

В работе представлен обзор и анализ методов измерения радиометрических характеристик светодиодов. Разработана удобная для повторения установка, что позволяет измерять основные параметры светодиодов на основе имеющегося и доступного в Украине метрологического оборудования и элементной базы. Проанализированы основные погрешности измерений радиометрических характеристик светодиодов, предоставлены рекомендации относительно их минимизации. Результаты работы будут полезны специалистам в области прецизионной радиометрии и разработчикам элементов оптико-электроники.

Ключевые слова: светодиоды, радиометрия, метрология

N. I. Didukh, L.A. Mikheenko, V. S. Sveshnikov

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

RADIOMETRY AND METROLOGY LEDS

In this article presented an overview and analysis methods for measuring radiometric characteristics of the LEDs. Designed for easy installation of repetition, which allows you to measure the basic parameters of the LEDs based on best available and affordable in Ukraine metrology equipment and components. Analyzed the basic error of measurement of radiometric characteristics of the LEDs provided recommendations to minimize them. The results will be useful to specialists in the field of precision radiometry and developers elements opto-electronics.

Keywords: LED, radiometry, metrology.

*Надійшла до редакції
2 червня 2010 року*

УДК 528.7, 629.78

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБОРА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

*Коваль С.Т., Цушко П.Н., Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

*Предложен специализированный метод определения спектральных характеристик од-
ноэлементных приемников излучения с использованием набора светоизлучающих диодов. Его
преимущества и эффективность подтверждены приведенными экспериментальными ре-
зультатами.*

Ключевые слова: параметры и характеристики приемников излучения, спектральная чувствительность, комплексность и автоматизация методов измерения, виртуальная лаборатория на базе ПК.

Введение

Одной из главных характеристик приемника излучения (ПИ) является его чувствительность, определяемая отношением величины фотосигнала к энергии потока падающего оптического излучения. Если поток лежит в достаточно узком интервале спектра, то такое отношение определяет значение спектральной чувствительности ПИ на определенной длине волны.

Спектральная чувствительность играет важную роль при выборе фотоприемного устройства в процессе проектирования оптико-электронных приборов. Определение такого рода характеристик на этапах научно-исследовательской и

опытно-конструкторской работ в производстве выполняется с применением дорогостоящих измерительных схем, наиболее габаритной и сложной в настройке частью которой является монохроматор [3]. Щелевая диафрагма такого прибора существенно снижает энергию потока излучения, что зачастую вынуждает метрологов использовать мощные источники излучения, например, лампы накаливания, а также механические модуляторы [2].

С целью упрощения нами было предложено модифицировать схему лабораторной установки, заменив монохроматор и модулятор набором светодиодных (СИД) излучателей.

Постановка задачи

Работа посвящена альтернативному методу определения спектральной чувствительности приемников оптического излучения. В основе этого метода лежит использование подобранного набора СИД, работающих в узком интервале длин волн на разных участках спектра. Метод подобен применению в фотометрии полосовых светофильтров, однако его главными достоинствами являются простота конструкции, дешевизна, малые габариты, быстродействие, а также перспективная возможность полной автоматизации процесса измерений.

Описание лабораторной установки

Согласно стандартной методике [1], лабораторный стенд для определения спектральной чувствительности состоит из следующих блоков (рис. 1): 1 – источник излучения; 2 – модулятор; 3 – монохроматор; 4 – эталонный ПИ; 5 – усилительное устройство; 6 – регистрирующий прибор; 7 – испытуемый ПИ; 8 – усилительное устройство; 9 – регистрирующий прибор.

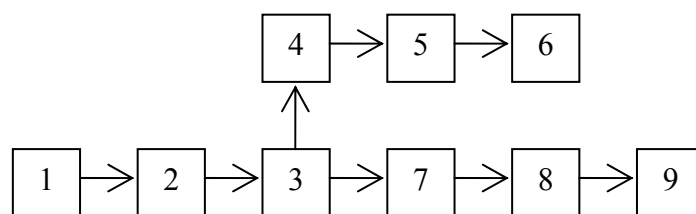


Рис. 1. Структурная схема установки для измерения спектральной чувствительности ПИ

Спектральная чувствительность испытуемого приемника излучения определяется за счет сопоставления фотосигналов, сформированных потоком от монохроматора, на эталонном и испытуемом ПИ.

В современной фотометрии благодаря развитию цифровой техники все больше появляется многофункциональных малогабаритных приборов. Вычислительная мощность сигнальных процессоров, а также наличие всевозможных средств коммуникации электронных устройств с персональным компьютером (ПК) позволяет создавать производителям измерительной техники целые ком-

плексы по сбору данных и обработке сигналов, так называемые «виртуальные лаборатории».

Учитывая такую тенденцию современного развития измерительного электронного оборудования нами было предложено модифицировать стандартный лабораторный стенд и разработать на базе «виртуальных» осциллографа и генератора альтернативный метод определения спектральных характеристик одноэлементных ПИ, заменив монохроматор и модулятор набором светодиодных излучателей.

Конструкция стенда, работающего без монохроматора, обладает существенно большей светосилой и быстродействием, так как в ней отсутствуют подвижные механические части. Светодиоды, работающие на разных участках спектра, заменяют диспергирующие оптические элементы, управляемый генератор – модулятор излучения, а осциллограф совместно с ПК создают мощную платформу для регистрации сигналов и их последующей обработки.

Суть метода определения спектральной чувствительности приемника излучения

Метод базируется на использовании ограниченного числа светодиодов, имеющих узких спектр излучения с максимумами, расположенными на различных длинах волн. Светодиоды, включаясь попеременно, формируют фотосигнал на выходе испытуемого ПИ, по величине которого определяется спектральная чувствительность. Различие в мощностях излучения используемых светодиодов устранено варьированием питающего напряжения для каждого СИД, а также введением поправочных коэффициентов в расчетные формулы.

В связи с селективным характером спектральной чувствительности $S(\lambda)$ фотоприемника его интегральная чувствительность S зависит от состава того излучения, которое используется при ее определении [2]. Зная спектральную кривую источника, мощность потока, приходящего на активную площадку приемника, а также значение фотосигнала, можно установить взаимосвязь между $S(\lambda)$ и S .

Интегральная чувствительность фотоэлемента определяется из следующего выражения

$$S = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $\Phi(\lambda)$ – спектральный поток излучения, λ_1 и λ_2 – граничные длины волн СИД.

В классической методике определения спектральной чувствительности приемника излучения, в которой используются монохроматоры либо узкополосные интерференционные фильтры, принято считать, что поток на выходе таких приборов является практически монохроматическим, а реакция фотоприемного устройства соответствует значению его спектральной чувствительности на той длине волны, на которую настроен спектральный прибор. Это вполне оправда-

но, так как на рабочем участке длин волн, который пропускает узкая щель монохроматора либо полосовой фильтр, характеристика приемника излучения практически линейная.

Как это видно из рис. 2, спектральная характеристика СИД также заключена в достаточно узком спектральном диапазоне, в то же время характеристика фотодиода по сравнению со светодиодом достаточно плавная. Учитывая это определим спектральную чувствительность ПИ на конкретном примере.

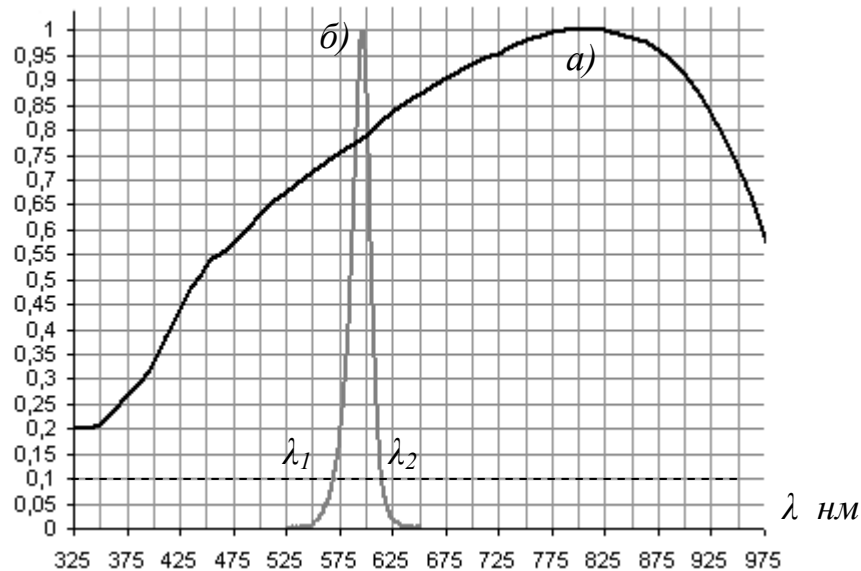


Рис. 2. Спектральные характеристики полупроводниковых приборов, где: *a* – относительная спектральная чувствительность фотоземента кремниевого фотодиода; *б* – относительный спектральный поток излучения InGaAlP светодиода

Пусть многоэлементный светодиодный излучатель состоит из *n* светодиодов с достаточно точно измеренными их спектральными характеристиками (см. рис. 3). Для того, чтобы убедиться в правильной методике определения спектральной чувствительности, возьмем прецизионный эталонный фотодиод (ФД) BPW20RF фирмы Vishay Semiconductors [6], параметры и характеристики которого также заранее известны. Покажем, что значения спектральной характеристики ФД возможно будет определить в *n* ее точках на соответствующих рабочих длинах волн светодиодов. Другие точки спектральной кривой получим в результате интерполирования результатов измерения.

В качестве примера возьмем желтый светодиод и, воспользовавшись выражением (1), определим для него интегральную чувствительность фотодиода. Так как в наших расчетах мы используем дискретные данные, заменим отношение интегралов (1) соответствующими суммами

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N \Phi_i S_i \Delta\lambda}{\sum_{i=1}^N \Phi_i \Delta\lambda}, \quad \Delta\lambda = \lambda_{i+1} - \lambda_i. \quad (2)$$

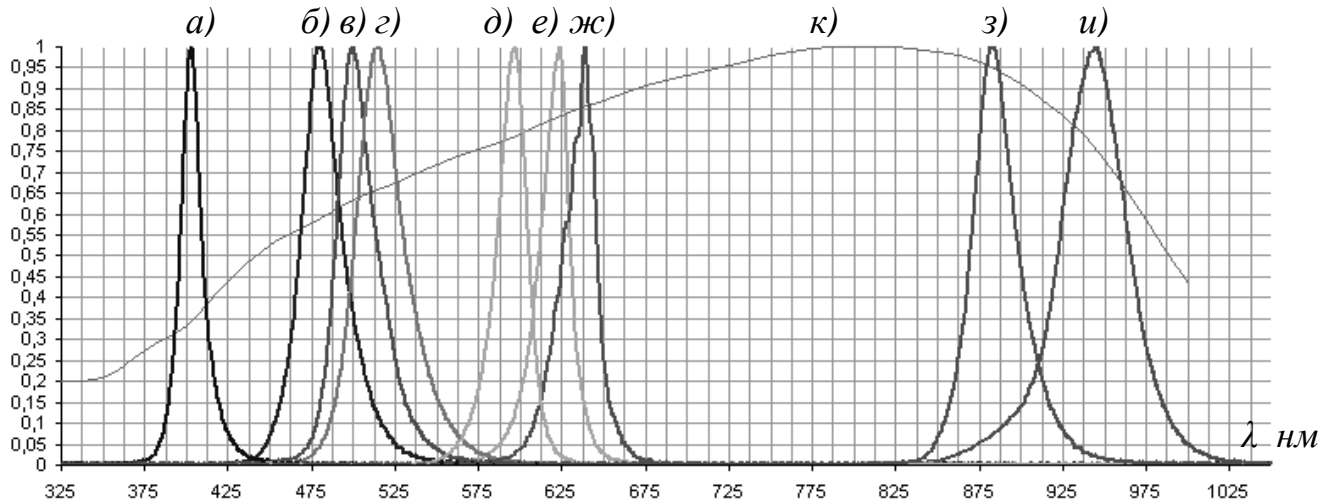


Рис. 3. Спектральні характеристики багатоелементного світодиодного излучателя: *a* – УФ світодиод (403 нм); *б* – синій світодиод (480 нм); *в* – зелений світодиод (500 нм); *г* – зелений світодиод (520 нм); *д* – жовтий світодиод (596 нм); *е* – помаранчевий світодиод (623 нм); *ж* – червоний світодиод (639 нм); *з* – інфрачервоний світодиод (884 нм); *и* – інфрачервоний світодиод (945 нм); *к* – відносна спектральна чутливість фотоелемента кремнієвого фотодиода

Визначимо значення інтегральної чутливості, зобразив її на наступному графіку в вигляді горизонтальної пунктирної лінії, в той час, як реальна крива $S(\lambda)$ показана сплошної:

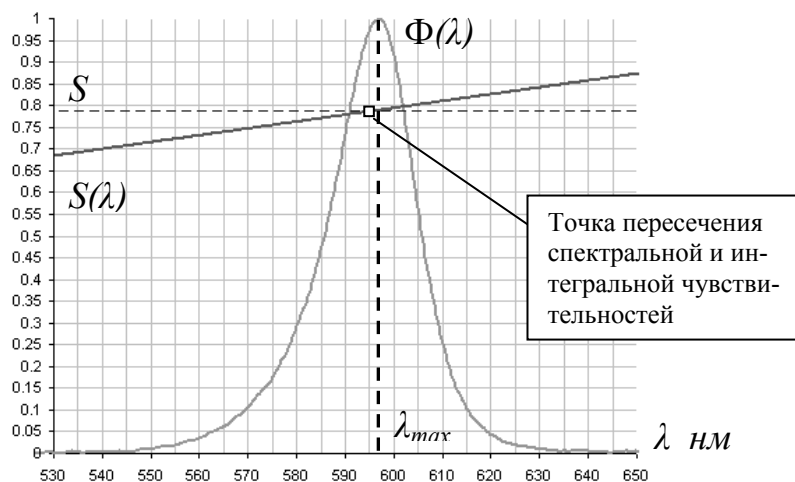


Рис. 4. Взаємозв'язок спектральної та інтегральної чутливостей фотодиода BPW20RF відносно жовтого світодиода (596 нм)

Як видно з графіка, точка пересічення кривої спектральної та інтегральної чутливості приймача визначають максимум довжини хвилі випромінювання світодиода з погрешністю в декілька нанометрів, що обумовлено асиметриєю кривої $\Phi(\lambda)$. Отсюда следует вывод: решив обратную задачу, то

есть, определив интегральную чувствительность приемника по конкретному СИДу, путем отношения фотосигнала и интегрального потока светодиода, а также зная его максимум длины волны излучения, можно определить достаточно точно спектральную чувствительность приемника на этой длине волны.

К тому же, если ориентироваться не на максимум спектральной кривой излучения светодиода, а на ее энергетический центр λ_c , который в нашем случае определяется из соотношения (3), то результат будет в несколько раз точнее (см. рис. 5 и 6)

$$\lambda_c = \frac{\sum \Phi_i \lambda_i}{\sum \Phi_i} \quad (3)$$

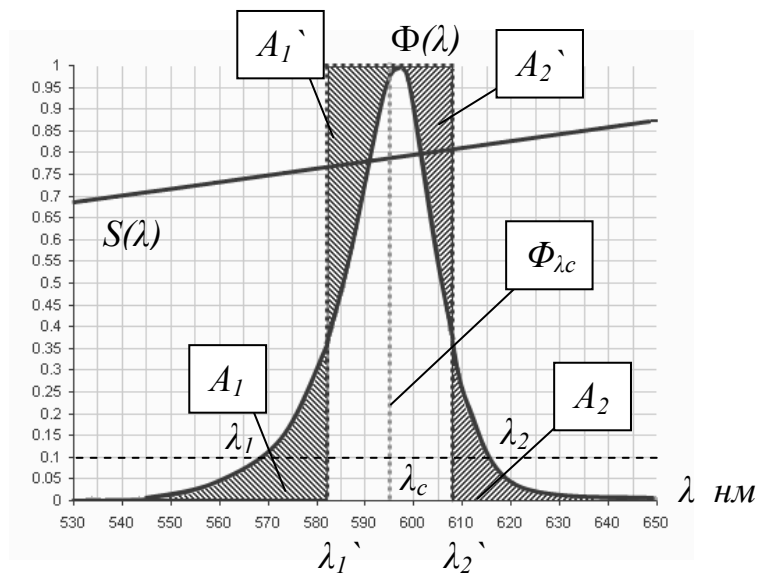


Рис. 5. Определение энергетического центра кривой излучения СИД

Из рис. 5 видно, что исходя из равенства площадей A_1 и A_1' , A_2 и A_2' , нелинейную кривую излучения СИД можно заменить эквивалентным прямоугольным спектром, центр диапазона которого будет определять энергетический центр λ_c .

Тогда выражение (1) можно записать следующим образом:

$$S = \frac{\Phi_{\lambda_c} \cdot \int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'} S(\lambda) d\lambda}{\Phi_{\lambda_c} \Delta\lambda}, \quad \Delta\lambda = \lambda_2' - \lambda_1' \quad (4)$$

К тому же, если на интервале длин волн $\Delta\lambda$ функция спектральной чувствительности приемника практически линейна, то значение интеграла выражения 5 можно также заменить константой. Отсюда

$$S = \frac{S_{\lambda_c} \cdot \Delta\lambda}{\Delta\lambda} = S_{\lambda_c} \quad (5)$$

где S_{λ_c} - спектральная чувствительность фотоприемника на длине волны λ_c .

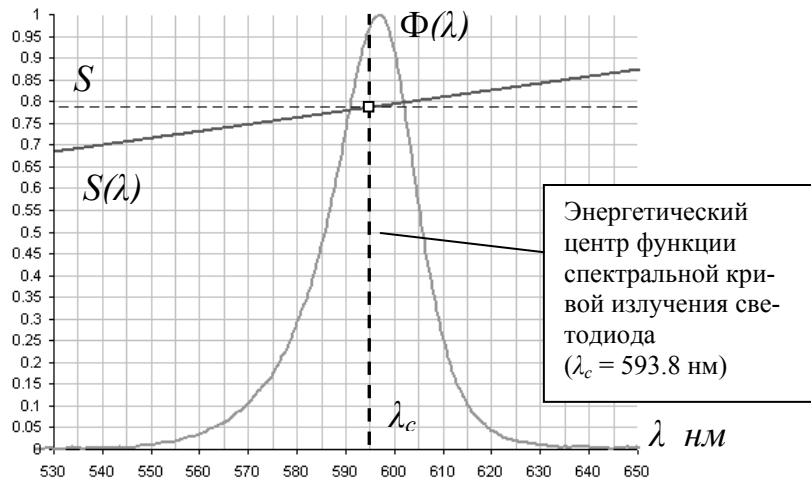


Рис. 6. Взаимосвязь спектральной и интегральной чувствительностей фотодиода BPW20RF относительно желтого светодиода (596 нм) с учетом энергетического центра

Используя вышеизложенную методику определим значения спектральной чувствительности ФД BPW20RF для каждого СИД, указанного на рис. 3, с занесением результатов в табл. 1.

Таблица 1

Светодиод	Энергетический центр λ_c	Относительная спектральная чувствительность S_{λ_c}
УФ светодиод (403 нм)	406.8 нм	0.363
Синий светодиод (480 нм)	488.5 нм	0.613
Зеленый светодиод (500 нм)	508.9 нм	0.649
Зеленый светодиод (520 нм)	520.7 нм	0.671
Желтый светодиод (596 нм)	593.8 нм	0.778
Оранжевый светодиод (623 нм)	616.3 нм	0.824
Красный светодиод (639 нм)	636.8 нм	0.856
Инфракрасный светодиод (884 нм)	880.8 нм	0.952
Инфракрасный светодиод (945 нм)	928.5 нм	0.826

По значениям табл. 1 восстановим путем интерполирования, например квадратичным сплайном, форму кривой спектральной чувствительности кремниевого фотодиода. Под сплайном обычно понимают кусочно-заданную функцию, совпадающую с функциями более простой природы на каждом элементе разбиения своей области определения. Классический сплайн одной переменной определяется разбиением на конечное число отрезков, на каждом из которых сплайн совпадает с некоторым алгебраическим полиномом.

В нашем случае полином является квадратичным уравнением, а функция спектральной чувствительности, получившаяся в результате интерполяции, будет иметь следующий вид:

$$S(\lambda) = a_i \lambda^2 + b_i \lambda + c_i, \quad \lambda \in (\lambda_{ci-1}, \lambda_{ci}), \quad i = 0..n, \quad (6)$$

где a_i, b_i, c_i – коэффициенты квадратичного полинома, на интервале между энергетическими центрами $\lambda_{ci-1}, \lambda_{ci}$, n – количество полиномов.

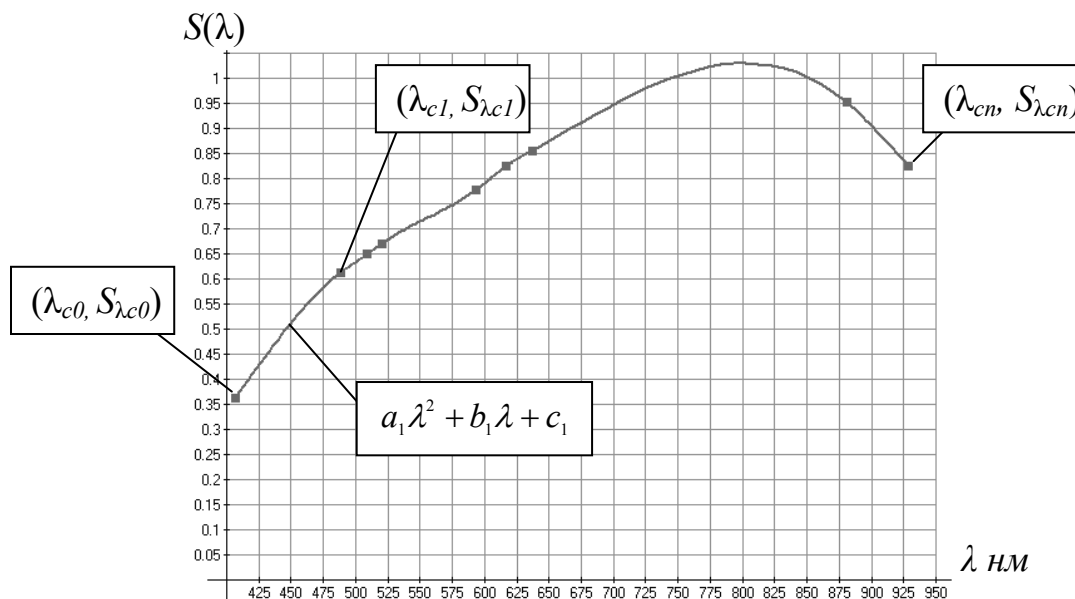


Рис. 7. Интерполирование результатов измерения квадратичным сплайном

Для того, чтобы определить коэффициенты квадратичных полиномов, необходимо решить систему из $3n$ уравнений, которая определяется из следующих соотношений:

Таблица 2

2n уравнений	n-1 уравнений	1 уравнение
$\left. \begin{aligned} a_1 \lambda_{c0}^2 + b_1 \lambda_{c0} + c_1 &= 0 \\ a_1 \lambda_{c1}^2 + b_1 \lambda_{c1} + c_1 &= 0 \\ a_2 \lambda_{c1}^2 + b_2 \lambda_{c2} + c_2 &= 0 \\ a_2 \lambda_{c2}^2 + b_2 \lambda_{c2} + c_2 &= 0 \\ \dots \\ a_n \lambda_{cn}^2 + b_n \lambda_{cn} + c_n &= 0 \end{aligned} \right\}$	$\left. \begin{aligned} 2a_1 \lambda_{c1} + b_1 - 2a_2 \lambda_{c2} - b_2 &= 0 \\ 2a_2 \lambda_{c2} + b_2 - 2a_3 \lambda_{c3} - b_3 &= 0 \\ 2a_3 \lambda_{c3} + b_3 - 2a_4 \lambda_{c4} - b_4 &= 0 \\ \dots \\ 2a_{n-1} \lambda_{cn-1} + b_{n-1} - 2a_n \lambda_{cn} - b_n &= 0 \end{aligned} \right\}$	$a_1 = 0$

В нашем случае, исходя из табл. 1, количество полиномов n будет равно 8, тогда система будет содержать 24 уравнения. Используя данные таб. 2 решим эту систему матричным способом. Обозначим основную матрицу системы литерой M , литерой C – матрицу искомых коэффициентов полиномов (свободных членов), Z – матрицу значений. Тогда по известному соотношению (7) определим значения коэффициентов полиномов a_i, b_i и c_i :

$$C = M^{-1}Z. \quad (7)$$

Коэффициенты квадратичных полиномов:

$$a = \begin{pmatrix} 0 \\ -7.047 \times 10^{-6} \\ -8.377 \times 10^{-7} \\ -4.246 \times 10^{-6} \\ 1.603 \times 10^{-6} \\ -6.831 \times 10^{-6} \\ -4.588 \times 10^{-6} \\ -7.755 \times 10^{-6} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 3.06 \times 10^{-3} \\ 8.794 \times 10^{-3} \\ 2.727 \times 10^{-3} \\ 6.195 \times 10^{-3} \\ 1.052 \times 10^{-4} \\ 0.01 \\ 7.356 \times 10^{-3} \\ 0.011 \end{pmatrix} \quad c = \begin{pmatrix} -0.882 \\ -2.001 \\ -0.522 \\ -1.404 \\ 0.15 \\ -2.819 \\ -1.968 \\ -3.064 \end{pmatrix} .$$

Отобразим исходную и интерполированную функции спектральной чувствительности на рис. 8.

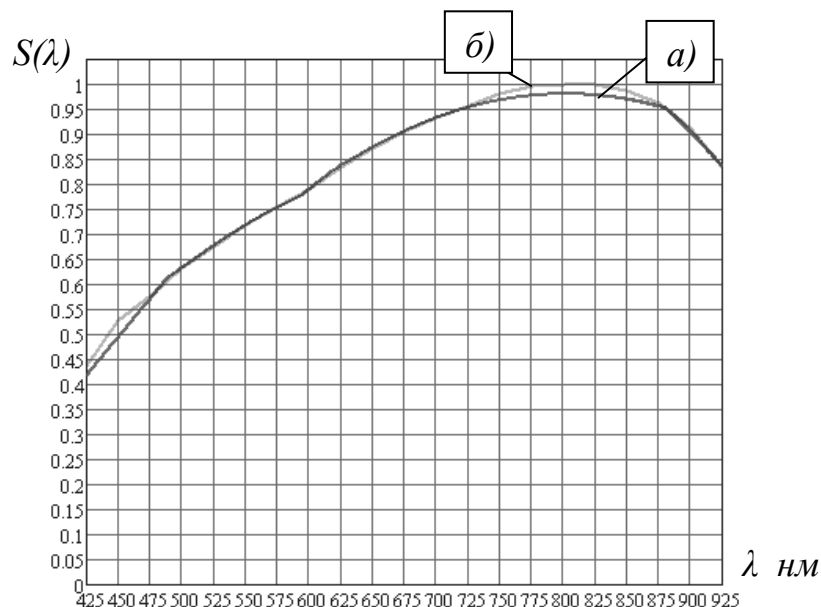


Рис 8. Спектральная чувствительность кремниевого фотодиода, где: *a* – интерполированная по значениям табл. 1; *б* – исходная

Произведем оценку точности данного метода. Так как исходная функция дискретна, произведем расчет отклонений в конкретных известных точках исходной спектральной чувствительности. Тогда относительная средней квадратическая погрешность будет задана следующим выражением:

$$\Delta S_i = \frac{\sqrt{(S(\lambda_i) - S_{ucxi})^2}}{S_{ucxi}}, \quad (8)$$

где $S(\lambda_i)$ – значение интерполированной функции на заданной длине волны λ_i , S_{ucxi} – дискретное значение исходной спектральной чувствительности приемника.

Из табл. 3 видно, что восстановленная кривая спектральной чувствительности ПИ схожа с исходной функцией, максимальное отклонение которой по предварительной оценке не превышает 6%.

Таблиця 3. Результати расчета относительной средней квадратической погрешности на отдельных дискретах

λ_i нм	$S(\lambda_i)$	$S_{\text{нечі}}$	ΔS_i %	λ_i нм	$S(\lambda_i)$	$S_{\text{нечі}}$	ΔS_i %	λ_i нм	$S(\lambda_i)$	$S_{\text{нечі}}$	ΔS_i %
425	0.4186	0.4388	4.58	600	0.7905	0.7898	0.07	775	0.9774	0.9973	1.99
450	0.4951	0.5265	5.96	625	0.8382	0.8351	0.38	800	0.9807	1	1.92
475	0.5716	0.5771	0.94	650	0.8751	0.8723	0.32	825	0.9782	0.9945	2.17
500	0.6340	0.6329	0.16	675	0.9070	0.9069	0.02	850	0.9700	0.98670	1.69
525	0.6785	0.6755	0.44	700	0.9332	0.9335	0.02	875	0.9560	0.96276	0.69
550	0.7193	0.7180	0.17	725	0.9537	0.9547	0.11	900	0.9055	0.91223	0.73
575	0.7548	0.7553	0.06	750	0.9684	0.9813	1.31	925	0.8364	0.83510	0.16

Выводы

Предложен метод для предварительной быстрой оценки спектральной чувствительности ПИ, главными достоинствами которого являются простота конструкции, дешевизна, малые габариты, быстродействие, а также возможность автоматизации процесса измерений. В перспективе развития данного метода лежит использование большего числа СИД, что позволит проводить измерения в более широком спектральном диапазоне, а также существенно повысить их точность.

Литература

- ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
- Гуревич М.М. Фотометрия. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 142.
- Иванов В.С. Основы оптической радиометрии. – М.: Физматлит, 2003. – С. 180.
- Гель П. Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс. – М.: ДМК, 1999. – С. 35.
- Мешков В.В. Основы светотехники. – М.: Энергия, 1979. – С. 45 - 46.
- Электронное техническое описание эталонного приемника излучения BPW20RF. – Режим доступа: <http://www.vishay.com/docs/81570/81570.pdf>

С. Т. Коваль, П. Н. Цушко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЙМАЧІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ НАБОРА СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ДІОДІВ

Запропоновано спеціалізований метод визначення спектральних характеристик одноелементних приймачів випромінювання з використанням набору світловипромінювальних діодів. Його переваги та ефективність підтверджені наведеними експериментальними результатами.

Ключові слова: параметри та характеристики приймачів випромінювання, спектральна чутливість, комплексність та автоматизація методів вимірювання, віртуальна лабораторія на базі ПК.

S. T. Koval, P. N. Tsushko

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

DETERMINATION OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF OPTICAL DETECTORS USING A SET OF LEDS

A special method for determining of the spectral characteristics of single-element optical detectors using a set of light-emitting diodes. Its advantages and effectiveness are confirmed by the experimental results.

Keywords: parameters and characteristics of optical detectors, spectral sensitivity, complex and automated measuring methods, virtual laboratory based on PC

*Надійшла до редакції
19 липня 2010 року*