DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.4.316.322

Спектрометры видимого и ближнего инфракрасного диапазона для научного и промышленного применения

В. М. Поляков[1], А. С. Бобе[2,3], С. И. Томашевич[2,3], Д. С. Денк[1], Д. Н. Калитеевский[1], И. Н. Калитеевский[1], А. Л. Павлова[1]
[1] ООО «ГК Р-АЭРО», Санкт-Петербург, Россия
[2] ООО «Геофотоника», Санкт-Петербург, Россия
[3] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлены спектрометры видимого и ближнего ИК-диапазонов, созданные для регистрации спектральных характеристик образцов разной природы. В основе прибора лежит оптическая схема Черни-Тернера, используются нарезные дифракционные решетки. Спектрометры могут быть использованы в качестве отдельного модуля в составе спектрофотометров, спектрофлюориметров, рамановских спектрометров. В конструкцию прибора заложена высокая адаптация под конкретные задачи промышленных и научных применений.

Ключевые слова: спектрометры видимого и ближнего ИК-диапазонов, схема Черни-Тернера, спектрофотометры, спектрофлюориметры, рамановские спектрометры

Статья поступила: 22.04.2021
Статья принята: 04.06.2021

Спектральное исследование света является мощным инструментом, дающим прямой доступ к изучению состава веществ, а также физических процессов, происходящих в источниках света. Так, например, сравнение спектрального состава света, прошедшего через исследуемый образец, со спектральным составом света, падающим на образец, позволяет напрямую изучить молекулярную структуру вещества, которая и определяет центральные длины волн и силу линий поглоще-

Visible and Near Infrared Spectrometers for Scientific and Industrial Applications

V. M. Polyakov[1], A. S. Bobe[2,3], S. I. Tomashevich[2,3], D. S. Denk[1], D. N. Kaliteevsky[1], I. N. Kaliteevsky[1], A. L. Pavlova[1]
[1] OOO «GK R-AERO», St. Petersburg, Russia
[2] OOO «Geofotonika», St. Petersburg, Russia
[3] ITMO University, St. Petersburg, Russia

Spectrometers of the visible and near-IR ranges, designed for recording the spectral characteristics of samples of different nature, are presented. The device is based on the optical scheme of Czerny-Turner, rifled diffraction gratings are used. Spectrometers can be used as a separate module in spectrophotometers, spectrofluorometers, Raman spectrometers. The design of the device is based on high adaptation to specific tasks of industrial and scientific applications.

Keywords: spectrometers of the visible and near infrared ranges, Czerny-Turner scheme, spectrophotometers, spectrofluorometers, Raman spectrometers

Received on: 22.04.2021
Accepted on: 04.06.2021

The spectral study of light is a powerful tool that provides direct access to the study of the composition of substances, as well as the physical processes occurring in light sources. For example, a comparison of the spectral composition of the light transmitted through the sample under study with the spectral composition of the light before the sample makes it possible to directly study the molecular structure of the substance, which determines the central wavelengths and the absorption line strength [1]. The study of the radiation spectra of laser and LED sources offers the possibility to evaluate the quality of radiation. The study of Raman spectra allows us to turn to the atomic structure of matter [2].

The high literacy of the modern user of spectral equipment sets new requirements to the principles of creating new spectrometric products and their

Рис. 1. *Линейка дифракционных спектрометров VISION2GO (ООО «ГК Р-АЭРО»)*
Fig. 1. *Diffraction spectrometers VISION2GO (LLC "GK R-AERO")*

ния [1]. Исследование спектров излучения лазерных и светодиодных источников позволяет оценивать качество излучения. Исследование рамановских спектров позволяет обратиться к атомарной структуре вещества [2].

Высокая грамотность современного пользователя спектрального оборудования предъявляет особые требования к принципам создания новых спектрометрических продуктов и их архитектуре. Современный пользователь зачастую формирует задания на нестандартные схемы измерения, которые не вышли еще на рынки измерительной аппаратуры в виде готовых решений. Если обратиться к опыту участников зарубежных рынков, то можно увидеть, что ведущие производители предлагают линейку продукции. В линейку входят элементарные блоки, которые могут использоваться как самостоятельные приборы, и сложные технические системы, построенные на основе этих элементарных блоков [3, 4]. При этом элементарные блоки также доступны в OEM исполнении для встраивания в системы клиента.

Перечисленные выше обстоятельства определили модель вывода на рынок спектральной продукции ООО «ГК Р-АЭРО» – линейки дифракционных спектрометров VISION2GO (рис. 1). Была разработана универсальная с точки зрения спектрального диапазона оптическая схема спектрометра и электроника для работы с кремниевыми и InGaAs приемниками. Особенностью оптической схемы является работа всех элементов на отражение и широкая вариабельность в использовании дифракционных решеток с разной частотой штрихов. В сочетании с гибким программным обеспечением собственной разработки такой подход позволяет, используя стандартные хорошо отработанные в серийном производстве

architecture. The modern user often generates tasks for challenging measurement designs, which do not exist on the market in the form of ready-made solutions. If you look at the Western market, you can see that the leading manufacturers offer a product line that consists of elementary blocks that can be used as an independent device, and of complex systems built using these elementary blocks[3,4]. At the same time, the elementary blocks are also available in OEM versions for integration into the customer's systems.

The facts listed above determined the model for launching the spectral products of the R-AERO Group of Companies LLC, which is the line of diffraction spectrometers VISION2GO (Fig. 1). In terms of the spectral range, a universal optical design of the spectrometer and electronics for operating silicon and

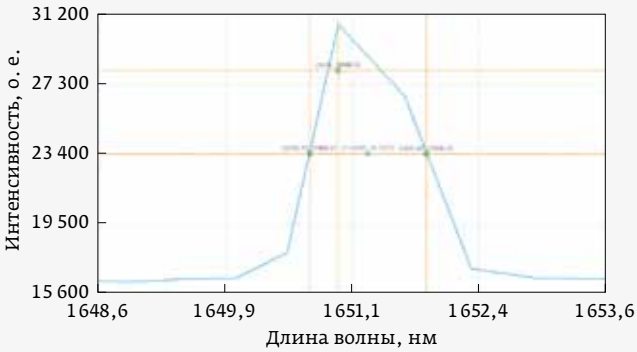

Рис. 2. *Разрешение дифракционного спектрометра в ближнем ИК-диапазоне*
Fig. 2. *Diffraction spectrometer resolution in the near infrared range*

модули, применять их в составе сложных технических систем для решения широкого круга задач.

В частности, основным компонентом, вокруг которого строится вся архитектура продуктовой линейки, является компактный спектрометр с фокусным расстоянием 50 мм, построенный по схеме Черни-Тернера на внеосевых асферических элементах с компенсацией астигматизма. На сегодняшний день эта схема используется в диапазонах 200–1100 нм, 900–1600 нм и 900–2500 нм. Характеристики наиболее массово изготавливаемых изделий представлены в таблице. В перспективе одного года планируется расширить спектральный диапазон работы спектрометров до 3–5 мкм.

В ближнем ИК-диапазоне указанная схема обеспечивает пикселную резкость (рис. 2) при ширине входной щели 50 мкм (входная щель в схеме изображается с увеличением 1:1 на приемник, имеющий ширину пиксела 50 мкм).

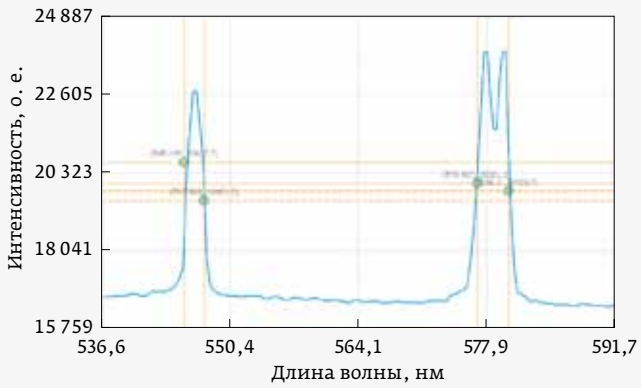

Рис. 3. *Разрешение дифракционного спектрометра в видимом диапазоне*

Fig. 3. *Visible Diffraction Spectrometer Resolution*

В видимом диапазоне (рис. 3) при щели 25 мкм схема позволяет добиться уверенной разрешающей способности не хуже 2 нм по полувысоте пика в диапазоне 200–1100 нм.

За счет установки более частых решеток можно разменивать ширину доступного спектрального диапазона на разрешающую способность. Протокол информационного обмена и программное обеспечение позволяют объединять несколько элементарных

InGaAs receivers were developed. A feature of the optical arrangement is the operation of all elements on reflection and wide variability in the use of diffraction gratings with different mark frequencies. In combination with the in-house flexible software, this approach can be employed to solve a wide range of tasks as part of complex systems using standard mass-produced modules that gave a good account of themselves.

Таблица. Характеристики коммерческих спектрометров массового изготовления

Table. Characteristics of commercial mass-produced spectrometers

	Параметр | Parameter	VIS	VIS-ER	VIS-NIR
Приемник Receiver	Размер пиксела | Pixel Size	7 × 200 мкм | µm		
	Число пикселов | Number of pixels	2 048		
Оптика Optics	Схема | Scheme	Черни-Тернера | Czerny-Turner		
	Входная щель | Entrance slit	25 мкм | µm		
	NA	0,22		
Подключения Connections	Электроника | Electronics	USB-B, BNC		
	Оптика | Optics	SMA-905 / FC		
Спектроскопия Spectroscopy	Выдержка | Optical exposure	10 мкс – 900 мс | 10 µs – 900 ms		
	Спектральный диапазон | Spectral range	400–700 нм | nm	300–1100 нм | nm	700–1100 нм | nm
	Спектральное разрешение | Spectral resolution	1 нм FWHM 1 nm FWHM	2 нм FWHM 2 nm FWHM	1 нм FWHM 1 nm FWHM
	Динамический диапазон | Dynamic range	25 000 : 1		
Конструктив Architecture item	Размеры | Size	94 × 87 × 35 мм | mm		
	Вес | Weight	340 г | g		

	Параметр | Parameter	NIR	NIR-HR
Приемник Receiver	Размер пиксела	50 × 500 мкм | µm	
	Число пикселов	256	
Оптика Optics	Схема	Черни-Тернера | Czerny-Turner	
	Входная щель	50 мкм | µm	
	NA	0,22	
Подключения Connections	Электроника	USB-B, BNC	
	Оптика	SMA-905 / FC	
Спектроско-пия Spectroscopy	Выдержка	40 мкс – 900 мс 40 µs – 900 ms	40 мкс – 900 мс 40 µs – 900 ms
	Спектральный диапазон	940–1 660 нм | nm	1 450–1 570 нм | nm
	Спектральное разрешение	3 нм FWHM | 3 nm FWHM	1 нм FWHM | 1 nm FWHM
	Динамический диапазон	35 000 : 1	
Конструктив Architecture item	Размеры	104 × 87 × 35 мм | mm	
	Вес	360 г | g	

	Параметр | Parameter	NIR-LW	NIR-ELW
Приемник Receiver	Размер пиксела | Pixel Size	50 × 500 мкм 2 ступени ТЭМ 50 ×500 µm 2 transmission electronic microscopy stages	
	Число пикселов | Number of pixels	256	
Оптика Optics	Схема | Scheme	Черни-Тернера | Czerny-Turner	
	Входная щель | Entrance slit	50 мкм | µm	
	NA	0,22	
Подключения Connections	Электроника | Electronics	USB-B, BNC	
	Оптика | Optics	SMA-905 / FC	
Спектроско-пия Spectroscopy	Выдержка | Optical exposure	60 мкс – 900 мс | 60 µs – 900 ms	
	Спектральный диапазон | Spectral range	1 300–1 900 нм | nm	1 100–2 500 нм | nm
	Спектральное разрешение | Spectral resolution	5 нм FWHM 5 nm FWHM	10 нм FWHM 10 nm FWHM
	Динамический диапазон | Dynamic range	35 000 : 1	
Конструктив Architecture item	Размеры | Size	104 × 100 × 81 мм | mm	
	Вес | Weight	860 г | g	

спектрометров в один и таким образом добиваться большой информативности измерений.

Помимо непосредственно спектрометров производятся такие источники излучения, как стабилизированные галогенные лампы и светодиодные источники с ШИМ-управлением интенсивностью (ШИМ – широтно-импульсная модуляция, *англ.* PWM – pulse-width modulation). Также произ-

In particular, the main component around which the entire architecture of the product line is built is a compact spectrometer with a focal length of 50 mm, built according to the Czerny-Turner optical scheme using off-axis aspherical elements with astigmatism correction. To date, this scheme is used in the ranges of 200–1100 nm, 900–1600 nm and 900–2500 nm. The characteristics of the most mass-produced products are

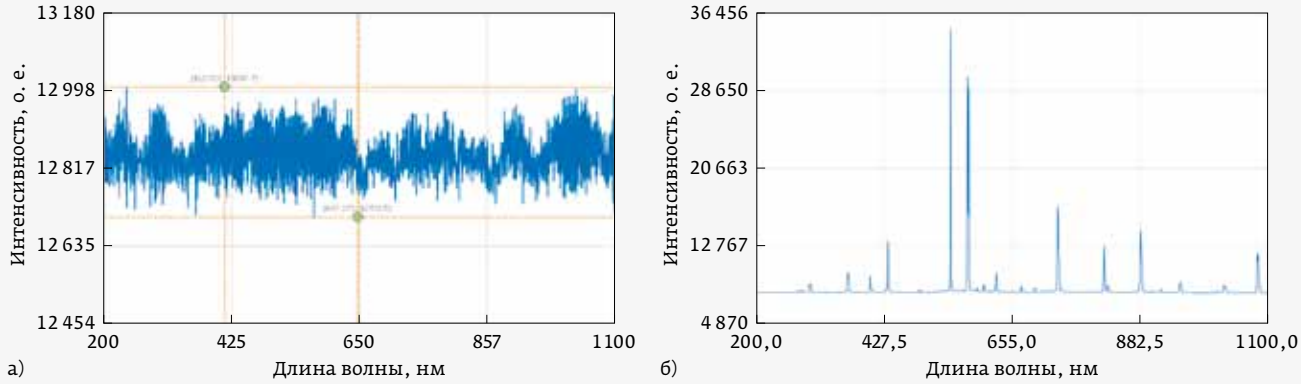

Рис. 4. *Рабочие характеристики спектрометров с приемником на основе кремниевой ПЗС-матрицы (Toshiba TCD1304), работающие в широком диапазоне длин волн 200–1100 нм: a) уровень интенсивности шума; b) динамический диапазон (выдержка – 100 мс)*

Fig. 4. *Operating characteristics of spectrometers with a receiver based on a silicon CCD array (Toshiba TCD1304), operating in a wide wavelength range of 200–1100 nm: a) noise intensity level; b) dynamic range (shutter speed – 100 ms)*

водятся устройства для введения образцов в измерительную схему – проточные кюветы, в том числе рассчитанные на давление до 125 МПа, и кюветы с зазором до 10 мкм; конденсоры для измерений коэффициентов отражения в микромасштабе, волоконные зонды.

Использование высокоразрядных АЦП и малошумящих источников питания позволяет добиваться сравнительно низкого уровня шумов (рис. 4a и 5a) и высокого динамического диапазона (рис. 4b и 5b). Для реализации синхронизации с работой источников света и иными рабочими процессами

made available in the table. In the future, it is planned to expand the spectral range of the spectrometers up to 3–5 microns.

In the near IR range (Fig. 2), this scheme provides pixel sharpness with an entrance slit width of 50 μm (the entrance slit in the scheme is depicted with an increase of 1:1 to the receiver that has the pixel width of 50 μm).

In the visible range (Fig. 3) with the gap of 25 μm, the scheme facilitates achieving a confident resolution of no worse than 2 nm at the half-height of the peak in the range of 200–1100 nm.

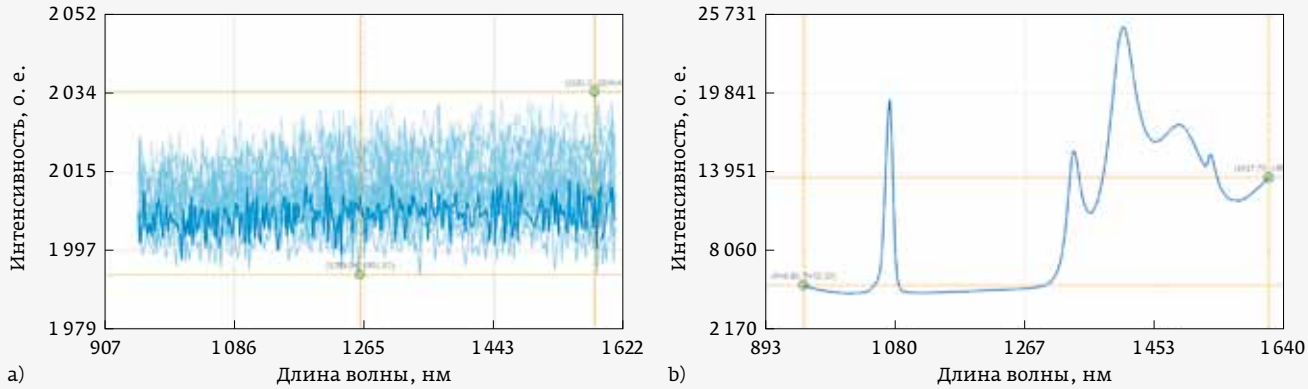

Рис. 5. *Рабочие характеристики спектрометров с приемником на основе InGaAs-матрицы (Hamamatsu G9203–256), работающие в ближнем ИК-диапазоне 900–1800 нм: a) уровень интенсивности шума; b) динамический диапазон (выдержка – 40 мс)*

Fig. 5. *Operating characteristics of spectrometers with a receiver based on InGaAs-matrix (Hamamatsu G9203–256), operating in the near-IR range of 900–1800 nm: a) noise intensity level; b) dynamic range (shutter speed – 40 ms)*

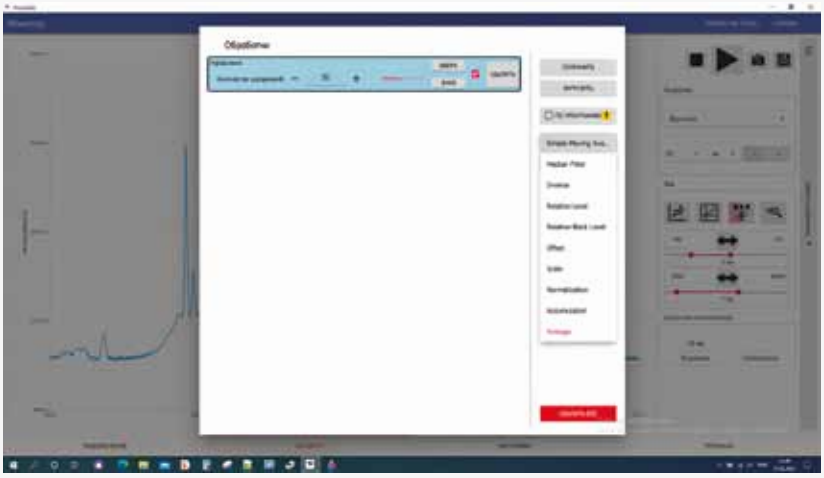

Рис. 6. *Вид интерфейса*
Fig. 6. *Interface view*

спектрометры оборудуются синхровходом. Ведется работа над аппаратной записью последовательности спектров во внутреннюю память спектрометра с последующей передачей по USB в программное обеспечение.

Программное обеспечение со встроенными функциями математической обработки позволяет дополнительно расширить динамический диапазон (рис. 6).

На основе описываемых модулей были реализованы несколько комплексных приборов, позволяющих проводить одновременную регистрацию спектров пропускания, отражения и флуоресценции

By installing more dense gratings, the width of the available spectral range for the resolution can be exchanged. The information exchange protocol and software makes it possible to combine several elementary spectrometers into one and thus achieve a great informative value of measurements.

In addition to the spectrometers themselves, radiation sources are produced, such as stabilized halogen lamps and LED sources with PWM intensity control, as well as devices for introducing samples into the measuring circuit – flow cells, including those designed to withstand pressure up to 125 MPa and flow cells with a gap of up to 10 μm, condensers for reflectance measurement within the microscale and fiber probes.

The use of high-bit ADCs and low-noise power supplies make it possible to achieve a relatively low noise level (Fig. 4a and 5a) and a high dynamic range (Fig. 4b and 5b). In order to be synchronized with light sources and other processes, the spectrometers are equipped

Рис. 7. *Спектрофотометр*
Fig. 7. *Spectrophotometer*

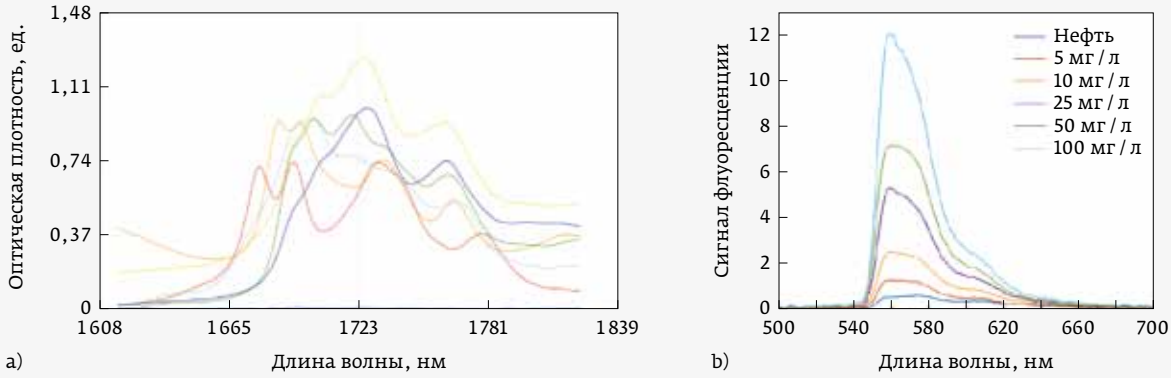

Рис. 8. *Образцы результатов исследований свойств образцов: a) спектр оптической плотности; b) спектр флуоресценции*

Fig. 8. *Samples of the results of studies of the properties of samples: a) optical density spectrum; b) fluorescence spectrum*

жидких и твердых образцов, например спектрофотометр (рис. 7).

Спектрофотометр позволяет регистрировать спектр пропускания жидких образцов (рис. 8) в спектральном диапазоне 1600–1860 нм с оптическими плотностями до 5, а также регистрировать спектр флуоресценции образца при возбуждении излучением на длине волны 405 нм.

REFERENCES

1. **J. Michael Hollas.** Modern Spectroscopy, 4th ed. *Clin. Chem.* 2004;50(12): 2469–2470.
2. **Long D. A.** *Raman spectroscopy.* – New York. 1977; 1–12.
3. *Applied Spectral Knowledge* | Spectrometers |. Ocean Insight [Electronic resource]. URL: https://www.oceaninsight.com/ (accessed: 09.06.2021).
4. *Mini Rugged Spectrometer Systems* | StellarNet Inc [Electronic resource]. URL: https://www.stellarnet.us/?gclid=Cj0KCQjwzYGGBhCTARIsAHdMTQzlxODjqJ3tHnbVc0XkTJQ228YqCuc4jNVqsPnWOEfnuxhLCLFbUZwaAh9cEALw_wcB (accessed: 03.06.2021).

АВТОРЫ

Поляков Вадим Михайлович, vadim.polyakov@r-aero.com, ООО «ГК Р-АЭРО», www.r-aero.com, технический директор, Санкт-Петербург, Россия.

Бобе Александра Сергеевна, ООО «Геофотоника», инженер-оптик, Университет ИТМО, кафедра прикладной и компьютерной оптики, Санкт-Петербург, Россия.

Томашевич Станислав Игоревич, к. т. н., ООО «Геофотоника», инженер-программист, Университет ИТМО; доцент, факультет систем управления и робототехники, Санкт-Петербург, Россия.

Денк Денис Сергеевич, ООО «ГК Р-АЭРО», инженер-электроник, www.r-aero.com, Санкт-Петербург, Россия.

Калитеевский Дмитрий Николаевич, ООО «ГК Р-АЭРО», инженер-конструктор, www.r-aero.com, Санкт-Петербург, Россия.

Калитеевский Илья Николаевич, ООО «ГК Р-АЭРО», генеральный директор, www.r-aero.com, Санкт-Петербург, Россия.

Павлова Анна Леонидовна, ООО «ГК Р-АЭРО», ведущий специалист по научно-техническим проектам, www.r-aero.com, Санкт-Петербург, Россия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы. АО «ЛЛС» – официальный дилер товаров ООО «ГК Р-АЭРО» на территории Российской Федерации и стран СНГ.

with a sync input. Activities are underway to improve hardware recording of the spectrum sequence to the internal memory of the spectrometer that is followed by transmission to the software via USB.

Software with built-in mathematical processing facilitates expanding the dynamic range additionally.

On the basis of the described modules, several complex devices were implemented that allow simultaneous recording of the transmission, reflection, and fluorescence spectra of liquid and solid samples. For example, a spectrophotometer (Fig. 7).

The spectrophotometer allows recording the transmission spectrum of liquid samples (Fig. 8) in the spectral range of 1600–1860 nm with optical densities up to 5, as well as recording the fluorescence spectrum of the sample when excited by radiation at a wavelength of 405 nm.

ABOUT AUTHORS

Polyakov Vadim Mikhailovich, vadim.polyakov@r-aero.com, R-AERO GC LLC, www.r-aero.com Technical Director, St. Petersburg, Russia.

Bobe Alexandra Sergeevna, Geophotonics LLC, optical engineer, ITMO University, Department of Applied and Computer Optics, St. Petersburg, Russia.

Tomashevich Stanislav Igorevich, Ph.D., Geophotonics LLC, software engineer, ITMO University; Associate Professor, Faculty of Control Systems and Robotics, St. Petersburg, Russia.

Denk Denis Sergeevich, R-AERO Group of Companies, electronic engineer, www.r-aero.com, St. Petersburg, Russia.

Kaliteevsky Dmitry Nikolaevich, LLC «GK R-AERO», design engineer, www.r-aero.com, St. Petersburg, Russia.Kaliteevsky Ilya Nikolaevich, R-AERO GC LLC, General Director, www.r-aero.com, St. Petersburg, Russia.

Pavlova Anna Leonidovna, R-AERO GC LLC, leading specialist in scientific and technical projects, www.r-aero.com, St. Petersburg, Russia.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work. JSC «LLS» is the official dealer of goods of LLC «GK R-AERO» on the territory of the Russian Federation and the CIS countries.

БЕЛОМО
ММЗ ВАВИЛОВА

ОАО «ММЗ имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО»

Оптический завод «Сфера»

«Оптический завод «Сфера» основан в 1994 году как филиал ОАО «Минский механический завод имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга БелОМО» для производства оптических элементов. В настоящее время завод выпускает большое количество оптических элементов различной сложности по чертежам Заказчика. Оптические элементы, произведенные «Оптическим заводом «Сфера», успешно применяются во многих уникальных оптоэлектронных системах.

Для производства высокотехнологичной продукции проводится техническое переоснащение производства, проводится модернизация производственных мощностей с целью увеличения объемов производства. Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям версии ГОСТ ISO 9001:2015.

Многолетний опыт производства оптических элементов, высококвалифицированный персонал предприятия позволяют удовлетворить любую потребность Заказчика.

Республика Беларусь, 220114,
г. Минск, ул. Макаенка, 23
Тел.: (+375 17) 325–52–91
Тел./факс: (+375 17) 276–27–71
E-mail: sfera.ved@belomo.by; sfera@belomo.by

www.belomo.by