

文章编号:1004-4213(2011)05-0663-4

照明用大功率发光二极管封装材料的优化设计

刘一兵^{1,2}, 戴瑜兴¹, 黄志刚²

(1 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

(2 邵阳职业技术学院 机电工程系, 湖南 邵阳 422000)

摘要:根据传热理论,建立了大功率发光二极管的有限元模型,选择了 4 种键合材料(高导热导电银胶、纳米银焊膏,大功率芯片键合胶、Sn70Pb30),4 种基板材料(Al_2O_3 、AlN、Al-SiC、铜钼合金),采用 ANSYS 有限元热分析软件进行了温度场仿真,得到了大功率发光二极管封装材料的最优选择.研究了基板厚度、芯片输出功率及外接热沉时对发光二极管结温的影响.结果表明:纳米银焊膏-AlN 组合具有最优的散热效果;增加散热基板厚度提高散热能力的作用不大;单个发光二极管输出功率有限,应优化封装结构并采用多芯片阵列来满足照明级的需要;外接铝热沉能达到理想的散热效果.

关键词:大功率发光二极管;封装;键合材料;基板材料;ANSYS;优化

中图分类号:TN312.8

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114005.0663

0 引言

大功率发光二极管(Light Emitting Diode, LED)由于在节能、环保、使用寿命等方面的巨大潜能,被认为是继白炽灯、荧光灯、高强度气体放电灯之后的第四代光源,即半导体照明,市场前景十分广阔^[1].为此,我国于 2003 年 6 月正式启动国家半导体照明工程,并将半导体照明生产技术开发作为国家“十五”科技攻关重大项目立项.但是,LED 对温度非常敏感,温度上升会影响发光效率,使发射光谱外移,辐射波长发生变化引起 LED 色温、色度变化,加速荧光粉及器件的老化^[2].还会使器件及芯片内部产生很大的热应力,导致电极与芯片的焊点接触不良,芯片内部出现分层^[3].

近年来,照明用大功率 LED 封装材料得到了广泛的研究^[4-11],如 M. Arik 等^[10-11]比较了采用不同芯片封装材料及键合技术对 LED 散热性能的影响,并通过有限元分析和实验得到关于 LED 芯片及封装中的关键性热问题.但这些研究都没有涉及到封装材料的优化设计.为此,本文针对 LED 封装材料的优化问题,建立了大功率 LED 封装模型.选择不同的键合材料和基板材料,应用有限元热分析方法,采用 ANSYS 软件进行温度场的仿真,对不同材料的组合进行优化设计.得出了当键合材料选用纳米银焊膏、

基板选用 AlN 时具有最优的散热效果,基板厚度对 LED 散热作用影响不大,单个 LED 输出功率不大,外接铝热沉能达到理想的散热效果的结论.

1 大功率 LED 有限元热学模型

大功率 LED 内部结构主要由硅胶透镜、GaN 基芯片、键合材料、内部铜材热沉、散热基板和外部热沉等组成,如图 1.由于作为透镜的硅胶和作为封装外壳的聚苯乙烯塑料导热性能差,芯片产生的热量绝大部分通过芯片衬底,内部铜热沉传到散热基板、外部热沉上,和环境对流换热散发到空气中,这意味着芯片键合材料、散热基板必须选择高导热材料才能获得好的散热效果.

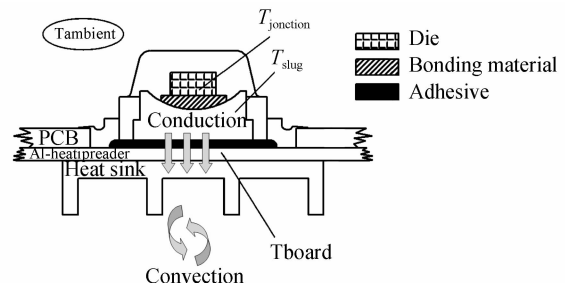


图 1 功率型 LED 内部结构和散热通道
Fig. 1 The internal structure and cooling channel of power type LED

根据传热理论,与热分析相关的材料属性包括:

基金项目:湖南省科技计划项目(No. 2010GK3182)和邵阳市科技计划项目(No. C0926)资助

第一作者:刘一兵(1964-),男,副教授,硕士,主要研究方向为半导体器件制造工艺及设计. Email:liuyibing0602@126.com

收稿日期:2011-02-24;修回日期:2011-03-25

热导率、比热容、焓、对流换热系数、辐射系数、生热密度。建立与 LED 封装热分析相关的导热微分方程即泊松(Poisson)方程

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0 \quad (1)$$

Poisson 是常物性、稳态、三维且有内热源的温度场控制方程式。

在作有限元划分后,考虑到器件的外表面与周围空气进行对流换热,其对流换热系数 h 为常量(在计算中取值为 $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$),设置边界条件为

$$q_n = h(t_w - t_f) \quad (2)$$

在瞬态过程中,系统温度、热流率、边界条件等可能随时间变化,瞬态平衡以矩阵形式表示为

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (3)$$

各矩阵元分别为

$$C_{ij} = \sum_{\text{element}_e} \int (c_e N_i N_j) dV \quad (4)$$

$$K_{ij} = \sum_{\text{element}_e} \int \left\{ K \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] \right\} dV + \int_{r_{i,e}} (h N_i N_j) ds \quad (5)$$

$$Q_i = \sum_{\text{element}_e} \int (H N_i) dV + \int_{r_{i,e}} (h T_f N_i) ds \quad (6)$$

式中: $\dot{\Phi}$ 为单位时间内单位体积内热源的生成热; q_n 为垂直于表面的热流; t_w, t_f 分别为边界处和环境的温度; $[C]$ 为比热矩阵; $\{\dot{T}\}$ 为单位节点温度对时间导致的向量; $[K]$ 为传导矩阵,包括热导系数、对流系数、辐射率和形状系数; $\{T\}$ 为单位节点温度向

量; $\{Q\}$ 为节点热流率向量,包括生成热; N_i, N_j 为单元插值函数,取决于单元类型。

求解式(3)~(6)可得到器件内的温度分布及随时间的变化,并可得到器件内部的热应变和热膨胀应力。

2 大功率 LED 封装材料的优化设计

对 LED 的封装材料进行优化设计的目的是降低结温,把结温控制在 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。另一方面要降低芯片与散热基板之间的温度差,过大的温差会产生较大的热应力,将降低 LED 芯片的使用寿命,将温差控制在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内。总体优化方案为:芯片键合材料选择高导热银胶、纳米银焊膏、大功率芯片键合胶、Sn70Pb30 4 种;散热基板选择 Al_2O_3 、AlN、Al-SiC,铜钼合金 4 种,他们分别组合成 16 种不同的结构,使用 ANSYS 热分析软件仿真各组合的温度场分布,比较各种组合的 LED 的结温及结温与散热基板之间的温差,得出最优设计。

2.1 不同封装结构的有限元分析

假设芯片尺寸为 $(2 \times 2) \text{ mm}^2$,厚度为 0.5 mm ,周围环境温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,忽略热辐射效应,芯片产生的热功率为 3 W ,在有限元分析中将 $1.5 \times 10^9 \text{ W/m}^3$ 的生热率载荷施加于芯片上。由于轴对称性,取大功率 LED 模型的 1/4 建立几何模型,经网络划分、加载求解、后处理,得出 16 种组合的结温值和芯片与散热基板间的温差如表 1。

表 1 不同封装材料组合的结温和芯片与散热基板间温差

Table 1 The junction temperature and temperature difference between the substrate and chip under different combinations of packaging materials

Combination of material	Chip temperature $T_j / (^\circ\text{C})$	Temperature difference between the substrate and chip $\Delta T / (^\circ\text{C})$
Silver conductive adhesive with high thermal conductivity- Al_2O_3	236.38	45.32
Silver conductive adhesive with high thermal conductivity-AlN	118.90	46.904
Silver conductive adhesive with high thermal conductivity-Al-SiC	123.02	46.819
Silver conductive adhesive with high thermal conductivity-Copper molybdenum alloy	119.16	46.902
Nano-silver paste- Al_2O_3	200.25	8.84
Nano-silver paste-AlN	81.325	9.275
Nano-silver paste-Al-SiC	85.498	9.223
Nano-silver paste-Copper molybdenum alloy	81.584	9.272
Power chip bonding adhesive- Al_2O_3	209.09	17.78
Power chip bonding adhesive-AlN	90.486	18.395
Power chip bonding adhesive-Al-SiC	94.650	18.335
Power chip bonding adhesiv-Copper molybdenum alloy	90.745	18.391
Sn70Pb30- Al_2O_3	210.96	19.69
Sn70Pb30-AlN	92.428	20.34
Sn70Pb30-Al-SiC	96.589	20.279
Sn70Pb30-Copper molybdenum alloy	92.686	20.336

由此可见,当键合材料选择纳米银焊膏时,相比其他的 3 种键合材料,其结温和温差都小得多;而在 4 种基板材料中,除 Al_2O_3 外,使用其它 3 种材料得出的结温和温差相差不大,但相比而言,AIN 材料稍优,因此可以得出纳米银焊膏-AIN 组合具有最佳的散热效果。

2.2 散热基板厚度对芯片温度的影响

热阻最大的地方就是温度梯度最陡的地方,即在散热基板上^[12],说明散热基板对 LED 封装散热起着关键性作用. 为此,研究 AIN 材料厚度对芯片温度的影响,如图 2. 由图可见,当散热基板厚度超过 2 mm 后,其结温的变化幅度很小. 这是由于材料导热系数大,有着良好的散热性能,即便厚度较薄,其横向热阻也较小,因此靠增加基板厚度来提高散热能力作用不大。

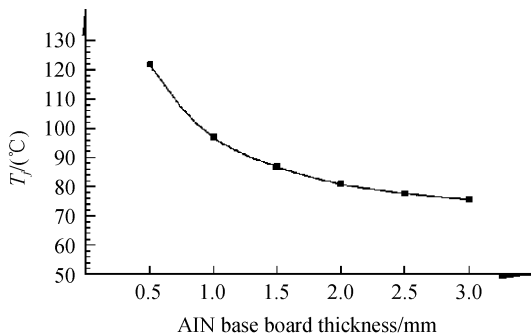


图 2 AIN 材料厚度对芯片温度的影响
Fig. 2 Influence of the chip temperature on AIN thickness

2.3 芯片输出功率对芯片结温的影响

目前单个大功率 LED 的功率约 1 W 至 5 W, 光通量为 30~50 lm. 为了实现照明级输出,需尽可能提高单个 LED 器件的输出功率. 本文模拟了 LED 芯片输出功率对结温的影响. 在封装材料为纳米银焊膏-AIN 组合下,当输出功率为 7 W 时,芯片结温达到 124.68 °C,如图 3,可能会导致芯片的失效. 这说明芯片的功率不能一味的增大,而应优化封装结构,采用芯片阵列方式满足照明级的需要。

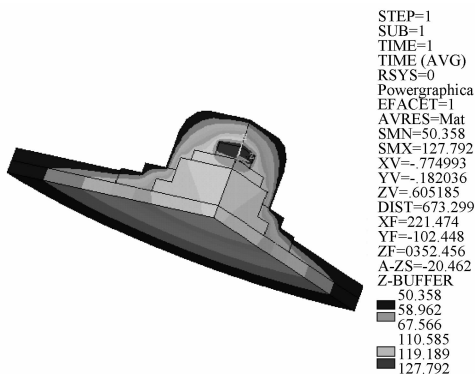


图 3 当输出功率为 7 W 时 LED 的温度场分布
Fig. 3 The temperature field distribution of LED with output power of 7 W

2.4 封装优化结构外接热沉时对芯片结温的影响

为进一步优化封装结构,获得更好的散热效果,本文模拟了在最优的封装结构中散热基板后面分别接上铜、铝热沉时芯片结温及结温与散热基板温差的影响. 假设外界热沉的尺寸与散热基板尺寸相同,厚度均为 2 mm,忽略外接热沉与基板的连接层,认为它们是紧密连接,当输出功率为 3 W 时,其温度场分布如图 4.

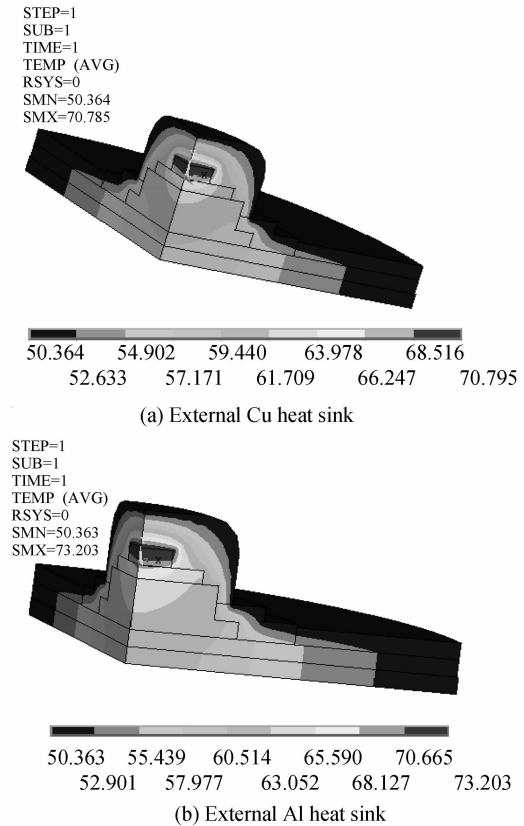


图 4 输出功率为 3 W 外接热沉时温度场分布
Fig. 4 The temperature field distribution in external heat sink with output power of 3 W

由温度场分布情况可知,外接铜热沉时,芯片结温为 69.478 °C,两者温差为 9.853 °C,外接铝热沉时芯片结温为 71.898 °C,温差为 9.67 °C. 由此可见,采用铜热沉相对铝热沉散热效果略强但不明显,这是由于虽然铜的导热系数(901 W/mK)比铝(238 W/mK)要高得多,但铝的比热容(702 J/kg·K)比铜(385 J/kg·K)高,能够存储的热量比铜大,在散热通道散热有限的条件下,铝储存热量的效果就显示出来了. 铜的价格相对铝热沉要高得多,综合考虑,建议采用铝热沉,也能达到理想的散热效果。

3 结论

根据传热理论所建立的模型,采用有限元热分析方法,对 4 种键合材料(高导热导电银胶、纳米银焊膏、大功率芯片键合胶、Sn70Pb30), 4 种散热基板

材料(Al_2O_3 、AlN、Al-SiC、铜钼合金),采用 ANSYS 有限元热分析软件分别对各种不同材料组合的温度场分布进行了研究,仿真分析表明:1)纳米银焊膏-AlN 组合具有最优异的散热效果且热应力匹配较好,是最优的封装材料组合;2)当散热基板厚度达到一定值时,靠增加厚度提高散热能力的作用不大;3)单个 LED 芯片的输出功率是有限的,应优化封装结构,采用多芯片阵列来提高发光效率以满足照明级的需要;4)外接热沉时,采用铝热沉能达到理想的散热效果。

参考文献

- [1] LIU Yi-bing, HUANG Xin-min, LIU Guo-hua. Research of heat release technology of based on power-LED[J]. *Journal of luminating Engineering*, 2008, **19**(1): 69-73.
刘一兵,黄新民,刘国华.基于功率型 LED 散热技术的研究[J].*照明工程学报*,2008,**19**(1): 69-73.
- [2] NARENDRAN N, GU Y, FREYSSINIER J P, *et al.* Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs[J]. *J Crystal Growth*, 2004, **268**(3-4): 449-456.
- [3] HU J Z, YANG L Q, Hwang W J, *et al.* Thermal and mechanical analysis of delamination in GaN-based light-emitting diode packages[J]. *J Crystal Growth*, 2006, **288**(1): 157-161.
- [4] MA Chun-lei, BAO Chao. Study on measurement method of thermal performances for high power LED and its application [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1803-1806.
马春雷,鲍超.高功率 LED 热特性测试方法研究与应用[J].*光子学报*, 2005, **34**(12): 1803-1806.
- [5] ZHANG Hai-bing, LÜ Yi-jun, CHEN Huan-ting, *et al.* Thermal characteristic analysis of high-power LEDs by structure functions [J]. *Journal of OptoelectronicsLaser*, 2009, **20**(4): 454-457.
张海滨,吕毅军,陈焕庭,等.利用结构函数分析功率型 LED 的热特性[J].*光电子激光*,2009,**20**(4): 454-457.
- [6] LI Bing-qian, BU Liang-ji, GAN Xiong-wen, *et al.* Research on the relationship of the change in forward voltage with temperature of light emitting diode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1349-1351.
李炳乾,布良基,甘雄文,等.LED 正向压降随温度的变化关系研究[J].*光子学报*, 2003, **32**(11): 1349-1351.
- [7] LIU Li-ming, ZHENG Xiao-dong. Measurements of LEDs spectral characteristics and junction temperature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1069-1073.
刘立明,郑晓东.LED 结温与光谱特性关系的测量[J].*光子学报*, 2009, **38**(5): 1069-1073.
- [8] VERONIS G, SUH W, LIU Y, *et al.* Coupled optical and electronic simulations of electrically pumped photonic-crystal-based light-emitting diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**(4): 044503.
- [9] WANG Jian, HUANG Xian, LIU Li, *et al.* Effect of temperature and current on LED luminous efficiency [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, **29**(2):358-361.
王健,黄先,刘丽,等.温度和电流对白 LED 发光效率的影响[J].*发光学报*,2008,**29**(2): 358-361.
- [10] ARIK M, WEAVER S. Chip scale thermal management of high brightness LED package[C]. *SPIE*, 2004, **5530**: 214-223.
- [11] ARIK M, BECKER C, WEAVER S, *et al.* Thermal management of LEDs: package to system[C]. *SPIE*, 2004, **5187**: 64-75.
- [12] WANG Chun-qing, LI Huan-ran. Simulation on temperature field and materials optimization of high-power white LEDpackage[J]. *Welding Joining*, 2008, (6): 2-5.
王春青,李焕然.大功率白光 LED 封装温度场模拟及材料优化[J].*焊接*,2008,(6): 2-5.

Optimization Design on Packaging Materials of High-power LED for Lighting

LIU Yi-bing^{1,2}, DAI Yu-xing¹, HUANG Zhi-gang²

(1 College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(2 Department of Mechanical and Electric, Shaoyang Professional-technology College, Shaoyang Hunan 422000, China)

Abstract: According to heat transfer theory, a finite element model of high-power light emitting diode (LED) was established. Four kinds of bonding materials (silver conductive adhesive with high thermal conductivity, nano-silver paste, power chip bonding adhesive, Sn70Pb30), and four kinds of substrate material (Al_2O_3 , AlN, Al-SiC, copper-molybdenum alloy) were chosen. ANSYS finite element thermal analysis software was used to simulate temperature field, and the optimal choice of materials for high-power LED package was obtained. The influences of the substrate thickness, chip output power and external heat sink on the LED junction temperature were studied. The results show that the nanometer silver soldering paste-AlN has the most superior radiation effect the increase of the substrate thickness will not increase the head dissipation capability obviously; because the signal LED output power is limited, the packaging structure should be optimized and the multi-chip array needs to be used to the illumination requirement; the external aluminum heat-sinking is able to achieve the ideal heat-sinking effect.

Key words: High power Light Emitting Diode(LED); Packaging; Bonding materials; Substrate materials