

Al 组分阶变势垒层 AlGaN/AlN/GaN HEMTs 的制备及性能*

马志勇 王晓亮[†] 胡国新 肖红领 王翠梅 冉军学 李建平

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术,在蓝宝石衬底上生长了 Al 组分阶变势垒层结构的 AlGaN/AlN/GaN 高电子迁移率晶体管结构材料.用三晶 X 射线衍射(TCXRD)和原子力显微镜(AFM)对材料的结构、界面特性和表面形貌进行了研究.测试结果表明该材料具有优良的晶体质量和表面形貌,GaN(0002)衍射峰的半高宽为 4.56° ,AFM $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ 扫描面积的表面均方根粗糙度为 0.159nm ;TCXRD 测试中在 AlGaN(0002)衍射峰右侧观察到 Pendellösung 条纹,表明 AlGaN 势垒层具有良好的晶体质量和高的异质结界面质量.

关键词: AlGaN/AlN/GaN; Pendellösung 条纹; 金属有机物化学气相沉积; 高电子迁移率晶体管

PACC: 6855

中图分类号: TN304.2*3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0394-04

1 引言

GaN, AlN 及其三元合金材料 AlGaN 具有禁带宽度大、击穿电场高、电子饱和漂移速度高、抗辐射能力强和良好的化学稳定性等优异特性;而且, GaN 可以与 AlGaN 构成异质结,其异质界面上大的能带带阶及压电极化和自发极化可产生高浓度的二维电子气(2DEG),电子气浓度比 GaAs 异质结提高了一个数量级.因此, GaN 基材料是制备高温、高频、大功率电子器件的理想材料^[1,2].高 Al 组分势垒层 AlGaN/GaN 异质结构是一种极具潜力的 AlGaN/GaN HEMT 结构^[3,4],随着势垒层 Al 组分增加,异质结带阶和极化电场增大,使二维电子气浓度显著提高.中国科学院半导体研究所采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术,在蓝宝石衬底上生长的 Al 组分为 0.45 的 $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT 结构材料^[3],室温二维电子气浓度达到 $1.66\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$,相应电子迁移率为 $1346\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$.但是, Al 组分很高时,大的晶格失配容易导致 AlGaN 势垒层的晶体质量变差,应变诱生的缺陷增多,同时 AlGaN 表面和界面质量下降.

本文采用 Al 组分阶变势垒层结构和 MOCVD 技术,生长出了高质量 AlGaN/AlN/GaN HEMT

结构材料,通过三晶 X 射线衍射(TCXRD)和原子力显微镜(AFM)测试对 Al 组分阶变势垒层 AlGaN/AlN/GaN HEMT 材料的结构、界面特性和表面形貌进行了研究,结果表明获得了高性能的 AlGaN/AlN/GaN HEMT 结构材料.

2 实验

Al 组分阶变势垒层 AlGaN/AlN/GaN HEMT 结构材料是在单面抛光的(0001)面蓝宝石衬底上用 MOCVD 技术生长的,三甲基镓(TMA)、三甲基铝(TMAl)和氨气(NH_3)分别作为 Ga 源、Al 源和 N 源, N_2 和 H_2 作为载气,生长前衬底首先在 1000°C 和 H_2 气氛下进行烘烤,除去表面吸附杂质.所生长的材料结构如图 1 所示,首先在 500°C 生长 20nm 厚的低温 GaN 成核层,然后在 1050°C 生长了 $3\mu\text{m}$ 厚的非故意掺杂的高阻 GaN 层和 100nm 厚的高迁移率 GaN 沟道层,接着生长了 1nm 厚的 AlN 层,最后在 1000°C 生长了 25nm 厚的非故意掺杂 Al 组分阶变 AlGaN 势垒层. Al 组分阶变 AlGaN 势垒层包括 5nm 厚的 $\text{Al}_{0.50}\text{Ga}_{0.50}\text{N}$, 10nm 厚的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{N}$ 和 10nm 厚的 $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$.霍尔测试表明,所生长材料的室温二维电子气迁移率在 $1600\sim 1800\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 之间,电子浓度大于 $1.0\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$.

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KG CX2-SW-107-1),国家自然科学基金(批准号:60606002)以及国家重点基础研究发展规划(批准号:2002CB311903,2006CB604905,513270605)资助项目

[†] 通信作者. Email: xlwang@red.semi.ac.cn

2006-11-22 收到,2006-12-27 定稿

Al _{0.20} Ga _{0.80} N layer
Al _{0.35} Ga _{0.65} N layer
Al _{0.50} Ga _{0.50} N layer
AlN interlayer
High mobility GaN layer
High resistive GaN layer
GaN nucleation layer
Sapphire substrate

图 1 Al 组分阶变势垒层 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the AlGaIn/AlN/GaN HEMT structure

用日本 Rigaku SLX-1AL 型 X 射线衍射仪对 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 结构材料进行了 TCXRD 测试;采用 Digital Instrument Nanoscope IV 型扫描探针显微镜,对 AlGaIn 表面进行了 AFM 测试.

3 结果与讨论

图 2(a)为 Al 组分阶变势垒层 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 结构材料 TCXRD $\omega/2\theta$ 扫描曲线,图

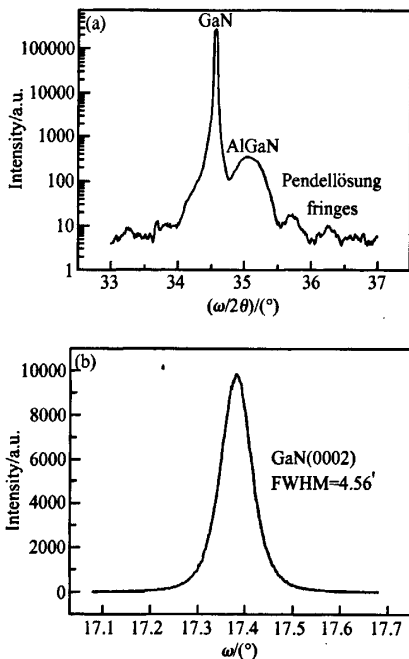


图 2 Al 组分阶变势垒层 HEMT 结构 TCXRD 图 (a) $\omega/2\theta$ 扫描曲线;(b) 同一样品的 GaN (0002) X 射线摇摆曲线
Fig.2 TCXRD results of the HEMT structure with compositionally step-graded AlGaIn barrier layer (a) $\omega/2\theta$ scanning curve;(b) X-ray rocking curve for GaN (0002) of the same sample

中两个清晰的高强度的衍射峰从左向右分别对应 GaN(0002)和 AlGaIn(0002)衍射峰.X 射线摇摆曲线半高宽是表征材料结晶质量的重要参数,图 2(b)为同一样品 GaN(0002)衍射峰的 TCXRD 摇摆曲线测试结果,从图中可以看出,GaN(0002)衍射峰的半高宽为 4.56',表明 GaN 外延层具有较好的晶体质量.

由图 2(a)还可以看出,在 AlGaIn(0002)衍射峰右侧存在着等间距排列的 Pendellösung 条纹,又叫厚度条纹.根据 X 射线衍射动力学理论,Pendellösung 条纹是晶体完整性和界面平整度的一种标志^[5],这种条纹只在晶体完整性和界面质量相当好,外延层厚度均匀时才出现.本实验观测到 AlGaIn(0002)衍射峰的 Pendellösung 条纹,从另一方面证实了 AlGaIn 势垒层具有良好的晶体质量和高的异质结界面质量.

利用 Pendellösung 条纹间距,可得到 AlGaIn 势垒层的厚度,外延层厚度 t 和条纹周期 $\Delta\theta$ 的关系如下:

$$t = \lambda \sin \epsilon / \Delta \theta \sin 2 \theta \quad (1)$$

其中 λ 为 X 射线的波长; ϵ 为衍射束和样品表面的夹角; θ 为晶体 AlGaIn(0002)面的布拉格衍射角.采用对称(0002)衍射,则 $\sin \epsilon = \sin \theta$,因此(1)式可简化为:

$$t = \lambda / 2 \Delta \theta \cos \theta \quad (2)$$

由(2)式,根据条纹周期和布拉格衍射角,得到的 AlGaIn 势垒层厚度为 22nm,我们根据生长速率推测的 AlGaIn 势垒层厚度为 25nm,表明测试结果与生长设计的结果吻合较好.

图 3(a)给出了 Al 组分阶变势垒层 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 结构材料的 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ AFM 表面形貌图,图 3(b)给出了相同条件下生长的 Al 组分为 0.50 的传统高 Al 组分 HEMT 结构材料表面形貌图.从图中可以看出,采用 Al 组分阶变势垒层结构,Al 组分由异质结界面处向表面阶变,减少了晶格失配,使由于晶格失配而引起的外延膜晶格畸变大为减少,因而样品表面形貌非常平整,原子台阶清晰,AFM $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 扫描面积的表面均方根粗糙度为 0.189nm.而相同条件下生长的 Al 组分为 0.50 的传统高 Al 组分 HEMT 结构材料,有非常多的细小短线比较均匀的分布在样品表面,呈现出一种近似脑表面状的形貌^[4,6,7],还有一些浅小的孔洞分布在表面,这是由于 Al 组分较高时,大的晶格失配引起的拉应力会导致 AlGaIn 势垒层的晶体质量和表面形貌变差,AFM $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 扫描面积的表面均方根粗糙度为 0.439nm.

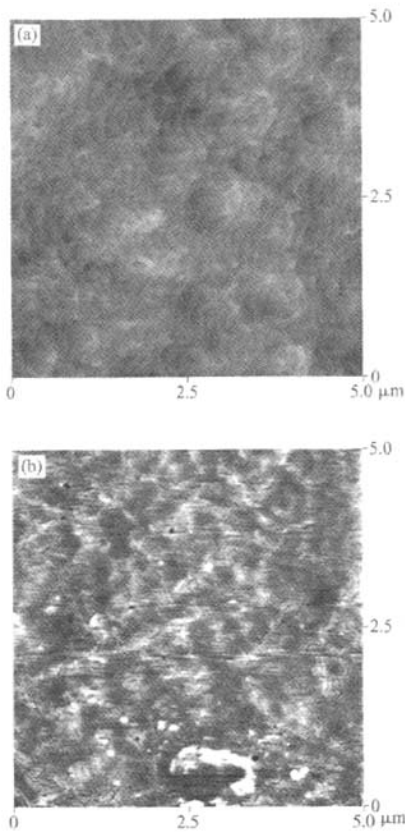


图3 表面 AFM 测试结果 (a) Al 组分阶变势垒层 HEMT 结构;(b)传统高 Al 组分 HEMT 结构

Fig.3 AFM images of the sample surface (a) Compositionally step-graded AlGaIn barrier HEMT structure;(b) Traditional high Al content HEMT structure

4 结论

采用 Al 组分阶变势垒层结构和 MOCVD 技

术,在蓝宝石衬底上生长出高质量 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 结构材料,TCXRD 测试结果表明该材料具有优良的晶体质量,GaN(0002)衍射峰的半高宽为 4.56° ,TCXRD 测试中在 AlGaIn(0002)衍射峰右侧观察到 Pendellösung 条纹,证明 AlGaIn 势垒层具有良好的晶体质量和高的异质界面质量.AFM 测试结果表明,采用 Al 组分阶变势垒层结构,较传统高 Al 组分 HEMT 结构材料,表面形貌显著提高,样品表面平整,原子台阶清晰,AFM $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 扫描面积的表面均方根粗糙度为 0.189nm .

参考文献

- [1] Asif Khan M, Bhattarai A, Kuznia J N, et al. High electron mobility transistor based on a GaN-Al_xGa_{1-x}N heterojunction. *Appl Phys Lett*, 1993, 63(9): 1214
- [2] Wang Xiaoliang, Wang Cuimei, Hu Guoxin, et al. Room temperature mobility above $2100\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ in Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN/GaN heterostructures grown on sapphire substrates by MOCVD. *Phys Status Solidi C*, 2006, 3(3): 607
- [3] Wang Cuimei, Wang Xiaoliang, Hu Guoxin, et al. Influence of AlN interfacial layer on electrical properties of high-Al content Al_{0.45}Ga_{0.55}N/GaN HEMT structure. *Appl Surf Sci*, 2006
- [4] Wang Cuimei, Wang Xiaoliang, Hu Guoxin, et al. Influence of Al content on electrical and structural properties of Si-doped Al_xGa_{1-x}N/GaN HEMT structures. *Phys Status Solidi C*, 2006, 3: 486
- [5] Halliwell M A G. Practical interpretation of X-ray rocking curves from semiconductor heteroepitaxial layers. *Appl Phys A*, 1994, 58: 135
- [6] Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H, et al. Characterization of different-Al-content Al_xGa_{1-x}N/GaN heterostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire. *J Vav Sci Technol B*, 2003, 21(2): 888
- [7] Miyoshi M, Egawa T, Ishikawa H. Structural characterization of strained AlGaIn layers in different Al content AlGaIn/GaN heterostructures and its effect on two-dimensional electron transport properties. *J Vav Sci Technol B*, 2005, 23(4): 1527

Preparation and Properties of AlGaN/AlN/GaN HEMTs with Compositionally Step-Graded AlGaN Barrier Layer*

Ma Zhiyong, Wang Xiaoliang[†], Hu Guoxin, Xiao Hongling, Wang Cuimei,
Ran Junxue, and Li Jianping

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

Abstract: AlGaN/AlN/GaN high electron mobility transistor (HEMT) structures with compositionally step-graded AlGaN barrier layer were grown on sapphire substrates by metalorganic chemical vapor deposition. High crystal quality and good surface morphology of the HEMT structures are confirmed by triple-crystal X-ray diffraction (TCXRD) and atomic force microscopy (AFM) measurements. The full width at half maximum of the GaN (0002) peak is $4.56'$ from the rocking curve. AFM measurements reveal a smooth AlGaN surface with a root-mean-square roughness of 0.159nm for a scan area of $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$. Pendellösung fringes are observed beside AlGaN(0002) diffraction peaks, indicating good crystalline quality and a coherent interface.

Key words, AlGaN/AlN/GaN; Pendellösung fringes; MOCVD; HEMT

PACC: 6855

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0394-04

* Project supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KGCX2-SW-107-1), the National Natural Science Foundation of China (No. 60606002), and the State Key Development Program for Basic Research of China (Nos. 2002CB311903, 2006CB604905, 513270505)

[†] Corresponding author. Email: xlwang@red.semi.ac.cn

Received 22 November 2006, revised manuscript received 27 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics