

Si(111) 衬底高温 AlN 缓冲层厚度及其结构特性*

王建峰^{1,2,†} 张纪才¹ 张宝顺¹ 伍 墨¹ 王玉田¹ 杨 辉¹ 梁骏吾¹

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

(2 武汉大学物理系, 武汉 430072)

摘要: 通过高分辨 X 射线衍射、光致发光、二次离子质谱(SIMS)、原子力显微镜和同步辐射 X 射线衍射分析了 AlN 缓冲层的厚度对 GaN 外延层的影响. 实验表明, 在缓冲层厚度为 13~20nm 之间时, GaN 外延层的张应力最小, 同时晶体质量和光学质量达到最优值. 此外, SIMS 分析表明, 当 AlN 缓冲层位于 13~20nm 之间时, 可有效抑制 Si 的扩散.

关键词: GaN; AlN; Si 衬底

PACC: 6110; 7280E; 0630M

中图分类号: TN304.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0109-04

1 引言

Si 具有易解理、易得到大面积高质量商业化衬底以及硅基器件易于集成等优点, 所以 Si 衬底 GaN 基材料生长及器件应用引起了人们极大地关注. 大失配外延生长 GaN 的传统方法一般采用二步法, 先生长低温的 GaN 或 AlN 缓冲层, 然后高温生长 GaN. 然而对于 Si 衬底上生长的低温 GaN 缓冲层, 经过退火后分解形成 Ga 滴, 严重影响晶体质量^[1]. 而在 Si 衬底上直接高温生长 GaN 时, 容易在 Si 衬底表面形成一层多晶 SiN 薄膜, 降低 GaN 膜的结晶质量^[2]. AlN 缓冲层是一个较好的选择, 其主要优点是热稳定性好, 又可避免高温生长时 SiN 的形成. 因为 Al—N 键形成优先于 Si—N 键, 所以生长 AlN 缓冲层时可以在一定程度下抑制 SiN 的形成. 低温 AlN(低于 720℃)存在两种取向, 而高温 AlN 的成核速率虽然较慢, 但每个晶粒的生长速率快, 有利于随后的 GaN 外延膜的生长^[3]. 本文将主要分析高温 AlN 缓冲层的厚度对 GaN 外延膜的应变状态、晶体质量、Si 扩散的影响以及 AlN 缓冲层的结构信息^[4].

2 实验

实验采用低压(1.01×10^4 Pa)MOCVD 方法在 Si(111) 衬底上生长六方相 GaN, 使用三甲基镓(TMGa)为 Ga 源, 三甲基铝(TMAI)为 Al 源, 高纯 NH₃ 气为氮源, 氢气为载气. 在 1100℃ 的条件下生长 AlN 缓冲层, 随后在 1200℃ 下生长 1500nm 的 GaN. 生长的样品 AlN 缓冲层的厚度分别为 8, 13, 25, 38, 68nm, 标记为样品 A, B, C, D, E. 此外还生长了一系列的样品, 除了生长时间以外, 缓冲层的生长条件与前面的一样, 在缓冲层上面没有生长 GaN 外延层. 缓冲层的生长时间分别为 1, 2, 4, 8min(厚度分别为 3, 6, 12, 25nm). 采用 PL 谱研究样品的光学性质, 利用 X 射线双晶衍射仪(XRD)分析样品的晶体质量和应力状态, 利用原子力显微镜(AFM)研究样品的表面形貌, 利用二次离子质谱仪(SIMS)研究 Si 扩散, 利用同步辐射 X 射线研究 AlN 缓冲层的结构特性.

3 结果与讨论

图 1 给出了 X 射线双晶衍射仪摇摆曲线半宽

* 国家自然科学基金(批准号: 69825107), 国家自然科学基金及香港研究资助局联合基金(批准号: 5001161953, N-HKU028/00)资助项目

† 本文通信作者, Email: wlino@red.semi.ac.cn

度和三轴晶系统所测试的 c 轴晶格常数和 AlN 厚度的关系. 可以看出 B 样品 X 射线半宽度最窄, 对应的 c 轴晶格常数最大. 从 c 轴晶格常数结果可以确认 GaN 外延层所受应力为张应力, 在厚度为 13nm 时所受张应力最小. 从曲线变化趋势可以看出, GaN 所受张应力越小其结晶质量越好. 大约在 13~20nm 范围内, GaN 质量最好. 从图 2 可以看出室温下 PL 谱半宽度和 AlN 厚度的变化关系几乎和 X 射线半宽度变化趋势完全一致, 这证明了 GaN 的光学质量在张应力最小处最好.

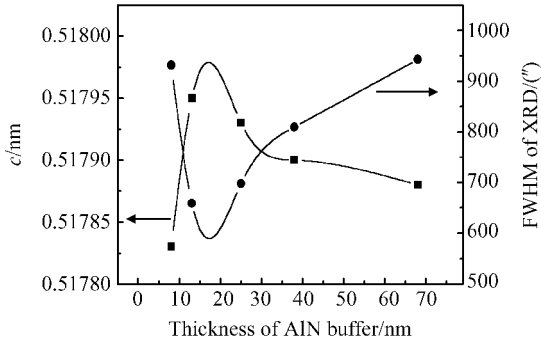


图 1 c 轴晶格参数、DCXRD 半宽度和 AlN 缓冲层厚度的关系
Fig. 1 c -lattice constant and full width at half maximum (FWHM) versus AlN thickness

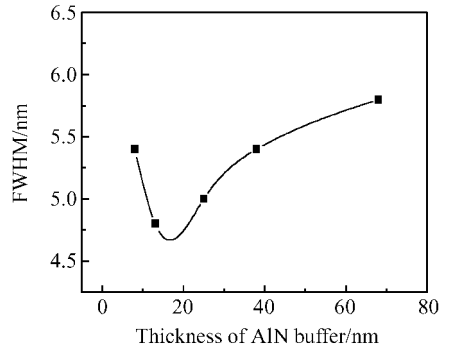


图 2 PL 半宽度和 AlN 缓冲层厚度的关系
Fig. 2 FWHM of PL versus AlN thickness

确定 AlN 缓冲层的最佳厚度, 不仅要考虑应力和位错密度的影响, 还要考虑 AlN 缓冲层对 Si 扩散的抑制作用. 一般文献报道 AlN 厚度大于 40nm. 我们采用 SIMS 研究了 Si 在 GaN/AlN/Si(111) 界面扩散过程, 结果如图 3 所示. 比较 B, C, D, E 样品发现 B, C 样品的 Si 扩散的抑制情况比 D, E 样品好, B 样品已有效地阻止了 Si-N 在 GaN 中的形成. 因此, 抑制 Si 扩散并不是 AlN 越厚越好. 对于 A 样品, 我们发现在其表面有大量明显的盘状缺陷, 直径大约为 1mm, 这些缺陷将限制该材料在器件方面

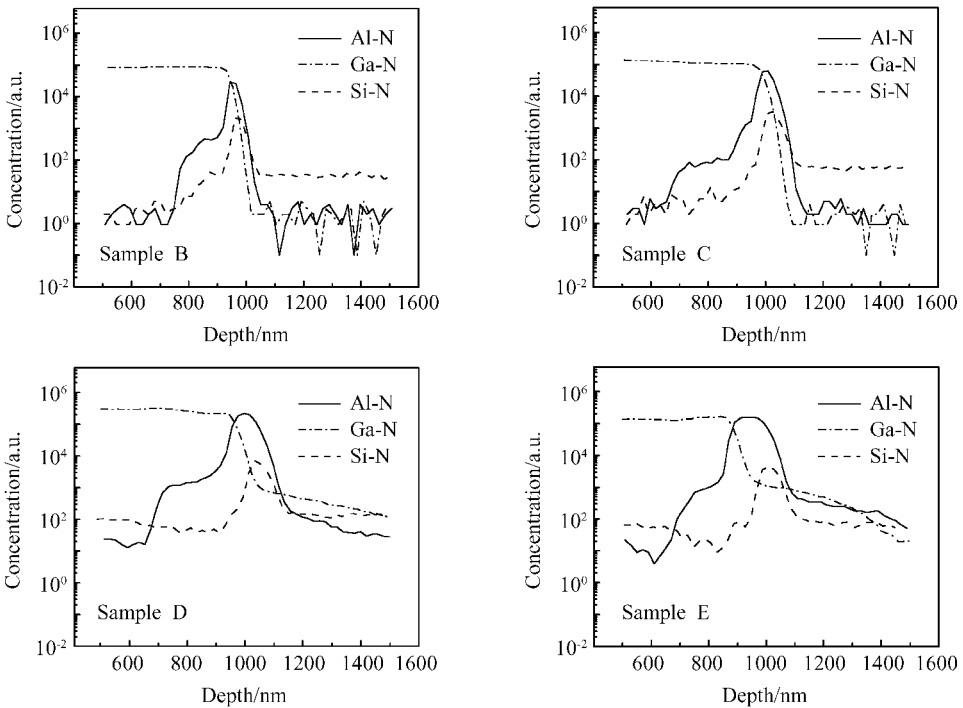


图 3 SIMS 测量不同 AlN 缓冲层厚度下 GaN 生长 Si 扩散的影响
Fig. 3 SIMS measurement of Si diffusion for samples B~D

的应用. 这些盘状缺陷一般认为源于衬底的 Si 扩散. 综合考虑应力、位错密度和 Si 扩散三个因素, AlN 厚度应在 20nm 左右.

我们采用 AFM 研究了 AlN 缓冲层的表面形貌(图 4), 对于生长时间分别为 1, 2, 4, 8min 的样品, 从生长 1min 刚开始成核, 此时还未完全铺满衬

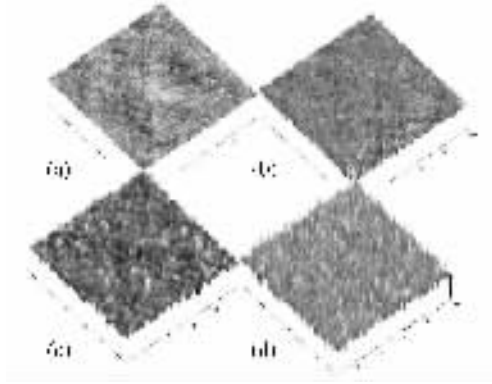


图 4 AFM 结果 (a) 1min; (b) 2min; (c) 4min; (d) 8min

Fig. 4 AFM image of AlN buffers corresponding to their growth time (a) 1min; (b) 2min; (c) 4min; (d) 8min

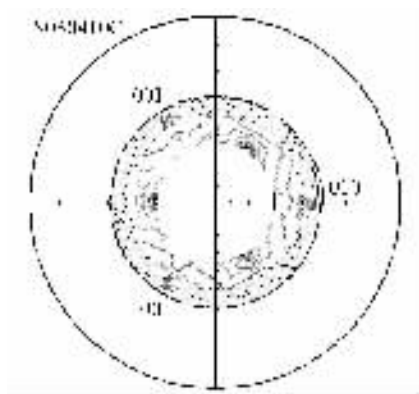


图 5 AlN 缓冲层(10 $\bar{1}2$)面极图

Fig. 5 (10 $\bar{1}2$) pole figure of AlN buffer layer

底; 到 2min 岛状成核逐渐长大, 在岛的顶端形成方型台面; 到 4min(既对应厚度大约 13nm 处)时成核最大, 方型台面也最大; 当继续生长到 8min 时, 令人奇怪的是此时岛的顶端逐渐变尖, 方型台面变小. 利用同步辐射高强度 X 射线, 对生长时间为 4min 的样品进行极图分析(图 5), 发现在标准的 χ 角为 42.7° 的位置有六次对称的(10 $\bar{1}2$)面以外, 在 χ 角为 35° 的位置发现了三次对称的衍射峰, 其产生的原因正在进一步分析中.

4 结论

本文从晶体质量、应力状态、光学质量以及抑制 Si 扩散等方面研究了 AlN 缓冲层的厚度对 GaN 外延层的影响, 得出最佳高温 AlN 缓冲层的厚度在 13 ~ 20nm 之间.

致谢 感谢高能所漫散射站的贾全杰、郭立平、何庆等在同步辐射测量中给与的帮助.

参考文献

- [1] Ishikawa H, Yamamoto K, Egawa T, et al. Thermal stability of GaN on (111) Si substrate. *J Cryst Growth*, 1998, 189/190:178
- [2] Ohtani A, Stevens K S, Beresford R. Microstructure and photoluminescence of GaN grown on Si(111) by plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 1994, 65:61
- [3] Bourret A, Barski A, Barbier A, et al. Growth of aluminum nitride on (111) silicon. Microstructure and interface structure. *J Appl Phys*, 1998, 83:2003
- [4] Zhang B S, Wu M, Shen X M, et al. Influence of high-temperature AlN buffer thickness on the properties of GaN grown on Si(111). *J Cryst Growth*, 2003, 258:34

Influence of Thickness of High Temperature AlN Buffer Grown on Si(111) on GaN Structure Properties*

Wang Jianfeng^{1,2,†}, Zhang Jicai¹, Zhang Baoshun¹, Wu Mo¹, Wang Yutian¹,
Yang Hui¹, and Liang Junwu¹

(1 *State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: The influences of AlN buffer thickness on the optical and the crystalline properties of metalorganic chemical vapor deposition wurtzite GaN layers on Si(111) substrate are investigated. High-resolution X-ray diffraction and photoluminescence measurement reveal that the thickness of AlN buffer exerts a strong influence on the distribution of dislocation and stress in GaN epilayer. The evidence is further reinforced by atomic force microscopic observation of AlN nucleation process. The optimum thickness of AlN buffer to effectively suppress Si diffusion is determined by secondary-ion mass spectroscopy to be in the range of 13~20nm.

Key words: GaN; AlN; Si substrate

PACC: 6110; 7280E; 0630M

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0109-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 69825107), the National Natural Science Foundation of China and the Research Grants Council of Hong Kong Joint Program(No. 5001161953, N-HKU028/00)

† Corresponding author. Email: wlino@red.semi.ac.cn

Received 26 October 2004, revised manuscript received 29 November 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics