

基于烟囱效应的发光二极管冷却用散热器优化分析

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)的散热性能,基于烟囱效应原理,设计了一种特殊的直筒式烟囱结构的LED冷却用散热器。通过Solidworks软件构建三维模型,利用其插件Flow Simulation对构建的模型进行热仿真。研究了不同烟囱高度、通风口形状和大小对烟囱效应散热效果的影响。研究表明:烟囱效应有效地提高了散热器的对流散热性能。当烟囱高度为50 mm、通风口等效直径为8 mm、通风口形状为梯形时,LED最高温度为61.60 °C,比优化前降低了6.54 °C。与传统散热器对比,LED最高温度降低了8.89 °C。实验中4个监测点的实际温度与仿真所得温度的平均误差为4.0%,在允许范围内,验证了以上研究的正确性。所设计的散热器可以很好地满足自然对流条件下LED的工作要求。

关键词 光学器件; 散热; 散热器; 烟囱效应; 最高温度; 发光二极管

中图分类号 TN312 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.072301

Optimization Analysis of Cooling Radiator for Light Emitting Diode Based on Chimney Effect

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 In order to improve the heat dissipation performance of light emitting diode (LED), based on the principle of the chimney effect, a special cooling radiator with straight chimney structure for LED is designed. The three-dimensional model is built by Solidworks software, and the model is simulated by its plug-in called Flow Simulation. The effects of various heights, vent shapes and sizes on the heat dissipation of chimney effect are studied. Studies show that chimney effect effectively improves the convection cooling performance of the radiator. When the height of chimney is 50 mm and the equivalent diameter of trapezoidal vent is 8 mm, the highest temperature of the LED is 61.6 °C, which is 6.54 °C lower than the original model. Compared with the traditional radiator, the highest temperature of LED reduces 8.89 °C. Through experiments, the average error between the actual temperature of the 4 monitoring points and the simulated temperature is 4.0%, and the average error is in the allowable range. It confirms the correctness of the simulation steps. In conclusion, the designed radiator can better satisfy the working requirements under the nature convection conditions.

Key words optical devices; cooling; radiator; chimney effect; highest temperature; light emitting diode

OCIS codes 230.3670; 230.5170; 230.1150; 230.2090

收稿日期: 2017-02-10; **收到修改稿日期:** 2017-03-16

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,主要从事发光二极管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发光二极管光学设计和散热设计等方面的研究。

E-mail: znguo@hqu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

作为第4代光源的发光二极管(LED),其具有色纯度高、抗震动、低能耗、无频闪、寿命长和可智能化控制等优点^[1-3],在各个照明领域被广泛应用。随着对LED要求的提高,其功率慢慢增大,若其产生的热量不能及时发散出去,会使其温度逐渐升高,从而导致可靠性降低^[4-5]。

为了提高LED灯具的散热能力,国内外众多学者进行了相关研究。如Dialameh等^[6]研究发现,在等截面翅片直角中,翅片的高度和长度的比值及高度和宽度的比值都会影响散热器的散热性能。Culham等^[7]研究发现,随着散热器翅片数量增多,热阻会降低,但是存在上限,当达到上限时,继续增加翅片数量并不能使热阻降低。李杨等^[8]对三维发光LED灯片进行了散热设计,通过优化对比灯板结构和芯片排布方式,使散热效果得到大幅度提升。马验宗等^[9]运用控制变量的方法,分析了散热器翅片厚度、曲率及微结构对散热性能的影响规律,并进行了优化。王丽岩等^[10]对影响翅片散热器的两个重要因素(翅片高度和厚度)进行了分析,发现芯片最高温度随着翅片的厚度和高度增加而减小,芯片温度的均匀性随翅片的厚度和高度增加而增强。侯绿等^[11]设计了塑料散热器的基本构型,并得出塑料散热器的设计应以增加对流换热面积为主,增加肋片与环境的视角系数是次要考虑因素。研究表明,在LED散热器设计中加入烟囱结构,可以在散热器中产生烟囱效应^[12],能有效地提高散热效果。烟囱结构散热器的散热原理在于:LED芯片工作时产生热量,热量经由基板与散热器最后传递到空气中,周围空气吸收热量温度升高密度减小,与烟囱通道上方空气形成密度差,产生由下至上的浮力,从而沿着烟囱通道上升,并从上面的通风口排出,产生的负压将新的冷空气继续吸入烟囱通道,形成烟囱效应,使烟囱通道中的对流换热系数提高,增强了自然对流散热效果,从而使散热器的散热能力得以提升。但在传统的烟囱结构中,气体会在散热器内流动产生涡流,导致空气流通受阻^[13],热量不能及时排出去。传统散热器的加工成型也需要费用高昂的开模铸造,违背了工业上低成本制造的原则。

为了增强LED散热器的散热效果和降低散热器生产成本,本文将脱离传统构型的设计,使LED散热器具有直筒式烟囱结构,避免气体在散热器内流动产生涡流。通过Solidworks软件构建三维模型,利用其插件Flow Simulation进行热仿真,用正交实验法对影响烟囱效应强度的三个因素(烟囱高度、通风口大小、通风口形状)进行深入优化研究。

2 理论基础与模型建立

2.1 理论基础

所设计LED散热器散热系统中,LED光源产生的热量通过基板、导热硅胶、散热器传输到环境中,其中从光源到散热器的热量传输以导热的方式发生,从散热器到环境的热量传输以自然对流及热辐射的方式发生。在散热系统稳态传热时,传热路径上热流量 P 处处相等。散热系统的总热阻为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4, \quad (1)$$

式中 R_1 为LED光源的热阻, R_2 为导热硅胶热阻, R_3 为基板热阻, R_4 为散热器热阻。

在导热过程中,

$$P = \frac{A\lambda}{\delta}(t_1 - t_2), \quad (2)$$

式中 P 为热流量, A 为散热表面积, λ 为导热率, δ 为导热厚度, t_1 、 t_2 分别为高温侧和低温侧温度,由(2)式可得:

$$R = \frac{\delta}{A\lambda} = \frac{t_1 - t_2}{P}. \quad (3)$$

整个散热系统自身发生导热并与环境发生自然对流及热辐射,系统的传热方程式为

$$P = A_2 k(t_3 - T_\infty), \quad (4)$$

式中 A_2 为系统的传热面积, k 为复合传热系数, t_3 、 T_∞ 分别为LED光源的温度、环境温度。

类似地,系统的总热阻 R 可以表示为

$$R = \frac{t_3 - T_\infty}{P}. \quad (5)$$

R 既包括系统自身的导热热阻也包括与环境发生换热的热阻。在所设计的结构中, R 是衡量系统散热性能的主要指标, 可以用 R 对所设计散热器进行评价。

2.2 模型建立

所设计的 LED 冷却用散热器基础模型如图 1 所示。

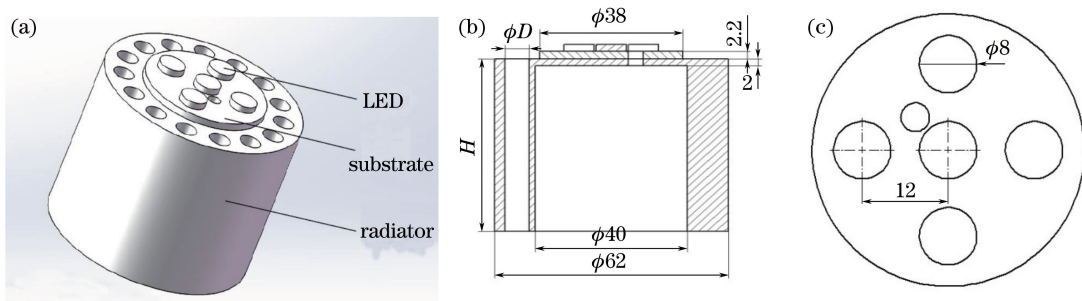


图 1 散热器示意图。(a)散热器基础模型;(b)散热器剖视图;(c)芯片分布

Fig. 1 Schematic of the radiator. (a) Foundation model of the radiator; (b) cutaway view of the radiator; (c) distribution of the chips

LED 在基板上均匀分布, 并与散热器连接。在散热器四周排列着 15 个相同的烟囱通道, 其高度 H 、通风口形状和通风口直径 D 为变量。对散热器基础模型进行深入优化研究, 基础模型的参数为: 烟囱高度 $H=40$ mm, 通风口等效直径 $D=4$ mm, 通风口形状为圆形。在此参数下, 芯片最高温度为 68.14 $^{\circ}\text{C}$, $R=7.52$ $\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ 。为了使热仿真迅速地进行, 在建立模型时将仿真结果影响不大的部分进行简化。即将芯片简化为高度为 2 mm 的圆柱体, 其热导率为 46 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。实验选用铝基板, 其横向热导率为 100 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 纵向热导率为 2 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 散热器的材料为 ADC12 压铸铝, 热导率为 96 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。将芯片设置为体积热源, 总功率为 8 W, 热电转换系数取 80%, 故发热功率为 6.4 W, 将室温设置为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。设置模拟的初始网格精度为 4, 设置模型整体为精度 8 的局部初始网格, 并进行网格独立性验证, 确定其计算结果可信。

3 正交优化实验与讨论

3.1 实验设计与结果

采用正交实验对通风口形状、通风口等效直径 D 和烟囱高度 H 三个变量的组合进行研究, 各变量的标识和通风口形状(等效直径为 8 mm 时)如图 1(b)和图 2 所示。根据 LED 散热器的基本条件, 确定 D 和 H 的约束范围为: $2\text{ mm}\leq D\leq 8\text{ mm}$, $30\text{ mm}\leq H\leq 60\text{ mm}$ 。以正交表 $L_{16}(4^3)$ 中的数据建立相应模型, 并代入仿真软件计算可得到最优散热参数组合及 LED 最高温度 T 和系统总热阻 R 的数值。为方便下文排列对比, 表 1 中用 A 表示通风口形状(A1、A2、A3、A4 分别表示通风口形状为圆形、梯形、正五边形和正方形), 用 B 表示通风口等效直径 D (B1、B2、B3、B4 分别表示 D 为 2, 4, 6, 8 mm), 用 C 表示烟囱高度 H (C1、C2、C3、C4 分别表示 H 为 30, 40, 50, 60 mm)。

通过对正交实验数据结果的各项参数取均值, 整理可得 A、B、C 三个参数对 T 的影响趋势, 如图 3~5 所示。

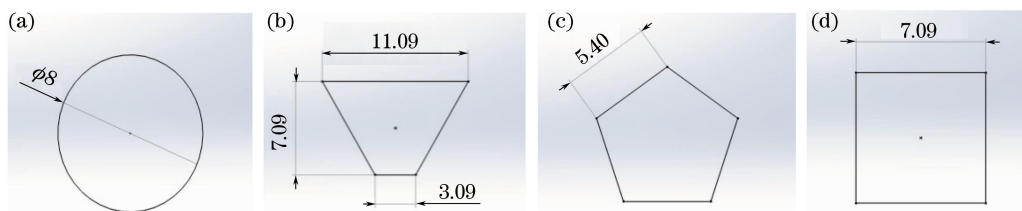


图 2 通风口形状。(a)圆形;(b)梯形;(c)正五边形;(d)正方形

Fig. 2 Shape of the vents. (a) Round; (b) trapezoid; (c) regular pentagon; (d) square

表 1 正交实验 $L_{16}(4^3)$ 设计Table 1 Design of orthogonal experiment $L_{16}(4^3)$

Number	Shape of vent	B	C	$T / ^\circ\text{C}$	$R / (\text{K}\cdot\text{W}^{-1})$
1	A ₁	B ₁	C ₁	69.60	7.75
2	A ₁	B ₂	C ₂	68.14	7.52
3	A ₁	B ₃	C ₃	65.20	7.06
4	A ₁	B ₄	C ₄	61.40	6.47
5	A ₂	B ₁	C ₂	68.01	7.50
6	A ₂	B ₂	C ₁	68.84	7.63
7	A ₂	B ₃	C ₄	64.37	6.93
8	A ₂	B ₄	C ₃	61.60	6.50
9	A ₃	B ₁	C ₃	67.38	7.40
10	A ₃	B ₂	C ₄	66.54	7.27
11	A ₃	B ₃	C ₁	67.51	7.42
12	A ₃	B ₄	C ₂	63.09	6.73
13	A ₄	B ₁	C ₄	67.05	7.35
14	A ₄	B ₂	C ₃	67.26	7.38
15	A ₄	B ₃	C ₂	66.61	7.28
16	A ₄	B ₄	C ₁	64.42	6.94

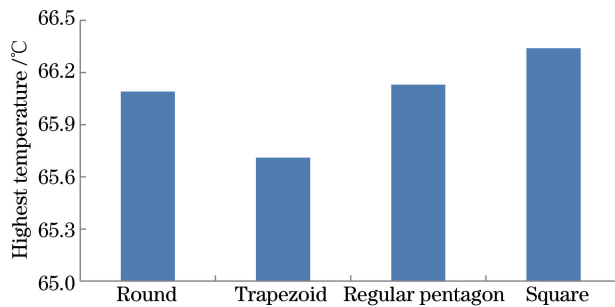
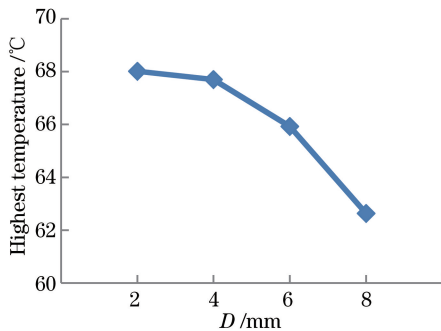
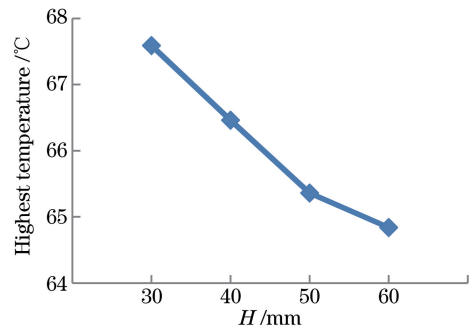


图 3 最高温度随通风口形状的变化

Fig. 3 Relationship between the highest temperature and the shape of the vents

图 4 最高温度随 D 的变化Fig. 4 Relationship between the highest temperature and D 图 5 最高温度随 H 的变化Fig. 5 Relationship between the highest temperature and H

3.2 分析与讨论

从图 3 可以看出,当通风口为梯形时,LED 的最高温度明显低于其他三种通风口形状。说明在本结构中,梯形通风口在 4 种通风口形状中散热效果最好。但是,通过对比散热效果最佳的梯形通风口和散热效果最差的正方形通风口,可以发现二者的 LED 最高温度仅相差 $0.63\text{ }^\circ\text{C}$,温度差别并不明显,说明在本结构中,通风口形状对散热效果的影响并不大。

从图 4 可以看出, D 从 2 mm 增加到 4 mm 时,LED 的最高温度从 $68.01\text{ }^\circ\text{C}$ 降低至 $67.70\text{ }^\circ\text{C}$,仅降低了 $0.31\text{ }^\circ\text{C}$ 。当 D 从 4 mm 继续增加到 8 mm ,芯片的最高温度迅速降低,依次下降了 $1.78\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $3.29\text{ }^\circ\text{C}$ 。出现这一现象的原因在于,当 D 在 4 mm 以下,烟囱通道的通风口仍很小,由于边界阻力作用^[14],空气进入通道

受到阻碍。当 D 大于 4 mm 时, 烟囱通道内空气流量的增大提高了表面的对流换热系数, 同时也使散热表面积增大, 可以使对流传热带走的热量增加。由此可见, 在一定范围内, 随着烟囱通道的通风口的增大, 散热器的散热性能不断提高。为了尽可能降低 LED 的最高温度, 同时又保证散热器的机械强度, 最终取 $D=8$ mm。

从图 5 可以看出, 当 H 小于 50 mm 时, LED 最高温度随着 H 的增加迅速下降; 当 H 大于 50 mm 时, 下降趋势变慢。分析其原因为: 当 H 小于 50 mm 时, 随着 H 的增加烟囱效应效果不断增强, 散热器散热能力得以提高; 当 H 大于 50 mm 时, 烟囱通道内产生气体回流现象^[15], 使热量在烟囱通道内滞留, 同时阻碍新的冷空气继续进入通道, 削弱了烟囱效应强度。当 H 由 50 mm 增加到 60 mm 时, 散热器重量增长了近 20%, 但 LED 最高温度只下降了 0.52 °C。在工业生产中, H 的增加也会使散热器重量和耗材增加, 明显增高材料造价和运输成本。因此, 同时考虑成本和散热效果, 取 $H=50$ mm。

根据图 3~5 及上述分析与讨论, 不难得出散热效果最好的因素组合 $A_2B_4C_3$, 即通风口形状为梯形, 烟囱通风口等效直径 $D=8$ mm, 烟囱高度 $H=50$ mm。显然, 这个组合为第 8 次正交实验的参数。此时 $T=61.60$ °C, $R=6.5$ K·W⁻¹, T 相比于优化前降低了 6.54 °C。散热器周围的空气速度流动迹线分布如图 6 所示, 其温度场分布如图 7 所示。

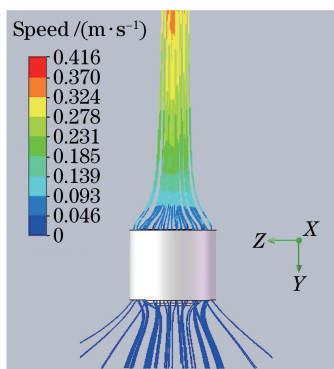


图 6 空气速度流动迹线分布

Fig. 6 Distribution of air speed flow trace

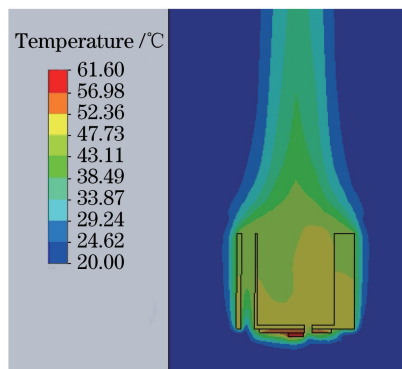


图 7 温度场分布图

Fig. 7 Distribution of temperature field

3.3 与传统散热器散热效果对比

为了进一步验证所设计散热器的散热效果是否优良, 将其与传统无烟囱通道的散热器对比。将其烟囱通道靠近 LED 光源一侧的通风口用厚度为 1 mm 的铝片封住, 并代入仿真软件, 去除烟囱通道的散热器(即传统散热器)结构和温度场分布如图 8 所示。从图 8 可以看出, 将所设计散热器去除烟囱通道后, LED 的最高温度为 70.49 °C, 相比于烟囱结构散热器, 温度升高了 8.89 °C。由此可见, 烟囱效应明显地提高了散热器的散热性能。

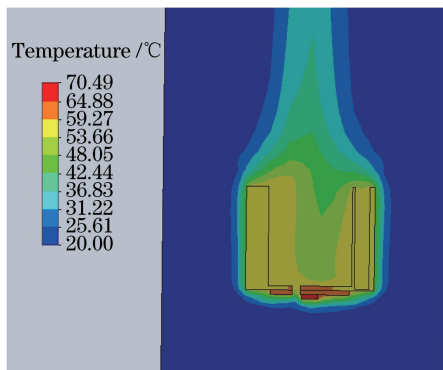


图 8 传统散热器模型和温度场分布

Fig. 8 Traditional radiator model and temperature field distribution

4 实物验证

通过对 LED 总输入功率为 8 W, $D=8$ mm, $H=50$ mm 的梯形通风口实物模型进行实验检测, 来验证以上研究的正确性。实物样品由机械加工制得的铝制散热器和芯片及基板组成, 其中基板和散热器之间用导热硅胶连接。

选用两个 TM-902C 温度测试仪和一台 WY 精密数显直流稳压电源测量所设计散热器的芯片温度。部分温度监测点位置和实验测试平台分别如图 9(a) 和(b) 所示。实验在封闭室内进行, 用空调将室温控制在 20 °C, 然后将芯片在额定工作电压下不间断点亮 30 min 后, 测取各监测点温度读数。

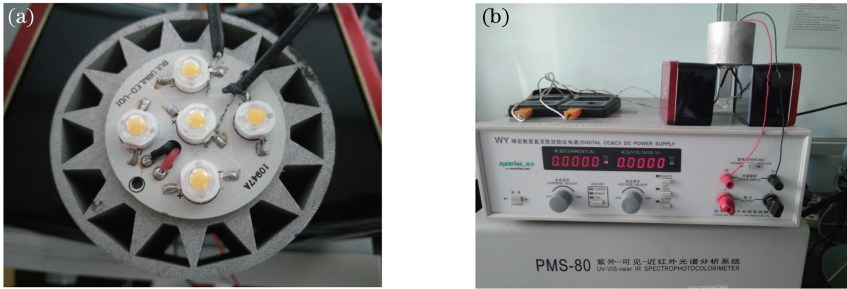


图 9 (a) 温度监测点; (b) 实物测试平台

Fig. 9 (a) Temperature monitoring points; (b) experimental test platform

从表 2 各测量点的对比结果可以看到: 基板表面两个点实测与仿真得到的温度相差在 2.2 °C 之内, 误差不超过 4.2% ; 散热器表面两个点实测与仿真得到的温度相差在 2.1 °C 之内, 其中最大误差为 4.8% 。4 个监测点实际测量的温度与仿真得到的 4 个点的温度基本一致, 平均误差为 4.0% , 在允许范围内, 验证了仿真结果的准确性。

表 2 各测量点温度对比

Table 2 Comparison of temperatures in measurement points

Test point	Measured temperature /°C	Simulation temperature /°C	Difference /°C	Relative difference /%
Point 1 of substrate surface	56.0	54.31	1.69	3.1
Point 2 of substrate surface	54.0	51.84	2.16	4.2
Point 1 of radiator surface	44.0	41.97	2.03	4.8
Point 2 of radiator surface	49.0	47.13	1.87	4.0

5 结 论

设计了一种特殊的直筒式烟囱结构的 LED 冷却用散热器, 并用正交实验法对烟囱通道高度 H 、通风口等效直径 D 和通风口形状进行深入研究。研究后得到的最优参数如下: 烟囱高度 $H=50$ mm, 通风口等效直径 $D=8$ mm, 通风口形状为梯形。此时, LED 最高温度为 61.60 °C, $R=6.5$ K·W⁻¹。相比于优化前, LED 温度降低了 6.54 °C。并且, 与传统散热器对比, LED 温度降低了 8.89 °C。经过实验验证, 4 个监测点的实际温度与仿真所得温度的平均误差为 4.0% , 在允许范围内, 验证了以上研究的正确性。由此可见, 通过引入烟囱效应, LED 散热器的散热性能得到明显加强。

参 考 文 献

- [1] Mueller-Mach R, Mueller G O. White-light-emitting diodes for illumination [C]. Symposium on Integrated Optoelectronics. International Society for Optics and Photonics, 2000: 30-41.
- [2] Krames M R, Shchekin O B, Mueller-Mach R, *et al.* Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting[J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(2): 160-175.
- [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] Liu Chao, Fu Rengli, Gu Xiguang, *et al.* 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.
- [5] 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.
- [6] Dialameh L, Yaghoubi M, Abouali O. Natural convection from an array of horizontal rectangular thick fins with short length[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(17): 2371-2379.
- [7] Culham J R, Muzychka Y S. Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(2): 159-165.
- [8] Li Yang, Zou Jun, Zhu Wei, *et al.* Study on thermal dissipation and measurement of three-dimensional light-emitting LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 112303.
李 杨, 邹 军, 朱 伟, 等. 三维发光 LED 灯片散热设计和测试研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112303.
- [9] Ma Yanzong, Zhang Zhongshan, Zhi Yuwen, *et al.* Optimization design based on the heat radiation structure of high-power LED[J]. Experiment Science and Technology, 2015, 13(6): 253-257.
马彦宗, 张忠山, 智郁雯, 等. 大功率 LED 散热结构的优化设计[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(6): 253-257.
- [10] Wang Liyan, Wang Gang, Fan Bingfeng, *et al.* The heat simulation and optimization design for the high power LED tunnel lighting[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016, (6): 19-25.
王丽岩, 王 钢, 范冰丰, 等. 大功率隧道照明 LED 散热模拟及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2016, (6): 19-25.
- [11] Hou Lü, Chen Hua, Zhou Xinglin, *et al.* Design and optimization of a new type LED lamp radiator based on thermal conductive plastics[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(9): 1103-1108.
侯 绿, 陈 华, 周兴林, 等. 基于导热塑料的新型 LED 灯散热器设计与优化[J]. 发光学报, 2016, 37(9): 1103-1108.
- [12] Zhu Peng. The enhancement of heat dissipation of high power LED lamp with chimney effect[D]. Shenyang: Dalian University of Technology, 2014: 20-24.
朱 鹏. 基于烟囱效应对大功率 LED 灯的强化散热[D]. 沈阳: 大连理工大学, 2014: 20-24.
- [13] 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): 498-505.
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): 498-505.
- [14] 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.
- [15] Li Jing, Ji Shengtao, Liu Jianyong, *et al.* Analysis on the stack effect of cooling device of electronic components[J]. Electronics & Packaging, 2011, 11(6): 36-40.
李 静, 姬升涛, 刘建勇, 等. 电子元件散热装置的烟囱效应分析[J]. 电子与封装, 2011, 11(6): 36-40.