поверку которых планируется выполнять на разрабатываемом стенде, работают в мультиспектральном и панхроматических режимах, то для частных случаев может требоваться задание элементов тест-объекта разных участков спектра (видимый, инфракрасный диапазоны).

Для системы регистрации было решено использовать любительский фотоаппарат «CANON EOS 60D» с рабочим сенсором APS-C CMOS, характеристики которого представлены в таблице 1 [2], и фотообъективы «CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM» [3] и «CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II» [4] в качестве тестируемых систем.

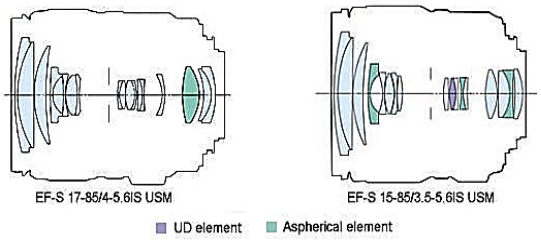

Рисунок 3 – Оптические системы фотообъективов: CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM и CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II

Выбор данной системы обусловлен следующими положениями:

1. Невозможность использования промышленных образцов высокоточных ОЭП.
2. Необходимость минимизирования погрешностей ориентации тестируемой оптической системы и приемного сенсора с возможностью замены тестируемых ОС при сохранении допусков отклонений.
3. Возможность получения изображений без автоматического редактирования и цветокоррекции (формат RAW).
4. Светосильная и точная оптика (относительно любительского сегмента рынка).

Использование двух объективов обусловлено возможностью относительной оценки чувствительности разрабатываемого метода – объективы со схожими параметрами одного производителя, при этом один из них (CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM) позиционируется как усовершенствованный – производитель заявляет о снижении влияния дисторсии за счёт использования асферических элементов в оптической схеме(рис.3).

В ходе юстировки экспериментального и рабочего стендов также необходимо предусмотреть метод компенсации непараллельности тестируемого ОЭП и тест-объекта. Из источника [5] видны высокая эффективность использования автоколлимационного метода оценки и компенсации децентрировки, а также соблюдения изопланатизма. В условиях экспериментального стенда (относительно низкой точности) возможно использование автоколлимационного метода контроля с поверочным зеркалом, прикладываемым к объективу регистрирующей системы. В дальнейшем метод требует доработки принципов взаимного позиционирования элементов, одним из возможных решений может являться использование координатных MEMS датчиков, позволяющих выставлять параллельность плоскостей приёмной матрицы и тест-объекта с высокой точностью, центрирование системы – производить с помощью функции в ПО, суть которой заключается в сопоставлении центральных пикселей приемной матрицы с центральным элементом тест-объекта.

Таким образом, был проведен подбор компонентов экспериментального стенда, предложены методы контроля соответствия отклонений взаимной ориентации узлов, высказана направленность дальнейшей работы.

1. Кожевников Д.А. Методы геометрической калибровки оптико-электронных приборов / Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В., Старосотников Н.О. // 9-я МНТК «Приборостроение-2016». Минск: БНТУ, 2016. – С.332-334.
2. Цифровые зеркальные камеры EOS и компактные системные камеры. Canon EOS 60D. – 2017. https://www.canon.ru/for_home/ product_finder/cameras/digital_slr/eos_60d/
3. Объектив EF-S Lenses Canon EF-S 17-85mm f/4-5.6 IS USM. – 2017. https://www.canon.ru/ lenses/ef-s-17-85mm-f-4-5-6-is-usm-lens/
4. Объектив EF-S Lenses Canon EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS II. – 2017. https://www.canon.ru/lenses/ef-s-18-55mm-f-3-5-5-6-is-ii-lens/
5. Ежова, К.В. Разработка алгоритмов для компенсации децентрировок поверхностей в оптической системе на основе методов Гауссовой оптики / К.В. Ежова // Вестник II межвузовской конференции молодых ученых: сб. научн. Трудов. – СПб.: СПбГУИТМО. – 2005. – С.51-58.

УДК 535.24

РЕФЕРЕНСНЫЕ СВЕТОДИОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАДИОМЕТРИИ

Данильчик А.В., Длугунович В.А., Ждановский В.А., Крейдич А.В., Луценко Е.В., Никоненко С.В.

Институт физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Система обеспечения единства измерений оптической радиометрии в Беларуси и странах СНГ в настоящее время базируется в основном на введенных в 2015 г. стандартах ГОСТ 8.023-2014, ГОСТ 8.195-2013, ГОСТ 8.197-2013 и ГОСТ 8.205-2014. Эти стандарты распространяются на поверочные схемы для средств измерений соответственно световых величин непрерывного и

импульсного излучений, спектрорадиометрических величин в диапазонах длин волн от 0,2 до 25 мкм и от 0,001 до 1,6 мкм, координат цвета и цветности, показателей белизны и блеска. В качестве элементов вторичных и (или) рабочих эталонов в этих стандартах указаны светодиоды (СИД) (или полупроводниковые излучатели).

Эти нововведения в определенной мере отражают прогресс в развитии СИД технологий. Следует отметить, что за последние 15 лет СИД и изделия на их осве в значительной мере вытеснили традиционные источники излучения с рынка светотехнических изделий местного и общего освещения, подсветки, а также сигнальной техники (светофоры, световая сигнализация). СИД излучают в видимом и ближнем ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра, но в отличие от видимого диапазона революционное развитие СИД в УФ диапазоне спектра (от 200 до 400 нм) еще только набирает силу. Большие перспективы применения УФ СИД просматриваются в: криминалистике, идентификации химических веществ; проверке подлинности документов и денег; полиграфии и производстве изделий из фотополимеров; люминесцентном анализе и дефектоскопии; тепличном хозяйстве, животноводстве, и т.д. Но особенно эффективно применение излучения УФ СИД может быть в медицине и санитарии, косметологии и пищевой промышленности, где используется биологическое действие УФ излучения. Основными преимуществами СИД по сравнению с традиционными источниками излучения являются: эффективность, долгий срок службы, экологичность, высокая устойчивость к внешним воздействиям, электро- и взрывобезопасность. Кроме того, современные СИД имеют компактные размеры, позволяющие создавать светотехнические изделия очень сложной конфигурации, большой выбор цветов свечения, широкий динамический диапазон интенсивностей излучения и практически произвольную форму пространственного распределения излучения.

Очевидно, что при столь широком распространении СИД и изделий на их основе, эффективность, качество и безопасность работ с применением СИД, особенно в УФ диапазоне спектра, в значительной мере определяется качеством измерений их оптических характеристик и параметров. Однако в настоящее время метрологическое обеспечение в области оптической радиометрии столкнулось с рядом проблем, обусловленных особенностями излучения СИД. К сожалению, следует констатировать, что в настоящее время на международном уровне еще не разработаны не только убедительные методики измерений оптических характеристик СИД, но даже номенклатура измеряемых параметров и характеристик не нормирована. Разработанные Международной комиссией по освещению (CIE) в 2007 г рекомендации, безусловно, смягчили ситуацию с измерением характеристик СИД, но по-прежнему не лишены недостатков [1 – 3]. Поэтому в технических комитетах CIE продолжается работа по разработке рекомендаций для измерений оптических характеристик: семейств (типов) СИД (ТК 2-50); высокомощных СИД при заданных температурах p-n перехода (ТК 2-63); при проведении высокоскоростных испытаний при производстве СИД (ТК 2-64); криволинейных и гибких СИД (ТК 2-75); для оценки фликкерных эффектов (ТК 2-76) и др. Следует особо отметить создание в 2016 г. нового комитета CIE ТК 2-87, основной целью которого является подготовка рекомендаций по методам характеризации и калибровке широкополосных УФ радиометров в спектральном диапазоне от 320 до 420 нм для промышленных применений. Основным способом реализации этой цели является стандартизация требований к референсному твердотельному источнику излучения и стандартизация процедуры его применения при калибровке радиометров.

Первоначальные рекомендации для референсных светодиодных источников излучения (РСИИ) на основе СИД [1] были следующими [1] – референсные (эталонные) СИД должны иметь пространственное и спектральное распределения излучения, подобные испытуемому СИД, пространственное распределение силы света референсных (эталонных) СИД должно быть в пределах ± 10º от оси гладким и примерно равномерными, а если спектральные условия не соблюдаются, то необходимо проводить коррекцию результатов измерений на спектральное рассогласование СИД. К основным недостаткам такой конструкции референсных светодиодных источников излучения (РСИИ) можно отнести применение хотя и распространенного, но старого типа СИД, который характеризовался низким уровнем мощности (порядка 20 мВт). Кроме того, температура СИД и ток инжекции только контролировались, а не задавались, и именно поэтому такая конструкция изначально предполагала наличие флуктуаций интенсивности оптического излучения, обусловленных нестабильностью тока и инжекции и температуры СИД. Отметим, что в ГОСТ 8.023–2014, ГОСТ 8.195–2013, ГОСТ 8.197–2013 и ГОСТ 8.205–2014 рекомендации для РСИИ фактически отсутствуют.

Несмотря на указанные недостатки, на рынке появились эталонные (референсные) СИД разных производителей, созданные на основе рекомендаций [1], в том числе и достаточно известных, например, Instrument Systems (Германия). Что обусловлено крайней востребованностью точного определения оптических характеристик СИД и изделий.

Одновременно возник вопрос о корректности оценки оптических характеристик СИД, применяя традиционные подходы их измерений. В ряде исследований было показано [2 - 6], что если выполняются измерения интегральных величин (силы света, светового потока, яркости и др.), то влиянием спектрального фактора [4] можно пренебречь. Вместе с тем, такие особенности СИД как стабильность и широкий диапазон мощности излучения, хорошая воспроизводимость основных оптических характеристик СИД излучателей весьма перспективны с точки зрения создания на их основе эталонных (референсных) источники излучения для применения в различных областях оптической радиометрии [5, 7].

Кратко остановимся на наиболее перспективных разработках РСИИ. Практически одновременно NIST (США) и Институтом физики НАН Беларуси были предложены другие конструкции референсных СИД [7–10]. В РСИИ [7] гомогенизация пространственного распределения излучения в плоскости излучающей гетероструктуры осуществляется при помощи волноводного элемента. С помощью линзы производится Фурье-преобразование изображения торца волноводного гомогенизатора в пространственно-угловое распределение излучения. Это обеспечивает относительно небольшой регулируемый (в случае изменения фокусного расстояния линзы) угол расходимости пучка излучения с достаточно высокой однородностью его интенсивности, что делает данный РСИИ не похожим на большинство современных мощных СИД, являющихся, как правило, косинусными источниками. К преимуществам, по сравнению с прототипом CIE, можно также отнести обеспечение постоянной температуры корпуса СИД с помощью Пельтье-элемента.

В разработанных Институтом физики НАН Беларуси РСИИ однородная пространственная засветка производится при помощи цилиндрического и полусферического рассеивателей. Пространственно-угловое распределение излучения в этих источниках, близкое к распределению косинусного источника, что делает предложенные РТТИИ подобными большинству выпускаемых мощных СИД [8–10]. Кроме того, следует отметить, что для полусферического РСИИ спектры излучения не имеют спектрального сдвига при любых углах излучения, а неравномерность интенсивности светового пятна (45 мм) на расстоянии 0,5 м не превышает 1,5 %, что является значимым преимуществом такой конструкции.

Таким образом, разработка и внедрение в метрологическую практику РСИИ, обеспечивающих высокостабильное и относительно равномерное спектральное распределение мощности излучения во всем спектральном диапазоне при достаточно высокой мощности излучения, может существенно повысить точность и качество метрологических работ в области оптической радиометрии.

1. CIE 127:2007 Technical report CIE. Measurement of LEDs. 2nd edition Publication. – Vienna, CIE Central Bureau, 2007 – 32 p.
2. Influence of spatial characteristics of solid state light sources on results of measurements of their photometric and radiometric properties / S.V.Nikanenka [et al.] // CIE 216:2015 Proc. 28th Session of the CIE, Manchester, UK, 28 June – 4 July 2015. – Manchester: CIE, 2015. – Vol. 1, P. 2. – P. 1389–1395.
3. Гомбош, К. Освещение светодиодами как проблема фотометрии и колориметрии / К. Гомбош, Я. Шанда // Светотехника. – 2009. – № 2. – С. 11 – 19.
4. Погрешности измерения освещенности создаваемой светодиодами / Д.В. Скумс [и др.] // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: тезисы докладов XIX науч.-техн. конф., Москва, 16-19 апреля 2013 г. – М.: Логос. 2013. – С. 38–40.
5. Advantages of white LED lamps and new detector technology in photometry / T. Pulli [et al] // Light: Science & Applications. – 2015. – №. 4. – P. 1–7.
6. Влияние спектральной чувствительности фотометров на измерение силы света белых светодиодов /С.В. Никоненко [и др.] // МЕТРОЛОГІЯ-2010: наукові праці VII Міжнар. науково-техніч. конф. Харьків, 12-14 жовтня 2010 р.: в 2 т. / ННЦ «Інститут метрології». – Харьків, 2010. – Т. 2. – С. 19–22.
7. Broadband Radiometric LED Measurements / G.P. Eppeldauer [et al] // Proc. of SPIE. – 2016. – Vol. 9954. – P. 99540J-01–99540J-15.
8. Эталонный монохромный светодиод: пат. № 115889, Российская Федерация, MПKG01J1/00 / А. В.Данильчик, Е.В.Луценко, С.В.Никоненко; заявитель Институт физики НАН Беларуси. – № RU 115889; заявл. 28.12.2011.
9. Influence of spatial characteristics of solid state light sources on results of measurements of their photometric and radiometric properties / S.V.Nikanenka [et al.] // CIE 216:2015 Proc. 28th Session of the CIE, Manchester, UK, 28 June – 4 July 2015. – Manchester: CIE, 2015. – Vol. 1, P. 2. – P. 1389–1395.
10. S.V. Nikanenka et al., Reference hemispherical UVA LED source /S.V.Nikanenka [et al.]/ Proc. NEWRAD 2017, Tokyo 13 - 16 June, 2017 , ed. LOC of NEWRAD 2017, P. 114-115.

УДК 681

БЕЗОПАСНЫЙ ДЛЯ ГЛАЗ КОМПАКТНЫЙ ЛАЗЕР БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Дейнека Р.В.[1], Горбаченя К.Н. [1], Ясюкевич А.С. [1], Кисель В.Э. [1], Мальцев В.В.[2], Леонюк Н.И. [2], Кулешов Н.В.[1]

[1]НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь
[2]Кафедра кристаллографии и кристаллохимии МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Твердотельный лазер на основе монокристаллов иттрий-алюминиевого и гадолиний-алюминиевого боратов (Er,Yb:YAl3(BO3)4 и Er,Yb:GdAl3(BO3)4) – синтетических структурных аналогов минерала хантита – является высокоэффективным малогабаритным источником излучения с различными длинами волн (1520, 1531, 1550, 1602 нм) в условно безопасном для органов зрения спектральном