

Н. П. БЕЛОВ, В. Н. ГРИСИМОВ, Ю. Ю. СМИРНОВ,
А. С. ШЕРСТОБИТОВА, А. Д. ЯСЬКОВ

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОГО RGB-ФОТОДИОДА

Рассмотрены конструктивные особенности и технико-эксплуатационные характеристики лабораторного колориметрического датчика на основе трехэлементного RGB-фотодиода. Датчик предназначен для измерения параметров цвета прозрачных и диффузно отражающих объектов. Обсуждается процедура калибровки датчика. Приведены результаты пробных измерений на образцах цветных стекол и диффузных отражателей.

Ключевые слова: колориметрический датчик, RGB-фотодиод, оптический фильтр, цветные стекла, диффузные отражатели, координаты цвета/цветности.

Постановка задачи. Современные колориметрические методы и приборы позволяют осуществлять измерения спектров пропускания и/или отражения исследуемого объекта в области длин волн $\lambda = 380 \dots 760$ нм и вычислять на основе спектральных данных параметры цвета (цветности) в любой из известных колориметрических систем. Использование спектрометров в составе колориметрических приборов, как показано, например, в работах [1—7], связано как с усложнением конструкции последних, так и существенным возрастанием их стоимости. В связи с этим представляет интерес применение для колориметрических исследований оптико-спектральных датчиков на основе фотодиода с тремя фотоприемными площадками, имеющими оптические фильтры для выделения красного (R), зеленого (G) или синего (B) компонентов регистрируемого излучения. Три составляющие выходного сигнала фотоприемника определяются его относительной спектральной чувствительностью, типичный график $V_{\text{пр}}(\lambda)$ которой представлен на рис. 1. Очевидно, что использование такого фотодиода позволит упростить конструкцию колориметрического датчика, оптимизировать его массогабаритные характеристики (вплоть до создания миниатюрного варианта), а также снизить стоимость.

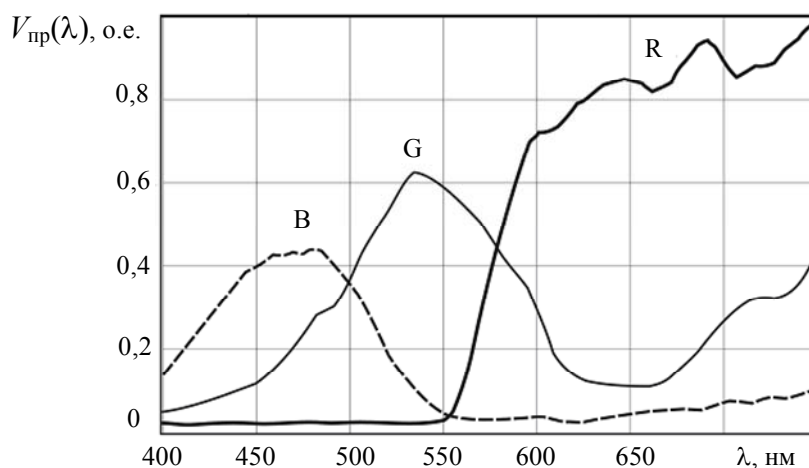


Рис. 1

В связи с этим был разработан и экспериментально исследован лабораторный колориметр на основе трехэлементного RGB-фотодиода. В настоящей статье рассматриваются основные конструктивные особенности и технические характеристики датчика.

Особенности конструкции и программного обеспечения датчика. Структурная схема датчика представлена на рис. 2. В осветителе использовалась галогенная лампа накаливания (20, 12 В), работающая на постоянном токе. Проходящее через исследуемый объект (образец) или отраженное от него излучение передавалось на фотоприемник через волоконно-оптический жгут, световой диаметр которого составлял 4 мм. Измерения коэффициента диффузного отражения производились в геометрии $0/45^\circ$ (по стандарту фирмы “General Electric”, США). Используемый фотодетектор имел высокую чувствительность в красной и ближней инфракрасной областях спектра при $\lambda > 660$ нм (см. рис. 1). Для подавления этих составляющих сигнала и формирования спектров фоточувствительности, приближенных к стандарту системы RGB, в осветителе был использован дополнительный оптический фильтр на основе цветного стекла СЗС-23.

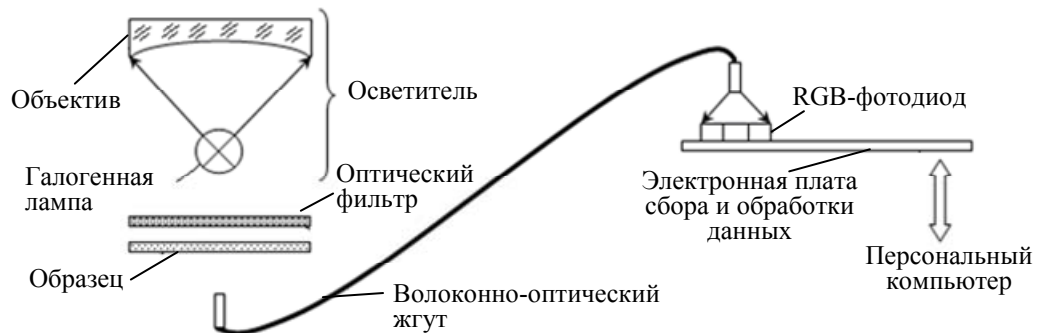


Рис. 2

Электронная система сбора и обработки данных обеспечивала измерение уровня сигналов в каждом из трех оптических каналов, оцифровку этих сигналов и их усреднение. Для вывода данных измерений в цифровом и графическом виде, а также сохранения этих данных в виде текстового файла было разработано специальное программное обеспечение.

Рабочее окно программы пользователя показано на рис. 3. Результаты измерений представляются на экране монитора графически в виде трех кругов красного, зеленого и синего цвета, яркость которых пропорциональна сигналам R, G, B фотодетектора. Пересечение этих кругов отображает цвет исследуемого образца (с учетом графических возможностей экрана монитора). В графическом окне программы выводятся также величины сигналов с фотодетектора.

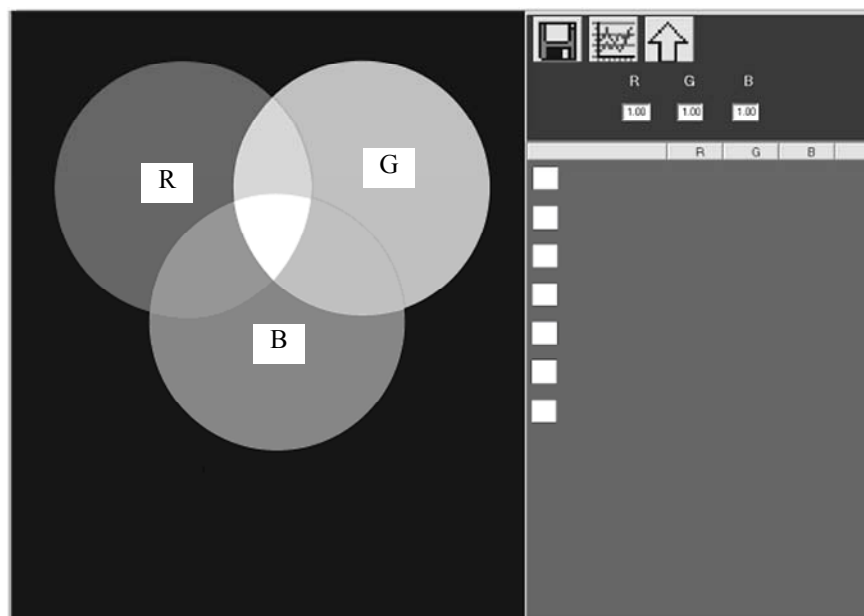


Рис. 3

Калибровка датчика. Результаты тестовых измерений. Помимо спектрального отклика фотоприемника (см. рис. 1), путем спектрального пропускания и отражения компонентов

оптической системы, спектрального распределения энергии излучателя и анализа цветовых параметров образца определяются три составляющие выходного сигнала. Таким образом, для определения параметров цвета, близкого к цвету исследуемого объекта, необходимо произвести калибровку датчика по эталону „белого“. При измерении коэффициента пропускания (T) в качестве такого эталона использовался „свободный“ канал ($T = 1$), а при измерении коэффициента отражения — диффузный отражатель (аттестованный в ФГУ „ТЕСТ-С-Петербург“) на основе молочного стекла МС-22 с коэффициентом отражения $R = 0,952$ по всему цветовому диапазону спектра. Результаты измерений по эталону „белого“ сохраняются после нажатия кнопки со стрелкой (см. рис. 3); при этом уровень сигнала в каждом из измерительных каналов принимается за единицу. При следующем измерении фиксируется изображение трех кругов максимальной яркости (256 ед. в 8-разрядном формате, принятом в системе RGB). На пересечении этих кругов формируется уровень „белого“. Результаты каждого последующего измерения коэффициента T или R для исследуемого образца воспроизводятся в графической форме на пересечении кругов, а также сохраняются в цифровом виде в правом окне (см. рис. 3). Параметры цвета R, G, B приводятся к значениям в диапазоне от 0 до 1 (калибровка по эталону „белого“).

Для анализа метрологических возможностей представленного датчика были сопоставлены полученные результаты измерений с независимыми данными. В качестве объектов измерений использовались образцы каталогизированных цветных стекол [8] и специально изготовленные цветные диффузные отражатели на основе порошковых полимерных покрытий. Параметры цветности стекол приведены в каталоге [8]. Для диффузных отражателей эти параметры определялись на спектроколориметре с интегрирующей сферой, аналогичном рассмотренному в работе [9].

В обоих случаях (цветные стекла и диффузные отражатели) данные, использованные для сравнительного анализа и принимаемые за эталоны, представляют собой параметры цветности x, y, z в системе XYZ для источника излучения типа „В“ [8]:

$$\left. \begin{aligned} x &= X / (X + Y + Z); \\ y &= Y / (X + Y + Z); \\ z &= Z / (X + Y + Z), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где координаты X, Y, Z цвета определяются как интегралы в области спектра $\lambda = 380 \dots 760$ нм:

$$\left. \begin{aligned} X &= k \int_{380}^{760} \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; \\ Y &= k \int_{380}^{760} \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; \\ Z &= k \int_{380}^{760} \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \\ k &= 100 / \int_{380}^{760} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В системе (2) $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ — функции удельных координат цвета, $S(\lambda)$ — спектральное распределение энергии излучателя, $\tau(\lambda)$ — спектральная зависимость коэффициента пропускания прозрачного образца (или $\rho(\lambda)$ — коэффициента отражения диффузного отражателя), k — нормирующий коэффициент.

Для преобразования экспериментальных получаемых в системе RGB результатов в систему XYZ необходимо найти переходную 3×3 -матрицу:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ G_1 & G_2 & G_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \end{pmatrix}^{-1}. \quad (3)$$

Для определения элементов a_{ij} переходной матрицы использовались три образца цветных стекол или диффузных отражателей, координаты цветности x, y, z которых определялись по данным каталога [8] или в результате независимых измерений и переводились в координаты X, Y, Z цвета, а координаты R, G, B цвета определялись по результатам спектральных измерений коэффициента пропускания или отражения этих стекол. В соответствии с найденной переходной матрицей (3) и данными измерений, полученных с использованием колориметрического датчика, можно определить координаты цвета для других образцов:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Значения X, Y, Z преобразовывались в координаты цветности x, y, z [10]. Для цветных стекол эти результаты сопоставлены на рис. 4, где представлен Цифровой график МКО (Международной комиссии по освещению) 1964 г. [8, 10]; здесь параметры цветности эталонных образцов цветных стекол обозначены как „*“, а результаты измерений (2 отсчета) тех же параметров с использованием RGB-колориметрического датчика — как „+“ и „x“. Анализ графика показывает, что измеренные и принимаемые за эталон [8] параметры цветности совпадают. Аналогичные результаты были получены также и для цветных диффузных отражателей.

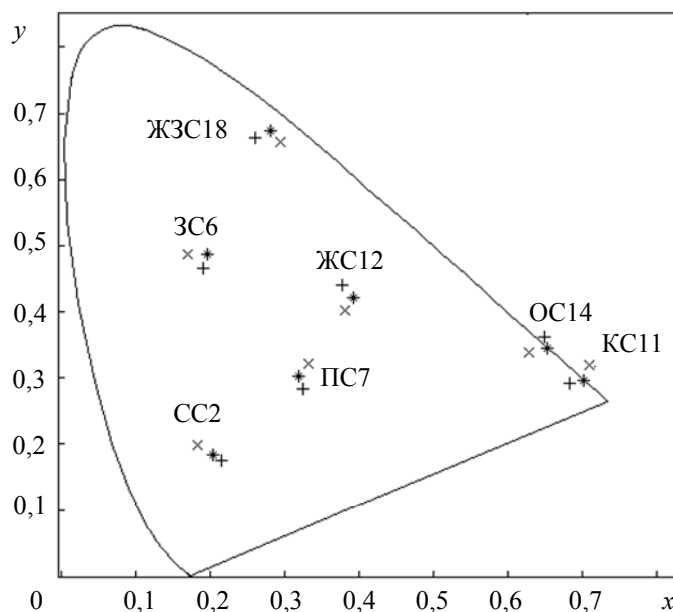


Рис. 4

Заключение. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что разработанный колориметрический датчик на основе RGB-фотодиода обеспечивает измерение параметров цветности прозрачных и диффузно отражающих объектов на уровне различимых визуально оттенков цвета. Представляется целесообразным использовать такой датчик для получения цифровой информации о цвете объекта в таких, например, областях, как спектроскопия, фотометрия и даже медицина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юстова Е. Н. Цветовые измерения: Колориметрия. СПб: Изд-во СПбГУ, 2000.
2. Ohta N., Robertson A. Colorimetry: Fundamentals and Applications. NJ, USA: Wiley-Blackwell, 2005.
3. Malacara-Hernandez D. Color vision and colorimetry: theory and applications // Proc. of SPIE. 2011.
4. Koenderink J. J. Color for the Sciences. MA, USA: MIT Press, 2010.
5. Seve R. Colour Physics: From Appearance to Colorimetry Techniques. London: John Wiley and Sons, 1999.
6. Green P., MacDonald L. W. Colour Engineering: Achieving Device Independent Colour. London: John Wiley and Sons, 2002.
7. MacAdam D. L. Selected papers on colorimetry-fundamentals // Proc. of SPIE. 2006.
8. Каталог цветного стекла. М.: Машиностроение, 1967.
9. Белов Н. П., Яськов А. Д., Грисимов В. Н. Лабораторный спектрометр для исследования коэффициента отражения и определения параметров цветности диффузно отражающих объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 74—78.
10. Джадд Д., Вышецкий Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978.

Сведения об авторах**Николай Павлович Белов**

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; ст. науч. сотрудник

Владимир Николаевич Грисимов

— д-р мед. наук; Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, кафедра стоматологии

Юрий Юрьевич Смирнов

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники

Александра Сергеевна Шерстобитова

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: ashev87@mail.ru

Андрей Дмитриевич Яськов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроникиПоступила в редакцию
25.04.11 г.