

Сергей Щеглов | serge\_sheglov@mail.ru  
Денис Николаев | nikolaev@ledcommunity.ru

# Основы формирования углового распределения силы света

## при конструировании ПСП

Во второй статье цикла публикаций о конструировании полупроводниковых световых приборов (ПСП) речь пойдет о формировании углового распределения силы света. Свет, непосредственно выходящий из светодиодов, далеко не всегда «пригоден» для использования — очень часто его необходимо перенаправить: в одних случаях сфокусировать, чтобы изготовить прожектор, в других — распределить, чтобы снизить яркость и изготовить светильник общего освещения. В статье рассказывается о методах, позволяющих получать от светильника такое пространственное распределение силы света, которое отвечало бы поставленным задачам.

### Исходные данные

В большинстве случаев светильник разрабатывается не для одного конкретного объекта, а для типового применения. Существует несколько стандартных типов диаграмм углового распределения силы света, или кривых силы света (КСС), подробное описание которых можно найти, например, в ГОСТ 17677—82, а краткое приведено в табл. 1 и на рис. 1. Некоторые разработчики проектируют светильник, выбирая диаграмму в зависимости от параметров объекта освещения, при этом получается, что в большинстве других случаев изделие оказывается не совсем подходящим.

Для производственных помещений рекомендуется применять светильники прямого света с КСС типа К, Г, Д. Причем чем больше высота подвеса, тем уже зона направлений максимальной силы света. Для общего освещения офисов в основном годятся светильники прямого и рассеянного света с КСС типа Г и Д. Для подсветки особых, выделенных зон, внутренних архитектурных решений и деталей интерьера подходят световые приборы с КСС типа К. Для формирования отраженного или приглушенного света (например, в холле здания) необходимо применять светильники

преимущественно отраженного света (КСС типа С). Как правило, в описанных случаях используются осветительные приборы, пространственное распределение силы света которых представляет собой тело вращения.

Для автострад и улиц, в зависимости от их категории (определяется СНиП 23-05-95), а также для автотранспортных туннелей, надземных и подземных пешеходных переходов и вытянутых коридоров общественных зданий применимы светильники, имеющие в одной из плоскостей КСС типа Л и Ш. Пространственная диаграмма большинства из них представляет собой сложное фотометрическое тело. Кривые силы света, описывающие такое тело в разных сечениях, имеют разную форму. Такие распределения называют специальными. При этом часто пространственная диаграмма дорожного светильника имеет не ось, а плоскость симметрии. Для уличного светильника в двух взаимно перпендикулярных сечениях КСС будут различны — в одном типа Л или Ш, а в другом — К или Г.

### Ассортимент

Маломощные светодиоды (<1 Вт) имеют некоторое разнообразие диаграмм углового

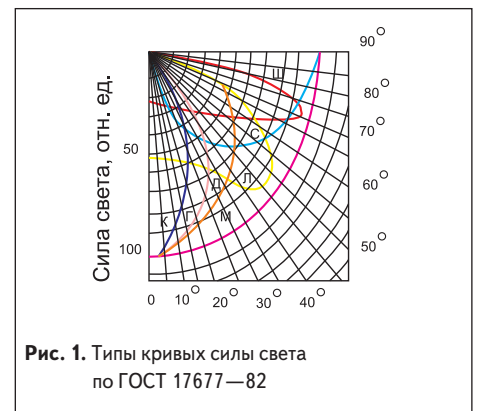


Рис. 1. Типы кривых силы света по ГОСТ 17677—82

распределения силы света (КСС типа К, Г, Д), но во многих случаях они неудобны для проектирования световых приборов, особенно мощных. Одна из причин — слабый световой поток от одного диода, из-за чего в светильник приходится устанавливать сотни (а то и тысячи) маломощных светодиодов. Также можно упомянуть низкую эффективность параметров формируемой диаграммы — это касается светодиодов, имеющих КСС типов К и Г (подробнее будет описано дальше).

Большинство современных мощных светодиодов ( $\geq 1$  Вт) имеют диаграмму типа Д. Для расширения номенклатуры по типам (КСС) применяют элементы так называемой вторичной оптики: преломляющей и отражающей. Но у некоторых производителей можно встретить мощные светодиоды с диаграммами, более узкими, чем Д, — например, у светодиода W49180 серии Z-Power компании Seoul Semiconductor полуширина составляет около  $90^\circ$ .

Таблица 1. Типы кривых силы света и рекомендации по их формированию

Тип кривой силы света		Рекомендуемые методы формирования КСС при использовании мощных белых светодиодов
Обозначение	Наименование	
К (а)	Концентрированная	Коллиматорные линзы
Г (б)	Глубокая	Коллиматорные линзы, отражатели
Д (с)	Косинусная	Светодиоды без вторичной оптики
Л (д)	Полуширокая	Светодиоды со специальной диаграммой, специальная вторичная оптика, разворот модулей с КСС типа К и Г
Ш (е)	Широкая	Разворот модулей с КСС типа К, специальная вторичная оптика
М (ф)	Равномерная	Специальная вторичная оптика
С (г)	Синусная	Светодиоды без вторичной оптики, специальные отражатели

Вторичные преломляющие оптические элементы представляют собой коллиматорные линзы, которые перераспределяют световой поток от светодиода. Конструкция таких элементов подразумевает использование максимальной выходной апертуры светодиода, при этом достигается высокий показатель эффективности перераспределения исходного потока. Под эффективностью мы подразумеваем отношение полного потока, вышедшего из коллиматорной линзы, к потоку светодиода, на который линза установлена. Это своего рода КПД линзы. Потери на таких элементах (не менее 8%), в основном, обусловлены потерями на каждой границе раздела двух сред и определяются законом отражения и преломления Френеля. Реальная эффективность коллиматорных преломляющих элементов, гладкие (без микрорельефа) поверхности которых не имеют сложной формы, составляет 80–90%. Высокая эффективность (около 90%) коллиматорных линз с гладкой (без микрорельефа) поверхностью сохраняется при полуширине КСС в 5–30°. Для получения более широкой диаграммы (FWHM 20–60°) на выходном торце коллиматорной линзы либо применяют растровую систему микролинз, либо формируют грубый микрорельеф (шагрень), чтобы поверхность приобрела рассеивающие свойства. Эффективность такого элемента снижается и может составлять от 85 до 70%.

При помощи коллиматорных линзовых элементов вторичной оптики можно получить не только осесимметричные диаграммы. Формируя на выходной поверхности особый рельеф в виде клиновых полос (прорезей, канавок), добиваются картины распределения освещенности на поверхности в виде вытянутого овала, а не круга. При помощи таких элементов можно получать диаграммы, характеризующиеся, например, полушириной КСС 20–40° при оптической эффективности не более 80%.

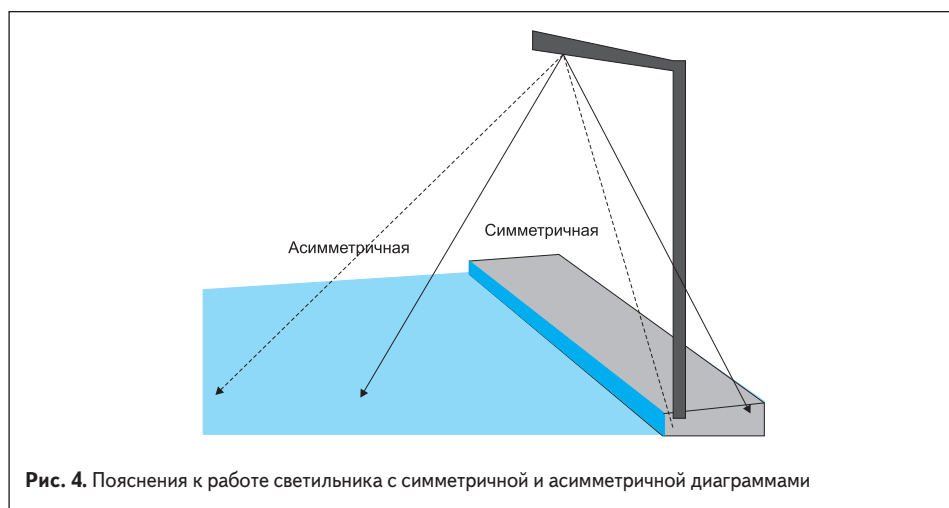
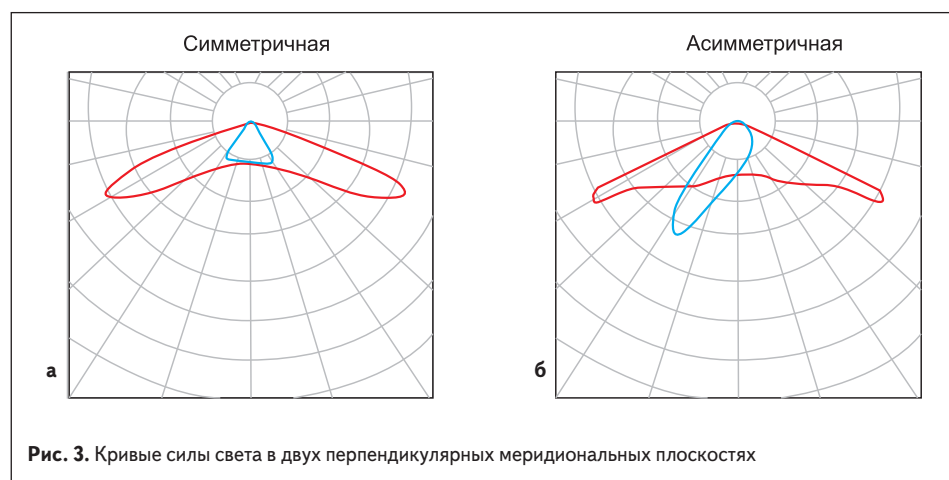
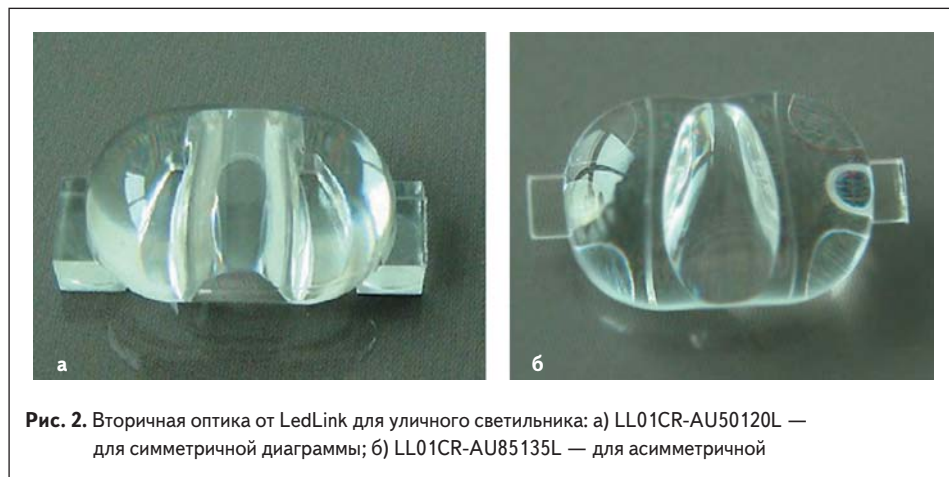
Кроме коллиматорных линз, существуют и зеркальные отражательные элементы. Их эффективность также высока и может достигать (в зависимости от качества зеркального покрытия) 90%. Диапазон формируемых диаграмм у таких элементов достаточно широкий — FWHM 10–80°. Однако они не получили широкого распространения, поскольку по сравнению с линзовыми коллиматорами имеют более значительные габариты, менее гибкие параметры для формирования диаграммы (одна отражательная поверхность вместо двух у линзовых), а их зеркальное покрытие нередко подвержено постепенной деградации и влиянию внешних климатических факторов.

Отражатель удобно применять в сочетании с крупногабаритными (по сравнению с обычными светодиодами) источниками света. Например, когда источник света составлен из нескольких кристаллов, объединенных общей первичной линзой или защитным слоем силикона. Коллиматорные линзы в таком случае не подходят, так как их размер и расход материала оказались бы слишком большими. Поскольку это дорого, то целесообразно ис-

пользовать отражатель. В этом случае недостатки отражательной системы компенсируются ее низкой стоимостью. Стоит отметить, что отражатель можно применять и при частичной фокусировке света от нескольких отдельных светодиодов.

Иногда кроме коллиматорных линзовых и отражающих элементов вторичной оптики используют обычные круглые плоско-выпуклые линзы. Эффективность таких линз значительно ниже, чем у остальных элементов. Это очевидно, потому что такие линзы не способны собирать весь свет, излучаемый светодиодом.

Относительно недавно для применения в уличном освещении стали разрабатываться специальные элементы вторичной оптики. Применение таких линз может существенно упростить задачу проектирования полупроводниковых светильников для освещения улиц и дорог, при этом их можно будет устанавливать вместо обычных с разрядными лампами, не изменяя конфигурацию опор. Компания LedLink для таких задач предлагает линзу (рис. 2–4) с асимметричной диаграммой, необходимой при монтаже светильника с наклоном. В продольном сечении такая линза имеет КСС типа Ш, в поперечном — К.



## Выбор решения

Допустим, нам предстоит разработать тот или иной световой прибор на основе светодиодов с учетом области применения и требуемых характеристик. Проведя предварительные расчеты освещенности (обычно они выполняются с помощью специального программного обеспечения, например DIALux), можно определить требуемое значение полного светового потока светильника, а также его пространственное распределение силы света. Исходя из этих данных, легко подсчитать требуемое число светодиодов, естественно, необходимо учесть потери на элементах вторичной оптики, рассеивателях и др.

Для выбора типа вторичной оптики прежде всего необходимо проанализировать диаграмму проектируемого светильника. Есть ли у нее ось или плоскость симметрии, насколько она гладкая, где расположены пиковые значения силы света. Если диаграмма круглосимметричная, следует определить осевую и максимальную силу света, угловую ширину на уровне 0,5 и 0,1 от нее (FWHM). Далее проводится поиск необходимого или близкого по светораспределению светодиода, оценивается картина распределения освещенности и светоточдачки светильника. Если выбранный высокоэффективный светодиод не обеспечивает заданное распределение освещенности, то необходимо применять вторичную оптику. Поэтому необходимо заранее выяснить, предлагают ли производители вторичной оптики что-либо для конкретной марки светодиода.

Как правило, выбор вторичных элементов для формирования круглосимметричных диаграмм (КСС типов К и Г), а также реализация КСС типа Д первичной оптикой самих светодиодов не вызывает особых трудностей. К тому же производители постарались снабдить потребителей для их удобства комплектами или наборами элементов вторичной оптики по 3, 5, 15 и т. д. коллиматорных линз, объединенных в единую (монокристаллическую) деталь.

Задачу формирования диаграммы неосесимметричного (специального) светораспределения приходится решать несколькими способами. Поясним это на примерах. Один из самых простых способов — найти светодиод с соответствующим пространственным светораспределением. Одним из ярких примеров такого светодиода можно назвать Golden Dragon Oval Plus компании Osram. Он вполне подходит в качестве источника света для уличного освещения. При этом дополнительные преломляющие или отражающие элементы в светильник устанавливать не требуется. Второй способ — применение особых коллиматорных линз. Широкий спектр таких линз, в том числе в групповом исполнении, предлагает компания LedLink. Третий способ — использование комбинации (взаимного наклона и поворота) светодиодов с узкой диаграммой направленности. Требуемая диаграмма при этом является суперпозицией диаграмм отдельных светодиодных модулей. Такой способ реализован в некоторых светильниках Zers. При этом светодиоды могут быть

снабжены элементами вторичной оптики разного типа. Недосток такого подхода заключается в усложнении конструкции корпуса светильника, так как в нем должны быть сформированы несколько наклонных плоскостей, установленных в четко заданных положениях. Можно придумывать различные комбинации. Решение о выборе того или иного способа в каждом конкретном случае принимает опытный разработчик. Но мы рекомендуем не забывать про такой важный аспект, как простота конструкции, от которой зависит стоимость изготовления светильника.

Из-за малых размеров светодиода, как и нить лампы накаливания, имеют большую яркость, т. е. большой световой поток исходит из поверхности малой площади. Это плюс при проектировании прожекторов и недостаток при использовании в общем освещении. Если полупроводниковый светильник находится недалеко от рабочего места, то открытые светодиоды образуют большое количество теневых контуров от рук или инструмента. Эта особенность делает эксплуатацию открытого светодиодного света практически невозможной. Кроме того, глаза людей должны быть защищены от чрезмерной яркости светильника. В этом случае необходимо предусматривать светорассеиватели, в качестве которых можно использовать молочные, призматические или растровые стекла, различные отражатели и перегородки.

## Измерение

При выборе производителя и модели вторичной оптики для СИД необходимо обратить внимание на заявленные характеристики. Чем больше и полнее информация о конструкции светодиод-вторичная оптика, тем больше шансов получить на выходе добротную систему. Ну а вопрос соотношения цена/качество остается открытым. Опыт авторов показывает, что европейские производители уделяют достаточное внимание проверке качества и проведению соответствующих измерений, что в конечном итоге сказывается на цене. Получается, что стоимость элемента вторичной оптики равна, а то и больше стоимости самого светодиода.

Многие азиатские производители предлагают схожий ассортимент по цене намного ниже европейской. Но за меньшую сумму предлагается продукт, предварительная информация о котором может содержать лишь название СИД, для которого он может быть использован, и полуширину диаграммы. Результаты, которые дает такая оптика, не всегда совпадают с ожидаемыми. При этом проверка одного тестового образца не всегда позволяет быть уверенным в качестве. В практике авторов встречались случаи, когда линзы из одной партии давали диаграммы со значительно различающимися характеристиками.

Необходимо отметить, что для всего многообразия конструктивных исполнений, типов элементов вторичной оптики и сопрягаемых вместе с ней светодиодов необходимо четко соблюдать рекомендации производителя. В слу-

чае физического совмещения светодиода с неподходящей вторичной оптикой нельзя гарантировать передаточные характеристики оптической системы.

Светодиодов, производители которых не входят в первую пятерку мировых лидеров, может не оказаться в списках изготовителей вторичной оптики. В таком случае подходящий вариант придется искать методом перебора. Вероятность, что найдется линза, подходящая для решения задачи вместе с выбранным светодиодом, достаточно высока. Но при этом может понадобиться провести измерения не с одним десятком линз или отражателей.

Таким образом, какое бы вы ни выбрали оптическое решение для проектируемого светильника, его необходимо проверить, т. е. выполнить измерение углового распределения силы света светодиода, модуля или светильника. Оно заключается в поочередном измерении силы света излучателя под разными углами и обычно выполняется для одной или нескольких меридиональных плоскостей (рис. 5). Для каждой меридиональной плоскости получают кривую силы света, то есть зависимость силы света от угла  $\Theta$  — широты, при этом за  $0^\circ$  принимают осевое направление. Ось является местом пересечения всех меридиональных плоскостей. Для измерения КСС используются гониофотометры. Один из таких приборов описан в [1].

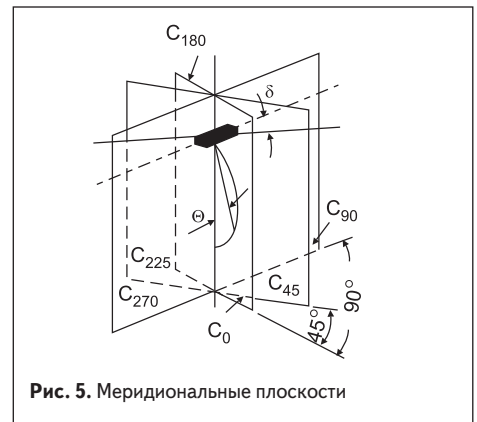
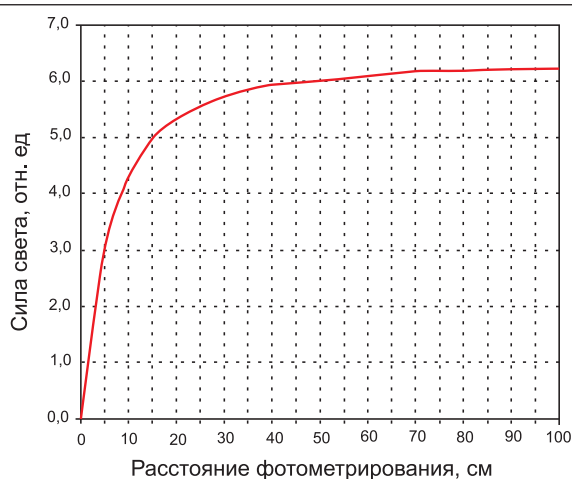


Рис. 5. Меридиональные плоскости

Для получения достоверных данных при измерении КСС необходимо правильно выбрать расстояние между светодиодом и фотоприемником — так называемое расстояние фотометрирования  $R$ . Сила света при этом будет пропорциональна сигналу от фотодетектора и квадрату расстояния фотометрирования. Сигнал фотодетектора, как правило, пропорционален освещенности, которую создает на нем источник света. Но это правило работает в случае, если расстояние достаточно велико, т. е. выполняется закон обратных квадратов. Очевидно, что если расстояние фотометрирования сравнимо с габаритами источника света, то указанный закон соблюдаться не будет. При измерении таких тел, как безрефлекторные лампы накаливания или люминесцентные лампы, т. е. источников света, излучающих преимущественно одинаково во всех направлениях, расстояние фотометрирования должно быть не меньше,



**Рис. 6.** Зависимость результатов измерения силы света от расстояния фотометрирования для 5-мм светодиода с полушириной КСС 15°. Численное моделирование

чем десятикратный размер измеряемого источника света.

Однако в случае узконаправленных источников света, например светодиодов со вторичной оптикой или отражателями, создающими пучок с полушириной 30° и меньше, правило «десяти габаритов» не работает. Не вдаваясь в подробности теории оптических систем, можно сказать, что чем уже КСС, тем больше должно быть расстояние. Для примера на рис. 6 показана зависимость результатов измерения силы света от расстояния фотометрирования. Кривая приведена для 5-мм светодиода, полуширина КСС которого составляет 15°. Очевидно, что силу света такого светодиода можно измерять на расстоянии не менее 80–90 см.

КСС можно измерять как в относительных единицах, так и в абсолютных (канделах). Относительные измерения можно проводить обычным кремниевым фотодиодом. А если цветность источника света зависит от направления излучения, что характерно для многих белых светодиодов, то для снижения погрешности измерения желательно использовать скорректированный фотоприемник (как в люксметре). Его сигнал (фототок) пропорционален освещенности — т. е. световой, а не энергетической величине. Для точного измерения абсолютных значений потребуется более сложная техника, описанная в [2].

По результатам измерения КСС можно рассчитать полный световой поток. В случае, когда диаграмма направленности светодиода представляет собой тело вращения, можно измерить КСС в одной плоскости и рассчитать полный световой поток по формуле:

$$F_v = 2\pi \times \Delta\theta \sum_i I_v(\Theta_i) \sin(\Theta_i),$$

где  $F_v$  — полный световой поток;  $\Delta\theta$  — угловой шаг, с которым измеряется угловое распределение:  $\Delta\theta = \Theta_{i+1} - \Theta_i$ ;  $I_v(\Theta_i)$  — сила света в направлении  $\Theta_i$ .

В других случаях, когда диаграмма направленности характеризуется различными КСС в различных меридиональных плоскостях, для получения достоверных данных могут по-

требоваться измерения КСС в 20 меридиональных плоскостях и более. Полный световой поток при этом рассчитывается как среднее от суммы потоков всех секторов.

Результаты измерений КСС позволяют, во-первых, оценить абсолютные значения различных характеристик излучателя (форму и полуширину КСС, осевую силу света, полный световой поток), а во-вторых — получить информацию об эффективности вторичной оптики. Рассмотрим последнее подробнее.

КПД (отношение полного светового потока светодиода с элементами вторичной оптики к той же величине без них) позволяет оценить общую эффективность оптической системы, но эта характеристика не является главным критерием при сравнении эффективности различных решений. Ее следует принимать во внимание только тогда, когда приняты решения с учетом всех других показателей.

Величина кд/лм (отношение осевой силы света к световому потоку источника света, используемого в светотехническом устройстве) показывает, насколько изменяется максимальная сила света при применении источников света с различным световым потоком в одной и той же оптической системе или наоборот — одного источника в различных оптических системах. Очевидно, что чем меньше полуширина пучка, тем больше значение силы света при том же значении светового потока светодиода. При равных значениях полуширины величина кд/лм показывает, какой из сравниваемых элементов вторичной оптики дает большую силу света. Этим параметром удобно пользоваться, если необходимо получить как можно большее значение осевой силы света, но он не свидетельствует об эффективности оптики. При этом КПД светильника не всегда позволяет сделать правильный выбор, так как кроме потока, сформированного в требуемом направлении, учитывает и тот поток, который может рассеиваться в побочных направлениях.

Рассмотрим соотношение ширины КСС на уровне 0,5 и 0,1 от максимального значения силы света. Чем ближе друг к другу эти показатели, тем больше света излучается в требуемом

направлении и меньше — в другие области пространства. Вместо указанного соотношения можно использовать отношение потока, излучаемого в телесном угле, ограниченном полушириной, к полному световому потоку.

## Заключение

В статье были изложены общие подходы и методы формирования требуемой диаграммы силы света светового прибора. Конечно, многие тонкие моменты остались за рамками публикации, но общие сведения помогут при разработке светильника с относительно простыми типами пространственного распределения силы света. Тем не менее при проектировании светильника с уникальным оптическим решением не обойтись без участия высококвалифицированного оптика, имеющего опыт работы именно в проектировании светодиодных систем. К счастью, сегодня такую работу уже могут выполнять сторонние организации, которые возьмут на себя не только расчет вторичной линзы, но и ее изготовление.

## Литература

1. Азизян Г., Артамонов А., Никифоров С. Гониофотометрическая установка для определения углового распределения силы света // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 1.
2. Никифоров С. Трудная задача измерения параметров света от светодиодов. Вопросы фотометрии и радиометрии // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 1.