



УДК 535.253

Гониометрический комплекс для исследования оптических характеристик излучения люминесцирующих структур

С.Я. Прислопский, В.В. Станкевич, С.В. Никоненко*Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости, 68–2, Минск, 220072, Республика Беларусь
v.stankevich@ifanbel.bas-net.by***Аннотация**

Статья посвящена созданному в Институте физики НАН Беларуси автоматизированному комплексу для исследования оптических характеристик излучения люминесцирующих структур и процессу его метрологической аттестации. Описана конструкция и принцип действия комплекса и приведены его основные технические и оптические характеристики.

При проведении метрологической аттестации комплекса, для обеспечения прослеживаемости к национальным эталонам Республики Беларусь, в качестве артефактов применялись специально разработанные пять референсных светодиодов.

Созданный автоматизированный гониометрический комплекс позволяет измерять пространственное распределение излучения люминесценции и рассеяния при внешнем лазерном возбуждении в единицах спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО), освещенности, координат цветности и коррелированной цветовой температуры. Основные метрологические характеристики комплекса: спектральный диапазон от 396 до 753 нм при разрешении не хуже 0,5 нм; диапазон измерения СПЭО в спектральном диапазоне от 400 до 750 нм от $3,5 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^6$ Вт/м³ при относительной суммарной стандартной неопределенности 7,8 %; диапазон измерения координат цветности для координаты x от 0,088 до 0,676, для координаты y — от 0,160 до 0,715, при относительной суммарной стандартной неопределенности не хуже 5,5 % для координаты x и 8,4 % для y ; диапазон измерения коррелированной цветовой температуры от 2000 до 7000 К при относительной суммарной стандартной неопределенности коррелированной цветовой температуры не хуже 9,3 %; диапазон измерения светового потока от 0,6 до 35,0 лм при относительной суммарной стандартной неопределенности не хуже 7,9 %; угол поворота в диапазоне от минус 90° до плюс 90° в тангенциальном и от минус 180° до плюс 180° в радиальном направлениях при угловом разрешении 0,5°. Обработка результатов измерения осуществляется программным обеспечением комплекса и позволяет представлять результаты измерений как в виде трехмерных диаграмм пространственного распределения в соответствующих единицах, так и в виде текстового файла.

Ключевые слова: гониометрическая установка; спектральная плотность энергетической освещенности; световой поток; координаты цветности; люминесценция.

Получено: 15.02.2019

Отредактировано: 29.03.2019

Одобрено к печати: 18.04.2019

Введение

В настоящее время актуально изучение распространения света в сложных средах (в том числе наноструктурированных), что обусловлено необходимостью разработки новых концепций фотонных устройств (фотонные кристаллы и стекла, лазеры Летохова и др.), поиском и установлением новых физических явлений (когерентное обратное рассеяние, андерсоновская локализация света, анизотропное рассеяние в упорядоченных нанопористых диэлектриках),

анализа распространения волн в квазипериодических и фрактальных структурах. Исследования в этой области показывают, что структура подложки оказывает существенное влияние на люминесценцию излучения помещенных на нее излучающих структур. Кроме того, топология поверхности определяет распределение рассеяния падающего на нее света. Например, наблюдается усиление люминесценции полупроводниковых наночастиц или органических красителей, нанесенных на поверхность пленки, образован-

© ННЦ «Институт метрології», 2019

ной коллоидными частицами золота или серебра с размерами 30–50 нм [1, 2]. На подобных подложках наблюдается и гигантское комбинационное рассеяние света (ГКР). Также было обнаружено пространственное перераспределение рассеянного излучения при прохождении через нанопористые мембраны анодного оксида алюминия [3]. Эти явления находят применение в аналитической спектроскопии, позволяя повысить чувствительность существующих методов измерения.

Изучение пространственного распределения излучения позволяет оптимизировать структуру таких подложек и технологию их изготовления. Так, например, исследование пространственного распределения интенсивности люминесценции ионов лантаноидов в порах нанопористого анодного оксида алюминия позволяет оптимизировать технологические процессы изготовления люминесцирующих структур для достижения анизотропии люминесценции и увеличение ее интенсивности [4], что дает возможность создать новые высокоэффективные люминесцентные источники излучения. Исследование индикатрис люминесценции ионов тербия, осажденного в пористом оксиде алюминия, позволяет оптимизировать структуру таких пленок при формировании на их основе золь-гель методом пористого оксида титана [5]. Исследование диаграмм рассеяния лазерного излучения на пористом фосфиде индия позволило обнаружить новый эффект обратного рассеяния — необычное рассеяние света нанопористым полупроводниковым материалом сетчатой структуры в спектральной области сильного (собственного, межзонного) поглощения полупроводника [6, 7]. Дальнейшие исследования позволили обнаружить вышеупомянутый эффект в арсениде галлия [8].

Существующие на рынке гониометрические комплексы в основном предназначены для регистрации пространственного распределения излучения светодиодов или светотехнических изделий, что привело к необходимости создания комплекса, который позволил бы изучать пространственное распределение излучения люминесценции или рассеяния при возбуждении исследуемых структур внешним лазерным излучением.

Принцип действия и основные технические характеристики комплекса

В 2018 г. в Институте физики НАН Беларуси создан гониометрический комплекс для исследования оптических характеристик излучения образцов люминесцирующих структур (далее — комплекс). Блок-схема комплекса приведена на рис. 1, а внешний вид — на рис. 2.

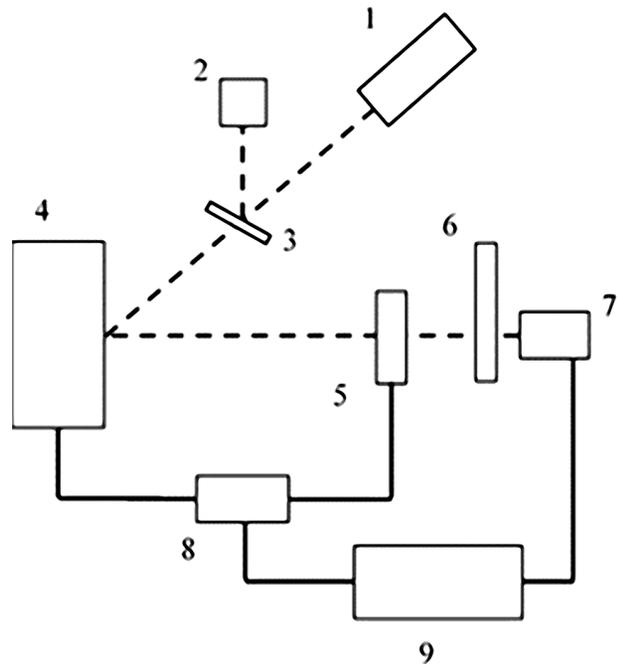


Рис. 1. Блок-схема комплекса: 1 — лазерные излучатели; 2 — измеритель мощности; 3 — светоделительная пластина; 4 — гониометр; 5 — поляризатор; 6 — ослабитель излучения с изменяемой оптической плотностью; 7 — система регистрации; 8 — контроллер шаговых двигателей; 9 — персональный компьютер

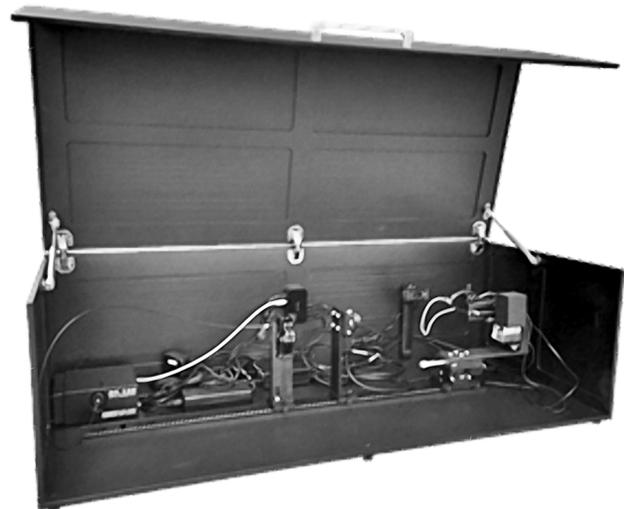


Рис. 2. Внешний вид комплекса

Комплекс состоит из двух основных элементов: гониометра 4 и системы регистрации 7 (см. рис. 1), которая основана на компактном высокочувствительном флуоресцентном спектрометре SC125 производства SolarLS (Беларусь). Основные характеристики спектрометра: спектральный диапазон от 350 до 1100 нм; фокусное расстояние 125 мм; относительное отверстие 1:3,9; приемник излучения — ПЗС-матрица Hamamatsu S10420–1106. Оптическая схема спектрометра SC125 не содержит движущихся элементов. Корпус спектрометра SC125 является монолитным, что улучшает долговременную стабильность основных характе-

ристик. Внутри корпуса расположены световые ловушки, позволяющие уменьшить влияние рассеянного света.

На блоке гониометра установлен блок лазерных источников излучения с номинальными длинами волн излучения 405 или 520 нм таким образом, чтобы в процессе измерения не допустить изменения области освещения образца. Излучение образца регистрируется с помощью радиометрической головки спектрометра, которая соединена с входной щелью спектрографа оптоволоконном. Между образцом и радиометрической головкой спектрометра установлен блок ослабляющих светофильтров. Также предусмотрена возможность установки поляризатора в канал регистрации, для обеспечения измерения поляризационных характеристик излучения исследуемого образца.

Комплекс работает в трех основных режимах измерения, основанных на детекторном подходе:

- измерение пространственного распределения спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО), которую создает люминесцирующая структура при внешнем лазерном возбуждении;
- измерение пространственного распределения СПЭО поляризованного излучения люми-

несцирующей структуры при внешнем лазерном возбуждении;

- измерение индикатрисы поляризации неподвижной люминесцирующей структуры для выбранного направления.

Общий порядок работы для всех режимов измерения следующий. На предметном столике моторизованного блока гониометра размещают исследуемый образец. Затем устанавливают требуемое расстояние измерений, используя шкалу оптического рельса. Запускают программу комплекса и задают необходимую мощность излучения одного из лазеров, а также параметры измерений (режим работы, время накопления сигнала, область сканирования и др.). С помощью видеокамеры корректируют положение исследуемой области образца относительно оптической оси системы регистрации 7.

Процесс измерения полностью автоматизирован и отображается в графическом виде, а полученные результаты измерений сохраняются в файл. Программное обеспечение комплекса позволяет рассчитать значения координат цветности, светового потока, коррелированной цветовой температуры и др. Пример отображения результатов измерений программой комплекса приведен на рис. 3.

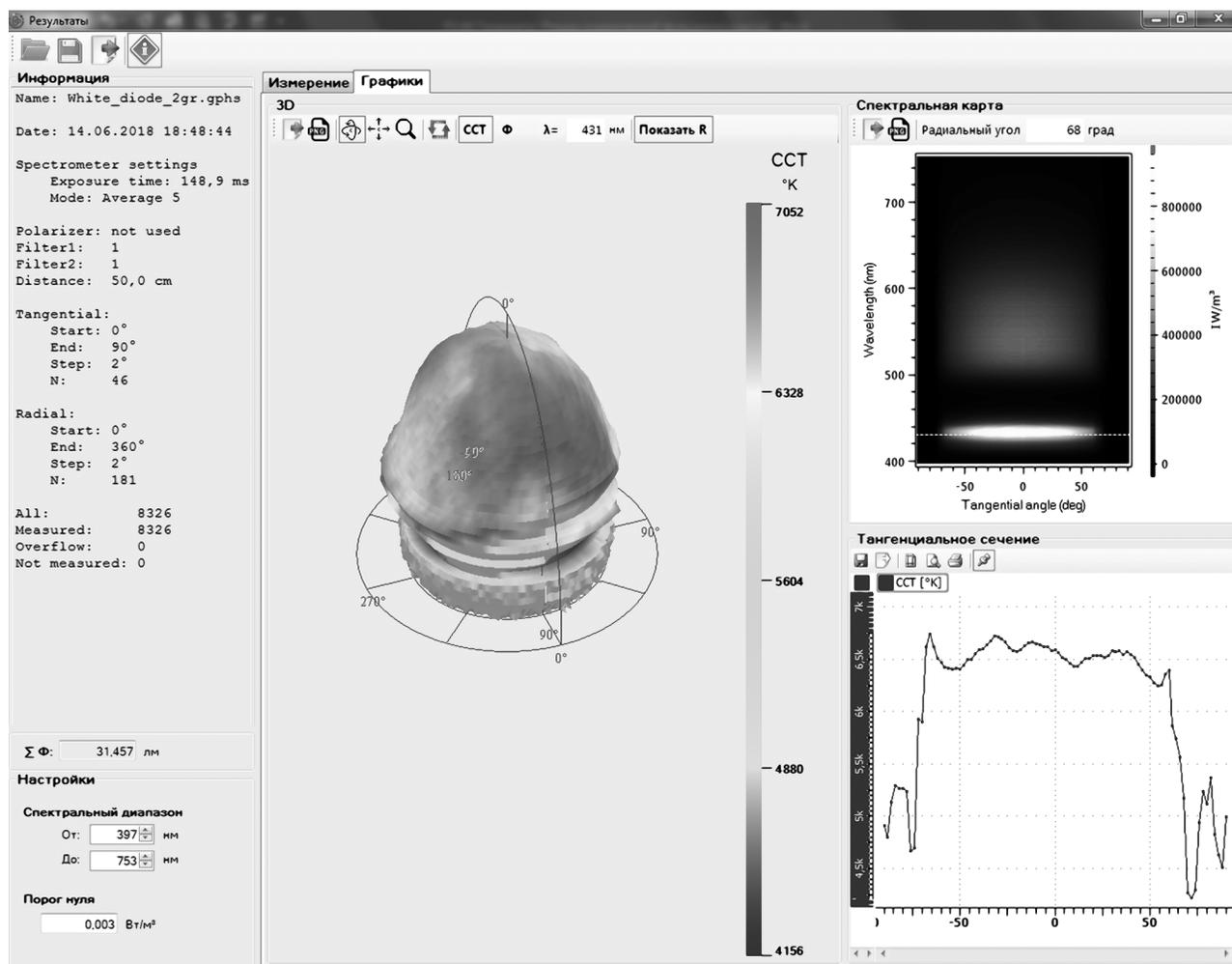


Рис. 3. Окно "Результаты" программы комплекса

Основные технические характеристики комплекса: гониометрическая система обеспечивает углы поворота в диапазоне от минус 90° до плюс 90° в тангенциальном и от минус 180° до плюс 180° в радиальном направлениях при угловом разрешении 0,5°; точность позиционирования поворотных площадок гониометра — 1 аркминута; диаметр входной апертуры спектрографа — 0,6 мм; спектральный диапазон системы регистрации — от 396 до 753 нм при разрешении 0,5 нм; максимальная мощность источников лазерного возбуждения — 30 мВт при длине волны 405 нм и 20 мВт — при длине волны 520 нм; общее охлаждение комплекса — воздушное.

Оптические характеристики комплекса

Основной измеряемой величиной на комплексе является спектральная плотность энергетической освещенности (СПЭО), что обеспечивается применением калиброванного в единицах СПЭО спектрометра SC125 по эталонной лампе. По результатам измерения СПЭО программное обеспечение комплекса позволяет рассчитать световой поток, координаты цветности и коррелированную цветовую температуру люминесцирующих структур, а также их пространственное распределение.

Световой поток испытуемых образцов Φ_v в лм рассчитывают по формуле

$$\Phi_v = l^2 \int_{360}^{750} \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\phi=0}^{\pi} V(\lambda) E_{e\lambda}(\varphi, \theta) \sin \theta \frac{Y_x}{Y_s} d\theta d\phi d\lambda,$$

где $E_{e\lambda}(\varphi, \theta)$ — СПЭО образца в Вт·м⁻³; Y_x — измеренный сигнал при освещении испытуемым образцом; Y_s — измеренный сигнал при освещении калиброванной по СПЭО лампы; $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность; φ, θ — углы поворота в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; l — расстояние между входной апертурой радиометрической головки спектрометра SC125 и испытуемым образцом, м.

Коррелированную цветовую температуру испытуемого образца рассчитывают по формуле МакКами [9]

$$T_{\text{корр}} = 449,0 \cdot n^3 + 3525,0 \cdot n^2 + 6823,3 \cdot n + 5520,33,$$

$$n = \frac{x - x_c}{y_c - y},$$

где $x_c = 0,3320$; $y_c = 0,1858$.

При проведении метрологической аттестации комплекса, для обеспечения прослежива-

емости к национальным эталонам Республики Беларусь, в качестве артефактов применялись специально изготовленные четыре референсных светодиода с пиковыми длинами волн 628,7 нм (красный), 581,7 нм (желтый), 527,2 нм (зеленый), 478,6 нм (синий), а также светодиод белого свечения. Используемые светодиоды были предварительно отожжены в течение не менее 50 ч. Все светодиоды закреплены на элементах Пельтье с алюминиевыми радиаторами, что позволяет обеспечить при проведении измерений температуру их корпуса $(25,0 \pm 1,0)$ °С. Значения светового потока, координат цветности и коррелированной цветовой температуры для каждого светодиода при соответствующих номинальных токах инжекции были установлены для референсных светодиодов по результатам измерения на национальных эталонах Республики Беларусь единицы светового потока непрерывного излучения и единиц силы света и освещенности. По результатам измерений для референсных светодиодов относительное среднее квадратическое отклонение (ОСКО) значений: СПЭО составило не более 0,43 %; светового потока ОСКО не более 1,03 %; координат цветности x и y для “желтого” светодиода не более 0,27 % и 0,23 %, для “синего” светодиода не более 0,03 % и 0,16 %, для “зеленого” светодиода не более 0,02 % и 0,002 %, для “красного” светодиода не более 0,002 % и 0,006 %; коррелированной цветовой температуры не более 0,03 %.

При проведении аттестации каждый из референсных диодов размещался на предметном столике блока гониометра и затем производились измерения пространственного распределения его излучения в единицах СПЭО. Расстояние между входной апертурой радиометрической головки спектрометра SC125 и референсным светодиодом составляло 0,5 м. При определении расстояния использовался комплект концевых мер. Измерения выполнялись не менее 10 раз для каждого светодиода.

Относительная суммарная стандартная неопределенность измерений СПЭО светодиодов $u^{\circ}_c(E_{e\lambda,xLED})$ определялась по формуле

$$u^{\circ}_c(E_{e\lambda,xLED}) = \sqrt{[u^{\circ}(\bar{E}_{e\lambda,xLED})]^2 + [u^{\circ}_{\text{кал}}(E_{e\lambda,s})]^2 + [u^{\circ}l]^2},$$

где $u^{\circ}(\bar{E}_{e\lambda,xLED})$ — относительная стандартная неопределенность измерения СПЭО референсных светодиодов с помощью комплекса, %; $u^{\circ}_{\text{кал}}(E_{e\lambda,s})$ — относительная стандартная неопределенность эталонной лампы, согласно сертификату о ее калибровке; $u^{\circ}l$ — относительная стандартная неопределенность измерения расстояния с помощью концевых мер, согласно сертификату об их калибровке.

Заключение

Создан гониометрический комплекс для исследования оптических характеристик излучения образцов люминесцирующих структур. Основные технические и метрологические характеристики комплекса следующие: спектральный диапазон системы регистрации от 396 до 753 нм при разрешении 0,5 нм; диапазон измерения СПЭО в спектральном диапазоне от 400 до 750 нм от $3,5 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^6$ Вт/м³ с относительной суммарной стандартной неопределенностью 7,8 %; диапазон измерения координат цветности для координаты x от 0,088 до 0,676, для y — от 0,160 до 0,715, с относительной суммарной стандартной неопределенностью 5,5 %

для координаты x и 8,4 % для y ; диапазон измерения коррелированной цветовой температуры в спектральном диапазоне от 400 до 750 нм, от 2000 до 7000 К с относительной суммарной стандартной неопределенностью определения коррелированной цветовой температуры 9,3 %; диапазон измерения светового потока от 0,6 до 35,0 лм с относительной суммарной стандартной неопределенностью 7,9 %; угол поворота в диапазоне от минус 90° до плюс 90° в тангенциальном и от минус 180° до плюс 180° в радиальном направлениях при угловом разрешении 0,5°; максимальная мощность источников лазерного возбуждения 30 мВт на длине волны 405 нм и 20 мВт — на длине волны 520 нм.

Гоніометричний комплекс для дослідження оптичних характеристик випромінювання люмінесціюючих структур

С.Я. Прислопський, В.В. Станкевич, С.В. Ніконенко

Інститут фізики НАН Білорусі, пр. Незалежності, 68–2, Мінськ, 220072, Республіка Білорусь
v.stankevich@ifanbel.bas-net.by

Анотація

Статтю присвячено створеному в Інституті фізики НАН Білорусі автоматизованому комплексу для дослідження оптичних характеристик випромінювання люмінесціюючих структур і процесу його метрологічної атестації.

Більшість приладів для вимірювання просторового розподілу випромінювання призначені для роботи з комерційними джерелами світла, такими як світлодіоди, лампи розжарювання, люмінесцентні лампи. Проте для наукових досліджень потрібні вимірювання просторового розподілу випромінювання люмінесценції або розсіяння, що привело до необхідності створення спеціалізованого комплексу, який дозволив би вивчати просторовий розподіл випромінювання люмінесценції або розсіяння під час збудження структур, що досліджуються, зовнішнім лазерним випромінюванням.

При проведенні метрологічної атестації комплексу, для забезпечення простежуваності до національних еталонів Республіки Білорусь, як артефакти застосовувалися спеціально розроблені п'ять референтних світлодіодів із різними спектральними характеристиками.

Створено автоматизований гоніометричний комплекс, який дозволяє вимірювати просторовий розподіл випромінювання люмінесценції та розсіяння при зовнішньому лазерному збудженні в одиницях спектральної густини енергетичної освітленості (СГЕО), освітленості, координатах кольоровості та корельованої колірної температури. Основні метрологічні характеристики комплексу: спектральний діапазон від 396 до 753 нм при роздільній здатності не гірше 0,5 нм; діапазон вимірювання СГЕО в спектральному діапазоні від 400 до 750 нм від $3,5 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^6$ Вт/м³ при відносній сумарній стандартній невизначеності 7,8 %; діапазон вимірювання координат кольоровості для координати x від 0,088 до 0,676, для координати y — від 0,160 до 0,715, при відносній сумарній стандартній невизначеності не гірше 5,5 % для координати x і 8,4 % для y ; діапазон вимірювання корельованої колірної температури від 2000 до 7000 К при відносній сумарній стандартній невизначеності корельованої колірної температури не гірше 9,3 %; діапазон вимірювання світлового потоку від 0,6 до 35,0 лм при відносній сумарній стандартній невизначеності не гірше 7,9 %; кут повороту в діапазоні від минус 90° до плюс 90° в тангенціальному і від минус 180° до плюс 180° в радіальному напрямках при кутовій роздільній здатності 0,5°. Обробка результатів вимірювання здійснюється програмним забезпеченням комплексу і дозволяє подавати результати вимірювань як у вигляді тривимірних діаграм просторового розподілу у відповідних одиницях, так і у вигляді текстового файлу.

Ключові слова: гоніометрична установка; спектральна густина енергетичної освітленості; світловий потік; координати кольоровості; люмінесценція.

Goniometric complex for investigation the optical characteristics of radiation of luminescent structures

S. Prislopski, V. Stankevich, S. Nikanenka

B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus 220072, Nezavisimosti Ave., 68–2, Minsk, Belarus
v.stankevich@ifanbel.bas-net.by

Abstract

In this paper we describe an automated goniometric complex for investigation the optical characteristics and them spatial distribution of luminescent structures.

On the market most instruments for measuring of the spatial distribution of radiation are designed for commercial light sources, such as LEDs, incandescent lamps, fluorescent lamps. Often scientific research requires measurements of the spatial distribution of emitted or scattered radiation upon excitation by external laser radiation. Therefore, the device for these measurements was designed and manufactured. In the article the design and principle of operation of the complex are described and its main technical characteristics are presented. During metrological certification specially developed five reference LEDs with different spectral characteristics were used to ensure traceability to the national measurement standards of the Republic of Belarus. The automated goniometric complex allows one to measure the spatial distribution of luminescence and scattering radiation with external laser excitation in the units of the spectral irradiance, luminous flux, chromaticity coordinates and correlated color temperature.

The main metrological characteristics of the complex: spectral range — from 396 nm to 753 nm with a spectral resolution of 0.5 nm; power spectral density measurement range — from $3.5 \cdot 10^2$ W/m² to $1 \cdot 10^6$ W/m² in the spectral range from 400 nm to 750 nm with relative combined standard uncertainty of 7.8 %; chromaticity coordinate measurement range for coordinate x from 0.088 to 0.676, for coordinate y — from 0.160 to 0.715, with relative combined standard uncertainty of 5.5 % for coordinate x and 8.4 % for coordinate y ; measurement range of correlated color temperature — from 2000 K to 7000 K with relative combined standard uncertainty of 9.3 %; luminous flux measurement range — from 0.6 lm to 35.0 lm with relative combined standard uncertainty of 9.3 %; rotation angle — from minus 90° to plus 90° in tangential direction and from minus 180° to plus 180° in radial direction with angular resolution of 0.5°.

Measurement results are processed by specially developed software. Results can be presented in the form of three-dimensional diagrams for selected units of measurement or in form of a text file.

Keywords: goniometric complex; spectral irradiance; luminous flux; chromaticity coordinates; luminescence.

Список литературы

1. Vaschenko S.V., Stankevich V.V., Ramanenka A.A., Guzatov D.V., Lunevich A. Ya., Glukhov Yu.F., Sveklo I.F., Gaponenko S.V. Plasmon-enhanced fluorescence of labeled biomolecules on top of a silver sol-gel film. *Journal of Nanophotonics*, 2012, vol. 6, pp. 061710-1–061710-11.
2. Романенко А.А., Станкевич В.В., Ващенко С.В., Луневич А.Я., Глухов Ю.Ф., Гапоненко С.В. Плазмонное усиление люминесценции конъюгатов изотиоцианата флуоресцеина иммуноглобулина человека. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2014. Т. 81. № 2. С. 228–232.
3. Prislopski S.Ya., Yakovtseva V., Litvinovich G., Sokol V. Nanoporous alumina panels for backlight enhancement in liquid crystal displays. *Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures. Proceedings of the International Conference*. Minsk, Belarus, 26–29 May 2009, pp. 613–616.
4. Гапоненко Н.В., Кортюв В.С., Ореховская Т.И., Николаенко И.А., Пустоваров В.А., Звонарев С.В., Слесарев А.И., Прислопский С.Я. Люминесценция тербия в ксерогеле оксида алюминия, сформированном в матрице пористого анодного оксида алюминия, при различных видах возбуждения. *Физика и техника полупроводников*. 2011. Т. 45. Вып. 7. С. 980–983.
5. Гапоненко Н.В., Ореховская Т.И., Николаенко И.А., Линник О.П., Жуковский М.А., Смирнова Н.П., Прислопский С.Я. Пленки ксерогеля оксида титана в пористом оксиде алюминия для фотокаталитического применения. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2010. Т. 77. № 3. С. 465–470.
6. Prislopski S. Ya., Naumenko E.K., Gaponenko S.V., Tiginyanu I.M., Ghimpu L., Monaico E., Sirbu L. Anomalous retroreflection from strongly absorbing nanoporous semiconductors. *Optics Letters*, 2011, vol. 36, no. 16, pp. 3227–3229.
7. Prislopski S. Ya., Tiginyanu I.M., Ghimpu L., Monaico E., Sirbu L., Gaponenko S.V. Retroreflection of light from nanoporous InP: correlation with high absorption. *Applied Physics A*, 2014, vol. 117, no. 2, pp. 467–470.

8. Gaponenko S.V., Monaico E., Sergentu V.V., Prislopski S.Ya. and Tiginyanu I.M. Possible coherent backscattering of light waves from a strongly absorbing nanoporous medium. *J. Opt.*, 20:7(2018), 075606.
9. McCamy C.S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. *Color Research & Application*, 1992, vol. 17, no. 2, pp.142–144.

References

1. Vaschenko S.V., Stankevich V.V., Ramanenka A.A., Guzatov D.V., Lunevich A.Ya., Glukhov Yu.F., Sveklo I.F., Gaponenko S.V. Plasmon-enhanced fluorescence of labeled biomolecules on top of a silver sol-gel film. *Journal of Nanophotonics*, 2012, vol. 6, pp. 061710-1-061710-11.
2. Ramanenka A.A., Stankevich V.V., Vaschenko S.V., Lunevich A. Ya., Glukhov Yu.F., Gaponenko S.V. Plazmonnoye usileniye lyuminestsentsii konyugatov izotiotsianata fluorestseina immunoglobulina cheloveka [Plasmonic Enhancement of Luminescence of Fluorescein Isothiocyanate and Human Immunoglobulin Conjugates]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2014, vol. 81, no. 2, pp. 228–232 (in Russian).
3. Prislopski S.Ya., Yakovtseva V., Litvinovich G., Sokol V. Nanoporous alumina panels for back-light enhancement in liquid crystal displays. *Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures. Proceedings of the International Conference*. Minsk, Belarus, 26–29 May 2009, pp. 613–616.
4. Gaponenko N.V., Kortov V.S., Orekhovskaya T.I., Nikolaenko I.A., Pustovarov V.A., Zvonarev S.V., Slesarev A.I., Prislopski S. Ya. Lyuminestsentsiya terbiya v kserogele oksida alyuminiya, sformirovanom v matritse poristogo anodnogo oksida alyuminiya, pri razlichnykh vidakh возбуждениya [Terbium luminescence in an alumina xerogel formed in a matrix of porous anodic alumina under various types of excitation]. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, 2011, vol. 45, issue 7, pp. 980–983 (in Russian).
5. Gaponenko N.V., Orekhovskaya T.I., Nikolaenko I.A., Linnik O.P., Zhukovskii M.A., Smirnova N.P., Prislopski S.Ya. Plenki kserogelya oksida titana v poristom okside alyuminiya dlya fotokataliticheskogo primeneniya [Titanium oxide xerogel films in porous aluminum oxide for photocatalytic application]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2010, vol. 77, no. 3, pp. 465–470 (in Russian).
6. Prislopski S.Ya., Naumenko E.K., Gaponenko S.V., Tiginyanu I.M., Ghimpu L., Monaico E., Sirbu L. Anomalous retroreflection from strongly absorbing nanoporous semiconductors. *Optics Letters*, 2011, vol. 36, no. 16, pp. 3227–3229.
7. Prislopski S.Ya., Tiginyanu I.M., Ghimpu L., Monaico E., Sirbu L., Gaponenko S.V. Retroreflection of light from nanoporous InP: correlation with high absorption. *Applied Physics A*, 2014, vol. 117, no. 2, pp. 467–470.
8. Gaponenko S.V., Monaico E., Sergentu V.V., Prislopski S. Ya. and Tiginyanu I.M. Possible coherent backscattering of light waves from a strongly absorbing nanoporous medium. *J. Opt.*, 20:7(2018), 075606.
9. McCamy C.S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. *Color Research & Application*, 1992, vol. 17, no. 2, pp. 142–144.