

利用电子束光刻技术实现 200 nm 栅长 GaAs 基 MHEMT 器件

徐静波, 张海英, 王文新, 刘亮, 黎明, 付晓君, 牛洁斌, 叶甜春

① 中国科学院微电子研究所, 北京 100029;

② 中国科学院物理研究所, 北京 100080

E-mail: xujingbo@ime.ac.cn

2007-09-24 收稿, 2007-12-27 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: G2002CB311901)、装备预先研究项目(编号: 61501050401C)和中国科学院微电子研究所所长基金(编号: O6SB124004)资助项目

摘要 电子束光刻(electron beam lithography)技术是实现微细栅长的光刻技术之一, 利用电子束光刻技术制备出 200 nm 栅长 GaAs 基 MHEMT 器件. 同时为了减少栅寄生电容和寄生电阻, 采用 3 层胶工艺, 实现了 T 型栅. GaAs 基 MHEMT 器件获得了优越的直流、高频和功率性能, 电流增益截止频率和最大振荡频率分别达到 105 和 70 GHz, 为进一步研究高性能 GaAs 基 MHEMT 器件奠定了基础.

关键词

电子束光刻

应变高电子迁移率晶体管

T 型栅

电流增益截止频率

近年来, 微波/毫米波高速数据传输和宽带应用的需要日益增长, 例如高速光纤传输系统(40 Gbit/s)^[1], 微波点对点无线电通信系统^[2], 本地多点分配业务^[3,4], Ka波段的卫星通信^[5], 77 GHz的汽车防撞雷达^[6,7]等领域, 极大地推动了微电子产业的进步.

GaAs 基 PHEMT(赝配高电子迁移率晶体管, pseudomorphic high electron mobility transistor)和InP基HEMT(高电子迁移率晶体管, high electron mobility transistor)已被公认为在微波/毫米波低噪声、高功率应用领域具有很大的优势^[8~10]. GaAs工艺较为成熟, 已有代工厂(foundry)提供加工业务. PHEMT沟道In组分一般不超过 25%, 而InP基HEMT由于InGaAs沟道的In组分可以达到 53%, 具有更高的电子迁移率和二维电子气密度, 所以器件性能比GaAs基PHEMT更为优越. 然而, InP衬底较脆易碎, 芯片尺寸小, 工艺加工难度大, 难以大批量生产, 成本昂贵.

GaAs 基 MHEMT(应变高电子迁移率晶体管, metamorphic high electron mobility transistor)是指在GaAs衬底上生长InP基HEMT的外延结构. 通过In组分渐变的缓冲层减缓GaAs衬底与外延结构之间的应

力, MHEMT结合了InP基HEMT优越的器件性能和成熟的GaAs大尺寸芯片加工工艺的优点^[11,12], 在毫米波频率范围内的低噪声、高功率领域有着非常重要的应用价值. MHEMT器件的 f_T (电流增益截止频率)和 f_{max} (最大振荡频率)主要受栅长的影响. 随着器件特征尺寸向深亚微米方向的发展, 常规的光学光刻技术已无法适应新的光刻工艺要求. 为了实现深亚微米的栅线条, 一方面, 逐渐减小曝光波长, 由紫外谱g线(436 nm)→i线(365 nm)→248 nm→193 nm→极紫外光(EUV)→X射线; 另一方面, 开发出离子束曝光、电子束曝光等非光学光刻技术. 这其中, 电子束光刻技术具有波长短、焦深长、分辨率高等优点.

1988 年, 首次报道了利用电子束光刻技术制备了 120 nm栅长GaAs基InAlAs/InGaAs MHEMT^[13]. 最新的报道已制备出 35 nm T型栅的MHEMT器件, f_T 和 f_{max} 分别达到 440 和 520 GHz^[14]. 目前, 国内在此领域的研究还处于起步阶段. 已报道的MHEMT器件均采用光学光刻技术, 栅长一般在 1.0 μm 左右, 这严重制约了MHEMT的器件性能^[15~17].

本文中, 我们利用电子束光刻技术实现了 200 nm

T型栅的GaAs基MHEMT器件, 获得了优越的DC和低频性能, 同时, 还测量了不同频率下MHEMT器件的功率性能. 跨导(g_m)、最大饱和漏电流密度(J_{DSS})、阈值电压(U_T)、关态源漏击穿电压(U_B)、 f_T 和 f_{max} 分别为504 mS/mm, 623 mA/mm, -1.8 V, 2.4 V, 105和70 GHz. 8 GHz下, 输入功率为-0.88 (2.11) dBm时, 输出功率、增益、PAE、输出功率密度分别为14.05(13.79)dBm, 14.9(11.68)dB, 67.74 (75.1)%, 254(239) mW/mm.

1 器件制备

MHEMT外延片由中国科学院物理研究所提供, 利用MBE技术外延生长. GaAs衬底上依次生长300 nm GaAs, 1000 nm In组分渐变的应变缓冲层, 18 nm $In_{0.6}Ga_{0.4}As$ 沟道, 4 nm $In_{0.52}Al_{0.48}As$ 空间隔离层, Si平面掺杂层, 18 nm $In_{0.52}Al_{0.48}As$ 势垒层和20 nm $N+In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 盖帽层.

利用中国科学院微电子研究所化合物半导体工艺线制备了GaAs基MHEMT器件. GaAs MHEMT外延材料和器件结构如图1(a)所示. 蒸发Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au作为源漏电极金属, 经常规剥离工艺和合金后, 形成欧姆接触的源漏电极. 利用磷酸系溶液($H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$)进行台面隔离, 互连金属为Ti/Au, 以上步骤中均采用光学光刻方式确定线条. 利用电子束光刻技术和3层光刻胶(PMMA/PMGI/PMMA)实现了200 nm的T型栅. PMMA C2胶作为底层, PMGI胶作为中间层, PMMA作为顶层. 柠檬酸系(citric acid: H_2O_2)溶液腐蚀栅槽, 栅金属为Ti/Pt/Au.

MHEMT器件的平面照片如图1(b)所示. 从平面照片中可以看到台面和源、漏、栅3个电极以及在源漏间距中间的细栅线条. 图1(c)为200 nm T型栅的SEM图片. 栅寄生电容和寄生电阻与栅脚长度、栅帽长度和栅干高度等参量有关, 从SEM照片中可以清晰地看到T型栅的轮廓, 栅脚的长度约为200 nm, 栅帽长度约为400 nm, 栅干高度约为150 nm.

2 器件性能

2.1 直流性能

利用Agilent 8510C测试了MHEMT的DC和高频性能. 200 nm栅长的MHEMT(100 μ m栅宽)显示出优越的器件性能. 器件的转移特性曲线和跨导特性曲线如图2(a)所示. 漏电压偏置固定为2.0 V, 从转移特性曲线可以看出, 当栅压小于-1.8 V时, 漏电流密

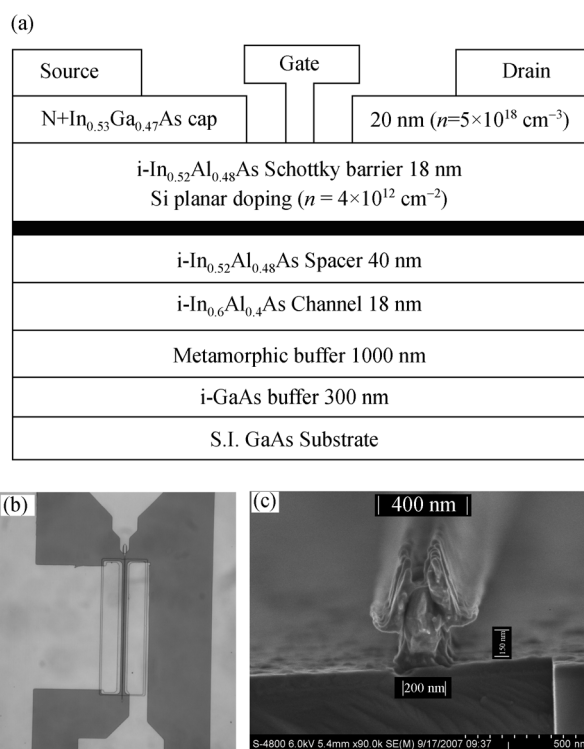


图1 GaAs MHEMT外延材料和器件结构、器件照片以及200nm T型栅的SEM图

(a) GaAs MHEMT外延材料和器件结构的示意图; (b) MHEMT器件的平面照片; (c) 200 nm T型栅的SEM图, 栅脚、栅帽、栅干长度分别为200, 400和150 nm

度很小, 几乎没有变化; 当栅压在-1.8~0.1 V之间时, 漏电流密度急剧增加, 则器件的夹断电压为-1.8 V; 当栅压大于0.1 V时, 漏电流密度的增加趋于平缓, 变化不大. 从跨导特性曲线可以看出, 栅压在小于-1.8 V和大于0.1 V的两个区间内, 变化不明显; 栅压在-1.8~-1.0 V区间, 跨导急剧增加; 栅压为-1.0 V时, 非本征跨导达到最大值504 mS/mm; 栅压在-1.0~0.1 V区间, 跨导急剧减小. 器件的 $I-U$ 特性曲线如图2(b)所示, 反应了栅压和漏压均变化的情况下器件的性能. 漏电压扫描范围为0.0~2.0 V, 栅电压扫描范围为-2.0~0.7 V, 步长为0.3 V. $I-U$ 曲线与转移特性曲线的变化趋势是相符的. 栅压为-2.0和-1.7 V的 $I-U$ 曲线, 差别不大; 栅压为-1.4, -1.1, -0.8, -0.5 V和-0.2 V的5条 $I-U$ 曲线, 依次上升, 变化很大; 栅压为0.1, 0.4, 0.7 V的 $I-U$ 曲线, 稍有增加. 膝点电压为0.75 V, 最大漏电流密度为623 mA/mm. MHEMT器件的关态源漏击穿电压如图2(c)所示, 栅电压偏置为-2.0 V, 小于夹断电压, 此时沟道处于截止状态. 随着漏电压

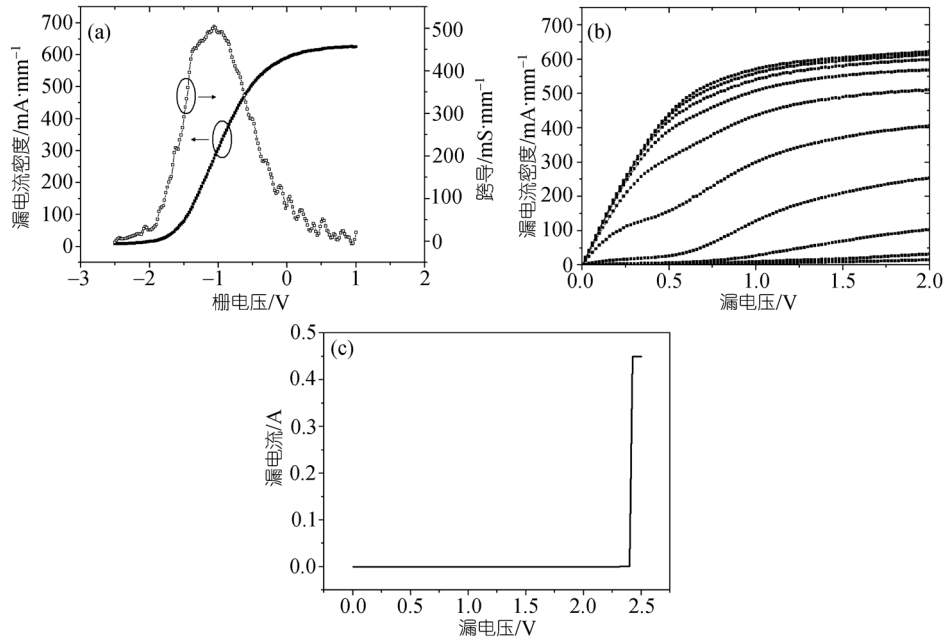


图2 MHEMT器件的DC性能

(a) 器件的转移特性曲线和跨导特性曲线, 实心点为转移特性的数据, 空心点为跨导特性的数据; (b) 器件的 I - U 特性曲线; (c) MHEMT 器件的关态源漏击穿特性曲线

的增加, 电场逐渐增强, 当漏电压为 2.4 V 时, 沟道电流突然急剧增加, 器件被击穿。

2.2 频率性能

利用网络分析仪和微波探针在片测试了 MHEMT 器件的 S 参数, 仪器校准范围为 0.1~15.1 GHz, 并利用 open 和 short 两步去嵌, 消除了寄生影响。漏压为 1.0 V, 栅压为 -1.0 V 时, MHEMT 器件的高频性能如图 3 所示。图中实线为电流增益随频率变化的测试数据, 以 -20 dB/10 倍频程斜率外推, 得到

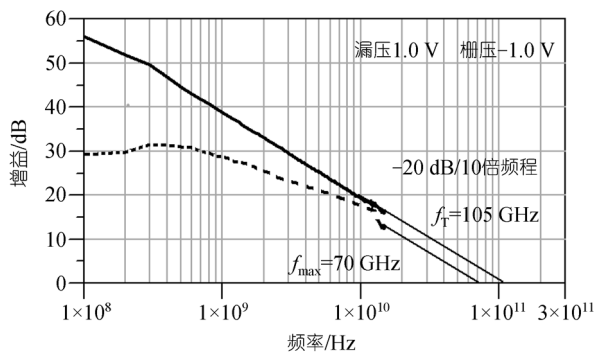


图3 MHEMT器件的高频性能

实线为电流增益随频率变化的测试数据, 外推得到 f_T 约为 105 GHz; 虚线为最大增益和频率的关系, 外推得到 f_{max} 约为 70 GHz

f_T 约为 105 GHz; 虚线为最大增益和频率的关系, 在 0.1~15.1 GHz 范围内的曲线是由相应的电流增益数据推算而来, 同样以 -20 dB/10 倍频程斜率外推, 得到 f_{max} 约为 70 GHz。

2.3 功率性能

利用 load-pull 测试系统测量了 8, 26, 35 和 40 GHz 下, MHEMT(100 μ m 栅宽)的功率性能。栅电压和漏电压分别固定为 -1.0 和 2.0 V, 详细的测试结果如图 4 和表 1 所示。在 8 GHz 下获得了优越的功率性能, 输入功率为 -0.88 dBm 时, 最大输出功率为 14.05 dBm, 增益为 14.9 dB, PAE 为 67.7%, 输出功率密度为 254 mW/mm; 输入功率为 2.11 dBm 时, 最大输出功率为 13.79 dBm, 增益为 11.68 dB, 最大 PAE 为 75.1%, 输出功率密度为 239 mW/mm。

3 结论

利用电子束技术实现了 200 nm T 型栅 GaAs 基 MHEMT 器件, 并获得了优越的直流、高频和功率性能。 g_m , J_{DSS} , U_T , U_B , f_T 和 f_{max} 分别为 504 mS/mm, 623 mA/mm, -1.8 V, 2.4 V, 105 和 70 GHz。8 GHz 下, 输入功率为 -0.88 dBm 时, 最大输出功率、最大增益、

表 1 不同频率下 MHEMT 器件的功率性能

频率/GHz	输入功率/dBm	输出功率/dBm	增益/dB	功率附加效率(%)
8.0	-0.88	14.05	14.9	67.7
	2.11	13.79	11.68	75.1
26.0	9.0	12.8	3.76	35.5
35.0	6.7	11.2	4.52	19.4
40.0	3.0	5.6	2.6	3.6

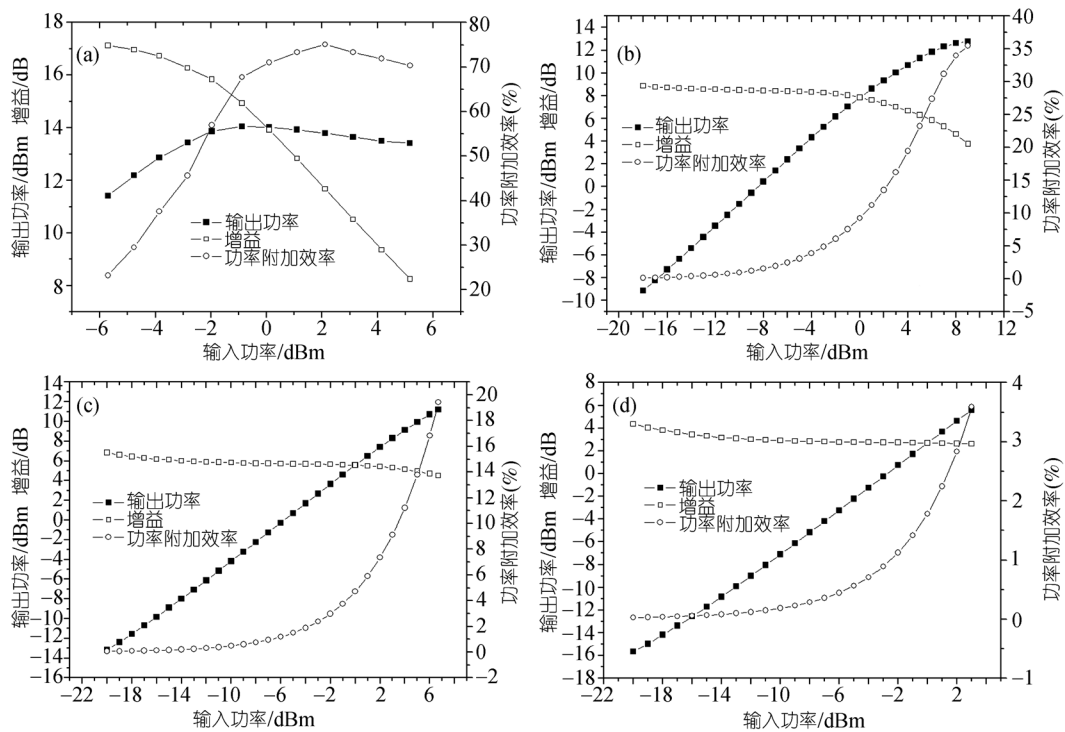


图 4 GHz 下 MHEMT 器件的功率性能

(a) 8 GHz 下 MHEMT 器件的功率性能; (b) 26 GHz 下 MHEMT 器件的功率性能; (c) 35 GHz 下 MHEMT 器件的功率性能; (d) 40 GHz 下 MHEMT 器件的功率性能

最大输出功率密度分别为 14.05 dBm, 14.9 dB, 254 mW/mm; 输入功率为-2.11 dBm 时, 最大功率附加效率为 75.1%. 如果优化 MHEMT 外延结构和制备工艺, 器件性能可以得到进一步的提高.

参考文献

- 1 Ying C H, Sun T L, Hsuan C L, et al. The design and deployment of 40Gbit/s experimental network. Communications, In: Circuits and Systems Proceedings, 2006 International Conference on Vol.3, June 25-28, 2006. 1923—1927
- 2 Brehm G E. Trends in Microwave/Millimeter-Wave Front-End Technology. In: European Microwave Integrated Circuits Conference, Sept 1, 2006. 1—4
- 3 Mahonen P, Saarinen T, Shelby Z, et al. Wireless Internet over LMDS: architecture and experimental implementation. IEEE Commun Mag, 2001, 39(5): 126—132 [\[DOI\]](#)
- 4 Nordbotten A. LMDS systems and their application. IEEE Commun Mag, 2000, 38(6): 150—154 [\[DOI\]](#)

- 5 Bodereau F, Miquel C, Debarge C, et al. Ka band converter assemblies for next telecommunication satellites. In: 2005 European Microwave Conference, Vol.2, Oct 4-6, 2005
- 6 Kyoungwoon K, Wooyeol C, Sungwon K, et al. A 77 GHz Transceiver for Automotive Radar System Using a 120nm In_{0.4}AlAs/In_{0.35}GaAs Metamorphic HEMTs. In: IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, Nov, 2006. 201—204
- 7 Nicolson S T, Tang K A, Yau K H K, et al. A Low-Voltage 77 GHz Automotive Radar Chipset. In: IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, June 3-8, 2007. 487—490
- 8 Yoshimi Y, Akira E, Keisuke S, et al. Pseudomorphic In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.7}Ga_{0.3}As HEMTs With an Ultrahigh f_T of 562 GHz. IEEE Elec Dev Lett, 2002, 23(10): 573—575 [\[DOI\]](#)
- 9 Leuther A, Weber R, Dammann M, et al. Metamorphic 50nm InAs-channel HEMT. In: Indium Phosphide and Related Material, May, 2005. 129—132
- 10 Chanh N, Miroslav M. The state-of-the-art of GaAs and InP power devices and amplifiers. IEEE Trans on Elec Dev, 2001, 48(3): 472—478 [\[DOI\]](#)
- 11 Campos R Y, Schworer C, Leuther A, et al. G-band metamorphic HEMT-based frequency multipliers. IEEE Trans Micr Theo Techn, 2006, 54(7): 2983—2992 [\[DOI\]](#)
- 12 Tessmann A. 220 GHz metamorphic HEMT amplifier MMICs for high resolution imaging applications. IEEE J Solid-State Circ, 2005, 40(10): 2070—2076 [\[DOI\]](#)
- 13 Wang G W, Chen Y K, Schaff W J, et al. A 0.1 μm gate In_{0.5}Al_{0.5}As/In_{0.5}Ga_{0.5}As MODFET fabricated on GaAs substrates. IEEE Trans Elec Dev, 1988, 35(7): 818—823 [\[DOI\]](#)
- 14 Kang S L, Young S K, Yun K H, et al. 35 nm zigzag T-Gate In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As metamorphic GaAs HEMTs with an ultrahigh f_{max} of 520 GHz. IEEE Elec Dev Lett, 2007, 28(8): 672—675
- 15 石华芬, 刘训春, 张海英, 等. 0.25 μm GaAs 基 MHEMT 器件. 半导体学报, 2004, 25(3): 325—328
- 16 陈效建, 吴旭, 李拂晓, 等. Pt 基埋栅势垒 GaAs 基增强型 InAlAs/InGaAs 改性高电子迁移率晶体管. 半导体学报, 2004, 25(9): 1137—1142
- 17 李献杰, 教金平, 曾庆明, 等. GaAs 基 InAlAs/InGaAs MHEMT 直流特性研究. 固体电子学研究进展, 2002, 22(2): 235—237