

基于平板热管的大功率 LED 散热系统模拟及优化

叶祥平¹, 刘煜¹, 黄青松²

(1. 广东省惠州市质量计量监督检测所, 广东 惠州 516003; 2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 为解决大功率 LED 的散热问题, 设计了平板热管散热器来实现 LED 芯片的高效散热。通过 Flotherm 模拟软件, 对大功率 LED 在自然对流条件下的散热情况进行了三维数值模拟。通过平板热管与常规铜、铝散热基板对比, 发现平板热管有效降低了大功率 LED 的结温和热阻, 使得 LED 温度分布更为均匀。此外, 还研究了平板热管 LED 散热系统在不同芯片功率下的热性能, 并对四种不同排布方式的 LED 平板热管散热系统进行了优化, 发现阵列分布其温度分布最为均匀, 结温最低, 是较优的排布方式。

关键词: 大功率 LED; 散热; 平板热管; 模拟; 优化; 结温

doi: 10.14106/j.cnki.1001-2028.2017.10.007

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2028 (2017) 10-0041-05

Simulation and optimization of high-power LED with flat heat pipe heat spreader

YE Xiangping¹, LIU Yu¹, HUANG Qingsong²

(1. Guangdong Huizhou Quality & Measuring Supervision Testing Institute, Huizhou 516003, Guangdong Province, China; 2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China)

Abstract: Flat heat pipe heat spreader was designed for the heat dissipation of high-power LED. The thermal performance of high-power LED in natural convection conditions was simulated by the Flotherm simulation software. It is found that the flat heat pipe reduces the junction temperature and thermal resistance compared to the conventional copper and alumina heat spreader. The thermal performance of LED with flat heat pipe heat spreader under different heat power conditions was also explored. Furthermore, four types of arrangement of the LED chips were also designed and compared for the optimization. The results indicate that the uniform array configuration induces the best uniform temperature distribution and the lowest junction temperature, and seems to be the optimum choice for high-power LED.

Key words: high-power LED; heat dissipation; flat heat pipe; simulation; optimization; junction temperature

LED 具有节能、环保、寿命长、显色性好、响应速度快等优点, 已广泛应用在各种指示、显示、装饰、背光源和照明等领域。然而, 目前的 LED 由于光电转换效率偏低, 导致大量的能量转化为热能, 从而带来严重的散热难题^[1], 由温升导致的发光效率降低、可靠性下降、芯片寿命缩减等问题, 已成为制约 LED 发展的关键瓶颈之一^[2]。由于 LED 芯片产生的热量绝大部分通过热沉、散热翅片, 然后以热对流的方式耗散在空气中, 因此, 热沉的导热性

能对降低芯片结温、实现有效散热起到关键的作用。

传统大功率 LED 散热基板主要为金属基板^[3], 如铝、铜等, 其具有良好的机械强度和韧性、较低的成本。然而, 随着大功率 LED 的集成度提高, 由此带来的高热流密度已经超出了传统金属基板的散热极限^[4], 亟需采用高效散热器件来实现大功率 LED 的散热。国内外学者在 LED 高效散热技术方面进行了一些尝试。陈伟等^[5]提出用封闭微喷射流系统来进行 LED 散热, 通过液体的喷射带走芯片基板的

收稿日期: 2017-07-20 通讯作者: 黄青松

基金项目: 广东省惠州市产学研结合项目 (No. 2014B050013002)

作者简介: 叶祥平 (1963 -), 男, 广东惠州人, 高级电子工程师, 主要从事光电产品检测方法与研究, E-mail: 26725232@qq.com ;

黄青松 (1989 -), 男, 河南商丘人, 研究生, 主要从事 LED 高效散热器件制造及应用, E-mail: xmdxhqsjy@163.com。

网络出版时间: 2017-09-27 10:57

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1241.TN.20170927.1057.007.html>

热量,取得了显著的快速冷却效果。田大垒等^[6]用热电制冷器件来实现大功率 LED 的冷却降温,实验发现其显著地降低了 LED 的结温。Ye 等^[7]采用圆热管对 LED 基板进行散热,利用液体在密闭圆形腔体内的蒸发、冷凝相变,实现热量的快速传递,通过数值模拟分析了该热管散热系统的优异效果。然而,上述微喷射流系统、热电制冷系统均需要复杂的系统设计,如外接驱动泵等,显著增加了系统的成本;而圆热管由于其与 LED 基板的接触面积有限,在多个热源的情况则显得无能为力。

平板热管通过平板内壁吸液芯内的工质蒸发、冷凝相变实现热量的快速散失,从而实现大功率 LED 的快速冷却降温,是解决大功率 LED 散热难题的理想选择。目前,已有研究者^[8-9]采用平板热管作为大功率 LED 散热器,并通过实验对其散热性能进行了初步研究,对平板热管在大功率 LED 的应用进行了初步探索。然而,通过实验测试大功率 LED 的结温,面临难以实现、测试不准确等固有缺陷,采用数值模拟方法可以较好地克服这一困难。此外,通过文献检索发现,通过数值模拟方法对大功率 LED 平板热管散热性能及优化的研究十分缺乏。因此,本研究通过平板热管与传统铝、铜金属基板的对比,采用数值模拟分析了该散热系统的效果,并对不同排布方式的大功率 LED 平板热管散热系统进行了分析和优化,为基于平板热管的大功率 LED 的优化设计提供参考。

1 平板热管工作原理

平板热管的工作原理如图 1 所示。其由上下两块金属平板密封焊接拼接而成,液体工质在蒸发面受热后蒸发、吸收大量热量,在冷凝面冷凝、释放出大量热量,从而实现热量从蒸发面局部区域向整个冷凝面的高效传递。冷凝液体工质则沿壁面回流至蒸发面,实现相变传热过程的循环往复进行。由于其平板型结构可以与芯片直接贴合,大大减少了热源与散热器之间的接触热阻,可将局部的高热流

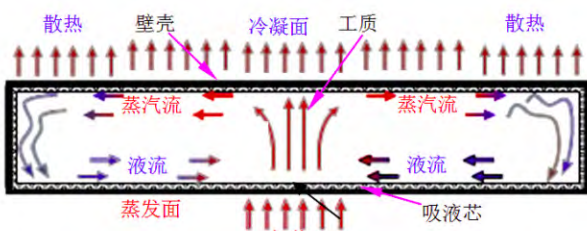


图 1 平板热管工作原理示意图

Fig.1 Schematic of the operation mechanism of flat heat pipe

密度以及多个热源的热量近乎等温传递到一个大的平面上,从而有效解决了芯片表面的局部热点、多热源等难题,特别适合于多芯片封装的 LED 器件。此外,平板热管还具有结构简单、体积小、易于与微型器件一体化封装等显著优点,从而为狭小空间内高热流密度光电子器件的散热难题提供了一种极佳的解决方案。

2 大功率 LED 封装模型

典型的大功率 LED 封装结构模型,其主要由玻璃透镜、LED 芯片、PCB 板、导热硅脂、散热基板、散热翅片等组成,LED 芯片的发热量主要通过底部 PCB 板、散热基板、散热翅片向外界自然对流散失。通过热辐射散失的热量所占比例仅为 1.6%,可忽略不计^[10]。在热仿真分析软件 Flotherm 中,根据上述典型的大功率 LED 封装结构建立起简化的三维模型,见图 2,模拟自然对流条件下 LED 封装结构的热性能。相关各封装结构的参数如表 1 所示。

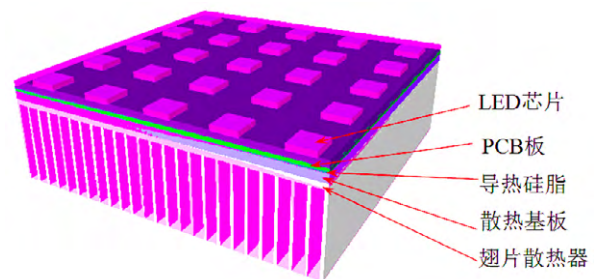


图 2 大功率 LED 封装模型(玻璃透镜位于芯片上方,未画出)

Fig.2 Package model of high-power LED

表 1 大功率 LED 模型各部分参数

Tab.1 Geometric parameters of the model of high-power LED

部件	材质	长/mm	宽/mm	高/mm	数量	热导率/ [W · (m · K) ⁻¹]
玻璃透镜	光学玻璃	120	120	2	1	1.05
芯片	GaN	10	10	1	25	130
PCB 板	FR-4	120	120	1.6	1	0.5
导热硅脂	硅脂	120	120	0.1	1	4
散热基板	铝	120	120	2	1	202
	铜					385
	平板热管					20 000
翅片散热器	铝	120	120	30	1	237

对计算模型做如下假设:(1)忽略热量通过荧光粉和透镜往上的散失;(2)不考虑封装过程各层之间的接触热阻;(3)LED 芯片阵列是正方体均匀热源;(4)周围环境温度设为 25 ;(5)器件在空

气接触面上的对流模式为空气自然对流，空气自然对流系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，压强为一个标准大气压 ($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$)。Flotherm 模拟时，将上述模型看成三维、稳态、常物性、有内热源的导热和对流热耦合问题进行求解^[11]。

3 散热分析与优化

3.1 三种散热基板对比

为对比三种不同散热基板的大功率 LED 散热情况，分别设置单个 LED 的发热功率为 1 W 和 3 W ，即总功率分别为 25 W 和 75 W ，按照图 2 所示模型均匀阵列排布。得到的 LED 最高结温及热阻如表 2 所示，其中热阻计算如下。

$$R=(T_j - T_a)/P \quad (1)$$

式中： T_j 为 LED 最高结温； T_a 为环境温度； P 为 LED 芯片功耗。

由表 2 可以看出，铝制基板其芯片结温最高，其次为铜制基板，热管散热基板的结温最低，这一趋势与散热基板的导热性能相吻合，利用平板热管极佳的导热性能，可在自然对流的情况下降低结温达 $0.3 \sim 0.8$ 。此外，热阻方面，采用平板热管的大功率 LED 总热阻明显低于铜、铝金属基板，利用相变传热原理的平板热管的散热效果优于常规铜、铝基板。

表 2 不同散热基板的大功率 LED 热性能

Tab.2 Thermal performance of high-power LED with different base plates

散热基板	功率/W	最高结温/	热阻/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)
铝	25	65.188	40.2
	75	109.84	28.3
铜	25	65.059	40.1
	75	109.51	28.2
平板热管	25	64.842	39.8
	75	109	28

三种散热基板的大功率 LED 温度分布如图 3 所示，可以看到，铜、铝散热基板的 LED 阵列温度分布呈现明显的不均匀，中心区域温度高于边缘；而平板热管由于其优异的均温效果，可实现良好的温度展平与热拓展作用，显著提高了 LED 温度分布的均匀性，有效避免了局部“热点”，从而避免大功率 LED 因局部高热流密度导致的热失效。由上面可以看到，平板热管良好的散热性能，能够很好满足大功率 LED 的散热需求，有望取代传统铜、铝等金属散热基板。

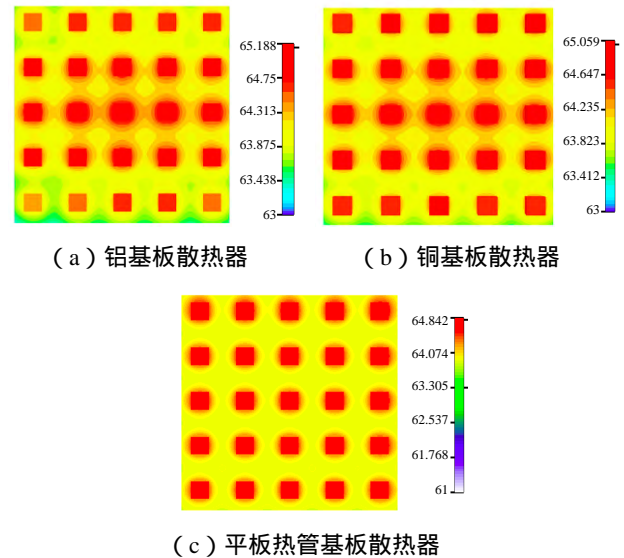


图 3 25W LED 散热器不同材料基板温度分布图
Fig.3 Temperature distribution of 25W LED with different base plates

3.2 平板热管散热器不同功率热性能

为探究平板热管散热器在不同芯片功率下的热性能，采用图 2 所示的均匀阵列排布的大功率 LED 模型，分别设置单个芯片的功率为 $1, 1.5, 2, 2.5, 3 \text{ W}$ ，分别得到大功率 LED 阵列的总瓦数为 $25, 37.5, 50, 67.5, 75 \text{ W}$ 。通过模拟分析，得到 LED 平板热管散热系统的最高结温及热阻如图 4 所示。可以发现，随着 LED 功率的增大，大功率 LED 系统的结温呈持续增加趋势，而热阻呈现出单调递减的趋势，在高功率情况下热阻显著降低，即平板热管散热系统在高功率情况下表现出更佳的散热性能。此时大功率 LED 系统的温度升高，与空气的自然对流换热增强，从而降低了系统的总热阻。图 5 列举了 LED 平板热管散热系统在芯片总功率分别为 25 W 和 75 W 的温度分布情况，随功率的增大，LED 芯片呈现出类似的分布情况，但温度显著升高，对其散热设计提出了更高的要求。

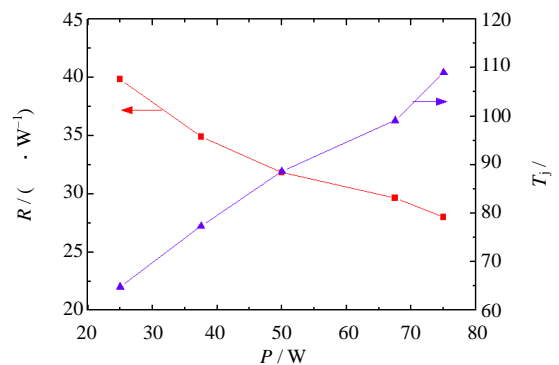


图 4 不同 LED 功率下平板热管散热性能
Fig.4 Thermal performance of flat heat pipe with LED at different input power

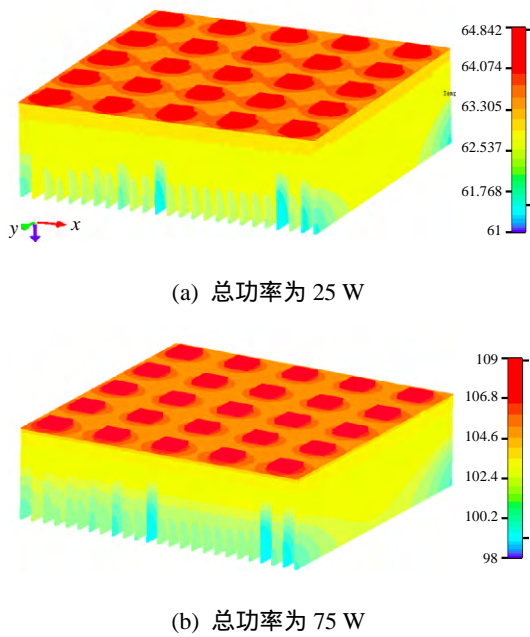


图 5 不同功率下 LED 平板热管散热系统温度分布
Fig.5 Temperature distribution of flat heat pipe based LED at different input power

3.3 LED 平板热管散热系统优化

采用平板热管散热系统，固定 LED 芯片总功率为 25 W，探究不同的 LED 芯片热源排布方式对大功率 LED 散热性能的影响，在 Flotherm 软件中建立起热源阵列分布、斜式分布、放射式分布、集中分布四个模型（图 6）。通过对比其温度分布及结温情况，

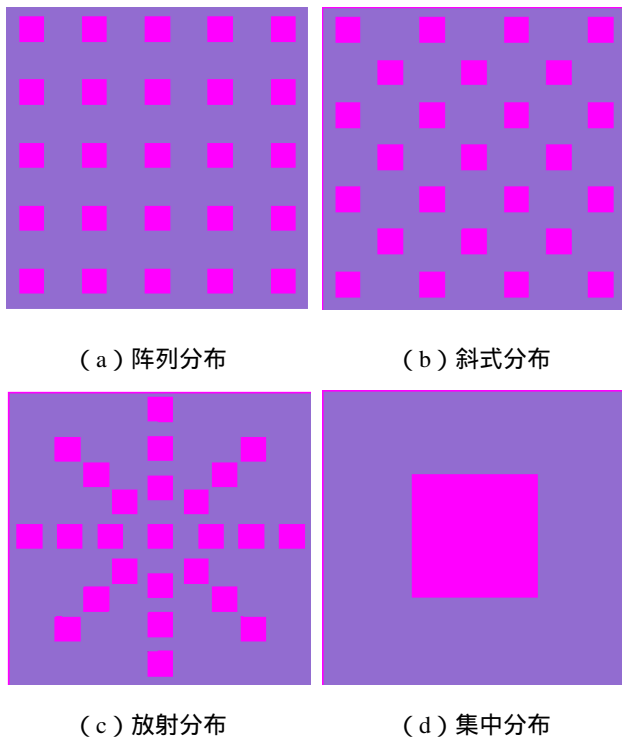


图 6 不同 LED 芯片热源排布模型
Fig.6 LED models with different arrangement of chips

对 LED 的排布方式进行优化。得到的四种排布方式下的芯片温度分布如图 7 所示。可以看出，阵列分布的 LED 芯片温度分布最为均匀，其次为斜式分布，其相邻 LED 芯片的几乎不产生相互的热影响；而放射分布的 LED 芯片存在严重的温度分布不均匀，其在中心区域温度最高，边缘则温度较低。集中分布的 LED 热源集中在中间区域，其扩散到大面积的散热基板十分困难。四种排布方式的 LED 最高结温如图 8 所示，其高低顺序依次为：集中分布>放射分布>斜式分布>阵列分布。由此可以看出，在芯片总瓦数相同的情况下，阵列式分布使芯片产生的结温最小、温度分布较均匀，从而减小了大功率 LED 系统因为热应力分布均匀、结点温升导致的热失效，使 LED 照明设备的使用寿命增长，是较优的排布方式。

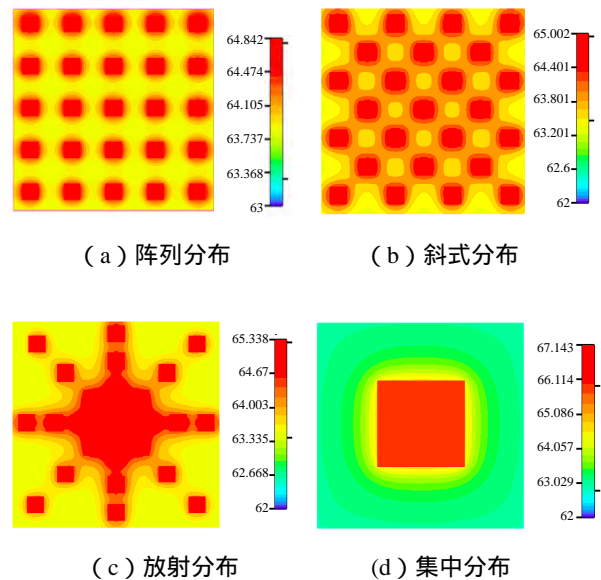


图 7 不同 LED 芯片热源排布温度分布情况
Fig.7 Temperature distribution of LED with different arrangement of chips

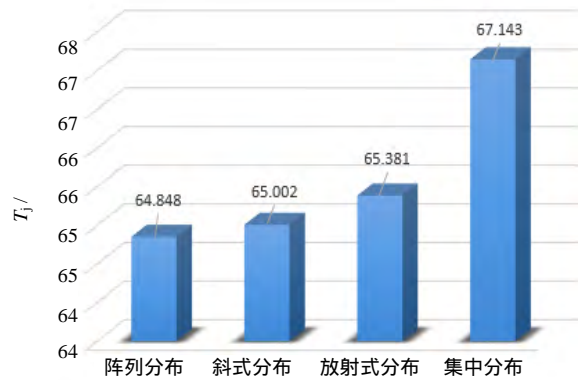


图 8 不同 LED 排布最高结温比较
Fig.8 Maximum junction temperatures of LED with different arrangement of chips

4 结论

通过数值模拟分析,针对大功率 LED 模组的结构特点,建立了包含玻璃透镜、LED 芯片、PCB 板、导热硅脂、散热基板、散热翅片的三维模型,模拟大功率 LED 系统在自然对流条件下的散热情况。通过平板热管与常规铜、铝散热基板对比,证实了平板热管应用于大功率 LED 散热的优异效果,其在自然对流、芯片总功率为 25~75 W 的情况下可降低结温达 0.3~0.8℃,使得 LED 温度分布更为均匀,能够很好满足大功率 LED 的散热需求。LED 平板热管散热系统随着芯片功率升高,结温升高,而总体热阻降低。此外,针对四种不同排布方式的 LED 平板热管散热系统进行了对比分析,发现阵列分布其温度分布最为均匀,结温最低,是较优的排布方式,在实际大功率 LED 封装应用时可选择均匀阵列排布进行热设计。

参考文献：

- [1] LUO X, HU R, LIU S, et al. Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications [J]. Prog Energy Combust Sci, 2016, 56: 1-32.
- [2] 韩娜, 崔国民, 刘国辉, 等. 基于有限元法 LED 散热强化研究 [J]. 电子元件与材料, 2016, 35(12): 44-47.
- [3] 闫泉喜, 张淑芳, 龙兴明, 等. 大功率 LED 散热用微通道铝基板的有限元仿真 [J]. 半导体光电, 2015, 36(3): 417-421.
- [4] LU X Y, HUA T C, WANG Y P. Thermal analysis of high power LED package with heat pipe heat sink [J]. Microelectron J, 2011, 42: 1257-1262.
- [5] 陈伟, 罗小兵, 程婷, 等. 大功率 LED 用微喷射流冷却系统的实验研究 [J]. 半导体光电, 2007, 28(4): 478-481, 486.
- [6] 田大垒, 关荣锋, 王杏, 等. 基于热电制冷的大功率 LED 散热性能分析 [J]. 电子与封装, 2009, 9(1): 35-37.
- [7] YE H, LI B, TANG H, et al. Design of vertical fin arrays with heat pipes used for high-power light-emitting diodes [J]. Microelectron Reliab, 2014, 54: 2448-2455.
- [8] 王宏燕, 邓月起, 郝丽敏, 等. 平板微热管阵列在 LED 散热装置中的应用 [J]. 半导体技术, 2012, 37(3): 240-244.
- [9] 汪双凤, 胡艳鑫, 陈金建. 应用于 LED 灯具散热的平板热管传热特性 [J]. 工程热物理学报, 2012, 33(8): 1371-1374.
- [10] 王长宏, 谢泽涛, 邹大枢. 大功率 LED 散热器的数值模拟与优化 [J]. 电子元件与材料, 2015, 34(6): 44-47.
- [11] TSAO J Y. Light emitting diodes (LEDs) for general illumination: an OIDA technology roadmap update 2002 [R]. Washington, USA: Optoelectronics Industry Development Association, 2002.
- [12] 陈国华, 徐华蕊, 江民红, 等. CaO 和 SiO₂ 质量分数比值对钙长石基微晶玻璃性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2010, 31(5): 30-35.
- [13] 陈国华, 唐林江, 职利, 等. 玻璃组成对 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系玻璃烧结、晶化和性能的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 1270-1275.
- [14] QING Z, LI B, LI H, et al. Influence of Al₂O₃/SiO₂ ratio on the microstructure and properties of low temperature co-fired CaO-Al₂O₃-SiO₂ based ceramics [J]. J Mater Sci Mater Electron, 2014, 25(10): 4206-4211.
- [15] 何峰, 邓志国. CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系统玻璃颗粒的烧结过程研究 [J]. 硅酸盐通报, 2003(1): 26-29.
- [16] 陈禾, 梁开明. CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系烧结微晶玻璃的结晶过程 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(10): 15-17.
- [17] TIAN Y L, ZHANG J, SUN S B, et al. The influence of Bi₂O₃ on SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃-RO glass properties arts [J]. Adv Mater Res, 2014, 22: 886-889.
- [18] KAUR R, SINGH S, PANDEY O P. A comparison of modifications induced by Li³⁺ and Ag¹⁴⁺ ion beam in spectroscopic properties of bismuth alumino-borosilicate glass thin films [J]. J Spectrosc, 2013(1): 49-57.
- [19] CHEN S W, WANG C H, LIN S K, et al. Phase diagrams of Pb-free solders and their related materials systems [J]. J Mater Sci Mater Electron, 2007, 38(24): 19-37.

(编辑：陈渝生)

(编辑：陈渝生)