

基于开缝基板的大功率 LED 散热性能研究

田立新¹ 文尚胜^{1,2} 姚日晖^{1,2} 陈颖聪¹ 谢嘉宁^{3*}

¹ 华南理工大学高分子光电材料与器件研究所, 广东 广州 510640
² 华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640
³ 佛山科学技术学院光电子与物理学系, 广东 佛山 528000

摘要 为了实现大功率多芯片 LED 的芯片直装散热(COH)封装的高效散热,提出了一种开缝基板的新颖散热结构,并运用 Icepak 仿真软件模拟分析了在自然对流下不同缝间距对结温、热阻、流场分布和换热特性的影响。结果表明,开缝基板能有效改善流场分布,提高表面换热系数,增加散热性能。在传导和对流的双重作用下,存在最佳缝间距使结温和热阻最低,输入功率为 1 W 时,结温和热阻分别降低 3.2 K 和 1.01 K/W。随芯片输入功率的增加,开缝基板的散热效果愈发明显。同时,开缝基板的提出也节省了器件封装成本。

关键词 光学器件;散热性能;结温;热阻;换热系数;基板质量

中图分类号 TN312⁺.8; TN383⁺.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1123002

Research on the Heat-Release Performance of High Power LED Using Slotted Plate

Tian Lixin¹ Wen Shangsheng^{1,2} Yao Rihui^{1,2} Chen Yingcong¹ Xie Jianing³

¹ Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China
² State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China
³ Department of Physics, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China

Abstract A novel heat-release structure with slotted plate is proposed to enhance the heat dissipation performance of high power multi-chip chip-on-heatsink (COH) LEDs. The junction temperature, thermal resistance, fluid field and the performance of heat dissipation are simulated and analyzed by Icepak software under natural convection. The simulation results show that the slotted plate can improve the flow feature of fluid field, increase the surface heat transfer coefficient, enhance the capability of heat dissipation. There is a best pitch between two plates to make the junction temperature and thermal resistance lower under the thermal conduction and thermal convection. And the junction temperature and thermal resistance lower 3.2 K and 1.01 K/W respectively when the input power of each chip is 1 W under the best pitch. For slotted plate, the capability of heat dissipation is enhanced obviously with the increasing of input power for each chip, and it also decreases the weight of plate and reduces the cost.

Key words optical devices; performance of heat dissipation; junction temperature; thermal resistance; heat transfer coefficient; plate weight

OCIS codes 230.1150; 230.2090; 230.3670; 230.5170

收稿日期: 2014-05-07; **收到修改稿日期:** 2014-07-01

基金项目: 广东省科技厅重大科技专项(2011A080801016)、广东省战略性新兴产业专项(2011A081301017, 2012A080304012, 2012A080304001)、广州市科技计划项目(2013J4300021)

作者简介: 田立新(1989—),男,硕士研究生,主要从事 LED 封装及散热技术方面的研究。E-mail: tlxscut@163.com

导师简介: 文尚胜(1964—),男,博士,教授,主要从事有机及无机半导体材料与器件等方面的研究。

E-mail: shshwen@scut.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: xiejianingfs@126.com

1 引言

相比于传统光源,发光二极管(LED)光源具有节能、环保、使用寿命长、响应速度快、易于控制等优点,被称为第四代照明光源或者是绿色光源,广泛应用于交通信号灯、液晶显示器(LCD)背光源、汽车灯和普通照明^[1-4]。单颗LED体积小,光通量有限,不能满足目前市场的应用需求,因此大功率多芯片LED应运而生。与传统单芯片LED模块相比,大功率多芯片LED模块具有光通量高、光色一致性好、低光衰等优点^[5],但是大功率多芯片LED在具有这些优点的同时,也产生了更多的热量,这些热量会降低LED的使用寿命和稳定性,并产生色飘,降低光通量^[6-8],因此大功率多芯片LED热管理是当前半导体照明研究的重点课题之一。

功率型LED的散热涉及芯片级、封装级和系统级三个层次的热管理^[9]。芯片级和封装级热管理主要是通过优化结构、材料和工艺等手段有效降低导热热阻,加快热量从发光层向热沉的传导。为了不断提高LED模块的散热能力,研究人员在芯片级和封装级方面提出了不同的封装结构。相比于传统的封装结构,板上芯片(COB)封装结构^[10]省去了芯片与基板之间的热沉结构,直接把芯片封装在印刷电路板上,减少了LED器件的结构热阻和接触热阻,使其具有良好的散热性能;芯片直装散热(COH)封装结构^[11]是以COB封装结构为基础,把芯片直接封装在散热器上,使散热器兼顾了向周围环境散发热量的同时,也承担了传统LED热沉的重要职能。COB封装结构和COH封装结构都减少了LED的热传导路径,降低了热阻,同时也减小了封装厚度,且Kailin等^[11]指出:COH封装比COB封装具有更好的散热性能。系统级热管理的核心是散热器的设计,这是解决功率型LED散热问题的关键。但是,目前针对大功率LED的COH封装的系统级热管理方面的研究较少,尤其是在自然对流条件下的研究更加有限。

已有研究表明,在自然对流条件下,水平基板、竖直平行翅片的散热器具有良好的散热性能^[12],在LED散热过程中,其翅片根部温度最高,沿翅片高度方向逐渐降低;同时,空气从翅片两侧进入、顶部输出,不利于自下而上的自然对流,在温度较高区域换热系数较小^[13],阻碍了翅片换热。已有研究表明:流动状态是影响翅片换热的重要因素^[14]。因此为改善翅片间流动状态,增加翅片换热特性,本文提出了一种开缝基板的散热系统,并对其芯片结温、流

场分布和换热特性进行了模拟分析,从原理上解释了开缝基板对散热性能的影响,为功率型LED的COH封装结构设计提供了理论依据和参考。

2 理论分析和模型

2.1 理论分析

热量传递有三种基本方式:传导、对流和辐射。在LED封装散热结构中,主要依靠传导作用把LED芯片结温传递给散热器,再通过对流和辐射的作用使散热器热量散发到外部环境中。由于散热器表面温度受LED最高工作温度的限制,因此可忽略其辐射作用。但散热器热导率较高,空气热导率非常小,散热器和外部环境之间存在很大的热阻,所以高效地把热量传递给外部空间是解决LED散热问题的有效途径之一。

牛顿冷却公式可以衡量外部环境和散热器之间的散热量,表示为

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

式中 A 为散热表面积, h 为表面换热系数, T_w 为固体表面温度, T_∞ 为环境温度。由(1)式可知,增加散热表面积和表面换热系数都可以增加固体表面的散热量,从而减小空气与热沉之间的热阻,降低结温。其中表面换热系数为

$$h = -\frac{\lambda}{T_w - T_\infty} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}, \quad (2)$$

式中 λ 为空气热导率, $\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}$ 为固体表面法线方向上的流体温度变化率^[15]。由(2)式可以看出表面换热系数与固体近壁处流体的温度场有关。所以改善固体表面的流场分布,可以改变流体温度场和固体表面换热系数的分布,从而使流体带走更多的热量,提高散热性能。

2.2 数值计算模型

具有开缝基板的大功率多芯片COH封装结构的简化模型如图1所示。采用几何尺寸为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$ 的LED倒装芯片,并按照 2×2 的阵列通过厚度为 0.02 mm 的绝缘固晶胶(Arctic Silver 5)粘贴在铝基板上,芯片之间的间距为 6 mm ,6个平板平行翅片中每个平行翅片的面积为 $18\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,厚度为 1 mm ,翅片间距为 6 mm 。假设每个芯片的输入功率为 1 W ,电光转换效率为 20% ,即每个芯片的热生成率为 0.8 W 。模型中各材料的热导率如表1所示,环境温度为 293.15 K ($20\text{ }^\circ\text{C}$),重力加速度为 $g_y = -9.8\text{ m/s}^2$,整个模型

放置在 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的计算空间内，空间边界设置为压力出口边界条件。

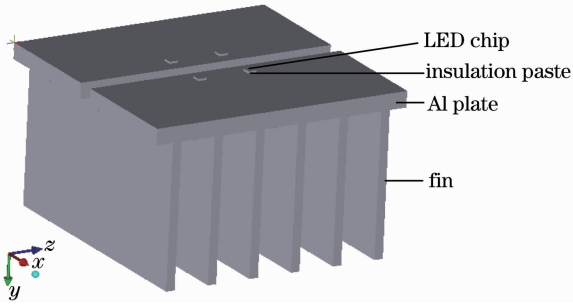


图 1 开缝基板的 COH LED 封装结构

Fig. 1 Structure of COH LED package with slotted plate

表 1 大功率 LED 各封装材料的热导率^[16]

Table 1 Thermal conductivities of high power LED package materials^[16]

Component material	Chip	Insulation paste	Al plate	Fin
Thermal conductivity / (W/mK)	130	8	205	205

器件产生的热量主要通过热传导和热对流的方式从热沉扩散到环境中，忽略芯片通过硅脂和透镜传播的热量，且不考虑芯片表面和热沉的辐射散热。Icepak 有限元分析软件具有强大的热分析能力，已有学者通过实验验证了 Icepak 的模拟温度和真实温度误差在可接受范围内^[17]。采用 $k-\epsilon$ 方程模型，运用非结构化六面体网格进行划分，对无缝基板模型进行求解，输入功率为 1 W 时，其温度分布如图 2 所示。

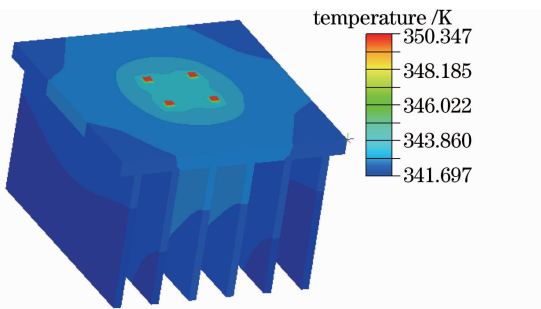


图 2 无缝基板温度场分布

Fig. 2 Temperature field distribution without slotted plate

3 计算结果与讨论

3.1 缝间距对结温和热阻的影响

结温(T_j)是指作用在 LED 芯片上的温度，是 LED 散热能力的表现结果。图 3 为单颗 LED 芯片输入功率为 1 W 时，结温随缝间距的变化曲线。由

于 4 芯片 LED 在基板上呈对称分布，所以结温相同。从曲线变化可以看出，基板无缝时，结温为 349.170 K，随着开缝间距的逐渐增大，结温逐渐降低。当开缝间距为 4 mm 时，结温达到最低，为 345.970 K；与无缝基板相比，结温降低了 3.20 K。继续增大缝间距，结温又逐渐升高。这主要是因为当基板开缝时，翅片间空气在浮力作用下，对基板中间的空气产生抽吸作用，增加了翅片根部且靠近中间部分与空气的相对运动速度，从而减小了热边界层的厚度，使流体带走更多的热量，提高了散热效率；当缝间距大于 4 mm 后，继续增加缝间距，芯片的有效热传导面积逐渐减小，芯片产生的温度不能及时有效地通过基板热传导作用传递给翅片，所以结温逐渐升高。

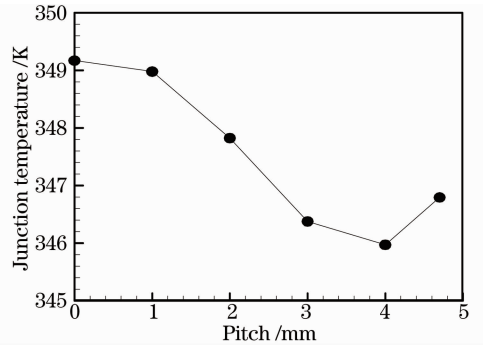


图 3 基板间距对结温的影响

Fig. 3 Junction temperature as a function of pitch between two plates

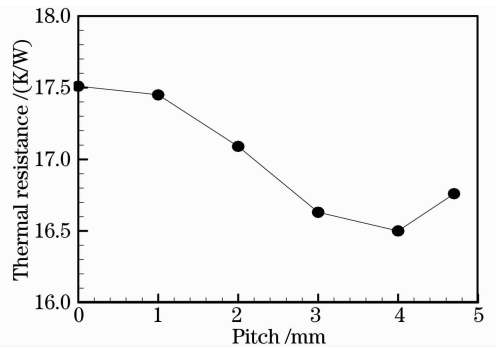


图 4 基板间距对热阻的影响

Fig. 4 Thermal resistance as a function of pitch between two plates

热阻(R_{th})是功率型 LED 散热能力的重要指标，代表 LED 封装结构的散热能力。散热能力的强弱直接影响着功率型 LED 芯片的稳定性、发光效率和使用寿命。LED 的热阻 R_{th} 为

$$R_{th} = \frac{T_j - T_x}{P_H}, \quad (3)$$

式中 R_{th} 为器件结温与环境温度下的热阻， T_j 为稳

态情况下芯片结温, T_x 为周围环境温度, P_H 为热功率。

图 4 为在不同缝间距时热阻变化曲线。间距分别为 0、1、2、3、4、4.7 mm 时的热阻分别为 17.51、17.45、17.09、16.63、16.50、16.76 K/W。与无缝基板相比, 开缝基板具有较低的热阻, 其中开缝间距为 4 mm 时的热阻比无缝时热阻降低了 1.01 K/W。

3.2 缝间距对流场和换热特性的影响

由(2)式可知换热特性与流场分布有关, 改善流场分布, 减薄热边界层, 可以有效提高固体表面的换热特性。图 5(a) 和 (b) 分别为在无缝和缝间距为 4 mm 情况时, 平行于翅片的中间剖面 ($Z=0.15$ mm)

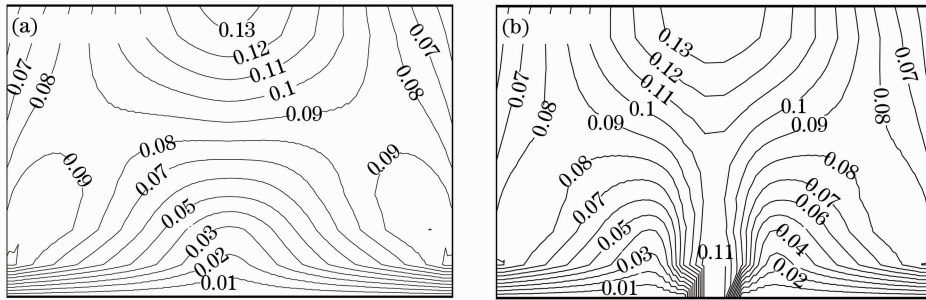


图 5 空气速度等值线分布 ($Z=0.15$ mm)。(a) 间距为 0 mm; (b) 间距为 4 mm

Fig. 5 Distribution of velocity contours ($Z=0.15$ mm)。(a) Pitch is 0 mm; (b) pitch is 4 mm

由(1)式得知, 物体表面散热量的多少不仅与物体的表面积有关, 同时也与物体的表面换热系数有关。由(2)式知, 在固体表面温度基本不变的情况下, 表面换热系数与固体表面的流体温度梯度有关, 即热边界层越厚, 表面换热系数就越小, 反之则相反。图 6 为基板表面和翅片表面的平均换热系数随缝间距变化的关系图, 可以看出, 随着缝间距的不断增大, 换热系数的总体趋势在增加。综合分析图 3 和图 6 可知, 当缝间距为 1 mm 时, 虽然表面换热系数比无缝时低 0.03 W/(m^2 K), 但其结温也比无缝

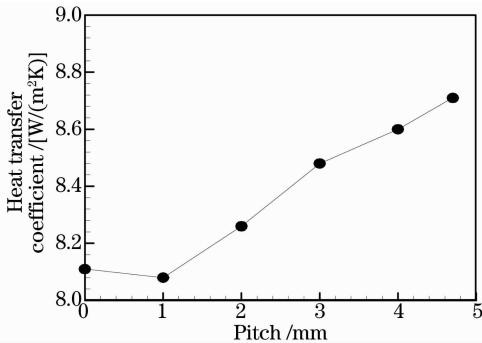


图 6 基板间距对表面换热系数的影响

Fig. 6 Heat transfer coefficient as a function of pitch between two plates

的空气速度等值线分布。由图 5 可知, 在自然对流情况下, 采用开缝基板的方式使翅片周围的空气流动状态发生了变化。无缝时[见图 5(a)], 翅片周围的空气在浮力作用下向上运动, 由于空气压强作用, 冷空气从翅片两侧进入翅片之间, 水平速率逐渐减小, 竖直向上速率逐渐增大。所以在中间且温度较高的翅片表面, 速率较小, 热边界层较厚, 换热效果较差。当缝间距为 4 mm 时[见图 5(b)], 由于热空气的上升, 部分冷空气在压强作用下从底部缝间距进入翅片中间, 且在温度较高的翅片表面速率较大, 热边界层较薄, 换热效果较好。

时低, 即缝宽为 1 mm 时的散热量比无缝时的散热量要多, 这主要是因为在对基板进行开缝的同时, 也增加了基板与空气的接触面积, 所以散热量要略高。其后, 随着开缝间距的逐渐增大, 翅片和基板表面的流体平均速度增大, 表面换热系数逐渐增加。但增加到一定值后, 继续增加缝宽, 就减小了基板的有效热传导面积, 使芯片温度不能及时有效地传递出去, 导致结温又逐渐升高。

3.3 开缝基板对不同输入功率的影响

当器件输入功率增大时, 结温逐渐升高, 导致热沉的温度也逐渐升高, 但热沉与空气之间存在很大的热阻, 热沉增加的热量不能同等的传递到环境当中去, 反过来也影响了芯片温度的积累, 使芯片结温最终达到一个高于低功率芯片结温的热平衡状态。从 3.2 节讨论可知, 开缝基板能够明显改善翅片间的流场分布, 并减薄热边界层, 提高换热系数。当器件输入功率较大时, 翅片温度较高, 热边界层较厚, 翅片表面温度梯度增加, 但基板和翅片表面的平均换热系数却呈增长趋势, 如图 7 所示。芯片输入功率为 0.5 W 时, 缝间距为 0 mm 和 4 mm 的表面平均换热系数分别为 7.24 W/(m^2 K) 和 7.65 W/(m^2 K), 二者之差为 0.41 W/(m^2 K)。随着输入功率的不断增大,

表面换热系数不断增加,但斜率逐渐减小,即增加量逐渐减少。当输入功率为 2.5 W 时,缝间距为 0 mm 和为 4 mm 的表面换热系数分别为 $9.77 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 和 $10.41 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$,二者之差为 $0.64 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 。同时可以得知,无论输入功率的大小,缝间距为 4 mm 时表面换热系数比无缝时的表面换热系数都大,且随着单颗芯片输入功率的增加,二者之间的差距越来越明显。

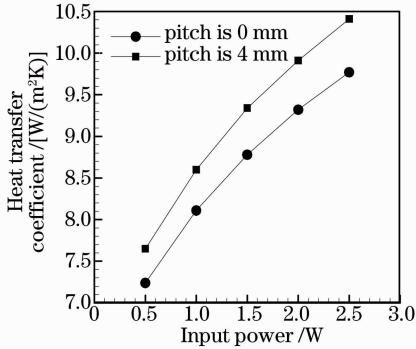


图 7 表面换热系数随输入功率的变化曲线

Fig. 7 Heat transfer coefficient as a function of input power

由于电光转换效率一定,输入功率越大的芯片,产生的热量越多,对器件各参数的影响也就越明显。图 8 为不同输入功率 LED 的结温变化曲线。可以看出,LED 结温随输入功率的增加而逐渐提高。但输入功率相同时,基板开缝比基板无缝时的结温明显降低,且随着单颗 LED 芯片输入功率的增加,结温降低幅度越来越大,在单颗 LED 输入功率分别为 0.5、1、1.5、2、2.5 W 时,缝宽为 4 mm 的结温比无缝时结温分别降低 2.4 K、3.2 K、4.2 K、5.05 K、5.95 K。且随着单颗 LED 功率的增加,两种结构的温差基本成正比例增加,单颗芯片输入功率每增加 0.5 W,4 mm 有缝基板比无缝基板温度降幅约增加 0.9 K。综合以上分析可知,随着功率的增加,热

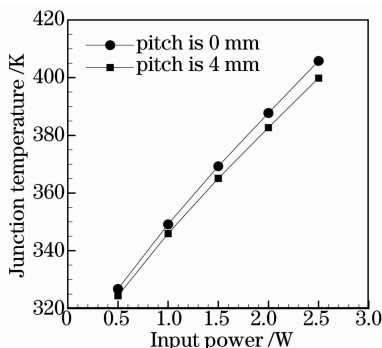


图 8 结温随输入功率的变化曲线

Fig. 8 Junction temperature as a function of input power

边界层厚度增加,但表面换热系数和热沉温度也在增加,由(1)式知散热量也在增加。由于散热增加量明显少于热生成量,所以导致结温升高。但开缝基板的存在有效降低了相同输入功率时 LED 的结温,特别是对大功率的 LED 影响更加明显,为大功率 LED 的应用创造了条件。

3.4 开缝基板对封装成本的影响

为使 LED 芯片的温度及时有效地散发出去,基板需要采用热导率较高的金属材料。为了节省生产成本和减轻产品的重量,需要减少所用金属材料的用量,这也是进行 LED 封装的重要目标之一。表 2 为基板通过开缝所减少的总质量百分比。

表 2 不同间距所减少质量百分比

Table 2 Percentage of weight reduction with the different pitches

Parameter	Value				
Pitch /mm	1	2	3	4	4.7
Percentage of weight reduction	3.3	6.6	10	13.3	15.7

通过在一定散热量的条件下,减小体积(质量),或者在一定体积(质量)条件下,提高散热能力可以达到热沉优化的目的^[18]。从图 4 和表 2 中可以清楚地看到:在两芯片之间的基板上取合适的开缝间距,不仅减小了基板重量,同时也提高了 LED 封装结构的散热能力。由于基板材料用量的减少,材料成本也将得到相应的节约。

4 结 论

运用牛顿冷却定律和 Icepak 仿真软件,模拟分析了在自然对流条件下开缝宽度对芯片结温、流场分布和换热特性的影响,对比分析了在不同输入功率条件下,开缝基板对散热性能的影响。研究发现对基板开缝可以改变热沉周围的流场流动特性、减薄温度较高区域的热边界层厚度、提高整体表面换热系数,从而提高散热性能,降低结温和热阻。由于传导和对流双重作用对散热的影响,存在一个最佳的缝间距,当芯片间距为 6 mm、输入功率为 1 W 时,其最佳缝间距为 4 mm,与无缝基板相比,其结温和热阻的降幅分别为 3.2 K 和 1.01 K/W。单颗 LED 芯片输入功率越大,开缝基板的散热效果越明显。同时,开缝基板也减少了封装材料的重量,降低了材料成本。

参 考 文 献

- 1 C C Sun, I Moreno, S H Chung, *et al.*. Brightness management in a direct LED backlight for LCD TVs [C]. J Soc Inf Disp, 2008, 16(4): 519-526.
- 2 L Yan, N Cordero, F Barthel, *et al.*. Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications [C]. App Therm Eng, 2009, 29(5-6): 1239-1244.
- 3 Xiao Si, Li Lin. A designing of LED stage lighting for long distance [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100307.
肖 思, 李 林. 大功率LED舞台灯的照明设计[J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100307.
- 4 L Zhang, X Guo, T Liang, *et al.*. Color rendering and luminous efficacy of trichromatic and tetrachromatic LED-based white LEDs [J]. Microelectron J, 2007, 38(1): 1-6.
- 5 L Kim, W J Hwang, M W Shin. Thermal resistance analysis of high power LEDs with multi-chip package [C]. IEEE 56th ECTC, 2006; 1076-1081.
- 6 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上芯片封装的LED热分析[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0823005.
- 7 Kuang Hai, Liu Junlin, Cheng Haiying, *et al.*. Effect of transferred submount materials on properties of GaN-based LED chips grown on Si substrate [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 143-145.
邝 海, 刘军林, 程海英, 等. 转移基板材质对Si衬底GaN基LED芯片性能的影响[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 143-145.
- 8 N Narendran, Y Gu, J P Freyssonier, *et al.*. Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs [J]. J Cryst Growth, 2004, 268(3-4): 449-456.
- 9 L Q Yin, L Q Yang, W Q Yang, *et al.*. Thermal design and analysis of multi-chip LED module with ceramic substrate [J]. Solid-State Electron, 2010, 54(12): 1520-1524.
- 10 P Hartmann, F P Wenzl, C Sommer, *et al.*. White LEDs and modules in chip-on-board technology for general lighting [C]. SPIE, 2006, 6337: 3370.
- 11 P Kailin, H Peng, G Yu, *et al.*. A novel packaging structure for high power LED based on chip on heat-sink method [C]. IEEE 2013 ICITA, 2013: 436-440.
- 12 K E Starner, H N McManus. An experimental investigation of free-convection heat transfer from rectangular-fin arrays [J]. J Heat Transfer, 1963, 85(3): 273-277.
- 13 Wang Le, Wu Ke, Yu Yibo, *et al.*. Study on LED array heat radiator improvement under natural convection [J]. J Optoelectronics•Laser, 2011, (3): 338-342.
王 乐, 吴 珂, 俞益波, 等. 自然对流条件下LED阵列散热器改进研究[J]. 光电子•激光, 2011, (3): 338-342.
- 14 Wang Le, Wu Ke, Yu Yibo, *et al.*. Study on LED array heat transfer under natural convection based on CFD [J]. J Optoelectronics•Laser, 2010, (12): 1758-1762.
王 乐, 吴 珂, 俞益波, 等. 基于CFD的LED阵列自然对流散热研究[J]. 光电子•激光, 2010, (12): 1758-1762.
- 15 Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006. 179-180.
陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006. 179-180.
- 16 Chen Jianlong, Wen Shangsheng, Yao Rihui, *et al.*. Thermal analysis of high-power LED without aluminum substrate [J]. Chi J Lumin, 2012, (12): 1362-1367.
陈建龙, 文尚胜, 姚日晖, 等. 去除铝基板的大功率LED热分析[J]. 发光学报, 2012, (12): 1362-1367.
- 17 L Ma, Y Yang, J Liu. Cooling of high power LEDs through ventilating ambient air to front surface of chip [J]. Heat Mass Transfer, 2013, 49(1): 85-94.
- 18 P Malekzadeh, H Rahideh, G Karami. Optimization of convective-radiative fins by using differential quadrature element method [J]. Energy Convers Manage, 2006, 47(11-12): 1505-1514.

栏目编辑: 韩 峰