УДК 628.9

А.І. Колесник[1], Д.О. Усіченко[12], Л.А. Назаренко[1]

[1]Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Україна
[2] Державне підприємство «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»

МЕТОДИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІДВОДУ ТЕПЛА ВІД СВІТЛОДІОДНОГО ПРИЛАДУ

Проаналізовано результати дослідження температури p-n переходу світлодіодного світильника з використанням перетворювача теплового потоку. Спроектовано математичну модель профілю світильника у програмному середовищі Solid Works Flow-Simulation. Проведено моделювання та аналіз теплових потоків в програмі і розрахунок теплових навантажень.

Ключові слова: *світлодіод, температура p-n переходу, теплові потоки.*

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомо, що граничні функціональні можливості і надійність навіть бездефектних світловипромінюючих приладів на основі світлодіодів багато в чому визначаються ефектами неоднорідного розподілу щільності струму, потужності і температури в приладових структурах. Однак кожен з таких параметрів як: температура p-n переходу, щільність протікаючого через p-n перехід струму, і так само температура люмінофора, по-різному впливають на світловий потік світильника. Зазначені ефекти прискорюють механізми деградації та відмов виробів. Особливістю сучасних потужних світловипромінювальних приладів є висока внутрішня квантова ефективність, значення якої сильно залежить від щільності струму і температури. Іншою особливістю сучасних потужних світлодіодів (СІД) є робота при великій густині струму накачування, при якій стає помітним опір шарів розтікання струму і пасивних областей структури. Однак, відомі теплоелектричні моделі світлодіодних пристроїв зазначених залежностей і ефектів у більшості не враховують.

Залежність параметрів світлодіодів від температури оточуючого середовища – предмет вивчення багатьох наукових статей. При підвищенні температури кристалу знижується термін життя світлодіода, тому питання охолодження світлодіодів достатньо актуальне.

Відвід виділеного світлодіодом тепла проходить через тримач кристалу, лютоване з‘єднання, друковану плату, ізолюючу теплопровідну перекладку або теплопровідну пасту, корпус-радіатор у зовнішнє середовище.

Така множина перехідних опорів на шляху «світлодіод - оточуюче середовище» є основним недоліком конструкцій світлодіодних світильників. Всі розробники світлових приладів намагаються мінімізувати всі ці опори. Основним фактором, обмежуючим підвищення світлової віддачі світлового приладу, є нагрівання світлодіода і, як наслідок, зниження світлової віддачі. Рішенням завдання ефективного тепловідведення і підтримки оптимальних режимів роботи світлодіодів є теплові розрахунки. Комп’ютерне моделювання дозволяє повністю відтворити температурне розподілення і з’ясувати чи буде даний охолоджувач справлятися з відводом тепла в даних умовах. Причому, крім теплофізичних параметрів, оптимізація потрібна також і по конструктивним рішенням, за ціною на кінцевий виріб і технологічністю виготовлення. Раціонально використати комплексний підхід до вирішення цієї проблеми. Відвід тепла від приладу можна забезпечити шляхом вибору оптимальних конструктивних рішень, тому необхідно розглянути різні підходи.

Виклад основного матеріалу

Точність результатів теплових розрахунків підтверджує чисельний серійний випуск виробів напівпровідникової світлотехніки. Отримані дані найчастіше перевіряють на стендах і дослідних зразках, починаючи з простого розміщення температурних датчиків в найбільш оптимальних точках поверхні охолоджувачів (зазвичай поруч з матрицями або дискретними світлодіодами) і закінчуючи отриманням повних температурних картин теплового розподілу за допомогою тепловізора. Таким чином, щоб спроектувати енергоефективний світильник, маємо два напрями досліджень:

- перший це вимірювання теплового потоку світильника з використанням перетворювача теплового потоку із подальшим розв’язанням

оберненої задачі знаходження температури p-n переходу;

- другий це вимірювання картини розподілу температурних полів світильника тепловізором та порівняння цих даних з результатами математичної симуляції світильника у програмному середовищі Solid Works Flow-Simulation.

Густина теплового потоку пропорційна градієнту температури:

$$q = - \text{¡} \cdot grad T , \quad (1)$$

де χ – коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом теплопровідності.

Обернені задачі теплопровідності є прикладом некоректно поставлених задач, а їх рішення і практичне застосування пов‘язано з певними труднощами. В першу чергу, це труднощі розробки методів і алгоритмів, які дають можливість одержати досить точні і стійкі результати.

В первинному перетворювачі теплового потоку (ПТП) – пристрої, в якому при проходженні через нього теплового потоку виникає різниця температури, а для її вимірювання передбачується термочутливий елемент.

ПТП виду допоміжної стінки [2] є найбільш придатним для вимірювання теплового потоку або його густини за будь-якого способу передачі теплового потоку.

Нами пропонується використовувати ПТП для вимірювання теплового потоку від світлодіодного світильника із наступним вирішенням оберненої задачі для знаходження температури p-n переходу.

Розрахунок профілю світильника може визначатися наступним чином. Тепловий опір визначає різницю температур, яка виникає між тепловиділяючим елементом або системою тепловиділяючих елементів (в нашому випадку системою світлодіодів):

$$R_T = \frac{\Delta T}{P_B}, \quad (2)$$

де ΔT – різниця температур оточуючого середовища і середньою температурою радіатора $\Delta T = (T_{рад} - T_{серед})$, P_B – потужність, що виділяється системою тепловиділяючих елементів.

З іншого боку, тепловий опір за конвективного теплообміну визначається виразом :

$$R_t = \frac{1}{(\alpha \cdot S_p)}, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі (Вт/м^{2}К),
S_p – площа теплового обміну (м^2).

Таким чином, із формул (2) і (3) отримаємо:

$$S_p = \frac{P_B}{(\alpha \cdot \Delta T)},$$

Нехай P – потужність, яка споживається системою світлодіодів білого випромінення, тоді $P_B + P_{вип}$, де $P_{вип}$ – потужність світлового випромінення.

В залежності від світлової віддачі $\eta_C = \frac{\Phi}{P}$, де Ф – світловий потік, випромінюваний системою світлодіодів, потужність $P_B = (1 - \frac{\eta_C}{\eta_{теор}}) \times P$, де $\eta_{теор}$ – гранично можлива (теоретично обґрунтовано) світлова віддача світлодіода. $\eta_{теор}$ – світлова ефективність випромінення вибраного світлодіода. Значення світлової ефективності випромінення може бути розраховано із спектрального розподілу випромінення світлодіода. Таким чином в розрахунках потужності, яка перетворюється в тепло, враховується спектральний розподіл випромінення конкретного світлодіода за формулою:

$$\eta_{теор} = \frac{683 \int \varphi(x)\nu(x)\,dx}{\int \varphi(x)\,dx}, \quad (4)$$

де φ(x) – спектральна густина випромінення, ν(x) – функція спектральної світлової ефективності. Значення світлової ефективності випромінення є граничною величиною світлової віддачі джерела випромінення. Потужність, яка перетворюється в тепло, в літературі оцінюється в межах 40-75%.

$$S_p = (1 - \frac{\eta_C}{\eta_{теор}}) \times \frac{P}{(\alpha \times \Delta T)}, \quad (5)$$

За природної конвекції коефіцієнт тепловіддачі α знаходиться в межах від 6 до 10 Вт/м^{2}К. Звичайно при попередніх розрахунках вибирається α=10 Вт/м^{2}К.

Дослідження температури p-n переходу світлодіода показали, що при нагріванні, інтенсивність випромінювання знижується, тобто зі збільшенням температури інтенсивність випромінювання змінюється нелінійно. Таким чином слід вважати температуру p-n переходу світлодіода до 100 °С оптимальною для досягнення найбільшої енергоефективності світлового приладу.

Ефективність випромінювання світлодіода залежить від живлячої його сили струму, тому для отримання найбільш енергоефективного світлового приладу слід застосовувати струм живлення світлодіодів 350-700 мА, при більш високих токах застосування світлодіодів є нераціональним, з огляду на невелику енергоефективність.

Для рішення поставленої задачі, пов’язаної з відводом тепла, розроблено математичну модель профілю світильника. Моделювання теплових потоків в ньому и розрахунок теплових навантажень виконано за допомогою модуля аналізу теплопередачі SolidWorks Flow Simulation. Даний

програмний комплекс дозволяє моделювати геометрію майбутнього виробу і виконувати всі необхідні розрахунки і аналізи. Кінцевий варіант профілю (рис. 1), що відповідає габаритним, масовим та тепловим вимогам отримано в результаті проведених розрахунків та експериментів з формою та габаритами. Методика розрахунку температури корпусу світильника, встановлює порядок проведення розрахунків, а також отримання наочної картини розподілу тепла в розрізі.

Рис.1. Профіль світлодіодного вуличного світильника

Таблиця 1. Результати термічного дослідження

Назва	***Тип***	***Мінімальне значення***	***Максимальне значення***
Термічний 1	TEMP: Температура	**59.2419 Celsius** Узел: 13291	**63.7425 Celsius** Узел: 6907

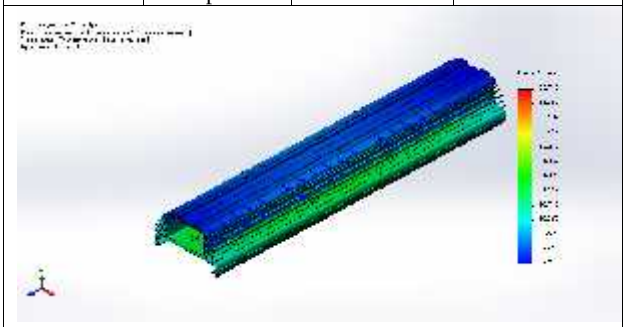

Рис.2. Теплове дослідження профілю 550 мм

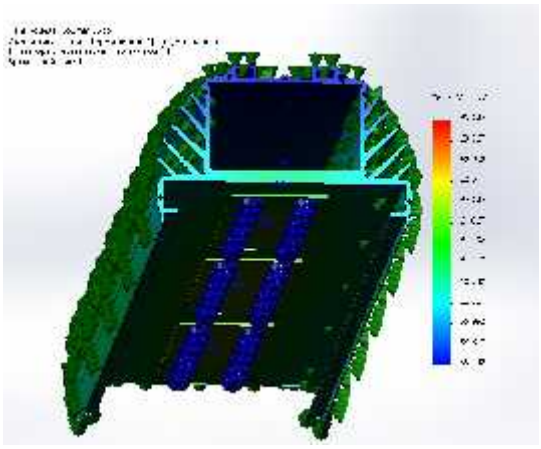

Рис.3. Теплове дослідження 550mm у розрізі

У проведеному дослідженні була спроектована і проаналізована - модель світлодіодного світильника з анодованим профілем довжиною 550мм, що представляє собою корпус, з розташованими на ньому трьома друкованими платами по 6 світлодіодів 5 Вт (номінальне значення) на кожен (90 Вт на світлодіодах) з запасом по тепловиділенню (на відведення тепла 50 Вт – це ККД світлодіодів 45%). Джерело живлення розташовано поза корпусу світильника, і не має вплив на температуру активної області.

Після розробки 3D моделі світильника були задані матеріали його основних деталей. Для кожного матеріалу задавалися фізичні характеристики необхідні для подальших розрахунків. У розрахунку враховувалися умови роботи світильника: навколишнє середовище - повітря, тиск 101,3 кПа; вологість 50%; температура навколишнього середовища; швидкість вітру 0 м/с. Результати наведені у таблиці 1.

Теплове дослідження профілю включає два типи навантаження – конвекцію та тепловий потік.

Тепловий розрахунок профілю, представленого на рисунку 2 та 3, наочно показує, що максимальна температура на корпусі (у горизонтальному положенні при відсутності вітру та температурі оточуючої середи 28 ºС) не перевищила 65 градусів При теплопровідності матеріалу 185-190, результат буде на пару градусів гірше. Спроектований профіль відповідає заданим параметрам і має можливість використання у серійному виробництві та подальших розрахунках.

Розрахунок втрат на нагрів здійснювався за умови, що квантовий вихід перетворення на люмінофорі дорівнює 1. Досягнуте до цього часу значення квантового виходу перетворення на люмінофорі має величину 0,75 ... 0,9. Відметемо також, що квантовий вихід перетворення залежить від довжини хвилі збуджуючого та випромінюючого світла. Побудована залежність потужності, що йде на тепло від сили струму живлення світлодіодів, рис. 4.

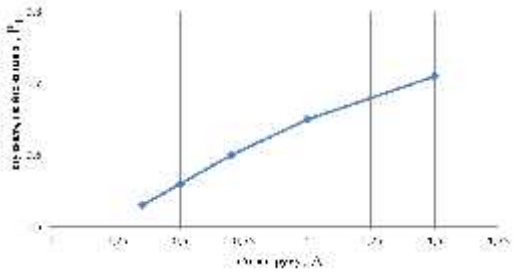

Рис.4. Залежність потужності, що йде на тепло від сили струму

Кількість світлодіодів визначається з умови парності (симетрії) і сумарного світлового потоку при температурі активної області 85 °С і загальної

потужності 120 Вт. Таким чином, при споживанні світлодіодом одного вата потужності, тільки 0,4 Вт перетворюється в світлове випромінювання, а 0,6 Вт йде на нагрів світлодіода. У результаті проведеної роботи маємо на меті створення дослідного зразка світильника із розрахованими параметрами корпусу та іншими характеристиками. Для перевірки розрахунків корпусу світлодіодного світильника пропонується вимірювання за допомогою тепловізора реального зразка світильника. Що в подальшому потребує порівняння і аналізу отриманих даних із розрахованими.

Висновки

Методика розрахунку температури корпусу світильника дозволяє оцінити, як обрані режими роботи світлодіодів будуть впливати на температуру світильника і відповідно, яка при цьому буде температура p-n переходу. Ефективність випромінювання світлодіода залежить від сили струму живлячої його, тому для отримання найбільш енергоефективного світлового приладу слід застосовувати струм живлення світлодіодів 350-700 мА. Розроблені методики дозволяють оцінювати теплові режими роботи світлодіодів, і вибирати найбільш підходящі, для створення енергоефективного світлового приладу.

Література

1. Теплометрия: теория, метрология, практика. Монография в трех книгах. / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев [и др.]; под ред. д-р техн. наук Т.Г. Грищенко. Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока - К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2017. – 438 с.

2. Колесник А. І. Исследование тепловых характеристик светодиодов / А. І. Колесник, Л. А. Назаренко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2016. – № 46 (2).– С. 27-30.

3. Бородин С.М. Обеспечение тепловых режимов в конструкциях радиоэлектронных средств. - Ульяновск: Ул. ГТУ, 2008. – 52.

4. K. Furkan Sokmena, E. Yuruklu, N. Yamankaradeniz, Computational thermal analysis of cylindrical fin design parameters and a new methodology for defining fin structure in LED automobile headlamp cooling applications, Appl. Therm. Eng. 94 (2016) 534–542.

5. Asiri Jayawardena, Yi-wei Liu, Nadarajah Narendran, Analysis of three different junction temperature estimation methods for AC LEDs, Solid-State Electronics, volume 86 (2013) Pages 11–16.

6. Young-Pil Kim, Young-Shin Kim, Seok-Cheol Ko, Thermal characteristics and fabrication of silicon sub-mount based LED package, Microelectronics Reliability, volume 56 (2016) pages 53–60.

7. U.S. Department of Energy. Lifetime of White LEDs. Building Technologies Program, Publication PNNL-SA-50957, April 2007.

8. LED Life for General Lighting: Recommendations for the Definition and Specification of Useful Life for Light-emitting Diode Light Sources. ASSIST recommends, Volume 1, Issue 7. Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies (ASSIST), 2006.

9. Sung Ho Parka, Jae Hoon Kim. Lifetime estimation of LED lamp using gamma process model // Microelectronics Reliability, Volume 57, February 2016, Pages 71–78.

10. IES LM-79-08. Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products. Illuminating Engineering Society of North America, 2008.

References

1. Thermometry: theory, metrology, practice. Monograph in three books. / T.G. Grischenko, L.V. Decouche, L.I. Vorobiev [and others]; Ed. Dr. Tech. T.G. Grishchenko. Book. 1: Methods and means of measuring the heat flow. - K .: Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2017. - 438 p.

2. Kolesnyk A.I. Investigation of thermal characteristics of light-emitting diodes / A.I. Kolesnyk, LA Nazarenko // Svitlotehnika and elektroenergetika. - 2016. - No. 46 (2) .- P. 27-30.

3. Borodin S.M. Provision of thermal regimes in the designs of radio electronic means. - Ulyanovsk: Ul. GTU, 2008. - 52.

4. K. Furkan Sokmena, E. Yuruklu, N. Yamankaradeniz, Computational thermal analysis of cylindrical fin design parameters and a new methodology for defining fin structure in LED automobile headlamp cooling applications, Appl. Therm. Eng. 94 (2016) 534–542.

5. Asiri Jayawardena, Yi-wei Liu, Nadarajah Narendran, Analysis of three different junction temperature estimation methods for AC LEDs, Solid-State Electronics, volume 86 (2013) Pages 11–16.

6. Young-Pil Kim, Young-Shin Kim, Seok-Cheol Ko, Thermal characteristics and fabrication of silicon sub-mount based LED package, Microelectronics Reliability, volume 56 (2016) pages 53–60.

7. U.S. Department of Energy. Lifetime of White LEDs. Building Technologies Program, Publication PNNL-SA-50957, April 2007.

8. LED Life for General Lighting: Recommendations for the Definition and Specification of Useful Life for Light-emitting Diode Light Sources. ASSIST recommends, Volume 1, Issue 7. Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies (ASSIST), 2006.

9. Sung Ho Parka, Jae Hoon Kim. Lifetime estimation of LED lamp using gamma process model //

Microelectronics Reliability, Volume 57, February 2016, Pages 71–78.

10. IES LM-79-08. Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products. Illuminating Engineering Society of North America, 2008.

Автор: КОЛЕСНИК Анастасія Ігорівна
аспірант кафедри Світлотехніки і джерел світла Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail: Atay1791@gmail.com

Автор: УСІЧЕНКО Дмитро Олександрович
аспірант кафедри Світлотехніки і джерел світла Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail: d.o.usichenko@gmail.com

Автор: НАЗАРЕНКО Леонід Андрійович
доктор технічних наук, професор кафедри Світлотехніка і джерела світла Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail: leonnaz@ukr.net

МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТВОДА ТЕПЛА ОТ СВЕТОДИОДНОГО ПРИБОРА

А.И. Колесник[1], Д.А. Усиченко[12], Л.А. Назаренко[1]

[1]Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, Украина
[2]Государственное предприятие "Харьковский региональный научно-производственный центр стандартизации, метрологии и сертификации"

Проанализированы результаты исследования температуры p-n перехода светодиодного светильника с использованием преобразователя теплового потока. Спроектирована математическая модель профиля светильника в программной среде Solid Works Flow-Simulation. Проведено моделирование и анализ тепловых потоков в программе и расчет тепловых нагрузок.

Ключевые слова: *светодиод, температура p-n перехода, тепловые потоки.*

METHODS AND RESULTS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HEAT DISSIPATION FROM LED LIGHTING

A. Kolesnyk[1], D. Usichenko[12], L. Nazarenko[1]

[1]O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine
[2]State enterprise "Kharkiv Regional Research and Production Center for Standardization, Metrology and Certification", Ukraine

The results of investigating the temperature of the p-n junction of an LED luminaire using a heat flow converter are analyzed. The calculation was carried out using the software complex for simulating the thermal modes of various electronic devices -SolidWorks Flow Simulation. This software package allows you to model the geometry of the future product and perform all necessary calculations and analyzes. In this paper we consider the heat and mass transfer in the base of the LED on the basis of 3D model that describe the complex of interrelated processes. The developed procedure for calculating the temperature of the luminaire body establishes the procedure for calculating the hull temperature. It is necessary to obtain a clear picture of the heat distribution in the section. The developed methods allow to evaluate the thermal modes of the LED operation, and to choose the most suitable for the creation of an energy efficient light device. The procedure for calculating the temperature of the housing of the luminaire allows us to assess how the selected modes of operation of the LEDs will affect the temperature of the luminaire and, accordingly, which will be the temperature of the p-n junction. A mathematical model of the luminaire profile was developed in the Solid Works Flow-Simulation software environment. Modeling of heat flows in it and calculation of thermal loads are carried out. The procedure for calculating the temperature of the lamp housing will allow us to assess how the selected modes of operation of the LEDs will affect the temperature of the luminaire and, accordingly, which will be the temperature of the p-n junction.

Keywords*: LED, p-n junction temperature, heat fluxes.*

