

# 半导体功率发光二极管温升和热阻的测量及研究

张跃宗<sup>†</sup> 冯士维 谢雪松 李 瑛 杨 集 孙静莹 吕长志

(北京工业大学电子信息与控制学院, 北京 100022)

**摘要:** 通过电学测量方法得到了半导体功率发光二极管温升与热阻的加热响应曲线. 曲线出现一个或多个台阶, 反映了其内部的热阻构成与器件物理结构. 同时采用遮光法对器件温升及热阻进行了修正. 还应用瞬态加热响应原理对功率管的封装结构进行了监测.

**关键词:** 温升; 热阻; 工作寿命; 可靠性; 发光效率

**PACC:** 4400; 0720

**中图分类号:** TN383

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)02-0350-04

## 1 引言

近年来, 固态照明工程以其高效率、低能耗成为节约能源的新途径. 因此高亮度蓝光和白光半导体功率发光二极管(LED) 得到迅猛的发展<sup>[1]</sup>. 由于发光功率的大大增加, 导致器件工作时会产生大量的热, 这将直接影响到温升和热应力, 导致其工作寿命的缩短. 同时对周围的器件也会产生影响, 使有的设备、组件和元器件在较高的温度下不能正常工作. 研究表明 70% 的电子元器件失效与过高的热环境应力有关. 器件的工作寿命随温度的增加呈现指数缩减<sup>[2~4]</sup>. 准确测量并有效降低温升是目前亟待解决的问题之一. 所以, 对电子元器件实现有效的温升测量控制措施是提高设备工作可靠性的关键. 半导体功率发光管的工作温升及热阻是影响其寿命和评估其可靠性的重要参数之一.

目前, 研究测量半导体功率二极管温升和热阻的方法主要有热绘仪(thermal plotter)法<sup>[5]</sup>、光谱法<sup>[6]</sup>以及端电压法<sup>[7]</sup>. 这些方法基于不同的测量原理实现温升和热阻的测量. 本文采用改进的电学测量方法<sup>[8]</sup>, 对注入电能转变为光能的过程中生成的热进行瞬态测量分析, 从而揭示光与热的相互作用.

## 2 温升与热阻的测量原理

小电流下半导体 p-n 结电压随温度变化具有非常好的线性<sup>[8]</sup>. 我们利用这种线性研究测量器件的工作温升及热阻. 即通过半导体器件结电压随温度的线性变化作为温敏参数, 测量其工作条件下温敏参数的变化, 进而达到测量温升及热阻的目的. 测试

装置等相关详细资料请参考文献[9].

利用温敏参数测量温升前, 首先对其校准. 校准的过程是将被测器件设置在两个或多个已知温度下, 测量相应温度下温敏参数, 即可得线性斜率, 用温度系数  $\alpha$  表示如下:

$$\alpha = \frac{V_1 - V_2}{T_1 - T_2} \quad (1)$$

测量温升时将器件放置在一恒温平台上. 器件工作后, 电功率将产生热量使器件内部温度升高. 由于恒温平台的温度保持不变, 只要测出结电压前后变化  $V$ , 再除以温度系数  $\alpha$ , 就是器件的工作温升:

$$T = V / \alpha \quad (2)$$

当一稳态的功率  $P$  加在一物体上后, 在热流方向上物体的两端会出现温差  $T$ , 通常定义温差与热流功率的比为物体材料的稳态热阻  $R_{\text{thrs}}$ :

$$R_{\text{thrs}} = T / P \quad (3)$$

稳态热阻是描述材料导热性质的热学参数. 当热流传导方向上有许多种材料组成时, 总的热阻为每层之和

$$R_{\text{thrs}} = \sum R_{\text{thrsi}} \quad (4)$$

在开关和脉冲电路中, 半导体二极管的结温是随时间变化的, 那么热阻也就变成随时间变化的瞬态热阻. 瞬态热阻更注重材料加热的响应.

## 3 瞬态加热响应原理

瞬态加热响应曲线的测量是分析半导体功率二极管热阻构成的有效方法. 它通过热阻响应的时间变化, 反映出器件空间的热阻构成. 对器件热特性的分析是一种非常理想的手段.

<sup>†</sup> 通信作者. Email: seewhat@eyou.com

2005-07-20 收到, 2005-10-08 定稿

测量瞬态响应的首要任务是能够及时记录有源区的快速升温过程. 电化学法采用器件的电学参数作为温敏参数, 将温度信号转换成电学量, 能及时反映器件内部温升(达到微秒级), 是实现瞬态测量的理想方法, 也是唯一方法. 其他测量方法不具备这种快速的条件, 测量装置见文献[9].

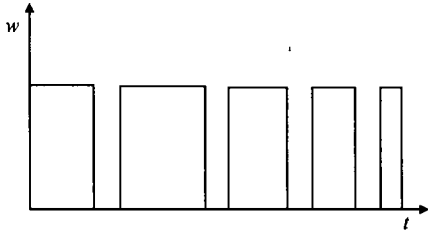


图 1 测量序列示意图

Fig. 1 Schematic of pulse sequence

在实际测量中我们采用一系列持续(加热)时间并以对数步长增加的测量序列, 测量每一个加热脉冲后的温升, 如图 1 所示. 为消除前一个加热脉冲对下一个测量的影响, 两次测量中间留出足够的时间以使有源区恢复到恒温. 这种方法虽然不是一次采集加热响应曲线, 但由于每一较长的加热脉冲都重复前一次脉冲的历史, 所以其加热响应过程与一次采集的相比应该一致.

封装后的半导体功率二极管由多层材料组成. 当器件内部产生热量后, 热量通过芯片、焊料、热沉、管壳扩散到外部系统. 当保持器件的功率不变即热量产生率不变时, 稳态温升的建立只是一个时间的过程. 当热量在同一材料中传输时, 属无热阻接触, 热量的传输无阻碍, 只是需要时间充满整个材料. 这时不会引起温升; 当热量传递到界面时, 由于存在热阻, 使热量在第一层内产生堆积, 导致温度升高. 只有当温度升高到一定程度, 形成温度梯度足以克服热阻本身引起的温差时, 热量才开始向下一层传递. 依次类推, 直到热量传递到无限大热沉, 达到一种稳态分布. 在温升建立的瞬态过程中, 对于有热阻接触的界面, 会出现台阶. 台阶的高度就是两种材料之间的接触热阻. 若有多个台阶, 则这些台阶的高度之和就构成了稳态热阻. 通过这种温升及热阻的瞬态响应, 可以准确地确定器件的各种热阻构成.

### 4 实验结果与讨论

#### 4.1 加热响应曲线与温升和热阻构成的关系

本文采用在一确定功率下, 测量出随加热时间增加, 器件内部的温升过程, 得到其器件的加热响应曲线. 如无特别说明以下实验均采用蓝宝石衬底,

AlGaIn/ GaN 基材料器件.

测量结果如图 2 所示, 加热响应曲线最大的特征是在不同的时间段上, 出现了温升与热阻台阶.

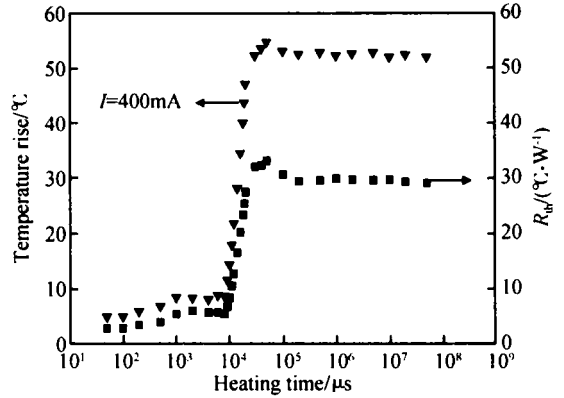


图 2 同一电流下温升与热阻的加热响应曲线

Fig. 2 Heating response curve of temperature rise and thermal resistance with time at same working current

从图中可见, 第一个温升台阶约为 7 , 第二个温升台阶约为 55 . 放置在恒温平台上的被测器件是带有热沉的芯片. 从物理角度分析可知: 从器件有源区到恒温平台之间主要有两种热特性差异较大的材料: 一种是芯片, 另一种则是芯片下的热沉. 这样温升曲线上的第一个台阶对应的是芯片的温升  $T_{chip}$ , 第二个台阶则是对应连带热沉的器件温升  $T_{total}$ , 那么两个台阶之差, 就是有源区与测量平台间的热沉所带来的附加温升  $T_{sink} = 48$  . 这种测量方法应该说是非常准确的, 因为它是取两台阶之差, 所有由测量引起的误差均可在两台阶之差中消去. 器件的总温升可以表示成芯片的温升和热沉带来的温升之和:

$$T_{total} = T_{chip} + T_{sink} \tag{5}$$

这样通过加热响应曲线, 测量和分辨出其主要的器件构成. 若上述的温升除以发光管的施加功率, 就是器件的热阻, 其变化趋势与温升相同, 见图 2 右侧坐标.

#### 4.2 利用遮光法对半导体发光二极管温升与热阻的修正

对于大功率发光二极管, 由于其发光效率大大增加, 使得我们必须考虑逃逸光对器件温升及热阻的影响. 为此, 我们设计并改进了测量装置: 用反光材料遮盖住被测器件的光输出端, 把逃逸光的输出全部或部分地反射回器件或器件覆盖层, 这样所施加的功率全部或部分地转为热功率.

设总的电功率为

$$P = P_{th} + P_{op} \tag{6}$$

其中  $P_{th}$  为热功率;  $P_{op}$  为光功率. 瞬态热阻为

$$R_{tht} = \frac{T}{P_{th}} \quad (7)$$

若单用某一电流下的温升描述热特性, 不足以描述引起温升部分的能量占总能量的比例. 故我们定义了表观热阻  $R_{tra}$ :

$$\begin{aligned} R_{tra} &= \frac{T}{P} = \frac{T}{P_{th} + P_{op}} \\ &= \frac{T/P_{th}}{1 + P_{op}/P_{th}} = \frac{R_{tht}}{1 + P_{op}/P_{th}} \\ &= R_{tht} (1 - \frac{P_{op}}{P}) = R_{th} (1 - \eta) \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\eta = P_{op}/P$  为器件的光输出效率. 表观热阻实际上是平均总功率带来的温升. 它具有了某一电流下, 引起温升的热量占有多少比例的含义. 表观热阻是一个与器件光输出转换效率有关的量. 所以它不是一个常数, 而与器件工作状态有关. 当器件的光输出效率  $\eta = 0$  时, 表观热阻就变为瞬态热阻. 而当  $\eta > 0$  时, 表观热阻小于瞬态热阻.

通过以上分析, 我们采用遮光法进行实验得到了温升与热阻数据的对比.

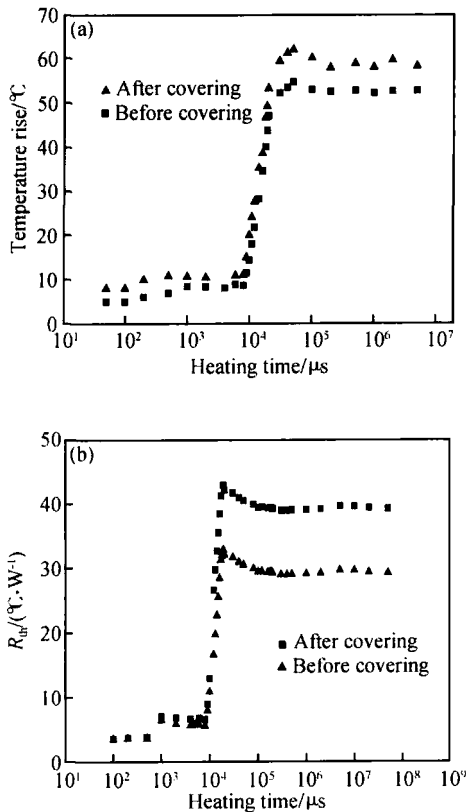


图 3 遮光前后温升(a)及热阻(b)的变化

Fig. 3 Temperature rise (a) and thermal resistance (b) before and after covering

电流的持续加热时间对器件的温升有较大的影响. 被测器件是放置在恒温平台上. 我们在实验中测

得的温升值是器件内部产生的温升. 由式(7)可以看出, 在一定的功率下, 器件的热阻与温升随加热时间的变化趋势相同.

从图 3 可以看出, 随着加热时间的增加, 遮光前后发光二极管温升及热阻值都发生了变化, 遮光后其值明显增加; 在发光开始阶段由于光的逃逸处于开始阶段, 所以与遮光前相比差值不大; 随着加热时间的增加, 逃逸光功率不断积累, 导致遮光前后温升差值增加, 直到稳态.

利用遮光法虽然不能完全消除逃逸光带来的影响, 但这种方法最大限度地考虑了逃逸光对温升及热阻所带来的影响并降低了误差.

### 4.3 应用瞬态加热原理对器件封装结构的分析

应用瞬态加热原理可以对器件的封装结构进行分析. 我们选取两个厂家生产的相同材料的半导体功率发光二极管, 编号为 A # 和 B #. 分别测得两器件温升及热阻的加热响应曲线, 如图 4 所示.

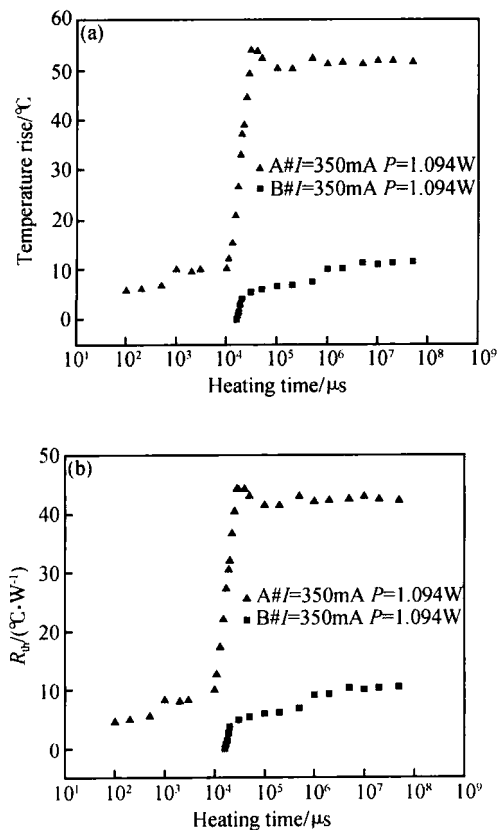


图 4 A # 与 B # 器件温升(a)与热阻(b)的对比

Fig. 4 Temperature rise (a) and thermal resistance (b) of A # and B # samples

由图 4 以看出, 在相同功率下, 随加热时间延续 A # 号管的温升和热阻比 B # 号管要大得多; 由倒装结构可以知道, 倒装芯片的散热性能较好, 因为可

以用散热材料从芯片的背面散热. 散热器可以直接连接到芯片背面, 提供了一个很好的散热途径, 所以 B # 器件为倒装结构.

而正装芯片由于衬底和热沉进一步减弱了器件的散热性能. 相同功率和加热时间下温升相对较高, 所以 A # 器件为正装结构.

当然, 我们在判断器件为正装或倒装封装结构时还应该同时考虑其他相关机制.

## 5 结论

半导体功率发光二极管被施加一稳定功率后将随着加热时间的增加出现温升与热阻台阶, 根据热阻台阶的值, 可以非常准确地得到附加热阻, 并由此测量和分辨出其主要的热阻构成, 实现对器件热阻构成的监控测量, 同时还可以分析器件的物理结构.

采用遮光法对半导体功率二极管的温升及热阻做了进一步修正: 为了考虑逃逸光所带来的误差, 我们定义了表观热阻的概念, 最大限度地降低了逃逸所带来的影响, 得到更加准确的温升及热阻.

应用瞬态加热响应原理可以实现对器件封装结构的分析. 由于倒装芯片的散热性能较好, 相同功率下, 加热时间相同时其温升和热阻比正装结构芯片要小得多. 通过瞬态加热响应实验测得的温升及热阻, 很好地证实了理论上的分析.

致谢 感谢北京光电子重点实验室对本工作的帮助和支持, 感谢彭强同学对本文所做的工作.

## 参考文献

- [ 1 ] Heliotis G, Stavrinou P N, Bradley D D C. Spectral conversion of InGaN ultraviolet microcavity light-emitting diodes using fluorine-based red, green, blue and white-light-emitting polymer overlayer films. *Appl Phys Lett*, 2005, 87:103505
- [ 2 ] Hartman R L, Dixon R W. Reliability of DH GaAs lasers at elevated temperatures. *Appl Phys Lett*, 1975, 26:239
- [ 3 ] Joyce W B, Dixon R W, Hartman R L. Statistical characterization of the lifetimes of continuously operated (Al, Ga) As double-heterostructure lasers. *Appl Phys Lett*, 1976, 28:684
- [ 4 ] Dixon R W, Hartman R L. Accelerated aging and a uniform mode of degradation in (Al, Ga) As double-heterostructure lasers. *J Appl Phys*, 1977, 48:3225
- [ 5 ] Ishikawa H, Fujiwara T, Fukuiwara K, et al. Accelerated aging test of  $Ga_{1-x}Al_xAs$  DH lasers. *J Appl Phys*, 1979, 50:2518
- [ 6 ] Kobayashi T, Wakita K, Kowakami T, et al. *Trans IECE Jpn*, 1978, E61:132
- [ 7 ] Eittenberg M. A statistical study of the reliability of oxide-defined stripe CW lasers of (AlGa) As. *J Appl Phys*, 1979, 50:1195
- [ 8 ] Feng Shiwei, Lü Changzhi, Ding Guangyu, et al. Study of temperature characteristic of GaAs MESFET forward Schottky junction. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1994, 15(11):747 (in Chinese) [冯士维, 吕长志, 丁广钰, 等. GaAs MESFET 正向肖特基结电压温度特性的研究. *半导体学报*, 1994, 15(11):747]
- [ 9 ] Feng Shiwei, Xie Xuesong, Lü Changzhi, et al. Measurement study on thermal characteristics of semiconductor devices by electrical method. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(5):358 (in Chinese) [冯士维, 谢雪松, 吕长志, 等. 电学法半导体器件温度特性的研究. *半导体学报*, 1999, 20(5):358]

## Study of Thermal Characteristics of Semiconductor Light-Emitting Devices

Zhang Yuezong<sup>†</sup>, Feng Shiwei, Xie Xuesong, Li Ying, Yang Ji, Sun Jingying, and Lü Changzhi

(School of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** The heating response curves of temperature rise and thermal resistance of semiconductor power emitting-lighting diodes are obtained according to electrical methods. The curve shows one or more sidesteps to reflect device's inside thermal resistance constitution and physical structure. The temperature rise and thermal resistance are amended with a covering method. A transient heating response theory is also used to inspect the package structure of the devices.

**Key words:** temperature rise; thermal resistance; working life-span; reliability; lighting-emitting efficiency

**PACC:** 4400; 0720

**Article ID:** 0253-4177(2006)02-0350-04

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: seewhat@eyou.com

Received 20 July 2005, revised manuscript received 8 October 2005