

利用结构函数分析功率型 LED 的热特性*

张海兵, 吕毅军**, 陈焕庭, 李开航, 高玉琳, 陈忠, 陈国龙
(厦门大学物理系, 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要: 运用电学法测量功率型 LED 冷却瞬态温度曲线, 通过数学方法将其转化为积分和微分结构函数来分析器件各区域的热阻和热容, 结果发现, 各层材料的测量值与理论值基本一致。1 μs 的瞬态数据采集精度和高的重复性保证了实验结果的准确性和可靠性, 运用这种方法比较了 3 种不同金属芯印刷电路板 (MCPCB) 对功率型 LED 的散热效果, 贝格斯 Al 基板散热性能最好, ANT Al 基板次之, 普通 Al 基板最差。研究表明, 利用结构函数分析功率型 LED 的热特性是一种强有力的方法。

关键词: 功率型 LED; 结构函数; 热阻; 金属芯印刷电路板 (MCPCB)

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2009)04-0454-04

Thermal characteristic analysis of high power LEDs by structure functions

ZHANG Hai-bing, LU Yi-jun**, CHEN Huan-ting, LI Kai-hang, GAO Yu-lin,
CHEN Zhong, CHEN Guo-long

(Department of Physics, Xiamen University, Fujian Engineering Research Center for Solid-state Lighting, Xiamen 361005, China)

Abstract: The cooling transient temperature curves of high-power LEDs are measured by electrical method. The cumulative and differential structure functions are extracted from these curves to analyse thermal resistances and thermal capacitances of all regimes of high-power LEDs with numeric computational method. It is found out that calculated and measured values of various materials are essentially conformable. The sampling resolution of 1 μs of transient data and high repetition assure the veracity and reliability of experimental result. Subsequently, thermal conduction capabilities of three different metal core printed circuit boards (MCPCBs) with high-power LEDs are compared by this method, and it is discovered that bergquist's MCPCB has the best thermal conduction capability, ANT's MCPCB takes second place, and the common MCPCB is the worst. So the structure functions are powerful tools for thermal characteristic analysis of high-power LEDs.

Key words: high-power LEDs; structure function; thermal resistance; metal core printed circuit board (MCPCB)

1 引言

功率型 LED 的发光效率和可靠性依赖于成功的热管理。LED 的温升效应会降低总体效率, 缩短寿命和影响其光度、色度^[1]与电气参数, 因此对功率型 LED 的热学研究就显得十分重要。测量 LED 热阻的主要方法有红外微象仪法、电学法、光谱法及光功率法。其中, 电学法利用 LED 在恒定电流下正向电压与温度成线性反比关系来测量芯片的结温, 进而得到热阻^[2], 因其操作简单、精度高而得到广泛运用。结到管壳的热阻可以衡量功率型 LED 的散热质量, 但封装器件各层的导热性能无法获知, 更无法比较同一层不同材料的导热效果, 比如焊接层、粘结层^[3-5]和基板等。因为封装器件的热瞬态响应函

数为芯片周围物体几何结构、热学属性以及热流路径结构的特性表现^[6]。本文利用电学法测量得到高时间精度的 LED 冷却瞬态温度曲线, 通过数学方法将其转化为积分和微分结构函数来分析功率型 LED 各区域的热阻和热容, 很好地解决了这些问题。

2 理论

在给某封装器件芯片处加上热功耗 P_{th} 一段时间后切断热源, 芯片的结温度会逐渐下降, 其热瞬态响应函数可写为^[7]

$$T_j(t) = T_j(t) - T_a = P_{th} \int_0^t R(\tau) [1 - \exp(-\tau/\tau)] d\tau \quad (1)$$

式中: T_a 为环境温度 (“环境”是指热量最终到达的位置,

* 收稿日期: 2008-09-01

** 基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2006AA03A175); 福建省科技项目 (2006H0092, 2008J0030); 厦门市重大专项资助项目 (3502Z20061004)

** E-mail: yjlu@xmu.edu.cn

可以是空气或控温冷板); $R(z)$ 为时间常数谱; z 为时间常数; 是热阻 R 和热容 C 的乘积。

令 $z = \ln t$, 得

$$T_j(z) = P_{th} \int_0^z R(z') [1 - \exp[-\exp(z - z')]] dz'$$

上式两边对 z 求导得

$$\frac{d}{dz} T_j(z) = P_{th} R(z) \odot \exp(z - \exp z)$$

式中, \odot 为卷积符号。上式为卷积型微分方程, 通过反卷积算法可解得时间常数谱 $R(z)$ ^[8]。

将时间常数谱 $R(z)$ 转化为一维 RC 热学网络的结构函数^[9,10]。首先将得到的 $R(z)$ 分成多个宽为 z 的微小部分, 如图 1(a) 所示, 每一部分相当于一个 RC 环路。通过离散化的时间常数谱可得到 Foster 型热学网络, 如图 1(b) 所示。只要 z 足够小, 就可得到与实际较接近的模型。把 Foster 型热学网络转化为可直接表示出实际热流结构的 Cauer 型热学网络, 如图 1(c) 所示。利用 Foster-Cauer 模型间的数学转化关系可计算出 Cauer 型热学网络。再通过 Cauer 型热学网络, 把各个热阻和热容进行叠加, 可得到积分结构函数 $C(R)$, 如图 1(d) 所示。

$$C = \int_0^x c(x) A(x) dx, R = \int_0^x \frac{dx}{A(x)}$$
 (2)

式中: $c(x)$ 是单位体积的热容; $\lambda(x)$ 是热导率; $A(x)$ 沿热流路径在 x 处的横截面积。在 $x=0$ 处表示为热源的位置。

由式(2)得微分结构函数 $K(R)$ 为

$$K(R) = \frac{dC}{dR} = c(x) (\lambda(x) A^2(x))$$
 (3)

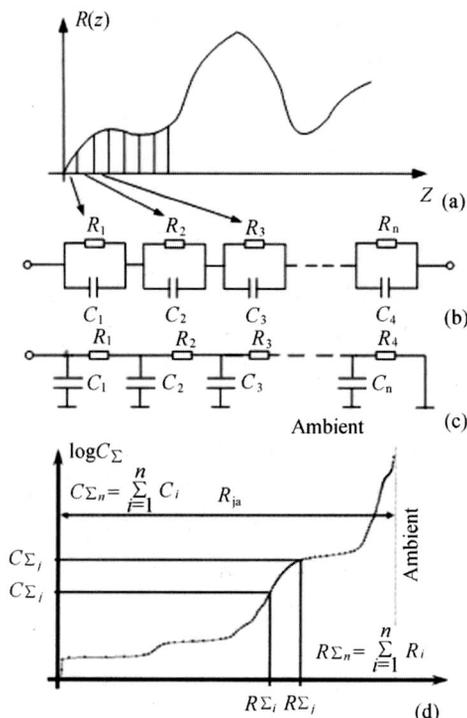


图 1 (a) 时间常数谱 $R_h(z)$; (b) Foster 型热学网络; (c) Cauer 型热学网络; (d) 积分结构函数

Fig.1 (a) Time-constant spectrum; (b) Foster thermal network model;

c) Cauer thermal network model; (d) Cumulative structure function

积分结构函数描述的是封装器件热流路径上各区域的热阻与热容参数, 在图 1(d) 中 R_{ja} 是指结到环境的热阻, 它是各区域热阻之和; 利用微分结构函数易于分辨出热流路径上 2 种材料的界面位置^[7]。目前普遍采用测量热瞬态响应函数, 提取积分和微分结构函数的方法来分析电子封装器件的热特性以及器件各区域的热阻和热容。这种方法最大的优点是简单、快速, 并且对测试的边界条件没有特别限制。

3 测试系统和实验

功率型 LED 热阻测试系统由 Teraled 光测试仪和 T3ster 热瞬态测试仪^[11]组成。Teraled 光测试仪配有控温夹具, 控温精度为 0.1 °C。实验需测得:

- 1) 功率型 LED 通测试电流时的电压温度系数 s ;
- 2) LED 通上加热电流稳定后的电功率 P_e 和光功率 P_o , 得到热功耗 $P_{th} = P_e - P_o$ 。
- 3) 断掉加热电流后通上测试电流时测得瞬态电压曲线 $V(t)$, 得到相应的冷却瞬态温度曲线 $T(t) = V(t)/s$ 。

T3ster 配有专门的后处理分析软件, 可以快速地将瞬态温度曲线转化为积分和微分结构函数。T3ster 采集瞬态数据的精度高达 1 μ s, 保证了分析软件分析结果的准确性。

实验样品为 1 W 蓝光 LED, 芯片面积是 1 mm \times 1 mm, 衬底是蓝宝石。图 2 为其封装结构和金属芯印刷电路板 (MCPCB) 示意图。由图 2 可知, 热源在 LED 结区处产生, 热流依次经过蓝宝石、Ag 胶、Cu 块、导热胶和 MCPCB, 最后到达冷板, 其中 MCPCB 俗称 Al 基板, 由覆 Cu 层、绝缘层和 Al 板 3 层结构组成。实验时, 样品贴付在冷板上, 加热电流为 350 mA, 加热时间 60 s, 测试电流为 10 mA, 测试时间为 100 s, 冷板的温度控制在 25 °C。

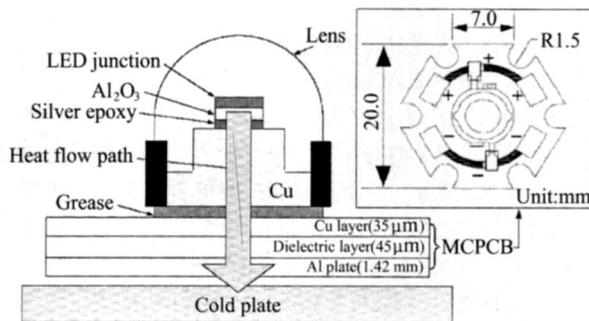


图 2 功率型 LED 封装结构和 MCPCB 板示意图
Fig.2 Schematic diagram of encapsulated structure of a high power LED and MCPCB

4 实验结果分析

首先对带 MCPCB 的 1 W 蓝光 LED 分 3 种界面情况进行测试: (a) MCPCB 下涂导热胶后再贴附于冷板上; (b) MCPCB 直接贴附于冷板上; (c) MCPCB 与冷板间放一薄塑料片。图 3 为该 LED 在 3 种界面情况下测得的冷却瞬态温度曲线图。由图 3 可知:

- 1) 在 1.701 s 之前 3 条曲线具有非常好的重复性, 这应是

LED 结到 MCPCB 间的结构引起的热瞬态响应,同时也说明了 LED 结到 MCPCB 间的物理信息不会因外部的边界条件不同而丢失;

2) LED 结到 MCPCB 间引起的温升 $T_{jb} = 14.84$ K,而实验测得热功耗 $P_{th} = 1.02$ W,得 LED 结到 MCPCB 的热阻 $R_{jb} = T_{jb}/P_{th} = 14.54$ K/W;

3) 在这3种界面情况下 LED 结到冷板间引起的温升分别为 $T_a = 15.50$ K、 $T_b = 18.16$ K和 $T_c = 19.79$ K,可知 T_a 与 T_{jb} 很接近,在实验误差允许范围内,为简化实验和快速测试,可将 MCPCB 下涂导热胶测得的结到冷板间引起的温升视为 LED 结到 MCPCB 间引起的温升,进而得到 LED 结到 MCPCB 的热阻;

4) 在 10 ms 前温度变化非常迅速,高时间精度的瞬态数据采集是必要的。

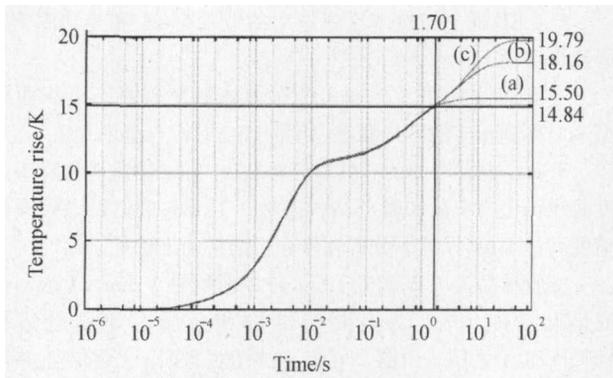


图3 蓝光功率型 LED 在不同界面情况下测得的冷却瞬态温度曲线

Fig.3 Cooling transient temperature curves of a blue power LED in different interface conditions

图4和图5分别是图3的瞬态温度曲线得到的积分和微分结构函数。在积分结构函数图中,斜率小的区域表示该区域具有低的热导率或者小的横截面积,斜率大的区域则反之。在微分结构函数图中,波峰表示该区域具有高的热导率,波谷表示该区域具有低的热导率,波峰与其相邻波谷间的拐点代表2种材料的界面位置^[9]。功率型 LED 热流路径的各区域所对应的材料都已在图2中标示出。Cu 块和 Al 板间的热阻主要由导热胶和 MCPCB 的绝缘层决定,这是因为在 Cu 块和 Al 板间的覆铜层的热阻极低,可忽略不计。图4中 Cu 块区出现一段斜率小的区域,这是由于 Cu 块横截面积突变引起的。从图很容易发现各界面的连接层是散热通道的瓶颈,如实验测得 Ag 胶的热阻高达 6.87 k/W,导热胶和绝缘层的总热阻 2.78 k/W。还可看出,LED 结到 MCPCB 的热阻 $R_{jb} = 14.06$ k/W,与上面通过温升算出的 R_{jb} 相近。表1为各材料热阻和热容的理论值和测量值的比对,可见,它们之间基本一致。其中,只有 Al 板热阻的理论值和测量值偏差较大,这是因为热流通过 Al 板时实际上为辐射状热传导,而理论值是通过一维热传导模型算得的。以上这些论证了结构函数的准确性和实用性,也说明了利用结构函数分析功率型 LED 的热特性是一种强有力的方法。

通过结构函数可以方便地区分不同 MCPCB 的散热性能。

对同一个 1 W 蓝光 LED 分别带 3 种同样外形不同厂家的 MCPCB 进行测试比对,MCPCB 的外形尺寸如图 2 所示。MCPCB 是将原有的 PCB 附贴在另一种热传导效果更好的金属上(Al、Cu),以此来强化散热效果,中间绝缘层是导热绝缘材料,是 MCPCB 的核心技术所在。这种技术能有效解决大功率器件在结构紧凑的趋势下带来的散热问题。从图 5 可知,在(a)界面下 Al 板区的波峰不是很明显,而在(b)、(c)界面下波峰很明显。为了在微分结构函数中显示出 Al 板区的波峰,实验选择在(b)界面下进行。图 6 为 LED 分别带 3 种不同 MCPCB 时测得的冷却瞬态温度曲线:(d)为 LED 带贝格斯 Al 基板;(e)

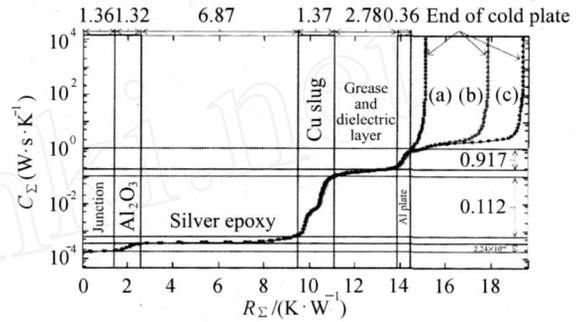


图4 从图3的冷却瞬态温度曲线得到积分结构函数

Fig.4 Cumulative structure functions,calculated from cooling transient temperature curves in Fig.3

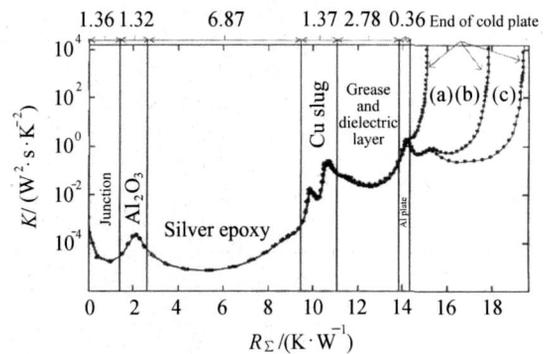


图5 从图3的冷却瞬态温度曲线得到微分结构函数

Fig.5 Differential structure functions,calculated from cooling transient temperature curves in fig.3

表1 各材料热阻和热容的理论值和测量值的比对

Tab.1 Comparison between calculated and measured value of thermal resistances and thermal capacitances about various materials

Parameters	Al ₂ O ₃	Cu slug	Al plate	
L/mm	0.08	1.9 0.9	1.42	
A/mm ²	1	7.065 25.700	309.79	
C/[W·s/(cm ³ ·K)]	3.025	3.395	2.391	
/[W/(m·K)]	50	264	203	
C _{th} /[W·s/K]	Calculated	2.42 × 10 ⁻⁴	0.124	1.052
	Measured	2.24 × 10 ⁻⁴	0.112	0.917
R _{th} /[K/W]	Calculated	1.60	1.15	0.02
	Measured	1.32	1.37	0.36

为 LED 带 ANT Al 基板;(f) 为 LED 带普通 Al 基板。由图 6 可知,在 0.352 s 之前 3 条曲线具有非常好的重复性,这是 LED 结到 Cu 块间的结构引起的热瞬态响应,所以 LED 结到 Cu 块间引起的温升 $T_{js} = 12.10$ K,得 LED 结到 Cu 块的热阻 $R_{js} = T_{js}/P_h = 11.86$ k/W。

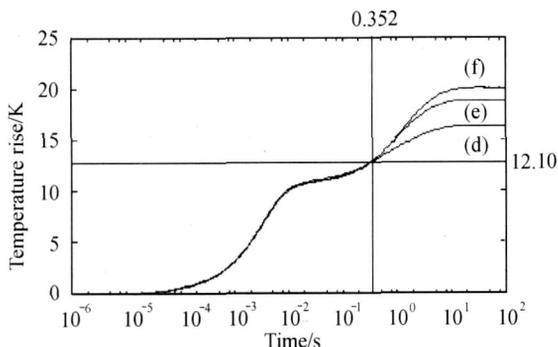


图 6 同一蓝光功率型 LED 带不同 MCPCB 测得的冷却瞬态温度曲线

Fig. 6 Cooling transient temperature curves of the same blue power LED with different MCPCBs

图 7 为从图 6 的冷却瞬态温度曲线得到微分结构函数。从图 4、5 和 7 可知,LED 结到 Cu 块的热阻 $R_{js} = 10.92$ k/W,与上面通过温升算出的 R_{js} 相近,再次论证了结构函数的准确性和实用性。LED 与这 3 种不同 MCPCB 粘结时导热胶的热阻可近似为一样的,所以从图 7 各 Al 板区的波峰间的相对位置可大致判断各绝缘层的散热效果,即可判断不同厂家的 MCPCB 的散热性能好坏。从图 7 可知,贝格斯 Al 基板散热性能最好,ANT Al 基板次之,普通 Al 基板最差。

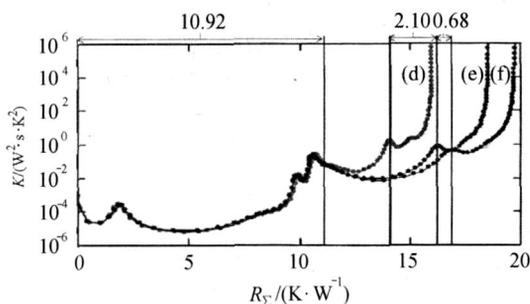


图 7 从图 6 的冷却瞬态温度曲线得到微分结构函数

Fig. 7 Differential structure functions, calculated from cooling transient temperature curves in Fig. 6

5 结论

运用电学法测量功率型 LED 冷却瞬态温度曲线,通过数学方法将其转化为积分和微分结构函数来分析功率型 LED 封

装器件各区域的热阻和热容。首先对一带 MCPCB 的 1 W 蓝光 LED 分 3 种界面情况进行测试,1 μ s 的瞬态数据采集精度和高的重复性保证了实验结果的准确和可靠。实验发现,3 种材料的热阻和热容与理论值基本一致,有力地论证了结构函数的准确性和实用性。运用这种方法比较了 3 种同样外形不同厂家的 MCPCB 对功率型 LED 的散热效果,得知贝格斯 Al 基板散热性能最好,ANT Al 基板次之,普通 Al 基板最差。研究表明,利用结构函数分析功率型 LED 的热特性是一种强有力的方法。

参考文献:

- [1] Farkas G,Poppe A,Schanda J, et al. Complex characterization of power LEDs: simultaneous measurement of photometric/radiometric and thermal properties[A]. CIELED Conference. 2004.
- [2] JESD51-1-1995. Integrated circuits thermal measurement method-electrical test method(single semiconductor device) [s].
- [3] Kim HH,Choi S H,Shin S H,et al. Thermal transient characteristics of die attach in high power LED PKG[J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48(3) :445-454.
- [4] Yin J ,van Wyk J ,Odendaal W G. Comparison of transient thermal parameters for different die-connecting approaches[J]. Industry Applications ,IEEE Transactions on,2006, 42(6) :1403-1411.
- [5] Rencz M,Szekely V ,Morelli A,et al. Determining partial thermal resistances with transient measurements ,and using the method to detect die attach discontinuities [A]. Semiconductor Thermal Measurement and Management [C]. 2002, 15-20.
- [6] Lasance C J M. The European project PROFIT: prediction of temperature gradients influencing the quality of electronic products[A]. Semiconductor Thermal Measurement and Management ,2001, 120-125.
- [7] Szekely V ,VAN Bien T. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices :A measurement and identification method[J]. Solid state Electron,1988, 31(9) :1363-1368.
- [8] Szekely V. Identification of RC networks by deconvolution: chances and limits[J]. Circuits and Systems I:Fundamental Theory and Applications ,IEEE Transactions on,1998, 45(3) :244-258.
- [9] Micred. Properties of the structure function and its use for structure identification and for compact model generation. [EB/OL]www.micred.com/stfunc.html,2000.
- [10] Szekely V. On the representation of infinite-length distributed RC one-ports[J]. Circuits and Systems,IEEE Transactions on,1991, 38(7) : 711-719.
- [11] Micred. T3ster—the thermal transient tester [EB/OL]. http://www.micred.com/t3ster.html.2004.

作者简介:

张海兵 (1985 -) ,男,硕士研究生,主要从事半导体照明检测。