

Д. В. ПЕКУР¹, д. т. н. В. М. СОРОКІН¹, д. т. н. Ю. Є. НИКОЛАЄНКО²

Україна, м. Київ, ¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України;

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: demid.pekur@gmail.com, vsorokin@isp.kiev.ua, yunikola@ukr.net

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПАКТНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ З ТЕПЛОВИМИ ТРУБАМИ ДЛЯ ПОТУЖНОЇ СВІТЛОДІОДНОЇ МАТРИЦІ

Розроблено конструкцію потужного світлодіодного світильника компактних розмірів для освітлення приміщень. Засобами тепловідведення є теплові труби довжиною 150 мм. Кільця теплообмінника охолоджуються природньою конвекцією оточуючого повітря. За допомогою комп'ютерного моделювання та дослідження експериментального зразка приладу визначено можливість запропонованої системи охолодження забезпечувати нормальний тепловий режим світлодіодного джерела світла. Результати комп'ютерного моделювання її температурного поля показали, що при потужності світильника 140,7 Вт температура корпусу світлодіодної матриці складає 60,5°C, а виміряна експериментально — 61,3°C. Визначена експериментально теплова потужність світлодіодної матриці становила 91,5 Вт, температура р-п-переходу — 79,6°C, загальний тепловий опір системи охолодження — 0,453°C/Вт.

Ключові слова: світлодіодний освітлювальний пристрій, теплова труба, система охолодження, комп'ютерне моделювання, експериментальне моделювання.

Для створення світлового середовища побутових та промислових приміщень сьогодні широко застосовуються світлодіодні джерела світла [1]. Суттєві їхні переваги, такі як висока світлова ефективність (понад 100 лм/Вт [2]), значний термін служби (до 100 000 год [3]), високий індекс кольоропередачі (понад 95 одиниць [4]), широкий діапазон корельованих кольорних температур (від 2000 до 8000 К) та ефективні шляхи створення потрібних типів світлорозподілу з використанням лінз, дозволяють при створенні освітлювальних пристроїв все частіше відмовлятися від використання інших типів джерел світла на користь світлодіодних.

Однак разом зі збільшенням потужності світлодіодів зростає і кількість розсіюваної теплоти, що призводить до підвищення температури напівпровідникових кристалів та, відповідно, до зниження надійності їхньої роботи та до зміни фотометричних характеристик [5—7]. Тому при розробці конструкцій світлодіодних освітлювальних пристроїв питанням забезпечення робочого теплового режиму приділяється особлива увага [8]. Задача підвищення ефективності охолодження стає вкрай актуальною при застосуванні в світильниках потужних багатокристалівних світлодіодних джерел світла, так званих COB (chip-on-board — чіп на платі) матриць [9]. Так, наприклад, світлодіодна матриця типу CITIZEN CLU058 містить 648 кристалів, розміщених на платі розмірами 38×38×1,4 мм, і має потужність до 526 Вт [9].

Концентрація теплової потужності на корпусі таких світлодіодних матриць промислового викори-

стання складає понад 10⁵ Вт/м². Тенденції до зменшення розмірів світловипромінюючих кристалів при збільшенні потужності [10, 11] вказують на подальше ще більш серйозне загострення проблеми ефективного тепловідведення від них.

Для охолодження потужних світлодіодних джерел світла застосовуються системи, побудовані на різних принципах роботи: на основі пасивних радіаторів [12], термоелектричних охолоджувачів [13], п'єзоелектричних вентиляторів [14], струменевих охолоджувачів [15], рідинних систем охолодження [16], а також експериментальні системи на основі електронного вітру [17—19]. Для підвищення ефективності систем охолодження використовуються також комбінації різних принципів їхньої побудови. Звичайно, кожен тип систем охолодження має свої недоліки та переваги, але термін служби системи охолодження для світлодіодних джерел має бути близьким до терміну життя світлодіодів (50—100 тис. год). Найбільший термін служби мають пасивні системи охолодження на основі радіаторів [12], виготовлених з однорідних матеріалів з високою теплопровідністю.

З початку 2000-х років для ефективного відведення теплоти від потужних електронних компонентів (мікропроцесорів, лазерних діодів, транзисторів IGBT та MOSFET тощо) широко застосовуються двофазні теплопередавальні пристрої — теплові труби та термосифони [19—23], які останнім часом все частіше починають використовуватись і для охолодження світлодіодних джерел світла.

Особливості побудови світильників потребують розробки спеціальних конструкцій систем охоло-

дження з тепловими трубами (ТТ), які б мали відповідний дизайн та привабливий вигляд. Зазвичай теплові труби використовують разом з іншими елементами тепловідведення, наприклад в [24—26] — сумісно з радіатором, що охолоджується вільною конвекцією оточуючого повітря, в [25] — в комплексі з плавлячою речовиною, в [27] — з радіатором, що обдувається вентилятором. Найбільш надійними та простими у виготовленні є системи охолодження на основі теплових труб та радіаторів з вільною конвекцією повітря. Вони не потребують енерговитрат на переміщення теплоносія та є найбільш придатними для застосування в світлодіодних світильниках для освітлення приміщень [26, 27].

Більшість конструкцій систем охолодження, побудованих на основі ТТ, передбачає значні розміри по висоті [28—32], що викликано конкретними умовами експлуатації. В ряді застосувань, таких як освітлення житлових приміщень з низькими стелями, кабін та салонів автомобільного, морського та міського транспорту, вагонів потягів тощо, бажано мати компактні світильники з мінімальними розмірами по висоті. Таке рішення запропоновано, наприклад, у [33, 34], але воно виглядає не зовсім естетично, а це є достатньо важливим у перелічених випадках.

Більш естетичний вигляд має нова типова конструкція світлодіодного світильника з системою охолодження на основі теплових труб, запропонована в [35—38]. Завданням даної роботи є комп'ютерне моделювання, виготовлення та експериментальне дослідження такої системи охолодження світлодіодного освітлювального приладу з тепловим навантаженням до 100 Вт.

Параметри комп'ютерної моделі системи охолодження світлодіодної матриці

Конструкція системи охолодження запропонованого в [35—38] світильника має ребра охолодження, виконані у вигляді концентричних кілець, які за допомогою радіально розташованих ТТ з'єднані з забезпеченням теплового контакту з основою джерела світла. Конструкція може бути масштабована відповідно до поставлених перед розробниками задач. Знаючи задану потужність світлодіодної матриці, максимальне значення температури її корпусу та температуру оточуючого повітря, можна в кожному конкретному випадку визначити необхідну кількість ТТ та кілець охолодження, геометричні параметри системи охолодження тощо, використовуючи наведену у [37] методику оптимізації. Виконані нами розрахунки показали, що для функціонування освітлювального приладу з тепловим навантаженням світлодіодів до 100 Вт достатньо чотирьох теплових труб, діаметр системи охолодження може становити 300 мм при кількості кілець 7 та оптимальній висоті кілець 30 мм.

Схему розробленого світлодіодного освітлювального приладу з тепловою потужністю світлодіодної

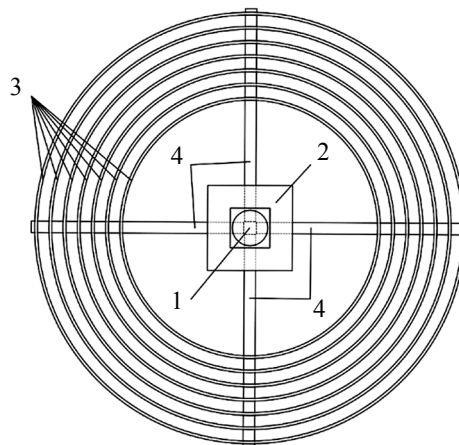


Рис. 1. Конструктивна схема системи охолодження світлодіодного освітлювального приладу на основі теплових труб

матриці до 100 Вт, яку було обрано в даній роботі для проведення комп'ютерного та експериментального дослідження, наведено на рис. 1. В освітлювальному приладі використано світлодіодну матрицю 1, яку закріплено з використанням між її корпусом та основою системи охолодження шару теплопровідної пасти товщиною 10^{-4} м з коефіцієнтом теплопровідності $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ (Arctic Silver 5 [39]). Система охолодження складається з основи 2, що має форму прямокутного паралелепіпеда, виготовленого з двох алюмінієвих пластин розмірами $60\times 60\times 5$ мм, семи теплообмінних кілець 3 вистотою 30 мм та товщиною 2 мм діаметром від 180 до 300 мм та чотирьох мідно-водяних теплових труб 4 довжиною 150 мм та діаметром 8 мм. В основі та в кільцях виконано отвори діаметром 8 мм, що забезпечують надійний тепловий контакт теплових труб з відповідними елементами.

Дослідження теплових характеристик моделі системи охолодження проводилися з використанням модуля аналізу FlowSimulation SolidWorks системи комп'ютерного проектування SolidWorks.

При створенні комп'ютерної моделі були враховані такі умови:

- теплові труби виконано з міді, теплоносієм — дистильована вода, ефективна теплопровідність ТТ відповідно до експериментально визначених значень становила $4542 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

- всі елементи конструкції (крім теплових труб) виготовлено з алюмінієвого сплаву АД31, коефіцієнт теплопровідності якого для температурного діапазону $300\text{—}600 \text{ К}$ становить $190 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [40];

- навколишнє середовище — повітря;

- температура навколишнього середовища 20°C ;

- атмосферний тиск $101,325 \text{ кПа}$;

- швидкість переміщення оточуючого середовища далеко за межами світильника 0 м/с ;

- теплота рівномірно розподіляється по зовнішній поверхні моделі джерела світла (світлодіодної

матриці СХА3070-0000-000NTHAD50H) з розміром корпусу 27,35×27,35 мм та діаметром зони підведення теплоти (зони випромінювання світла) 23 мм.

Для контролю похибок дискретизації і збіжності використовувалися розрахункові сітки моделей з ступенем деталізації до 801 тис. елементів. Контрольними параметрами були обрані максимальна температура системи охолодження і швидкість вільної конвекції повітря. Для розглянутого варіанту виконання системи охолодження похибка моделювання становить 4%.

Результати комп’ютерного моделювання та експериментальних досліджень

Отримані результати комп’ютерного та експериментального теплофізичного моделювання дозволили визначити температуру в характерних контрольних точках системи охолодження та визначити її можливості щодо забезпечення робочої температури потужних світлодіодних джерел світла.

Результати комп’ютерного моделювання представлено на **рис. 2**.

Для оцінки достовірності результатів комп’ютерного моделювання було виготовлено експериментальний зразок світлодіодного освітлювального приладу (**рис. 3**) діаметром 310 мм, висотою 51 мм, масою 1,2 кг. Вимірювання температури проводилося в характерних контрольних точках (див. рис. 2): на корпусі світлодіодної матриці (1, 2), на основі системи охолодження (3), на першому, четвертому та шостому кільцях системи охолодження (відповідно, 4, 5 та 6).

Для збільшення інформативності та достовірності результатів вимірювання проводилися двома методами: за допомогою тепловізора та за допомогою термопар. Використовувалися тепловізор типу FLIR SC305 та мідь-константанові термопари (Т-типу) з багатоканальним вимірювачем температури YF-500.

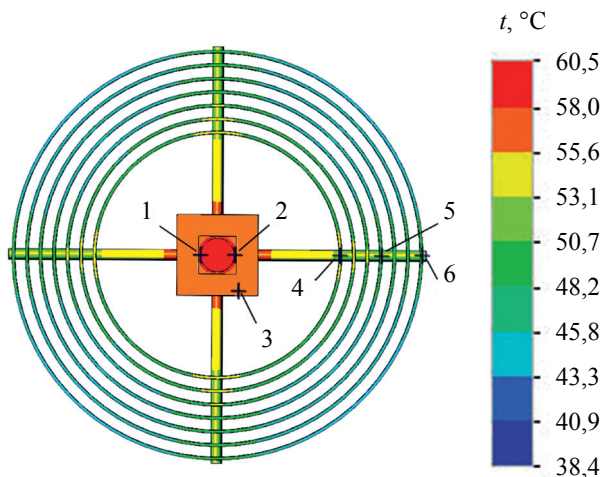


Рис. 2. Розподіл температури в системі охолодження світлодіодного джерела світла, отриманий методом комп’ютерного моделювання (1...6 — контрольні точки визначення температури)

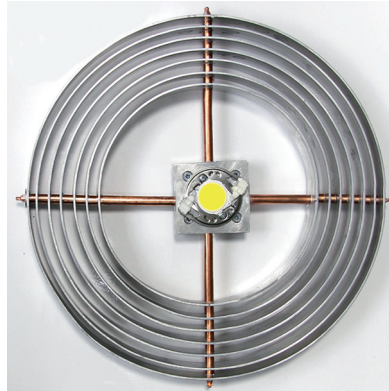


Рис. 3. Експериментальний зразок системи охолодження світлодіодної матриці

В таблиці представлено значення температури в контрольних точках, отримані експериментально та визначені методом комп’ютерного моделювання при тепловій потужності світлодіодного джерела світла 91,5 Вт, загальна потужність при цьому складала 140,7 Вт. Аналіз представлених даних показує добру узгоджуваність результатів експериментального вимірювання температури з результатами комп’ютерного моделювання, що говорить про адекватність комп’ютерної моделі. Розбіжності значень температур, отриманих за результатами комп’ютерного моделювання та визначених експериментальними методами, знаходиться в межах похибки експерименту.

Значення температури в контрольних точках, отриманих методом комп’ютерного моделювання та експериментально

№ точки	Температура, °С		
	моделювання	тепловізор	термопари
1	60,5(±1,9)	61,2(±1)	61,4(±1)
2	60,5(±1,9)	60,2(±1)	60,5(±1)
3	57,5(±1,7)	57,2(±1)	57,1(±1)
4	46,9(±1,2)	47,2(±1)	46,9(±1)
5	46,1(±1,1)	45,5(±1)	45,2(±1)
6	45,2(±1,1)	44,8(±1)	44,1(±1)

За вказаної теплової потужності середнє значення температури корпусу світлодіодної матриці, отримане експериментально, складає 61,3°С, а розрахункове значення температури р-п-переходу при тепловому опорі «світлодіодний кристал — корпус» 0,2 К/Вт становить до 79,6°С.

Висновки

Таким чином, показано, що експериментальний зразок освітлювального приладу компактних розмірів здатний забезпечити такий рівень температури світловипромінюючих структур, що дозволяє передбачити їхню надійну роботу протягом 100 тис. год.

Розроблений експериментальний зразок освітлювального приладу показує практичну можливість створення компактних світлодіодних систем охолодження на основі теплових труб.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Светодиоды и их применение для освещения (Под общей редакцией ак. АЭН РФ Ю. Б. Айзенберга). Москва, Знак, 2012.
2. Котеленко С.В., Чижкин А.В. Светодиоды как современная альтернатива традиционным источникам света. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2019, №11, с. 92–97. <https://doi.org/10.24411/2071-6168-2019-11113>.
3. Борщев В.Н., Листратенко А.М., Тымчук И.Т. и др. Высокоэффективные объемные светодиодные модули для сверхмощных ламп бытового и промышленного применения. *Оптоэлектроника та напівпровідникова техніка*, 2017, № 52, с. 70–80. <https://doi.org/10.15407/jopt.2017.52.070>
4. Светодиоды с высоким CRI, широким спектром и узкой КСС от Citizen Electronics. *Современная светотехника*, 2015, № 4, с. 9–11. http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/09.pdf
5. Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. *Lighting Res. Technol.*, 2015, vol. 48, № 8, с. 943–965. <https://doi.org/10.1177/1477153515576785>
6. Chang Moon-Hwan, Das Diganta, Varde P.V., Pecht Michael. Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, iss. 5, p. 762–782. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.07.063>
7. Chhajed S., Xi Y., Li Y.-L. et al. Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes. *Journal of Applied Physics*, 2005, Vol. 97, p. 054506-1–054506-8. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1852073>
8. Pryde J. R. *Development of effective thermal management strategies for LED luminaires*, Doct. Thesis, Loughborough University, 2017. <https://hdl.handle.net/2134/26687>
9. Ураски А. Развитие светодиодных модулей Chip-on-Board на примере эволюции матриц от компании Citizen Electronics. *Современная светотехника*, 2018, № 2, p. 20–22. [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20\(3\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20(3).pdf)
10. Shuji Nakamura, Michael R. Krames. History of gallium-nitride-based light-emitting diodes for illumination. *Proceedings of the IEEE*, 2013, vol. 101, iss. 10, p. 2211–2220. <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2013.2274929>
11. Wong M. S., Shuji Nakamura, DenBaars S. P. Review-progress in high performance III-nitride micro-light-emitting diodes. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020, vol. 9, art. 015012. <http://dx.doi.org/10.1149/2.0302001JSS>
12. Ying S. P., Shen W. B. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2015, vol. 62, iss. 3, p. 896–901. <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2015.2390255>
13. Wang Jing, Zhao Xin-Jie, Cai Yi-Xi et al. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 101, p. 532–540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.040>
14. Maaspuro Mika. Piezoelectric oscillating cantilever fan for thermal management of electronics and LEDs — A review. *Microelectronics Reliability*, 2016, vol. 63, p. 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.06.008>
15. Deng Xiong, Luo Zhenbing, Xia Zhixun et al. Active-passive combined and closed-loop control for the thermal management of high-power LED based on a dual synthetic jet actuator. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 132, p. 207–212. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.034>
16. Schneider M., Leyrer B., Herbold C., Maikowske S. High power density LED modules with silver sintering die attach on aluminum nitride substrates. *IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2014, p. 203–208. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897289>
17. Jingguo Qu, Lingjian Kong, Jianfei Zhang. Experimental investigation on flow and heat transfer characteristics of a needle-cylinder type ionic wind generator for LED cooling. *Energies*, 2018, vol. 11, art. 1149. <https://doi.org/10.3390/en11051149>
18. Dong Ho Shin, Dong Kee Sohn, Han Seo Ko. Analysis of thermal flow around heat sink with ionic wind for high-power. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 143, p. 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.118>
19. Mochizuki Masataka, Nguyen Thang, Mashiko Koichi et al. A review of heat pipe application including new opportunities. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 2011, vol. 2, p. 013001. <https://doi.org/10.5098/fhp.v2.1.3001>
20. Shu Shili, Hou Guanyu, Wang Lijie et al. Heat dissipation in high-power semiconductor lasers with heat pipe cooling system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, № 6, p. 2607–2612. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0502-9>
21. Nikolaenko Yu. E., Alekseik E.S., Kozak D.V., Nikolaienko T.Yu. Research on two-phase heat removal devices for power electronics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 8, p. 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>
22. Lu Jiazheng, Shen Limei, Huang Qingjun et al. Investigation of a rectangular heat pipe radiator with parallel heat flow structure for cooling high-power IGBT modules. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, vol. 135, p. 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.09.004>
23. Driss Améni, Maalej Samah, Zaghdoudi Mohamed Chaker. Thermal modeling of the cooling of a power MOSFET by heat pipes. *International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, Monastir, Tunisia, 2017, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEMIS.2017.8273067>
24. Ji Li, Wenkai Tian, Lucang Lv, A thermosyphon heat pipe cooler for high power LEDs cooling. *Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 52(8), p. 1541–1548. <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-015-1679-z>
25. Wu Y., Tang Y., Li Z. et al. Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, vol. 108, p.192–203. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.127>
26. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2019, vol. 22(3), p. 366–371. <https://doi.org/10.15407/spqeo22.03.366>
27. Nikolaenko T.Yu., Nikolaenko Yu.E. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with light emitting diodes. *Light & Engineering*, 2015, vol. 23(3) , p. 85–88. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84966507707&partnerID=MN8TOARS>
28. Николаенко Ю. Е. Светодиодная люстра с тепловыми трубами и результаты исследования ее тепловых характеристик. *Конференция LED Progress «Світлодіоди — Новинки. Практика. Перспективи»*, Київ, 2016, с. 53–54.
29. Николаенко Ю. Е., Баранок А. В., Николаенко Т. Ю. Экспериментальное исследование характеристик светодиодной люстры с тепловыми трубами с возможностью питания ее от возобновляемых источников энергии. *Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Секция III, Узбекистан, Ташкент, 2017, с. 149–154.*
30. Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Naumova A.N. Baranyuk A.V. Development of the ways to increase the lighting energy efficiency of living space. *International Journal of Energy for a Clean*

Environment, 2017, vol. 18(30), p. 275–285. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2018021>.

31. Пекур Д. В., Николаєнко Ю. Є., Сорокін В. М. та ін. Комп'ютерне моделювання та експериментальне дослідження двофазної системи охолодження для світлодіодного світильника типу «бра». *Тези доповідей XI Міжнар. наук.-техн. конференції «Метрологія та вимірювальна техніка»*, Харків, 2018, с. 121.

32. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2019, vol. 22(3), p. 366–371.

33. Делендик К., Войтик О., Коляго Н. Системы охлаждения на основе тепловых труб. *Наука и инновации*, 2017, vol. 11(177), с. 27–33.

34. Delendik K., Kolyago N., Voitik O. Design and investigation of cooling system for high-power LED luminaire. *Computers and Mathematics with Applications*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2020.01.026>

35. Сорокін В.М., Пекур Д.В., Николаєнко Ю.Є. Світлодіодний світильник. Пат. № 141753, 2020, бюл. № 8.

36. Пекур Д. В., Николаєнко Ю. Є., Сорокін В. М. Нова конструкція світлодіодного світильника з тепловими трубами. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 5–6, с. 34–42, <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.5-6.34>

37. Pekur D. V., Nikolaenko Yu. E., Sorokin V. M. Optimization of the cooling system design for a compact high-power LED luminaire. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2020, vol. 23(1), p. 91–101. <https://doi.org/10.15407/spqeo23.01.091>

38. Pekur D. V., Sorokin V. M., Nikolaenko Yu. E. Thermal characteristics of a compact LED luminaire with a cooling system based on heat pipes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 18, art. 100549. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100549>

39. Елагин А. А., Шишкин Р. А., Баранов М. В., Бекетов А. Р., Стоянов О. В. Обзор теплопроводных материалов и термопаст на их основе. *Вестник Казанского технологического университета*, 2013, Т. 16(4), с. 132–136.

40. Белецкий В. М., Кривов Г. А. *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение)*. Киев: Коминтех, 2005, 365 с.

Дата надходження рукопису
до редакції 02.06 2020 р.

DOI: 10.15222/ТКЕА2020.3-4.35

УДК 536.248.2; 628.941.8

Д. В. ПЕКУР¹, В. М. СОРОКИН¹, Ю. Е. НИКОЛАЕНКО²

Украина, Киев, ¹Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины,

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

E-mail: demid.pekur@gmail.com,
vsorokin@isp.kiev.ua, yunikola@ukr.net

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАКТНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ МОЩНОЙ СВЕТОДИОДНОЙ МАТРИЦЫ

В настоящее время для освещения бытовых и промышленных помещений широко применяются светодиодные источники света, в частности мощные многокристальные. При этом с увеличением мощности растет и количество выделяемой теплоты, что приводит к повышению температуры полупроводниковых кристаллов и, соответственно, к снижению надежности работы светодиодов и изменению их фотометрических характеристик. Поэтому при разработке конструкции светодиодных осветительных устройств особое внимание уделяется вопросам обеспечения рабочего теплового режима. С начала 2000-х годов для эффективного отвода тепла от мощных электронных компонентов стали широко применять тепловые трубы. Они не требуют энергозатрат на перемещение теплоносителя и являются наиболее подходящими для применения в светодиодных светильниках.

В данной работе проведено компьютерное моделирование системы охлаждения на основе тепловых труб, а затем разработана и экспериментально исследована конструкция мощного светодиодного светильника с тепловой нагрузкой до 100 Вт компактных размеров.

Для отвода теплоты от светодиодного источника света к концентрически расположенным вокруг него кольцам теплообменника использованы тепловые трубы длиной 150 мм. Кольца теплообменника охлаждаются естественной конвекцией окружающего воздуха.

Результаты компьютерного моделирования температурного поля разработанной системы охлаждения показали, что при мощности светодиодного источника света 140,7 Вт температура корпуса светодиодной матрицы составляет 60,5°C, а измеренная экспериментально — 61,3°C. Определенная экспериментально тепловая мощность светодиодной матрицы составляла 91,5 Вт, температура р-п-перехода — 79,6°C, общее тепловое сопротивление системы охлаждения — 0,453°C/Вт. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности разработанной конструкции.

Ключевые слова: светодиодное осветительное устройство, тепловая труба, система охлаждения, компьютерное моделирование, экспериментальное моделирование.

Ukraine, Kyiv, ¹V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine;
²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute"
E-mail: demid.pekur@gmail.com, vsorokin@isp.kiev.ua, yunikola@ukr.net

EXPERIMENTAL STUDY OF A COMPACT COOLING SYSTEM WITH HEAT PIPES FOR POWERFUL LED MATRIX

LED light sources, and powerful multichip light sources in particular, are currently widely used for lighting household and industrial premises. With an increase in power, the amount of heat increases as well, which leads to an increase in the temperature of semiconductor crystals and, accordingly, to a decrease in the reliability of LEDs and a change in their photometric characteristics. Therefore, when developing the design of LED lighting devices, special attention is paid to thermal management. Since the early 2000s, heat pipes have been widely used to efficiently remove heat from powerful electronic components. They do not require power for moving the working fluid and are most suitable for use in LED luminaires.

In this study, the authors carry out a computer simulation of a cooling system based on heat pipes, which is then used to design and test a powerful compact LED lamp with a thermal load of up to 100 W.

Heat pipes with a length of 150 mm are used to remove heat from the LED light source to the heat exchanger rings located concentrically around it. The heat exchanger rings are cooled by natural convection of the ambient air. The results of computer modeling of the temperature field of the developed cooling system show that at a power of the LED light source of 140.7 W, the temperature of the LED matrix case is 60.5°C, and the experimentally measured temperature is 61.3°C. The experimentally determined thermal power of the LED matrix is 91.5 W. The p-n junction temperature is 79.6°C. The total thermal resistance of the cooling system is 0.453°C/W. The obtained results indicate the effectiveness of the developed design.

Keywords: LED lighting device, heat pipe, cooling system, computer simulation, experimental simulation.

REFERENCES

1. Svetiodiody i ikh primeneniye dlya osveshcheniya [LEDs and their application for lighting]. Ed. by Yu. B. Eisenberg. Moscow, Znack, 2012. (Rus)
2. Kotelenko S.V., Chizhkin A.V. [LEDs as a modern alternative to traditional light sources]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*. 2019. no. 11. pp. 92–97. <https://doi.org/10.24411/2071-6168-2019-11113>. (Rus)
3. Borshchev V.N., Listratenko A.M., Tymchuk I.T. et al. Highly efficient volumetric LED modules for heavy-duty lamps for household and industrial use. *Optoelektronika ta napivprovodnikova tekhnika*, 2017, no. 52, pp. 70–80. <https://doi.org/10.15407/jopt.2017.52.070> (Rus)
4. [High CRI, wide spectrum and narrow LIC LEDs from Citizen Electronics]. *Sovremennaya svetotekhnika*, 2015, no. 4, pp. 9–11. http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/09.pdf (Rus)
5. Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. *Lighting Res. Technol.*, 2015, vol. 48, no. 8, pp. 943–965, <https://doi.org/10.1177/1477153515576785>
6. Chang Moon-Hwan, Das Diganta, Varde P.V., Pecht Michael. Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, iss. 5, pp. 762–782, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.07.063>
7. Chhajed S., Xi Y., Li Y.-L. et al. Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes. *Journal of Applied Physic*, 2005, vol. 97, pp. 054506-1–054506-8, <http://dx.doi.org/10.1063/1.1852073>
8. Pryde J. R. *Development of effective thermal management strategies for LED luminaires*, Doct. Thesis, Loughborough University, 2017, <https://hdl.handle.net/2134/26687>
9. Ursaki A. Development of Chip-on-Board LED modules by the example of matrix evolution from Citizen Electronics. *Sovremennaya svetotekhnika*, 2018, no. 2, pp. 20–22, [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20\(3\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20(3).pdf) (Rus)
10. Shuji Nakamura. Michael R. Krames. History of gallium-nitride-based light-emitting diodes for illumination. *Proceedings of the IEEE*, 2013, vol. 101, iss. 10, pp. 2211–2220. <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2013.2274929>
11. Wong M. S., Shuji Nakamura, DenBaars S. P. Review—Progress in High Performance III-Nitride Micro-Light-Emitting Diodes. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020, vol. 9, art. 015012. <http://dx.doi.org/10.1149/2.0302001JSS>
12. Ying S. P., Shen W. B. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2015, vol. 62, iss. 3, pp. 896–901. <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2015.2390255>
13. Wang Jing, Zhao Xin-Jie, Cai Yi-Xi et al. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 101, pp. 532–540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.040>
14. Maaspuro Mika. Piezoelectric oscillating cantilever fan for thermal management of electronics and LEDs — A review. *Microelectronics Reliability*, 2016, vol. 63, pp. 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.06.008>
15. Deng Xiong, Luo Zhenbing, Xia Zhixun et al. Active-passive combined and closed-loop control for the thermal management of high-power LED based on a dual synthetic jet actuator. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 132, pp. 207–212. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.034>
16. Schneider M., Leyrer B., Herbold C., Maikowske S. High power density LED modules with silver sintering die attach on aluminum nitride substrates. *IEEE 64th Electronic Components and*

Technology Conference (ECTC), 2014, pp. 203–208. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897289>

17. Jingguo Qu, Lingjian Kong, Jianfei Zhang. Experimental investigation on flow and heat transfer characteristics of a needle-cylinder type ionic wind generator for LED cooling. *Energies*, 2018, vol. 11, art. 1149. <https://doi.org/10.3390/en11051149>

18. Dong Ho Shin, Dong Kee Sohn, Han Seo Ko. Analysis of thermal flow around heat sink with ionic wind for high-power. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 143, pp. 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.118>

19. Mochizuki Masataka, Nguyen Thang, Mashiko Koichi et al. A review of heat pipe application including new opportunities. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 2011, vol. 2, pp. 013001. <https://doi.org/10.5098/fhp.v2.1.3001>

20. Shu Shili, Hou Guanyu, Wang Lijie et al. Heat dissipation in high-power semiconductor lasers with heat pipe cooling system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, no. 6, pp. 2607–2612. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0502-9>

21. Nikolaenko Yu. E., Alekseik E.S., Kozak D.V., Nikolaenko T.Yu. Research on two-phase heat removal devices for power electronics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 8, pp. 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>

22. Lu Jiazheng, Shen Limei, Huang Qingjun et al. Investigation of a rectangular heat pipe radiator with parallel heat flow structure for cooling high-power IGBT modules. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, vol. 135, pp. 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.09.004>

23. Driss Améni, Maalej Samah, Zaghdoudi Mohamed Chaker. Thermal modeling of the cooling of a power MOSFET by heat pipes. *International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, Monastir, Tunisia, 2017, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEMIS.2017.8273067>

24. Ji Li, Wenkai Tian, Lucang Lv. A thermosyphon heat pipe cooler for high power LEDs cooling. *Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 52(8), pp. 1541–1548. <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-015-1679-z>

25. Wu Y., Tang Y., Li Z., Ding X., Yuan W., Zhao X., Yu B. Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, vol. 108, pp. 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.127>

26. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2019, vol. 22(3), pp. 366–371. <https://doi.org/10.15407/spqeo22.03.366>

27. Nikolaenko T.Yu., Nikolaenko Yu.E. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with Light Emitting Diodes. *Light & Engineering*, 2015, vol. 23(3), pp. 85–88. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84966507707&partnerID=MN8TOARS>

28. Nikolaenko, Yu. E. [LED chandelier with heat pipes and the results of the study of its thermal characteristics]. *Exhibition of LED*

and Smart Lighting «LEDExpo Ukraine 2016», as part of Conference LED Progress “LED Lighting: News. Practice. Prospects”, Kyiv, 2016, pp. 53–54 (Rus)

29. Nikolaenko Yu. E., Baranyuk AV, Nikolaenko T. Yu. [Experimental research on characteristics of the LED chandelier with heat pipes with a possibility to power it from renewable energy sources]. *Proceedings of the International Conference «Fundamental and applied problems of physics». Section III*, Uzbekistan, Tashkent, 2017, pp. 149–154. (Rus)

30. Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Naumova A.N. Baranyuk A.V. Development of the ways to increase the lighting energy efficiency of living space. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2017, vol. 18(30), pp. 275–285. <https://doi.org/10.1615/InterJenerCleanEnv.2018021>

31. Pekur D. V., Nikolaenko Yu. Ye., Sorokin V. M. et al. [Computer modeling and experimental research of two-phase cooling system for scone type LED lamps]. *Proceed. of the XI International Scientific & Technical Conference “Metrology and measurement techniques”*, Kharkiv, 2018, pp. 121. (Ukr)

32. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2019, vol. 22(3), pp. 366–371.

33. Delendik K., Voytik O., Kolyago N. [Cooling systems based on heat pipes]. *Nauka i innovatsii*, 2017, vol. 11(177), pp. 27–33. (Rus)

34. Delendik K., Kolyago N., Voitik O. Design and investigation of cooling system for high-power LED luminaire. *Computers and Mathematics with Applications*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2020.01.026>

35. Sorokin V. M., Pekur D. V., Nikolaenko Y. E. *LED lamp*. Patent №141753, of Ukraine, 2020, bull. № 8. (Ukr)

36. Pekur D. V., Nikolaenko Yu. E., Sorokin V. M. New LED lamp design with heat pipes. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5–6, pp. 34–42. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.34> (Ukr)

37. Pekur D. V., Nikolaenko Yu. E., Sorokin V. M. Optimization of the cooling system design for a compact high-power LED luminaire. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2020, vol. 23, iss. 1, pp. 91–101. <https://doi.org/10.15407/spqeo23.01.091>

38. Pekur D. V., Sorokin V. M., Nikolaenko Yu. E. *Thermal characteristics of a compact LED luminaire with a cooling system based on heat pipes*. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 18, art. 100549. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100549>

39. Elagin A. A., Shishkin R. A., Baranov M. V et al. [Review of heat-conducting materials and thermal pastes based on them]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, iss. 4, pp. 132–136. (Rus)

40. Beletsky V.M., Krivov G.A. [*Aluminum alloys (composition, properties, technology, application)*]. Ed. by I. N. Friedlander. Kiev, Komintech, 2005, 365 p. (Rus)

Опис статті для цитування:

Пекур Д. В., Сорокін В. М., Ніколаєнко Ю. Є. Експериментальне дослідження компактної системи охолодження з тепловими трубами для потужної світлодіодної матриці. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 3–4, с. 35–41. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.3-4.35>

Cite the article as:

Pekur D. V., Sorokin V. M., Nikolaenko Yu. E. Experimental study of a compact cooling system with heat pipes for powerful LED matrix. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 3–4, с. 35–41. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.3-4.35>