2. Исследована зависимость ФЭП платиновой проволоки излучения от температуры. На длине волны 1,06 мкм при увеличении температуры ФЭП уменьшается, в то время как на длине волны 10,6 мкм он увеличивается. По-видимому, это связано с различными механизмами поглощения излучения в металле в этих спектральных диапазонах.

3. Измеренный ФЭП платиновой проволоки в 1,2–1,4 раза меньше, чем рассчитанный по формулам теории дифракции при табличных значениях коэффициентов преломления и поглощения металла. Возможное объяснение этому – изменение структуры поверхностного слоя в проволоке, вызванное деформацией кристаллической структуры материала при ее изготовлении (термической обработке и протяжке через малое отверстие).

4. Обоснован метод измерения оптических постоянных материала металлических проволок, основанный на зависимости ФЭП от этих параметров.

Список литературы

1. *Лазарев Л.П.* Контроль геометрических и оптических параметров волокна / Л.П. Лазарев, С.Д. Мировицкая. – М.: Радио и связь, 1988. – 280 с.
2. *Mishcyenko M.I.* Scattering, absorption fnd emission of light by small particles / M.I. Mishcyenko, L.D. Travis, A.A. Lacis. – N.Y.: Goddard Institute for Space Studies, 2004. – 488 p.
3. Методы светорассеяния в анализе дисперсионных биологических сред / В.Н. Лопатин, А.В. Приезжев, А.Д. Апонасенко [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 384 с.
4. *Xu R.* Particles characterization light scattering methods / R. Hu. – N.Y., Boston, London, Moscow: Kluver Academic Publishers, 2005. – 410 p.
5. Средства измерения энергетических характеристик мощного лазерного излучения / Н.Г. Кокодий, В.Н. Тимошенко, В.Ф. Ефимов [и др.] // Квантовая электроника: сб. – 1990. – № 36.
6. *Катрич А.Б.* Болометрический анализатор параметров лазерного излучения / А.Б. Катрич, А.В. Худошин // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 2. – С. 227.
7. *Pak A.O.* Grid receiver for measuring of laser radiation characteristics / A.O. Pak, N.G. Kokody // International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling: the 11-th Int. conf., 4–8 September 2011. – Kharkov, 2011. – P. 1–3.
8. *Кокодий Н.Г.* Измерение распределения интенсивности в пучках теплового излучения / Н.Г. Кокодий, Д.Н. Кокодий // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45, № 2. – С. 289–295.
9. Измерение фактора эффективности поглощения тонкопроволочного болометра / В.М. Кузьмичев, И.А. Приз, Б.В. Сафронов [и др.] // Измерительная техника. – 2007. – № 7. – С. 28–30.
10. *Перепечай М.П.* Исследование взаимодействия интенсивного инфракрасного излучения с металлическими цилиндрами с целью создания проходных измерителей мощности лазерных пучков: дис. ... канд. физ.-мат. наук / М.П. Перепечай. – Харьков, 1979. – 182 с.
11. Direct imaging of photonic nanojet / P. Ferrand, J. Wenger, A. Devilez [et al.] // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, No. 10. – P. 6930–6940.

УДК 535.241.42

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОДІОДІВ У МЕТРОЛОГІЧНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ СВІТЛОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

О.Д. Купко, *доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків*
В.В. Терещенко, *аспірант Харківського національного університету радіоелектроніки*

О.Д. Купко

В.В. Терещенко

Проаналізовано існуючі засоби відтворення та передачі сили світла. Запропоновано метод відтворення сили світла із використанням світлодіода. Досліджено похибки, пов'язані зі спектральними характеристиками джерел оптичного випромінювання, та виділено переваги і недоліки використання як еталонного джерела випромінювання білого та зеленого світлодіодів.

Existing equipment for realization and transmission of luminous intensity is analysed. The method for realization the luminous intensity with the use of light-emitting diode

is offered. The errors related to spectral characteristics of optical radiation sources are investigated and the advantages and disadvantages of using white and green light-emitting diodes as a reference radiation source are highlighted.

Вступ

У 1996 р. було затверджено державний первинний еталон одиниці сили світла ДЕТУ 11-02-96 [1]. Метод відтворення базувався на застосуванні абсолютного приймача і монохроматичного джерела випромінювання. Монохроматичне джерело було виконано на базі ртутної лампи та вузькосмугового фільтра, який відокремлює лінію 546 нм. Це дозволило не використовувати фільтр, який приводить спектральну чутливість приймача до спектральної чутливості людського ока, та уникнути похибок, що пов'язані із цим. Але на подальших стадіях передачі одиниці необхідно використовувати такий фільтр. У 2008 р. було опубліковано роботу [2], присвячену використанню трап-детектора для світлових вимірювань, де використовувався абсолютний приймач і джерело безперервного спектра. Абсолютним приймачем служив трап-детектор, джерелом – лампа розжарювання. Похибки, пов'язані з фільтром, виявилися відразу на стадії відтворення, але під час передачі одиниці, через те що фільтр в еталоні подібний до фільтрів у вимірювальних приладах, похибки зростали не так швидко, як в еталоні ДЕТУ 11-02-96.

Останніми роками істотно підвищилося використання світлодіодів як білого кольору, так і кольорових. У 2015 р. почалися роботи з удосконалення еталона сили світла, план модернізації включає роботи із впровадження світлодіодних джерел світла. Світлодіоди можуть використовуватися для відтворення одиниці сили світла. Удосконалення фотоприймачів зробило область їх передбаченої квантової ефективності (майже 100 %) достатньою, щоб охопити увесь спектр випромінювання не тільки багатьох кольорових, але й білих світлодіодів. З урахуванням того, що спектральна смуга випромінювання світлодіодів займає проміжне положення між монохроматичним джерелом і джерелом безперервного спектра, потрібно проаналізувати методичні переваги і недоліки такого підходу в порівнянні з раніше використаними.

Деталізація задачі

Для порівняння перелічених методів необхідно вибрати відповідний критерій. Очевидно, що велика частина похибок (невизначеностей) пов'язана з конкретною конструкцією установок та з характеристиками приладів. Пропонується порівнювати похибки, обумовлені тільки відмінністю в методах. Відмінність у методах полягає у відмінності в спектрах джерел, тому необхідно звернути увагу на похибки, обумовлені врахуванням спектральних характеристик.

Усі світлові величини тісно пов'язані. Хоча основною світловою величиною є кандела, спочатку може відтворюватися люкс – одиниця освітленості, або люмен – одиниця світлового потоку. Враховуючи, що більшість вимірювальних приладів реагує на освітленість, логічно проводити порівняння точності відтворення і передачі за освітленістю. Більшість вимірювань освітленості виконують за допомогою безперервного спектра, тому, виходячи з практичних потреб, логічно проводити порівняння точності передавання при освітленні найбільш поширеним стандартним джерелом випромінювання – джерелом типу А.

Основні формули

Загальний вираз для освітленості при використанні джерела типу А зі спектром $E_A(\lambda)$ відповідно до [2] може бути записаний у вигляді формули

$$E_A = \frac{kI}{AS\tau} F_A, \qquad (1)$$

де

$$F_A = \frac{\int_0^\infty E_A(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty E_A(\lambda)S(\lambda)d\lambda} -$$

коефіцієнт актинічності (спрощено – це в нормованому вигляді відношення того, що ми хотіли б виміряти ідеальним приладом, до того, що ми вимірюємо реальним); k – 683 кд·стер/Вт; I – сигнал абсолютного приймача; A – площа діафрагми; S – чутливість абсолютного приймача на довжині хвилі 555 нм (лм/А); τ – пропускання фільтра на довжині хвилі 555 нм; $S(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість приймача з фільтром $V(\lambda)$. У цьому випадку F_A – величина, близька до одиниці, оскільки $S(\lambda) \approx V(\lambda)$.

Якщо для відтворення використовується світлодіод зі спектром, який уже в області передбаченої квантової ефективності, то фільтр не потрібний, тобто $\tau = 1$. Вираз для освітленості при використанні джерела зі спектром $E_{СД}(\lambda)$ може бути записаний у вигляді

$$E_{СД} = \frac{kI}{AS} F_{СД}, \qquad (2)$$

де

$$F_{СД} = \frac{\int_0^\infty E_{СД}(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty E_{СД}(\lambda)S(\lambda)d\lambda} -$$

коефіцієнт актинічності для випромінювання світлодіода. Якщо для зеленого світлодіода напівширина $E_{СД}(\lambda)$ мала в порівнянні з напівшириною $V(\lambda)$, то $F_{СД} \approx V(\lambda_{СД}) / S(\lambda_{СД})$. Для білого світлодіода $S(\lambda)$ сильно

відрізняється від $V(\lambda)$, $F_{СД} \approx 0{,}33$. Якщо врахувати, що невизначеність вимірювань на еталоні [3] становить $u = 0{,}8$ %, то відповідна невизначеність коефіцієнта актинічності дорівнює $u = 0{,}11$ %.

При використанні для відтворення монохроматичного джерела формула змінюється. Фільтр не потрібний, тобто $\tau = 1$, а коефіцієнт актинічності перетворюється у відношення функції видності до відносної спектральної чутливості на використовуваній довжині хвилі випромінювання. У результаті отримаємо формулу з відсутнім коефіцієнтом актинічності:

$$E_{М} = \frac{kI}{AS} F_{М} = \frac{kI}{AS_{М}} V_{М}. \qquad (3)$$

Після відтворення одиниці з використанням випромінювання будь-якого спектра повинна відбутися її передача засобу вимірювання, який використовуватиметься для зберігання. Потрібно провести вимірювання освітленості від джерела зі стандартним спектром. У рамках цієї роботи критерієм вибрано чутливість до випромінювання джерела типу А. Якщо використовувалося відтворення за допомогою випромінювання світлодіода або монохроматичного випромінювання, то на приймач при передачі потрібно буде встановити світлофільтр, що приводить його чутливість до $V(\lambda)$. Відповідно зміняться абсолютна і відносна чутливості приймача на всіх довжинах хвиль. З урахуванням цього зауваження можна вважати, що для таких випадків майже справедлива формула (1). Істотною особливістю відтворення одиниці при її передачі є необхідність забезпечити такий режим роботи джерела, щоб він максимально відповідав джерелу типу А. Похибки, обумовлені відмінністю спектра джерела від джерела типу А, призведуть до відповідних похибок освітленості. Формула може бути записана у вигляді

$$E_{А} = \frac{kI}{AS\tau} F_{Areal}, \qquad (4)$$

де

$$F_{Areal} = \frac{\int_0^\infty E_{А}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{Areal}(\lambda) S(\lambda) d\lambda} -$$

коефіцієнт актинічності з урахуванням реального спектра.

У формулах використовується відносна чутливість приймача. Існує тільки два типи абсолютних приймачів і теоретично можна використовувати будь-який із них. У тих випадках, коли для розрахунків необхідно буде використовувати спектральні характеристики, можна вважати, що приймачі з електричним заміщенням неселективні, а чутливість трап-детектора добре описується формулою

$$S(\lambda) = \frac{(1-\rho(\lambda))\varepsilon(\lambda)\lambda}{K} \approx \frac{\lambda}{K},$$

де λ – довжина хвилі; $K = 1239{,}85$ нм·Вт/А; $\rho(\lambda)$ – коефіцієнт віддзеркалення фотодіодів; $\varepsilon(\lambda)$ – внутрішня квантова ефективність фотодіодів.

Слід зазначити, що величина *k/(AS)* визначається конструкцією приймача, тобто поза темою цієї роботи, і вважатиметься однаковою для всіх розглянутих випадків. Це означає, що незалежно від того, яким із перерахованих засобів спочатку відтворювалася одиниця, похибка передачі буде в методичному сенсі однакова і визначатиметься тільки характеристиками використовуваної апаратури.

Аналізуючи формули (1)–(4), можна порівняти похибки відтворення для описаних випадків. У цій роботі розглядатимуться тільки спектральні складові. Слід розглянути похибки, пов'язані з точністю визначення відносних спектральних характеристик джерела і фільтра, а також із точністю визначення абсолютної величини пропускання фільтра, оскільки саме ці величини входять у формули (1)–(4).

Основні похибки реалізованих методів

Необхідно розглянути такі похибки вимірювань: похибки моделі, що виникають через неідеальність; похибки, обумовлені похибкою вимірювання спектральним приладом, у тому числі й кінцевою спектральною шириною щілини спектрального приладу; похибки розрахунку для всіх перерахованих методів відтворення. Для обліку похибок вимірювання спектральних характеристик досить використовувати похибки спектрорадіометричного еталона та еталона спектральних коефіцієнтів [3, 4]. У роботі [1] детально розглянуто похибки методу відтворення на основі монохроматичного джерела та абсолютного приймача, у тому числі й спектральні похибки, обумовлені наявністю у випромінюванні неподавлених ліній і фону у межах смуги пропускання 2 нм інтерференційного фільтра (відповідно 0,03 і 0,8 % від потужності в лінії 546 нм). Проте в результаті застосування запропонованої методики обробки результуючу похибку було зведено до $S = \theta = 3 \cdot 10^{-3}$ %. Спектральні похибки, обумовлені кінцевою спектральною шириною апаратної функції спектрального приладу для відтворення за допомогою монохроматичного джерела, практично відсутні, оскільки спектральну ширину лінії випромінювання вимірювати не потрібно. У формулі (3) відсутні інтеграли, то і похибок інтегрування немає.

Похибки методу відтворення, що ґрунтується на використанні джерела типу А, на апаратурі ННЦ "Інститут метрології" описано в [2]. У роботі малося на увазі використання джерела типу А, характеристики якого задано в таблиці, тобто спектральні похибки, пов'язані з неточним знанням спектра джерела, не розглядалися. Похибку вимірювання

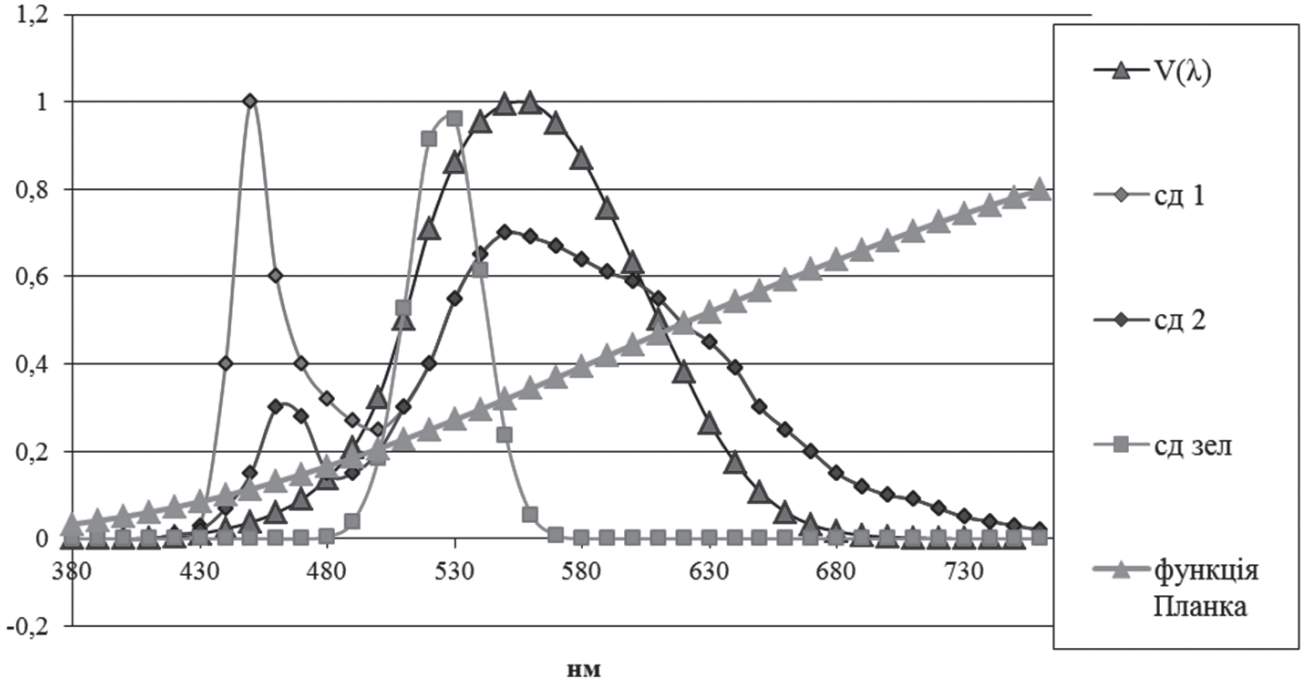


Рис. 1. Типові спектри білого (сд 1 і сд 2) та зеленого (сд зел) світлодіодів, крива *V(λ)*

коефіцієнта пропускання фільтра в [2] оцінено в 0,11 %. Цю цифру отримано за наслідками 50-кратних вимірювань протягом декількох днів. Для оцінок точність вимірювання коефіцієнта пропускання фільтра можна поліпшити, оскільки невизначеність вимірювання коефіцієнтів направленого пропускання в діапазоні 0,01...0,95 на еталоні, відповідно до [4], становить u = 0,03 %. Основна проблема була пов'язана з урахуванням неподавленого фільтром випромінювання. З урахуванням того, що для джерела типу А частка випромінювання в області 380...760 нм (видима область) становить малу частку випромінювання в області 300...1200 нм (область чутливості кремнієвого фотодіода), а також з урахуванням зростання чутливості фотодіода з довжиною хвилі, істотного значення набувають помилки поза основною областю пропускання фільтра. Якщо коефіцієнт пропускання фільтра поза видимим діапазоном становитиме не нуль, а тільки 0,1 %, то сигнал фотодіода збільшиться на 2 %. Ці труднощі долалися тим, що область інтегрування при обчисленні коефіцієнта актинічності розбивалася на три області: 300...380, 380...760 і 760...1200 нм. Використовувалися кольорові стекла, які виділяли ці області, і вимірювався сигнал коригованого приймача із цими стеклами і без них. У результаті вдалося врахувати внесок випромінювання поза основною областю чутливості і ввести поправку. Невизначеність вимірювання коефіцієнта актинічності оцінено в 0,14 %. Спектральні вимірювання проводилися при спектральній ширині щілини 1,2 нм з урахуванням того, що смуга пропускання фільтра $V(\lambda)$ = 380 нм, поправок на кінцеву спектральну ширину апаратної функції монохроматора не вводилося. Розрахунок інтегралів проводився за формулою прямокутників. Відповідно до [5] такий метод має похибку, пов'язану з похідною інтегрованої функції. Доброю оцінкою можна вважати

$$\frac{\Delta \int_{380}^{760} E_A(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{760} E_A(\lambda)V(\lambda)d\lambda} = \frac{\sum_{38}^{76} 1/2 \cdot d(E_A(\lambda_i)V(\lambda_i))/d\lambda}{\sum_{38}^{76} E_A(\lambda_i)V(\lambda_i)},$$

де λ_i – довжини хвиль, на яких проводилося вимірювання від 380 до 760 нм, крок вимірювань – 10 нм. За оцінками через майже симетричний контур відповідна похибка дорівнює близько $6 \cdot 10^{-3}$ %.

Метод відтворення зі світлодіодним джерелом

Оцінки невизначеностей для методу відтворення, що використовує світлодіод, раніше не проводилися, тому їх слід розглянути докладніше. Випромінювання світлодіода повністю знаходиться в області $V(\lambda)$, тому врахування неподавлених ліній і фону не вимагається. Якщо користуватися вимірюваннями спектра на спектрорадіометричному еталоні [3] (u_c= 0,8), то невизначеність обчислення F_A становить 0,11 %. Вплив спектральної ширини апаратної функції приладу буде різним для монохромного і білого світлодіодів. На рис. 1 наведено типові відносні спектральні розподіли монохроматичного і білого світлодіодів. Для орієнтування також наведено криву $V(\lambda)$. Спектри сд1 и сд2 сильно відрізняються величиною піку в синій області, тобто відповідають холодному і теплому кольорам білого світлодіода. Реальні невизначеності при вимірюваннях спектрального складу видимого випромінювання, відповідно до [3], можна оцінити як u= 0,8.

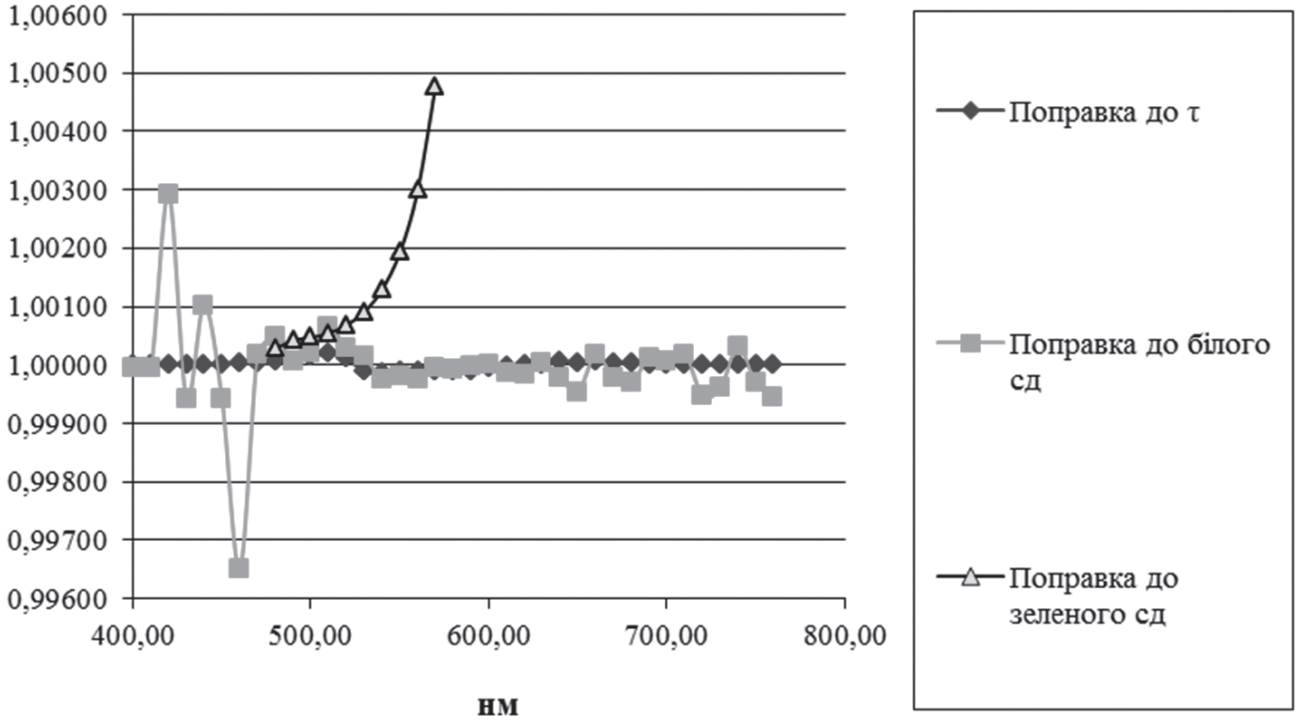


Рис. 2. Співвідношення реальних вимірювань та експериментально виміряного коефіцієнта пропускання фільтра для спектра випромінювання білого та зеленого світлодіодів

Для цих світлодіодів існують ділянки спектра, які швидко змінюються, що призведе до спотворення виду спектра внаслідок впливу апаратної функції. Загальний підхід при обліку впливу апаратної функції спектрального приладу потребує вирішення інтегрального рівняння типу згортки. Такий підхід детально розроблений [6], проте достатньо трудомісткий. Для практичних потреб необхідний більш простий метод. У [7] запропоновано підхід, що дозволяє оцінити відмінність дійсного і виміряного спектрів. Розрахунки, відповідно до [8], проведено для спектральної ширини щілини 2 нм. Результати розрахунку співвідношення реальних та експериментально виміряних величин наведено на рис. 2.

Розрахунки показали, що якщо використовувати прилад зі спектральною шириною щілини 2 нм, то для білого світлодіода максимальна відмінність на довжинах хвиль 420 і 460 нм становить близько 0,3 %. Для зеленого світлодіода поправка досягає 0,5 %. На інших довжинах хвиль поправка істотно менша: середньоквадратичне відхилення менш ніж 0,1 і 0,14 % для білого і зеленого світлодіодів відповідно. Очевидно, що при вимірюванні спектра зеленого світлодіода потрібна більш вузька щілина, чого легко можна досягти. Оскільки для білого світлодіода вже не можна говорити про симетрію спектра, то для нього були розраховані похибки інтегрування для

$$\int_0^\infty E_{\text{СД}}(\lambda)S(\lambda)d\lambda \; -$$

близько 0,11 %.

При інтегруванні

$$\int_0^\infty E_{\text{СД}}(\lambda)V(\lambda)d\lambda$$

через симетрію контуру похибки становили близько 10^{-4} %.

Для похибок передачі при розрахунку за формулою (4) необхідно врахувати, що реальне джерело випромінювання має спектр, що не точно збігається зі спектром джерела типу А (4).

Оскільки, відповідно до [7], за температур порядку 2800 К допустимі відхилення в 120 К, то виникне похибка у визначенні коефіцієнта актинічності, яку легко оцінити: F_{Areal} =0,986. Якщо користуватися вимірюваннями спектра на спектрорадіометричному еталоні [3] (u_c= 0,8), то для визначення F_{Areal} розрахунок дає u= 0,11 %.

Порівняння

Після розгляду деяких похибок методу відтворення, що ґрунтується на використанні світлодіода, можна порівняти всі раніше перераховані методи. Оскільки є різний ступінь опрацьованості перерахованих методів (реалізовано тільки два), слід розглянути їх усі, користуючись однаковим підходом, тобто користуючись результатами атестації існуючих еталонів. У таблиці зібрано розглянуті раніше джерела невизначеностей для k=1.

Проаналізувавши таблицю, можна сказати, що кожний із методів має свої переваги. Основний недолік методу, що використовує світлодіод, – відсутність стандартизованого джерела світла, що імітує

Порівняння невизначеностей спектральних величин при відтворенні та передачі світлових одиниць

Складові невизначеностей	Метод			
	Джерело типу А	Світлодіод	Монохроматор	Передача
Формула	1	2	3	4
Вимірювання фільтра, %	u=0,03	u=0	u=0	u=0,03
Вимірювання спектра випромінювання, %	u=0	u=0,11	u=0	u=0,11
Неподавлене випромінювання, %	u=0,14	u=0	u=3,2 10^{-3}	u=0,14 для джерела типу А; u=0 для сд
Апаратне поширення, %	u=0	u=0,1–0,14	u=0	u=0,1
Похибка інтегрування, %	u=6·10^{-3}	u=0,11	u=0	u=6·10^{-3}
Сумарна спектральна невизначеність, % (k=1)	u=0,29	u=0,37	u=0,006	u=0,42 Для стандартного спектра сд u=0,23

випромінювання світлодіода. За наявності такого стандартного джерела коефіцієнт актинічності обчислювався б теоретично, тобто в рамках справедливості припущення про функціональну залежність спектральної чутливості, без похибок. У такому разі пропаде похибка вимірювання спектра і сумарні невизначеності для джерела А і для світлодіода практично зрівняються. Апаратне розширення для світлодіода приблизно таке ж, як неподавлене випромінювання для джерела типу А, але існує можливість корекції спектра на кінцеву величину апаратної функції. Похибка інтегрування легко зменшується, наприклад, при зміні методу на метод інтегрування за Сімпсоном. Невизначеності для методу відтворення за білим світлодіодом стають менші, ніж при методі за джерелом типу А. На етапі передачі можна було б проводити калібрування світлових приладів у ранзі робочих еталонів і від лампи розжарювання (джерело типу А), і від світлодіода. Якість корекції спектральної чутливості робочих засобів вимірювання постійно зростає, залежність від виду спектра джерела для них не така критична, як раніше. Для робочих засобів вимірювання у разі калібрування люксметра за світлодіодом зі спектром сд 1, який наведено на рис. 1, і при подальшому його застосуванні для вимірювання світлодіода зі спектром сд 2 похибки становили б близько 2 %. Це пов'язано з малими значеннями $V(\lambda)$ в області синього піку світлодіода. Така похибка цілком прийнятна для робочих засобів вимірювання.

Інша сторона використання світлодіодних джерел випромінювання при передачі одиниці пов'язана з тим, що в Україні відсутнє виробництво світловимірювальних ламп, а конструкцію тих, що збереглися, було розроблено в кінці 20-х рр. минулого століття [9]. Покупка дорогих зарубіжних світловимірювальних ламп так само не є простим виходом з існуючого положення, оскільки всю апаратуру в центрах пристосовано до наявних ламп. Є нагальна потреба в змінах, зокрема, в рішучішому переході до використання джерел випромінювання переважно як компараторів [10]. Аналогічні пропозиції про широке використання світлодіодних джерел для метрологічних цілей є і за кордоном [11].

У підсумку слід зазначити, що однією із причин модернізації еталона сили світла, що почалася, є необхідність створення основи для метрологічного забезпечення періодичних та імпульсних джерел випромінювання, а світлодіоди чудово підходять для створення періодичних та імпульсних джерел випромінювання. Все це разом дозволяє стверджувати, що застосування світлодіодів для метрологічного забезпечення світлових вимірювань в Україні є перспективним.

Список літератури

1. *Купко А.Д.* Эталон единицы силы света в Украине / А.Д. Купко, Л.А. Назаренко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2001. – № 1. – С. 15–26.
2. *Купко А.Д.* Использование трап-детектора для световых измерений / А.Д. Купко // Український метрологічний журнал. – 2008. – №1.– С. 24–29.
3. Державний первинний еталон одиниць спектральної густини енергетичної яскравості, спектральної густини сили випромінювання та спектральної густини енергетичної освітленості; потужності випромінювання та енергетичної освітленості / М.В. Гур'єв, В.Л. Каштаньєр, О.Д. Купко, Л.А. Назаренко // Там само. – 2006. – № 4. – С. 28–38.

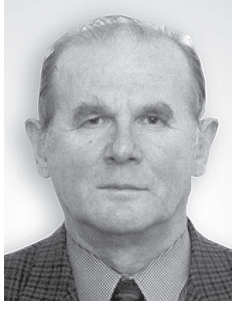
4. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання спектральних, інтегральних і редукованих коефіцієнтів спрямованого пропускання, дзеркального та дифузного відбиття в діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 25,0 мкм: ДСТУ 7122:2009. – [Чинний від 2011-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України.
5. *Бронштейн И.Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
6. *Тихонов А.Н.* Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Арсеньев. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
7. *Купко А.Д.* Влияние аппаратной функции монохроматора на точность спектрорадиометрических измерений / А.Д. Купко // Український метрологічний журнал. – 2000. – № 4. – С. 57–61.
8. Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик: ГОСТ 23198–94. – [Дата введения 1996-01-01]. – Минск: Изд-во стандартов, 1994. – 121 с. – (Межгосударственный стандарт).
9. *Тиходеев П.М.* Световые измерения в светотехнике (фотометрия) / П.М. Тиходеев. – Л.–М.: Гл. ред. энергетич. лит-ры, 1936. – 465 с.
10. *Купко А.Д.* Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине / А.Д. Купко, Л.А. Назаренко // Светотехника. – 2001. – № 5.– С. 38–40.
11. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP), Chinese Academy of Sciences (CAS). Accepted Article Preview: Tomi Pulli Advantages of white LED lamps and new detector. technology in photometry / Tomi Pulli, Timo Donsberg, Tuomas Poikonen, Farshid. Manoocheri, Petri Karha, and Erkki Ikonen // Received 12 December 2014; revised 22 May 2015; accepted 27 May 2015; accepted article preview 1 June 2015.

УДК 628.98

МЕЗОПІЧНА ФОТОМЕТРІЯ

Л.А. Назаренко, *доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова (ХНУМГ)*

Т. В. Можаровська, *аспірант ХНУМГ, м. Харків*



Л.А. Назаренко

Т. В. Можаровська

Показано систему мезопічної фотометрії як нову базу для проектування систем вуличного та дорожнього освітлення. Описано скотопік/фотопік (S/P) відношення, що є показником кількості енергії в короткохвильовій області спектра джерела світла. Наведено способи визначення функції спектральної світлової ефективності для присмеркової фотометрії. Відзначено необхідність подальшого вдосконалення системи мезопічної фотометрії.

The system of mesopic photometry as a new basis for the design of street and road lighting has been reported. Scotopic/photopic (S/P) ratio, which is the measure of the amount of energy in the short-spectrum light source have been described. The method to determining the function of spectral efficiency for twilight photometry has been presented. The needs for further improvement of mesopic photometry have been noted.

Крім добре відомих денного і нічного існує ще один режим зору, який займає проміжне положення між фотопічним та скотопічним зором і називається мезопічним (присмерковим). Рівні яскравості присмеркового діапазону типові для вуличного освітлення у нічний час або у приміщеннях з аварійним чи охоронним освітленням.

Довгий час не існувало узгодженого Комітетом Міжнародної комісії з освітлення (МКО) методу оцінки візуальної ефективності джерел світла в цьому діапазоні. В 90-х рр. минулого століття було запропоновано підхід, який ставив метою забезпечити узгодження з існуючою фотометричною теорією. Шукана функція повинна відповідати денній та нічній функціям спектральної чутливості ока на границях присмеркового діапазону. Основною перешкодою при розробці системи присмеркового зору є надзвичайна складність зорового апарату людини. Спектральна чутливість ока визначається не тільки яскравістю, але й розміром, часом адаптації,