

铝/氧化铝复合基板封装的 LED 光源的光热特性

朱海涛, 傅仁利, 费 盟, 王彩霞, 季 磊

南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 210000

摘要 为获得具有高出光效率、高导热性能的发光二极管(LED)封装基板,采用直接敷铝(Al)工艺制备了铝/氧化铝(Al_2O_3)复合陶瓷基板并对其表面进行化学机械抛光处理。运用光学模拟软件 Tracepro 和热学模拟软件 ANSYS 对该陶瓷基板封装的 LED 光源的光学性能和热学性能进行了模拟计算,并和传统氧化铝陶瓷基板封装的 LED 光源进行了对比分析,最后将所制备的铝/氧化铝陶瓷基板封装成板上芯片直装(COB)型 LED 光源进行测试。模拟和实验测试结果均表明:直接敷铝工艺制备的铝/氧化铝陶瓷基板热传递速度更快,导热性能更加优异,更适合用于大功率 LED 光源的封装;铝/氧化铝陶瓷基板封装的 LED 光源比基于传统氧化铝陶瓷基板的 LED 光源的光通量大,出光效率更高。

关键词 光学器件; 出光效率; 镜面铝; 直接敷铝; 数值模拟

中图分类号 TN312+.8; TN383.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1023002

Optical and Thermal Performance of LED Light Source Packaged by Al/ Al_2O_3 Composite Substrate

Zhu Haitao, Fu Renli, Fei Meng, Wang Caixia, Ji Lei

*College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210000, China*

Abstract To obtain light emitting diode (LED)-packaged substrate with high luminous efficiency and high thermal conductivity, the direct aluminum (Al) plating technology is used to prepare aluminum/aluminum oxide (Al_2O_3) composite ceramic substrate whose surface is also polished by chemical-mechanical method. The optical and thermal performance of the LED light source packaged by this composite substrate are simulated by using the optical simulation software Tracepro and the thermal simulation software ANSYS. This LED light source is also compared with the traditional alumina ceramic substrate package LED light source. Finally, the prepared aluminum/alumina ceramic substrate is packaged into an on-board chip-mounted (COB) type LED light source for testing. Both results of simulation and experimental tests show that the aluminum/alumina ceramic substrate prepared by direct aluminum process has faster heat transfer rate, better thermal conductivity and it is more suitable for high power LED light source packaging. LED packaged by Al/ Al_2O_3 ceramic substrate has bigger luminous flux and higher luminous efficiency, compared with the light source packaged by traditional Al_2O_3 ceramic substrate.

Key words optical devices; luminous efficiency; mirror aluminum; direct bonded aluminum; numerical simulation

OCIS codes 230.1150; 230.2090; 230.3670; 220.5450

1 引 言

白光发光二极管(LED)因具有节能、环保、寿命长等优点已逐渐取代传统照明光源,是继白炽灯、荧光灯之后的第 4 代照明光源^[1-3]。LED 光源主要由封装基板、芯片、荧光粉三个部分组成^[4]。芯片发出蓝光,经

收稿日期: 2017-05-02; **收到修改稿日期:** 2017-06-06

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 朱海涛(1993—),男,硕士研究生,主要从事 LED 封装热学和光学仿真计算模拟方面的研究。

E-mail: zht771493640@163.com

导师简介: 傅仁利(1965—),男,博士,教授,主要从事微电子封装基板与封装技术、白光 LED 荧光发光材料及 LED 灯封装技术、功率电子器件封装基板及封装工艺等方面的研究。E-mail: renlif@nuaa.edu.cn(通信联系人)

芯片表面出射后激发荧光粉产生黄光,黄光和蓝光混合产生白光^[5]。目前应用于 LED 封装的基板主要有金属芯印刷基板(MCPCB)、金属复合基板和氧化铝(Al_2O_3)陶瓷基板,材料多为铝(Al)、铜等高导热金属材料和高导热陶瓷材料^[6]。除此之外,LED 封装结构中还需要选择封装材料的折射率和基板的反射系数,用以提高 LED 的出光效率^[7]。

金属铝基板通常由电路层(铜箔层)、导热绝缘层和金属基层组成,具有良好的加工性能和较好的导热性能,因此被广泛应用于大功率 LED 的封装。随着 LED 封装形式的发展和倒装芯片的出现,新型板上芯片直装(COB)和芯片尺寸封装(CSP)开始在 LED 封装过程中得到应用^[8]。然而,金属基板表面的绝缘层多为低导热系数的聚合物薄膜材料,热阻较大,而且金属基板的热膨胀系数较大,与芯片不匹配,容易导致热失效的发生^[9]。随着白光 LED 功率的进一步提高,封装密度和单颗芯片的功率都大幅度提升,对封装结构和封装基板材料提出了更高要求,不仅要求其具有高的导热率,而且还要求与芯片的热膨胀系数匹配。陶瓷基板由于具有较高的导热系数、与芯片相匹配的热膨胀系数以及良好的化学稳定性和电绝缘性能,因此在大功率白光 LED 封装中得到广泛关注^[10]。目前已经用于大功率白光 LED 封装的陶瓷基板有直接敷铜(DBC)陶瓷基板、厚膜陶瓷基板、低温共烧陶瓷(LTCC)基板和薄膜陶瓷基板等,有效地解决了 LED 灯的散热问题和寿命问题,提高了 LED 的发光光效^[11]。然而,由于氧化铝陶瓷基板本身的反光率较低,因此封装后的 LED 光源的出光效率也会有所降低。采用光亮铝基板可以有效提高 LED 发光器件的光效,但是光亮铝基板表面绝缘层的制备困难,导致其耐压性能和安全性能下降^[12]。因此,获得同时具有高出光率和高导热的 LED 封装基板,是研究者一直追寻的目标。

本文采用直接敷铝方法制备铝/氧化铝陶瓷复合基板,同时采用化学机械抛光技术对复合基板的铝金属层进行镜面抛光。采用光学模拟软件 Tracepro 和热学模拟软件 ANSYS 对该复合基板封装的 LED 器件的光热性能进行模拟分析,同时采用所制备的铝/氧化铝复合基板进行了 LED 的封装,对封装的 LED 光源的光热性能进行测试并与氧化铝基板封装的 LED 光源进行对比分析。

2 铝/氧化铝复合基板的制备及表面铝层的化学机械抛光

2.1 铝/氧化铝复合基板的制备

在 He H 等^[13]提出的氧化铝陶瓷基板铜金属化的基础上,采用直接敷铝工艺制备铝/氧化铝复合陶瓷基板,其制备过程如图 1 所示,包括氧化铝陶瓷基板铜金属化、铝箔通过氧化铝陶瓷表面的铜中间层实现铝/氧化铝陶瓷复合两个阶段^[14]。

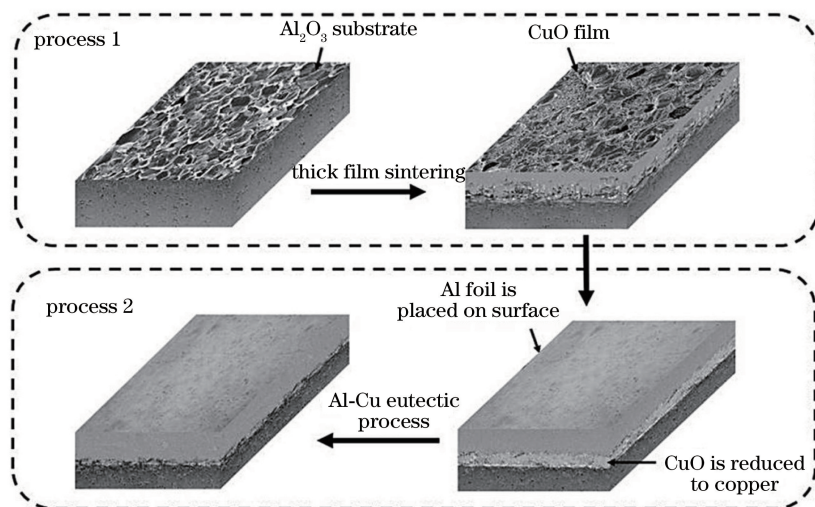


图 1 氧化铝陶瓷表面直接敷铝工艺流程

Fig. 1 Process of directing bonded aluminum on alumina substrate

按照图 1 所示工艺流程,将铝箔(厚度 0.3 mm,纯度大于 99%,国药集团化学试剂有限公司)放置在表面铜金属化后的氧化铝陶瓷基板(厚度 1 mm,纯度为 96%,珠海粤科京华电子陶瓷有限公司)上,然后将样

品置于真空/气氛炉(SJG-1600 °C, 洛阳神佳窑业有限公司)中,在真空条件、700 °C温度下敷接制备出了铝/氧化铝复合基板,图 2(a)为复合基板的铝/氧化铝界面的显微结构。作为对比,本研究也采用银铜钎料(SnAgCu 钎料, M705-GRN360-K2-V 无铅钎料, 千住新原金属有限公司)通过钎焊工艺将表面镀镍处理的铝箔与表面铜金属化的氧化铝陶瓷进行钎焊,制备铝/氧化铝复合基板,钎焊温度为 240 °C。图 2(b)为钎焊制备的铝/氧化铝复合基板的界面显微结构。

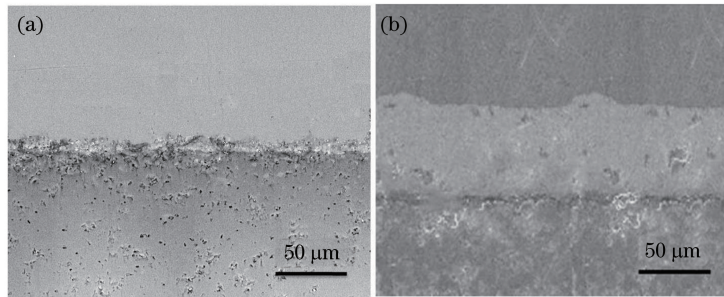


图 2 铝/氧化铝复合基板的界面显微结构。(a)直接敷铝工艺;(b)钎焊工艺

Fig. 2 Interface microstructure of Al/Al₂O₃ composite substrate. (a) Direct bonded aluminum; (b) soldering technology

从图 2 中可以看到,直接敷铝工艺制备的铝/氧化铝复合基板的界面结构从上往下分别为铝层、界面层、氧化铝陶瓷层,铝层与氧化铝层之间连接紧密,形成了有效的连接。钎焊工艺制备的铝/氧化铝复合基板的界面结构从上往下分别为铝层、SnAgCu 焊料层、氧化铝陶瓷层,焊料层致密,也实现了铝层与氧化铝层的有效连接。

采用剥离强度实验对两种敷接工艺制备的铝/氧化铝复合基板力学性能进行测试,测试方法同文献[15],测试结果如图 3 所示。钎焊工艺最高敷结强度达到 8.7 MPa,直接敷铝工艺最高敷接强度达到 14.8 MPa。由此可见,采用直接敷铝工艺制备的铝/氧化铝复合基板的力学性能要远优于钎焊方法制备的基板。

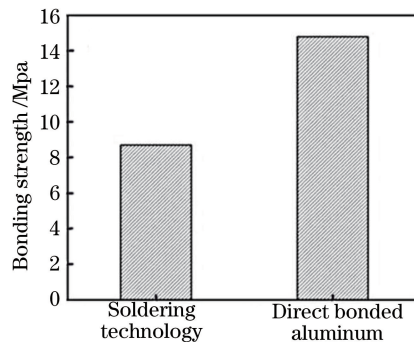


图 3 直接敷铝工艺与钎焊工艺制备的铝/氧化铝复合陶瓷基板的剥离强度

Fig. 3 Peel strength of Al/Al₂O₃ composite ceramic substrate prepared by direct bonded aluminum and soldering technology

2.2 铝/氧化铝复合基板表面铝层的化学机械抛光

为提高铝/氧化铝复合基板表面铝箔的反射率,需要对铝/氧化铝复合基板的金属铝表面进行抛光处理以降低粗糙度,从而提高其反射率。通过三种不同的抛光工艺(化学抛光、电解抛光和化学机械抛光)对铝/氧化铝复合基板的金属铝表面分别进行了抛光。图 4 为未经抛光处理的铝层表面和经过三种不同抛光工艺处理后铝表面的白光干涉三维形貌图,图 5 为未经抛光处理和三种不同抛光工艺处理后铝的表面粗糙度曲线。

图 4 中红色代表较高区域而蓝色代表较低区域,对比发现化学机械抛光的样品其表面最为平整,相较于其他三个样品的形貌表面来说几乎没有凸起。从样品表面的粗糙度曲线也可明显发现在整个扫描范围内,机械化学抛光后的样品表面浮凸程度只有 100 nm 左右。

采用紫外-可见分光光度计(UV-3600, 日本岛津)对 4 种不同表面处理工艺的铝/氧化铝复合基板的反射率进行了测试,测试结果如图 6 所示。由图 6 可见,在可见光范围(400~800 nm)内,经过化学机械抛光

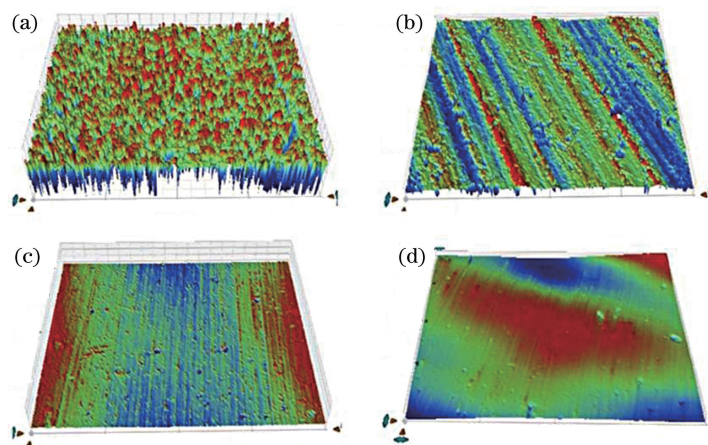


图 4 不同抛光处理的铝/氧化铝复合陶瓷基板表面三维形貌。(a)未处理;(b)化学抛光;(c)电解抛光;(d)化学机械抛光
 Fig. 4 3D surface topography of Al/Al₂O₃ composite ceramic substrate disposed by different polishing methods.
 (a) Untreated; (b) chemical polishing; (c) electrolytic polishing; (d) chemical-mechanical polishing

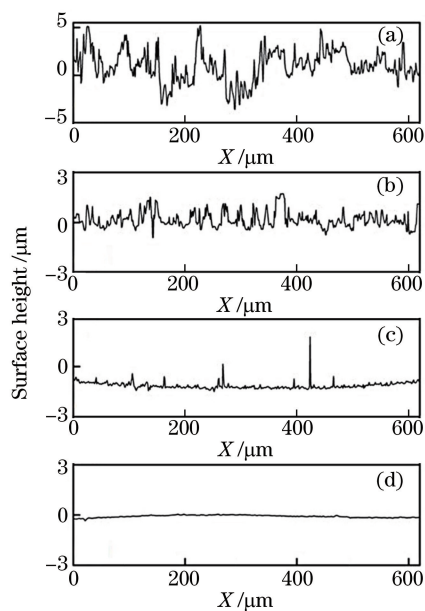


图 5 不同抛光处理制备的铝/氧化铝复合陶瓷基板的表面粗糙度曲线。(a)未处理;(b)化学抛光;
 (c)电解抛光;(d)化学机械抛光

Fig. 5 Surface roughness curves of Al/Al₂O₃ composite ceramic substrate disposed by different polishing methods.
 (a) Untreated; (b) chemical polishing; (c) electrolytic polishing; (d) chemical-mechanical polishing

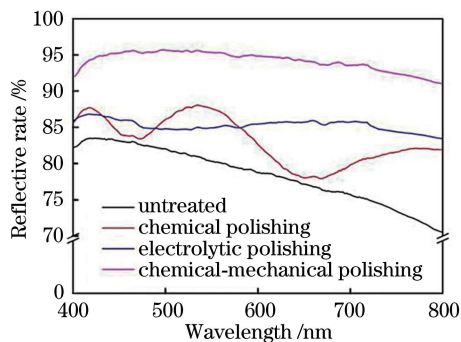


图 6 不同抛光处理的铝/氧化铝复合陶瓷基板表面铝层的反射率

Fig. 6 Reflective index of Al/Al₂O₃ composite ceramic substrate disposed by different polishing methods

后铝/氧化铝复合基板表面铝层的反射率最高,平均反射率达到了 94% 以上,远高于其他两种抛光工艺,该结果与铝层表面抛光后的粗糙度曲线是一致的,因此可以认为其更加适合作为 LED 光源用封装基板。

3 采用铝/氧化铝复合基板封装的 LED 光源的光热模拟

为探究基于抛光处理的铝/氧化铝复合基板封装的 LED 光源的光学和热学性能,本研究采用计算机模拟方法对采用铝/氧化铝复合基板的光学性能和热学性能进行分析。

3.1 铝/氧化铝复合基板封装的 LED 光源的光学模拟

图 7 为所建立的基于铝/氧化铝复合基板 COB 封装 LED 的物理模型,主要分为如下 5 个部分:基板、反光杯、蓝光 LED 芯片、绝缘胶和荧光胶,各部分的相关尺寸及性能参数如表 1 所示。

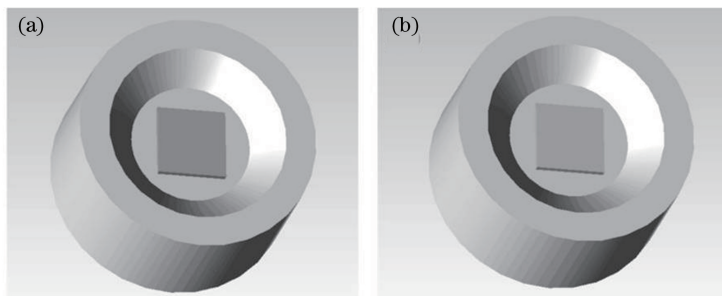


图 7 圆形反光杯的三维光学模型。(a)传统氧化铝陶瓷基板;(b)高反射率铝/氧化铝陶瓷基板

Fig. 7 3D optical model of round reflective cup. (a) Traditional Al_2O_3 ceramic substrate;
(b) $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ceramic substrate with high reflective index

表 1 COB 封装模型各部分的相关参数

Table 1 Relative parameters of each part of COB packaging model

Item	Parameter
Substrate	Size: 20 mm×20 mm×1 mm;reflective index: 95.3% ($\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ substrate) and 85% (Al_2O_3 substrate)
Chip	Total power: 5 W (80% transform into heat and 20% transform into light intensity inside the chip)
Insulation paste	Size: 20 mm×20 mm×0.5 mm
Reflection cup	Thickness: 0.65 mm;inner face is set as total reflection
Phosphor	Wavelength range: 520~600 nm;absorption index: 0.12; reflective index: 1.42; concentration of Ce:YAG:3.9 mol·L ⁻¹

根据上述光学模拟的预设参数与光学设计方案,采用 Tracepro 建立模型并进行光学模拟,图 8 为光学模拟半球形接收面的模型图。

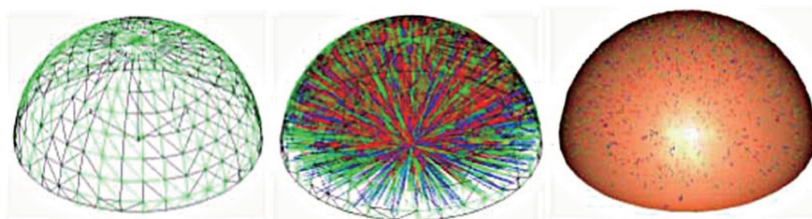


图 8 半球形接收面模型示意图

Fig. 8 Schematic of hemispherical receiving surface model

图 9 为采用 96%氧化铝陶瓷基板封装的 LED 光源的出光效率模拟结果,图 10 为采用抛光处理后的铝/氧化铝复合基板封装的 LED 光源的出光效率模拟结果。从图 9 的模拟结果可以看出,当反射层为氧化铝陶瓷时(反射率为 85%),其总光通量为 180.28 lm。而当基板采用高反射率铝层(反射率为 95.3%)作为反射层时,其总光通量为 204.8 lm。

对比上述光学模拟计算结果可知,当基板表面的反射率从 85% 提升至 95.3%,LED 光源的总光通量从 180.28 lm 提升至 204.8 lm,出光效率提升了 13%。光学模拟结果表明,采用经过表面抛光处理的高反射率

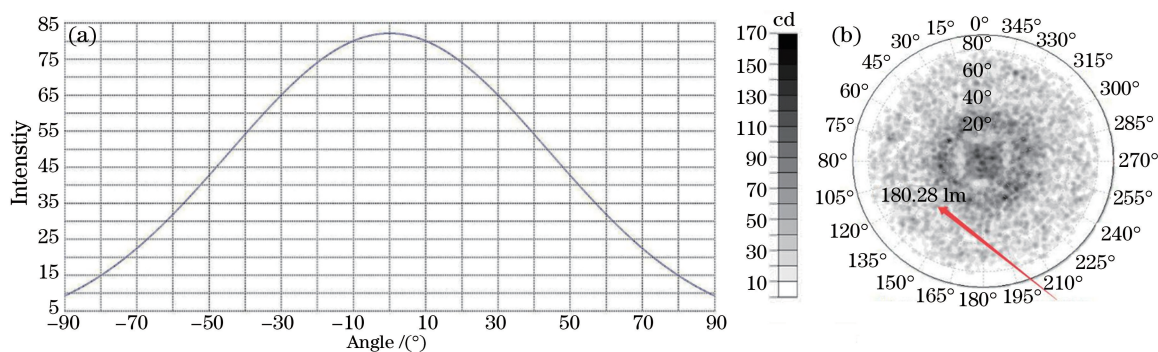


图 9 采用氧化铝陶瓷基板封装的 LED 的出光效率模拟结果。(a)矩形光强分布图;(b)等光强极坐标图
Fig. 9 Simulation result of luminous efficiency of LED packaged by Al_2O_3 ceramic substrate.

(a) Rectangular candela distribution plot; (b) polar iso-candela plot

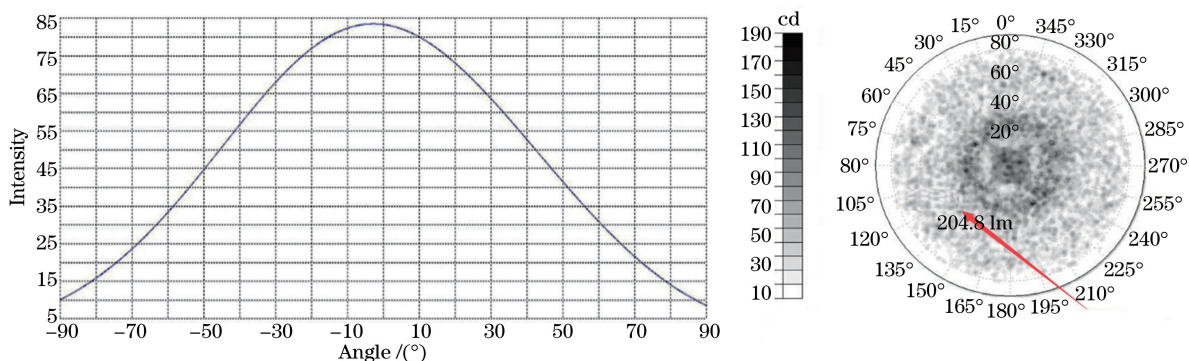


图 10 采用铝/氧化铝复合基板封装的 LED 的出光效率模拟结果。(a)矩形光强分布图;(b)等光强极坐标图
Fig. 10 Simulation result of luminous efficiency of LED packaged by $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite substrate.

(a) Rectangular candela distribution plot; (b) polar iso-candela plot

铝/氧化铝基板进行封装,可以有效提升 LED 光源的出光光效。

3.2 铝/氧化铝复合基板封装的 LED 光源的热学模拟

为了考察铝/氧化铝复合基板对于封装后 LED 光源的散热性能的影响,采用 ANSYS 热学模拟的方法对直接敷铝法制备的铝/氧化铝复合基板封装的 LED 光源的散热性能进行模拟,同时为了对比,对采用钎焊工艺的复合基板封装的 LED 光源的散热性能也进行了模拟。两种封装基板的结构示意图如图 11 所示。

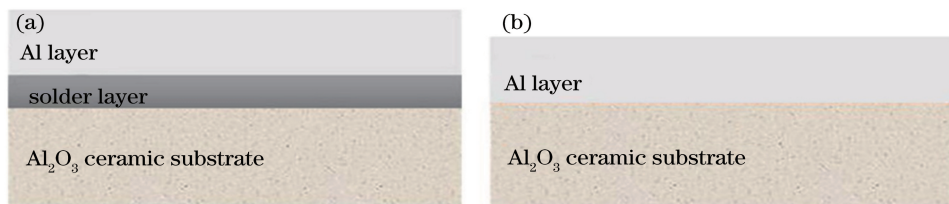


图 11 两种不同工艺制备的铝/氧化铝陶瓷基板的结构。(a)钎焊工艺;(b)直接敷铝工艺
Fig. 11 Structure of $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ceramic substrate prepared by two different technologies.

(a) Soldering technology; (b) direct bonded aluminum

采用 ANSYS 有限元分析软件分别对图 11 所示的两种不同结构封装基板的散热性能进行模拟计算,计算所依据的物理模型如图 12 所示,相关热学参数如表 2 所示。

表 2 铝/氧化铝复合基板的尺寸及相关热物理性能参数

Table 2 Size and relative thermal physical property parameters of $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite substrate

Component	Thermal conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Size /mm
Al	205	$24 \times 24 \times 0.3$
Al_2O_3	32	$24 \times 24 \times 1.0$
Solder (SnAgCu)	58	$24 \times 24 \times 0.02$

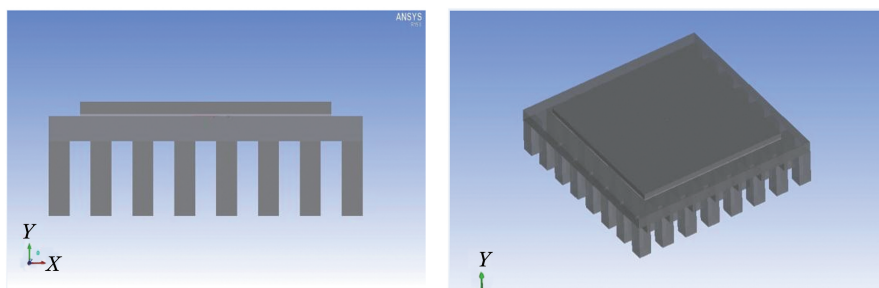


图 12 采用铝/氧化铝复合基板的封装散热结构模型

Fig. 12 Encapsulation heat dissipation model of Al/Al₂O₃ composite substrate

为便于软件模拟和计算,对基于铝/氧化铝复合基板的封装结构模型进行如下假设:1)计算过程主要考虑封装模型达到稳态时的散热过程;2)空气密度采用布西内斯克近似;3)除了密度值外,空气的其他物性参数看作定值。

对两种复合基板表面各施加一个热功率为 4 W 的热载荷,通过有限元分析软件计算整个封装结构达到稳态后的温度场分布。图 13 为两种不同结构的铝/氧化铝复合基板的温度场分布,其中图 13(a)为直接敷铝法制备的复合基板温度场分布模拟结果,图 13(b)为采用钎焊工艺制备的复合基板温度场分布模拟结果。

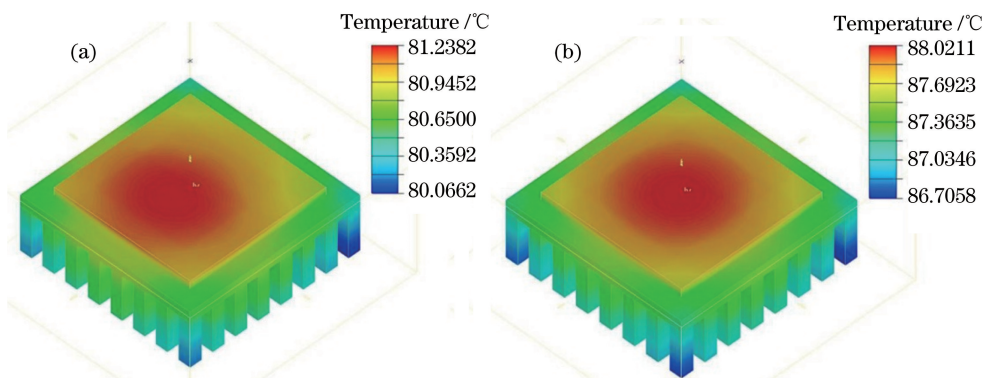


图 13 4 W 热功率载荷稳态下不同基板对应的封装结构温度分布图。(a)直接敷铝基板;(b)钎焊基板

Fig. 13 Steady-state temperature distribution of encapsulation structure with different substrates under the thermal power of 4 W. (a) Direct bonded aluminum substrate; (b) soldering substrate

从图 13 的模拟结果可以看出,采用两种不同结构的铝/氧化铝复合基板封装的 LED 光源达到热稳定状态之后,直接敷铝工艺制备的基板所对应的封装模型的最高温度为 81.2 °C,温度差为 1.17 °C;采用钎焊工艺制备的铝/氧化铝复合基板对应的封装模型的最高温度为 88.0 °C,温度差为 1.31 °C。上述结果表明直接敷铝工艺制备的基板具备更好的热量传导性能。另外,通过改变施加的热载荷功率探索不同功率下不同的稳态过程,图 14 所示为直接敷铝工艺制备的基板和钎焊工艺制备的基板对应的封装结构的温差变化趋势。

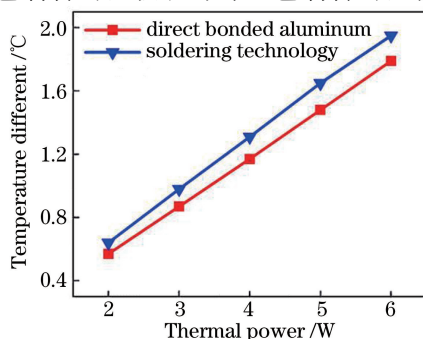


图 14 不同热功率载荷下使用不同方法制备的铝/氧化铝陶瓷基板的封装结构的温差

Fig. 14 Temperature difference of encapsulation structure with Al/Al₂O₃ ceramic substrate prepared by different preparation methods under different thermal power loads

由图 14 可见,随着热载荷功率增大,直接敷铝工艺制备的铝/氧化铝基板具有更好的散热性能,即直接敷铝工艺在大功率 LED 器件中对散热性能更加有利。

4 基于铝/氧化铝复合基板的 LED 光源的光学性能和散热性能测试

为探索实际封装后的样品的出光效果和散热性能,采用所制备的高反射率铝/氧化铝复合基板与氧化铝陶瓷基板分别封装成 LED 光源,封装芯片选用 460 nm 的蓝光芯片(三安 2646),封装样品如图 15 所示。采用 Lighting-140 型国家标准 LED 光学性能测试仪(杭州远方光电信息有限公司)分别对两种不同基板封装的样品的出光光效进行测试,为保证测试的精确性,测试分别进行 75 次(不同基板分别选出 5 个样品封装成光源,每个 LED 光源通电 15 次,分别记录其光强)。将测试结果绘制成柱状图并进行高斯拟合,结果如图 16 所示。

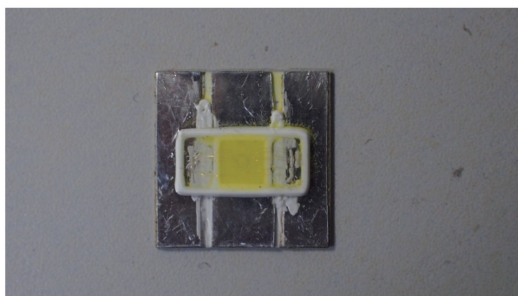


图 15 铝/氧化铝复合陶瓷基板封装样品

Fig. 15 Sample packaged by Al/Al₂O₃ composite ceramic substrate

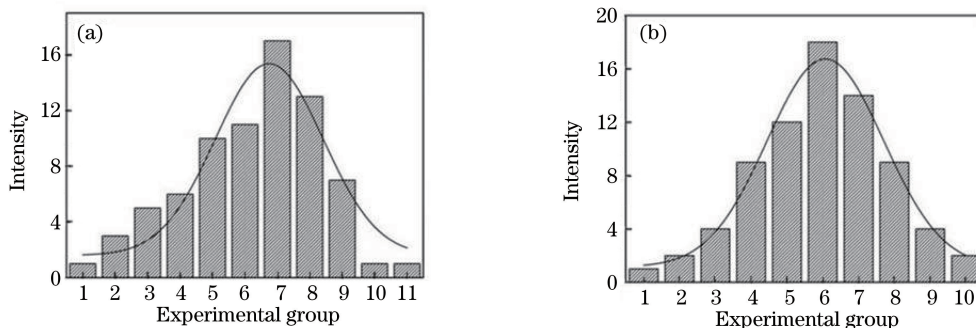


图 16 封装后的 LED 光源的光强分布图与拟合曲线。(a)普通氧化铝陶瓷基板;(b)铝/氧化铝复合陶瓷基板

Fig. 16 Light intensity distribution and fitting curve of packaged LED source. (a) Normal Al₂O₃ ceramic substrate; (b) Al/Al₂O₃ composite ceramic substrate

由图 16 的测试结果可见,两种基板封装的 LED 光源的出光光强近似为正态分布,96%氧化铝陶瓷封装后光源光强的平均值为 0.956 cd,高反射铝/氧化铝陶瓷封装后的光源光强的平均值为 1.032 cd,相比 96%氧化铝陶瓷封装光源提高 7.9%。

采用自制导热性能测试装置对直接敷铝法和钎焊工艺制备的铝/氧化铝复合基板样品的散热性能进行了测试,测试原理如图 17 所示。

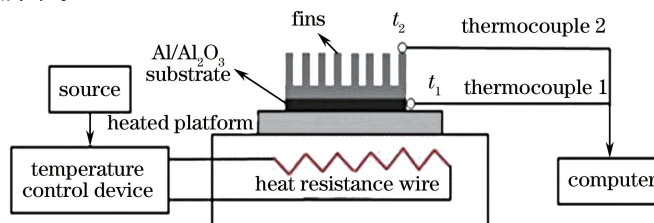


图 17 自制基板导热性能测试装置示意图

Fig. 17 Schematic of homemade substrate heat conduction performance testing device

如图 17 所示,实验中,将复合基板上表面的侧面 t_1 点和铝制散热翅片表面 t_2 点作为温度测量点,等到仪器运行一段时间后测量 t_1 与 t_2 点的温度(最终温度分别为 T_1 和 T_2),再通过计算两点温度差(ΔT)来评估不同基板的热阻大小从而衡量两者导热能力的差别。测量结果如图 18 所示。

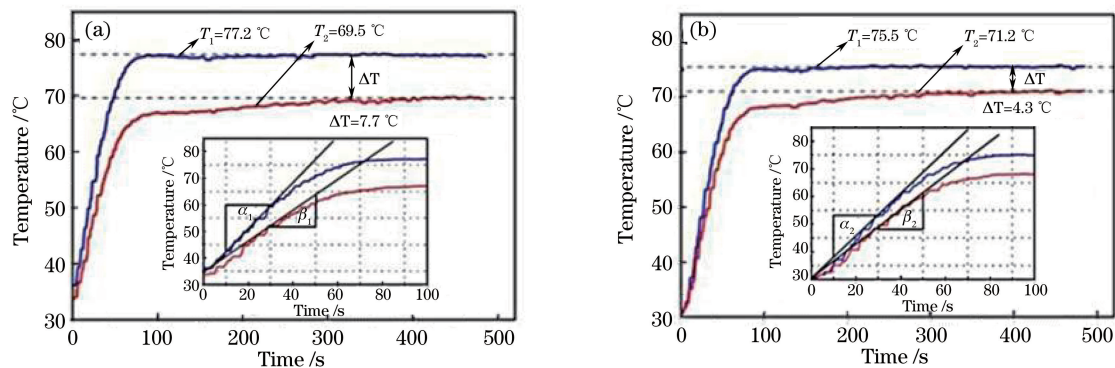


图 18 不同工艺制备的陶瓷基板的导热性能。(a)直接敷铝工艺;(b)钎焊工艺

Fig. 18 Heat conduction performance of ceramic substrate prepared by different technologies. (a) Direct bonded aluminum; (b) soldering technology

如图 18(a)和(b)插图所示,同时选择时间 30 s 的位置做两条曲线的斜率,该数据物理意义为样品在该时间点的瞬时升温速率,通过对比二者的升温曲线速率和最终温差 ΔT 可得:相较于钎焊制备的基板,直接敷铝法制备的基板具有更佳的热传导性能。

5 结 论

采用直接敷铝工艺制备了铝/氧化铝复合陶瓷基板,对其表面铝层采用化学机械抛光处理,采用计算机模拟方法对该基板的光学性能和散热性能进行了模拟,同时也采用抛光后的铝/氧化铝基板进行 LED 光源的实际封装,对封装后的光源的出光光强和散热性能进行实际封装测试。研究表明,采用直接敷铝工艺制备的铝/氧化铝复合基板界面结合紧密,具有良好的敷接强度,同时采用化学机械抛光制备的样品反射率达到 95.3%。热学仿真模拟计算表明直接敷铝工艺制备的复合基板的散热能力要高于钎焊工艺制备的基板;光学模拟计算表明基于高反射率复合基板设计的光源光通量为 204.8 lm,比普通氧化铝陶瓷基板高 13%。将高反射率复合基板封装成 COB 型 LED 光源,其平均光强为 1.032 cd,高于普通基板封装后的光源光强 0.956 cd。散热性能测试结果表明直接敷铝法制备的基板在热平衡时系统内外温差更小,优于氧化铝陶瓷基板封装的 LED 光源样品的散热能力。

参 考 文 献

- [1] Wang Qing. Study on aluminum core printed circuit board applying in high power LED packaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
王庆. 大功率 LED 散热封装用铝基印刷电路板研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [2] Tian Minbo. Electronic packaging technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
田民波. 电子封装工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] Fu X Y, Liu X J, Wu Y. Research and analysis of the design development and perspective technology for LED lighting products [C]. IEEE, International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, 2009: 1330-1334.
- [4] Liang Wenyue, Li Yuanxing, Long Yongbing, *et al.* Design of freeform surface lens with chip on board LED sources for uniform illumination [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 012202.
梁文跃, 李远兴, 龙拥兵, 等. 板上芯片型 LED 光源均匀照明自由曲面透镜设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 012202.
- [5] Pimputkar S, Speck J S, Denbaars S P, *et al.* Prospects for LED lighting [J]. Nature Photonics, 2009, 3(4): 180-182.
- [6] Fang Jun, Hua Gang, Fu Renli, *et al.* Structure and substrate for high power white LED package [J]. Semiconductor

- Technology, 2013, 38(2): 67-74.
- 方军, 花刚, 傅仁利, 等. 大功率白光 LED 封装结构和封装基板[J]. 半导体技术, 2013, 38(2): 67-74.
- [7] Sun Haojie, Li Baicheng, Zhang Dawei, *et al.* Parameters analysis of a new type of white-light LED package structure [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s2): 356-358.
- 孙浩杰, 李柏承, 张大伟, 等. 新型白光 LED 封装结构的参数分析[J]. 光学学报, 2009, 29(s2): 356-358.
- [8] Liu Chao, Fu Renli, Gu Xiguang, *et al.* Structure of chip scale package for LED light source and its thermal performance analysis based on numerical simulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 122301.
- 刘超, 傅仁利, 顾席光, 等. 芯片级 LED 封装光源结构散热性能的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 122301.
- [9] Wu Chaohui, Cheng Hao, Zhang Jun, *et al.* Technologies and development status of heat spreader for high-power LED packaging[J]. 2016, 37(1): 1-6.
- 吴朝晖, 程浩, 章军, 等. 大功率 LED 封装基板技术与发展现状[J]. 半导体光电, 2016, 37(1): 1-6.
- [10] Qian Fei, Fu Renli, Zhang Pengfei, *et al.* Influence of ceramic substrate and soldering joint technology on thermal dissipation performance of LED[J]. Electronic Components & Materials, 2014, 33(2): 47-51.
- 钱斐, 傅仁利, 张鹏飞, 等. 陶瓷基板及钎焊技术对 LED 散热性能的影响[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(2): 47-51.
- [11] Kim S H, Singh S, Oh S K, *et al.* Visible flip-chip light-emitting diodes on flexible ceramic substrate with improved thermal management[J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(5): 615-517.
- [12] Ouyang Xueqiong, Wang Shuangxi, Zheng Qiongna, *et al.* Development of package substrates for high power LED[J]. Electronics and Packaging, 2011, 11(4): 1-5.
- 欧阳雪琼, 王双喜, 郑琼娜, 等. 大功率 LED 用封装基板研究进展[J]. 电子与封装, 2011, 11(4): 1-5.
- [13] He H, Fu R L, Wang D L, *et al.* A new method for preparation of direct bonding copper substrate on Al_2O_3 [J]. Materials Letters, 2007, 61(19/20): 4131-4133.
- [14] Zhang P F, Fang J, Fu R L, *et al.* Bonding of Al to Al_2O_3 , via Al-Cu eutectic method[J]. Materials & Design, 2015, 87: 619-624.
- [15] Zhang P F, Fu R L, Tang Y, *et al.* Morphology of thick film metallization on aluminum nitride ceramics and composition of interface layer[J]. Ceramics International, 2015, 41(10): 13381-13388.