

LED 异形灯蜂巢散热器设计与实验

唐帆¹, 王丹², 郭震宁¹

¹华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021;

²华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021

摘要 为了提高发光二极管(LED)灯具的散热能力,基于烟囱效应原理,设计了一种新型的LED灯具散热结构。运用SolidWorks软件构建三维模型,利用其Flow Simulation插件进行热仿真。当功率为10 W时,LED芯片的最高温度为81.34℃;当功率增加到15 W时,芯片的最高温度变为105.54℃,高于其安全工作温度(85℃)。提出了在基板中间加入蜂巢散热器的改进方案,使LED芯片的最高温度下降了30.54℃,并进行了优化实验。研究结果表明:当蜂巢类型为正六边形、蜂巢边长为6.0 mm、蜂巢壁厚为1.0 mm时,LED异形灯的散热效果最好,LED芯片的最高温度为74.47℃,散热器质量为47.19 g。当功率为8,12,15,18 W时,LED芯片的最高温度都满足安全工作要求。通过对8 W的LED异形灯样品进行实验测试,证实了研究的准确性。

关键词 光学器件; 散热; 发光二极管异形灯; 烟囱效应; 蜂巢

中图分类号 TN312 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.062301

Design and Experiment of Special-Shaped LED Lamp with Honeycomb Radiator

Tang Fan¹, Wang Dan², Guo Zhenning¹

¹Key Laboratory of Light Propagation and Transformation of Fujian Province, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

²College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract To improve the cooling capacity of light emitting diode (LED) lamps, a new type of LED lamp radiating structure is designed based on the principle of the chimney effect. A three-dimensional model is built by SolidWorks, and its plug called Flow Simulation is used to simulate the model build. The highest temperature of LED chip is 81.34℃ when the power is 10 W. When the power is increased to 15 W, the highest temperature is 105.54℃, and it is higher than the security temperature (80℃) of LED chip. An improved scheme of adding the honeycomb radiator in the middle of the substrate is proposed. Which reduces the highest temperature of the LED chip by 30.54℃, and the optimization experiment is carried out. The results show that when the type of honeycomb is regular hexagon, the length of honeycomb is 6.0 mm and the thickness of the honeycomb is 1.0 mm, special-shaped LED lamp has the best heat dissipation effect. The highest temperature of LED chip is 74.47℃ and radiator mass is 47.19 g. When the power is 8, 12, 15, 18 W, the highest temperatures of the LED lamp meet the safety requirements. The accuracy of the study is confirmed by the experiment of 8 W special-shaped LED lamp samples.

Key words optical devices; radiation; special-shaped light emitting diode lamp; chimney effect; honeycomb

OCIS codes 230.1150; 230.2090; 230.3670; 230.5170

收稿日期: 2017-02-10; **收到修改稿日期:** 2017-02-20

基金项目: 福建省科技计划引导性重点项目(2016H0022)、华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1400201001)

作者简介: 唐帆(1990—),男,硕士研究生,主要从事LED散热设计方面的研究。E-mail: 304462588@qq.com

导师简介: 郭震宁(1958—),男,博士,教授,主要从事半导体发光器件及LED光学设计和散热设计方面的研究。

E-mail: znguo@hqu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

相比于传统光源,发光二极管(LED)具有节能、易控制、寿命长及配光设计多样^[1-3]等优点,被称为第四代照明光源。随着LED的广泛应用,低功率LED已不能满足目前市场的需要,由此诞生了大功率LED。目前由于受技术的限制,LED的光电转换效率为20%左右,大部分能量转化为了热能。大功率LED产生的热量过多,如果这些热量不能及时散去,将会导致LED的结温升高,缩短LED的寿命^[4]。因此,快速散热成为大功率LED研究的难点^[2-5]。

为了增强LED灯具的散热能力,国内外学者进行了大量的研究。如田立新等^[6]优化设计了一种LED液冷换热热沉,提高了大功率LED热沉的综合换热性能。周驰等^[7]提出了一种整体式热管散热器,对充液率、产热功率、倾角等方面进行了散热自然对流实验研究和分析,结果发现与常见的太阳花翅片和平板散热器相比,整体式热管散热器可以更有效地控制芯片结温。Luo等^[8]提出了一种LED微喷射流冷却系统,此系统采用系列微喷换热,靠冲击射流的良好散热效果,将LED工作时放出的热量导入冷却系统内,从而达到散热的目的。陈颖聪等^[9]提出了一种基于塑料散热器无基板板上芯片(COB)封装方式,并传统的陶瓷基板COB封装方式进行对比,结果为当塑料热导率为20 W/(m·K)时,二者散热效果相近。但是,利用液冷散热或者改变LED封装方式在实际应用时操作困难,大多数的厂商都采用增加LED散热器散热面积的方式来提高LED灯具的散热能力,蜂巢结构就能有效增加LED散热器的散热面积。研究表明,利用烟囱效应^[10],将烟囱结构应用到LED灯具设计中,可以加快灯具附近空气流动速率,加大灯具的散热能力。

基于烟囱效应原理,本文设计了一种LED异形灯。通过三维建模软件SolidWorks构建模型,利用其Flow Simulation插件进行散热模拟仿真。所设计的异形灯具有特殊的直筒式烟囱结构,可以有效避免空气在普通烟囱结构的灯体中形成涡流,减少空气进出烟囱通道的流量^[11],可以满足小功率LED灯具的安全工作要求,而且不使用散热器,大大降低了生产成本,节约了生产时间。为了满足更大功率LED灯具的工作要求,本文又在基板中间的空心部分加入蜂巢散热器以增大烟囱效应强度,散热器中的蜂巢单元形成多个独立的直筒烟囱通道,提高了自然对流换热效果。本文还对蜂巢散热器的相关参数进行了设计优化。这种新式的LED异形灯具,突破了传统LED灯具圆板状的基板构型,并利用蜂巢式散热器大幅度提升了散热器的换热面积和对流换热效果,增强了LED灯具的散热能力。

2 理论与模型建立

2.1 理论基础

流体在固体表面不存在流体运动,传递能量只能靠对流进行。用牛顿冷却公式可以衡量外部环境和散热器表面之间的热量交换,牛顿冷却公式表示为

$$Q = Ah(T_s - T_\infty), \quad (1)$$

式中 Q 表示表面换热量, A 为散热表面积, h 表示表面换热系数, T_s 表示壁面温度, T_∞ 表示环境温度。

由(1)式可知,增大散热器的散热表面积和表面换热系数都可以增加固体表面的换热量,减小空气与热沉之间的热阻,降低结温。表面换热系数可表示为

$$h = -\frac{k\partial T/\partial y|_{y=0}}{T_s - T_\infty}, \quad (2)$$

式中 k 为空气热导率, T 为温度。由(2)式可知,表面换热系数与固体表面的温度场有关,可以通过引入烟囱效应改变固体表面的温度场及气体流场分布,以此改变固体表面的换热系数,从而改变散热性能。

2.2 模型建立

本研究所设计的LED异形灯由光学灯罩、LED光源、基板、散热器和灯头等组成。其中灯头为E27标准灯头,电源放置在灯头内。将基板设置为特殊的空心圆柱形,散热器在基板中,散热器的特殊结构形成一个独立的直筒状烟囱通道。LED光源工作时产生的热量由芯片传递到基板,再经散热器传递到附近空气中。空气吸收热量后,温度上升、密度下降,与其上方空气形成密度差,从而产生浮力,热空气携带着热量从上方排出烟囱通道,产生的负压又会使新的冷空气从下方进入通道内,如此循环,形成烟囱效应,提高了自然

对流换热强度。LED异形灯的结构如图1(a)所示。

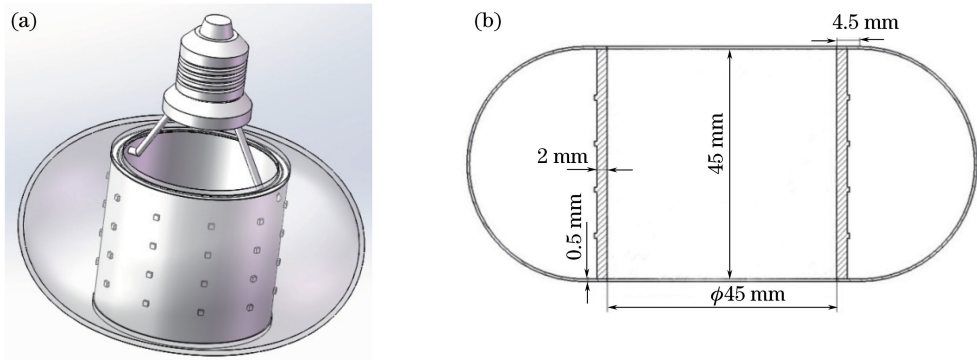


图1 LED异形灯的(a)结构示意图和(b)热仿真简化图

Fig. 1 (a) Structure schematic and (b) simplified thermal simulation graph of the special-shaped LED lamp

LED异形灯的热仿真简化图如图1(b)所示。将LED芯片尺寸设置为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ ，在基板上呈 4×10 均匀分布。因为灯头盒电源在异形灯主体外部，对热仿真结果影响不大，所以将其省略。

3 热仿真

将已建模型代入仿真软件,进行仿真。灯罩材料为玻璃,其热导率为 $0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;散热器材料为挤压铝6061,其热导率为 $236\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;基板采用铝基板,其横向热导率为 $100\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,纵向热导率为 $2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

设置LED芯片为体积热源,输入功率为 10 W ,发光效率为 20% 时,产热功率为 8 W 。设置环境温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,初始网格精度为4,设置LED异形灯整体精度为8的局部初始网格,仿真结果如图2所示。

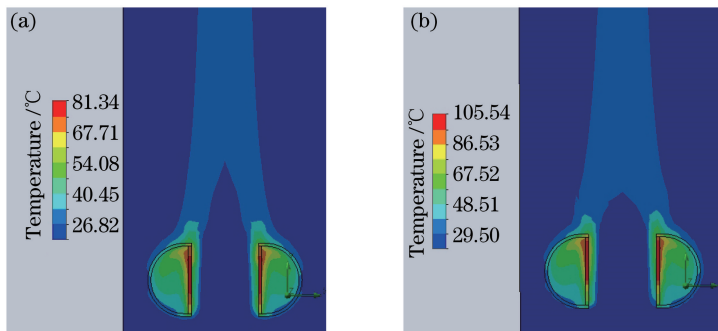


图2 温度分布云图。(a)输入功率 10 W ; (b)输入功率 15 W

Fig. 2 Temperature distribution cloud image. (a) Input power of 10 W ; (b) input power of 15 W

从图2可以看出:当功率为 10 W 时,LED芯片的最高温度为 $81.34\text{ }^\circ\text{C}$;当功率为 15 W 时,LED芯片的最高温度为 $105.54\text{ }^\circ\text{C}$ 。所以,当功率不大于 10 W 时,本文设计的这种特殊的散热结构,在无散热器的条件下,可以满足LED的安全工作要求,即最高温度低于 $85\text{ }^\circ\text{C}$ ^[12]。不使用散热器可大大减轻LED灯具的质量降低生产运输成本,节约生产时间。为了使这种结构能满足更大功率的使用要求,本研究提出了在圆柱状基板中间加入蜂巢散热器的方案,可使散热器中独立的蜂巢单元形成多个烟囱通道。取输入功率为 15 W ,蜂巢的等效直径为 4.55 mm ,蜂巢类型为正六边形,蜂巢边长 $a=5.0\text{ mm}$,蜂巢壁厚 $L=1.0\text{ mm}$,散热器质量 M 为 51.31 g ,如图3所示。

对比图3(c)和图2(b)可知,改进后LED异形灯的最高温度为 $75.00\text{ }^\circ\text{C}$,比改进前降低了 $30.54\text{ }^\circ\text{C}$ 。其原因如下:添加散热器可使芯片产生的热量通过基板传递到散热器上,增加了散热表面积,进入通道的风可以带走更多的热量,故散热能力大大增强。为了进一步增强散热效果,本研究对蜂巢散热器的蜂巢类型、蜂巢边长 a 、蜂巢壁厚 L 等进行了优化。

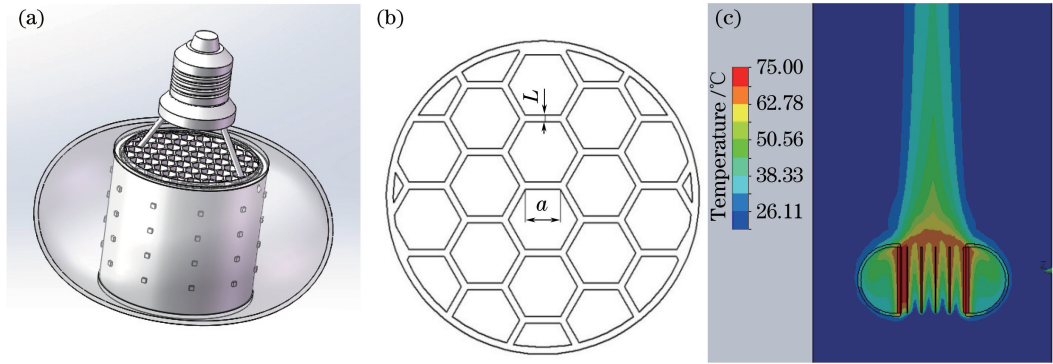


图3 改进方案。(a) LED异形灯结构示意图;(b)散热器截面图;(c)温度分布云图

Fig. 3 Improvement scheme. (a) Structure schematic of the special-shaped LED lamp; (b) radiator section diagram; (c) temperature distribution cloud image

4 实验结果和讨论

4.1 蜂巢类型对散热效果的影响

保持蜂巢壁厚 $L=1.0$ mm, 蜂巢等效直径为 4.55 mm 不变。探究蜂巢类型的变化对 LED 芯片最高温度的影响。将蜂巢类型分别设置为正六边形、正方形、正三角形和圆形等, 4 种蜂巢类型的 LED 芯片最高温度分布如图 4 所示。

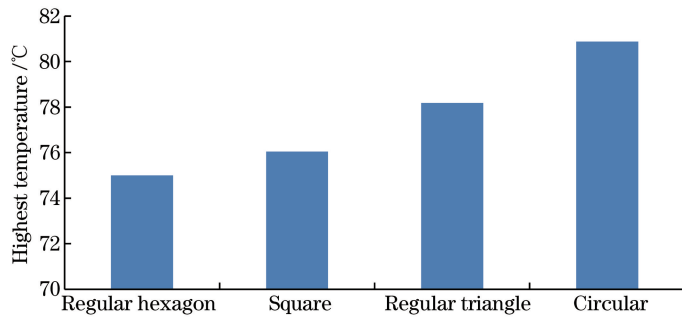


图4 LED芯片的最高温度和蜂巢类型的关系

Fig. 4 Relationship between highest temperature of LED chip and honeycomb type

从图 4 可以得出, 当蜂巢类型为正六边形时, LED 异形灯的最高温度最低, 比蜂巢类型为圆形时的最高温度低 5.88 °C。说明在本文设计的结构中, 正六边形蜂巢比其他类型蜂巢散热效果更好。其因为在等效直径和热传导一定的情况下, 正六边形蜂巢结构的孔化率高, 即正六边形蜂巢散热器与空气接触的面积大于其他蜂巢类型, 根据牛顿冷却定律, 散热器散热面积的增大可以使对流换热带走的热量增多, 从而降低 LED 芯片的最高温度。正六边形蜂巢散热器的表面积最大, 所以其散热效果最好。牛顿冷却定律:

$$\phi = \lambda S \Delta T, \quad (3)$$

式中 ϕ 为产热功率, λ 为散热器表面的对流换热系数, S 为散热器散热表面积, ΔT 为散热器表面温度与环境温度的差值。

综上所述, 选择正六边形蜂巢, 此时 LED 芯片的最高温度为 75.00 °C, 正六边形蜂巢边长 $a=5.0$ mm, 蜂巢壁厚 $L=1.0$ mm, 散热器质量 $M=51.31$ g。

4.2 蜂巢边长 a 对散热效果的影响

在 4.1 节的研究基础上, 进一步对正六边形蜂巢散热器的蜂巢边长 a 进行优化。保持蜂巢类型为正六边形, 蜂巢壁厚 $L=1.0$ mm, 探究蜂巢边长 a 对 LED 芯片最高温度的影响。取 a 的变化范围为 2.5~7.0 mm, 相应的 LED 芯片的最高温度和散热器质量的变化如图 5 所示。

从图 5 可以得出, 蜂巢边长 a 从 2.5 mm 增至 6.0 mm 时, LED 芯片的最高温度由 90.50 °C 增至 74.47 °C, 降低了 16.03 °C。当 a 从 6.0 mm 继续增加到 7.0 mm, LED 芯片的最高温度反而上升。出现这种

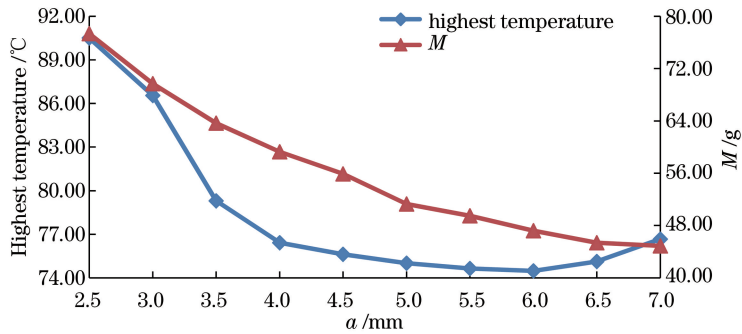


图5 蜂巢边长对LED芯片的最高温度和散热器质量的影响

Fig. 5 Effect of the length of honeycomb on the highest temperature of LED chip and radiator mass

现象是因为当通风口很小时,由于边界阻力作用^[13],烟囱通道内的空气流动很缓慢,不能引入充足的空气通过对流换热带走散热器上的热量,烟囱效应不明显。当通风口过大时,LED光源产生的热量不足以使烟囱通道中的大量空气快速上升,反而降低了通道内的空气流速,使对流换热系数减小。蜂巢边长 a 在2.5~6.0 mm范围内时,随着 a 的增大,六边形蜂巢单元所构成的烟囱通道通风口逐渐变大,散热效果增强, a 为6.0 mm时,散热效果最佳。当 a 继续增大到7.0 mm时,由于烟囱通道通风口过大,散热效果慢慢降低。所以烟囱通道的通风口过大^[14]或过小都会降低空气的流量,从而降低烟囱效应的效果。

从图5还可以看出,随着 a 的增加, M 不断下降。为了使LED芯片的最高温度尽可能低,故取蜂巢边长 $a=6.0$ mm,此时LED芯片的最高温度为 74.47°C ,散热器质量为 47.19 g。

4.3 蜂巢壁厚 L 对散热效果的影响

以4.1节和4.2节的研究为基础,保持蜂巢类型为正六边形,蜂巢边长 $a=6.0$ mm,对蜂巢壁厚 L 进行优化。取蜂巢壁厚变化范围为 $0.5\sim 1.5$ mm,经计算得到了相应的LED芯片的最高温度及散热器质量 M ,如图6所示。

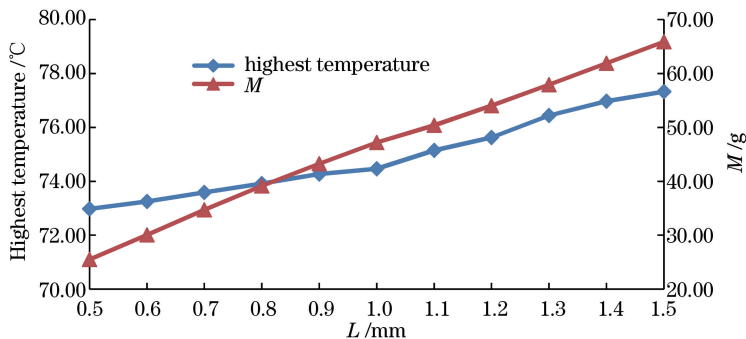


图6 蜂巢壁厚对LED芯片的最高温度和散热器质量的影响

Fig. 6 Effect of the thickness of honeycomb on the highest temperature of LED chip and radiator mass

从图6可以看出,蜂巢壁厚的增加一方面快速增加了散热器的质量,另一方面降低了散热效果。但由于蜂巢壁厚过小会增大加工难度,使废品率大大增加,故取蜂巢壁厚 $L=1.0$ mm,此时LED芯片的最高温度为 74.47°C ,散热器质量 $M=47.19$ g。

4.4 不同功率时LED最高温度的变化

以上述研究为基础,探究配备蜂巢散热器的LED异形灯在不同功率下LED芯片最高温度的变化,结果如表1所示。

从表1可以看出,随着功率的增大,LED异形灯芯片的最高温度不断上升。当功率为8,12,15,18 W时,配备蜂巢散热器的LED异形灯芯片的最高温度都低于结温 85°C ,可以安全地进行工作。在工作条件相似的情况下,文献[12]所设计的LED球泡灯在功率为12 W时,芯片结温为 71.25°C 。而所设计的配备蜂巢散热器的LED异形灯在功率为12 W时,芯片结温仅为 65.69°C ,散热效果大大增强。并且同现有LED灯具相比,所设计的LED异形灯具有全新的构型方式,便于设计师对其进行更为美观的设计。

表1 不同功率时 LED 芯片的最高温度

Table 1 Highest temperature of LED chip under different powers

Power /W	8	12	15	18	21	24	27
Highest temperature / $^{\circ}\text{C}$	53.24	65.69	74.47	82.89	91.04	98.95	106.64

5 实物实验

通过对输入功率为 8 W、蜂巢类型为正六边形(蜂巢边长 $a=6.0$ mm,蜂巢壁厚 $L=1.0$ mm)的 LED 异形灯实物样品的温度进行实验检测,证实了以上研究的准确性。实物样品由机械加工制得的铝制散热器、LED 芯片及基板、光学灯罩组成,其中基板和散热器中间涂覆导热硅胶,配备蜂巢散热器的 LED 异形灯测试样品如图 7(a)所示。

采用两个 TM-902C 温度测试仪和一台兆信 PS-3003D 直流电源供应器对样品进行温度测量。选取 LED 芯片的正面中心位置和侧面为温度检测点,如图 7(b)所示。实验在封闭室内进行,用空调将室温控制在 20°C ,然后将 LED 异形灯在额定工作电压下不间断点亮 30 min 后,测量其芯片温度。实验测试平台及测试结果如图 7(c)所示。实验检测发现 LED 异形灯的最高温度为 54.00°C ,与仿真结果仅相差 0.76°C ,误差为 1.4% ,在允许范围内,证实了本研究的准确性。

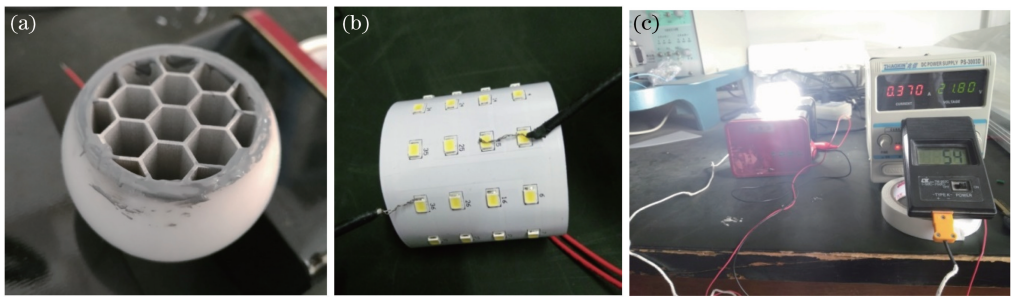


图7 实验测试平台及温度检测点。(a)测试样品;(b)温度检测点;(c)实物测试平台及测试结果

Fig. 7 Experimental test platform and temperature test points. (a) Test sample; (b) temperature test points; (c) experimental test platform and test results

6 结 论

基于烟囱效应,设计了一种拥有特殊散热结构的 LED 异形灯。在无散热器的条件下,可以满足 LED 芯片输入功率不大于 10 W 时的安全工作要求,不使用散热器可大大减轻 LED 灯具的质量,降低生产成本,节约生产时间。为了满足更大输入功率的需求,又提出了在空心圆柱状基板中间加入蜂巢散热器的改进方案,使 LED 异形灯的最高温度下降了 30.54°C 。并对散热器的蜂巢类型、蜂巢边长、蜂巢壁厚等进行了优化,得到的最佳设计参数为:蜂巢类型为正六边形,蜂巢边长 $a=6.0$ mm,蜂巢壁厚 $L=1.0$ mm。所设计 LED 异形灯的最高温度为 74.47°C ,散热器的质量为 47.19 g。当 LED 异形灯工作环境的温度为 20°C ,功率分别为 8,12,15,18 W 时,其芯片的最高温度都低于 LED 的工作安全结温 85°C 。对 8 W 的 LED 异形灯样品进行实验测试,测得 LED 芯片的最高温度为 54.00°C ,与仿真结果仅相差 0.76°C ,证实了研究的准确性。本文设计的 LED 异形灯突破了传统 LED 灯具的构型,散热效果较好,为解决大功率 LED 散热问题提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] Dong Li, Liu Hua, Wang Yao, *et al.* Reliability of light source modeling for distribution design on compact LED[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 1-5.
董 丽, 刘 华, 王 尧, 等. 紧凑型 LED 配光设计中光源模型可靠性研究[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 1-5.
- [2] Liu Chao, Fu Renli, Gu Xiguang, *et al.* The structure of chip scale package for LED light sources and its thermal

- performance analysis based on numerical simulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 122301.
- 刘超, 傅仁利, 顾席光, 等. 芯片级 LED 封装光源结构散热性能的数值模拟[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 122301.
- [3] Yang Chu, Jin Shangzhong, Shao Maofeng, *et al.* Research on LED performance of glass substrate with COB packaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 012304.
- 杨初, 金尚忠, 邵茂丰, 等. 玻璃基板 COB 封装的 LED 性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 012304.
- [4] LIN Y C, Tran N, Zhou Y, *et al.* Materials challenges and solutions for the packaging of high power LEDs[C]// *International Microsystems, Packaging, Assembly Conference, Taiwan, 2006, IEEE, 2006: 177-180.*
- [5] Arik M, Petroski J, Weaver S. Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: Light emitting diodes[C]// *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002, IEEE, 2002a: 113-120.*
- [6] Tian Lixin, Wen Shangsheng, Huang Weiming, *et al.* Study on the heat sink structure and heat transfer effect of liquid cooling system for high power LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0323003.
- 田立新, 文尚胜, 黄伟明, 等. 大功率 LED 液冷热沉结构与换热效果研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0323003.
- [7] Zhou Chi, Zuo Dunwen, Sun Yuli, *et al.* Study on the heat sink structure and heat transfer effect of liquid cooling system for high power LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(11): 1294-1400.
- 周驰, 左敦稳, 孙玉利. 自然对流下 LED 集成芯片整体式热管散热器性能实验研究[J]. *发光学报*, 2014, 35(11): 1394-1400.
- [8] Luo X B, Liu S H. A microjet array cooling system for thermal management of high-brightness LEDs [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2007, 30(3): 475-484.
- [9] Chen Yingcong, Wen Shangsheng, Wu Yuxiang. Thermal analysis for LED chip on board package based on plastic radiator without substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0823005.
- 陈颖聪, 文尚胜, 吴玉香. 基于塑料散热器无基板板上芯片封装的 LED 热分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0823005.
- [10] Zhu Peng. The enhancement of heat dissipation of high power LED lamp with chimney effect [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- 朱鹏. 基于烟囱效应对大功率 LED 灯的强化散热[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [11] Chen Qiyong, He Chuan, Gao Yuanyuan. Numerical study on natural convection of high-power LED street lamp heat sink[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(4): 498-501.
- 陈启勇, 何川, 高园园. 大功率 LED 路灯散热器自然对流的数值研究[J]. *半导体光电*, 2011, 32(4): 498-501.
- [12] Liu Jiao, Liu Juanfang, Chen Qinghua, *et al.* Thermal management of novel 12 W LED bulb for the substitution of 100 W incandescent bulb[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(7): 866-871.
- 刘娇, 刘娟芳, 陈清华, 等. 替代 100 W 白炽灯的新型 12 W LED 球泡灯的散热性能研究[J]. *发光学报*, 2014, 35(7): 866-871.
- [13] Li Benhong, Liu Hailin. Analysis of the chimney effect in thermal design of high-power LED lamps radiator [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2014, 37(2): 221-224.
- 李本红, 刘海林. 烟囱效应在大功率 LED 灯具散热器设计中的影响分析[J]. *电子器件*, 2014, 37(2): 221-224.
- [14] Liu Hailin. Optimal design of the components in high-power LED lamps thermal package [D]. Ningbo: Ningbo University, 2013.
- 刘海林. 大功率 LED 灯具散热封装组件的优化设计[D]. 宁波: 宁波大学, 2013.