

功率型 LED 电压温度系数的研究*

张海兵, 吕毅军^{* *}, 李开航, 陈焕庭, 高玉琳, 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: 理论上详细分析了 LED 正向电压随温度变化的物理机理, 并在大的电流范围(0.1~200 mA)和温度范围(60~350 K)内, 对 AlGaInP、InGaN 材料系功率型 LED 正向电压随温度的变化关系进行了系统的实验研究。发现在恒定电流下, 两者的变化关系可分为高温区和低温区两段。在高温区两者为线性反比关系, 并且电压温度系数与正向电流有关, 在低温区正向电压随温度减小而突然急剧增大。理论很好地解释了实验结果。

关键词: 功率型 LED; 结温; 电压温度系数; 温度传感器

中图分类号: TN383.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2008)12-1580-04

Research on voltage temperature coefficient of high power light emitting diodes

ZHANG Hai bing, LU Yi jun^{* *}, LI Kai hang, CHEN Huan ting, GAO Yu lin, CHEN Zhong
(Department of Physics, Xiamen University, Fujian Engineering Research Center for Solid state Lighting, Xiamen 361005, China)

Abstract: The physical mechanism of the forward voltage as a function of the junction temperature in light-emitting diodes (LEDs) was analyzed in detail. And experimental investigation was carried out systematically on the relationship between the forward voltage and the junction temperature in AlGaInP and InGaN high power LEDs over wide current range (0.1-200 mA) and temperature range (60-350 K). It is discovered that at a constant current, the relationship may be divided into two segments, i.e. in the high temperature region, a linear inverse relationship exists between them and the voltage temperature coefficient is closely relevant with forward current; while in low temperature region, forward voltage increases drastically as the junction temperature decreases. The experimental results is in good agreement with the theory.

Key words: high power LED; junction temperature; voltage temperature coefficient; temperature sensors

1 引言

功率型 LED 是向固体照明发展过程中的关键器件^[1]。而功率型 LED 的性能受结温的影响极大。LED 的温升效应会降低发光效率。缩短寿命并影响其光度、色度与电气参数^[2]。因此, 对功率型 LED 的结温进行准确快速测量就显得十分必要。测量 LED 结温的主要方法有: 红外微相仪法、电学法^[3-6]、光谱法^[7]及光功率法^[5,6]。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。该方法因其操作简单, 精度高而得到广泛运用。在利用电学法测量功率型 LED 结温时, 首先要知道 LED 正向电压随温度的变化关系和小电流下电压温度系数的大小^[3]。LED 电压温度系数还是一个随正向电流变化的物理量, 研究其变化规律对 LED 结温测试的结果是至关重要的。文献[5, 6]中研究了各种 LED 的电压温度系数, 但他们均未指出 LED 电压温度系数与正向电流的变化关系。本文理论和实验上研究了这个问题。

2 理论背景

根据二极管肖克莱模型, 并考虑串联电阻 R_s 的影响, LED 的 $I-V$ 正向特性可近似写为:

$$I_F = I_s \exp\left[\frac{e(V_F - I_F R_s)}{nkT}\right] \quad (1)$$

式中 I_s 为反向饱和电流, e 为电子电量, k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度, n 为理想因子。当载流子的主要运输机制为扩散电流时, $n=1$; 当载流子的主要运输机制为复合电流时, $n=2$ 。因此对于扩散-复合模型 n 应介于 1~2 之间。 I_s 是温度的函数, 在半导体材料杂质全部电离、本征激发可以忽略的条件下有:

$$I_s = A e \left(\frac{D_n n_i^2}{N_A \tau_n} + \frac{D_p n_i^2}{N_D \tau_p} \right) = C T^3 \exp\left(-\frac{eV_{g0}}{kT}\right) \quad (2)$$

式中 A 是结面积; C 是与结面积、杂质浓度等有关的常数; V_{g0} 是绝对零度时 PN 结材料的导带底和价带顶的电势差。计算中假设载流子的扩散系数和平均寿命与温度无关。

* 收稿日期: 2008-03-13 修订日期: 2008-06-12

* 基金项目: 国家“863”半导体照明工程资助项目(2006A A03A175); 福建省重大专项资助项目(2006H0092, 2008J0030); 厦门市重大项目(3502Z20061004)

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

串联电阻 R_s 为体电阻和接触电阻之和。接触电阻相对于体电阻很小, 可忽略。对于 PN^+ 型二极管, R_s 主要由 p 区材料的体电阻决定。对于 p^+N 型二极管, R_s 主要由 n 区材料的体电阻决定。下面假设 R_s 主要由 p 区材料的体电阻决定。因此串联电阻 R_s 可表示为:

$$R_s \approx \rho \frac{L}{A} = \frac{1}{e\mu_p} \frac{L}{pA}$$

式中 p 是空穴浓度, μ_p 是空穴的迁移率, L 是 p 型区厚度。其中, 空穴浓度 p 可表示为^[9]:

$$p \approx \left(\frac{1}{2}N_A N_V\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right)$$

式中 E_a 是受主杂质激活能, $N_V = 2\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$, 则

$$R_s \approx DT^{-\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{E_a}{2kT}\right) \quad (3)$$

式中 D 是与结面积、杂质浓度等有关的常数, 计算中假设 μ_p 与温度无关。

把 (2)(3) 两式代入式 (1), 两边取对数得:

$$V_F - nV_{g0} - \frac{nkT}{e} \ln \frac{C}{I_F} + \frac{3nkT}{e} \ln \frac{1}{T} + I_F DT^{-\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{E_a}{2kT}\right) = V_J + V_R \quad (4)$$

其中 $V_J - nV_{g0} - \frac{nkT}{e} \ln \frac{C}{I_F} + \frac{3nkT}{e} \ln \frac{1}{T}$ (5)

$$V_R = I_F DT^{-\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{E_a}{2kT}\right) \quad (6)$$

这就是 LED 正向电压作为正向电流与温度的函数表达式。其中 V_J 为 PN 结压降, V_R 为 LED 上串联电阻的压降。

假设理想因子 n 与温度无关, 将式 (4) 对温度求导得:

$$\frac{dV_F}{dT} = \frac{nk}{e} \ln \frac{I_F}{C} - \frac{3nk}{e} \ln T - \frac{3nk}{e} - \frac{1}{2} \frac{5kT + E_a}{2kT^2} I_F R_s$$

定义电压温度系数 S 为

$$S = \left| \frac{dV_F}{dT} \right| = \frac{nk}{e} \ln \frac{C}{I_F} + \frac{3nk}{e} \ln T + \frac{3nk}{e} + \frac{1}{2} \frac{5kT + E_a}{2kT^2} I_F R_s \quad (7)$$

由以上可知, 电压温度系数主要是由本征载流子浓度, 正向电流表达式的指数项, 载流子浓度等随温度变化而引起的。应当指出, 由于实际 LED 样品不可能是一个理想的 PN 结, 因此式 (4)、(7) 所描写的并不是严格的定量关系。

3 测试系统和实验方法

测试系统如图 1 所示, LED 热沉紧贴在传热样品架上, 使用真空泵抽真空绝热和利用 ARS DE 202AI 低温循环制冷系统控制功率型 LED 内部热沉的温度, 达到精确控制结温的目的。LakeShore331 温控器的控温精度为 0.1 K, YOKOGAWA GS610 测量信号源具有可编程电流输出和自动扫描测量的功能。

实验样品由厦门华联电子有限公司提供的 AlGaInP, InGaN 系 1 W 功率型 LED。图 2 为被测试功率型 LED 器件结构, 器件使用多量子阱结构和金属镜面反射层提高出光效率, 外延层的原衬底被移除并键合上热导率高的材料^[10, 11]。

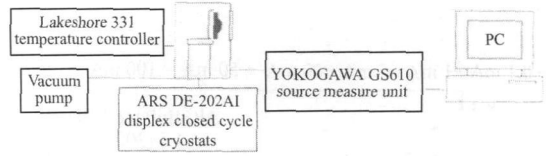


图 1 LED 测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LED measurement system

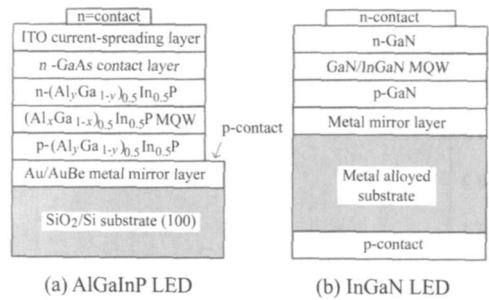


图 2 AlGaInP, InGaN 系功率型 LED 器件结构

Fig. 2 The structure of AlGaInP and InGaN high power LEDs

实验方法如下: 变温范围为 60~ 350 K, 待温度稳定在设定值时, 测量 LED 的 IV 关系, 电流源输出范围为 0.1~ 200 mA, 采用脉冲模式线性扫描, 脉冲宽度为 1 ms, 占空比为 0.1%, 脉冲宽度足够短, 可以忽略大电流对 LED 的加热影响。最后的实验数据传到计算机处理。

4 实验结果分析

图 3 为实验得到的 3 个 LED 在不同电流下的 $T-V_F$ 图。由图可知, AlGaInP 红光 LED 的 $T-V_F$ 关系按温度范围明显可分为低温区与高温区, 分界线依电流不同在 110~ 200 K 不等; InGaN 绿光 LED 低温区与高温区分界线在 160 K 附近, 但分界线相对 AlGaInP LED 模糊; InGaN 白光 LED 分界线也在 160 K 附近, 但更为模糊。它们的 $T-V_F$ 关系有以下几个特点:

1) 在低温区正向电压随温度减小而突然急剧增大, 这是因为当温度低到半导体材料杂质电离发生困难时, 材料的体电阻率随着温度的下降急剧增大, 所测得的电压主要是串联电阻上的压降 V_R 。且由式 (6) 可知, 突变温度由受主杂质激活能, 正向电流决定。低温区的 $T-V_F$ 关系可近似看做是线性关系^[12]。

2) 在高温区两者为线性反比关系。这是因为在高温区, 串联电阻上的压降 V_R 反而很小, 对正向电压 V_F 的贡献主要在 V_J 上。在 V_J 中第三项是非线性的, 但在温度足够高时, 有 $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{d^2}{dT^2} \left(\frac{3nk}{e} \ln \frac{1}{T} \right) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{-3nk}{eT^3} = 0$ 。所以在高温区可把 V_F 看作两个线性函数之和, 仍然是一个线性函数^[13]。

3) 正向电流越大高温区的线性变化范围越小, 线性度越差。文献 [4~ 6] 的实验结果也证实了这一点。文献 [4] 中测得的是在 20~ 100 mA 间 GaN 基 LED 的 $T-V_F$ 关系, 文献 [5] 中测得的是在 10~ 100 mA 间 AlGaIn 紫外 LED 的 $T-V_F$ 关系。文献 [6]

中测的是在 10~ 100 mA 间 InGaN 紫外、蓝光、绿光 LED 和 AlGaInP 红光 LED 的 $T-V_F$ 关系。

可把式(7)改写为:

$$S = C_1 - C_2 \ln I_F + C_3 I_F \quad (8)$$

式中 C_1, C_2, C_3 为常数, 其中 C_3 为一很小的常数。

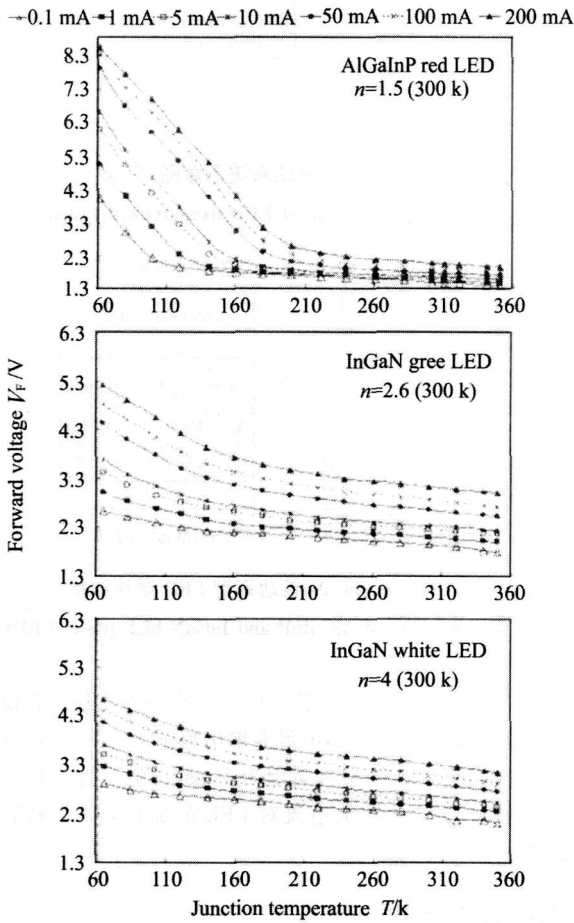


图3 3个LED在不同电流下的 V_F 图
Fig 3 V_F curves of three LEDs at different value of forward currents

理论很好地解释了图3的实验结果。发现样品中红光LED在低温区时正向电压随温度变化的幅度较大, 绿光LED次之, 白光LED最小。高温区可视为LED正常工作温度范围。若在更高温度区, 即当温度升高到本征激发显著增加时, PN结正向电压随着温度的增加将变得比较缓慢, 会造成新的非线性^[13]。根据本征激发载流子浓度 $n_i \propto T^{\frac{3}{2}} \exp(-\frac{E_g}{2kT})$ 可知, 在同样温度下, 禁带宽度越大的材料, 本征激发的载流子浓度越低, 说明在高温区有较宽的线性范围。

下面分析高温区的电压温度系数与正向电流的关系。我们把实验数据中 $T-V_F$ 曲线的高温区(取260~350K)进行了线性拟合, 相关系数都在0.99以上, 得到电压温度系数 S , 并作出各个LED的 I_F-S 图(如图4)。从式(7)可知, 电压温度系数与正向电流, 温度有关。其中式(7)的第2项 $(\frac{3mk}{e} \ln T)$ 在高温区随温度变化较缓慢, 可视为常数; 第4项的 $(\frac{1.5kT + E_a}{2kT^2} R_s)$ 因子在高温区近似为一很小的常数, 其它项为常数。因此, 在高温区

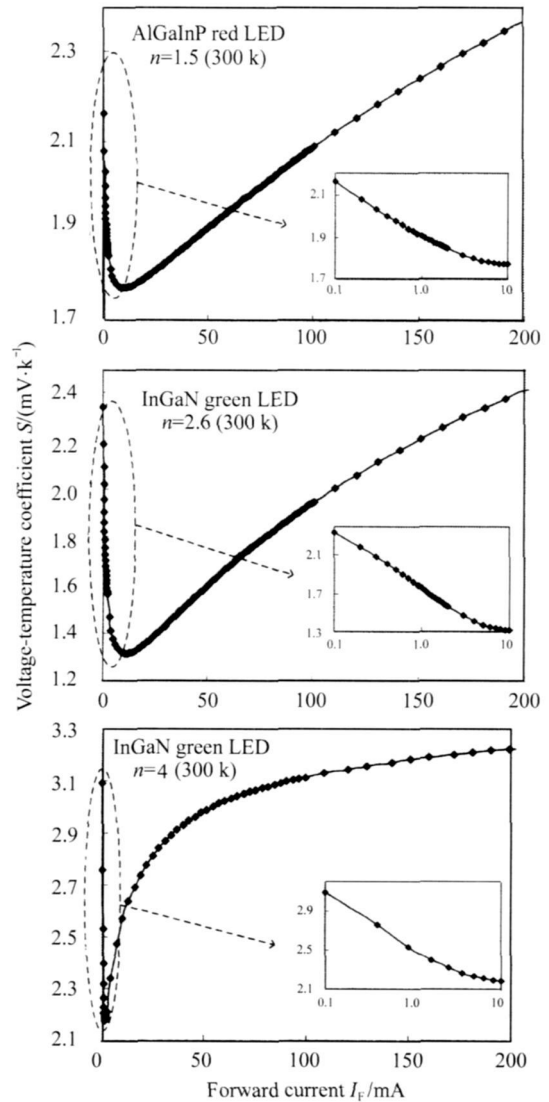


图4 3个LED在高温区的 I_F-S 图
(内置的小图为半对数坐标的 I_F-S 图)
Fig. 4 I_F-S curves of three LEDs in high temperature regime
(the inset shows I_F-S curves in semi logarithmic coordinate)

由式(8)可知, 在高温区, 小电流时电压温度系数与正向电流成负对数关系, 图4的3个内置小图也证实了这一点; 大电流时二者成线性正比关系, 斜率与串联电阻有关, 这在图4红光LED的 I_F-S 图中得到很好证实。但样品中的白光LED在高温区大电流时二者并不成线性关系, 而且我们实验中发现大部分InGaN LED在高温区大电流时二者的关系与这个InGaN白光LED相似。利用式(1)对测得的 $I-V$ 曲线进行拟合, 发现这些InGaN LED的理想因子 n 大部分在3~6之间, 与文献[14~17]的结论一致。文献[14]分析了GaN基LED大的理想因子的机理并提出了热空穴发射模型。文献[15]也分析了GaN

基 LED 大的理想因子的机理并认为实际测出的理想因子是其 LED 结构(金属半导体接触, 异质结, 同质结等)各部分理想因子之和。文献[16, 17]把 GaN 基 LED 大的理想因子归结为载流子的隧道复合。由于晶格失配以及生长工艺的制约, GaN 外延层中一般具有较高的缺陷密度和界面能级密度, 导致存在复杂的电流机制, 具体的电流机制有待进一步探究。所以这些 InGaN LED 会偏离二极管肖克莱模型得出的结论, 即在低温区时正向电压随温度变化很缓慢和在高温区大电流时电压温度系数与正向电流偏离线性关系。而对于图 4 中的 InGaN 绿光 LED, 在 300 K 时 $n=2.6$, 可知它的主要运输机制为载流子的扩散复合, 所以与二极管肖克莱模型得出的结论相近。

5 结论

本文对 AlGaInP, InGaN 材料系功率型 LED 的正向电压随温度的变化关系进行了系统的理论和实验研究。发现在恒定电流下, 两者的变化关系可分为高温区和低温区两段。在高温区两者为线性反比的关系; 在低温区正向电压随温度减小而突然急剧增大。并指出高温区的电压温度系数与正向电流的一般关系: 小电流时二者为负对数关系; 大电流时二者线性正比关系。但对于一些缺陷密度较高 InGaN LED 大电流时电压温度系数与正向电流会偏离线性关系。理论很好地解释了实验结果, 为测量 LED 的结温提供良好的理论依据。值得指出的是本文对 PN 结温度传感器也有重要的参考作用。

参考文献:

- [1] YI Xiao-yan, CUO Jin-xia, MA Long, et al. Research and fabrication of flip-chip high-power blue LEDs[J]. Journal of Optoelectronics • Laser (光电子 • 激光), 2006, 17(6): 693-696. (in Chinese)
- [2] YU Bin-hai, WANG Yao-hao. Junction temperature and thermal resistance restrict the development of high power LED[J]. Chin J Lumin, 2005, 26(4): 761-766. (in Chinese)
- [3] JE5D51-1-1995. Integrated circuits thermal measurement method electrical test method(single semiconductor device)[S].
- [4] Han Youl Ryu, Kyoung-Ho Ha, et al. Measurement of junction temperature in GaN based laser diodes using voltage-temperature characteristics[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87:093506.
- [5] Xi Y, Xi J Q, Gessmann Th et al. Junction temperature in ultraviolet light emitting diodes[J]. Jpn J Appl Phys, 2005, 44(10): 7260-7266.
- [6] Chirajed S, Xi Y, Th Gessmann, et al. Junction temperature in light-emitting diodes assessed by different methods[J]. Proc SPIE, 2005, 5139: 16-24.
- [7] Gu Y, Narendran N. A non contact method for determining junction temperature of phosphor-converted white LEDs[J]. Proc SPIE, 2004, 5187: 107-114.
- [8] FEI Xiang QIAN Ke-yuan, LIU Yi. Junction temperature measurement and luminous properties research of high-power LED[J]. Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2008, 19(3): 289-292. (in Chinese)
- [9] LIU En-ke, ZHU Bing-sheng, LIU Jin-sheng. Semiconductor physics[M]. Publishing house of electronics industry, 2003: 85. (in Chinese)
- [10] Ray Hua Hbrng, Yi-Chung Lien, Wei-Chih Peng, et al. High brightness wafer-bonded indium tin oxide light-emitting diode/mirror/Si. Jpn J Appl Phys, 2001, 40: 2747-2751.
- [11] Tran C A, Chu C F, Cheng C C, et al. High brightness GaN vertical light emitting diodes on metal alloyed substrate for general lighting application J Cryst Growth, 2007, 298: 722-724.
- [12] Ota S B, Smita Ota. A study of forward characteristics of a GaAlAs temperature sensor diode[J]. Measure Science Technology, 2000, 11: 815-817.
- [13] ZHANG Kai-xun, WANG Xiang. Measure temperature with p-n junction forward characteristics[J]. Physics, 1980, 9(3): 213-217. (in Chinese)
- [14] Hirsch L, Barriere A S. Electrical characterization of InGaV GaN light emitting diodes grown by molecular beam epitaxy. J Appl Phys, 2003, 94(8): 5014-5020.
- [15] Shan J M, Li Y L, Gessmann T, et al. Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors($n \gg 2$) in AlGaIn GaN p-n junction diodes[J]. J Appl Phys, 2003, 94(4): 2627-2630.
- [16] Cao X A, Stokes E M, Sandvik P M. Diffusion and tunneling currents in GaN InGaN multiple quantum well light-emitting diodes[J]. IEEE Electron Device Lett, 2002, 23(9): 535-537.
- [17] Chitnis A, Kumar A, Shatalov M, et al. High quality p-n junctions with quaternary AlInGaInGa quantum wells. Appl Phys Lett, 2000, 7(23): 3800-3802.

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。