

GaN 基蓝光发光二极管正向电压温度特性研究^{*}

李炳乾[†] 郑同场 夏正浩

(佛山科学技术学院光电子与物理学系, 佛山 528000)

(2009 年 1 月 6 日收到, 2009 年 2 月 24 日收到修改稿)

对 GaN 基蓝光发光二极管(LED)正向电压温度特性进行了研究,发现在温度较高时,正向电压随温度的变化系数逐渐减小,直至出现拐点,正向电压随温度的变化系数由负数变为正数.此时若继续升高温度,则正向电压随温度升高迅速增加,并常常伴随有器件失效的现象发生.在小电流情况下,这种现象不很明显.随着电流的增加,现象表现得越来越明显,拐点出现的温度也越来越低,而且温度超过拐点之后,正向电压值增加得更快.通过与相同封装的另一组器件测试结果对比,排除了封装材料玻璃转换温度的影响.分析认为,这一现象的出现是由器件等效串联电阻迅速增加所致,而且主要是由器件 p 型层材料的迅速劣化引起的.研究结果表明通过测量不同电流下正向电压随温度的变化系数能够快速判断 GaN 基蓝光 LED p 型层的质量好坏,为研究者和生产者提供了一种快速、简便的测试方法.

关键词:发光二极管,氮化镓,正向电压,温度系数

PACC:7280E,7865P,7860F,7840G

1. 引言

GaN 基蓝光发光二极管(light emitting diodes,简称 LED)由于具有发光效率高、全固态、长寿命等特点,其在照明领域的应用前景引起学术界和产业界的广泛关注.为了满足照明领域对高光通量的要求,单个器件的输出功率在不到十年时间里由最初的不足 0.1 W,达到目前接近 10 W 的水平^[1-3].LED 芯片的工作温度对 LED 器件和模组的发光效率、可靠性、光色等有很大影响,随着输入功率的增加,LED 器件和模组的散热结构设计成为 LED 封装和应用中最重要的问题之一^[4,5].

衡量 LED 散热设计的主要特征参数之一是热阻.一般情况下,半导体器件 pn 结的正向电压随温度的升高而下降,二者近似成线性关系^[6],这一关系是电学法测量半导体器件和模组热阻的基础.本文在研究 GaN 基蓝光 LED 正向电压温度特性时发现,在温度较高时,正向电压随温度的变化严重偏离线性关系,直至会出现正向电压随温度的变化系数由负数变为正数的情况,而且这一转变出现的温度同实验所用的电流有关.随着电流增加,转变点出现的

温度也越来越低.上述现象同传统的半导体理论以及以前的文献报道产生明显矛盾^[7],初步分析认为这一反常现象与 LED 器件质量有关(主要是 p 型层).通过对比实验发现,出现反常现象的 LED 寿命和可靠性都存在问题.在研究中还发现正向电压随温度的变化系数也同测量电流有关,小电流时的电压随温度的变化系数明显大于大电流的情况,并对正向电压随温度的变化系数同电流的关系进行了定性的理论分析.

2. 电压随温度变化的物理机理及实验系统

实际的二极管可以看作一个理想二极管与等效电阻串联而成,LED 工作时的额定电流往往达到十几毫安甚至上千毫安,串联电阻引起的压降也不能忽略,电流-电压方程近似写为

$$I_F = I_0 e^{\frac{q(V_F - R_s I_F)}{nkT}}, \quad (1)$$

其中 I_0 是反向饱和电流, V_F 、 I_F 分别是输入电压和输入电流, q 为电子电荷, R_s 是等效串联电阻, n 为理论因子, k 为玻耳兹曼常数.反向饱和电流 I_0 与

^{*} 广东省自然科学基金(批准号:04011642)和佛山市科技发展专项基金(批准号:04030021)资助的课题.

[†] E-mail: libingqian@fosu.edu.cn

温度和能带宽度的关系可以用下列公式描述：

$$I_0 = A e^{-\frac{E_G(T)}{nkT}}, \quad (2)$$

式中 A 是与 pn 结的类型、掺杂浓度、几何尺寸以及构成 pn 结的材料等有关的系数, $E_G(T)$ 是温度 T 时的能带宽度. 半导体材料的能带宽度表现出很强的温度依赖特性, 随着温度的升高, 能带宽度呈现出单调下降的趋势, 用 Varshni 公式^[8]可以很好地描述能带宽度和温度的关系, 在更多的情况下, 能带和温度的关系可以用更加简单的一级近似描述为

$$E_G(T) = E_G(0) - \beta T, \quad (3)$$

其中 β 是温度系数.

为了描述方便, (1) 式可以改写为

$$V_F = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_F}{A}\right) + \frac{E_G(0) - \beta T}{q} + R_s I_F. \quad (4)$$

LED 通电后, 一部分电能转换成光能量输出, 其余部分以热量形式耗散在 LED 芯片中. 因为热阻的存在, 输入功率引起的自加热效应将导致芯片温度升高, 芯片 pn 结 (发光区) 温度 T_j 可以表示为

$$T_j = (P_e - P_o) \theta_{jc} + T_c, \quad (5)$$

式中, $P_e = I_F \cdot V_F$ 是输入电功率, P_o 为 LED 输出光功率, θ_{jc} 为 pn 结到环境的热阻, T_c 为环境温度.

对于固定的器件散热结构和电器连接, 芯片到环境的热阻是固定的, 在输入功率恒定的情况下, 可以近似认为环境温度的改变量等于管芯温度的改变值.

为了测量输入电压随温度的变化系数, 设计了图 1 所示的测试系统. 通过粗调电阻 R_1 和细调电阻 R_2 以及恒压源自身的输出调节, 可以精确控制流过 LED 的电流大小, 保证整个实验过程中, 流过 LED 的电流值恒定. 实验中采用三只 LED 串联, 对测量电压值取平均的方法, 这样可以提高测量精度, 并在一定程度上消除 LED 个体性能差异对实验结果带来的影响.

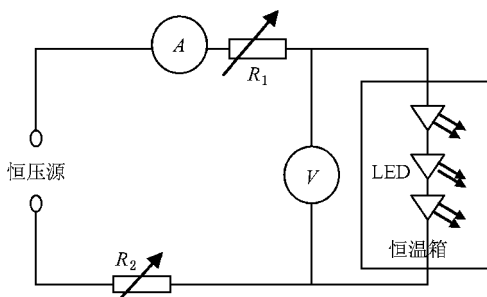


图 1 输入电压随温度的变化系数测试原理图

实验中, 采用台湾某公司生产的商品化 GaN 基蓝光 LED 芯片, 这种芯片采用蓝宝石衬底, 在衬底上依次淀积有 n 型 GaN 层、多量子阱 (multi-quantum-well, 简称 MQW) 发光层和 p 型 GaN 层. 芯片尺寸为 $300 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$, 封装采用典型的引线封装结构. 由于引线散热面积很小, 引线结构 LED pn 结到环境的热阻值往往高达 $400\text{--}450 \text{ }^\circ\text{C/W}$, 焊接到线路板上之后, 可以通过焊点和 PCB 板上的铜箔散热, pn 结到环境的热阻会有所降低, 具体降低的数值由焊点和铜箔面积决定, 但是降低的数量有限, 往往也会达到 $300 \text{ }^\circ\text{C/W}$ 以上.

3. 高温大电流时电压随温度的非线性变化

文献 [7] 曾经对不同材料和不同结构的 LED 电压随温度的变化关系进行了研究, 由于研究的温度范围有限, 文中得出了电压随温度的变化系数与温度无关的结论. 在本文对 GaN 基 LED 的研究中, 将实验温度扩展到 $40\text{--}110 \text{ }^\circ\text{C}$ 的范围, 实验结果如图 2 所示. 通过图 2 可以看出, 在一定的温度范围内 ($40\text{--}80 \text{ }^\circ\text{C}$), 不同电流下, 电压随温度的变化近似成线性关系, 但是随着温度的进一步增加, 不同驱动电流下, 电压与温度的变化关系出现了很大的差异.

对于小电流情况, 如 0.1 、 0.2 和 0.5 mA , 电压随着温度的变化关系近似保持了线性关系. 电流增加到 1 mA , 在温度超过 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 随着温度的增加, 电压随着温度的增加虽然呈现出单调下降的现象, 但是电压下降的幅度越来越小, 二者明显开始偏离线性关系.

对于大电流的情况, 如 2.5 、 10 、 15 、 20 和 25 mA , 在温度超过 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 随着温度增加, 电压随温度的变化不仅偏离了线性关系, 甚至出现了一个拐点温度. 超过了这个温度之后, 随着温度的增加, 电压不下降反而开始升高. 对比不同电流的实验曲线可以发现, 拐点温度的数值与电流的大小密切相关, 电流越大, 拐点温度越低, 而且电流越大, 拐点出现之后, 电压随着温度的升高增加的也就越快. 电流在 15 mA 以上 (15 、 20 和 25 mA) 时, 拐点出现之后, 如果继续提高实验温度 $15\text{--}20 \text{ }^\circ\text{C}$, 则 LED 光强迅速下降, 电压迅速提高, 并经常伴随有器件失效现象.

实验中出现的这种电压随温度的非线性变化关系, 不仅同传统的半导体理论发生矛盾, 而且在对

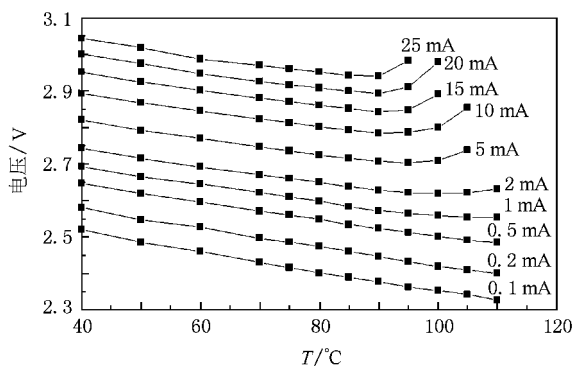


图 2 不同电流正向电压随温度变化关系

AlGaInP 四元系超高亮度的红、黄色 LED 进行的类似实验研究中,也没有出现过.由于实验所采取的温度范围没有超过 110 °C,即使将芯片的自加热效应计算进去,也没有超过封装用环氧树脂的玻璃转换温度 140 °C,因此可以排除封装环氧树脂的影响.

在正向电流恒定的情况下,对(4)式两侧求微分,电压随温度的变化系数 K 描述为

$$\frac{dV_F}{dT} = \frac{nK}{q} \ln\left(\frac{I_F}{A}\right) - \frac{\beta}{q} + \frac{dR_s}{dT} I_F, \quad (6)$$

式中,等号右边前两项可以看作常数,对电压随温度变化系数影响最大的是第三项,也就是等效串联电阻随温度的变化.在 AlGaInP 材料系 LED 中,等效串联电阻比较小,其随温度的变化对电压随温度变化系数的影响也很小,这是在实验中没有发现电压随温度变化系数偏离线性的原因. GaN 基 LED p 型层的电阻很大^[9],导致 GaN 基 LED 的等效串联电阻比较大,其变化对电压随温度变化系数影响也大,而且这一影响随着驱动电流的增加会表现得更加明显.

文献[10]给出 GaN 基 LED 的等效串联电阻在一定的温度范围内相对恒定,超出这一温度范围后就会迅速增加.初步判断是该批次的 LED 芯片 p 型层或 p 型欧姆接触存在质量问题,在相对较低的温度范围内就开始迅速增加,从而导致了电压随温度的变化偏离了线性关系.这种 p 型层或 p 型欧姆接触存在的质量问题有可能会影响到 LED 的可靠性和稳定性.为了验证这一点,对该批次的 LED 进行了恒流老化实验,结果发现与分析情况类似,该批次的 LED 在 20 mA 恒流驱动下,平均寿命(以光衰超过 75% 计算)不到 1000 h.同时,对该公司生产的另一批次同型号 GaN 基蓝光 LED 芯片(以下简称 2# 样品)进行了类似实验研究,2# 样品的平均寿命超过了 5000 h,实验数据如图 3 所示.从图 3 数据可以

看出,虽然实验温度范围由 40—110 °C 扩展为 40—120 °C,最高温度增加了 10 °C,但是在所有电流下(0.1—25 mA)电压随温度的变化都表现出良好的线性关系.

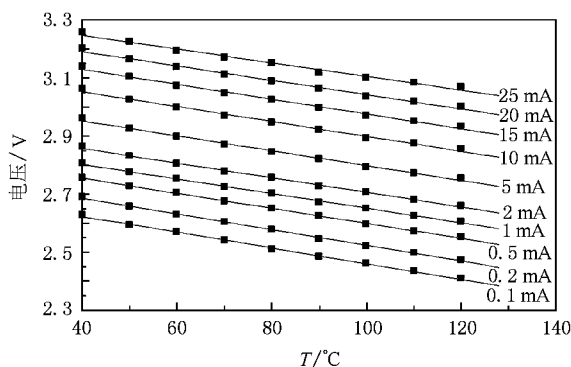
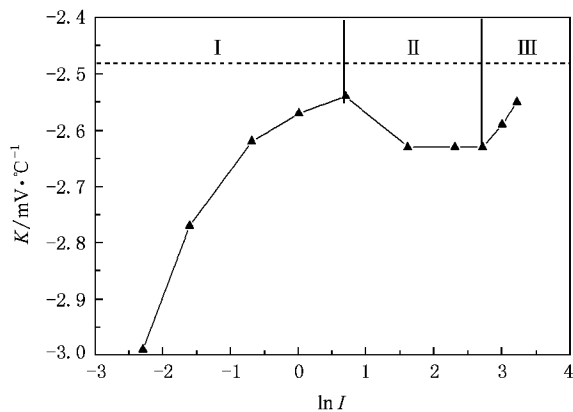


图 3 2# 样品不同电流正向电压与温度的变化关系

4. 电压随温度的变化系数同电流的关系

从(6)式等号右边第一项可以看出,电压随温度的变化系数同电流的自然对数成正比,而(6)式等号右边第二项在相当宽的温度范围内都可以看做常数,第三项在等效串联电阻不随温度变化的情况下实际为零,只有在等效电阻随温度发生变化时才开始对电压随温度的变化系数产生影响.

图 4 是不同驱动电流下,电压随温度的变化系数 K 的实验数据,从图中可以看出,在小电流的情况下(图中范围 I, 电流 0.1—2 mA),电压随温度的变化系数随 $\ln I$ 增加而增加,但是增加的速率逐渐下降.在这一阶段,等效串联电阻基本不随温度变

图 4 电压随温度的变化系数 K 与电流的变化关系 I 的单位为 mA

化,影响电压随温度的变化系数和电流关系的主要因素是(6)式等号右边第一项,该项中的理论因子 n 是一个同复合电流与扩散电流比例相关的物理量.在量子阱结构的发光器件中,由于扩散电流在总电流中所占比例很大, n 值往往数倍于同质 pn 结^[1].随着电流的增大,扩散电流在总电流中的所占比例逐渐增大,复合电流所占比例下降.这一点已经通过 LED 发光效率在小电流情况下的变化情况得到了验证.扩散电流和复合电流在总电流中的所占比例的变化导致 n 的数值开始下降,正是 n 随电流增加而出现的下降部分抵消了电流增加带来的影响,导致电压随温度的变化系数没有随 $\ln I$ 增加而线性增加.

当 n 值下降造成的电压随温度的变化系数减小和电流增加带来的电压随温度的变化系数增加基本达到平衡时,就出现了图 4 中范围 II 的情况,电压随温度的变化系数基本保持不变.当电流进一步增加时,芯片的自加热效应不能忽略,例如根据(5)式和引线结构 LED 的热阻可以估算出 pn 结温度在 15、20 和 25 mA 时分别高出环境温度 17、23 和 28 °C (pn 结到环境热阻按照 350 °C/W 估算),有可能已经超出了等效串联电阻相对稳定的范围.这时(6)式等号右边第三项的影响开始显现出来,并且逐渐占据主导地位.与此同时,随着电流的增加, n 值也

渐趋稳定,在这两方面的共同作用下,电压随温度的变化系数重新开始随电流的增加而增加(图 4 中范围 III).

5. 结 论

对 GaN 基蓝光 LED 正向电压温度特性的实验研究表明,通过测量正向电压随温度的变化系数可以反映出器件等效串联电阻的变化.而对于 GaN 基蓝光 LED 芯片, p 型电阻层和 p 型欧姆接触层是等效串联电阻的主要来源,等效串联电阻的异常变化可以作为判断 GaN 基蓝光 LED 芯片 p 型电阻层和 p 型欧姆接触层材料质量优劣的一个标准.很多侧重于 LED 封装结构和宏观特性的研究者和 LED 封装企业往往不具备微观分析仪器,只能采用长时间的寿命实验来对 GaN 基蓝光 LED 芯片 p 型电阻层和 p 型欧姆接触层质量进行判断,延长了产品开发的周期.本文的研究结果表明,即使利用简单的电流表、电压表和恒温箱,通过测量不同电流下正向电压随温度的变化系数能够快速判断出 p 型电阻层和 p 型欧姆接触层的质量好坏,为 LED 封装结构和宏观特性的研究者和 LED 封装企业提供了一种快速、简便的测试方法.

- [1] Jang J S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 081118
- [2] Chen T P, Yao C L, Wu C Y, Yeh J H, Wang C W, Hsieh M H 2008 *Proc. SPIE* **6910** 691005
- [3] Shen G D, Zhang J M, Zhou D S, Xu C, Gu X L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 472 (in Chinese) [沈光地、张剑铭、邹德恕、徐 晨、顾晓玲 2008 物理学报 **57** 472]
- [4] Horng R H, Chiang C C, Hsiao H Y, Zheng X, Wu D S, Lin H I 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 111907
- [5] Hahn B, Weimar A, Peter M, Baur J 2008 *Proc. SPIE* **6910** 691004
- [6] Zhang Y Z, Feng S W, Xie X S, Li Y, Yang J, Sun J Y, Li C Z 2006 *Chinese Journal of Semiconductors* **27** 350 (in Chinese) [张跃宗、冯士维、谢雪松、李 瑛、杨 集、孙静莹、吕长志 2006 半导体学报 **27** 350]
- [7] Li B Q, Bu L J, Gan X W, Fan G H 2003 *Acta Photon. Sin.* **32** 1350 (in Chinese) [李炳乾、布良基、甘雄文、范广涵 2003 光子学报 **32** 1350]
- [8] Cao X A, Teetsov J M, D'Evelyn M P, Merfeld D W, Yan C H 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 7
- [9] Liu N X, Wang H B, Liu J P, Niu N H, Han J, Shen G D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1424 (in Chinese) [刘乃鑫、王怀兵、刘建平、牛南辉、韩 军、沈光地 2006 物理学报 **55** 1424]
- [10] Li B Q, Liu Y H, Feng Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 477 (in Chinese) [李炳乾、刘玉华、冯玉春 2008 物理学报 **57** 477]
- [11] Chitnis A, Kurmar A, Shatalov M, Adivarahan V, Lunev A, Yang J W, Simin D, Khan M A, Gaska R, Shur M S 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 3800

Temperature characteristics of the forward voltage of GaN based blue light emitting diodes^{*}

Li Bing-Qian[†] Zheng Tong-Chang Xia Zheng-Hao

(Department of Optoelectronics & Physics ,Foshan University ,Foshan 528000 ,China)

(Received 6 January 2009 ; revised manuscript received 24 February 2009)

Abstract

The temperature characteristics of the forward voltage of GaN based blue light emitting diodes are studied. We find that the temperature coefficient decreases with the increasing temperature when the temperatures is relatively high. There is an inflection point as the temperature coefficient deceases ,then the temperature coefficient changes from negative to positive. If the temperature still increases at this moment ,the forward voltage will increase dramatically ,resulting in the failure of the light emitting diodes. This phenomenon is not obvious when the current is low. When the current increases ,this phenomenon becomes more and more obvious ,and the temperature of inflection point becomes lower and lower. Moreover , the forward voltage increases more quickly when the temperature is higher than the inflection point temperature. By comparing the test result of another group light emitting diodes with the same package epoxy , we find that the influence of glass transition temperature of the package epoxy can be neglected. The appearance of this phenomenon is due to the rapid increment of the equivalent series resistance of which the main reason is the rapid deterioration of the p-type layers of the GaN based blue light emitting diode. The result shows that we can judge the quality of the GaN based blue light emitting diodes p-type layers quickly by measuring the variation of the forward voltage with temperature ,which is a rapid method for the researchers and producers.

Keywords : light emitting diode , GaN , forward voltage , temperature coefficient

PACC : 7280E , 7865P , 7860F , 7840G

^{*} Project supported by the Natutral Science Foundation of Shandong Province , China (Grant No. 04011642) and the Science & Technical Foundation of Foshan City , China (Grant No. 04030021).

[†] E-mail : libingqian@fosu.edu.cn