

凹栅 AlGaIn/GaN HFET

张志国^{1,2,3,†} 冯 震^{1,2} 杨梦丽^{1,2} 冯志红^{1,2} 默江辉^{1,2} 蔡树军^{1,2} 杨克武^{1,2}

(1 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

(2 专用集成电路国家级重点实验室, 石家庄 050051)

(3 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

摘要: 研究了总栅宽为 $100\mu\text{m}$ 栅凹槽结构的 AlGaIn/GaN HFET, 采用相同的外延材料, 凹槽栅结构器件与平面栅结构器件比较其饱和电流变化小, 跨导由 260.3mS/mm 增加到 314.8mS/mm , n 由 2.3 减小到 1.7, 栅极漏电减小一个数量级. 在频率为 8GHz 时, 负载牵引系统测试显示, 当工作电压增加到 40V , 输出功率密度达到 11.74W/mm .

关键词: AlGaIn/GaN HFET; 凹栅; 高电压; 高功率密度

EEACC: 1350F; 2560P

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)09-1420-04

1 引言

半导体 GaN 材料具有宽的禁带宽度、大的电子饱和速度和尖峰速度、高击穿电场等特点, 成为国内外研究的热点. 基于 AlGaIn/GaN 异质结的场效应晶体管(HFET)具有高温、高频、高功率和高功率密度等特性, 也已成为研究的热点.

自从 1993 年研制出第一只具有直流特性的 AlGaIn/GaN HFET^[1] 以来, 器件的研究便沿着两个不同的方向进行: 高功率密度器件和高输出功率器件. 2003 年 Wu 等人^[2] 报道, 在 SiC 衬底外延材料上制备的器件, 工作电压为 120V , 工作频率为 4 和 8GHz 时, 输出功率密度分别为 32.2 和 30.6W/mm , 这是输出功率密度的最高结果; SiC 衬底四胞合成总栅宽为 144mm 的功率放大器, 工作电压为 65V , 输出功率大于 500W ^[3], 这是器件的最高功率输出结果. 国内在此领域的研究取得了一定的突破, 蓝宝石衬底和 SiC 衬底器件的输出功率分别达到 4.57 和 6.1W ^[4,5].

本文研究了凹槽栅对器件特性的影响, 研究表明, 采用栅凹槽结构后, AlGaIn/GaN HFET 的栅整流特性得到明显改善, 器件栅漏之间的漏电流减小一个数量级, 理想因子由 2.3 减小到 1.7. 器件的工作电压提高, 负载牵引系统测试器件的输出功率特性, 发现随工作电压的提高, 器件的输出功率逐渐增加, 当工作电压为 40V 时, 总栅宽为 $100\mu\text{m}$ 器件 X 波段输出功率达到 1.174W , 即功率密度为 11.74W/mm , 达到国内领先水平, 实现小栅宽器件

的高功率密度特性.

2 器件制备

采用我所自主研制的 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HFET 材料, 表层生长 n 型 GaN 帽层, 其中 AlGaIn 势垒层厚度为 21nm , Al 组分为 0.26. 研制的器件单指栅宽 $50\mu\text{m}$, 总栅宽为 $100\mu\text{m}$, 欧姆接触采用 Ti/Al/Ni/Au 复合金属系统, 合金后接触电阻为 $0.3\Omega\cdot\text{mm}$, 采用干法刻蚀技术, 形成栅凹槽. 图 1 为栅凹槽结构的 AFM 图, 其中栅凹槽深度为 4nm , 腐蚀后外延材料的方均根粗糙度为 0.28nm . 电子曝光形成 γ 栅, 电子束蒸发金属 Ni/Au, 栅长为 $0.35\mu\text{m}$, 器件进行 SiN 钝化处理, 钝化后器件电流崩塌小于 10%.

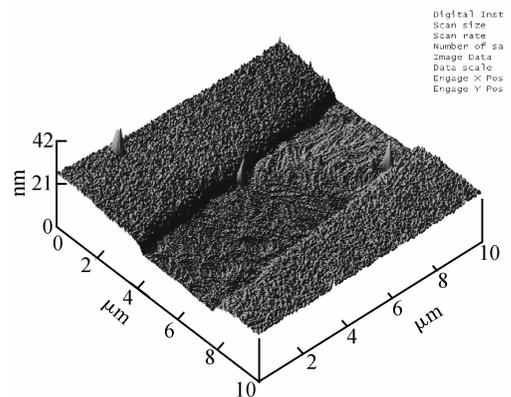


图 1 栅凹槽结构的 AFM 照片

Fig.3 AFM microphotography of the recessed gate

† 通信作者. Email: flying200016@163.com

2007-03-20 收到, 2007-04-28 定稿

3 凹栅结构对 AlGaIn/GaN HFET 特性的影响

对于场效应晶体管,饱和区本征跨导为:

$$g_m = \frac{\partial I_{DSS}}{\partial V_G} \Big|_{V_{DS} = \text{const}} = \frac{\epsilon(x) v_{\text{sat}} W_G}{d} \times \frac{V_{GS} - V_{th}(x)}{\sqrt{(E_c L_G)^2 + (V_{GS} - V_{th}(x))^2}} \quad (1)$$

对于栅长为亚微米器件,(1)式根号中第一项可以忽略,则跨导可以简化为:

$$g_m = \frac{\partial I_{DSS}}{\partial V_G} \Big|_{V_{DS} = \text{const}} = \frac{\epsilon(x) v_{\text{sat}} W_G}{d} \quad (2)$$

其中 v_{sat} 为载流子的饱和速度; W_G 为栅宽; L_G 为栅长; d 为 AlGaIn 层的厚度; V_{GS} 为源漏电压; V_{th} 为阈值电压. 当器件采用栅凹槽结构后,栅下势垒层厚度减小,栅对导电沟道中 2DEG 的控制能力增强,器件的跨导增加. 为了研究势垒层厚度对器件特性的影响,生长 10nm 厚度的 GaN 帽层,使用 ICP 进行低损伤刻蚀,刻蚀深度分别为 5, 7, 8, 10, 13 和 16nm,刻蚀后采用相同栅蒸发工艺,栅后分别测试器件的直流特性和跨导特性,数据如图 2 所示. 当势垒层厚度大于 18nm 后,器件跨导随势垒层厚度的减小而增加;当势垒层厚度小于 18nm 后,由于外延材料势垒层厚度薄,器件饱和电流明显减小,跨导减小. 研究表明,当外延材料势垒层厚度大于一定厚度时,随势垒层厚度的减小,器件跨导增加,说明势垒层厚度减小,栅对 2DEG 的控制能力增强.

生长 GaN 帽层厚度为 2nm 的外延材料,用于栅凹槽特性的研究,使用 Load-Pull System 对器件的直流特性和连续波输出功率特性进行测试. 凹栅深度为 4nm 器件的直流 $I-V$ 特性如图 3 所示,饱和电流为 74mA,夹断电压为 -2.8V,当栅源电压为 2V 时,漏源最大电流达到 112mA. 使用相同的外延

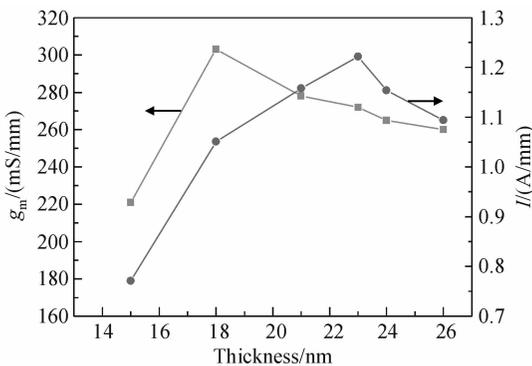


图 2 势垒层厚度对器件转移特性的影响

Fig.2 Relations of transfer characteristics and barrier thickness

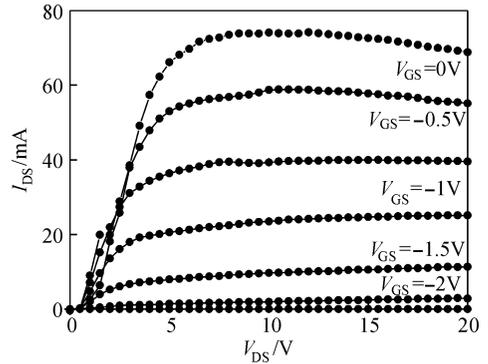


图 3 凹栅结构器件的 $I-V$ 特性曲线

Fig.3 $I-V$ curves of the recessed AlGaIn/GaN HFET

材料、相同工艺制备了平面栅结构的器件,其饱和电流为 78mA,夹断电压为 -3.7. 结果说明,栅凹槽深度为 4nm 时,没有破坏异质结的极化效应,与平面栅器件比较,饱和电流变化小. 同时由于减小势垒层厚度,栅对沟道中 2DEG 的控制能力增强,夹断电压减小.

尽管栅凹槽对器件的饱和电流影响很小,但由于夹断电压减小,必然会引起器件转移特性的变化. 图 4 为凹栅和平面栅结构器件的跨导特性曲线,采用凹栅结构后,器件的阈值电压减小,跨导值由 260.3mS/mm(曲线 2)增加到 314.8mS/mm(曲线 1),增加 20.9%,实验结果表明,栅凹槽结构改善了器件的跨导特性.

大量文献报道,GaN 外延材料表面由于长时间与大气接触表面材料被氧化,同时氮元素(N)易从表层材料溢出,形成 n 型 N 空位,这些因素均对栅整流特性产生负面影响,栅整流特性退化,将直接影响器件的增益特性,降低功率器件的输出功率密度,因此优化器件的整流特性是高功率密度器件研究的另一个重要内容. 图 5 为两种结构器件的栅整流特性比较,其中图 5(a)为栅源正向整流特性结果,

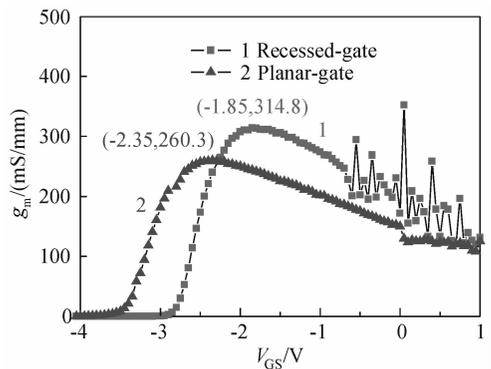


图 4 凹栅和平面栅器件跨导特性曲线

Fig.4 Transconductance curves of recessed and planar AlGaIn/GaN HFET

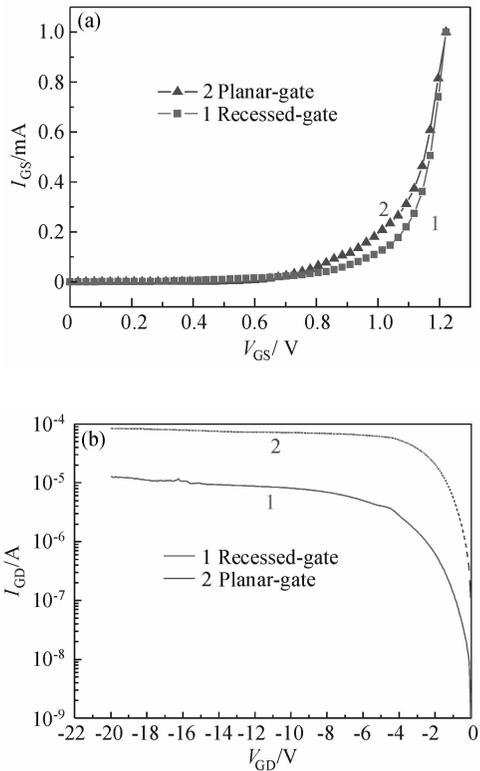


图 5 凹槽栅对器件整流特性的影响 (a)凹槽栅对栅源正向特性的影响;(b)凹槽栅对栅源反向特性的影响

Fig. 5 Rectified characteristic of recessed AlGaIn/GaN HFET

利用栅源二极管模型,计算得到平面栅和凹栅结构的 n 值分别为 2.3 和 1.7,金属 Ni 与 AlGaIn 接触势垒为从 0.67eV 增加到 0.82eV,这些数据表明,采用栅凹槽结构后,表层氧化层被腐蚀,栅与表层材料的整流效应得到改善.图 5(b)为栅反向特性曲线,栅极漏电流由 10^{-4} 数量级减小到 10^{-5} 数量级,减小了一个数量级,栅极漏电流的减小有助于提高器件的击穿电压和工作电压.研究表明栅凹槽结构能明显地改善器件的整流特性.

4 AlGaIn/GaN HFET 高功率密度特性

对未封装的管芯进行 Load-Pull 输出功率特性测试,图 6 为输出功率与器件工作电压的关系,发现随工作电压的增加,器件输出功率逐渐增加,当电压增加到 40V 时,器件输出功率接近饱和.这一数据说明器件工作电压的增加,有助于器件输出功率密度的提高.

选取静态工作电压为 40V,对器件进行输出功率测试,图 7 为器件在频率为 8GHz 时输出功率特性曲线,工作电压为 40V 时当输入信号为 25dBm

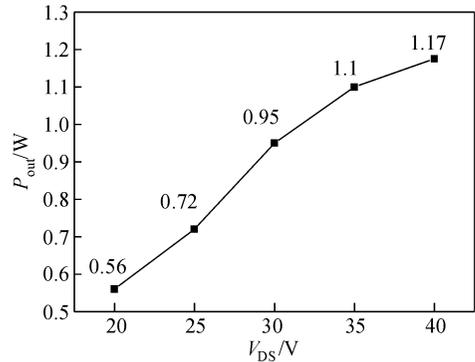


图 6 器件输出功率与工作电压的关系

Fig. 6 Relations of output power and operation voltage of recessed AlGaIn/GaN HFET

时,器件输出功率达到最高为 30.7dBm,即 1.174W,输出功率密度达到 11.74W/mm,这一数值为国内同一器件功率密度的最高结果,器件的功率附加效率为 35.5%,测试显示器件的小信号增益达到 8dB.平面栅器件工作电压为 28V 时,X 波段输出功率密度仅为 6.7W/mm,增益为 6dB.

5 结论

本文研究了凹槽栅对器件特性的影响,栅凹槽结构可以明显地改善器件的跨导特性,采用相同的外延材料,凹槽栅结构器件与平面栅结构器件比较,其饱和电流变化小,器件跨导值增加,栅整流特性改善,器件的工作电压提高,当工作电压为 40V,频率为 8GHz 时,功率密度达到 11.74W/mm,达到国内领先水平.

尽管器件的输出功率密度达到国内领先水平,但与国外比较仍有较大的差距,同时由于没有采用场板结构,器件的工作电压仍然相对偏低,下一步研

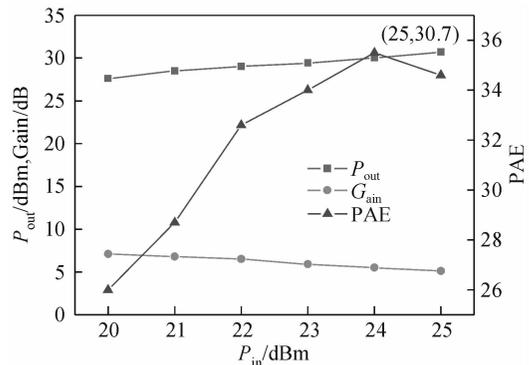


图 7 凹槽栅结构器件的输出功率特性曲线

Fig. 7 Output power characteristic of recessed AlGaIn/GaN HFET

究的重点为优化场板对器件的作用,进一步提高工作电压,提高器件的功率密度特性.

参考文献

- [1] Khan M A, Bhattarai A, Kuznia J N, et al. High electron mobility transistor based on a GaN-AlGaIn heterojunction. *Appl Phys Lett*, 1993, 63(9):1214
- [2] 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
- [3] Maekawa A, Yamamoto T, Mitani E, et al. A 500W push-pull AlGaIn/GaN HEMT amplifier for L-band high power application. *IEEE MTT-S*, 2006:722
- [4] Zhang Zhiguo, Yang Ruixia, Li Li, et al. Output power of an AlGaIn/GaN HFET on sapphire substrate. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(7):1255 (in Chinese) [张志国, 杨瑞霞, 李丽, 等. 蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN HFET 功率特性. *半导体学报*, 2006, 27(7):1255]
- [5] Chen Tangsheng, Jiao Gang, Li Zhonghui, et al. AlGaIn/GaN MIS HEMT with AlN dielectric. *CS MANTECH Conference*, 2006:227

Recess-Gate AlGaIn/GaN HFET

Zhang Zhiguo^{1,2,3,†}, Feng Zhen^{1,2}, Yang Mengli^{1,2}, Feng Zhihong^{1,2}, Mo Jianghui^{1,2},
Cai Shujun^{1,2}, and Yang Kewu^{1,2}

(1 *The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China*)

(2 *National Key Laboratory of ASIC, Shijiazhuang 050051, China*)

(3 *School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: A recessed gate AlGaIn/GaN HFET with a total gate length of $100\mu\text{m}$ is studied. The device demonstrates an increase in transconductance from 260.3 to 314.8mS/mm compared to the unrecessed device, while the saturation current changes slightly. Moreover, the ideality is improved from 2.3 to 1.7. An output power density of 11.74W/mm is achieved at 8GHz and 40V using a load pull system.

Key words: AlGaIn/GaN HFET; recessed gate; high voltage; high power density

EEACC: 1350F; 2560P

Article ID: 0253-4177(2007)09-1420-04

† Corresponding author. Email: flying200016@163.com

Received 20 March 2007, revised manuscript received 28 April 2007