

X 波段高输出功率凹栅 AlGa_N/Ga_N HEMT

冯 震^{1,2} 张志国^{1,2,3,†} 王 勇^{1,2} 默江辉^{1,2} 宋建博^{1,2} 冯志红^{1,2} 蔡树军^{1,2} 杨克武^{1,2}

(1 专用集成电路国家级重点实验室, 石家庄 050051)
(2 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)
(3 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

摘要: 使用自主研发的 SiC 衬底 GaN HEMT 外延材料, 研制出高输出功率 AlGa_N/Ga_N HEMT, 优化了器件研制工艺, 比接触电阻率小于 $1.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 电流崩塌参量小于 10%, 击穿电压大于 80V. 小栅宽器件工作电压达到 40V, 频率为 8GHz 时输出功率密度大于 10W/mm. 栅宽为 2mm 单胞器件, 工作电压为 28V, 频率为 8GHz 时, 输出功率为 12.3W, 功率增益为 4.9dB, 功率附加效率为 35%. 四胞内匹配总栅宽为 8mm 器件, 工作电压为 27V 时, 频率为 8GHz 时, 输出功率为 33.8W, 功率增益为 6.3dB, 功率附加效率为 41.77%. 单胞器件和内匹配器件输出功率为目前国内该器件输出功率的最高结果.

关键词: AlGa_N/Ga_N HEMT; 高输出功率; 内匹配器件
EEACC: 1350F; 2560P

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)11-1773-04

1 引言

宽禁带半导体 GaN 材料具有大的禁带宽度及饱和(峰值)漂移速度, 高热导率及峰值击穿电场等特征, 非常适合于研制微波功率器件, 基于 AlGa_N/Ga_N 异质结的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 具有高频、大功率、耐高温等特性, 成为国内外研究的热点. 自上世纪 90 年代 GaN 基功率器件首次研制成功以来^[1], 随着材料质量的提高及器件制作工艺的不断改进, AlGa_N/Ga_N HEMT 输出功率、功率密度不断得到提高. Wu 等人^[2] 利用凹栅结构和场板技术研制的 AlGa_N/Ga_N HEMT, 频率 8GHz 时工作电压为 120V 时, 功率密度达到 30.6W/mm, 是目前 X 波段器件的最高功率密度. 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. 近几年, 国内在这一领域的研究取得了长足的进展, 器件跨导最高达到 325mS/mm^[4], 蓝宝石和 SiC 衬底器件微波输出分别大于 4W^[5] 和 6W^[6].

文中用于器件研制的外延材料衬底为高热导率的 SiC 材料, 自主研发了 GaN 外延材料, 通过对欧姆接触、隔离技术、刻蚀技术及钝化技术等关键工艺的优化, 研制出 X 波段高输出功率凹栅 AlGa_N/Ga_N HEMT, 小栅宽器件在频率为 8GHz 时, 功率

密度大于 10W/mm, 单胞总栅宽为 2mm 器件在频率为 8GHz 时输出功率大于 12.3W, 使用该结构器件进行四胞内匹配, 总输出功率达到 33.8W, 增益为 6.3dB, 功率附加效率 (PAE) 为 41.7%, 提高了国内在这一器件的微波输出功率水平.

2 器件制备

在高纯 SiC 衬底上采用 MOCVD 工艺生长 GaN 外延材料, 其外延及器件基本结构如图 1 所示, 其中 Al 组分为 0.28, 2DEG 浓度与迁移率乘积大于 $2 \times 10^{16} \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 外延材料方块电阻为 260 Ω/\square , 采用低损伤的 ICP 刻蚀技术进行台面隔离, 欧姆接触采用 Ti/Al/Ni/Au 金属系统, 优化的退火条件为 780 $^{\circ}\text{C}$, 40s, 比接触电阻率达到 $1.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 使用 ICP 刻蚀形成栅凹槽, 均方根粗糙度小于

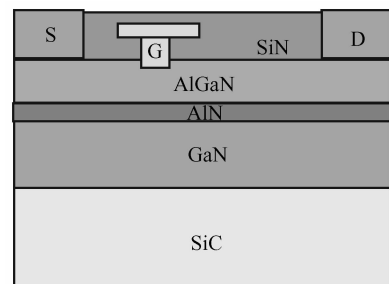


图 1 GaN 外延材料和器件基本结构图
Fig. 1 Diagram of GaN epitaxy material and device

† 通信作者. Email: flying200016@163.com
2007-05-10 收到, 2007-05-29 定稿

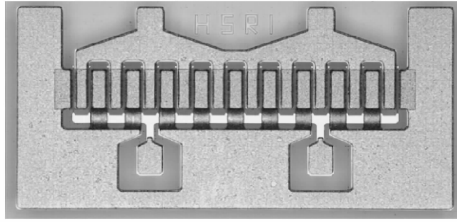


图 2 总栅宽为 2mm AlGaIn/GaN HEMT
Fig.2 2mm-total-gate AlGaIn/GaN HEMT

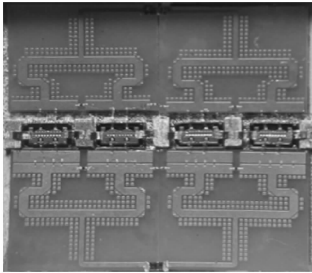


图 3 四胞内匹配 AlGaIn/GaN HEMT
Fig. 3 Four-cell internally matched AlGaIn/GaN HEMT

0.5nm, 栅金属为 Ni/Au, 栅长为 0.4 μ m, PECVD 淀积富 SiSiN 钝化层. 利用传统 Willogge 一分四功率合成器进行器件功率内匹配合成设计, 得到总栅宽为 8mm 的内匹配器件, 单胞器件和内匹配器件如图 2 和 3 所示.

3 器件特性

3.1 直流特性

利用半导体参数特性测试仪测量了器件的 $I-V$ 特性, 栅宽 2mm 器件测试曲线如图 4 所示. 当栅压 V_g 为 1V 时器件的最大饱和电流 I_{ds} 可

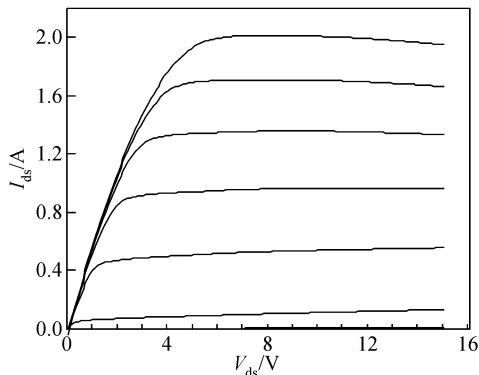


图 4 AlGaIn/GaN HEMT $I-V$ 特性曲线
Fig.4 $I-V$ characteristic of AlGaIn/GaN HEMT

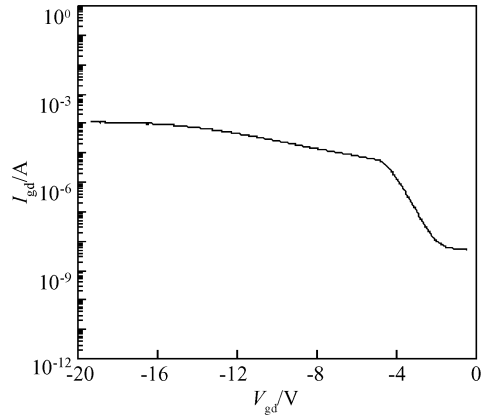


图 5 AlGaIn/GaN HEMT 栅漏泄电流
Fig.5 Gate-drain leakage current of AlGaIn/GaN HEMT

达 2.0A, 最大本征跨导 G_{max} 为 550mS. 优化了钝化功率、温度、时间等工艺参数, 减小了钝化层对器件击穿电压的负面影响, 降低了栅漏泄电流, 提高了击穿电压. 栅漏泄电流 I_{gd} 曲线如图 5 所示, 栅压为 0V, 漏压为 -20V 时栅漏泄电流仅为 110 μ A, 栅漏泄电流降低一个数量级, 源漏击穿电压大于 80V.

利用脉冲测试系统测量器件电流崩塌效应, 并定义归一化电流崩塌参量 ΔI 表征电流崩塌效应的大小, 其定义为:

$$\Delta I = \frac{\Delta I_{ds}}{I_{ds1}} \quad (1)$$

其中 ΔI_{ds} 为零栅压下, 脉冲信号与直流信号源漏电流减少值的最大量; I_{ds1} 为对应的直流信号的漏极电流值. 通过优化钝化工艺, 采用富 Si 钝化层淀积技术, 大大减小了电流崩塌量. 栅金属化后器件典型电流崩塌测试曲线如图 6 所示, 利用(1)式计算得到钝化前器件电流崩塌参量为 60%, 钝化工艺后, 电流崩塌参量减小到 8%, 如图 7 所示, 可见富 Si 的 SiN 膜对器件的电流崩塌效应进行了有效的抑制.

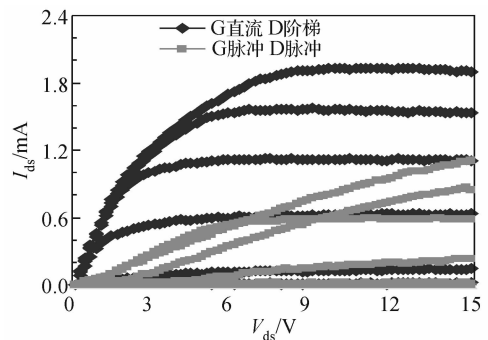


图 6 钝化前器件电流崩塌效应
Fig.6 Current collapse effect before passivation

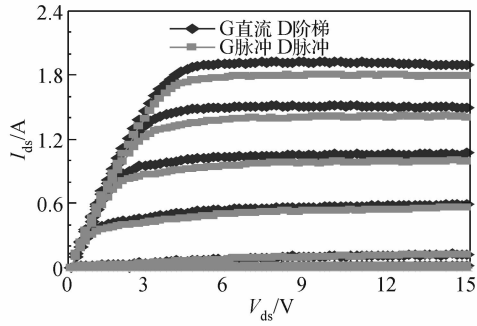


图 7 钝化后器件电流崩塌效应

Fig. 7 Current collapse effect after passivation

3.2 器件微波输出功率特性

利用负载牵引系统测量了小栅宽器件输出功率特性,如图 8 所示.由图可知,栅宽 $100\mu\text{m}$ 的器件,频率为 8GHz ,工作电压 V_{ds} 达到 40V ,器件输出功率为 30.1dBm (1.02W),功率密度为 $10.2\text{W}/\text{mm}$,功率增益为 9dB ,PAE 为 55% ,小栅宽器件实现了高输出功率密度特性.

利用微波测试系统对封装器件进行微波功率测试,单胞 2mm 栅宽器件功率特性曲线如图 9 所示,频率为 8GHz ,工作电压 V_{ds} 为 28V ,输出功率为 40.9dBm (12.3W),功率增益为 4.9dB ,PAE 为 35% .使用 Wiloge 一分四功率合成器对 2mm 器件进行内匹配测试,功率特性曲线如图 10 所示,频率为 8GHz ,工作电压 V_{ds} 为 27V 时,输出功率为 45.3dBm (33.8W),功率增益为 6.3dB ,PAE 为 41.77% .四胞内匹配器件漏电流大于单胞器件,在微波功率测试时将其栅电压进一步减小,其 PAE 比单胞器件大.该项技术的实施为大功率器件的实现和器件的实用化奠定了基础.

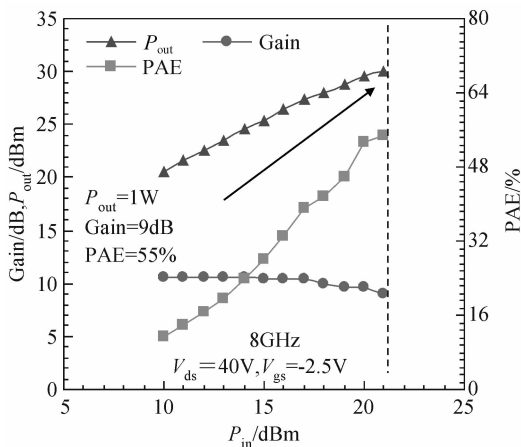


图 8 高功率密度器件功率特性

Fig. 8 Power characteristics of the high power density device

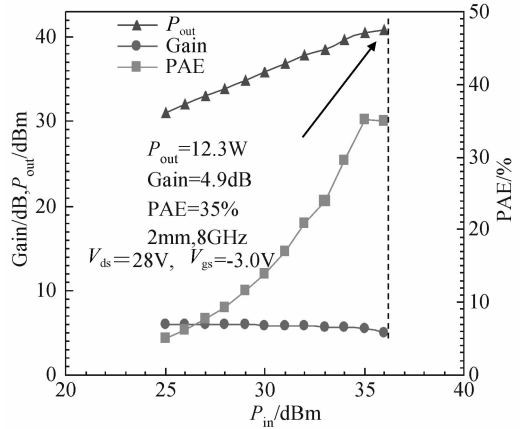


图 9 单胞 2mm AlGaIn/GaN HEMT 功率特性

Fig. 9 Power characteristics of single-cell AlGaIn/GaN HEMT

4 结论

采用自主研发的 SiC 衬底上 GaN HEMT 外延材料,优化了研制器件的欧姆接触、刻蚀技术及钝化工艺,研制出低欧姆接触、高击穿电压、大功率和大功率密度的 AlGaIn/GaN HEMT.器件电流崩塌小于 10% ,小栅宽器件,频率为 8GHz ,工作电压达到 40V ,连续波输出功率密度大于 $10\text{W}/\text{mm}$.单胞器件,频率为 8GHz , V_{ds} 为 28V 时,器件连续波输出功率为 12.3W ,功率增益为 4.9dB ,功率附加效率为 35% .四胞内匹配器件频率为 8GHz , V_{ds} 为 27V ,输入功率为 39dBm ,连续波输出功率为 45.3dBm (33.8W),功率增益为 6.3dB ,峰值功率附加效率 (PAE) 为 41.77% .器件单胞输出功率和总输出功率值为目前国内该种器件的最高输出功率值.

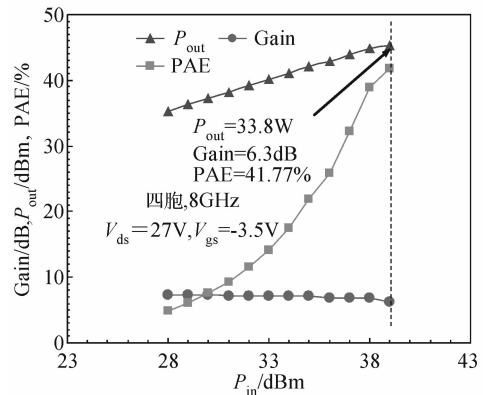


图 10 高输出功率 AlGaIn/GaN HEMT 输出功率特性

Fig. 10 Output power characteristics of high power AlGaIn/GaN HEMT

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, Saxler A, Moore M, et al. 30W/mm GaN HEMTs by field plate optimization. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25(3):117
- [3] Therrien R, Singhal S, Johnson J W, et al. A 36mm GaN-on-Si HEMT producing 368W at 60V with 70% drain efficiency. *International Electron Devices Meeting*, 2005:285
- [4] Zhang Zhiguo, Yang Ruixia, Wang Yong, et al. AlGaIn/GaN HFET with transconductance of over 325mS/mm. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(9):1789 (in Chinese) [张志国, 杨瑞霞, 王勇, 等. 跨导为 325mS/mm 的 AlGaIn/GaN HFET 器件. *半导体学报*, 2005, 26(9):1789]
- [5] 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]
- [6] Chen Tangsheng, Jiao Gang, Li Zhonghui, et al. AlGaIn/GaN MIS HEMT with AlN dielectric. *CS MANTECH Conference*, 2006:227

A Recessed AlGaIn/GaN HEMT with High Output Power in the X Band

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

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

(2 *The 13th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050051, China*)

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

Abstract: A high output power recessed AlGaIn/GaN HEMT on SiC substrate is fabricated. With the optimized process, the specific contact resistance is less than $1.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, the current collapse parameter is less than 10%, and the breakdown voltage is more than 80V. For the short gate-wide device, the operation voltage is up to 40V, and the output power density is more than 10W/mm at 8GHz. For the single-cell device, the output power is 12.3W at 8GHz, the gain is 4.9dB, and the PAE is 35%. For the four-cell internally matched device with 8mm total-gate, 33.8W output power is achieved at 8GHz, the gain is 6.3dB, and the PAE is 41.77%. The output power of single-cell and internally matched devices are currently the best in mainland China.

Key words: AlGaIn/GaN HEMT; high output power density; internally matched device

EEACC: 1350F; 2560P

Article ID: 0253-4177(2007)11-1773-04

† Corresponding author. Email: flying200016@163.com

Received 10 May 2007, revised manuscript received 29 May 2007