

# 氮化镓基发光二极管结构中粗化 p 型氮化镓层的新型生长方法\*

李水清<sup>1)2)</sup> 汪 莱<sup>2)†</sup> 韩彦军<sup>2)</sup> 罗 毅<sup>2)</sup> 邓和清<sup>1)</sup> 丘建生<sup>1)</sup> 张 洁<sup>1)</sup>

1)(厦门市三安光电科技有限公司,厦门 361009)

2)(清华大学电子工程系,集成光电子学国家重点实验室/清华信息科学与技术国家实验室(筹),北京 100084)

(2010年12月7日收到;2010年12月13日收到修改稿)

提出了一种新型 p 型氮化镓粗化外延生长方法,这种生长方法的本质特征是利用低温生长的 p 型氮化镓作为粗化层的“晶籽”层,然后在这一层的基础上高温快速生长 p 型氮化镓,使粗化程度得到放大. 经实际制作尺寸为 12 mil × 10 mil 的蓝光发光二极管器件并进行验证测试,与未进行 p 型氮化镓粗化的结果相比,通过这种方法粗化的发光二极管光通量可提升 45%;结果同时表明,该方法有效解决了低温生长 p 型氮化镓带来的漏电流大,及预通镁源带来的前置电压高的问题.

**关键词:** 粗化, 氮化镓, p 型氮化镓, 发光二极管

**PACS:** 81.15.Kk, 61.72.uj

## 1. 引 言

近年来,由于具有节能、环保、体积小等优越性能,GaN 基 LED (light emitting diode) 日益受到人们越来越多的关注,并且其应用领域大大扩展,涵盖了显示屏、交通灯、信号灯、路灯照明甚至家庭照明等. 白光 LED 的发光效率一直是限制 LED 照明光源节能效果的重要因素. LED 的输出光功率大小由 LED 的外量子效率来决定,而 LED 的外量子效率又由 LED 的内量子效率及光的提取效率两方面来共同决定. LED 的内量子效率主要取决于晶体的生长质量、LED 的结构设计等因素,目前,GaN 基 LED 的内量子效率已经达到了 80% 以上<sup>[1]</sup>. 另一方面,由于 GaN 的折射率为 2.4,对应于临界全反射角  $\theta_c = 24.5^\circ$ ,超过这个角度的入射光子被反射回去并最终被 GaN 材料内部吸收掉. 因此,提高光提取效率是提高 LED 性能面临的重大挑战.

为解决此问题,已经提出了光子晶体<sup>[2,3]</sup>、图形衬底<sup>[4,5]</sup>、表面粗化<sup>[6-8]</sup>等技术方案. 其中,表面粗

化技术由于其简单有效的特点而受到人们的普遍关注,目前粗化方案有:1) 化学腐蚀方法<sup>[6]</sup>;2) 掩膜结合 ICP 蚀刻方法<sup>[9]</sup>;3) 预通 Mg 外延生长粗化 p-GaN<sup>[10]</sup>;4) 低温外延生长 P-GaN<sup>[11]</sup>等技术. 前两种主要是针对芯片制程,后面两种主要在外延生长时改变生长条件来达到. 本研究主要对外延生长进行讨论.

采用低温外延生长 p-GaN 层,可以有效地增加 p-GaN 的空穴浓度、降低器件工作电压、并可将亮度提升 80%<sup>[11]</sup>. 但此方法在以降低 p-GaN 的晶体质量为前提,在亮度提升的同时,由于 p-GaN 晶格受到破坏,使得 LED 器件存在较大的反向漏电流 ( $I_r$ ),进而影响到器件的寿命. 采用预通镁源外延生长粗化 p-GaN 的方法,虽然也可得到粗化的外延表面,提升 LED 的出光效率<sup>[10]</sup>,但此方法同时也会带来前向电压 ( $V_f$ ) 高,使 LED 的串联电阻增加,进而使热效应增加,降低 LED 的寿命等问题,在实际应用中同样受到限制.

本研究针对上述两种外延生长粗化表面的问题,提出一种新型的外延生长粗化表面的方法,并

\* 国家重点基础研究发展计划(973)(批准号:2011CB301902, 2011CB301903),国家自然科学基金(批准号:60723002, 50706022, 60977022, 51002085),国家高技术研究发展计划(863)(批准号:2007AA05Z429, 2008AA03A194)和北京市自然科学基金(批准号:4091001)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wanglai@tsinghua.edu.cn

对该方法生长出来的 LED 的表面形貌、实际制作的 LED 器件的性能进行了分析讨论. 这种生长方法的本质特征是利用低温生长的 p-GaN 作为粗化层的

“晶籽”层, 然后在这一层的基础上高温快速生长 p-GaN, 使粗化程度得到放大, 得到 p-GaN 粗化层. 图 1 显示了 p-GaN 粗化层的形成过程.

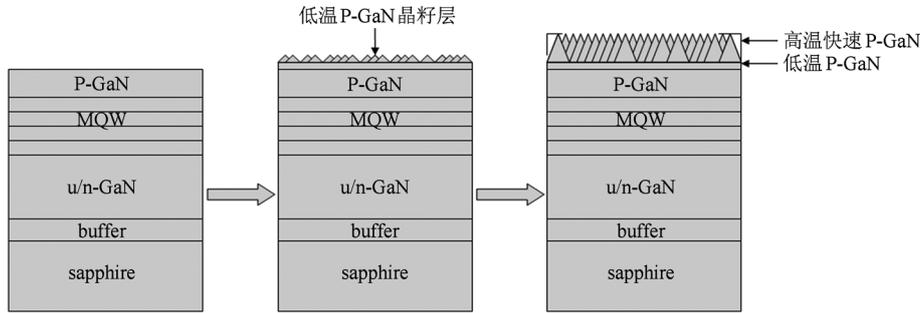


图1 p-GaN 粗化层的形成过程

## 2. 实 验

本研究所有样品制备均采用美国 VEECO 公司生产的 D300 型 MOCVD 设备, 衬底材料采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 在(0001)面上进行生长. 在生长过程中, 分别通入三甲基镓 ( $\text{TMGa}$ )、三甲基铟 ( $\text{TMIIn}$ )、三甲基铝 ( $\text{TMAI}$ ) 作为 III 族镓、铟、铝源; 用二茂镁 ( $\text{CP}_2\text{Mg}$ ),  $\text{SiH}_4$  分别作为 p 型和 n 型掺杂剂; 用  $\text{NH}_3$  作为 V 族氮源. 首先,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底升温到  $1050\text{ }^\circ\text{C}$  通  $\text{H}_2$  进行氢化处理, 以去除表面杂质及形成台阶状表面; 然后, 再降温到  $550\text{ }^\circ\text{C}$  通  $\text{NH}_3$  生长 GaN 成核层, 再升温到  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  生长  $4\text{ }\mu\text{m}$  厚的掺 Si 的 n-GaN; 多量子阱 (MQW) 采用 10 对  $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}/\text{GaN}$  异质结构, 在  $750\text{ }^\circ\text{C}$  下生长; p-GaN 的粗化分别采用三种方法, 由此生长的 LED 分别命名为样品 B, C, D; 样品 A 是未粗化的 LED 样品, 作为样品 B, C, D 的对比样品. LED 样品 A, B, C, D 的 p-GaN 生长方法如下:

- 1) 样品 A 为  $950\text{ }^\circ\text{C}$  下直接生长一层  $4000\text{ }\text{\AA}$  的 p-GaN.
- 2) 样品 B 为先  $950\text{ }^\circ\text{C}$  生长一层  $2000\text{ }\text{\AA}$  的 p-GaN, 然后再在 p-GaN 上预通 1 min 的  $\text{CP}_2\text{Mg}$ , 然后再  $950\text{ }^\circ\text{C}$  生长  $2000\text{ }\text{\AA}$  的 p-GaN; p-GaN 总厚度为  $4000\text{ }\text{\AA}$ .
- 3) 样品 C 为低温  $800\text{ }^\circ\text{C}$  下生长 p-GaN, p-GaN 厚度为  $4000\text{ }\text{\AA}$ .
- 4) 样品 D 为先  $950\text{ }^\circ\text{C}$  生长一层  $2000\text{ }\text{\AA}$  的 p-GaN, 然后再降温  $800\text{ }^\circ\text{C}$  下生长  $500\text{ }\text{\AA}$  的 p-GaN, 然后再快速升温到  $950\text{ }^\circ\text{C}$  下生长  $1500\text{ }\text{\AA}$  的 p-GaN.

样品 B 及样品 C 主要根据文献提供方法生长,

样品 D 为本研究提出的一种新的外延 p-GaN 粗化生长方法.

上述四种样品经过氧化透明薄膜 (ITO) 蒸镀、光刻、感应耦合等离子体 (ICP) 等工艺环节、最后镀上 Cr/Pt/Au 作为 n, p 电极, 经过激光划裂, 制成  $12\text{ mil} \times 10\text{ mil}$  的 LED 芯片, 并进行光电参数的测量比对.

## 3. 结果与讨论

图 2 分析了四种样品对应的电流-电压曲线, 在  $20\text{ mA}$  电流下, 样品 A, B, C, D 的工作电压分别为  $3.26\text{ V}$ ,  $3.37\text{ V}$ ,  $3.08\text{ V}$ ,  $3.18\text{ V}$ . 和未粗化的样品 A 相比, 样品 B 的电压高  $0.11\text{ V}$ , 样品 C 和样品 D 分别低  $0.18\text{ V}$  和  $0.08\text{ V}$ . 样品 B 和文献报道的前向电压 ( $V_f$ ) 变高是一致的. 样品 D 和样品 A 比对, 样品 D 的电压更低, 说明采用本方法得到的粗化样品比光滑表面样品电压会更低. 样品 C 的电压最低,

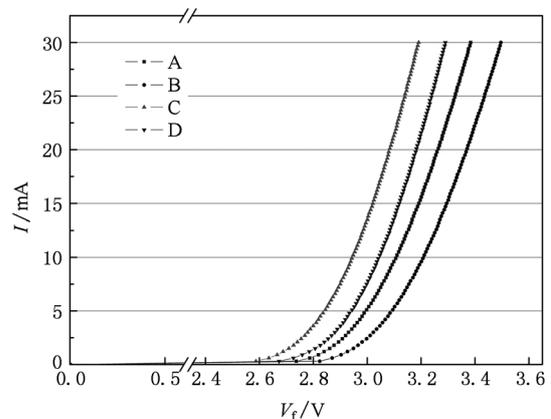


图2 样品 A, B, C, D 的 I-V 曲线

这是因为样品 C 已产生了漏电,这在后面的数据分析中会体现.

图 3 为四种样品的反向漏电流( $I_r$ )大小随反向电压变化的曲线. 从图中可以看出,样品 A,B,C,D 在反向电压 10 V 下的反向漏电流分别为 0.19  $\mu$ A, 0.07  $\mu$ A, 0.36  $\mu$ A, 0.07  $\mu$ A. 样品 C 存在着较大的反向漏电流( $I_r$ )问题. 采用本方法的粗化样品 D 的反向漏电流( $I_r$ )要小于常规产品样品 A. 样品 B 由于其前向电压( $V_f$ )高,表面接触电阻大,所以其反向漏电流  $I_r$  也显得小.

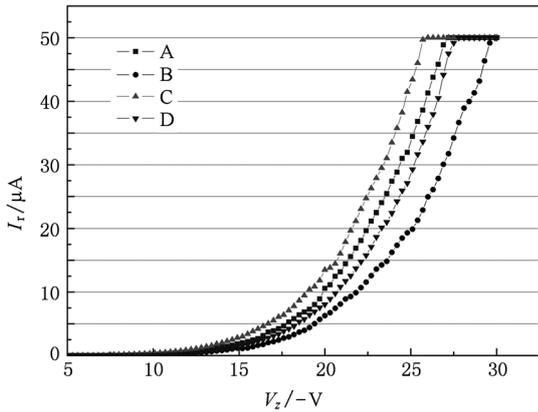


图 3 样品 A, B, C, D 的反向漏电流曲线

图 4 为在 455 nm 波段下的样品 A, B, C, D 发光强度和电流的关系曲线图,在 20 mA 下,样品 B 的光强为 39.78 mcd、样品 C 为 36.02 mcd、样品 D 为 43.37 mcd. 对比样品 A 的 29.48 mcd,可以看出,采用不同的粗化技术,样品 B, C, D 提升的亮度分别为 35%, 22% 及 45%. 相对样品 B 和 C,采用本文提出的粗化技术的 LED 样品 D 具有更高的出光效率.

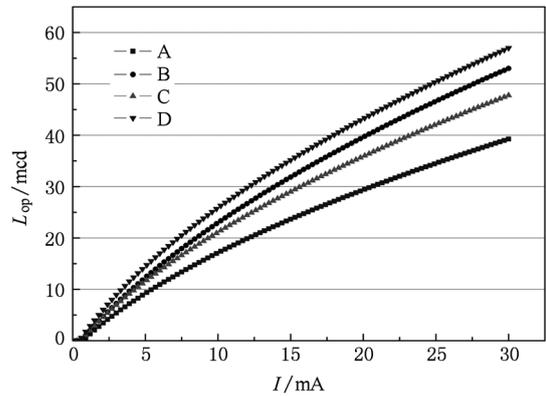


图 4 样品 A, B, C, D 的光强-电流曲线

图 5 显示了样品 A, B, C, D 表面的扫描电子显微镜 (SEM) 图,从图中可以看出不同的外延粗化生长方法,其表面呈现出完全不一样的状况. 从图中可以看

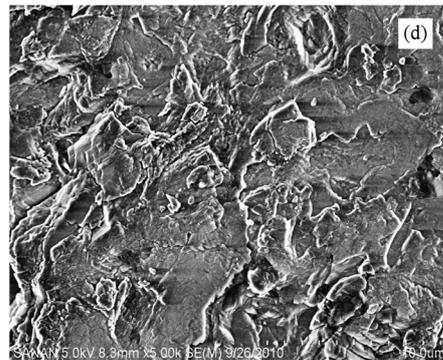
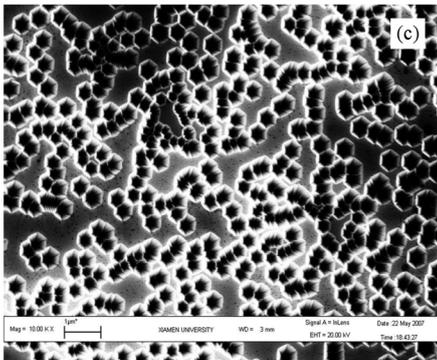
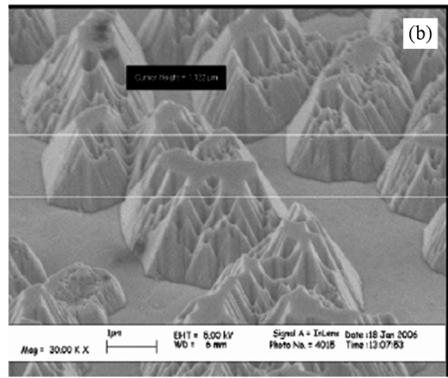
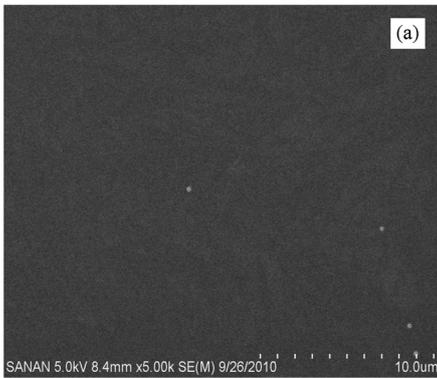


图 5 样品 A(a), B(b), C(c), D(d) 表面的 SEM 照片

出,由于高温生长,样品 A 表面呈光滑的镜面状. 样品 B 的表面呈现凸起六边形,这是因为在预通  $CP_2Mg$  之后, $CP_2Mg$  和  $NH_3$  气反应形成  $Mg_xN_y$  岛状物, p-GaN 在岛状物上继续生长长大;样品 C 的粗化表面呈现出六角坑洞形状;样品 D 是本研究采用的粗化生长方法,其粗化表面呈现出不规则的形状.

由于较差的晶格质量,样品 B 表面的岛状物在掺入 Mg 原子后能被有效激活的 Mg 原子的浓度并不高. 这使得金属电极和 p-GaN 接触后并不能形成有效的欧姆接触,导致 LED 的电压变高;样品 C 的表面呈现出规则的六角坑洞,这是导致样品 C 的反向漏电流较大的原因;样品 D 表面虽然也呈现出了一定的不规则形状,但其粗糙程度远远低于样品 B,且其表面 p-GaN 能有效结合在一

起,没有样品 C 的坑洞状,这就使得样品 D 即能有较低的电压,又能有效避免反向漏电流 ( $I_r$ ) 增大的问题.

#### 4. 结 论

本研究创新性地提出利用低温生长的 p-GaN 作为粗化层的“晶籽”层,然后在这一层的基础上高温快速生长 p-GaN,使粗化程度得到放大,得到 p-GaN 粗化层. 实际器件测试结果表明,和常规 LED 相比,新方法粗化过 LED 的亮度提升更高. 同时新型外延粗化生长方法有效解决了外延粗化中常出现的反向漏电流 ( $I_r$ ) 及前向电压 ( $V_f$ ) 高的问题,更贴近产品实际应用.

- [1] Nishida T, Saito H, Kobayashi N, Naoki K 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 711
- [2] Shakya J, Kim K H, Lin J Y, Jiang H X 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 142
- [3] Chen Y X, Zheng W H, Chen W, Chen L H, Tan Y D, Shen G D 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 8083 (in Chinese) [陈依新、郑婉华、陈 微、陈良惠、汤益丹、沈光地 2010 物理学报 **59** 8083]
- [4] Tadatomo K, Okagawa H, Ohuchi Y, Tsunekawa T, Imada Y, Kato M, Taguchi T 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** L583
- [5] Jiang Y, Luo Y, Wang L, Li H T, Xi G Y, Zhao W, Han Y J 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 3468 (in Chinese) [江 洋、罗毅、汪 莱、李洪涛、席光义、赵 维、韩彦军 2009 物理学报 **58** 3468]
- [6] Fujii T, Gao Y, Sharma R, Hu E L, DenBaars S P, Nakamura S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 855
- [7] Park E H, Ferguson I T, Jeon S K, Park J S, Yoo T K 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 251106
- [8] Hao M, Egawa T, Ishikawa H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 241907
- [9] Pan S M, Tu R C, Fan Y M, Yeh R C 2003 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **15** 649
- [10] Tsai C M, Sheu J K, Lai W C, Hsu Y P, Wang P T, Kuo C T, Kuo C W, Chang S J, Su Y K 2005 *IEEE Trans. on Electron. Dev.* **26** 464
- [11] Liu C H, Chuang R W, Chang S J, Su Y K, Wu L W, Lin C C 2004 *Mater. Sci. Eng. B* **112** 10

## A new growth method of roughed p-GaN in GaN-based light emitting diodes\*

Li Shui-Qing<sup>1)2)</sup> Wang Lai<sup>2)†</sup> Han Yan-Jun<sup>2)</sup> Luo Yi<sup>2)</sup> Deng He-Qing<sup>1)</sup> Qiu Jian-Sheng<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1)</sup>

1) (Xiamen Sanan Optoelectronics Co. Ltd., Xiamen 361009, China)

2) (Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology/State Key Lab on Integrated Optoelectronics, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 7 December 2010; revised manuscript received 13 December 2010)

### Abstract

A new growth method of roughed p-GaN has been demonstrated in this paper. First, some crystal seeds of p-GaN are obtained by utilizing low-temperature growth. Then, a p-GaN high-temperature epitaxy layer is grown on it subsequently with a fast growth rate, which will enlarge the roughness degree. Compared with the luminous flux of the conventional light emitting diode with flat p-GaN, the luminous flux is improved by 45%. Meanwhile, it is found that the problems of large reverse current and high forward bias aroused by the low-temperature epitaxy are also solved.

**Keywords:** surface roughness, GaN, p-GaN, LED

**PACS:** 81.15.Kk, 61.72.uj

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CB301902 and 2011CB301903), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60723002, 50706022, 60977022 and 51002085), the High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2007AA05Z429, 2008AA03A194), and the Beijing Natural Science Foundation (Grant No. 4091001).

† Corresponding author. E-mail: wanglai@tsinghua.edu.cn