

ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 53.087.4

А.В. Ульянов, В.А. Сергеев, В.Н. Рогов

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРА УЗКОПОЛОСНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ¹

Ульянов Александр Владимирович, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета, выпускник аспирантуры кафедры «Радиотехника» УлГТУ. Руководитель отдела ГС и ИТ филиала АО «ЭР-Телеком Холдинг» в г. Ульяновск. Имеет статьи в области методов и средств измерения параметров элементов и приборов микро- и оптоэлектроники, автоматизации процессов измерения. [e-mail: ulyanov_a@bk.ru].

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил физический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Имеет монографии, статьи и изобретения в области моделирования и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Рогов Виктор Николаевич, кандидат технических наук, профессор, декан радиотехнического факультета УлГТУ, окончил Ульяновский политехнический институт. Имеет статьи и изобретения в области измерения параметров электрических шумов, оптических сигналов, колориметрии. [e-mail: rvn@ulstu.ru].

Аннотация

Представлен краткий анализ известных средств оперативного контроля параметров спектра оптического излучения, а также области применения указанных средств. Показано, что основной тенденцией развития средств спектрального анализа является повышение их быстродействия. Описан способ измерения параметров спектра узкополосного оптического излучения двумя фотоприемниками с заданными спектральными характеристиками, описываемыми гауссовыми функциями, с различной длиной волны в максимуме пропускания. Показана возможность оперативного определения предложенным способом как центральной длины волны спектра излучения, так и ширины спектра. Предложенный способ позволяет повысить быстродействие средств контроля и управления источниками оптического излучения. Приведена функциональная схема и основные характеристики экспериментального образца устройства, реализующего предложенный способ. Экспериментально показана возможность применения разработанного варианта устройства для определения тепловых параметров светодиодов по сдвигу спектра излучения в результате саморазогрева светодиода рабочим током. Приведены результаты апробации методики измерения тепловых параметров светодиодов на нескольких образцах серийных приборов.

Ключевые слова: спектр излучения, параметры, измерение, фотоприемник.

¹ Работа выполнена в рамках проекта №1514 государственного задания № 2014/232 Минобрнауки РФ Ульяновскому государственному техническому университету.

METHODS AND MEANS OF OPERATIONAL CONTROL OF NARROW-BAND OPTICAL RADIATION SPECTRUM PARAMETERS

Aleksandr Vladimirovich Ulyanov, Head of the Department of GSiIT of "ER-Telecom Holding" Ulyanovsk Branch; graduated from the Faculty of Radioengineering at Ulyanovsk State Technical University; finished his post-graduate study at the Department of Radioengineering at Ulyanovsk State Technical University; an author of articles in the field of methods and tools for measuring the parameters of elements and devices of micro and optoelectronics, automation of measurement processes. e-mail: ulyanov_a@bk.ru.

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Physics at Lobachevsky State University; Head of Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS. monographs; an author of monographs, inventions, and articles in the field of researching and simulating semiconductor device and integrated circuit performance, and measuring their thermal characteristics. e-mail: sva@ulstu.ru.

Viktor Nikolaevich Rogov, Candidate of Engineering, Professor, Head of the Faculty of RadioEngineering of Ulyanovsk State Technical University; graduated from Ulyanovsk Polytechnic Institute; an author of articles and inventions in the field of parameters measurement of electrical noise, optical signals, colorimetry. e-mail: rvn@ulstu.ru.

Abstract

A brief analysis of the well-known means of operational control parameters of optical radiation spectrum as well as the application of these means has been submitted. It is shown that the main trend of development of spectral analysis means is to improve their performance. A method for measuring the parameters of a narrow-band spectrum of optical radiation in two photodetectors with predetermined spectral characteristics described by a Gaussian function with different wavelengths at the maximum bandwidth has been described. The possibility of operational determination of both the central wavelength of the emission spectrum and the spectral width with the use of the proposed method has been shown. The proposed method can improve performance of monitoring and control sources of optical radiation. The functional scheme and the main characteristics of the experimental prototype device based on the proposed method have been shown. It is experimentally demonstrated that the possibility of application of the developed embodiment of the device for determining the thermal properties of LEDs based on the emission spectrum shift as a result of self-heating of the LED operating current. The results of the testing methodology for measuring thermal properties of LEDs with the use of several samples of serial devices have been obtained.

Key words: emission spectrum, parameters, measurement, photodetector.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие активно разрабатываются и все более широко применяются автоматизированные системы измерения, контроля и управления параметрами оптического излучения. Оптическое излучение широко используется не только как носитель информации в системах передачи информации и в оптоэлектронных измерительных системах, но и как технологический инструмент в микроэлектронике, машиностроении, медицине и других производствах. Одной из актуальных технических задач является повышение точности и быстродействия средств измерения параметров спектра узкополосного оптического излучения (УОИ).

Широкое применение системы автоматизированного контроля и управления параметрами спектра УОИ находят в системах оптической связи [1] для автоматической подстройки длины волны передающих устройств; при контроле и управлении температурой полупроводниковых оптических излучателей [2]; в автоматизированных системах измерения скорости доплеровским методом [3]; в оптоэлектронных измерительных системах с перестраиваемыми и прецизионными источниками УОИ на основе

светоизлучающих диодов (СИД) и полупроводниковых лазеров [4] и др.

В работе [5] описаны способ и устройство управления длиной волны лазерного излучения за счет изменения температуры кристалла полупроводникового лазера. Данный способ находит применение в системах оптической связи со спектральным уплотнением каналов. Контроль центральной длины волны оптического излучения осуществляется датчиком, состоящим из двух брэгговских решеток и двух фотодиодов. По сигналу датчика микроконтроллер управляет рабочим током лазерного диода и температурой корпуса с помощью элемента Пельтье. Недостатком метода является отсутствие возможности контроля ширины спектра оптического излучения.

В работах А.В. Крайского и др. [6, 7] предлагается контролировать оптическое излучение на основе метода с использованием двух и более фотоприемников с произвольными спектральными характеристиками. По оценкам авторов, погрешность измерения центральной длины волны не должна превышать 1 нм. К существенным недостаткам указанного способа можно отнести следующее: невозможно контролировать ширину спектра оптического

го излучения. Также авторы не приводят оценки погрешности измерения центральной длины волны, связанной с изменением ширины спектральной характеристики для реальных источников оптического излучения.

В работах [8, 9] измерение параметров спектра оптического излучения осуществляется спектральным способом. Погрешность измерения центральной длины волны составляет не более 4 нм. Время одного измерения составляет не менее 1 мс. Спектральный способ наряду с измерением центральной длины волны также позволяет контролировать и другие параметры спектра, такие как ширина спектра и его асимметрия. Существенными недостатками спектрального способа, ограничивающими его применение в автоматизированных системах, являются: низкое быстродействие, высокая стоимость измерительного элемента, большой объем измеренной информации.

1 БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРА УОИ

Для решения задачи оперативного контроля и управления параметрами спектра УОИ, включая возможность оценки ширины спектра, нами предложено использовать способ с двумя фотоприемниками [10]. Суть способа состоит в регистрации сигналов, создаваемых УОИ в двух фотоприемниках со спектральными характеристиками, имеющими форму гауссиан и смещенными относительно друг друга:

$$S_1(\lambda) = \frac{S_{10}}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_1)^2}{2\sigma_1^2}},$$

$$S_2(\lambda) = \frac{S_{20}}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_2)^2}{2\sigma_2^2}},$$

(1)

где λ_1 и λ_2 — длины волн, соответствующие максимуму функций $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$ соответственно;

σ_1 и σ_2 — параметры этих функций, характеризующие их ширину (рис. 1);

S_{10} и S_{20} — параметры, определяющие абсолютную чувствительность фотоприемников.

В большинстве практических приложений спектры УОИ (таких как излучение лазера и светодиода, сигнал брэгговского датчика, фотолюминесцентное излучение и т. д.) хорошо описываются гауссовой функцией [7–9]:

$$Y_x(\lambda) = \frac{A_x}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_x)^2}{2\sigma_x^2}},$$

(2)

где λ_x — длина волн, соответствующая максимуму функции спектрального распределения излучения $Y_x(\lambda)$,

A_x — параметр, определяющий интенсивность излучения,

σ_x — параметр функции, характеризующий ширину спектра УОИ.

При попадании оптического излучения на фотодетектор выражения сигналов с фотоприемника принимают вид:

$$U_1 = \frac{S_0 A_x}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_x^2}} e^{-\frac{(\lambda_x - \lambda_1)^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_x^2)}},$$

$$U_2 = \frac{S_0 A_x}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_x^2}} e^{-\frac{(\lambda_x - \lambda_2)^2}{2(\sigma_2^2 + \sigma_x^2)}}.$$

(3)

Для упрощения дальнейшего анализа можно принять $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$, что достаточно легко реализуется путем применения дополнительных фильтров.

В зависимости от ширины спектра оптического излучения возможно несколько вариантов решения системы уравнений (3). В самом простом случае, когда $\sigma_x^2 = 0$ (монохроматическое излучение), выражение определенной центральной длины волны принимает вид:

$$\lambda_x = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} + \frac{\sigma^2 \ln \left[\frac{U_2}{U_1} \right]}{(\lambda_2 - \lambda_1)}.$$

(4)

Для реальных источников оптического излучения $\sigma_x^2 \neq 0$:

$$\lambda_x = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} + \frac{\sigma^2 (1 + \tilde{\sigma}_x^2) \ln \left[\frac{U_2}{U_1} \right]}{(\lambda_2 - \lambda_1)},$$

(5)

где $\tilde{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma$.

Параметр, характеризующий ширину оптического излучения, возможно вычислить, разрешив систему уравнений итерационным численным методом.

2 БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРА СВЕТОДИОДА

Для апробации способа было разработано устройство для измерения и управления спектром излучения светодиода. Функциональная схема устройства показана на рисунке 2.

Устройство содержит фотоприемники (ФП1 и ФП2) на основе фотодиодов (ФД), широкополосные усилители и микроконтроллер, содержащий быстродействующие

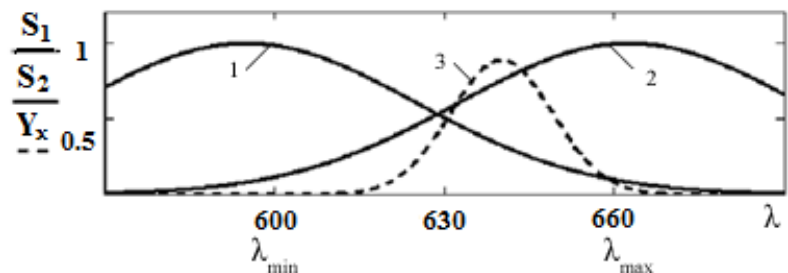


Рис. 1. Спектральные характеристики фотоприемников (1, 2) и спектр (3) контролируемого УОИ

аналого-цифровые преобразователи (АЦП1 и АЦП2), арифметическое устройство (вычислитель) и блок управления питанием светодиода.

При попадании оптического излучения на ФП, на их выходе возникают сигналы, описываемые выражениями (3). Далее усиленные и оцифрованные сигналы подаются на арифметическое устройство, где происходит их дальнейшая обработка в соответствии с формулами (4) или (5). Полученное значение параметров спектра излучения сравнивается со значениями параметров спектра, заранее занесенными в память микроконтроллера. На основании полученной разницы сигналов микроконтроллером (данную роль может выполнять, например, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), который часто встраивается в микроконтроллеры как периферия) либо внешним устройством, на рисунке 2 обозначенном, как блок управления питанием, вырабатывается управляющий сигнал для источника питания. В соответствии с управляющим сигналом на источнике питания происходит подстройка величины питающего тока. Далее процесс повторяется.

Быстродействие такой системы при современном уровне развития элементной базы может достигать порядка 106 измерений в секунду.

Основными узлами, ограничивающими быстродействие устройства, схема которого предложена на рисунке 2, являются ФП, усилители, АЦП и алгоритм обработки сигналов с фотодатчика.

Для сравнения у спектроколориметра ТКА ВД время выполнения одного измерения составляет около 4 мс, для автоматизированной системы измерения параметров СИД НР8000 и НР9000 фирмы Nori Optics Technology Co – не более 5 секунд, для спектроколориметра 7000А – 1 с.

Оценка погрешности проводилась методами численного моделирования и экспериментальным путем, при котором сравнивались результаты, полученные на экспе-

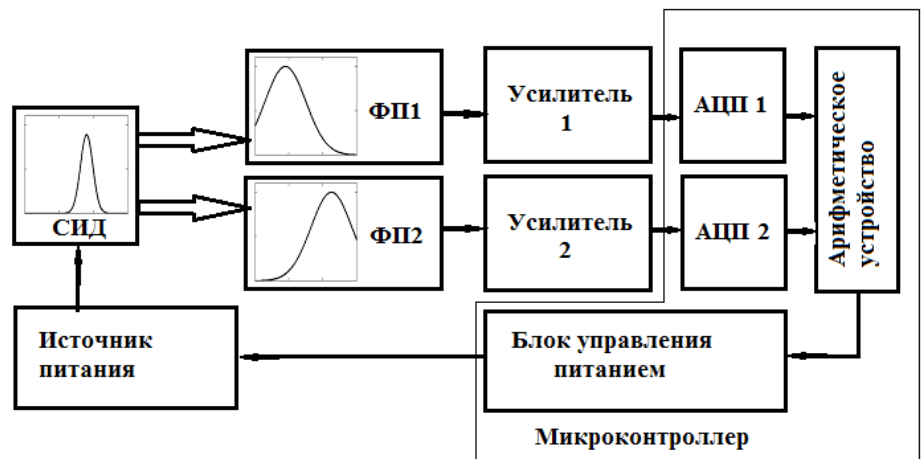


Рис. 2. Функциональная схема устройства для измерения параметров спектра СИД

риментальной установке, с результатами, полученными на спектрометре USB2000+VIS-NIR-ES фирмы Ocean Optics.

Относительная погрешность измерения центральной длины волны по описанному выше способу не превышает 0,6% для СИД красного цвета свечения. Заметим, что с уменьшением ширины спектра погрешность измерения центральной длины волны уменьшается, так для лазера красного цвета свечения с длиной волны 630 нм относительная погрешность измерения составила 0,24%. Погрешность определения центральной длины волны СИД определяется наряду с другими причинами ошибкой аппроксимации спектра СИД одной гауссианой [11].

3 Контроль температурного сдвига спектра светодиодов

Рассмотрим возможность применения описанного выше метода и устройства для контроля центральной длины волны излучения СИД в процессе его работы и саморазогрева рабочим током.

Известно, что изменение температуры *p-n*-перехода СИД вызывает смещение спектра излучения [2].

На рисунке 3 показаны измеренные зависимости смещения центральной длины спектра оптического излучения СИД типа Vishay TLCR5800 при подаче на него ступеньки тока величиной 30 мА.

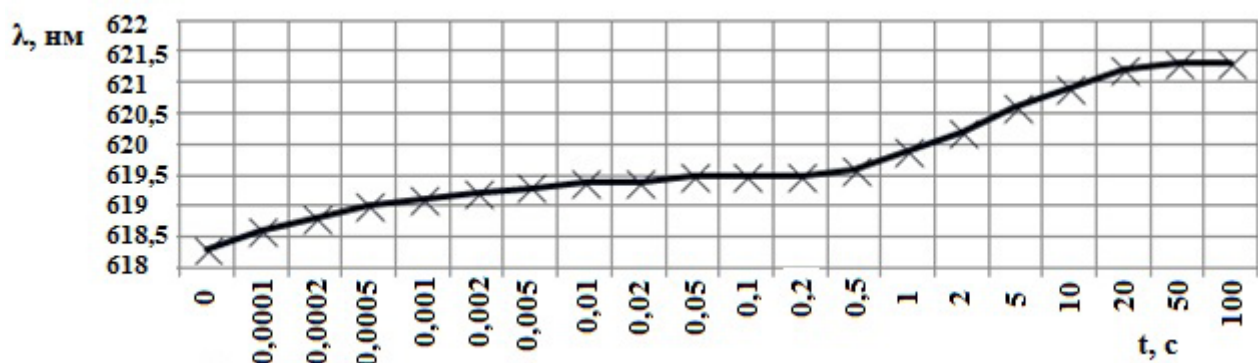


Рис. 3. Зависимость центральной длины волны излучения СИД от времени его работы

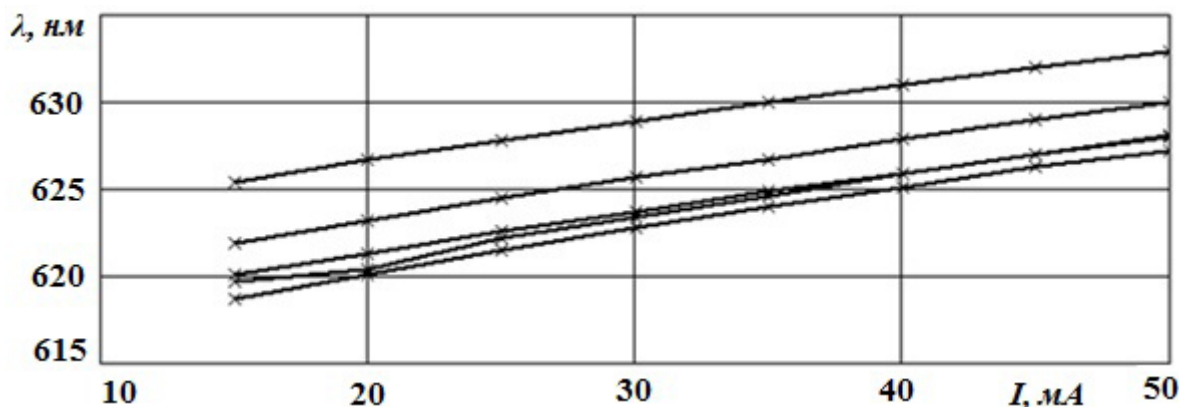


Рис. 4. Зависимость сдвига центральной длины волны СИД от величины питающего тока

Изменение центральной длины волны СИД связано с нагревом р-п-перехода под действием протекающего по нему тока. Наряду с саморазогревом изменение центральной длины волны может быть вызвано изменением температуры окружающей длины волны.

Одним из способов стабилизации параметров спектра излучения СИД является регулирование его рабочего тока. Зависимости центральной длины волны СИД от величины рабочего тока приведены на рисунке 4.

Таким образом, описанный выше способ контроля параметров УОИ позволяет не только контролировать параметры спектра оптического излучения, но и оперативно подстраивать их, удерживая в заданном рабочем диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беннет Д. Когерентные технологии для DWDM сетей дальней связи. Переходя границу в 10G // T-COMM – Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – № спец. вып. «Метрология. Измерения и технологии». – С. 35–36.
2. Луценко Е. Температура перегрева активной области коммерческих светодиодов с прямым жидкостным охлаждением чипа // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 2. – С. 26–29.
3. Афанасьев А.Л. Определение скорости ветра из турбулентных флуктуаций оптического излучения в атмосфере : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 01.04.05 – Томск, 2012. – 19 с.
4. Brown S.W., Santana C., Eppeldauer G.P. Development of a tunable LED-based colorimetric source // Journal of research of the National Institute of Standards and Technology. – 2002. – Vol. 107, № 4. – pp. 363–371.
5. Пат. 2480876 RU, МКИ H01S3/13. Лазерная система с динамически стабилизируемой релаксирующей длиной волны и способ ее функционирования / Антоненко В.И., Самарцев И.Э. – опубл. 10.11.2012.
6. Крайский А.В., Миронова Т.В., Султанова Т.Т. Измерение поверхностного распределения длины волны узкополосного излучения колориметрическим методом // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40, № 7. – С. 652–658.
7. Крайский А.В., Миронова Т.В., Султанова Т.Т. Измерение длины волны узкополосного излучения при обра-

ботке цифровых фотографий в raw-формате // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 12. – С. 1137–1139.

8. Круглов О.В., Кузьмин В.Н., Томский К.А. Измерение светового потока светодиодов // Светотехника. – 2009. – № 3. – С. 34.

9. Круглов О.В. Разработка и исследование приборов для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.11.07. – СПб., 2011. – 22 с.

10. Сергеев В.А., Рогов В.Н., Ульянов А.В. Методические погрешности определения параметров спектра светодиодов двумя фотоприемниками // Измерительная техника. – 2013. – № 4. – С. 42–44.

11. Сергеев В.А., Ульянов А.В. Погрешность аппроксимации спектра излучения светодиода различными функциями // Известия вузов. Электроника. – 2015. – № 3. – С. 76–78.

REFERENCES

1. Bennet D. Kogerentnye tekhnologii dlia DWDM setei dalnei sviazi. Perekhodia granitsu v 10G [Coherent Technologies for DWDM Networks. Over 10G Transfer]. T-SOMM – Telekommunikatsii i transport [T-COMM. Telecommunications and Transport], 2012, Special Issue „Metrology. Measurements and Methods”, pp. 35–36.
2. Lutsenko E. Temperatura peregreva aktivnoi oblasti kommercheskikh svetodiodov s priamym zhidkostnym okhlazhdeniem chipa [Active Region Overheating Temperature of Commercial and Active Liquid Cooled LEDs]. Poluprovodnikovaia svetotekhnika [Solid-State Lighting Magazine], 2011, no. 2, pp. 26–29.
3. Afanasev A.L. Opredelenie skorosti vetra iz turbulentnykh fluktuatsii opticheskogo izlucheniia v atmosfere. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Determination of Wind Velocity Incoming from Turbulent Fluctuations of Optical Radiation in Atmosphere. Cand. Eng. Sci. Diss. Abstract of Thesis]. Tomsk, 2012. 19 p.
4. Brown S.W., Santana C., Eppeldauer G.P. Development of a Tunable LED-based Colorimetric Source. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2002, vol. 107, no. 4, pp. 363–371.
5. Antonenko V.I., Samartsev I.E. Lazernaia sistema s dinamicheski stabiliziruemoi relaksiruiushchei dlinoi volny

i sposob ee funktsionirovaniia [Laser System with Dynamic Stabilized Relax Wavelength and Operation Method thereof]. Patent RF. 2480876 RU, MKI H01S3/13. Date of publication: 10 Nov., 2012.

6. Kraiskii A.V., Mironova T.V., Sultanova T.T. Izmerenie poverkhnostnogo raspredeleniia dliny volny uzkopolosnogo izlucheniia kolorimetriceskim metodom [Measurement of the Surface Wavelength Distribution of Narrow-band Radiation by a Colorimetric Method]. *Kvantovaia elektronika* [Quantum Electronics], 2010, vol. 40, no. 7, pp. 652–658.

7. Kraiskii A.V., Mironova T.V., Sultanova T.T. Izmerenie dliny volny uzkopolosnogo izlucheniia pri obrabotke tsifrovyykh fotografii v raw-formate [Narrow-band radiation wavelength measurement by processing digital photographs in RAW format]. *Kvantovaia elektronika* [Quantum Electronics], 2012, vol. 42, no. 12, pp. 1137–1139.

8. Kruglov O.V., Kuzmin V.N., Tomskii K.A. Izmerenie svetovogo potoka svetodiodov [Light-Emitting Flow

Measurement]. *Svetotekhnika* [Light and Engineering], 2009, no. 3, pp. 34–36.

9. Kruglov O.V. *Razrabotka i issledovanie priborov dlia izmereniia opticheskikh parametrov i kharakteristik svetodiodov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development and Research of Devices Intended for Measurement of Optical Parameters and LED Characteristics. Cand. Eng. Sci. Diss. Abstract of Thesis]. St. Petersburg, 2011. 22 p.

10. Sergeev V.A., Rogov V.N., Ulyanov A.V. *Metodicheskie pogreshnosti opredeleniia parametrov spektra svetodiodov dvumia fotopriemnikami* [Method Errors in Definition of LED Spectrum Parameters of Two Photoreceptors]. *Izmeritelnaia tekhnika* [Measurement Technique], 2013, no. 4, pp. 42–44.

11. Sergeev V.A., Ulyanov A.V. *Pogreshnost approksimatsii spektra izlucheniia svetodioda razlichnymi funktsiiami* [Error of LED Emission Spectrum Approximation by Different Functions]. *Izvestiia vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities Electronics], 2015, no. 3, pp. 76–78.