

УДК 681.524

## **ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ СПЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

*Ю.А. Усачев, О.Д. Абжуев*

Рассмотрены особенности построения существующих характерных автоматизированных систем спектрально-энергетических испытаний опτικο-электронных устройств. Установлена потребность отрасли фотоники в повышении уровня автоматизации и расширении функциональных возможностей указанных систем.

Ключевые слова: фотоника; автоматизированные системы испытаний; опτικο-электронные устройства; оптическое излучение малой интенсивности.

Одним из лидирующих и наиболее стремительно развивающихся направлений мирового научно-технического прогресса последнего десятилетия является фотоника. Она включает в себя задачи, относящиеся к генерации, передаче, преобразованию и измерению физических величин, связанных с оптическим излучением, а также вопросы, касающиеся разработки и создания электронно-оптических устройств [1–4]. Фотоника включена в приоритетные направления развития науки и техники ведущих стран мира, в том числе, Российской Федерации [5–9].

В настоящее время широко применяются опτικο-электронные устройства, функционирующие в различных спектральных и динамических диапазонах. При этом часть из них (диапазон длин волн 0,2...2,5 мкм, излучение средней и высокой интенсивности) эксплуатируется в течение длительного времени и характеризуется детально проработанными методами и средствами [10, 11]. Использование же других диапазонов и уровней интенсивности является перспективным, но связано с определенными трудностями [12, 13]. В связи с этим в настоящее время осуществляется активное обновление соответствующей эталонной и нормативной базы. Так, в РФ прекращено действие ГОСТ 8.195-2013 [14] в качестве национального стандарта в связи с внедрением нового государственного первичного эталона радиометрических величин ГЭТ 86-2017 [15] и соответствующей поверочной схемы [16].

Особый интерес представляет оптическое излучение малой и сверхмалой интенсивности, когда становится необходимым достоверное обнаружение одиночных фотонов. Эта технология востребована во многих отраслях науки и техники, включая нейробиологию (задачи, связанные с изучением активности отдельных нейронов), медицину (неинвазивная диагностика различных форм рака, выявление нарушений костной ткани), кван-

товую криптографию, астрономию, телекоммуникации, космическое приборостроение [17–23]. Следует отметить, что проблема счета одиночных фотонов находится на повестке дня у Консультативного комитета по фотометрии и радиометрии Международного комитета мер и весов и внесена в стратегическую программу развития [24] на 2017–2027 гг.

Технологии счета одиночных фотонов оказываются востребованы в задачах, связанных с выполнением затратных по времени и материальным ресурсам операций, оказывающих непосредственное влияние на жизни и здоровье людей. В связи с этим возникает необходимость в обеспечении высокого качества и достоверности характеристик изделий и исследований, связанных с фотоникой, что невозможно без создания соответствующего испытательного оборудования.

Многофункциональность оптико-электронных приборов и систем, высокие требования к точности определения их характеристик, – все это к существенному возрастанию длительности и трудоемкости соответствующих испытательных процедур [25]. Наиболее очевидным и эффективным способом решения проблемы, при этом, является повышение уровня автоматизации и универсальности испытательного оборудования: оно должно обеспечивать возможность работы с оптико-электронными устройствами, обладающими различными геометрическими, спектральными и динамическим и параметрами при возможно минимальном вмешательстве оператора.

Рассмотрим характерные существующие автоматизированные системы испытаний оптико-электронных устройств и оценим текущее состояние отрасли.

#### **Установки для испытаний оптико-электронной аппаратуры «Камелия», «Камелия-М» и «Камея»**

Установки «Камелия», «Камелия-М» и «Камея» предназначены для проведения спектроскопических испытаний многоспектральных сканирующих устройств, используемых в составе систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Несмотря на то, что их эксплуатация осуществляется на разных предприятиях и в разных странах (первая принадлежит АО «Российские космические системы», остальные – Белорусскому государственному университету), разработка установок производилась с учетом рекомендаций одних и тех же нормативных документов (ГОСТ 8.195-89, в настоящее время на территории РФ не действует и заменен [16]) и метрологических организаций (ВНИИОФИ) [26–28]. В связи с этим указанные оптико-электронные комплексы имеют схожие принципы функционирования и структуру. Установка «Камея» создана (2013–2014 гг.) с целью заменить комплекс «Камелия-М» (1989 г, последующий ряд модернизаций), однако последний с успехом используется и сегодня [26, 29].

Каждая из установок включает комплект излучателей (диффузных и монохроматических) и спектральный компаратор на основе монохромато-

ра. Спектральный рабочий диапазон охватывает ближнюю ультрафиолетовую, видимую и ближнюю инфракрасную области. В установках «Камелия» и «Камелия-М» в качестве главного эталона выступает светоизмерительная вольфрамовая ленточная лампа накаливания типа ТРУ 1100-2350 [26, 30]. В комплексе «Камея» для повышения эффективности и точности выполняемых операций используется два эталона [31]: аналогичная ленточная лампа (калибровка монохроматического излучателя) и эталонная интегрирующая сфера (калибровка диффузных излучателей). Освещение диффузных излучателей во всех трех системах осуществляется с использованием различного числа кварцевых галогенных ламп.

Системы регистрации каждой из установок представлены двумя приемниками излучения, перекрывающими требуемый спектральный диапазон:

– матричный ПЗС-приемник (0,35...1,0 мкм) и фотодиодная линейка (1,0...2,5 мкм) в «Камелия-М» и «Камея» [26, 32];

– приемник на основе фотодиода (0,4...1,0 мкм) и фоторезистора (1,1...2,5 мкм) в «Камелия» [30].

Кроме того, в установке «Камея» предусмотрено термоэлектрическое охлаждение обоих приемников, а в установке «Камелия» – только фоторезистора. Несмотря на это, возможность регистрации малых и сверхмалых излучений (режим счета одиночных фотонов) во всех трех установках отсутствует.

Таким образом, рассмотренные установки предназначены, в первую очередь, для проведения спектроскопических испытаний широкополосных приемников и протяженных источников излучения высокой и средней интенсивности. Кроме того, несмотря на наличие компьютеризации и сопутствующего программного обеспечения (которое позволяет производить настройку монохроматора и регистрацию результатов испытаний в базу данных), большинство операций в процессе испытаний выполняются вручную (например, установка и контроль тока и источника излучения, настройка оптического тракта для реализации выбранного режима испытаний).

### **Лаборатория спектроскопических испытаний светодиодных источников излучения**

В настоящее время все более широкое применение в науке, технике и повседневной жизни находят твердотельные (светодиодные) источники оптического излучения. Они доказывают свое удобство и эффективность в задачах, связанных с искусственным освещением жилых и рабочих помещений, улиц, с отображением информации, проведением биохимических экспериментов и т. д. Кроме того, в связи с падением рентабельности производства светоизмерительных эталонных ламп становится актуальной проблема использования светодиодов в качестве эталонных излучателей [33]. Так, в уже упомянутой ранее стратегической программе Консуль-

тативного комитета по фотометрии и радиометрии [24] имеется пункт о разработке первичного государственного эталона на основе светодиодных эталонных излучателей. В связи с этим возникает необходимость в создании систем, предназначенных для проведения комплексных испытаний характеристик соответствующих источников излучения.

Примером такой системы является лаборатория «Архилайт» (ранее «Л.И.С.Т.») [34–36]. В ее состав включен ряд установок, позволяющих проводить всесторонние исследования светодиодов различных типов. Так, определение силы света и диаграммы углового распределения оптического излучения выполняется на установках «Флакс-7» (внешний вид которой представлен на рис. 1 [34]) и «Флакс-20» (число в названии определяет длину фотометрической трассы в метрах), в состав которых входят прецизионные источники питания, гониометры, а также комплект фотометрических и радиометрических приемников излучения на основе фотодиодов [34]. Для определения спектральных характеристик испытуемых источников предназначена установка «Спекорд», построенная на базе спектрофотометра Analytik Jena AG Specord-S600 (эталонный источник излучения – галогенная лампа LSC1050).



Рис. 1. Внешний вид фотометрической установки «Флакс-7»

Выполнение экспериментов на отдельных установках осуществляется с использованием специализированного программного обеспечения. Автоматизация здесь, в первую очередь, связана с системой сбора данных. Так, в [34] разработчики отмечают функциональность, связанную с позиционированием гониометра и регистрацией (в файл или базу данных на управляющем компьютере) соответствующих установленному углу выходных сигналов радиометра или фотометра. Тем не менее, позиционирование испытуемого или эталонного оптико-электронного устройства в

пределах оптической трассы (которая составляет 7 или 20 метров в зависимости от используемой установки), а также управление параметрами электрического питания источников и приемников излучения выполняется вручную [34, рис. 5]. Кроме того, лаборатория специализирована на проведение испытаний светодиодов, а не традиционных источников излучения (ламп). Несмотря на то, что возможность последнего не исключается, в действительности это потребует серьезной модернизации существующих или создания дополнительных установок (наподобие рассмотренных в предыдущем разделе). В качестве отличительной черты лаборатории следует отметить поддержку испытаний различных характеристик светодиодов, а не только спектроэнергетических.

### Установка SIRCUS для проведения спектроэнергетических испытаний оптико-электронных устройств

Установка SIRCUS (Spectral Irradiance and Radiance Responsivity Calibrations with Uniform Sources, SIRCUS) является частью лаборатории Национального института стандартов и технологий, США, предназначена для спектроэнергетических испытаний приемников излучения различного назначения и построена с использованием детекторного подхода к воспроизведению и передаче размера единиц физических величин. В качестве эталонного приемника излучения используется радиометр, откалиброванный непосредственно по первичному государственному эталону спектральной плотности энергетической освещенности. Структурная схема SIRCUS представлена на рис. 2 [37–41].

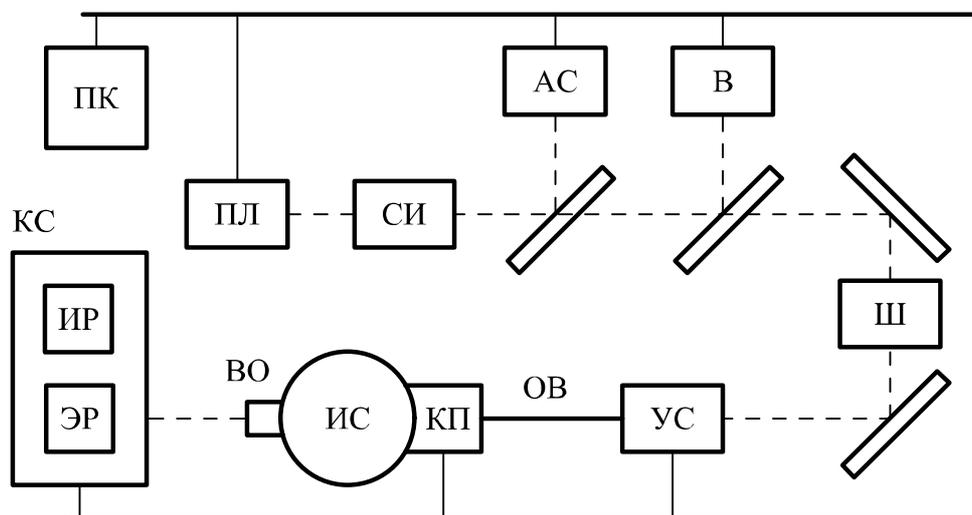


Рис. 2. Структурная схема установки SIRCUS: ПК – персональный компьютер; ПЛ – перестраиваемый лазер; СИ – стабилизатор интенсивности; АС – анализатор спектра; В – волномер; Ш – шторка; УС – система устранения спеклов; ОВ – оптоволокно; КП – контрольный приемник излучения; ИС – интегрирующая сфера; ВО – выходное отверстие; ЭР – эталонный радиометр; ИР – исследуемый радиометр; КС – координатный стол

Источник излучения установки представляет собой равномерный, квази-ламбертовский источник излучения высокой интенсивности и сформирован с использованием высокоомощных перестраиваемых лазеров (для различных спектральных диапазонов используются разные лазеры) и интегрирующей сферы. Введение лазерного излучения в интегрирующую сферу осуществляется с помощью оптоволоконного кабеля.

Использование в качестве излучателя перестраиваемого лазера вместо классической лампы, с одной стороны, позволяет достичь большего отношения сигнал/шум на выходе системы, но, с другой стороны, ставит перед разработчиками значительное число новых проблем, связанных, в первую очередь, со стабильностью выходной мощности лазера, стабильностью длины волны, самоинтерференцией (образование спеклов) и другими эффектами, снижающими точность результатов испытаний [43]. В связи с этим в SIRCUS предусмотрен ряд технических решений, позволяющих в той или иной мере компенсировать указанные факторы, а именно [41]:

Стабилизация мощности оптического излучения (стабилизатор интенсивности, точность до 0,01 %).

Контроль длины волны излучения (волномер, точность измерения до 0,001 нм), полосы пропускания и стабильности моды лазера (интерферометр Фабри–Перо).

Обнаружение изменений интенсивности излучения в процессе испытаний (контрольный приемник излучения на основе фотодиода, смонтированный на поверхности интегрирующей сферы).

Помещение короткого участка оптоволоконного кабеля в ультразвуковую ванну с целью устранения спеклов.

Проведение спектроскопических испытаний приемников излучения осуществляется в автоматизированном режиме. Эталонный и испытуемый радиометры располагаются на координатном столе, снабженном системой приводов и датчиком линейных перемещений. В процессе испытаний производится установка требуемой длины волны, измерение фонового и рабочего сигналов контрольного приемника и радиометра (сначала эталонного, затем – испытуемого), статистическая обработка данных и контроль стабильности лазера [41]. К сожалению, более подробных сведений об уровне автоматизации испытательной установки не найдено.

Несмотря на достоинства, рассмотренная система обладает также и рядом недостатков:

Рабочий спектральный диапазон установки составляет 200...1600 нм. Существует аналогичная установка (SIRCUS-IR), функционирующая в диапазоне от 780 нм до 5 мкм [41, 42], однако проведение испытаний многих современных приемников излучения (функционирующих в диапазоне до 2,5 мкм) оказывается сопряжено с дополнительными трудовыми и временными затратами: указанные установки пространственно разделены,

что приводит к необходимости дублирования ряда операций (монтаж, демонтаж, юстировка, инициализация и ожидание выхода на рабочий режим испытуемых устройств).

Возможность проведения испытаний источников излучения не предусмотрена. Кроме того, отсутствие дополнительных оптических элементов на выходе интегрирующей сферы ограничивает возможность согласования геометрических параметров приемника и источника излучения, что приводит к еще большей специализации установки.

В связи с использованием высокомоощных лазеров в качестве источников излучения отсутствует возможность работы с излучениями малой и сверхмалой интенсивности.

### **Заключение**

Рассмотренные в работе автоматизированные системы и установки спектроденергетических испытаний оптико-электронных устройств являются действующими, востребованными и, фактически, уникальными (аналогов и конкурентов у них, по крайней мере в рамках конкретных стран, нет). Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что подавляющее большинство таких систем и установок, существующих в настоящее время, являются достаточно узкоспециализированными (спектрально-енергетическая аттестация только источников или только приемников оптического излучения, испытания многоспектральных сканирующих устройств ДЗЗ, испытания светодиодов и т. д.) и поддерживают весьма ограниченный рабочий динамический диапазон. Области исследований, связанные с оптическим излучением малой и сверхмалой интенсивности, оказываются за пределами их возможностей. Кроме того, уровень автоматизации этих систем также оказывается ограниченным, фрагментарным (необходимость устанавливать и контролировать электрический ток питания эталонных источников излучения вручную, позиционировать испытуемое устройство вручную в пределах оптической трассы и т. д.).

Указанное обстоятельство не является существенной проблемой в задачах, связанных с проведением различных научных исследований локального характера, в рамках потребностей конкретной лаборатории (в этом случае программы эксперимента часто меняются, а иногда и вовсе носят эвристический характер, поэтому полная автоматизация всех действий может быть невозможна). Однако при проведении спектроденергетических испытаний (связанных, в первую очередь, с метрологией) программа эксперимента строго задается нормативными документами, т. е. детально известна. Выполнение ручных операций в процессе таких испытаний, при этом, влечет за собой снижение общей эффективности работы (т. е. увеличение времени испытаний), усложнение процедуры журналирования выполняемых действий (любое действие, инициированное микропроцессорным устройством, может быть зарегистрировано в базе данных с указани-

ем временной метки, с точностью до миллисекунд, и сопровождаться вспомогательной диагностической информацией, которая впоследствии может быть использована для анализа и, например, выявления негативных влияющих факторов, прогнозирования отказов) и т. д.

Таким образом, в настоящий момент актуальной является задача создания автоматизированной системы спектроскопических испытаний оптико-электронных устройств с высокой степенью универсальности, позволяющей производить исследования приемников и источников излучения (традиционных и твердотельных), как в области средней и высокой интенсивности, так и в области предельно низкой интенсивности, используя, например, регистрацию сигналов на основе различных алгоритмов счета отдельных фотонов. Интересным представляется также добавление в систему компонентов, позволяющих проводить испытания характеристик оптико-электронных устройств, отличных от спектроскопических (например, динамических параметров систем ориентации и навигации космических аппаратов [44], электрических характеристик светодиодов [34], диффузной и направленно-полусферической отражательной способности [12, 45] и т. д.), что может рассматриваться в качестве темы для дальнейших исследований.

#### Библиографический список

1. План мероприятий («дорожная карта») «Развитие оптоэлектронных технологий (фотоники)». Распоряжение Правительства РФ от 24 июля 2013 г. № 1305-р. – URL: <http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/fotonika-1305r.pdf>.
2. Межведомственная программа исследований и разработок в области фотоники на 2017–2020 годы. – URL: [https://npl.nsu.ru/website/photonics/upload/custom/files/Photonics\\_Program.pdf](https://npl.nsu.ru/website/photonics/upload/custom/files/Photonics_Program.pdf).
3. Photonics dictionary. – URL: <https://www.photonics.com/EDU/Dictionary.aspx>.
4. Котюк, А.Ф. «Активные» и «пассивные» оптические величины и их измерения / А.Ф. Котюк // Фотоника. – 2009. – № 3. – С. 34–36.
5. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899. «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологии и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». – URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/33514>.
6. Arthurs, E.G. The US National Photonics Initiative / E.G. Arthurs // Light Innovating the Future. – SPIE, 2015. – 33 p.
7. A Report by Canadian Photonics Industry Consortium – 2016. – URL: [https://photonscanada.ca/media/67747/cpic-report-en-15\\_feb\\_2016.pdf](https://photonscanada.ca/media/67747/cpic-report-en-15_feb_2016.pdf).
8. Photonics Center Osaka University. – URL: <https://www.pacjp.org>.
9. Антоненко, К.В. Роль фотоники в мировой экономике / К.В. Антоненко // Актуальные вопросы экономических наук. – 2010. – № 14. – С. 53–59.
10. Tynnison, T.A. «Spectr» Calibration Setup for Metrological Certification of Aerospace Radiometric Equipment within the Wavelength Range of 0,3 – 2,5 micron /

T.A. Tynnison, R.E. Graf, L.O. Myartin // Remote Atmospheric Probing from the Board of Salut-7 Orbital Complex. – 1988. – P. 141–150.

11. Best practices in passive remote sensing VNIR hyperspectral system hardware calibrations / J. Yablonski, C. Durell, T. Slonecker et al. // Hyperspectral Imaging Sensors: Innovative Applications and Sensor Standards 2016. – International Society for Optics and Photonics. – 2016. – V. 9860. – P. 986004.1-30.

12. Methods for quantitative infrared directional-hemispherical and diffuse reflectance measurements using an FTIR and a commercial integrating sphere / T.A. Blake, T.J. Johnson, R.G. Tonkyn et al. // Applied optics. – 2018. – V. 57, № 3. – P. 432-446.

13. Calibration of free-space and fiber-coupled single-photon detectors / T. Gerrits, A. Migdall, J.C. Bienfang et al. // Metrologia. – 2019. – V. 57, № 1. – P. 015002.1-19.

14. ГОСТ 8.195-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещенности, силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм. – М.: Стандартинформ, 2015. – 10 с.

15. Государственный первичный эталон единиц радиометрических и спектрометрических величин в диапазоне длин волн от 0, 2 до 25, 0 мкм ГЭТ 86–2017 / В.Р. Гаврилов, И.А. Григорьева, Е.А. Ишанин и др. // Измерительная техника. – 2018. – № 10. – С. 3-8.

16. Приказ № 2815 от 29.12.2018 г. «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещенности, силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм, спектральной плотности потока излучения в диапазоне длин волн от 0,25 до 2,5 мкм, энергетической освещенности и энергетической яркости монохроматического излучения в диапазоне длин волн от 0,45 до 1,6 мкм, спектральной плотности потока излучения возбуждения флуоресценции в диапазоне длин волн от 0,25 до 0,8 мкм и спектральной плотности потока излучения эмиссии флуоресценции в диапазоне длин волн от 0,25 до 0,85 мкм». – URL: <https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/67525>.

17. Akam, T. Photometry: Open source Python based hardware and software for fiber photometry data acquisition / T. Akam, M.E. Walton // Scientific reports. – 2016. – V. 9, № 1. – P. 1–11.

18. Matousek, P. Development of deep subsurface Raman spectroscopy for medical diagnosis and disease monitoring / P. Matousek, N. Stone // Chemical Society Reviews. – 2016. – V. 45, № 7. – P. 1794–1802.

19. Cryogenic primary standard for optical fibre power measurement / M.G. White, Z.E. Ruiz, C.S. Yung et al. // Metrologia. – 2018. – V. 55. – P. 706-715.

20. Пономарев, А.К. Фотонные технологии в космическом приборостроении / А.К. Пономарев, А.А. Романов, А.Е. Тюлин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – М.: ОАО «Российская корпорация

ракетно-космического приборостроения и информационных систем», 2016. – Т. 3. – № 2. – С. 4–23.

21. Fluorescence excitation-emission features of aflatoxin and related secondary metabolites and their application for rapid detection of mycotoxins / Z. Hrushka, H. Yao, R. Kincaid et al. // *Food and bioprocess technology*. – 2014. – V. 7, № 4. – P. 1195-1201.

22. Перевощикова, И.В. Флуоресцентная корреляционная спектроскопия в биологии, химии и медицине / И.В. Перевощикова, Е.А. Котова, Ю.Н. Антоненко // *Биохимия*. – 2011. – Т. 76. – № 5. – С. 613-635.

23. Traceability in Fluorometry. Part I: Physical Standards / J. Hollandt, R.D. Taubert, J. Seidel et al. // *Journal of Fluorescence*. – 2005. – V. 15, № 3. – P. 301-313.

24. CCPR strategy document – BIPM. – URL: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CCPR-strategy-document.pdf>.

25. Стендовая спектрально-энергетическая калибровка систем оптического дистанционного зондирования / Ю.В. Беляев, И.М. Цикман, А.А. Казак, А.П. Попков // «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния»: сб. тр. II Международной научно-практической конференции. – 2013. – С. 9–13.

26. Стендовая спектрально-энергетическая калибровка систем оптического дистанционного зондирования / Ю.В. Беляев, И.М. Цикман, А.А. Казак, А.П. Попков // «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния»: сб. трудов II Международной научно-практической конференции. – 2013. – С. 9–13.

27. Наземные и полетные калибровки авиакосмической аппаратуры дистанционного зондирования Земли / Б. Беляев, Л. Катковский, В. Сосенко, Ю. Беляев // *Наука и инновации*. – 2016. – № 4 (158). – С. 21–26.

28. Метрологические и методические аспекты спектрально-энергетических калибровок оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ / Д.О. Трофимов, Ю.М. Гектин, С.М. Зорин, А.А. Зайцев // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. – 2018. – Т. 5, № 2. – С. 26-33.

29. Метрологический комплекс для аттестации видеоспектральной аппаратуры дистанционного зондирования КАМЕЛИЯ-М. – URL: [http://www.product.bsu.by/katalog/apparatno-programmnie-kompleksi-pribori-i-ustrojstva/kontrol\\_no-izmeritel\\_nie-pribori/metrologicheskoe-oborudovanie/metrologicheskij-kompleks-dlja-attestatcii-videospektral\\_noj-apparatnuri-distancionnogo-zondirovaniya-kamelija-m/](http://www.product.bsu.by/katalog/apparatno-programmnie-kompleksi-pribori-i-ustrojstva/kontrol_no-izmeritel_nie-pribori/metrologicheskoe-oborudovanie/metrologicheskij-kompleks-dlja-attestatcii-videospektral_noj-apparatnuri-distancionnogo-zondirovaniya-kamelija-m/).

30. Приложение к свидетельству № 55245 об утверждении типа средств измерений. Описание типа средств измерений. Комплекс измерительный «Камелия». – М.: ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИОФИ», 2014. – 7 с.

31. Цикман, И.М. Методика радиометрической калибровки метрологического комплекса «Камея» / И.М. Цикман, Ю.В. Беляев, А.П. Попков // Седьмая Международная научно-техническая конференция «Приборостроение–2014». – 2014. – С. 227–228.

32. Метрологический комплекс «Камелия-М». – URL: <http://remsens.by/development/stands/kamelia>.

33. Горшкова, Т.Б. Метрологическая база световых измерений в России / Т.Б. Горшкова, В.И. Саприцкий, Р.И. Столяревская // Светотехника. – 2011. – № 4. – С. 48–56.

34. Никифоров, С.Г. Лаборатория исследований световых технологий «Л.И.С.Т.» / С.Г. Никифоров // Полупроводниковая техника. – 2011. – № 2. – С. 30–38.

35. Прытков, С.В. Современное состояние исследования изменения спектра излучения светодиодных светильников в процессе их эксплуатации / С.В. Прытков // Материалы XXII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. – 2019. – С. 211–214.

36. Никифоров, С.Г. Фотометрические и радиометрические методы измерений параметров излучения светодиодов / С.Г. Никифоров // Перспективы науки. – 2014. – № 12 (63). – С. 110–117.

37. Brown, S.W. NIST facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations with uniform sources / S.W. Brown, G.P. Eppeldauer, K.R. Lykke // Metrologia. – 2000. – V. 37, № 5. – С. 579–582.

38. Brown, S.W. Advances in radiometry for ocean color / S.W. Brown, B.C. Johnson // Earth Observing Systems VIII. – International Society for Optics and Photonics. – 2003. – V. 5151. – С. 441–453.

39. Spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources (SIRCUS) facility at NIST / S.W. Brown, G.P. Eppeldauer, J.P. Rice et al. // Earth Observing Systems IX. – International Society for Optics and Photonics. – 2004. – V. 5542. – С. 363–374.

40. Brown, S.W. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources / S.W. Brown, G.P. Eppeldauer, K.R. Lykke // Applied Optics. – 2006. – V. 45, № 32. – P. 8218–8237.

41. Comparison of absolute spectral irradiance responsivity measurement techniques using wavelength-tunable lasers / V. Ahtee, S.W. Brown, T.C. Larason et al. // Applied Optics. – 2007. – V. 46, № 20. – P. 4228–4236.

42. Spectral irradiance responsivity calibration of InSb radiometers using the improved IR-SIRCUS at NIST / J. Zeng, H.W. Yoon, G.P. Eppeldauer et al. // Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XVII. – International Society for Optics and Photonics. – 2009. – V. 7453. – 74530N1-12.

43. Brighter Future for LEDs: NIST Introduces New Lamp Calibration Lab. – URL: <https://www.nist.gov/news-events/news/2019/09/brighter-future-leds-nist-introduces-new-lamp-calibration-lab>.

44. Кондратьева, Т.В. Моделирование параметров движения космических аппаратов и внешних условий космического пространства в процессе наземных испытаний звездных координаторов / Т.В. Кондратьева. – М.: ИКИ РАН, 2005. – 21 с.

45. Bidirectional reflectance scale comparison between NIST and PTB / C.C. Cooksey, M.E. Nadal, D.W. Allen et al. // Applied Optics. – 2015. – V. 54, № 13. – P. 4006–4015.

[К содержанию](#)