

УДК 620.9.004.18

А.О. МОРОЗОВ*, В.П. КЛИМЕНКО*, **В.Б. КОРБУТ***, М.Г. ІЄВЛЄВ*, В.Г. БУТКО***ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ**

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Стаття присвячена аналізу енергозберігаючих систем світлодіодного освітлення. Розглянуто світлодіоди як джерело світла, принцип їх роботи і конструкцію. Наведені основні характеристики світлодіодів, методи їх вимірювання. Представлені тепловий розрахунок світлодіода, схеми і джерела живлення світлодіодних освітлювальних пристроїв, методи обчислення освітленості об'єктів. У статті також розглянуті основні результати розробки і впровадження енергозберігаючих світлодіодних систем освітлення, одержані Інститутом проблем математичних машин і систем НАН України за останні 7 років.

Ключові слова: енергозбереження, світлодіод, освітлювальні системи, освітлювальні пристрої, освітленість.

Аннотация. Статья посвящена анализу энергосберегающих систем светодиодного освещения. Рассмотрены светодиоды как источник света, принцип их работы и конструкция. Приведены основные характеристики светодиодов, методы их измерения. Представлены тепловой расчет светодиода, схемы и источники питания светодиодных осветительных устройств, методы вычисления освещенности объектов. В статье также рассмотрены основные результаты разработки и внедрения энергосберегающих светодиодных систем освещения, полученные Институтом проблем математических машин и систем НАН Украины за последние 7 лет.

Ключевые слова: энергосбережение, светодиод, осветительные системы, осветительные устройства, освещенность.

Abstract. The article is devoted to the analysis of energy saving LED lighting systems. The LEDs are considered as a source of light, the principle of their operation and design. The main characteristics of LEDs and methods of their measurement are given. The thermal calculation of the LED, circuits and power supplies of LED lighting devices, methods of calculating the illumination of objects are presented. The main results of the development and implementation of energy saving LED lighting systems, obtained by the Institute of Mathematical Machines and Systems of NAS of Ukraine for the last 7 years are regarded in the paper.

Keywords: energy saving, LED, lighting systems, lighting devices, illumination.

1. Вступ

Енергозбереження – пріоритетний напрям державної політики України. Основи політики енергозбереження викладені в законі «Про енергозбереження» від 01.07.1994 № 74/94-ВР, Комплексній державній програмі «Енергозбереження в Україні на 2005–2020 рр.» та Державній цільовій науково-технічній програмі «Розробка і впровадження енергозберігаючих світлодіодних джерел світла та освітлювальних систем на їх основі».

Одним із суттєвих напрямів енергозберігаючої політики України є економія електроенергії, яка витрачається на освітлення. Із всієї електроенергії на освітлення в Україні витрачається близько 30%.

За останні роки досягнення в галузях фізики і оптоелектроніки сприяли створенню світлодіодних джерел світла з енергоефективністю, що в 8–12 разів перевищує енергоефективність ламп розжарювання та в 3–4 рази енергоефективність газорозрядних ламп.

Згідно з прогнозами закордонних експертів, вже в найближчі роки світлодіоди у значній мірі витиснуть звичайні лампи, використання яких буде заборонено законодавст-

вом. Впровадження в Україні світлодіодних джерел світла дозволить значно зменшити витрати на освітлення (до 10–15% від загальних витрат електроенергії).

Таким чином, впровадження світлодіодних систем освітлення є актуальною задачею. Світлодіодні системи у порівнянні з традиційними системами дозволяють суттєво зменшити витрати електроенергії, зменшити витрати на обслуговування за рахунок значно більшої надійності та терміну експлуатації світлодіодних джерел світла, забезпечити високу якість освітлення.

2. Аналіз енергозберігаючих систем світлодіодного освітлення

2.1. Світлодіоди як джерело світла. Принцип роботи і конструкція

Світлодіод – це напівпровідниковий прилад некогерентного випромінювання в оптичному діапазоні довжин хвиль, принцип дії якого ґрунтується на явищі електролюмінесценції в напівпровідниках і призначений для роботи в освітлювальних пристроях, пристроях відображення інформації, оптопарах та волоконно-оптичних лініях зв'язку [1–3].

Світлодіоди можна створювати на основі $p-n$ переходів, переходів метал-напівпровідник і гетеропереходів. Електролюмінесценція у світлодіодах може спричинятися збудженням унаслідок лавинного помноження носіїв у $p-n$ переході і унаслідок тунелювання носіїв через $p-n$ перехід при прямому і зворотному зміщеннях. Однак у світлодіодах використовується інжекційне збудження люмінесценції. При прямому зміщенні $p-n$ переходу в області p і n інжектується велика кількість неосновних носіїв, які виявляються у збудженому стані й інтенсивно рекомбінують.

Оскільки око людини чутливе до випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0,78–0,38 мкм, то напівпровідникові матеріали для світлодіодів повинні мати ширину забороненої зони в межах 1,58–3,2 еВ.

Найбільш імовірна випромінювальна рекомбінація у прямозонних напівпровідниках, в яких відбуваються переходи типу зона-зона. До таких матеріалів належать, наприклад, GaAs, InP. У непрямоzonних напівпровідниках імовірність випромінювальної рекомбінації нехтовно мала.

Найбільший інтерес для утворення світлодіодів становить сполука $GaAs_{1-x}P_x$. Це зумовлено тим, що ширина забороненої зони цього матеріалу змінюється залежно від x . У разі змінювання x від нуля до одиниці ширина забороненої зони збільшується від 1,4 до 2,7 еВ. Однак, коли $x > 0,48$, цей матеріал стає непрямоzonним і внутрішній квантовий вихід

різко зменшується.

Для збільшення внутрішнього квантового виходу в непрямоzonних напівпровідниках GaP, $GaAs_{1-x}P_x$ (якщо $x > 0,45$) вводять азот, унаслідок чого утворюються ізоелектронні екситонні центри (уловлювачі), через які відбувається випромінювальна рекомбінація. При цьому енергія кванта випромінювання відрізняється від ширини забороненої зони на енергію зв'язку екситону.

У найпростішому випадку світлодіод (рис. 1) – це плоский $p-n$ перехід з омичними контактами від бази й емітера. Емітером є сильнолегована область n , а базою – слабколегована

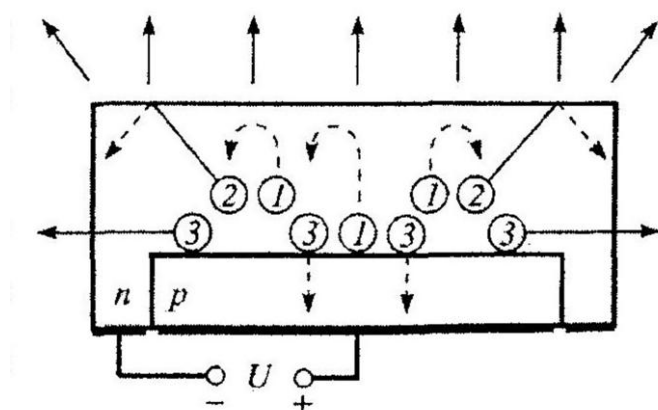


Рис. 1. Випромінювальний $p-n$ перехід. Втрати оптичного випромінювання: 1 – на власне поглинання; 2 – на повне внутрішнє відбивання; 3 – на зворотне і торцеве випромінювання

область p .

При прямому зміщенні $p-n$ переходу в базу інжектуються електрони, нерівноважна концентрація яких визначається величиною прямого струму. Випромінювальна рекомбінація відбувається, переважно, в базі біля ділянки об'ємного заряду.

Ефективність роботи світлодіода характеризується зовнішнім квантовим виходом $\eta_{\text{зов}}$, під яким розуміють відношення кількості фотонів, що вийшли за межі випромінювача, до загальної кількості носіїв, які беруть участь у рекомбінації. Зовнішній квантовий вихід $\eta_{\text{зов}}$ завжди менший від внутрішнього виходу $\eta_{\text{внт}}$.

Зменшення кількості фотонів, що вийшли в зовнішнє середовище, порівняно з кількістю, яка генерується в активній ділянці діода, зумовлено втратами на поглинання, втратами на повне внутрішнє відбивання і втратами на зворотнє і торцеве випромінювання (рис. 1).

Поглинання фотонів у напівпровіднику може бути зумовлено різними видами взаємодії.

Енергія фотона може витрачатися на переведення електронів валентної зони на вищі енергетичні рівні зони провідності, на збудження домішкових рівнів (домішкове поглинання), на нагрівання кристалічної ґратки та на інші види взаємодії.

Втрати на повне внутрішнє відбивання зумовлені заломленням світла на межі двох середовищ. У разі попадання випромінювання на межу напівпровідник-повітря під кутом, більшим від критичного, відбувається повне внутрішнє відбивання і його самопоглинання. Критичний кут для GaAs становить 16° , а для GaP – 17° .

Фотони, що генеруються в активній частині бази, випромінюються рівноймовірно у всіх напрямках, у тому числі в бік підкладки та через бокові межі (рис. 1). Вибір матеріалу підкладки принципово важливий для конструювання світлодіодів. У випадку, якщо підкладка непрозора, тоді в ній може поглинатися до 85% випромінювання. Якщо ж підкладка оптично прозора для випромінювання, то фотони, проходячи крізь неї, відбиваються від тильного контакту і, багаторазово заломлюючись, можуть вийти через випромінювальну поверхню. Це може суттєво підвищити зовнішній квантовий вихід діода. Випромінювання через торцеві грані у звичайних світлодіодах некорисне і знижує $\eta_{\text{зов}}$.

У світлодіодах для узгодження з волоконними оптичними лініями зв'язку необхідно застосовувати спеціальні заходи для посилення торцевого випромінювання. Для цього омичний контакт, який прилягає до торцевої грані, виготовляють у вигляді вузької смужки, під якою локалізується інжекція носіїв заряду і випромінювальна рекомбінація. У цьому випадку в місці виходу $p-n$ переходу на торцеву грань буде переважати торцеве випромінювання.

Плоска конструкція світлодіода вирізняється простотою виготовлення і малою вартістю, завдяки чому вони набули широкого використання в оптоелектроніці. Однак така конструкція має незначний коефіцієнт $\eta_{\text{зов}}$. Для збільшення зовнішнього квантового виходу розроблено складніші конструкції у вигляді півсфери, зрізаної сфери і параболоїда (рис. 2). У таких конструкціях кут падіння випромінювання завжди менший від критичного, тому в них майже немає втрат на повне внутрішнє відбивання. Недоліками конструкцій є складність їх виготовлення і дороговизна.

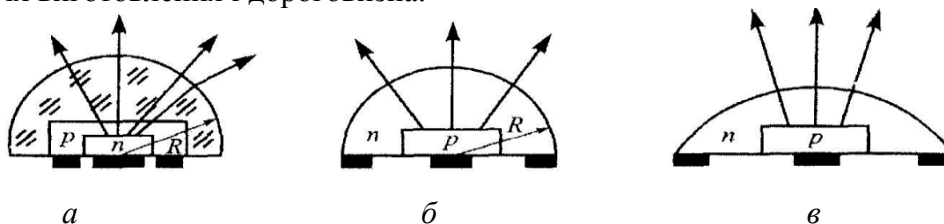


Рис. 2. Різновиди конструкцій світлодіодів:

a – площина з прозорим напівсферичним покриттям; b – напівсферична; c – параболічна

Простіший спосіб підвищення зовнішнього квантового виходу – нанесення покриттів з оптично прозорих матеріалів з необхідною геометрією, яка має великий коефіцієнт заломлення.

Тепер випускаються світлодіоди, які перекривають весь спектр довжин хвиль видимого діапазону. Окрім світлодіодів, які випромінюють у видимому діапазоні довжин хвиль, промисловістю випускаються діоди інфрачервоного випромінювання – ІЧ діоди, які утворюють на основі напівпровідникових матеріалів з шириною забороненої зони, меншою за 1,5 eV. Найбільш придатні для цього GaAs, а також сполука $Ga_{1-x}Al_xAs$. Діоди інфрачервоного випромінювання призначені передусім для випромінювачів в оптронах та у волоконно-оптичних лініях зв'язку.

У світлодіодних системах освітлення використовуються в основному білі світлодіоди, які швидко розвивалися і досягли ефективності стандартних систем освітлення.

Існують два способи отримання білого світла високої інтенсивності у світлодіодах. Перший спосіб – використання окремих світлодіодів, які випромінюють три первинні кольори, що змішуються: червоний, зелений і синій (RGB системи). Такі світлодіоди називають різноколірними білими, або RGB світлодіодами. Оскільки управління змішуванням різних кольорів і їх розповсюдженням пов'язане зі складними електрооптичними процесами, цей спосіб рідко використовується у промисловості для отримання білих світлодіодів. Проте даний метод особливо цікавий дослідникам і вченим завдяки гнучкості змішування різних кольорів.

Другий спосіб – використання люмінесцентного матеріалу для перетворення монохроматичного світла з синього або ультрафіолетового в широкий спектр білого (схожим чином працює люмінесцентна лампа). Щоб отримати біле світло, цей спосіб використовує покриття світлодіодів одного кольору (головним чином синіх світлодіодів, зроблених з InGaN) з фосфором різних кольорів. У цьому випадку світлодіоди називають фосфоробазованими білими світлодіодами. Залежно від кольору оригіналу може використовуватися фосфор різних кольорів. При цьому при застосуванні декількох люмінесцентних шарів різних кольорів спектр, що випромінюється, розширюється, ефективно збільшуючи індекс надання кольору (CRI) даного світлодіода.

Фосфорні світлодіоди мають нижчу ефективність, ніж звичайні світлодіоди, через високу температуру і проблеми деградації, пов'язані з фосфором. Проте люмінесцентний метод – все ще найпопулярніша техніка для виробництва білих над'яскравих світлодіодів. Проектування і виробництво джерел світла або освітлювальних арматур, що використовують одноколірні емітенти з люмінесцентним перетворенням, простіші і дешевші, ніж складні системи RGB. Тому більшість білих світлодіодів високої інтенсивності на ринку виконані з використанням люмінесцентного перетворення світла.

Білий світлодіод також може бути отриманий при покритті ультрафіолетових світлодіодів високоефективною сумішшю, яка створена на червоному і синьому фосфорі з добавкою зеленої міді та алюмінію, лакованого сульфідом цинку ($ZnS:Cu, Al$). Також відомий метод отримання білого світла, який не використовує фосфору взагалі і заснований на вирощеному цинковому селеніді ($ZnSe$). Ця композиція одночасно випромінює синє світло від активної області і жовте світло від основи.

Розглянемо переваги світлодіодів у порівнянні з іншими джерелами світла.

- Ефективність: світловидатність світлодіодів на один ват вища, ніж у ламп розжарювання і люмінесцентних ламп.
- Колір: світлодіоди випромінюють світло потрібного кольору без використання кольорових фільтрів, потрібних для традиційних методів освітлення. Це ефективніше і може знизити початкові витрати.
- Розмір: світлодіоди можуть бути дуже маленькими (менше, ніж 2 мм) і легко наносяться на друковані плати.

- Час реакції: світлодіоди перемикаються дуже швидко. Типовий червоний індикатор LED досягає повної яскравості в мікросекунди. У світлодіодів, які використовуються у пристроях комунікацій, можуть бути ще швидші відповіді в часі.

- Затемнення: яскравість світлодіода можна дуже легко зменшити простим зниженням рівня прямого струму.

- «Прохолодне» світло: на відміну від більшості джерел світла, світлодіоди випромінюють дуже малу кількість тепла. Енергія, витрачена на нагрів, розсіюється через тепловідводи світлодіода.

- Повільна відмова: світлодіоди виходять з ладу поступово, блякнути протягом довгого часу, на відміну від ламп розжарювання, які перегорять різко.

- Довгий термін експлуатації: у світлодіодів відносно довгий термін корисного використання. Його оцінюють в 35 000–50 000 годин, хоча час служби може бути і довшим. Час служби люмінесцентних ламп оцінюється приблизно в 10 000–15 000 годин залежно від умов використання, а ламп розжарювання – 1 000–2 000 годин.

- Опір удару: світлодіоди, які є твердотільними приладами, важко пошкодити ударивши їх, на відміну від люмінесцентних і ламп розжарювання, які достатньо крихкі.

- Токсичність: світлодіоди не містять ртуті, на відміну від люмінесцентних ламп.

Розглянемо недоліки світлодіодів.

- Висока початкова ціна: світлодіоди в даний час дорожчі. Ціна люмена на початковій стадії витрат вища, ніж у більшості інших джерел освітлення. Проте за загальною вартістю використання (включаючи витрати на електроенергію і витрати обслуговування) світлодіоди мають перевагу перед лампами розжарювання та галогеновими і, навіть, компактними люмінесцентними лампами.

- Температурна залежність: робота світлодіодів у значній мірі залежить від температури навколишнього середовища. Перегрів світлодіодів при високих навколишніх температурах може призвести до відмови пристрою. Адекватне зниження високої температури збільшить термін експлуатації. Це особливо важливо при розгляді автомобільного, медичного і військового застосування, де пристрій повинен працювати у великому діапазоні температур і обов'язково мати низький ступінь відмови.

- Чутливість до зміни напруги: світлодіоди повинні житися напругою вище порогової і струмом, нижчим за межу. Це вимагає додаткових резисторів або керованих джерел електроживлення.

- Небезпека ультрафіолету: випромінювання синіх і прохолодно-білих світлодіодів при збоях в устаткуванні може перевищити безпечні межі у специфікаціях безпеки зору.

2.2. Основні характеристики світлодіодів. Методи їх вимірювання

Випромінювальна характеристика $\Phi_e = f(I_{np})$ – залежність потоку випромінювання від прямого струму світлодіода (рис. 3). У широкому діапазоні змінювання струму характеристика лінійна. Низька ефективність випромінювання за малих прямих струмів пояснюється переважним внеском безвипромінювальної рекомбінації на поверхні та ділянці об'ємного заряду $p-n$ переходу. Із зростанням струму відбувається заповнення центрів безвипромінювальної рекомбінації і їх роль послаблюється. У діапазоні великих струмів характеристика стає сублінійною, відбувається насичення інтенсивності випромінювання. Це зумовлено тим, що за великих струмів відбувається заповнення центрів випромінювальної рекомбінації [4, 5].

Особливою випромінювальною характеристикою із суперлінійною ділянкою у разі великих струмів вирізняється суперлюмінесцентний світлодіод. У такому діоді відбувається стимульоване випромінювання і в діапазоні великих струмів його характеристика наближена до експоненціальної. Для діодів видимого діапазону на практиці частіше викори-

стовують яскравісну характеристику $L_v = f(I_{np})$. Характер цієї залежності такий самий, як і залежності $\Phi_e = f(I_{np})$.

Спектральна характеристика – $\Phi_e = f(\lambda)$ – залежність світлового потоку від довжини хвилі випромінювання. Спектральна характеристика визначає колір світіння світлодіода. Спектральні характеристики світлодіодів на основі різних матеріалів зображено на рис. 4.

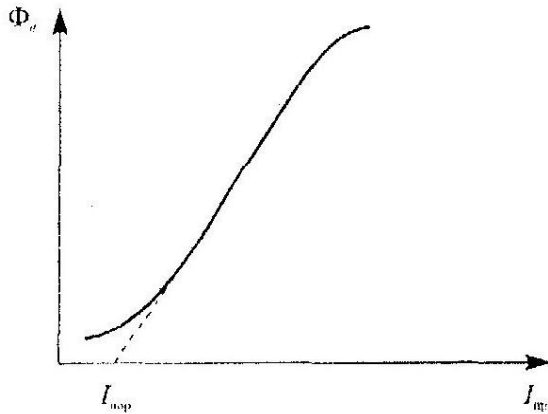


Рис. 3. Випромінювальна характеристика світлодіода

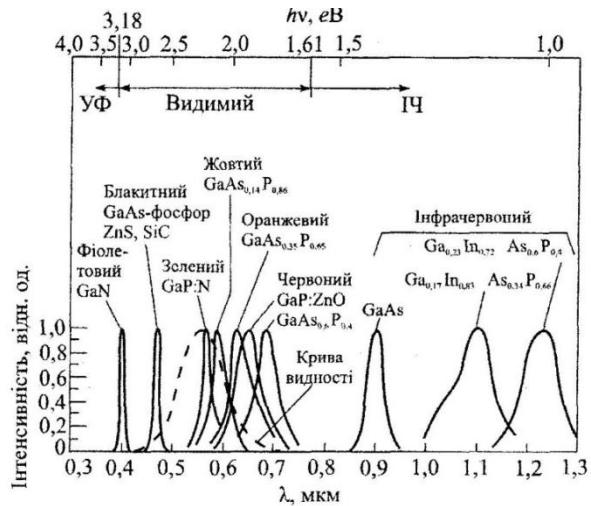


Рис. 4. Спектри випромінювання світлодіодів на основі різних матеріалів: фіолетовий (GaN), блакитний (ZnS, SiC), зелений (GaP:N), червоний (GaP:ZnO), інфрачервоний (GaAs)

Розроблено конструкції світлодіодів, у яких можна керувати кольором світіння. На рис. 5 зображено двоперехідну структуру діода з керованим світінням. У кристалі GaP утворено два $p-n$ переходи. Напівпровідники підібрано таким чином, що один перехід випромінює червоний колір, а другий – зелений. У разі змішування цих кольорів утворюється жовтий колір. Регулюючи величину струму через кожний перехід, можна змінювати колір світіння від жовто-зеленого до жовто-червоного, а також отримувати чисті (зелений і червоний) кольори.

Другою принциповою можливістю керувати кольором світіння є підбір таких домішок, які утворювали б ізоелектронні центри світіння різних рівнів. Довжина хвилі випромінювання залежить від глибини залягання цих центрів, а інтенсивність випромінювання – від величини прямого струму. Керуванням прямим струмом можна домогтися відповідного кольору світіння діода.

Діаграма напрямленості – $I_v = f(\Theta)$ – залежність сили світла від напрямку випромінювання. Форма діаграми напрямленості залежить від геометрії випромінювача. Діаграми напрямленості для різних конструкцій світлодіодів зображено на рис. 6.

Вольт-амперна характеристика – $I = f(U)$ – залежність струму через світлодіод від прикладної напруги. Пряме падіння напруги визначається шириною забороненої зони початкового матеріалу (рис. 7). Світлодіоди утворюються на основі сильнолегованих матеріалів, тому мають малу допустиму зворотну напругу. Однак це не принципово, тому що світлодіоди працюють при прямому зміщенні.

До специфічних параметрів світлодіодів належать:

– довжина хвилі випромінювання – λ_{max} (мкм) – це довжина хвилі, яка відповідає максимуму спектральної характеристики світлодіода;

- сила світла – I_v (Кд) – густина світлового потоку на одиницю тілесного кута;
- кут випромінювання – φ (град) – плоский кут, у межах якого сила світла діода I_v становить не менше 50% I_{vmax} ;
- пороговий струм – $I_{пор}$ (мА) – прямий струм діода, при якому починається помітне світіння світлодіода. Його величина дорівнює струму, який відсікається прямою апроксимацією ват-амперної (яскравісної) характеристики на осі струмів (рис. 3).

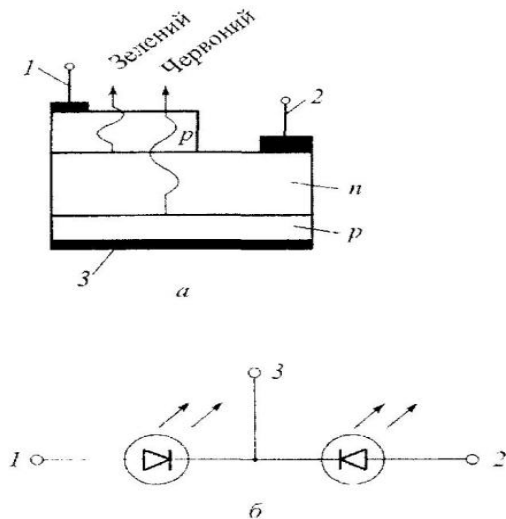


Рис. 5. Структура світлодіода з керованим кольором світіння (а) і його схема заміщення (б): 1, 2 – емітерні електроди; 3 – базовий електрод

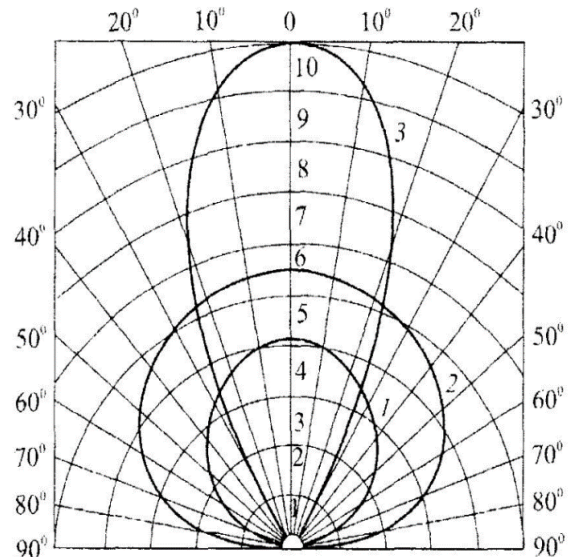


Рис. 6. Діаграма напрямленості різних конструкцій світлодіодів: 1 – плоскої; 2 – напівсферичної; 3 – параболічної геометрії

Електричні параметри світлодіода – це також пряме падіння напруги $U_{пр}$, допустимий прямий струм $I_{пр.дон}$, допустима зворотна напруга $U_{зв.дон}$, час вмикання $\tau_{вм}$ і час вимикання $\tau_{вим}$.

Час вмикання і час вимикання ($\tau_{вм}$ і $\tau_{вим}$) характеризують швидкодію світлодіода, яка визначається інерційністю процесу початку і закінчення випромінювання у разі подачі на діод прямокутного імпульсу струму. Інерційність зумовлена часом нагромадження і розсмоктування неосновних носіїв у базі діода.

Для світлодіодів, призначених для візуального відображення інформації, швидкодія не має принципового значення, оскільки інерційність людського ока значно перевищує інерційність діодів. Для роботи діодів в оптопарах та волоконно-оптичних лініях зв'язку їх швидкодія має бути якомога вищою.

Параметри світлодіодів залежать від температури. Із підвищенням температури зменшується ширина забороненої зони напівпровідника, отже, буде збільшуватися довжина хвилі випромінювання і зменшуватися потік випромінювання Φ_e .

Недоліками світлодіодів на основі гомопереходів є малий зовнішній квантовий вихід і низька швидкодія. Цих недоліків можна уникнути у світлодіодах на основі гетероструктур. Як відомо, у разі контакту двох напівпровідників з різною шириною забороненої зони утворюється електричний перехід, який має різні висоти потенціального бар'єра для електронів і дірок (рис. 8). Можуть бути підібрані такі пари напівпровідників, що інжекція носіїв заряду через перехід буде односторонньою, тобто коефіцієнт інжекції $\gamma = 1$. Причому значення коефіцієнта інжекції не залежить від концентрації носіїв у сусідніх ділянках, тобто не залежить від ступеня легування емітера і бази. А це означає, що значення коефіцієнта інжекції не залежить і від рівня інжекції в широких межах змінювання прямого стру-

му. Це дозволяє варіювати концентрацію домішок в емітері і базі, не побоюючись погіршення інжекційної здатності гетеропереходу. Емітер і база гетероструктури мають різні оптичні властивості. Спектральна характеристика вузькозонної бази виявляється зсунутою в бік довгих хвиль відносно спектральної характеристики поглинання емітера (рис. 9). Тому з виведенням випромінювання через емітер фотони майже не поглинаються.

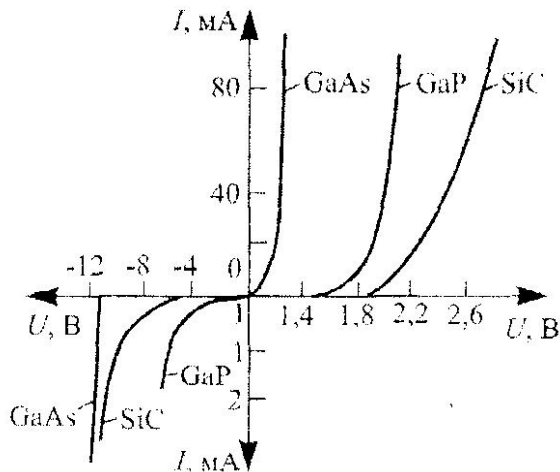


Рис. 7. Вольт-амперні характеристики світлодіодів на основі різних матеріалів

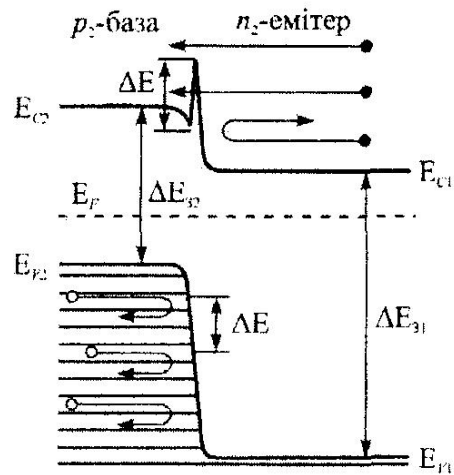


Рис. 8. Енергетична діаграма випромінювальної гетероструктури

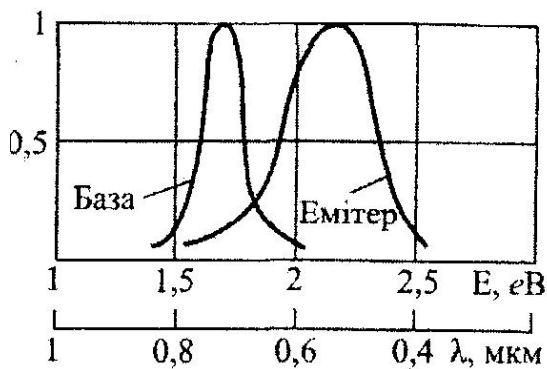


Рис. 9. Спектральна характеристика бази та емітера гетероструктури

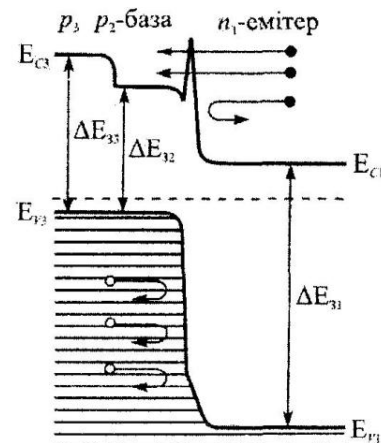


Рис. 10. Енергетична діаграма випромінювальної подвійної гетероструктури

Гетероструктури, що утворюються при контакті двох напівпровідників, називаються одинарними. Додаткові можливості мають подвійні гетероструктури на основі трьох напівпровідників (рис. 10). У таких структурах утворюються два електричні переходи: основний перехід між широкозонним напівпровідником n_1 і вузькозонним p_2 та додатковий перехід між вузькозонним напівпровідником p_2 і широкозонним p_3 . Потенціальний бар'єр додаткового переходу перешкоджає виходу інжекттованих емітером n_1 електронів, і вони нагромаджуються в базі p_2 . Таким чином, утворюється велика надмірна концентрація електронів в активній базі, що різко підвищує внутрішній квантовий вихід гетероструктури. Активну ділянку бази виконують якомога тоншою (декілька мікрометрів), що дозволяє збільшити швидкодію вдвічі порівняно зі швидкодією одинарних гетероструктур

без зменшення потужності випромінювання. Недоліком гетероструктур є складність конструкції і високі вимоги до технології виготовлення.

Сучасний ринок оптоелектронних компонентів вимагає розуміння не тільки оптичних властивостей світлодіодів, але і методів їх вимірювання.

Перелік характеристик світлодіодів, що підлягають вимірюванню, наведений нижче:

- фотометричні (світлові) характеристики;
- радіометричні (енергетичні) характеристики;
- калориметричні (спектральні) характеристики;
- гоніометричні (кутові) характеристики.

Фотометрія – це вимірювання світла в видимому спектрі. Це та частина світлового спектра, яка приблизно відповідає довжинам хвиль 380–770 нм і її видно неозброєним оком (1 ніт = 1 кд/м² або 1 стильб = 1 кд/см²), освітленість (1 люкс = 1 лм/м²) та ін. Всі вони засновані на двох основних фотометричних стандартах: світловий потік і сила світла.

Світловий потік вимірюється в люменах. 1 люмен визначається як світловий потік, що випускається точковим джерелом з силою світла 1 кандела усередині тілесного кута 1 стерадіан (1 лм = 1 кд/ср). Важливо розуміти визначення стерадіана, що є тілесним кутом (конусом) з центром у сфері радіуса r , який вирізує зі сфери поверхню площею S (рис. 11). Площа поверхні сфери рівна $4\pi r^2$, тому повний світловий потік, що створюється точковим джерелом з силою світла одна кандела, рівний 4π люменам.

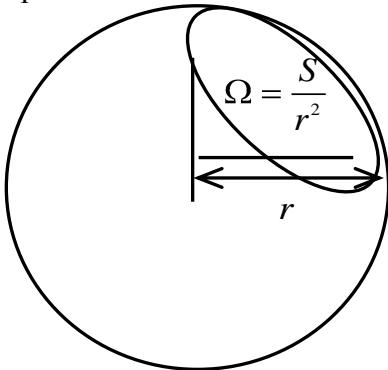


Рис. 11. Визначення стерадіана

Ще зовсім недавно світлодіоди, які випускаються промисловістю, виконували в основному індикаторні функції, і їх головною споживчою характеристикою була сила світла (у міліканделах). Проте така характеристика виявилася малокорисною при побудові систем освітлення: світлодіод з силою світла 2000 мкд і кутом випромінювання 30° забезпечує такий же світловий потік, як і світлодіод з параметрами 8000 мкд / 15°. Тому завдяки збільшенню попиту на потужні світлодіоди, які є альтернативою лампам розжарювання, зараз все частіше робиться акцент саме на величині світлового потоку.

Тобто саме люмен є більш відповідною мірою оцінки проведеного світла при порівнянні між різними джерелами світла і при виконанні розрахунків.

Для перерахунку кандел в люмени використовують такий метод:

1. Знаючи плоский кут випромінювання світлодіода θ (подвійний кут половинної яскравості), вказаний виробником, обчислюється тілесний кут:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos(\theta/2)). \quad (1)$$

2. Обчислюємо світловий потік:

$$F = I_v \cdot \Omega, \quad (2)$$

де I_v – сила світла світлодіода.

Проте фактично вимірне значення може відрізнитися від розрахункової величини із-за варіацій просторового розподілу випромінювання світлодіода. Це особливо помітно при перерахунку несиметричних діаграм спрямованості випромінювання (наприклад, світлодіодів з овальною оптикою) і індикатрис вужконаправлених світлодіодів. Річ у тому, що не існує ніякого однозначного методу перерахунку сили світла для визначення точного світлового потоку. Тільки безпосереднім вимірюванням цієї величини можна з високою точністю визначити її значення в люменах.

Радіометрія займається вимірюваннями повного світлового випромінювання в усіх оптичних діапазонах (видимому, інфрачервоному і ультрафіолетовому). Основна одиниця радіометричної оптичної потужності – ват (Вт). Ват – абсолютна величина, незалежна від довжини хвилі. Один ват інфрачервоного світла несе таку ж потужність, як один ват видимого світла. Інші вимірювані радіометричні величини – енергетична сила випромінювання (Вт/ср), енергетична освітленість (Вт/м²) і енергетична яскравість (Вт/ср·м²).

Основний метод вимірювання повної оптичної потужності заснований на використанні сферичного інтегратора. Сферичний інтегратор вимірює світло, яке випромінюється світлодіодом в усіх напрямках. Ці виміри не залежать від кута випромінювання світла і не мають кутових похибок, характерних для фотометричного тестування.

Колориметрія – наукове вимірювання і визначення кольорових характеристик світлодіодів. Колориметричні параметри світлодіодів зазвичай виражені в координатах кольоровості або в довжинах хвиль.

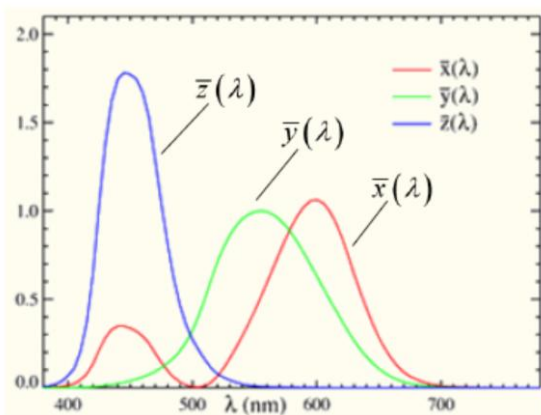


Рис. 12. Криві X, Y, Z

Колірне сприйняття людини надто складне, оскільки воно залежить не тільки від різних фізичних властивостей світла, а також і від навколишніх об'єктів, механічних властивостей випромінювача, фізіологічного відгуку ока спостерігача і його психологічного стану.

У 1931 році СІЕ були виміряні реакції на колір декількох тисяч людей і введено поняття «Стандартного спостерігача». Реакцію такого абстрактного спостерігача на кольори різного спектра описали через tristimulus – три криві, названі X, Y і Z (рис. 12).

Система tristimulus базується на умові, що кожен колір – це комбінація трьох первинних кольорів: червоного, зеленого і синього. Діаграма кольоровості СІЕ (рис. 13) отримана із значень tristimulus таким чином:

$$X = X / (X+Y+Z) \text{ або } X = \text{Червоний} / (\text{Червоний} + \text{Зелений} + \text{Синій}).$$

$$Y = Y / (X+Y+Z) \text{ або } Y = \text{Зелений} / (\text{Червоний} + \text{Зелений} + \text{Синій}).$$

$$\text{Оскільки } (X+Y+Z) = 1, \text{ третя вісь } Z = 1 - (X+Y).$$

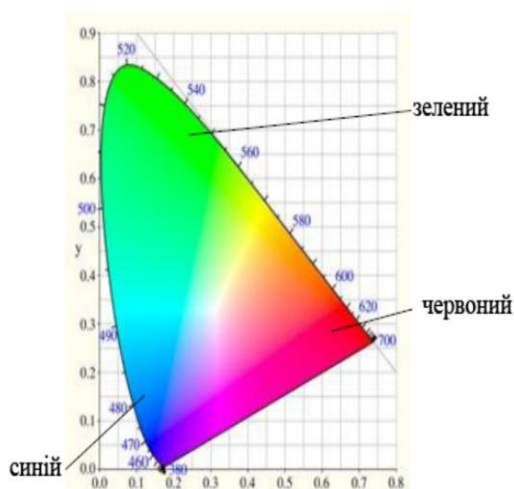


Рис. 13. Діаграма кольоровості СІЕ

Зазвичай координати кольоровості визначаються тільки осями X і Y. Але якщо світлодіод не має «білого» свічення, більшість специфікацій, що надаються виробниками, містять не координати кольоровості, а швидше пікову і домінуючу довжини хвиль. Домінуюча довжина хвилі використовується для позначення кольору в координатах СІЕ і вимірюється в нанометрах (нм). Це, по суті, колір, що фактично сприймається людським оком. Пікова довжина хвилі – це довжина хвилі максимальної спектральної інтенсивності. Пікове значення легко визначити і тому воно є найбільш частим параметром, що вказується виробниками світлодіодів. Проте пікова довжина хвилі, яка сприймається людським зором, має менше практичне значення для застосувань в області спектра: два світлодіоди можуть мати однакову пікову довжину хвилі, але будуть оцінені людиною як такі, що мають різні кольори.

У даний час існує найточніший метод вимірювання кольору з використанням спекторадіометра. Даний пристрій реєструє і вимірює спектральний розподіл потужності джерела світла, після чого можуть бути математично обчислені всі фотометричні, радіометричні і колориметричні параметри. Точність визначення устаткуванням довжини хвилі повинна бути не менше, ніж 0,5 нм (бажано 0,1 нм). Існують різні чинники, які впливають на отриманий результат. Одним із них є температура. З підвищенням температури навколишнього середовища збільшується і температура активної області світлодіода, відповідно збільшується довжина хвилі випромінювання світлодіода. Це збільшення зазвичай має значення в межах 0,1–0,2 нм/°C залежно від типу використовуваного кристала. Деякі світлодіоди, наприклад, червоного свічення, можуть демонструвати і негативну температурну залежність довжини хвилі.

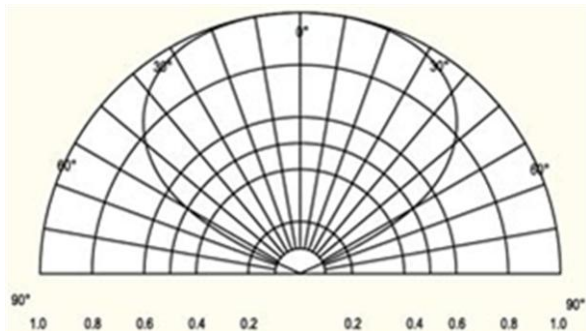


Рис. 14. Профіль випромінювання у площині

Гоніометрія займається вимірюванням кутових характеристик світлодіодів. Гоніометр – пристрій, який вимірює просторовий розподіл сили світла світлодіода (рис. 14). Суть цього методу заснована на покроковій фіксації значень сили світла світлодіода при його повороті на відомий кут, що може бути реалізоване переміщенням датчика навколо світлодіода або нахилами світлодіода відносно нерухомого датчика. Декілька вимірювань виходу світла робляться для кожного кута при виконанні обертання

від 0° до 180°. В результаті ми отримуємо профіль випромінювання в одній площині.

Оскільки більшість світлодіодів мають круглу форму лінзи, то найчастіше діаграма спрямованості випромінювання (індикатриса) є симетричною.

Багато виробників представляють таку діаграму як графічне представлення кута випромінювання світлодіода. Але різна геометрія та похибки, внесені у ході виробництва, можуть суттєво змінити їх оптичні показники. Щоб компенсувати ці похибки, треба робити виміри у декількох площинах. Особливо потребують таких вимірів світлодіоди специфічних форм (овальної або еліптичної), які мають дві діаграми випромінювання.

Такі твердотільні пристрої, як світлодіоди, практично не зношуються, якщо через них пропускається номінальний струм і експлуатація ведеться при низьких температурах. Багато світлодіодів, виготовлених ще у 70-х – 80-х рр., сьогодні все ще працюють. Типові значення терміну служби складають 25000–100000 годин, але висока температура кристала і відхилення величини струму живлення можуть значно скоротити цей термін. Найзагальніша ознака відмови – поступове зниження світловидатності і падіння ефективності. Також можуть відбуватися раптові відмови світлодіодів, хоча і рідко.

Величина і нестабільність струму сильно впливають на термін служби світлодіодів. Ще одним чинником довговічності можуть бути умови експлуатації. Зараз, на жаль, немає загальних стандартів, які визначали б термін служби і параметри надійної роботи для світлодіодів. Для визначення терміну служби світлодіодів, як правило, береться за основу час, протягом якого світловий потік знижується до певного значення (наприклад, 75% чи 50% від початкової величини).

2.3. Управління тепловим режимом світлодіода

Майже 3/4 електроенергії, споживаної світлодіодом, перетворюється в тепло і лише 1/4 – у світло. Тому при конструюванні світлодіодних світильників вирішальну роль у забезпеченні їх максимальної ефективності грає оптимізація теплового режиму світлодіодів, простіше кажучи, інтенсивне охолодження [6].

Як відомо, передача тепла від нагрітого тіла здійснюється за рахунок трьох фізичних процесів: випромінювання, конвекції, теплопровідності.

При дизайні світлодіодних світильників необхідно прийняти всі можливі заходи для полегшення теплового режиму світлодіодів за рахунок збільшення випромінювання, конвекції і теплопровідності.

Поверхня освітлювального приладу, на якій вмонтовується світлодіод або модуль з декількома світлодіодами, не повинна бути металевою, оскільки метали мають дуже низький коефіцієнт випромінювання. Поверхні світильників, які контактують із світлодіодами, повинні, по можливості, мати високий спектральний коефіцієнт випромінювання.

Для ефективного використання конвекції бажано мати достатньо велику площу поверхні корпусу світильника для безперешкодного контакту з потоками навколишнього повітря (спеціальні ребра, що охолоджують, жорстка структура і т.д.). Додаткове відведення тепла можуть забезпечити примусові заходи: мінівентилятори або вібруючі мембрани.

Через дуже невеликі площі поверхні і об'єм світлодіодів необхідне для них охолодження за рахунок випромінювання і конвекції не досягається. Тому першочергове завдання при конструюванні світлодіодних світильників – забезпечити відведення тепла за рахунок теплопровідності спеціальних елементів, які охолоджують, або конструкції корпусу. Тоді ці елементи будуть відводити тепло випромінюванням і конвекцією. Матеріали тепловідвідних елементів, по можливості, повинні мати мінімальний тепловий опір.

Позитивні результати були отримані з тепловідвідними вузлами типу «Heatpipes», що мають екстремально високі теплопровідні властивості. Один із кращих варіантів тепловідводу – керамічні підкладки із задалегідь нанесеними струмоведучими трасами, безпосередньо до яких підпаюються світлодіоди. Тепловідводи на базі кераміки відводять приблизно в 2 рази більше тепла в порівнянні із звичайними варіантами металевих елементів, що охолоджують.

Основним та визначальним параметром при теплових розрахунках є температура $p-n$ переходу світлодіода $T_{p-n \text{ перехід}}$, яку вимірюють в лабораторних умовах відомими методами. Ця температура не може перевищувати максимально допустиму $T_{\text{макс}}$, К, бо навіть при короткочасному її перевищенні в напівпровіднику відбуваються процеси, які ведуть до неправильного функціонування, а надалі і до виходу з ладу світлодіода. Температура $T_{p-n \text{ перехід}}$ зв'язана з температурою навколишнього середовища $T_{\text{середовище}}$ виразом

$$T_{p-n \text{ перехід}} = T_{\text{середовище}} + P \cdot R_{\Sigma}, \quad (3)$$

де P – споживана потужність світлодіода, $Вт$;

R_{Σ} – тепловий опір між переходом і середовищем, $^{\circ}C/Вт$.

З наведеної формули видно, що підвищення $T_{\text{середовище}}$ та P призводить до збільшення, а низький тепловий опір R_{Σ} до зменшення температури переходу при заданих умовах роботи. Тому розвиток технології виготовлення світлодіодів, з яким пов'язані проблеми як підвищення світловіддачі, так і відводу тепла, обумовлюється використанням матеріалів з низькими тепловими опорами та використанням відповідних конструктивних рішень.

Тепловий розрахунок світлодіода (або пристрою на їх основі – світлодіодного пристрою) є чи не найважливішим етапом проектування і неможливий без наявності визначених теплових параметрів, що встановлюють взаємозв'язок між потужністю, яка розсіюється конструкцією, та температурою відповідних частин пристрою. Для аналізу теплового режиму з урахуванням (по можливості) більшості теплофізичних процесів, що протікають у світлодіоді, використовуємо метод теплових опорів, для чого побудовано ві-

дповідну електротеплову модель у вигляді наведеної на рис. 15 (а, б) схеми. Модель характеризує найбільш поширену конструкцію світлодіодного пристрою, де тепло розсіюється в навколишнє середовище, проходячи від переходу через друковану плату до радіатора. Видно, що світлодіод представлений чотирма ділянками, кожна з яких характеризується своїм тепловим опором. R_{n-k} – тепловий опір між $p-n$ переходом і корпусом світлодіода (вказується в документації на світлодіод) і визначається внутрішньою конструкцією та матеріалом напівпровідникового пристрою, $^{\circ}C/Wm$ (для світлодіодів різних виробників ця величина коливається від $6^{\circ}C/Wm$ до $12^{\circ}C/Wm$). R_{k-n} – тепловий опір між корпусом і платою, визначається якістю теплового контакту між ними (пайка, теплопровідні клеї, пасти тощо); $R_{плата-радіатор}$ – тепловий опір між платою і радіатором і визначається способом контакту їх між собою. Хороший тепловий контакт забезпечується теплопровідними клеями, пастами чи прокладками з більш високою теплопровідністю, ніж у повітря.

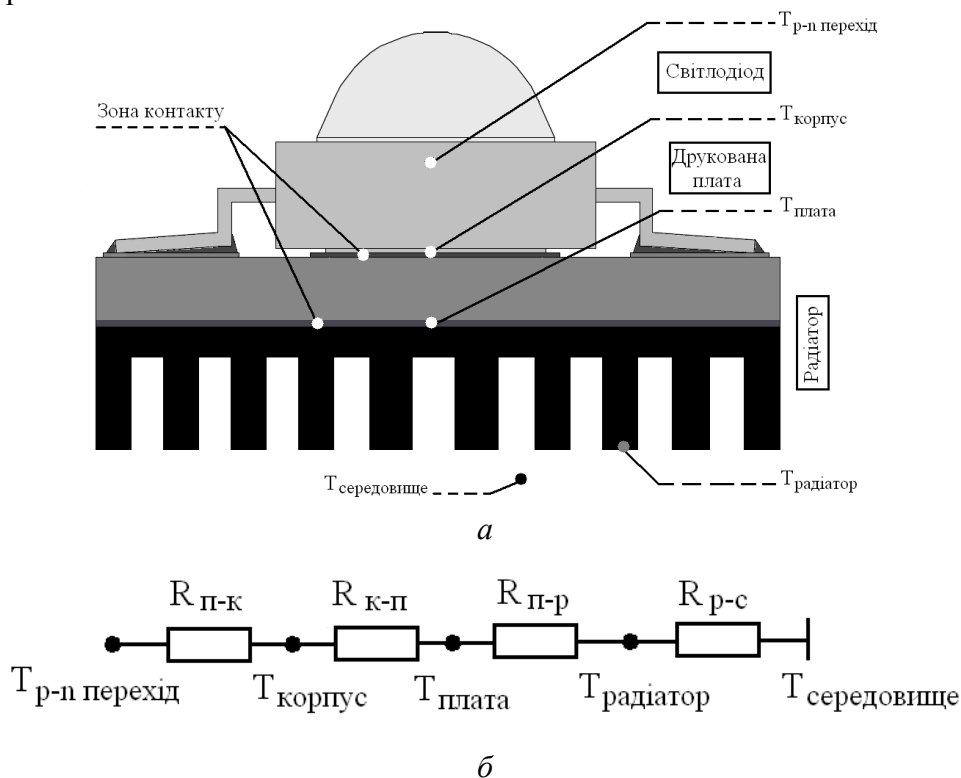


Рис. 15. Схематичне зображення світлодіода (а) і його теплова схема (б)

R_{p-c} – тепловий опір між радіатором та навколишнім середовищем і залежить від спроектованого конструктором радіатора, $^{\circ}C/Wm$.

Для відведення тепла від активної області потужного світлодіода та розсіювання його в навколишнє середовище використано друковану плату з наскрізними металізованими отворами та радіатор (рис. 16 а). Двостороння друкована плата з текстоліту має металізовану мідну площадку для пайки та наскрізні отвори діаметром 0,5 мм, які передають теплову енергію від верхньої (де саме і встановлено світлодіод) до нижньої сторони плати, що з'єднується з радіатором. Плата з наскрізними отворами потребує більш товстого шару металізації, а саме 70 мкм замість широкоживаних 35 мкм. Монтаж радіатора виконувався за допомогою теплопровідного клею з додатковим кріпленням гвинтами.

Як показали проведені дослідження, ефективним та чи не найпростішим розв'язанням задачі відведення тепла є застосування структури, поданої на рис. 16 б. Плата являє собою алюмінієву пластину товщиною від 1,5 до 2 мм з шаром діелектрика

(75...300) мкм (теплопровідність коливається від 0,5 до 5 Вт/(м·К)), що являє собою скло-тканину, просочену епоксидними смолами, на яку нанесений шар мідної фольги товщиною 35 мкм (виключно для утворення струмоведучих доріжок). Від плати тепло передається через шар теплопровідного матеріалу радіатора, розміри якого відповідають розміру металічної пластини.

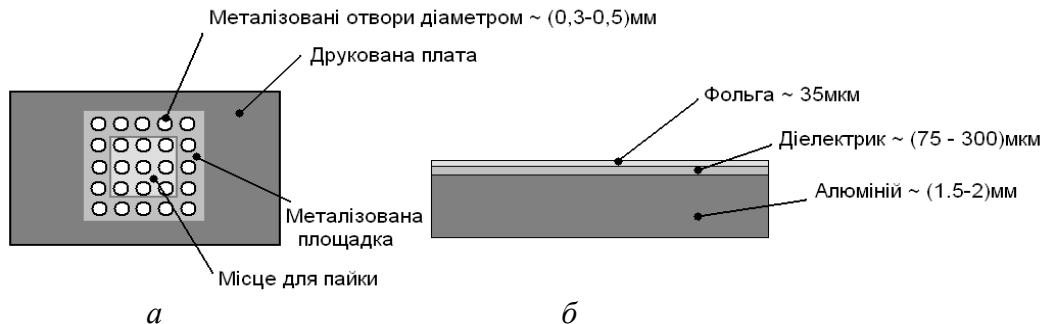


Рис. 16. Схематичне зображення друкованої плати з наскрізними отворами (а) та фольгової алюмінієвої плати (б)

Досліджувались потужні світлодіоди DORADO з представленими видами монтажу. Метою експерименту було вимірювання температури плати при тривалій роботі світлодіода. Отримані такі значення температури:

- 76,6°C – металізована друкована плата;
- 75,5°C – друкована плата з наскрізними отворами;
- 84,8°C – плата з фольгованого алюмінію.

Встановлено, що за рахунок наявності та збільшення металізованих отворів можна суттєво зменшити тепловий опір між платою і навколишнім середовищем, але не суттєво покращити тепловідвід у порівнянні з платою з фольгованого алюмінію.

Конструювання чи вибір із стандартного ряду радіаторів, що пропонуються на ринку, можна здійснити на підставі відомих емпіричних методів розрахунку за умов максимальної теплової ефективності, технологічних, вартісних та інших показників. При цьому ефективним є використання спеціальних програм, наприклад, QLED, за допомогою яких можна проаналізувати та оцінити ефективність прийнятих рішень щодо забезпечення теплового режиму пристроїв. На сьогодні широко використовують алюмінієві (голчасті і ребристі) та керамічні радіатори для діодів потужністю до 15 Вт. Для більш потужних світлодіодів (15...30 Вт) додатково використовують вентилятори чи струминну технологію обдування радіатора (наприклад, такі, що розроблені і впроваджені компанією Nuventix). Для найбільш потужних світлодіодів (десятки і сотні ват) застосовують рідинну систему охолодження. Світлодіоди потужністю менше 0,5 Вт монтують просто на текстолітову друковану плату.

Розглянемо порядок і приклад розрахунку теплового режиму потужних світлодіодів.

1. Умови роботи:

- максимальна робоча температура середовища – $T_{\text{середовище}}, ^\circ\text{C}$;
- потужність, що розсіюється на світлодіодному пристрої, Вт:

$$P = I \cdot U,$$

де I – струм, що проходить через світлодіод, А;

U – напруга на світлодіодній структурі, В.

Для групи світлодіодів:

$$P = n \cdot I \cdot U,$$

де n – кількість світлодіодів.

2. Теплові дані світлодіода:

– максимальна допустима температура $p-n$ переходу – $T_{\text{макс}}$, °C;

– тепловий опір $R_{\text{перехід-середовище}}$ (заданий у документації на світлодіод).

3. Визначимо температуру $p-n$ переходу $T_{p-n \text{ переходу}}$, виходячи з умов роботи та теплових даних світлодіода, за формулою

$$T_{p-n \text{ переходу}} = T_{\text{середовище}} + P R_{\text{перехід-середовище}}.$$

4. Робимо висновок про доцільність застосування тепловідводу в заданих умовах:

1) $T_{p-n \text{ переходу}} > T_{\text{макс}}$ – потрібно використати радіатор;

2) $T_{p-n \text{ переходу}} < T_{\text{макс}}$ – пристрій працює в заданих умовах без застосування радіатора.

5. Проектуємо радіатор згідно з відомими емпіричними формулами, виходячи із максимально допустимого теплового опору радіатор-середовище $R_{p-c \text{ доп}} \cdot R_{\text{радіатор-середовище}}$ визначається з формули температури $p-n$ переходу (3), де R_{Σ} – сумарний тепловий опір, що визначається вже як $R_{\Sigma} = R_{n-k} + R_{k-p} + R_{p-c}$. Тоді шукана величина:

$$R_{p-c \text{ доп}} = ((T_{p-n \text{ переходу}} - T_{\text{середовище}}) / P) - R_{n-k} - R_{k-p}.$$

Для групи світлодіодів:

$$R_{p-c \text{ доп}} = ((T_{p-n \text{ переходу}} - T_{\text{середовище}}) / n \cdot P) - R_{n-k} / n - R_{k-p} / n.$$

Радіатор проектується згідно з умовою $R_{p-c \text{ доп}} < R_{p-c \text{ проект}}$, де $R_{p-c \text{ проект}}$ – тепловий опір спроектованого радіатора.

При виборі того чи іншого радіатора необхідно враховувати і його масогабаритні розміри.

Як правило, виробники потужних світлодіодів монтують їх спочатку на друковану плату (наприклад, фольгована алюмінієва) і при необхідності встановлюють на додатковий тепловідвід (наприклад, алюмінієвий радіатор). При такій комбінації можливо підвищити струм через світлодіодну структуру.

6. Перераховуємо температуру $p-n$ переходу. При цьому нове значення температури $T_{p-n \text{ розрах.}}$ має задовольняти умові

$$T_{p-n \text{ розрах.}} < T_{\text{макс}}.$$

Світлодіодний пристрій готовий до роботи в заданих умовах.

Звичайно, дані розрахунки мають відповідати реальному макету, вимірявши температуру переходу, щоб розробник впевнився у правильності застосування варіанта охолодження пристрою.

Для прикладу визначимо тепловий режим світлодіода з приведеними нижче даними.

1. Умови роботи: $U=3,6 \text{ В}$, $I=700 \text{ мА}$, $P=2,52 \text{ Вт}$.

2. Теплові дані світлодіода: $T_{\text{середовище}}=40^\circ\text{C}$, $T_{\text{макс}}=125^\circ\text{C}$, $R_{\text{перехід-середовище}}=45 \text{ К/Вт}$.

3. $T_{p-n \text{ перехід}} = T_{\text{середовище}} + P \cdot R_{\text{перехід-середовище}} = 40 + 2,52 \cdot 45 \approx 153^\circ\text{C}$.

4. Так як $T_{p-n \text{ переходу}} > T_{\text{макс}}$, $153^\circ\text{C} > 125^\circ\text{C}$, то робимо висновок про необхідність використати радіатор. У нашому випадку світлодіод монтується на фольговану алюмінієву плату зі стандартним тепловим опором – $1,5 \text{ К/Вт}$, тепловий опір «корпус – плата» (площа контакту $\approx 32 \text{ мм}^2$, теплопровідність контактного матеріалу $=2,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) $R_{k-n}=1,2 \text{ К/Вт}$.

5. Як радіатор скористаємося найпростішим варіантом: пластинчастим радіатором із

алюмінію. Визначимо допустимий тепловий опір радіатор-середовище при заданих $R_{n-k} = 15 \text{ K/Wm}$, $R_{n-p} = 1,5 \text{ K/Wm}$:

$$R_{p-c \text{ доп.}} = (T_{p-n \text{ переходу}} - T_{\text{середовище}}) / P - R_{n-k} - R_{k-n} - R_{n-p}.$$

$$R_{p-c \text{ доп.}} = (125 - 40) / 2,52 - 15 - 1,2 - 1,5 \approx 16 \text{ K/Wm}.$$

Площа такого радіатора $S = 500 / 14 \approx 36 \text{ см}^2$.

Габаритні розміри такої пластини: $6 \times 6 \text{ см}$, товщина алюмінію – 2 мм . Бачимо, що для зменшення температури переходу світлодіода необхідно збільшувати розмір пластини. Звичайно, розміри радіатора треба мінімізувати в силу зменшення вартості та масогабаритних параметрів конструкції, але сам радіатор не може бути менший за габаритні розміри світлодіода чи їх групи. Тому вибираємо радіатор виробника *Aavid Thermalloy* із алюмінію розміром $26,97 \times 26,97 \times 31,75 \text{ мм}$ з потужністю розсіювання 3 Вт та тепловим опором $9,4 \text{ K/Wm}$.

6. Перерахована температура:

$$T_{p-n \text{ розрах.}} = 40 + 2,52 (15 + 1,2 + 1,5 + 9,4) \approx 108^\circ\text{C}.$$

Перевіряємо умову: $T_{p-n \text{ розрах.}} < T_{\text{макс.}}$.

$108^\circ\text{C} < 125^\circ\text{C}$ – світлодіод задовольняє задані умови, і розрахунок закінчено.

Подальші дії можуть бути спрямовані тільки на зменшення температури переходу: проектування чи вибір із каталогу радіатора з меншим тепловим опором чи застосування комбінованого методу із наявних способів тепловідведення (наприклад, алюмінієвий радіатор і вентилятор).

Вище розглянуті основні моменти забезпечення відведення тепла від активної області потужних світлодіодів. Складений порядок і проведений розрахунок теплового режиму (як важливий етап проектування світлодіодної конструкції) за допомогою методу теплових опорів дає можливість правильно вибрати тепловий режим напівпровідникових світловипромінюючих структур. Результати проведеного аналізу слугуватимуть основою для дослідження теплових режимів як окремих світлодіодів різного конструктивного виконання, так і світлодіодних пристроїв, до складу яких входять десятки та сотні світлодіодів.

2.4. Класифікація освітлювальних пристроїв

Освітлювальні пристрої (ОП) – це пристрої, які необхідним чином перерозподіляють світловий потік джерел світла у просторі. За загально прийнятою класифікацією всі ОП діляться на три класи: прожектори, світильники і прожектори [7].

Прожектори – це ОП, що концентрують світловий потік джерела світла на визначеній, чітко обмеженій площі або в певному об'ємі. Найпоширеніший приклад таких ОП – це кінопрожектори, що створюють задану освітленість тільки на певній площі екрана.

Прожектори і світильники – це світлові пристрої, призначені для освітлення певних об'єктів як усередині, так і поза приміщеннями.

Світильники – це ОП, в яких світловий потік джерел світла розподіляється усередині великих тілесних кутів. Як правило, світильники освітлюють поверхні або предмети, що знаходяться від них на достатньо близьких відстанях, сумірних з розмірами самих світильників.

Прожекторами зазвичай називаються ОП, що зосереджують світловий потік джерел світла в достатньо малих тілесних кутах і освітлюють об'єкти, які знаходяться від ОП на відстанях, що значно перевищують розміри самих ОП.

За призначенням ОП діляться на ряд груп:

- ОП для освітлення виробничих приміщень;
- ОП для освітлення адміністративних, офісних, культурно-просвітницьких та інших приміщень суспільного призначення;
- ОП для освітлення побутових приміщень;
- ОП для освітлення сільськогосподарських приміщень;
- ОП для освітлення спортивних споруд;
- ОП для функціонального зовнішнього освітлення;
- ОП для декоративного зовнішнього освітлення;
- ОП для внутрішнього освітлення засобів транспорту;
- ОП для архітектурно-художнього освітлення будівель, пам'ятників, фонтанів та ін.;
- ОП аварійного освітлення.

Кожна з цих груп у свою чергу ділиться на дрібніші підгрупи. Так, у групі ОП для освітлення виробничих приміщень можна виділити:

- ОП для освітлення приміщень з нормальним середовищем;
- ОП для освітлення приміщень з важким середовищем (запорошених, вологих, з агресивними парами);
- ОП для освітлення вибухонебезпечних приміщень;
- ОП для освітлення пожежонебезпечних приміщень.

Існує міжнародна система класифікації і позначення ОП та іншого електротехнічного устаткування за ступенем їх захищеності від дії вологи (води) і твердих частинок (пилу). Ступінь захисту позначається буквами IP (Ingress Protection – захист від проникнення) і двома цифрами.

Перша цифра показує ступінь захищеності ОП від проникнення в нього пилу і сторонніх тіл і може приймати значення від 2 до 6:

2 – оптимальний третій варіант з використанням перетворювачів із стабілізованим вихідним струмом означає, що спеціального захисту від пилу немає; забезпечений захист від проникнення твердих тіл з максимальним розміром у поперечному перетині більше 12 мм, що виключає можливість доторкання пальцями до струмоведучих елементів;

3 – захисту від пилу також немає, але виключена можливість дотику до струмоведучих елементів твердим тілом з максимальним розміром у поперечному перетині більше 2,5 мм (наприклад, викруткою);

4 – захисту від пилу немає, виключена можливість дотику до струмоведучих елементів твердими тілами з максимальним розміром у поперечному перетині 1 мм (наприклад, дротом діаметром 1 мм);

5 – забезпечений захист від попадання пороші на струмоведучі елементи і колби ламп. Повний захист від зіткнення зі струмоведучими деталями;

6 – повний захист від попадання пилу у внутрішній об'єм ОП (пиленепроникні прилади) і від зіткнень зі струмоведучими деталями.

Друга цифра в позначенні показує ступінь захисту від проникнення води в середину ОП. Ця цифра може бути від 0 до 8 і означає:

0 – ніякого захисту від попадання води немає;

1 – у класифікації ступеня захищеності не використовується;

2 – забезпечений захист від крапель води, які падають зверху під кутом не більше 15° до вертикалі (краплезахисені ОП);

3 – захист від крапель і бризок, які падають зверху під кутом до вертикалі до 60° (дощезахищені);

4 – захист від крапель і бризок, що потрапляють на прилад з будь-якого напрямку (бризкозахисені);

- 5 – захист від водяних струменів, які падають з будь-якого напрямку;
- 6 – захист від проникнення води при непостійному попаданні на ОП великих її мас;
- 7 – захист від проникнення води в середину ОП при зануренні його на певну глибину і заданий час (водонепроникні);
- 8 – захист від проникнення води при зануренні ОП у воду на необмежений час (герметичні).

Електробезпека ОП повинна забезпечувати захист людей від удару електричним струмом. Ступінь безпеки визначається наявністю та якістю електричної ізоляції струмоведучих елементів (проводів, клемних колодок, патронів), наявністю заземлення та величиною електричної напруги, в яку включений ОП.

При роботі всі джерела світла нагріваються до певної температури, залежної, перш за все, від типу, потужності і умов охолодження. Температура нагріву може бути достатньо високою: наприклад, зовнішня поверхня галогенних ламп розжарювання може нагріватися вище 400°C, поверхня ламп розжарювання загального призначення – вище 200°C, МГЛ і НЛВД – вище 300°C. Тому ОП є приладами, що створюють небезпеку виникнення пожежі в місцях їх установки. З іншого боку, небезпека виникнення пожежі залежить і від умов експлуатації ОП – типу матеріалу, на якому встановлюється ОП, наявності в освітлюваному приміщенні легкозаймистих речовин, заповненості приміщень. Для виключення ймовірності виникнення пожежонебезпечних ситуацій необхідно знати ступінь пожежонебезпечності як самих ОП, так і приміщень, в яких вони працюють. На ОП вбудованого, стельового, настінного, настільного і підлогового виконання наносяться спеціальні знаки, що характеризують їх пожежонебезпечність.

При освітленні підприємств хімічної, нафтової, газової і деяких інших галузей промисловості необхідно враховувати, що в таких місцях можуть утворюватися вибухонебезпечні суміші і світильники ні в якому разі не повинні бути джерелами виникнення вибухонебезпечних ситуацій. Для освітлення таких підприємств можуть застосовуватися тільки спеціальні світильники, конструкція яких повинна перешкоджати виникненню небезпечних ситуацій. При освітленні приміщень, де небезпека вибухів особливо велика, світильники встановлюються поза приміщеннями, а світло вводиться через спеціальні світлові отвори або за допомогою порожнистих щілинних світлопроводів.

При виборі світильників і систем освітлення в першу чергу необхідно керуватися критеріями якості освітлення, якими можна вважати:

- забезпечення нормованих кількісних параметрів освітленості;
- комфортність;
- безпека;
- надійність;
- економічність;
- легкість експлуатації;
- естетичність.

Ці критерії тісно зв'язані між собою. Важливість кожного з них визначається видом освітлюваного приміщення або об'єкта і характером виконуваної роботи.

Світлодіодні освітлювальні пристрої (СОП) найбільше відповідають усім зазначеним вище критеріям. Вони безпечні, оскільки живляться низькою напругою і виділяють, у порівнянні з іншими джерелами світла, дуже мало тепла. При використанні світлодіодів дуже легко забезпечити нормовані кількісні параметри освітленості, вибираючи потрібну кількість світлодіодів з необхідними світлотехнічними характеристиками. Комфортність освітлення легко забезпечити, використовуючи потужні білі світлодіоди з потрібним спектром випромінювання (тепло-білі, нейтрально-білі, «денного» спектра або холодно-білі). Крім того, світлодіоди фірми Cree можуть відбиратися ще й у середині цих чотирьох груп з меншою або більшою кольоровою температурою.

Про надійність і економічність світлодіодних освітлювальних пристроїв широко відомо. Зараз строк безвідмовної роботи СОП залежить не від строку служби світлодіодів, а від надійності їх джерел живлення.

Естетичність світлодіодних освітлювальних пристроїв досягається використанням конструктивів світильників, призначених для інших джерел світла. Зазвичай більшість цих конструктивів дозволяє розмістити в них достатню кількість світлодіодів і відповідне джерело живлення.

2.5. Схеми і джерела живлення світлодіодних освітлювальних пристроїв

Кристал світлодіода починає випромінювати, коли в ньому протікає струм у прямому напрямку. Світлодіоди мають експоненціально зростаючу вольт-амперну характеристику. Зазвичай вони живляться постійним стабілізованим струмом або постійною напругою з послідовно включеним обмежуючим опором. Це запобігає небажаним змінам номінального струму, які впливають на стабільність світлового потоку, а у гіршому разі можуть навіть призвести до пошкодження світлодіода.

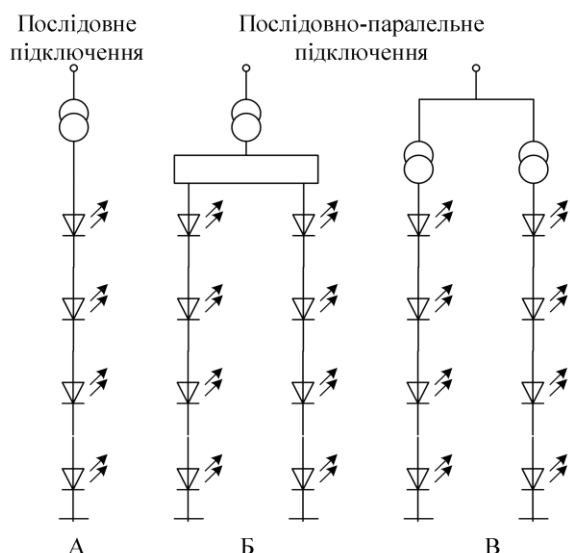


Рис. 17. Схеми підключення світлодіодів до джерел живлення

При невеликих потужностях використовуються аналогові лінійні регулятори, для живлення потужних діодів – мережеві блоки із стабілізованим струмом або напругою на виході. Зазвичай світлодіоди включаються послідовно, паралельно або в послідовно-паралельні ланцюжки (рис. 17).

На рис. 17 варіант А показує підключення однієї ланки послідовно з'єднаних світлодіодів до одного джерела живлення, варіант Б – вже дві послідовні ланки світлодіодів, підключених до одного джерела живлення через роздільник струму, і, нарешті, варіант В – кожна з двох ланок світлодіодів підключена до свого джерела струму.

Плавне зниження яскравості («dimming») світлодіодів здійснюється регуляторами з широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ) або зменшенням прямого струму. За допомогою стохастичної ШІМ можна

добитися мінімізації спектра перешкод (проблема електромагнітної сумісності). Але в даному випадку при ШІМ може спостерігатися пульсація випромінювання світлодіода.

Величина прямого струму варіюється залежно від моделі: наприклад, 2 мА – в мініатюрних світлодіодах площинного монтажу (SMD-LED), 20 мА – у світлодіодах діаметром 5 мм з двома зовнішніми виводами і до 1-3 А – в потужних світлодіодах, що використовуються з метою освітлення.

Пряма напруга U_f зазвичай лежить у межах від 1,3 В (ІК-ДІОДИ) до 4 В (світлодіоди на базі нітриду індію-галію – білі, блакитні, зелені, УФ).

Вже створені схеми живлення, які дозволяють підключати світлодіоди безпосередньо до мережі змінного струму 230 В. Для цього дві гілки світлодіодів включаються антипаралельно і підключаються до стандартної мережі через омичний опір. У 2008 р. проф. П. Маркс отримав патент на схему регулювання яскравості світлодіодів, які живляться стабілізованим змінним струмом (рис. 18).

Південнокорейська фірма Seoul Semiconductors інтегрувала цю схему з двома антипаралельними ланцюжками (у кожному з яких велика кількість світлодіодів) безпосередньо в одному чіпі («ACRICHE-LED»). Прямий струм світлодіодів (20 мА) обмежується омичним опором, підключеним послідовно до антипаралельної схеми. Пряма напруга на кожному із світлодіодів складає 3,5 В. Така схема підключення має ряд недоліків, головним з яких є відсутність гальванічної розв'язки від мережі змінного струму. Крім того, такі світлодіоди мають низьку ефективність: при споживаній потужності майже 4,5 Вт їх світловидатність не перевищує світловидатності двох сучасних світлодіодів із споживаною потужністю 1 Вт кожен.

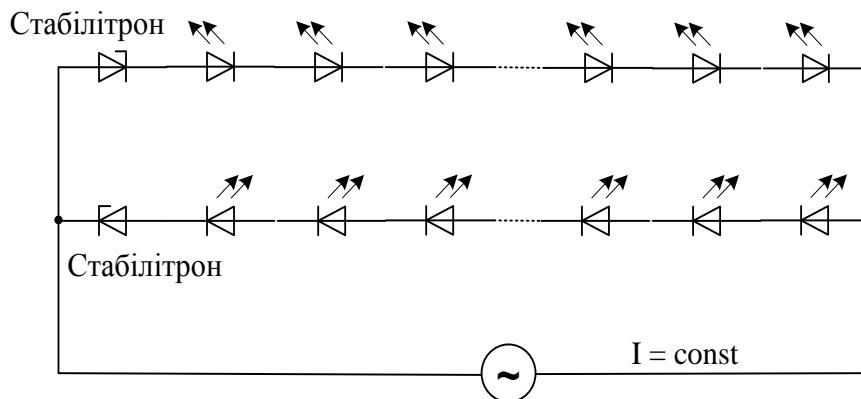


Рис. 18. Схема включення світлодіодів для живлення стабілізованим змінним струмом

Світлодіоди – це низьковольтні напівпровідникові прилади. До того ж, для їх живлення, яке забезпечує тривалий термін служби, необхідно стабілізувати струм, що протікає через них. Справа в тому, що незначні зміни прямої напруги на світлодіоді викликають різкі скачки струму через світлодіод.

Ще одна дуже важлива причина, яка примушує жити світлодіоди стабілізованим струмом, це залежність світлового потоку від струму, який протікає через світлодіод. Цю залежність використовують при необхідності регулювання сили світла світлодіодного світильника або для отримання різних кольорних відтінків свічення в повнокольорових RGBW-світлодіодах. Проте в більшості випадків потрібне стабільне рівномірне свічення джерела світла.

Особливості підключення світлодіодів до джерел живлення із стабілізованою вихідною напругою або стабілізованим вихідним струмом показані в табл. 1.

У першому випадку застосовують звичайні джерела живлення із стабілізованою вихідною напругою, включивши послідовно резистор для обмеження струму через світлодіоди.

Цей варіант відрізняється низькою ефективністю і поганою стабілізацією струму, що небажано при використанні потужних світлодіодів.

Другий варіант – підключення інтегральної схеми драйвера світлодіодів до виходу такого ж джерела живлення (табл. 1). Цей варіант, поза сумнівом, краще першого, але вимагає застосування і установки додаткового драйвера світлодіодів, що ускладнює конструкцію і підвищує ціну.

Для живлення потужних світлодіодів оптимальний третій варіант з використанням перетворювачів із стабілізованим вихідним струмом (табл. 1), що дозволяє відмовитися від зовнішніх компонентів (резистора або інтегральної схеми драйвера світлодіодів) і добитися простоти підключення світлодіодів, зручності експлуатації і зниження вартості всієї системи. Проте і цей варіант має недоліки через обмеженість вибору потужності джерел живлення зі струмовим виходом.

Таблиця 1. Особливості підключення світлодіодів

Схема підключення світлодіодів	
Опис	$R = [U - (UF \cdot n)] / I$ Перетворювач з виходом «стабільна напруга»; U – вихідна напруга; UF – пряме падіння напруги на світлодіоді; I – прямиий струм через світлодіоди
Переваги	низька вартість; простота схеми
Недоліки	нестабільність яскравості; низький ККД
Схема підключення світлодіодів	
Опис	Перетворювач з виходом «стабільна напруга»; G – імпульсний драйвер з ШІМ
Переваги	високий ККД; довгий строк служби світлодіодів
Недоліки	висока вартість; складність схеми
Схема підключення світлодіодів	
Опис	Перетворювач з виходом «стабільний струм»
Переваги	високий ККД; довгий строк служби світлодіодів; простота схеми
Недоліки	–

Необхідно відмітити, що для живлення світлодіодів можуть використовуватись перетворювачі різних типів, як DC/DC, так і AC/DC. Використовуючи ці типи перетворювачів, можна при необхідності реалізувати кожний варіант схем підключення, представлених в табл. 1.

Найпростішим перетворювачем для живлення світлодіодів є аналоговий стабілізатор струму, який може бути виконаний як на дискретних елементах, так і на базі інтегрального стабілізатора напруги. Останній варіант потребує підключення тільки одного рези-

стора, який задає вихідний струм. Однак такий перетворювач має багато недоліків, головним з яких є низький ККД.

Зараз на ринку України доступні перетворювачі для живлення світлодіодів усіх типів багатьох фірм як відомих (MeanWell, Resom та ін.), так і маловідомих (Eagle, Power Light). Перші відомі якістю і широкою номенклатурою своїх виробів при розумних цінах, другі – «сірі конячки». Фірма Resom відома як виробник DC/DC-перетворювачів високої якості, у тому числі і для живлення світлодіодів.

2.6. Методи обчислення освітленості об'єктів

Розглянемо основні принципи розрахунку освітлення об'єктів [8].

Звичайним завданням розрахунку освітленості є визначення кількості та потужності світильників, необхідних для забезпечення заданого значення освітленості. Значно рідше виконуються перевірочні розрахунки, тобто визначення очікуваної освітленості при заданих параметрах установки.

При освітленні об'єктів «точковими» джерелами світла, тобто лампами розжарювання, світлодіодами, а також газорозрядними лампами типів ДРЛ, ДРІ та ДНаТ, спочатку плануються кількість і розміщення світильників, у процесі ж розрахунку визначається необхідна їх потужність. При виборі джерела світла за стандартами допускається відхилення номінального світлового потоку ламп від запланованого розрахунком у межах від -10% до $+20\%$. При неможливості вибрати джерело світла, потік якого лежить у зазначених межах, змінюється кількість світильників.

При освітленні трубчастими люмінесцентними лампами плануються кількість і розташування рядів світильників, за результатами розрахунку здійснюється «компонування рядів», тобто визначення кількості та потужності світильників, які встановлюються в кожному ряду. При цьому відхилення очікуваної освітленості від заданої не повинно перевищувати вищевказаних меж.

Всі приклади розрахунку засновані на двох формулах, що пов'язують освітленість з характеристиками світильників і ламп:

$$E = \frac{F}{S}, \quad (4)$$

де E – освітленість, лк;

F – світловий потік, лм;

S – площа освітлювальної поверхні, m^2 .

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha}{r^2}, \quad (5)$$

де I – сила світла у напрямку від джерела на дану точку освітлювальної поверхні, кд;

α – кут падіння світлового потоку між променем і перпендикуляром до освітлювальної поверхні;

r – відстань від джерела світла до освітлювальної поверхні, м.

Принципова різниця між цими формулами полягає в тому, що перша з них, написана в недиференціальному вигляді, визначає середню освітленість поверхні, а друга – освітленість конкретної точки на поверхні.

Метод, заснований на першій формулі, носить назву методу коефіцієнта використання. У своїх звичайних формах він дозволяє забезпечувати середню освітленість горизонтальної поверхні з урахуванням усіх падаючих на неї потоків, як прямих, так і відображених. Перехід від середньої освітленості до мінімальної у цьому випадку може здійснюватися лише приблизно. Метод, заснований на другій формулі, – точковий метод, який до-

зволяє забезпечувати заданий розподіл освітленості на розташованих як завгодно поверхнях, але лише приблизно врахувати світло, відбите поверхнями приміщення.

Відповідно до цих особливостей, метод коефіцієнта використання застосовується для розрахунку загального рівномірного освітлення горизонтальних поверхонь, а також для розрахунку зовнішнього освітлення у випадках, коли нормована середня освітленість.

Точковий метод застосовується для розрахунку загального рівномірного і локалізованого освітлення приміщень і відкритих просторів та для розрахунку місцевого освітлення при будь-якому розташуванні освітлюваних поверхонь. Його область застосування для розрахунку внутрішнього освітлення обмежена випадками, коли досить наближено можна обліковувати світло, відбите поверхнями приміщення.

Області застосування обох методів частково перекривають одна одну, але бувають випадки, в яких, здавалося б, не може застосовуватися жоден із методів.

Дійсно, загальне рівномірне освітлення горизонтальної поверхні без точного обліку відбитого світла може бути розраховане будь-яким із методів. Зазвичай у цих випадках краще користуватися більш простим методом – методом коефіцієнта використання. Але для великих відповідальних приміщень бажано користуватися точковим методом, що дозволяє не тільки забезпечити задану найменшу освітленість, а й проаналізувати розподіл освітленості по всій освітлюваній поверхні.

З вищесказаного випливає, що для розрахунку локалізованого освітлення або освітлення негоризонтальних поверхонь у випадках, коли відбите світло відіграє значну роль, безпосередньо не може бути застосований жоден метод. У цих випадках доводиться застосовувати обидва методи, тобто комбінувати їх.

Але треба відмітити, що всі описані методи засновані на використанні тільки традиційних джерел світла, таких як лампи розжарювання, люмінесцентні, галогенові та ін. Для розрахунків освітленості різних об'єктів при використанні світлодіодних освітлювальних приладів найкраще користуватись програмними пакетами розрахунку.

В останні десятиріччя ХХ століття з'явився цілий ряд спеціалізованих світлотехнічних програм, призначених полегшити роботу проектувальників при розрахунку освітлення. В даний час існує достатня кількість світлотехнічних програм, які надійно закріпилися на ринку програмного забезпечення. З їх числа можна виділити такі: Europic, DIALux, Calculux, OxyTech, Brilux, Tulight, Ekalux, LightScape та ін. Ринок світлотехнічного програмного забезпечення (ПЗ) склався таким чином, що лідируючі виробники світлотехнічного устаткування є одночасно розробниками програм автоматизованого проектування освітлення. Серед них можна виділити фірми Osram, GE (Europic), Philips (Calculux). Незважаючи на загальні завдання, розв'язувані в САПР світлотехнічних систем, кожна з перерахованих програм має свої відмінності, і вибір проектувальника буде залежати від таких факторів, як рід розв'язуваного завдання, характер одержаних характеристик на виході програми, ліцензійність ПЗ та ін. Тому світлотехніку корисно ознайомитися як можна з більшою кількістю програм, що дозволить полегшити завдання ухвалення рішення на передпроектному етапі.

Світлотехнічні програми дозволяють проектувати освітлення як внутрішніх, так і зовнішніх об'єктів. Вбудовані у програми каталоги світлотехнічного устаткування найчастіше прив'язані до продукції фірми-виробника, і використання устаткування інших виробників не доступне. Ця обставина обмежує використання багатьох світлотехнічних програм.

У більшості випадків САПР має ряд переваг перед іншими засобами проектування:

- точність;
- ощадлива витрата часу при виконанні повторюваних операцій;
- можливість використання файлу САПР іншими програмами.

Для розрахунку освітлення існує багато комп'ютерних програм як безкоштовних, так і ліцензованих.

До безкоштовних відносяться програми: «DIALux», «Light-in-Night», «Формула Света», «Ulysse», «Faellite».

Програма «DIALux» – безумовний лідер за своїми можливостями серед усіх безкоштовних програм. Ця якісна й популярна серед світлодизайнерів програма призначена для проектування як внутрішнього, так і зовнішнього освітлення. Є можливість тривимірної візуалізації, причому все виглядає досить якісно. Дуже простий інтерфейс. В середньому, без сторонньої допомоги на освоєння навичок роботи із програмою (при базовому знанні світлотехніки) йде півгодини.

Більшість виробників світлотехнічної продукції в усьому світі мають свої бази даних світильників для роботи з цією програмою.

DIALux – програма для розрахунку і дизайну освітлення розробляється з 1994 року DIAL GMBH (DeutscheInstitutfur Angewandte Lichttechnik) – Німецьким Інститутом Прикладної Світлотехніки. Програма розповсюджується безкоштовно і може використовувати дані освітлювального устаткування будь-яких виробників, у яких є електронні бази світильників у форматі, підтримуваному програмою. Вона безперервно вдосконалюється своїми розробниками і має найбільшу базу даних світильників багатьох світових брендів.

DIALux – одна з кращих програм для розрахунку освітлення на ринку програмного забезпечення. Вона враховує всі сучасні вимоги до дизайну і розрахунку освітлення. Програма підтримує міжнародні і національні стандарти європейських країн.

DIALux підтримує багато мов: німецьку, англійську, італійську, іспанську, португальську, французьку, фламандську, голландську, шведську, норвезьку, данську, фінську, грецьку, польську, російську і китайську мови інтерфейсу. Програма працює на всіх поточних платформах Windows і постійно поновлюється кваліфікованою групою розробників.

DIALux призначений для всіх, хто має відношення до розрахунку освітлення. Для тих, хто проводить розрахунок освітлення лише іноді, призначається Асистент DIALux Light, який забезпечує розрахунок освітленості всього за декілька кроків. Професійний проектувальник за допомогою програми може вирішити будь-яку задачу: розрахувати освітлення в повній відповідності з нормами освітленості як внутрішніх, так і зовнішніх сцен, вуличне освітлення, зовнішнє освітлення і навіть отримати фотореалістичну візуалізацію проекту. Електрики, дизайнери і проектувальники освітлення вважають, що DIALux – інструмент, який робить їх роботу набагато простішою.

Фірми-виробники світильників (у даний час їх 47, але кількість їх постійно зростає) фінансують проект впродовж останніх 11 років. Вони забезпечують так звані DIALux PlugIns(каталоги світильників) для використання у програмі. Ці електронні каталоги запускаються з програми і відкривають проектувальникові широкий вибір виробів. Таким чином, для виробників DIALux є інструментом маркетингу, іншими словами, можливістю презентації своєї продукції з метою її просування на ринку. Успіх буде забезпечений, якщо проектувальники почнуть використовувати вироби фірми для своїх розробок. Саме тому користувач може розраховувати на безперервний розвиток програми і її постійну адаптацію до потреб проектувальника.

3. Досвід Інституту проблем математичних машин і систем (ІПММС) НАН України у проектуванні та впровадженні систем світлодіодного освітлення

Роботи зі створення і впровадження в народне господарство енергозберігаючих світлодіодних систем освітлення розпочалися в ІПММС НАН України в 2007 році. За час, що минув з 2007 року, співробітниками ІПММС було розроблено та впроваджено декілька проектів світлодіодного освітлення й декоративного підсвічування. Були розроблені зразки світлодіодних освітлювальних приладів, призначених для різних сфер вжитку. До переліку входять світильники для потреб житлово-комунального господарства, побуту, декоративного садово-паркового та архітектурного підсвічування та багато інших [9–11].

Один із перших проектів використання світлодіодних світильників, розроблених в ІПММС, був проект для освітлення приміщень лабораторного корпусу Інституту нейрохірургії ім. академіка А.П. Ромоданова АМН України, впроваджений у 2010 році.

ІПММС розробив енергозберігаючі світлодіодні системи салонного освітлення вагонів метро моделей 81-714, 81-717 та їх модифікацій. Цими системами в 2012 році переобладнані 50 вагонів Куренівсько-Червоноармійської лінії Київського метрополітену, які безвідмовно працюють більше п'яти років. Детально ця робота описана в [12]. Розроблена в ІПММС система світлодіодного освітлення вагонів метро серії 81-717, 81-714 у порівнянні зі стандартною системою освітлення на люмінесцентних лампах забезпечує економію електроенергії в 3 рази, збільшення освітленості вагонів більше, ніж у 1,5 рази, зменшення витрат на обслуговування системи освітлення за рахунок значно більшої надійності і терміну експлуатації світлодіодних джерел світла.

Наступним проектом, який виконав у 2012 році ІПММС, було декоративно-архітектурне підсвічування будівлі Міністерства освіти та науки України. Розроблена система світлодіодного декоративного підсвічування будівлі Міністерства освіти і науки України у порівнянні з традиційними системами підсвічування на галогенових лампах дозволяє істотно (в 12–15 разів) зменшити витрати електроенергії на підсвічування будівлі, забезпечити високу якість підсвічування і надійність системи, зменшити витрати на обслуговування електромереж, знизити рівень забруднення навколишнього природного середовища.

У кінці 2012 року ІПММС реалізував проект системи світлодіодного освітлення внутрішнього двору Президії Національної академії наук України. У 2013 році розроблено проект художнього освітлення фасаду будівлі Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

У 2013–2014 роках розроблені і впроваджені системи світлодіодного освітлення коридорів головного корпусу ІПММС. Системи управляються від контролера, що забезпечує три режими освітленості: максимальний, робочий, черговий. Максимальний режим включається примусово (вручну), робочий режим включається автоматично з 8 до 17 години в робочі дні, а черговий режим включається автоматично з 17 до 8 годин і у вихідні дні. У результаті випробувань системи світлодіодного освітлення були отримані такі результати по споживаній потужності: максимальний режим – 373 Вт, робочий – 124 Вт, черговий – 23 Вт. Таким чином, споживання електроенергії при використанні робочого режиму знизилося майже в 6 разів, а при переході в режим чергового освітлення – більш, ніж в 30 разів.

ІПММС НАНУ продовжує роботи по створенню енергозберігаючих світлодіодних систем освітлення для різних об'єктів народного господарства (кілька таких робіт виконано у 2016–2017 роках), а також роботи в напрямі розробки нових приладів для формування світлових потоків різної потужності з заданою діаграмою спрямованості, розробку методів та мікроконтролерних пристроїв керування потужністю, діаграмою спрямованості, кольором, розробку ряду приладів – вимикачів, що реагують на зовнішню освітленість, рух та інші фактори, а також розробку систем живлення освітлювальних приладів.

Розроблені в ІПММС світлодіодні пристрої для освітлення вагонів рухомого складу залізниці, у тому числі для освітлення вагонів метрополітену, світлодіодні системи освітлення приміщень, світлодіодні світильники різного призначення захищені Патентами України [13–22].

4. Висновки

Розглянуто фізичні процеси у світлодіодах, способи отримання білого світла високої інтенсивності у світлодіодах. Описані переваги світлодіодів у порівнянні з іншими джерелами світла. Наведені основні характеристики світлодіодів і методи їх вимірювання. Показано, що при конструюванні світлодіодних світильників вирішальну роль у забезпеченні їх максимальної ефективності грає оптимізація теплового режиму світлодіодів. Розглянуто порядок і приклад розрахунку теплового режиму потужних світлодіодів.

Представлена класифікація освітлювальних пристроїв за їх призначенням, ступенем їх захищеності від різних негативних факторів, критерії якості освітлення.

Виконано аналіз схем підключення світлодіодів до джерел живлення, показано, що оптимальним є варіант з використанням перетворювачів із стабілізованим вихідним струмом.

Розглянуті основні принципи розрахунку освітлення об'єктів та спеціалізовані світлотехнічні програми, які призначені полегшити роботу проектувальників при розрахунку освітлення. З усієї різноманітності світлотехнічних програм DIALux – одна з кращих програм для розрахунку освітлення на ринку програмного забезпечення. Вона враховує всі сучасні вимоги до дизайну і розрахунку освітлення. Програма підтримує міжнародні і національні стандарти європейських країн.

Висококваліфіковані фахівці ПММС постійно працюють над удосконаленням схемотехніки та конструкції світлодіодних освітлювальних приладів. Наші розробки виконуються з використанням сучасних електронних компонентів і конструкційних матеріалів. Це дозволяє досягти високого ступеня енергоекономічності і надійності наших виробів. Ми пропонуємо клієнтам широкий спектр освітлювальної апаратури. Це можуть бути як ексклюзивні світильники нашого виробництва, так і світильники інших виробників, адаптовані для використання світлодіодів.

Інститут здійснює розробку дизайн-проектів за всіма видами освітлення, від інтер'єрів до архітектурних і ландшафтних; комп'ютерне моделювання освітлення різних об'єктів; вибір освітлювального і електротехнічного устаткування; розробку проектів внутрішніх і зовнішніх мереж освітлення; авторський супровід реалізованих проектів на всіх етапах; гарантійне, післягарантійне і сервісне обслуговування своїх проектів.

ПММС має можливість організувати на базі інституту виробництво дослідних зразків освітлювальних світлодіодних систем, розроблених ним, а в подальшому – їх серійне виробництво.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Борисов О.В., Основи твердотільної електроніки. Напівпровідникові діоди / Борисов О.В., Гусев В.О., Родионов М.К. – К.: НТУУ «КПІ», 2006. – 212 с.
2. Чадюк В.О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання / Чадюк В.О. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – Кн. 1. – 380 с.
3. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники / Степаненко И.П. – М.: Сов. радио, 1980. – 423 с.
4. Гуторов М.М. Основы светотехники и источники света / Гуторов М.М. – М.: Энергоиздат, 1983. – 384 с.
5. Щепина Н.С. Основы светотехники / Щепина Н.С. – М.: Энергоиздат, 1985. – 341 с.
6. Руденко Н.М. Аналіз та розрахунок теплового режиму потужних світлодіодів / Н.М. Руденко, О.В. Гурба // Вісник Національного технічного університету «КПІ». – (Серія «Радіотехніка. Радіопаратобудування»). – 2010. – № 41. – С. 16 – 21.
7. Мешков В.В. Осветительные установки / В.В. Мешков, М.М. Епанешников. – М.: Энергия, 1972. – 372 с.
8. Клюев С.Л. Как рассчитать электрическое освещение производственного помещения / Клюев С.Л. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 48 с.

9. Корбут В.Б. Енергозберігаючі світлодіодні системи освітлення / В.Б. Корбут, М.Г. Ієвлев, В.Г. Бутко // Науково-технічна інформація. – 2013. – № 2. – С. 42 – 49.
10. Опыт разработки и внедрения систем светодиодного освещения / А.А. Морозов, В.П. Клименко, В.Б. Корбут [и др.] // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2014. – № 2. – С. 30 – 36.
11. Енергозберігаючі засоби автоматизації і світлодіодні системи освітлення в промисловості, на транспорті, в будівництві та комунальній сфері / В.П. Клименко, С.Д. Лутов, В.Б. Корбут [и др.] // Наука та інновації. – 2013. – № 5. – С. 19 – 26.
12. Корбут В.Б. Енергозберігаючі світлодіодні системи освітлення вагонів метро / В.Б. Корбут, М.Г. Ієвлев, В.Г. Бутко // Науково-технічна інформація. – 2013. – № 4. – С. 44 – 49.
13. Пат. України на корисну модель № 71804. Пристрій для освітлення вагонів рухомого складу / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 14, 25.07.2012.
14. Пат. України на корисну модель № 82193. Світлодіодна система освітлення приміщень / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 14, 25.07.2013.
15. Пат. України на винахід № 106806. Світлодіодна система освітлення приміщень / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 19, 10.10.2014.
16. Пат. України на корисну модель № 90085. Автомобільна лампа на основі над'яскравого світлодіода / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 9, 12.05.2014.
17. Пат. України на корисну модель № 90086. Світильник світлодіодний / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 9, 12.05.2014.
18. Пат. України на корисну модель № 90085. Ліхтар аварійної зупинки / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 9, 12.05.2014.
19. Пат. України на корисну модель № 91104. Світлодіодна лампа для зовнішнього освітлення / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 12, 25.06.2014.
20. Пат. України на корисну модель № 91105. Світлодіодний прожектор / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 12, 25.06.2014.
21. Пат. України на корисну модель № 91106. Світильник аварійного (евакуаційного) освітлення / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 12, 25.06.2014.
22. Пат. України на винахід № 106578. Світильник аварійного (евакуаційного) освітлення / Морозов А.О., Клименко В.П., Корбут В.Б., Ієвлев М.Г., Бутко В.Г.; Бюл. № 17, 10.09.2014.

Стаття надійшла до редакції 15.11.2017