

AlN 阻挡层对 AlGaN/GaN HEMT 器件的影响*

张进城 王 冲 杨 燕 张金凤 冯 倩 李培咸 郝 跃

(西安电子科技大学微电子研究所, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

摘要: 利用低压 MOCVD 技术在蓝宝石衬底上生长了 AlGaN/GaN 异质结和 AlGaN/AlN/GaN 异质结二维电子气材料, 采用相同器件工艺制造出了 AlGaN/GaN HEMT 器件和 AlGaN/AlN/GaN HEMT 器件. 通过对两种不同器件的比较和讨论, 研究了 AlN 阻挡层的增加对 AlGaN/GaN HEMT 器件性能的影响.

关键词: AlGaN/GaN; AlN 阻挡层; 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(2005)12-2396-05

1 引言

由于 AlGaN/GaN 异质结材料具有一系列出色的特性, 基于 AlGaN/GaN 异质结材料制造的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 能够获得很高的射频功率. GaN 和 AlGaN 具有高击穿场强 ($\sim 3 \times 10^6$ V/cm), 所以 AlGaN/GaN HEMT 器件可以承受比 AlGaAs/GaAs HEMT 更高的漏极偏置电压; 由于 AlGaN/GaN 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 10^{13} cm^{-2} 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 GaN 具有高的饱和电子漂移速度 ($\sim 2 \times 10^7$ cm/s). 这些出色的材料电学特性使得 AlGaN/GaN 异质结二维电子气材料成为制造高性能微波功率 HEMT 器件的理想材料. AlGaN/GaN HEMT 器件被认为是 1~50 GHz 频率范围内最好的微波功率器件, 并已得到了实验证实. Khan 等人^[1]报道了 0.12 μm 栅长的 AlGaN/GaN 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. AlGaN/GaN HEMT 器件获得的功率密度已经超过了 AlGaAs/GaAs HEMT 器件

的 10 倍^[2]. 即使如此, AlGaN/GaN HEMT 器件的性能仍然有很大的提升空间, 因为目前制造 AlGaN/GaN HEMT 使用的 AlGaN/GaN 异质结二维电子气材料中 Al 组分大多处于 10~35% 之间. 理论上, AlGaN/GaN 异质结中 Al 组分越高, AlGaN/GaN 界面的导带断续越大, 从而引起的 2DEG 密度越高; 但是由于 AlGaN 与 GaN 之间的晶格失配随着 Al 组分增加而变大, 从而会引起更多的界面缺陷, 致使 2DEG 的迁移率下降. 已报道的结果表明, Al 组分为 35% 时所获得 2DEG 迁移率与浓度的乘积最大. Connell 大学的 Shen 等人^[3]提出了一种折中的方法, 即在 AlGaN 与 GaN 之间插入一薄层 AlN 层, 既可以在一定程度上利用 AlN 与 GaN 之间大的导带断续, 又不会使 2DEG 界面变得很差, 实验结果也表明这种方法可以进一步提高 2DEG 迁移率与浓度的乘积. 虽然 AlGaN/AlN/GaN 异质结材料制备和 HEMT 器件制造已经通过了实验验证, 但是 AlN 层的插入对 AlGaN/GaN HEMT 器件特性的影响还没有针对性的研究.

本文采用完全相同的材料生长工艺和器件制造工艺分别制造了 AlGaN/GaN HEMT 器件和 AlGaN/AlN/GaN HEMT 器件, 然后深入研究了 AlN 层的插入对 AlGaN/GaN HEMT 器件特性的影响.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 513270407, 2002CB3119), 国防科技预研基金 (批准号: 41308060106), 国防科技重点实验室 (批准号: 51432030204DZ0101) 资助项目

张进城 男, 1976 年出生, 副教授, 博士, 从事 GaN 基半导体材料和器件的研究.

郝 跃 男, 1958 年出生, 教授, 博士生导师, 从事半导体器件可靠性和宽禁带半导体技术的研究.

2005-04-26 收到, 2005-08-30 定稿

2 实验

材料生长设备是立式低压 MOCVD 设备. TE-Ga, TMAI 和 NH₃ 分别作为 Ga 源、Al 源和 N 源, H₂ 作为载气, 生长压力为 5.3 kPa. 生长采用的 AlGaN/ GaN (编号: XD040) 二维电子气材料结构截面图如图 1 所示. AlGaN/ AlN/ GaN (编号: XD041) 结构是图 1 中在 8nm 未掺杂 AlGaN 与 1μm 未掺杂 GaN 层之间插入厚 1nm 的 AlN 层. 实验采用 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 3H₂SO₄ - 1H₃NO₄ 的混合溶液处理 10min, 再用去离子水漂洗基片三次, 最后用高纯 N₂ 吹干.

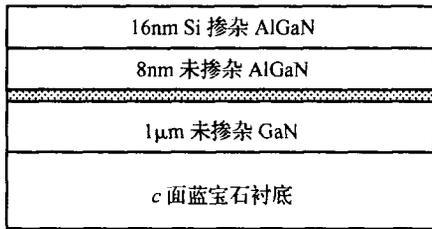


图 1 AlGaN/ GaN 结构的截面图

Fig. 1 Cross section of AlGaN/ GaN structure

蓝宝石基片装入反应室后, (1) 在 950 °C 下 NH₃ 和 H₂ 混合气氛中对蓝宝石基片进行高温预处理 10min; (2) 降温到 520 °C 生长厚度约为 30nm 的 GaN 成核层; (3) 升温至 920 °C 生长厚度约为 1μm 的 GaN 层; (4) 920 °C 退火 3min; (5) 920 °C 依次生长 (1nm 厚 AlN 层, 对于 AlGaN/ AlN/ GaN 结构) 8nm 厚未掺杂 AlGaN 层和 16nm 厚 Si 掺杂 AlGaN 层, 其中 Si 掺杂浓度约为 $(1 \sim 2) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 对于两种异质结, AlGaN 层的 Al 组分均为 27%.

Hall 效应测量显示, 室温下 AlGaN/ GaN 异质结的电子迁移率和 2DEG 面密度分别为 $946 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $1.29 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$; 室温下 AlGaN/ AlN/ GaN 异质结的电子迁移率和 2DEG 面密度分别为 $723 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $1.71 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. 相应地, 室温下 AlGaN/ GaN 异质结和 AlGaN/ AlN/ GaN 异质结的 2DEG 迁移率与面密度的乘积 μn_s 分别为 1.24×10^{16} 和 $1.22 \times 10^{16} / (\text{V} \cdot \text{s})$. Shen 等人^[3] 发现插入 AlN 层因降低合金散射而使 2DEG 迁移率提高, 而且由于 AlN 层的插入增大了异质结界面的有效导电不连续性和极化效应, 使得 2DEG 面密度也有所

提高, 从而 2DEG 迁移率和面密度乘积也会得到明显提高. 但本文的研究结果却与 Shen 等人的结果有所不同: 2DEG 面密度明显提高, 但 2DEG 迁移率却有所下降. 产生这种现象的主要原因是, 本文 Hall 效应测量的欧姆接触电阻是采用高温烙铁在材料表面焊锡形成的. 采用焊锡法在 AlGaN/ AlN/ GaN 结构上形成的欧姆接触电阻大于 AlGaN/ GaN 结构, 因此 Hall 效应测量中 AlN 层插入引起 2DEG 迁移率和面密度乘积的增加, 被欧姆接触电阻的增大所抵消. 本文 Hall 效应测量中 AlN 插入后迁移率明显下降, 主要是因为 Hall 测量中欧姆接触电阻变大使得测量值小于实际值. 对于 AlN 层插入后欧姆接触电阻的增大将在下文有详细论述.

本文 HEMT 器件制造的基本工艺条件为: 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. HEMT 器件结构如图 2 所示, 栅长 L_G 为 $1 \mu\text{m}$, 源漏间距 L_{SD} 为 $2.5 \mu\text{m}$, 栅极处于源漏正中, 器件栅宽 W_G 为 $20 \mu\text{m}$. 利用 HP4156B 测量室温下 HEMT 器件的直流特性, 在制备 HEMT 器件的同时也制备了传输线 (TLM) 电阻图形, 用于测量欧姆接触电阻和材料方块电阻.

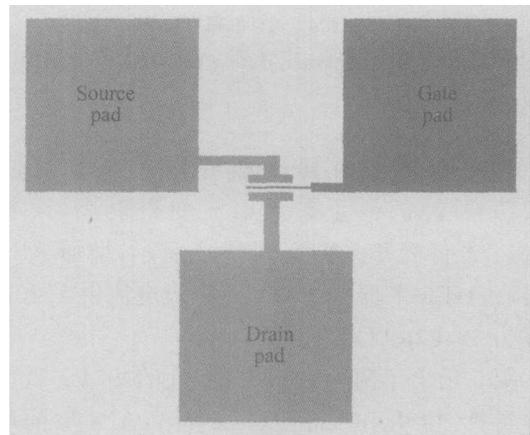


图 2 HEMT 器件平面图

Fig. 2 Layout of HEMT device

3 结果与讨论

图 3 给出了源极和漏极均接地的情况下栅泄漏电流随栅压的变化规律. 可以明显看出, AlN 层的插入大大改善了栅肖特基结的反向漏电特性, AlN 层的插入使 $V_G = -5 \text{ V}$ 时栅泄漏电流由 $110.33 \mu\text{A}$ 下降为 $22.46 \mu\text{A}$, 为无 AlN 层时栅泄漏电流的 $1/5$.

主要原因在于 AlN 阻挡层在 2DEG 界面 AlGaN 一侧形成了一个高的势垒,该势垒对沟道(2DEG)中的电子向栅电极的输运产生很大的阻挡作用,因此 AlN 层的增加可以大大改善 AlGaN/GaN HEMT 器件的栅泄漏特性.随着 AlN 层厚度的增加,栅泄漏特性更好,因此 AlN 层的厚度还可以适当地提高一些. AlN 层厚度越大,2DEG 面密度越大,但是 AlN 层不能太厚,否则一方面会引起源漏欧姆接触制造上的更大困难,另一方面会引起界面晶格失配缺陷的增多而使得 2DEG 迁移率下降. Shen 等人^[3]研究得出的最佳 AlN 层厚度为 1.6nm.

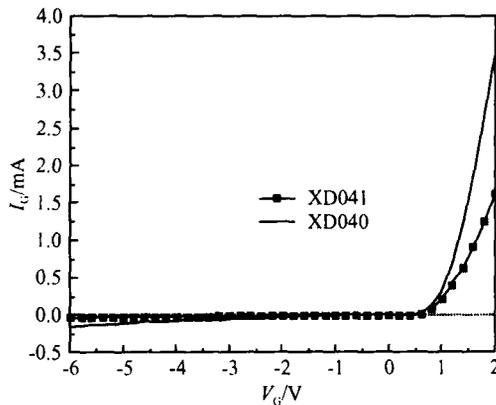


图 3 室温下 HEMT 器件的栅肖特基特性曲线

Fig. 3 Schottky characteristics of HEMT device at room temperature

AlN 阻挡层对栅泄漏特性的改善也使得 HEMT 器件的截止态漏电流变得更小,改善了 HEMT 器件的开关特性.如图 4 所示,增加 AlN 阻挡层后,HEMT 器件的截止态漏极电流由 192.7 μ A 下降为 32.03 μ A ($V_G = -5$ V 时).

图 5 给出了两种 HEMT 器件的 I_D - V_G 特性和跨导特性.由 I_D - V_G 特性可以看出,AlN 层的增加使得 HEMT 器件的阈值电压由 -2.6V 变为 -3.6V,这是因为 AlN 层的增加使得 2DEG 面密度增加,因此要将 2DEG 中的电子耗尽所需的栅压(即阈值电压)变得更负.同时, $V_D = 5$ V 和 $V_G = 1$ V 时的漏电流由 9.84mA 增大为 10.48mA,这是由于 Al 阻挡层增强了 2DEG 沟道的导电能力.由跨导特性可以看出,AlN 阻挡层的增加使 HEMT 器件的最大跨导由 3.28mS 减小为 3.11mS.这是本文发现的增加 AlN 层对 HEMT 器件唯一的不利现象.下面对此进行详细解释.

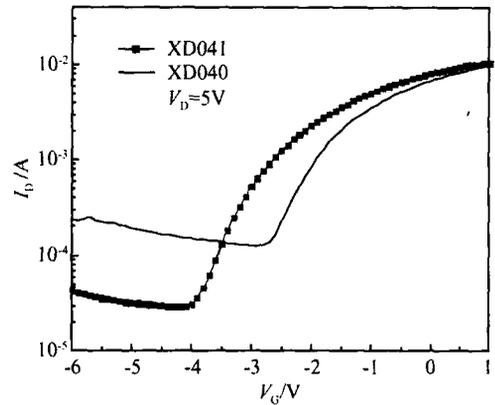


图 4 室温 HEMT 器件的截止态特性

Fig. 4 Off-state characteristics of HEMT device at room temperature

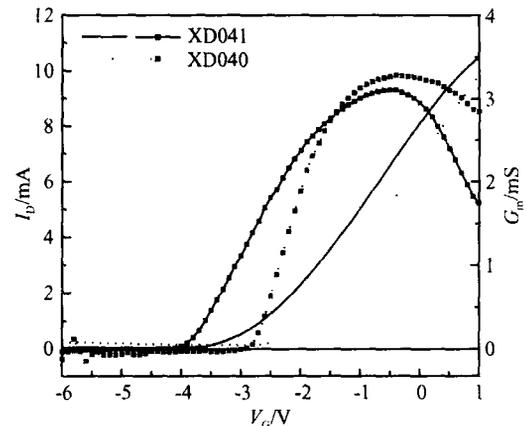


图 5 室温 HEMT 器件的转移特性

Fig. 5 Transfer characteristics of HEMT device at room temperature

本文 HEMT 器件制造中源和漏欧姆接触金属 Ti/Al/Ti/Au 直接淀积在 AlGaN 层表面,形成的欧姆接触能带图如图 6 所示,源漏金属电极中的电子通过隧道效应穿越金属与 AlGaN 层间势垒形成导电通道.通过图 6 中 AlN 层插入前后欧姆接触能带图的比较可以看出,AlN 层插入后源漏金属电极中的电子进入 2DEG 沟道不仅需要穿越金属与 AlGaN 间的势垒,而且要穿越 AlN 层势垒,从而引起源区和漏区欧姆接触电阻的增大.

图 7 给出了由 TLM 图形测量得到的传输线电阻与传输线长度的关系曲线.根据图 7 可以得到材料方块电阻、源(或漏)电极欧姆接触电阻以及比接触电阻的数值,如表 1 所示.表 1 显示,AlN 层插入后异质结材料的方块电阻明显减小,这与 Shen 等

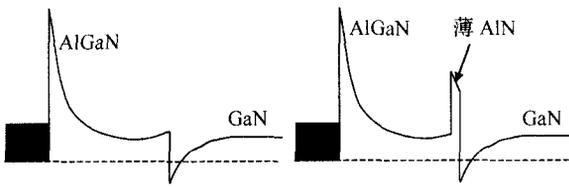


图 6 AlN 层插入前后 AlGaIn/ GaN 异质结欧姆接触能带图
Fig. 6 Energy band of ohmic contact in AlGaIn/ GaN heterostructure before and after the insertion of AlN layer

人的报道保持一致,也说明本文前述的 Hall 效应测量结果中 AlN 层插入前后 2DEG 迁移率和面密度乘积变化不大是测量引起的.实际上 AlN 插入后 2DEG 迁移率和面密度乘积明显增大(2DEG 迁移率与面密度乘积和材料方块电阻成正比),即 AlN 层的插入明显增强了 2DEG 的导电能力,从而使得 AlGaIn/ AlN/ GaN HEMT 器件的漏电流大于 AlGaIn/ GaN HEMT 器件.

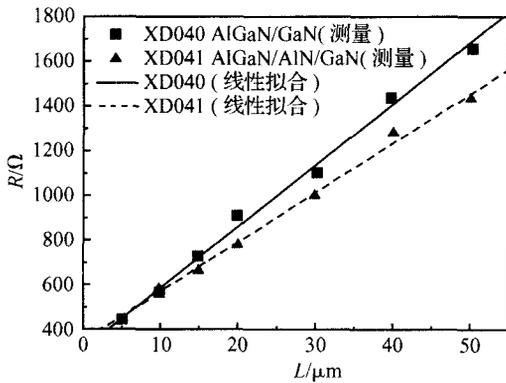


图 7 传输线电阻与传输线长度的关系

Fig. 7 Relation of TLM resistance and length

表 1 TLM 图形测量得到的材料电阻与欧姆接触电阻

Table 1 Material sheet resistance and specific contact resistance measured by TLM

材料编号	材料方块电阻 /($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)	源/漏欧姆 接触电阻/ /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	比接触电阻 /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
XD040 AlGaIn/ GaN	546	158	1.82×10^{-4}
XD041 AlGaIn/ AlN/ GaN	442	175	2.78×10^{-4}

由表 1 还可以看出 AlN 层插入后 HEMT 器件

的源/漏欧姆接触电阻明显增大,比接触电阻也明显增大,从而使得 HEMT 器件的跨导在 AlN 层插入后略有减小.

AlN 层插入引起的源漏欧姆接触电阻增大这一缺点可以通过改进器件工艺的方法来消除.在制造源和漏电极时可采用 Wu 等人^[4]提出的方法,将源区和漏区刻蚀到 2DEG 界面以下,然后在源区和漏区重新生长 n^+ GaN 层,这样可以克服 AlN 阻挡层对源和漏串联电阻的影响.

4 结论

本文利用低压 MOCVD 技术在蓝宝石衬底上生长获得了 AlGaIn/ GaN 异质结和 AlGaIn/ AlN/ GaN 异质结 2DEG 材料.采用相同器件工艺制造出了 AlGaIn/ GaN HEMT 器件和 AlGaIn/ AlN/ GaN HEMT 器件.通过对两种不同器件特性的比较和讨论,研究了 AlN 层的插入对 AlGaIn/ GaN HEMT 器件性能的影响.结果表明,AlN 层的插入可以大大改善 HEMT 器件的栅肖特基泄漏特性和开关特性,缺点是会引起源和漏欧姆接触电阻的增大,但是该缺点可以通过新的器件工艺予以克服.

致谢 信息产业部电子 13 研究所曾庆明和李献杰制备了 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 120GHz. IEEE Electron Device Lett, 2002, 23(8) :455

[2] Wu Y F, Keller B P, Keller S, et al. GaN-based FETs for microwave power amplification. IEICE Trans Electron, 1999, E82-C(11) :1895

[3] Shen L, Heikman S, Moran B, et al. AlGaIn/ AlN/ GaN high-power microwave HEMT. IEEE Electron Device Lett, 2001, 22(10) :457

[4] Wu Y F, Kapolnek D, Kozodoy P, et al. AlGaIn/ GaN MODFETs with low ohmic contact resistance by source/ drain n^+ re-growth. 24th International Symposium on Compound Semiconductors, San Diego, 1997

Effect of an AlN Spacer Layer on AlGaN/GaN HEMTs *

Zhang Jincheng, Wang Chong, Yang Yan, Zhang Jinfeng, Feng Qian, Li Peixian, and Hao Yue

(Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices,
Institute of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: AlGaN/GaN and AlGaN/AlN/GaN heterostructure two-dimensional electron gas materials are grown on sapphire substrates by low-pressure MOCVD technique. AlGaN/GaN HEMTs and AlGaN/AlN/GaN HEMTs are fabricated by the same device processes. The effects of an AlN spacer layer on the device performance of AlGaN/GaN HEMTs are studied by comparing the DC characteristics of these two different devices.

Key words: AlGaN/GaN; AlN spacer layer; two-dimensional electron gas; HEMT

EEACC: 0520F; 2530B; 2560S

Article ID: 0253-4177(2005)12-2396-05

* Project supported by the National Development Program for Basic Research of China (Nos. 513270407, 2002CB3119), the National Defense Scientific and Technical Pre-Research Program of China (No. 41308060106), and the National Defense Scientific and Technical Key Laboratory Fund of China (No. 51432030204DZ0101)

Zhang Jincheng male, was born in 1976, associate professor, PhD. He is interested in research on GaN-based materials and devices.

Hao Yue male, was born in 1958, professor, advisor of PhD candidates. His research areas include wide bandgap semiconductors, reliability of semiconductor devices, and manufacturability of IC.

Received 26 April 2005, revised manuscript received 30 August 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics