

где  $K$  – коэффициент запаса, он выбирается из максимально допустимого смещения центра пучка относительно центра грани.

Далее, исходя из рассчитанных ранее величин  $L$  и  $m$ , можно найти радиус вписанной окружности  $R$  в полученный многоугольник:

$$R = \frac{L}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{m}\right)}. \quad (6)$$

Для крепления ПД на ось вращения следует выполнить в его центре технологическое отверстие, радиус которого равен [1]:

$$r = \frac{\left(\frac{N}{57,3} \cdot 32,16 \cdot S\right)^2}{W} - R^2, \quad (7)$$

где  $N$  – предельная частота вращения,  $S$  – предел текучести материала,  $W$  – плотность материала ПД.

Расчеты параметров ПД при угле развертки строки сканирования  $\sigma = \frac{\pi}{2}$ , угле подачи излучения  $\alpha = \frac{\pi}{3}$ , диаметре пучка  $D = 2$  мм и коэффициенте запаса  $K = 1,2$  приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при приближении количества граней к максимальному значению, увеличивается коэффициент полезного использования грани, но одновременно с этим происходит увеличение габаритных размеров ПД. Коэффициент  $C$  определяет также время пере-

хода с одной грани на другую, то есть время перехода с одной строки сканирования на другую. При больших коэффициентах время перехода значительно сокращается, что может вызывать проблемы с кадровой разверткой. Другим недостатком такой системы является уменьшение коэффициента полезного использования грани с ростом угла развертки  $\sigma$ . С другой стороны, в отличие от других систем сканирования, ПД способен обеспечить большие углы  $\sigma$  и высокую скорость сканирования пространства.

Таблица 1. Результаты расчета параметров ПД

Количество граней ПД	Коэффициент полезного использования грани	Длина грани, мм	Радиус вписанной окружности, мм
3	0,375	3,695	1,067
4	0,5	4,619	2,309
5	0,625	6,158	4,238
6	0,75	9,238	8
7	0,875	18	19

#### Литература

1. Gerald, F. M. Handbook of Optical and Laser Scanning, Second Edition / Gerald F. Marshall, Glenn E. Stutz. – Нью-Йорк : Marcel Dekker publishing, 2004. – P. 291.

УДК 535.24

### ЭТАЛОННЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ РАДИОМЕТРОВ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ СИЕ С

Данильчик А.В.<sup>1</sup>, Луценко Е.В.<sup>1</sup>, Никоненко С.В.<sup>1</sup>, Тарасова О.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»

<sup>2</sup>РУП «Белорусский государственный институт метрологии»

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Разработан компактный эталонный источник излучения УФ С на основе светодиода для калибровки УФ-радиометров. Источник обеспечивает плотность мощности излучения до 400 мкВт/см<sup>2</sup> на площади 3×3 мм с неоднородностью 1,5 %. Излучение источника с максимумом 265 нм сконцентрировано на 97 % в УФ С области спектра. Использование источника для лазерных диодов ComboSource 6310 позволило прецизионно стабилизировать инжекционный ток и температуру светодиода.

**Ключевые слова:** эталонный источник излучения УФ С, светодиоды УФ С, калибровка УФ-радиометров.

### REFERENCE LED RADIATION SOURCES FOR CALIBRATION OF CIE C UV RADIOMETERS

Danilchik A.<sup>1</sup>, Lutsenko E.<sup>1</sup>, Nikanenka S.<sup>1</sup>, Tarasova O.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>B.I. Stepanov Institute of Physics NAS of Belarus

<sup>2</sup>National Metrological Institute of the Republic of Belarus

Minsk, Belarus

**Abstract.** A compact reference UV C radiation source based on LED for calibration of radiometers has been developed. The source provides a power density of radiation up to 400 μW/cm<sup>2</sup> on area of 3×3 mm with inhomogeneity of 1.5 %. The radiation from source with a maximum of 365 nm is 97 % concentrated in the UV C region of the spectrum. The use of a source for laser diodes ComboSource 6310 made it possible to precisely stabilize the injection current and temperature of the LED.

**Key words:** reference UV C radiation source, UV C LEDs, calibration of UV-radiometers.

Адрес для переписки: Никоненко С.В., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220070, Республика Беларусь  
e-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by

Пандемия коронавируса (COVID-19) вызвала острую необходимость в разработке новых и улучшении существующих методов и средств борьбы с распространением вирусной инфекции. Одним из наиболее успешных методов обеззараживания воды, воздуха и различных поверхностей является использование бактерицидных свойств ультрафиолетового (УФ) излучения в области от 200 до 280 нм, которая определяется СИЕ как диапазон излучения УФ С [1]. Для этого в последние годы начали интенсивно использовать светодиодные (СД) источники. Эффективность, качество и безопасность работ, выполняемых с использованием УФ-излучения (УФИ), во многом определяются качеством выполненных измерений и калибровок приборов. Однако в УФ-метрологии существует ряд проблем [2, 3]: существенное снижение точности передачи размера единиц величин от национальных эталонов оптических величин средствам измерения; необходимо использовать измеритель мощности с постоянной спектральной чувствительностью в УФ-диапазонах СИЕ и нулевой за его пределами, что проблематично из-за отсутствия качественных УФ-фильтров; точность измерения существенно снижается из-за различия спектральных распределений интенсивности излучения испытуемого и эталонного источников излучения.

Особенно значимое влияние эти проблемы оказывают на результаты измерений и калибровки в диапазоне УФИ СИЕ С. Наиболее распространенными на предприятиях Республики Беларусь являются УФ-радиометры ТКА-ПКМ, ТКА-АВС (ООО НТП «ТКА», Санкт-Петербург) и УФ-радиометры «Аргус-04», «Аргус-05» «Аргус-06» (ФГУП «ВНИИОФИ»). Метрологический контроль этих радиометров выполняется в БелГИМ на установке для поверки УФ-радиометров УПР-02 и составляет от 150 до 200 шт. поверяемых приборов год. Количество приборов, не прошедших поверку составляет примерно 30-40 %, при максимально выявленном превышении относительной погрешности 40 % (производители используют калибровку на линии 254 нм ртутного источника низкого давления). Во многом это обусловлено тем, что применяемые в приборах приемники излучения имеют крайне низкую чувствительность ближе к границе спектрального диапазона УФИ СИЕ С 280 нм, что подтверждается практически нулевой чувствительностью некоторых радиометров к излучению предлагаемого эталонного светодиодного источника (ЭСДИ) с максимумом излучения 265 нм [4]. Поэтому измерение современных СД источников УФ С диапазона спектра должно проходить, согласно рекомендациям СИЕ, с помощью УФ-радиометров калиброванных с помощью референсных (эталонных) СД источников излучения.

Ранее нами было разработано несколько эталонных источников УФИ на основе светодиодов (СД) [3]. Однако их плотность мощности СД в дальнем поле в УФИ СИЕ В и С была недостаточной для исследования динамического диапазона УФ-радиометров. Быстрый прогресс в разработке УФ СД привел к значительному увеличению их мощности и эффективности. В настоящее время появились СД с различными коллимирующими линзами и достаточно высокой плотностью мощности УФ излучения.

В этой работе мы рассматриваем новый ЭСДИ СИЕ С и его характеристики. Конструкция РСДИ подробно описана в [4]. Источник разработан на основе УФ СД с 30 градусной коллимирующей линзой и оптической мощностью 40 мВт при длине волны  $\sim 265$  нм, что достаточно для исследования динамического диапазона УФ С радиометров и позволяет их калибровать. Излучение светодиода собирается дополнительной коллимирующей линзой и для увеличения однородности освещения в дальнем поле излучения рассеивается голографическим фильтром.

Из рисунка видно, что 97,0 % мощности излучения ЭСДИ приходится на диапазон УФ С, 2,7 % – УФ В и 0,3 % – УФ А. Это позволяет применять ЭСДИ для калибровки в диапазоне УФ С, без использования светофильтров.

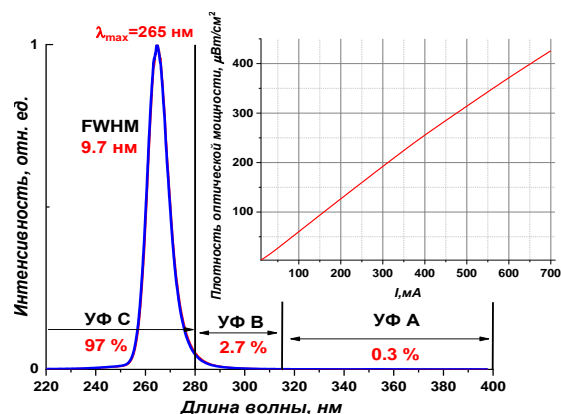


Рисунок 1 – Спектр излучения РСДИ. Вставка: плотность оптической мощности в зависимости от тока инжекции

Плотность оптической мощности УФ С – излучения ЭСДИ практически линейно зависит от тока инжекции (вставка рисунка). Максимальная плотность мощности составляет более 400 мкВт/см<sup>2</sup> в рабочей зоне радиометров (расстояние 600 мм от источника) при токе инжекции 700 мА. Максимальная квантовая эффективность источника УФ С наблюдается в диапазоне 200–500 мА. Мы рекомендуем использовать ЭСДИ УФ С именно в этом диапазоне инжекционных токов. В этом режиме работы обеспечивается наиболее эффективная излучательная комбинация электронов и дырок в активной об-

ласти СД, что сводит к минимуму тепловыделение из-за безызлучательной рекомбинации и, как следствие, увеличивает стабильность и срок службы СД источника.

Представленная конструкция ЭСДИ с голографическим фильтром (FWHM 0,5°) и дополнительной линзой обеспечивает равномерное ( $\pm 1,5\%$ ) освещение рабочей области 30×30 мм на расстоянии 550 мм и более от источника, что обеспечивает удобство при калибровке. Рабочие расстояния 600–700 мм оптимальны для рутинных калибровок на калибровочной установке УФ-радиометров.

Показано, что тепловое равновесие ЭСДИ при рабочем токе 500 мА достигается через 600 секунд после включения (небольшое падение интенсивности на 1,5%). После этого интенсивность излучения медленно падает со скоростью 0,17% в час. Этот хороший результат получен благодаря как стабильности тока и температуры, обеспечиваемым источником питания Agrovo Instruments ComboSource 6310 (источник тока – стабильность < 10 ppm, 1 час, регулятор температуры – стабильность 0,002 °С, 1 час), так и в следствие очень медленной деградации УФ СД, что возможно только при малых температурах перегрева СД кристалла. Дополнительные измерения температуры СД кристалла с помощью

тепловизора показали, что, перегрев составил всего лишь 25 °С при токе 500 мА. Такие низкие температуры перегрева обеспечиваются особенностями конструкции СД.

Таким образом создан компактный эталонный светодиодный источник излучения УФ С для калибровки и поверки УФ-радиометров, что обеспечивает высокую точность измерения начинающих широко внедряться новых типов СД излучателей УФ С.

#### Литература

1. CIE Position Statement on the Use of Ultraviolet (UV) Radiation to Manage the Risk of COVID-19 Transmission, May 2020.
2. Broadband Radiometric LED Measurements / G. P. Eppeldauer [et al.] // Proc. of SPIE, 2016. – Vol. 9954. – P. 99540J-01–99540J-15.
3. Nikanenko, S. V. Compact reference UVC LED source / S. V. Nikanenko, A. V. Danilchuk, E. V. Lutsenko // Ukrainian Metrological Journal. – 2020. – № 3A. – P. 140–144.
4. Nikanenko, S. V. Reference UVC LED Source / S. V. Nikanenko, A. V. Danilchuk, E. V. Lutsenko // New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2021): Proc. 14<sup>th</sup> Internat. Conf., NIST, Boulder, USA, 21–24 June 2021. – Boulder: Local Organizing Committee, 2021. – P. 134–135.

УДК 621.3.038.825.2

#### СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА Tb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>

Демеш М.П.<sup>1</sup>, Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Волкова Е.А.<sup>2</sup>, Мальцев В.В.<sup>2</sup>, Копорулина Е.В.<sup>2</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Детально исследованы лазерно-спектроскопические свойства кристалла Tb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>. Зарегистрированы спектры поглощения и люминесценции в поляризованном свете. Определено время жизни возбужденного состояния <sup>5</sup>D<sub>4</sub>. Рассчитаны коэффициенты ветвления люминесценции и спектры сечения стимулированного испускания.

**Ключевые слова:** тербий, ортоборат, поглощение, люминесценция.

#### SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF Tb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> CRYSTAL

Demesh M.<sup>1</sup>, Gorbachenya K.<sup>1</sup>, Kisel V.<sup>1</sup>, Volkova E.<sup>2</sup>, Maltsev V.<sup>2</sup>, Koporulina E.<sup>2</sup>, Kuleshov N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies of BNTU  
Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University  
Moscow, Russia

**Abstract.** Spectroscopic properties of Tb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal were investigated in detail. The polarized absorption and luminescence spectra were recorded, as well as a lifetime of the <sup>5</sup>D<sub>4</sub> excited state is determined. Stimulated emission cross sections and luminescence branching ratios were found.

**Key words:** terbium, orthoborate, absorption, luminescence.

Адрес для переписки: Демеш М.П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: maxim.demesh@bntu.by