2010年6月

Jun., 2010

文章编号:1000-7032(2010)03-0364-05

# Si 衬底 GaN 基蓝光 LED 老化性能

肖友鹏<sup>1</sup>,莫春兰<sup>1,2</sup>,邱 冲<sup>1,2</sup>,江风益<sup>1,2</sup>\* (1. 南昌大学教育部发光材料与器件工程研究中心,江西南昌 330047; 2. 晶能光电(江西)有限公司,江西南昌 330029)

**摘要:**报道了芯片尺寸为 500 µm×500 µm 硅衬底 GaN 基蓝光 LED 在常温下经 1 000 h 加速老化后的电学 和发光性能,其光功率随老化时间的变化分先升后降两个阶段;老化后的反向漏电流和正向小电压下的电流 均有明显的增加;老化后器件的外量子效率(EQE)比老化前低;老化前后 EQE 衰减幅度在不同的注入电流下 存在明显差异,衰减幅度最小处出现在发光效率最高时对应的电流密度区间。

关 键 词: 硅衬底; GaN; 蓝光 LED; 老化; 光衰
 中图分类号: 0482.31; TN383.1
 PACS: 78.60. Fi
 PACC: 7860F
 文献标识码: A

### 1引言

近几年来, InGaN/GaN 发光二极管(LEDs)的 研发与生产取得了飞速发展。文献中已经报道了 蓝光 LEDs 的光功率达到 643 mW(440 nm/3.24 V/350 mA/WPE: 57%), 白光的光通量达到 155 lm(350 mA/3.24 V/136 lm/W/5 000 K)<sup>[1]</sup>。这 表明, GaN 基蓝光 LEDs 已经具备了进入通用照 明所需的发光效率<sup>[2]</sup>。但是, 目前产品市场中不 同厂家生产的器件的可靠性良莠不齐, 在一定程 度上影响了用户的信心, 对大面积推广使用不利, 因而提高器件的可靠性成为目前研究的重点 之一。

LEDs 的制作要依次经过外延生长、芯片制 作、器件封装等主要环节<sup>[3]</sup>,每个环节都会对 LEDs 器件的可靠性和寿命产生影响。外延材料 中非辐射复合缺陷的生成、载流子注入活性区机 制的变化,芯片制造中欧姆接触电学性能的变化、 反射镜制作的质量、器件封装中散热工艺、各界面 连接质量等等都会影响 GaN 基 LED 的可靠 性<sup>[4~7]</sup>。温度和电流对 LED 的发光效率产生影 响<sup>[8]</sup>,研究 LED 的可靠性通常采取电流加速方法 和温度加速方法,在 LEDs 芯片中注入高电流密 度会导致热化和强电场现象。持续的高温和强电 场可能会增强原子的扩散和造成电极的意外熔 合,与此同时也有可能增加断层密度和点缺 陷<sup>[9]</sup>。本实验室已经分别对 Si 衬底 GaN 基大功 率蓝光 LED 和 Si 衬底 GaN 基绿光 LED 进行 90 mA 大电流 125 ℃ 高温老化,结果显示器件无光 衰,电学性能非常稳定<sup>[10,11]</sup>。而对 LED 进行 SiN 膜钝化也会改善器件的可靠性<sup>[12]</sup>。本文在常温 下对 500  $\mu$ m × 500  $\mu$ m 的 GaN 基蓝光 LED 芯片 注入 200 mA 的电流持续老化 1 000 h,报道了加 速老化前后相关光电性能。

#### 2 实 验

GaN 基蓝光 LED 芯片样品尺寸为 500 μm × 500 μm,设计工作电流为 60 mA。外延片是本实 验室 Thomas Swan MOCVD 外延系统上生长的,衬 底是 Si(111)<sup>[13]</sup>;经过基板转移、腐蚀衬底等步骤 制成垂直结构芯片<sup>[14]</sup>;划片后将芯片固定于封装 支架上,为避免因封装不良带来的可靠性问题而 影响对老化机理的判断,本样品不灌胶,目的是仅 仅研究芯片本身的可靠性。加速电流老化实验在 室温下进行,选择 5 只 LED 进行裸芯老化,老化 电流是 200 mA,持续老化 1 000 h。在老化 24, 72,240,576,1 000 h 时从老化台上取下样品,分 别用积分球测试系统在工作电流 60 mA 时测量

收稿日期: 2009-10-09;修订日期: 2009-11-24

基金项目:国家"863"计划 (2003 AA302160, 2005 AA311010)资助项目

作者简介:肖友鹏(1979-),男,江西萍乡人,主要从事 Si 衬底 GaN 基 LED 的研究。

E-mail: lantianshang@ yahoo. cn

<sup>\*:</sup> 通讯联系人; E-mail: jiangfy@ ncu. edu. cn

LED 的光功率,用 KEITHLEY2400 测试系统测量 *I-V* 曲线。

## 3 结果与讨论

我们选取了5只具有相同外延条件的LED 老化实验数据,列于表1。

表1 硅衬底蓝光 LED 经老化后在不同时间点的光衰 Table 1 Luminous decay of LED after aging

编号	不同老化时间的光衰			
	24 h	72 h	576 h	1 000 h
1	0.6%	-1.4%	-3.0%	-4.2%
2	1.9%	-0.2%	-2.7%	-3.9%
3	1.0%	0.5%	-0.8%	-4.4%
4	1.3%	-0.7%	-3.1%	-1.6%
5	1.1%	-0.8%	-2.9%	-4.6%
平均	1.2%	-0.5%	-2.5%	-3.8%

图1显示了光衰演进过程。光功率的衰减经 过了两个阶段,首先老化一段时间后光功率有所 增加,而后随着老化的继续进行,光功率逐渐衰 减,这与 Narendran 等<sup>[15]</sup>的实验结果相一致。这 一现象可作如下解释:开始老化阶段,消极因素是 缺陷有所增加,积极因素是这一相当于退火的过 程使 p 型受主进一步被激活提高了空穴浓度,积 极因素战胜消极因素,光功率会有所上升<sup>[16]</sup>。后 一阶段,缺陷进一步增加,使得光功率衰减。由于 衬底与外延薄膜之间存在较大的晶格失配和热失 配,异质外延生长时 GaN 外延薄膜中存在大量失 配位错,这些缺陷起非辐射复合中心和载流子隧 穿通道的作用。在 LED 的老化过程中,有源区内



图 1 200 mA、常温老化下 LED 的光衰与老化时间的关 系曲线

Fig. 1 Luminous decay of LEDs after aging under 200 mA, at RT for 1 000 h condition.

缺陷和位错的增加,有源区外缺陷和位错移动,造成了器件的光衰减<sup>[17,18]</sup>。

图 2 是老化进行过程中的 *I-V* 曲线的变化情况。在 10 V 的反向电压下,随着老化时间的增加,常温老化 24,72,240,576,1 000 h 后反向漏电流逐渐增大。反向漏电流的增加可归结为隧穿电流的增加<sup>[19]</sup>,杂质能级和缺陷能级是产生隧穿电流的原因<sup>[20]</sup>。





Fig. 2 *I-V* curves measured in blue LED submitted to DC aging test. The inset shows relationship between forward voltage and aging time.

在正向小电压下,载流子注入到活性区主要 是隧穿机制,隧穿主要通过位于空间电荷区的缺 陷,空间电荷区由非辐射复合占主导。在电压超 过2.5 V后,注入载流子扩散经过整个活性区,辐 射复合优于非辐射复合。而在电压更高的情况 下,*I-V*曲线几乎成线性,串联电阻高,理想因子 在 6~7之间(数学分析未显示),如此高的理想 因子说明 pn 结中存在着隧穿电流<sup>[21]</sup>。硅衬底 GaN 基 LED 理想因子大的原因被认为是高缺陷 密度 所致,高缺陷密度使电流隧穿更容易 进行<sup>[22]</sup>。

反向偏压和正向偏压下都观察到了漏电流也 就是隧穿电流的增加,缺陷的生成增加了活性区 中的非辐射复合率,形成附加的隧穿电流。漏电 流随老化时间的增加而增加,对应了图1所示的 光功率随老化时间的延续持续衰减<sup>[23]</sup>。

图 2 中的插图显示了不同老化时间下 60 mA 正向电流时的正向电压。开始电压降低是由于欧 姆接触的改善和芯片电导率的增加,而后随着老 化的进行电极接触性能退化且可能引起电流拥 挤,正向电压有所上升。正向电压的变化趋势和 光功率的变化趋势没有必然的联系。 图 3 是老化 1 000 h 后外量子效率的变化情况,与其对应的是老化 1 000 h 后不同电流密度下的光衰情况。在每个电流水平下,老化后的外量子效率(EQE,External Quantum Efficiency)都比老化前低。LED 的外量子效率:

EQE = IQE ×  $\eta_{\text{extraction}} = \eta_{\text{injection}} \times \eta_{\text{radiative}} \times \eta_{\text{extraction}}$ , 式中 EQE 指的是外量子效率, IQE 是内量子效 率, $\eta_{\text{extraction}}$ 是出光效率, $\eta_{\text{injection}}$ 是载流子注入效 率, $\eta_{\text{radiative}}$ 是辐射效率。注入效率 $\eta_{\text{injection}}$ 是活性 区总的复合电流( $I_{\text{active}}$ )与外部施加总的电流( $I_{\text{F}}$ ) 的比值,其在小电流水平下通常较高<sup>[24]</sup>。辐射效 率 $\eta_{\text{radiative}}$ 是活性区中辐射复合率与辐射复合率加 非辐射复合率总和的比值。由于老化后缺陷增 殖,非辐射复合中心和漏电流增加,降低了注入效 率和辐射效率,使得老化后的外量子效率低于老 化前。



图 3 老化前后 LED 外量子效率 EQE(a) 和光衰(b) 与电 流密度之间的关系

Fig. 3 EQE(a) and luminous decay (b) of LED as a function of current density before and after aging 老化前后的 EQE 随电流密度的增加均存在 先升后降的过程。这一现象可作借助活性区载流 子匹配状况来解释:在 InGaN/GaN 多量子阱中, 导带中阻挡电子的势垒高度比价带中阻挡空穴的 势垒高度高出许多;在低电流密度区域,导带中较 高的电子势垒限制了电子于 MQW 活性区内参与 辐射复合,而价带中较低的空穴势垒有助于空穴 于 MQW 活性区内参与辐射复合,此时电子密度 少于空穴密度的<sup>[25]</sup>,发光效率较低;随着注入电 流密度的增加,越来越多的电子参与活性区辐射 复合,电子与空穴这两种载流子逐渐匹配,从而效 率增加;在更大注入电流密度的情况下,导带中的 电子势垒不能有效阻止电子的逸出,活性区电子 密度不能与空穴密度相匹配,发光效率将下降。

非常有意义的是在电流密度为2.0 A · cm<sup>-2</sup> (即正向电流为4 mA)处有最大的 EQE,且老化 前后此处 EQE 最接近,即光衰最小,不到1.0%。 随着电流密度逐渐远离2.0 A · cm<sup>-2</sup>,无论小于 还是大于此值,光衰越来越大。这一现象对设计 外延结构中 p 层和 n 层载流子浓度和一定电流工 作下芯片的尺寸大小有参考价值。

#### 4 结 论

对 Si 衬底 GaN 基蓝光 LED 芯片在常温下经 1 000 h 老化的电学和发光性能进行了研究。老 化后的光功率随时间的变化分先升后降两个阶 段,光功率升高的原因归结为老化后更高的受主 激活率,光功率下降的原因归结为老化后更高的受主 激活率,光功率下降的原因归结为老化后更高的受主 激活率,光功率下降的原因归结为老化后更高的受主 流活率,光功率下降的原因归结为老化后要高的受主 加所带来的负面影响。老化前后 *I-V* 曲线结果显 示,反向漏电流和正向小电压下的电流都有明显的 增加,归结为老化后杂质缺陷能级带来的隧穿电流 所致。老化后的器件外量子效率比老化前低,老化 前后 EQE 衰减幅度与注入电流密度关系密切;电 流密度为 2.0 A · cm<sup>-2</sup>处对应 EQE 最高点,同时也 是老化前后光衰最小处。60 mA 工作的芯片在 200 mA 加速老化 1 000 h 后光功率下降仅 3.8%,说明 硅衬底 LED 芯片具有较高的可靠性。

#### 参考文 献:

- [1] Johannes Baur, Frank baumann, Matthias Peter, et al. Status of high efficiency and high power thin GaN-LED development
  [J]. Phys. Status Solidi (c), 2009, 6(s2): S905-S908.
- [2] Dupuis R D, Krames M R. History, development, and applications of high-brightness visible light-emitting diodes [J].

- [3] Luo Yi, Zhang Xianpeng, Han Yanjun, et al. Key technologies for solid state lighting [J]. Laser & Optoelectronics Progress (激光与光电子学进展), 2007, 44(3):17-28 (in Chinese).
- [4] Hahn B, Weimar A, Peter M, et al. High-power InGaN LEDs: present status and future prospects [J]. SPIE, 2008, 6910:691004-1-8.
- [5] Fang Fubo, Wang Yaohao, Song Daihui, et al. Spectroscopic analysis of white LED attenuation [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2008, 29(2):353-357 (in Chinese).
- [6] Li Junfei, Rao Haibo, Hou Bin, *et al.* Investigation on improving the extraction efficiency of power white LEDs with slurry method [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(1):19-24 (in English).
- [7] Chu Minghui, Wu Qing, Wang Jian, et al. Calculation of theoretical limitation of lumen efficiency for white LED [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2009, 30(1):77-80 (in Chinese).
- [8] Wang Jian, Huang Xian, Jiang Dapeng, et al. Effect of temperature and current on LED luminous efficiency [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2008, 29(2):358-362 (in Chinese).
- [9] Ishizaki Shinya. Lifetime estimation of high power white LEDs [J]. J. Light and Visual Environment, 2007, 31(1):11-18.
- [10] You Da, Cheng Haiying, Jiang Fengyi, et al. Study of the reliability of Si-based GaN high-power LED [C]. Zhenjiang: China Optics and Optoelectronics Manufactures Association, 2008.
- [11] Cheng Haiying, You Da, Jiang Fengyi, et al. Research of Silicon substrate GaN-based green LED optical and aging performance [C]. Zhenjiang: China Optics and Optoelectronics Manufactures Association, 2008.
- [12] Qiu Chong, Liu Junlin, Jiang Fengyi, et al. The influence of SiN passivation layer to the GaN based blue LED on Si substrate [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2008, 29(5):840-844 (in Chinese).
- [13] Mo Chunlan, Fang Wenqing, Liu Hechu, et al. Growth and characterization of InGaN blue LED structure on Si (111) by MOCVD [J]. J. Crystal Growth, 2005, 285(3):312-317.
- [14] Xiong Chuanbing, Jiang Fengyi, Wang Li, et al. Different properties of GaN-based LED grown on Si(111) and transferred onto new substrate [J]. Science in China (series E: Technological Sciences), 2006, 49(3):313-321.
- [15] Narendran N, Gu Y. Life of LED-based white light sources [J]. IEEE OSA J. Disp. Technol., 2005, 1(1):167-171.
- [16] Jianzheng Hu, Lianqiao Yang, Moo Whan Shin, et al. The aging mechanism of high-power InGaN/GaN light-emitting diodes under electrical stresses [J]. Semicond. Sci. Technol., 2007, 22(12):1249-1252.
- [17] Cao X A, Sandvik P M, Leboeuf S F, et al. Defect generation in InGaN/GaN light-emitting diodes under forward and reverse electrical stresses [J]. Microelectron. Reliab., 2003, 43(1):1987-1991.
- [18] Pavesi M, Salviati G, Armani N, et al. Optical evidence of an electrothermal degradation of InGaN-based light-emitting diodes during electrical stress [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 84(17):3403-3405.
- [19] Meneghini M, Trevisanello L R, Meneghesso G, et al. High-temperature degradation of GaN LEDs related to passivation
  [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2006, 53(12):2981-2987.
- [20] Lee S W, Oh D C, Goto H, et al. Origin of forward leakage current in GaN-based light-emitting devices [J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(13):132117-1-3.
- [21] Otto Pursiainen, Norbert Linder, Arndt Jaeger, et al. Identification of aging mechanisms in the optical and electrical characteristics of light-emitting diodes [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 79(18):2895-2897.
- [22] Liu Weihua, Wang Li, Jiang Fengyi, et al. Research on the ideality factor of GaN light-emitting diodes on Si substrate [J]. J. Functional Materials and Devices (功能材料与器件), 2006, 11(1):45-48 (in Chinese).
- [23] Meneghini M, Meneghesso G, Levada S, et al. High brightness GaN LEDs degradation during dc and plused stress [J]. Microelectron. Reliab., 2006, 46(9-11):1720-1724.
- [24] Rozhansky I V, Zakheim D A. Analysis of processes limiting quantum efficiency of AlGaInN LEDs at high pumping [J]. Phys. Stat. Sol. A, 2007, 204(1):227-230.
- [25] Reynolds C L, Jr, Patel A. Tunning entity in different injection regimes of InGaN light emitting diodes [J]. J. Appl. Phys., 2008, 103(8):086102-1-2.

## The Aging Characteristics of GaN-based Blue LED on Si Substrate

XIAO You-peng1, MO Chun-lan1,2, QIU Chong1,2, JIANG Feng-yi1,2

 Engineering Research Center for Luminescence Materials and Devices of the Education Ministry, Nanchang Uerversity, Nanchang 330047, China;
 Latticepower (Jiangxi) Co. Ltd., Nanchang 330029, China)

**Abstract**: The electrical and optical aging characteristics of GaN-based light-emitting diodes on Si substrate were studied. The LED samples were stressed at room temperature with an injection current of 200 mA. Light-output power increases in the first stage and decreases with aging time. The current-voltage characteristics were also analyzed. Reverse current and forward current at low bias were increased significantly. The external quantum efficiency (EQE) of device after aging is lower than the pre-aging one. The EQE attenuation before and after aging are significantly different at different injection currents. The smallest attenuation occurs in the current density range corresponding to the highest efficiency.

Key words: Si substrate; GaN; blue LED; aging test; luminous decayCLC number: 0482.31; TN383.1PACS: 78.60. FiPACC: 7860FDocument code: A