

文章编号:2095-0411(2016)02-0088-05

功率型 LED 结温电学法测量研究

曹玉春,陈亚飞,周慧慧,唐 波

(常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213016)

摘要:随着节能技术的发展,LED 作为一种半导体照明技术,得到研究者的关注。以此为背景,针对 LED 灯工作过程中产生大量热量的散热技术开展研究。基于 LED 正向电压随温度变化的原理,运用电学法,以 1W 普通正装 GaN 基 LED 为例,对其温度系数和正向压降进行测量,分析得出热阻与结温值。并利用红外热像仪法和管脚温度法对电学法测温结果进行了验证,证明了该方法的测温精度。

关键词:功率型 LED;结温;热阻;电学法

中图分类号:TK 8

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.02.017

The Study of Electrical Measurement Method of High Power LED Junction Temperature

CAO Yuchun, CHEN Yafei, ZHOU Huihui, TANG Bo

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: With the development of energy-saving technologies, LED, as a technology of semiconductor lighting, has got concern by researchers. Under this background, the heat dissipation technology of LED is studied on the mass heat produced when it works. Based on the relationship between LED forward voltage and the temperature, the electrical measurement method is presented in this paper. By measuring the temperature coefficient and the forward voltage of 1W ordinary GaN-based LED, the thermal resistance and junction temperature are analyzed and obtained. Finally, the accuracy of this measurement method is verified by comparison with the infrared thermal imaging method and pin temperature method.

Key words: high-power LED; junction temperature; thermal resistance; electrical measurement method

1998 年白光 LED 的开发成功,以其高效节能、长寿命、色彩丰富和环保等特点受到人们的关注,并广泛应用于指示灯、信号灯、显示屏、景观照明等领域^[1-2]。随着芯片尺寸的减小以及功率的大幅提高,LED 结温不断上升,引起应力分布不均、发光效率降低、荧光粉转换效率下降等一系列问题,大大降低了 LED 使用寿命和可靠性能^[3-4]。当结温超过一定值时,器件的失效率将成指数规律上升^[5]。从而保

持 LED 结温在允许的范围内,是 LED 芯片制备、器件封装和器件应用等每个环节都必须重点研究的关键因素。因此,对功率型 LED 的结温、热阻等热特性参数进行准确、快速的测试就显得十分重要。目前半导体器件工作温度和热阻的测试方法有很多,其中电学法具有测试结构简单,稳定性高等特点,可作为功率型 LED 结温和热阻测试的标准方法^[6-8]。电学法进行热阻测量时,必须预先知道 PN 结正向

收稿日期:2015-05-04。

基金项目:常州市 2012 自然科学基金资助(CJ20120024)。

作者简介:曹玉春(1973—),男,江苏盐城人,博士,副教授,主要从事能源高效利用研究。

压降随温度的变化关系^[9]。本文就结温对压降依赖关系的理论基础作了详细分析,并在大的电流范围(0.5~300mA)和温度范围(30~120℃)内,对实际 LED 温度随正向电压的关系作了实验研究和测量,通过与红外热像仪方法测量值的比较推出电学法测量 LED 结温与热阻的可行性。

1 电学法基本原理与测量过程

1.1 测量原理分析

电学法是利用器件结点的电压与结温的关系,通过测量工作电流下的正向电压来估算结温。首先从 Shockley 方程入手^[10],如式(1)

$$J_f = J_s \left[\exp\left(\frac{eV_f}{nk\theta}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中: J_f 为 PN 结电流密度, n 为理想因子, q 为电子电荷, k 为玻尔兹曼常数, V_f 为 PN 结外加电压, θ 为温度, J_s 为反向饱和电流密度,其表达式可表示为

$$J_s = e \left[\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_A} \right] \quad (2)$$

式(2)代入式(1)经变形求得正向电压随结温的变化关系式

$$\frac{dV_f}{d\theta} = \frac{k}{e} \ln\left(\frac{N_D N_A}{N_C N_V}\right) - \frac{\alpha\theta(\theta + 2\beta)}{e(\theta + \beta)} - \frac{3k}{e} \quad (3)$$

这个方程是描述正向电压随温度变化很有用的方程。当 LED 的 PN 结通以较小的正向电流 I_M 时,结温升与相应的结正向电压的变化量存在线性关系^[11]。即随着环境温度的升高,LED 两端的正向压降值单调减小,可近似表达为

$$\Delta V_F = K \Delta \theta_j \quad (4)$$

即

$$V_{FF} - V_{F1} = K(\theta_j - \theta_x) \quad (5)$$

式中: V_{FF} 和 V_{F1} 分别为结温在 θ_j (℃) 和 θ_x (℃) (一般取环境温度) 时的正向压降, mV; K 为比例系数, mV/℃。因此,可通过测量 LED 结电压相对于初始值的变化量 ΔV_F , 并利用 K 系数计算结温。

LED 主要以热阻 R_{JX} 表征其本身的热学特性,根据热阻定义:热通道上的温度差与通道上耗散功率的比值^[12-13], 计算如下:

$$R_{JX} = \frac{\Delta \theta_j}{P_H} = \frac{\Delta V_F}{K P_H} \quad (6)$$

式中: R_{JX} 为待测器件 PN 结到指定环境之间的热阻,℃/W; P_H 为待测器件耗散的功率, W。因此,

为了确定 LED 热阻即必须知道等式(6)右边的电压降与功率。

1.2 测量方法与步骤

1.2.1 电压的测量

热阻测试原理如图 1 所示,图 2 是施加到待测器件上的电流时序图和相应的 PN 结正向压降^[14-15]。

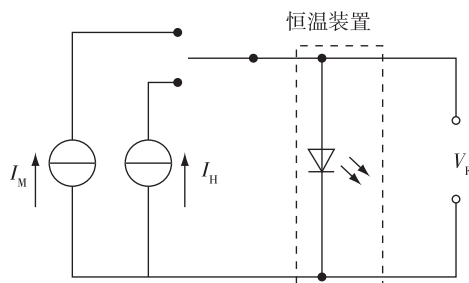


图 1 LED 结温测试原理图

Fig.1 Schematic diagram of LED junction temperature test

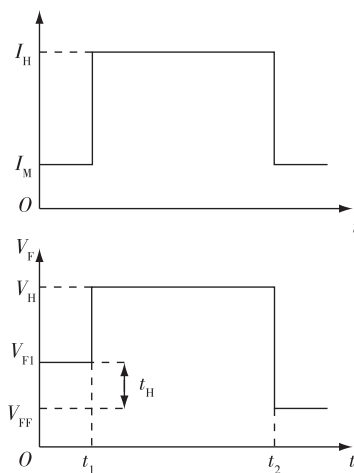


图 2 测试信号时序图

Fig.2 Diagram of test signal timing

测试流程图如图 3^[15], 测试电流 I_M 的选择可根据 LED 样品的伏安特性曲线来选取, 一般选择 LED 伏安特性曲线中正向电流开始明显增大的拐点处附近的值作为 I_M 。此电流下的 LED 处于导通态, 但又不会导致明显的结温升高。

1.2.2 K 系数的测量

不同的 I_M 会对应不同 K , 必须在热测过程中保持相同的 I_M 。而且 I_M 值的测量必须在恒温控制环境下进行, 在不同的温度下测量相应的 V_F , 并且 V_F 的测量须待 V_F 和环境温度均达到稳定后才进行^[16], 测试流程图如图 4。

以上正向压降的测量均待结温稳定后测量, 将

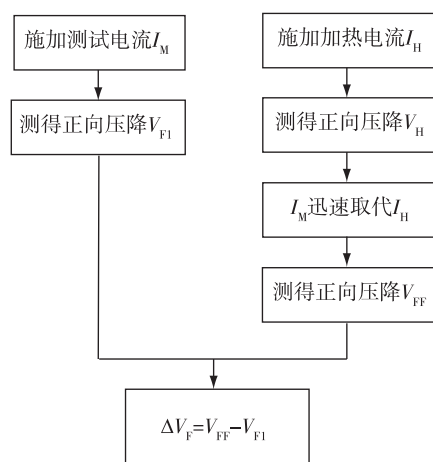


图3 电压测试流程图

Fig.3 Flow chart of voltage test

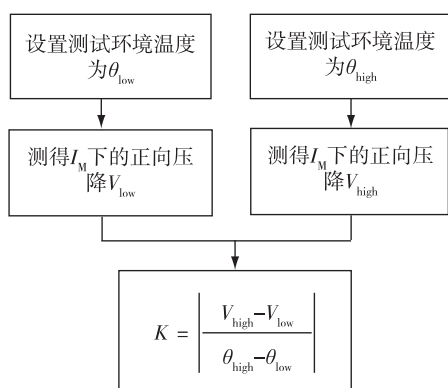


图4 K 系数测试流程图

Fig.4 Flow chart of coefficient K test

以上 ΔV_F 与 K 值测量的这两步得到的数据代入式(4),求出结温 θ_j ,再代入(6)式求出热阻 R_{jx} 。

2 电学法验证分析

2.1 样本测量数据

本文选用 1W 普通正装 GaN 基 LED 进行测量。

1) 首先测定温度系数 K , 测量电流 I_M 设为 5mA, 为减小测试环境温度变化和数据采集带来的误差, 恒温箱温度控制在 30~100℃ 选取了 8 个温度点, 分别对不同温度下的正向压降进行采样并对采样数据进行线性拟合。拟合曲线如图 5 所示, 拟合结果 $K = 1.79286 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, 相关系数为 0.9988。

2) 热阻的测量, 将恒温箱温度控制在 30℃, 加热电流 I_H 分别设置为 100、150、200、250、300mA 和 350mA 进行测量, 加热时间 t_H 设置为 30min, 待 LED 达到热平衡后, 迅速将 I_H 切换至 I_M 并对测得

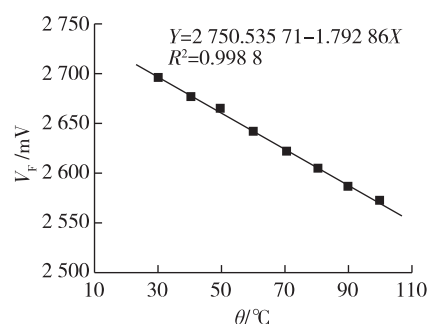


图5 K 系数的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of coefficient K

的正向压降采样, 根据式(6), 以 P_H 为横坐标, $\Delta V_F / K$ 为纵坐标, 对采样数据进行线性拟合, 其斜率即为热阻。拟合曲线如图 6 所示, 拟合结果 $R_{jx} = 31.57 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$, 相关系数为 0.9994。

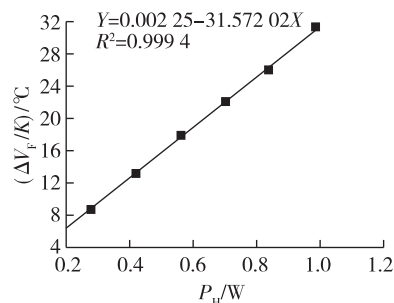


图6 热阻拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of thermal resistance

将以上测得电阻代入公式(6), 经公式(6)反推得出不同加热电流下所得的结温值。

2.2 测量结果比较

为了验证上述测量方法的准确性, 在同样的环境温度下选取目前比较成熟的红外热像仪法进行测量比较, 通过测量器件工作时表面的红外辐射, 给出 LED 表面的二维温度分布, 不同的加热电流下对应不同的结温。

两种测量方法结果的比较如图 7 所示: 结果显示, 红外热像仪法比电学法测量的结温值均稍微偏低, 但随着加热电流的变化所测得的温度变化趋势基本相同。这可能由于芯片不同层次的红外信息干扰形成噪声所造成^[17-18]。为了更进一步证明电学法测量的可行性与准确性, 选用管脚温度法进行测量, 他是利用 LED 器件的热传输性质, 通过 Pt 电阻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的另一种直接测量方法, 测量结果比较见表 1。

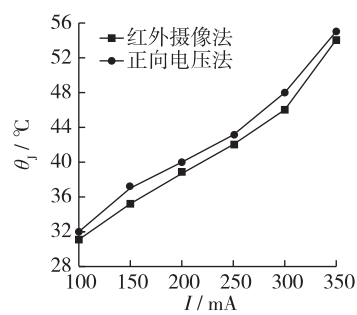


图 7 2 种测量方法的结温比较

Fig.7 Junction temperature comparison of two measurement methods

表 1 2 种测量方法的结温比较

Table 1 Junction temperature comparison of two measurement methods

	℃					
I/mA	100	150	200	250	300	350
电学法	32.1	37.2	40.2	43.2	48.2	55.1
管脚温度法	31.9	37.1	40.3	43.2	48.5	55.0

结果显示,管脚温度法与电学法测量结温值基本吻合。3 种测量方法相比,红外热像仪能快速获取器件表面的温度分布图像,呈现芯片质量的全局概况,并能清晰显示出可能导致器件热失效主要因素。但其缺点是只能测量未封装的裸露芯片,封装后的芯片必须拆封后才能进行测量,并且测量仪器昂贵^[18]。管脚温度法与电学法一样,成立的前提是将 LED 耗散的光功率认为是很小的量值或者忽略不计若待测器件为大功率 LED,测量方法将有待考证^[19-20]。对于电学法测试,PN 结既是被测对象,又要把它看成是温度传感器,PN 结温度的变化通过温度敏感参数即 PN 结正向压降的变化输出,这样消除了因附加温度传感器而引入测量误差。但电学法测热阻也存在若干问题,使得测量造成一定的误差。

3 减小电学法测量误差的对策

电学法测量无法估算加热电流下达到热平衡的加热时间,而是选择经验值 30min 为热平衡时间,这不仅造成实验上不必要的时间浪费,而且由于 LED 加热时间过长带来一定的误差。目前由美国实验室的 ZONG Yuqin 提出了一种脉冲测量方法,测试时序如图 8 所示,通过脉冲电流可得出每一个加热序列后 ΔV_F 的变化值,并能得到瞬态参考热阻。一定时间后电压降将不再发生变化。

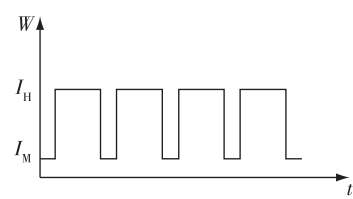


图 8 脉冲序列示意图

Fig.8 Schematic diagram of pulse sequence

在测试电流 I_M 迅速取代加热电流 I_H 的瞬间,结温立即下降,但由于电压测量时间的延迟,使得获得数据与实际值存在一定偏差,通常要做出被测器件的冷却曲线,如图 9 所示,用于对测量数据进行修正。

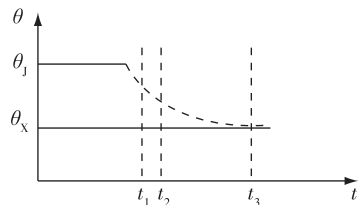


图 9 冷却曲线图

Fig.9 Schematic diagram of cooling curve

同时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。

4 结 论

电学法是利用 LED 的 PN 结的温度效应,通过测量工作电流下的正向电压来测算结温。结果表明:电学法具有快捷、方便、稳定等优点,是一种非破坏性的测量方法;在相同的驱动电流下,电学法测得的结温与红外热像仪法和管脚温度法稍有偏差,但在允许范围内,证明了电学测量的可行性。同时针对电学法测量过程中可能出现的误差提出了相应的解决对策。

参考文献:

[1]YUNG K C, YUNG H L, CHOY H S. Heat transfer analysis of a high-brightness LED array on PCB under different placement configurations[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, 53: 79-86.

[2]LIU D J, YANG H Y, YANG P. Experiment and numerical approach on junction temperature of high-power LED[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54

- (5): 926-931.
- [3]郭常青, 闫常峰, 方朝君, 等. 大功率 LED 散热技术和热界面材料研究进展[J]. 半导体充电, 2011, 32(6): 749-755.
- [4]付贤政, 胡良兵. LED 灯的散热问题研究[J]. 照明工程学报, 2011, 22(3): 73-77.
- [5]FARANDA R, GUZZETTI S, LAZAROIU G C, et al. Refrigerating liquid prototype for LED's thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 48: 155-163.
- [6]JAYAWARDENA A, LIU Y W. Analysis of three different junction temperature estimation methods for AC LEDs[J]. Solid-State Electronics, 2013(86): 11-16.
- [7]WEN P Y, LI D Y, ZHANG S M, et al. High accuracy thermal resistance measurement in GaN/InGaN laser diodes[J]. Solid-State Electronics, 2015(106): 50-53.
- [8]XI Y, XI J Q, GESSMANN T, et al. Junction and Carrier temperature measurement in deep-ultraviolet light-emitting diodes using three methods[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(3): 031907.
- [9]JIANG F Y, LIU W H, LI Y Q, et al. Research on the junction-temperature characteristic of GaN light-emitting diodes on Si substrate[J]. Journal of Luminescence, 2007(122): 693-695.
- [10]李秉乾, 布良基, 甘雄文. LED 正向压降随温度变化关系研究[J]. 光子学报, 2003, 32(11): 1349-1351.
- [11]中华人民共和国工业和信息化部. 半导体发光二极管测试方法: SJ/T11394—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [12]QIAO Y B, FENG S W, XIONG C, et al. The thermal properties of AlGaAs/GaAs laser diode bars analyzed by the transient thermal technique[J]. Solid-State Electronics, 2013(79): 192-195.
- [13]DING R, TANG Y, LI Z. Thermal and optical investigations of high power LEDs with metal embedded printed circuit boards[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 66(1): 32-39.
- [14]中华人民共和国信息产业部. 半导体发光二极管热阻抗测试方法: SJ 20788—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [15]XI Y, SCHUBERT E F. Junction temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(12): 2163-2165.
- [16]饶丰, 葛志晨. LED 结温测量方法[J]. 照明工程学报, 2011, 22: 46-50.
- [17]肖炜, 刘一兵. 一种测量功率型 LED 热阻的方法[J]. 低温与超导, 2011, 39(6): 80-82.
- [18]蔡涛, 段善旭, 康勇. 半导体器件热特性的光学测量技术及其研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(6): 51-58.
- [19]毛德丰, 郭伟玲, 高国. 功率 LED 结温和热阻在不同电流下性质研究[J]. 固体电子学研究进展, 2010, 30(2): 309-312.
- [20]范宇, 龚伟, 李农. 基于 ARM 的 LED 显示屏异步控制系统[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2013, 25(4): 90-92.

(责任编辑:殷丽莉)