

УДК 535.853.26

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САМОКАЛИБРУЮЩИХСЯ ФОТОДИОДОВ В КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Ю.П.Мачехин, В.М.Бабич, П.Конс, А.И.Расчектаева

Продемонстрирована возможность использования самокалибрующихся фотодиодов в колориметрических измерениях. Предложена конструкция трехканального колориметра с использованием самокалибрующихся фотодиодов.

Колориметрические измерения теоретически и методически проработаны достаточно полно и всеобъемлюще [1–3], поскольку явление “цвет” вовлечено почти в каждый производственный процесс и имеется большой спрос на недорогие и точные колориметры. В то же время необходимого парка колориметров как рабочих средств измерений серийно практически не выпускает ни одно предприятие Украины. В первую очередь, это связано с тем, что известные конструкции, разработанные 20–30 лет назад, морально устарели и очень дорогие в изготовлении. В основном они базировались на прецизионной механике и устаревших к настоящему времени фотоприемных устройствах.

Тем не менее, потребность в колориметрических измерениях велика, и удовлетворить ее можно только предложением малогабаритных колориметров для оперативного измерения цвета самосвещающихся и отражающих объектов. Отметим, что на зарубежном рынке уже появилось несколько типов малогабаритных колориметров, позволяющих решать отдельные цветоизмерительные задачи. Как правило, они базируются на упрощенных модификациях спектральных приборов, которые дают возможность грубо оценивать цветовые координаты. Стоимость таких малогабаритных колориметров порядка 5000 USD, главным образом, из-за дорогих детекторных линеек, установленных в спектроскопических колориметрах.

Более корректным решением задачи представляется создание объективного трехканального колориметра, где используются светофильтры, кривые пропускания которых пропорциональны кривым удельных координат однородных излучений $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ [2]. В зависимости от используемых фотоприемных устройств, кривые пропускания светофильтров должны быть откорректированы таким образом, чтобы, например, в канале измерения X координаты цвета выполнялось условие

$$\tau_x(\lambda)S(\lambda) = \bar{x}(\lambda), \quad (1)$$

где $\tau_x(\lambda)$ – спектральная характеристика пропускания светофильтра в канале измерения X координа-

ты; $S(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотоприемника.

Это приводит к серьезной проблеме подбора оптических элементов колориметров, в частности, фильтры и фотодиоды должны быть согласованы в соответствии с условием (1), чтобы получить точные измерения. Спектральная чувствительность каждого фотодетектора должна быть измерена до того, как соответствующие фильтры будут изготовлены. Это ведет к высоким затратам в связи с дорогостоящими подготовительными измерениями спектральной чувствительности фотодиодов и фильтров.

В настоящей работе обсуждается первый этап работы по созданию объективного трехканального колориметра, а именно, разработка принципа его работы и те особенности, которые в дальнейшем позволят сделать колориметр простым и удобным в изготовлении, а также выгодным для серийного производства.

В общем случае координаты цвета могут определяться объективным колориметром в системе XYZ , однако их можно пересчитать в любую другую систему, например, RGB . Координаты цвета сложного излучения, имеющего спектральное распределение $\varphi(\lambda)$, рассчитываются с помощью хорошо известных выражений [2]:

$$X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda; \quad (2)$$

$$Y = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda; \quad (3)$$

$$Z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где X, Y, Z – координаты цвета в системе XYZ ; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – удельные координаты однородных излучений; λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона, который установлен для колориметрических измерений (то есть 380 ... 780 нм); $\varphi(\lambda)$ – спектральная плотность исследуемого излучения.

В спектрофотометрическом методе измеряются дискретные значения функции $\varphi(\lambda)$ и затем с помощью таблиц удельных координат вычисляются координаты цвета и цветности по формулам (2)–(4) (в которых интегралы заменяются на сумму). Поскольку спектральный состав измеренного излуче-

ния известен только для дискретных значений длин волн, интегралы заменяются на сумму. Если шаг длины волны не слишком большой, этот метод оказывается очень точным, но дорогостоящим. Обычно принято использовать шаг длины волны 5 нм, что является достаточным для большинства целей.

Как было отмечено выше, в объективных колориметрических измерениях, в каждом из измерительных каналов устанавливается светофильтр (коэффициент пропускания $\tau(\lambda)$), соответствующий данному цвету. Светофильтр совместно с фотодиодом должны обеспечивать спектральное пропускание канала, совпадающее с одной из кривых сложения, как показано в (1).

Таким образом, использоваться могут только пары "светофильтр+фотодиод". Это в значительной степени усложняет как изготовление самих светофильтров, так и подбор их в случае необходимости замены одного из элементов пары "светофильтр+фотодиод".

В настоящей статье мы хотим показать простой способ решения этой проблемы. В случае, если спектральная чувствительность фотодиода имела бы простой и воспроизводимый характер, можно было бы значительно упростить формирование спектрального пропускания каналов цвета.

Рассмотрим использование самокалибрующихся фотодиодов со 100-процентной квантовой эффективностью (например, S1337 фирмы "Hamamatsu"). Спектральную чувствительность таких фотодиодов в диапазоне спектра от 380 до 800 нм с высокой степенью точности можно описать линейной функцией

$$S = S_{01}(1+a\lambda),$$

где S_{01} и a – коэффициенты, которые уточняются для каждого фотодиода экспериментально (рис. 1).

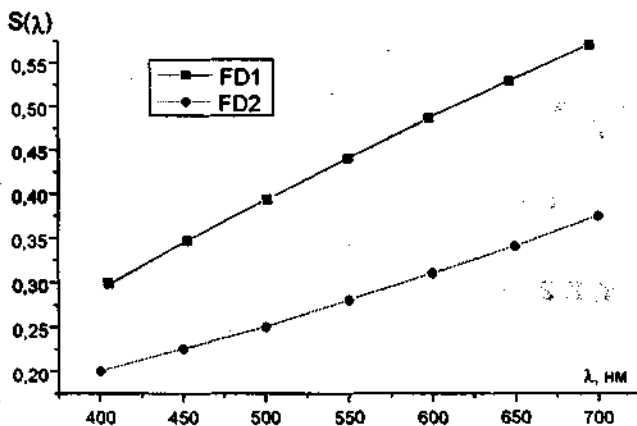


Рис. 1. Спектральные характеристики двух фотодиодов S1337 фирмы "Hamamatsu" [4]

В этом случае излучение, прошедшее один из каналов колориметра и зарегистрированное фотодиодом, описывается уравнением

$$\Phi_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \tau(\lambda) S_{01}(1+a\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Если использовать светофильтр, спектральная характеристика пропускания которого пропорциональна кривой сложения, например, $\tau(\lambda) = k\bar{x}(\lambda)$, то уравнение (5) можно будет переписать в следующем виде:

$$\Phi_1 = S_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda + aS_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \lambda d\lambda \quad (6)$$

или

$$\Phi_1 = S_1 X + aS_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (7)$$

где $S_1 = S_{01}k$.

Таким образом, зарегистрированная величина Φ_1 представляет собой два слагаемых, одно из которых пропорционально величине координаты цвета. Однако, вычислить эту координату цвета из уравнения (7) нельзя, поскольку второе слагаемое также представляет неизвестную величину. Но если уравнение (5) дополнить еще одним уравнением относительно тех же самых искомых величин, то из решения этой системы можно определить значение координаты цвета. Для этого запишем результат измерения, аналогичный (6), но полученный на фотодиоде, спектральная характеристика которого описывается линейной функцией, но с другими коэффициентами $S = S_{02}(1+b\lambda)$:

$$\Phi_2 = S_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda + bS_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (8)$$

где $S_2 = S_{02}k$.

Запишем систему из двух уравнений, упростив запись уравнений (7) и (8) заменой

$$X' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \lambda d\lambda:$$

$$\Phi_1 = S_1 X + aS_1 X'; \quad (9)$$

$$\Phi_2 = S_2 X + bS_2 X'.$$

Решая систему (9) относительно искомой величины X , находим аналитическое выражение для описания величины координаты цвета:

$$X = \frac{\Phi_1 b S_2 - \Phi_2 a S_1}{S_1 S_2 (b - a)}. \quad (10)$$

Или, если учесть коэффициент пропорциональности между $\tau(\lambda)$ и $\bar{x}(\lambda)$ – k , можно уравнение (10) переписать в виде

$$X = \frac{\Phi_1 b}{k S_{01} (b - a)} - \frac{\Phi_2 a}{k S_{02} (b - a)}. \quad (11)$$

Отсюда следует, что, зная характеристики спектральной чувствительности фотодиодов, то есть S_{01} , S_{02} , a , b , используя измеренные величины Φ_1 и Φ_2 , можно вычислить координату цвета.

Представленный метод аналогичным образом реализуется и в остальных каналах по измерению Y и Z координат цвета.

В процессе работы мы не заметили изменения спектральной чувствительности фотодиодов S1337 фирмы "Hamamatsu" в течение двух лет.

Технически реализовать предложенный метод можно простым способом – используя два фотодиода, установленных последовательно на пути регистрируемого пучка излучения (рис. 2). На второй фотодиод подается излучение, отраженное от первого. Если коэффициент отражения от первого фотодиода остается постоянным, то его можно учесть в уравнении (9). Это предположение имеет силу в видимом спектре частот. Следовательно, используя одновременно два фотодиода, можно очень просто измерять координаты цвета простым трехканальным колориметром.

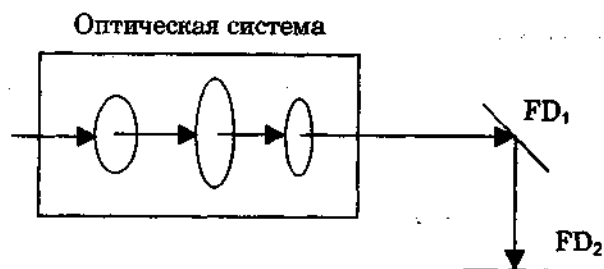


Рис. 2. Предполагаемая конфигурация расположения фотодиодов

Таким образом, используя в колориметрических измерениях фотодиоды с линейной характеристикой спектральной чувствительности, можно в значительной мере упростить процедуру измерения координат цвета.

В результате можно сделать следующие выводы:

1. Изготовленные для каждой координаты цвета фильтры не зависят от спектральной чувствительности фотодиодов. Таким образом, изготовленные колориметры упрощены, так как фильтры мо-

гут быть изготовлены в больших количествах без привязки к спектральной чувствительности фотодиодов.

2. Процедура определения одной координаты цвета значительно упрощена, проводится всего 2 измерения, что проще, чем определение спектральной чувствительности фотодиодов по полному видимому спектру частот.

3. Замена одного или двух фотодиодов приведет к замене коэффициентов в полученной формуле и потребует коррекции данных в расчетной программе, что заметно упрощает операцию настройки колориметра.

Настоящая работа была выполнена при поддержке INTAS, Брюссель, Бельгия (проект № 2000/61).

Список литературы

1. Луизов А.В. Цвет и свет. -М.: Мир, 1989. -356 с.
2. Джад Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. - М.: Энергия, 1978. -512 с.
3. Ивэнс Ральф М. Введение в теорию цвета. -М.: Наука, 1964. -435 с.
4. Lehman J.H., Cromer C.L. //Metrologia. -2000. - № 37. -Р. 477-480.

USING SELF-CALIBRATING PHOTODIODES IN COLORIMETRIC MEASUREMENTS

Y.P.Machekhin, V.M.Babich, P.Kohns, A.I.Raschektayeva

The possibility of using self-calibrating photodiodes in colorimetric measurements is shown. The design of a three-channel colorimeter with using self-calibrating photodiodes is proposed.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Мачехін Юрій Павлович –

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, заступник директора ХДНДІМ, м. Харків

Бабіч Валентин Михайлович –

провідний інженер ХДНДІМ, м. Харків

Конс Пітер –

професор Боннського університету, Німеччина

Расчектаєва Анжеліка Іванівна –

молодший науковий співробітник ХДНДІМ, м. Харків