

RF-MBE 生长 AlN/GaN 超晶格结构 二维电子气材料*

胡国新 王晓亮 孙殿照 王军喜 刘宏新 刘成海 曾一平 李晋闽 林兰英

(中国科学院半导体研究所 材料中心, 北京 100083)

摘要: 用射频等离子体辅助分子束外延技术(RF-MBE)在 *c* 面蓝宝石衬底上外延了高质量的 GaN 膜以及 AlN/GaN 超晶格结构极化感应二维电子气材料. 所获得的掺 Si 的 GaN 膜室温电子浓度为 $2.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 相应的电子迁移率为 $221 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; $1 \mu\text{m}$ 厚的 GaN 外延膜的(0002)X 射线衍射摇摆曲线半高宽(FWHM)为 7° ; 极化感应产生的二维电子气室温电子迁移率达到 $1086 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 相应的二维电子气面密度为 $7.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$.

关键词: RF-MBE; 二维电子气; HFET; AlGaIn/GaN

EEACC: 0520D; 2560S; 2520X; 2810F; 2530

中图分类号: TN304.2³

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)06-0602-04

1 引言

GaN、AlN 及其三元合金材料 AlGaIn 具有禁带宽、电子漂移速度高、击穿电场强、热导率高、不易热分解、耐腐蚀、抗辐照等特点, 是制作高温、大功率、高频电子器件的理想材料^[1]. GaN 基高温电子器件不需或只需很少冷却装置, 仅此一点就可以大大减少电子装备的体积和重量, 因此可广泛应用于汽车、坦克、航空航天、石油钻探、核反应监控、雷达等方面. 目前 AlGaIn/GaN 二维电子气材料的室温电子迁移率达 $1500 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ (在蓝宝石衬底上外延)^[2] 和 $2000 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ (在 SiC 衬底上外延), 相应的电子气面密度在 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 左右^[3]. 如果在蓝宝石衬底上先用 MOVPE 法生长一层 GaN, 再在其上用 RF-MBE 法生长 AlGaIn/GaN 二维电子气结构, 可以得到更好的结果^[4]. 目前 AlGaIn/GaN HFET 器件的室温跨导高达 400mS/mm (栅长为 $1.2 \mu\text{m}$)^[5]; 截止频率达 50GHz , 最高振荡频率达近 97GHz (栅长为 $0.28 \mu\text{m}$)^[2].

我们以前曾报道过使用 NH_3 -MBE 技术在 *c* 面蓝宝石上外延高质量的 GaN 材料^[6,7]; 也曾经报道用 RF-MBE 技术在 *c* 面蓝宝石上外延高质量的 AlGaIn/GaN 二维电子气结构材料^[8], AlGaIn/GaN 极化感应二维电子气材料室温电子迁移率达 $730 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 相应的电子气面密度为 $7.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$. 用此材料成功制备出了 HFET 器件, 其室温最大跨导达 50mS/mm (栅长 $1 \mu\text{m}$); 特征频率达 13.25GHz (栅长 $0.5 \mu\text{m}$, 栅宽 $20 \mu\text{m}$). 器件在 300°C 高温下仍有直流特性, 但是器件的漏电流有明显的增加. 本文报道使用等离子体辅助分子束外延技术(RF-MBE)在 *c* 面蓝宝石衬底上外延生长高质量的 GaN 以及 AlN/GaN 超晶格结构二维电子气材料的结果. 由于 AlN/GaN 超晶格结构系统具有大的导带不连续性和很强的极化效应, 可以在界面产生出高浓度的二维电子气, 理论值超过 10^{13}cm^{-2} , 并且可以降低由于掺 Si 所引入的电离杂质散射, 提高二维电子气的迁移率. 所以我们采用 AlN/GaN 超晶格结构. 试验结果表明, 极化感应所产生的二维电子气室温电子迁移率进一步提高到 $1086 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 相应的二维

* 中国科学院、国家自然科学基金(批准号: 60136020)和国家重点基础研究发展规划(No. G20000683)资助项目

胡国新 男, 1975 年出生, 研究实习员, 目前从事氮化物材料和相关器件的研究工作.

王晓亮 男, 1963 年出生, 博士, 研究员, 博士生导师, 目前从事氮化物材料和相关器件的研究工作.

2002-07-18 收到, 2002-12-24 定稿

©2003 中国电子学会

电子气面密度为 $7.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$, 为进一步制作性能优异的器件打下了良好的基础.

2 实验

外延设备是用国产分子束外延设备改装的. 氮分子束来源于氮气的射频等离子体炉 (SVTA RF2.75), 使用 6N 纯度的高纯氮气; 高纯镓和铝分别作为镓和铝的分子束源材料. 使用 c 面蓝宝石作衬底, 生长前衬底先在 NH_3 气氛中约 800°C 氮化 0.5h, 然后开始生长, 生长温度为 750°C . 生长一层厚度约为 8nm 的 AlN 层后, 再接着长 GaN 和 AlN/GaN 层. GaN 层的生长速率约为 $0.2 \mu\text{m}/\text{h}$. 外延时的氮气流量为 1.6sccm, 等离子体输出功率为 400W. 外延生长时反射高能电子衍射 (RHEED) 呈现如图 1 的 2×2 再构图形. 在 $[\bar{1}120]$ 方位同样可观察到类似图案, 表明了 GaN 膜的 2×2 再构表面. GaN 外延膜厚度为 $1.6 \mu\text{m}$ 左右; AlN/GaN 超晶格结构是在 $1.6 \mu\text{m}$ GaN 层基础上外延的, 其结构如图 2 所示, 其中 AlN 层厚度为 1.2nm, GaN 层厚度为 6nm, GaN 层和 AlN 层均为非有意掺杂.



图 1 GaN 膜生长时沿 $[\bar{1}120]$ 方位的 RHEED 图形
Fig. 1 RHEED pattern of GaN thin film along $[\bar{1}120]$ azimuth



图 2 AlN/GaN 超晶格二维电子气材料结构
Fig. 2 Schematic structure of AlN/GaN superlattice two-dimensional electron gas structure

3 结果与讨论

3.1 GaN 外延膜

GaN 外延膜的电学性质用 Van de Pauw-Hall 测量表征, 磁场强度为 0.2T, 使用钢做欧姆电极. 厚度约为 $1 \mu\text{m}$ 的 GaN:Si 外延膜的室温电子迁移率为 $221 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 电子浓度为 $2.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$. GaN 膜 (0002) X 射线衍射摇摆曲线半高宽为 $7'$, 如图 3 所示, 表明外延膜具有较好的质量. 图 1 所示为 $[\bar{1}10\bar{1}0]$ 方向上看到的 2×2 再构表面图形, 样品旋转 30° 后, 在 $[\bar{1}120]$ 方向上仍可看到 2×2 再构图形, 表示该材料为镓面极性材料. 相对于 N 面极性, Ga 面极性适合于制作器件结构, 可以得到更好的结果.

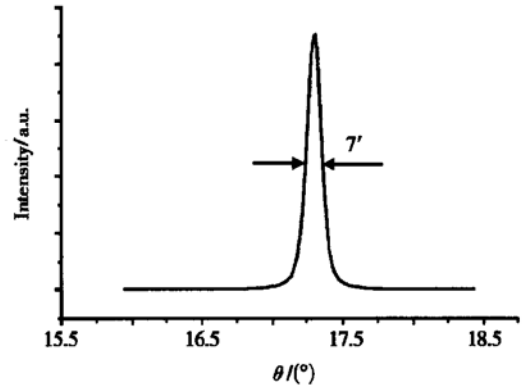


图 3 蓝宝石衬底上 $1 \mu\text{m}$ 厚外延膜 GaN (0002) 峰双晶 X 射线衍射摇摆曲线

Fig. 3 XRD pattern of $1 \mu\text{m}$ thick GaN film grown on sapphire

3.2 AlN/GaN 二维电子气材料

同样用变温 Van de Pauw-Hall 测量方法测量了 AlN/GaN 超晶格二维电子气结构材料的电子迁移率和电子浓度随样品温度的变化, 结果如图 4 所示. 其中, 较低的一条曲线为电子迁移率和温度的关系, 可见随着温度降低, 电子迁移率增加; 而较高的曲线, 即二维电子气的面密度和温度关系则显示, 到了某一温度后面密度几乎不随温度降低而改变, 这些是典型的二维电子气特征. 所获得的 AlN/GaN 二维电子气材料的室温电子迁移率为 $1086 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 相应的二维电子气的面密度为 $7.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$; 低温 77K 时的相应值分别为 $2243 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $7.3 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$. 与调制掺杂结构不同, 该异质结中的 AlN 层是非掺杂的, 这里的二维电子气是由

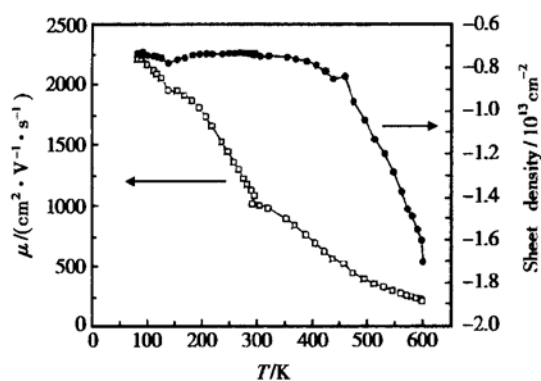


图 4 AlN/GaN 超晶格结构二维电子气迁移率和面密度随温度的变化

Fig. 4 Temperature dependence of mobility and sheet density of AlN/GaN superlattice

AlN/GaN 层的极化感应产生的. GaN 基材料极化包括自发极化与应变极化, 极化效果是两者的总和. 在该异质结构中, AlN 层受到张应变^[2], 其极化方向垂直于异质结界面并取决于 AlN 晶体取向, 产生的极化电场会吸引电子到该异质结界面处并形成二维电子气. 由于 GaN/AlN 体系的极化效应较强, 因此产生了高浓度的二维电子气. 在该异质结外延过程中观察到的高能电子衍射也是 2×2 图形, 由此判断外延的 GaN(AlN) 都是 Ga(Al) 面结构^[9].

4 结论

使用 RF-MBE 技术在 c 面蓝宝石衬底上生长出了高质量的 GaN 膜以及 AlN/GaN 极化感应二维电子气材料. GaN:Si 膜室温电子迁移率为 221cm²/(V·s), 电子浓度为 2.2×10¹⁸cm⁻³; GaN(0002) 峰 X 射线摇摆曲线半高宽为 7'. AlN/GaN 极化感应二维电子气材料室温电子迁移率达 1086cm²/(V·s), 相应的电子气面密度为 7.5×10¹²cm⁻².

致谢 感谢中国科学院半导体研究所王万年、王玉田及清华大学苗伟老师为此材料所作的测试.

参考文献

[1] Strite S, Morkoc H. GaN, AlN, and InN: A review. J Vac Sci Technol, 1992, B10(4): 1237

[2] Murphy M J, et al. High-frequency AlGaIn/GaN polarization-induced high electron mobility transistors grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. Appl Phys Lett, 1999, 75: 3653

[3] Gaska R, et al. Electron mobility in modulation-doped AlGaIn/GaN/GaN heterostructures. Appl Phys Lett, 1999, 74: 287

[4] Elsass C R, et al. High mobility two-dimensional electron gas in AlGaIn/GaN heterostructures grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy. Appl Phys Lett, 1999, 74: 3528

[5] Chen Ching Hui, et al. High-transconductance self-aligned AlGaIn/GaN modulation-doped field-effect transistors with regrown ohmic contacts. Appl Phys Lett, 1999, 73: 3147

[6] Sun Dianzhao, Wang Xiaoliang, Wang Junxi, et al. High quality GaN grown by GSMBE. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(7): 723(in Chinese) [孙殿照, 王晓亮, 王军喜, 等. GSMBE 生长的高质量氮化镓材料. 半导体学报, 2000, 21(7): 723]

[7] Sun Dianzhao, Liu Hongxin, Wang Junxi, et al. GaN 2DEG structure grown by NH₃-MBE. Chinese Journal of Functional Materials and Devices, 2000, 6(4): 350(in Chinese) [孙殿照, 刘宏新, 王军喜, 等. NH₃-MBE 生长极化场二维电子气材料. 功能材料与器件学报, 2000, 6(4): 350]

[8] Hu Guoxin, Sun Dianzhao, Wang Xiaoliang, et al. AlGaIn/GaN 2DEG structure grown by RF-MBE. Chinese Journal of Materials Science and Technology, 2001, 9(3): 316(in Chinese) [胡国新, 孙殿照, 王晓亮, 等. RF-MBE 生长 AlGaIn/GaN 二维电子器材料. 材料科学与工艺, 2001, 9(3): 316]

[9] Smith A R, et al. Determination of wurtzite GaN lattice polarity based on surface reconstruction. Appl Phys Lett, 1998, 72: 2114

Two-Dimensional Electron Gas Materials with AlN/GaN Superlattice Structure Grown by Radio-Frequency Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy*

Hu Guoxin, Wang Xiaoliang, Sun Dianzhao, Wang Junxi, Liu Hongxin, Liu Chenghai
Zeng Yiping, Li Jinmin and Lin Lanying

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

Abstract: High-quality GaN films and AlN/GaN polarization-induced two-dimensional electron gas (2DEG) materials are grown on (0001) sapphire substrates by radio-frequency plasma-assisted molecular beam epitaxy (RF-MBE). Electron mobility and electron concentration of the grown GaN film doped with Si at room temperature are $221\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ and $2.2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, respectively. The full width at half maximum (FWHM) of GaN (0002) X-ray rocking curve of the GaN film is 7° . Electron mobility of the 2DEG materials with AlN/GaN superlattice structure at room-temperature is $1086\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ at a sheet electron concentration of $7.5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$.

Key words: RF-MBE; 2DEG; HFET; AlGaIn/GaN

EEACC: 0520D; 2560S; 2520X; 2810F; 2530

Article ID: 0253-4177(2003)06-0602-04

* Project supported by The Chinese Academy of Sciences, National Natural Science Foundation of China(No. 60136020) and the Special Funds for Major State Basic Research Project(No. G20000683)

Hu Guoxin male, was born in 1975. His current research interests are in GaN-based materials and devices.

Wang Xiaoliang male, was born in 1963, professor. His current research interests are in GaN-based materials and devices.

Received 18 July 2002, revised manuscript received 24 December 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics