

文章编号: 0253-2239(2006)08-1269-5

δ 掺杂对 Si 衬底 GaN 蓝光 LED 外延膜性能的影响研究*

程海英 方文卿 莫春兰 刘和初 王 立 江风益**

(南昌大学教育部发光材料与器件工程研究中心, 南昌 330047)

摘要: 用 X 射线衍射方法通过不同晶面的 ω 扫描测试, 分析了 Si 衬底 GaN 蓝光 LED 外延膜中 n-型层 δ 掺杂 Si 处理对外延膜结晶性能的影响。报道了 Si 衬底 GaN 外延膜系列晶面的半峰全宽(FWHM)值。通过使用晶格-旋转(Lattice-rotation)模型拟合, 计算出样品的螺位错密度和刃位错密度。结果表明, δ 掺杂 Si 处理后生长出的样品螺位错密度增大、刃位错密度减小, 总位错密度有所减小。通过对未经 δ 掺杂处理和 δ 掺杂处理的 GaN 外延膜相应 $\omega-2\theta$ 扫描半峰全宽值的比较, 发现 δ 掺杂 Si 处理后生长出的样品非均匀应变较大; 相应样品的 LED 电致发光光谱、 $I-V$ 特性曲线显示 δ 掺杂后样品性能变好。

关键词: 薄膜光学; GaN; X 射线衍射; Si 衬底; 结晶性能; δ 掺杂

中图分类号: O472.3 文献标识码: A

Effect of δ -Doping on Performance of GaN Blue LED Epitaxial Films on Si Substrates

Cheng Haiying Fang Wenqing Mo Chunlan Liu Hechu Wang Li Jiang Fengyi

(Research Center for Luminescent Materials and Devices Engineering, Ministry of Education,

Nanchang University, Nanchang 330047)

Abstract: The effect of δ -doping in n-type layers on crystal performance of GaN epitaxial films on Si substrates was studied by ω -scan of different crystal planes with X-ray diffraction method. The full width at half maximum (FWHM) values of the serial crystal planes of the GaN epitaxial films on Si substrates were reported. By using the lattice-rotation model, the screw and edge dislocation densities of the samples were calculated. The results showed that the screw dislocation density increased, the edge dislocation density decreased, and the total dislocation density decreased in the δ -doped GaN films. By comparing the relevant FWHM values of $\omega-2\theta$ scan of δ -doped and untreated samples, it was found that the inhomogeneous strain of GaN films increased by δ -doping. In addition, LED fabricated using the δ -doped samples showed better electroluminescence performance and $I-V$ characteristic compared with that of the untreated samples.

Key words: thin films optics; GaN; X-ray diffraction; Si substrate; crystallization properties; δ -doping

1 引 言

GaN 是一种直接带隙半导体材料, 在信息显示和固态照明等领域都具有广阔的应用前景^[1]。目前蓝宝石(α - Al_2O_3)、碳化硅衬底是最为成熟的被广泛应用于生长 GaN 外延膜的衬底材料。价格便宜的

Si 作为 GaN 外延膜的衬底还处于研究摸索阶段。Si 作为衬底有许多优点如, 具有良好的导电、导热性, 晶体质量高、尺寸大, 易加工、器件加工工艺成熟等。因此, 近年来有很多科研人员致力于 Si 衬底 GaN 外延膜生长的研究并取得了较大的进展。已

* 863 纳米专项(2003AA302160)和电子信息产业发展基金资助课题。

作者简介: 程海英(1979~), 女, 湖北天门人, 南昌大学助教, 硕士研究生, 主要从事宽禁带半导体材料方面的研究。

E-mail: chying8181@163.com

** 通信联系人。E-mail: jiangfy@ncu.edu.cn

收稿日期: 2005-10-27; 收到修改稿日期: 2006-01-09

有少数几家研究组报道在 Si 衬底上制备出了 GaN 基发光器件^[2~8]。由于 Si 衬底与 GaN 外延层之间存在巨大的晶格失配和热失配,使得 Si 衬底上生长的 GaN 材料极易产生大量的位错及裂纹,制约了 Si 衬底 GaN 器件的发展。其中 GaN 外延膜中的螺位错和刃位错是研究人员较为关注的,它们可以由 X 射线衍射的 ω 扫描来表征^[9~12]。

在之前的系列研究中,我们研究组已经报道了 Si 衬底上生长 GaN 基蓝光 LED^[8]的相关内容,另外还报道了 Si 衬底 GaN 基 LED 的理想因子与其外延材料的结晶性能之间的关系^[13]。本文用 X 射线衍射方法,通过不同晶面的 ω 扫描测试及晶格-旋转(Lattice-rotation)模型^[9,10,12]的拟合计算,得出样品的螺位错密度和刃位错密度。分析了 δ 掺杂 Si 处理对 GaN 外延膜结晶性能的影响。并通过相应样品 LED 电致发光光谱、I-V 特性曲线的测试来表征 δ 掺杂 Si 处理对 GaN 蓝光 LED 光电性能的影响。

2 实 验

实验所用的样品 A、B 均为本研究组用金属有机化合物汽相沉积法(MOCVD)生长的 Si 衬底蓝光多量子阱 LED 结构的 GaN 外延膜^[8]。其中样品 A 未经 δ 掺杂 Si 处理,样品 B 经过 δ 掺杂 Si 处理,除此以外这两个样品其它生长工艺相同。图 1 为样品 B 的具体结构,其中 n 型层厚度为 $3.2 \mu\text{m}$, p 型层厚度为 $0.2 \mu\text{m}$,多量子阱厚度为 60 nm 。进行 δ 掺杂 Si 处理时将 Ga 源关闭,改为通少量的硅烷(流量为 40 ml/min),同时 NH_3 继续通入,处理 90 s 以后继续正常生长。对 n 型 GaN 膜作了三次 δ 掺杂 Si 处理,每隔 $0.5 \mu\text{m}$ 处理一次。通过 X 射线双晶衍射仪(Bede QC 200)的测量结果对样品的结晶性

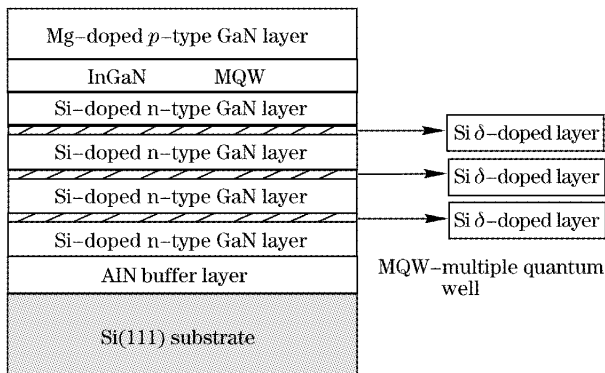


图 1 Si 衬底 GaN 基多量子阱 LED(样品 B)结构示意图
Fig. 1 Sketch of structure of GaN multiple quantum well LED on Si substrates for sample B

能进行分析。X 射线双晶衍射仪的 X 射线源为 $\text{Cu K}\alpha_1$ ($\lambda=0.154 \text{ nm}$)。其表征结果是整个 GaN 蓝光 LED 外延材料的结晶质量,但 n 型层厚度最大,所以表征的主要是 n 型层结晶质量。分别对样品作了 ω 扫描和 $\omega-2\theta$ 扫描。为了消除由测量带来的误差,在测量各样品的数据时在探测器的前面加了一个 0.2 mm 的狭缝。另外还对两样品制成的 LED 进行了光电性能测试。电致发光光谱的测试装置为远方(PMS-50)光谱分析仪,精度为 0.1 nm 。I-V 测试装置电压精度为 1 mV ,电流精度为 $0.01 \mu\text{A}$ 。

3 结果与讨论

A、B 两样品的 (002)、(104)、(103)、(102)、(101)五个晶面的 X 射线双晶衍射 ω 扫描半峰全宽(FWHM)值如表 1 所示。从表 1 中可以看出 A、B 两样品的 (102) 面双晶衍射半峰全宽值均小于 $500''$,这是目前在 Si 衬底上生长 GaN LED 结构外延膜所报道的最小值^[13]。表明这两个样品具有较好的结晶性能。

表 1 样品五个面的 ω 扫描半峰全宽值

Table 1 FWHM values of ω -scanning five crystal planes of sample A, B (unit: second of arc)

	(002)	(104)	(103)	(102)	(101)
Sample A	346	412	450	498	597
Sample B	415	443	457	488	537

GaN 外延膜中的位错密度可通过 X 射线衍射 ω 扫描半峰全宽值表征。其中螺位错密度可以由 (002) 面 ω 扫描半峰全宽值与伯格矢量 $b=[0001]$ 计算,刃位错密度可以通过 (100) 面 ω 扫描半峰全宽值与伯格矢量 $b=1/3[11\bar{2}0]$ 计算得出^[9]。通常 GaN 外延膜为 (0001) 取向,因此做 (100) 面 ω 扫描时衍射面与样品表面垂直,即此时要求入射角为 90° 。由于 GaN 外延膜的厚度较薄,用来表征刃位错密度的 (100) 面 ω 扫描很难实现^[14]。

刃位错密度还可以根据 (302) 面的 ω 扫描半峰全宽值计算^[10],其中 (302) 面 ω 扫描的倾斜角为 70.45° 。因此,可以测量一系列不同倾角(角度小于 70.45°)的晶面的 ω 扫描半峰全宽值,通过计算拟合,得到倾斜角为 70.45° 晶面 (302) 面的半峰全宽值,进而计算出刃位错密度。

样品 A、样品 B 的 ω 扫描半峰全宽值随倾斜角增加的变化曲线图。通过晶格-旋转模型^[9,10,12]进行拟合,拟合公式为

$$\Gamma_{hkl} = \sqrt{(\Gamma_y \cos \phi)^2 + (\Gamma_z \sin \phi)^2},$$

其中 Γ_{hkl} 为 (hkl) 面的 ω 扫描半峰全宽值, ϕ 为该衍射面的倾斜角度。其拟合图如图 2 所示, 从拟合图中可以看出实验数据与拟合曲线吻合很好。这样就可以根据图 2 所示各样品的拟合曲线中 (002) 面和 (302) 面半峰全宽值计算出螺位错密度和刃位错密度。位错密度的计算公式^[15] 为:

$$D_{\text{screw}} = \beta_{(002)}^2 / 4.36b_{\text{screw}}^2,$$

$$D_{\text{edge}} = \beta_{(302)}^2 / 4.36b_{\text{edge}}^2,$$

$$D_{\text{dis}} = D_{\text{screw}} + D_{\text{edge}},$$

其中 D_{screw} 为螺位错密度, D_{edge} 为刃位错密度, β 为半峰全宽值, b 为伯格矢量的值 ($b_{\text{screw}} = 0.5185 \text{ nm}$, $b_{\text{edge}} = 0.3189 \text{ nm}$)。其计算结果如表 2 所示。

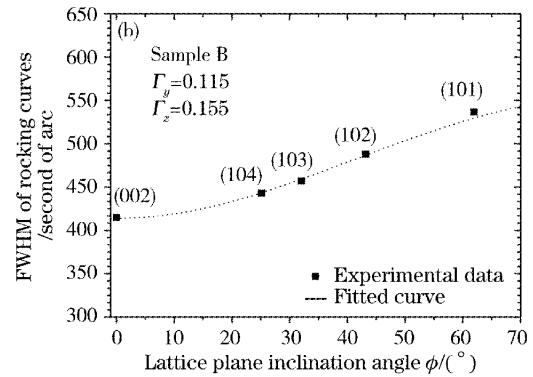
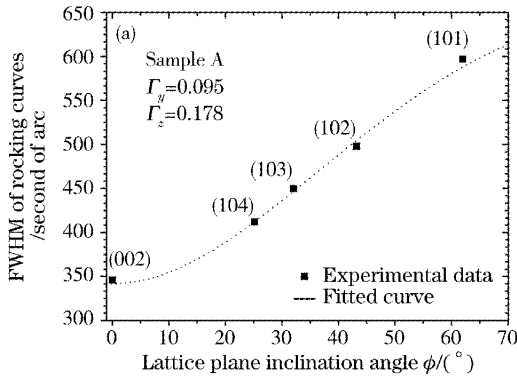


图 2 两个样品 ω 扫描半峰全宽值随倾斜角增加的变化曲线图

Fig. 2 FWHM value of ω -scans as a function of inclination angle ϕ for the two GaN films

表 2 样品 A、B 的螺位错密度、刃位错密度及总的位错密度

Table 2 Screw and edge dislocation densities and total dislocation densities of samples A and B

	$D_{\text{screw}} /$ (10^8 cm^{-2})	$D_{\text{edge}} /$ (10^9 cm^{-2})	$D_{\text{dis}} /$ (10^9 cm^{-2})
Sample A	2.3	2.0	2.23
Sample B	3.4	1.6	1.94

结果表明, 经过 δ 掺杂 Si 处理后生长的样品 B 中的螺位错密度有所增大, 同时刃位错密度会减少。但样品 B 的总位错密度还是有所减小。认为主要有以下原因: 首先是样品 B 经过 δ 掺杂 Si 处理后会在 n 型层上形成任意分布的岛状 Si_xN_y ; 在这些 Si_xN_y 上很难外延生长 GaN; 因此势必会在该样品的 Si 处理层上下的外延膜之间形成一些微小空洞。一方面由于这些岛状 Si_xN_y 的存在使得 Si 处理后接着生长的 GaN 最初呈三维生长模式, 当这些岛状的 GaN 晶核在实现二维生长连成膜的时候则需要更多的“生长触媒”螺位错。因此经过三次 Si 处理后生长的 GaN 样品中的螺位错密度有所增大就不难理解了。另外由于这些微小空洞有利于弛豫 Si 衬底与 GaN 外延膜之间由于大失配所产生的巨大应力从而导致刃位错有所减小。相对于增加的螺位错来说, 因应力释放而减少的刃位错占主导地位, 所以样品 B 的总位错密度还是有所减小。

A、B 两样品的 (002) 面和 (004) 面的 $\omega-2\theta$ 扫描半峰全宽值如表 3 所示。从表 3 不难发现样品 B

(002) 、 (004) 面的 $\omega-2\theta$ 扫描曲线半峰全宽值均明显大于样品 A, 其半峰全宽值主要是反映样品在 C 轴方向非均匀应变的大小。即表明 Si 处理后的样品中非均匀应变较大。认为样品 B 非均匀应变变大的主要原因是由于应力的释放使外延膜中晶粒尺寸变大, 而位错密度的减小又会增大每个晶粒内部的应力。所以对于每个晶粒而言, 尺寸变大、应力变大, 结果必然导致非均匀应变变大。就整个样品而言非均匀应变也会相应变大。这一结果跟公式 $\Gamma = \lambda/2D\cos\theta + \epsilon_{\text{in}}\tan\theta$, (其中 Γ 为 $\omega-2\theta$ 扫描半峰全宽值, D 为晶粒尺寸, θ 为布拉格衍射角, ϵ_{in} 为非均匀应变) 也是吻合的。

表 3 各样品的 (002) 面和 (004) 面的 $\omega-2\theta$ 扫描曲线半峰全宽值

Table 3 FWHM values of $\omega-2\theta$ scans of (002) and (004) planes of each sample (unit: second of arc)

		$(002)\omega-2\theta$	$(004)\omega-2\theta$
Untreated sample	Sample A	327	311
Delta-doped sample	Sample B	371	353

对 A、B 两样品, 采用相同的器件工艺制作了上下电极结构的蓝光 LED 芯片。图 3 为室温下, 注入 20 mA 正向电流时样品 A、B 的电致发光光谱。样品 A 的峰值波长为 465.0 nm, 半峰全宽为 23.5 nm, 光辐射功率为 217.23 mW; 样品 B 的峰值波长为 460.0 nm, 半峰全宽为 22.0 nm, 光辐射功率为 221.48 mW。对应的 LED I-V 特性曲线如图 4 所示。样品 A 在 20 mA 时正向电压为 3.9 V,

在 $40 \mu\text{A}$ 正向电流时开启电压为 2.6 V , $10 \mu\text{A}$ 反向电压为 11.5 V ; 样品 B 在 20 mA 时正向电压为

3.7 V , 在 $40 \mu\text{A}$ 正向电流时开启电压为 2.6 V , $10 \mu\text{A}$ 反向电压为 18.0 V 。

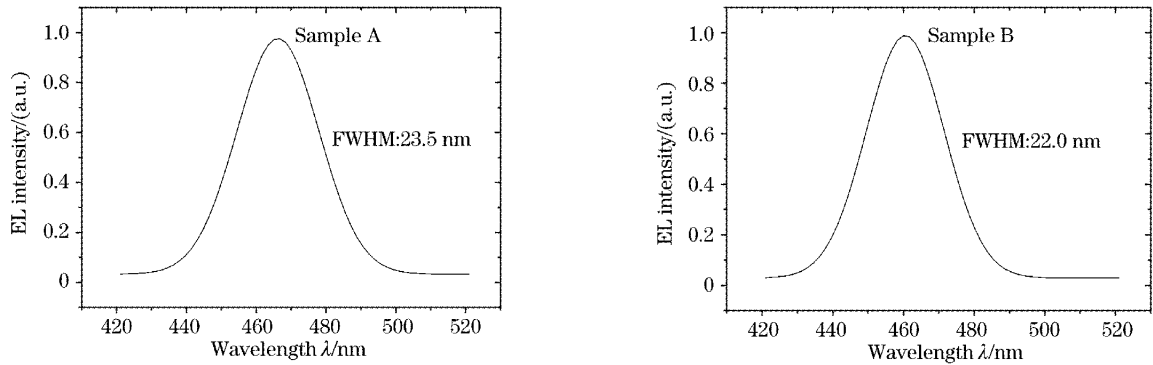


图 3 样品在 20 mA 工作电流下的电致发光光谱图

Fig. 3 Electroluminescence spectra of GaN blue LED samples under 20 mA DC current

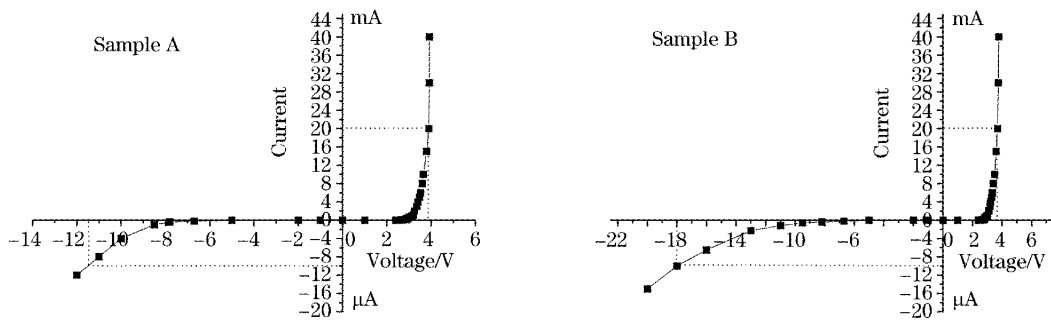


图 4 样品所对应的 LED 的 I - V 曲线

Fig. 4 I - V curves of the LED of sample A, B

以上数据表明,经过 δ 掺杂 Si 处理的样品 B 有相对更好的光电性能。由于两样品的芯片制作工艺均相同,主要原因是由于样品 B 的晶体质量较样品 A 好,这样可能会使芯片的 p 型欧姆接触更好一些,器件质量就会相应地有所提高。所以总体来看与前面 X 射线衍射分析的结果也是吻合的。

4 结 论

通过 X 射线衍射的位错和应力分析以及相应的 LED 电致发光光谱、 I - V 性能测试,发现 δ 掺杂 Si 处理后生长的 GaN 样品中螺位错密度有所增大,刃位错密度会减少,总的位错密度仍有所减少;样品的非均匀应变较大;相应的 LED 光电性能、 I - V 性能变好。

参 考 文 献

1 Shuji Nakamura, Stephen Pearton, Gerhard Fasol. *The Blue Laser Diode: The Complete Story* [M]. New York: Springer, 2000. 1~5
2 Supoatik Guha, Nestor A. Bojarczuk. Ultraviolet and violet GaN

light emitting diodes on silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(4): 415~417
3 Chuong A. Tran, A. Osinski, R. F. Karlicek *et al.*. Growth of InGaN/GaN multiple-quantum-well blue light-emitting diodes on silicon by metalorganic vapor phase epitaxy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(11): 1494~1496
4 J. W. Yang, A. Lunev, G. Simin *et al.*. Selective area deposited blue GaN-InGaN multiple-quantum well light emitting diodes over silicon substrate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76** (3): 273~275
5 A. Dadgar, M. Poschenrieder, O. Contreras *et al.*. Bright, crack-free InGaN/GaN light emitters on Si(111)[J]. *Phys. Status. Solidi A*, 2002, **192**(2): 308~313
6 Baijun Zhang, Takashi Egawa, Hiroyasu Ishikawa *et al.*. High-bright InGaN multiple-quantum-well blue light diodes on Si(111) using AlN/GaN multilayers with a thin AlN/AlGaIn buffer layer [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**: 226~228
7 A. Dadgar, M. Poschenrieder, J. Bläsing *et al.*. MOVPE growth of GaN on Si(111) substrates[J]. *J. Crystal Growth*, 2003, **248**: 556~562
8 Mo Chunlan, Fang Wenqing, Jiang Fengyi *et al.*. Growth and characterization of InGaN blue LED structure on Si(111) by MOCVD[J]. *J. Crystal Growth*,
9 V. Srikant, J. S. Speck, D. R. Clarke. Mosaic structure in epitaxial thin films having large lattice mismatch[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(9): 4286~4295
10 Yuejun Sun, Oliver Brandt, Tianyu Liu *et al.*. Determination of the azimuthal orientational spread of GaN films by X-ray

diffraction[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(26): 4928~4930

11 H. Heinke, V. Kirchner, S. Einfeldt *et al.*. X-ray diffraction analysis of the defect structure in epitaxial GaN[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(14): 2145~2147

12 S. R. Lee, A. M. West, A. A. Allerman *et al.*. Effect of threading dislocation on the Bragg peakwidths of GaN, AlGaIn, and AlN heterolayers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(24): 241904-1~241904-3

13 Liu Weihua, Li Youqun, Jiang Fengyi *et al.*. Research on the ideality factor of GaN light-emitting diodes on Si substrate[J]. *J. Functional Materials and Devices*, 2006, **12**(1): 45~48 (in

Chinese)

刘卫华,李有群,江风益等. Si 衬底 GaN 基 LED 理想因子的研究[J]. *功能材料与器件学报*, 2006, **12**(1): 45~48

14 X. H. Zheng, H. Chen, Z. B. Yan *et al.*. Determination of twist angle of in-plane mosaic spread of GaN films by high-resolution X-ray diffraction[J]. *J. Crystal Growth*, 2003, **255**: 63~67

15 Zhou Jin, Yang Zhijian, Tang Yingjie *et al.*. X-ray Analysis of GaN film grown by hydride vapor phase epitaxy[J]. *Chin. J. Luminescence*, 2001, **22**(Suppl.): 79~82

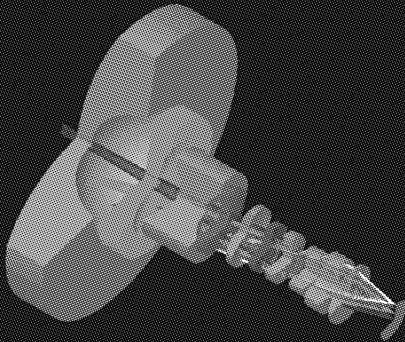


• 广告 •



光研科学有限公司

光学软件权威供应商



ZEMAX[®]
光学设计软件

TFClac[®]
薄膜设计软件

欢迎致电或浏览网页
了解软件订购和课程安排详情

新加坡电话/传真: 65-65643659/65649627
南京电话/传真: 025-57929358/57929359
深圳电话: 0755-27698403

福州电话/传真: 0591-83730680/83721062
北京电话/传真: 010-67126765/67113155
[http:// www.wavelab-sci.com](http://www.wavelab-sci.com)