

MOCVD 外延生长高阻 GaN 薄膜材料*

方测宝 王晓亮 刘超 胡国新 王军喜 李建平 王翠梅 李成基 曾一平 李晋闽

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 采用 MOCVD 技术在非有意掺杂的条件下, 在 C 面蓝宝石衬底上制备出了高阻的 GaN 单晶薄膜样品. 用扫描电子显微镜和原子力显微镜分析样品显示 GaN 外延膜的表面十分平整, 表面粗糙度仅有 $\sim 0.3\text{nm}$. 样品的 X 射线双晶衍射摇摆曲线(0002)峰的半峰宽为 5.22° , 证实所生长的 GaN 外延层具有较好的结晶质量. 变温 Hall 测量发现样品的室温电阻率高达 $6.6 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 250°C 下的电阻率约为 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$.

关键词: MOCVD; GaN; 电阻率

PACC: 6855; 6865; 7360F

中图分类号: TN304.055

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0091-03

1 引言

GaN 基 III 族氮化物外延材料作为第三代宽禁带半导体材料的典型代表, 不仅可以制作 LED, LD 和短波长紫外探测器等光电器件, 而且在研制高温、高频、大功率微波电子器件方面也极具发展前途. 由于 AlGaIn/GaN 异质结构击穿电压大, 因极化可产生高浓度二维电子气(2DEG), 并具有很高的电子迁移率, 因此在微波功率器件应用方面引起了广泛关注^[1,2]. 为了减小漏电流, 提高 AlGaIn/GaN HEMT 器件的功率密度及其高温、高频性能, 在器件材料结构中外延生长高阻 GaN 层是十分必要的^[3].

由于用 MBE 和 MOCVD 技术异质外延生长的 GaN 薄膜一般呈现 n 型导电类型, 单晶薄膜的晶格中容易自然形成大量的氮空位缺陷并结合其他的浅施主杂质而产生较高的背景电子浓度. 因此要获得半绝缘的高阻 GaN 薄膜就必须显著降低外延薄膜中的背景载流子浓度. 如通过引入深受主能级、缺陷能级来形成电子陷阱(俘获中心)或控制 p 型杂质补偿等途径^[4,5], 均能有效地降低 GaN 薄膜中的载流子浓度而形成高阻材料. 目前常用的可制备高阻

GaN 薄膜的主要方法有: 离子注入法^[6,7]、p 型杂质补偿法^[4,5]和工艺控制生长法^[8,9]. 这些方法各有优缺点并且都不十分成熟, 因而对高阻 GaN 薄膜材料制备工艺的研究成为近年来的热点研究方向之一. 本文报道了我们在非有意掺杂的条件下用 MOCVD 技术在蓝宝石衬底上外延生长高阻 GaN 薄膜的研究成果.

2 实验

实验采用 MOCVD 系统, 以三甲基镓(TMGa)和氨气(NH_3)分别作为 Ga 源和 N 源, 以高纯 H_2 和 N_2 作为载气, $\phi 50\text{mm}$ 的 C 面蓝宝石材料为衬底. 材料生长前蓝宝石衬底需在 MOCVD 系统的生长室中加热处理, 之后降低衬底温度开始非有意掺杂 GaN 薄膜的外延生长. 首先在蓝宝石衬底上外延生长一层较薄的低温 GaN 缓冲层, 生长温度为 $500 \sim 550^\circ\text{C}$, 然后升高衬底温度至 $\sim 1050^\circ\text{C}$ 继续外延生长 $3.2\mu\text{m}$ 厚的非掺杂高温 GaN 层. 衬底温度、源气流量和生长室压力等工艺参数对 GaN 薄膜的外延生长速率、晶体质量和电阻率都有重要影响. 用 SEM, AFM, DCXRD 和变温薄膜电阻测试仪对原生高阻

* 国家自然科学基金(批准号: 60136020), 国家重点基础研究发展规划(批准号: G20000683, 2002CB311903)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA305304)资助项目

GaN 样品进行了性能分析.

3 结果与讨论

本文在 C 面蓝宝石衬底上制备的高阻 GaN 薄膜样品在自然光下观察其表面光亮如镜,在扫描电子显微镜放大 35 万倍时样品表面仍看不出明显的缺陷结构特征,表面影像十分均匀.图 1 是样品解理截面的 SEM 形貌照片.图中左边为蓝宝石衬底,中间为外延生长的高阻 GaN 薄膜,由图中比例尺估测 GaN 薄膜的厚度约 $\sim 3\mu\text{m}$,与傅里叶红外光谱仪测得的平均膜厚 $3.32\mu\text{m}$ 十分接近.

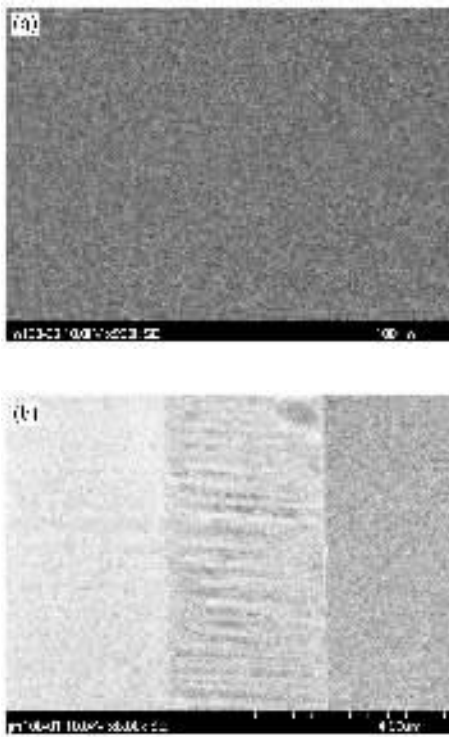


图 1 HR-GaN 样品表面及截面的 SEM 照片

Fig. 1 Images of the high resistivity GaN layer (a) Surface SEM; (b) Cross section SEM

图 2 是用 digital instrument nanoscope III a 型原子力显微镜在接触模式下分析高阻 GaN 样品的表面形貌照片.图中显示样品表面仅有较浅的波浪起伏,表面平均粗糙度 RMS 约 $\sim 0.3\text{nm}$,HR-GaN 外延膜的表面十分平坦.

图 3 给出了高阻 GaN 样品(0002)晶面的 X 射线双晶衍射的摇摆曲线,其半峰宽(FWHM)仅有 $5.22'$,说明我们在 C 面蓝宝石衬底上外延生长的 HR-GaN 薄膜具有较好的质量.

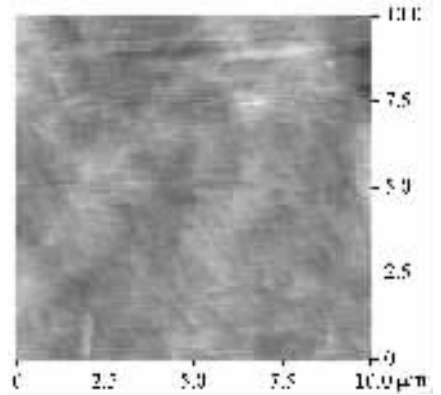
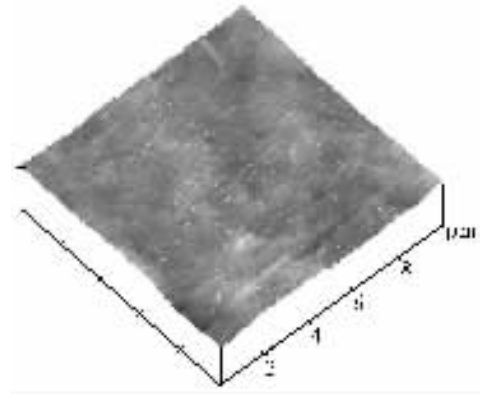


图 2 HR-GaN 样品表面形貌的 AFM 照片

Fig. 2 Roughness diagram and AFM result of the sample

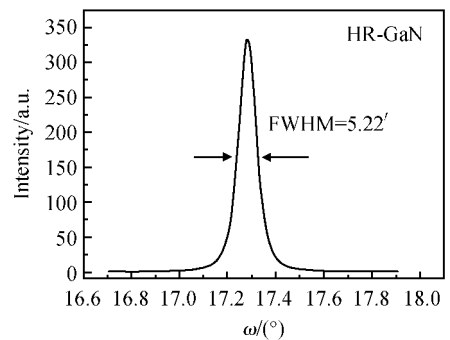


图 3 HR-GaN 样品(0002)晶面的 DCXRD 摇摆曲线

Fig. 3 DCXRD result of HR GaN layer

图 4 是用薄膜电阻测试仪在不同温度下测试高阻 GaN 样品的薄膜电阻率与温度的变化关系.从图中可以看出随着温度的上升,薄膜电阻率单调地下降.室温下 HR-GaN 样品的薄膜电阻率高达 $6.6 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 250°C 时薄膜电阻率为 $\sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$.从室温到 200°C 时薄膜电阻率下降相对较慢,通过拟合计算求得的激活能为 $\sim 0.85\text{eV}$.从 200°C 到 400°C 时薄膜电阻率下降得较快,激活能为 1.06eV .

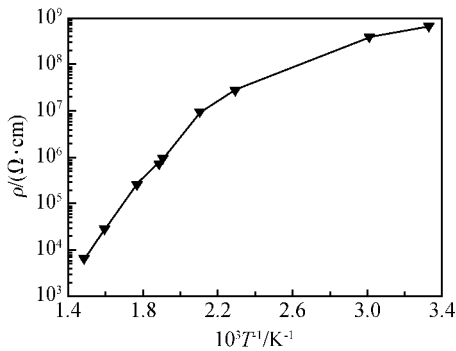


图4 HR-GaN 样品薄膜电阻率与温度的关系

Fig. 4 Temperature dependence on the resistivity of the GaN layer

4 结论

采用 MOCVD 技术在非有意掺杂条件下,在 C 面蓝宝石衬底上外延生长出了高阻的 GaN 单晶薄膜样品. 用 SEM, AFM, DCXRD 和变温薄膜电阻测试仪对样品进行初步分析的结果显示:高阻 GaN 外延膜表面十分平整,表面平均粗糙度仅有 $\sim 0.3\text{nm}$,单晶质量良好,在室温下的薄膜电阻率高达 $6.6 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 250°C 时薄膜电阻率达到 $\sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$. 这为研制高性能 GaN 基高温、高频、大功率电子器件奠定了良好基础.

High Resistivity GaN Film Grown by MOCVD*

Fang Cebao, Wang Xiaoliang, Liu Chao, Hu Guoxin, Wang Junxi, Li Jianping,
Wang Cuimei, Li Chengji, Zeng Yiping, and Li Jinmin

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: High resistivity unintentionally doped GaN films are grown on (0001) sapphire by metalorganic chemical vapor deposition. The surface morphology of the layer is measured by both atomic force microscopy and scanning electron microscopy. The film shows a mirror-like surface morphology (RMS:0.3nm). The FWHM value of X-ray rocking curve is $5.22'$, indicating that the single-crystalline GaN quality is well-crystallized. The resistivity at room temperature and 250°C is measured to be $6.6 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ and $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ by variable-temperature Hall measurement, respectively.

Key words: MOCVD; GaN; resistivity

PACC: 6855; 6865; 7360F

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0091-03

参考文献

- [1] Tompson R, Prunty R, Kaper V, et al. Performance of the Al-GaN HEMT structure with a gate extension. IEEE Trans Electron Devices, 2004, 51(2):292
- [2] Wang Xiaoliang, Hu Guoxin, Wang Junxi, et al. Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(2):121
- [3] Klein P B, Binari S C, Ikossi K, et al. Current collapse and the role of carbon in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors grown by metalorganic vapor-phase epitaxy. Appl Phys Lett, 2001, 79(21):3527
- [4] Sato M. Highly resistive CH-doped GaN grown by plasma-assisted metalorganic chemical vapor deposition. Appl Phys Lett, 1996, 68(7):935
- [5] Heikman S, Keller S, Mates T, et al. Growth and characteristics of Fe-doped GaN. J Cryst Growth, 2003, 248:513
- [6] Cao X A, Pearton S J, Dang G T, et al. Creation of high resistivity GaN by implantation of Ti, O, Fe, or Cr. J Appl Phys, 2000, 87(3):1091
- [7] Oishi T, Miura N, Suita M, et al. Highly resistive GaN layers formed by ion implantation of Zn along the C axis. J Appl Phys, 2003, 94(3):1662
- [8] Lee J H, Lee M B, Hahn S H, et al. Growth of semi-insulating GaN layer by controlling size of nucleation sites for SAW device applications. MRS Internet J Nitride Semicond Res, 2003, 8(5):1
- [9] Wickenden A E, Koleske D D, Henry R L, et al. Resistivity control in unintentionally doped GaN films grown by MOCVD. J Cryst Growth, 2004, 260:54

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60136020), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G20000683 and 2002CB311903), and the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA305304)