

GaN 基功率型 LED 可靠性分析*

陈 宇[†] 王良臣 伊晓燕 王立彬 刘志强 马 龙 严丽红

(中国科学院半导体研究所 集成技术中心, 北京 100083)

摘要: 以 GaN 基蓝光芯片为基础制备了功率型蓝光和白光 LED, 在室温 25℃、湿度 35%、驱动电流 350mA、连续老化 1080h 下, 功率型蓝光和白光 LED 光衰随时间呈指数变化, 分别平均衰减 1.35% 和 2.56%; 对 LED 的失效机理分析表明, GaN 基外延材料质量、芯片的结构设计、p 型电极的欧姆接触稳定性等均对 LED 可靠性有重要的影响。

关键词: GaN; 功率型 LED; 老化实验; 退化机理; 可靠性

PACC: 7280E; 7865P; 7840G

中图分类号: TN312*.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0500-04

1 引言

GaN 基发光二极管(LED)一经问世, 由于其具有节能、环保、冷光源、显色指数高、响应速度快、体积小和工作寿命长等突出优点, 广泛应用于电子产品的背光源、交通灯、显示标志、景观照明等方面^[1~3]。随着 InGaN/GaN 蓝光材料的深入研究和功率型发光二极管器件制备性能的稳步提高, LED 正在成为取代传统电光源的下一代的绿色固体照明光源^[4]。尽管许多研究的理论计算都称 LED 寿命可达 10 万小时以上, 但是普通封装的 LED 的光衰严重^[5], 长期可靠性是其重要的性能参数。对于功率型 LED 退化机理研究和有关老化测试数据的报道很少。本文通过 GaN 基芯片制备了功率型 LED, 并对 LED 电流加速老化实验、老化前后 I-V 特性和光衰减特性及其退化机理进行了初步解释。

2 实验

采用 GaN 基波长 455~460nm 不同外延材料, 通过表面处理、ICP 干法刻蚀、电子束(EB)蒸发金属电极、减薄、划片、封装制备功率型蓝光和白光 LED。采用自己设计的老化实验装置进行可靠性实验, 实验条件为室温 25℃, 湿度 35%, 驱动电流 350mA, 连续老化 1080h。并对 p-GaN 电极普遍采用的 NiAu 体系和优化设计 PxNi 体系在 500℃ 空气氛围下长时间合金处理。功率型 LED 的电学和

光学的性能测试在杭州远方公司的 LED 测试系统 PMS-50 紫外-可见-红外光谱分析系统进行, 误差为 ±3%; 所有的 LED 的 I-V 特性测量都采用 HP4156B 型参数分析器进行; 使用 TLM 计算金属电极的比接触电阻率。

3 结果与讨论

3.1 功率型 LED 的光衰特性和 I-V 特性

图 1 是功率型蓝光和白光 LED 的相对光输出随时间的衰减曲线, 每组均采用初始值进行归一化处理。衰减曲线可以采用公式拟合^[6]: $y = \exp(-\alpha t)$, 式中 y 是相对的光输出, α 是衰减系数, t 是老化时间。白光和蓝光分别平均衰减 2.56% 和 1.35%, 蓝光衰减较慢, 这主要是由于白光 LED 波长漂移、荧光粉和环氧树脂退化等因素造成的。由指数衰减规律公式计算蓝光和白光 LED 的平均寿命分别为 51405h 和 26942h。

对比蓝光 LED 老化前后的 I-V 特性(见图 2) 可以看出, 正向 I-V 特性分为明显的 3 个阶段: I 阶段是串联电阻效应区; II 阶段是扩散电流区; III 阶段是隧道电流区。老化后, I 阶段的寄生串连电阻增加, 使得相同电压下的正向电流减小, IV 阶段的反向漏电明显增加, 并且和 III 阶段隧道电流的增加相似。这主要是与 p-GaN 金属电极的退化以及 GaN 基外延材料中缺陷有关^[7,8], 详细的机理将在下面分别讨论。

* 国家科技攻关计划资助项目(批准号: 2003BA316A01)

[†] 通信作者. Email: chenyu@red.semi.ac.cn

2006-12-04 收到

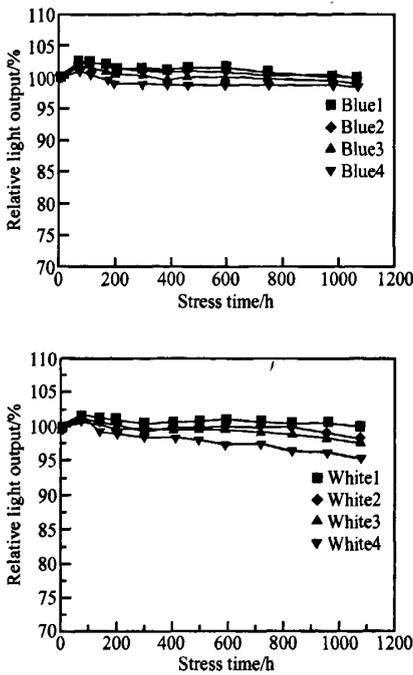


图1 功率型 LED 的老化衰减曲线

Fig.1 Dependence of relative light output on aging time of high power LEDs

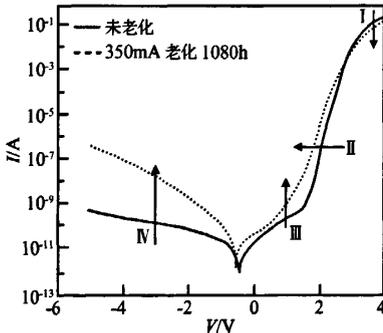


图2 老化前后 GaN 基蓝光 LED 的 I-V 特性

Fig.2 I-V curves of blue LEDs before and after aging experiments

3.2 功率型 LED 的退化机理分析和提高可靠性的措施

根据对于不同可靠性实验结果分析,影响功率型 LED 器件可靠性的主要因素包括 GaN 基外延材料的质量、芯片的结构设计和 p-GaN 金属稳定性等。

3.2.1 GaN 基外延材料

GaN 基器件可靠性的关键取决于外延材料的质量,由于蓝宝石和 GaN 的晶格常数的失配度为 14%,在蓝宝石衬底上生长 GaN 基材料的位错密度

一般为 $10^6 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. 图 3 是 GaN 基材料的 PL 谱的积分强度和位错密度的变化关系^[8]. 可以看出,随刃位错密度和螺位错密度的增加,GaN 基材料 PL 谱的积分强度急剧降低. 这是因为位错本身的原子结构产生了深能级,或是位错引起了晶体中的应变和电化学晶格畸变. 由于缺陷对于载流子具有较强的俘获作用,将在有源层中形成非辐射复合中心,增加了光吸收,使得材料的发光效率降低. 只有在注入电流足够大时,载流子才能发生辐射复合;而注入载流子的非辐射复合又使得能量转化为晶格的振动,导致位错的移动和增殖,金属电极在电应力和热应力的作用下就会沿这些位错线迁移形成“低阻欧姆通道”^[7-10],表现为漏电流增加和开启电压明显升高,造成 LED 异质结特性退化. 因此,提高 GaN 基外延材料的质量是提高 LED 可靠性的关键

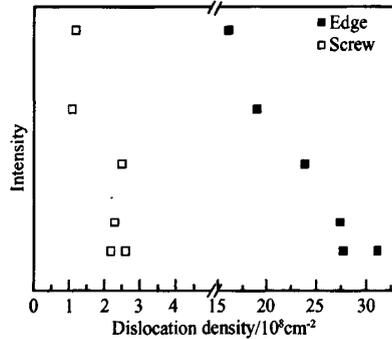


图3 PL 谱积分强度随位错密度的变化

Fig.3 Dependence of intensity of PL spectrum on threading dislocation density

3.2.2 芯片结构

功率型 LED 版图和结构设计直接决定芯片的电流分布的均匀性. 由于电流密度分布不均匀产生的“电流密集效应”,使得芯片微区温度分布不均匀,局部区域的温度过高,导致部分电极欧姆接触或者异质结性能的退化,有时甚至芯片部分区域难以实现电流的注入,使得 LED 在正常工作电流 350mA 下电压明显升高(见图 4),导致 LED 的光衰严重.

采用倒装结构 GaN 基 LED 的四叉指单胞结构(见图 5),可以缩短电流扩展路径,实现电流互补,降低电流分布的不均匀性,改善芯片发光的均匀性,降低电压;同时电极到芯片的扩散距离减少能有效地降低热阻,提高 LED 的可靠性.

3.2.3 p-GaN 金属电极

对于图 1 中老化后 I 阶段的寄生串连电阻增加使得相同电压下的正向电流减小,IV 阶段的反向漏电明显增加,并且和 III 阶段隧道电流的增加相似. Meneghesso^[9]认为这些变化是由于 p-GaN 透明欧姆接触金属电极在大电流 350mA 和热的影响下退

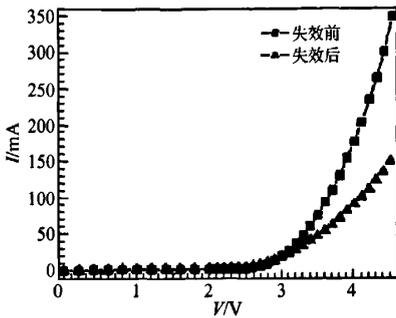


图 4 电极的部分区域失效引起 LED 的 $I-V$ 特性变化
Fig. 4 Change of $I-V$ curves of LEDs because partial inactivation of electrode

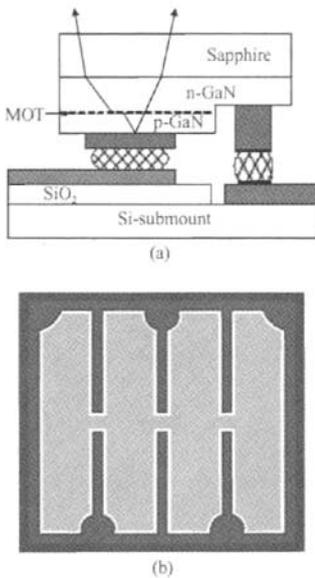


图 5 GaN 基倒装功率型 LED 结构 (a) 和版图示意图 (b)
Fig. 5 Sketch map about domain (a) and structure (b) of GaN-based flip-chip structure LED

化,导致串联电阻的增加,产生电流密集效应,使得发光效率下降,在大的注入电流下,缺陷发生增殖和延伸,电极金属沿着缺陷通道进行扩散,使得漏电流增加。Manyakhin^[10]通过分析认为 LED 随着老化的进行,使得 p-GaN 中施主缺陷 N 空位的形成占优势,使受主浓度降低,这些缺陷增加了非辐射复合,使发光强度减小。目前,有关详细的物理机理有待进一步的研究。

对普遍采用的 Ni/Au 体系和优化 Px/Ni 两种电极体系在 500℃ 空气氛围下进行长时间合金实验,图 6 表明 NiAu 体系串联电阻明显增大,而 Px/Ni 体系 $I-V$ 特性基本维持不变,从而表明 PxNi 体系具有良好的热稳定性。然后通过改进外延片的表

面处理方法、优化材料退火、金属化体系和电极蒸镀工艺,获得了与 p 型 GaN 材料良好的欧姆接触、热稳定性良好的金属电极体系 PxNi, TLM 方法计算的比接触电阻率为 $4.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

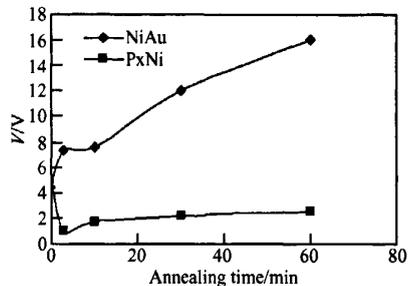


图 6 NiAu 和 PxNi 电压随退火时间的变化
Fig. 6 Dependence of voltage on annealing time of NiAu and PxNi electrode

4 结论

以 GaN 基蓝光芯片为基础制备了功率型蓝光和白光 LED,在室温 25℃、湿度 35%、驱动电流 350mA,连续老化 1080h 后,呈指数衰减规律分别平均衰减 1.35% 和 2.56%,蓝光比白光衰减得慢,预期寿命分别为 51405h 和 26942h。对功率型 LED 的退化机理进行了分析,表明影响可靠性的主要因素如下:

(1) 在外延材料过程中产生的和 LED 制备过程中引入的缺陷都将在有源层中形成非辐射复合中心,而注入载流子的非辐射复合又使得能量转化为晶格的振动,导致位错的移动和增殖,造成 LED 异质结特性退化;

(2) 不合理的设计芯片结构,使得注入的电流密度不均匀,散热性差,局部结温过高导致 LED 电压升高和光效下降,甚至发生突然失效;

(3) p-GaN 金属电极的欧姆接触和热稳定性对功率型 LED 的电学及光学性能产生重要影响,通过改进外延片的表面处理方法,优化材料退火、金属化体系和电极蒸镀工艺,获得了热稳定性良好,比接触电阻率为 $4.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的金属电极体系 PxNi。

参考文献

- [1] Narendran N, Maliyagoda N, Bierman A, et al. Characterizing white LEDs for general illumination applications. SPIE, 2000; 3938
- [2] Steranka F M, Bhat J, Collins D, et al. High power LEDs-technology status and market applications. Phys Status Solidi

- A, 2002, 194, 380
- [3] Nakamura S, Pearson S, Fasol G. The blue laser diode, the complete story. New York: Springer, 2000; 57
- [4] Nakamura S, Chichibu S F. Introduction to nitride semiconductor blue laser and light emitting diodes. London: Taylor & Francis, 2000; 13
- [5] Zhou Xiaoying, Sun Changzheng, Guo Wenping, et al. Photoluminescence of Mg-doped GaN with different Mg concentrations after annealing at different temperatures. Chinese Physics Letters, 2003, 20(7): 1137
- [6] Hong E, Narendran N. A method for projecting useful life of LED lighting systems. SPIE, 2003; 5187
- [7] Sugiura L. Dislocation motion in GaN light-emitting devices and its effect on device lifetime. J Appl Phys, 1997, 81(4): 1633
- [8] Narendran N, Gu Y, Freyssonier J P, et al. Failure analysis of white LEDs. J Cryst Growth, 2004, 268(4): 449
- [9] Meneghesso O, Levana S, Pierobon R, et al. Degradation mechanisms of GaN based LEDs after accelerated DC current aging. IEEE Int Electron Devices Meeting, 2002; 103
- [10] Manyakhin F, Kovaleva A, Yunovich A E. Aging mechanisms of InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes operating at high currents. MRS Int J Nitride Semicond, 1998, (3): 53

Analyses in Reliability of GaN-Based High Power Light Emitting Diodes*

Chen Yu[†], Wang Liangchen, Yi Xiaoyan, Wang Libin, Liu Zhiqiang,
Ma Long, and Yan Lihong

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract: High-power blue and white light-emitting diodes were fabricated with the blue LEDs chips as primary light source. Its photoelectric characteristic was measured during DC aging test up to 1080h at current 350mA under room temperatures 25°C and humidity 35%, and the degradation mechanism was investigated. As a result, the relative light output of blue and white LEDs degrades exponentially with the time, arriving at 1.35% and 2.56%. This paper presents the degradation mechanisms of GaN-based LED including the growth and formation of the GaN material defects, structure of GaN-based flip-chip structure LED, p-GaN electrode contact metal degradation, and so on, and the measures improving reliability of the device.

Key words: GaN; high-power LED; life test; degradation mechanism; reliability

PACC: 7280E; 7865P; 7840G

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0500-04

* Project supported by the National Key Scientific and Technical Plan of China (No. 2003BA316A01)

[†] Corresponding author. Email: chenyu@red.semi.ac.cn

Received 4 December 2006