

硅基 GaN 薄膜的外延生长*

张昊翔 叶志镇 卢焕明 赵炳辉 阙端麟

(浙江大学硅材料国家重点实验室 杭州 310027)

摘要 本文报道采用简便的真空反应法在 Si(111) 衬底上生长出了六方结构的 GaN 单晶薄膜, 并对 GaN 薄膜的表面形貌、结晶学性质和光学特性作了研究。SEM 表明外延层表面光亮平整, 无裂纹出现, XRD 图谱上有一 GaN (0002) 衍射峰, 其半高宽为 0.5° ; 室温下的光致发光谱在 373nm 处有一个很强的发光峰, 其半高宽为 8nm (35.7meV)。

PACC: 6865, 6855, 7865

1 引言

GaN 是一种直接带隙半导体, 室温下禁带宽度为 3.39eV, 在制备蓝紫光光电子器件如光发射二极管、激光器、探测器件^[1]以及大功率高速微电子器件^[2]方面有很好的应用前景。由于 GaN 大尺寸体单晶生长极为困难, 因此在异质衬底上外延 GaN 就成为研究 GaN 材料和器件的主要手段。利用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)、分子束外延(MBE)等技术已经在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 衬底、SiC 衬底上制备出较好质量的 GaN 外延层, 研制出 GaN 基蓝色发光二极管^[3]及激光器^[4]。

虽然 GaN 基蓝光二极管及激光器已经开始商品化, 但限制 GaN 薄膜材料及器件广泛应用的仍然是衬底问题: (1) $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 衬底不导电, 器件电极不容易制作; (2) SiC 衬底虽然导电, 但其尺寸较小、价格昂贵。为了制备大面积的 GaN 薄膜, 硅片被认为是制备 GaN 的较为理想的衬底, 因为它具有质量高, 尺寸大, 成本低等许多优点。如果氮化镓能外延在硅衬底上, 极有可能将氮化镓基的器件集成到硅基大规模集成电路之中。硅衬底与 GaN (纤锌矿结构) 的匹配存在着以下问题, (1) 具有较大的晶格失配 (37.77%); (2) 具有较大的热膨胀系数的失配 (41.16%)。在氮化镓研究的早期, 硅上获得的氮化镓薄膜是非晶或多晶^[5,6], 且很容易开裂。Lei 等人^[7]采用分子束外延技术在 Si(100) 衬底上获得了单晶氮化镓薄膜。

本文我们采用真空反应法, 尝试在硅基上生长氮化镓外延层薄膜并获得成功。比起 MOCVD、MBE 等方法, 本实验方法具有简便易行、成本低等特点。目前, 我们对硅片上生长的 GaN 外延薄膜的性能进行了一些测试, 并对它的生长机制和发光机理进行了初步探讨,

* 本课题受到国家教委“跨世纪优秀人才”基金及国家自然科学基金重大项目资助

张昊翔 男, 1974 年出生, 博士生, 从事半导体薄膜研究

叶志镇 男, 1955 年出生, 教授, 博士生导师, 从事半导体薄膜及 UHV/CVD 硅低温外延、锗硅超晶格研究
1998-05-16 收到, 1998-09-17 定稿

有关深入研究正在进行中。

2 实验

GaN 薄膜的外延生长是在真空反应炉里进行的。生长系统背景真空度优于 1×10^{-5} Pa。它与 GSMBE 的最大不同之处在于 Ga 源的蒸发是在生长室内进行的, 蒸发出的 Ga 分子在到达衬底表面的过程中不断地补充能量来满足克服 Ga 与 NH_3 反应势垒所需的活化能。

实验采用晶向为 111 的 Si 片做衬底, 固态金属镓作 Ga 源, 氨气和氮气作氮源, 其纯度均为 5N。具体实验过程如下: 硅片采用传统的 RCA 清洗方法, 清洗完毕后, 立即放入生长室, 开始抽真空, 当达到背景真空度后, 升温至 950 通入 NH_3 进行原位清洗 20 分钟, 然后开始外延生长, 生长温度控制在 900~ 1100 之间。改变实验条件, 生长速度可以在每小时 0.4 μm 到 2 μm 之间变化。

样品制备好后, 利用扫描电镜观察 GaN 薄膜的表面形态, X 射线双晶衍射对其晶体学性质进行测试, 采用 HITACHI-850 型荧光光谱仪对 GaN 外延层进行了的室温下的光致发光光谱测试。仪器采用 150W 的氙灯发射波长可连续变化的光经光栅分光后作为激发光源。样品测试采用的激发光波长为 288nm。

3 实验结果及讨论

生长出的 GaN 薄膜表面光亮平整, 用 SEM 观察其表面, 发现平整光滑, 无裂纹出现, 如图 1 所示。

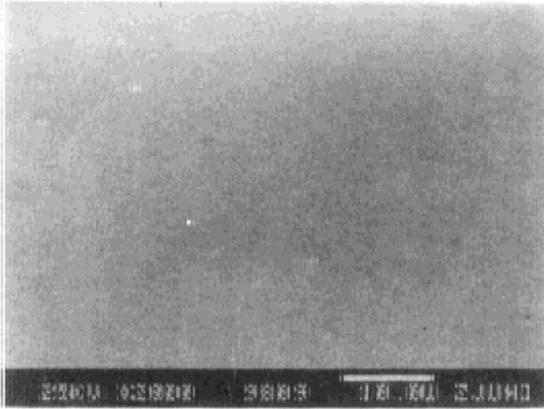


图 1 GaN 薄膜表面的 SEM 显微像

图 2 为在 Si(111) 衬底上生长 2.5 μm 厚的 GaN 薄膜的 X 射线衍射谱。在 $2\theta = 35.9^\circ$ 处出现的强衍射峰为 GaN (0002) 晶面的衍射峰, 通过比较可以看出 GaN (0002) 衍射峰比 Si(111) 衍射峰窄很多。同时还可以确定生长出的 GaN 薄膜为纤锌矿结构。在所做的 XRD 测试分析中, 在 950~ 1100 生长条件下, 得到的 GaN 薄膜的 XRD 衍射峰在图谱上均处于同一位置。

用 X 射线衍射仪对 GaN (0002) 衍射峰进行回摆曲线的测试, 确定衍射峰的半高宽 $\text{FWHM} = 0.5^\circ$ (如图 3 所示), 对于大多数样

品, 其 (0002) 衍射峰的半高宽均在 0.4~ 0.6 之间。

如图 4 所示, 图谱上只有一个强而尖锐的近带边发光峰, 其波长为 373nm (3.33eV), 半高宽为 8nm (35.7meV), 其它处光滑平坦, 黄光带未见发光峰出现, 这一结果在文献[8]中也有报道。通常文献中报道的室温下的 PL 谱中发光峰位于 365nm 处, 且在波长为 560nm 处有黄光峰出现, 我们的样品近带边发光峰位于 373nm 处, 其它处并未有发光峰出现。我们认为有以下的理由: 首先, 这个近带边发光峰是浅施主到价带的辐射复合所致, 浅施主的来源是氮空位和其它一些晶格缺陷^[9], 通过 X 射线衍射结果 ($\text{FWHM}_{\text{GaN}(0002)} = 0.5^\circ$) 也反映

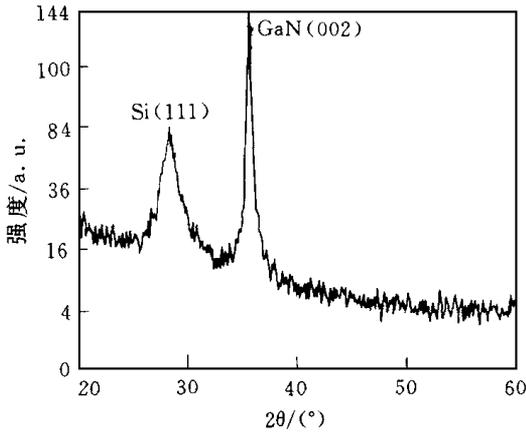


图 2 GaN 外延薄膜层的 XRD 衍射图谱

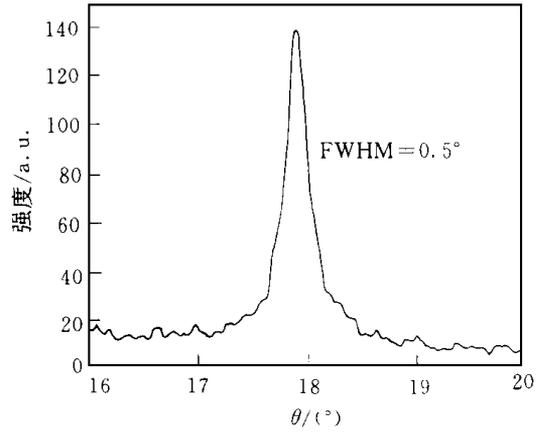


图 3 GaN (0002)X 射线衍射峰回摆曲线

出了 GaN 外延薄膜层中存在较多的晶格缺陷,而这些较多的氮空位和晶格缺陷则增加了浅施主能级的态密度,使得浅施主到价带的辐射复合加剧从而使带边发光峰发生了红移,而没有真正表征出六方 GaN 室温下的禁带宽度 其次,对于在波长为 560nm 处未见黄光峰出现,是由于我们在外延生长之前的 Si 片 RCA 清洗和原位清洗基本去除了衬底表面吸附的碳,同时在反应源中不含有碳元素的物质,外延时控制的生长压力也比较低(10^{-2} Pa),所以在 GaN 外延层中杂质碳的含量较低,从而观察不到由导带到杂质碳受主能级辐射复合而致的黄色发光峰

4 结论

利用简便的真空反应法成功地在 Si 衬底上生长出了 GaN 外延薄膜,其生长速率可达 $2\mu\text{m}/\text{h}$ SEM 观察到 GaN 外延层表面光亮平整,无裂纹出现 XRD 图谱表明除衬底峰外,只有一个 GaN (0002)的衍射峰,其半高宽 $\text{FWHM} = 0.5^\circ$;室温下的光致发光谱上只有一个强的近带边发光峰,峰值波长对应 373nm,谱峰半高宽为 8nm (35.7meV).

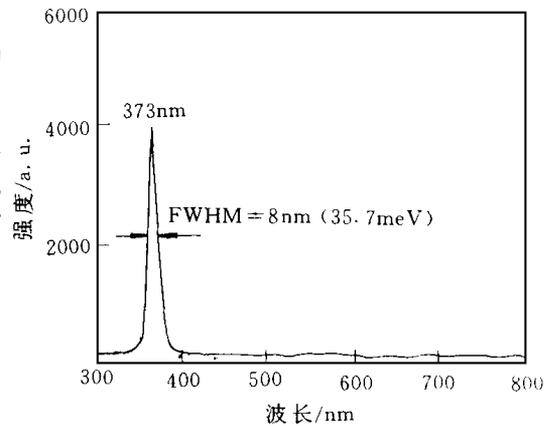


图 4 GaN 外延层室温下的光致发光谱 300K

参 考 文 献

[1] K. S. Stevens, M. Kinnibuigh, R. Beresford, Appl Phys Lett , 1995, **66**: 3518
 [2] M. A. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson *et al* , Appl Phys Lett , 1994, **65**: 1121.
 [3] ShujiNakanura, TakashiMukai and Masayuki Senoh, Appl Phys Lett , 1994, **74**: 1687.
 [4] ShujiNakanura, M. Senoh, S. Nagahama *et al* , Jpn J. Appl Phys , 1996, **35**: 74
 [5] E. Butter, G. Fitzi *et al* , Thin Solid Films , 1979, **59**(1): 25

- [6] S. W. Choi, K. J. Bachmann *et al* , *J. Mater. Res.* , 1993, **8**(4): 847.
[7] T. Lei, M. Fanciulli, R. J. Molnar *et al* , *Appl. Phys. Lett.* , 1991, **59**(8): 944.
[8] 段家 , 张国义, 等, *半导体学报*, 1996, **17**(8): 637.
[9] K. G. Fertitta, A. L. Holmes, J. G. Neff *et al* , *Appl. Phys. Lett.* , 1994, **65**: 1823.

Epitaxial Growth of GaN Film on Si Substrate

Zhang Haoxiang, Ye Zhizhen, Lu Huanming, Zhao Binghui, Que Duanlin

(*State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

Received 16 May 1998, revised manuscript received 17 September 1998

Abstract GaN epilayer grown on Si substrate by a novel vacuum reaction method rather than MOCVD or MBE is reported, and its surface morphology, crystallinity and optical property are also investigated. SEM shows that surface of GaN epilayer is mirror-like flat and crack-free. A pronounced GaN (0002) peak appears in the XRD pattern. The FWHM of the XRD for (0002) diffraction from the GaN is 0.5° . The PL spectrum shows that the GaN epilayer emits light at the wavelength of 373nm with a FWHM of 8nm (35.7meV).

PACC: 6865, 6855, 7865