

大功率LED器件热阻的热敏感性研究

杨卫桥¹ 张建华^{2,3} 殷录桥^{2,3*}

¹上海半导体照明工程技术研究中心, 上海 201203

²上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072

³上海大学机械工程与自动化学院, 上海 200072

摘要 随着发光二极管(LED)功率的提高,散热的挑战性也越来越高,而热量的集聚会引起LED结温的上升。过高的结温不但会影响LED的光功率和光通量等性能参数,还会使器件寿命急剧衰减。因此掌握LED器件的升温规律成为提高器件可靠性的关键。实验中选取了不同封装结构的LED器件,对不同驱动电流、不同基板温度和不同封装材料的LED器件分别进行了热阻、光功率等性能测试。实验发现,随着电流的增加或者基板温度的升高,LED器件的热阻呈现先下降后上升的趋势,不同封装基板的器件变化幅度有所不同;升高基板温度时,铝基板封装的LED器件由于结温高光功率衰减快热阻呈现下降趋势。结果表明互连材料层、基板的导热能力是影响LED器件热阻差异的关键。

关键词 光学器件; 大功率发光二极管; 热阻; 光功率; 互连材料

中图分类号 TN364+.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.012302

Research in the Heat Sensitivity of Thermal Resistance of High Power LED Devices

Yang Weiqiao¹ Zhang Jianhua^{2,3} Yin Luqiao^{2,3}

¹Shanghai Research Center of Engineering and Technology for Semiconductor Lighting, Shanghai 201203, China

²Key Lab of Advanced Display and System Applications, Ministry of Education, Shanghai University, Shanghai 200072, China

³School of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract As the electric power of high-power light emitting diode (HP-LED) increasing, the challenge of heat dissipation is also becoming higher and higher. The heat which can't be dissipated from chip effectively will raise the junction temperature of the LED devices. High junction temperature will not only affect the optical power, flux and other performance of LED devices, but also decay the lifetime of device rapidly. Therefore, knowing the temperature rising rules of HP-LED devices well becomes the key to improve the reliability of devices. The effects of different drive current, different substrate temperatures and different packaging materials on thermal resistance of LED devices are studied. The results show with the increase of current or with the substrate temperature increases, the thermal resistance of LED devices trend to decline and then rise. The changes of thermal resistance of LED devices packaged by aluminum substrates and ceramic substrates are different. When the substrate temperature increases, the thermal resistance of LED devices interconnected by the Al substrate keeps declining because of the higher pn-junction temperature of the LED device. The tested results of the thermal resistance of LED devices interconnected by different materials show that the thermal resistance are obviously effected by the interconnect layer and the substrate.

收稿日期: 2014-06-16; 收到修改稿日期: 2014-07-10; 网络出版日期: 2014-12-18

基金项目: 国家973计划(2011CB013103)、上海大学科技创新基金及上海市教委高校青年教师培养计划

作者简介: 杨卫桥(1975—),男,博士,高级工程师,主要从事光学晶体窗口材料、III族氮化物衬底材料的生长和缺陷、半导体LED照明等方面的研究。E-mail: weiqyang75@qq.com

*通信联系人。E-mail: lqyin@shu.edu.cn

Key words optical devices; high-power light emitting diode; thermal resistance; radiant power; interconnected materials

OCIS codes 230.3670; 120.6780; 120.6810

1 引言

随着大功率发光二极管(LED)大规模和应用,散热对其可靠性的影响日益重要。结温和热阻是表征器件散热性能的重要热学参数^[1],功率型LED的光学特性和电学特性很大程度上依赖于结温,结温过高将会引起LED内量子效率降低、芯片寿命缩短、封装材料老化等问题。因此,对于大功率LED来说,散热性能的好坏决定其性能的优劣,掌握LED器件的结温和热阻变化特性便成为了提高器件可靠性的关键所在^[2]。

影响LED器件散热性能的因素有很多,使用高热导率的封装材料、成熟的封装工艺以及合适的环境条件等都能有效地降低器件的热阻。本文研究发现,使用高热导率的基板材料和芯片互连材料可以有效地改善器件的散热问题,同时,改变驱动电流和基板温度也会影响LED器件的热阻^[3-4]。

2 实验样品和实验方法

LED热阻定义为LED散热通道上的两个节点之间热功率流的阻值,热阻单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 或 K/W ,通常用 $R_{\theta j-s}$ 表示,其数学表达式为:

$$R_{\theta j-s} = (T_j - T_s) / P_D, \quad (1)$$

式中 $R_{\theta j-s}$ 为LED的pn结到基板的热阻, T_j 、 T_s 分别代表pn结温度和基板温度, P_D 是LED的热耗散功率。

P_D 无法直接测出,可以由以下公式求出:

$$P_D = P - P_o, \quad (2)$$

式中 P 为LED的总输入功率, P_o 为LED的光输出功率。由于仪器功能的原因,在测量LED热阻时,如果直接忽略了LED的光功率 P_o ,或者仅对LED的光功率进行粗略的估计^[5-6],这对于输入电能约有10%~30%转化为光能的大功率LED来说将导致较大的测量偏差。研究发现为了得到LED热阻的精确值,必须准确测量并扣除LED的光功率^[7]。实验中用T3Ster热阻仪测试热阻,用HAAS-2000高精度快速光谱辐射计测出不同条件下的光功率,在进行瞬态热处理的时候从总功率中扣除光功率。

实验所用的器件为实验室自己封装的LED器件,如图1所示。器件结构图如图2所示,为简单的芯片-互连层-铜线路板-基板结构。

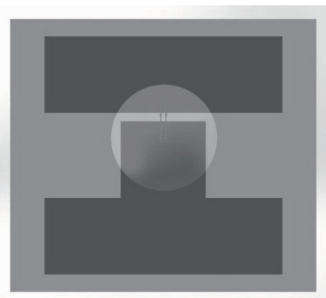


图1 封装的LED器件

Fig.1 Packaged LED device

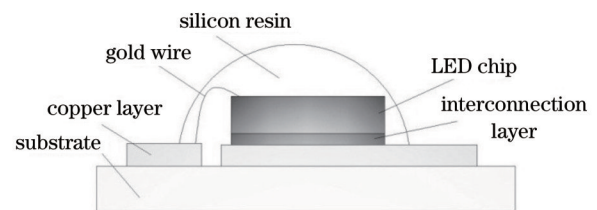


图2 LED器件结构图

Fig.2 Structure of LED device

T3Ster设备测热阻的计算是假定热量沿 Z 轴一维传输。测试中为了尽量避免有热量沿 X 、 Y 方向传输,通过温控台对LED器件的基板进行强制制冷,以保证尽量多的热量沿 Z 方向传输。

实验中所用芯片为Cree公司的EZ900芯片,额定工作电流为350 mA。芯片分别基于银胶(三种型号)、锡膏和金锡粘结,基板使用陶瓷基板和铝基板,具体封装规格如表1所示。实验时在LED器件底面涂覆导热硅脂,并粘结在T3Ster设备的温控台上,改变温控台的温度实现LED器件基板的控制,从而测试不同温度条件下LED器件热阻值。

表1 实验中使用的不同封装结构LED器件

Table 1 Different types of LED devices used in the experiments

Type	Substrate	Interconnect layer	Chip	Experiments
1	Al	Silver paste III	EZ900	Variations of $R_{\theta j-s}$ of HP-LED & I
2	Ceramic	Silver paste III	EZ900	(50 mA to 1000 mA) or T_s (25 °C to 85 °C)
3	Ceramic	Silver paste (I,II,III)	EZ900	Comparisons of the $R_{\theta j-s}$ of
4	Ceramic	Gold-tin	EZ900	HP-LED & 25 °C, 350 mA
5	Ceramic	Solder paste	EZ900	

3 实验结果及分析

3.1 驱动电流对LED器件热阻的影响

图3是基板温度为25 °C时,分别用铝基板和陶瓷基板封装的LED器件热阻(从芯片至基板)随驱动电流的变化趋势图。由图3中可知,在电流50 mA到1000 mA的变化过程中,器件热阻随着驱动电流的增加呈现先减小后增大的趋势。分析认为LED器件在小于350 mA电流下工作时,器件内的各种缺陷、材料的不匹配度比较稳定,对散热影响不大,热量从芯片传导到基板比较容易,芯片的电光转换效率较高,芯片内集聚的热量不多,芯片pn结与基板的温差增加量相对于热功率的增加量较小[见(1)式],此时LED器件的热阻随电流增加呈现轻微下降趋势。当电流超过350 mA的额定电流时,从图4中可知,光功率随着电流的变大而增加趋于缓慢,说明越来越多的电功率转换成热量,而且结温的升高会导致LED材料热导率的下降。研究表明,随着温度从25 °C上升,GaN的热导率会明显下降^[8-9],而且过大的电流还会导致LED各接触层之间失配度的变化、焊料的退化等^[10],这些原因会导致LED芯片热量积聚并达到饱和,随着驱动电流继续增加,继续增加的热量来不及传递到基板而引起pn结结温的迅速升高,导致pn结与基板的温差升高,芯片pn结与基板的温差增加量相对于热功率的增加量较大,从而热阻开始呈现升高趋势。相对于陶瓷基板,铝基板封装的LED器件,由于铝基板上表面导热性能略差,所以积累的热量更多,从而在350 mA之后的上升趋势明显高于陶瓷基板热阻上升趋势。

从图3中可以发现,在相同驱动电流下,铝基板封装的LED器件热阻值比陶瓷基板封装的LED器件大很多。在驱动电流从50 mA逐渐升高到1000 mA的过程中,铝基板封装的LED器件的热阻值从18.79 °C/W上升到26.86 °C/W,而陶瓷基板封装的LED器件热阻值从10.88 °C/W上升到12.64 °C/W,相比铝基板封装的器件变化较小。造成此种差异的原因是铝基板表面覆盖一层绝缘层,该绝缘层的热导率极低,成为铝基板的散热瓶颈,影响整个结构的散热效果。由于两种基板封装的LED器件热功率比较接近,但热阻差异比较大,所以验证了在基板温度25 °C时热阻的差异性及变化主要是由于热量的积累并逐步饱和导致的结温升高引起的。图4是两种基板封装的LED器件光功率、电光转换效率随着驱动电流增加的变化趋势,随着驱动电流的增加,铝基板封装的LED器件光功率增加趋势变缓,电光转化率降低的趋势相对于陶瓷封装的LED器件快的现象,验证了结温的升高导致了LED器件光功率增幅变缓,电光转换率降低,从而引起了热阻的变化。

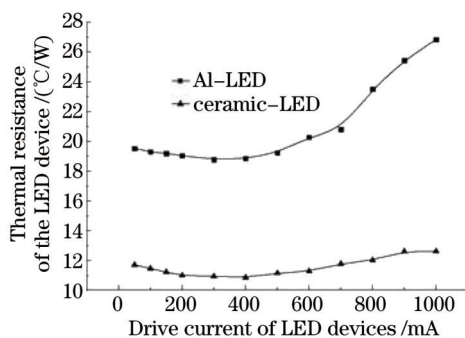


图3 LED器件的热阻随驱动电流变化曲线

Fig.3 Thermal resistance of LED devices with different driving currents

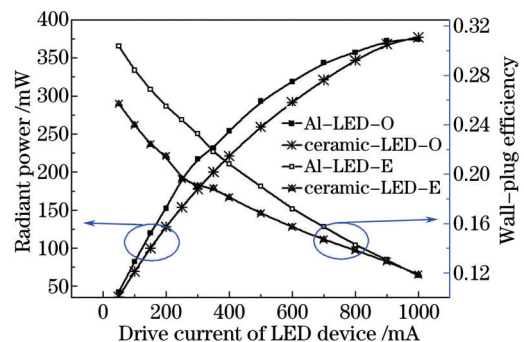


图4 LED器件的光性能随驱动电流变化曲线

Fig.4 Optical performances of LED devices with different driving currents

3.2 基板温度对LED器件热阻的影响

图5是驱动电流为350 mA,基板温度从25℃变化至85℃(每10℃设置一个测量点),得到的铝基板和陶瓷基板封装的LED器件的热阻随基板温度的变化热阻变化趋势图。由图5可知,铝基板封装的LED器件热阻随着基板温度的增加,LED器件的热阻呈现下降的趋势,开始时热阻变化较快,温度高时变化缓慢,陶瓷基板封装的LED器件热阻在基板温度65℃以下是减小趋势,而在65℃以上会有一段回升。分析认为原因与不同电流下的热阻变化规律类似,如表2所示,基板温度在65℃以下时,芯片的结温在80℃左右,此时,器件的工作状态良好,器件内各种缺陷达到稳定,热阻较小,温度的增加引起的电光转换效率降低趋势略缓(相对于基板温度65℃以上时),而此时LED芯片的温升相对较大(如表2所示,温升呈现降低趋势),参考(1)式,可以认为热耗散功率的增加量相对于温升的增加量较小,所以热阻呈现下降趋势。而基板温度大于65℃时,芯片结温在80℃~110℃,GaN的热导率会明显下降^[9],从图6也可以发现,电光转换效率逐渐降低趋势加快(热耗散功率升高率变大),而温升变化趋势减缓,所以铝基板封装的LED器件热阻继续下降,而陶瓷基板封装的LED器件电光转换效率变化幅度较小,而此时器件处于高温状态,陶瓷横向导热能力较强,热量容易沿X、Y轴方向散热,从而降低了计算中的热耗散功率,所以陶瓷基板的LED器件热阻有略微上升的趋势。

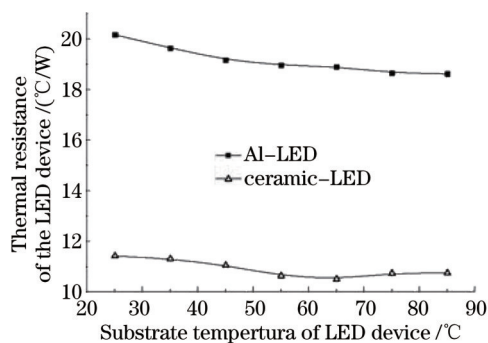


图5 LED器件的热阻随基板温度变化曲线

Fig.5 Thermal resistance of LED devices with different substrate temperatures

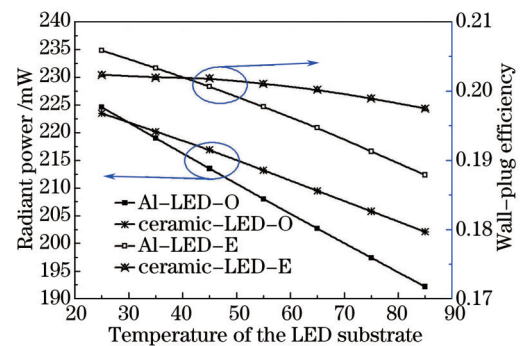


图6 LED器件的光功率随基板温度变化曲线

Fig.6 Optical performances of LED devices with different substrate temperatures

图6为两种基板封装的LED器件随着基板温度变化得到的光功率、电光转换效率的变化图。由图6可以看出,光功率随着基板温度的上升呈现线性减小趋势,而电光转换效率随着基板温度的升高下降趋势加快。铝基板封装的LED器件斜率比陶瓷基板封装的LED器件大得多,分别为 $-0.54 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ 和 $-0.36 \text{ mW}/^\circ\text{C}$,说明陶瓷基板封装的LED在温度升高时光性能略稳定,原因为陶瓷基板导热能力更强,使芯片的结温略小(如表2所示),LED芯片的光输出高。表2还可以发现一个现象,就是LED器件热阻随着基板温度的升高而降低,但是此时结温是上升的,所以在评估工作条件对LED器件的热学性能影响时,需要综合评估热阻、结温的变化。

表2 LED器件在不同基板温度下的结温

Table 2 Junction temperature of LED devices at different substrate temperatures

$T_A / ^\circ\text{C}$	Aluminum substrates LED		Ceramic substrates LED	
	$T_j / ^\circ\text{C}$	Temperature rise $/^\circ\text{C}$	$T_j / ^\circ\text{C}$	Temperature rise $/^\circ\text{C}$
25	47.5	22.5	41.1	16.1
35	56.6	21.6	50.0	15
45	66.1	21.1	59.3	14.3
55	75.6	20.6	68.8	13.8
65	85.2	20.2	78.3	13.3
75	95.0	20	88.1	13.1
85	104.8	19.8	98.0	13

3.3 互连材料对LED器件热阻的影响

芯片互连材料是LED器件热阻中重要的一环,实验中使用的LED器件分别使用银胶(三种型号)、金锡和锡膏互连,均采用陶瓷基板封装,每种器件选择3个样本,测试基板温度25℃和工作电流350 mA条件下

的热阻,取其平均值,得到不同互连材料封装的LED器件的热阻值,如表3所示。从表中可以看出,互连层的热导率对LED器件的热阻有明显的影响。使用热导率为 $14\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的银胶封装的LED器件热阻为 $13.79\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$,而用热导率为 $67\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的锡膏封装的LED器件热阻大大降低,为 $9.57\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。实验结果说明在LED器件的封装结构中,芯片与基板之间的互连材料是影响LED器件热阻的一个重要因素。

表3 不同互连材料封装的LED器件热阻值

Table 3 Thermal resistance of LED devices with different interconnect materials

Interconnected materials	Silver paste I	Silver paste II	Silver paste III	Gold-tin	Solder paste
Thermal conductivity $/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	14	20	28	57	67
Thermal resistance $/(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	13.79	11.57	11.14	10.06	9.57

4 结 论

分别研究了驱动电流(50~1000 mA)和基板温度(25 $^{\circ}\text{C}$ ~85 $^{\circ}\text{C}$)对铝基板、陶瓷基板封装的LED器件的热阻影响趋势。结果显示,LED器件的热阻随着驱动电流、基板温度的增加分别呈现先下降后上升、下降的趋势,其中使用铝基板封装的LED器件热学性能和光学性能变化幅度明显高于陶瓷基板封装的LED器件,因为铝基板的导热性能差,容易造成LED芯片的热饱和,从而引起结温的变化幅度大,造成光学性能相应的变化幅度略大。同时还测试了多组热导率不同的芯片互连材料封装的LED器件的热阻,测试结果表明,芯片互连材料是影响LED器件热阻的一个重要因素,发现互连层材料热导率越大,器件的热阻越低。

参 考 文 献

- 1 Paasschens Jcj, Harmsma S, Van der Toom R. Dependence of thermal resistance on substrate and actual temperature [C]. Proceedings of the 2004 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Montreal, Canada, 2004. 96-99.
- 2 Mao Defeng, Guo Weilin, Gao Guo, *et al.*. Research on the thermal resistance and junction temperature of high-power LEDs[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2010, 30(2): 308-312.
毛德丰, 郭伟琳, 高 国, 等. 功率LED结温和热阻在不同电流下的性质研究[J]. 固体电子学研究进展, 2010, 30(2): 308-312.
- 3 Liew Weiching, Ong Chaoyui, Devarajan Mutharasu. Thermal analysis of high power LEDs at different drive-in current [C]. 2nd Asia Symposium on Quality Electronic Design, Penang, Malaysia, 2010. 70-75.
- 4 Lee Szeyen, Mutharasu Devarajan. Thermal analysis of multi-chip LED package with different position and substrate temperatures[C]. 2011 IEEE 2nd International Conference on Photonics, Kota Kinabalu, Malaysia, 2011. 1-4.
- 5 Yu Binhai, Wang Yaohao. Junction temperature and thermal resistance affect the development of HP-LED[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2005, 26(6): 761-766.
余彬海, 王焱浩. 结温与热阻制约大功率LED发展[J]. 发光学报, 2005, 26(6): 761-766.
- 6 Chen Liucaroline, Lehtiniemi Reijo, Vandeveld Bart, *et al.*. Steady state and transient thermal characterization for flip chip interconnection on flexible substrate[C]. 7th Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, Como, Italia, 2006. 1-6.
- 7 Zhuang Peng. Thermal resistance measurement and structure identification for high-power LED[J]. Advanced Display, 2008, (9): 25-29.
庄 鹏. 大功率LED的热阻测量与结构分析[J]. 现代显示, 2008, (9): 25-29.
- 8 Kotchetkov D, Zou J, Balandin Aa, *et al.*. Effect of dislocations on thermal conductivity of CaN layers[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(26): 4316-4318.
- 9 Christensen Adam, Nicol David, Ferguson Lan, *et al.*. Thermal design considerations in the packaging of GaN based light emitting diodes[C]. Fifth International Conference on Solid State Lighting, Denver, Colorado, 2005. 1-14.
- 10 Singal Bemards. Factors affecting semiconductor device thermal resistance measurements[C]. Fourth Annual Semiconductor Thermal and Temperature Measurement Symposium, San Diego, 1988. 12-18.

栏目编辑: 韩 峰