
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 631.396.6

© Э. Г. Силькис, А. С. Станкевич, В. Н. Крашенинников,
Ю. А. Репеев, Д. В. Новиков, 2021

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ МИНИ-СПЕКТРОМЕТРОВ**

На основе мини-спектрометров, эталонной лампы типа СИРШ с известной цветовой температурой и источников линейчатого спектра создан недорогой аппаратный комплекс для измерений параметров излучения гетеродиодов и интерференционных фильтров. Приведены примеры регистрации излучения гетеродиодов (полуширина полосы излучения 17–30 нм) с максимумом излучения в области 659 и 764 нм и измерения параметров полосового интерференционного фильтра (полуширина полосы — 12 нм) с максимумом пропускания 727 нм. В программу измерения и обработки данных введены параметры излучения эталонной лампы СИРШ, что существенно уточняет значение длины волны максимума излучения и пропускания.

Кл. сл.: система регистрации на линейном ПЗС, мини-спектрометр, длина волны спектральной линии, лазерный гетеродиод

ВВЕДЕНИЕ

Измерения параметров широкополосного излучения представляют важность для определения спектральных характеристик контуров излучения гетеродиодов и полос пропускания интерференционных фильтров. Эти измерения могут выполняться с помощью недорогих мини-спектрометров серии МС [1, 2] и специализированной программы обработки сигнала. В статье описан аппаратно-программный комплекс для таких исследований и приведены примеры его использования. Возможность получения спектров пропускания интерференционных фильтров по этой методике позволяет заменить дорогостоящие специализированные спектрофотометры типа Spesord и Cary. Измерения параметров отдельных полос в спектрах поглощения важны в классических спектральных измерениях (например, спектры поглощения широкого класса полиароматических соединений, в частности лазерных красителей) и также могут выполняться на созданной аппаратуре.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС

Схема комплекса аналогична ранее использованной в работе [3], но вместо полупрозрачного зеркала применен волоконно-оптический разветвитель (изготовитель — ООО "НТЦ волоконно-оптических устройств", [4]), более удобный для подвода излучения к входной щели мини-спектрографа. Измеряемое излучение поступает

на входной торец одного из каналов двухканального волоконно-оптического разветвителя, по второму каналу попеременно передается излучение либо от Ar-Ne-газоразрядной лампы, либо от эталонной светоизмерительной лампы типа СИРШ 8.5-200 [5]. Спектр в фокальной плоскости мини-спектрографа регистрируется фоточувствительным линейным детектором типа TCD1304DG.

По спектру Ar-Ne газоразрядного источника линейчатого спектра программой строится рабочая спектральная шкала, которая в дальнейшем при необходимости только корректируется непосредственно перед рабочим измерением. Также перед рабочим измерением регистрируется отклик на излучение эталонной лампы накаливания СИРШ. Цветовая температура рабочего тела лампы СИРШ составляла 3000 К при рабочем токе 20 А, питание осуществлялось от стабилизированного источника тока типа SP-240-75 Mean Well. В программу введена формула Планка для расчета спектральной плотности излучения $I(\lambda)$ абсолютно черного тела в диапазоне 350–1100 нм при заданной цветовой температуре с поправкой на коэффициент серости [6]. По этим данным строится скорректированная функция спектрографа "амплитудный отклик — длина волны", используемая в дальнейшем для нормировки амплитуды спектрального контура измеряемого излучения. На следующем этапе обработки данных выполняется определение параметров контура излучения. Такими параметрами являются положение максимума полосы излучения, центр ее тяжести и полуширина. Результаты измерения выводятся на информационное табло.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 показаны спектры при измерении параметров контура излучения экспериментального

гетеродиода мини-спектрографом МС-120 в области 691–842 нм: линейчатый спектр газоразрядной лампы Ne–Ar (рис. 1, а), по которому

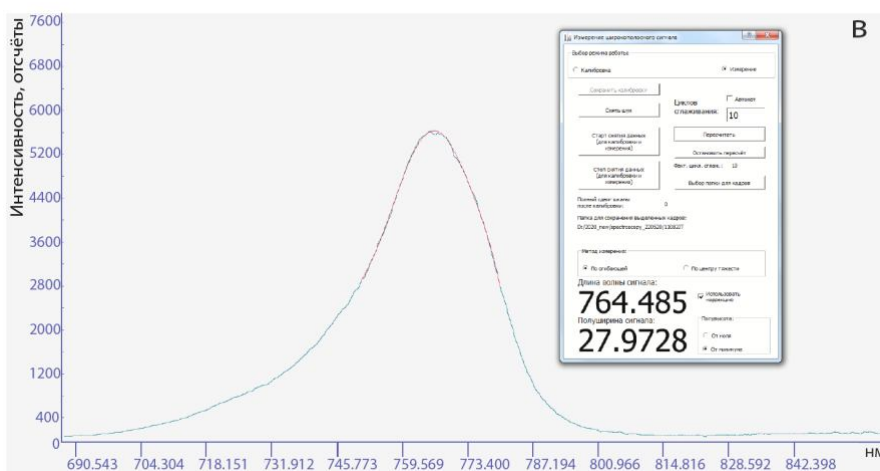
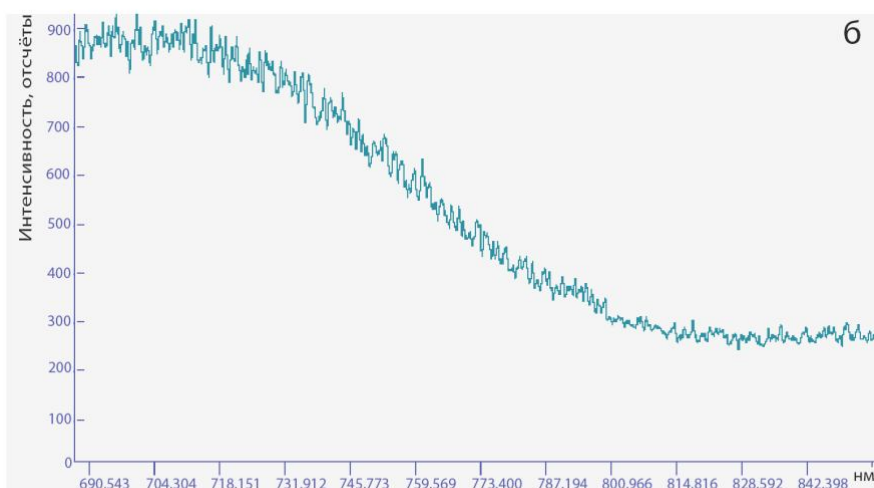
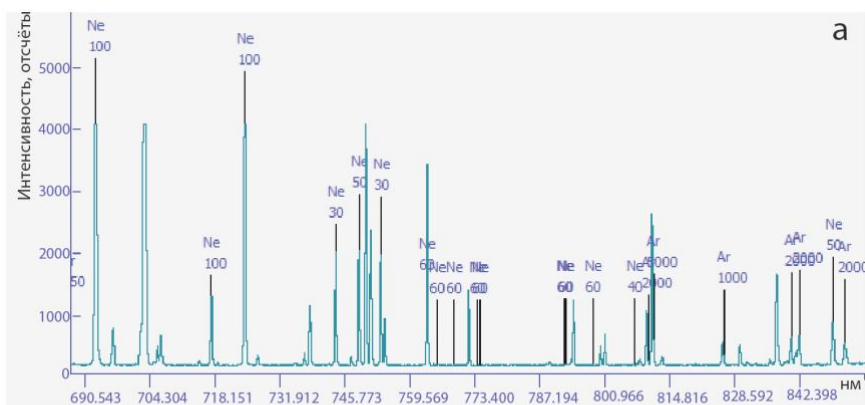


Рис. 1. Измерение параметров контура излучения гетеродиода.

а) спектр Ne–Ar лампы на шкале, откалиброванной с помощью линий нормалей в диапазоне 689–842 нм;

б) спектр эталонной лампы СИРШ 8.5-200 в том же диапазоне длин волн;

в) откорректированный спектр излучения гетеродиода.

На информационном табло отображены значения максимума контура излучения и его полуширины:

осуществлялась калибровка шкалы длин волн; спектр излучения эталонной лампы накаливания СИРШ 8.5-200 с цветовой температурой 3000 К (рис. 1, б); спектр излучения гетеродиода на откалиброванной шкале с коррекцией амплитудного отклика (рис. 1, в). На информационном табло отображается длина волны максимума или центра тяжести полосы излучения (по выбору), а также полуширина контура излучения.

В программе заложены возможность выполнения процедуры предварительного сглаживания контура

и возможность получать значения его параметров с учетом и без учета искажающей функции спектрографа. Например, положение максимума контура излучения гетеродиода с коррекцией и без коррекции определяется как 764.485 и 762.791 нм соответственно, т.е. разница в значениях достаточно существенна.

На рис. 2 показаны контуры излучения скорректированного и без коррекции типового красного светодиода типа АП112А(Г). Регистрация спектра велась в диапазоне 638–680 нм перестраиваемого по длинам волн мини-спектрометра МС-300 [1].

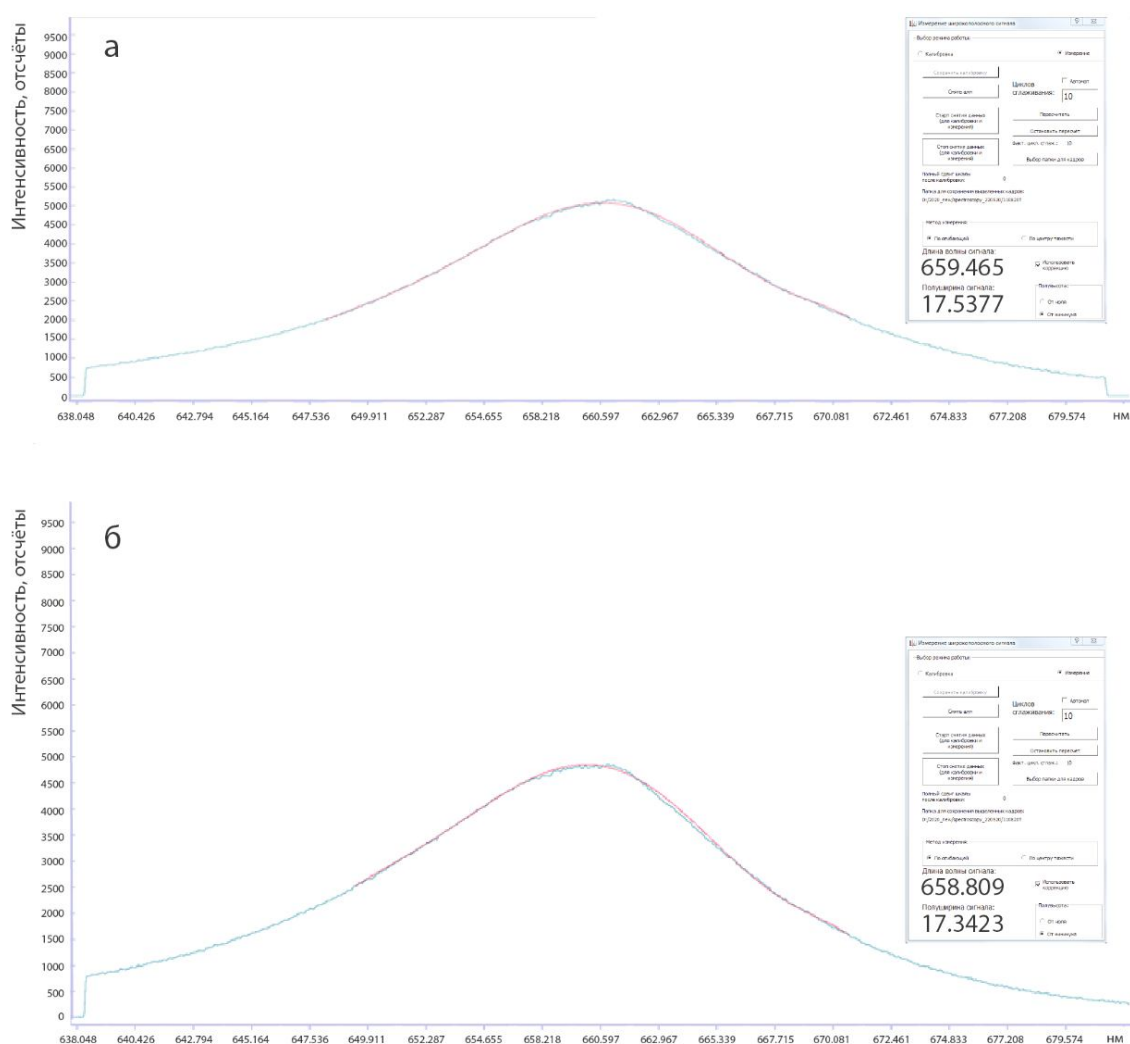


Рис. 2. Контур полосы излучения светодиода АП112А(Г), зарегистрированный с помощью спектрографа МС-300.

а) откорректированный на искажающую функцию спектрографа максимум полосы излучения 659.465 нм;

б) без коррекции, максимум полосы определяется на длине волны 658.809 нм

Калибровка спектрального участка осуществлялась по линиям нормалей Ne лампы с полым катодом (ЛПК) Fe-Ne, отклик на излучение лампы СИРШ измерялся в этом же диапазоне.

Из данных по измерению положения максимума полосы излучения гетеродиода и светодиода типа АП112А(Г) очевидно, что коррекция формы контура является необходимой процедурой, т.к. разница достигает единиц нанометров.

Наличие второго канала, который по своему основному предназначению используется для целей калибровки спектрографа, открывает дополнительные возможности, а именно регистрацию спектров пропускания (поглощения) в области 350–1000 нм, т.к. спектрограф в совокупности с эталонной лампой СИРШ 8.5-200 (источник света непрерывного спектра) представляет собой спектрофотометр.

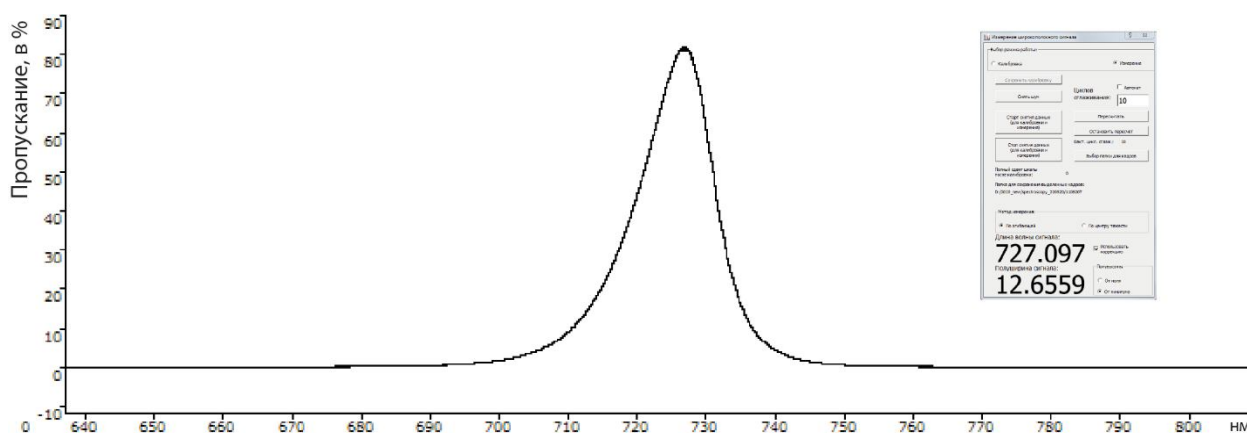


Рис. 3. Спектр интерференционного фильтра с таблицей параметров

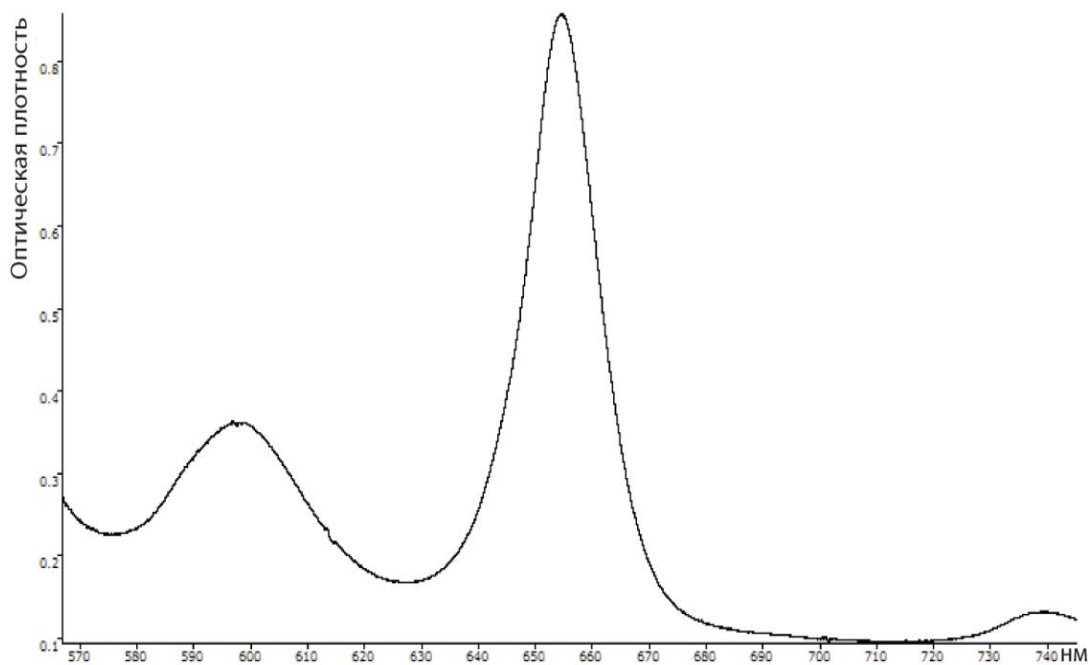


Рис. 4. Спектр поглощения тетрафенилпорфина в матрице полиметилметакрилата

В качестве примера такого применения прибора на рис. 3 показан результат измерения спектра пропускания узкополосного интерференционного светофильтра BPF_SL 727\10 производства ООО "Фотооптик" [7] на спектрометре МС-120 в диапазоне 640–810 нм. Полученные результаты сравнивались с паспортными характеристиками фильтра. По паспортным данным максимум полосы пропускания фильтра 81% достигается на длине волны 727 нм, ширина полосы на полувысоте составляет 12 нм. Наше измерение демонстрирует хорошее совпадение с паспортными значениями: максимум пропускания фильтра 79% на длине волны 727.10 нм, полуширина полосы пропускания — 12.66 нм.

В качестве еще одного примера применения прибора на рис. 4 приведен участок 570–740 нм спектра поглощения тетрафенилпорфина в матрице полиметилметакрилата (толщина образца — 1.5 мм, концентрация 10^{-3} моль/л), спектр снят на мини-спектрографе МС-120, значение максимума полосы 645–658 нм составляет 653.6 нм.

ВЫВОДЫ

С помощью мини-спектрометров, лампы СИРШ с известной цветовой температурой и источников света с линиями нормалей для точной калибровки шкалы длин волн можно создать недорогой комплекс для измерения параметров излучения широкополосных светодиодов, интерференционных фильтров и классических спектров поглощения в области 350–1000 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силькис Э.Г., Станкевич А.С., Крашенинников В.Н. Системы регистрации спектров, миниспектрометры и эмиссионные спектрометры // Вузовско-акаде-

мический сб. научн. трудов "Проблемы спектроскопии и спектрометрии". Вып. 33. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 43–67.

2. ООО "МОРС" Разработка и производство спектрального оборудования. URL: <http://www.ooo-mors.ru>
3. Силькис Э.Г., Станкевич А.С., Крашенинников В.Н., Новиков Д.В. Измеритель длины волны лазерных диодов в области 330–1080 нм // Научное приборостроение. 2020. Т. 30, № 1. С. 27–38. URL: <http://www.iairas.ru/mag/2020/full1/Art4.pdf>
4. ООО "Научно Технический Центр Волоконно-Оптических Устройств". URL: <http://www.optofiber.ru>
5. Лампы МЭЛЗ. Электрические светоизмерительные широкодиапазонные лампы. URL: <http://www.viclight.ru/category/elektricheskie-svetoizmeritelnye-shirokodiapazonnye-lampy/index.php>
6. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К., Лах В.И., Луцки Я.Т., Пуццло В.И., Стаднык Б.И., Ярышев Н.А. Температурные измерения. Справочник. Киев: Наукова думка, 1989. 465 с.
7. ООО "Фотооптик". Изготовление фильтров для оптической индустрии. URL: <http://www.photooptic-filters.com>

Институт спектроскопии РАН, Москва, г. Троицк
(Силькис Э.Г., Станкевич А.С., Крашенинников В.Н., Репеев Ю.А.)

ООО "МОРС", Москва, г. Троицк (Силькис Э.Г., Новиков Д.В.)

Контакты: Силькис Эммануил Гершович,
esilkis@mail.ru

Материал поступил в редакцию 10.08.2021

MEASUREMENT OF PARAMETERS OF BROADBAND EMISSION USING MINI-SPECTROMETERS

E. G. Silkis^{1,2}, A. S. Stankevich¹, V. N. Krashennnikov¹,
Yu. A. Repeev¹, D. V. Novikov²

¹*Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk*

²*MORS LTD, Moscow, Troitsk*

On the basis of mini-spectrometers, a reference lamp of the SIRSH type with a known color temperature, and line spectrum sources, an inexpensive hardware complex has been created for measuring the emission parameters of heterodiodes and interference filters. Examples of recording the emission of heterodiodes (full width at half maximum is 17–30 nm) with a maximum of emission in the region of 659 and 764 nm and measurement of an interference filter (FWHM of the bandwidth is 12 nm) with a maximum transmission of 727 nm are given. The emission parameters of the SIRSH standard lamp are introduced into the program for measuring and processing data, due to which it is possible to significantly refine the value of the wavelength of the maximum emission and transmission.

Keywords: linear CCD recording system, mini-spectrometer, spectral line wavelength, laser heterodiode

INTRODUCTION

Measurements of the parameters of broadband emission are important for determining the spectral characteristics of the emission contours of heterodiodes and the passbands of interference filters. These measurements can be performed using inexpensive mini-spectrometers of the MC series [1, 2] and a specialized signal processing software. The article describes a hardware and software complex for such studies and provides examples of its use. The possibility of obtaining transmission spectra of interference filters using this technique makes it possible to replace expensive specialized spectrophotometers such as Specord and Cary. Measurements of the parameters of individual bands in the absorption spectra are important in classical spectral measurements (for example, the absorption spectra of a wide class of polyaromatic compounds, in particular, laser dyes) and can also be performed using the created equipment.

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX

The scheme of the complex is similar to that previously used in [3], but instead of a semitransparent mirror, a fiber-optic splitter (manufactured by STC Fiber Optic Devices Ltd [OOO "NTZ volokonno-opticheskikh ustroystv"], [4]) is used, which is more convenient for supplying emission to the entrance slit of the mini-spectrograph. The emission to be measured enters the inlet end of one of the channels of the two-channel fiber-optic splitter, the second channel alternately transmits emission either from an Ar-Ne

gas-discharge lamp, or from a standard measuring lamp SIRSH 8.5-200 [5]. The spectrum in the focal plane of the mini-spectrograph is recorded using a photosensitive linear detector TCD1304DG.

Using the Ar-Ne spectrum of a gas-discharge source of a line spectrum, the program builds a working spectral scale, which is further, if necessary, only adjusted immediately before the measurement. Also, before the working measurement, the response to the emission of the SIRSH standard incandescent lamp is recorded. The color temperature of the working body of the SIRSH lamp is 3000 K with an operating current of 20 A; power was supplied from a stabilized current source the SP-240-75 Mean Well. The program includes the Planck formula for calculating the spectral emission density $I(\lambda)$ of an absolutely black body in the range of 350–1100 nm at a given color grayness-corrected temperature [6]. Based on these data, the corrected function of the spectrograph "amplitude response-wavelength" is constructed, which is subsequently used to normalize the amplitude of the spectral contour of the measured emission. At the next stage of data processing, the parameters of the emission contour get determined. These parameters are the position of the maximum of the emission band, its center of gravity, and full width at half maximum (FWHM). The measurement results are displayed on the information board.

MEASUREMENT RESULTS

Fig. 1 shows the spectra when the parameters of the emission contour of the experimental heterodiode

were measured with the MC-120 mini-spectrograph in the range 691–842 nm:

- the line spectrum of a Ne – Ar gas-discharge lamp (Fig. 1, a), according to which the wavelength scale was calibrated;
- the emission spectrum of the SIRSH 8.5-200 standard incandescent lamp with a color temperature of 3000 K (Fig. 1, б);
- the emission spectrum of the heterodiode on a calibrated scale with corrected amplitude response (Fig. 1, в).

Fig. 1. The measurement of the parameters of the emission contour of the heterodiode.
 а) spectrum of the Ne – Ar lamp on a scale calibrated using normal lines in the range 689–842 nm;
 б) spectrum of the SIRSH 8.5-200 standard lamp in the same wavelength range;
 в) the corrected emission spectrum of the heterodiode. The information board displays the values of the maximum of the radiation contour and its FWHM

The information board displays the wavelength of the maximum or center of gravity of the emission band (optional), as well as the FWHM of the emission contour. The program provides the ability to perform the preliminary smoothing of the contour and the ability to obtain the values of its parameters with and without taking into account the distorting function of the spectrograph. For example, the position of the maximum of the emission contour of the heterodiode with and without correction is determined as 764.485 and 762.791 nm, respectively, i.e., the difference in values is quite significant.

Fig. 2 shows the emission contours of the corrected and without correction of a typical red LED АП112А(Г). The spectrum was recorded in the 638–680 nm range of a tunable MC-300 mini-spectrometer [1]. The spectral section was calibrated according to the Ne normal lines of the lamp with a hollow cathode Fe-Ne; the response to the SIRSH lamp emission was measured in the same range.

Fig. 2. The contour of the emission band of the АП112А(Г) LED, recorded using an MC-300 spectrograph.
 а) corrected for the distorting function of the spectrograph, the maximum of the emission band – 659.465 nm;
 б) without correction, the maximum of the band is determined at a wavelength 658.809 nm

The data on measuring the position of the maximum of the emission band of the heterodiode and LED АП112А(Г) reveals that the correction of the contour shape is a necessary procedure, since the difference reaches the order of nanometers..

The presence of the second channel, which by its main purpose is used for the calibration of the spectrograph, opens up additional possibilities, namely, the transmission (absorption) spectra recording in the range of 350–1000 nm, since the spectrograph in combination with the SIRSH 8.5-200 standard lamp (continuous spectrum light source) is a spectrophotometer.

As an example of such an application of the device, Fig. 3 shows the result of measuring the transmission spectrum of a narrow-band interference filter BPF_SL 727 \ 10 manufactured by Photoptic LTD [7] with MC-120 spectrometer in the range of 640–810 nm. The results obtained were compared with the certificate characteristics of the filter. According to the certificate data, the maximum bandwidth of the filter — 81% — is achieved at a wavelength of 727 nm, the bandwidth at FWHM is 12 nm. Our measurement demonstrates good agreement with the certificate values: the maximum filter transmission is 79% at a wavelength of 727.10 nm, the bandwidth FWHM is 12.66 nm.

Fig. 3. Interference filter spectrum and display readings

As another example of the application of the device, Fig. 4 shows the 570–740 nm region of the absorption spectrum of tetraphenylporphin in a polymethyl methacrylate matrix (sample thickness — 1.5 mm, concentration — 10^{-3} mol / liter), the spectrum was recorded with MC-120 mini-spectrograph, the maximum of the 645–658 nm band is 653.6 nm.

Fig. 4. Absorption spectrum of tetraphenylporphin in a polymethyl methacrylate matrix

CONCLUSIONS

Using mini-spectrometers, SIRSH lamp with a known color temperature and light sources with normal lines for accurate calibration of the wavelength scale, one can create an inexpensive complex for measuring the emission parameters of broadband LEDs, interference filters and classical absorption spectra in the range of 350–1000 nm.

REFERENCES

1. Sil'kis E.G., Stankevich A.S., Krasheninnikov V.N. [System registration spectra, mini spectrometers and emission spectrometers]. Vuzovsko-akademicheskii sb. nauchn. trudov "Problemy spektroskopii i spektrometrii" [Problems of spectroscopy and spectrometry], Ekaterinburg, UrFU, 2014, is. 33, pp. 43–67. (In Russ.).

2. ООО "MORS" Razrabotka i proizvodstvo spektral'nogo oborudovaniya [LLC "MORS" Development and production of spectral equipment]. URL: <http://www.ooo-mors.ru> (In Russ.).
3. Silkis E.G., Stankevich A.S., Krashennnikov V.N., Novikov D.V. [Laser diode wavelength meter in the range of 330–1080 nm]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2020, vol. 30, no. 1. P. 27–38. URL: <http://www.iairas.ru/mag/2020/full1/Art4.pdf> (In Russ.).
4. ООО "Nauchno Technicheskiy Zentr Volokonno-Opticheskikh Ustroystv" [LLC "Scientific and Technical Center of Fiber Optic Devices"]. URL: <http://www.optofiber.ru> (In Russ.).
5. Lampy MELZ. Elektricheskie svetoizmeritel'nye shiroko-diapazonnye lampy [Lamps "MELZ" Electric light-measuring wide-range lamps]. (In Russ.). URL: <http://www.viclight.ru/category/elektricheskie-svetoizmeritelnye-shirokodiapazonnye-lampy/index.php>
6. Gerashchenko O.A., Gordov A.N., Eremina A.K., Lakh V.I., Lutsik Ya.T., Putsylo V.I., Stadnyk B.I., Yaryshev N.A. Temperaturnye izmereniya. Spravochnik [Temperature measurements. Directory]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 465 p. (In Russ.).
7. ООО "Fotooptik". Izgotovlenie fil'trov dlya opticheskoy industrii [LLC "Photoptic". Manufacture of filters for the optical industry]. URL: <http://www.photoptic-filters.com> (In Russ.).

Contacts: *Silkis Emmanuil Gershovitch*,
esilkis@mail.ru

Article received by the editorial office on 10.08.2021