

Современное состояние и перспективы развития фотометрии осветительных приборов. Часть 2¹

С.И. СТОЛЯРЕВСКАЯ¹, Е.И. РОЗОВСКИЙ²

¹ ООО «Редакция журнала «Светотехника», Москва

² ООО «ВНИСИ им. С.И. Вавилова», Москва

¹ E-mail: lights-nr@inbox.ru

Аннотация

Статья посвящена обзору материалов в части рекомендаций, методов и средств воспроизведения и передачи размеров единиц фотометрических, энергетических и фотонных величин. Рассмотрены способы воспроизведения единиц фотометрических величин и их прослеживание до основных единиц системы СИ, а также связь методов и средств передачи размеров единиц от первичных эталонов измерительным установкам испытательных центров и лабораторий и современные требования к методам и средствам испытаний осветительных приборов, используемых в системах освещения различного назначения.

Ключевые слова: оптическая радиометрия, фотометрия, колориметрия, спектрорадиометрический подход, детекторный подход, фотонные величины, гониофотометрия, фотояркоммер.

4. Измерения фотометрических характеристик современных источников света и осветительных приборов (СД ламп, СД модулей, осветительных приборов с СД)

При испытаниях современных источников света (ИС) и осветительных приборов (ОП) определяется следующий перечень световых и цветовых параметров: полный световой поток, световая отдача, парциальный световой поток, пространственное распределение силы света, яркость и распределение яркости, координаты цветности, коррелированная цветовая температура, индекс цветопередачи.

При этом выполняется анализ составляющих погрешности (неопределённости) измерений и рассчитывается суммарная погрешность с учётом

толерантного и принятого интервала для пределов неопределённости при доверительной вероятности 95%. Тolerантный интервал включает в себя погрешности, связанные со стандартными условиями тестирования (например, температура в лаборатории, напряжение питания (сети) и т.д.). Особое внимание должно уделяться толерантности при установлении производителем данных, вносимых в спецификацию на конкретный тип изделий [30, 45].

4.1. Полный световой поток

Метод измерения светового потока выбирается в зависимости от геометрических параметров тестируемого прибора (ТП) и от того, какие ещё характеристики должны быть определены в процессе измерений. Могут быть использованы методы измерения с помощью интегрирующей сферы с фотометрической головкой или спектро-радиометром. Определение светового потока может быть также выполнено на основе измеренного распределения силы света или на основе освещённости и расстояния фотометрирования.

В интегрирующей сфере для установки ТП применяют следующие конфигурации:

– 4π -геометрия, которая применяется для всех типов ТП, в том числе с СД. ТП устанавливается в центре сферы в рабочем положении. Если это возможно, то ТП ориентируют так, чтобы на экран попадало минимальное количество прямого света. Линейный ТП должен устанавливаться так, чтобы его ось совпадала с линией, проведённой между центрами фотометрической головки и сферы. Сферу калибруют с помощью эталонной лампы светового потока, которую устанавливают в том же положении, что и ТП;

– 2π -геометрия, которая применяется для ТП, в том числе с СД, с полусферическим или направленным рас-

пределением силы света (без «обратного» излучения). ТП устанавливают на стенку сферы в рабочем положении. Для предотвращения прямого освещения приёмника источником света следует использовать экран. Сферу калибруют с помощью эталонной лампы светового потока с полусферическим распределением, которую устанавливают в том же положении, что и ТП.

Если ТП и эталонная лампа светового потока имеют различные размеры и отражательные характеристики, то должен применяться коэффициент коррекции самопоглощения, который определяют с использованием вспомогательной лампы. Для комплекса сфера-спектро-радиометр коррекцию самопоглощения выполняют на основе спектральных измерений.

Кроме того, должны быть оценены и скорректированы различия в угловых распределениях излучения ТП и эталонной лампы светового потока.

4.2. Парциальный световой поток

Для определенного угла конуса α парциальный световой поток получают посредством интегрирования в пределах соответствующего телесного угла значений силы света $I(\theta, \varphi)$, измеренных с помощью гониофотометра с шагом сканирования $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$.

При определении парциального светового потока для углов конуса 90° и более измерения должны проводиться с шагом сканирования не более 5° для углов θ (угол γ в системе координат (C, γ)) и не более 45° для углов φ (угол C в системе координат (C, γ)). Меньший угловой шаг сканирования может применяться для ТП специального применения (например, для уличных светильников).

4.3. Световая отдача

Световая отдача η_v – это отношение светового потока Φ , излучаемого ИС или ОП, к потребляемой им электрической мощности P_{tot} :

$$\eta_v = \Phi / P_{tot} \quad (6)$$

Методики измерения светового потока приведены выше, а к характеристикам приборов электропитания и измерения электрических характеристик ОП во время тестирования предъяв-

¹ Первая часть статьи опубликована в: Светотехника. – 2017. – № 4. – С. 4–13.

ляется ряд специальных требований [30]:

- измерения напряжения, тока и мощности постоянного и переменного тока должны выполняться прецизионным оборудованием;

- погрешность калибровки вольтметров переменного и постоянного тока не должна превышать 0,2% и 0,1% соответственно;

- погрешность калибровки измерителя мощности (анализатора мощности) переменного тока не должна превышать 0,5% при частоте порядка 100 кГц. Более низкие частоты (5 кГц или 30 кГц) приемлемы, если отсутствуют компоненты с частотой выше 30 кГц;

4.4. Распределение силы света

При измерениях пространственного распределения силы света, кроме особо оговоренных случаев, применяется система координат (C, γ) [46].

Угловой интервал между значениями силы света в вертикальной плоскости и угловой интервал между соседними вертикальными плоскостями должны быть такими, чтобы полученное распределение силы света позволяло провести интерполяцию результатов измерений с удовлетворительной точностью. Число плоскостей определяется характером распределения (симметричное или неоднородное) и конечной целью измерений. Измерения распределения силы света проводят на гониофотометре.

4.5. Осевая сила света и угол излучения

При определении распределения силы света с помощью гониофотометра направление $(0,0)$ обычно совпадает с оптической осью источника излучения, которая проходит через фотометрический центр и перпендикулярна светоизлучающей плоскости (за исключением особых требований производителя).

4.6. Измерение яркости

Для достаточно однородной светящейся поверхности могут использоваться следующие методические подходы к измерению яркости:

- измерение средней яркости всего ОП в одном или нескольких направлениях. Для этого сначала с помощью гониофотометра измеряется сила све-

та (её распределение), а затем посредством деления силы света на площадь светящейся поверхности рассчитывается средняя яркость этой поверхности;

- метод измерения «пятна яркости», который используют для оценки пространственной неравномерности яркости больших уличных светильников [46]. При этом в одном или нескольких направлениях измеряют среднюю яркость маленьких площадок (пятен яркости) на светящейся поверхности светильника. Количество и положение этих площадок должны быть указаны в технической документации. Измерения проводят с помощью гониофотометра в заданном направлении или с помощью яркомера, измеряющего среднюю яркость каждого пятна. Данный метод применяют для ОП с СД, которые не имеют рассеивателей, то есть представляют собой совокупность точечных источников света.

5. Измерение колориметрических характеристик современных ИС и ОП (СД ламп, СД модулей, ОП с СД)

Для измерения колориметрических характеристик следует использовать спектрорадиометры. Трехканальные колориметры не обладают достаточной точностью при измерениях абсолютных значений колориметрических величин, поэтому могут использоваться только для определения цветовых различий.

Значения колориметрических характеристик СД ламп, СД модулей и ОП с СД могут иметь угловую неоднородность.

Колориметрические или спектральные измерения выполняют вдоль заданного направления или для нескольких направлений (пространственное распределение) с использованием комплексов гониометр-колориметр или гониометр-спектрорадиометр. Пространственно усредненные результаты измерений могут быть получены с использованием следующих методов:

- измерения с помощью комплекса сфера-спектрорадиометр спектрального распределения полного светового потока с последующим пересчётом в пространственно усредненные колориметрические характеристики;

- измерения с помощью комплекса гониометр-спектрорадиометр спектрального распределения потока из-

лучения с пересчётом результатов измерений в полный световой поток и пространственно усреднённые колориметрические характеристики;

- измерения с помощью комплекса гониометр-колориметр координат цвета $X(\theta, \phi)$, $Y(\theta, \phi)$, $Z(\theta, \phi)$. Пространственно интегрированные координаты цвета рассчитываются по формулам:

$$X = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} X(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi, \quad (7)$$

$$Y = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} Y(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi, \quad (8)$$

$$Z = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} Z(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi. \quad (9)$$

Координаты цветности, коррелированная цветовая температура и другие колориметрические характеристики рассчитываются с использованием координат цвета.

Индекс цветопередачи может быть получен только с помощью спектрорадиометрических методов [47].

5.1. Коррелированная цветовая температура (для белых СД источников света)

Цветность можно характеризовать коррелированной цветовой температурой и параметром цветового различия D_{in} , которое соответствует определённому расстоянию от кривой для излучателя Планка в системе координат МКО $(u', 2/3v')$. Это расстояние положительно для точек над кривой и отрицательно для точек под кривой. Расчет коррелированной цветовой температуры выполняют в соответствии с рекомендациями МКО [48].

5.2. Угловая цветовая однородность

Угловая цветовая однородность определяется [49] как наибольшее отклонение координат цветности (u', v') СД источника излучения в разных направлениях от пространственно усреднённых координат цветности (u'_a, v'_a) и рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{u', v'} = \sqrt{(u' - u'_a)^2 + (v' - v'_a)^2}. \quad (10)$$

Координаты цветности (u', v') измеряют с помощью комплексов го-

ниометр-колориметр или гониометр-спектрорадиометр с интервалом вертикального угла не более 10° (рекомендуется $2,5^\circ$) и интервалом горизонтального угла не более 90° (рекомендуется $22,5^\circ$). Для ламп с отражателями угловой шаг должен быть не более $1/10$ угла излучения, но не более 10° . Результатами измерений в точках, где сила света составляет менее 10% от максимальной, при расчётах можно пренебречь.

Средние значения координат цветности (u'_a, v'_a) получают с помощью комплексов гониометр-колориметр, используя рассчитанные по формулам (7–9) значения координат цвета X, Y, Z .

6. Погрешности (неопределённости) измерений

Для всех измеряемых характеристик расширенную неопределённость рассчитывают при доверительной вероятности 95%. Расширенная неопределённость определяется с точностью до двух значащих цифр. Каждый протокол испытаний должен содержать сведения о значениях неопределённостей, обусловленных методиками измерений параметров и условиями тестирования [30].

Лаборатории должны иметь подробный бюджет неопределённостей для продукции одного типа. Если такой бюджет неопределённостей сформирован для ряда изделий, параметры которых имеют известный диапазон (например, цветовую температуру от 2700 до 4000 К), то устанавливается максимальное значение неопределённости внутри диапазона.

Коррекция результатов испытаний может проводиться только с использованием характеристик конкретного ТП, но не подобной продукции.

Для распределения силы света неопределённость измерения должна быть оценена, по крайней мере, в одном направлении, в котором сила света достаточно равномерна. Неопределённость установки угла (включая положение ТП в гониометре) представляют отдельно. Для распределения яркости неопределённость измерения должна быть представлена по крайней мере в одной точке, где распределение яркости достаточно однородное.

Суммарный бюджет неопределённостей должен учитывать следующие факторы:

– точность установки температуры и неопределённость измерений температуры;

– точность установки электрических параметров и неопределённость электрических измерений;

– пульсации излучения ТП;

– калибровочный стандарт (данные из сертификата калибровки);

– рабочие характеристики калибровочного стандарта (старение, электрические измерения, процесс калибровки);

– линейность измерительных приборов;

– воспроизводимость и повторяемость.

Для всех измерений бюджет неопределённостей должен формироваться с учётом вклада не только измерительного комплекса и методики измерений, но и конкретных характеристик ТП. Кроме указанных выше, в бюджете неопределённостей при измерениях световых и цветовых характеристик следует учитывать и факторы, приведённые в табл. 1.

Кроме того, в бюджете неопределённостей следует учитывать следующие факторы:

– полосу пропускания измерителя мощности переменного тока (влияние, коррекция);

– входное сопротивление измерителя мощности переменного тока.

Корреляция между значениями светового потока и электрической мощностью должна применяться для оценки снижения неопределённости измерений. Например, если потребляемый ток влияет как на световой поток, так и на электрическую мощность ТП в одном и том же направлении и с одной и той же чувствительностью, то этот фактор при оценке неопределённости измерения световой отдачи можно не учитывать.

Общее описание определения неопределённостей в фотометрии приведено в [50, 51].

7. Заключение

1. На рубеже веков Международное бюро мер и весов совместно с мировой научной общественностью проделало большую работу по переопределению основных единиц системы СИ на основе физических констант и их фотонной природы, что обеспечивает повышение точности воспроизведения и прослеживаемости соответ-

ствующих величин и единство измерений в целом на более высоком уровне.

2. Определение канделы 1979 г. фактически даёт значение световой эффективности для функции усреднённого дневного зрения человека на длине волны 555 нм, и кандела, оставаясь основной единицей системы СИ, является единицей измерения эффективной величины – силы света, как это было и раньше.

3. Современное осветительное оборудование заставило внимательнее относиться к реалиям зрительного восприятия, например, при освещении улиц и дорог ОП с СД, и ввести фотометрию в условиях сумеречного зрения в оценку, в первую очередь, дорожного освещения.

4. Применение ОП с СД привело к повышению требований к точности испытательного оборудования, применению исключительно методов абсолютной фотометрии, превалянию спектрорадиометрического подхода над детекторным (интегральным) в области оптической радиометрии.

5. Проблемы реализации спектрорадиометрического подхода в фотометрии связаны с отсутствием (в мировой практике) эталонных источников света спектральной плотности потока излучения, которые необходимы испытательным лабораториям, т.к. любой спектрорадиометр в составе гониометра, сферы или спектрорадиометрического стенда является лишь компаратором спектральных характеристик эталонных источников и ТП.

6. Рассматривая реалии современной фотометрии с точки зрения российской действительности, необходимо отметить, что вся система испытаний строится на импортном оборудовании, которое необходимо везти, сертифицировать, внести в реестр средств измерений РФ и поверять ежегодно, что существенно удорожает процедуру испытаний светотехнической продукции.

7. Вопросу состояния отечественного приборостроения в области фотометрии и колориметрии ОП необходимо уделить особое внимание и оказать поддержку российским производителям в направлении разработки и производства современных информационно-измерительных систем и прецизионного приборостроения в целях оснащения им светотехнической отрасли России.

Факторы, определяющие суммарную погрешность метода измерения

Определяемая характеристика	Применяемое оборудование	Составляющие погрешности
Световой поток, сила света, яркость	Классический гониофотометр	<ul style="list-style-type: none"> – рассеянный свет (пространственный); – точность установки ТП; – спектральное несоответствие; – неравномерность приемной площадки детектора; – косинусная погрешность приёмника излучения; – неопределённость измерения расстояния, если используется режим измерения освещённости. – неравномерность (отклонения от плоскостности) зеркал и эффекты поляризации; – спектральная неоднородность отражения от зеркал.
Световой поток	Сфера и фотометр	<ul style="list-style-type: none"> – самопоглощение в сфере; – тепловой режим; – пространственная и спектральная неоднородность коэффициента отражения поверхности сферы; – отражения внутри сферы; – спектральное несоответствие (детектор + сфера, различия в спектральном распределении эталонного источника и ТП); – воспроизводимость измерений при открывании и закрывании сферы; – стабильность коэффициента преобразования сферы между калибровками; – косинусная погрешность фотометрической головки; – эффект флюоресценции покрытия сферы.
Световой поток, распределение силы света, осевая сила света, спектральное распределение потока излучения, яркость, распределение яркости	Сфера и спектро радиометр	<ul style="list-style-type: none"> – самопоглощение в сфере; – тепловой режим; – пространственная и спектральная неоднородность коэффициента отражения поверхности сферы; – отражения внутри сферы; – пространственная неоднородность чувствительности; – погрешность установки длины волны; – рассеянный свет в спектро радиометре; – спектральный интервал спектрометра; – воспроизводимость измерений при открывании и закрывании сферы; – стабильность коэффициента преобразования сферы между калибровками; – косинусная погрешность входа спектро радиометра; – эффект флюоресценции покрытия сферы.
Световой поток, распределение силы света, осевая сила света, спектральное распределение потока излучения, яркость, распределение яркости	Гониофотометр и спектро радиометр Гониофотометр ближнего поля	<ul style="list-style-type: none"> – равномерность зеркал и влияние поляризации; – спектральная отражательная способность зеркал; – рассеянный свет (пространственный); – точность установки ТП; – приёмная площадка детектора; – косинусная погрешность; – точность установки длины волны; – внутреннее рассеяние спектро радиометра; – спектральная ширина щели спектро радиометра; – неопределённость определения расстояния, если спектро радиометр калибруется по эталону спектральной плотности энергетической освещённости; – неопределённость, вызванная отражением зеркал, если спектро радиометр калибруется по эталону спектральной плотности энергетической яркости.
Цветовые характеристики	Сфера и спектро радиометр, гониофотометр и спектро радиометр	<ul style="list-style-type: none"> – корреляции, связанные с неопределённостью измерения цветовой температуры калибровочного источника излучения; – внутреннее рассеяние спектро радиометра; – спектральная ширина щели спектро радиометра; – точность установки длины волны; – линейность в динамическом диапазоне во всем спектральном интервале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ²

30. CIE S025/E:2015: Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules.
31. CIE S009 / E:2002 / IEC62471:2006 Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems.
45. ISO/IEC GUIDE98-4.
46. CIE121-1996. The Photometry and Goniophotometry of Luminaires.
47. CIE13.3.:1995. Method of Measuring and Specifying Colour Rendering of Light Sources.
48. CIE15:2004. Colorimetry, 3rd Edition.
49. CIE TN001:2014.
50. CIE198:2011. Determination of Measurement Uncertainties in Photometry.
51. CIE198:2011. Determination of Measurement Uncertainties in Photometry – Supplement1: Modules and Examples for the Determination of Measurement Uncertainties.

² Полный список литературы приведен в 1-ой части статьи (Светотехника. – 2017. – № 4. – С. 4–13).



Столяревская Раиса Иосифовна, доктор техн. наук. Окончила в 1968 г. физический факультет Казанского государственного университета. Зам. главного редактора журнала «Светотехника» и научный редактор англоязычной версии журнала «Light & Engineering».

Представитель Российского национального комитета МКО в Отделении 2 МКО



Розовский Евгений Исаакович, кандидат техн. наук (1984 г.). Окончил МЭИ в 1971 г. Ведущий научный сотрудник ООО «ВНИСИ им. С.И. Вавилова». Старший научный редактор

журнала «Светотехника». Эксперт от РФ в ТК 34 МЭК «Источники света и сопутствующее оборудование»

Компания Everlight представила ИК диод для опознавания личности по радужной оболочке глаза

Компания Everlight выпустила новый ИК излучающий диод для опознавания личности по радужной оболочке глаза. Этот прибор, серии «NIR-C19M», излучает на длине волны 810 нм, что даёт наилучший контраст для считывания узора радужной оболочки глаза.



Everlight утверждает, что опознавание производится точно и быстро, причём этот прибор прекрасно рассеивает тепло, позволяя использовать его для опознавания по радужной оболочке в системах наблюдения служб безопасности

(пропускной контроль) и в соответствующих носимых устройствах.

Диод включает в себя современный процессор изображений и КМОП-датчик, принимающий отражённое глазом ИК излучение для проведения опознавания по радужной оболочке.

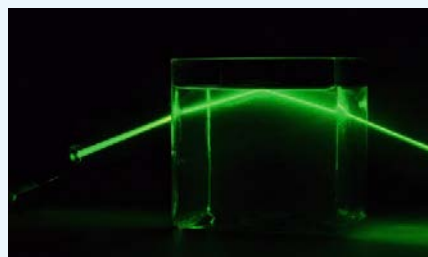
Его оптическая система обеспечивает хорошее отражение, небольшой угол излучения (поле зрения = 25°) и силу излучения 2700 Вт/ср при токе не более 1000 мА.

Компанией заявлено, что тепловое сопротивление диода (4,38 К/Вт) обеспечивает лучшее, чем у любых других представленных на рынке конкурирующих изделий, рассеяние тепла. Этот прибор выдержал испытания на соответствие стандарту IEC62471, выполнение требований которого подтверждает отсутствие его опасности для глаз и кожи людей. Размеры диода – 3,5×3,5×2,3 мм.

compoundsemiconductor.net
30.08.2017

Бактериальное «оптическое волокно» позволит свету лазера проходить сквозь мутную воду

Присутствие частиц в жидкости или газе заставляет рассеиваться свет, проходящий через эту среду. Именно поэтому свет автомобильных фар не может пробиться далеко через густой туман или сильный снегопад. Точно так же свет не может распространяться далеко сквозь мутную воду, но Чень Чжи-ган (Zhigang Chen), исследователь из университета Сан-Франциско, случайно нашёл весьма необычное решение этой проблемы. Во время одних из своих исследований он нацелил луч интенсивного зелёного лазерного света на резервуар с морской водой, в которой находилось большое количество бактерий вида *Synechococcus*. И неожиданно для учёного свет начал проникать сквозь мутную воду гораздо дальше, чем этого можно было ожидать.



Эффект улучшенного распространения лазерного света в воде – следствие того, что у клеток микроорганизмов показатель преломления света другой, чем у морской воды. В данном случае каждая клетка выступает

в роли микроскопической линзы, фокусирующей и усиливающей проходящий сквозь неё свет. Кроме того учёные наблюдали ещё один интересный эффект: лазерный луч большой интенсивности в водной среде выполняет роль оптического пинцета, который притягивает клетки и выравнивает их вдоль пути своего распространения. И через непродолжительное время в водной среде формируется бактериальное «оптическое волокно», проводящее свет гораздо лучше мутной морской воды.

Исследователи провели несколько экспериментов, в которых использовалась вода с разным количеством находящихся в ней бактерий. И даже при самой малой их концентрации дальность распространения лазерного света увеличивалась на несколько сантиметров. Несмотря на то, что бактерии освещались достаточно сильно, большинству из них удалось выжить и продолжить нормальное существование после отключения лазера.

В ближайшем времени учёные планируют провести подобные эксперименты, но уже не с бактериями, а с разными типами кровяных клеток (эритроциты и лейкоциты). И если эти клетки также смогут формировать «оптическое волокно», то этот эффект можно будет использовать в медицине для неразрушающей диагностики, съёмки внутренних частей органов без необходимости хирургического вмешательства.

dailytechinfo.org
27.08.2017