

RF-MBE 生长 AlGaN/GaN 极化感应二维电子气材料

孙殿照 胡国新 王晓亮 刘宏新 刘成海 曾一平 李晋闽 林兰英

(中国科学院半导体所材料中心, 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AlGaN/GaN极化感应二维电子气材料。所外延的GaN膜室温背景电子浓度为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 相应的电子迁移率为 $177 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; GaN(0002)X射线衍射摇摆曲线半高宽(FWHM)为 $6'$; AlGaN/GaN极化感应二维电子气材料的室温电子迁移率为 $730 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 相应的电子气面密度为 $7.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$; 用此二维电子气材料制作的异质结场效应晶体管(HFET)室温跨导达 50 mS/mm (栅长 $1\mu\text{m}$), 截止频率达 13 GHz (栅长 $0.5\mu\text{m}$)。

关键词: RF-MBE; 二维电子气; HFET; AlGaN/GaN

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

中图分类号: TN 304. 2⁺ 3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)11-1425-04

1 引言

GaN、AlN 及其三元合金材料 AlGaN 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, 因而是制作高温、大功率、高频电子器件的理想材料^[1]。高温大功率高频电子器件可应用于汽车、坦克、航空航天、石油钻探、核反应监控、雷达等方面。GaN 基高温电子器件不需或少需冷却装置, 仅此一点就可以大大减少电子装备的体积和重量。从九十年代中期开始出现 GaN 基 MESFET 电子器件, 随后出现 HEMT(或称 HFET)和 HBT 电子器件。这些电子器件所用的外延材料都是用分子束外延(MBE)或金属有机物气相外延(MOVPE)两种技术生长的。所用外延衬底通常是 C 面蓝宝石和 6H-SiC。两种外延技术所获得的 AlGaN/GaN 二维电子气材料以及相应的 HFET 器件性能相差不多。目前 AlGaN/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]或 $2000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ (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]。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 AlGaN/GaN 二维电子气结构, 可以得到更好的结果^[4]。目前 AlGaN/GaN HFET 器件的室温跨导高达约 400 mS/mm (栅长为 $1.2\mu\text{m}$)^[5]; 截止频率达 50 GHz , 最高振荡频率达近 97 GHz (栅长为 $0.28\mu\text{m}$)^[2]。功率密度和功率附加系数分别达 9.1 W/mm (10 GHz) 和 47% ^[6]。我们以前曾报道过使用 NH₃-MBE 技术在 C 面蓝宝石上外延高质量 GaN 以及 AlGaN/GaN 二维电子气材料^[7-9]。本文报道使用等离子体辅助分子束外延技术(RF-MBE)在 C 面蓝宝石上外延高质量的 GaN 以及 AlGaN/GaN 二维电子气材料的结果。

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 RF 2.75), 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。在生长前衬底先在氮气氛中约 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

孙殿照 男, 1942 年出生, 研究员, 目前从事氮化物材料及相关电子器件的研究工作。

2000-12-13 收到, 2001-01-20 定稿

©2001 中国电子学会

为8nm的AlN层后,再接着长GaN和AlGaN层。GaN层的生长速率约为 $0.3\mu\text{m}/\text{h}$ 。外延时的氮气流量为1.2sccm,等离子体输入功率为400W。外延时反射式高能电子衍射(RHEED)呈 2×2 再构图形(图1)。GaN外延膜厚度为 $1\mu\text{m}$ 左右;AlGaN/GaN二维电子气材料结构是在 $1\mu\text{m}$ GaN层上再外延一层30nm厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x=0.1$)。GaN层和AlGaN层均不有意掺杂。



图1 GaN膜生长时沿[1-100]方位的RHEED图形。在[1-20]方位同样可观察到 $2\times$ 图形,表明了GaN膜的 2×2 再构表面。

FIG. 1 GaN RHEED Pattern Along [1-100] Azimuth During Growth, Showing $2\times$ Surface Reconstruction. A $2\times$ pattern was also observed along [1-120] azimuth, indicating a 2×2 reconstruction surface of the GaN film.

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。使用铟做欧姆电极。厚度约为 $1\mu\text{m}$ 的GaN外延膜的室温电子迁移率为 $177\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,背景电子浓度为 $2\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 。图2是另一样品的变温霍耳测量结果。GaN体材料中的电子散射机构是在较高温度以晶格散射为主,在较低温度以离化杂质散射为主。随着样品温度下降,电子迁移率通常先有一个增加过程,经过一个极值后减少。而本样品,如图所示,随样品温度下降迁移率并没有明显的增加;另外,值得注意的是当温度在约100K左右以下时电子迁移率和载流子浓度不再变化。这些现象有待进一步研究。GaN(0002)X射线衍射摇摆曲线半高宽为 $6'$ (图3),表明晶体质量较好。

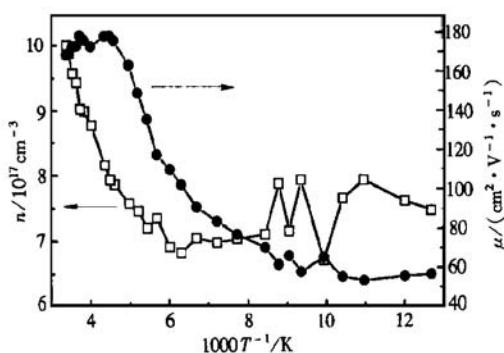


图2 C面蓝宝石上的GaN外延膜的电子迁移率和电子浓度随温度的变化。

FIG. 2 Electron Mobility and Electron Concentration vs Sample Temperature for a GaN Epilayer on (0001) Sapphire

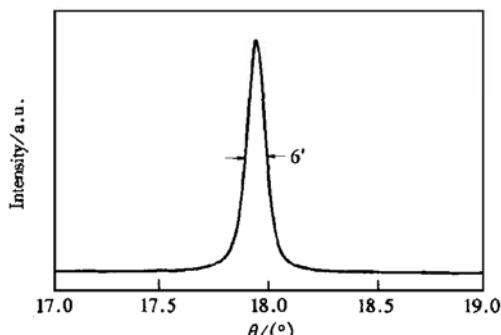


图3 GaN外延膜的X射线衍射(0002)摇摆曲线其半高宽为 $6'$ 。

FIG. 3 GaN (0002) X-Ray Rocking Curve with FWHM of 6 arcmin for a GaN Epilayer Grown on (0001) Sapphire.

3.2 AlGaN/GaN 二维电子气材料

同样用变温Van de Pauw-Hall测量方法测量了该材料的电子迁移率和电子浓度随样品温度的变化,显示了二维电子气迁移率随温度变化的特性(图4)。即随着温度降低,电子迁移率增加到某一温度后迁移率几乎不随温度改变。所获得的AlGaN/GaN二维电子气材料的最高室温电子迁移率为 $730\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,相应的二维电子气的面密度为 $7.6\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$;低温77K时的相应值分别为 $1200\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 和 $7.1\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 。与调制掺杂结构不同,该异质结中的AlGaN层是非有意掺杂的,这里的二维电子气不是由AlGaN层杂质提供的,而是由于AlGaN层的极化产生的。镓氮基材料极化包括自发极化与

应变极化。在该异质结构中, AlGaN 层受到张应变^[2], 其极化方向垂直于异质结界面并取决于 Al-GaN 晶体取向。Ga 面 AlGaN 中的极化电场会吸引电子到该异质结界面处, 形成二维电子气。在该异质结外延过程中观察的高能电子衍射是 2×2 图形, 由此判断外延的 GaN、AlGaN 是 Ga 面结构^[10]。

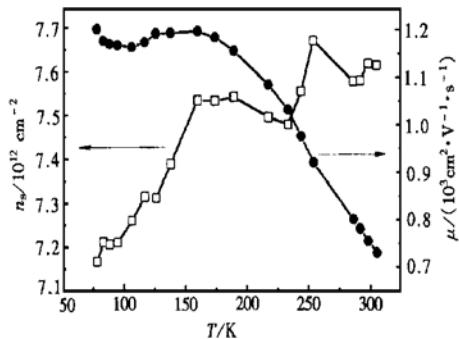


图 4 AlGaN/GaN 二维电子气迁移率和面密度随温度的变化

FIG. 4 Variation of Mobility and Sheet Concentration of 2DEG in AlGaN/GaN Heterostructure Against Sample Temperature

3.3 AlGaN/GaN 异质结场效应晶体管(HFET)

用所外延的 AlGaN/GaN 二维电子气材料制备了异质结场效应晶体管(HFET), 用离子刻蚀技术形成管芯台面, 源、漏电极使用 Ti/Al/Pt/Au 电极, 而栅极则采用 Pt/Au 电极。栅长分 0.5、1 和 $2\mu\text{m}$ 三种, 栅宽分 20 和 $100\mu\text{m}$ 两种。图 5 是其中一个晶体管的室温工作特性。室温最大跨导为 50mS/mm (栅长 $1\mu\text{m}$)。图 6 显示的是该晶体管在 150°C 和 300°C 时的工作特性, 由此可以看到即使在 300°C 高温器

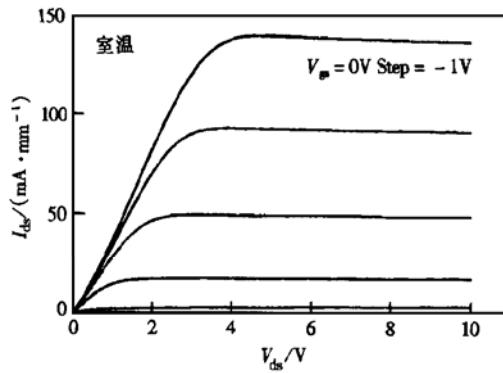


图 5 AlGaN/GaN HFET 室温直流工作特性

FIG. 5 DC-Output Characteristic of AlGaN/GaN HFET at Room-Temperature $L_g = 1\mu\text{m}$

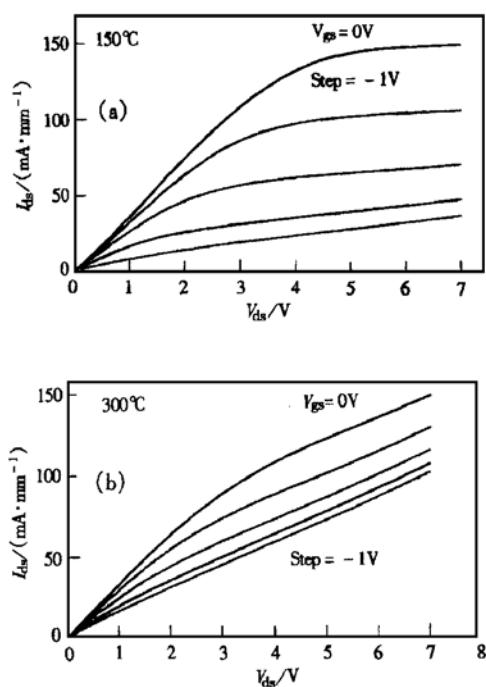


图 6 AlGaN/GaN HFET 的高温工作特性

FIG. 6 High-Temperature DC-Output Characteristic of AlGaN/GaN HFET $L_g = 1\mu\text{m}$

件仍然有工作特性, 同时也明显可以看出工作特性的倾斜, 这可能主要由于 GaN 外延膜材料的漏电流随温度升高而增加所致。为避免出现这种倾斜, 有必要进一步改善外延材料, 特别是 GaN 膜材料的质量。使用 HP8510C 网络分析仪测量了该晶体管的高频特性, 如图 7 所示。得到的最高截止频率为 13GHz (栅长 $0.5\mu\text{m}$, 栅宽为 $20\mu\text{m}$)。

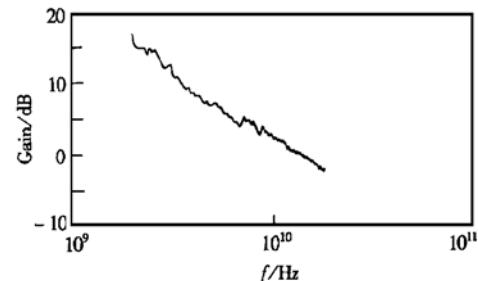


图 7 AlGaN/GaN HFET 器件的高频工作特性

FIG. 7 Gain vs Frequency for AlGaN/GaN HFET $L_g = 0.5\mu\text{m}, L_w = 200\mu\text{m}$

4 结论

使用 RF-MBE 技术在 C 面蓝宝石衬底上外延出了高质量的 GaN 膜以及 AlGaN/GaN 极化感应

二维电子气材料。GaN 膜室温电子迁移率为 $177\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 背景电子浓度为 $2\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$; (0002) X 射线摇摆曲线半高宽为 6'. AlGaN/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 $7.6\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$. 用此类材料制备的 HFET 器件室温最大跨导达 $50\text{mS}/\text{mm}$ (栅长 $1\mu\text{m}$); 截止频率达 13GHz (栅长 $0.5\mu\text{m}$, 栅宽 $20\mu\text{m}$). 器件在 300°C 高温下仍有工作特性, 但是器件的漏电流有明显的增加。

致谢 中国科学院半导体研究所王万年、清华大学苗伟、北京大学微电子所张锦文和中国科学院微电子中心杨纯永分别为我们的材料和 HFET 器件进行了各种特性的测量, 信息产业部电子 13 所曾庆明、刘伟吉制备了 HFET 器件, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] S. Strite and H. Morkoc, J. Vac. Sci. Technol., 1992, **B10**(4): 1237.
- [2] M. J. Murphy *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1999, **75**: 3653.
- [3] R. Gaska *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1999, **74**: 287.
- [4] C. R. Elsass *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1999, **74**: 3528; L. P. Smorchkova *et al.*, J. Appl. Phys., 1999, **86**: 4520.
- [5] C-H. Chen *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1999, **73**: 3147.
- [6] Y-F. Wu *et al.*, IEDM Technical Digest, 1999, 925—927.
- [7] WANG Xiao-liang, SUN Dian-zhao, KONG Mei-ying *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(12): 890—895 (in Chinese) [王晓亮, 孙殿照, 孔梅影, 等, 半导体学报, 1998, **19**(12): 890—895].
- [8] SUN Dian-zhao, WANG Xiao-liang, Wang Jun-xi *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**(7): 723—725 (in Chinese) [孙殿照, 王晓亮, 王军喜, 等, 半导体学报, 2000, **21**(7): 723—725].
- [9] SUN Dian-zhao, LIU Hong-xin, WANG Jun-xi *et al.*, Journal of Functional Materials and Devices, 2000, **6**(4): 350—353 (in Chinese) [孙殿照, 刘宏新, 王军喜, 等, 功能材料与器件学报 2000, **6**(4): 350—353].
- [10] A. R. Smith *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1998, **72**: 2114.

AlGaN/GaN Polarization-Induced Two-Dimensional Electron Gas Materials Grown by Radio-Frequency Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy

SUN Dian-zhao, HU Guo-xin, WANG Xiao-liang, LIU Hong-xin, LIU Cheng-hai, ZENG Yi-ping, LI Jin-min and LIN Lan-ying

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

Abstract: High-quality GaN films and AlGaN/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) technique. Electron mobility and background electron concentration of the grown GaN film at room temperature are $177\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ and $2\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, respectively. The full width at half maximum (FWHM) of (0002) X-ray rocking curve of the GaN film is 6arcmin. Electron mobility of the 2DEG at room-temperature is $730\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ with a sheet electron concentration of $7.6\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$. The Heterostructure field effect transistors (HFETs) made of the 2DEG materials have the transconductance of $50\text{mS}/\text{mm}$ with the gate-length of $1\mu\text{m}$ and the cut-off frequency of 13GHz with the gate-length and width of $0.5\mu\text{m}$ and $20\mu\text{m}$, respectively.

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

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

Article ID: 0253-4177(2001)11-1425-04

SUN Dian-zhao professor, was born in 1942. His current research interest is in MBE growth and electronic devices of III-Nitrides.

Received 13 December 2000, revised manuscript received 20 January 2001

© 2001 The Chinese Institute of Electronics