

# 高性能 1mm SiC 基 AlGaIn/GaN 功率 HEMT 研制\*

罗卫军<sup>1,2</sup> 陈晓娟<sup>2</sup> 李成瞻<sup>2</sup> 刘新宇<sup>2,†</sup> 和致经<sup>2</sup> 魏 珂<sup>2</sup> 梁晓新<sup>2</sup> 王晓亮<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 在 6H-SiC 衬底上, 外延生长了 AlGaIn/GaN HEMT 结构, 设计并实现了高性能 1mm AlGaIn/GaN 微波功率 HEMT, 外延材料利用金属有机物化学气相淀积技术生长. 测试表明, 该 1mm 栅宽器件栅长为  $0.8\mu\text{m}$ , 输出电流密度达到  $1.16\text{A}/\text{mm}$ , 跨导为  $241\text{mS}/\text{mm}$ , 击穿电压  $>80\text{V}$ , 特征频率达到  $20\text{GHz}$ , 最大振荡频率为  $28\text{GHz}$ .  $5.4\text{GHz}$  连续波测试下功率增益为  $14.2\text{dB}$ , 输出功率达  $4.1\text{W}$ , 脉冲条件测试下功率增益为  $14.4\text{dB}$ , 输出功率为  $5.2\text{W}$ , 两端口阻抗特性显示了在微波应用中的良好潜力.

**关键词:** AlGaIn/GaN; 高电子迁移率晶体管; 微波功率; 功率增益

**PACC:** 7280 **EEACC:** 2570

**中图分类号:** TN325+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2006)11-1981-03

## 1 引言

AlGaIn/GaN 是国际上广泛关注的新型宽禁带化合物半导体材料, 具有较宽的禁带宽度 (GaN  $3.4\text{eV}$ , AlN  $6.2\text{eV}$ ), 较高的击穿场强 ( $1\sim 3\times 10^{10}\text{V}/\text{cm}$ ), 高电子饱和漂移速率 ( $2.2\times 10^{10}\text{cm}/\text{s}$ ) 和良好的热稳定性. 与此同时, AlGaIn/GaN 异质结具有较大的导带不连续性, 又有强烈的自发极化与压电极化效应, 使得界面处的二维电子气 (2DEG) 可达到很高的密度. 因此, 凭借优良的材料特性及制作工艺的提高, GaN 基器件可达到比 GaAs 基器件大  $5\sim 10$  倍的微波功率密度. AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 在高频高温大功率领域具有十分引人瞩目的应用前景<sup>[1,2]</sup>. 目前国际上报道的  $36\text{mm}$  GaN 基 HEMT 器件在  $2.4\text{GHz}$  下输出功率可达  $368\text{W}$ <sup>[3]</sup>. 在  $35\text{GHz}$  下, 输出功率密度为  $4.13\text{W}/\text{mm}$ <sup>[4]</sup>. 国内报道的 AlGaIn/GaN HEMT 多基于蓝宝石衬底<sup>[5,6]</sup>. 由于蓝宝石衬底散热问题的限制, 使得器件的输出功率很难提高. 本文报道用 SiC 衬底 AlGaIn/GaN 异质结材料研制出的大尺寸 GaN HEMT 器件, 其栅长为  $0.8\mu\text{m}$ , 总栅宽为  $1\text{mm}$ , 器件跨导  $241\text{mS}/\text{mm}$ ,  $5.4\text{GHz}$  下连续波功率达  $4.1\text{W}$ , 脉冲波功率达  $5.2\text{W}$ .

## 2 器件结构与工艺

本文采用了中国科学院半导体研究所材料中心

GaN 课题组研制的非掺杂 AlGaIn/GaN HEMT 外延材料. 材料采用金属有机物化学气相淀积技术 (MOCVD) 在半绝缘 6H-SiC 衬底上制备, 结构如图 1 所示.

AlGaIn 20% UID 20nm
GaN 高迁移率 100nm
GaN UID $3\mu\text{m}$
AlN UID 20nm
SI 6H-SiC

图 1 AlGaIn/GaN HEMT 截面示意图  
Fig.1 Schematic structure of the AlGaIn/GaN HEMT

材料结构为  $20\text{nm}$  的 AlN 成核层,  $3\mu\text{m}$  的 GaN 缓冲层,  $100\text{nm}$  的高迁移率 GaN 层,  $20\text{nm}$  的不掺杂 AlGaIn, Al 组分 20% 左右. 霍尔测试得出室温下二维电子气的浓度为  $1.0\times 10^{13}/\text{cm}^2$ , 迁移率为  $1900\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ .

器件隔离使用高能 He 离子注入实现. 源漏电极欧姆接触采用 Ti/Al/Ti/Au 金属结构, 并在  $750^\circ\text{C}$   $\text{N}_2$  氛围中退火 50s, 传输线测试得到欧姆接触电阻约为  $0.5\sim 0.7\Omega\cdot\text{cm}$ , 比接触电阻率为  $10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}^2$  量级, 并且具有良好的形貌. 栅电极采用 Pt/Ti/Au, 栅长  $0.8\mu\text{m}$ , 栅宽  $1\text{mm}$ , 源漏间距  $4\mu\text{m}$ . 整个器件使用电镀工艺将布线金属加厚至  $2.5\mu\text{m}$ , 并使用电镀空气桥实现源区的连接, 减小了栅源寄生电容. 并以  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化以改善电流崩塌效应, 器件

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2002CB311903, G20000683) 及中国科学院重点创新 (批准号: KGCX2-SW-107) 资助项目

† 通信作者. Email: xyliu@ime.ac.cn

2006-04-20 收到, 2006-05-18 定稿

的最终形貌如图 2 所示.此外,在器件背面电镀一层金属以利于器件的散热和封装,采用金丝键合的方式将管芯封装在管壳中进行功率测试.

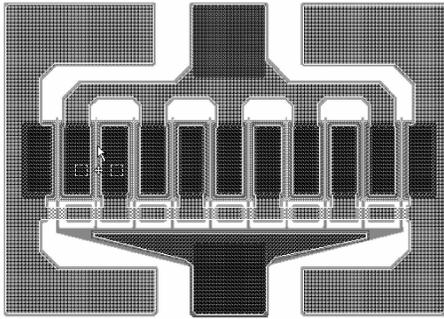


图 2 栅长 0.8 $\mu\text{m}$  的 1mm AlGaIn/GaN HEMT 功率器件  
Fig.2 Photo of power device with total gate width 1mm and gate length 0.8 $\mu\text{m}$

### 3 结果与讨论

采用 HP 4155 对器件进行直流特性测试,测试结果分别如图 3 和图 4 所示.  $I$ - $V$  特性测试条件为栅电压( $V_{gs}$ )  $-5 \sim +1\text{V}$ ,源漏偏压  $0 \sim 10\text{V}$ .测试结果如图 3 所示,器件的最大饱和电流约为 1.16A,折合电流密度约为 1.16A/mm,截止电压约为  $-5\text{V}$ .

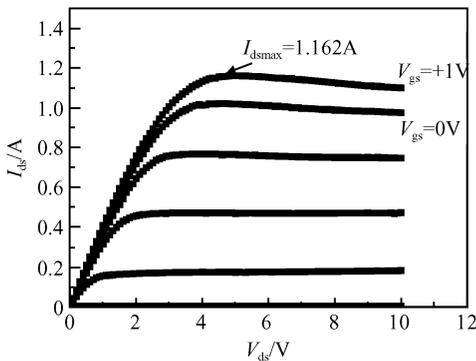


图 3 1mm AlGaIn/GaN HEMT 功率器件  $I$ - $V$  特性  
Fig. 3  $I$ - $V$  characteristics of AlGaIn/GaN power HEMT with total gate width 1mm

由图 3 可见,由于 SiC 衬底的导热系数 ( $4.49\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ ) 优于蓝宝石衬底的导热系数 ( $0.3\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ ),因而 SiC 基 GaN HEMT 器件的自热效应得到一定程度的改善,表现在随着源漏电压  $V_{ds}$  的增大,源漏电流  $I_{ds}$  没有出现陡峭的下降趋势.这表明 SiC 衬底器件的散热性能较好,热阻较小,适宜在大功率条件下工作.

器件的跨导特性如图 4 所示,偏置条件为源漏电压( $V_{ds}$ )  $7\text{V}$ ,栅源电压( $V_{gs}$ )  $-5 \sim 2\text{V}$ ,从图中可见,钝化后器件跨导( $g_m$ )的峰值达到  $241\text{mS}/\text{mm}$ .

器件的高频特性测试采用 HP 8510C 网络分析仪与 Agilent ICCAP 系统,测试源漏电压  $V_{ds} =$

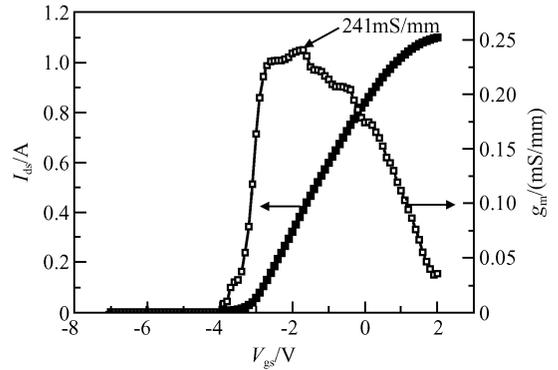


图 4 1mm 器件传输与跨导特性  
Fig.4 Transfer and transconductance characteristics of the device with total gate width 1mm

$20\text{V}$ ,栅电压  $V_{gs} = -3\text{V}$ ,正向电流增益( $H_{21}$ )和最大功率可用增益(MAG)分别如图 5 所示.从图 5 可知,特征频率( $f_T$ )约为  $20\text{GHz}$ ,最大振荡频率( $f_{max}$ )约为  $28\text{GHz}$ ,去嵌后可达到  $f_T = 23\text{GHz}$ ,  $f_{max} = 30\text{GHz}$ .可见,总栅宽为 1mm 的 AlGaIn/GaN HEMT 器件显示了良好的频率特性.

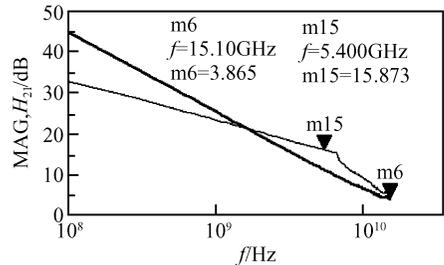


图 5 正向电流增益( $H_{21}$ )和最大可用功率增益(MAG)  
Fig.5 Forward current gain( $H_{21}$ ) and maximum available gain versus frequency

利用 Load-Pull 功率测试系统对封装好的 1mm 栅宽 SiC 基 AlGaIn/GaN HEMT 器件的大信号微波功率特性进行测试,结果如图 6 所示.在  $V_{gs} = -3.5\text{V}$ ,  $V_{ds} = 30\text{V}$  的偏置点,工作频率为  $5.4\text{GHz}$ ,输出信号为连续波的条件,最大输出功率为  $36.17\text{dBm}$ ,即  $4.1\text{W}$ ,功率增益为  $14.2\text{dB}$ .在输出信号为占空比 10% 的脉冲信号下,最大输出功率为  $37.2\text{dBm}$ ,即  $5.2\text{W}$ ,功率增益为  $14.4\text{dB}$ .这是目前基于国内 AlGaIn/GaN HEMT 外延技术和器件制作技术的最高输出功率和功率增益.由脉冲功率测试可见,器件在脉冲信号下,器件的热阻减少,功率增益和输出功率都得到提高.

通过该 1mm 器件两端口  $S$  参数的分析可知, $5.4\text{GHz}$  时器件的输出端口阻抗值实部和虚部都较大(约  $50\Omega$ ).因此,该 AlGaIn/GaN HEMT 器件的阻抗转换比( $Z_L/Z_s$ )较小,匹配网络的设计相对容易,并更容易实现宽频放大.

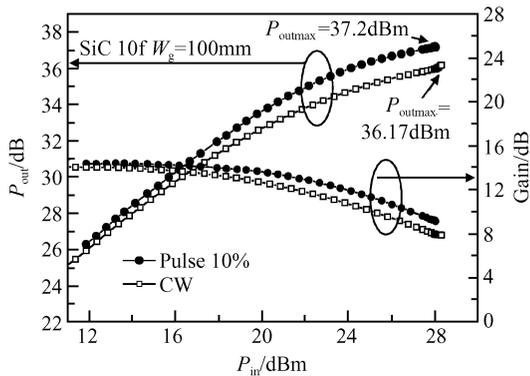


图 6 1mm 栅宽 SiC AlGaIn/GaN HEMT 功率特性

Fig. 6 Power characteristics of SiC AlGaIn/GaN HEMT with total gate width 1mm

## 4 结论

在 6H-SiC 衬底上, 外延生长了 AlGaIn/GaN HEMT 结构, 设计并实现了高性能 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN 微波功率 HEMT, 器件栅长  $0.8\mu\text{m}$ , 跨导达到  $241\text{mS/mm}$ , 微波测试表明, 特征频率为  $20\text{GHz}$ , 最高振荡频率为  $28\text{GHz}$ , 两端口  $S$  参数显示该 1mm AlGaIn/GaN 功率器件具有较高的端口阻抗, 便于匹配网络的实现.  $5.4\text{GHz}$  下, 器件连续

波输出功率达  $4.1\text{W}$ , 功率增益为  $14.2\text{dB}$ ; 脉冲波输出功率达  $5.2\text{W}$ , 功率增益为  $14.4\text{dB}$ , 显示了良好的微波应用前景. 这是目前基于国内 AlGaIn/GaN HEMT 材料外延技术和器件制作工艺技术所取得的最高输出功率和功率增益.

## 参考文献

- [1] Wu Y F, Kapolnek D, Ibbetson J P, et al. Very-high power density AlGaIn/GaN HEMT. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48:586
- [2] Sheppard S T, Doverspike K, Pribble W L, et al. High power microwave GaN/AlGaIn HEMT's on silicon carbide. *IEEE Electron Device Lett*, 1999, 20:161
- [3] Therrien R, Singhal S, Johnson J W, et al. A  $36\text{mm}$  GaN-on-Si HFET producing  $368\text{W}$  at  $60\text{V}$  with  $70\%$  drain efficiency. *IEEE Electron Devices Meeting*, 2005:568
- [4] Lee G, Saunier P, Yang Jinwei. AlGaIn/GaN HEMT on SiC with CW power performance of  $>4\text{W/mm}$  and  $23\%$  PAE at  $35\text{GHz}$ . *IEEE Electron Device Lett*, 2003, 24(10):616
- [5] Xiao Dongping, Liu Jian, Wei Ke. High transconductance AlGaIn/GaN HEMT grown on sapphire substrates. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(9):907
- [6] Chen Tangsheng, Jiao Gang, Xue Fangshi, et al. Undoped AlGaIn/GaN microwave power HEMT. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(1):69 (in Chinese) [陈堂胜, 焦刚, 薛舫时, 等. 非掺杂 AlGaIn/GaN 微波功率 HEMT. *半导体学报*, 2004, 25(1):69]

## Fabrication of a High-Performance 1mm AlGaIn/GaN HEMT on SiC Substrate\*

Luo Weijun<sup>1,2</sup>, Chen Xiaojuan<sup>2</sup>, Li Chengzhan<sup>2</sup>, Liu Xinyu<sup>2,†</sup>, He Zhijing<sup>2</sup>, Wei Ke<sup>2</sup>, Liang Xiaoxin<sup>2</sup>, and Wang Xiaoliang<sup>1</sup>

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

(2 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** This paper reports a high-performance AlGaIn/GaN HEMT with 1 mm gate width on 6H-SiC substrate. The epitaxial materials of the device are grown with metal organic chemical vapor deposition. Test results indicate that the gate length of the device is  $0.8\mu\text{m}$ , the output current density is  $1.16\text{A/mm}$ , the transconductance is  $241\text{mS/mm}$ , the breakdown voltage is greater than  $80\text{V}$ , the current gain cutoff frequency reaches  $20\text{GHz}$ , and the power gain cutoff frequency is  $28\text{GHz}$ . The power gain of a continuous wave at  $5.4\text{GHz}$  is  $14.2\text{dB}$ , with an output power of  $4.1\text{W}$ , while the corresponding results of pulsed power test are  $14.4\text{dB}$  and  $5.2\text{W}$ . Two ports impedance characteristics demonstrate good potential in microwave applications.

**Key words:** AlGaIn/GaN; HEMT; microwave power; power gain

**PACC:** 7280 **EEACC:** 2570

**Article ID:** 0253-4177(2006)11-1981-03

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Nos. 2002CB311903, G20000683) and the Funds of the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering (No. KG CX2-SW-107)

† Corresponding author. Email: xyliu@ime.ac.cn

Received 20 April 2006, revised manuscript received 18 May 2006