

Сергей Никифоров, к.т.н. | snikiforov@list-lab.ru

# Трудная задача измерения параметров света от светодиодов

## Вопросы фотометрии и радиометрии

**Статья посвящена методам измерений светотехнических характеристик светодиодов с помощью фотометрических и радиометрических головок. Описаны проблемы, а также показаны положительные и отрицательные стороны использования указанных методов, основанные на примерах их применения в практике лаборатории «Л.И.С.Т.» («Лаборатория Исследования Световых Технологий»). Сделан акцент на необходимость учета спектрального распределения плотности энергетической яркости измеряемых источников при фотометрических измерениях.**

### История вопроса

Основная задача измерений любых физических величин — уход от субъективности их восприятия органами чувств человека. Подобно Фемиде, неодоушленное средство измерения выдаст результат, который будет отражать исследуемую величину с той лишь погрешностью, которую заложил при его изготовлении создатель — человек. Полученное значение будет лишено эмоциональных, нравственных, возмездных, иных субъективных оттенков и тем самым может служить той независимой истиной, которую так трудно найти. Однако за всю длительную историю научных открытий и производственных отношений человечество так ловко научилось манипулировать результатами объективных измерений и трактовать их суть, что нет-нет, да и промелькнет в отчетах чиновников или бизнес-планах «стратегов» от торговли нечто вроде яблока, падающего вверх, или КПД в 101%... Отлично знают толк в измерениях: инспекторы ГИБДД, выражающие скорость в рублях; продавцы на рынке, утверждающие, что литр воды весит не менее 1,5 кг; заправщики на бензоколонке, уместающие 80 л бензина в 60-литровый бак автомобиля; финансисты, виртуозно владеющие технологиями растворения и испарения средств; производители водки, утверждающие, что вода из крана имеет крепость не менее 38% об. в соответствии с ГОСТ, и многие другие общественные метрологи. Не обделенными «вниманием» остались и светотехнические величины, которыми пользуются производители, потребители и поставщики светотехники. Однако в отличие от общеизвестных единиц веса, расстояния, объема и времени, а также от простоты их измерения (оценки), светотехнические понятия малоиз-

вестны, и не только менеджеры разных рангов, но и выпускники профильных вузов могут отличать лампочки лишь по потребляемой мощности и далеко не сразу открывают для себя, что люмен — это не фамилия ученого, открывшего световой поток. Вероятно, дело в том, что свет и его характеристики не так просто измерить, как кажется, и, соответственно, 90% (а может, и больше) людей пользуются только одним средством измерения параметров света — собственными глазами. А как мы говорили ранее, это абсолютно субъективно и поэтому порождает многозначность. И это несмотря на то, что глаз человека является самым совершенным фотометрическим прибором в своем диапазоне длин волн. К его достоинствам надо отнести недостижимую долговечность с сохранением всех функций, а если потребуется, то и их самовосстановлением, большой динамический диапазон освещенностей, при которых сохраняются все параметры цветопередачи и разрешения изображения, «автоматически» управляемая оптика с широким диапазоном изменения фокусного расстояния и диафрагмы, высокое разрешение изображения (плоский угловой размер сфокусированного зрения — 1°) наряду с углом бокового обзора практически в 180°, самый большой рабочий диапазон длин волн относительно других жителей планеты, высокая скорость передачи данных в центр по их обработке наряду с большим их объемом, непревзойденная интеграция всего прибора в малом объеме и ничтожное потребление энергии, и, наконец, что выгодно отличает его от других средств фотометрии, — независимость параметров от температуры окружающей среды ввиду постоянного высокоточного термостабирирования в течение всей жизни владельца

устройства, которая вполне может составить более 100 лет.

Также следует всегда помнить о том, что глаз человека предназначен для использования в условиях естественных освещенностей Земли и, адаптируя искусственный источник освещения для необходимого восприятия его глазом, надо учитывать особенности физики и характеристик этой освещенности. Фотобиологические процессы на Земле происходят в основном в диапазоне длин волн от 300 до 900 нм. Это обусловлено энергетикой квантов этого диапазона излучения, которая определяется по известной со школьной программы формуле (1):

$$E = hc/\lambda, \quad (1)$$

где  $E$  — энергия кванта, Дж;  $h$  — постоянная Планка ( $1,58 \times 10^{-34}$  кал/сек;  $1 \text{ кал} \times 4,2 \text{ Дж}$ );  $c$  — скорость света,  $3 \times 10^8 \text{ м/с}$ ;  $\lambda$  — длина волны излучения, м.

Для длин волн короче 300 нм удельная энергия превышает 95 ккал/моль. При такой энергии возникают повреждения молекул белков и нуклеиновых кислот. У волн длиннее 1800 нм, напротив, энергии оказывается недостаточно, чтобы вызвать в светочувствительном пигменте (родопсине) фотохимический процесс [1]. Поэтому допустимая энергия светового восприятия большинства живых существ лежит в пределах от 15 до 65 ккал/моль, что соответствует диапазону длин волн от 440 до 1900 нм. Зрение человека реализуемо в более коротком диапазоне от 380 до 750 нм. Лучи, длина волны которых выходит за указанные пределы, для нас невидимы.

Исходя из этих рассуждений, зная, как измеряет глаз параметры света, и были созданы фотометрические средства измерения, по возможности максимально повторяющие характеристики чувствительности глаза.

### Электронный глаз

Насколько ни был бы совершенен наш зрительный аппарат, безусловно, он имеет разброс по своим метрологическим, если можно так

выразиться, характеристикам: все мы видим по-разному цвет, индивидуально воспринимаем освещенность и яркость. Этот разброс можно определить количественно, но нельзя абсолютно уверенно сказать, где точка отсчета: относительно какого значения можно говорить об отклонении. Однако почти 100 лет назад Международная Комиссия по Освещению (МКО) утвердила эту отправную линию, выведенную статистически, и обозначила ее как кривую видности глаза  $V(\lambda)$  для дневного зрения (рис. 1), когда рабочая точка чувствительности глаза находится

в средней части динамического диапазона [2]. Была определена и такая же зависимость для ночного зрения, однако она применяется реже: например, в случае определения параметров светосигнальных огней (светофоров, автомобильных фар и др.) в ночное время. Все это — не что иное, как зависимость чувствительности глаза от длины волны. Получилось нетрадиционно: сначала фотодатчиками с известными характеристиками спектральной чувствительности были измерены относительные величины интенсивностей представляемых сигналов, а потом эксперименталь-

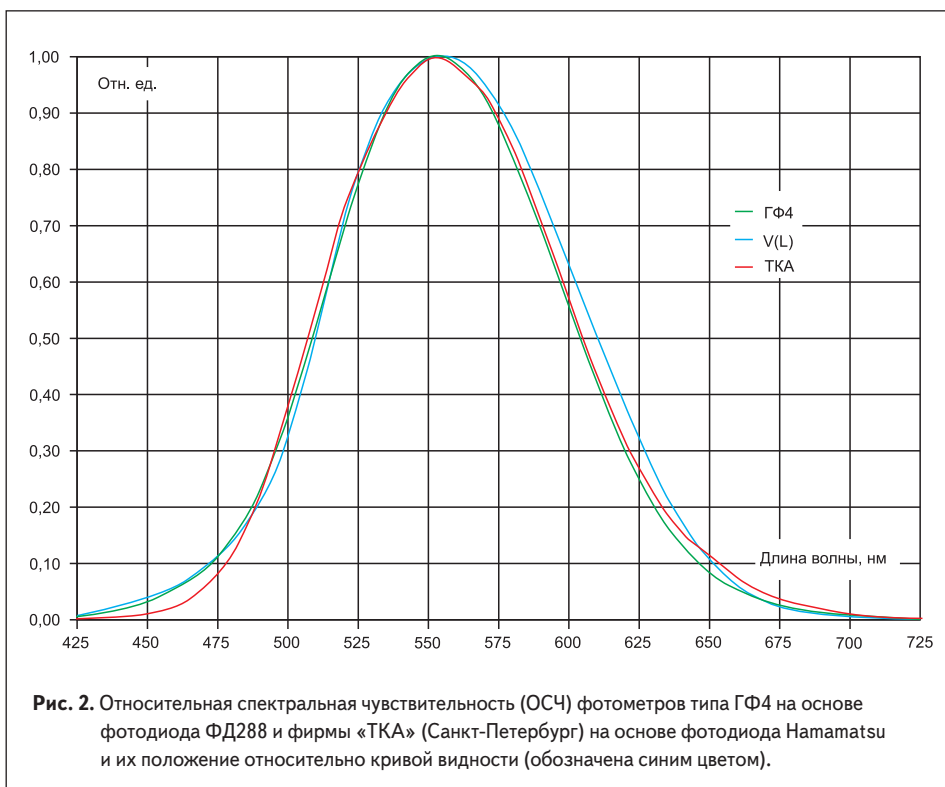
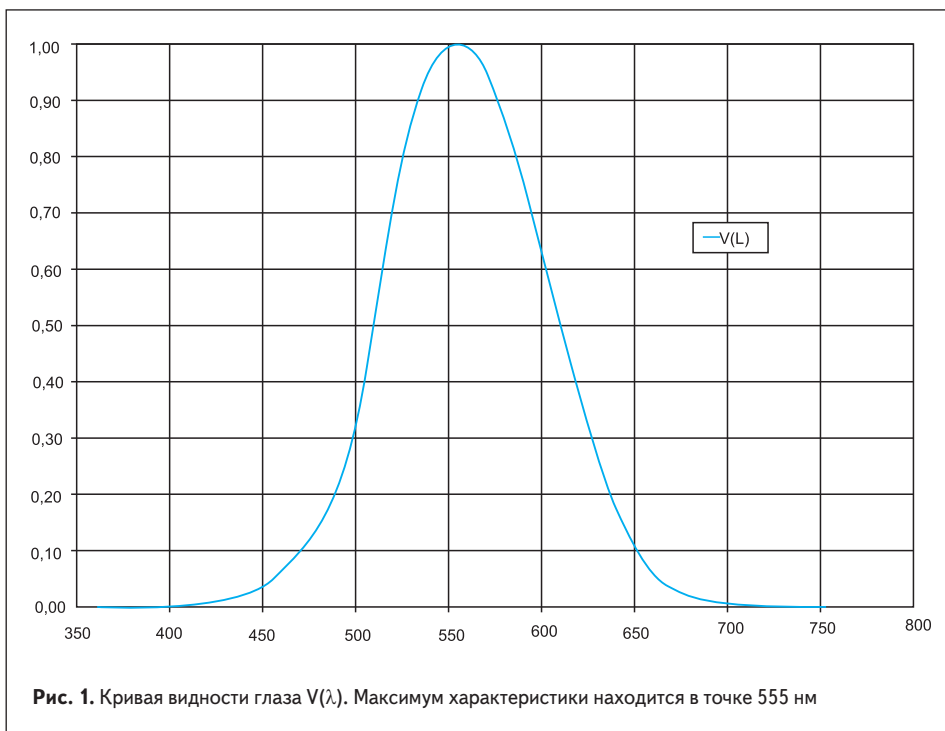
но определены их величины в соответствии со статистикой восприятия цветов большим количеством наблюдателей. Так что не всегда в истории яйцо и курица стоят в однозначно строгой последовательности.

Полученная характеристика в дальнейшем стала основой для большинства расчетов, связанных со светотехникой, вся цель которой — обеспечение таких характеристик освещенности, какие нужны только для нашего глаза, являющегося единственным «потребителем» производимого светотехническими устройствами излучения. И если возвращаться к количественной оценке этого излучения, то совершенно понятно, что фотометрические датчики должны обладать такой же характеристикой чувствительности, как и глазной аппарат. Создание датчиков, максимально приближенных к функции видности  $V(\lambda)$ , и является основной задачей корректности и точности измерений параметров света, таких как сила света и световой поток. Однако, как ни парадоксально это звучит, именно погоня за созданием электронного аналога фотометра с чувствительностью  $V(\lambda)$  и создает погрешности при измерениях. Совокупность нелинейностей чувствительности исходного датчика — фоточувствительного полупроводникового элемента и самого оптического фильтра, формирующего кривую видности, делает крайне трудоемким процесс прецизионного изготовления высокоточного фотодатчика. Как правило, твердотельный фильтр в виде многослойной структуры или оптического стекла с добавками позволяет формировать фотометры с погрешностью не лучше 2–3% при измерениях освещенности от источника типа «А».

Однако рабочие эталоны имеют погрешность не более 1%, производятся либо сложным индивидуальным подбором фильтра и фотодиода, либо применением жидкостного оптического фильтра и стоят дорого. Некоторые примеры характеристик чувствительности фотометров показаны на рис. 2.

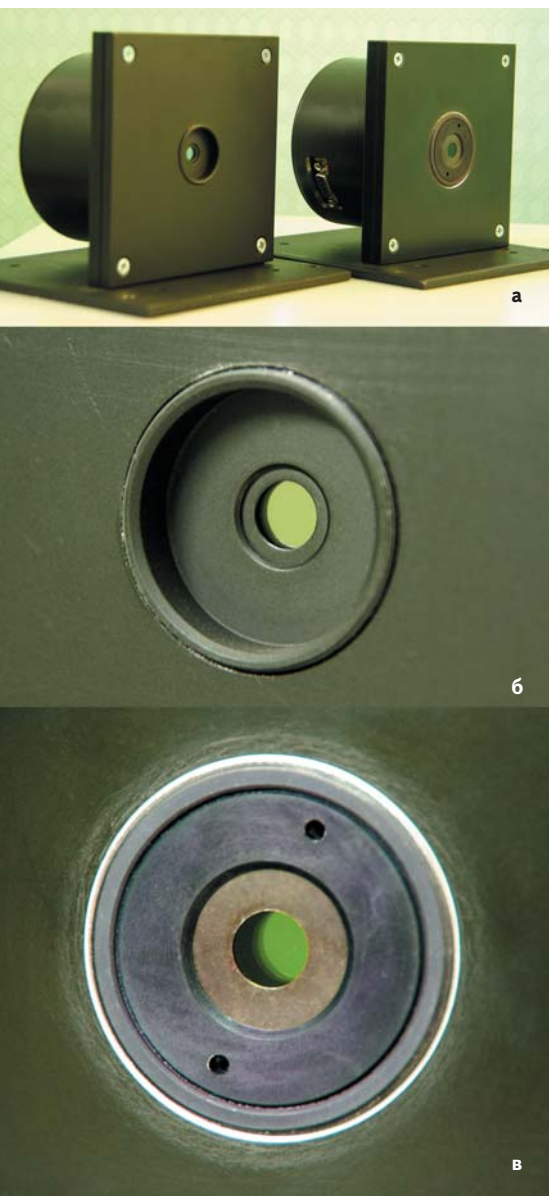
Можно заметить, что приведенные характеристики повторяют  $V(\lambda)$ , хотя и с некоторыми неточностями, особенно в длинноволновой части. И, тем не менее, относительно источника типа «А» фотометры ГФ4 имеют погрешность не более 3%.

Рассмотрим работу фотометров на примерах измерений силы света конкретных источников, проведенных в лаборатории «Л.И.С.Т.». В соответствии с ГОСТ 8.023-03 «Государственная поверочная схема для средств измерений световых величин непрерывного и импульсного излучений», коэффициент преобразования фотометров (величина в размерности электрического тока (напряжения), пропорциональная освещенности чувствительной части фотометра) определяется с некоторой погрешностью относительно стандартного источника типа «А», соответствующего спектру излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с цветовой температурой в 2856 К. Следовательно, любое отклонение спектрального распределения плотности энергетической яркости (СПЕЯ) измеряемого источника от указанного вызовет увеличение погрешности измерения.



**Таблица.** Сравнительные характеристики погрешности измерений силы света (светового потока) источников с различным спектром излучения фотометром и радиометром (относительно последнего).

Цвет/Тип источника	Параметры спектра источника							Относительные значения силы света (светового потока)		
	$L_{max}$ , нм	$L_{сеп}$ , нм	Полуширина, нм	$L_{дом}$ , нм	$T_c$ , К	X	Y	Радиометр	Фотометр по исследуемому источнику относительно радиометра	Фотометр по источнику «А» относительно радиометра
Синий LED	460,0	460,0	26,5	464,19	—	0,1417	0,0457	1	0,9593	1,0470
Зеленый LED	511,0	520,5	43,0	514,54	—	0,1414	0,6255	1	0,9140	0,8020
Красный LED	654,5	654,0	19,5	641,00	—	0,7188	0,2802	1	0,8200	0,6900
Лампа КЛЛ11W (белый)	611,5	601,5	176,5	—	2672,3	0,4667	0,4202	1	1,0240	1,0540
Лампа ЛЛ18W (белый)	611,5	587,0	176,5	—	3003,5	0,4386	0,4100	1	0,9998	1,0230
Светодиод (белый)	446,0	569,5	152,5	—	5507,5	0,3323	0,3487	1	1,0000	0,9910
Светодиод (белый)	455,5	545,0	23,0	—	6683,6	0,3107	0,3228	1	1,0251	1,0280
Светодиод (белый)	457,5	546,5	28,5	—	7321,2	0,3035	0,3096	1	1,0265	1,0794

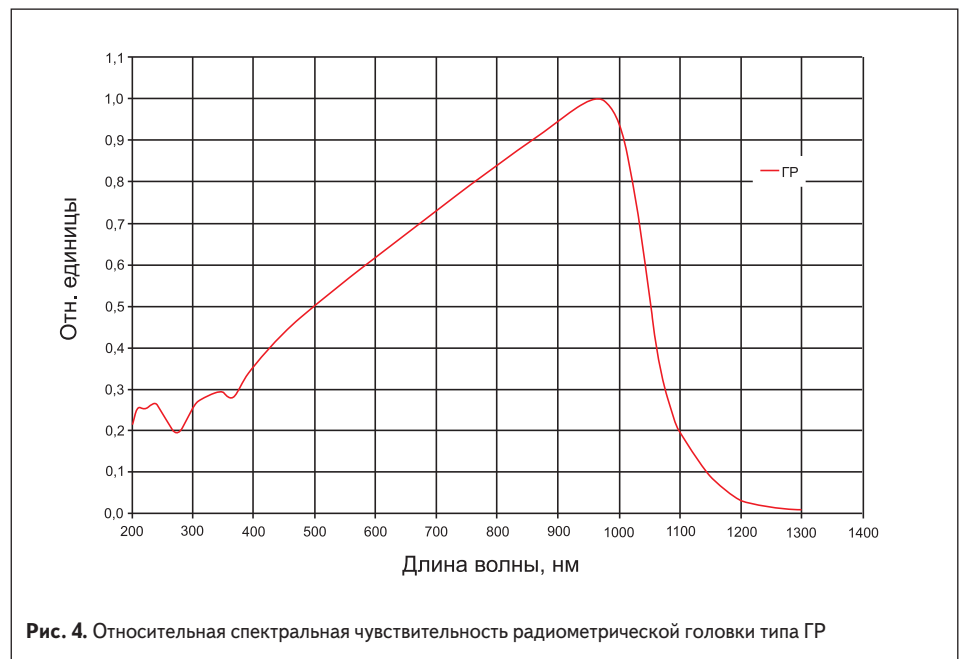


**Рис. 3.** Общий вид датчиков: а) ГР и ГФ4; б) радиометр типа ГР; в) фотометр типа ГФ4

А если говорить о таких квазимонохроматических источниках, как светодиоды, с полушириной СПЭЯ в 10–25 нм, то погрешность может возрасти на порядок величины, особенно на краях чувствительности: в зоне коротковолнового синего и длинноволнового красного. Увеличение погрешности также неизбежно будет и при измерении светодиодов белого цвета свечения на основе люминофора из-за значительной доли синего в спектре излучения. Для уменьшения погрешности измерений освещенности (силы света) такими фотометрами применяют корректировку коэффициента преобразования фотоприемников с известными значениями относительно стандартных источников с привязкой к конкретному спектру излучения измеряемых источников. Однако здесь требуется измерение их ОСПЭЯ, что также вносит свою погрешность. И, тем не менее, если все калибровки и расчеты будут выполнены корректно, то описанное уточнение

значения коэффициента преобразования существенно снизит погрешность измерения. Данные по таким расчетам приведены в таблице, где имеются сравнительные значения измеренных фотометрических единиц с помощью фотометра типа ГФ4 для различных источников излучения.

Впрочем, приведенные здесь случаи измерений с помощью фотометра являются частными в более широкодиапазонной радиометрии, которая охватывает весь спектр электромагнитных излучений. И если ограничить этот диапазон видимым светом, то радиометрические методы с успехом могут быть применены и для фотометрических целей. Прежде всего, это обусловлено отсутствием какого-либо оптического фильтра на входе радиометрической головки, что однозначно исключает целый класс погрешностей, связанных с точностью попадания коррекции ОСЧ приемника как можно ближе к функции  $V(\lambda)$ . Безусловно, измерение

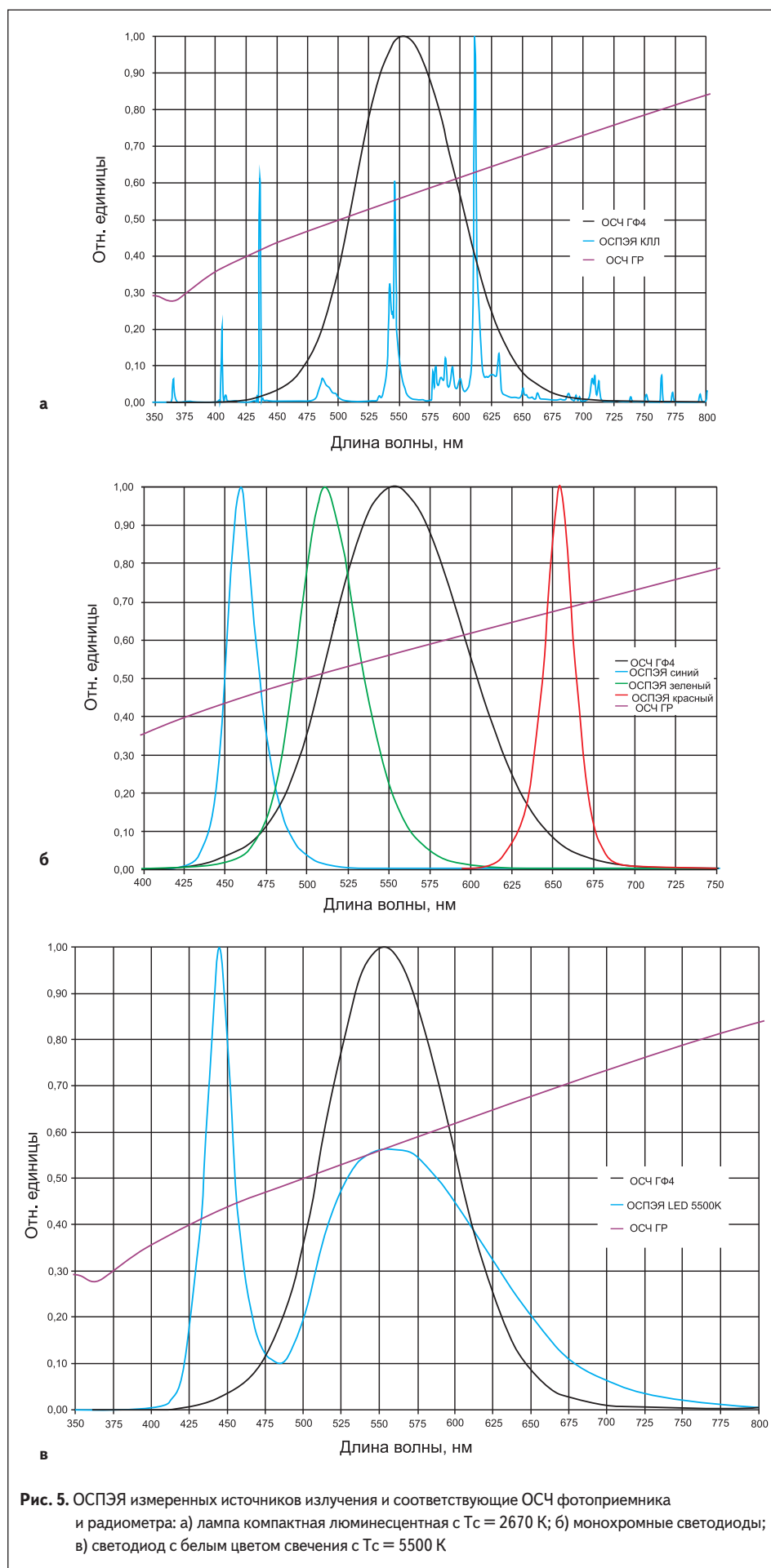


**Рис. 4.** Относительная спектральная чувствительность радиометрической головки типа ГР

ОСПЭЯ тестируемого источника здесь обязательно, потому как расчет коэффициента преобразования радиометра будет основан на его результатах. Но, как мы выяснили ранее, для увеличения точности измерений фотометром это также будет необходимо. Следовательно, по трудоемкости эти 2 процесса могут быть приблизительно приравнены, с той лишь разницей, что потребуются расчет фотометрических величин из энергетических с помощью люмен-эквивалента, или спектральной световой эффективности. Таким образом, можно сделать вывод, что измерения непосредственных энергетических единиц с помощью радиометра оказываются существенно точнее и корректнее с точки зрения физики процесса измерения. В таблице все данные для фотометра ГФ4 рассчитаны относительно измерений силы света с помощью радиометра типа ГР, разработанного в лаборатории «Л.И.С.Т.» на основе фотодиода Hamamatsu как выполненных наиболее точным методом. Совершенно понятно, что как ОСЧ фотометра, так и ОСЧ (или абсолютная спектральная чувствительность — АСЧ) радиометра должны быть как можно точнее измерены с применением эталонной базы, например во ВНИИОФИ.

Следует добавить также, что отсутствие фильтра на входе радиометра значительно повышает его чувствительность, что расширяет динамический диапазон измеряемых энергетических единиц с одной стороны или делает возможным уменьшение входного окна радиометрической головки с другой. Последнее обстоятельство очень важно для увеличения точности измерений диаграмм пространственного распределения силы света (силы излучения) и для некоторого снижения нелинейности чувствительности фотодиода, связанного с его площадью. Более того, пределы измерений в этом случае расширяются до ближнего УФ и ИК. Указанный радиометр типа ГР имеет чувствительность 190–1100 нм при минимальном уровне 0,2 от максимума в области 950 нм (рис. 4). Фотометр и радиометр показаны на рис. 3.

Из таблицы также можно заметить, что измерения монохромных светодиодов имеют существенную погрешность даже с применением рассчитанных коэффициентов преобразования фотометра. На это имеется несколько причин, основная их которых — узость СПЭЯ и очень близкое его расположение относительно края характеристики чувствительности, приведенной на рис. 2. Видно, что излучение синего LED, параметры спектра которого показаны в таблице на первой строке и на рис. 2, лежит в области чувствительности фотометра всего в 0,05 от максимальной  $K_{\max}$ . В то же время определено, что измерения можно считать достоверными (с погрешностью, аттестованной при калибровке), если используется характеристика чувствительности не менее 0,2  $K_{\max}$ . Это обусловлено линейными искажениями, связанными с малым значением измеряемого сигнала и пропорциональным значением фототока. Данное





обстоятельство усугубляется при измерении диаграмм пространственного распределения силы света, когда выбранное расстояние фотометрирования обеспечивает рабочую точку фотодиода приблизительно в середине его динамического диапазона, а оптический сигнал к краям диаграммы уменьшается на порядок величины. Такое же положение дел складывается и в области длинноволнового красного, измерения параметров которого, кстати, очень актуальны из-за использования светодиодов подобного спектра излучения в железнодорожной сигнализации. Таким образом, измерение энергетических характеристик источников с упомянутыми СПЭЯ вообще некорректно выполнять с помощью таких фотодатчиков, а если посмотреть на ОСЧ радиометра, приведенную на рис. 4, можно заметить, что его чувствительность имеет линейную зависимость от длины волны в видимом диапазоне и в области синего составляет не менее 0,4 Ктах, уже не говоря о красном, где это значение около 0,8 Ктах. Однако по-другому дело обстоит с источниками белого цвета свечения. В таблице приведены примеры некоторых из них, имеющих различную природу: люминесцентные лампы (ЛЛ) и светодиоды с разными значениями коррелированной цветовой температуры (КЦТ). Расчеты показали, что решающим в значении коэффициента преобразования будет отнюдь не цветовая температура, а составляющие спектра излучения. Это видно при сравнении измерений ЛЛ с КЦТ 3000 К и светодиода с КЦТ 5507 К.

При увеличении КЦТ у светодиодов возрастающая доля синего будет увеличивать расхождение с интегралом и формой спектра излучения источника типа «А», относительного которого откалиброван фотометр. В то время как для радиометра это не будет иметь никакого значения, и точность измерений сохранится. Для наглядности спектры монохромных светодиодов и некоторых источников белого цвета свечения приведены на рис. 5, где на них наложены спектры чувствительности фотометра и радиометра. Такое представление графиков показывает, насколько малочувствителен глаз к излучению синего и красного цветов и что некоторая доля излучения находится даже за пределами видимости. И хотя она не влияет на точность измерения светотехнических величин, ограниченных  $V(\lambda)$ , все же присутствует, входит в состав интегральной мощности излучения, а с помощью измерений радиометром может быть достоверно определена ее доля. Эта информация может быть полезна для определения эффективности излучения источника в видимом диапазоне.

Имеется также еще одна сложность при измерениях диаграмм пространственного распределения силы света (силы излучения) — когда в пределах измеряемой диаграммы присутствует неоднородность ОСПЭЯ источника. В последнее время довольно часто наблюдается существенная неоднородность как в светильниках (особенно с применением оптики), так и в самих

основывающих их светодиодах [3,4]. В таких случаях применяется методика измерений ОСПЭЯ в зависимости от угла излучения с последующей соответствующей корректировкой коэффициентов преобразования фотометра (радиометра). Безусловно, это существенно усложняет измерения, но зато делает их результаты максимально точными. Во всяком случае, такой принцип: достижение возможной прецизионности измерения применяется в любых ситуациях в лаборатории «Л.И.С.Т.», и теоретически дискретность определения ОСПЭЯ по диаграмме излучения источника может составить до 1,2 угловой минуты, то есть около 16 000 точек за 360 градусов.

Безусловно, это огромный массив информации, если учесть, что каждая точка ОСПЭЯ содержит в себе до 2000 точек измерения плотности энергетической яркости с шагом в 0,5 нм. И если к этому добавить тот факт, что для достоверности расчета светового потока измерения ведутся, как правило, в 2-х десятках плоскостей, то во столько же раз возрастает и количество данных. Однако при необходимости это вполне реализуемая задача.

### Сложный выбор

Рассмотренные принципы измерений фотометрических и энергетических параметров светодиодов и других источников излучения позволяют оценить разумность применения тех или иных методов к конкретным типам исследований для достижения оптимального результата. Система светотехнических характеристик источников излучения имеет едва ли не самую обширную номенклатуру параметров, с помощью которых можно их описать с технической точки зрения. И несмотря на то, что большинство этих значений — расчетные, корректное получение исходных величин является непростой задачей. Вместе с электрическими характеристиками, неотделимыми от светотехнических, совокупность параметров современного светодиода или устройства на его основе представляет собой многомерный ряд, все члены которого взаимозависимы. Поэтому указанной задаче измерений фотометрических величин всегда сопутствуют измерения спектральной плотности энергетической яркости для получения колориметрических параметров, электрических, а в случае исследования полупроводниковых излучающих гетероструктур — прямых и обратных вольт-амперных характеристик. Поэтому представленные в статье методы измерений, с одной стороны, не могут существовать отдельно, а с другой — являются наиболее сложными в этом комплексе. Для большинства примеров использования результатов измерений в области светотехники необходима высокая точность, повторяемость и комплексность. На основе этих измерений производятся светотехнические проекты, рассчитываются оптические параметры ис-

точников, характеристики освещенности и яркости поверхностей. Полученные данные составляют основу технических условий и требований, стандартов и спецификаций, в конце концов, по результатам исследований принимают решение о сертификации изделий или об их стоимости.

Показанные в работе методы не являются только теоретическими, и их суть не служит открытием, однако их доработка и прикладное применение продиктованы необходимостью. Использование современных средств для получения в процессе исследования и быстрой обработки больших массивов данных позволяет применять, на первый взгляд, более трудоемкие методы измерений с применением радиометра. Однако это сравнимо по скорости с фотометрическими измерениями, причем в распоряжении оказывается существенно больше данных и их точность в подавляющем большинстве случаев значительно выше. То же самое можно сказать и о потенциальной возможности измерений источников со спектральным диапазоном излучения за пределами кривой видности  $V(\lambda)$ . Данные утверждения подкреплены большим опытом практических измерений, в том числе с целью сертификации светотехнических устройств в лаборатории «Л.И.С.Т.». Стоит отметить, что во всех случаях производимых испытаний выполняется либо коррекция ОСЧ фотоприемников, либо применение радиометра, а насколько это важно и как влияет на точность измерений — показано в настоящей работе. Следует добавить, что все средства измерений «Лаборатории Исследования Световых Технологий» занесены в Государственный реестр средств измерений и подвергаются периодической поверке и калибровке.

В условиях появления современных объектов исследования (светодиодов), параметры которых стоят отдельно от всех существовавших до них источников света, остро встала необходимость разработки методик измерения их параметров, потому как классические варианты использования традиционных средств измерений применимы лишь в общих случаях, и, как показали приведенные выше расчеты и практические примеры, не могут обладать требуемой достоверностью. Необходимы иные подходы к этим измерениям, такие же новые, не похожие на другие, как и сами источники — светодиоды. ●

### Литература

1. Иванецкий Г. В. Вернисаж инфракрасных портретов // Наука и жизнь. 2005. №8.
2. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир. 1978.
3. Никифоров С. Г. Исследование параметров семейства светодиодов Cree XLamp // Компоненты и технологии. 2006. №11.
4. Никифоров С. Г. Особенности характеристик светодиодов Moonstone от Avago Technologies // Полупроводниковая светотехника. 2009. №1.