

# 光增强湿法刻蚀提高 Si 衬底垂直结构 GaN 基 LED 的出光效率

周印华<sup>1</sup> 汤英文<sup>1,2</sup> 饶建平<sup>1</sup> 江风益<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>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)  
<sup>2</sup>晶能光电(江西)有限公司, 江西 南昌 330096)

**摘要** 以 0.1 M  $K_2S_2O_8 + KOH$  和氙灯分别作为刻蚀剂和紫外光源, 采用光增强湿法刻蚀转移衬底的垂直结构 GaN 基 LED 的  $n$  型 GaN, 对 N 面有电极和没有电极的芯片的  $n$  型 GaN 层进行刻蚀。结果表明, 在相同的刻蚀条件下,  $n$  面有电极的  $n$  型 GaN 层刻蚀速率明显大于没有电极的  $n$  型 GaN; 而它们的均方根粗糙度(RMS)则结果相反。刻蚀后的形貌呈圆锥型凸起。20 mA 下刻蚀后的裸芯光输出功率较刻蚀前提高了 88.5%。

**关键词** 光学材料; 出光效率; 光增强湿法刻蚀; 垂直结构 GaN 基 LED; Si 衬底

**中图分类号** TN312<sup>+</sup>.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0252

## Improvement for Extraction Efficiency of Vertical GaN-Based LED on Si Substrate by Photo-Enhanced Wet Etching

Zhou Yinhu<sup>1</sup> Tang Yingwen<sup>1,2</sup> Rao Jianping<sup>1</sup> Jiang Fengyi<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> *Engineering Research Center for Luminescence Materials and Devices, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China*,  
<sup>2</sup> *Lattice Power (Jiangxi) Corporation, Nanchang, Jiangxi 330096, China*)

**Abstract** The surface of  $n$ -GaN is fabricated by photo-enhanced wet etching with the etchant of 0.1 M  $K_2S_2O_8 + KOH$  and the illumination of Xe ultraviolet light. The  $n$ -GaN with an electrode on its surface is etched. Under the same etching condition,  $n$ -GaN with an electrode on its surface shows a higher etching rate but a lower root-mean-error(RMS) compared with  $n$ -GaN without an electrode. After etching, the surface of  $n$ -GaN is covered by hexagonal cones. Output power of the LED is improved by 88.5% after etching with 20 mA current.

**Key words** optical materials; extraction efficiency; photo-enhanced wet etching; vertical GaN-based light emitting diodes; Si substrate

## 1 引 言

GaN 是直接宽带隙 III-V 族化合物半导体, 在蓝、绿、紫外光 LED, 探测器, 蓝光激光器等<sup>[1]</sup> 领域获得广泛的应用。由于外延技术的进步, GaN 基 LED 的内量子效率已经超过 80%<sup>[2]</sup>。然而, 外量子效率与内量子效率相比仍然较低。因此, 人们采用

了表面粗化<sup>[3]</sup>, 背面制作银反射镜<sup>[4]</sup>, 图形衬底<sup>[5]</sup> 等芯片制造技术来提高出光效率。

采用光增强湿法刻蚀经剥离后的硅衬底 GaN 基 LED 结构中的  $n$  型 GaN 层出光面, 对比了 N 面有无电极的刻蚀速率和均方根粗糙度(RMS) 的差异, 测试了刻蚀后 GaN 基 LED 的出光效率的变化。

收稿日期: 2008-05-13; 收到修改稿日期: 2008-07-07

基金项目: 国家 863 计划纳米专项(2003AA302160) 和国家 863 计划光电子主题课题(2005AA311010) 资助课题。

作者简介: 周印华(1981—), 男, 硕士研究生, 目前主要从事 Si 衬底 GaN 基 LED 器件方面的研究。

E-mail: yhzhou168@yahoo.com.cn

导师简介: 江风益(1963—), 男, 教授, 目前主要从事宽禁带半导体发光材料与器件方面的研究。

E-mail: jiangfy@ncu.edu.cn

与通常采用  $K_2S_2O_8 + KOH$  作为刻蚀剂的光增强湿法刻蚀绝缘衬底(如蓝宝石衬底)  $n$  型 GaN 相比,省去在  $n$  型 GaN 表面制作贵金属纳米掩膜工序,且出光效率得到了较大的提高。

## 2 实 验

硅衬底 GaN 基 LED 采用 Thomas Swan MOCVD 生长在 Si(111) 衬底上, GaN 外延结构与芯片结构已有报道<sup>[6~8]</sup>。垂直结构 LED 制作流程包括:(1)外延材料的 P 型面制作欧姆接触;(2)外延片和新基板的连接;(3)去除 Si(111) 生长衬底;(4)制作 LED 的  $n$  型欧姆接触电极。本文 LED 芯片尺寸为  $200 \mu m \times 200 \mu m$ , 为垂直结构 GaN 基 LED 芯片如图 1 所示。

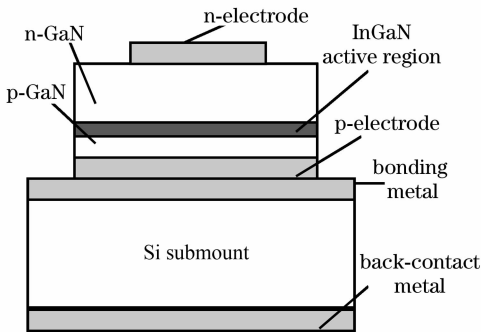


图 1 垂直结构 GaN 基 LED 示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the vertical structure GaN-based LED

1000 W 的氙灯和  $KOH + 0.1 M K_2S_2O_8$  溶液分别作为光增强湿法刻蚀的紫外照明源和刻蚀剂。本文紫外光源距离样品始终保持在 22 cm(恒定光强密度)。刻蚀过程中没有搅拌溶液,为了保持一定的反应温度,反应容器被至于恒温水槽中。刻蚀速率,刻蚀后的形貌,光功率分别通过 Dektak 6M 台阶仪, OLYMPUS(干涉显微镜)和原子力显微镜(Veeco DI D3100 AFM),积分球测量。下面分别对改变  $KOH$  浓度和刻蚀时间的有、无电极的  $n$  型 GaN 刻蚀实验结果进行分析。

## 3 结果与分析

图 2(a), (b) 是  $N$  面有电极和没有电极的 GaN 基 LED 出光面的表面形貌。有电极和没有电极的芯片的表面都发生了刻蚀现象。

图 3 是  $N$  面有电极和没有电极的芯片的  $n$  型 GaN 的刻蚀速率随  $KOH$  浓度的变化关系。从中可以看出,在其它实验条件不变的情况下,随着

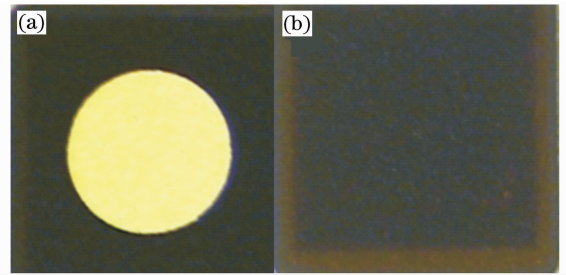


图 2 (a)  $N$  面有电极和 (b) 没有电极的 GaN LED 在  $0.1 \text{ mol/L } K_2S_2O_8 + 0.3 \text{ mol/L } KOH$ 、1000 W 氙灯、室温、无搅拌下刻蚀 12 min 后的形貌

Fig. 2 Etched image of GaN LED chip with n electrode and without n electrode with  $0.1 \text{ mol/L } K_2S_2O_8 + 0.3 \text{ mol/L } KOH$ , room temperature, 1000 W Xe-lamp, 12 min and without stirring

$KOH$  浓度的增加,刻蚀速率呈线性增加。导致这一结果的主要原因是由于  $n$  型 GaN 与刻蚀溶液形成了能带向上弯曲的液结<sup>[9]</sup>,使所生成的电子-空穴对的空穴向其移动,而电子向  $n$  型 GaN 内部移动,整个反应处于扩散限制下,反应速率跟  $OH^-$  扩散到  $n$  型 GaN 表面的速率有关<sup>[10]</sup>。从图中还可看出  $N$  面有电极的芯片的刻蚀速率明显大于没有电极的芯片。对这一新现象,作如下解释:对于  $N$  面有电极的芯片,光生电子向  $n$  型 GaN 内部迁移,一方面电子横向扩散通过  $n$  电极参与溶液反应而消耗,另一方面电子垂直扩散通过背面电极和金属粘结层参与溶液反应而消耗;而对于  $N$  面没有电极的芯片,只有垂直扩散通过背面电极和金属粘结层参与溶液反应而消耗,并且垂直扩散受到  $p-n$  结势垒的阻挡,但横向扩散是在  $n$  型 GaN 内部发生,电子迁移率非常

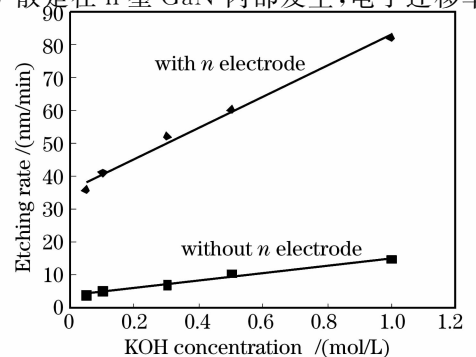
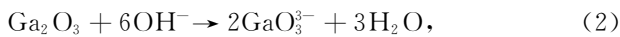
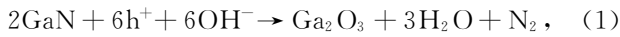


图 3 在恒定光密度、温度,  $0.1 \text{ mol/L } K_2S_2O_8$  下,  $N$  面有电极和没有电极的  $n$  型 GaN 的刻蚀速率随  $KOH$  浓度的变化关系

Fig. 3 Etching rate of n GaN with and without n electrode varying with KOH concentrations when the amount of  $K_2S_2O_8$  is kept constant at  $0.1 \text{ mol/L}$ , and a 1000 W Xe lamp is used as the UV source

快,导致了横向扩散的速率明显大于垂直方向扩散。在光生电子-空穴对一定的前提下,导致在没有电极的 n 型 GaN 与溶液接触的界面电子含量大于有电极的 n 型 GaN,并且电子含量越大,在液结处空穴被电子通过隧穿而复合的量越多,从而在没有电极的 n 型 GaN 与溶液接触的界面的净空穴小于有电极的 n 型 GaN 与溶液的界面。下面的反应方程式<sup>[10]</sup>也可进一步说明光增强湿法刻蚀的过程:



由反应方程式(1)可知净空穴减少会导致此反应速率变小,进而使刻蚀速率变小。

图 4 为 N 面有电极和没有电极的芯片的 n 型 GaN 的均方根粗糙度(RMS)随 KOH 浓度的变化关系。图中所示结果刻蚀时间为 12 min,其他条件同上。在足够强的紫外光照下,当 KOH 浓度小于 1.0 mol/L 时,反应始终处于扩散限制,这样 n 型 GaN 表面会很光滑<sup>[10,11]</sup>。从图中的对比也可看出 KOH 的浓度越低表面越光滑,这是扩散限制影响加剧的缘故。在相同条件下,N 面没有电极的芯片均方根粗糙度(RMS)大于有电极的芯片的 RMS,此机理与图 3 中相同,没电极的 GaN 表面净空穴含量减少,弱化了扩散限制。

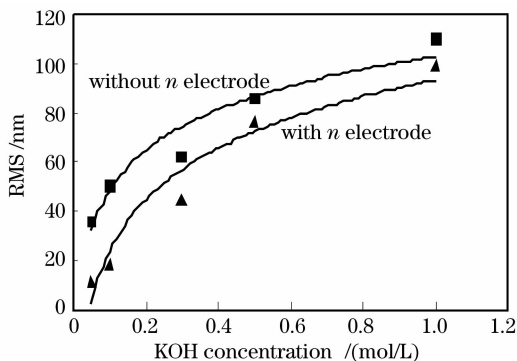


图 4 在 0.1 mol/L  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 、恒定光密度、温度下,N 面有电极和没有电极的芯片的 RMS(均方根粗糙度)随 KOH 浓度的变化,未刻蚀的 n GaN 的 RMS 为 2.1 nm

Fig. 4 RMS surface roughing of n GaN using varing KOH concentrations with the mount of  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  kept constant at 0.1 mol/L. A 1000 W Xe lamp was used as the UV source. The RMS roughing of the unetched surface was measured to be 2.1 nm

图 5 为在以上实验条件下得到的 N 面有电极的 GaN 表面原子力显微镜图。这里所用刻蚀溶液

为 0.1 mol/L  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  + 0.1 mol/L KOH、1000W 氙灯(恒定光密度),室温,刻蚀时间为 12 min。从图中可看到分布比较均匀的圆锥型凸起。此结果的表面形貌图与 Fu 等<sup>[12]</sup>采用  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  + KOH 作为刻蚀剂的光辅助化学刻蚀方法获得的结果类似。

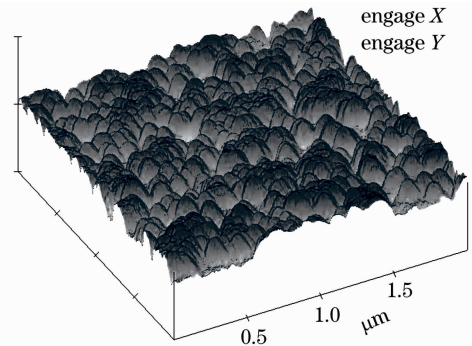


图 5 在 0.1 mol/L  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  + 0.1 mol/L KOH、1000W 氙灯、室温、反应时样品距离紫外光源 22 cm、无搅拌下刻蚀 12 min 后,n-GaN 表面  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  原子力显微镜图

Fig. 5  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  AFM image of etched n-GaN surface for 12 min with 0.1 mol/L  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  + 0.1 mol/L KOH, 1000 W Xe - lamp, room temperature, kept the distance of UV source and sample at 22 cm, without stirring

图 6 是 N 面有电极的 GaN 表面作了刻蚀和未作刻蚀过程的裸芯电致发光的光功率与电流变化的关系曲线。刻蚀时使用的溶液为 0.1 mol/L  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  + 0.1 mol/L KOH,时间为 12 min。从图中可以看出,随着注入电流的增大,已刻蚀的裸芯 LED 的光输出功率明显大于未刻蚀的裸芯的光输出功率。当注入电流 20 mA 时,刻蚀后裸芯输出光功率较未刻蚀的裸芯输出光功率提高了 88.5%。

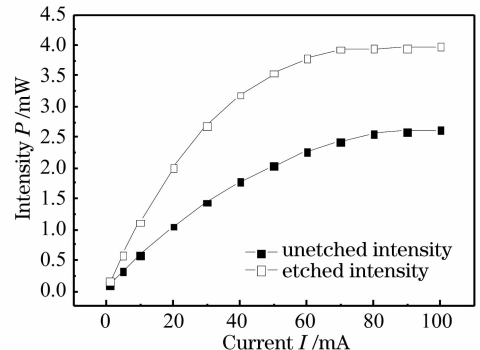


图 6 N 面有电极的 LEDs 刻蚀前后的输出光功率与注入电流的关系

Fig. 6 Light output power of LEDs with n electrode as the function of injecting current

## 4 结 论

研究了光增强湿法刻蚀对垂直结构 GaN 基 LED 出光效率的影响,分别对 N 面有电极和没有电极的芯片进行了刻蚀。研究表明,在相同的刻蚀条件下,有电极的芯片刻蚀速率明显大于没有电极的芯片,而它的均方根粗糙度小于没有电极的芯片;两者在 KOH 浓度小于 1.0 mol/L 下, RMS 均未出现饱和且溶度越低被刻蚀的芯片表面越光滑现象。研究还表明刻蚀后出光面的原子力形貌呈圆锥型凸起,20 mA 下裸芯出光效率提高了 88.5%。

## 参 考 文 献

- 1 S. Nakamura, G. Fasol. The Blue Laser Diode[M]. Springer, New York, 1997. 7~10
- 2 Toshio Nishida, Hisao Saito, Naoki Kobayashi. Efficient and high-power AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diode grown on bulk GaN[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **9**(6):711~712
- 3 I. Schnitzer, E. Yablonovitch, C. Caneau *et al.*. 30% external quantum efficiency from surface textured, thin-film light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(16):2174~2176
- 4 Y. T. Hwang, H. G. Hong, T. Y. Seong *et al.*. Electrical and thermal stability of Ag ohmic contacts for GaN-based flip-chip light-emitting diodes by using an AgAl alloy capping layer[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **2007**, **10**(1):14~18
- 5 S. J. Chang, L. W. Wu, Y. K. Su *et al.*. Nitride-based LEDs with 800 °C grown p-AlInGaIn-GaN double-cap layers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6):1447~1449
- 6 Chunlan Mo, Wenqing Fang, Yong Pu *et al.*. Growth and characterization of InGaIn blue LED structure on Si(1 1 1) by MOCVD[J]. *J. Cryst. Growth.*, 2005, **285**:312~317
- 7 Kuang Hai, Liu Junlin, Cheng Haiying *et al.*. Effect of transferred anferred submount materials on properties of GaN-based LED chips grown on Si substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):143~145  
 邝海,刘军林,程海英等. 转移基板材质对 Si 衬底 GaN 基 LED 芯片性能的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):143~145
- 8 Cheng Haiying, Fang Wenqing, Mo Chunlan *et al.*. Effect of  $\delta$ -doping on performance of GaN blue LED epitaxial films on Si substrates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1269~1273  
 程海英,方文卿,莫春兰等.  $\delta$  掺杂对硅衬底 GaN 蓝光 LED 外延膜性能的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1269~1273
- 9 C. Youtsey, G. Bulman, I. Adesida. Dopant-selective photoenhanced wet etching of GaN [J]. *J. Electron. Mater.*, 1998, **27**(4):282~287
- 10 R. T. Green, W. S. Tan, P. A. Houston *et al.*. Investigations on electrode-less wet etching of GaN using continuous ultraviolet illumination[J]. *J. Electron. Mater.*, 2007, **36**(4):397~402
- 11 C. Youtsey, I. Adesida, L. T. Romano *et al.*. Smooth n-type GaN surfaces by photoenhanced wet etching[J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **72**(5):560~562
- 12 D. J. Fu, G. P. Panin, T. W. Kang. GaN pyramids prepared by photo-assisted chemical etching[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2003, **42**:611~613