

金属基板结构对 LED 散热性能的影响

秦典成, 梁可为, 陈爱兵, 肖永龙

(乐健科技(珠海)有限公司 广东省 LED 封装散热基板工程技术研究中心, 广东 珠海 519180)

摘要: 为满足天使眼汽车照明用 LED 灯的散热需求, 设计了 4 种散热管理方案, 同时利用结温测试仪与热电偶分别对上述 4 种方案的 LED 灯珠结温及金属基板 (MCPCB) 底部温度进行了测试, 并对 4 种方案的散热效果展开了对比研究。结果表明, 表面贴装技术 (SMT) 焊接方案较铆接方案具备一定的散热优势, 而热电分离式金属基板的焊接方案较普通金属基板的焊接方案散热优势明显, 能大幅度降低 LED 结温, 有望赋予天使眼 LED 灯更加优异的综合性能; 当环境温度分别为 (25 ± 1) 及 (90 ± 3) $^{\circ}\text{C}$ 时, 4 种方案的散热效果为: 0.4 mm 热电分离式金属基板的焊接方案 > 0.3 mm 厚普通金属基板的焊接方案 > 1.0 mm 厚普通金属基板的铆接方案 > 0.3 mm 厚普通金属基板的铆接方案; 当环境温度为 (25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 时, 4 种散热方案下的 LED 结温均在最高允许温度 135 $^{\circ}\text{C}$ 以内。而当环境温度为 (90 ± 3) $^{\circ}\text{C}$ 时, 只有使用热电分离式金属基板焊接方案的天使眼的 LED 结温低于最高允许温度, 为 117.92 $^{\circ}\text{C}$, 其它 3 种方案的天使眼 LED 结温均超过最高允许温度。

关键词: 天使眼; LED; 散热; 金属基板; 热电分离; 结温

中图分类号: TN305.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2019)07-0717-05

Influence of MCPCB's Structure on Heat Dissipation Performance of LED Lamp

QIN Diancheng, LIANG Kewei, CHEN Aibing, XIAO Yonglong

(Guangdong LED Package-Used Heat Dissipation Substrate Engineering Technology Research Center, Rayben Technologies (Zhuhai) Limited, Zhuhai 519180, China)

Abstract: Four types of solutions were proposed to meet the heat dissipation requirement of angel eye automobile headlight, with junction temperature tester and thermocouple employed to measure the LEDs' junction temperature and the bottom side temperature of LED mounted metal core printed circuit board (MCPCB) for the comparative study of their heat dissipation performances. It was found that surface mounting technology (SMT) welding solution presented a better heat dissipation performance than riveting solution did, and thermoelectric separation MCPCB beat regular MCPCB to dissipate heat generated by LEDs using SMT technology. When the ambient temperatures were (25 ± 1) and (90 ± 3) $^{\circ}\text{C}$ respectively, the heat dissipation effects of the four schemes are as follows: LED mounted on 0.4 mm thermoelectric separation MCPCB using SMT method $>$ LED mounted on 0.3 mm regular MCPCB using SMT method $>$ LED mounted on 1.0 mm regular MCPCB using riveting method $>$ LED mounted on 0.3 mm regular MCPCB using riveting method. When the ambient temperature was (25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$, the above four types of heat dissipation solutions resulted in junction temperatures within the limit temperature of 135 $^{\circ}\text{C}$. But when the ambient temperature was (90 ± 3) $^{\circ}\text{C}$, only LED mounted on 0.4 mm thermoelectric separation MCPCB using SMT method produced the junction temperature below the limit temperature of 135 $^{\circ}\text{C}$.

Key words: angel eye; LED; heat dissipation; MCPCB; thermoelectric separation; junction temperature

1 前言

目前, 随着世界范围内绿色环保的生态理念日益深

入人心, 发光二极管 (LED) 以其绿色环保、能耗低、响应快、性能稳定、寿命长等优点而受到各国政府的高度重视, 成为照明光源的理想选择^[1, 2], 并在汽车灯照明与装饰领域广为应用^[3, 4]。

天使眼是装配在汽车灯外的光圈, 主要用作汽车的示宽灯, 同时也起到美化和装饰车灯的作用。因其外形类似天使头顶的光环, 天使眼便因此而得名。最近, LED 式发光的天使眼映入了人们的眼帘。常见的天使眼使用单个 LED 灯珠发光, 并利用导光圈导光, 其结构如

收稿日期: 2018-02-23 修回日期: 2018-05-22

基金项目: 广东省 LED 封装散热基板工程技术研究中心协同创新与平台环境建设专项项目 (509141674069)

第一作者: 秦典成, 男, 1985 年生, 工程师, Email: qindiancheng@qq.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201802005

图 1 所示, 由 LED 模组(灯珠+散热基板)、导光圈和散热器组成。因 LED 对温度较为敏感, 当其结温过高时, LED 会发生波长红移、寿命变短、可靠性变差、光效降低等不良后果^[5-7]。因此, 如何解决好 LED 的散热问题也就成了开发 LED 光源过程中不容忽视的问题。

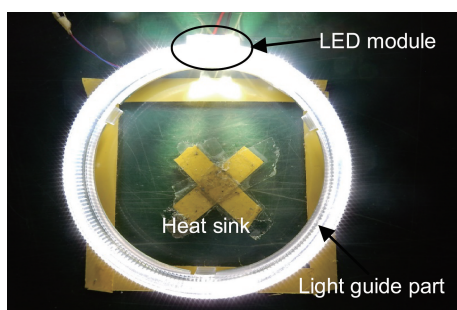


图 1 天使眼结构示意图

Fig. 1 Structural schematics of angel eye automobile headlight

研究表明^[8, 9], 通过科学地设计灯具结构、合理地选择导热连接材料及配备外部热沉等方式可较好地解决 LED 车灯的散热问题。而散热基板作为车灯重要的散热通道, 对全面提升 LED 的综合性能发挥着不可忽视的作用。目前, 市面上使用较为普遍的散热基板有普通金属基板和陶瓷基板两种。其中普通金属基板因结构简单、制造方便、成本低廉、导热率较高等特点而一度成为散热基板的首选材料^[10, 11]。但金属基板因绝缘层导热率偏低而成为限制金属基板整体导热率提升的技术瓶颈, 无法满足较大功率 LED 车灯的散热需求^[12, 13]。陶瓷基板虽然导热率较高, 但因其对设备的要求较高、环境污染较大, 且表面金属化技术难度及成本较高而使其应用受限^[6, 14]。鉴于此, 本文从实际应用出发, 针对天使眼 LED 灯具的散热需求提出了 4 种散热管理方案, 并对其中的热电分离式散热管理方案着重进行了研究与阐述, 以期在解决好大功率 LED 散热问题的同时, 为其实际照明工程应用提供技术参考。

2 天使眼散热方案设计

金属基板(metal core printed circuit board, MCPCB)是当前使用最为广泛的散热基板, 主要由金属基座、导热绝缘层、线路层组成, 其结构如图 2a 所示^[12]。热电分离式金属基板也属于 MCPCB, 但与普通 MCPCB 不同的是, 它采用蚀刻或其它工艺方法在金属基座上形成散热凸台, 并使其直接贯穿事先加工有镂空位的 FR4 材料(由铜箔、绝缘层和玻璃纤维布等增强材料组成), 以此作为 LED 的安放点, 从而达到高效散热的目的, 结构如图 2b 所示。其中, FR4 材料的绝缘层由半固化片和玻璃

纤维布等增强材料组成, 而线路层则是在图形转移的基础之上, 利用化学试剂蚀刻 FR4 材料的铜箔所获得。因 FR4 材料较普通 MCPCB 的线路层及绝缘层更为廉价, 热电分离式基板又是通过较为成熟的压合工艺将带有凸台的铜基座和 FR4 材料复合, 所以理论上而言, 热电分离式 MCPCB 不仅导热率大大高于普通 MCPCB, 且还具备制造简单、成本低廉等陶瓷基板无法比拟的优势。

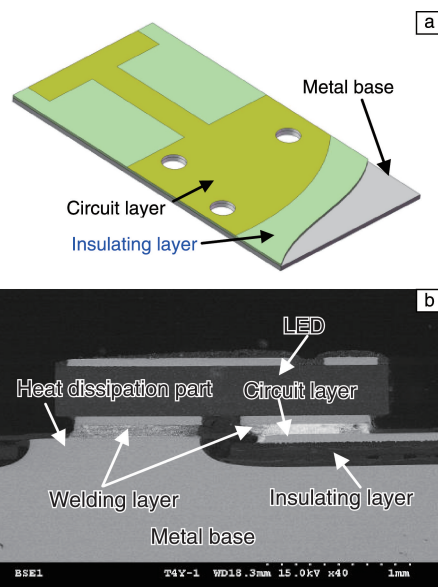


图 2 不同 MCPCB 结构示意图: (a) 普通, (b) 热电分离式

Fig. 2 Structural schematics of different MCPCB: (a) regular MCPCB; (b) thermoelectric separation MCPCB

天使眼的 4 种散热方案见图 3, 其中图 3a 是 0.4 mm 厚热电分离式 MCPCB 的焊接方案, 记为 A; 图 3b 是 0.3 mm 厚普通 MCPCB 焊接方案, 记为 B; 图 3c 是 1.0 mm 厚普通 MCPCB 铆接方案, 记为 C; 图 3d 是 0.3 mm 普通 MCPCB 铆接方案, 记为 D。上述 4 种方案中, LED 灯珠型号为 Luxeon C、功率为 3 W、驱动电压为 12 V。各基板线路层厚度均为 35 μm 。普通 MCPCB 导热绝缘层为同一种材料, 导热系数为 4 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 厚度为 50 μm 。热电分离式 MCPCB 绝缘层导热系数为 0.22 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 厚度为 50 μm 。

3 实验

3.1 实验原料及仪器设备

原材料: 0.4 mm 厚热电分离式 MCPCB、0.3 mm 厚普通 MCPCB、1.0 mm 厚普通 MCPCB、LED(型号为 LUMILEDS LUXEON C, 基本参数如表 1 所示)、锡膏、铆钉。

仪器设备: 力兹 LEDT-300B 结温测试仪、Omega T 型热电偶、小型 SMT 焊接机、铆合机。

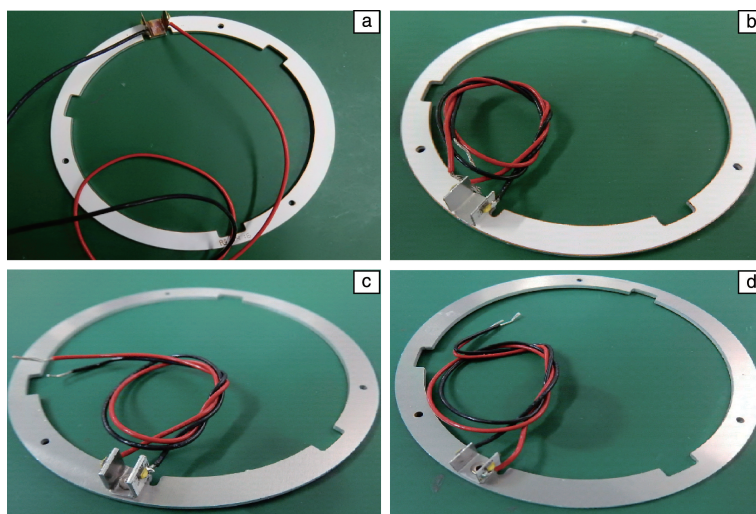


图 3 天使眼散热方案：(a)0.4 mm 厚热电分离式 MCPCB 焊接方案，(b)0.3 mm 厚普通 MCPCB 焊接方案，(c)1.0 mm 厚普通 MCPCB 铆接方案，(d)0.3 mm 厚普通 MCPCB 铆接方案

Fig. 3 Heat dissipation solutions for angel eye automobile headlight: (a)0.4 mm thermoelectric separation SMT welded MCPCB solution, (b)0.3 mm regular SMT welded MCPCB solution, (c)1.0 mm regular riveted MCPCB solution, (d)0.3 mm regular riveted MCPCB solution

表 1 结温为 85 °C 时 LUXEON C 白光 LED 的基本参数及典型值

Table 1 LUXEON C white LED's basic parameters and its typical values at 85 °C

Parameters	Power/W	Forward voltage/V	CRI (color rendering index)	Forward current/mA	Flux/lm	Wavelength/nm
Values	3	3	70~90	350	93~116	480~634

3.2 实验过程

利用小型 SMT 焊接机及锡膏分别将 0.4 mm 厚热电分离式 MCPCB 和 0.3 mm 厚普通 MCPCB 与 LED 组装成 LED 模组，并记为 A 和 B。利用铆合机及铆钉分别将 1.0 和 0.3 mm 厚普通 MCPCB 与 LED 组装成 LED 模组，并分记为 C 和 D。参照 EIA/JESD51-1 及 GBT 24824-2009 标准，分

别设置环境温度为 (25 ± 1) 及 (90 ± 3) °C、湿度为 35% ~ 65%、恒流为 0.5 A，利用电压法借助结温测试仪对 LED 结温(T_j)进行测试。同时，利用结温测试仪自带的精度为 0.75% 的 Omega T 型热电偶测量 MCPCB 底部温度(T_b)，如图 4 所示。最后利用 $T_j - T_b$ 评估各方案散热性能的优劣。

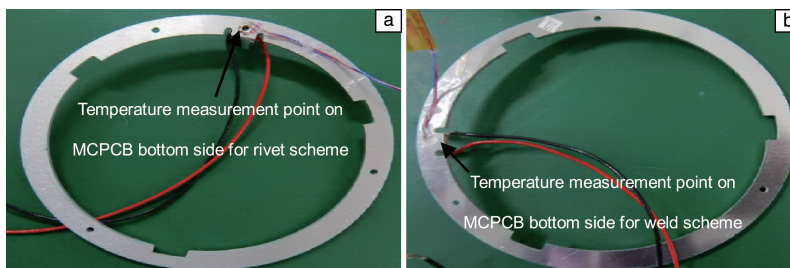


图 4 天使眼 LED 灯 MCPCB 底部温度测试：MCPCB 铆接方案(a)和 MCPCB 焊接方案(b)测温点

Fig. 4 Bottom side temperature test of MCPCB applied in angel eye automobile headlight: temperature measurement point of rivet-bonding MCPCB (a) and weld-bonding MCPCB (b)

4 结果与讨论

图 5a 和图 5b 分别是当环境温度分别为 (25 ± 1) 及

(90 ± 3) °C 时，4 种散热方案下 LED 结温(T_j)及对应 MCPCB 底部温度(T_b)曲线。表 2 和表 3 分别为 4 种散热方案下，对应的 LED 结温及 MCPCB 底部温度信息。

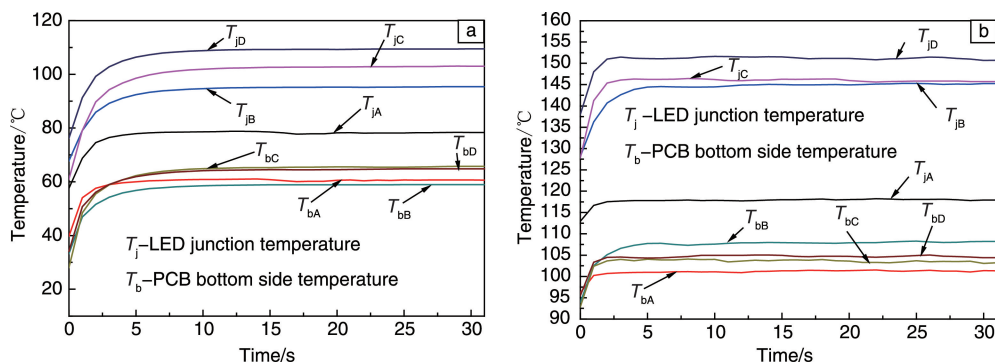


图 5 不同环境温度下 4 种散热方案的天使眼 LED 结温及对应的 MCPCB 底部温度: (a) $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$, (b) $(90 \pm 3) ^\circ\text{C}$

Fig. 5 Angel eye LEDs' junction temperature and corresponding bottom side temperature of MCPCB under different ambient temperatures employing four types of heat dissipation solution: (a) $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$, (b) $(90 \pm 3) ^\circ\text{C}$

表 2 环境温度为 $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$ 时 4 种散热方案下的 LED 结温及对应的 MCPCB 底部温度

Table 2 LEDs' junction temperature and corresponding bottom side temperature of MCPCB when ambient temperature is $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$

Temperature/ $^\circ\text{C}$	A	B	C	D
T_j	78.35	95.41	103.03	109.49
T_b	60.64	58.95	65.75	64.79
$T_j - T_b$	17.71	36.46	37.28	44.7

表 3 环境温度为 $(90 \pm 3) ^\circ\text{C}$ 时 4 种散热方案下的 LED 结温及对应的 MCPCB 底部温度

Table 3 LEDs' junction temperature and corresponding bottom side temperature of MCPCB when ambient temperature is $(90 \pm 3) ^\circ\text{C}$

Temperature/ $^\circ\text{C}$	A	B	C	D
T_j	117.92	145.25	145.71	150.7
T_b	101.31	108.21	103.21	104.41
$T_j - T_b$	16.61	37.04	42.5	46.29

从表 2 和表 3 可知, 当环境温度为 $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$ 时, A-0.4 mm 厚热电分离式 MCPCB 焊接方案、B-0.3 mm 厚普通 MCPCB 焊接方案、C-1.0 mm 厚普通 MCPCB 铆接方案和 D-0.3 mm 厚普通 MCPCB 铆接方案所对应的 $T_j - T_b$ 分别为 17.71, 36.46, 37.28 及 44.7 $^\circ\text{C}$, 对应的 LED 结温分别是 78.35, 95.41, 103.03 及 109.49 $^\circ\text{C}$, 均在最高允许温度 135 $^\circ\text{C}$ 以内; 当环境温度为 $(90 \pm 3) ^\circ\text{C}$ 时, 上述 4 种散热方案所对应的 $T_j - T_b$ 分别为 16.61, 37.04, 42.5 及 46.29 $^\circ\text{C}$, 对应的 LED 结温分别是 117.92, 145.2, 145.71 及 150.7 $^\circ\text{C}$, 除热电分离式 MCPCB 焊接方案, 其余 3 种方案的 LED 灯珠结温均已超出最高允许温度 135 $^\circ\text{C}$ 。一般来说, $T_j - T_b$ 越小, 说明从 PN 结到基板底

部的温度梯度越小, 热量分布更为均匀。而结温越低, 说明基板散热速度越快。上述两种现象都是散热基板导热性能优异的表现。综上, 在同等条件下, 焊接方案的散热效果明显好于铆接方案, 而热电分离式 MCPCB 能赋予天使眼 LED 更好的散热效果。

一般地, 焊接方案因使用锡膏将 LED 模组焊接在散热器上, 锡膏的存在填补了界面间隙, 极大地降低了界面热阻。而铆接方案直接利用铆钉将 LED 模组铆合在散热器上, 界面上存在着大量的空气, 使得界面热阻较焊接方案要大得多, 热量传播较为缓慢, 热量在 LED 的 PN 结附近聚集, 导致 LED 结温升高, 进而对 LED 的综合性能造成不良影响。而在使用普通 MCPCB 焊接方案时, 因普通 MCPCB 的导热绝缘层导热率较线路层及金属基座低得多, 热量由 LED 灯珠经焊接层传导至线路层, 再由线路层经绝缘层传导至金属基座, 最后由金属基座传导至其它散热通道。在此过程中, 绝缘层便成为了散热的瓶颈, 使得 LED 的整体散热效果不良, 最终导致 LED 的结温偏高。

与普通 MCPCB 相比, 热电分离式 MCPCB 的散热凸台直接贯穿绝缘层和线路层成为 LED 灯珠的安放点。在合金内部, 热传导主要由声子的扩散和电子的运动来实现, 而在聚合物所构成的绝缘层内部, 热传导则主要由声子的扩散来完成^[15, 16]。因此, 当 LED 工作时所产生的热量传导至散热凸台时, 因凸台内部的电子无法穿越凸台-绝缘层界面, 而声子在穿越此界面的时候会因界面缺陷和杂质而发生散射, 大量声子无法穿越界面, 从而在凸台-绝缘层界面处产生一个较大的界面热阻^[17, 18]。因界面热阻的存在, 仅有小部分热量会沿着基板水平方向传导, 而剩余的大部分热量会直接沿着凸台(基板)厚度方向传导。因凸台由金属制成, 为声子和电子的扩散提供了高效的传播途径, LED 工作时所产生的热量便可快速地向下级散热通道扩散, 从而有效地缓解了 LED 的

PN 结处的热量聚集, 大大降低了 LED 的结温, 获得了良好的散热效果。

5 结 论

本文针对普通 MCPCB 导热率较低, 而陶瓷基板虽导热率较大, 但同时因成本高、技术难度大等缺点而无法满足大功率 LED 车灯散热需求的现状, 借鉴热电分离式理念开发出一种新型的高导热 MCPCB, 并在此基础上设计了包含热电分离式 MCPCB 焊接散热方案、普通 MCPCB 焊接散热方案及普通 MCPCB 铆接散热方案在内的 4 种散热管理方案。通过研究发现, 普通 MCPCB 的焊接方案较之铆接方案有着一定的散热优势, 可实现 LED 结温的小幅度下降。而热电分离式 MCPCB 焊接散热方案因使用散热凸台作为散热的主体部分直接参与热传导, 对比普通 MCPCB 的焊接方案具有巨大的优势, 能大幅降低 LED 的结温, 并有望赋予天使眼 LED 灯具更加优异的综合性能, 是未来功率型 LED 散热基板材料的理想选择之一。

参考文献 References

- [1] 刘顺瑞, 王丽, 张明磊, 等. 发光学报[J], 2017, 38(12): 1668-1674.
LIU S R, WANG L, ZHANG M L, *et al.* Chinese Journal of Luminescence[J], 2017, 38(12): 1668-1674.
- [2] 秦典成, 李保忠, 黄奕钊, 等. 半导体技术[J], 2017, 42(11): 864-869.
QIN D C, LI B Z, HUANG Y Z, *et al.* Semiconductor Technology [J], 2017, 42(11): 864-869.
- [3] 方达, 张智强, 吴震轩, 等. 发光学报[J], 2017, 38(02): 201-206.
FANG D, ZHANG Z Q, WU Z X, *et al.* Chinese Journal of Luminescence [J], 2017, 38(02): 201-206.
- [4] 黄婷, 郭震宁, 林介本, 等. 照明工程学报[J], 2017, 28(04): 89-95.
HUANG T, GUO Z N, LIN J B, *et al.* China Illuminating Engineering Journal [J], 2017, 28(04): 89-95.
- [5] 郑莉莉, 郭自泉, 严威, 等. 发光学报[J], 2016, 37(11): 1384-1389.
ZHENG L L, GUO Z Q, YAN W, *et al.* Chinese Journal of Luminescence [J], 2016, 37(11): 1384-1389.
- [6] 秦典成, 李保忠, 肖永龙. 中国陶瓷工业[J], 2017, 24(05): 30-36.
QIN D C, LI B Z, XIAO Y L. China Ceramic Industry [J], 2017, 24(05): 30-36.
- [7] 孔富城, 张玉珍, 孙佳嵩, 等. 光学学报[J], 2016, 36(05): 89-95.
KONG F C, ZHANG Y Z, SUN J S, *et al.* Acta Optica Sinica [J], 2016, 36(05): 89-95.
- [8] 秦典成, 陈爱兵, 肖永龙, 等. 人工晶体学报[J]. 2018, 47(01): 225-230.
QIN D C, CHEN A B, XIAO Y L, *et al.* Journal of Synthetic Crystals [J], 2018, 47(01): 225-230.
- [9] 关焯锋, 黎永耀. 照明工程学报[J], 2017, 28(03): 75-79.
GUAN Y F, LI Y Y. China Illuminating Engineering Journal [J], 2017, 28(03): 75-79.
- [10] 方亮, 钟前刚, 何建, 等. 材料导报[J], 2011, 25(02): 130-134.
FANG L, ZHONG Q G, HE J, *et al.* Materials Review [J], 2011, 25(02): 130-134.
- [11] 张淑芳, 方亮, 钟前刚, 等. 半导体光电[J], 2014, 35(05): 832-837.
ZHANG S F, FANG L, ZHONG Q G, *et al.* Semiconductor Optoelectronics[J], 2014, 35(05): 832-837.
- [12] 马振辉, 黄金亮, 殷镖, 等. 工程塑料应用[J], 2011, 39(12): 50-53.
MA Z H, HUANG J L, YIN B, *et al.* Engineering Plastics Application[J], 2011, 39(12): 50-53.
- [13] 罗亮亮, 樊嘉杰, 经周, 等. 照明工程学报[J], 2018, 29(01): 1-6+33.
LUO L L, FAN J J, JING Z, *et al.* China Illuminating Engineering Journal[J], 2018, 29(01): 1-6+33.
- [14] 蔡雯君, 张哲娟, 孙卓. 半导体光电[J], 2017, 38(01): 36-39.
CAI W J, ZHANG Z J, SUN Z. Semiconductor Optoelectronics [J], 2017, 38(01): 36-39.
- [15] 李志刚, 张亚玲, 曹博, 等. 电子元件与材料[J], 2015, 34(09): 25-30.
LI Z G, ZHANG Y L, CAO B, *et al.* Electronic Components and Materials [J], 2015, 34(09): 25-30.
- [16] 石零, 米铁, 刘延湘. 低温与超导[J], 2006(03): 176-178.
SHI L, MI T, LIU Y X. Cryogenics and Superconductivity[J], 2006(03): 176-178.
- [17] 张春伟, 毕可东, 王建立, 等. 中国科学: 技术科学[J], 2012, 42(05): 597-602.
ZHANG C W, BI K D, WANG J L, *et al.* Scientia Sinica(Technologica) [J], 2012, 42(05): 597-602.
- [18] 秦典成, 陈爱兵, 肖永龙. 发光学报[J], 2019, 40(01): 97-105.
QIN D C, CHEN A B, XIAO Y L. Chinese Journal of Luminescence [J], 2019, 40(01): 97-105.