

# 基于蓝宝石衬底的高性能 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 二维 电子气材料与 HEMT 器件\*

张进城 郝 跃 王 冲 王峰祥

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

**摘要:** 利用低压 MOCVD 技术在蓝宝石衬底上生长了高性能的 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 二维电子气(2DEG)材料, 室温和 77K 温度下的电子迁移率分别为 946 和 2578 cm<sup>2</sup>/(V·s), 室温和 77K 温度下 2DEG 面密度分别为 1.3×10<sup>13</sup> 和 1.27×10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup>. 并利用 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 二维电子气材料制造出了高性能的 HEMT 器件, 栅长为 1 μm, 源漏间距为 4 μm, 最大电流密度为 485 mA/mm (V<sub>GS</sub> = 1V), 最大非本征跨导为 170 mS/mm (V<sub>GS</sub> = 0V), 截止频率和最高振荡频率分别为 6.7 和 24 GHz.

**关键词:** MOCVD; AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>; 二维电子气; HEMT

**EEACC:** 0520F; 2530B; 2560S

**中图分类号:** TN304.2'3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2004)10-1281-04

## 1 引言

由于 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 异质结材料具有一系列出色的材料特性, 所以基于 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 异质结材料制备的高电子迁移率晶体管(HEMT)能够获得很高的射频功率. Ga<sub>N</sub> 和 AlGa<sub>N</sub> 具有高击穿场强(~ 3×10<sup>6</sup> V/cm), 所以 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 器件可以承受比 AlGaAs/GaAs HEMT 更高的漏极偏置电压. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 异质结界面存在大的导带断续和强的形变诱导压电极化效应, 从而引起薄层载流子密度高于 1×10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup> 的二维电子气(2DEG)的存在. 这远高于 AlGaAs/GaAs 异质结界面形成的 2DEG 密度, 同时 Ga<sub>N</sub> 具有高的饱和电子漂移速度(~ 2×10<sup>7</sup> cm/s). 这些出色的电学特性使得 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 异质结二维电子气材料成为制备高性能微波功率 HEMT 器件的理想材料.

高性能 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 异质结二维电子气材料的生长是高性能 HEMT 器件制造的关键. 目前 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 二维电子气材料大多是利用 MOCVD 或

MBE 技术在蓝宝石或 SiC 衬底上异质外延得到的. 通常, 基于蓝宝石衬底的 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 二维电子气材料的室温电子迁移率在 1000~ 1500 cm<sup>2</sup>/(V·s), 2DEG 薄层载流子浓度为 0.7~ 1.5×10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup>. 具有出色微波功率特性的 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 器件也已经获得了大量的实验验证. Khan 等人<sup>[1]</sup>报道了目前最为出色的微波特性, 0.12 μm 栅长的 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 器件, 截止频率  $f_T$  和最高振荡频率  $f_{max}$  分别达到了 121 和 162 GHz.

本文利用自主开发的低压 MOCVD 设备生长获得了高性能的 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 异质结二维电子气材料, 并在此基础上制备出了性能较高的 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 器件.

## 2 材料结构与生长

AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 二维电子气材料生长设备是自主开发的立式低压 MOCVD 设备. 反应室为 50 mm 冷壁石英玻璃反应室, 采用射频感应加热, 全自动生长

\* 国家重点基础研究发展规划和国防预先研究基金(编号: 41308060106)资助项目

张进城 男, 讲师, 博士研究生, 目前从事 Ga<sub>N</sub> 基半导体材料和器件研究.

郝 跃 男, 教授, 博士生导师, 长期从事半导体器件可靠性和宽禁带半导体技术研究.

2003-10-09 收到, 2003-12-06 定稿

控制. TEGa, TMAI 和  $\text{NH}_3$  分别作为 Ga 源, Al 源和 N 源,  $\text{H}_2$  作为载气, 生长压力为  $5.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ . 生长温度的精确控制是材料生长的关键, 采用热耦和红外测温仪两种方法结合测量温度, 并通过温控器实现生长温度的闭环控制, 控制精度可以达到  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

生长采用的 AlGaIn/GaN 二维电子气材料结构截面图如图 1 所示. 使用 C 面单面抛光蓝宝石基片作衬底. 衬底基片装入反应室前, 首先利用有机溶剂超声清洗 5min, 然后利用煮沸的  $3\text{H}_2\text{SO}_4 : 1\text{H}_3\text{PO}_4$  的混合溶液处理 10min, 用去离子水漂洗基片三次, 最后用高纯  $\text{N}_2$  吹干.



图 1 AlGaIn/GaN 结构的截面图

Fig. 1 Cross section of AlGaIn/GaN structure

蓝宝石基片装入反应室后, (1) 在  $950^\circ\text{C}$  下  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2$  混合气氛中对蓝宝石基片进行高温预处理 10min; (2) 降温到  $520^\circ\text{C}$  生长厚度约为 30nm 的 GaN 成核层; (3) 升温至  $920^\circ\text{C}$  生长厚度约为  $1\mu\text{m}$  的 GaN 层; (4)  $920^\circ\text{C}$  退火 3min; (5)  $920^\circ\text{C}$  依次生长 8nm 厚未掺杂 AlGaIn 层和 16nm 厚 Si 掺杂 AlGaIn 层, 其中 Si 掺杂浓度约为  $1 \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . 利用透射谱测量得到的 AlGaIn 层的 Al 组分为 27%.

利用汞探针和 Keithley 高频测试仪对 AlGaIn/GaN 二维电子气材料进行了室温 100kHz 高频  $C-V$  测量. 根据  $C-V$  曲线计算得到了 AlGaIn/GaN 结构中由 AlGaIn 表面向里垂直方向上载流子浓度的深度分布图. 如图 2 所示, AlGaIn/GaN 界面存在明显的二维电子气, 电子浓度峰值位于表面下 24.6nm 处, AlGaIn/GaN 物理界面应位于表面下约 24nm 处, 即二维电子气主要位于 AlGaIn/GaN 界面 GaN 一侧. 汞探针方法无法得到图 2 曲线左侧更靠近表面处的载流子分布. 假设 2DEG 的电子浓度分布是对称的, 可以得到该 2DEG 分布的半高宽(FWHM) 为 1.28nm. 由于通常 2DEG 中靠近 AlGaIn/GaN 界面一侧的电子浓度分布更为陡峭, 因此实际的半高宽略小于 1.28nm. 2DEG 中电子浓度峰值为  $2.27 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .  $C-V$  测量结果已经证实了高性能 Al-

GaN/GaN 二维电子气材料的获得. 同时, 通过  $C-V$  测量确定的本底 GaN 层的背景载流子浓度为  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  (对应表面下 200nm 处).

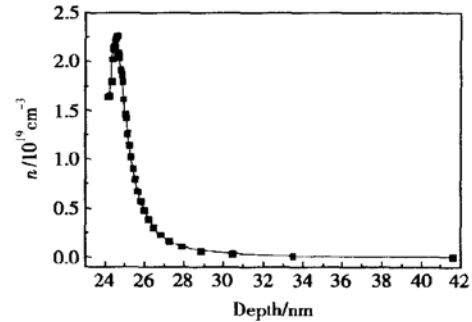


图 2  $C-V$  测量得到的 AlGaIn/GaN 结构中载流子浓度的深度分布

Fig. 2 Calculated carrier density profile in  $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.72}\text{N}/\text{GaN}$  hetero-structure from  $C-V$  measurement

AlGaIn/GaN 二维电子气样品的变温 Hall 效应测量结果如图 3 所示. Hall 效应测量显示, 室温和 77K 下该材料的电子迁移率  $\mu$  分别为 946 和  $2578 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , 室温和 77K 下 2DEG 面密度  $n_s$  分别为  $1.3 \times 10^{13}$  和  $1.27 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . 相应地, 室温和 77K 下 2DEG 迁移率与面密度的乘积  $\mu n_s$  分别为  $1.23 \times 10^{16}$  和  $3.27 \times 10^{16}/(\text{V} \cdot \text{s})$ . 室温下乘积  $\mu n_s$  高于  $1 \times 10^{16}/(\text{V} \cdot \text{s})$ , 这已经是比较好的结果. 低温 77K 下 2DEG 迁移率很高, 达到  $2578 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , 表明 AlGaIn/GaN 异质界面和材料的整体质量都很不错.

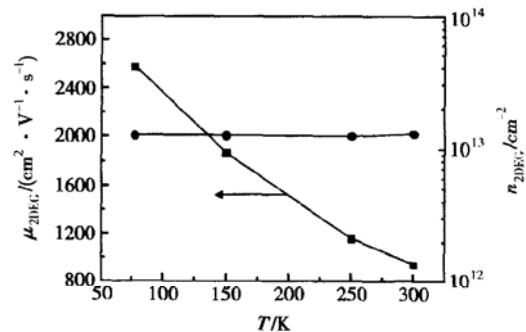


图 3 2DEG 迁移率和面密度随温度的变化

Fig. 3 Electron mobility and sheet carrier density in the 2DEG as a function of temperature

AlGaIn/GaN 异质界面二维电子气浓度与极

化效应和 AlGaIn 层的掺杂浓度有关, 假设室温下 AlGaIn 层中的 Si 杂质完全电离并全部转移到 Al-GaN/GaN 界面的 2DEG 中, 那么 16nm 厚 Si 掺杂 AlGaIn 层(Si 掺杂浓度约为  $1\sim 2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ) 可提供的 2DEG 密度为  $1.6\sim 3.2\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ , 而测量得到室温 2DEG 密度为  $1.3\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ , 显然, Si 掺杂 AlGaIn 层对 2DEG 的贡献比较小, 2DEG 主要来源于极化效应。

从图 3 还可以看出, 2DEG 面密度基本不随温度变化, 77K 温度下 2DEG 面密度只略小于室温下数值, 这主要是因为极化效应随温度的下降变化不大, 所以极化产生的 2DEG 保持稳定; 同时随着温度的降低, AlGaIn 和 GaN 的禁带宽度增大, Al-GaN/GaN 界面的导带断续增大, 导带断续增大引起的 2DEG 增加基本抵消了 Si 掺杂 AlGaIn 层中 Si 杂质电离率降低引起的 2DEG 减少, 从而使得 2DEG 浓度在 77K 到室温之间保持稳定。

### 3 HEMT 器件制备与特性

利用生长得到的 AlGaIn/GaN 二维电子气材料制备出了 AlGaIn/GaN HEMT 器件. 反应离子刻蚀 (RIE) 形成管芯台面, 源和漏欧姆接触使用 Ti/Al/Ti/Au 电极, 栅肖特基接触采用 Pt/Au 电极. 器件栅长  $L_G$  为  $1\mu\text{m}$ , 源漏间距  $L_{SD}$  为  $4\mu\text{m}$ , 栅极处于源漏正中间, 器件栅宽  $W_G$  为  $20\mu\text{m}$ . 利用 HP4156B 测量了室温下该 HEMT 器件的直流特性, 利用微波探针台和网络分析仪测量了该器件的微波特性。

图 4 和图 5 分别给出了 AlGaIn/GaN HEMT 器件的典型直流输出特性曲线和转移特性曲线. 从图 4 可看出, 输出特性曲线在饱和区没有出现负阻现象, 且关断特性很好.  $V_G=1\text{V}$  时最大饱和漏电流为  $485\text{mA}/\text{mm}$ , 表明该器件已经具有出色的电流处理能力. 从图 5 可以看出, 器件的阈值电压为  $-2.8\text{V}$ , 跨导最大值为  $170\text{mS}/\text{mm}$  ( $V_G=0\text{V}$ ). 使用网络分析仪测量了该 HEMT 器件的高频特性, 如图 6 所示, 截止频率  $f_T$  和最高振荡频率  $f_{\text{max}}$  分别为  $6.7$  和  $24\text{GHz}$ .

上述器件测量结果已经表明该 HEMT 器件具有出色的直流特性, 高频特性主要是截止频率偏小. Ping 等人<sup>[2]</sup>报道的栅长  $1\mu\text{m}$  源漏间距  $3\mu\text{m}$  同类器件的截止频率为  $15\text{GHz}$ . Wu 等人<sup>[3]</sup>报道的栅长  $1\mu\text{m}$  源漏间距  $4\mu\text{m}$  同类器件的截止频率为  $6\text{GHz}$ .

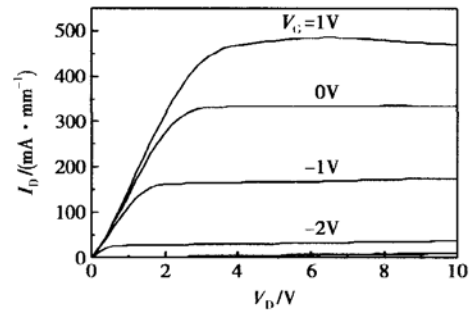


图 4 AlGaIn/GaN HEMT 器件的典型直流输出特性曲线  
Fig. 4 Typical DC output characteristics of AlGaIn/GaN HEMT s

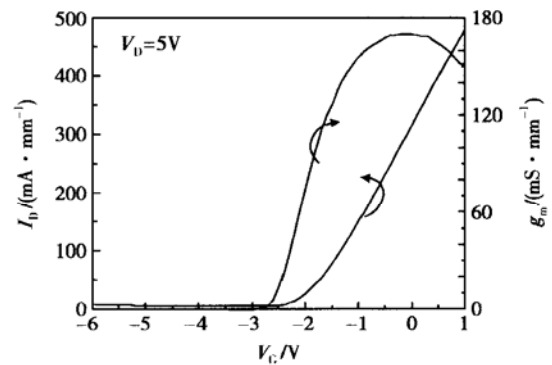


图 5 AlGaIn/GaN HEMT 器件的典型直流转移特性曲线  
Fig. 5 Typical DC transfer characteristics of AlGaIn/GaN HEMT s

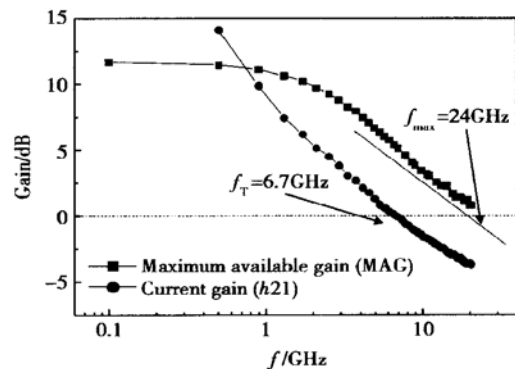


图 6 AlGaIn/GaN HEMT 器件的微波特性  
Fig. 6 Microwave characteristics of AlGaIn/GaN HEMT s

造成截止频率偏小的主要原因是, 该器件的源漏串联电阻过大和源漏间距偏大. 利用传输线模型 (TLM) 测量得到该器件的源漏欧姆接触电阻为  $2.92\Omega\cdot\text{mm}$ , 国际上通常的源漏欧姆接触电阻一般

在  $0.3 \sim 1.0 \Omega \cdot \text{mm}^{[4]}$ . 考虑源漏串联电阻对跨导的影响, 估算出本征跨导为  $403 \text{mS/mm}$ . 由于欧姆接触电阻偏大引起了外部跨导远小于本征跨导, 所以通过降低欧姆接触电阻可以提高器件外部跨导, 从而提高器件的截止频率 ( $f_T \propto g_m$ ). 减小源漏间距也可以减小源漏串联电阻, 而且可以减小栅源寄生电容, 从而有助于提高器件的截止频率.

## 4 结论

利用低压 MOCVD 技术在蓝宝石衬底上生长了高性能的 AlGaIn/GaN 二维电子气材料, 室温和 77K 下的电子迁移率分别为  $946$  和  $2578 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , 室温和 77K 下 2DEG 面密度分别为  $1.3 \times 10^{13}$  和  $1.27 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ . 并利用该 AlGaIn/GaN 二维电子气材料制备出了高性能的 HEMT 器件, 栅长  $L_G = 1 \mu\text{m}$  和源漏间距  $L_{SD} = 4 \mu\text{m}$  的 HEMT 器件的最大电流密度为  $485 \text{mA/mm}$  ( $V_G = +1 \text{V}$ ), 最大非本征

跨导为  $170 \text{mS/mm}$  ( $V_G = 0 \text{V}$ ), 截止频率  $f_T$  和最高振荡频率  $f_{\text{max}}$  分别为  $6.7$  和  $24 \text{GHz}$ .

**致谢** 信息产业部电子 13 研究所曾庆明制备了 HEMT 器件, 在此致谢.

## 参考文献

- [ 1 ] Kumar V, Lu W, Schwindt R, et al. AlGaIn/GaN HEMTs on SiC with  $f_T$  of over 120 GHz. IEEE Electron Device Lett, 2002, 23(8): 455
- [ 2 ] Ping A T, Chen Q, Yang J W, et al. DC and microwave performance of high-current AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors grown on p-type SiC substrates. IEEE Electron Device Lett, 1998, 19(2): 54
- [ 3 ] Wu Y F, Keller B P, Keller S, et al. Measured microwave power performance of AlGaIn/GaN MODFET. IEEE Electron Device Lett, 1996, 17(9): 455
- [ 4 ] Xu Jian. AlGaIn/GaN High-electron-mobility transistors based flip-chip integrated broadband power amplifiers. The PhD Thesis of University of California, Santa Barbara, 2000

# Super AlGaIn/GaN Two-Dimensional Electron Gas Materials and HEMT Devices on Sapphire Substrates\*

Zhang Jincheng, Hao Yue, Wang Chong and Wang Fengxiang

(Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The super AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas (2DEG) material on sapphire substrate is grown by low-pressure MOCVD method. Hall measurement reveals that the mobility of  $946 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  at room temperature and sheet charge density of about  $1.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$  could be achieved. The mobility and sheet charge density at low temperature (77K) is  $2578 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  and  $1.27 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ , respectively. Based on the AlGaIn/GaN 2DEG material, a super AlGaIn/GaN HEMT is fabricated. The AlGaIn/GaN HEMT with  $L_G = 1 \mu\text{m}$  and  $L_{SD} = 4 \mu\text{m}$  exhibits the maximum drain current density of  $485 \text{mA/mm}$  ( $V_G = 1 \text{V}$ ) and the maximum extrinsic transconductance of  $170 \text{mS/mm}$  ( $V_G = 0 \text{V}$ ). Small signal measurement reveals  $f_T$  of  $6.7 \text{GHz}$  and  $f_{\text{max}}$  of  $24 \text{GHz}$ .

**Key words:** MOCVD; AlGaIn/GaN; two-dimensional electron gas; HEMT

**EEACC:** 0520F; 2530B; 2560S

**Article ID:** 0253-4177(2004)10-1281-04

\* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China and the National Defense Pre-research Fund (No. 41308060106)

Zhang Jincheng male, PhD candidate. His research interest is focused on GaN-based material and devices.

Hao Yue male, professor, PhD supervisor. His research area includes wide bandgap semiconductor, reliability of semiconductor devices, and manufacturability of IC.

Received 9 October 2003, revised manuscript received 6 December 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics