

# 高光效 LED 灯丝球泡灯的光学性能研究

龚三三, 秦会斌, 刘丹

(杭州电子科技大学 新型电子器件与应用研究所, 杭州 310018)

**摘要:** 基于板上芯片 (COB) 封装技术, 提出了一种 360° 出光的新型发光二极管 (LED) 灯丝球泡灯, 其封装基板采用透明基板。研究了不同封装材料及芯片对其 LED 光通量、光效和色温的影响。首先介绍了 LED 灯丝球泡灯的结构、优点, 然后分析了影响 LED 光学性能的因素, 最后进行相关性能测试。测得采用玻璃/蓝宝石基板封装的 LED 灯丝的光通量分别为 467.29 和 471.69 lm; 光效分别为 110.06 和 111.79 lm/W; 显色指数分别为 84.1 和 81.9。测试结果表明, 采用透明基板封装的 LED 灯丝球泡灯不仅能有效调节色温, 而且能显著提高 LED 的光通量、光效和显色指数。

**关键词:** 透明基板; LED 灯丝球泡灯; 光通量; 光效; 封装

**中图分类号:** TN305.94; TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2015) 02-0112-05

## Study on Optical Performance of High Luminous LED Filament Bulbs

Gong Sansan, Qin Huibin, Liu Dan

(Institute of New Electron Device & Application, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Based on the chip on board (COB) packaging technology, a novel 360° LED filament bulb was present and the transparent substrate is used for the LED filament package. The effect of different packaging materials on flux, luminous efficiency and color temperature were investigated in detail. First the structure and advantages of the LED filament bulb were introduced, then the factors which effect the optical performance were analyzed, finally the relevant experiments were conducted. The results of the filament bulb (packaging on glass/sapphire) show that the flux of the LEDs are 467.29 lm and 471.69 lm, and the luminous efficiency are 110.06 lm/W and 111.79 lm/W. The color rendering index are 84.1 and 81.9, respectively. The experiment results show that the LED filament bulb package based on transparent substrate technique can not only adjust the color temperature, but also increase the luminous flux, luminous efficacy and color rendering index.

**Key words:** transparent substrate; LED filament bulb; flux; luminous; package

**EEACC:** 4260D

## 0 引言

发光二极管是 21 世纪最具有发展前景的一种冷光源<sup>[1]</sup>。因其具有效率高、光色纯、寿命长、能耗低、绿色环保等优点而被广泛应用于各种照明领域。随着不少国家开始推行禁止使用白炽灯的计划<sup>[2]</sup>, 钨丝白炽灯行将消失, LED 灯丝灯逐步取

代钨丝白炽灯在人们心中的地位。民用照明灯泡多数是球形灯泡, 作为替代传统钨丝白炽灯的新型 LED 灯丝球泡灯不仅要具有相同的光通量<sup>[3]</sup>, 而且符合居民的照明使用习惯。但是目前球泡灯是采用表面贴封装方式的灯珠组合而成, 由于其成本较高而限制了 LED 球泡灯的普及。

本文提出了一种基于 COB 封装方式的 LED 灯丝球泡灯, 采用透明基板封装的 LED 灯丝, 相对于目前存在的 LED 灯丝而言, 其发光效率更高,

**E-mail:** gong\_san\_san@163.com

真正做到了  $4\pi$  出光; LED 灯丝球泡灯采用蓝光 LED 芯片和红光 LED 芯片激发蓝绿色荧光粉合成白光, 具有更高的显色指数; LED 灯丝球泡灯采用全新的  $360^\circ$  模组灌胶技术, LED 荧光胶模组成型, 其良品率高, 而且有效避免了 LED 蓝光泄露。

## 1 LED 灯丝球泡灯

### 1.1 LED 灯丝封装结构

LED 灯丝采用板上 COB 技术, 利用固晶设备直接将 LED 芯片粘贴在散热基板上, 再用金线键合, 将 LED 芯片的 pn 结依次顺序连接, 基板两端的 LED 芯片通过金线键合与电极引出线连接, 之后再行点胶、烘烤<sup>[4]</sup>。LED 灯丝的封装采用的透明基板材料蓝宝石基板和玻璃基板<sup>[5]</sup>, 由于蓝宝石基板和玻璃基板本身就是绝缘体因此可以直接在基板上进行封装。采用正装芯片封装而成的 LED 灯丝结构示意图如图 1 所示。

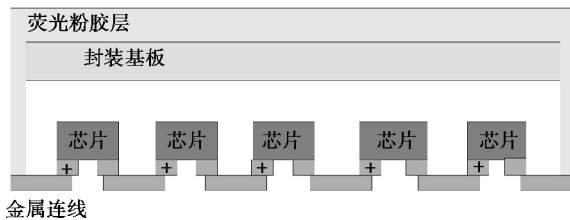


图 1 正装芯片封装的 LED 灯丝结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the LED filament package with the chip

### 1.2 LED 灯丝倒装封装结构

图 2 是 LED 灯丝采用倒装芯片的封装结构示意图。LED 灯丝倒装封装结构先在封装基板上采用丝网印刷技术制作电极结构, 再用银胶将倒装 LED 芯片放置在散热基板上, 最后进行点胶、烘烤。相比于采用正装 LED 芯片减少了焊线这一步, 操作更简单。

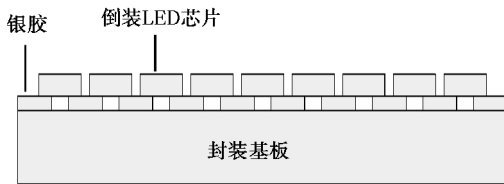


图 2 倒装芯片封装的 LED 灯丝结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the LED filament package with the flip chip

图 3 为 LED 灯丝封装中单颗芯片放大结构示意图。LED 灯丝封装结构从上至下依此为 LED 芯片、固晶胶、基板 (包括蓝宝石和玻璃基板)。



图 3 LED 灯丝封装的剖面示意图

Fig. 3 Cross section of the LED filament package

### 1.3 LED 热阻分析

LED 作为一种半导体器件, 主要以热阻  $R$  表征其本身的热学特征

$$R = \frac{T_j - T_x}{P_H}$$

式中:  $R$  是指待测器件 pn 结到指定环境之间的热阻, 单位为  $^\circ\text{C}/\text{W}$ ;  $T_j$  是测试条件稳定时的待测结温;  $P_H$  是待测器件的耗散功率;  $T_x$  是指定环境温度的参考值。

本文采用 COB 封装技术, 将多个小功率 LED 芯片直接封装在基板上, 扩大了散热面积, 并且减少了不必要的散热通道, 省去了表面贴式封装中的支架这一器件, 分析如图 3 所示封装结构的等效热阻示意图如图 4 所示。

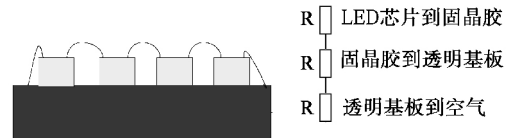


图 4 LED 灯丝等效热阻

Fig. 4 Equivalent thermal resistance of the LED filament

### 1.4 LED 灯丝球泡灯的优点

与传统的 LED 球泡灯相比, LED 灯丝球泡灯能够实现  $360^\circ$  全角度发光、与钨丝白炽灯一样轻巧, 是未来 LED 球泡灯的发展方向。它具有以下几个优点:

(1) 发光效率高。相对于传统球泡灯采用金属支架封装, 发光角度最大为  $180^\circ$ , LED 灯丝将 LED 芯片封装在透光性能高的透明支架上, 真正实现了  $360^\circ$  全角度发光, 提高了其发光效率。

(2) 显色指数高。LED 灯丝球泡灯采用蓝光 LED 芯片和红光 LED 芯片激发蓝绿色荧光粉合成白光, 避免了红色荧光粉的自吸收<sup>[6]</sup>, 不仅提高了 LED 灯丝球泡灯的显色指数, 而且消除了光损, 进一步提高了光效。

(3) 良品率高。传统 LED 球泡灯采用普通点胶机点胶, 对于胶体的高度、点胶量的多少都难以控制, LED 的良品率较低, 而 LED 灯丝球泡灯采

用全新的 360° 模组灌胶技术, LED 荧光胶模组成型, 其良品率高, 而且可有效避免 LED 蓝光泄露。

(4) 体积小、结构轻巧。传统的 LED 球泡灯依靠铝基板及金属散热器散热, 体积大、质量重, 而 LED 灯丝球泡灯将 LED 灯丝密封真空并充满低粘滞、高导热系数的惰性气体内, 利用气体对流和热传导散热, 极大的减轻了 LED 球泡的体积和重量。

(5) 成本低。LED 灯丝球泡灯直接将 LED 裸芯片封装在透明支架上, 不需要对 LED 芯片单独封装, 所有降低了成本。而且不需要在透明支架上单独制作电极结构, 而是通过 LED 芯片 pn 结完成电气连接, 进一步降低了成本。

## 2 影响 LED 光学性能的因素

### 2.1 封装材料对光学性能的影响

在传统的封装中, 一般采用的是环氧树脂与荧光粉混合配制荧光粉胶进行封装。然而, 环氧树脂的抗衰老性较差, 当 LED 器件工作或环境温度在 125 °C 左右时, 环氧树脂将会从一种刚性的类玻璃状态转变成一种柔性的类似于橡胶的物质, 此时, 与 LED 芯片接触的环氧树脂会逐渐变性、变黄, 影响 LED 的出光效率。

硅胶对低波长有较好的抗受性, 具有抗老化、隔离紫外线使其不对外辐射的优点, 此外, 硅胶的透光率、折射率、耐腐蚀性和耐热性都比环氧树脂理想<sup>[7]</sup>。因此在 LED 封装中采用硅胶混合荧光粉制成的荧光胶对 LED 芯片进行灌胶处理, 有效避免了分立光源器件组合存在的点光、炫光和蓝光泄露等缺点。

### 2.2 封装基板对光学性能的影响

LED 封装过程中, 使用的基板有玻璃纤维板、金属基板、陶瓷基板等, LED 芯片发出的光线照射范围只能是基板以上部分, 即实现 180° 出光, 基板下方由于材料本身的不透光性, 阻挡了光线的穿透, 降低了 LED 光源的出光率。LED 灯丝采用玻璃和蓝宝石作为封装基板, LED 芯片所发出的光能透过基板照射到基板下方, 即实现 360° 全角度出光, 有效提高 LED 的出光效率<sup>[8]</sup>。

### 2.3 封装方式对光学性能的影响

光通量与 LED 的热特性有一定的关系, LED

的温度上升, 致使 LED 发光的波长红移, 光通量减少<sup>[9]</sup>。LED 器件的内量子效率、禁带宽度和光输出都会受温度升高的影响。LED 灯丝采用 COB 封装方式, 直接将 LED 裸片粘贴在散热基板上, 扩大了散热面积, 并且减少了不必要的散热通道, 省去了表面贴式封装中的支架, 从而有效地降低了 LED 器件的热阻值, 降低了 LED 芯片结温, 提升了 LED 的光通量。

## 3 实验及结果分析

### 3.1 光学性能实验过程

首先采用丝网印刷技术在玻璃基板和蓝宝石基板上印刷电极结构, 电极宽度应尽可能窄, 避免银胶的吸光作用, 放入设定 550 °C 的烘烤箱烘烤 1.5 h, 温度过高容易导致银胶与基板材料发生化学反应, 影响电极结构效果, 温度过低, 银胶容易脱落, 焊线容易短路; 其次, 在基板材料上采用 0.05 W 小功率 LED 芯片进行固晶, 每根 LED 基板上封装 20 颗 LED 芯片, 这样每根灯丝实际功率为小于 1 W, 再进行焊线和点胶, 点胶的关键点在于采用全新的 360° 模组灌胶技术, LED 荧光胶模组成型, 优势为良品率高; 再将 LED 灯丝放入烤箱烘烤 6 h, 完成 LED 灯丝制作。

最后将 LED 灯丝构成的球泡灯放入 2 m 积分球的测试架上, 同时打开 PF9811 智能电量测量仪器和 HASS 光谱辐射计开关以及将 DPS 设定为标定电压与频率。点亮 5 min 后, 点击测试软件, 系统自动进入测试。记录不同驱动电流下的 LED 灯丝球泡灯的光学参数, 实验发现, 当驱动电流为 15 mA 时, 其发光效率达到最大值。

### 3.2 实验结果及其分析

#### 3.2.1 基于玻璃基板封装的 LED 灯丝球泡灯的光学性能参数

基于玻璃基板封装的 LED 灯丝球泡灯的整灯技术指标包括以下几个部分: CIE 颜色参数包括: 色品坐标  $x = 0.4123$ ,  $y = 0.3706$  /  $u' = 0.2490$ ,  $v' = 0.5037$ ; 相关色温  $T_{cc} = 3172$  K, 主波长  $\lambda_d = 587.3$  nm, 色纯度 = 34.9%; 峰值波长  $\lambda_p = 603$  nm, 半峰带宽 FWHM = 145.1 nm, 色比  $R = 22.6\%$ 、 $G = 74.4\%$ 、 $B = 3.0\%$ ; 显色指数  $R_a =$

84.1。图 5 为该灯的色度图。光度和辐度参数包括: 光通量  $\Phi = 467.29 \text{ lm}$ , 光效为  $110.06 \text{ lm/W}$ , 辐射通量  $\Phi_e = 1.5757 \text{ W}$ 。该灯的光谱测试图如图 6 所示。

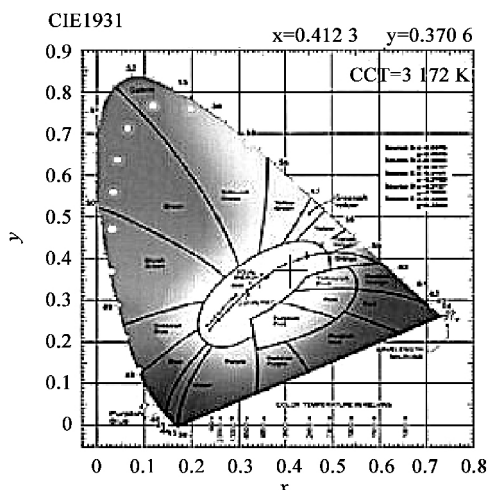


图 5 基于玻璃基板封装的 LED 灯丝球泡灯的色度图  
Fig. 5 Chromaticity diagram of the LED filament bulb packaged on the glass substrate

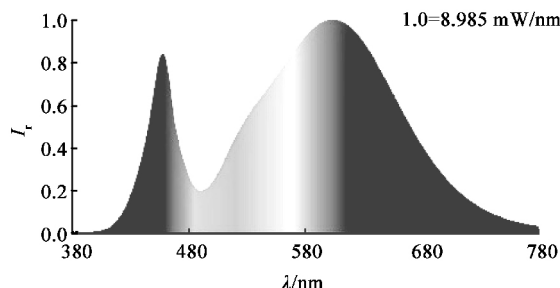


图 6 基于玻璃基板封装的 LED 灯丝球泡灯光谱图  
Fig. 6 Spectrum diagram of the LED filament bulb packaged on the glass substrate

### 3.2.2 基于蓝宝石封装的 LED 灯丝球泡灯的光学性能参数

基于蓝宝石封装的 LED 灯丝球泡灯的整灯技术指标包括以下几个部分: CIE 颜色参数: 色品坐标  $x = 0.4309$ ,  $y = 0.3921$ ,  $u' = 0.2519$ ,  $v' = 0.5156$ ; 相关色温  $T_{CC} = 3004 \text{ K}$ , 主波长  $\lambda_d = 584.4 \text{ nm}$ , 色纯度 =  $47.0\%$ ; 峰值波长  $\lambda_p = 604 \text{ nm}$ , 半峰带宽  $\text{FWHM} = 144.8 \text{ nm}$ , 色比  $R = 22.9\%$ 、 $G = 74.7\%$ 、 $B = 2.4\%$ ; 显色指数  $R_a = 81.9$ , 图 7 为该灯的色度图。光度和辐度参数包括: 光通量  $\Phi = 471.69 \text{ lm}$ , 光效  $115.79 \text{ lm/W}$ , 辐射通量  $\Phi_e = 1.5757 \text{ W}$ 。该灯的光谱测试图如图 8 所示。

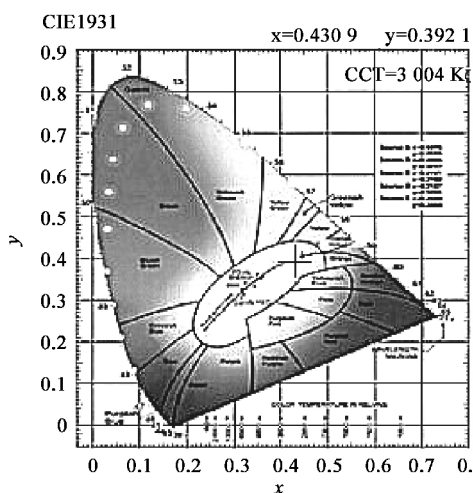


图 7 基于蓝宝石封装的 LED 灯丝球泡灯的色度图  
Fig. 7 Chromaticity diagram of the LED filament bulb package on the sapphire substrate

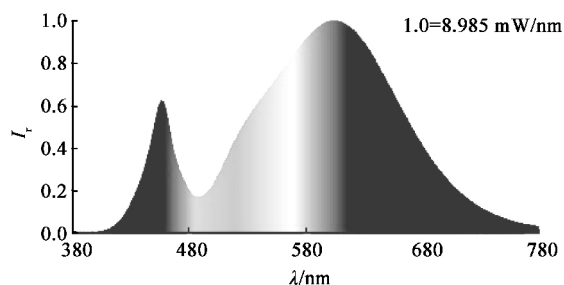


图 8 基于蓝宝石封装的 LED 灯丝球泡灯光谱图  
Fig. 8 Spectrum diagram of the LED filament bulb package on the sapphire substrate

### 3.2.3 实验结果分析

由以上实验测试结果可知, 采用蓝宝石基板封装的 LED 灯丝球泡灯的光学技术指标优于基于玻璃封装的 LED 灯丝球泡灯, 其原因在于: 其一, 蓝宝石的导热系数明显高于玻璃基板, 其散热效果优于玻璃基板, LED 的散热效果越好, LED 的光效越高, 寿命越长。其二, 玻璃基板的折射率约为 1.52, 蓝宝石基板的折射率为 1.76 左右, LED 封装基板材料的折射率越高, 光发生全反射的概率越小, 更多的光透射出去, LED 的发光效率越高。其三, 蓝宝石的透光性能优于玻璃基板, 更多的光透过蓝宝石背面散发出来, LED 的发光效率越高。综上所述, 故基于蓝宝石封装的 LED 灯丝球泡灯的发光效率比基于玻璃基板封装的 LED 灯丝球泡灯好。

### 3.3 热学实验及结果分析

将 Pt1000 热电阻固定在 LED 灯丝的中央, 测得未通电状态下的热阻值, 再将 LED 灯丝接通电

源, 每间隔 1 min 记录一次 Pt1000 热电阻的阻值, 90 min 后, 关闭电源。将所得到的数据与 Pt1000 热电阻分度表对应起来, 得到 LED 灯丝的温度值 ( $\theta$ )。其结果如图 8 所示。

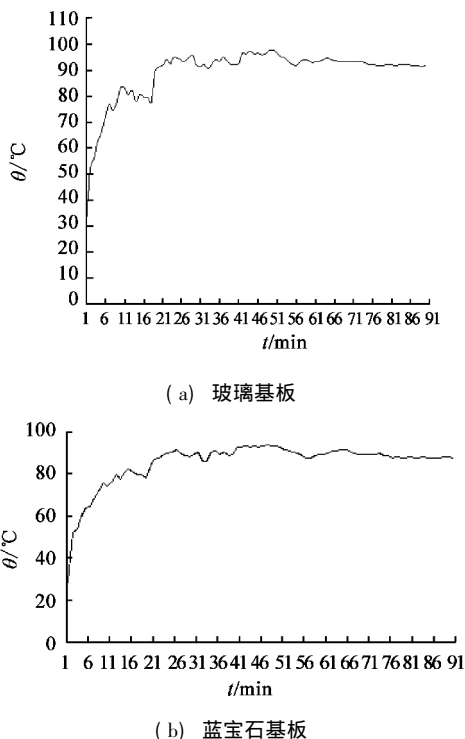


图 9 玻璃基板和蓝宝石基板的 LED 灯丝测试温度图

Fig 9 Tested temperatures of the LED filament with the glass substrate and sapphire substrate package

由图 9 可以看出, 玻璃基板封装的 LED 灯丝的 LED 芯片位置处是最高温度 94.0 °C; 蓝宝石基板封装的 LED 灯丝的 LED 芯片位置处是最高温度 86.2 °C。LED 的温度均在 LED 芯片的安全工作温度范围内, 同时由于铂热电阻与 LED 灯丝的荧光胶直接接触, 对测试结果会有一些影响, 导致 LED 的温度升高, 故透明基板封装的 LED 灯丝球泡灯可以安全可靠的工作。

#### 4 结论

随着国家“禁白”活动的推行, LED 照明必然成为未来照明主流, 但是由于传统 LED 球泡灯的成本过高, 发光效率不高等原因, 影响了 LED 的推广使用。本文提出了一种新型高效 LED 灯丝球泡灯, 采用透明支架封装, 真正实现了 360° 全角度发光, 提高了 LED 发光效率。通过对该 LED 灯丝球泡灯的研究测试, 结果表明, 采用透明基板材料封装的 LED 灯丝的光学性能优于采用一般的

不透光的基板材料的 LED 灯丝, 其显色指数更高。尤其是采用蓝宝石基板封装的 LED, 其出光效率优于玻璃基板封装的 LED 灯丝。该 LED 灯丝球泡灯不仅结构轻巧, 而且性价比高, 市场前景良好。

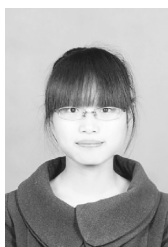
#### 参考文献:

- [1] 祁姝琪. LED 芯片的 COB 封装技术 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
- [2] 李长春. LED 封装工艺设计及优化 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [3] 刘娇, 刘娟芳, 陈清华, 等. 替代 100 W 白炽灯的新型 12 W LED 球泡灯的散热性能研究 [J]. 发光学报, 2014, 35 (7): 866 - 871.
- [4] 沈洁, 刘靖. LED 封装技术与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [5] LAI S C, YAO K, CHEN Y F, et al. A photovoltaic UV sensor with a ferroelectric thin film on transparent substrate [J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34 (11): 1427 - 1429.
- [6] 曹宇杰. 高显色指数高光效 LED 球泡灯的研究 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- [7] 祁姝琪, 丁申冬, 郑鹏, 等. COB 封装对 LED 光学性能影响的研究 [J]. 电子与封装, 2012, 12 (3): 6 - 9.
- [8] PAN C, NAKAMURA S, DEN BAARS S P. High light extraction efficiency light-emitting diodes grown on bulk GaN and sapphire substrates using vertical transparent package [C] // Proceedings of the 2012 Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose, CA, USA, 2012: 1 - 2.
- [9] 陈宇彬. 白光 LED 老化机理研究 [D]. 广州: 华南师范大学, 2007.

(收稿日期: 2014 - 09 - 23)

#### 作者简介:

龚三三 (1989—), 女, 江西南昌人, 硕士研究生, 研究方向为新型电子器件设计及应用;



秦会斌 (1961—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士生导师, 主要从事新型电子器件设计及应用方面的科研和教学工作;

刘丹 (1989—), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 研究方向为大功率太阳能光伏逆变电源。