

УДК 681.2.0821.083:535.2:543.063

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Решение актуальных задач спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения

А.С. Сигов,
Н.Б. Голованова,
О.А. Минаева[@],
С.И. Аневский,
Р.В. Шамин,
О.И. Останина

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

Резюме

Цели. Использование синхротронного излучения позволяет решать фундаментальные метрологические задачи воспроизведения и передачи единиц спектрорадиометрии, разрабатывать методы и средства метрологического обеспечения современных технологий, таких как нанофотолитография в электронной промышленности. Развитие твердотельных источников и приемников излучения формирует новые актуальные задачи исследования метрологических характеристик светодиодов, многоэлементных матричных приемников, ПЗС-камер и телескопов, успешное решение которых зависит от использования свойств эталонного источника синхротронного излучения. Целью работы является развитие методов спектрорадиометрии для метрологических каналов электронного накопительного кольца при контроле характеристик компонентов в электронной промышленности, при исследованиях и калибровках радиометров, фотометров, излучателей в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Методы. Методы передачи единиц спектрорадиометрии на электронном накопительном кольце основаны на использовании классической теории Ю. Швингера, описывающей электромагнитное излучение релятивистского электрона, для расчета спектральных энергетических характеристик синхротронного излучения с учетом поляризационных компонентов.

Результаты. Рассмотрены возможности развития методов передачи единиц спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения и создания испытательной установки. Эта установка включает в себя компаратор на основе монохроматора, телескопа с ПЗС-матрицей, спектрорадиометра, радиометра, фотометра, гониометра и интегрирующей сферы, позволяющих проводить измерения полного набора спектрорадиометрических и фотометрических характеристик источников и приемников излучения – от наиболее дифференциального распределения спектральной плотности энергетической яркости по излучающей области до интегрального потока излучения с прослеживаемостью к эталонному источнику синхротронного излучения.

Выводы. Определение метрологических характеристик светодиодных излучателей, многоэлементных матричных приемников, ПЗС-камер и телескопов с использованием синхротронного излучения представляется наиболее перспективным направлением с учетом малых размеров излучающей области синхротронного излучения, Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области электронного сгустка синхротрона, широкого динамического диапазона перестройки спектра за счет изменения энергии и числа ускоренных электронов.

Ключевые слова: спектрорадиометрия, синхротронное излучение, энергетическая яркость, сила излучения, светодиод, фотометр, радиометр

• Поступила: 15.02.2022 • Доработана: 28.02.2022 • Принята к опубликованию: 18.04.2022

Для цитирования: Сигов А.С., Голованова Н.Б., Минаева О.А., Аневский С.И., Шамин Р.В., Останина О.И. Решение актуальных задач спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):34–44. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Solution of topical spectroradiometric problems using synchrotron radiation

Alexander S. Sigov,
Nataliya B. Golovanova,
Olga A. Minaeva[@],
Sergei I. Anevsky,
Roman V. Shamin,
Olga I. Ostanina

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

Abstract

Objectives. In order to solve fundamental metrological problems concerning the reproduction and transmission of spectral radiometry units, as well as developing methods and tools for metrological support of modern technologies such as nanophotolithography in the electronics industry, synchrotron radiation can be used. When developing solid-state sources and receivers of radiation, new topical problems arise in connection with the metrological characteristics of light-emitting diodes (LEDs), multi-element array receivers, charge-coupled device (CCD) cameras and telescopes, whose successful solution depends on the properties of a reference source of synchrotron radiation. Therefore, the purpose of the present work is to develop spectral radiometry methods for obtaining metrological channels using an electron storage ring in order to control the characteristics of electronics components, as well as for studying and calibrating radiometers, photometers, and emitters operating in the visible, ultraviolet and infrared regions of the electromagnetic spectrum.

Methods. Methods for transmitting spectroradiometric units on an electron storage ring are based on the classical theory of Julian Schwinger, which describes the electromagnetic radiation of a relativistic electron to calculate the spectral and energetic synchrotron radiation characteristics taking polarization components into account.

Results. The possibility of developing methods for transmitting spectral radiometric units using synchrotron radiation was evaluated by means of a test setup, which included a monochromator-based comparator, a telescope with a CCD array, a spectroradiometer, a radiometer, a photometer, a goniometer, and an integrating sphere. This allowed the full set of spectroradiometric and photometric characteristics of radiation sources and receivers to be measured: from the most differential distribution of the spectral radiance density of the emitting region to the integral radiation flux. The results were compared with the reference synchrotron radiation source.

Conclusions. Among possible approaches for determining the metrological characteristics of LED emitters, multi-element array receivers, CCD cameras, and telescopes, synchrotron radiation seems to be the most promising. This

approach allows the small size of the emitting region of synchrotron radiation, the Gaussian distribution of radiance over the emitting region of the synchrotron electron bunch, as well as the wide dynamic range of spectrum tuning due to changes in the energy and number of accelerated electrons, to be taken into account.

Keywords: spectral radiometry, synchrotron radiation, radiance, radiation intensity, LED, photometer, radiometer

• Submitted: 15.02.2022 • Revised: 28.02.2022 • Accepted: 18.04.2022

For citation: Sigov A.S., Golovanova N.B., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Shamin R.V., Ostanina O.I. Solution of topical spectroradiometric problems using synchrotron radiation. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):34–44. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства синхротронного излучения ускоренных релятивистских электронов в циклических ускорителях открыли большие возможности для метрологии, что позволило использовать электронные накопительные кольца (ЭНК) в качестве первичных эталонных источников электромагнитного излучения с чистым, свободным от плазмы, непрерывным спектром, без спектральных линий, легко перестраиваемым за счет изменения энергии и числа электронов на орбите [1].

Синхротронное излучение широко используется как в фундаментальных метрологических исследованиях, так и при разработке основ метрологического обеспечения современных технологий нанополитографии в электронной промышленности [2]. В Указе Президента Российской Федерации¹ и Постановлении Правительства Российской Федерации² уделяется большое внимание развитию спектрорадиометрии оптического излучения с использованием синхротронного излучения.

Первые работы по спектрорадиометрии, проведенные на синхротроне DESY³ в Гамбурге, были

направлены на измерение спектральной плотности энергетической яркости ультрафиолетового излучения с использованием относительного спектрального распределения синхротронного излучения с абсолютной привязкой в видимой области к эталону на модели черного тела. Это позволило обеспечить спектральный диапазон калибровки континуума дейтерия до границы вакуумного ультрафиолета, то есть до энергий фотонов 6 эВ, недоступной для модели черного тела. Использование электронных накопительных колец и синхротронов в России, Германии и США расширяет диапазон абсолютных спектральных измерений в область вакуумного ультрафиолета, сначала в область Шумана до 10 эВ, а затем и в область Лаймана до 30 эВ. Особенно интенсивное развитие метрологии синхротронного излучения началось с освоения экстремального вакуумного ультрафиолета для нанoeлектроники, позволившее с учетом современных достижений в нанополитографии обеспечить при энергиях фотонов около 100 эВ размеры элементов микросхем до единиц нанометров [3, 4]. В то же время в Национальном метрологическом институте РТВ (Берлин) с созданием метрологического накопительного кольца Metrological Light Source (MLS) начались работы по использованию синхротронного излучения также для спектрорадиометрии труднодоступного терагерцового диапазона для энергий фотонов от 10^{-2} до 10^{-3} эВ [5]. Большое внимание развитию методов спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения уделяется в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» на ЭНК Сибирь-1 и Сибирь-2. Работы с синхротронным излучением позволили обеспечить в ведущих национальных метрологических центрах проведение абсолютных спектральных измерений в широком диапазоне длин волн от радиочастот до рентгеновского излучения.

Фундаментальные и прикладные метрологические исследования с использованием синхротронного излучения проводятся в национальных

¹ Указ Президента РФ от 25 июля 2019 г. № 356 «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в РФ». [Decree of the President of the Russian Federation of July 25, 2019. No. 356 “On measures to develop synchrotron and neutron research and research infrastructure in the Russian Federation” (in Russ.).]

² Постановление Правительства РФ от 16.03.2020 г. № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы». [Decree of the Government of the Russian Federation of March 16, 2020. No. 287 “On Approval of the Federal Scientific and Technical Program for the Development of Synchrotron and Neutron Research and Research Infrastructure for 2019–2027” (in Russ.).]

³ Deutsches Elektronen-Synchrotron – немецкий электронный синхротрон. (Национальный исследовательский центр DESY, Германия). [Deutsches Elektronen-Synchrotron – German electronic synchrotron (National Research Center DESY, Germany).]

метрологических центрах не только в труднодоступных областях спектра – экстремальном вакуумном ультрафиолетовом (УФ) и терагерцовом диапазонах, но и в видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра, где постоянно формируется большое количество актуальных метрологических задач, успешное решение которых прямо зависит от использования свойств эталонного источника синхротронного излучения. В первую очередь это связано с исследованиями метрологических характеристик светодиодов, многоэлементных матричных приемников, ПЗС-камер⁴ и телескопов.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Главными задачами при исследовании метрологических характеристик светодиодов в соответствии с существующими ГОСТ 8.888-2015⁵, ГОСТ Р 54814-2018⁶, ГОСТ Р 8.749-2011⁷ являются измерения спектральной плотности силы излучения и полного потока излучения. Измерения метрологических характеристик светодиодов особенно важны для проведения технологического контроля при производстве излучателей белого холодного, нейтрального и теплого цветов для разработки светотехнического оборудования наземной, авиационной и морской техники, применяемых в подсветке и индикации бортовой аппаратуры, а также светотехнических изделий офисного, уличного и декоративного освещения. Исследование электрооптических, световых и тепловых характеристик полупроводниковых наногетероструктур твердотельных источников

излучения также требует развития методов спектрорадиометрии. Для определения характеристик излучения источников в единицах спектральной плотности силы излучения (СПСИ) используют спектральные компараторы, обеспечивающие интегрирование спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в пределах излучающей области и фиксированного телесного угла [6].

Основной проблемой спектрорадиометрии синхротронного излучения является необходимость учета сложной угловой зависимости интенсивности поляризационных компонентов [1]. Компаратор для калибровки СПСИ светодиодов включает фокусирующую оптику, спектральный прибор, светофильтры и приемник излучения. Метод передачи единицы СПСИ на электронном накопительном кольце должен учитывать два поляризационных компонента синхротронного излучения, плоскость колебаний которых лежит в плоскости электронной орбиты и в перпендикулярной плоскости. Уравнение, описывающее сигнал компаратора $i_{SR}(\lambda)$, пропорциональный СПСИ [7, 8] в поляризационных компонентах синхротронного излучения, записывается следующим образом:

$$i_{SR}(\lambda) = \int_{\Psi_0} I_{SR}^{\parallel}(\psi, \lambda) \tau^{\parallel}(\psi, \lambda) S^{\parallel}(\lambda) \Delta\lambda \Delta\varphi d\psi + \\ + \int_{\Psi_0} I_{SR}^{\perp}(\psi, \lambda) \tau^{\perp}(\psi, \lambda) S^{\perp}(\lambda) \Delta\lambda \Delta\varphi d\psi, \quad (1)$$

где Ψ – угол отклонения от плоскости электронной орбиты; Ψ_0 – апертурный угол отклонения от плоскости электронной орбиты; λ – длина волны; $I_{SR}^{\parallel}(\psi, \lambda)$, $I_{SR}^{\perp}(\psi, \lambda)$ – спектральная плотность силы синхротронного излучения, поляризованного, соответственно, в плоскости орбиты и в перпендикулярной плоскости; $\tau^{\parallel}(\psi, \lambda)$, $\tau^{\perp}(\psi, \lambda)$ – коэффициенты пропускания спектрального прибора компаратора для излучения, поляризованного в плоскости орбиты и в перпендикулярной плоскости; $S^{\parallel}(\lambda)$, $S^{\perp}(\lambda)$ – спектральная чувствительность детектора компаратора для излучения, поляризованного в плоскости орбиты и в перпендикулярной плоскости; $\Delta\lambda$ – спектральное разрешение компаратора; $\Delta\varphi$ – апертурный угол компаратора в плоскости электронной орбиты.

Как следует из уравнения (1), использование в составе компаратора монохроматора, фотоумножителя или спектрорадиометра, эффективность которых зависит от плоскости поляризации падающего излучения, затрудняет метрологический анализ. Для исключения сложной зависимости сигнала от степени поляризации используются фотодиод или ПЗС-матрица, а для спектральных измерений – монохроматор нормального падения или комплект интерференционных фильтров [9, 10].

⁴ ПЗС – прибор с зарядовой связью. [CCD is a charge-coupled device.]

⁵ ГОСТ 8.888-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Светодиоды эталонные некогерентного излучения. Технические требования. М.: Стандартинформ; 2019. [GOST 8.888-2015. National Standard of the Russian Federation. State system for ensuring the uniformity of measurements. Reference Light-emitting diodes (LED) of noncoherent radiation. Technical requirements. Moscow: Standartinform; 2019 (in Russ.).]

⁶ ГОСТ Р 54814-2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Светодиоды и светодиодные модули для общего освещения и связанное с ними оборудование. Термины и определения. М.: Стандартинформ; 2018. [GOST R 54814-2018. National Standard of the Russian Federation. Light emitting diodes (LED) and LED modules for general lighting and related equipment. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2018 (in Russ.).]

⁷ ГОСТ Р 8.749-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик. М.: Стандартинформ; 2019. [GOST R 8.749-2011. National Standard of the Russian Federation. State system for ensuring the uniformity of measurements. Light-emitting diodes. Methods of photometric measurements. Moscow: Standartinform; 2019 (in Russ.).]

Это позволяет упростить уравнение (1) для сигнала компаратора:

$$i_{SR}(\lambda) = S(\lambda)\Delta\lambda\Delta\varphi\Delta\tau \left[\int_{\Psi_0} I_{SR}^{\parallel}(\psi, \lambda) d\psi + \int_{\Psi_0} I_{SR}^{\perp}(\psi, \lambda) d\psi \right]. \quad (2)$$

Для светодиода уравнение, описывающее в фиксированном телесном угле Ω сигнал компаратора $i_{CD}(\Omega, \lambda)$, пропорциональный спектральной плотности силы неполяризованного излучения $I_{CD}(\Omega, \lambda)$ [11], имеет вид:

$$i_{CD}(\Omega, \lambda) = S(\lambda)\Delta\lambda\Delta\tau\Omega I_{CD}(\Omega, \lambda). \quad (3)$$

На метрологическом канале синхротронного излучения ЭНК BESSY-II⁸ в Берлине для решения проблемы учета поляризационных компонентов в системе уравнений (1) и (3) используется поворот монохроматора вокруг оптической оси без нарушения юстировки. Для компаратора с малым апертурным углом относительно плоскости электронной орбиты учитывается только поляризационный сигма-компонент синхротронного излучения $I_{SR}^{\parallel}$, что позволяет получить в соответствии с формулой Швингера [12] относительно простое решение для спектральной плотности силы излучения светодиода:

$$I_{CD}(\Omega, \lambda) = 0.0273N(i_{CD}/i_{SR})\Delta\varphi(e^2c/\Omega R^3) \times (\lambda_c/\lambda)^4 \gamma^8 \int_{\Psi_0} K_{2/3}^2(\lambda_c/2\lambda) d\psi, \quad (4)$$

где N – число электронов на орбите; γ – релятивистский фактор; e – заряд электрона; R – радиус орбиты электрона; c – скорость света; $K_{2/3}$ – функция Макдональда; $\lambda_c = (4/3)\pi R\gamma^3$ – критическая длина волны.

Для определения энергии электронов и релятивистского фактора на накопительных кольцах используется обратное рассеяние лазерного излучения на электронном пучке, измерение индукции магнитного поля на орбите, а также методы, основанные на относительных спектральных измерениях потока синхротронного излучения. Наиболее точный метод определения числа электронов основан на использовании телескопа с ПЗС-матрицей при выделении

отдельного электрона на орбите ускорителя. Радиус орбиты определяется частотой ускоряющего поля электронных накопительных колец. Для выполнения условия $\Omega = \Delta\varphi\Psi_0$ определяются размеры апертурных диафрагм и расстояние до излучающей точки орбиты.

На длинах волн много больше критической λ_c , то есть в видимой, ближней УФ и ближней ИК областях спектра, при увеличении апертурного угла оптической системы компаратора в плоскости электронной орбиты Ψ_0 для источника синхротронного излучения интегральные значения СПСИ в полном угле отклонения от плоскости орбиты, нормированные на один электрон, определяются только радиусом орбиты в точке излучения. Это означает, что в видимой, ближней УФ и ближней ИК областях спектра интеграл спектральной плотности силы синхротронного излучения по всем углам отклонения от плоскости орбиты рассчитывается с высокой точностью, не зависит от энергии электронов и является постоянной для каждого источника синхротронного излучения. Этот вывод особенно важен для метрологических исследований при создании первичных спектро-радиометрических эталонов, основанных на фундаментальных физических константах.

Интегрирование СПСИ светодиодов по длинам волн позволяет определить силу излучения и силу света в фиксированном телесном угле с учетом относительной спектральной световой эффективности в соответствии с ГОСТ 8.332-13⁹. В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по освещению (МКО) № 127:2007¹⁰ измерение силы излучения в режиме А проводится на расстоянии 316 мм, в телесном угле 0.001 ср и в режиме В – на расстоянии 100 мм в телесном угле 0.01 ср. Для определения силы излучения и силы света светодиодов применяются интегральные компараторы, включающие радиометры, фотометры или спектро-радиометры [13]. При этом основные трудности связаны с необходимостью точных измерений коэффициентов спектральной коррекции чувствительности компаратора в соответствии с рекомендациями МКО № 053-1982¹¹.

⁹ ГОСТ 8.332-2013 Межгосударственный стандарт. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. Общие положения. М.: АО «Кодекс»; 2015. [GOST 8.332-2013. Interstate Standard. State system for ensuring the uniformity of measurements. Light measurements. Values of relative spectral luminous efficiency function of monochromatic radiation for photopic vision. Moscow: Kodeks; 2015 (in Russ.).]

¹⁰ МКО № 127:2007 Технический доклад «Измерения СИД». [CIE 127:2007 Technical report «Measurement of LEDs». ISBN 978-3-901906-58-9.]

¹¹ МКО № 053-1982. Методы определения характеристик радиометров и фотометров. [CIE 053-1982. Methods of characterizing the performance of radiometers and photometers. ISBN 978-92-9034-053-9.]

⁸ BESSY-II Electron storage ring – источник синхротронного излучения третьего поколения (Helmholtz-Zentrum Berlin, Германия). URL: https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/quellen/bessy/index_en.html, дата обращения 10.12.2021 [BESSY-II Electron storage ring is a third-generation synchrotron radiation source (Helmholtz-Zentrum Berlin, Germany). URL: https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/quellen/bessy/index_en.html. Accessed December 10, 2021.]

Спектральная коррекция чувствительности люксметра в соответствии с нормативными документами проводится только для пяти типов контрольных излучателей. Это означает, что спектральная коррекция чувствительности люксметра проводится в основном в максимуме чувствительности в «зеленой» области, а на спадающих крыльях в «синей» и «красной» областях спектра относительная спектральная чувствительность люксметра может отличаться в десятки раз от относительной спектральной световой эффективности. Это приводит к существенным ошибкам, например, при оценке опасного воздействия излучения в случае применения ярких синих светодиодов [14].

При использовании интегрального радиометра трудности оказываются более значимыми, т.к. относительная спектральная чувствительность радиометра должна иметь П-образную зависимость, которую практически невозможно реализовать. Поэтому создание универсальных интегральных радиометров и фотометров для определения силы излучения и силы света светодиода является сложной метрологической задачей [14]. В соответствии с выражением (4) при использовании ЭНК проводится калибровка радиометров и фотометров, а также определяются коэффициенты спектральной коррекции для конкретных типов излучателей и компараторов. Использование спектрорадиометров, калиброванных по синхротронному излучению, позволяет при интегрировании сигналов, пропорциональных СПСИ светодиодов, получить значения силы излучения и силы света, но при этом необходим учет уровня рассеянного излучения, высших порядков дифракции и влияния степени поляризации синхротронного излучения [16].

При определении суммарной стандартной неопределенности измерений силы излучения и силы света необходимо также учитывать диапазон линейности чувствительности, шумы и порог чувствительности детекторов спектрорадиометра.

Основные трудности при измерении характеристик твердотельных излучателей связаны со сложной угловой зависимостью СПСИ и высокой энергетической яркостью твердотельных светодиодных излучателей [17]. Использование в метрологических лабораториях гониометров для измерений углового распределения интенсивности излучения светодиодов позволяет получить значение потока излучения и светового потока. В качестве детектора гониометра применяются радиометры, фотометры, спектрорадиометры и ПЗС-матрицы, калиброванные по источнику синхротронного излучения.

Для измерения полного потока излучения детектор устанавливается на подвижное плечо гониометра и юстируется в горизонтальной и вертикальной

плоскостях по максимуму сигнала. При пошаговой фиксации сигналов определяется угловое распределение силы излучения или силы света. Для повышения точности измерений используется минимальный шаг угла поворота относительно геометрической оси светодиода. Сигналы радиометра или фотометра в зависимости от угла отклонения от геометрической оси излучателя и при повороте излучателя вокруг геометрической оси нормируются на максимальный сигнал углового распределения, измеренный в телесном угле, фиксированном при калибровке на источнике синхротронного излучения.

Интегрирование угловой зависимости нормированных сигналов гониометра позволяет рассчитать полный поток излучения или световой поток светодиода, но требует обработки большого объема измерительной информации при количестве градаций по углам, составляющем несколько тысяч точек, а также значительного времени измерений при стабилизации режима питания светодиода и поддержании теплового режима. Измерение полного потока излучения с использованием гониометра характеризуется значительной систематической погрешностью. Эта погрешность включает в себя абсолютную калибровку эталонного радиометра или фотометра с учетом спектральной коррекции чувствительности, установку угла поворота плеча гониометра, измерение расстояния от детектора до центра вращения, угловое разрешение и угловой шаг, шум радиометра или фотометра, высокую скорость сканирования по углам рассеянного излучения и нестабильность источника излучения [18].

Использование высокочувствительных многоэлементных детекторов позволяет сократить время измерений при сохранении требований спектральной коррекции чувствительности. Компьютерная 3D-диаграмма, иллюстрирующая результаты измерений угловой зависимости силы излучения светодиода, представлена на рис. 1.

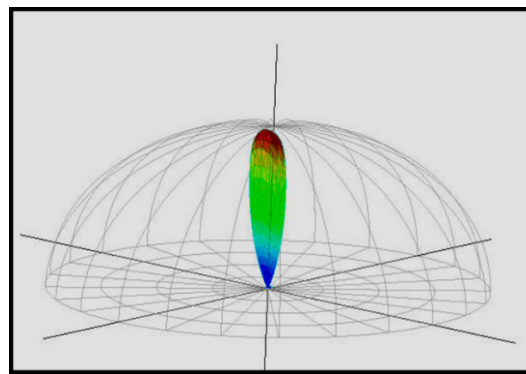


Рис. 1. Компьютерная 3D-диаграмма, иллюстрирующая результаты измерений угловой зависимости силы излучения светодиода

Приведенный пример показывает, что максимум углового распределения силы излучения может быть сдвинут относительно оси светодиода и поток излучения сконцентрирован в малом телесном угле. Полученное угловое распределение позволяет определить силу излучения и поток излучения в произвольном телесном угле.

На рис. 2 приведена соответствующая 2D-диаграмма, где красной линией показана полуширина углового распределения излучения светодиода со сдвигом относительно геометрической оси.

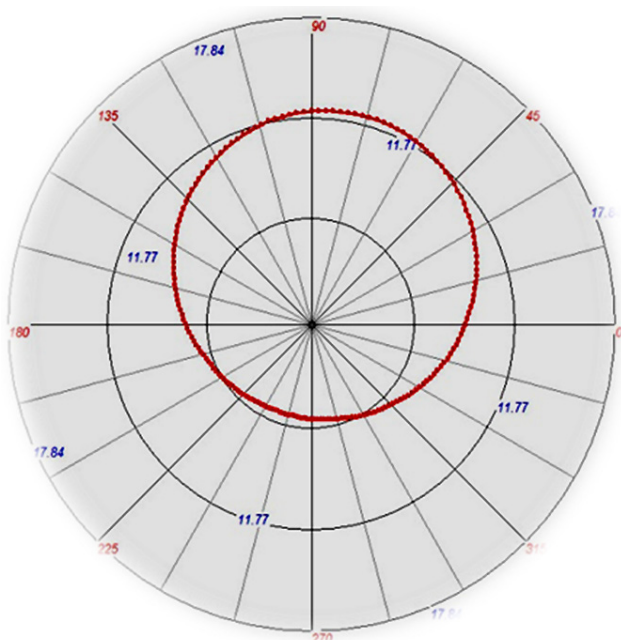


Рис. 2. 2D-диаграмма полуширины углового распределения излучения светодиода

Измерение светового потока мощных светодиодов, используемых для освещения, требует исследования углового распределения силы излучения в режиме, в котором светодиоды применяются в рабочих модулях. Для обеспечения заданной температуры при измерении характеристик мощных светодиодов используется регулируемый теплоотвод.

Особое значение в спектрорадиометрии имеет измерение наиболее дифференциальных характеристик излучения – пространственного распределения яркости и энергетической яркости светодиодов по излучающей области. В состав компаратора энергетической яркости входят оптическая система, комплект корректирующих светофильтров и охлаждаемая ПЗС-матрица.

Использование фундаментального свойства синхротронного излучения – Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области электронного пучка ЭНК – позволяет провести

калибровку относительной чувствительности пикселей ПЗС-матрицы и измерить распределение энергетической яркости различных излучателей.

На рис. 3 представлены результаты регистрации Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области ЭНК, а на рис. 4 – по излучающей области светодиода [19].

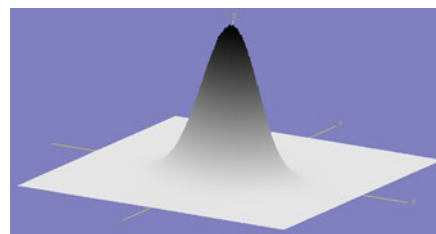


Рис. 3. Результаты регистрации Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области ЭНК

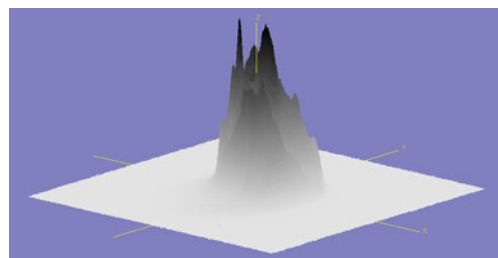


Рис. 4. Результаты регистрации распределения энергетической яркости по излучающей области светодиода

Существенная неоднородность пространственного распределения энергетической яркости светодиода связана с искажением фокусирующей линзой характера распределения [20]. Для исключения искажения распределения яркости по излучающей области разработана конструкция вторичных эталонных светодиодов, представленных на рис. 5, со специально сформированной поверхностью и регулировкой температурного режима с использованием элемента Пельтье.



Рис. 5. Общий вид вторичных эталонных светодиодов

На рис. 6 представлены результаты измерений распределения яркости по излучающей области эталонного светодиода.

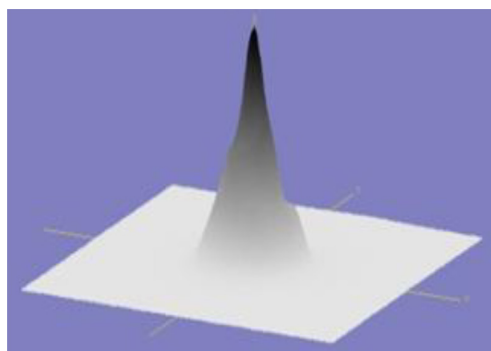


Рис. 6. Результаты измерений распределения яркости по излучающей области эталонного светодиода

Для формирования чувствительности компаратора на основе телескопа с ПЗС-матрицей в соответствии с относительной световой эффективностью используется комплект корректирующих фильтров. Это позволяет проводить измерения пространственного распределения яркости и средней габаритной яркости для определения показателей ослепленности и дискомфорта световой среды, формируемой сверхяркими светодиодными излучателями.

Наиболее распространенный метод измерения полного потока излучения светодиода основан на использовании интегрирующей сферы с коррекцией пространственной неоднородности коэффициента диффузного отражения поверхности сферы с угловой и спектральной коррекцией чувствительности детектора [21]. Для увеличения точности измерений используются интегрирующие сферы большого диаметра с высоким соотношением площади сферы к размеру излучателя. При этом в соответствии с рекомендациями МКО светодиод должен устанавливаться в центре интегрирующей сферы.

Схема калибровки светодиода и общий вид используемой интегрирующей сферы представлены на рис. 7 и 8. В интегрирующую сферу 1 через апертурную диафрагму вводится излучение внешнего эталонного источника 6 или 7 и регистрируется приемником излучения 2. В качестве приемника излучения 2 используется фотодиод или ПЗС-матрица с корректирующими фильтрами, фотометр, радиометр или спектрорадиометр. Излучение калибруемого светодиода 4, установленного в центре интегрирующей сферы, перекрывается экранами 3 от прямого попадания на приемник излучения. Приемник излучения 5 используется для регистрации излучения на апертурной диафрагме интегрирующей сферы. Внешние эталонные источники излучения 6, 7 и приемник излучения 5 расположены под углом 90° .

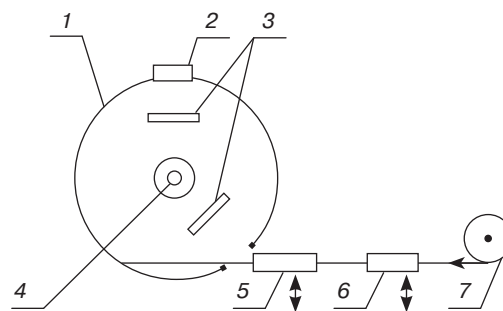


Рис. 7. Схема калибровки светодиода на интегрирующей сфере с использованием синхротронного излучения



Рис. 8. Общий вид интегрирующей сферы

Поток излучения от внешнего эталонного источника определяется интегрированием силы излучения в пределах телесного угла, фиксированного при калибровке по источнику синхротронного излучения. Поток излучения от внутреннего источника – светодиода определяется отношением сигналов приемника излучения от внешнего и внутреннего источников с учетом поправочных коэффициентов, учитывающих неидеальность интегрирующей сферы [22].

В соответствии с рекомендациями МКО при калибровке используются поправочные коэффициенты для учета погрешности спектральной коррекции относительно источника типа А, неоднородности интегрирующей сферы для внутреннего и внешнего источников излучения, отличия коэффициентов диффузного отражения покрытия сферы при различных углах падения. Коэффициент зонной неоднородности чувствительности сферы определяется угловой зависимостью сигналов приемника и позволяет учитывать влияние экранов, неравномерность толщины покрытия, состояние внутренней поверхности [23]. Чувствительность интегрирующей сферы калибруется с опорой на воспроизводимость метрологических характеристик синхротронного

излучения ЭНК и определяется отношением сигнала приемника излучения к потоку излучения на входной диафрагме [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что развитие методов спектрометриии, разработанных для метрологических каналов ЭНК в России и за рубежом, показывает, что источник синхротронного излучения является высокоточным первичным эталоном, который используется национальными метрологическими центрами для решения задач метрологического обеспечения при производстве компонентов в электронной промышленности, исследованиях и калибровках радиометров, фотометров и излучателей, включая светодиоды, в видимых УФ и ИК областях спектра.

Методы спектрометриии, основанные на использовании фундаментальных свойств синхротронного излучения при малой излучающей области и высоких значениях силы излучения и энергетической яркости, регулируемых в широком динамическом диапазоне, позволяют обеспечить абсолютную калибровку ПЗС-телескопов и камер, интегрирующих сфер, гониофотометров и спектрометриев.

Создание спектрометрической установки, включающей компаратор на основе комплекта излучателей, монохроматора, телескопа с ПЗС-матрицей, спектрометра, радиометра и фотометра, позволит проводить измерения полного набора спектрометрических и фотометрических характеристик излучателей, используемых в электронной промышленности, от наиболее дифференциального распределения СПЭЯ по излучающей области до интегрального полного потока излучения.

При использовании источника синхротронного излучения на длинах волн много больше критической, то есть в видимой, ближней УФ и ближней ИК областях спектра, интегральные значения СПСИ в полном угле отклонения от плоскости орбиты, нормированные на число ускоренных электронов, определяются только радиусом орбиты в точке излучения, не зависят от энергии электронов и рассчитываются с высокой точностью по фундаментальным физическим константам и, таким образом, являются неизменными метрологическими характеристиками для каждого источника синхротронного излучения.

Определение метрологических характеристик светодиодов с использованием синхротронного излучения представляется наиболее перспективным с учетом малых размеров излучающей области синхротронного излучения, сравнимых с излучающей областью светодиодов, Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области электронного сгустка синхротрона, широкого динамического диапазона перестройки СПСИ за счет

изменения энергии и числа ускоренных электронов на длинах волн вблизи критической.

Вклад авторов

А.С. Сигов – выбор актуального направления исследований на основе использования методов и средств метрологического обеспечения современных технологий, таких как нанополитография в электронной промышленности; анализ и оценка полученных результатов.

Н.Б. Голованова – оценка эффективности выбранного метода исследований, участие в выборе оптимального состава экспериментальной установки при исследованиях характеристик компонентов в электронной промышленности, а также при калибровках радиометров, фотометров оптического излучения.

О.А. Минаева – проведение теоретических и экспериментальных исследований, участие в разработке спектрометрической установки для измерений характеристик источников и приемников излучения с прослеживаемостью к эталонному источнику синхротронного излучения, оценка погрешностей результатов измерений.

С.И. Аневский – проведение экспериментальных спектрометрических исследований для решения фундаментальных метрологических задач воспроизведения и передачи единиц спектрометриии с использованием теоретических основ синхротронного излучения.

Р.В. Шамин – проведение теоретических обоснований использования эталонного источника синхротронного излучения для оценки характеристик источников и приемников излучения.

О.И. Останина – участие в разработке конструкции измерительной установки, проведении измерений и оценке метрологических и технических характеристик разработанной измерительной установки.

Authors' contributions

A.S. Sigov – choice of the prospect area of research based on the use of methods and means of metrological support of modern technologies, such as nanophotolithography in the electronic industry; analysis and assessment of the results obtained.

N.B. Golovanova – assessment of the chosen research method effectiveness, participation in the choice of the experimental setup optimal composition in the study of characteristics of the electronics industry components, as well as in the calibration of radiometers and photometers of optical radiation.

O.A. Minaeva – conducting theoretical and experimental studies, participating in the development of a spectroradiometric installation for measuring the characteristics of radiation sources and receivers with traceability to a reference source of synchrotron radiation, estimating measurement errors.

S.I. Anevsky – conducting experimental spectroradiometric studies to solve fundamental metrological problems of reproduction and transmission of spectroradiometry units using the theoretical foundations of synchrotron radiation.

R.V. Shamin – theoretical justification for the use of a synchrotron radiation reference source to assess the characteristics of radiation sources and receivers.

O.I. Ostanina – participation in the measuring installation design, conducting measurements, and evaluation of metrological and technical characteristics of the developed measuring installation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Richter M., Ulm G. Metrology with Synchrotron Radiation. In: Jaeschke E., Khan S., Schneider J.R., Hastings J.B. (Eds.). *Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers*. Springer; 2020. P. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04507-8_63-1
2. Li H., Li B., Wang S., Li Z., Qi J., Yu M., Huang Y., Li Y., Barboutis A., Lubeck J., Klein R., Kroth S., Paustian W., Ressin M., Thornagel R. Research on the irradiance calibration of a VUV dual-grating spectrometer based on synchrotron radiation. *Opt. Commun.* 2020;475:126254. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126254>
3. Hurdax P., Hollerer M., Egger L., Koller G., Yang X., Haags A., Soubatch S., Tautz F.S., Richter M., Gottwald A., Puschnig P., Sterrer M., Ramsey M.G. Controlling the electronic and physical coupling on dielectric thin films. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2020;11:1492–1503. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.132>
4. Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N., Pariev D.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., et al. High-reflection Mo/Be/Si multilayers for EUV lithography. *Optic. Lett.* 2017;42(24):5070–5073. <https://doi.org/10.1364/ol.42.005070>
5. Steiger A., Kehrt M., Deninger A. A reference material for accurate THz measurements. In: *2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. 2018:8510011. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2018.8510011>
6. Sperling A., Meyer M., Pendsa S., Jordan W., Revtova E., Poikonen T., Renaux D., Blattner P. Multiple Transfer Standard for calibration and characterization of the setups for LED lamps and luminaires in industry. *Metrologia*. 2018;55(2):S37–S42. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaa173>
7. Сигов А.С., Минаева О.А., Аневский С.И., Лебедев А.М., Минаев Р.В. Метрологические исследования характеристик многослойных поверхностных покрытий с использованием синхротронного излучения. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):38–47. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47> [Sigov A.S., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Lebedev A.M., Minaev R.V. Metrological studies of the characteristics of multilayer surface coatings using synchrotron radiation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):38–47 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47>]
8. Schneider P., Salfner K., Sperling A., Nevas S., Kröger I., Reiners T. Improved calibration strategy for luminous intensity. *J. Phys.: Conf. Series*. 2018;972(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/972/1/012016>
9. Klein R., Kroth S., Paustian W., Richter M., Thornagel R. PTB's radiometric scales for UV and VUV source calibration based on synchrotron radiation. *Metrologia*. 2018;55(3):386. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aab803>
10. Reichel T., Gottwald A., Kroth U., Laubis C., Scholze F. Developments in calibration of EUV and VUV detectors for solar orbiter instrumentation using synchrotron radiation. In: *Proc. SPIE 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, 990547990547-6. <https://doi.org/10.1117/12.2231405>
11. Sildoja M., Nevas S., Pape S., Pendsa S., Sperfeld P., Kemus F. LED-based UV monitoring source. In: *13th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2017)*, Proceedings. 2017: 92–93.
12. Schwihys J. On the classical radiation of accelerated electrons. *Phys. Rev.* 1949;75(12):1912–1925. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.75.1912>
13. Sildoja M., Nevas S., Kouremeti N., Gröbner J., Pape S., Pendsa S., Sperfeld P., Kemus F. LED-based UV source for monitoring spectroradiometer properties. *Metrologia*. 2018;55(3):97–103. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aab639>
14. Schmähling F., Wuebbeler G., Krueger U., Ruggaber B., Schmidt F., Taubert R.D., Sperling A., Elster C. Uncertainty evaluation and propagation for spectral measurements. *Color Research & Application*. 2018;43(1):6–16. <https://doi.org/10.1002/col.22185>
15. McEvoy H.C., Martin M.-J., Steiner A., Schreiber E., Girard F., Battuello M., Sadli M., Ridoux P., Gutschwager B., Hollandt J., Diril A., Pehlivan Ö. Report on the measurement results for the EURAMET 658 extension: project to examine underlying parameters in radiance scale realization. *Metrologia*. 2018;55(1A):03001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/55/1A/03001>
16. Zuber R., Sperfeld P., Nevas S., Sildoja M. A stray light corrected array spectroradiometer for complex high dynamic range measurements in the UV spectral range. In: *13th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2017)*, Proceedings. 2017:65–66.
17. Kokka F., Poikonen T., Blattner P., Jost S., Ferrero S., Pulli T., Ngo M., Thorseth A., Gerloff T., Dekker P., Stuker F., Klej A., Ludwig K., Schneider M., Reiners T., Ikonen E. Development of LED illuminants for colorimetry and recommendation of white LED reference spectrum for photometry. *Metrologia*. 2018;55(4):526–534. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aae7>
18. Ferrero A., Velázquez J.L., Pons A., Campos J. Index for the evaluation of the general photometric performance of photometers. *Opt. Express*. 2018;26(14):18633–18643. <https://doi.org/10.1364/OE.26.018633>
19. Gutschwager B., Hollandt J. Nonuniformity correction of infrared cameras by reading radiance temperatures with a spatially nonhomogeneous radiation source. *Meas. Sci. Technol.* 2017;28(1):015401. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/28/1/015401>
20. Strothkämper C., Ferrero A., Koo A., Jaanson P., Ged G., Obein G., Källberg S., Audenaert J., Leloup F.B., Martínez-Verdú F.M., Perales E., Schirmacher A., Campos J. Multilateral spectral radiance factor scale comparison. *Appl. Opt.* 2017;56(7):1996–2006. <https://doi.org/10.1364/ao.56.001996>
21. Kokka A., Pulli T., Poikonen T., Askola J., Ikonen E. Fisheye camera method for spatial non-uniformity corrections in luminous flux measurements with integrating spheres. *Metrologia*. 2017;54(4):577–583. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7cb7>

22. Kokka A., Pulli T., Ferrero A., Dekker P., Thorseth A., Kliment P., Klej A., Gerloff T., Ludwig K., Poikonen T., Ikonen E. Validation of the fisheye camera method for spatial non-uniformity corrections in luminous flux measurements with integrating spheres. *Metrologia*. 2019;56(4):045002. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab17fe>

Об авторах

Сигов Александр Сергеевич, академик Российской академии наук, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Голованова Наталия Борисовна, д.э.н., профессор, заместитель первого проректора ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Минаева Ольга Александровна, д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Аневский Сергей Иосифович, д.т.н., профессор кафедры метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Шамин Роман Вячеславович, д.ф.-м.н., директор Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: shamin@mirea.ru. Scopus Author ID 6506250832, <https://orcid.org/0000-0002-3198-7501>

Останина Ольга Ивановна, к.х.н., доцент кафедры метрологии и стандартизации, Институт перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ostanina@mirea.ru. Scopus Author ID 9249650700, <https://orcid.org/0000-0002-5455-0046>

About the authors

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Nataliya B. Golovanova, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Deputy First Vice-Rector, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Olga A. Minaeva, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Sergei I. Anevsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Roman V. Shamin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: shamin@mirea.ru. Scopus Author ID 6506250832, <https://orcid.org/0000-0002-3198-7501>

Olga I. Ostanina, Cand. Sci. (Chem.), Assistant Professor, Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ostanina@mirea.ru. Scopus Author ID 9249650700, <https://orcid.org/0000-0002-5455-0046>