

тельных измерений отношения поляризаций в падающем пучке и последующего учета этого отношения в соответствующем коэффициенте, определяющем диффузные потери. Применение методики расчета диффузных потерь в ТД, представленной в данной работе, допускает возможность самокалибровки обоих типов ТД.

Л и т е р а т у р а

1. Fox N. P. Trap Detectors and their Properties // Metrologia. 1991. V. 28. P. 197—202.
2. Schrama C. A. e. a. Comparison of monochromator-based and laser-based cryogenic radiometry // Metrologia. 1998. V. 35. P. 431—435.
3. Ковалев А. А. и др. Определение внутренней квантовой эффективности фотодиода при помощи его вольт-амперных характеристик // Измерительная техника. 2011. № 2. С. 33—36; Kovalev A. A. e. a. Determination of the internal quantum efficiency of a photodiode by means of its current-voltage characteristic // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 2. P. 157—161.

4. Ковалев А. А. и др. Вычисление поглощенной фотодиодом мощности излучения по его экспериментальным вольт-амперным характеристикам // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 40—43; Kovalev A. A. e. a. Calculation of the radiation power absorbed by a photodiode from its experimental current-voltage characteristics // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 1. P. 57—62.

5. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы). Л.: Энергоатомиздат, 1983.

6. Eppeldauer G. P., Lynch D. C. Opto-Mechanical and Electronic Design of a Tunnel-Trap Si Radiometer // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2000. V. 105. P. 813—828.

7. Шерклиф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.

8. Ландау Л. В., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

9. Houston J. M., Livigni D. J. Comparison of Two Cryogenic Radiometers at NIST // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2001. V. 106. P. 641—647.

Дата принятия 25.09.2012 г.

53.088.2

Методические погрешности определения параметров спектра светодиодов двумя фотоприемниками

В. А. СЕРГЕЕВ*, В. Н. РОГОВ**, А. В. УЛЬЯНОВ**

* Ульяновский филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия, e-mail: sva@ulstu.ru

** Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия, e-mail: ulyanov_a@bk.ru

Рассмотрен способ оперативного определения длины волны излучения в максимуме спектра светодиода и ширины спектра при помощи двух фотоприемников с гауссовой спектральной характеристикой и представленная структурная схема устройства. Получено выражение для методической погрешности способа.

Ключевые слова: излучение, светодиод, длина волны, фотоприемник, спектральная характеристика.

The method and structural scheme of the device intended for operational determination of the radiation wavelength in the LED spectrum maximum and of the spectrum width by means of two photoreceivers with Gauss spectral characteristics are considered. The expression for a methodical error is formulated.

Key words: radiation, LED, wavelength, photoreceiver, spectral characteristics.

Для измерения параметров спектра излучения светодиодов (СИД) используют спектроанализаторы, монохроматоры, полихроматоры и другие устройства с дисперсионными элементами [1, 2]. Эти средства измерений (СИ) имеют низкое быстродействие и достаточно сложны в настройке и калибровке. Для многих технических приложений, в частности, в системах контроля качества требуется оперативное измерение длины волны $\lambda_{\max}$ излучения в максимуме спектра $I(\lambda)$ СИД и ширины спектра σ_λ по заданному уровню. Наиболее простым методом для измерений цветности светодиодов является метод с использованием двух фотоприемников с различными, но одинаковыми по форме, функциями спектральной чувствительности [3, 4]. Однако анализ погрешностей метода применительно к спектрам светодиодов и

возможности минимизации указанной погрешности путем подбора характеристик фотоприемников в литературе авторы не обнаружили.

Рассмотрим спектрометрическое устройство, состоящее из двух фотоприемников, со спектральными характеристиками вида

$$\left. \begin{aligned} S_1(\lambda) &= \frac{S_{10}}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_1)^2}{2\sigma_1^2}\right); \\ S_2(\lambda) &= \frac{S_{20}}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_2)^2}{2\sigma_2^2}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где λ_1, λ_2 — длины волн, соответствующие максимуму функций $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$, соответственно; σ_1, σ_2 — параметры этих функций, характеризующие их ширину (рис. 1).

Характеристики вида (1) достаточно легко реализуются путем применения широкополосных фотоприемников и полосовых фильтров с гауссовыми характеристиками пропускания [3]. При помощи нейтральных фильтров интегральную чувствительность обоих фотоприемников можно сделать одинаковой и без ограничения общности дальнейшего рассмотрения принять $S_{10} = S_{20} = S_0$.

Излучение со спектром $I(\lambda)$ при попадании на фотоприемники создает на их выходе сигналы, которые в общем случае определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \int_0^\infty S_1(\lambda) I(\lambda) d\lambda; \\ U_2 &= \int_0^\infty S_2(\lambda) I(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Поскольку ширина спектра излучения СИД существенно меньше полосы пропускания фотоприемников, их вид в данном случае не играет большой роли. Спектр излучения СИД по аналогии с [3] представим также гауссовой функцией

$$I(\lambda) = \frac{A_x}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_x)^2}{2\sigma_x^2}\right),$$

где A_x — параметр, определяющий интенсивность излучения; λ_x — длина волны излучения в максимуме спектра СИД; σ_x — параметр, характеризующий ширину спектра.

Тогда подинтегральные выражения в (2) запишем как

$$S_i(\lambda) I(\lambda) = \frac{S_0 A_x}{2\pi\sigma_i\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_1)^2}{2\sigma_i^2} + \frac{(\lambda - \lambda_x)^2}{2\sigma_x^2}\right], \quad (3)$$

где i — номер фотоприемника.

После подстановки (3) в (2) и несложных преобразова-

ний с учетом равенства $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-(t-m)^2/(2\sigma^2)} dt = 1$ для сиг-

налов на выходе фотоприемных устройств получим следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{S_0 A_x}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{(\lambda_x - \lambda_1)^2}{(\sigma_1^2 + \sigma_x^2)}\right]; \\ U_2 &= \frac{S_0 A_x}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{(\lambda_x - \lambda_2)^2}{(\sigma_2^2 + \sigma_x^2)}\right]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для нахождения трех неизвестных A_x, σ_x, λ_x в общем случае необходима система из трех уравнений. Для определения интенсивности излучения проще всего использовать третий калибровочный фотоприемник с равномерной спектральной чувствительностью $S_3(\lambda) = S_0/\Delta\lambda_k$ в диапазоне длин волн $\Delta\lambda_k \gg \sigma_k$. Значение сигнала этого фотоприемника $U_3 = S_0 A_x / \Delta\lambda_k$, найденное интегрированием по полосе, может быть использовано для нормирования сигналов U_1 и U_2 .

С целью дальнейшего анализа алгоритма преобразования сигналов введем безразмерные параметры спектра СИД:

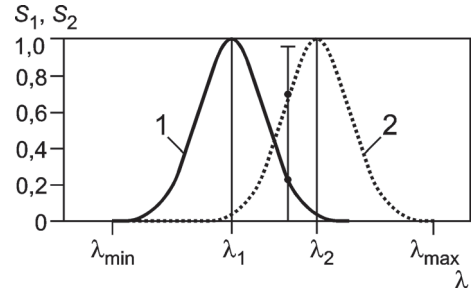


Рис. 1. Вид спектральных характеристик фоточувствительных элементов и спектра излучения СИД при его измерении двумя фотоприемниками

$\tilde{\lambda}_x = (\lambda_x - \lambda_{cp}) / \sigma_1$; $\tilde{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_1$, где $\lambda_{cp} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$. Тогда систему (4) после несложных преобразований для безразмерных величин запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U}_1 &= \frac{1}{\sqrt{1 + \tilde{\sigma}_x^2}} \exp\left[-\frac{(\tilde{\lambda}_x + \Delta\tilde{\lambda}_\Phi/2)^2}{(1 + \tilde{\sigma}_x^2)}\right]; \\ \tilde{U}_2 &= \frac{1}{\sqrt{1 + v^2 \tilde{\sigma}_x^2}} \exp\left[-\frac{v^2 (\tilde{\lambda}_x - \Delta\tilde{\lambda}_\Phi/2)^2}{(1 + v^2 \tilde{\sigma}_x^2)}\right], \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\tilde{U}_1 = \sqrt{2\pi} U_1 \sigma_1 / (U_3 \Delta\lambda_k)$, $\tilde{U}_2 = \sqrt{2\pi} U_2 \sigma_2 / (U_3 \Delta\lambda_k)$, $v = \sigma_1 / \sigma_2$,

$\Delta\tilde{\lambda}_\Phi = (\lambda_2 - \lambda_1) / \sigma_1$.

Дальнейший вывод функции преобразования в общем виде приводит к громоздким выражениям, поэтому рассмотрим наиболее важные и вполне реализуемые частные случаи. Допустим, что дисперсии рабочих фотоприемников одинаковы: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$, что вполне достижимо на практике, например, путем подбора фильтров. В этом случае параметр $v = 1$. Тогда, логарифмируя обе части уравнений (5) и вычитая одно полученное уравнение из другого, получаем общее выражение

$$\tilde{\lambda}_x = (1 + \tilde{\sigma}_x^2) \ln(\tilde{U}_2 / \tilde{U}_1) / (2\Delta\tilde{\lambda}_\Phi), \quad (6)$$

откуда

$$\lambda_x = \lambda_{cp} - (1 + \tilde{\sigma}_x^2) \sigma^2 \ln(\tilde{U}_2 / \tilde{U}_1) / (2(\lambda_2 - \lambda_1)). \quad (7)$$

Заметим, что при $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ в (6) входит только отношение приведенных сигналов фотоприемников, причем $(\tilde{U}_2 / \tilde{U}_1) = (U_2 / U_1)$, т. е. не требуется их нормировать. Однако при этом в (6) входит также второй неизвестный параметр спектра СИД

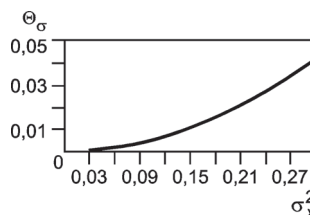


Рис. 2. Зависимость неисключенной части систематической погрешности измерения длины волны в максимуме спектра СИД от его ширины при среднем относительном ее разбросе $\varepsilon = 0,5$

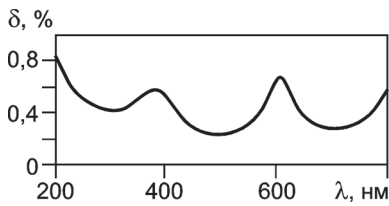


Рис. 3. Зависимости относительной случайной погрешности измерения длины волны излучения от значения измеряемой величины при $\lambda_1 = 400$ и $\lambda_2 = 600$ нм, $\sigma = 100$ нм

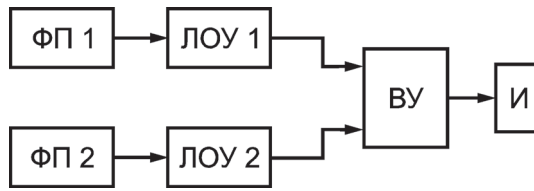


Рис. 4. Структурная схема измерителя параметров спектра СИД:

ФП1, ФП2 — фотоприемники; ЛОУ1, ЛОУ2 — логарифмические усилители, ВУ — вычитающее устройство; И — индикатор

$\tilde{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma$, причем во второй степени. В зависимости от значения $\tilde{\sigma}_x$ возможно несколько вариантов обработки сигналов.

В самом простом случае монохроматического источника $\tilde{\sigma}_x \rightarrow 0$ для неизвестной длины волны излучения получаем

$$\lambda_x = \lambda_{cp} + C \ln(U_1/U_2), \quad (8)$$

где $C = \sigma / (2\Delta\tilde{\lambda}_\Phi)$ — постоянная величина.

Выражение (8) представляет собой монотонную линейную функцию логарифма отношения сигналов. Это означает, что для монохроматического источника длина волны будет определяться однозначно. У современных СИД относительный разброс длины волны излучения в максимуме спектра от образца к образцу составляет 0,2—0,5 %. Это значение и определяет верхний предел допустимой погрешности СИ параметров спектра СИД.

Для реальных источников приближение монохроматического излучения приводит к погрешности. Относительная погрешность определения $\tilde{\lambda}_x$ согласно (6) равна $\tilde{\sigma}_x^2$. Заме-

тим, что значение $\tilde{\sigma}_x$ можно уменьшать путем увеличения ширины функции спектральной чувствительности фотоприемников. Для источников с малой, но ненулевой шириной спектра, учесть влияние конечной ширины можно введением поправочного коэффициента путем калибровки на одном или нескольких образцах СИД с точно известной длиной волны излучения в максимуме спектра. При последующих измерениях однотипных СИД будет проявляться неисключенная часть систематической погрешности, значение которой мож-

но оценить по формуле $\Theta_\sigma = 2\tilde{\sigma}_x^2 \varepsilon / (1 + \tilde{\sigma}_x^2)$, где ε — оценка среднего относительного разброса ширины спектра однотипных СИД от образца к образцу. У современных СИД средняя ширина спектра по уровню 0,606 (что соответствует значению σ_x) составляет не более 10—15 нм и относительное среднее квадратическое отклонение σ_x от образца к образцу не превышает 0,2. Зависимости указанной погрешности от относительной ширины спектра приведены на рис. 2. Уже при $\tilde{\sigma}_x \approx 0,1$ относительная погрешность, обусловленная разбросом ширины спектра СИД, приближается к предельно допустимой. Для повышения точности требуется определять ширину спектра каждого образца контролируемых излучателей.

В общем случае значение $\tilde{\sigma}_x^2$ может быть найдено из системы (5) после подстановки полученного решения (6) для $\tilde{\lambda}_x$, которое можно получить численными методами при компьютерной обработке результатов измерений. В приближении $\tilde{\sigma}_x^2 \ll 1$, что практически реализуемо для всех типов СИД, возможно аналитическое решение (5), которое приводит к следующему выражению:

$$\tilde{\sigma}_x^2 = - \left[b + a^2 + (\Delta\tilde{\lambda}_\Phi^2 / 4) \right] / (b + 2a^2 + 1), \quad (9)$$

$$\text{где } a^2 = \left[\ln(\tilde{U}_1/\tilde{U}_2) / (2\Delta\tilde{\lambda}_\Phi) \right], \quad b = \ln(\tilde{U}_1\tilde{U}_2).$$

При известных $\tilde{U}_1, \tilde{U}_2$ и $\Delta\tilde{\lambda}_\Phi$ значение $\tilde{\sigma}_x^2$ легко вычислить по (9) микроконтроллером или компьютером.

Погрешность измерений длины волны излучения, обусловленную случайным изменением параметров фотоприемников, оценим в приближении монохроматического источ-

ника. Подставив в полный дифференциал $\Delta\lambda_x = \frac{\partial\lambda_x}{\partial U_1} \Delta U_1 +$

$+\frac{\partial\lambda_x}{\partial U_2} \Delta U_2$ производные для $\partial\lambda_x/\partial U_1$ и $\partial\lambda_x/\partial U_2$ из (9) получим следующее выражение для систематической погрешности измерения λ_x :

$$\Delta\lambda_{xc} = C \left[(\Delta U_{1c}/U_1) - (\Delta U_{2c}/U_2) \right] = \frac{\sigma}{2\Delta\tilde{\lambda}_\Phi} [\delta U_{1c} - \delta U_{2c}],$$

где $\Delta U_{1c}, \Delta U_{2c}, \delta U_{1c}, \delta U_{2c}$ — абсолютные и относительные составляющие систематических погрешностей сигналов, соответственно.

Относительную случайную погрешность измерения λ_x определим из выражения

$$\hat{\delta}_\lambda = \left[\ln(U_1/U_2) + 2\Delta\tilde{\lambda}_\Phi/\sigma \right]^{-1} \sqrt{\delta U_1^2 + \delta U_2^2}. \quad (10)$$

Изменение сигналов фотоприемников вследствие изменения положения максимума и ширины спектральных характеристик фотоприемников запишем в форме полных дифференциалов

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &= \frac{A_x(\lambda_x - \lambda_1)}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-(\lambda_x - \lambda_1)^2/(2\sigma^2)} \Delta\lambda_1 + \frac{A_x}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times \\ &\times \left(\frac{(\lambda_x - \lambda_1)^2}{\sigma^3} - \frac{1}{\sigma} \right) e^{-(\lambda_x - \lambda_1)^2/(2\sigma^2)} \Delta\sigma_1; \\ \Delta U_2 &= \frac{A_x(\lambda_x - \lambda_2)}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-(\lambda_x - \lambda_2)^2/(2\sigma^2)} \Delta\lambda_2 + \frac{A_x}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times \\ &\times \left(\frac{(\lambda_x - \lambda_2)^2}{\sigma^3} - \frac{1}{\sigma} \right) e^{-(\lambda_x - \lambda_2)^2/(2\sigma^2)} \Delta\sigma_2. \end{aligned} \right\}$$

Если изменения параметров фотоприемников являются случайными и независимыми, тогда (10) принимает вид

$$\hat{\delta}_{\lambda} = B \left[\left(\frac{\lambda_1 \Lambda_1}{\sigma^2} \hat{\delta}_{\lambda_1} \right)^2 + \left(\left(\frac{\Lambda_1^2}{\sigma^2} - 1 \right) \hat{\delta}_{\sigma_1} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_2 \Lambda_2}{\sigma^2} \hat{\delta}_{\lambda_2} \right)^2 + \left(\left(\frac{\Lambda_2^2}{\sigma^2} - 1 \right) \hat{\delta}_{\sigma_2} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где $B = \left[\sqrt{2\pi} \sigma \left(\ln(U_1/U_2) + 2\Delta\tilde{\lambda}_f/\sigma \right) \right]^{-1}$; $\Lambda_1 = \lambda_x - \lambda_1$; $\Lambda_2 = \lambda_x - \lambda_2$.

График функции $\hat{\delta}_{\lambda}(\lambda_x)$ при значениях $\lambda_1 = 400$ нм и $\lambda_2 = 600$ нм, $\sigma = 100$ нм и относительных погрешностях $\hat{\delta}_{\lambda_1} = \hat{\delta}_{\lambda_2} = \hat{\delta}_{\sigma} = 0,1$ и $\hat{\delta}_{\sigma_1} = \hat{\delta}_{\sigma_2} = \hat{\delta}_{\sigma} = 0,1$ представлен на рис. 3, откуда следует, что при одинаковых случайных погрешностях параметров фотоприемников погрешность измерения будет минимальной для длины волны излучения, равной среднему значению: $\lambda_x = \lambda_{cp} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$.

Структурная схема устройства (рис. 4), работающего в соответствии с выражением (7), достаточно проста и не требует пояснений.

Таким образом, показана возможность оперативного измерения длины волны излучения в максимуме спектра СИД и ширины спектра по заданному уровню с приемлемой точностью. Полученные результаты могут быть использованы в приборах для измерений параметров спектра СИД, которые будут иметь высокое быстродействие и простоту в настройке и калибровке.

Л и т е р а т у р а

1. Schanda J., Muray K., Kráncz B. LED colorimetry // Proc. AIC Conf. Rochester, 2001.
2. Schanda J. LED photometry and colorimetry [Электрон. ресурс]. <http://www.knt.vein.hu/staff/schandaj/SJCV-Publ-2005/523.pdf> (дата обращения: 03.10.2012).
3. Рогов В. Н., Ульянов А. В. Методы измерения цвета светодиодов // Радиоэлектронная техника: Межвуз. сб. науч. трудов. Ульяновск: УлГТУ, 2010. С. 100—105.
4. Рогов В. Н., Ульянов А. В. Устройство измерения цветности светодиодов // Радиоэлектронная техника: Межвуз. сб. науч. трудов. Ульяновск: УлГТУ, 2011. С. 92—95.

Дата принятия 14.01.2013 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.12:532.57

Измерение расхода двухфазного потока кориолисовым расходомером

А. В. ПУШНОВ

ООО «Эндресс+Хаузер», Москва, Россия, e-mail: Andrei.Pushnov@ru.endress.com

Показано, что при соблюдении ряда условий кориолисовым расходомером можно достаточно надежно измерять расход двухфазного потока. Рассмотрены требования к конструкции кориолисового расходомера, выполнение которых позволяет добиться высоких результатов. Даны рекомендации по способу монтажа расходомера при измерении двухфазного потока.

Ключевые слова: кориолисовый и массовый расходомеры, двухфазный поток, свободный газ, измерительные трубки.

It is shown that at observance of certain conditions the Coriolis flow meters can reliably measure the two-phase flows. The requirements to Coriolis flow meter design allowing to make possible the reliable measurement of two-phase flows are considered. The recommendations on the Coriolis flow meter installation at the two-phase flow measurement are given.

Key words: coriolis flow meter, mass flow meter, two-phase flow, free gas, measuring tubes.

Измерение расхода двухфазного потока при помощи кориолисового (массового) расходомера — актуальная научно-прикладная задача, особенно для нефтегазовой отрасли промышленности в связи с требованиями стандарта [1]. Пользователи обсуждают влияние свободного газа на погрешность таких расходомеров, в основе которого лежит информация производителей и результаты собственных исследова-

ний. Скептики часто в качестве аргументов приводят результаты [2], интерпретируя их не в пользу применения массовых расходомеров в составе автоматических групповых измерительных (замерных) установок (АГЗУ). Оптимисты ссылаются на утверждения ряда производителей о том, что встроенное в прибор специализированное программное обеспечение позволяет компенсировать влияние свобод-