

## УДК 535.241.61

Зубков Д.П., Zubkov D.P., асистент кафедри Світлотехніка і джерела світла  
Назаренко Л.А., Nazarenko L.A., д.т.н., професор, завідувач кафедри “Світлотехніка і джерела світла”  
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова

ГОНИОФОТОМЕТРИЧНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТУЖНИХ СВІТЛОДІОДІВ

ГОНИОФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ

GONIOPHOTOMETER FACILITY FOR PHOTOMETRIC MEASUREMENTS OF HIGH-POWER LEDs

*Розроблено гніофотометричну установку для вимірювання світлових та спектральних характеристик випромінення потужних світлодіодів (СВД) за заданої температури р-п переходу. Розглянуто особливості розробленої конструкції обертального блока та фотометра. Обґрунтовано необхідність використання фотометричної кулі малого діаметра як дифузора та вхідної оптики спектрометра.*

*Разработана гониофотометрическая установка для измерения световых и спектральных характеристик излучения мощных светодиодов (СИД) при заданной температуре р-п перехода. Рассмотрено особенности разработанной конструкции поворотного блока и фотометра. Обосновано необходимость использования фотометрического шара малого диаметра в качестве диффузора и входной оптики спектрометра.*

*The goniophotometer facility is constructed for characterizing photometric and spectral properties of high-power light emitting diodes (LEDs) in accordance to recommendations of the International Commission on Illumination. Considered in detail the design features of each part and expediency of the selected options; described design features of the rotational block and photometer; the process of measuring LED characteristics at the desired junction temperature; showed the necessity of using small photometric sphere as diffuser and as input optics for spectrometer. The basic characteristics and sources of error when using a photometer are presented.*

Ключові слова: вимірювання потоку світлодіодів, потужний світлодіод, гоніофотометр.

Ключевые слова: измерение потока светодиодов, мощный светодиод, гониофотометр.

Keywords: measurements of luminous flux of LEDs, high-power LED, goniophotometer.

Останніми роками світловипромінювальні діоди (СВД) надзвичайно швидкими темпами ввійшли до нашого повсякденного життя. Вже ні для кого не є новиною бачити лампи зі СВД для прямої заміни традиційних джерел світла (так звані «ретрофіти») чи повноцінні освітлювальні прилади (ОП) з СВД на прилавках будівельних супермаркетів та магазинів, що спеціалізуються на освітленні.

У загальному бюджеті світових енергетичних витрат значна складова належить до освітлення, тому особливу увагу серед переваг СВД привертає висока енергоефективність. Завдяки цьому створюються сприятливі умови для інтенсивного розроблення та впровадження СВД освітлення в усіх галузях життєдіяльності людини, яке забезпечить не лише високу якість освітлення, але й заощадження енергії, зменшення викидів CO<sub>2</sub>.

На українському ринку світлотехніки з'явилася велика кількість фірм-виробників ОП зі СВД. Очевидно, що такі фірми використовують СВД як компоненти, щодо яких необхідно

виконувати вхідний контроль на відповідність заявленим характеристикам виробника, оскільки це є запорукою якості кінцевого продукту на одному рівні з вихідним контролем.

СВД дуже відрізняються від традиційних джерел світла своїми розмірами, температурним режимом, спектром та просторовим розподілом випромінювання. Ці відмінності дуже впливають на результати вимірювання, що за використання традиційних підходів веде до значних відмінностей у результатах вимірювань світлових величин. Тому, для створення загальної методики визначення фотометричних і радіометричних характеристик СВД, Міжнародною комісією з освітлення (МКО) розроблено рекомендації щодо їх вимірювання МКО 127-2007 [1].

Згідно з ними вводиться нове поняття усередненої сили світла СВД та дві геометричні умови вимірювання – А та В. Обидві умови передбачають використання приймача з круглою апертурою, яка має площу  $100 \text{ мм}^2$ . Під час вимірювань СВД має встановлюватися перед приймачем і вирівнюватися у такий спосіб, щоб механічна вісь СВД проходила через центр апертури приймача. Умови А і В відрізняються дистанціями між верхівкою СВД до площини вхідної апертури фотометра, які становлять для МКО стандартної умови А 316 мм; для МКО стандартної умови В 100 мм.

Стосовно методу вимірювання усередненої сили світла рекомендовано два можливих варіанти – метод заміщення еталонним СВД та метод еталонного фотоприймача.

Для вимірювання характеристик СВД методом заміщення пропонується застосовувати еталонні, калібровані у національному метрологічному інституті (НМІ) СВД того ж типу, що й вимірювані. Позитивним аспектом цього методу є відсутність необхідності застосування спектральної корекції. Однак, зважаючи на величезну кількість різноманітних типів СВД, виникають ускладнення у придбанні та обслуговуванні такої кількості еталонів.

Більш практичним є застосування другого методу – еталонного приймача. При цьому одиниця вимірюваної величини зберігається на фотометрі, який є більш стабільним у часі, має тривалий термін експлуатації та потребує менших витрат на обслуговування. Однак, в цьому випадку коригування за допомогою спектрального коефіцієнта необхідне за кожного вимірювання.

На жаль, в Україні наразі відсутня верхня еталонна ланка у сфері вимірювань СВД, тому постає гостра необхідність у створенні еталонної бази засобів вимірювання фотометричних характеристик СВД, які відповідатимуть рекомендаціям МКО, а також у розробленні відповідних методик проведення калібрування засобів вимірювання та їх прив'язки до державного первинного еталона, що забезпечить єдність і необхідну точність вимірювань. Залишається відкритим і питання, які характеристики повинні мати еталонні засоби вимірювання СВД. У світовій практиці вимірювань найбільших успіхів з цього питання досягли Національний інститут стандартів і технологій (NIST) (США) і фізико-технічний інститут (РТВ) (Німеччина).

У NIST як еталонний засіб вимірювання усередненої сили світла СВД використовують еталонні фотометри з площею отвору апертури  $100 \text{ мм}^2$ . Вимірювання світлового потоку СВД виконується за допомогою інтегральної фотометричної кулі діаметром 2,5 м, заснованої на абсолютному методі вимірювання [2].

У РТВ вимірювання СВД здійснюються на спеціально сконструйованому гоніофотометрі, який використовується також і для вимірювання їх світлового потоку [3].

Для вимірювання світлового потоку СВД, – найбільш важливого світлотехнічного параметра для джерел світла (ДС), метод інтегральної фотометричної кулі достатньо привабливий з огляду на швидкість. Однак, для виконання прецизійних вимірювань необхідно використовувати еталонне джерело випромінювання. Окрім того, використання гоніофотометра також не виключається, оскільки вимірювання світлорозподілу вимірюваного зразка на гоніофотометрі необхідне для розрахунку поправки на нерівномірність відбивальної характеристики стінок кулі. Тому створення засобу вимірювання світлового потоку СВД одразу на основі гоніометричного методу виглядає найбільш доцільним.

## 1. ВИБІР ТИПУ ГОНІОМЕТРА

Серед різних типів гоніофотометрів для виконання поставленого завдання найбільш привабливим з економічної, технічної й ергономічної точок зору представляється пристрій з обертвовим ДС та фіксованим приймачем, який виконує вимірювання у системі площин  $C$ ,  $\gamma$  (рис. 1) [4].

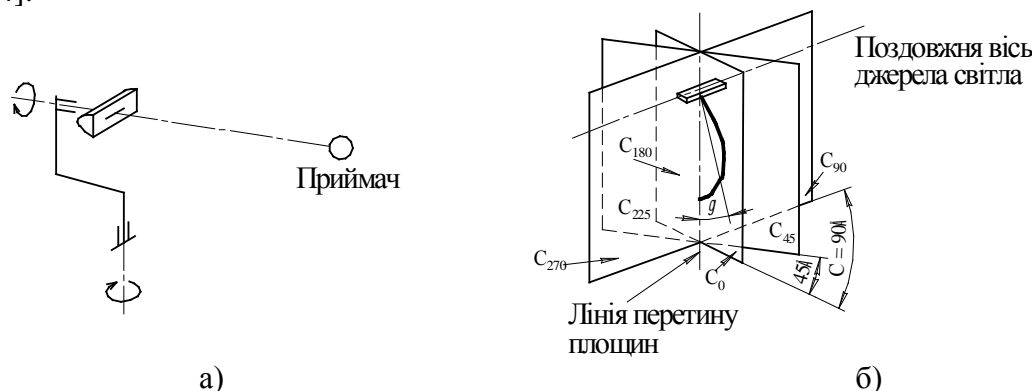


Рис. 1 Характеристики обраного типу гоніометра  
а) принципова кінематична схема; б) система площин вимірювання

Fig. 1 Characteristics of chosen goniophotometer type  
a) kinematic scheme; b) system of measurement planes

Гоніометри такої системи добре зарекомендували себе та знайшли застосування як державні еталонні засоби вимірювання світлового потоку СВД в НМІ таких країн, як Німеччина (PTB), Японія (NMIJ), Франція (LNE), Нідерланди (VSL) [5].

Методика вимірювання потоку гоніофотометром полягає у вимірюванні сили світла точкового ДС у великій кількості заздалегідь обраних напрямків. Для цього простір, що оточує ДС, ділиться на певну кількість площин, і вимірюється інтенсивність випромінювання у всіх напрямках, що лежать в межах кожної площини [6]. Вважається, що у межах достатньо малих тілесних кутів  $d\omega$ , побудованих навколо кожного з цих напрямків вимірювання, сила світла джерела  $I_i$  практично однакова, а світловий потік  $d\Phi_i$ , котрий заповнює кожний із тілесних кутів  $d\omega$ , дорівнює добутку  $I_i d\omega$ . Отже, повний світловий потік джерела можливо отримати за формулою [7, 8]:

$$\Phi = \int_{\omega} I_i d\omega. \quad (1)$$

За застосування методу еталонного приймача для калібрування фотометричної голівки гоніофотометра останній виконує вимірювання в одиницях освітленості – люксах, що є звичайною практикою [9].

За визначенням, освітленість це щільність світлового потоку в межах освітлюваної поверхні, тобто  $E = d\Phi_v/dA$ , звідки світловий потік  $\Phi_v = \int E(A)dA$ . Тут вважається, що  $dA$  – елементарна ділянка сфери, яка освітлюється ДС на відстані  $r$ , тобто вираз (1) приймає вид:

$$\Phi_v = r^2 \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi. \quad (2)$$

На практиці інтеграл замінюється сумою:

$$\Phi_v = 2\pi r^2 \sum_{\theta=0}^{\pi} E(\theta, \varphi) (\cos\theta_1 - \cos\theta_2). \quad (3)$$

Отже, вираз (3) є робочою формулою для визначення світлового потоку за просторовим розподілом сил світла.

## 2. РОЗРОБЛЕННЯ ГОНІОФОТОМЕТРА

Згідно з наведеними вище вимогами проведено роботу із розроблення та конструювання гоніофотометра та супутніх систем. Результатом стала гоніофотометрична установка для вимірювання СВД – LGF-C-42 (LED Goniophotometer Facility) для проведення вимірювань в системі С-площин (максимальний розмір досліджуваного зразка (монтажної плати) – 42 мм).

Структурну схему розробленої установки та її загальний вигляд наведено на рис. 2, 3.

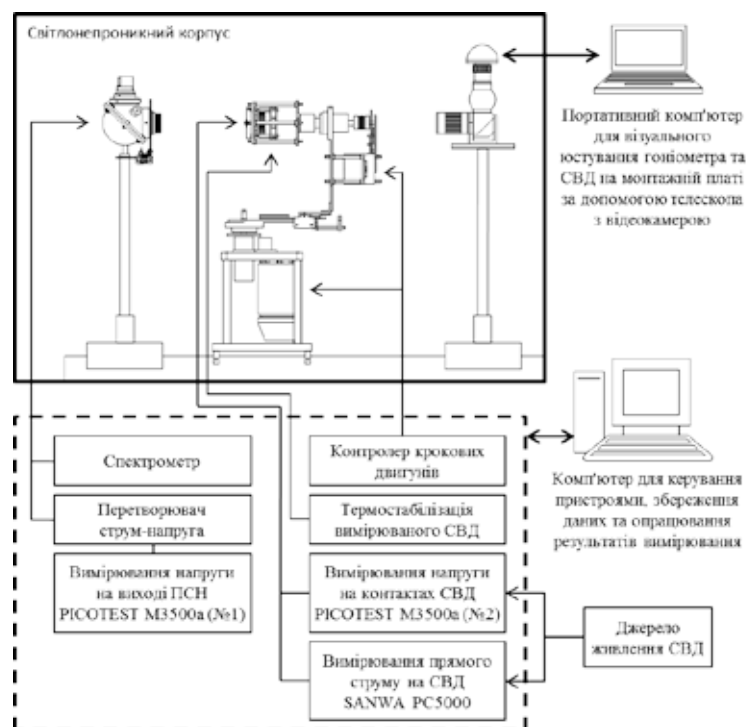


Рис. 2 Структурна схема установки LGF-C-42

Fig. 2 Block diagram of the facility LGF-C-42

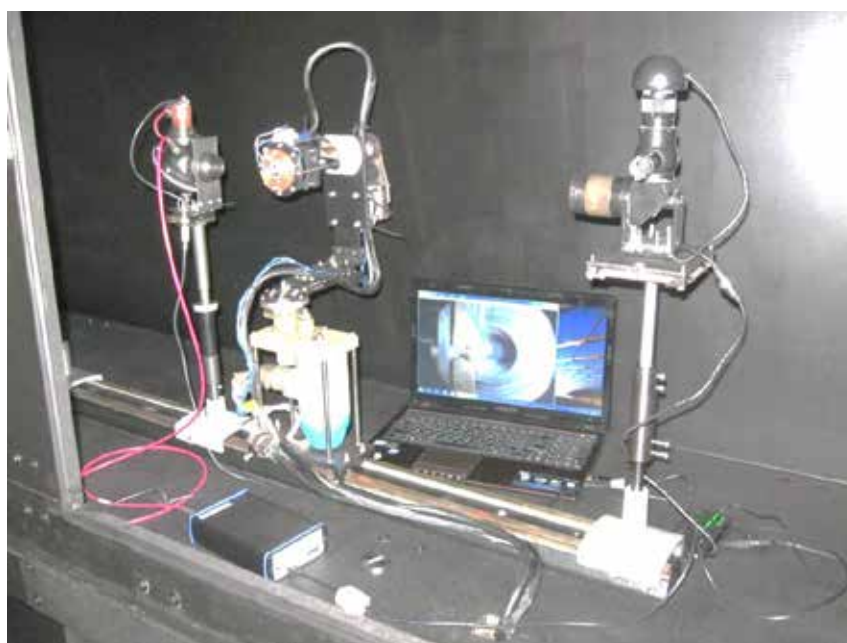


Рис. 3 Загальний вигляд гоніофотометричної устави в захисному корпусі

Fig. 3 A general look of goniophotometer facility in a protective enclosure

Обертвий блок гоніометра створено на основі крокових двигунів з редукторами, які забезпечують вимірювання просторового розподілу випромінення у межах діапазону кутів  $\gamma = \pm 180^\circ$  та площин  $C = 360^\circ$ . Роздільна здатність зміни кута не перевищує  $0,08^\circ$ , що дозволяє вимірювати дуже щільну сітку величин просторового розподілу сили світла з високим рівнем точності й повторюваності вимірювань.

Гоніофотометр розміщується в світлонепроникному корпусі, внутрішні поверхні якого мають мінімальний коефіцієнт відбиття для зменшення розсіяного світла. Для встановлення та вирівнювання досліджуваного зразка СВД використовується оптичний метод юстування за допомогою цифрового телескопа.

Досліджуваний зразок під час вимірювань закріплюється на термостаті, за допомогою якого можливо встановити та підтримувати необхідну робочу температуру р-п переходу СВД у межах від  $+12$  до  $+85^\circ\text{C}$  за навколишньої температури  $30^\circ\text{C}$ . Термостат розроблено на елементі Пельтьє, який «переносить» температуру від монтажної плати з СВД до радіатора. У бічну площину монтажної плати встановлено температурний датчик, за допомогою якого реалізується зворотний зв'язок з блоком керування термостатом. Сам блок керування через порт USB з'єднується з комп'ютером, на якому встановлено програму керування та моніторингу температури.

Використання такого термостата дозволяє виконувати вимірювання потужних СВД (зі споживаною потужністю понад 1 Вт) за методом NIST [10], тобто визначати характеристики СВД, які він матиме у кінцевому світловому приладі за реальних температурних умов. Загальна послідовність дій для проведення такого вимірювання така:

- 1) на термостат устанавлюється досліджуваний зразок;
- 2) за допомогою блока керування термостатом з комп'ютера встановлюється температура термостата, еквівалентна необхідній температурі р-п переходу СВД; термостат витримується за такої температури до досягнення температурної рівноваги;
- 3) на СВД подається живлення та одночасно вимірюється падіння напруги в діапазоні часу від моменту увімкнення до встановлення робочої температури СВД;
- 4) оскільки температура СВД зростає вище заданої у п. 2, необхідно знизити температуру термостата до такої, за якої падіння напруги на СВД дорівнюватиме вимірюваному в п. 3. Для цього використовується швидкодіючий цифровий вольтметр Picotest M3500a.

У такий спосіб стає можливим встановлення і підтримання температури р-п переходу вимірюваного СВД на заданому рівні під час вимірювання світлових характеристик.

### 3. ФОТОМЕТР

Як детектор для вимірювань випромінення у видимому діапазоні найчастіше застосовують кремнієві фотодіоди. У точних приладах зазвичай використовують фотодіоди Hamamatsu S1337 або їх еквіваленти. Для застосування у блоці фотометра обрано модель фотодіода Hamamatsu S1337-1010BQ.

Згідно з рекомендаціями МКО [1], фотометри для вимірювання СВД повинні мати спектральну чутливість, максимально близьку до функції  $V(\lambda)$ . Відповідність до цієї вимоги оцінюється за числом  $f_1'$  використовуваного фотометра, яке у разі вимірювання СВД має не перевищувати 3 %. Оскільки фотодіоди серії S1337 не скориговані під функцію  $V(\lambda)$ , розраховано та виготовлено світлофільтр на базі набору кольорового оптичного скла. Розрахунок виконувався за допомогою програми для підбору фільтрів [11], при цьому показник  $f_1'$  розрахованого комплекту дорівнює 2,7 %.

Досягти відповідності спектральній світловій ефективності  $f_1' = 0$  практично неможливо, тому застосовують коефіцієнт спектральної корекції  $F^*$  [1]. Цей коефіцієнт розраховують індивідуально для кожного вимірюваного джерела випромінення за виразом (4):

$$F^* = \frac{\int S(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int S(\lambda)s_{\text{відн.}}(\lambda)d\lambda} \cdot \frac{\int S_A(\lambda)s_{\text{відн.}}(\lambda)d\lambda}{\int S_A(\lambda)V(\lambda)d\lambda}, \quad (4)$$

де  $S(\lambda)$  – відносний спектральний розподіл випромінення досліджуваного СВД;

$S_A(\lambda)$  – відносний спектральний розподіл стандартного джерела МКО типу А;

$V(\lambda)$  – відносна спектральна світлова ефективність;

$S_{\text{відн.}}(\lambda)$  – відносна спектральна чутливість фотометра.

Виходячи із виразу (4), видно, що для визначення коефіцієнта спектральної корекції  $F^*$  необхідно мати відносний спектральний розподіл випромінення вимірюваного СВД. Для цього найкраще підходять спектрометри з ПЗС-матрицею, які дозволяють вимірювати спектр випромінення практично миттєво. До того ж, використання програмного забезпечення для роботи з спектрометром дозволяє значно прискорити розрахунок коефіцієнта  $F^*$ . Спектрометри такого типу здебільшого мають оптоволоконний ввід, який потребує застосування дифузора. Згідно з рекомендаціями [1] для вимірювання спектральних характеристик СВД як дифузор можна використати молочне скло або фотометричну кулю з діаметром близько 50 мм.

До фотометрів, для вимірювання усередненої сили світла СВД, існує вимога рівномірності чутливості у межах отвору апертури [1]. Вона зумовлена наявністю в СВД певних типів вузького пучка випромінення або нерівномірного просторового розподілу інтенсивності, що створює нерівномірний розподіл освітленості по поверхні вхідного отвору апертури. Зазвичай нерівномірність чутливості по чутливій поверхні фотометрів з фотометричною кулею в якості дифузора дорівнює 0,1 % і менше, що у 3–5 раз краще за рівномірність чутливості кремнієвих фотодіодів найвищої якості [12].

З огляду на зазначене вище, переваги використання фотометричної кулі в якості дифузора стають очевидними, тому для створення фотометра розроблено та виготовлено таку фотометричну кулю (рис. 4, 5).

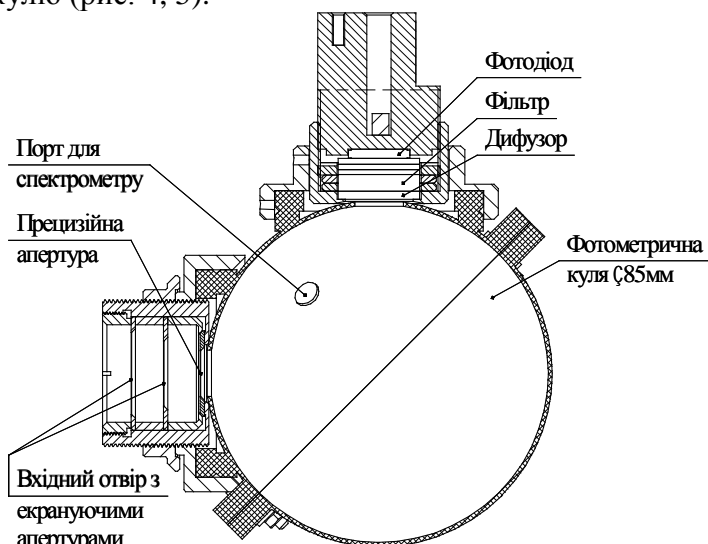


Рис. 4 Перетин фотометра з фотометричною кулею в якості дифузора  
Fig. 4 Cross-section of sphere-input photometer

Для наочності вигляд фотометру представлено нижче у загальному (рис. 4, а) та рознесеному (рис. 4, б) вигляді.

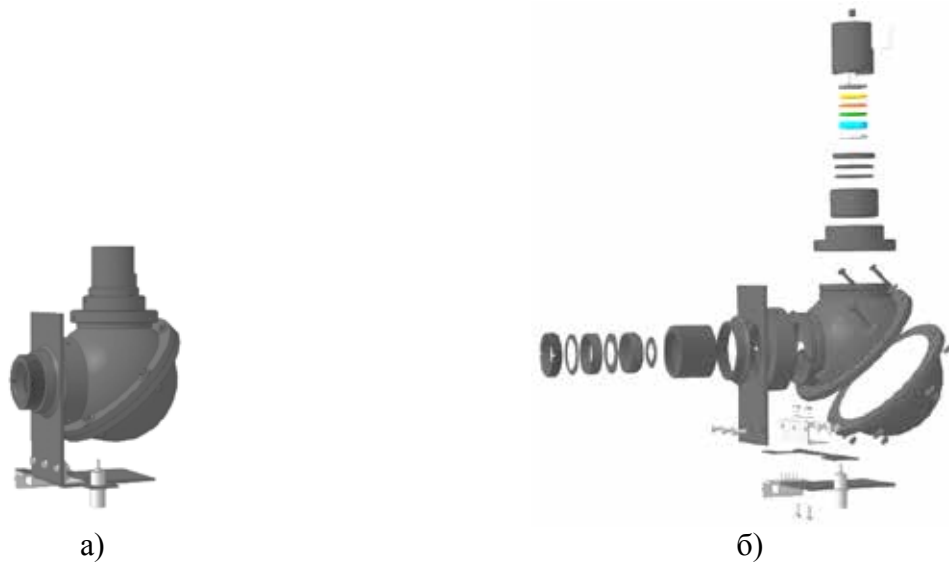


Рис. 5 Фотометр з фотометричною кулею в якості дифузора  
 а) загальний вигляд; б) рознесений вигляд  
 Fig. 5 Sphere-input photometer  
 a) overall view; b) exploded view

Корпус фотометра виготовлено з двох роз'ємних половинок пустотілої пластикової кулі діаметром 85 мм, внутрішню поверхню якої пофарбовано фарбою на основі сірчаноокислого барію ( $BaSO_4$ ) згідно з методикою, викладеною в [13].

Випромінення, яке пройшло через апертуру та вхідний отвір кулі, внаслідок багаторазового відбиття рівномірно розподіляється по чутливій поверхні фотодіоду. Плоский дифузор, через який випромінення з фотометричної кулі надходить до фотодіоду, є частиною стінки кулі, поза якої безпосередньо розміщується набір фільтрів, тобто між дифузором та фотодіодом.

Вхідна прецизійна апертура встановлюється поза екранувальними апертурами, які обмежують поле зору фотометра до  $30^\circ$ , що, у свою чергу, знижує вплив розсіяного світла від елементів установки. Діаметр вхідної апертури дорівнює 10,859 мм, що забезпечує площу чутливої поверхні фотометра рівну  $92,603 \text{ мм}^2$ .

Як спектрометр використовується AvaSpec-ULS2048L-BB-50 з оптоволоконним водом. Для під'єднання спектрометра використовується порт на бічній стінці кулі. Розташування порта розраховано у такий спосіб, щоби в нього потрапляло лише відбите від стінок випромінення. Таке оптимальне положення дозволило обійтися без використання екранів усередині кулі.

Вимірювання фотоструму фотометра та його підсилення виконується за допомогою перетворювача струм-напруга (ПСН) [14], розробленого на основі операційного підсилювача AD549JHZ. Як опір зворотного зв'язку використовується прецизійний резистор С2-29В-1 з опором 8,25 МОм (точність номінального значення 0,5 %).

Основні характеристики та джерела похибок при застосуванні розробленого фотометра визначалися відповідно до технічного звіту МКО 69-1987 [15] та зведено у таблицю.

Таблиця. Характеристики розробленого фотометру  
 Table. Specifications of designed photometer.

№	Характеристика	Символ	Значення
1	Невідповідність спектральній світловій ефективності	$f_1'$	2,7 %
2	Реакція на ультрафіолетове випромінення	u	0,2 %
3	Реакція на інфрачервоне випромінення	r	0,2 %
4	Кутова чутливість фотометра	$f_2$	1,5 %
5	Нелінійність фотометра	$f_3$	0,2 %
6	Температурний коефіцієнт (залежність результатів вимірювання від температури)	$\alpha$	0,012 %/°C

7	Вплив втомлюваності приймача	$f_5$	0,146 %
8	Вплив модульованого світла	$f_7$	0,1 %
9	Вплив поляризації	$f_8$	2 %
10	Нерівномірність чутливості по поверхні вхідного отвору з апертурою	$f_9$	0,1 %
11	Невизначеність калібрування фотометра за освітленістю	U (k=2)	1,4 %

#### 4. ВИМІРЮВАННЯ СВД

Процес вимірювання просторового розподілу є нетривіальним завданням з точки зору позиціонування досліджуваного СВД. Використання комп'ютера для проведення вимірювань та опрацювання отриманих даних безперечно є однією з найважливіших умов для досягнення високої точності результатів та їх підготовки до подальшого використання.

Тому для автоматизації керування процесом вимірювання розроблено відповідне програмне забезпечення. Процес вимірювання СВД виконується автоматично. За закінченням вимірювання результати можна зберегти у вигляді протоколу вимірювання або електронної таблиці у форматі \*.csv, де містяться значення сил світла у відповідних напрямках. Також є можливість зберегти результати вимірювання у форматі IESNA 2002, які у подальшому можна використовувати в таких програмах для моделювання освітлювальних приладів, як, наприклад, Photopia, Zemax чи TracePro.

Окрім програми керування установкою LGF-C-42, в процесі вимірювання також застосовується окремо розроблена програма для керування температурою термостата, тобто програма, котра необхідна для встановлення та підтримання необхідної температури р-п переходу СВД.

Для визначення спектральних характеристик досліджуваного СВД використовується програмне забезпечення спектрометра AvaSpec-ULS2048L-BB-50, яке дозволяє визначати спектральний розподіл випромінення, його координати колірності (з відображенням координат на діаграмі колірності), колірну температуру випромінення та індекс кольоропередавання. Вимірені спектрометром характеристики можна зберегти у вигляді таблиць для подальшого опрацювання та використання у розрахунках.

#### ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретично-експериментальних та конструкторських робіт створено гоніофотометричну установку LGF-C-42, яка відповідає як рекомендаціям МКО 127-2007, так і світовому рівню цього виду вимірювання і характеризується таким:

1. Вимірює характеристики СВД:

- силу світла у встановленому напрямку;
- усереднену силу світла СВД;
- просторовий розподіл випромінення;
- повний світловий потік;
- спектральний склад випромінення в обраному напрямку;
- просторовий розподіл спектрального складу випромінення;
- координати колірності  $x$ ,  $y$ ;
- колірну температуру випромінення;
- індекс кольоропередавання;
- падіння напруги на СВД;
- споживану потужність СВД.

2. Вимірювання СВД високої потужності має складності через значну чутливість до теплових умов функціонування. Тому використано ідею температурно-контрольованої монтажної плати для проведення вимірювань потужних СВД за визначеної температури їх р-п переходу.



Досліджуваний зразок під час вимірювання закріплюється на термостаті, який забезпечує встановлення та підтримування необхідної робочої температури р-п переходу СВД. Термостат має зворотний зв'язок з блоком керування, котрий через порт USB з'єднується з комп'ютером для реалізації моніторингу та контролю встановленої температури.

3. Комп'ютер і розроблене програмне забезпечення є головною системою керування. Весь процес вимірювання керується програмою в автоматичному режимі. Також за допомогою програмного забезпечення результати вимірювання можна представити у вигляді таблиць, графіків або фотометричних файлів формату IESNA.

4. Як приймач випромінювання розроблено та виготовлено фотометр на основі фотометричної кулі діаметром 85 мм, яка виступає у ролі дифузора. Такий підхід дозволяє отримати найкраще значення рівномірності випромінювання по чутливій поверхні приймача, а також приєднати оптоволоконний кабель спектрометра Avantes ULS2048L-USB2 через спеціальний порт на стінці кулі. Поєднання в одному приладі фотометра і спектрометра дозволило проводити одночасне вимірювання як фотометричних, так і спектральних характеристик у вигляді функцій від кута. Для вимірювання фотоструму фотодіода та для його підсилення розроблено перетворювач струм-напруга на основі операційного підсилювача AD549JHZ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Measurement of LEDs : CIE 127-2007. — [2nd edition]. — s.l.: s.n., 2007. — 38 с. — ISBN 978 3 901 906 58 9.
2. Y. Ohno Integrating sphere simulation: application to total flux scale realization / Yoshi Ohno // Applied Optics. — №33., 13. — 1994. — С. 2637-2647 — <http://dx.doi.org/10.1364/AO.33.002637>.
3. Заутер Г. Фотометрия светодиодов / Г. Заутер, М. Линдемманн, Й. Оно, А. Шперлинг ; пер. с нем. Л.П. Варфоломеева // Светотехника. (Zauter H. Photometry of LEDs / H. Zauter, M. Lyndemann, Y. Ono, A. Shperlynh ; per. s nem. L.P. Varfolomeeva // Svetotekhnika.) — №3. — 2004. — С. 5-11.
4. Зубков Д.П. Гониометрический метод измерения излучения светодиодов / Зубков Д. П. // Світлотехніка та електроенергетика. (Zubkov D.P. Goniophotometrical method for measurement of LEDs / Zubkov D. P. // Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka.) — №4. — 2011. — С. 30-37.
5. Dong-Hoon Lee. Final report of international comparison on total luminous flux of LEDs : APMP.PR-S3b / Dong-Hoon Lee, Seongchong Park, Seung-Nam Park // Metrologia. — №49. — 2012. — С. 141 — doi:10.1088/0026-1394/49/1A/02003.
6. The Measurement of Absolute Luminous Intensity Distributions : CIE 70-1987. — s.l.: s.n., 1987. — 44 с. — ISBN 978 3 900734 05 3.
7. The measurement of luminous flux : CIE 84-1989. — [1st edition]. — s.l.: s.n., 1989. — 57 с. — ISBN 978 3 900734 21 3.
8. Светильники. Общие технические условия : ГОСТ 17677-82. — [Действует с 01.01.83] (Luminaires. General specifications : GOST 17677-82. — [Valid from 01/01/83]) — М: Издательство стандартов, 1982.— 59 с.
9. Matthias Lindemann. Photometry and colorimetry of reference LEDs by using a compact goniophotometer / Matthias Lindemann, Robert Maass // MAPAN. — Volume 24, Issue 3. — September 2009. — С. 143-152.
10. Y. Zong, Y. Ohno. New practical method for measurement of high-power LEDs : CIE Expert Symposium 2008 on Advances in Photometry and Colorimetry / CIE x033:2008. — Turin, 2008.
11. Назаренко Л.А. Програмне забезпечення для розрахунку світлофільтрів / Л.А. Назаренко, С.А. Рева, М. В. Гур'єв // Світлотехніка та електроенергетика. (Nazarenko L.A. Software for calculation of optical filters / L.A. Nazarenko, S.A. Reva, M.V. Hur"yev // Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka.) — №3. — 2012. — С. 12-15.

12. Optical Radiometry. Experimental Methods in the Physical Sciences / Edited by Albert C. Parr, Raju U. Datla and James L. Gardner — 1 edition — San Diego: Academic Press, 2005. — Volume 41 — 586 с. — ISBN: 978-0-12-475988-6.

13. Лампы электрические. Методы измерения электрических и световых параметров : ГОСТ 17616-82. — [Действует с 01.01.83] (Electric lamps. Methods of measurement of electrical and optical parameters: GOST 17616-82. — [Valid from 01/01/83]) — М: Издательство стандартов, 1983. — 50 с.

14. G. Eppeldauer. Optical Radiation Measurement with Selected Detectors and Matched Electronic Circuits Between 200 nm and 20  $\mu\text{m}$  / G. Eppeldauer // NIST Technical Note 1438, NIST. — 2001.

15. Methods of Characterising Illuminance Meters and Luminance Meters. Performance, characteristics and specifications : CIE 69-1987. — s.l.: s.n., 1987. — 43 с. — ISBN 978 3 900734 04 6.

Отримано/ received  
Стаття рекомендована  
Prof.

18.03.2014 р.