

doi: 10.3788/lop47.052201

大功率 LED 照明装置微热管散热方案分析

李 勇 李鹏芳 曾志新

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要 设计了一种新型的带有百叶窗的平板式大功率发光二极管(LED)照明装置。该装置采用高导热系数的铝基板作为多颗大功率 LED 的散热电路板,用 0.4 mm 的铝片作为散热翅片,结合沟槽式微热管构成集发光与散热一体化的输入功率为 21 W 的照明模组,该模组可根据照明亮度要求重构成不同功率的照明装置。对功率为 144 W 的照明装置进行了理论分析与实验研究。根据理论计算,每个照明模组的发热量约为 18 W,每个照明模组的传热量约为 47 W;模拟结果表明,在环境温度为 30 °C,自然对流换热系数为 10 W/(m²·K)时,LED 芯片最高结温 $T_a=75$ °C,而实验测得 $T_a=75.7$ °C。

关键词 LED 照明装置;数值模拟;散热技术;微热管

中图分类号 TN318 OCIS 220.2945 230.3670 文献标识码 A

Mirco Heat Pipe Cooling Solution for High Power LED Illuminator

Li Yong Li Pengfang Zeng Zhixin

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract A new plate-type high power LED illuminator with louvers is designed. Aluminum plate with high thermal conductivity is applied as radiated circuit plate for high power LEDs, and aluminum stack with 0.4 mm thickness as radiated fins, which make illuminator module with input power 21 W combining with micro grooved heat pipe. The illuminator module is integrated with lightening and radiating. According to lamination requirements, module groups can be reconstructed into illuminators with different input power. Theoretical analysis and experimental research were conducted to a 144 W illuminator. Calculated results indicate the calorific value of one module is 18 W and the heat transfer value is 47 W. The simulated results indicate that the max junction temperature (T_a) of LED chips is 75 °C and T_a measured by experiment is 75.7 °C when the ambient temperature is 30 °C and the natural convection heat transfer coefficient is 10 W/(m²·K).

Key words LED illuminator; numerical simulation; heat removal technology; micro heat pipe

1 引 言

与在道路照明中使用量最大的高压钠灯相比,大功率 LED 作为照明装置具有色温可选、发光效率高、无需高压、超高亮度、显色性高及长寿命等优势^[1]。散热问题是限制大功率 LED 照明应用的最大障碍^[2,3]。Won Kyu Jeung 等^[4]研究了硅基多芯片的封装新方法,C.C. Hsu 等^[5]报道了一种可以有效降低热阻的用于 LED 封装的金属粘结方法。Zhang Kai 等^[6]用竖直的碳纳米管作为粘结材料直接粘结在铝基板上,生长的碳纳米管作为热边界材料,得到了较好的散热效果。Petroski^[7]开发了一种新型热沉来实现大功率 LED 的

收稿日期: 2009-09-30; 收到修改稿日期: 2009-10-23

基金项目: 国基自然科学基金(50705031, 50975096), 广东省自然科学基金(8151064101000058)资助项目。

作者简介: 李 勇(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微热管及节能与新能源领域设计制造等方面的研究。

E-mail: meliyong@scut.edu.cn

冷却。Lan Kim 等^[8]提出了一种 LED 的热管散热模型, 结点温度和热阻都得到了较大的降低。Gwojiun Sheu 等^[9]研究了将 LED 粘结在微热管上的散热性能, 微热管能使芯片温度降低更多。

马春雷等^[10]利用动态电学测试方法测量大功率 LED 热阻和结温的原理、实验装置、测量步骤和影响测试结果的因素。戴炜锋等^[11]针对利用有限元模拟分析了工作过程中的温度和热应力分布, 并测试了实际器件表面特征点的温度变化。袁柳林等^[12]设计了大功率 LED 阵列封装的微通道冷却结构, 探讨了各参数对 LED 多芯片散热效果的影响。罗小兵等^[13]研究了微喷射流的大功率 LED 主动散热方案, 实现大功率 LED 芯片组的高效散热。陈焕庭等^[14]采用有限体积数值模拟、瞬态热阻测试方法以及热沉温度-峰值波长变化的关系, 对 3 种散热基板上大功率 AlGaInP 红光 LED 进行了热特性分析。鲁祥友等^[15]提出了一种新型结构的回路热管, 并建立了其性能测试实验装置。

目前, 国内外的研究多集中在 LED 热阻、结温测量及利用封装方法降低热阻等方面。本文针对大功率 LED 的照明应用需求, 提出了一种集成微热管的新型百叶窗式的大功率 LED 照明装置模块化结构设计方案, 并对其散热性能进行模拟分析和实验研究。

2 大功率 LED 照明装置模块化结构

图 1(a)为大功率 LED 照明装置结构及散热风道示意图。照明装置采用模块化的设计方法, 每排 LED 都是 1 个照明模组, 可以单独使用, 总共由 7 个模组组成, 如图 1(b)所示。照明装置分前舱和后舱两部分, 前舱装有 LED 及电源, 设计成全密封结构; 后舱安装散热模块, 左右及下壁面开有散热用百叶窗结构。翅片自然对流散热的风道经过优化设计, 风可以从照明装置翅片舱的任意一侧流入, 从另一侧流出, 同时翅片的上表层也可以和周围的空气进行对流散热。LED 照明装置结构的整体尺寸为 328 mm×480 mm×84 mm, 模块的基座尺寸为 22 mm×205 mm, 微热管直径为 6 mm, 单片翅片的尺寸为 35 mm×66 mm×0.4 mm, 翅片间距为 3 mm。

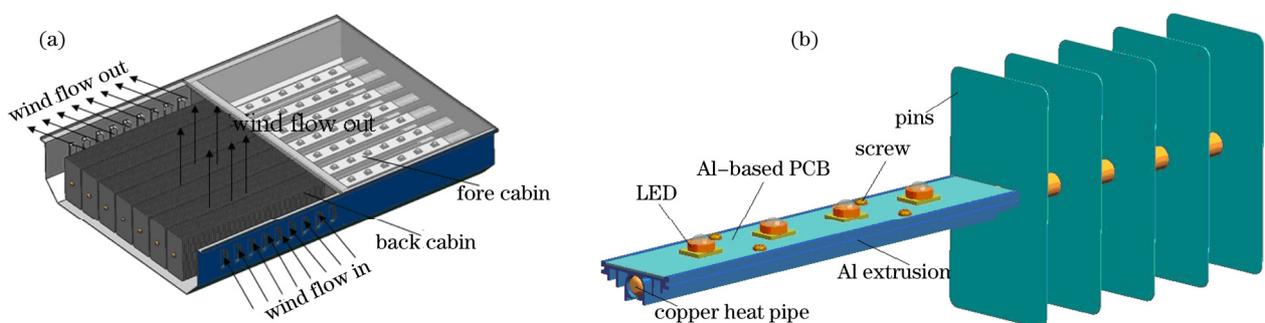


图1 LED 照明装置及模组示意图。(a)LED 照明装置结构及散热风道; (b)照明与散热一体化的模组结构

Fig.1 LED illuminator and LED module. (a)structure and duct of LED illuminator;
(b) LED module integrated with lighting and radiating

在每个照明模组中, LED阵列焊接在铝基电路板上, 铝基电路板下面由挤压铝型材板作为支撑。微热管一端与铝型材板下表面半圆孔利用过渡配合方式进行固定; 另外一端套装上铝翅片并焊接牢固, 为了减小接触热阻, 它们之间采用高导热焊料焊接。铝基电路板和挤压铝型材采用螺钉连接, 中间涂有硅胶。

LED照明装置通电运行后, LED产生的热量通过微热管的一端吸收, 运输到翅片端, 热量通过翅片的热传导和自然对流, 最后被空气带走。微热管具有很高的导热率, 能够及时将LED产生的热量导出, 避免芯片结温过度升高; 采用厚度为0.4 mm的薄铝片来加强对流散热, 比一般的铝基挤压型材热沉具有更大的散热面积、更轻的质量及更好的散热风道。此照明装置运用模块化设计, 具有可重构特征。散热系统采用自然对流散热, 不需要额外的驱动, 因此结构简单、灵活且成本低廉。

3 散热量的理论计算

单个LED照明模组中微热管散热器的最大传热能力可按描述对流传热的牛顿冷却公式写为

$$Q = \alpha A \Delta t, \quad (1)$$

式中 Q 为热管散热器的总传热量, 单位为W; α 为散热器的总传热系数, 单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; A 为散热器的基准散热面积, 单位为 m^2 ; Δt 为热管基板表面温度 t_b 与散热片周围冷却气流温度 t_f 的差, 即 $\Delta t = t_b - t_f$, 单位为 $^{\circ}C$ 。从(1)式可以推导得到

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{A \Delta t}{Q} = AR, \quad (2)$$

式中 R 为当基准面积 A 为单位面积时, 微热管散热器的总热阻, 按传热学理论, 它也是各串联传热环节中的热阻之和, 即

$$R = R_b + R_{rg} + R_{bh} + R_{in} + R_{sr} + R_f, \quad (3)$$

式中 R_b 为从热管基板表面传递到贴附其上的热管蒸发段内壁的导热热阻; R_{rg} 为蒸发段的传热热阻; R_{bh} 为热管内饱和蒸气传递热阻, 由于热管热阻极小, 在此计算中予以忽略; R_{in} 为冷凝段蒸气与内壁的传热系数; R_{sr} 为冷凝段内壁到散热片基板之间的导热热阻; R_f 为从冷凝段翅片到冷却气体之间的传热热阻。得到总传热系数

$$\alpha = \frac{1}{A_f R} = \frac{1}{\left(\delta_{rg} / \lambda_{rg}\right) \cdot \left(A_f / A_{zf}\right) + A_f / \left(A_{zf} h_{zf}\right) + A_f / \left(A_m h_m\right) + \left(\delta_{sr} / \lambda_{sr}\right) \cdot \left(A_f / A_w\right) + 1 / h_f}, \quad (4)$$

代入数据, 得 $\alpha = 6.48 W/(m^2 \cdot K)$, 则微热管散热器的最大散热量为47 W。

单个LED照明模组的输入功率为21 W, 假设发光效率为15%, 则单个模组的发热量为18 W。由此可见, 单个照明模组中微热管散热器的最大理论传热量远大于LED的发热量, 所以该种散热方式能够满足LED的散热要求。

4 LED 照明装置的数值模拟分析

根据一般应用要求, 假设环境温度为 $30^{\circ}C$, 翅片与空气的对流散热系数为 $10 W/(m^2 \cdot K)$ 。翅片材料为6063型铝合金, 导热系数为 $201 W/(m^2 \cdot K)$ 。图2为D翅片的温度、温度梯度和热流密度分布图。可见温度梯度和热流密度的分布状态基本一致, 温度梯度越大热流密度越大, 这与理论分析相符合。在实际应用中, 因翅片间的热场会产生干扰, 使热量不能及时导出, 导致其中某些翅片的实际温度值要高于理论值。

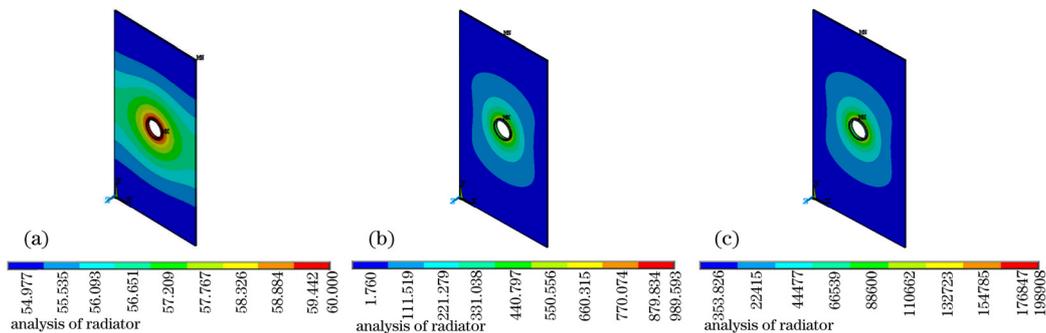


图2 单片翅片模拟结果图。(a)翅片温度分布图; (b)翅片温度梯度分布; (c)翅片热流密度分布
Fig.2 Simulated results of single fin. (a)temperature distribution of fin; (b) temperature gradient distribution of fin; (c)heat flux distribution of fin

图3为翅片间距分别为2 mm和3 mm的单排翅片温度分布情况。翅片间距为2 mm时, 各翅片温度分布不均匀, 相邻翅片存在明显温差, 如图3(a)所示。翅片间距为3 mm时, 各翅片温度分布基本一致, 翅片与微热管接触的部位温度较高, 穿孔处可达到 $60^{\circ}C$ 。可见, 翅片间距对LED散热有直接的影响。相同

条件下,翅片温差越小越好,因为对流传热是由空气与翅片的温度梯度驱动的。因此,本照明装置采用的翅片间距为 3 mm。

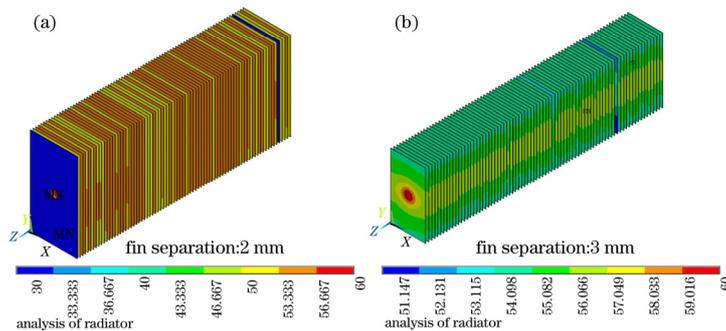


图 3 不同间距的翅片的温度分布图

Fig.3 Temperature distribution of fin stack with different separation

图 4 为单排 LED 模组的温度分布情况。芯片结温 $T_j = T_c + P_D \cdot R_{JC}$, 其中 T_c 为散热衬底的温度, P_D 为 LED 的功耗, R_{JC} 为 LED 芯片结点到散热衬底的热阻。图 4(a)为使用等直径铜管散热器的情况, 芯片衬底的最高温度可达 92.8°C , $T_j = 103.6^\circ\text{C}$ 。LED 芯片在较高温度下工作, 会影响芯片的使用寿命和出光效率。图 4(b)为使用微热管散热器的情况, T_c 最高为 65°C , T_j 为 73°C , LED 芯片的温度大大降低。

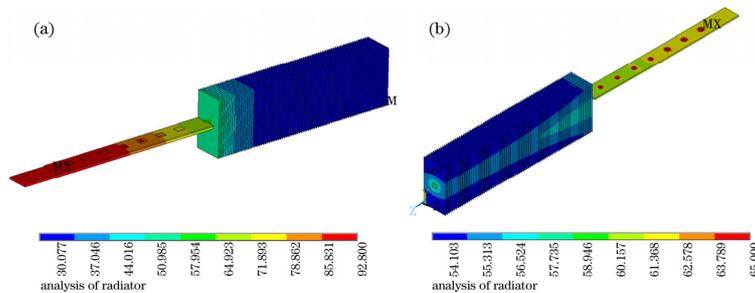


图 4 LED 模组温度分布图。(a)铜管散热器; (b)微热管散热器

Fig.4 Temperature distribution of LED module. (a)radiator with copper tube; (b)radiator with micro heat pipe

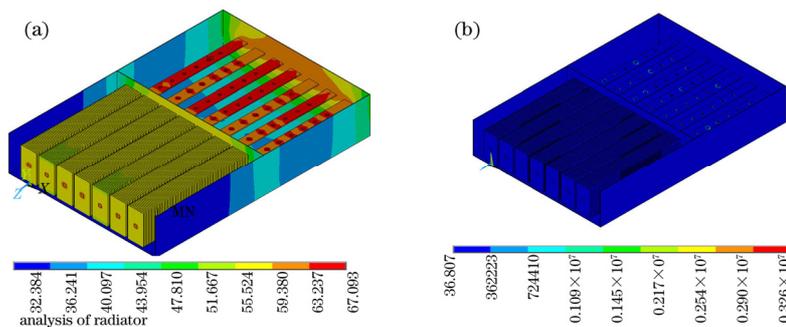


图 5 LED 照明装置模型温度分布(a)和热流密度分布(b)

Fig.5 Temperature distribution (a) and heat flux distribution (b) of LED illuminator

图 5(a)为整个 LED 照明装置的温度分布图。翅片温度分布与单片的近似, 每排翅片以及同排不同位置的翅片温度分布都基本相同。LED 芯片衬底的最高温度为 67°C , 换算后结温为 75°C , 产生在 3 和 4 排铝基电路板中间位置的 LED 芯片上, 与实验结果吻合。模组间距、翅片间距以及翅片本身的参数都有待进一步优化, 可使此模型获得更好的散热效果。模拟结果的温度分布和实验测得的温度分布情况是吻合的, 因此可以用模拟结果来进一步核算每个散热模块的散热量。整个 LED 照明装置模型的热流密度分布如图 5(b)所示, 其平均热流密度为 100 W/m^2 , 模组的传热量为平均热流密度与散热面积之积。因此, 可计算单个模组的最大传热量为 36.48 W , 略小于单个模组的最大散热理论计算值, 这主要是因为模拟分析时考虑了热场的耦合效应, 使得对流散热作用减弱, 传热量减小。

5 实验及结果分析

该照明装置采用了两种实验方法进行对比测试分析。一种是采用非接触式红外温度测试仪测量LED芯片和翅片表面温度，其结果可以直观地反映结点温度的大小，如图6所示。另一种是采用K型热电偶对关键特征点进行接触式测量，如图7所示。



图 6 红外温度测试装置
Fig.6 Infrared temperature measurement setup

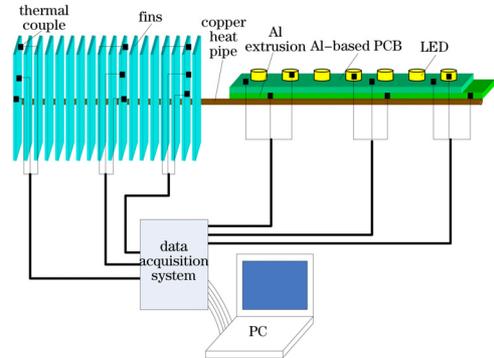


图 7 热电偶测温装置
Fig.7 Temperature measurement setup with thermocouple

在红外测温方法中，LED 表面的温度由红外测温仪直接测得，实验误差主要源于红外测温仪自身的误差(约为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)。在热电偶测温方法中，各个点的温度值由热电偶直接测得，误差主要由热电偶的测量误差和多次测量的读数误差组成。实验用热电偶为标准 NiCr-NiSi 的 K 型热电偶，在温度范围为 $-30\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，绝对测量误差为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对测量误差为 0.75% ；读数的绝对误差为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对误差为 1% 。所以总的绝对误差为 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对误差为 1.75% 。

图 8 为不同导热铝基电路板热平衡时的温度分布图和曲线。红外测温时，环境温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且系统已运行 60 min 达到热平衡。芯片衬底最高温度为 $67.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，经换算得 LED 芯片最高结温为 $75.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，芯片衬底最低温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (两基板中间空隙空气温度约为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$)。基板的表面温度约为 $67\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，两侧的温度稍低于中间温度。2~5 排温度分布相近，1, 6 排温度较低。2~5 排基板周围热场干扰大，空气流动较弱，热量不易被带走，从而使其温度高于 1, 6 排。实验结果表明，采用微热管散热方案，大功率 LED 芯片可以长时间工作，这表明该散热方案具有实用价值。

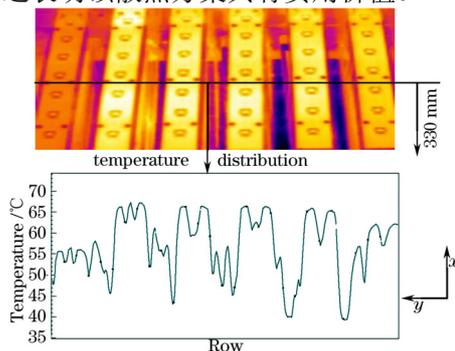


图 8 不同导热基板温度分布图和曲线
Fig.8 Temperature distribution and curve of different Al-based PCB

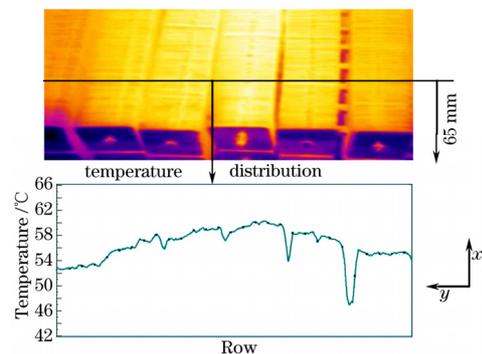


图 9 不同排翅片表面的稳定温度分布图和曲线
Fig.9 Temperature distribution and curve of fin stack

图 9 为 LED 翅片表面热平衡时的温度分布图和曲线，顺序与基板顺序相同，翅片表面最高温度为 $60.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最低温度为 $52.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (两排翅片中间空隙空气温度约为 $46.9\text{ }^{\circ}\text{C}$)。翅片表面温度中间高，两侧低，中间排翅片温度较高。此排翅片温度升高主要是对流散热效果不佳、热量不能及时对流到空气所致。为使中间翅片获得更好的散热效果，可在适当的位置加风扇强排。

实验过程中，LED 电源有一定的发热量，会使芯片组周围空气温度升高，在一定程度上增加对流散热

的困难性。因此,在实际应用中,可以考虑将电源单独放置。红外温度测试仪只能拍摄到某一平面的温度分布情况,温度会有些误差,但是可以用其代表 LED 系统整体温度分布状况,因为红外测温与热电偶直接测量结果一致。

图 10 为 7 个模组上相同位置点的热电偶测温得到的温度分布曲线。图中可以看出,各点在 7 个模组上的温度基本成正态分布,最高温度为 61.2 °C,最低温度为 53.6 °C,与红外温度测试仪测得的温度分布相吻合。在单个模组的不同点上,点 1 和点 2 的温度基本相等,点 3 的温度最低,因为点 3 处在模组翅片的最外层。图 11 为 A, B, C, D 4 片翅片上不同点的温度分布。由理论知识可知,单片翅片上的温度成对称分布,所以在其 1/4 面积上取了 5 个点,点的位置分布如图 12 所示。可见翅片在整体翅片中的位置对翅片温度有很大的影响,而各片翅片的温度分布情况是一致的,离热管中心越远其温度越低,因为在热传导过程中温度会降低。

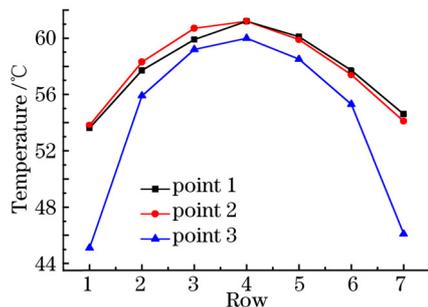


图 10 7 个模组在相同位置点上的温度分布
Fig.10 Temperature distribution of the same points in the seven modules

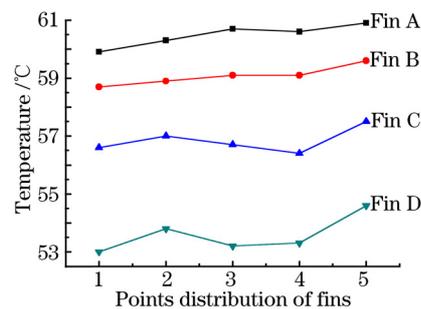


图 11 A,B,C,D 4 片翅片上不同点温度分布
Fig.11 Temperature distribution of different points on A,B,C,D fins

图 13 为各排模组上 LED 灯底座的温度分布曲线,其分布状况可代替 LED 灯的温度分布情况。由图可知,各排 LED 的温度分布趋势一致,随着微热管传热方向呈递减趋势,但温度最高值出现在中间位置。微热管的等温性虽好,但依然存在很小的传递温差,LED 的温度值也受其位置的影响,位置不仅影响其所对应翅片的散热情况,而且也影响其对应的 Al 基板的对流散热情况。

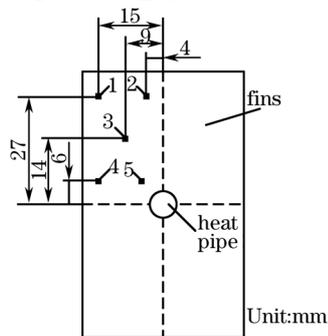


图 12 翅片上点的位置分布
Fig.12 Position distribution of points on the fin

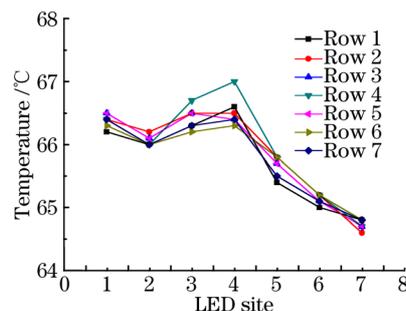


图 13 各排 LED 底座温度分布
Fig.13 Temperature distribution of LED substrate

根据 Edison 公司给出的大功率白光 LED 的结温在亮度 70% 时与寿命的关系可知,当芯片结点温度为 75 °C 时,其寿命大约为 40000 h,而市场上使用的高压钠灯有效使用寿命大约为 10000 h,所以此照明装置结构具有很高的市场应用价值。

6 结 论

提出了一种新型的带有百叶窗的平板式大功率 LED 照明装置。实验和数值模拟结果表明,整个照明装置中不同翅片间温度分布具有耦合效应,翅片间距与散热模组间距都影响散热翅片温度分布,因此,处于

照明装置中间的模组的温度分布会高于两边的模组温度分布。该照明装置能在自然对流的条件下有效散热, 可使 LED 芯片组结温保持在 75.7 °C 以下; 而不使用微热管散热时 LED 芯片组结温一般在 136.4 °C 以上, 因此, 该照明装置可用作户外路灯照明来代替目前的高压钠灯, 具有明显的节能效果和重大的实用价值。该照明装置运用模块化设计, 采用微热管导热, 使得照明装置结构简单、具有可重构特征, 且具有良好的散热性能。相关翅片的参数设计还可以进一步优化以提高系统的散热性能, 也可通过增加风扇, 研究该装置在强迫对流条件下的性能。

参 考 文 献

- 1 The trouble in large-scale commercial application of LED lamps[J]. *Solar & Renewable Energy Sources*, 2008, (2): 45
LED路灯大规模商用所面临的难题[J]. 阳光能源, 2008, (2): 45
- 2 J. Petroski. Thermal challenges facing new generation light emitting diodes (LEDs) for lighting applications[C]. *SPIE*, 2002, **4776**: 215~222
- 3 Li Bingqian. Current-illumination characteristics of novel high power LED with metal PCB[J]. *Acta photonica sinica*, 2005, **34**(3): 372~374
李炳乾. 基于金属线路板的新型大功率LED及其光电特性研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 372~374
- 4 Won Kyu Jeung, Sang Hyun Shin, Suk Youn Hong *et al.*. Silicon-based, multi-chip LED package[C]. *Electronic Components and Technology Conference*, 2007. 722~727
- 5 C. C. Hsu, S. J. Wang, C. Y. Liu. Metallic wafer and chip bonding for LED packaging[C]. *IEEE Proc. 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2003, 1. 26
- 6 Zhang Kai, Matthew M. F. Yuen, David G. W. Xiao *et al.*. Directly synthesizing CNT-TiM on aluminum alloy heat sink for HB-LED thermal management[C]. *IEEE, 2008 Electronic Components and Technology Conference*, 2008, 978-1-4244-2231
- 7 J. Petroski. Understanding longitudinal fin heat sink orientation sensitivity for Light Emitting Diode (LED) lighting applications[C]. *IEEE, Proc International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition. Maui, Hawaii*, 2003. 111~117
- 8 Lan Kim, Jong Hwa Choi, Sun Ho Jang *et al.*. Thermal analysis of LED array system with heat pipe[J]. *Thermo-Chimica Acta*, 2007, **455**: 21~25
- 9 Gwojiun Sheu, Farnshiu Hwu, Shenhang Tu *et al.*. The heat dissipation performance of LED applied a MHP[C]. *SPIE, Fifth International Conference on Solid State Lighting, Bellingham, WA*, 2005, **5941**. 594113
- 10 Ma Chunlei, Bao Chao. A novel measuring method of thermal resistance for high power LED[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(2): 13~17
马春雷, 鲍超. 一种大功率LED热阻的测试方法[J]. 光学仪器, 2005, **27**(2): 13~17
- 11 Dai Weifeng, Wang Jun, Li Yuesheng. Transient thermal analysis of high-power LED Package[J]. *Semiconductor Opto-Electronics*, 2008, **29**(3): 324~328
戴炜锋, 王珺, 李越生. 大功率LED封装的温度场和热应力分布的分析[J]. 光电器件, 2008, **29**(3): 324~328
- 12 Yuan Liulin, Liu Sheng, Chen Mingxiang *et al.*. Thermal analysis of high power LED array packaging with microchannel cooler[J]. *Semiconductor Opto-Electronics*, 2006, **27**(6): 712~716
袁柳林, 刘胜, 陈明祥等. 基于微通道致冷的大功率LED阵列封装热分析[J]. 光电器件, 2006, **27**(6): 712~716
- 13 Luo Xiaobing, Liu Sheng, Jiang Xiaoping *et al.*. Numerical and experimental study of high power LED radiating project with micro injection stream[J]. *Science in China Series E*, 2007, **37**(9): 1194~1204
罗小兵, 刘胜, 江小平等. 基于微喷射流的高功率LED散热方案的数值和实验研究[J]. 中国科学E辑, 2007, **37**(9): 1194~1204
- 14 Chen Huanting, Lü Yijun, Chen Zhong *et al.*. Analysis of thermal spreading boards for high-power AlGaInP red LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 805~810
陈焕庭, 吕毅军, 陈忠等. 大功率AlGaInP红光LED散热基板热分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 805~810
- 15 Lu Xiangyou, Cheng Yuanxia, Liu Meijing *et al.*. Experimental investigation on heat pipe heat sink for cooling high power LED[J]. *Semicond. Optoelectronics*, 2008, **29**(5): 651~654
鲁祥友, 程远霞, 刘美静等. 用于大功率LED冷却的热管散热器的实验研究[J]. 半导体光电, 2008, **29**(5): 651~654