

\* 基金项目: 863 重大专项(2006AA03A175); 福建省重点科技项目(2006H0092); 厦门大学科技创新项目(XDKJ CX20051011)

# LED 热阻测试方法的研究进展\*

陈焕庭, 吕毅军, 王亚军, 陈 忠

(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:** 本文从 LED 热阻测试方法原理以及 LED 热学模型出发, 介绍了向列型液晶温度记录(NLCT)、电学参数法、光谱法以及光功率法、管脚温度法四种 LED 热阻测量方法。对不同的测试方法的原理、步骤和影响测试结果的因素进行分析和比较, 并讨论各种测试方法适用的范围。

**关键词:** LED, 热阻, 结温

中图分类号: TN383.1

文献标识码: A

## Advances In Measurement Method For LED Thermal Resistance

CHEN Huan-ting, LU Yi-jun, WANG Ya-jun, CHEN Zhong

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

**Abstract:** Based on the principle of LED thermal resistance measurement and LED thermal model. Several thermal resistance measurement methods of LED devices or chips have been reported in this paper, including Nematic liquid crystals thermographs method, electrical measurement method, spectra-method and pin-method. The differences between measurement methods, procedures, conditions which will influence the measuring results as well as their correspondingly applied fields are analyzed and compared in details.

**Keywords:** LED; thermal resistance; junction temperature

## 1 引言

在最近 5 年中, LED 省电、寿命长、耐震动、响应速度快和冷光源等特点, 广泛应用于指示灯、信号灯、显示屏、景观照明等领域。增大 LED 输入功率将导致芯片温度升高, 影响器件光通量、颜色、主波长以及正向电压等光度、色度和电气参数, 加速 LED 老化过程, 使其提前失效。尤其对于大功率 LED 器

件, 其热学特性直接影响到 LED 的工作温度、使用寿命和发光效率。因此如何控制大功率 LED 的热能量, 分析功率型 LED 芯片的工作温度和器件热阻, 是 LED 器件封装和器件应用设计必须着重解决的核心问题。因此, 对大功率 LED 的结温、热阻等热特性参数进行准确快速地测试, 并规范各种测试方法, 提出标准化的测试技术路线, 从而满足检测中心和企业需要。

目前测量LED结温以及热阻的主要方法有:红外热成像法、电学参数法、光谱法及光功率法。这些方法基于不同的测量原理,可以测试出器件表面的工作温度或是在某个状态下的瞬态温度。因器件材料及封装形式的不同,各种测试方法的应用范围也不同。本文在简述LED热学特性以及相关热学参数测试原理的基础上,介绍了近年来LED热阻测试的各种方法,同时分析和比较了这些测试方法的适用范围和条件。

## 2 LED热学特性测试原理

热阻定义为热流通道上的温度差与通道上耗散功率之比:

$$\theta_{JX} = \left[ \frac{T_J - T_X}{P_{JX}} \right] = \left[ \frac{T_J - T_X}{V_f \times I_f - P_{\text{光}}} \right] \quad (1)$$

式(1)中 $\theta_{JX}$ 为从LED结点至参考点之间的热阻; $T_J$ 为LED结点温度; $T_X$ 为LED器件参考点温度; $P_{JX}$ 为热损耗功率,大小为耗散电功率( $V_f \times I_f$ )与光功率( $P_{\text{光}}$ )的差值,小功率待测器件光转换效率较低,因此式(1)中的 $P_{\text{光}}$ 损耗可忽略不计,若大功率器件则可大大提高电光转换效率,因此在测试热阻过程中需考虑 $P_{\text{光}}$ 的损耗<sup>[2]</sup>。

图1中LED热学模型<sup>[2]</sup>PN结产生热量从以下热传导路径传输:PN结-反射腔-印刷板-空气。此模

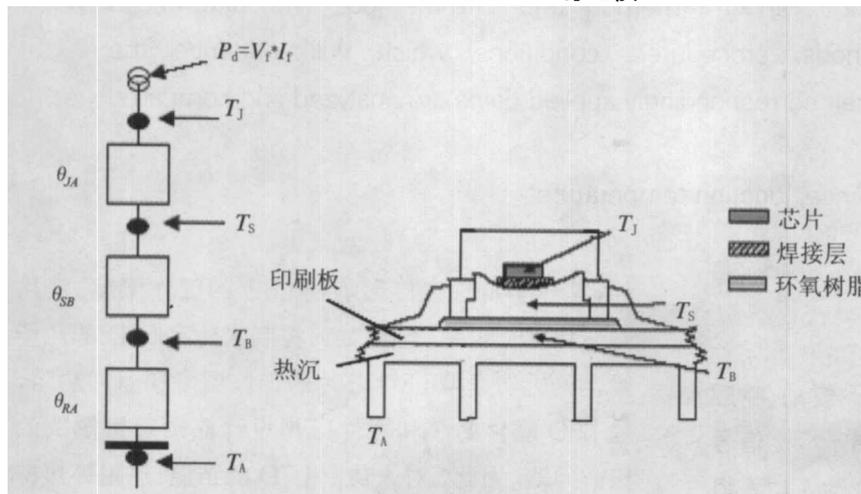


图1 LED热学模型

型总热阻可表示为热传导路径上各个热阻的总和。

$$\theta_{JA} = \theta_{JS} + \theta_{SB} + \theta_{BA} \quad (2)$$

式(2)中 $\theta_{JS}$ 为芯片和芯片粘结剂到反射腔之间形成的热阻; $\theta_{SB}$ 为反射腔,环氧树脂到印刷板间的热阻; $\theta_{BA}$ 为印刷板和接触环境空气的热沉之间组合的热阻。一般认为从LED封装至环境热流通道中的热损耗足够小,在计算总热阻时可忽略不计。利用LED热学模型以及LED最大可承受的结温值,便可设计出尺寸、规格合理的热沉。

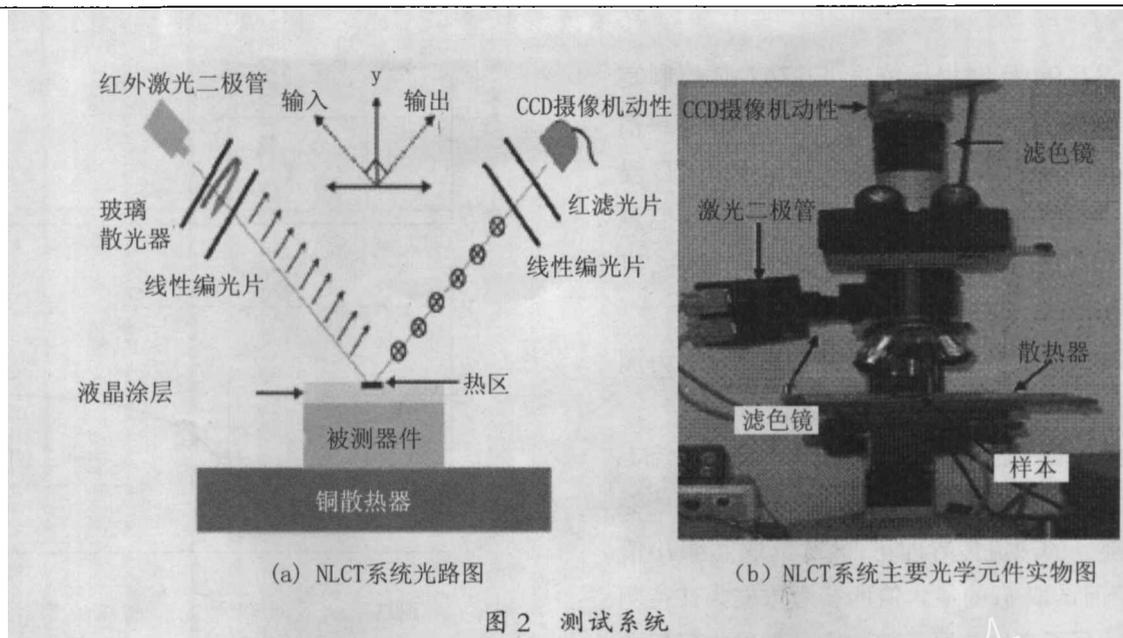
## 3 LED热学特性测试方法

### 3.1 向列型液晶温度记录(NLCT)

红外热成像是测量半导体器件结温分布常用的方法,但是其缺点为成本高,速度慢,受空间分辨率的限制,而且要求待测器件为未封装或开封的状态。液晶方法(liquid crystal methods)缺点为在测试过程中耗费时间过长。这两种方法都利用内部结温与表面温度的关系,推算器件结温。向列型液晶温度记录(NLCT)系统<sup>[3]</sup>,利用激光辅助照射功能改进LED热成像图效果。传统NLCT方法不适用于测量LED表面温度分布,从液晶层表面反射的光线强度弱于LED发出的光线,LED发出的光线把反射光线覆盖,导致在热成像图中显示的温度比实际情况低。在系统中采用激光照射和滤光器可解决此问题。该测试系统的空间分辨率为微米以下,温度灵敏度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ,具有操作简单,成本低的优点,能对工作中LED表面温度实时检测,并对热阻进行测量。

对GaN蓝光LED结温测量,系统照射光源采用660nm高功率激光器二极管,作为感应温度光线。在光路中放置滤光器,用于屏蔽LED光线,通过热成像仪可准确地测量出GaN蓝光LED结温。若需测量红光LED结温,则选取红外激光器作为系统照射光源。该系统也可以测试在不同结温下LED的转换效率,分析由温度因素引起转换效率变化的机理。

测试系统如图2所示,待测器件为InGaN-GaN



LED, 因 P-GaN 层很薄, 厚度只有  $0.5\ \mu\text{m}$ , 因此可认为芯片表面温度等于结温。有报道证实此假设的合理性<sup>6</sup>。在热成像图中, 一般认为芯片表面最高温度不能等于结温, 然而当芯片表面温度分布变化很小时, 在一定误差允许范围之内, 可把表面最高温度当作结温。如图 2 所示系统采用 660nm 激光二极管作为照射光源, 激光器输出光为偏振光, 符合 NLCT 的要求。起偏器用于增加激光束偏振程度。偏振激光通过显微透镜投射在待测器件表面。若 LED 表面液晶层区域加热温度超过液晶跃迁温度 (transition temperature of the liquid crystal), 则液晶层将由各向异性变化至各向同性介质。线性偏振光射入向列型液晶层, 并在其表面发生反射, 将不会改变反射光的偏振方向。用偏振光学显微镜观测该区域, 该区域呈现为暗区。除了热成像区域的部分, 温度保持在跃迁温度以下, 液晶层仍为各向异性介质。这部分的反射光线的偏振方向与初始状态不同。用偏振光学显微镜观测该部分, 该部分呈现为明区。在亮区和暗区交界领域, 温度等于向列型液晶跃迁温度。在跃迁温度以下, 液晶层的双折射使反射光线偏振方向发生旋转。测试过程中 InGaN-GaN 蓝宝石芯片对于激光光线为透明状态, 即芯片不吸收激光, 不产生热流。在测量 LED 热阻过程中, 选取五个向列型液晶, 它们的跃迁温度各不相同, 记录五个不同结温 ( $T_j$ )。通过调整待测器件壳温 ( $T_c$ ), 获取芯片表面等温曲

线轮廓。当  $T_c$  增加时, 热像图中的向列型液晶跃迁温度曲线轮廓图将向外扩张, 当  $T_c$  减小时, 则向内收缩。 $T_j$  等价于覆盖待测器件表面的向列型液晶跃迁温度, 利用等温曲线与  $T_c$  之间的变化关系就可推算出  $\Delta T = T_j - T_c$ 。同时测量待测器件的耗散功率, 计算器件热阻。

实验表明采用此方法测试  $T_j$  误差小于  $4^\circ\text{C}$ <sup>7</sup>, 新型 NLCT 能对多量子阱 InGaN/GaN LED 热学特性进行合理评估, 根据测量结果, 可对待测器件的结构和封装设计提出改进意见。若待测器件为其他材料规格, 那么此种测试方法的结果能否依旧保持合理, 还有待进一步探讨。

### 3.2 电学参数法

液晶传感和红外热成像技术测量结温局限性都要求待测器件为未封装状态, 而电学参数法可直接测试封装完整的器件, 且无需采用探测器, 只要利用器件结点的电参数与温度的关系, 就可估算出器件的结温。半导体材料的电导率具有热敏性, 改变温度可以改变半导体中载流子数量。禁带宽度通常随温度的升高而降低, 且在室温以上随温度的变化具有良好的线性关系, 故能认为半导体器件的正向压降与结温是线性变化关系。因此只要准确地监测 LED 正向压降的变化量, 便可确定其热阻。目前采用电学方法测热阻标准, 国际上通用 IEC747-7<sup>8</sup>, 国内采用

的 GB/T4587-94 标准也是依据 IEC747-7 而制定的。目前可改进电学法测试条件,提高测试结果精度。改变测试环境状态,如将高亮度 InGaAlP LED 浸入液氮中,加载电流范围为 18.5~204mA,结温测试结果为 70~298K,结温测量误差在 ±2K 左右,可靠性为 95%<sup>[9]</sup>。

热阻测试流程如图 3 所示,图 4、5<sup>[10]</sup>分别为测试电路以及测试中电压与电流的关系。

为了提高测试结果的精度,选取的测试电流  $I_M$  应为小电流。 $I_M$  的最小值选取参考依据为只要能够确定结点部分的热传导即可,通常选取  $I_M$  最小值为 0.1mA;而选取  $I_M$  的最大值的参考依据为在待测器件结点部分不产生热量,但在实际情况中任何数量级的电流都将产生热效应,因此只需把产生自热效应限制在一个允许的小范围内即可,通常选取  $I_M$  最大值为 50mA。通常情况  $I_M$  取为 1mA,对于大功率器件, $I_M$  可取至 10mA 或 20mA。

通过加热、冷却曲线图,可记录各个时刻 LED 的瞬态热阻以及处于热平衡状态下的稳态热阻。预

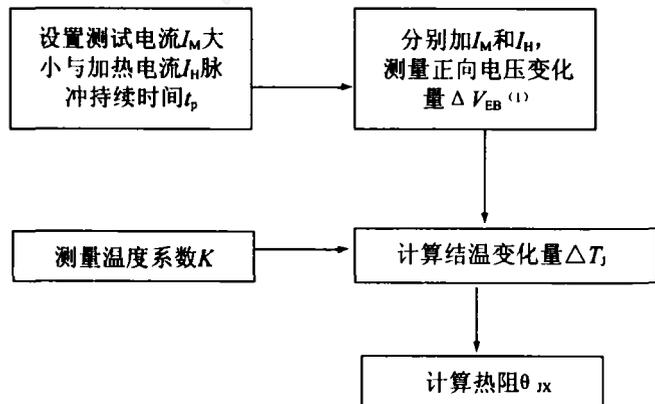


图 3 电学参数法测试热阻流程

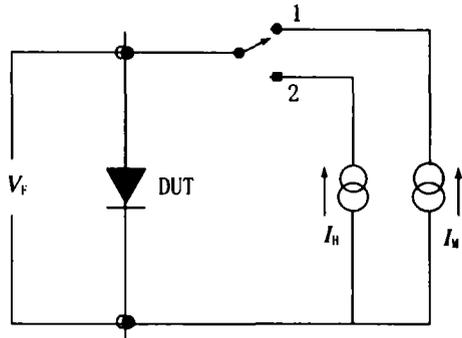


图 4 测量 LED 热阻的基本试验电路

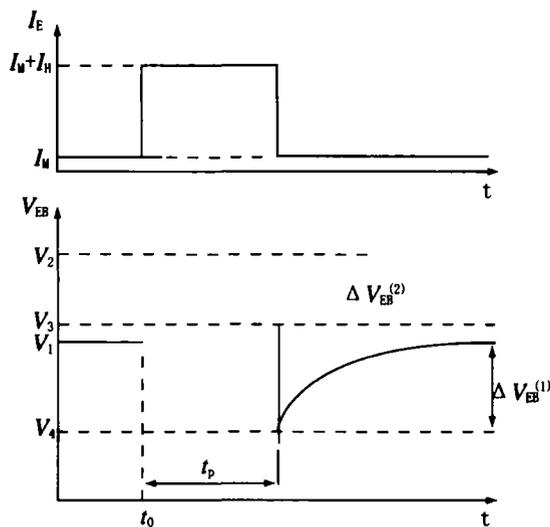


图 5 测量过程电流和电压波形

估在不同环境条件下,器件达到热平衡状态的时间,需考虑到两个因素。其一为器件的热容量;其二为器件结点至环境路径的热阻。在冷却过程中被测器件断开加热电流瞬间,结温立即下降,但电压测量和读出需要一定时间,由于测量延迟时间的存在,因此所获得的测量数据有一定的误差。通常要做出被测器件的冷却曲线,如图 6 所示,以便于对测量数据进行修正。加热曲线如图 7 所示,表示瞬态热阻与加热持续时间关系,曲线涵盖器件从瞬态到稳态过程的热学特性变化范围。只要进行适当的分析,任何工作功率条件下的热学特性都可准确地估算。加热曲线的光滑度表示实验数据连贯性和可信度;显示不同环境条件的加热曲线有助于估计器件在其他环境下的热性能。

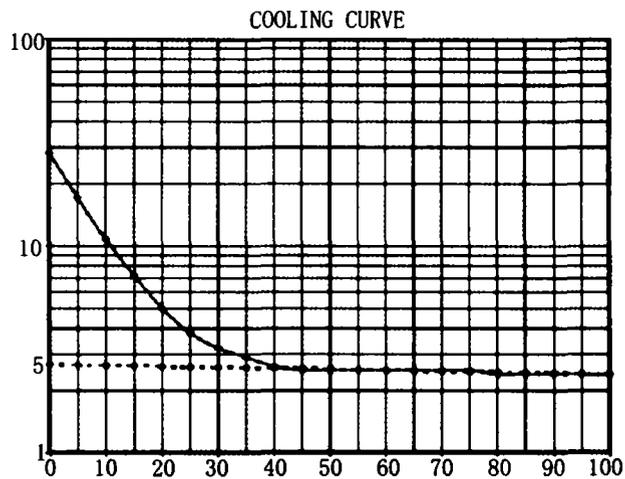


图 6 冷却曲线

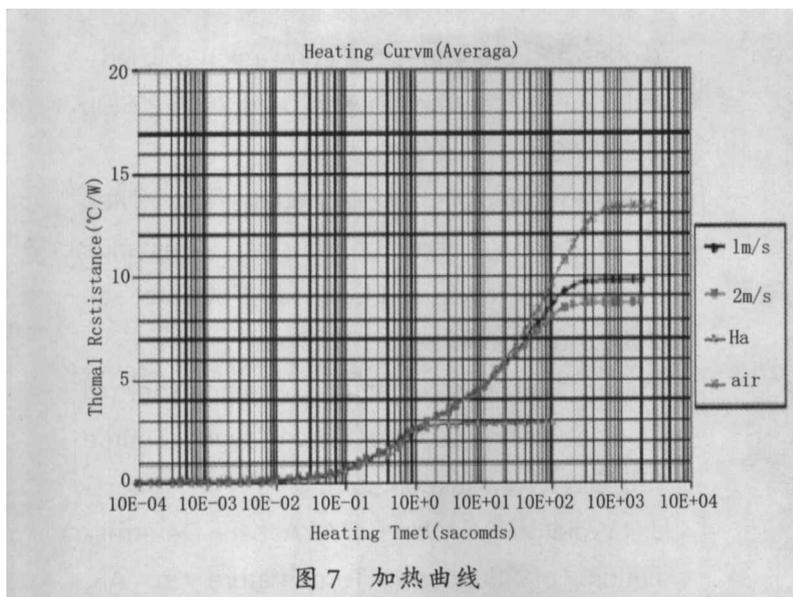


图7 加热曲线

电学参数法测 LED 热阻仍存在若干问题。如忽略了对器件耗损光功率的测试,若待测器件为大功率 LED,将导致测试结果与实际热阻有较大偏差;如何合理控制参考点温度,使其在测试过程中不发生偏移;如何选取合理的测试电流等问题,仍有待进一步研究。

### 3.3 光谱法以及光功率法

光谱法测 LED 结温的优点是:测试过程中测试设备无需与 LED 引线直接接触,就可以直接测量出其结温;对于已经封装完整的 LED,采用光谱法测量则使测试过程简便易行。美国照明研究中心 (Lighting Research Center) 采用光谱法测量 Al-GaInP 红光 LED,发现其峰值波长与结温成线性关系,通过增大电流或环境温度的措施以提高结温,都能引起此类红光 LED 峰值波长发生红移,如图 8 所

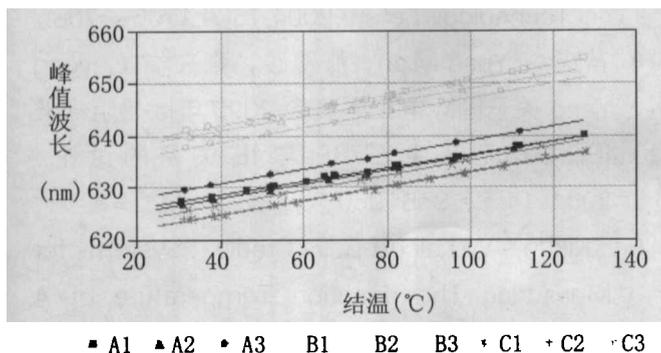


图8 9种 AlGaInP 红光 LED 峰值波长与结温关系

示<sup>[11]</sup>。GaN 基蓝光 LED 峰值波长与结温关系为非线性关系,且变化范围小,如图 9 所示。

不同厂商制作的 AlGaInP 红光 LED 峰值波长与结温关系如图 7 所示,虽然它们的峰值波长各不相同,但在结温变化相同的状态下,峰值波长漂移量是相同的。测量初始环境温度与峰值波长的漂移量,就可利用式(4)计算结温。

$$T_j = T_a + \frac{\Delta \lambda_p}{K_p} \quad (4)$$

$T_j$  为待测结温;  $T_a$  为环境温度或者初始结温;  $\Delta \lambda_p$  为峰值波长的变化量;  $K_p$  为结温 - 峰值波长图中直线斜率。

Ga-N+YAG 白光 LED,峰值波长与结温并不成线性关系,且随结温的峰值波长的漂移范围很小,因此无法利用峰值波长与结温的关系,推算其结温。故

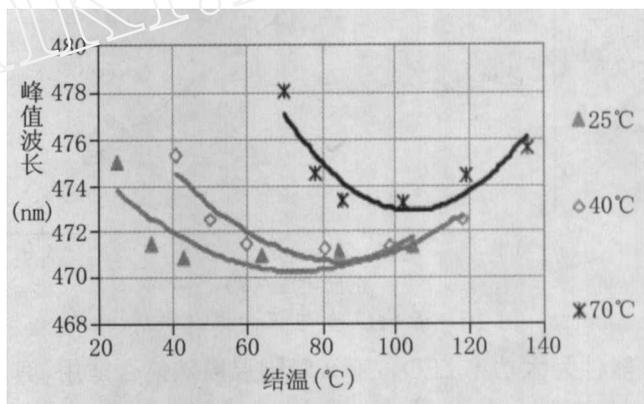


图9 GaN 基蓝光 LED 峰值波长与结温关系

须采用光功率法测试其结温。对封装口径为 5mm 的 Ga-N+YAG 白光 LED 测量证明,总的辐射功率 (W)和蓝光区域辐射功率 (B) 比值 (W/B),与结温成线性关系,利用公式(5)计算结温。

$$T_j = T_0 + \frac{(R - R_0)}{K_r} \quad (5)$$

式(5)中,  $T_0$  为初始环境温度(也等价于初始结温);  $R$  为结温为  $T_j$  时的比率 (W/B);  $R_0$  为当结温  $T_0$  时的比率 (W/B);  $K_r$  为 (W/B) 比率与结温线性关系的直线斜率 ( $\frac{\Delta R}{\Delta T_j}$ )  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。通过推算 GaN+YAG 白光 LED 的结温,就可进一步计算热阻。

### 3.4 管脚温度法

管脚温度法<sup>[13]</sup>是利用 LED 器件的热输运性质,通过测量管脚温度和芯片耗散的热功率,以及热阻系数来确定结温,可用式(1)来计算结温。其中  $T_x$  为管脚温度,  $T_j$  为结温,  $\theta_{jx}$  为从结到管脚的热阻,可结合电学参数法确定热阻。图 10 为管脚温度与正向电压的关系。从图 10 中可知,两者满足很好的线性关系,故可利用此关系,推算 LED 结温。管脚温度法成立的前提是将 LED 耗散的光功率  $P_{光}$  认为是个很小的量值,并将其忽略不予考虑。若待测

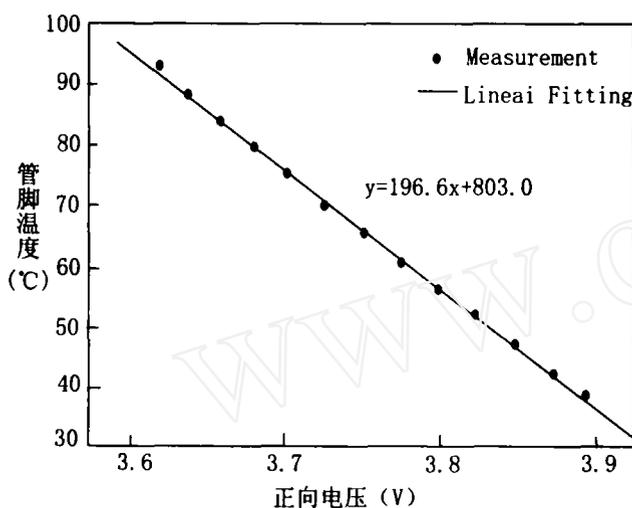


图 10 管脚温度与正向电压关系

器件为大功率 LED,那么管脚温度法能否适用,有待进一步研究。

## 3 结论

本文从 LED 热阻测试方法原理以及 LED 热学模型出发,分别对向列型液晶温度记录(NLCT)、电学参数法、光谱法、光功率法和管脚温度法测量 LED 热阻,进行了分析和比较,并讨论各种测试方法适用的范围。针对不同材料、封装状态、规格的 LED,采用适宜的测试方法,可简化测试步骤,并能提高测试结果精度。

### 参考文献:

[1] Jeong Park, Chin C. Lee. An electrical model with junction temperature for light-emitting

diodes and the impact on conversion efficiency[J]. IEEE Electron Device Lett, 2005, 26 (9): 308-310.

[2] Lianqiao Yang, Jianzheng Hu, Lan Kim, Moo Whan Shin. Variation of Thermal Resistance With Input Power in LEDs [J]. Phys. stat. sol, 2006, 3(6): 2187-2190.

[3] Philips Lumileds Lighting Company. Thermal Design Using LUXON Power Light Source [EB/OL]. www.luxeon.com.

[4] J. R. Waldrop, K. C. Wang, P. M. Asbeck. Determination of Junction Temperature in Al-GaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors by Electrical Measurement [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1992, 39(5): 1248-1250.

[5] Jeong Park, Chin C. Lee. A New Thermal Measurement Technique Using Nematic Liquid Crystals with IR Laser Illumination for Visible Light Emitting Devices [J]. IEEE Electronic Components and Technology Conference, 2005, 0-7803-89006-9: 1607-1610.

[6] J. Park, M. Shin, C. C. Lee. Thermal modeling and measurement of GaN-based HFET devices [J]. IEEE Electron Device Lett, 2003, 24 (7): 424-426.

[7] Chin C. Lee, Fellow, IEEE, Jeong Park. Temperature Measurement of Visible Light-Emitting Diodes Using Nematic Liquid Crystal Thermography With Laser Illumination [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(7): 1706-1708.

[8] 苗庆海, Yuan Miao, 张德骏, 张兴华, Lieyong Yang. 关于国际电工委员会 2000 年版热阻标准 IEC 60747-7 中  $\Delta V_{BE}$  与  $I_E$  关系的讨论, 2004, 14(8): 955-960.

[9] L. Kikup, W. Kalceff, G. McCredie. System for Measuring The Junction Temperature of A Light Emitting Diode Immersed in Liquid Ni-

下转第 109 页

要的途径是设法提高器件的热散失能力,使结温产生的热,通过各种途径散发到周围环境中去。

### 3 胶水的选择

在我们传统封装中,我们采用的是环氧进行封装。通常,LED 用的封装环氧存在着一个重要特性,即当环氧温度超过一个特定温度  $T_g=125^\circ\text{C}$  时,封装环氧的特性将从一种刚性的类玻璃状态转变成一种柔软的似橡胶态状物质。此时材料的膨胀系数急剧增加,形成一个明显的拐点,这个拐点对应的温度即为环氧树脂的玻璃状转换温度,其值通常为  $125^\circ\text{C}$ 。当器件在此温度附近或高于此温度变化时,将发生明显的膨胀或收缩,致使芯片电板与引线受到额外的压力,而发生过度疲劳乃至脱落损坏。此外,当环氧处于较高温度时(即使未超过转变温度  $T_g$ ),特别是与芯片临近部分的封装环氧会逐渐变性,发黄,影响封装环氧的透光性能。这是一个潜移默化的过程,随着工作时间的延长,LED 将逐渐失去光泽。显然工作温度越高,这种过程将进行得越快。为解决这一困难,特别在大功率器件的制作过程中,一些先进的封装结构已摒弃了环氧树脂材料而改用一些性能更为稳定的诸如玻璃、PC 等材料制作透镜;另一个重要方法是让环氧不直接接触芯片表面,之间填充一种胶状的,性能稳定的透明硅胶。实践证明,通过如此改进,器件的性能与稳定度获得了明显改善。

由于硅胶除了对低波长有较佳的抗受性、较不易老化外,硅胶阻隔近紫外线使其不外泄也是对人体健康的一种保护,此外硅胶的光透率、折射率、耐热性都很理想,GE Toshiba 的 InvisiSi1 具有高达 1.51~1.53 的折射率,波长范畴在 350nm~800nm 间的光透率达 95%,且波长低至 300nm 时仍有 75%~80% 的光透。同样的,Dow Corning Toray 的 SR 7010 在 405nm 波长以上时光透率达 99%,且硬化处理后折射率亦有 1.51,另外耐热上也都能达  $180^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$  的水平。在经过对不同的硅胶在不同结构的芯片配合作成的 LED 进行一系列的评价后,最终在我们公司的中功率产品制程工艺中将环氧树脂完全用硅胶替代,并保证产品的各项性能上都优于使用环氧树脂的 LED。

在种种有力的数据的说明下,我们在功率型 LED 的封装过程中,采用性能优良的硅胶对芯片进行保护。在选用什么样的硅胶适用于我们不同的封装要求,我们会根据不同的参数要求,进行合理选择搭配。

在中国,LED 目前还仅处于照明应用的初级阶段。要使 LED 真正进入照明领域,LED 产业界和照明产业界要做的工作很多,面对中国的功率型 LED 潜在的巨大市场,我们公司要走的路还很长。面对挑战,我们要对困难有清醒和足够的认识,同时也要坚信:只要我们不懈地努力,一定能在不久的将来,在中国实现人类历史上又一伟大创举——用半导体 LED 固态光源全面替代传统照明光源。

上接第 134 页

- trogen [J].REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS,2006,77,046107-1-046107-2.
- [10]半导体分立器件和集成电路第 7 部分:双极型晶体管 [S]. 中华人民共和国国家标准 GB/T4587-94 中国标准出版社,1996.
- [11]Hong,E,N.Narendran.A method for projecting useful life of led lighting systems [C].Proceedings of SPIE,2004,5187:93-99.
- [12]Gu,Y. and.N.Narendran.A non-contact met-

- hod for determining junction temperature of phosphor-converted white leds [C].Proceedings of SPIE,2004,5187:107-114.
- [13]陈挺,陈志忠,林亮等.GaN 基白光 LED 的结温测量[J].发光学报,2006,27(3):407-412.

作者简介:陈焕庭(1982-),男,福建漳州人,厦门大学物理系硕士研究生,主要研究方向为半导体照明检测,E-mail: htchen23@sina.com.