

УДК 628.981 (045)

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

РОЗРАХУНОК СВІТЛОВОГО ПОТОКУ ПОТУЖНИХ СВІТЛОДІОДІВ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У НИХ

Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: ¹a.b.zinchenko@gmail.com,
²1286113@gmail.com

Порушено проблему визначення дійсного значення світлового потоку потужних світлодіодів у робочій точці температур. Запропоновано методику перерахунку світлового потоку і подано рекомендації щодо вирішення проблеми, зумовленої тепловими режимами світлодіода.

Ключові слова: світловий потік, світлодіод, тепловий розрахунок.

Вступ. Ринок напівпровідникової світлотехніки розвивається швидкими темпами, тому сфери використання світлодіодів стають більш широкими. Відомо, що виробництво освітлювальних приладів на основі світлодіодів ґрунтується на розробленні нових рішень, оскільки майже немає типових та універсальних рішень. Проте використання світлодіодів зазвичай зумовлює проблему для інженерів, які ще не зіштовхувались з розробленням освітлювальної техніки на основі напівпровідників. Річ у тім, що для напівпровідникових джерел світла є своя неповторна специфіка розроблення. Проектуючи освітлювальну систему на базі світлодіодів, слід враховувати його режими й уміти правильно підібрати умови. Інакше на стадії макетування отримані параметри не будуть відповідати розрахованим.

Сьогодні теплове моделювання стало першою і найважливішою ланкою в проектуванні світлових приладів. Саме тому рішення щодо систем, які відводять тепло, може дати відповідь на питання, який світловий потік буде мати виріб, що розробляється, і наскільки він буде надійним.

Аналіз досліджень і публікацій. Останнім часом проблема теплових розрахунків стала дуже гострою, тому вона знайшла відображення у працях Ф. Е. Шуберта [2], А. Е. Юновича [3], В. Воронкова, С. Миронова та ін. Однак єдиного вирішення цієї проблеми досі не запропоновано, окрім локальних рішень для деяких типів освітлювальних систем на основі світлодіодів.

Постановка завдання. Розглянути основні параметри, що впливають на зміну світлового потоку, виявити залежність між тепловими режимами світлодіода та зміною його світлових характеристик у процесі експлуатації, а також визначити електричні умови роботи системи: рівень робочого струму, робочу температуру, за якої прилад повинен забезпечувати необхідний світловий вихід і термін експлуатації.

Температурний розрахунок світлодіода. Як і у будь-якому напівпровіднику, процес *p-n* переходу в світлодіоді сильно залежить від його температури. Відомо, що з підвищенням температури напівпровідника ширина забороненої зони зменшується. А разом з нею зменшується і відстань між рівнем провідності і домішковим рівнем. Електрон починає випромінювати меншу кількість енергії, тому енергія фотона зменшується. Випромінювання зміщується в «синю» зону спектру, одночасно падає потужність світлового потоку. Від температури залежить зношення люмінофора і як результат – строк служби усього світлодіода. Ось чому, проектуючи напівпровідникове джерело світла, необхідно починати саме з термічного розрахунку, результат якого стане відправною точкою для світлотехнічного розрахунку.

Послідовність розрахунків. За технічною документацією на світлодіод вивчити умови, за яких був отриманий заявлений параметр ефективності. В найбільш поширених випадках заявлені значення світлового потоку вказують за температури кристала 25 °С. Очевидно, що така умова не може бути виконана. Температура на кристалі потужного світлодіода рідко знижується до 43–45 °С в ідеальних температурних умовах, за струму 350 мА та з одним світлодіодом на платі. Реальна температура кристала може сягати 100–110 °С. Логічно припустити, що в робочих умовах світлодіод буде мати відмінне від заявленого виробником значення світлового потоку, для оцінки якого і необхідно виконати температурний розрахунок.

Розглянемо основну складову температурного розрахунку – теплову модель. В основу теплової моделі покладено поняття теплового опору. Якщо тепло від тіла з більшою температурою T_1 передається тілу з меншою температурою T_2 , то тепловий опір $R\theta$ визначається як відношення різниці температур тіл до потужності P_d , що розсіюється нагрітим тілом, °С/Вт:

$$R\theta = \frac{T_1 - T_2}{P_d}. \quad (1)$$

Така модель зручна тим, що тепловими опорами можна оперувати аналогічно електричним опорам. Це робить модель дуже наочною і спрощує розрахунки.

Для світлодіодних освітлювальних приладів найбільш важливою характеристикою є тепловий опір між p - n переходом і тепловідвідною основою корпусу $R\theta_{j-p}$. Його величина завжди вказується у технічній документації на прилад. Якщо світлодіод устанавлюється на тепловідвід, то в тепловій моделі послідовно з $R\theta_{j-p}$ включаються теплові опори між світлодіодом і тепловідводом $R\theta_{p-h}$ і тепловідводом та навколишнім середовищем $R\theta_{h-a}$ (рис. 1), а результуючий тепловий опір має вигляд:

$$R\theta_{j-a} = R\theta_{j-p} + R\theta_{p-h} + R\theta_{h-a}. \quad (2)$$

Якщо на тепловідводі встановлено декілька світлодіодів, то еквівалентна теплова схема буде мати вигляд, показаний на рис. 2. При цьому результуючий тепловий опір обчислюється за формулою для паралельного з'єднання резисторів:

$$\frac{1}{R\theta_{(j-b)\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R\theta_{(j-b)i}}. \quad (3)$$

У разі еквівалентних умов теплопередачі кожного світлодіода формулу (3) можна спростити:

$$R\theta_{(j-b)\Sigma} = \frac{R\theta_{(j-b)1}}{n}.$$

Орієнтовні величини теплових опорів $R\theta_{p-h}$ і $R\theta_{h-a}$ у ряді випадків можна знайти у технічній документації виробників світлодіодів. Однак на практиці достовірні значення можна отримати лише в результаті натурного моделювання, вимірюючи температури тепловідвідної основи світлодіода і всіх інших компонентів системи забезпечення теплового режиму. Знаючи температуру навколишнього середовища і розсіювану приладом потужність, за формулою (1) можна визначити відповідні теплові опори. Незважаючи на трудомісткість такого моделювання, його результатами можна користуватися для теплових розрахунків будь-яких світлотехнічних систем, для яких використовуються аналогічна технологія монтажу світлодіодів, матеріали і конфігурація елементів тепловідведення.

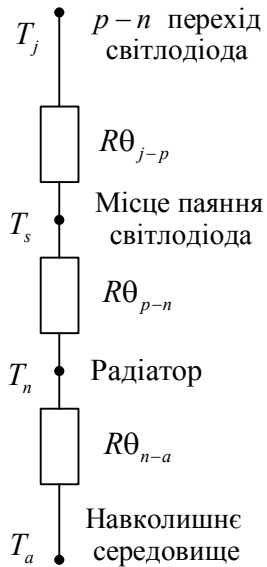


Рис. 1. Теплова модель твердотілого джерела світла, у якому на тепловідвід (радіатор) встановлено один світлодіод

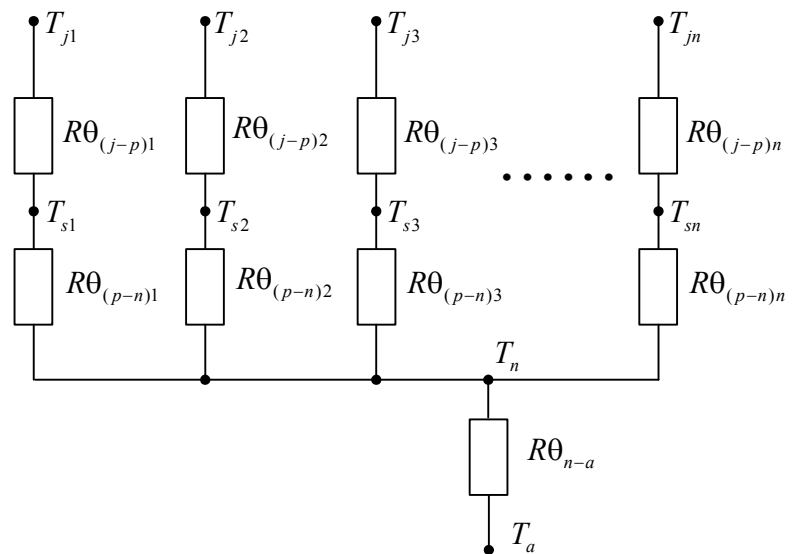


Рис. 2. Тепловая модель твердотілого джерела світла, у якому на тепловідводі (радіаторі) встановлено декілька світлодіодів

Місцями виділення тепла всередині світлодіода є контакти, зовнішні шари і активна ділянка. За низьких значень струму нагріванням контактів і зовнішніх шарів можна знехтувати з огляду на малість потужності, яка розсіюється на їх паразитних опорах. Тому за малих струмів основним джерелом тепла є активна ділянка світлодіода, яка нагрівається в результаті безвипромінювальної рекомбінації. Із підвищенням струму внесок паразитних опорів контактів і зовнішніх шарів у збільшення температури діода стає більш помітним. Тому в результаті підвищення значущості безвипромінювальної рекомбінації через глибокі домішкові рівні, поверхневої рекомбінації і втрат носіїв заряду в бар'єрних шарах гетероструктур інтенсивність випромінювання світлодіода падає [2].

Перелік складових елементів світлодіодних освітлювальних систем, які також впливають на зміну значення світлового потоку:

1. Струм роботи світлодіода. Підвищення прямого струму через кристал світлодіода призводить до збільшення тепловиділення. Надлишок тепла підвищує температуру активної зони кристала, що потребує додаткової системи відводу тепла.

2. Тип текстолітної плати, на яку монтується світлодіод, її термоопір. Є три основні типи монтажних плат для світлодіодів, що застосовуються для різних діапазонів розсіювання тепла:

– тип I – одностороння друкована плата FR4 з/(без) додатковою мідною площиною – є найдешевшою і найменш ефективною для розсіювання тепла;

– тип II – двостороння друкована плата FR4 з додатковою мідною площиною і тепловими отворами – забезпечує додаткове розсіювання тепла від світлодіода через отвори до додаткової мідної площинки на нижньому боці друкованої плати, яка може бути залишена без паяльної маски за допомогою технології вирівнювання паяння гарячим повітрям (HASL), якщо це забезпечить краще розсіювання тепла в навколишнє середовище. Це також забезпечує кращу взаємодію металу в разі приєднання додаткового радіатора;

– тип III – друкована плата з внутрішнім металевим шаром Metal Core Printed Circuit Board (MCPCB). У друкованій платі цього типу зазвичай як внутрішню основу використовують алюміній, який має добру теплопровідність (понад 200 Вт/мК), і тепло, проведене від світлодіода, може ефективно поширюватися через плату MCPCB у

навколишнє середовище. Порівняно з підкладкою FR4 плата МРСВ чудово підтримує низьку температуру $p-n$ переходу світлодіода.

3. Конструкція та характеристики профілю (радіатора), на якому розміщуються світлодіоди, його термоопір.

4. Потужність світлодіода. Прямий струм I_f , помножений на пряму напругу U_f , дає розсіювану потужність, необхідну для розрахунку теплових характеристик. Не вся ця енергія розсіюється як тепло, тому що деяка її частина перетворюється у світло. Традиційний підхід передбачає, що вся потужність розсіюється як тепло. Це призводить до завищення розрахункової температури і, як наслідок, потребує використання радіатора більшого розміру, ніж потрібно насправді.

5. Значення температури навколишнього середовища, де буде експлуатуватися світлодіодна освітлювальна система. Використовуючи ці параметри, можна на основі розрахунку теплових і оптичних характеристик знайти оптимальний баланс між тепловими умовами і робочими параметрами системи, що розробляється на базі світловипромінювального діода.

Методика перерахунку світлового потоку світлодіода. Під час розроблення освітлювальних виробів параметри світлодіода точно розраховуються в спеціальних лабораторіях, але у випадку простого супроводження проекту затрати на повномасштабне розроблення просто недопустимі. Для зменшення цих затрат використовується ця методика, що дозволяє отримати досить точні оцінні значення світлового потоку.

1. Розрахунок термоопору. Найважливішим параметром є критична температура кристала, яку можна записати так:

$$T_{\text{кр}} = T_{\text{н.с}} + PR\theta_{j-a},$$

де $T_{\text{н.с}}$ – температура навколишнього середовища; P – потужність світлодіода; $R\theta_{j-a}$ – загальний температурний опір системи.

У свою чергу

$$P = I_f U_f, \quad (6)$$

де I_f – робочий струм світлодіода; U_f – падіння напруги на світлодіоді; $R\theta_{j-a}$ є сумою термоопорів, яку розраховують за формулою (2) або (3).

Термоопір на переході радіатор – навколишнє середовище розраховується за параметрами граничної температури кристала $T_{\text{кр.мак}}$ (зазначається в паспорті на світлодіод) і максимальної температури навколишнього середовища $T_{\text{н.с.мак}}$. Вибораючи температуру навколишнього середовища, слід враховувати, що температура всередині будь-якого, навіть перфорованого корпусу, буде вищою. Якщо радіатор розрахований на роботу в зовнішнє середовище або функцію радіатора виконує корпус, температуру навколишнього середовища вибирають максимально можливою для умов експлуатації виробу. Тоді

$$R\theta_{h-a} = (T_{\text{кр.мак}} - T_{\text{н.с.мак}} - R\theta_{j-p}P - R\theta_{p-h}P_{\text{заг}}) / P_{\text{заг}}.$$

Розрахувавши деяке значення термоопору на переході радіатор–навколишнє середовище потрібно підбирати радіатор з паспортним значенням термоопору, меншим або рівним розрахованому.

На основі отриманих значень термоопорів, що відповідають кожному елементу розроблюваної конструкції, можна одержати реальні значення зміни світлового потоку від температури кристала світлодіода.

2. Визначення коефіцієнта спаду світлового потоку. За отриманим з розрахунку значенням температури кристала визначають реальне значення світлового потоку в робочій точці температур. Для цього розглянемо графік залежності світлового потоку від температури кристала. Такий графік, як правило, міститься в технічній документації світлодіода і називається «cold/hot factor» [4]. Побудувавши проекцію з осі температур на

криву і далі на вісь світлового потоку, отримаємо значення поправкового коефіцієнта. Легко переконатися, що коефіцієнт, на який потрібно множити заявлене значення світлового потоку, у робочих умовах рідко перевищує 0,94, тобто відхилення світлового потоку світлодіода від заявленого виробником становитиме понад 6 %. У деяких випадках це значення може досягати значення 10–12 %. Крива залежності різних світлодіодів (лм/°C) не завжди має різний нахил. Таким чином, для різних умов більш виграшним може виявитися і цілком несподіваний варіант. Виконавши такий розрахунок для ряду виробників, можна отримати об'єктивну картину світлової ефективності світлодіодів для робочих умов.

Висновки. Наведена методика розрахунку є оцінною, дозволяє вибирати засоби та кошти. Проте для розрахунків світлодіодних модулів метод здебільшого малоефективний. Причиною цього є його непристосованість для аналізу роботи великих масивів джерел теплової потужності. Його точність знижується прямо пропорційно збільшенню масиву джерел тепла. Однак він ефективний для розрахунку режимів невеликих модулів, що містять 5–6 потужних світлодіодів. Достовірність результатів отриманих цим методом для невеликих масивів світлодіодів є досить високою, а відхилення отриманих даних від розрахунків не перевищує 2–3 %.

Список літератури

1. *Справочная книга по светотехнике* / под ред. Ю. Б. Айзенберга. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Знак, – 2006 – 972 с.
2. *Шуберт Ф.* Светодиоды / Ф. Шуберт; пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, – 2008. – 496 с.
3. *Юнович А. Э.* Светодиоды как основа будущего / А. Э. Юнович // *Светотехника* – 2003. – № 3. – С. 2 – 6.
4. *Luxeon Technical Datasheet* <http://www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-white>.

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

Расчет светового потока мощных светодиодов с учетом тепловых процессов в них

Поднята проблема определения реального значения светового потока мощного светодиода в рабочей точке температур. Предложена методика пересчета светового потока и даны рекомендации относительно решения проблемы, обусловленной тепловыми режимами светодиода.

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

Calculation of power LEDs' luminous flux according to thermal processes occurring in them

In the article raises the problem of determining of real value of a powerful LEDs' luminous flux at the working point of temperatures. The technique of recalculation of luminous flux is recommended. The recommendations on how to solve the problems related to thermal regimes of LEDs are made.