

Сергей Никифоров, к. т. н. | sgnikiforov@arhlight.ru

# Система параметров светодиодов

## Электрические, фотометрические, спектральные (колориметрические) и энергетические характеристики

**Статья посвящена описанию и систематизации параметров и характеристик светодиодов. Предпринята попытка не только охватить список имеющихся величин, но и построить систему, основанную на их взаимозависимостях. Материал поясняет и трактует суть около 70 параметров, использующихся в спецификациях светодиодов, а также раскрывает их взаимосвязь. Содержание работы может быть использовано производителями, разработчиками и потребителями светодиодной продукции.**

Любая техническая характеристика какой-либо продукции должна содержать в наиболее удобном для восприятия потребителем виде информацию о ее функциональных возможностях и в то же время позволять провести сравнение с другими аналогами, чтобы пользователь мог не только составить необходимый технический портрет изделия, но и определить его положение среди подобных типов в свете предоставляемых технических данных. Однако, помимо удобства чтения и сравнения, система должна наиболее полно отражать истинные физические данные изделия, сформированные на основе тех функций, параметров и тех их взаимозависимостей, которые, с одной стороны, имеются у большинства светодиодов, а с другой стороны, для каждого их типа являются только частным случаем. В то же время система параметров светодиодов должна включать в себя преимущественно только такие сочетания характеристик и единиц, которые хорошо согласуются с системами параметров других групп, классов и видов изделий и позволяют использовать их для дальнейших расчетов режимов в составе устройств на их основе или выходных характеристик сложных комплексных конструкций [1, 2]. Так, например, на основе фотометрических характеристик источников света (светодиодов в данном случае) рассчитывается и формируется комплекс параметров осветительного прибора, определяется его оптическая система, а колориметрические характеристики ложатся в основу цветовых параметров будущего светильника. Поэтому очень важно иметь однозначное понимание параметров всех аналогов, которые могут быть использованы в этом светотехническом устройстве в качестве источника света. Электрические характеристики используются для расчетов вторичного источника питания и способа коммутации излучающих кристаллов или светодиодов в световом приборе.

Для представления характеристик светодиодов не существует единой утвержденной международной системы, по которой строились бы все спецификации, или Datasheets, с помощью которых производители описывают технические параметры своей продукции. Это касается не только светодиодов, но и кристаллов, на основе которых производятся эти светодиоды. Как правило, в основу подавляющего большинства спецификаций ложатся самые важные и показательные физические характеристики, приводимые в единицах системы СИ, однако большинство светотехнических и колориметрических единиц, полученных эмпирически или статистически, приняты МКО на основе субъективного анализа психофизических реакций респондентов и часто не несут в себе истинного физического смысла, хотя и указываются наряду с первыми (индекс цветопередачи, коррелированная цветовая температура, координаты цветности) [3]. К слову сказать, формально силу света и световой поток также можно отнести к виртуальным единицам, сформированным на основе статистической кривой видности  $V(L)$  относительно энергетического потока, являющегося самой «физической» из приведенных единиц. Этот факт является основной проблемой отсутствия единства в системах формирования спецификаций на светодиодную продукцию и порождает множество разногласий при их чтении и сравнении. В данной работе будет не только описана существующая система характеристик, но и предпринята попытка формирования наиболее рационального и информативного концепта, с точки зрения автора, отражающего максимальное количество характеристик и, что самое важное, их взаимозависимостей, которые могут учитывать также и факторы деградации параметров в зависимости от времени и различных режимов работы.

Все параметры современных спецификаций делятся на группы, отражающие физический смысл и природу их происхождения, а также

необходимость и удобство их использования потребителем при расчетах устройств, учитывающих или основанных на этих параметрах. В составе каждой группы существующей системы параметров светодиодов представленные ниже характеристики расположены вне зависимости от важности (необходимости использования) для потребителя, однако информативность и физический смысл их находится в некоторой логической последовательности, позволяющей проследить связь большинства параметров. Для характеристик в виде функций или зависимостей в качестве примера, часто только для одного типа кристаллов, приводится диаграмма, наглядно показывающая вид этой зависимости. Большинство терминов и обозначений параметров и характеристик согласовано с [4].

Для наглядности удобно рассматривать систему параметров, как это показано на рис. 1, в виде блок-схемы, где можно проследить как их взаимосвязь, так и положение той или иной группы относительно друг друга. Следует заметить, что предложенная система содержит в основном самые важные и ключевые характеристики, которые можно измерить, рассчитать или косвенно определить реальными измерениями.

### Группа электрических характеристик

#### Исходные величины

- Прямое напряжение  $U_f$  [В].

Определяется параметрами ширины запрещенной зоны  $E_g$  примененной гетероструктуры, материалом подложки, структурой омических контактов и характеристиками токоведущих нитей и их сварных соединений. Указывает прямое напряжение смещения светодиода при номинальном прямом токе  $I_f$ . Применяется, помимо определения потребляемой мощности светодиода, для расчета режимов оконечных каскадов или ключей вторичных источников питания, нагрузкой которых являются светодиоды, а также параметров самих источников питания, буферных, согласующих и стабилизирующих элементов.

- Прямой ток  $I_f$  [А].

Рабочий (номинальный) ток светодиода, при котором обеспечивается его работоспособность в течение указанного времени и с указанными

далее в спецификации параметрами.  $I_f$  достигается подачей на светодиод прямого напряжения  $U_f$ . Все характеристики светодиода измеряются при токе  $I_f$ . Он считается базовым параметром, относительно которого ведутся расчеты и измерения других электрических параметров, поэтому при любых подобных действиях он жестко зафиксирован и стабилизирован, его величина известна с высокой точностью во время каждого измерения остальных характеристик. Используется для расчетов потребляемой энергии, КПД, эффективности излучения, мощности источника питания светодиода (группы светодиодов).

- Плотность тока через  $p-n$ -переход  $\rho_{if}$  [А/см<sup>2</sup>].  
Указывает отношение прямого тока  $I_f$  к площади  $p-n$ -перехода. Служит для оценки режимов работы гетероструктуры и активной области перехода, деградационных характеристик. Параметр удобен для нормирования прямого тока без указания его непосредственного значения у конкретной группы приборов, с привязкой к площади излучающего кристалла.
- Обратное напряжение  $U_r$  [В].

Отрицательное напряжение, подаваемое на анод светодиода относительно его катода, при котором через светодиод протекает обратный ток  $I_r$ , значение которого не должно превышать указанную величину. Применяется для расчета характеристик цепей питания

светодиода, элементов фильтров и режимов коммутирующих элементов при динамическом управлении [5].

- Обратный ток  $I_r$  [А, мкА].  
Обусловлен наличием неоднородностей в материале области пространственного заряда, вызванного повышенной плотностью неосновных носителей заряда в прилегающих к  $p-n$ -переходу областях. Вызван экстракцией неосновных носителей заряда из указанных областей совпадающим по направлению внешним приложенным электрическим полем (в неравновесном состоянии) [6]. Может служить косвенным показателем качества эпитаксиальной гетероструктуры на предмет наличия примесей или дислокаций, а также уровня выполнения производственных операций по утонению — разделению пластин, нанесению омических контактов, посадке кристалла и приварке контактных проводников. Указывает значение тока через светодиод при приложении  $U_r$  [В].
- Электрическая емкость светодиода  $C_f$  [Ф, пкФ].  
Определяется свойствами материала кристалла, геометрией омических контактов и токоведущих частей конструкции светодиода. Применяется для расчетов импульсных режимов работы, переходных характеристик участков цепей, содержащих светодиод, и т. д.
- Индуктивность  $L_f$  [Гн, мкГн].

Обусловлена геометрией омических контактов, кристалла и токоведущих частей конструкции светодиода. Вместе с емкостью  $C_f$  образует реактивную часть комплексного сопротивления светодиода, выраженную характеристическим сопротивлением, и учитывается при расчетах временных характеристик импульсов и их фронтов при динамическом управлении, а также соответствующих согласующих цепей оконечных каскадов или ключей с нагрузкой, которой являются светодиоды.

- Максимальный импульсный ток  $I_{max}(\tau)$  [А].  
Максимальное значение тока  $I_f$ , независимо от времени действия ( $\tau$ ) которого на приборе выделяется максимальная мгновенная мощность  $P_{dis\ max}(\tau)$ , способная быть рассеянной конструкцией прибора без появления необратимых изменений.
- Время нарастания и спада (фронт) импульса тока  $\tau_f$  и  $\tau_b$  (с, нс).

Интервал времени, в течение которого ток через светодиод изменяется от 0,1 до 0,9 значения. Применяется при использовании светодиодов в устройствах отображения информации с импульсным управлением, а также в приборах для систем приема/передачи информации (инфракрасные порты, считывающие и передающие оптические устройства, оптроны). Благодаря большому значению ширины запрещенной зоны области пространственного заряда излу-

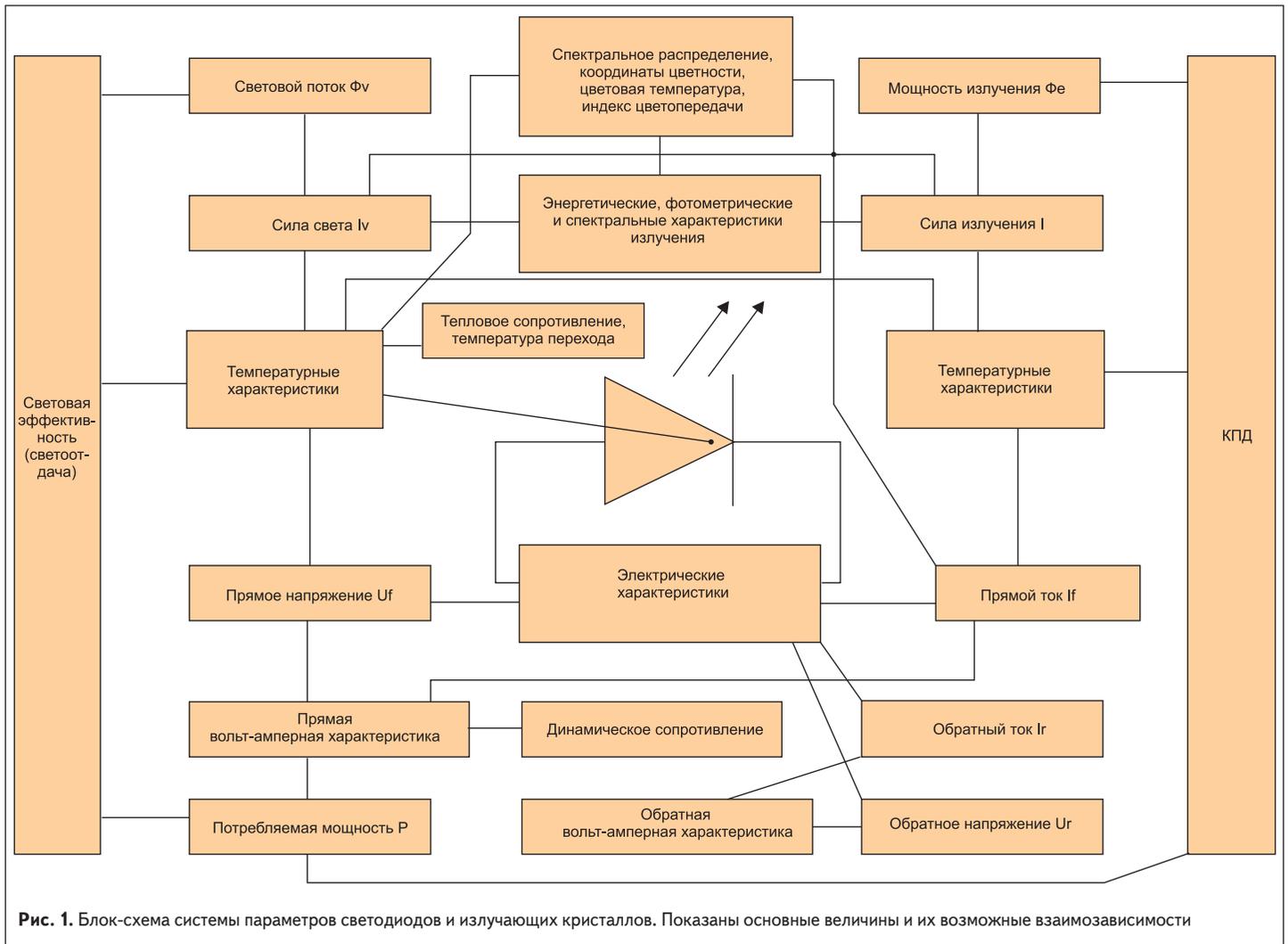


Рис. 1. Блок-схема системы параметров светодиодов и излучающих кристаллов. Показаны основные величины и их возможные взаимозависимости

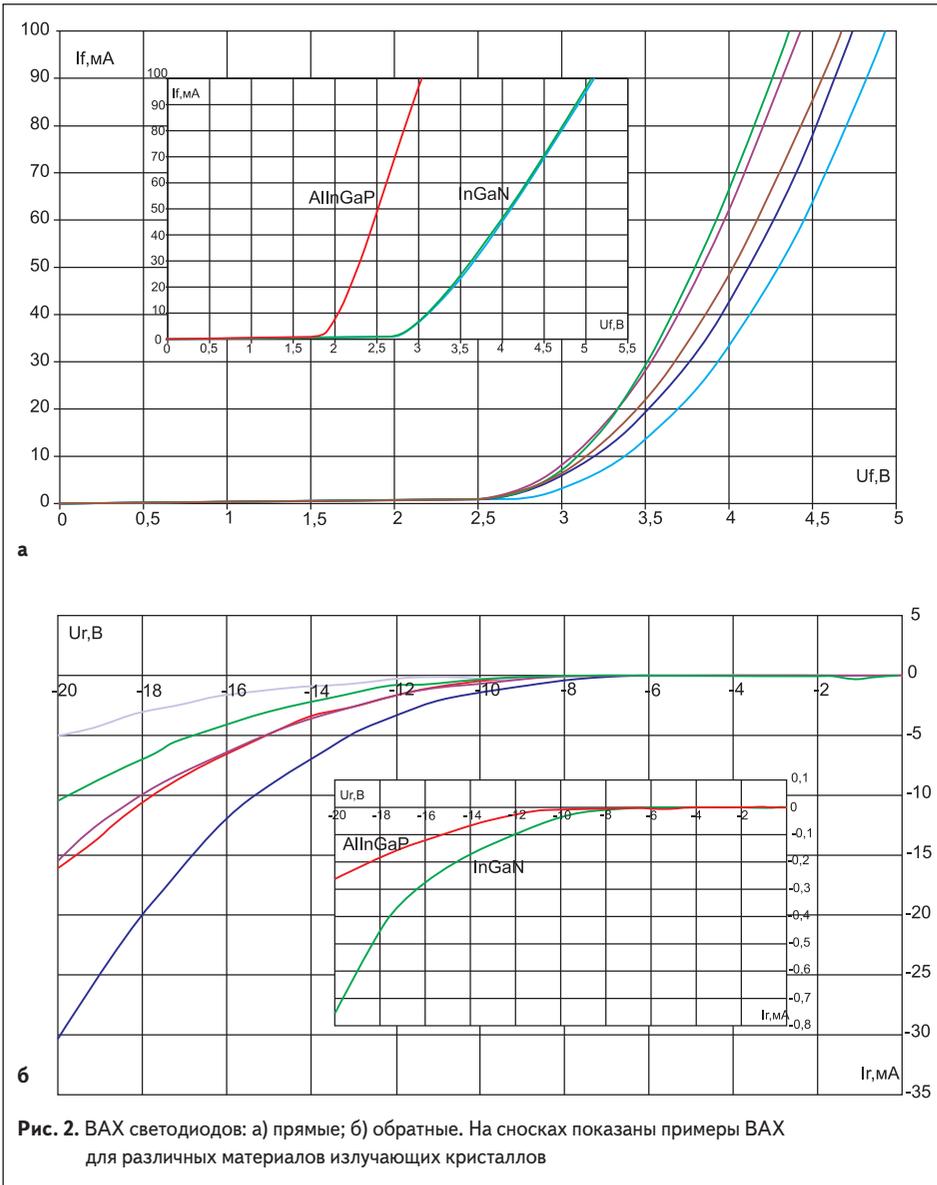


Рис. 2. ВАХ светодиодов: а) прямые; б) обратные. На сносках показаны примеры ВАХ для различных материалов излучающих кристаллов

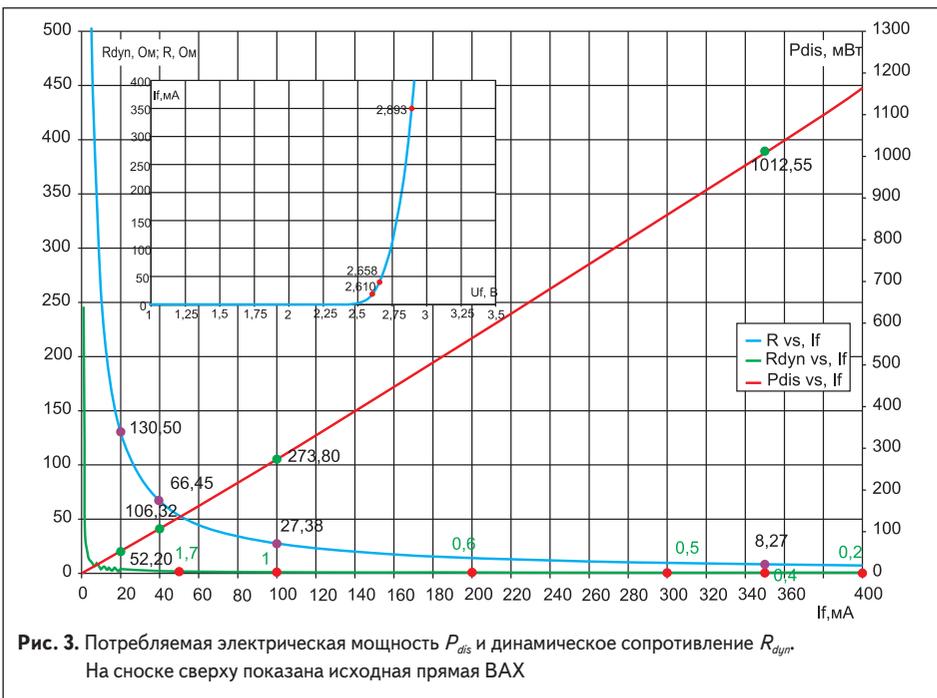


Рис. 3. Потребляемая электрическая мощность  $P_{dis}$  и динамическое сопротивление  $R_{dyn}$ . На сноске сверху показана исходная прямая ВАХ

чающих кристаллов (в особенности у твердых растворов нитрида галлия, синих и фиолетовых цветов свечения), светодиоды способны формировать оптические импульсы с фронтами длительностью до единиц наносекунд, соответственно работать при частоте питающего тока вплоть до 500–800 МГц [6].

**Производные величины**

- Прямая вольт-амперная характеристика  $I_f(U_f)$  (рис. 2а).

Показывает динамику изменения прямого тока при изменении приложенного напряжения в прямом смещении светодиода. Применяется для расчета динамических характеристик устройств управления и питания светодиодов, а в совокупности с  $P(T_a)$  или  $P(I_f)$  (подробно эти параметры описаны в разделе «Группа фотометрических и энергетических характеристик излучения. Производные величины») — для расчетов светотехнических характеристик при изменении указанных электрических параметров. Крутизна ВАХ характеризует динамические характеристики светодиода.

- Обратная вольт-амперная характеристика  $I_r(U_r)$  (рис. 2б).

Показывает изменение обратного тока в зависимости от приложенного обратного напряжения. Как и параметр  $I_f$  (обратный ток), может косвенно определять качественные показатели структуры и светодиода.

- Динамическое сопротивление  $R_{dyn}$  [Ом] (рис. 3).

Показывает отношение приращения прямого тока к приращению изменения прямого напряжения. Используется при расчетах нагрузочных характеристик буферных каскадов, ключевые элементы которых управляют режимом работы светодиода.

- Потребляемая электрическая мощность  $P_{dis}$  [Вт] (рис. 3).

Показывает потребляемую электрическую мощность при заданном прямом токе (заданной плотности тока) через светодиод ( $p-n$ -переход). Применяется для расчетов источников питания для светодиодов или устройств на их основе, расчетов КПД, эффективности излучения и др.

- Температурная зависимость прямого тока  $I_f(T_a)$  (рис. 4).

Зависимость значения прямого тока от температуры окружающей среды при неизменном прямом напряжении [8].

- Температурная зависимость прямого напряжения  $U_f(T_a)$  (рис. 4).

Зависимость значения прямого напряжения от температуры при неизменном прямом токе [15].

- Зависимость прямого напряжения от времени наработки  $U_f(t)$  (рис. 5).

Применяется для коррекции электрических режимов светодиода или окончных устройств управления им со временем наработки.

- Вольт-фарадная характеристика  $C_f(U_f)$  (рис. 6).

Зависимость емкости структуры излучающего кристалла, обусловленной наличием объемного заряда в приповерхностной области полупроводника, от приложенного к ней

напряжения. Используется для определения качества гетероструктуры.

### Группа фотометрических и энергетических характеристик излучения

#### Исходные величины

- Энергетическая сила света (сила излучения)  $I$  [Вт/ср].

Характеризует излучение источника в некотором направлении. Равна отношению потока излучения, распространяющегося от источника внутри элементарного телесного угла, содержащего рассматриваемое направление, к этому элементарному телесному углу. Понятие энергетической силы излучения применимо при расстояниях от источника, намного превышающих его размеры, и при выполнении закона «обратных квадратов».

- Сила света  $I_v$  [кд].

Одна из основных световых величин, характеризующая интенсивность источника видимого излучения (света). Сила света в общем случае различна для различных направлений от источника и равна отношению светового потока  $d\Phi_v$ , распространяющегося от источника внутри элементарного телесного угла  $d\Omega$ , который содержит данное направление, к этому телесному углу (1). Условие расстояния так же справедливо, как и в предыдущем пункте.

$$I_v = d\Phi_v / d\Omega. \quad (1)$$

- Осевая сила света  $I_{vmax}$  [кд].

Показывает величину светового потока источника, заключенного в элементарном телесном угле и распространяющегося в направлении оптической или физической оси источника излучения [7].

- Максимальная сила света  $I_{vmax}$  [кд].

Показывает максимальную величину силы света источника в любой точке поверхности фотометрического тела (рис. 76) [7].

#### Производные величины

- Световой поток  $\Phi_v$  [лм].

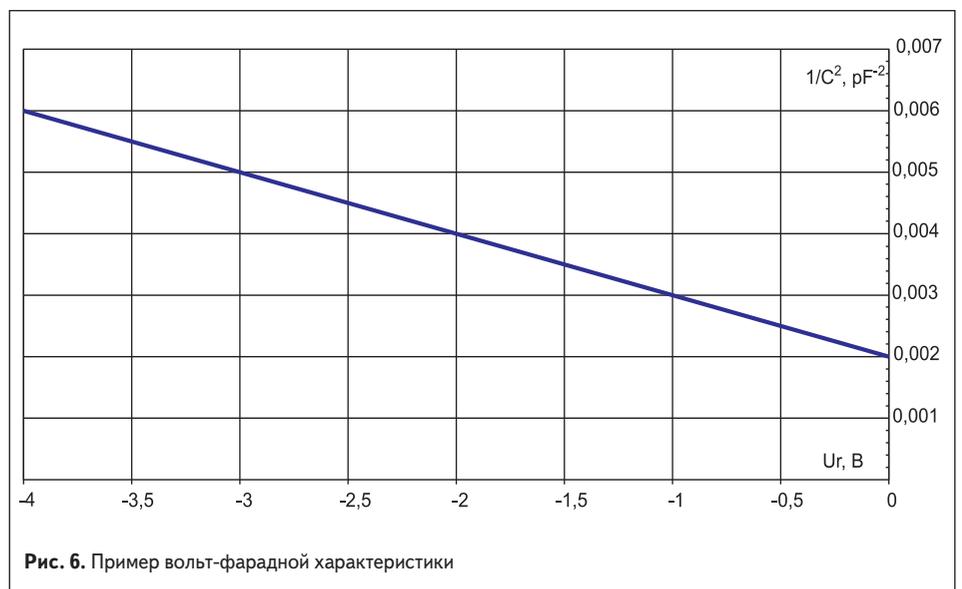
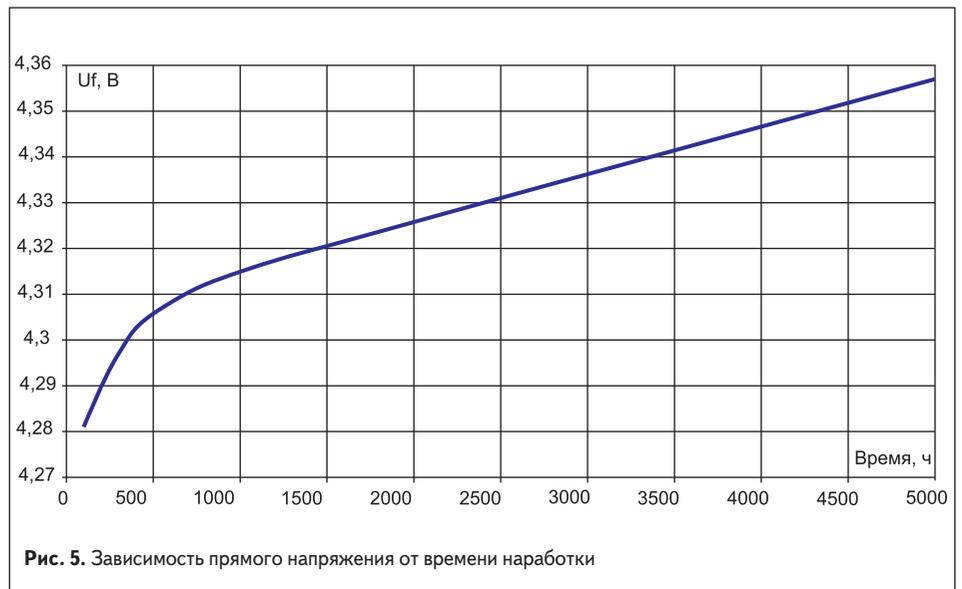
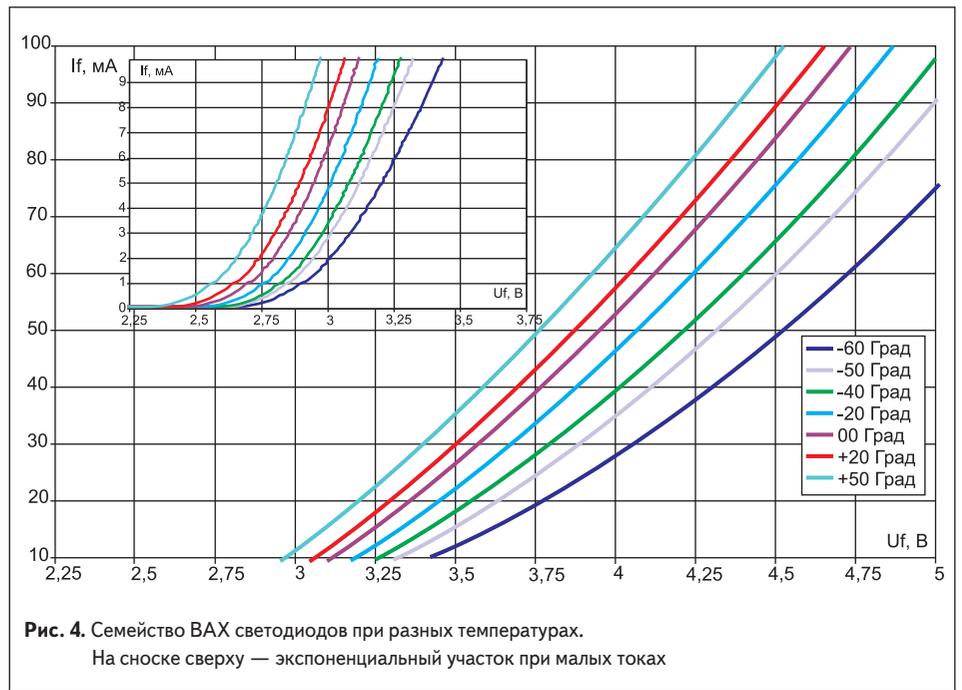
Является основной единицей, определяющей энергию излучения в видимом диапазоне [7]. Показывает мощность излучения, оцениваемую по производимому зрительному ощущению или действию на селективный приемник с характеристикой спектральной чувствительности в виде кривой видности  $V(\lambda)$  «стандартного наблюдателя» МКО и пропорциональную потоку излучения с учетом относительной спектральной световой эффективности (2).

$$\Phi_v = K_m \int_{360}^{830} \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \times V(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где  $d\Phi_e(\lambda)/d\lambda$  — спектральное распределение энергетического потока;  $V(\lambda)$  — относительная спектральная световая эффективность.

- Мощность излучения (энергетический поток оптического излучения  $\Phi_e$ )  $P$  [Вт].

Полная энергия, переносимая оптическим излучением в единицу времени через данную



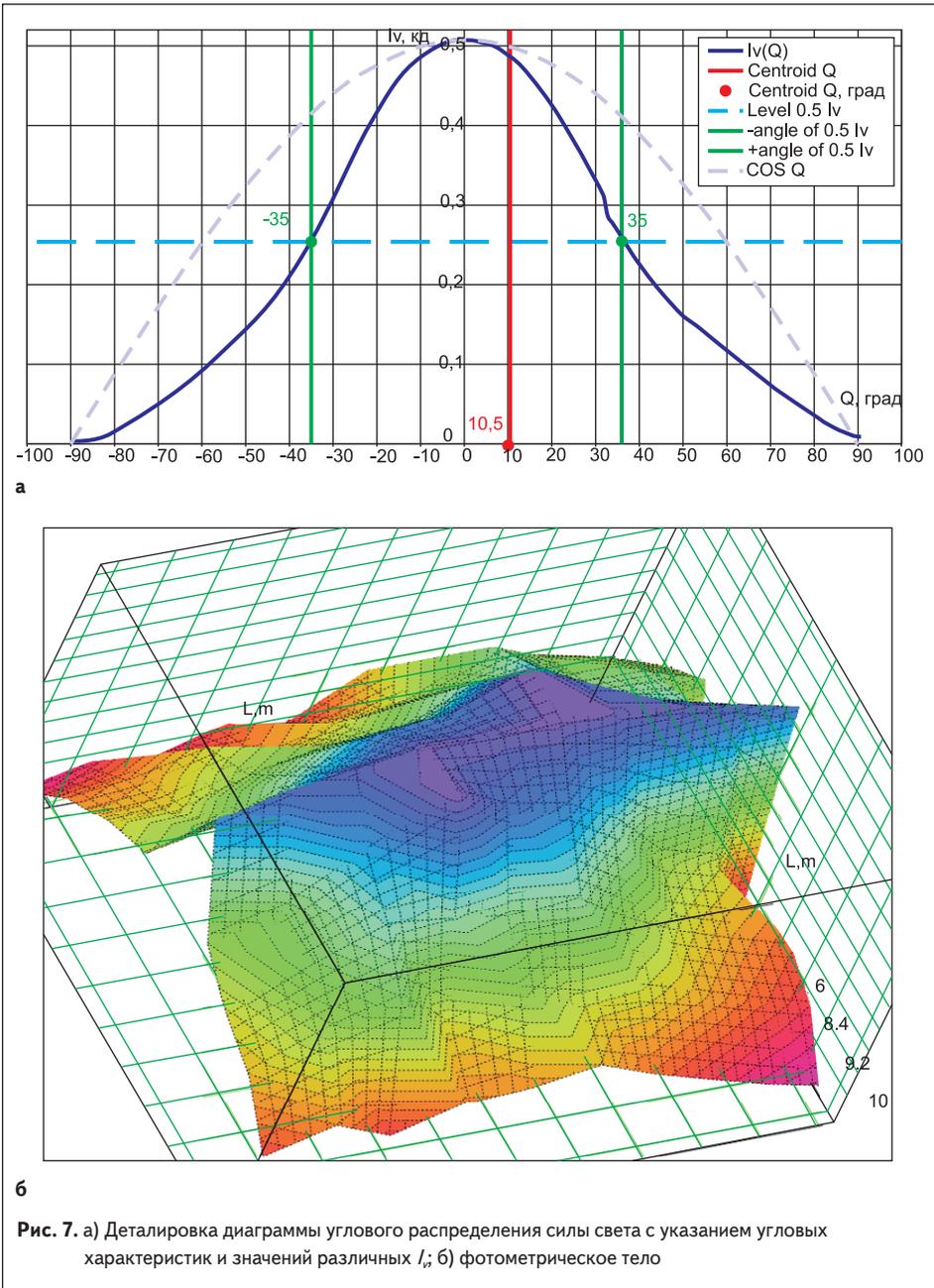


Рис. 7. а) Детализовка диаграммы углового распределения силы света с указанием угловых характеристик и значений различных  $I_v$ ; б) фотометрическое тело

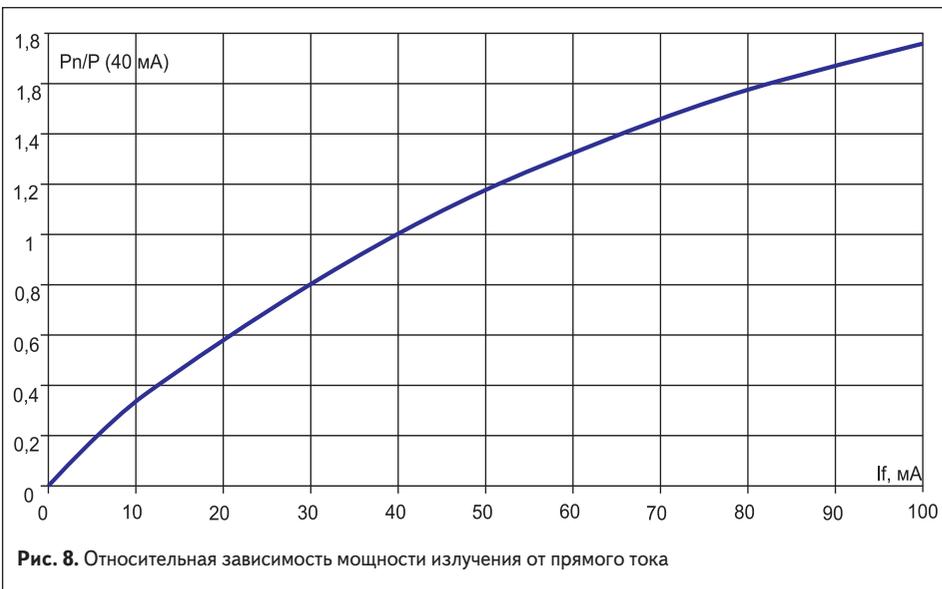


Рис. 8. Относительная зависимость мощности излучения от прямого тока

поверхность. Характеризует энергию излучения любого источника, излучающего в оптическом диапазоне длин волн. Частным случаем мощности излучения является световой поток  $\Phi_v$ . Используется для расчетов параметров (КПД, эффективности, энергетической яркости и освещенности) источников, спектральное распределение излучения которых выходит за пределы видимого диапазона. Из-за существенной близости большей части составляющих спектра к границе кривой видности излучение синих (фиолетовых) или красных (малиновых) светодиодов в спецификации характеризуется именно значением мощности излучения.

- Температурная зависимость мощности излучения  $P(T_a)$ .

Показывает зависимость мощности излучения светодиода или устройства на его основе от температуры окружающей среды. Может преобразовываться в температурный коэффициент мощности излучения.

- Зависимость мощности излучения от прямого тока  $P(I_f)$  (рис. 8).
- КПД светодиода  $\eta$  [%].

Выражает отношение потребляемой светодиодом электрической мощности к мощности излучения. Характеризует коэффициент преобразования электрической энергии в световую. Применяется в расчетах эффективности световых приборов и осветительных установок на основе светодиодов, а также при определении общего КПД этих устройств с учетом КПД вторичных источников питания.

- Плотность мощности излучения  $P_\Omega$  [Вт/ср].

Показывает распределение долей интегральной мощности излучения в объеме диаграммы пространственного распределения энергетической силы света, заключенных в соответствующих телесных углах, отнесенных к значениям этих углов.

- Угловое распределение силы излучения  $I(\Omega)$ .

Показывает зависимость значения энергетической силы света от угла излучения относительно физической или оптической оси в одной из плоскостей (сечений) фотометрического тела. Характеризует направление излучения и его интенсивность в этом направлении в указанных плоскостях (сечениях).

- Освещенность  $E_v$  [лк].

Отношение светового потока источника  $d\Phi_v$ , падающего на элемент поверхности, к площади  $dA$  этого элемента.

$$E_v = d\Phi_v / dA. \quad (3)$$

- Яркость  $L_v$  [кд/м<sup>2</sup>].

Отношение силы света источника излучения к площади его излучающей поверхности (4).

$$L_v = d\Phi_v / (dA \times \cos\theta \times d\Omega), \quad (4)$$

где  $d\Phi_v$  — световой поток, проходящий через элементарную площадь и распространяющийся в телесном угле  $d\Omega$ , содержащем данное направление;  $d\Omega$  — телесный угол;  $dA$  — элементарная площадь поверхности;  $\theta$  — угол между нормалью к данному сечению и направлением излучения.

- Угол излучения по уровню осевой силы света  $0,1I_{\text{max}} \ 2 \ \Omega_{0,1I}$  [град.].

Определяется как разница проекций силы света правого и левого спадов характеристики углового распределения силы света с указанным уровнем амплитуды ( $0,1I_v$ ) на ось углов. Характеризует относительную величину угла пространственного распределения излучения в одной плоскости.

- Угол излучения по уровню осевой силы света  $0,5I_{\text{max}} \ 2 \ \Omega_{0,5I}$  [град.].

Определяется как разница проекций силы света правого и левого спадов характеристики углового распределения силы света с указанным уровнем амплитуды ( $0,5 I_v$ ) на ось углов.

Характеризует относительную величину угла пространственного распределения излучения в одной плоскости.

- Угловое распределение силы света  $I_v(\Omega)$ .

Показывает зависимость значения силы света от угла излучения относительно физической или оптической оси в одной из плоскостей (сечений) фотометрического тела. Характеризует направление излучения и его интенсивность в этом направлении в указанных плоскостях (сечениях).

- Люмен-амперная характеристика  $\Phi_v(I_f)$ .

Показывает зависимость значения светового потока от изменения прямого тока. Ввиду возможного перераспределения относительной

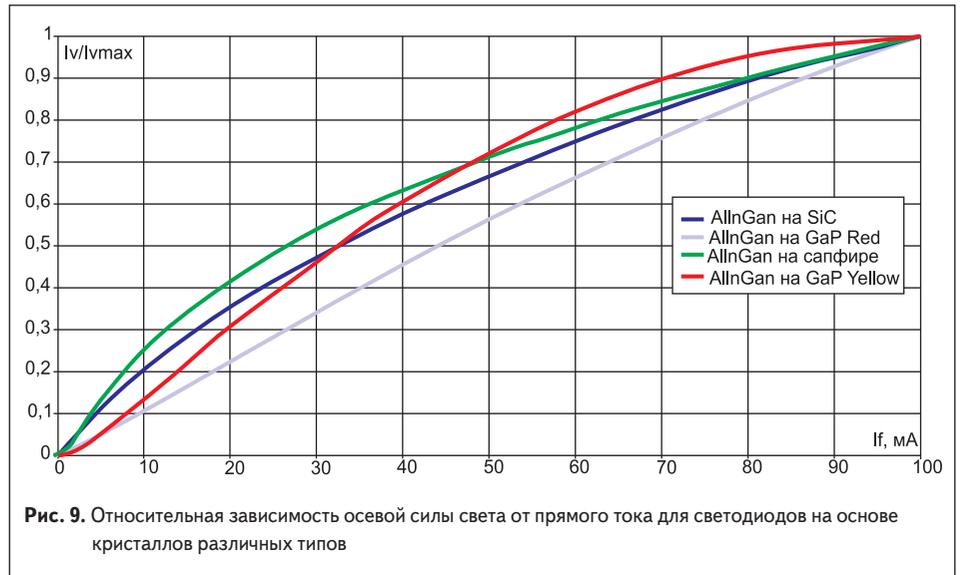


Рис. 9. Относительная зависимость осевой силы света от прямого тока для светодиодов на основе кристаллов различных типов

плотности потока по диаграмме пространственного распределения силы света при изменении прямого тока через *p-n*-переход характеристика может не являться частным случаем зависимости, описанной в следующем пункте.

- Зависимость силы света от прямого тока  $I_v(I_f)$  (рис. 9).

Показывает зависимость силы света от изменения прямого тока в одной (любой) точке диаграммы пространственного распределения. Частным и наиболее часто встречающимся видом этой характеристики является зависимость осевой силы света от прямого тока  $I_{\text{max}}(I_f)$ .

- Температурная зависимость светового потока ( $T_n$ ) (рис. 10).

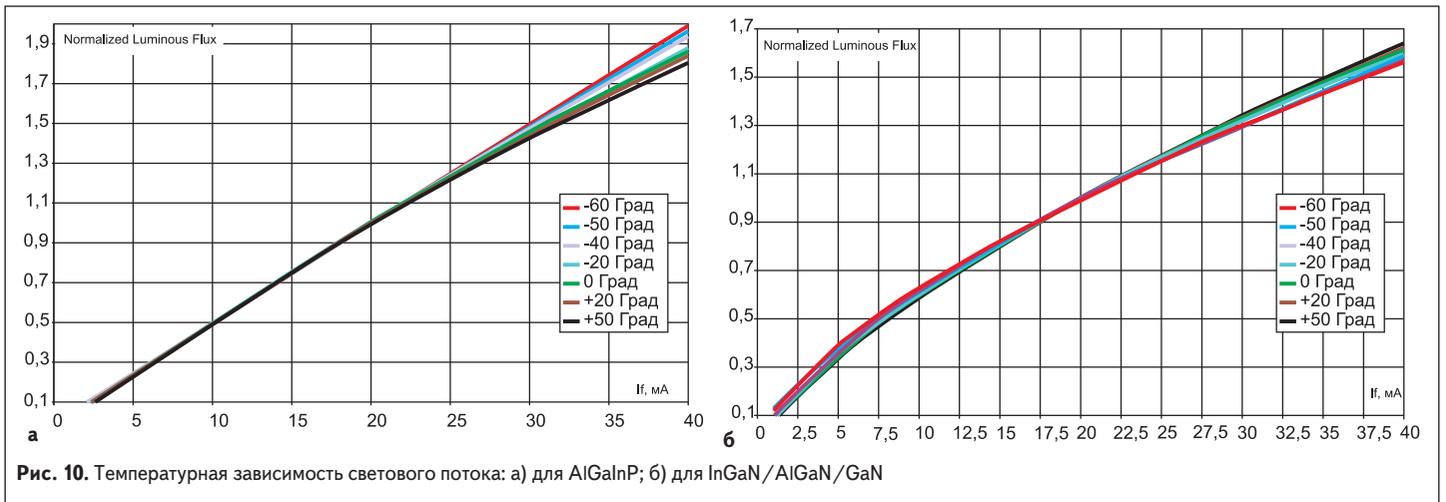


Рис. 10. Температурная зависимость светового потока: а) для AlGaInP; б) для InGaN/AlGaIn/GaN

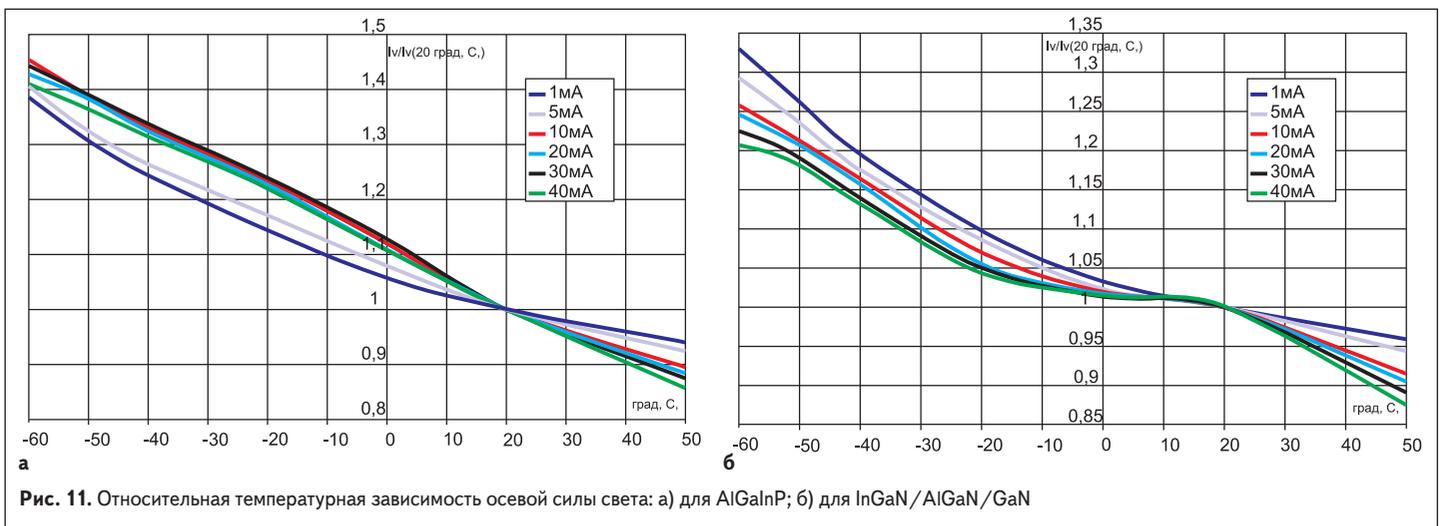
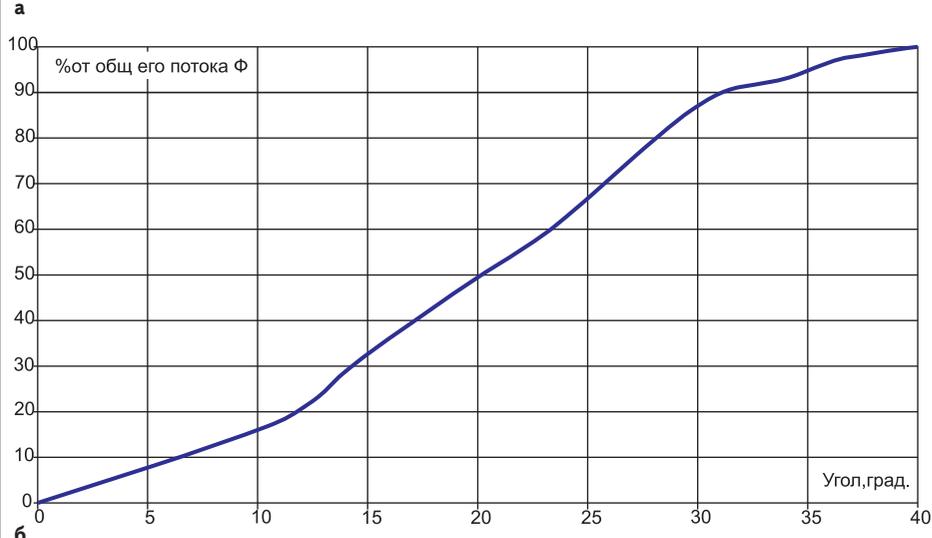
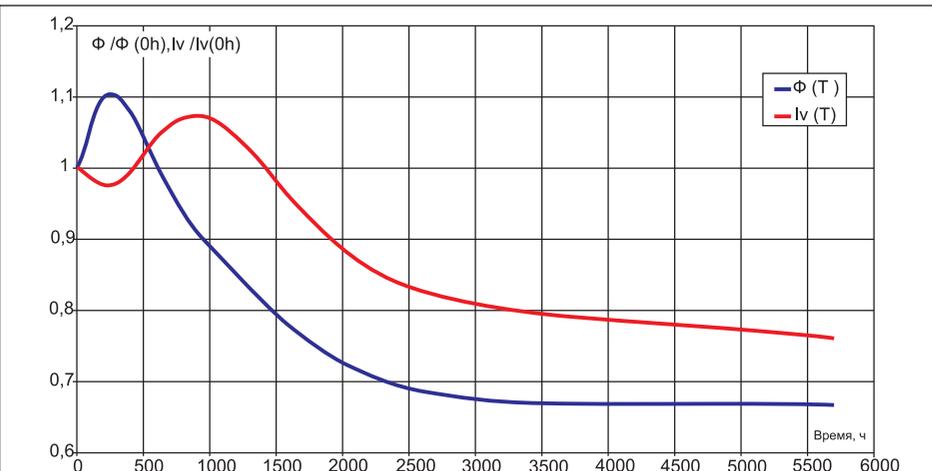


Рис. 11. Относительная температурная зависимость осевой силы света: а) для AlGaInP; б) для InGaN/AlGaIn/GaN

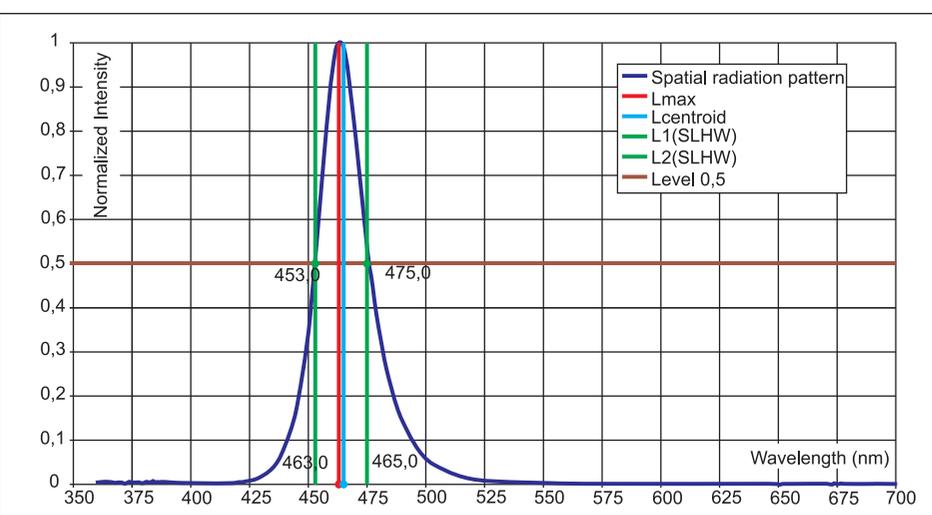
Уровень силы света (Iv/Ivmax)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Световой поток, лм	0,912	0,867	0,775	0,655	0,543	0,441	0,366	0,278	0,201	0,111	
По отношению к общему потоку, %	100,00	95,13	85,04	71,80	59,57	48,37	40,10	30,52	22,09	12,19	
Угол по уровню силы света, град.	171,65	146,25	121,78	100,67	84,41	71,89	62,81	53,45	43,51	31,43	
Сила света, cd	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,41	0,46	0,51



**Рис. 12.** Распределение светового потока по углу излучения



**Рис. 13.** Относительная деградационная характеристика светового потока и осевой силы света. Несовпадение графиков объясняется не только изменением, но и перераспределением светового потока по фотометрическому телу в процессе наработки



**Рис. 14.** Детализовка спектра излучения монохромного светодиода

Показывает изменение светового потока светодиода в зависимости от температуры окружающей среды при неизменных электрических характеристиках [8].

- Температурная зависимость осевой силы света  $I_v(T_a)$  (рис. 11).

Показывает изменение осевой силы света светодиода от температуры окружающей среды при неизменных электрических характеристиках [8]. Применяется для коррекции расчетов освещенности при использовании светодиодов в различных температурных условиях.

- Распределение светового потока по углу излучения  $\Phi(\Omega)$  (рис. 12).

Показывает часть светового потока, его значение или долю, заключенную в заданном телесном угле диаграммы пространственного распределения излучения, относительно интегрального потока светодиода.

- Плотность светового потока  $\Phi_{v,\Omega}$  [лм/ср].

Показывает распределение долей интегрального светового потока в объеме диаграммы пространственного распределения силы света, заключенных в соответствующих телесных углах, отнесенных к значениям этих углов.

- Световая эффективность (световая отдача) [4]  $\eta$  [лм/Вт].

Отношение светового потока источника к потребленной электрической мощности (5).

$$\eta = \Phi_v / P_{dis} \quad (5)$$

где  $\Phi_v$  — световой поток;  $P_{dis}$  — потребляемая мощность.

- Среднее время наработки до изменения светового потока на  $n\%$   $t$  [ч].

Время, при котором световые параметры составляют  $n\%$  измеренных начальных значений, в функции от  $t$ . В спецификации должно быть дано указание, если для достижения этих значений необходимо принудительное охлаждение.

- Деградационная характеристика светового потока  $\Phi(t)$  (рис. 13).

Зависимость, показывающая изменение значения светового потока со временем наработки при паспортных (рекомендованных производителем) условиях эксплуатации.

- Деградационная характеристика силы света  $I_v(t)$  (рис. 13).

Зависимость, показывающая изменение значения силы света (в определенном направлении, например в осевом) со временем наработки при паспортных (рекомендованных производителем) условиях эксплуатации. Ввиду возможного перераспределения относительной плотности потока по диаграмме пространственного распределения силы света в процессе наработки характеристика может не являться частным случаем зависимости, описанной в предыдущем пункте, и иметь иную форму, тренд или градиент.

- Время нарастания и спада импульса излучения  $\tau_{fr}$  и  $\tau_{br}$  (нс).

Интервал времени, в течение которого световой поток  $\Phi$ , светодиода изменяется от 0,1 до 0,9 значения [7].

## Группа спектральных и колориметрических характеристик излучения

### Исходные величины

- Спектральное распределение мощности излучения (относительное спектральное распределение мощности излучения)  $\Phi_e(\lambda)$  (рис. 14).

Зависимость мощности излучения от длины волны. Может представлять собой сплошную линию (лампы накаливания, тепловые источники, светодиоды белого цвета свечения) или иметь отдельные узкополосные пики (люминесцентные, металлогалогенные, натриевые, ксеноновые лампы) и, соответственно, квалифицироваться как сплошной, полосатый, линейчатый спектр (рис. 15). Спектральное распределение является основной совокупностью данных для расчетов всех колориметрических величин или параметров спектра излучения, поэтому считается одной из самых «физических» характеристик излучения. На исследовании спектральных зависимостей основано изучение качественных показателей полупроводниковых излучающих кристаллов, деградационных характеристик, тепловых свойств эпитаксиальных структур и пр. Следует добавить, что спектральный метод исследования является наиболее точным и показательным относительно других.

### Производные величины

- Спектральная световая эффективность  $K(\lambda)$  [лм/Вт].

Показывает отношение «весовой» доли исследуемого диапазона спектра (светового потока), присутствующего в излучении, относительно всей «массы» потока излучения. Отражает значение светового потока, соответствующего определенной мощности излучения на фиксированной длине волны или в диапазоне длин волн, находящихся в пределах видимого диапазона. Максимальное значение — 683 лм/Вт. Частный случай может быть рассчитан по формуле (6):

$$K = 683 \times \frac{\int_{360}^{830} E(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{360}^{830} E(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

где  $E(\lambda)$  — относительное спектральное распределение плотности энергетической яркости исследуемого источника (ОСПЭЯ);  $V(\lambda)$  — кривая видности глаза.

В спецификациях указывается наряду с индексом цветопередачи. Зависимость  $K(\lambda)$  от прямого тока показана на рис. 16 [7].

- Ширина спектрального распределения по уровню 0,5  $\Delta\lambda_{0,5}$  [нм].
- Ширина спектрального распределения по уровню 0,1  $\Delta\lambda_{0,1}$  [нм].

Величины 0,5  $\Delta\lambda_{0,5}$  и 0,1  $\Delta\lambda_{0,1}$  получают как разницу длин волн правого и левого спадов (спектральных линий) спектрального распределения мощности излучения с соответ-

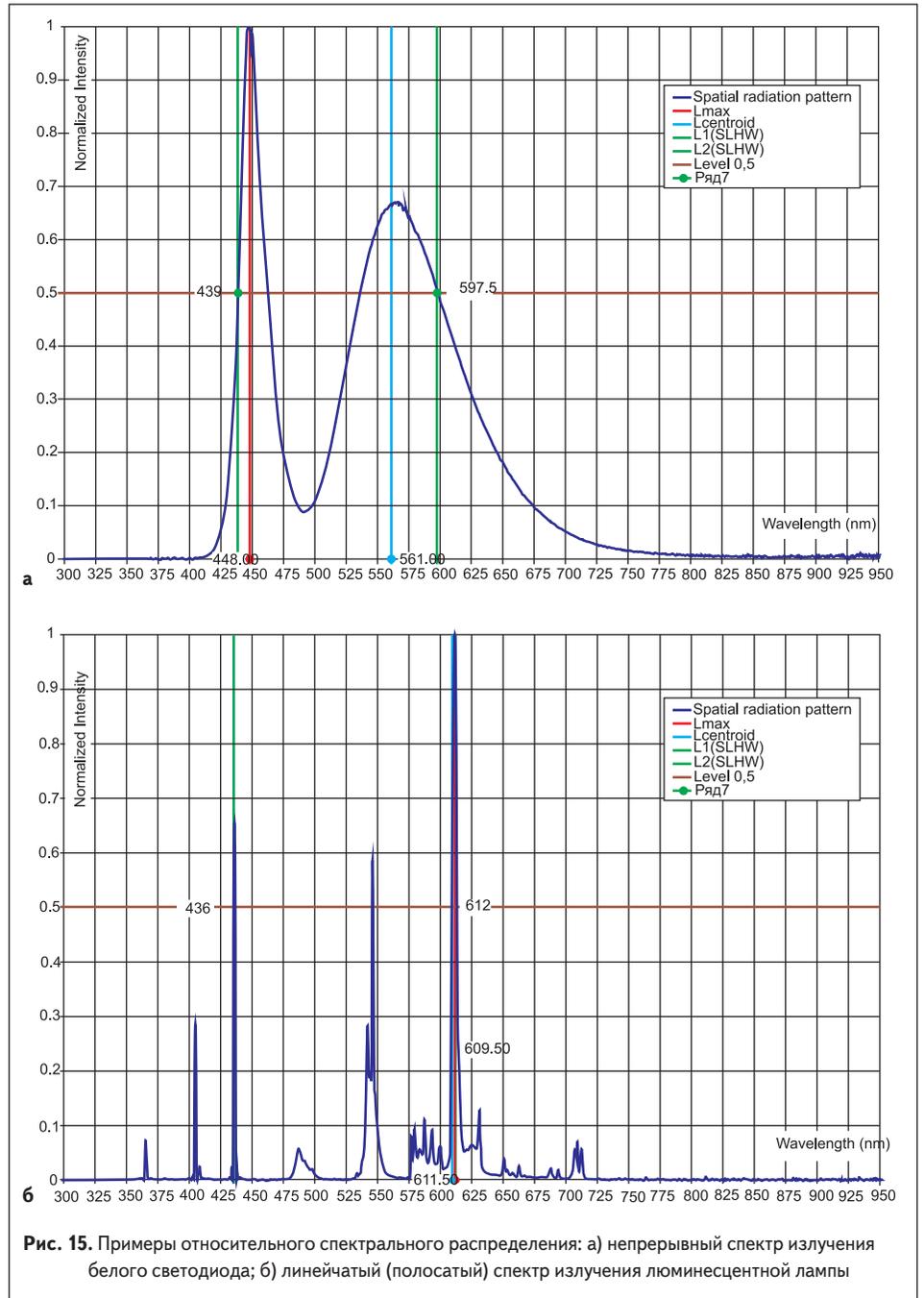


Рис. 15. Примеры относительного спектрального распределения: а) непрерывный спектр излучения белого светодиода; б) линейчатый (полосатый) спектр излучения люминесцентной лампы

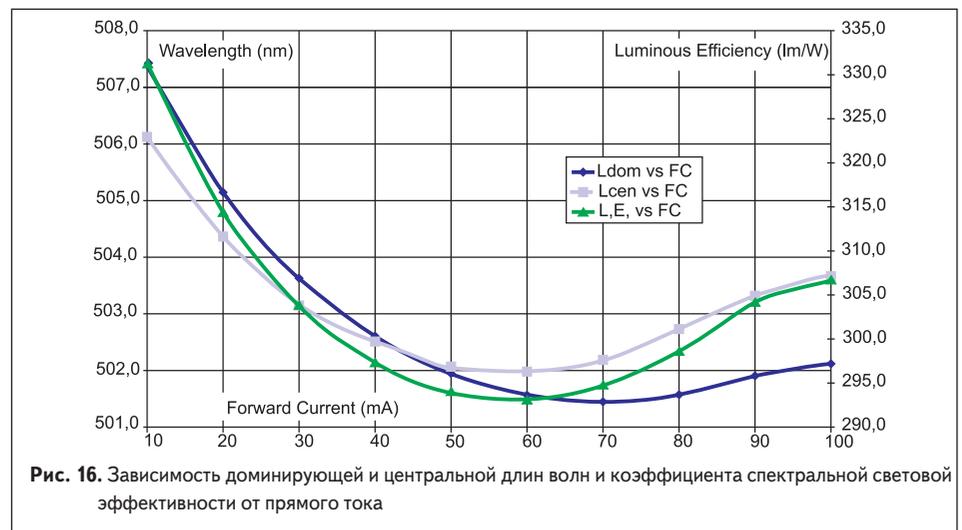


Рис. 16. Зависимость доминирующей и центральной длин волн и коэффициента спектральной световой эффективности от прямого тока

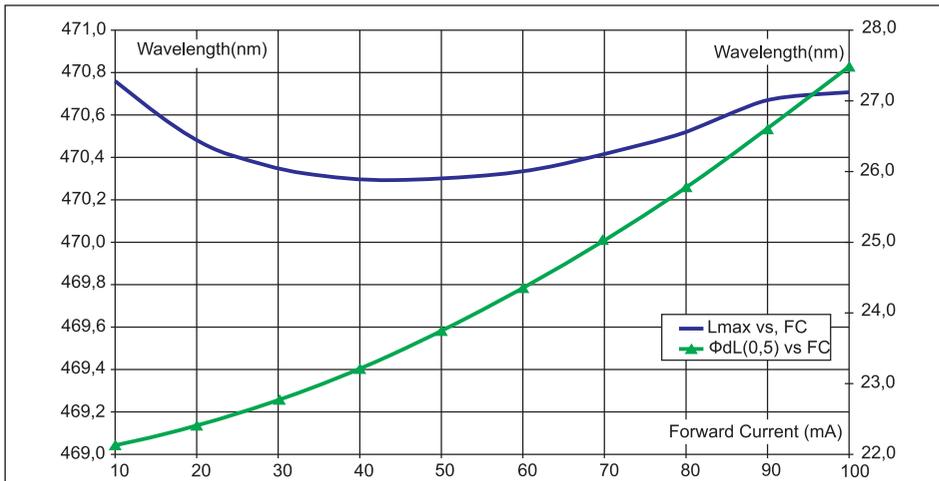


Рис. 17. Зависимость максимальной длины волны и полуширины спектрального распределения от прямого тока

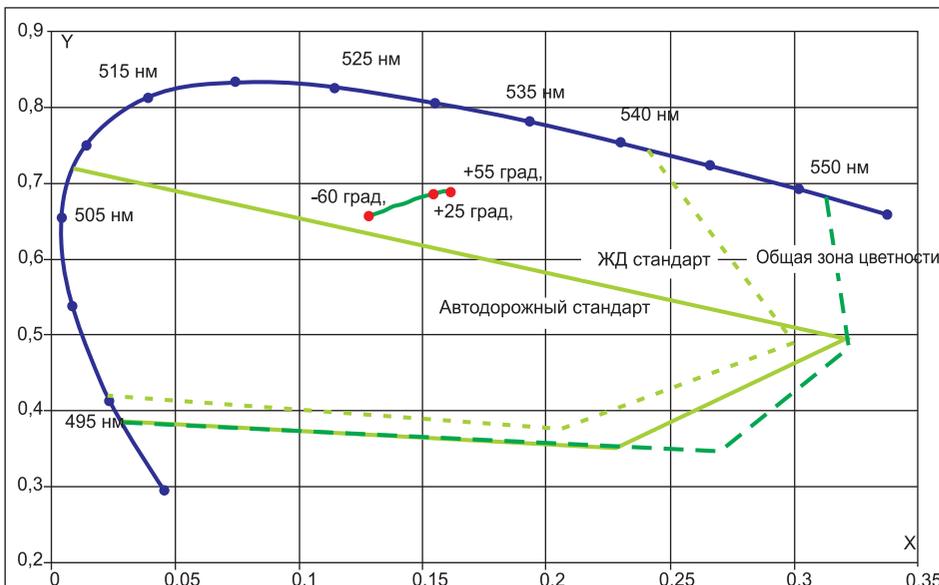


Рис. 18. Температурная зависимость координат цветности. Указаны границы зон цветности

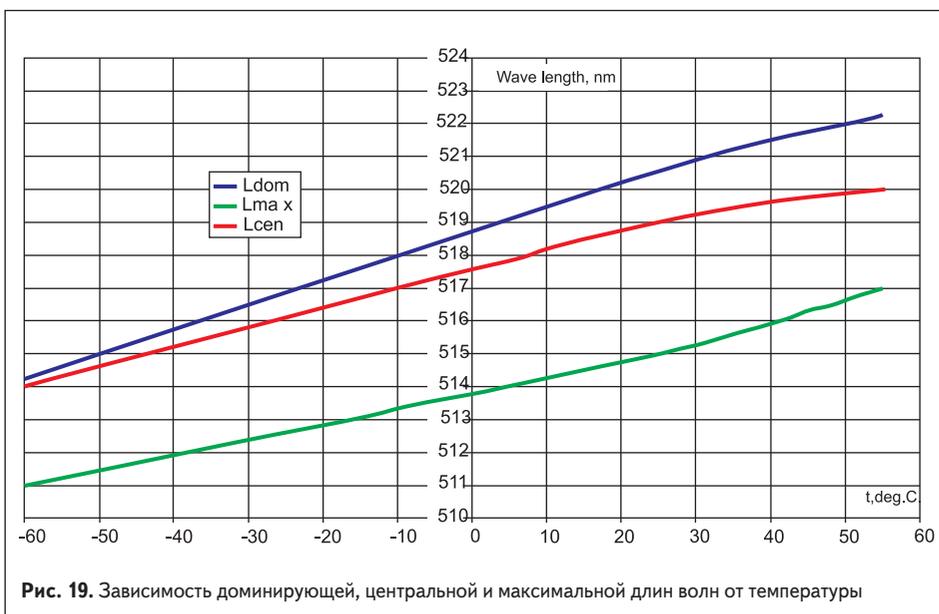


Рис. 19. Зависимость доминирующей, центральной и максимальной длин волн от температуры

ствующим значением доли от максимального значения.

- Максимальная (пиковая) длина волны  $\lambda_{max}$  [нм].  
Показывает максимальную составляющую спектра, по которой можно определить положение пика функции спектрального распределения на шкале длин волн. Другими словами, длина волны в максимуме спектрального распределения (рис. 17).

- Центральная (центроидная) длина волны  $\lambda_{cen}$  [нм].

Является «центром масс» интеграла функции  $\Phi_e(\lambda)$ , может дать понятие о симметрии функции спектрального распределения в соответствии с тем, насколько она отличается от  $\lambda_{max}$ . В идеальном случае  $\lambda_{max}$  и  $\lambda_{cen}$  совпадут.

- Доминирующая длина волны  $\lambda_{dom}$  [нм].

Длина волны монохроматического излучения, которое при сложении в определенных пропорциях с заданным ахроматическим излучением дает цветовое равенство с рассматриваемым излучением.

Чтобы характеризовать светодиоды, базовым ахроматическим излучением должен быть стандартный равноэнергетический источник E с координатами цветности  $xE = 0,33333$ ,  $yE = 0,33333$ , либо D65 [3] с координатами цветности  $xD = 0,31271$ ,  $yD = 0,32900$ .

Значение доминирующей длины волны  $\lambda_{dom}$  откладывается на линии чистых цветов равноконтрастного цветового графика МКО и пересечении ее прямой, проходящей через точки, образованные координатами цветности искомого источника и ахроматического источника. При значительном удалении источника от линии чистых цветов понятие доминирующей длины волны теряет смысл и совершенно его не имеет для источников белого цвета.

- Координаты цветности X, Y, Z.

Отношение каждой из трех координат цвета к их сумме. Являются важной и основной колориметрической характеристикой излучения. Служат для расчетов других колориметрических величин и применяются для описания цветовых характеристик светодиодов в спецификации, где фигурируют границы сортировки (биновки) или есть необходимость однозначного указания цветности (например, для монохромных светодиодов).

- Температурная зависимость доминирующей длины волны  $\lambda_{dom}(T_a)$ .

Изменение доминирующей длины волны при фиксированном прямом токе светодиода в зависимости от окружающей температуры (рис. 19).

- Температурная зависимость координат цветности X, Y, Z( $T_a$ ).

Изменение координат цветности при фиксированном прямом токе светодиода в зависимости от окружающей температуры (рис. 18).

- Зависимость доминирующей волны от угла излучения  $\lambda_{dom}(\Omega)$ .

Отражает изменение доминирующей длины волны от угла излучения светодиода. Справедлива для монохромных светодиодов (рис. 21).

- Зависимость координат цветности от угла излучения X, Y, Z( $\Omega$ ). (рис. 20б).

Отражает изменение координат цветности от угла излучения светодиода. Зависимость

справедлива для любых светодиодов. В основном, характеризует равномерность цветности белых светодиодов на основе синего кристалла и люминофора. Косвенно может отражать качество нанесения люминофорного покрытия на кристалл или работу вторичной оптики в такой системе.

- Зависимость координат цветности от времени наработки  $X, Y, Z(t)$  (рис. 20а).

Показывает изменение цветности светодиода, выраженное в изменении координат цветности в процессе эксплуатации.

- Зависимость полуширины спектрального распределения излучения от прямого тока  $\Phi_c \Delta \lambda_{0,5}(I_f)$  (рис. 17).
- Зависимость максимальной длины волны от прямого тока  $\lambda_{max}(I_f)$  (рис. 17).
- Зависимость доминирующей длины волны от прямого тока  $\lambda_{dom}(I_f)$  (рис. 16).
- Зависимость центральной длины волны от прямого тока  $\lambda_{cen}(I_f)$  (рис. 16).
- Индекс цветопередачи  $R_a$ .

Мера соответствия зрительных восприятий цветового объекта, освещенного исследуемым и стандартным источниками света, при определенных условиях наблюдения. Отражает степень идентичности цветовых параметров исследуемого и эталонного источников с очень близкими цветовыми температурами на уровне зрительного ощущения. В спецификации  $R_a$  приводится для светодиодов белого цвета свечения и справедлив для коррелированных цветовых температур до 3000–3200 К (близких к источнику типа «А»). Для более высоких температур смысл  $R_a$  теряется. Это связано с отсутствием эталонного источника, имеющего спектральное распределение «черного тела» с высокими цветовыми температурами, поэтому имеет место невозможность измерения (или сравнения).

### Группа общих температурных характеристик, условий хранения и эксплуатации

- Температура активной области кристалла  $T_j$  [°C].

Наибольшая допустимая температура в активной области  $p-n$ -перехода светодиода в течение объявленного срока службы. Либо температура, при которой нормируются фотометрические, электрические или колориметрические характеристики. При отсутствии разогревающего действия тока в импульсном режиме питания считается, что эта температура равна температуре окружающей среды. В большинстве спецификаций все параметры нормируются при температуре активной области +25 °C.

- Тепловое сопротивление  $p-n$ -переход–корпус  $R_{jv}$  [°C/Вт].

Определяет способность отводить (препятствовать отводу) тепла от кристалла и выражается в разнице температур  $p-n$ -перехода светодиода и его корпуса. Характеризует перегрев активной области кристалла относительно внешней части корпуса в отношении к единице подводимой электрической мощности. В спецификациях приводится для

расчета теплового режима работы светодиода и размеров радиатора охлаждения, а также для определения остальных параметров светодиода при использовании с различными плотностями тока, деградационных зависимостей или предельных режимов.

- Тепловое сопротивление  $p-n$ -переход–окружающая среда  $R_{ja}$  [°C/Вт].

Характеризует перегрев активной области кристалла относительно окружающей среды в отношении к единице подводимой электрической мощности. Выражается в разнице температур  $p-n$ -перехода светодиода и окружающей среды.

- Диапазон рабочих температур окружающей среды  $T_a$  [°C].

Диапазон окружающей температуры, при которой светодиод или светодиодный модуль может работать в соответствии с техническими условиями.

- Диапазон температур хранения  $T_{astr}$  [°C].

Диапазон окружающей температуры, при котором могут храниться неработающие светодиоды или модули на их основе с сохранением параметров, предусмотренных в соответствующем стандарте изготовителем или ответственным поставщиком.

- Температура точки пайки выводов  $T_{sp}$  [°C].

Наибольшая допустимая температура в точке припайки светодиода в течение объявленного срока службы. Либо температура, при которой нормируются фотометрические, электрические или колориметрические характеристики.

Для лучшего понимания взаимосвязей характеристик и наглядности их представления далее приводится пример расчета большинства описанных в работе параметров, основанный на реальных измерениях, где можно будет не только проследить «дерево» полученных величин, но и оценить их численное значение. Во всех частях рис. 22 фигурирует один и тот же образец (светодиод белого цвета свечения), где все его измеренные

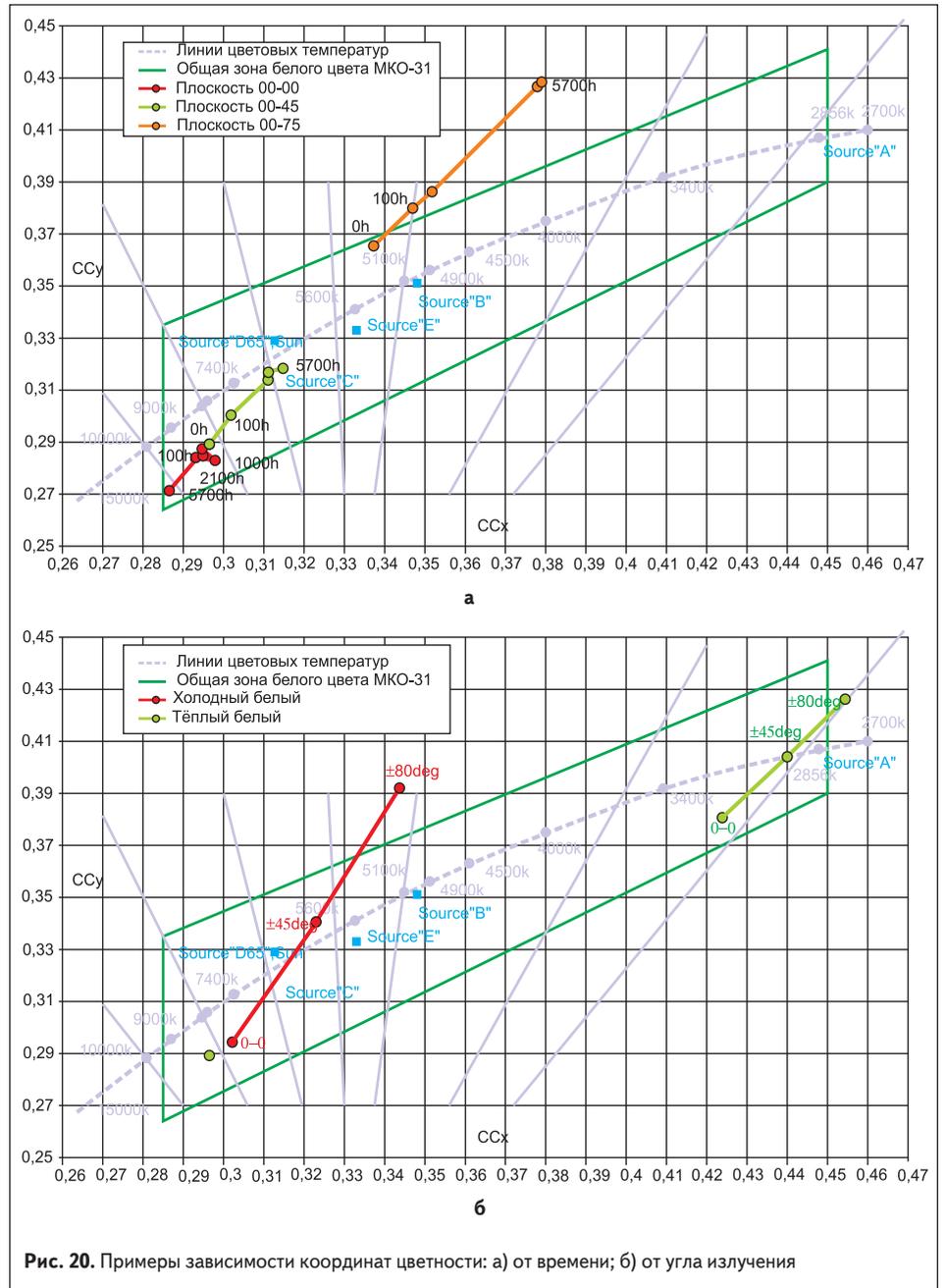
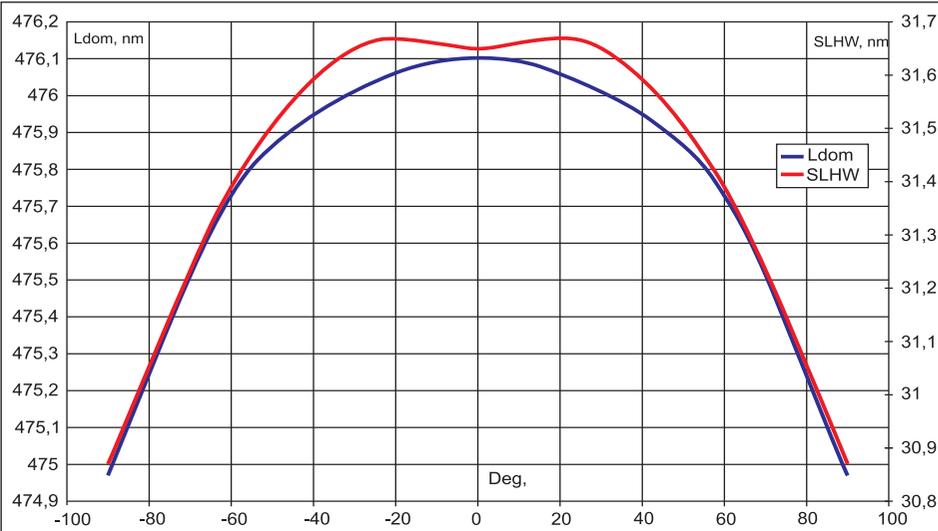


Рис. 20. Примеры зависимости координат цветности: а) от времени; б) от угла излучения

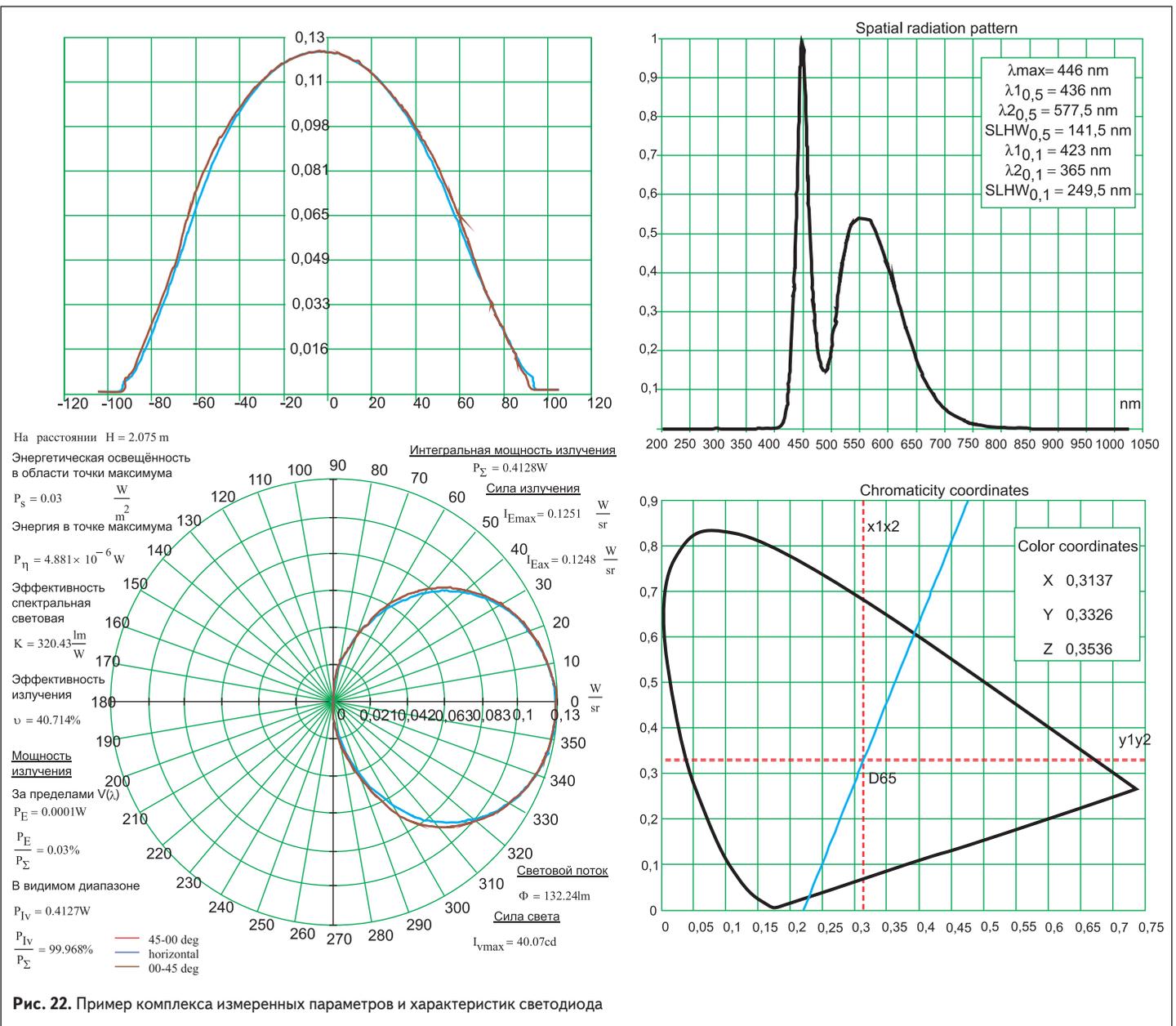


**Рис. 21.** Зависимость доминирующей длины волны  $\lambda_{dom}$  и полуширины спектрального распределения  $\Delta\lambda_{0,5}$  (SLHW) от угла излучения светодиода на основе InGaN/AlGaIn/GaN

и рассчитанные параметры в комплексе так или иначе связаны между собой.

Рассчитанные параметры и характеристики приведены в таблице. Можно заметить, что все исходные измерения сделаны в радиометрическом варианте, однако в процессе расчетов выполнен переход и к светотехническим единицам, что указывает на их происхождение от исключительно физических величин — энергетической силы света и мощности излучения. Общее количество представленных на рис. 22 и в таблице параметров и характеристик одного светодиода составляет не менее 50. Все они находятся в такой же системной зависимости, как было показано в начале работы на рис. 1.

Большинство описанных параметров и характеристик получены в различное время в результате измерений реальных светодиодов или устройств на их основе в лабораториях компаний «Корвет-Лайтс», «Л.И.С.Т.», «Архилайт».



**Рис. 22.** Пример комплекса измеренных параметров и характеристик светодиода

## Литература

- Hatcher M. Traditional Cree seeks next big thing // Compound Semiconductor. September, 2006.
- Hatcher M. OSRAM develops tiny thin-GaN white LED // Compound Semiconductor. April, 2005.
- Measurements of LED's. Technical report. CIE127-1997.
- Проект ГОСТ Р МЭК 62504. 2011.
- Ермаков О. Н., Сушков В. П. Полупроводниковые знаковосинтезирующие индикаторы. М.: Радио и связь. 1990.
- Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Том 1–2. М.: «Мир». 1984.
- Котюк А. Ф. Основы оптической радиометрии М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003.
- Никифоров С. Г. Температура в жизни и работе светодиодов. // Компоненты и технологии. 2005. № 9; 2006. № 1.

Таблица. Рассчитанные параметры и характеристики светодиода, приведенные на рис.22.

Мощность излучения		Total optic power	$P_{\Sigma} = 0,4128$ Вт	$P_{IV}/P_{\Sigma} = 99,968\%$
Мощность излучения в видимом диапазоне		Optic power into $V(\lambda)$	$P_{IV} = 0,4127$ Вт	
Мощность излучения за пределами видимого диапазона		Optic power out $V(\lambda)$	$P_E = 0,0001$ Вт	$P_E/P_{\Sigma} = 0,03\%$
Суммарный световой поток		Total Luminous Flux	$\Phi = 132,24$ лм	
Максимальная сила света		Luminous Intensity max	$I_{Vmax} = 40,07$ кд	
Осевая сила света		Luminous Intensity on-axis	$I_{Vax} = 40$ кд	
Освещенность по оси на расстоянии $H = 2,075$ м		On axis illumination on dist. H	$E_v = 9,29$ лк	
Энергетическая сила света	максимальная	Power Intensity	Max	$I_{Emax} = 0,1251$ Вт/ср
	осевая		on-axis	$I_{Eax} = 0,1248$ Вт/ср
Угловые характеристики и распределение мощности по основным плоскостям		Angles and Optic Power pattern to planes, %	45-00 plane $dP_{450} = 33,03\%$	$\theta_{0,5} = 121,262^\circ$ $\theta_{0,1} = 171,725^\circ$
			Horizontal plane $dP_{00} = 33,03\%$	$\Omega_{0,5} = 121,262^\circ$ $\Omega_{0,1} = 171,725^\circ$
			00-45 plane $dP_{045} = 33,94\%$	$\Psi_{0,5} = 125,022^\circ$ $\Psi_{0,1} = 172,113^\circ$
Средние значения углов		Average angle	$0,5 I_{Vmax}$	$Q_{av0,5} = 122,515^\circ$
			$0,1 I_{Vmax}$	$Q_{av0,1} = 171,854^\circ$
Электрические параметры		Electrical data		$I_e = 0,35$ А
		Power input		$U = 2,90$ В
Эффективность световая		Efficacy	$P_{in} = 1,014$ Вт	
Фотометрическое отношение		$I_{Vmax}/1000$ lm	$\nu_v = 130,418$ лм/Вт	
КПД		Efficiency	$N = 303$ кд/кЛм	
Спектральная световая эффективность		Luminous Efficacy	$\nu = 40,71\%$	
Энергетическая освещенность на расстоянии $H = 2,075$ м		Energy illumination on a distance $H = 2,075$ m	$K = 320,43$ лм/Вт	
Максимальная длина волны		Maximum wavelength	$P_s = 0,03$ Вт/м <sup>2</sup>	
Полуширина спектра излучения		SLHW <sub>0,5</sub>	$\lambda_{max} = 446$ нм	
Ширина спектра излучения		SLHW <sub>0,1</sub>	$SLHW_{0,5} = 141,5$ нм	
Координаты цветности		Color coordinates	$SLHW_{0,1} = 249,5$ нм	
Доминирующая длина волны		Dominant wavelength	$X = 0,314; Y = 0,333; Z = 0,354$	
Центроидная длина волны		Centroid wavelength	$\lambda_{dom} = 562,18$ нм	
Доля ОСПЭЯ относительно $V(\lambda)$		Spectral part to $V(\lambda)$	$\lambda_{centroid} = 545,5$ нм	
Коррелированная цветовая температура		Correlated color temperature (CCT)	$P_{\lambda} = 44\%$	
Цветовая температура по Планку		Planc color temperature	$T_c = 6446,1$ К	
			$T_{Plank} = 7389,5$ К	