УДК 628.984(045)

[1]**А. Б. Зюзіна-Зінченко,** асп.,
[2]**Є. В. Ковальський,** асп.

ПІДВИЩЕННЯ ІНДЕКСУ КОЛЬОРОПЕРЕДАЧІ СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ НА ОСНОВІ СВІТЛОДІОДІВ

[1]Національний авіаційний університет, e-mail: a.b.zinchenko@gmail.com
[2]Національний авіаційний університет, e-mail: 1286113@gmail.com

Досліджено основні способи створення напівпровідникових джерел білого світла та шляхи підвищення індексу кольоропередачі світлових приладів на їх основі як показника якості кольоропередачі освітлювальних систем.

Ключові слова: індекс кольоропередачі, світлодіод, λ-перетворювач, світлова ефективність, колірна температура.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Штучне світло забезпечує можливість орієнтації в просторі, певний рівень зорової працездатності та психофізіологічної активності. Воно дозволяє створювати комфортне світлове середовище для роботи та відпочинку. Тому вкрай гостро стоїть питання якості кольоропередачі.

Характеристикою джерел білого світла, що визначає якість кольоропередачі, є індекс кольоропередачі (CRI – color rendering index або Ra). Він описує здатність джерел світла (ДС) передавати реальні кольори об'єктів, що освітлюються ними.

Натепер індекс кольоропередачі – це єдина визнана на міжнародному рівні система оцінювання кольоропередачі, яка дає споживачу хоча б деякі орієнтири. Однак слід зазначити, що в цій галузі веде роботу Державний інститут стандартів і технологій (NIST) США, який розробляє шкалу якості кольору для удосконалення існуючої системи оцінювання кольоропередачі. Проводяться довгострокові дослідження зі створення оновленої метричної системи для оцінювання якості кольору, придатної для всіх джерел світла.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Світлодіодна галузь демонструє динамічний розвиток, проте світлодіоди (СД) є відносно новими джерелами світла. Тому актуальним є створення стандартів для подальшого розвитку напівпровідникових джерел світла та випуску якісної продукції на їх основі.

Стандарти активно розробляються такими організаціями [1], як Північноамериканське співтовариство інженерів-світлотехніків (Illumination Engineering Society of North America, IESNA), організацією Underwriters Laboratory, Національним інститутом стандартів США (American National Standards Institute, ANSI), Міжнародною комісією з освітлення (МКО, International Commission on Illumination, CIE), Комітетом з твердотільних освітлюваних приладів (Solid State Lighting, SSL) і багатьма іншими.

Активно розробляє стандарти для світлодіодного освітлення МЕК (International Electrotechnical Commission, IEC). За дорученням ANSI в роботі МЕК регулярно бере участь американська Технічна консультативна група (TAG). На відміну від підходу, прийнятого в США, де стандарти напівпровідникового освітлення розробляються IESNA (для випробувань), ANSI і NEMA (для робочих параметрів) і UL, МЕК створює стандарти для систем усіх галузей застосування, аналогічних системам на основі інших освітлюваних приладів.

Методи розрахунку індексу кольоропередачі детально розглянуто в працях [2; 3]. Стандарт, розроблений МКО, «Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources» CIE 013.3-1995, описує методику оцінювання здатності досліджуваного джерела випромінювання до передачі кольорів, яка виконується шляхом

його порівняння з еталонним джерелом світла. Ключові документи з цього напряму, опубліковані останнім часом: технічні звіти CIE 177-2007 (TC1-62) «Кольоропередача білих світлодіодних джерел світла» та CIE TC1-69 «Якість відтворення кольору (новий індекс кольоропередачі)».

Проте в нормативній літературі не описуються методи підвищення значення індексу кольоропередачі. Світові видання перенасичені публікаціями про саме поняття індексу кольоропереді, трапляються також праці з порівнянням цього показника різних джерел світла. Однак лише деякі виробники подають інформацію про способи підвищення індексу кольропередачі в реальних світлових приладах (СП).

Постановка завдання. Дослідження та узагальнення методів підвищення індексу кольоропередачі напівпровідникових джерел світла та світлових приладів, визначення переваг та недоліків кожного зі способів.

Виклад основного матеріалу. Значення індексу кольоропередачі світлодіодного джерела світла напряму залежить від способу формування білого світла у ньому. Основні методи створення світлодіодів білого світла показано на рис. 1 [4].

Рис. 1. Способи формування білих світлодіодів

Змішування випромінювання декількох світлодіодів. Перший спосіб полягає в змішуванні випромінювання двох джерел, що мають вузькі спектральні лінії, – комплементарні довжини хвиль (додаткові кольори). Сформувати високоякісні джерела білого світла на принципі адитивного змішування двох комплементарних кольорів майже неможливо. Двоколірні джерела білого світла, як правило, мають найвищі значення світлової ефективності, але найгіршу кольоропередачу.

Усі високоякісні джерела білого світла побудовані зазвичай на принципі змішування трьох (або навіть більшої кількості) основних кольорів. Для досягнення високих індексів кольоропередачі (CRI = 90–95) найбільш придатними є довжини хвиль λ_1 = 450–455 нм, λ_2 = 525–535 нм і λ_3 = 600–615 нм. Уширення спектральних ліній випромінювання також призводить до підвищення індексу кольоропередачі.

Чотири- та п'ятиколірні джерела білого світла створюються на основі світлодіодів чотирьох та п'яти кольорів відповідно. Проте збільшення кількості світлодіодів різного типу часто призводить до зниження світловіддачі. Такі джерела білого світла мають вищий індекс кольоропередачі, але меншу світлову ефективність випромінювання порівняно з триколірними.

λ-перетворювачі. Перетворювачі довжини хвилі створюють на основі люмінофорів, напівпровідників і барвників.

Найпоширеніші джерела білого світла створюються на основі напівпровідникових світлодіодів, випромінювання яких повністю або частково використовується для оптичного збудження одного або декількох люмінофорів.

Люмінофори мають різні за довжинами хвиль максимуми поглинання та випромінювання. Вони вирізняються високою стабільністю, а їх квантовий вихід часто наближається до 100 %.

Люмінофори складаються з неорганічних матеріалів, легованих оптично активними елементами. Товщина шару люмінофора і його концентрація в епоксидній смолі визначають співвідношення інтенсивностей двох типів випромінювання, що дозволяє оптимізувати такі характеристики СД, як світлова ефективність та індекс кольоропередачі.

Як джерела оптичного випромінювання використовують СД ультрафіолетового та видимого (найчастіше синього) діапазонів довжин хвиль.

Джерела білого світла, створені на основі УФ-світлодіода та люмінофора, мають значення індексу кольоропередачі від 60 до 100. Видима частина спектра випромінювання таких СД визначається тільки випромінюванням люмінофорів, тому вони вирізняються досить якісним відтворенням оптичних спектрів, що свідчить про відпрацьовану технологію. Проте цей спосіб утворення білого світла пов'язаний з принциповими втратами енергії. Крім того, ефективність джерела випромінювання зменшується, оскільки різні люмінофори мають різні спектри збудження люмінесценції, які не точно відповідають УФ-спектру випромінювання кристала СД. Їх істотним недоліком є сильний стоксів зсув.

У разі використання СД синього випромінювання склад кристала з гетероструктурами на основі InGaN/GaN підбирають таким чином, щоб його спектр випромінювання відповідав спектрам збудження люмінофорів. Кристал покривають шаром гелю з порошком люмінофора так, щоб частина голубого випромінювання збуджувала люмінофор, а частина – проходила без поглинання. Форму тримача, товщину шару гелю і форму пластикового купола розраховують і ретельно підбирають, щоб випромінювання мало білий колір в потрібному тілесному куті.

На відміну від RGB-світлодіодів відтінок білих СД з люмінофорним покриттям задається в процесі їх виробництва. Недоліки СД з люмінофорним покриттям – менша, ніж у RGB-матриць, світловіддача через перетворення світла в шарі люмінофора, трудність нанесення рівномірного за товщиною покриття і, як наслідок, неконтрольована колірна температура, крім того, люмінофор старішає швидше за СД.

Однорідність кольору і ефективність джерел білого світла також сильно залежать від просторового розташування люмінофора. Є два варіанти розташування люмінофора в середині джерела: близьке та віддалене.

Технологія ближнього розташування люмінофора. Частинки люмінофора розчиняються в епоксидній смолі, яка потім розподіляється по чаші відбивача. Один з варіантів ближнього

розташування є комфортне розташування люмінофора, тобто шар люмінофора наноситься в процесі формування напівпровідникової структури, а не під час складання ДС. Основний недолік ДС з ближнім розташуванням люмінофора – поглинання його випромінювання напівпровідниковим кристалом. У структурах з віддаленим люмінофором істотно знижується імовірність потрапляння випромінювання на напівпровідниковий кристал з низькою відбивною здатністю.

Джерело білого світла формують також на основі СД та напівпровідникових перетворювачах довжин хвиль. Принцип роботи напівпровідникових λ-перетворювачів: частина фотонів, випущених світлодіодом синього випромінювання на основі InGaN, поглинаються вторинною активною ділянкою AlInGaP, що призводить до повторного випромінювання фотонів. Вторинно випущені фотони мають меншу енергію, ніж початкові. У процесі створення білого світла між інтенсивностями випромінювання обох складових потрібно підтримувати точне співвідношення. Вибираючи оптимальні значення робочих довжин хвиль для досягнення максимальної ефективності пристроїв, необхідно враховувати енергетичні втрати від перепоглинання фотонів.

Нині є багато напівпровідників, придатних для побудови перетворювачів довжин хвиль. На основі три- та чотирикомпонентних твердих розчинів напівпровідників можна створити перетворювачі, що працюють майже на будь-якій довжині хвилі випромінювання видимого спектра.

Барвники – ще один тип матеріалів для створення перетворювачів довжин хвиль. Органічні молекули барвників вбудовуються в герметик з епоксидної смоли чи в оптично прозорі полімери. Натепер випускають багато марок різноманітних барвників, що характеризуються відносно невеликою різницею між спектрами поглинання та випромінювання, а після деякої кількості актів поглинання фотонів молекули барвників «обезбарвлюються», тобто їх оптична активність знижується. Тому довготривала стабільність їх характеристик набагато нижча, ніж напівпровідників та люмінофорів.

Узагальнені значення індексів кольоропередачі для кожного зі способів утворення джерел білого світла на основі світлодіодів наведено в таблиці.

Показники індексу кольоропередачі

Метод створення світлодіода білого світла	Індекс кольоропередачі
Змішування випромінювання двох світлодіодів	60–80
Змішування випромінювання трьох світлодіодів	80–95
Змішування випромінювання чотирьох світлодіодів	85–100
Використання люмінофорів	60–95
Використання напівпровідників	60–95
Використання барвників	75–95

Видно, що найвищі показники індексу кольоропередачі мають джерела білого світла на основі змішування випромінювання чотирьох світлодіодів.

Методи підвищення індексу кольоропередачі світлодіодних СП [5].

1. Розширення спектра випромінювання світлодіода методом градієнтної зміни хімічного складу основної композиції люмінофора.

Щоб збільшити внесок червоного випромінювання, додають червоний фосфор або інші матеріали до складу люмінофора. Така конструкція дозволяє підвищити значення індексу кольоропередачі до 80.

Перевага цього методу – немає потреби змінювати конструкцію світлодіода, недоліки – додання червоного фосфору зазвичай позначається на яскравості СД, її зниження на 10–15 % відбувається за рахунок меншої ефективності перетворення через сильний стоксів зсув.

Після 2–3 тис. год роботи такого приладу через теплові процеси концентрація червоного фосфору зменшується, в результаті чого значення індексу кольоропередачі також знижується.

Застосування цієї технології дає змогу збільшити значення індексу кольоропередачі в досліджуваному зразку до позначки 75, що проілюстровано на рис. 2.

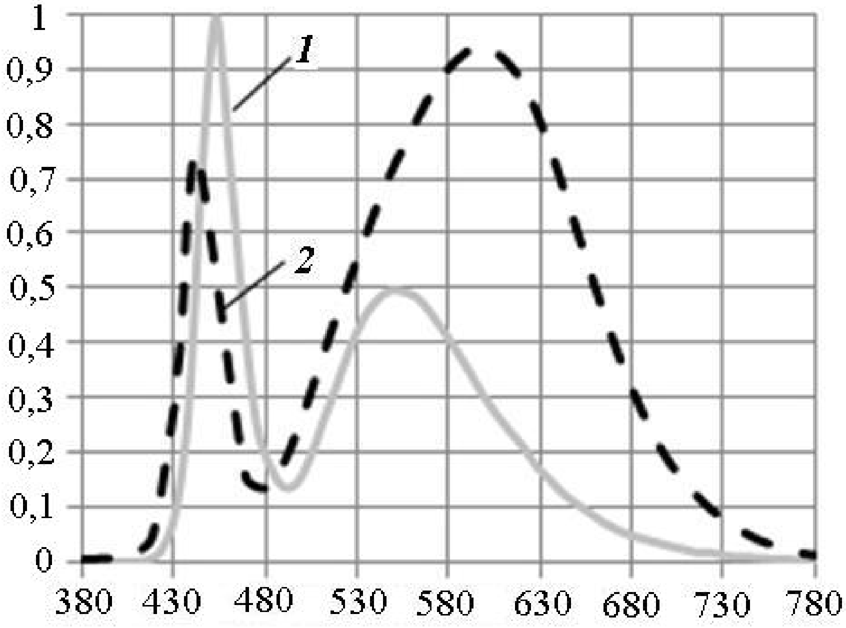

Рис. 2. Розподіл спектрів випромінювання досліджуваних зразків:
1 – зразок 1 (CRI = 70), *2* – зразок 2 (CRI = 75)

Досліджувані зразки – світлодіоди білого кольору випромінювання одного виробника та однієї партії. У спектрі випромінювання досліджуваного СД (зразок 1) домінував синій колір (430–480 нм). При доданні червоного фосфору (зразок 2) спостерігалось збільшення випромінювання в жовто-червоній ділянці спектра (580–630 нм) і, як результат, підвищення індексу кольоропередачі.

2. Уведення червоних світлодіодів у масив з холодними білими світлодіодами, які утворюють один модуль. Перевагами цього методу є можливість регулювати колірну температуру контролюванням інтенсивності червоних діодів, недоліки – більш складна конструкція СП, яка потребує керування двома різними типами світлодіодів в одному СП.

У практичних застосуваннях цей метод незручний, оскільки необхідно мати декілька джерел різної напруги, багато контактних виводів і пристроїв для змішування та фокусування світла від декількох СД. Через аберацію оптичної системи колір у центрі та на краях матриці різний, а головне – через нерівномірне відведення тепла світлодіоди нагріваються по-різному. У результаті їх випромінювання в процесі старіння змінюється – сумарна колірна температура і колір у процесі експлуатації «пливуть». Це явище досить важко і дорого компенсувати.

У процесі експерименту використовувались СД білого та червоного випромінювань з однаковими електричними параметрами (рис. 3), тому немає потреби мати декілька джерел різної напруги. Збільшувалась кількість червоних світлодіодів в одному модулі, у результаті чого початкове значення CRI збільшилося від 74 до 79 при додаванні 14 % червоних світлодіодів від загальної кількості.

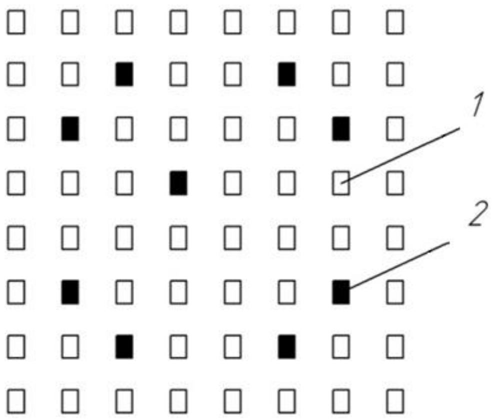

Рис. 3. Схема розташування червоних світлодіодів у модулі: *1* – білий СД; *2* – червоний СД

Колірна температура змістилася з позначки 6490 до 6020 зі збільшенням кількості червоних світлодіодів, тому випромінювання СП – «тепліше». На рис. 4 показані спектри випромінювання досліджуваних зразків.

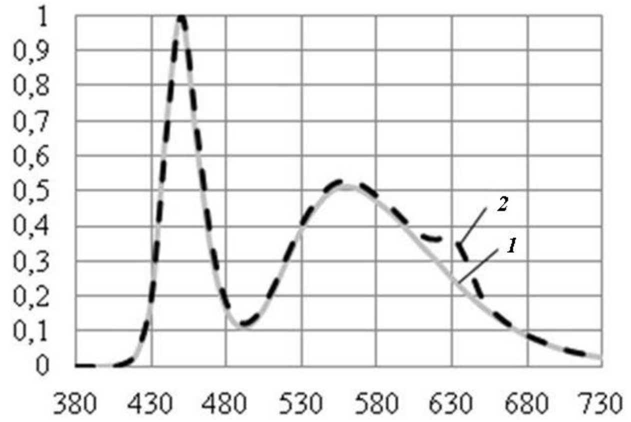

Рис. 4. Розподіл спектрів випромінювання досліджуваних зразків:
1 – зразок 1 (CRI = 74, T_c = 6494), *2* – зразок 2 (CRI = 79, T_c = 6024)

3. Додання в структуру двоколірного світлодіода іншого джерела для перепоглинання фотонів. Недоліком цього методу є те, що розширення спектральних ліній і введення додаткових ліній знижує світлову віддачу і світлову ефективність випромінювання приладу.

4. Уведення спеціального шару скла (світлофільтра) у конструкцію світлового приладу або ж його розташування безпосередньо після шару люмінофора. Ця технологія полягає у включенні світлофільтра в різні частини СП або ж безпосередньо у склад ДС. Така варіація дещо ускладнює процес конструювання СП на основі світлодіодів. Товщина та прозорість шарів світлофільтра може бути змінною і підбирають її конкретно для кожного випадку. Недоліком є дещо знижена світлова ефективність, проте індекс кольоропередачі може бути значно збільшений, а колірна температура зміститься в більш «теплий» діапазон (у досліджуваних зразках значення колірної температури змінилося від 7000 до 4400 К).

Необхідно підтримувати параметри світлодіода на сталому рівні, що особливо важливо для джерел білого світла на основі трьох, чотирьох та п'яти світлодіодів, оскільки через порівняно вузький діапазон довжин хвиль випромінювання, за яких можливі високі індекси кольоропередачі, стабільність характеристик таких джерел світла залежить від зміни температури переходу та навколишнього середовища. У результаті зі зміною температури змінюються координати колірності джерела білого світла, створеного на основі світлодіодів.

Зміщення координат колірності можна усунути відношенням потужностей світлодіодів, якого можна досягти двома способами: 1) постійним вимірюванням спектра

випромінювання, на основі даних якого система зворотного зв'язку коригує оптичну потужність кожної складової результуючого випромінювання; 2) коригуванням відстежувати температуру джерела і за відомими температурними залежностями характеристик використовуваних світлодіодів коригувати потужність випромінювання всіх компонентів результуючого випромінювання. Другий спосіб легший, що зумовлено простотою температурних вимірювань. Проте цим способом неможливо компенсувати зміну характеристик приладу через його старіння.

Висновок. Індекс кольоропердачі можна вважати одним з інформаційних параметрів для оцінювання якості світла світлодіодних виробів і освітлювальних систем на їх основі.

Проведені дослідження дають змогу стверджувати, що серед розглянутих методів підвищення значення індексу кольоропередачі неможливо виділити лише один. Світлова віддача джерел білого світла знижується зі збільшенням кількості використаних кольорів для формування випромінювання, багато важить точність підбору довжин хвиль, що формують випромінювання.

Для практичного використання цих методів слід враховувати не тільки їх переваги та недоліки, але і доступність їх впровадження та інші характеристики світлового приладу.

Список літератури

1. *Стандартизация*. Путь к успеху светодиодных средств освещения [Электронный ресурс] // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2011. – № 6. – Режим доступу: www.esco-ecosys.narod.ru/2011_6/art177.htm
2. *Wyszecki G.* Color Science - Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae / G. Wyszecki, W.S. Stiles. – [2nd edition]. – New York: John Wiley and Sons, 2000. – 968 p.
3. *Method* of Measuring and Specifying Color-Rendering of Light Sources: CIE 13-3:1995. – Official publication. – Vienna: International Commission on Illumination, 1995. – 20 p.
4. *Шуберт Ф.* Светодиоды / Ф. Шуберт; [пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича]. – [2-е изд.] – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
5. *Никифоров С. Г.* Реальный цвет и виртуальный индекс его передачи / С. Г. Никифоров // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 2. – С. 18–24.

А. Б. Зюзина-Зинченко, Е. В. Ковальский

Повышение индекса цветопередачи световых приборов на основе светодиодов

Исследованы способы создания полупроводниковых источников белого света и пути повышения индекса цветопередачи световых приборов на их основе как показателя качества цветопередачи осветительных систем.

A. B. Zyuzina-Zinchenko, E. V. Kovalskyi

Improvement of color rendering index of luminaires based on LEDs

The methods of creating of semiconductor white light sources and the ways to improve their CRI as an indicator of color quality are investigated.