

# Проблемные вопросы радиометрических измерений

О.М. МИХАЙЛОВ<sup>1</sup>

Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, Санкт-Петербург

## Аннотация

Современные методы измерений в области фотометрии и колориметрии всё более склоняются в сторону использования значений спектральной плотности фотометрической величины для определения как интегральных эффективных величин, так и для измерений значений колориметрических величин самосветящихся и несамосветящихся источников излучения, применяемых в осветительных установках и световых приборах. Это связано с ограничением использования ламп накаливания и расширением масштаба применения энергоэффективных современных источников излучения в технике освещения. Данная публикация (заметки) посвящена проблемным вопросам спектральных измерений оптического излучения в широкой области спектра.

**Ключевые слова:** энергетическая фотометрия, визуальные измерения, корректирование, эффективность, погрешность, спектральная плотность величины, компьютерное преобразование, светодиод, цветность излучения, электролюминесценция, пространственное распределение излучения.

## 1. Обращение к читателям

Выбор тематики статьи обусловлен родом и направлением деятельности автора и интересом к подобной научной направленности со стороны читателей. Поднятая тема является основополагающим аспектом деятельности практически всех фирм и учебных заведений по научному направлению энергетической фотометрии, являющейся, в свою очередь, неотъемлемой частью светотехники.

Цель данных заметок – побудить читателей к дискуссии или высказываниям по поднятой проблеме.

## 2. Светодиоды, традиционные источники, энергосбережение и эффективность

Эффективная величина «световой поток  $\Phi_v$ », в люменах, естественно, отличается от «потока излучения  $\Phi_e$ » ( $\Phi_e = \int \Phi_e(\lambda)d\lambda$ ), в Ваттах:

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda)V(\lambda)d\lambda,$$

где  $K_m$  – максимальная спектральная световая эффективность ( $K_m = 683$  лм/Вт);

$\Phi_e(\lambda)$  – функция спектральной плотности потока излучения, Вт/нм;

$V(\lambda)$  – функция относительной спектральной световой эффективности излучения для дневного зрения стандартного фотометрического наблюдателя МКО.

Таким образом, световой поток – эффективная величина, образованная в результате воздействия электромагнитного излучения на глаз, тогда как на окружающие предметы воздействует не свет, а электромагнитное излучение. Изменения, которые происходят в объекте, зависят от его свойств и  $\Phi_e(\lambda)$ .  $\Phi_e$  обуславливается не только видимым участком электромагнитного излучения, а большим спектральным диапазоном. Для оценки (не для измерений световых характеристик) системы освещения, осветительных установок зачастую используются методики, основанные на зрительном восприятии. В то же время оценку  $\Phi_e$  проводить по зрительному ощущению недопустимо.

Измеренная в люксах освещённость на заданной плоскости может быть одинаковой от разрядной лампы, лампы накаливания (ЛН) или светодиода (СД). Существенное различие спектров излучения этих источников света ведёт к погрешностям измерения освещённости интегральным люксметром, связанным с качеством коррекции измерительного прибора под кривую  $V(\lambda)$ .

СД мало излучают в фиолетовой ( $\lambda < 440$  нм) и дальней красной ( $\lambda > 680$  нм) областях видимого спектра. Поэтому передача цвета по сравнению со стандартными излучателями МКО у них другая. (Вы можете не узнать свою машину по цвету на подземной парковке, освещённой светодиодами с СД.)

В России, как и во всём мире, пропагандируется переход от тепловых источников излучения к электролюминесцентным (СД и разрядным компактным лампам). СД (неорганические) обладают специфическими оптико-физическими свойствами и требуют для своей работы меньших энергозатрат, а срок службы их определяется, во многом, пускорегулирующими устройствами. В то же время экономически (из-за высокой цены) они уступают традиционным ЛН и даже КЛЛ. Электролюминесцентный источник излучения – это современное высоконадёжное полупроводниковое устройство «невакуумной» конструкции, в котором энергия электрического поля непосредственно преобразуется в излучение, что определяет его небольшую потребляемую мощность.

Основные характеристики световых приборов с СД – спектральный состав излучения,  $\Phi_e$ , зависимость яркости от напряжения, тока и их частоты, потребляемая мощность, световая отдача и срок службы. Цвет излучения люминофора и спектр излучения СД зависят от применяемого активатора, его концентрации и режима возбуждения. Существенным ограничением срока службы СД является старение (деградация) электролюминофора в процессе работы, приводящая к снижению яркости и изменению колориметрических характеристик. Цвет излучения может быть любым, в том числе белым любых оттенков. СД-источники излучения («новые») и, например, КЛЛ и традиционные ЛН («старые») источники излучения должны подвергаться комплексным испытаниям на предмет передачи цветовых отличий, воспроизводимости параметров излучения и экономической целесообразности применения в устройствах разного назначения.

Увеличение стоимости энергоносителей и ужесточение требований экологической безопасности настойчиво заставляют заниматься экономией электроэнергии для городско-

<sup>1</sup> E-mail: mom1938@mail.ru

го и бытового освещения. По сравнению со «старыми» источниками излучения СД (неорганические) имеют высокую эффективность преобразования электрической энергии в энергию излучения, а органические СД обладают достаточной яркостью, небольшим потоком излучения и длительным сроком службы. В то же время органические СД экологически более безопасны по сравнению с СД, производство которых с точки зрения экологии удовлетворительным назвать нельзя. Органические СД для систем освещения только начинают свой жизненный путь. В отличие от СД, из них можно изготавливать однородно светящие неслепящие поверхности с высоким общим индексом цветопередачи.

Воспроизведение большинства цветов, в том числе коричневого, золотого, пурпурного и др., при освещении объекта осветительным прибором с СД весьма неудовлетворительно. Само же понятие «цветопередача» требует новой терминологической обоснованности, как и коррелированная цветовая температура.

Всё это лежит в основе того, что определение параметров осветительных приборов с СД необходимо дополнять с применением объективных спектральных приборов и спектрорадиометрических методов измерений. Это достаточно новое явление в рутинных световых и цветовых измерениях, для которых типичными и повсеместными были интегральные методы измерений значения эффективных величин с помощью фотометров и колориметров. При этом относительная спектральная чувствительность фотоприёмных устройств (ФПУ) подобных приборов должна была корректироваться под относительную спектральную кривую задачи измерений.

### 3. Необходимость корректирования, погрешности световых и цветовых измерений

Необходимость указанного корректирования ФПУ несомненна в случае измерения разных интегральных эффективных величин. Классические эффективные величины – световые. Кроме них существуют эффективные величины, определяемые, например, функциями (кривыми) фотобиологической опасности

для сетчатки в ИК и синей областях спектра, эритемной, бактерицидной, фотосинтезной кривыми и функциями сложения в колориметрии. Большинство методов корректирования используют установку в оптическую схему фотоприёмника селективно отрезающих цветных светофильтров из разных материалов. Определения марки светофильтров и их толщин по известной чувствительности фотоприёмника современными вычислительными средствами трудностей не представляют. Правда, сами эти процедуры довольно громоздки, так как должны учитываться разбросы чувствительности ФПУ, категории варки, например, стеклянных светофильтров и габаритные размеры выходного приспособления. Корректирующий светофильтр может состояться тремя способами: субтрактивный способ (*B*), когда цветные стёкла накладываются друг на друга и перекрывают весь пучок излучения, вычитая нерабочие области спектра; аддитивный способ (*A*) – когда цветные стёкла располагаются рядом и перекрывают разные части сечения пучка, суммируя полезные области спектра; комбинированный способ (*C*) – комбинация двух первых способов, когда к светофильтру, составленному по способу *B*, добавляются два стекла разной окраски по способу *A*, перекрывающие некоторые регулируемые части пучка.

Особая трудность и проблема возникают при контроле качества исправления относительной спектральной чувствительности фотометра под заданную кривую измерительной задачи. Существовавшие методы оценки по пяти лампам и значениям специфических величин  $\Delta$ ,  $f_z$  и  $f_1$  в современных условиях не всегда корректны [1, 2]. Широкое развитие квазимонохроматических излучателей (СД, органические СД и полупроводниковые лазеры) позволяет опираться на спектральную оценку или проверку по квазимонохроматическому излучению цветных СД.

В отличие от любых других измерений погрешность световых и цветовых измерений связана не только с классическими положениями теории погрешности, но и с методом градуировки и видом измеряемой зависимости. Уровень излучения или его цвет измеряются во всём их при-

родном многообразии, а градуировка производится по стандартному излучению МКО. Погрешность градуировки легко рассчитывается, а погрешность измерения конкретного излучения, особенно сложного или линейчатого состава, подчас трудно предсказуема. Эталоны цветности излучения могут быть только спектрально чистые излучения и цветности излучения чёрного тела при разной температуре. При этом погрешность интегрального метода измерений продукции, имеющей спектр, отличный от спектра эталонного излучателя, будет значительной из-за неопределённости оценки качества коррекции применяемого фотометра или колориметра.

Сейчас появилась возможность проводить точные измерения интегрального эффективного излучения путём определения относительного спектра исследуемого излучения и компьютерного расчёта эффективного потока по табличным данным МКО. Качество корректирования при этом не учитывается, так как оно практически идеально, но погрешность измерения, например, световых величин будет зависеть целиком от точности измерения спектральной плотности искомой характеристики. В современных условиях необходимо использовать стабильный высокочувствительный приёмник оптического излучения (ПОИ), развитую компьютерную технику и обязательный экспериментальный массив результатов измерения уровня некогерентного излучения. Эксперименты подтвердили возможность световых измерений спектрорадиометрическими методами. Современные спектрорадиометры имеют выход на компьютер и программное обеспечение, в которое входят табулированные функции сложения для расчёта колориметрических и фотометрических величин. При этом легко находить  $E_v$  в режиме как бы «безпогрешностного» измерения значения световой величины в любом разумном спектральном интервале видимого диапазона, определяя  $E_c(\lambda)$  – функцию спектральной плотности энергетической освещённости.

Кроме того, есть идеи новых физических моделей эталонных источников излучения: например светового люмена. Световой люмен – источник

излучения, относительная  $\Phi_e(\lambda)$  которого повторяет  $V(\lambda)^2$ .

Легированный европием материал тиагаллат стронция является перспективным составом для изготовления эффективных люминофоров, испускающих излучение зелёного цвета и работающих при низком возбуждающем напряжении.

Спектральные характеристики (рис. 1) исследуемых образцов показывают, что после соответствующей обработки можно получить материал, обладающий большой яркостью фотолюминесценции. Дальнейшие технологические операции (радиационное, гамма- и электронно-лучевое модифицирование) позволяют изменять вид спектра излучения и смещать значение пиковой длины волны  $\lambda_m$  на  $\pm 50$  нм. Новизна данной разработки очевидна, а практическую значимость следует всесторонне обсудить.

#### 4. Спектральные измерения вообще

К спектральным измерениям относятся измерения: спектральной плотности параметров излучения; спектральной чувствительности фотоприёмников и ФПУ; спектральных коэффициентов пропускания и отражения материалов, газообразных и конденсированных сред.

Определение спектральных характеристик материалов и сред, в принципе, решается с помощью специализированных спектрофотометров, выпускаемых на основе прецизионных сканирующих монохроматоров, или предназначенных для рутинных измерений ПЗС-спектрометров. Такого же типа диспергирующие приборы могут использоваться для измерения спектральных характеристик источников излучения методом сравнения с эталонным источником спектрального

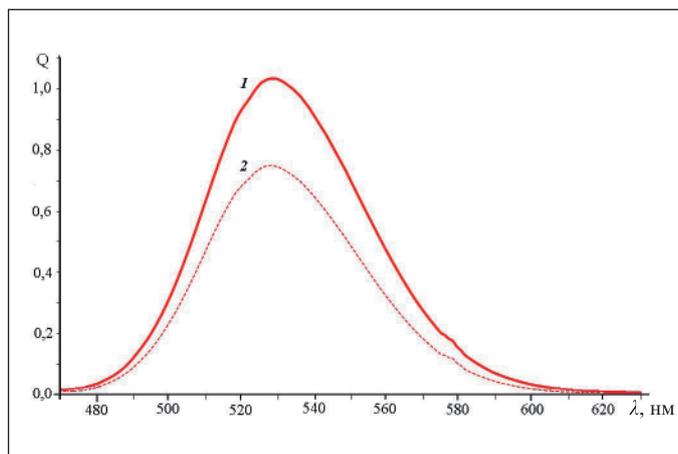


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции исследуемых плёнок  $SrGa_2S_4:Eu$  (тиагаллат стронция) после отжига в парах серы с электронно-лучевой обработкой (1) и без неё (2)

распределения требуемой характеристики. Трудности, вполне преодолимые, могут возникать при регистрации значения спектральной плотности мощности (энергии) импульсного, лазерного и многолинейчатого излучения. В значительной степени они обусловлены спектральным (сотые доли нанометра), временным (переходная импульсная характеристика до единиц пикосекунд) и пространственным (вид индикатрисы, поляризация) разрешением. Здесь надо обратить внимание на два обстоятельства: рассеивание излучения диспергирующей системой (и высшие порядки разложения) и самопоглощение собственного излучения плазмой в импульсном разряде. Регистрация импульсов излучения малой длительности нуждается в применении приёмника излучения, постоянная времени которого не превышает  $10^{-10}$  с. С рассеянным излучением бороться очень сложно. Следует применять механические диафрагмы и шторки, смену приёмника или, как при исключении высших порядков разложения дифракционной решётки, отрезающие полосовые светофильтры. В импульсном разряде спектральное распределение, например, силы излучения и спектральное распределение энергии излучения различны. Объясняется это сложными физическими процессами в разряде. На повышение точности подобных спектральных измерений определённое влияние оказывает абсолютизация получаемых данных и стабильность работы объекта измерений, так как за один импульс получить полный спектр невозможно (разложение в ряды Фурье не рассматриваем).

Интегральные по длинам волн измерения параметров излучения в разных участках оптического спектра

всегда остаются проблемой, разрешаемой принятием определённых договорённостей на международном уровне. В ИК области спектра применяют коэффициент использования. В видимой области – систему световых величин. В УФ диапазоне – целенаправленные эффективные потоки (бактерицидный, эритемный и др.). Применение для регистрации спектра неселективных приёмников обеспечивает достоверное и точное измерение излучения любого вида. Ослабление же и модификация воздействующего излучения в конкретных измерительных задачах не имеет к этим результатам никакого отношения. Способы абсолютизации данных радиометрических и спектрометрических измерений нуждаются в обсуждении. Наиболее точные способы самокалибровки и моделей чёрных тел имеют несомненные преимущества и определённые недостатки [4, 5]. Разделение УФ области на области УФ-А, УФ-В и УФ-С, а ИК области на ближнюю и дальнюю области ограничивает использование надёжных и достоверных методов. П-образное распределение никогда не достигается имеющимися средствами, а компьютерная обработка спектральных измерений легко справляется с этой задачей. Слепое следование разделению на подобласти (зоны) ведёт к серьёзным ошибкам измерения значений величин энергетической фотометрии, так как излучение «не знает», что оно нарезано искусственно. Истинное воздействие излучения на объекты и среду регистрируется с огромной погрешностью.

Спектральную чувствительность приёмника  $S(\lambda)$  можно оценивать квантовым выходом  $Q$ , т.е. отношением числа фотоэлектронов к числу па-

<sup>2</sup> Современные достижения в нано- и химической технологиях позволяют предложить неожиданный и весьма дискуссионный метод создания модели источника излучения заданного спектрального состава, который и можно назвать «световой люмен». Суть предложения в том, что с помощью воспроизводимых технологических приёмов компоновки электролюминесцентных источников излучения образуется источник света,  $\Phi_e(\lambda)$  которого по виду приближается к  $V(\lambda)$  [3].

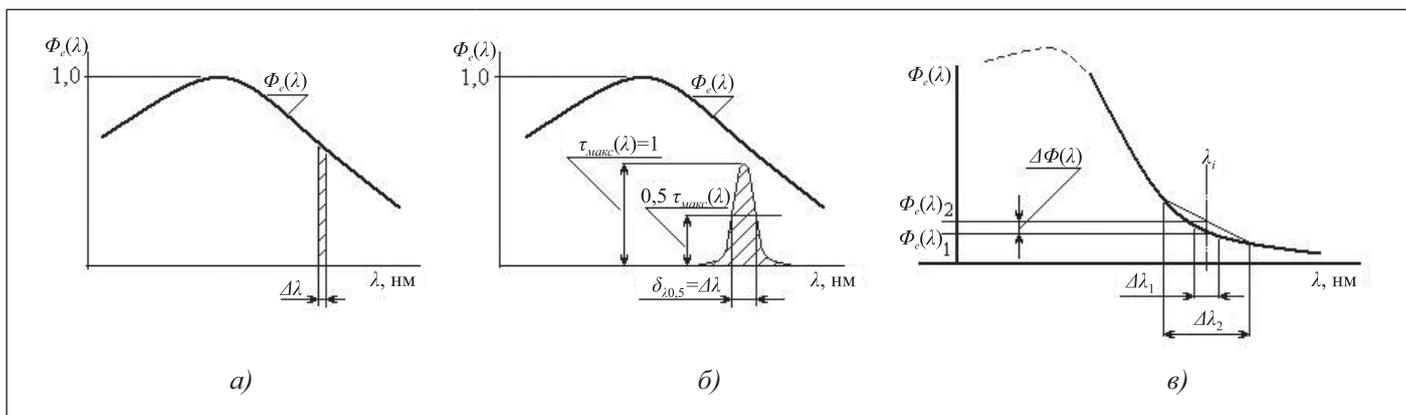


Рис. 2. Особенности спектральных измерений: спектральное разрешение (а), интерференционный фильтр (б) и влияние ширины щели (в)

дающих на чувствительную поверхность квантов:

$$Q = \frac{I \cdot h \cdot c}{\Phi_e \cdot n \cdot e \cdot \lambda};$$

где  $I$  – реакция приёмника,  $n$  – показатель преломления воздуха. Сделаем необходимые преобразования, получим при квантовом выходе, равном 1, формулу для  $S(\lambda)$ :

$$S(\lambda) = I / \Phi_e = (\lambda \text{ [нм]} / 1239,5) \text{ [А/Вт]}$$

Некоторые фотоприёмники, например, кремниевые и германиевые фотодиоды в определённой области спектра имеют квантовый выход, равный 1. В силу ряда причин не все фотоны при этом работают на фотоэффект. Часть их отражается от границы раздела (поверхность ФПУ – внутренний чувствительный слой). Тогда  $S(\lambda) = \alpha(\lambda) \cdot \lambda / 1239,5 \text{ [А/Вт]}$ . В особо расположенных нескольких однотипных приёмниках за счёт увеличения показателя экстинкции (доли невозвращённого излучения) путём многократного использования отражённого излучения [5] значения  $\alpha(\lambda)$  заставляют стремиться к 1. В этом случае абсолютная спектральная чувствительность (явление самокалибровки) определяется первым выражением. Необходимо измерять только ток в электрической цепи приёмника и длину волны излучения. Зная абсолютную привязку на одном участке кривой  $S(\lambda)$ , легко перейти на весь диапазон чувствительности по длинам волн, измерив относительную спектральную чувствительность используемого приёмника излучения. Немало-

важным обстоятельством при широкополосных спектральных измерениях в энергетической фотометрии является красная граница фотоэффекта, т.е. длина волны, для которой наличие чувствительности приёмника излучения означает ошибку измерения.

Следует обсудить и методики равноспектральной и равносигнальной фотометрии и радиометрии. Первая чаще используется при измерении спектральной чувствительности ФПУ, а вторая – при измерении спектральной плотности параметров излучения. Обусловлено такое положение тем, что в первом случае необходимо исключить влияние рассеянного излучения, а во втором – стремиться работать на линейном участке характеристики «выходной сигнал приёмника/входное воздействие излучения».

Измерение спектральной чувствительности ФПУ остаётся трудоёмким и сложным звеном в общей проблеме энергетической фотометрии. Это обусловлено: во-первых, необходимостью измерять приборы разного класса (термоэлементы, фотоэлементы, фотоумножители, фотодиоды, ПЗС и т.п.); во-вторых, необходимостью использования специального оборудования (вакуум, тепло); в-третьих, трудностями метрологического обеспечения, в том числе необходимостью наличия достоверных приспособлений, модифицирующих излучение в разных участках спектра. Перепад чувствительности многих фотоприёмников достигает нескольких порядков. На красной границе чувствительности устройства возникает трудноразрешимая проблема её измерения. Она связана со спектральным разрешением диспергирующего прибора (рис. 2).

Предпочтение в выборе образцовых средств должно отдаваться требованиям равноспектральной фотометрии. Достоверность и надёжность измерения чувствительности подтверждается такими факторами, как сохранение информативного параметра при многократных измерениях, сличения результатов измерений при использовании разных установок и методов определения абсолютного значения. В качестве одного из методов определения используют явление самокалибровки. Абсолютная спектральная чувствительность в областях спектра, в которых наблюдается постоянство квантового выхода, устанавливается с помощью двух операций измерения. Сначала измеряется коэффициент отражения чувствительной площадки, а затем ток в цепи приёмника без использования мер сравнения. Спектральный прибор, в составе которого имеется приёмник с постоянным квантовым выходом (*Trap Detector* [5]), позволяет измерять  $\Phi_e(\lambda)$  любого типа и даёт возможность абсолютизации относительных спектральных характеристик световых приборов [6].

## Заключение

С середины 1970-х спектральные измерения источников и приёмников оптического излучения и спектрофотометрические измерения неизлучающих материалов и сред получили широкое развитие в отечественном приборостроении, получила развитие эталонная база метрологического обеспечения этих видов измерений на государственном уровне. В настоящее время методы спектральной ра-

диометрии находят широкое применение в рутинных измерениях, не всегда обеспечивающих условие единства измерений. Современные спектральные приборы строятся на принципах «экспресс измерений» в технологических операциях на производстве и в качестве контрольных приборов оценки цветовой среды. В них используются ФПУ типа ПЗС-матриц, специальное программное обеспечение и примитивная оптическая система. Проблемы метрологического обеспечения таких приборов заставляют перейти на новый уровень требований при их исследовании и испытаниях, с обязательным обеспечением единообразия средств и единства измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический отчёт МКО CIE 53:1982 «Methods of Characterizing the Performance of Radiometers and Photometers».
2. Стандарт МКО CIE S 023/E:2013 «Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters».
3. Михайлов Олег, Марков Егор, Томский Константин. Зависимость качества экранного изображения от источника излучения. – Саарбрюкен: Palmarium Academic Publishing, 03.09.2014, 2014. – 76 с.
4. Михайлов Олег, Сычёв Максим, Огурцов Константин. Фотометрия и метрика дисплеев. Монография. – Саарбрюкен: Palmarium Academic Publishing, 22.10.2014, 2014. – 220 с.
5. Fox N.P. Trap Detectors and their properties // Metrologia. – 1991. – Vol. 28. – P. 197–202.
6. Stolyarevskaya R.I., Bartsev A.A., Belyaev R. Methodology of LED Luminaire BLH Radiance Measurements / Proc. CIE conf. «Lighting Quality and Energy Efficiency», 2012. – P. 215–222.



**Михайлов Олег Михайлович,**

доктор техн. наук,  
профессор.  
Окончил в 1963 г.  
Ленинградский  
институт точной  
механики и оптики.  
Известный  
специалист

в области энергетической и импульсной фотометрии, колориметрии и метрики оптического излучения. Профессор кафедры светотехники Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения. Заслуженный метролог РФ