

А. Н. НАУМОВА¹, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО¹, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ¹,
чл.-корр. НАНУ, д. т. н. В. М. СОРОКИН², А. С. ОЛЕЙНИК²

Украина, г. Киев. ¹НТУУ «Киевский политехнический институт»,

²Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ

E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

ОХЛАЖДЕНИЕ СВЕТОДИОДНОГО МОДУЛЯ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОТВОДОВ

Приведены результаты экспериментального сравнения тепловых характеристик трех теплоотводов: штампованного из алюминиевого листа (базовый вариант), на основе медно-водяной пульсационной тепловой трубы и на основе медного проволочного радиатора, с помощью которых охлаждался светодиодный модуль мощностью 10,55 Вт. Установлено, что все исследованные теплоотводы обеспечивают температуру не выше 64°C в местах установки светодиодов в условиях естественной конвекции, при этом использование медного проволочного радиатора позволяет снизить температуру в центре печатной платы модуля на 3,9°C по сравнению с базовым вариантом, а использование теплоотвода на основе пульсационной тепловой трубы — на 7,1°C.

Ключевые слова: светодиодный модуль, теплоотвод, радиатор, пульсационная тепловая труба, температура.

Стремительное развитие технологий в области светодиодных источников света привело к значительному расширению сферы применения светодиодов: от простых световых индикаторов до светодиодных ламп прямой замены и мощных осветительных приборов самого различного назначения. Светодиодные источники света отличаются высокой световой отдачей (120–150 Лм/Вт против 10–15 Лм/Вт у ламп накаливания), низким потреблением электроэнергии, малой чувствительностью к низкой температуре и агрессивной окружающей среде, экологичностью, высокой степенью управляемости параметрами освещения. Все это делает их привлекательными для решения одной из важнейших проблем современной светотехники — проблемы энергосбережения [1, 2]. К достоинствам светодиодов стоит отнести также высокую механическую прочность, длительный срок службы, не зависящий от количества циклов включения и выключения (свыше 30 тыс. ч против 1 тыс. ч для ламп накаливания), безопасность использования и малую инерционность (мгновенное включение по сравнению с люминесцентной лампой, время включения которой составляет от 1 с до 1 мин плюс несколько минут на стабилизацию яркости). В то же время, светодиоды не лишены и недостатков, основным из которых является их высокая стоимость. Помимо этого, светодиоды очень чувствительны к воздействию высокой температуры: длительное функционирование при высокой температуре и/или недостаточно эффективный отвод выделяемой теплоты приводят к деградации полупроводникового кристалла светодиода, что негативно сказыва-

ется на сроке службы, световых характеристиках и цветовых параметрах устройства [3–5].

Во время работы светодиода около 75% потребляемой электроэнергии выделяется в виде теплоты, что приводит к его нагреву. В связи с этим обеспечение заданного теплового режима является одной из основных проблем при разработке светодиодных осветительных приборов, а качество теплоотвода является ключевым фактором, определяющим основные характеристики светодиодов и осветительного прибора в целом.

Как правило, в осветительных приборах светодиоды используются в составе светодиодных модулей (СДМ). Известны различные способы отвода теплоты от СДМ: от традиционного использования кондуктивных теплоотводов и оребрения элементов корпуса прибора с отводом теплоты естественной или вынужденной конвекцией воздуха [6–9] до использования термоэлектрических охладителей [10], жидкостного охлаждения [11–13], тепловых труб [14–16]. При этом в каждом конкретном случае важно подобрать такую конструкцию теплоотвода, которая бы максимально эффективно справлялась с задачей охлаждения СДМ и не снижала ценовую конкурентоспособность осветительного прибора. Из указанных систем теплоотвода самыми дешевыми являются оребренные поверхности (ребристые и проволочные радиаторы). Вместе с тем, они и менее эффективны, чем, например, жидкостное охлаждение. Привлекательным выглядит использование пульсационных тепловых труб (ПТТ), отличающихся достаточно высокими теплопередающими характеристиками при простоте кон-

струкции (не содержат капиллярно-пористой структуры) [17, 18].

В данном исследовании было проведено экспериментальное сравнение эффективности охлаждения светодиодного модуля с помощью трех наиболее дешевых теплоотводов: штампованного алюминиевого радиатора, теплоотвода на основе пульсационной тепловой трубы и теплоотвода на основе медного проволочного радиатора.

Конструкция теплоотводов, экспериментальная установка и методика исследований

В качестве объекта охлаждения, использованного во всех экспериментах, был выбран светодиодный модуль, представляющий собой теплопроводное основание в виде плоской алюминиевой печатной платы диаметром 52 мм с распаянными на ней 30 светодиодами в корпусах 2835 (рис. 1). Светодиоды электрически соединены

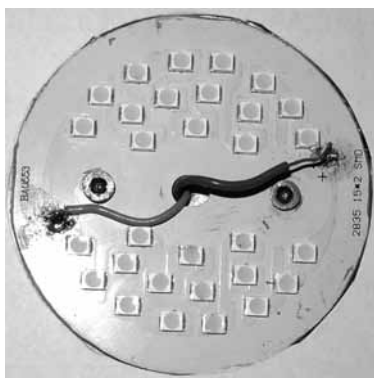


Рис. 1. Внешний вид светодиодного модуля

в две параллельные цепочки по 15 включенных последовательно светодиодов в каждой и подключены к общему драйверу питания. При этом, потребляемая всеми светодиодами мощность составила 10,55 Вт (измеренные значения тока и напряжения на входе СДМ составили 120 мА и 87,9 В соответственно).

Для охлаждения СДМ использовалось три конструктивных варианта теплоотводов (рис. 2):

1) Радиатор сложной формы (см. рис. 2, а), изготовленный штамповкой из алюминиевого листа толщиной 0,5 мм, диаметром 150 мм, с радиально-гофрированными ребрами с общей площадью теплоотдающей поверхности $306 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, изготовленный в НПП «Газотрон-лайт» (базовый вариант);

2) Пульсационная тепловая труба (ПТТ) [19] с 24 петлями высотой 40 мм, изготовленная из медной трубки с наружным и внутренним диаметрами 2 и 1 мм соответственно. Участки зоны нагрева (ЗН) запаяны в медное основание размером 50 50 3 мм. Высота участков зоны конденсации — 39 мм, общая площадь теплоотдающей поверхности — $143 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. В качестве теплоносителя используется вода (см. рис. 2, б);

3) Проволочный радиатор (см. рис. 2, в), выполненный из медной проволоки диаметром 2 мм. Его геометрия совпадает с геометрией ПТТ, поэтому площадь теплоотдающей поверхности такая же ($143 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$).

Для исследования тепловых характеристик теплоотводов была собрана экспериментальная установка, структурная схема которой приведена на рис. 3. Основным рабочим участком установки являлся светодиодный модуль 1, на котором

поочередно с помощью двух винтов М3 закреплялись исследуемые теплоотводящие конструкции 2. С целью минимизации термического сопротивления между СДМ и теплоотводом на контактирующие поверхности был нанесен слой теплопроводной пасты КПТ-8. Температурное поле теплоотводов и СДМ измерялось с помощью компьютеризированной измерительной системы на основе аналого-цифрового преобразователя 3 и соответствующего программного продукта, которые позволяют преобразовывать аналоговые значения сигналов термопар в цифровые значения температуры и отображать их на экране монитора персонального компьютера 4 в виде графиков зависимости температуры от времени и в виде таблицы в формате Excel.

Для измерений использовались тарированные медь-константановые термопары с диаметром электродов 0,2 и 0,16 мм соответственно. Крепление термопар к твердым поверхностям производилось с помощью клейкой алюминиевой фольги и пайки. Их спаи размещались в пяти

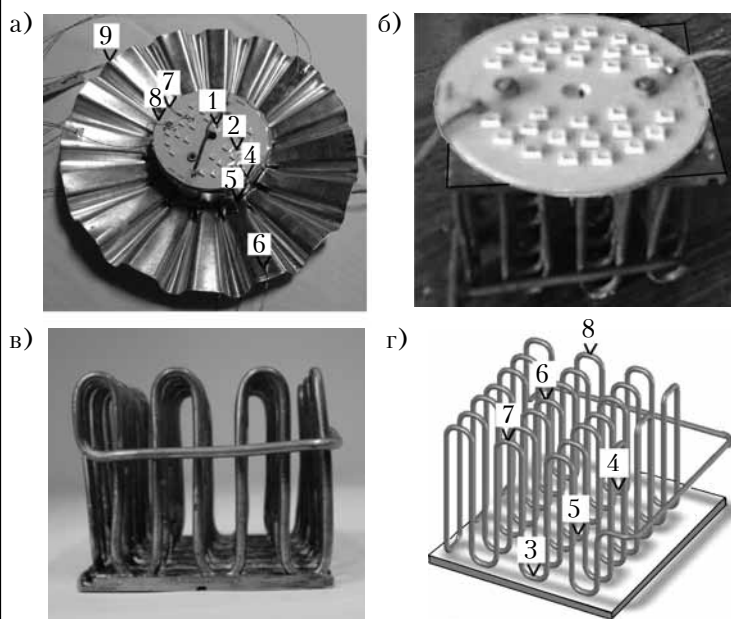


Рис. 2. Внешний вид теплоотводов:

а — штампованный алюминиевый радиатор (показаны места установки термопар); б — теплоотвод на основе медно-водяной ПТТ; в — радиатор из медной проволоки; г — схема размещения термопар на ПТТ и проволочном радиаторе

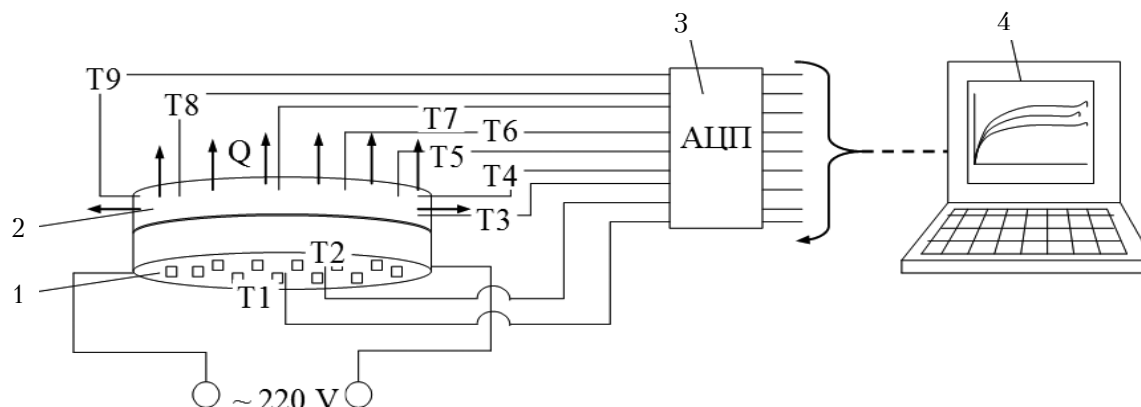


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:
1 — СДМ; 2 — теплоотвод; 3 — АЦП; 4 — персональный компьютер; T1...T9 — термопары

характерных тепловых зонах, а именно: I — в центре печатной платы СДМ; II — между светодиодами на поверхности печатной платы СДМ; III — у основания ребер штампованного радиатора или у основания петель ПТТ и проволочного радиатора; IV — на крайней части ребер или петель теплоотводов; V — в окружающем воздухе. Номера термопар, установленных в этих зонах, приведены в таблице.

Как видно из **таблицы**, термопары с одним и тем же номером размещались при исследовании разных теплоотводов в разных тепловых зонах. Так, термопара T9 при исследовании алюминиевого штампованного радиатора размещалась не в окружающем воздухе (тепловая зона V), а на периферийной части радиатора (зона IV), как и термопара T6, что хорошо видно на рис. 2, а. Температура воздуха в этом случае измерялась не термопарой, а ртутным термометром и на экран монитора ее значения не выводились. В двух других случаях спай термопары T9 был размещен в окружающем воздухе (зона V), и ее показания через АЦП выводились на ПК и отображались на экране монитора.

Для имитации реальных условий эксплуатации осветительного прибора СДМ с прикрепленным теплоотводом располагался в пространстве так, чтобы своей светоизлучающей поверхностью светодиоды были направлены вниз, а теплоотвод находился сверху СДМ. При таком расположении зона нагрева ПТТ находилась ниже зоны конденсации.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. После сборки СДМ с соответствующим теплоотводом и установки термопар эта конструкция крепилась на штативе. Затем СДМ через источник питания (драйвер) подключалась к электрической сети 220 В. Охлаждение СДМ с теплоотводом осуществлялось с помощью естественной конвекции окружающего воздуха. О температурном поле всей системы охлаждения судили по показаниям термопар T1...T9, которые в реальном времени выводились через АЦП на монитор ПК. По показаниям термопар следили за выходом системы охлаждения в стационарный тепловой режим, после чего снимали показания термопар. Файл с полученными результатами записывался в память ПК. Затем СДМ отключался от сети питания, и аналогичные эксперименты повторялись с другим теплоотводом.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В результате проведения экспериментов были получены зависимости температуры в контрольных точках рабочего участка — как СДМ, так и теплоотвода — от времени при выходе системы в стационарный тепловой режим (**рис. 4**).

Как следует из рис. 4, дольше всего на стационарный тепловой режим выходит СДМ с алюминиевым штампованным радиатором — примерно 13 мин, тогда как с теплоотводом на основе ПТТ и медным проволочным радиатором время выхода на стационарный режим составило 10 мин.

Размещение термопар в характерных тепловых зонах при использовании различных вариантов теплоотвода

Вариант теплоотвода	Номера термопар, установленных в характерной тепловой зоне				
	I	II	III	IV	V
Алюминиевый штампованный радиатор (рис. 2, а)	T1	T2	T4, T5, T7, T8	T6, T9	—
Пульсационная тепловая труба (рис. 2, б)	T1	T2	T3, T4, T5	T6, T7, T8	T9
Проволочный радиатор (рис. 2, в)	T1	T2	T3, T4, T5	T6, T7, T8	T9

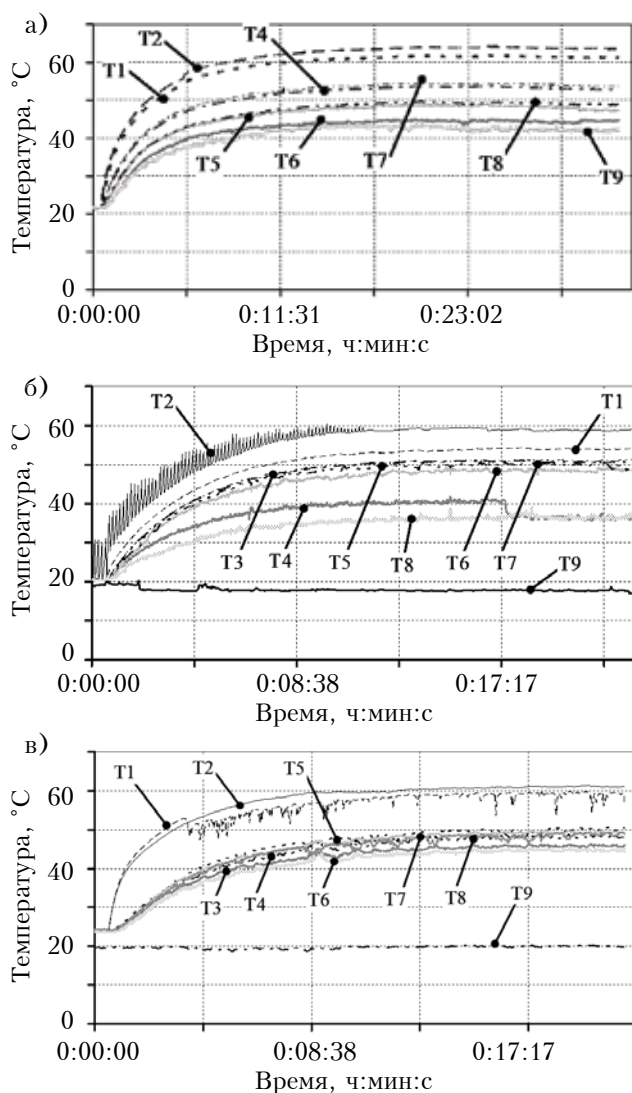


Рис. 4. Изменение во времени температуры в контрольных точках СДМ с различными теплоотводами: а — со штампованным алюминиевым радиатором; б — с теплоотводом на основе медно-водяной ПТТ; в — с радиатором из медной проволоки

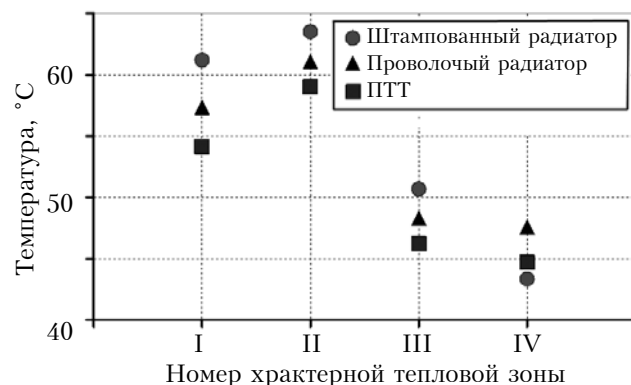


Рис. 5. Температура в характерных тепловых зонах рабочего участка: I — в центре платы СДМ; II — на СДМ между светодиодами; III — у основания радиатора или петель (для ПТТ и проволочного радиатора); IV — на краю радиатора или петель (для ПТТ и проволочного радиатора)

Во время проведения всех экспериментов температура окружающего воздуха составляла $19,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

На рис. 5 приведены средние значения температуры, определенные в установившемся тепловом режиме в характерных тепловых зонах I — IV рабочего участка по показаниям соответствующих термопар (их номера указаны в таблице для каждой зоны и для каждого типа теплоотвода).

Как видно из рис. 5, наименьшую температуру СДМ в местах установки светодиодов обеспечивает теплоотвод в виде пульсационной тепловой трубы. Так, по сравнению со штампованным алюминиевым радиатором (базовый вариант) ПТТ позволяет снизить температуру на $7,1^\circ\text{C}$ в центре печатной платы СДМ (зона I) и на $4,5^\circ\text{C}$ на поверхности между светодиодами (зона II), а медный проволочный радиатор — соответственно, на $3,9$ и $2,5^\circ\text{C}$.

В целом, можно констатировать, что каждый из теплоотводов справляется с поставленной задачей охлаждения и обеспечивает светодиодам необходимый уровень температуры, не превышающий 64°C в исследованных характерных тепловых зонах СДМ.

Следует также отметить, что мощности $10,55$ Вт данной конструкции СДМ недостаточно для того, чтобы вызвать процесс активного кипения и пульсаций теплоносителя в ПТТ, т. е. такой режим, в котором теплопередача будет максимальной [19, 20]. Поэтому с увеличением мощности СДМ до $30-40$ Вт и выше будет расти и эффективность теплоотводов на основе ПТТ, в то время как штампованного алюминиевого радиатора — уменьшаться в связи с необходимостью увеличения диаметра радиатора и снижения при этом эффективности его ребер. При высоких мощностях светодиодных модулей можно рекомендовать использование комбинированного теплоотвода [21], в котором пульсационная тепловая труба объединена с плоским штампованным радиатором, что позволяет обеспечить высокую эффективность его ребер, снизить его термическое сопротивление, а следовательно, и температуру светодиодов.

Выводы

В результате проведенных сравнительных экспериментов установлено, что все исследованные теплоотводы позволяют обеспечить уровень температуры светодиодного модуля в пределах заданного рабочего диапазона (не выше 64°C). При этом, наиболее эффективное охлаждение светодиодного модуля обеспечивается при использовании теплоотвода на основе пульсационной тепловой трубы, а наименее эффективное — при его охлаждении с помощью алюминиевого штампованного радиатора.

Поскольку теплопередача ПТТ максимально эффективна после начала активного кипения теплоносителя, т. е. при больших тепловых пото-

ках, для охлаждения мощных светодиодных модулей (свыше 30–40 Вт) можно рекомендовать теплоотводы на основе ПТТ. При более низких мощностях использование теплоотвода на основе ПТТ может оказаться экономически менее выгодным по сравнению со штампованным алюминиевым радиатором, стоимость изготовления которого намного ниже, а снижение температуры на $7,1^{\circ}\text{C}$ не всегда может оказаться определяющим фактором. Разумной альтернативой ПТТ является медный проволочный радиатор, который также обеспечивают меньшую температуру светодиодного модуля по сравнению с алюминиевым штампованным.

Таким образом, при выборе типа теплоотвода и материала для его изготовления в каждом конкретном случае применения следует комплексно рассматривать вопросы стоимости его изготовления, массы, габаритных размеров и ожидаемой эффективности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Айзенберг Ю.Б. Энергосбережение — одна из важнейших проблем современной светотехники // Светотехника. — 2007. — № 6. — С. 6–10.
2. Сорокин В.М. Светодиодное освещение. Проблемы. Решения. Перспективы // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2014. — № 5(89). — С. 28–38.
3. Полищук А., Туркин А. Деградація напівпровідникових світодіодів на основі нітрида галію і його твердих розчинів // Компоненти і технології. — 2008. — № 2. — С. 25–28.
4. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 2 // Компоненты и технологии. — 2006. — № 1. — С. 42–47.
5. Елисеев Н.П., Решенов С.П. О предельных световых и цветовых характеристиках белых светодиодов // Светотехника. — 2012. — № 4. — С. 12–18.
6. Fan A., Bonner R., Sharratt S., Ju Y. S. An innovative passive cooling method for high performance light-emitting diodes // Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM). — 2012. — P. 319–324. — <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2012.6188867>
7. Ключник А., Абалов А. Проектирование теплоотвода под заданные условия эксплуатации // CHIP NEWS Украина. — 2015. — № 6(146). — С. 18–21.
8. Лишик С. И., Паутино А. А., Поседейко В. С. и др. Конструктивно-технологические решения светодиодных ламп прямой замены // Светотехника. — 2010. — № 2. — С. 7–12.
9. Ruishan Wang, Junhui Li. A cooling system with a fan for thermal management of high-power LEDs // J. Mod. Phys. — 2010. — V. 1, No 3. — P.196–199. — <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2010.13029>.
10. Junhui Li, Bangke Ma, Ruishan Wang, Lei Han. Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs // Microelectronics Reliability. — 2011. — V. 51. — P. 2210–2215. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2011.05.006>.
11. Sorensen H. Water cooling of high power light emitting diode // 13th IEEE Intersociety Conference «Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems» (Itherm). — P. 968–974. — <http://dx.doi.org/10.1109/ITHERM.2012.6231531>.
12. Xin Zhang, Ru-Chun Li, Qi Zheng. Analysis and simulation of high-power LED array with microchannel heat sink // Advances in Manufacturing. — 2013. — Vol. 1(2). — P. 191–195. — <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-013-0027-0>
13. Shou-Shing Hsieh, Yu-Fan Hsu, Meng-Lin Wang. A microspray-based cooling system for high powered LEDs // Energy Conversion and Management. — 2014. — Vol. 78. — P. 338–346. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.066>.
14. Гвоздев С.М., Митрофанов А.В., Сафонов С.А., Холодилов В.И. Об использовании тепловых труб в проектировании мощных светильников со светодиодами // Светотехника. — 2012. — № 2. — С. 19–21.
15. Nikolaenko T. Yu., Nikolaenko Yu. E. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with light emitting diodes // Light & Engineering. — 2015. — Vol. 23, N 3. — P. 85–88. ISSN 0236-2945.
16. Lan Kim, Jong Hwa Choi, Sun Ho Jang, Moo Whan Shin. Thermal analysis of LED array system with heat pipe // Thermochimica Acta. — 2007. — V. 455(1). — P. 21–25. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2006.11.031>.
17. Алексеев Е.С., Кравец В.Ю. Система отвода теплоты от теплонегруженных элементов РЭА на основе пульсационной тепловой трубы // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 1. — С. 19–24.
18. Смирнов Г.Ф., Бурдо О.Г. Моделирование процессов в тепловых трубах и термосифонах. — Одесса: Полиграф, 2012.
19. Кравец В. Ю., Наумова А. Н., Вовкогон А.Н. Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 1. — С. 39–43.
20. Наумова А.Н., Кравец В.Ю., Николаенко Ю.Е. Физическое представление и расчет начала кипения в пульсационной тепловой трубе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 2–3. — С. 42–47. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2014.2-3.42>.
21. Пат. 94136 України. Світлодіодна лампа-світильник / А.М. Наумова, Ю.Є. Ніколаєнко, В.Ю. Кравець та ін. — 2014. — Бюл. № 20.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 23.10.2015 г.*

**А. М. НАУМОВА, Ю. Є. НИКОЛАЄНКО,
В. Ю. КРАВЕЦЬ, В. М. СОРОКІН, О. С. ОЛІЙНИК**

Україна, м. Київ, НТУУ «КПІ», ІФН ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ
E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

ОХОЛОЖДЕНИЯ СВИТЛОДИОДНОГО МОДУЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ РІЗНИХ ТЕПЛОВІДВОДІВ

Наведено результати експериментального порівняння теплових характеристик трьох тепловідводів: штампованого з алюмінієвого листа (базовий варіант), на основі мідно-водяної пульсаційної теплової

труби та на основі мідного дротового радіатора, за допомогою яких відводилося тепло від світлодіодного модуля потужністю 10,55 Вт. Встановлено, що в умовах природної конвекції всі три тепловідводи забезпечують рівень температури світлодіодного модуля в місцях установки світлодіодів, що не перевищує 64°C. Використання мідного дротового радіатора дозволяє в порівнянні з базовим варіантом знизити температуру в центрі друкованої плати модуля на 3,9°C, а використання тепловідводу на основі пульсуючої теплової труби – на 7,1°C.

Ключові слова: світлодіодний модуль, тепловідвід, радіатор, пульсуюча тепла труба, температура.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.35
UDC 536.248.2; 628.941.8

A. M. NAUMOVA, Yu. E. NIKOLAENKO,
V. Yu. KRAVETS, V. M. SOROKIN, O. S. OLIINYK
Ukraine, Kiev, NTUU "KPI", V. Lashkaryov ISP NASU
E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

COOLING OF LED MODULE BY VARIOUS RADIATORS

Given article presents the results of an experimental comparison of three radiators which are: pressed radiator made of aluminum plate (basic variant), radiator made of copper wire, and copper/water pulsating heat pipe. The radiators are intended to take off heat from the LED module with the power capacity of 10,55 W. It is established that under natural convection all three radiators can keep temperature level of the circuit board module less than 64 °C that lies within the operating range. In comparison with basic variant the use of the copper wire radiator allows lowering of the temperature in the LED module center on 3.9 °C, and the same value for the pulsating heat pipe is 7.1°C.

Keywords: LED module, heat sink, radiator, pulsating heat pipe, temperature

REFERENCES

1. Eisenberg Yu.B. [Energy conservation is one of the most important problems of modern lighting.] *Svetotekhnika*, 2007, no 6, pp. 6-10. (Rus)
2. Sorokin V.M. [Led lighting. Problems. Solutions. Prospects.] *Promyslova elektroenergetika ta elektrotehnika*, 2014, no 5(89), pp. 28-38. (Rus)
3. Polishchuk A., Turkin A. [Degradation of semiconductor light-emitting diodes based on gallium nitride and its solid solutions.] *Komponenty i tehnologii*, 2008, no 2, pp. 25-28. (Rus)
4. Nikiforov C. [The temperature in the life and work of the LEDs. Part 2.] *Komponenty i tehnologii*, 2006, no 1, pp. 42-47. (Rus)
5. Yeliseyev N.P., Reshenov S.P. [About the limit of light and color characteristics of white LEDs.] *Svetotekhnika*, 2012, no 4, pp. 12-18. (Rus)
6. Fan A., Bonner R., Sharratt S., Ju Y. S. An innovative passive cooling method for high performance light-emitting diodes. *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*, 2012, pp. 319-324. <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2012.6188867>
7. Kluchnik A., Abalov A. [Designing the heat sink under the specified operating conditions.] *CHIP News Ukraine*, 2015, no 6 (146), pp. 18-21. (Rus)
8. Lishik S.I., Pautino A.A., Posed'ko V.S., Trofimov Yu.V., Tsvirko V.I. [Design and technological solutions for the direct replacement LED lamps.] *Svetotekhnika*, 2010, no 2, pp. 7-12. (Rus)
9. Ruishan Wang, Junhui Li. A Cooling System with a Fan for Thermal Management of High-Power LEDs. *J. Mod. Phys.*, 2010, vol. 1, no 3, pp.196-199. <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2010.13029>
10. Junhui Li, Bangke Ma, Ruishan Wang, Lei Han. Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. *Microelectronics Reliability*, 2011, vol. 51, pp. 2210-2215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2011.05.006>
11. Sorensen H. Water cooling of high power Light Emitting Diode. *13th IEEE Intersociety Conference "Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems" (Itherm)*, 2012 pp. 968-974. <http://dx.doi.org/10.1109/ITHERM.2012.6231531>
12. Xin Zhang, Ru-Chun Li, Qi Zheng. Analysis and simulation of high-power LED array with microchannel heat sink. *Advances in Manufacturing*, 2013, vol. 1(2), pp. 191-195. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-013-0027-0>
13. Shou-Shing Hsieh, Yu-Fan Hsu, Meng-Lin Wang. A microspray-based cooling system for high powered LEDs. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 78, pp. 338-346. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.066>
14. Gvozdev S.M., Mitrofanov A.V., Safonov S.A., Holodilov V.I. [On the use of heat pipes in the design of high-power lamps with LEDs.] *Svetotekhnika*, 2012, no 2, pp. 19-21. (Rus)
15. Nikolaenko T. Yu., Nikolaenko Yu. E. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with Light Emitting Diodes. *Light & Engineering*, 2015, vol. 23, no 3, pp. 85-88.
16. Lan Kim, Jong Hwa Choi, Sun Ho Jang, Moo Whan Shin. Thermal analysis of LED array system with heat pipe. *Thermochimica Acta*, 2007, vol. 455(1), pp. 21-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2006.11.031>
17. Alekseik E.S., Kravets V.Yu. [Oscillating heat pipe cooler for heat-generating elements of electronics.] *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no 1, pp.19-24. (Rus)
18. Smirnov G.F., Burdo O.G. [Modeling of processes in the heat pipes and thermosyphons.] Odessa: Polygraph, 2012, 294 p.
19. Kravets V.Yu., Naumova A.N., Vovkogon A.N. [Research of heat transfer modes of the pulsating heat pipe.] *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2010, no 1(85), pp. 39-43. (Rus)
20. Naumova A.N., Kravets V.Yu., Nikolaenko Yu.E. [Physical concept and calculation of boiling point in a pulsating heat pipe.] *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2014, no 2-3, pp.42-47. (Rus)
21. Naumova A.N., Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Sorokin V.M., Kopnin V.P., Seriy A.F. [LED-lamp.] Pat. UA no 94136. (Ukr)