

功率LED结温和热阻在不同电流下性质研究^{*}

毛德丰^{**} 郭伟玲 高 国 沈光地

(北京工业大学, 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京, 100124)

2009-01-19 收稿, 2009-03-16 收改稿

摘要: 通过对不同驱动电流下各种颜色LED结温和热阻测量, 发现各种颜色LED的热阻值均随驱动电流的增加而变大, 其中基于InGaN材料的蓝光和白光LED工作在小于额定电流下时, 热阻上升迅速; 驱动电流大于额定电流时, 热阻上升速率变缓。其他颜色LED热阻随驱动电流变化速率基本不变。结温也随驱动电流的增加而变大。相同驱动电流下, 基于AlGaInP材料的1W红色、橙色LED的结温要低于基于InGaN材料的蓝色、绿色、白色LED的结温。分别用正向电压法和红外热像仪法测量了实验室自制的1 mm × 1 mm蓝光芯片结温, 比较了两种方法的优缺点。结果表明, 电学法测量简单快捷, 测量结果可以满足要求。

关键词: 结温; 热阻; 驱动电流; 功率发光二极管

中图分类号: TN 312⁺.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-3819(2010)02-0308-05

Research on the Thermal Resistance and Junction Temperature of High-power LEDs

MAO Defeng GUO Weiling GAO Guo SHEN Guangdi

(Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, CHN)

Abstract: In this paper, the junction temperature and thermal resistance of different color power LEDs were measured at different drive current by forward-voltage method. The colors include red, orange, green, blue and white. The results show that the junction temperature and thermal resistance of different color LEDs increase as the driving current rising. The thermal resistance of blue and white LED based on InGaN materials rise quickly at the low driving current, after the current is more than the operation current, the thermal resistances increase a little bit slowly; and those of the other color LED increase almost the same speed. When the driving current is the same for the same power LED, the higher the thermal conductivity of LED heat sink materials, the lower the LED junction temperature. Comparing with the forward-voltage method, the infrared thermal imaging method is used to measure the junction temperature of 1 W blue LED. The results show the datum of the two methods agrees with each other.

Key words: junction temperature; thermal resistance; drive current; power LED

EEACC: 4260D

^{*} 基金项目: 国家863计划资助项目(2009AA03A1A3, 2008AA03A192); 国家科技重大专项资助项目(2008ZX10001-014)

^{**} 联系作者: E-mail: guoweiling@bjut.edu.cn

引 言

全球照明协会表示在不远的将来, 大功率发光二极管(Power light-emitting diodes)将在普通照明领域起到至关重要的作用。自1994年以来, 大功率LED得到迅猛发展, 已经在诸多领域(如路灯、汽车尾灯、LCD背光源等)取代了传统光源。近年来, LED技术的发展更是日新月异, 其光效的提升和器件成本的下降服从类似于摩尔定律的海茨(Haitz)定律, 即LED价格每10年降低为原来的1/10, 性能则提高20倍。国际上LED技术正在向大功率、高亮度、高效率、低成本方向发展^[1]。功率LED的光学特性和电学特性强烈依赖于结温^[2]。随着LED功率的增大, 过高的结温会影响LED的寿命和可靠性, 散热问题变得日益严峻。因此, 了解功率LED结温和热阻的变化特性就变得尤为重要。文中通过正向电压法和红外热像仪法, 对功率LED的结温和热阻随电流的变化特性进行了研究。

1 功率LED结温测量方法

按标准, 热阻的一般定义是: 在热平衡的条件下, 两规定点(或区域)温度差与产生这两点温差的耗散功率之比(单位 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 或 K/W)。热阻的大小直接影响LED的寿命、出光率、发光强度等。对于LED, 由于热源在pn结处, 其最高温度通常指pn结的温度, 即结温 T_j , 它也是影响LED可靠性的重要参数。目前比较成熟的结温测量方法有红外热像仪法和正向电压法(又称标准电学法)。红外热像仪法通过测量器件工作时芯片表面的红外辐射给出芯片表面的二维温度分布, 以此来表征结温及其分布, 这种方法只能测量未封装的器件, 对成品器件则需要开封才能测量。正向电压法是一种非破坏性的芯片温度测量方法, 与红外热像法相比正向电压法具有灵敏度高、测量迅速、试验成本低廉等优点。

2 实验样品

所测试的样品, 均为路灯和夜景照明用功率LED, 包括1 W InGaN蓝色、绿色LED、1 W AlGaInP红色、橙色LED以及1 W、3 W蓝宝石衬底InGaN白光LED。所有颜色芯片均用金属铝做散热基板材料。1 W样品为一个 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 芯片。3 W

LED为两个1 W芯片并联结构, 白光是通过在InGaN蓝光LED表面涂敷YAG荧光粉实现。

3 实验及结果分析

测试时环境温度设置为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 驱动电流从100 mA上升到1 A, 增长间隔为100 mA。

3.1 正向电压法测量热阻分析

图1是环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 W AlGaInP红色和橙色LED的热阻随驱动电流的变化趋势图。由图1可知, 功率为1 W的AlGaInP红色和橙色LED热阻均随驱动电流的增加而增大, 在相同驱动电流下, 橙色AlGaInP LED的热阻值要高于红色LED。在驱动电流的变化过程中, 橙色LED的热阻值从 $10.28\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 上升到 $15.05\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$, 红色LED热阻值从 $9.85\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 增大到 $13.25\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 。造成此种差异的原因是由于在相同的输入功率下, 橙色LED的电光转化效率低于红色LED造成的, 亦即在相同注入电流时, AlGaInP橙色LED比红色LED有更高的结温。

图2是环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 W InGaN绿色和蓝色LED的热阻随驱动电流的变化趋势图。从图中可以看出, InGaN绿色和蓝色LED的热阻一样随驱动电流的增加而变大, 其中蓝光LED的热阻值由 $10.02\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 上升为 $21.57\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$, 而绿光的热

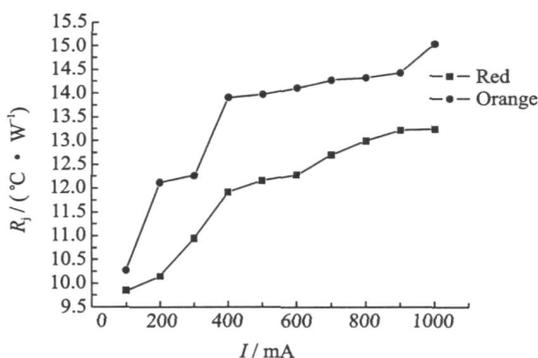


图1 AlGaInP红色和橙色LED热阻变化趋势图

Fig. 1 Thermal resistance vs drive current for 1W Al-GaInP red and orange LED

阻值由 $13.74\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 上升为 $17.68\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$, 其变化幅度较蓝光LED要小。蓝光LED在大于额定工作电流350 mA的驱动电流下工作时, 热阻的变化趋于缓和, 由于器件在大于额定电流下工作时, 器件内

部的各种缺陷、材料的不匹配度等达到了稳定值, 电流的增加对他们的影响不像小电流阶段那么明显了(除非电流加到足以使LED内电极翘起、金线熔断), 导致随驱动电流的增加, 器件内部阻碍热流传导到外部的障碍并没有太大变化。文中认为热阻的升高可能是由于大电流导致的电流拥挤效应, 电流拥挤效应又导致了电光转换效率的减少(辐射复合区域减少), 虽然输入的电功率有所增加, 但随着电流增加, 输出的光功率却减少了, 并最终导致了热阻的上升。

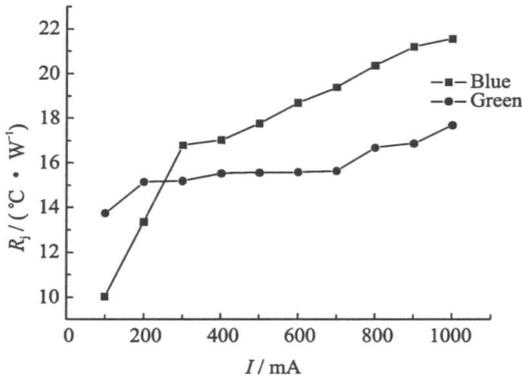


图2 InGaN 绿色和蓝色LED 热阻变化趋势图

Fig.2 Thermal resistance vs drive current for 1 W In-GaN green and blue LED

图3是环境温度为25 ℃, 1 W InGaN 白色和蓝色LED的热阻随驱动电流的变化趋势图。虽然白光LED要比蓝光LED多出一层YAG 荧光粉, 但如图3所示, 二者的热阻值差异不大, 表明YAG 荧光粉并未严重影响1 W 白光LED的散热, 功率LED的内部热量靠辐射散发的很少, 主要还是靠芯片传导到衬底, 衬底传导到铝基板的方式散发到外部的。

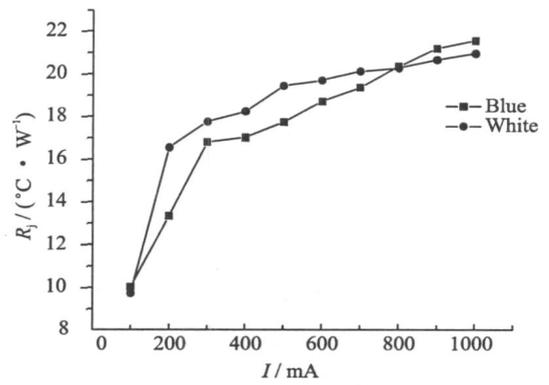


图3 InGaN 基白色和蓝色LED 热阻变化趋势图

Fig. 3 Thermal resistance vs drive current for 1 W In-GaN white and blue LED

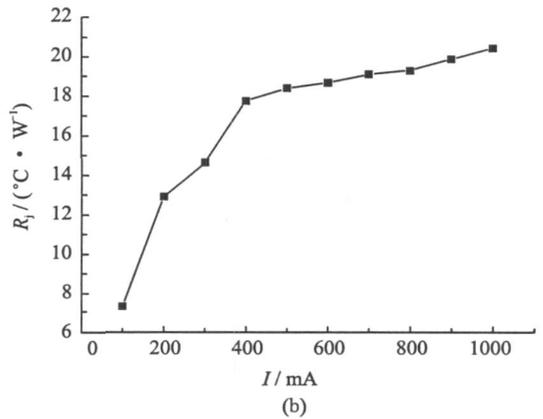
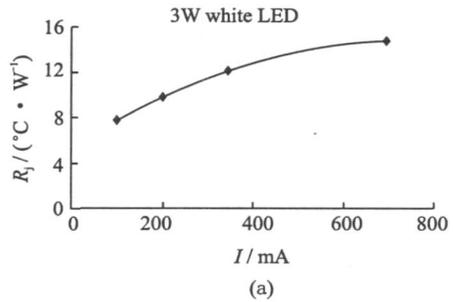


图4 (a) 美国照明研究中心测量的3 W 白色LED 热阻随电流变化趋势图; (b) 3 W 白色LED 热阻随输入电流变化趋势图

Fig. 4 (a) Thermal resistance vs drive current for 3 W white LED tested by America lighting Research Center; (b) Thermal resistance vs current for 3 W white LED

图4是3 W 白光LED 热阻随驱动电流变化的趋势图, 其中, 图4(a)是美国照明研究中心的Jayasinghe 等人在环境温度25 ℃时测得的3 W 白光LED热阻在不同驱动电流下的变化趋势图^[3], 图4(b)是在相同环境温度下测得的3 W InGaN 基白光LED热阻趋势图。两种试验用的LED 芯片大小相同, 但美国照明研究中心所测量的管子比笔者的封装要大些。图4(a)中驱动电流从100~800 mA 变化时, 热阻值由8 ℃·W⁻¹上升到15 ℃·W⁻¹, 在相同的电流变化范围内, 图4(b)热阻值由7.5 ℃·W⁻¹上升至19 ℃·W⁻¹, 差异较小, 说明我国大功率白光LED 发展迅速, 其散热性能已经比较好。

3.2 正向电压法测量结温分析

表1是环境温度25 ℃, 驱动电流变化范围从100 mA 到1000 mA 时, 不同颜色1 W 功率LED 在相应电

流下的结温。从表中可以看出, 各种颜色的功率LED 结温均随驱动电流的增加而上升。分析认为, 随着驱动电流的加大, 会导致LED 内部产生电流拥挤效应, 电流拥挤会导致光输出效率的减少(辐射复合减少), 因此导致结温上升, 而结温的升高会导致LED 材料热导率的变化。一些小组研究得出GaN 导热系数在 25 ~ 175 ℃ 时从 2.50 W/(cm · K) 下降到 1.75 W/(cm · K)^[4]; 其他人研究说温度从 25 ~ 125 ℃ 时, GaN 导热系数由 2.0 W/(cm · K) 下降至 1.6 W/(cm · K)^[5]。反过来, 材料导热系数的下降又会制约LED 的热传导, 进一步提高LED 结温, 如此相互制约, 甚至会形成恶性循环。另外, 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^[6], 也会导致LED 温度的升高。

表1 正向电压法测得的各种颜色 1 W 功率LED 在不同驱动电流下的结温值

Tab. 1 Junction temperature of different color LEDs in different drive currents

| Color | Red | Orange | Green | Blue | White |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>I</i> /mA | <i>T_j</i> /℃ |
| 100 | 26.81 | 26.95 | 28.74 | 27.53 | 27.69 |
| 200 | 29.13 | 30.11 | 35.27 | 34.45 | 35.31 |
| 300 | 32.17 | 33.06 | 41.47 | 38.99 | 43.23 |
| 400 | 36.71 | 38.37 | 47.42 | 44.89 | 48.53 |
| 500 | 39.37 | 41.93 | 51.93 | 51.89 | 55.96 |
| 600 | 43.32 | 46.15 | 57.33 | 59.66 | 63.29 |
| 700 | 47.36 | 50.77 | 63.5 | 67.76 | 69.34 |
| 800 | 52.93 | 55.71 | 71.26 | 77.23 | 80.33 |
| 900 | 57.85 | 60.89 | 78.43 | 87.3 | 86.94 |
| 1000 | 62.58 | 67.74 | 85.33 | 96.72 | 94.12 |

其次, 从表中可以看出, 由AlGaInP 材料制作的红色、橙色LED 结温在相同驱动电流下结温差距不大, 由InGaIn 材料制作的蓝色、绿色、白色LED 的结温也很相似, 而由AlGaInP 材料制作的LED 的结温要远远低于InGaIn 材料制作的LED。这是由于材料禁带宽度差异, 在相同输入电流下InGaIn 材料制作的LED 电压值要高于AlGaInP 材料制作的红色、橙色LED, 虽然InGaIn 材料LED 的光电转换效率要高些, 但其电功率转换成热功率的值仍要大于Al-GaInP 红色、橙色LED。即在相同驱动电流下, In-GaIn 材料LED 产生的热功率要大于AlGaInP 材料的红色、橙色LED。而且, 由于InGaIn 材料的P 型掺杂浓度低于AlGaInP 材料, 导致InGaIn 芯片的串联欧姆电阻要大于AlGaInP 材料的串联欧姆电阻, 大

电流条件下串联欧姆电阻产生的热量^[7]也是导致两种芯片LED 结温不同的重要因素。

再次, AlGaInP 材料制作的红色LED 的结温要低于相同芯片材料的橙色LED, 反证了文中关于图2 的解释是合理的。

3.3 正向电压法、红外热像仪法比较

采用实验室自制的 1 mm × 1 mm 芯片进行了正向电压法和红外热像仪法测量结温的方法比较。图 5 是两种方法测得的 1 W 蓝光LED 在不同驱动电流下的结温变化曲线。由图可以看出, 两种方法测得的结温值基本相同, 无论哪种方法, 结温均随驱动电流的增加而增大。正向电压法得到的是平均温度效应。相比之下, 红外热像仪法能够快捷地获取器件表面的温度分布图像, 展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——热斑的分布密度, 尤其近些年来, 通过结合现代高速发展的计算机技术、微电子技术和图像处理技术, 光学测温技术的灵敏度、精度、稳定性和自动化程度都得到了大幅度提高, 其应用领域也越来越广泛^[8]。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。

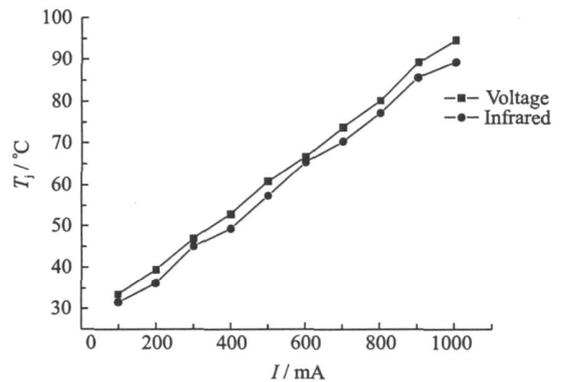


图5 正向电压法和红外热像仪法测得的蓝光LED 结温
Fig. 5 Junction temperature vs drive current for 1 W InGaIn blue LED

图6 是利用红外热像仪测得的蓝光LED 在驱动电流为 800 mA 时的表面温度分布图。由图可以看出, 该种倒装结构的大面积区域温度分布比较均匀, 最高温度为 79.37 ℃, 主要集中在 N 型电极压焊点附近的 P 区。最低温度为 70.43 ℃, 温差较小, 主要原因是这种 LED 芯片采用了环形插指电极结构减小了电流扩展路径, 使电流在 N 型区流动的横向电

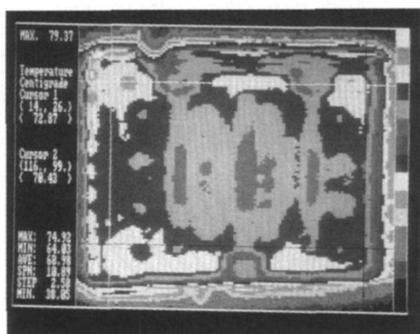


图6 1 W 蓝光LED 表面温度分布

Fig.6 Temperature distribution of 1 W InGaN blue LED

阻减小,产生热量降低,所以器件温升小。

4 结 论

通过对不同驱动电流下各种颜色LED 结温和热阻的测量发现,任何颜色LED 的热阻均随驱动电流的增加而变大,其中InGaN 材料的蓝光、白光LED 在小于额定电流下工作时,热阻上升迅速;驱动电流高于额定电流时,热阻上升速率变缓。其他颜色LED 热阻随驱动电流变化速率基本不变。结温也会随驱动电流的增加而变大。相同驱动电流下,由AlGaInP 材料制作的红色、橙色LED 结温要低于In-GaN 材料的蓝色、绿色、白色LED 的结温。比较了正向电压法和红外热像仪法测得的蓝光LED 结温值,分析了两种方法的优缺点。结果表明,红外热像仪法能够直观地反映芯片的最高温度区域,器件的失效最终还是由最高温度决定的;但正向压降法测得的结温与红外法差别不大,作为一种快捷方便非破坏性的方法,可以首先被普遍采用。

参 考 文 献

[1] 中国照明学会. 中国照明工程年鉴[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 14.

- [2] Paasschens J C J, Harmsma S, Toom R van der. Dependence of thermal resistance on ambient and actual temperature[J]. IEEE BCTM, 2004(1): 96-99.
- [3] JayasingheLalith, DongTianming, Narendran Nadarajah. Is the thermal resistance coefficient of high-power LEDs constant [C]. Lighting Research Center, USA Seventh International Conference on Solid State Lighting, New York: R: Proc of SPIE, 2007: 1-6.
- [4] Kotchetkov D, Zou J, Balandin A A, et al. Effect of dislocations on thermal conductivity of GaN layers [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(11): 4316-4318.
- [5] Christensen A, Nicol D, Ferguson I, et al. Thermal design considerations in the packaging of GaN based light emitting diodes [C]. Lighting Research Center, USA Fifth International Conference on Solid State Lighting, New York: R: Proc of SPIE, 2006, 1-18.
- [6] Siegal B S. Factors affecting semiconductor device thermal resistance measurements[C]. SEM I-T HERM IV, Fourth Annual Semiconductor Thermal and Temperature Measurement Symposium, IEEE, 1988: 12-18.
- [7] 罗丹, 郭伟玲, 徐晨, 等. 半导体激光器结温测试研究[J]. 半导体光电, 2007, 28(2): 183-187.
- [8] 蔡涛, 段善旭, 康勇. 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.



毛德丰(MAO Defeng) 男, 1983年生, 汉族, 北京通州人, 北京工业大学光电子实验室硕士研究生, 主要从事功率LED热特性方面研究。