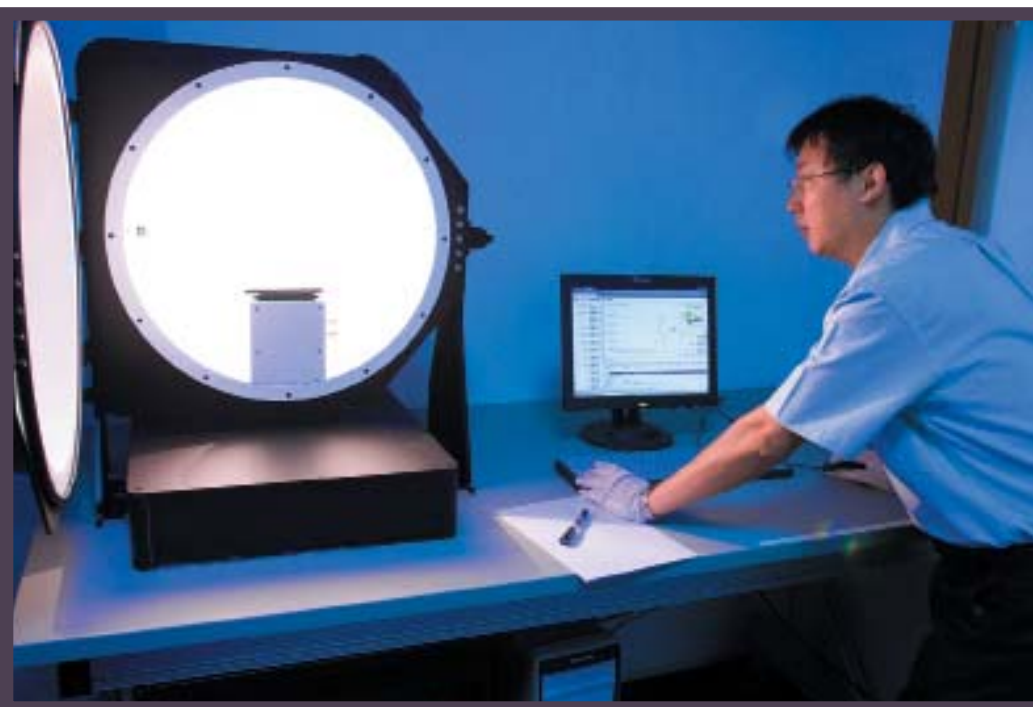


Гюнтер Лешхорн (Günther Leschhorn) | Ричард Янг (Richard Young) |  
Перевод и комментарии: Владимир Рентюк

# Понимание того, как измерить световой поток и мощность светового излучения

➔ В предлагаемом отрывке из готовящегося к выпуску справочника Handbook of LED and SSL Metrology («Справочник по методологии измерения параметров светодиодов и твердотельных источников света») Гюнтер Лешхорн и Ричард Янг объясняют основы измерения светового потока и мощности излучения, играющих решающую роль в развитии продуктов твердотельного освещения (Solid-State Lighting, SSL).



**К**ак правило, световой поток и мощность излучения являются наиболее важными оптическими параметрами для светодиодов, хотя иногда требуется учитывать и пространственное распределение интенсивности светового потока. Для небольших устройств все еще распространена такая характеристика, как усредненная энергетическая сила излучения светодиодов при условии фотометрирования «В» (CIE 127)<sup>1</sup>. А такое понятие, как частичный поток для светодиодов, хоть и является величиной, постепенно входящей в обращение, но до сих пор еще широко не измеряется.

Как мы видим, для твердотельных источников света фотометрические и колориметрические характеристики излучения имеют важное значение.

Для измерений общей мощности излучения и светового потока используются два основных метода, в которых используют или интегрирующую сферу (в терминологии ГОСТ Р 8.749-2011 — фотометрический шар, называемый еще фотометрический шар Ульбрихта), или гониофотометр/спектро-радиометр. Следующие два раздела статьи объясняют данные методы измерения с учетом типичных решаемых при этом задач.

## Метод интегрирующей сферы и измерения геометрии

Величиной светового потока иногда называют общий или полный световой поток. Это связано с желанием подчеркнуть тот факт, что он является общим во всех направлениях. Он также упоминается как 4π-поток, так как полная сфера имеет 4π стерадиан телесного угла. Чтобы собрать весь свет в пределах 4π стерадиан, источник должен быть помещен в центре сферы. Эта 4π-геометрия является обычной конфигурацией для измерения светового потока (рис. 1а). Излучение, испускаемое во всех направлениях, захватывается и измеряется как суммарный световой поток.

Для источников света, которые имеют весьма незначительное излучение или вообще не имеют излучения, идущего в направлении, обратном их оптической оси, суммарный световой поток может быть измерен в более удобном варианте, а именно, как прямой поток излучения

<sup>1</sup> Для стандарта CIE 127-2007 прямого аналога в виде ГОСТ Р пока нет, по имеющимся данным, он находится на стадии разработки. Можно руководствоваться ГОСТ Р 8.749-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик».

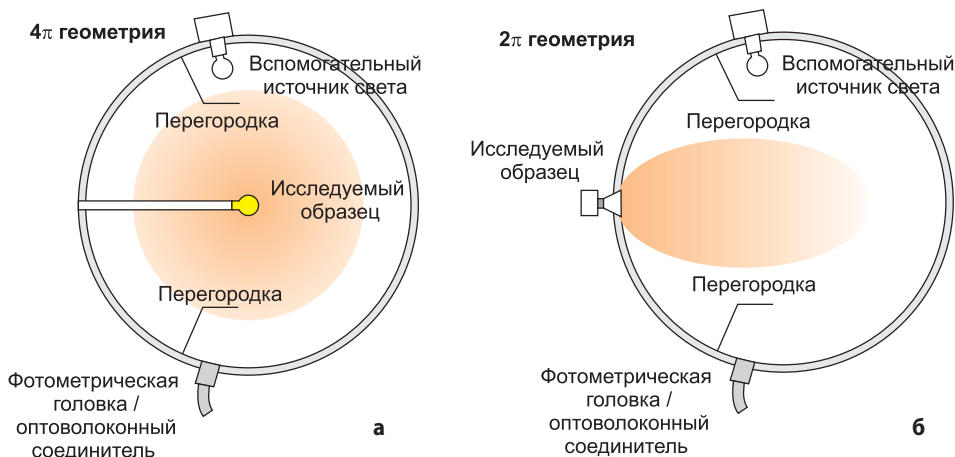


Рис. 1. Рекомендуемая МКО сфера с геометрией: а) для любых источников света; б) для источников света без обратного излучения

или, как его еще называют, в 2π-геометрии. Здесь источник света расположен в отверстии (окошке) на стенке сферы. В этом варианте измерения фиксируется только световое излучение, которое испускается в передней полусфере (рис. 1б). Именно этот тип излучения характерен для большинства светодиодной продукции. Перед проведением измерений интегрирующая сфера должна быть точно откалибрована на основе геометрии измерения, в соответствии с принципом замещения. Этот принцип гласит, что тестируемый источник света всегда следует измерять путем сравнения со стандартным источником, имеющим сходные пространственные и спектральные характеристики распределения излучения<sup>2</sup>.

### Рекомендации по выбору правильного размера

Чтобы нивелировать фактор помехи, испытуемый образец всегда должен быть значительно меньше, чем внутренний диаметр интегральной сферы, причем настолько меньше, чтобы по сравнению с ней размеры самого образца были незначительными. Тем не менее, по мере того как диаметр сферы увеличивается, интенсивность падающего на детектор света уменьшается. Как правило, пропускная способность света интегрирующей сферы является функцией, обратно пропорциональной квадрату радиуса сферы. Поэтому при выборе правильного соотношения между размерами исследуемого объекта и сферы крайне важно найти эффективный компромисс и баланс между высокой точностью измерений и достаточным уровнем света на детекторе (рис. 2).



Рис. 2. Сферы: а) диаметром 1 м для измерения большинства отдельных светодиодов и модулей в обоих, 4π и 2π, рекомендованных геометриях; б) диаметром 2 м для больших светильников и продуктов твердотельного освещения

Для упрощения задачи выбора имеются рекомендации по выбору правильного размера сферы для заданного размера испытуемого образца. Если для измерений используется 4π-геометрия, то суммарная площадь поверхности исследуемого образца должна быть не более чем 2% от площади поверхности сферы. Длина линейной лампы не должна превышать 2/3 от диаметра сферы. При использовании 2π-геометрии диаметр измерительного окошка (и, следовательно, относительное увеличение геометрических размеров

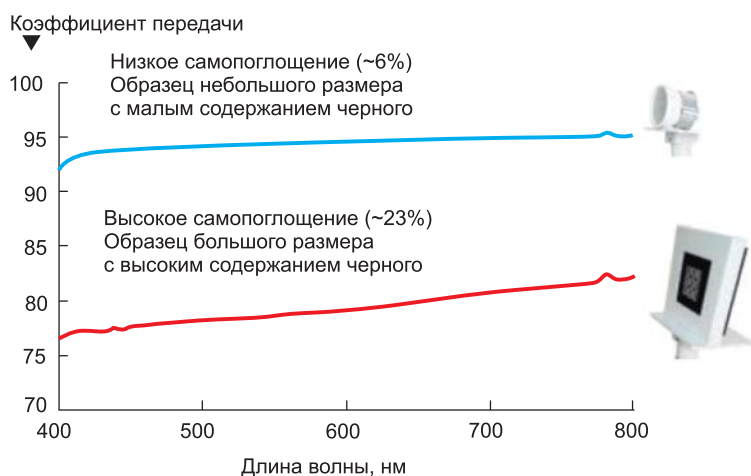


Рис. 3. Характеристика влияния спектра самопоглощения для двух типичных испытываемых образцов

<sup>2</sup> Согласно действующим в РФ стандартам, для этой цели используются квазигалогеновые лампы с вольфрамовой нитью.

испытываемого образца) не должен превышать 1/3 диаметра шара.

### Коррекция на самопоглощение излучения

Сам тестируемый объект способствует поглощению светового излучения в интегрирующей сфере. Эта форма влияния на результаты измерения, известная как самопоглощение излучения, может привести к существенному ослаблению светового излучения и приводит к внесению дополнительной погрешности в полученные результаты. Влияние такого ослабления становится более выраженным по мере увеличения размеров испытываемого образца и тем выше, чем темнее его поверхность. На рис. 3 показаны два типичных примера в части испытываемого образца и зависимость результатов измерения от длины волны. Как видно из рассмотрения рисунка, самопоглощение может привести к отклонениям до нескольких десятков процентов.

Поскольку это крайне важно для точных измерений, коррекция самопоглощения осуществляется с помощью подходящего вспомогательного источника света. Для этой цели, как правило, используются дополнительные галогенные лампы, которые охватывают широкий спектральный диапазон. Чтобы избежать непосредственного освещения образца, вспомогательный источник света должен быть расположен за перегородкой. Кроме того, чтобы избежать флуктуации параметров светового потока, он должен работать от стабильного источника питания. Этот источник света используется для того, чтобы детерминировать поведение испытываемого устройства, его держателя и соединительных кабелей в части собственного поглощения, а затем выполнить его замещение для фактического измерения. Эффект самопоглощения растёт, если отражающая способность покрытия увеличивается, а отношение площади сферы к площади поверхности испытываемого образца уменьшается.

### Поглощение света объектами, расположенными в ближней зоне

Любой объект (например, такой как соединитель), который находится в непосредственной близости к источнику света, может значительно поглощать свет, что, в свою очередь, приведет к большим



**Рис. 4.** Пример минимизации эффектов поглощения в ближней зоне (держатель линейной трубчатой лампы расположен максимально далеко от источника света и покрыт материалом с высоким коэффициентом отражения)

погрешностям измерения. Это так называемое поглощение света в ближней зоне не может быть исправлено путем измерения собственного поглощения. Таким образом, следует избегать возникновения этого эффекта или максимально минимизировать его влияние. Создающий помехи объект должен быть размещен настолько далеко от лампы, насколько это возможно, а образование полостей вообще недопустимо, этого следует всячески избегать. Кроме того, рекомендуется использовать покрытие поверхности такого объекта материалом с высоким коэффициентом отражения. В качестве примера на рис. 4 показано хо-

рошее решение для держателя линейного источника света в виде трубки.

### Монтажная позиция

Как указано в одной из глав упомянутого в начале статьи справочника, измерения для пассивно охлаждаемых твердотельных источников света должны быть выполнены в их рабочем положении, которое определено изготовителем. Это также относится и к фотометрической сфере. При измерении в 4π-геометрии удобно использовать внутренний держатель лампы, который, для того чтобы реализовать нужное рабочее положение источника света, может быть установлен либо сверху вниз, либо снизу вверх.



**Рис. 5.** Поворотная сфера диаметром 1 м (позиционно-чувствительные источники света могут быть измерены в их рабочем положении)

В случае 2π-геометрии оптимальным выбором является использование вращаемой сферы, такой, которая в виде примера показана на рис. 5. Здесь сфера может поворачиваться в пределах своей монтажной рамы. Чтобы обеспечить возможность выбора нужного положения, измерительный порт сферы может быть выбран с расположением сбоку, сверху или снизу.

Вопросы погрешностей измерений и причины их возникновения достаточно разнообразны. В одной из глав справочника приводится анализ погрешностей при использовании спектро радиометра в качестве детектора. Согласно этим данным, широкий диапазон характеристик излучения источников света на основе светодиодов может привести к ошибкам калибровки при измерении светового потока. Так, для компонентов с диффузным излучением может быть достигнута погрешность в 5%, а для светодиодов с малым углом излучения возможны отклонения более чем в 10%. Таким образом, как уже было сказано выше, при выборе подходящего размера сферы, необходимо выполнять коррекцию самопоглощения, избегать поглощения в ближней зоне, а измерения источника света проводить строго в указанном изготовителем рабочем положении. Все это имеет решающее значение для получения достоверных результатов с низким уровнем погрешности измерений.

Еще одним источником значительных погрешностей является их проведение еще до того, как источник света термостабилизируется, то есть достигнет теплового равновесия в некоторой точке своей рабочей температуры. Кроме того, при



**Рис. 6.** Гониоспектро радиометр в компактном, защищенном от внешнего света корпусе (в данном приборе вместо детектора перемещается светодиод)

тестировании в соответствии с CIE S 025 или EN 13032-4 рекомендуется проводить измерения при температуре окружающей среды (+25 ±2) °С. При помещении в корпус (интегрирующую сферу) источника, который генерирует тепло, температура окружающей среды (в нашем случае это температура внутри сферы) будет расти, и она будет отличаться от «нормальных» условий эксплуатации. Поэтому при измерении в геометрии 4π рекомендуется предварительно стабилизировать источник с открытыми полушариями сферы. Сама сфера должна быть закрыта только непосредственно перед измерением. Таким образом, условия окружающей среды при нормальной эксплуатации могут быть смоделированы лучше всего. Однако здесь следует соблюдать определенную осторожность, поскольку закрывать сферу необходимо очень аккуратно и таким образом, чтобы избежать движения воздуха, которое могло бы внести свой вклад в нежелательное искажение установившегося температурного режима.

### Гониофотометрический метод измерения

Хотя измерение светового потока или мощности излучения с помощью гониофотометра требует гораздо больше времени по сравнению с использованием интегрирующих сфер, оно является гораздо более точным. Эта процедура измерения не требует светового потока стандартных ламп в качестве получения некоторого опорного значения, как это имеет место в фотометрии с использованием сфер. Наоборот, этот метод измерений выбирается в том случае, если должны быть измерены лампы с различным распределением силы света, которое впоследствии будет базовым для калибровки светового потока уже стандартных ламп, которые и обеспечивают опорные значения для других видов испытаний. Еще одна отличительная черта гониофотометрии по сравнению со сферической фотометрией — возможность измерения частичного светового потока и угла его половинной интенсивности (Full Width at Half Maximum, FWHM). Эти значения должны быть определены при

измерении характеристик, относящихся к энергетической эффективности, и в соответствии со спецификациями Zhaga<sup>3</sup>.

Этот метод лучше всего описывать воображаемой сферой, охватывающей светодиод. Фотометрическая головка с косинусоидальной коррекцией (детектор) перемещается по условной поверхности сферы вдоль заданных путей на расстоянии  $r$  (радиус условной сферы). Детектор используется для определения освещенности  $E$ , возникающей в результате частичного лучистого потока  $d\Phi$ , падающего на область детектора  $dA$ , как функция  $\theta$  и  $\varphi$ .

$$E(\theta, \varphi) = d\Phi/dA.$$

При определении полной мощности излучения детектор перемещают пошагово на угол  $\theta$ . Для каждого угла  $\theta$  проводят несколько измерений, с измерением угла обзора  $\varphi$  от 0° до 360°.

При измерении пространственного распределения освещенности по воображаемой сферической поверхности с радиусом  $r$  определяют по формуле:

$$\Phi = r^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} E(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi,$$

где  $E(\theta, \varphi)$  — это пространственное распределение освещенности в телесном углу  $\theta$  при угле наблюдения  $\varphi$ ;  $r$  — расстояние (радиус) от излучающей поверхности светодиода до условной сферической поверхности.

В качестве альтернативы, вместо того чтобы перемещать детектор, что может потребовать сложных механических приспособлений, можно использовать стационарное устройство. В этом случае перемещается сам сканируемый светодиод на элементе его крепления. Однако этот вариант измерений не может быть использован для модулей и светильников, которые имеют конвекционное охлаждение, так как тут необходимо будет учитывать поправки на указанное рабочее положение такого источника света.

На рис. 6 показана установка светодиодного гониофотометра данного типа. Угол  $\varphi$  регулируется вращением светодиода вокруг его механической

<sup>3</sup> Zhaga — консорциум компаний, специализирующихся в светотехнической области. Его общая цель состоит в разработке спецификаций для интерфейса, который позволит использовать светодиодные источники освещения от различных поставщиков на взаимозаменяемой основе, без необходимости конструктивных изменений светильника. В свою очередь, это должно ускорить процесс введения в использование светодиодов для целей общего освещения. В этой связи консорциум Zhaga разрабатывает спецификации (книги о спецификациях) для сопряжения интерфейсов светодиодных источников освещения и светодиодных светильников.

оси, а угол  $\theta$  — путем его поворота вокруг держателя (наконечника). Для обеспечения измерений на различных расстояниях детектор установлен на рельсе оптической скамьи. Большие расстояния являются необходимым условием, чтобы соответствовать требованиям дальнего поля при измерении распределения световой интенсивности. Для измерения полного потока с использованием гониометра большие расстояния не требуются. При использовании фотометрической головки с хорошей косинусной корректировкой освещенность можно точно измерить на всех углах. Интенсивность падающего излучения не является свойством лампы, а определяется светом, падающим на поверхность. Путем измерения интенсивности падающего излучения на надлежащих местах на виртуальной сфере, охватывающей лампу, полный поток может быть получен с помощью интеграции. Если выполнено условие, что при измерениях нет прямого контакта

между источником и детектором, то размер источника может быть практически равен размеру виртуальной сферы.

### Коэффициент полезного действия и световая эффективность светодиодов

Если общая оптическая мощность  $\Phi_e$  [Вт], излучаемая светодиодом, модулем или светильником, известна, то она может быть отнесена к электрической мощности  $P$  [Вт], подаваемой на них, и в результате мы получаем их коэффициент полезного действия (КПД):

$$\varepsilon_e = \Phi_e/P.$$

КПД является безразмерной величиной (единицы измерения в числителе и знаменателе одинаковы), а также зависит от условий измерения. При определении КПД источника света может также учитываться коэффициент полезного действия его драйвера, а для целей практического применения необходимо еще учитывать

деградацию параметров источника света от температуры.

Световую эффективность, или светоотдачу, вычисляют аналогичным образом, но с использованием значения общего светового потока  $\Phi_v$  [лм]:

$$n_v = \Phi_v/P.$$

Светоотдача  $n_v$  выражается в лм/Вт. Как и КПД, значение световой эффективности зависит от условий измерения, при его расчете могут также учитываться или не учитываться коэффициент полезного действия драйвера и влияние температуры. ●

*Этот текст представляет собой отрывок из справочника Handbook of LED and SSL Metrology, который опубликован компанией Instrument Systems в конце 2016 г. Рисунки в настоящей публикации, по сравнению с оригиналом, для большей ясности изложения были изменены.*

*Оригинал статьи опубликован на [www.ledsmagazine.com](http://www.ledsmagazine.com)*