

高功率密度自对准结构 AlGaAs/GaAs 异质结双极晶体管*

严北平 张鹤鸣 戴显英

(西安电子科技大学微电子学研究所, 西安 710071)

摘要: 利用各向异性的湿法刻蚀和侧墙隔离技术实现了发射极金属和基极金属的自对准, 采用该自对准技术成功地研制出了自对准结构的 AlGaAs/GaAs 异质结双极晶体管, 器件直流电流增益大于 20, 电流增益截止频率 f_T 大于 30GHz, 最高振荡频率 f_{max} 大于 50GHz, 连续波功率测量表明: 在 1dB 增益压缩时, 单指 HBT 可以提供 100mW 输出功率, 对应的功率密度为 6.67W/mm, 功率饱和时最大输出功率 112mW, 对应功率密度为 7.48W/mm, 功率附加效率为 67%.

关键词: 自对准结构 HBT; 异质结

EEACC: 2606J; 0170E

中图分类号: TN322⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)02-0247-04

1 引言

AlGaAs/GaAs 异质结构双极晶体管(HBT)具有许多内在的优点, 例如载流子渡越时间短^[1], 大电流处理能力强^[2], 随 V_{BE} 呈指数变化的跨导^[3]以及只通过集电极外延层设计就可以控制的击穿电压等^[4]. 由于上述优点, GaAs HBT 作为新一代的微波和毫米波有源器件在空间技术、精密制导、智能武器以及雷达通讯等军事技术领域有着广泛的应用前景. 为了实现高性能的 HBT, 必须减小集电极电容, 因此发展自对准技术是实现高性能 HBT 的必由之路, 虽然有关 HBT 自对准技术已有报道^[5-8], 但是关键性的技术细节并不能得到. 本文利用各向异性的湿法刻蚀和侧墙隔离技术实现了发射极金属和基极金属的自对准, 采用该自对准技术成功地研制出了自对准结构的 AlGaAs/GaAs 异质结双极晶体管. 器件不但呈现良好的直流和高频特性, 而且具有优良的功率特性.

2 器件制造

HBT 材料是用 MOCVD 技术生长的, 处延层材料结构如下: 半绝缘衬底上生长 600nm 厚 n^+ -GaAs 子集电区, 掺杂浓度 $4.5 \times 10^{18}/cm^3$; 500nm n^- -GaAs 集电区, 掺杂浓度 $5 \times 10^{16}/cm^3$; 100nm p^+ -GaAs 基区, 碳掺杂浓度 $4 \times 10^{19}/cm^3$; 180nm Al_xGa_{1-x}As 发射区, 其中两端各有 30nm 的 Al 组分抛物缓变层, 掺杂浓度均为 $5 \times 10^{17}/cm^3$; 80nm n^+ -GaAs 帽层, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}/cm^3$; 20nm In_{0.15}Ga_{0.85}As 接触层, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}/cm^3$.

器件制造主要流程如图 1 所示, 在完成质子隔离以后, 电子束分层蒸发发射极金属 Au/Ge/Ni/Au, 并剥离. 发射极金属随后被用作自然掩膜湿法刻蚀掉发射极台以外的区域直到基区表面. 由于利用了晶体各向异性的特性, 故刻蚀后发射极台面形成了倒台结构, 然后 PECVD 淀积 SiN, 随后用 RIE 刻蚀 SiN, 控制刻蚀条件保证在发射极台面两侧留

* 国家自然科学基金资助项目(No. 69676033).

严北平 男, 1960 年出生, 博士, 副教授, 中国电子学会高级会员, 主要从事微电子技术专业教学和半导体器件及器件物理研究.

张鹤鸣 男, 1947 年出生, 副教授, 中国电子学会高级会员, 主要从事微电子技术专业教学和器件物理及功率器件研究.

戴显英 男, 1961 年出生, 高级工程师, 中国电子学会高级会员, 主要从事微电子技术专业教学和半导体器件及器件物理研究.

下侧墙, 而其余部分的 SiN 被刻蚀掉。在侧墙形成以后, 光刻基区, 接着电子束蒸发基极接触金属 Ti/Pt/Au。剥离后即形成发射极金属和基极金属的自对准, 侧墙的作用是防止基极金属和发射极台面之间短路。接下来光刻集电区并湿法刻蚀到集电极, 电子束分层蒸发集电极接触金属 Au/Ge/Ni/Au, 接触金属在 400°C 下合金 10s。最后, 互连金属 Ti/Au 被用于连接三个不同的电极, 最终器件的 SEM 照片如图 2 所示。

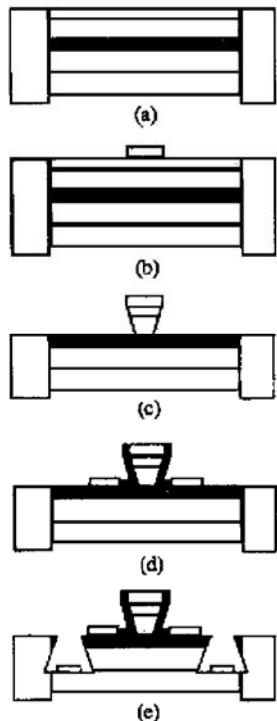


图 1 自对准结构 HBT 的主要制造工艺流程图 (a) 质子注入隔离; (b) 发射极接触形成; (c) 发射极台面刻蚀; (d) 侧墙隔离及自对准形成基极电极; (e) 集电极刻蚀及集电极电极形成
FIG. 1 Fabrication Procedure of Self-Aligned HBT
(a) Proton Implantation Isolation, (b) Emitter Contact Formation, (c) Emitter Mesa Etching, (d) Sidewall and Self-Aligned Base Contact Formation, (e) Base Mesa Etching and Collector Contact Formation.

3 器件特性

器件的直流特性是利用 HP4155 半导体参数分析仪测量的。图 3 表明典型的共发射极 $I-V$ 特性, 器件面积为 $3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, 直流电流增益大于 20。大电流下器件展现出较小的拐点电压 (Knee Voltage), 这对于功率应用是非常有利的, 这是因为拐点电压



图 2 自对准结构 HBT 的 SEM 照片

FIG. 2 SEM Photograph of the Self-Aligned HBT

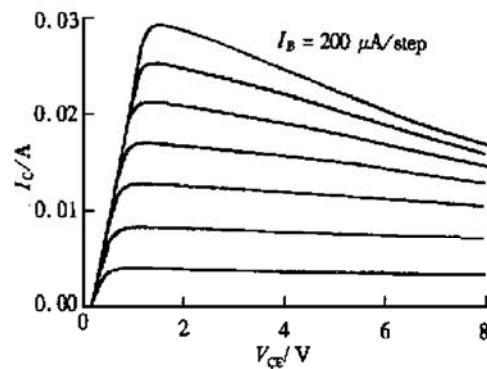


图 3 自对准结构 HBT 的共发射极 $I-V$ 特性曲线

FIG. 3 Common Emitter $I-V$ Characteristics of the Self-Aligned HBT

是决定最大输出功率和功率附加效率的关键因素^[9]。图 4 给出了测量出的 Gummel 曲线, 可以看到三个明显不同的区域。一般来说, 增加基区掺杂浓度

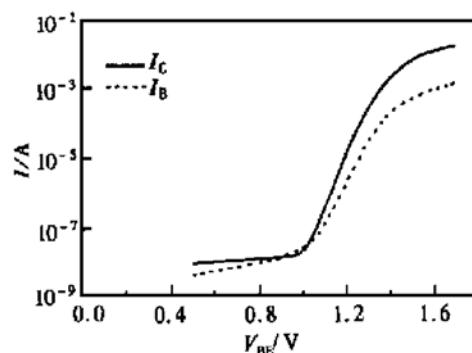


图 4 自对准结构 HBT 的 Gummel 特性曲线

FIG. 4 Gummel Curve of the Self-Aligned HBT

将会降低基区少子寿命, 从而增大基区复合电流, 当基区掺杂浓度 $\geq 4 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, 基区体内复合将占优势, 理想因子 n 接近于 1, 相反当基区掺杂浓度 $<$

$1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, 占优势的复合电流将是发射结空间电荷区的复合电流, 理想因子 n 接近于 2, 发射结空间电荷区的复合电流的大小严格依赖于载流子寿命, 即发射极材料的质量. 在低集电极电流下 ($I_c < 10^{-7}$ A), 基极电流 I_B 随 V_{BE} 缓慢增加, 理想因子很大, 此时基极电流主要是发射结空间电荷区的复合电流, 基区电流很小, 这反映发射极材料质量良好. 在 $I_c > 10^{-7}$ A, 基极电流 I_B 随 V_{BE} 以理想因子 $n = 1.1$ 增加, 表明此时基极电流的主要成份是基区内复合电流, 在高电流下, I_B 和 I_c 达到饱和, 这是由于在电极接触电阻上电压降引起的. 图 5 给出了高频小信号特性的测量结果. 测量是用 8510C 网络分析仪及 CASCADE 射频探针对在片测试 HBT 的 S 参数, 再由 S 参数提取出器件的小信号电流增益 h_{21} 和功率增益 MAG. 由图 5 可以外推出器件的 f_T 和 f_{max} 分别大于 30GHz 和 50GHz.

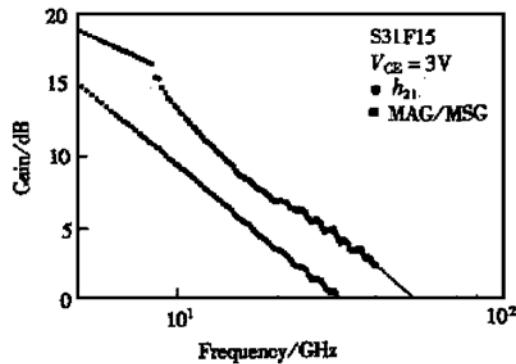


图 5 自对准结构 HBT 的高频特性

FIG. 5 Microwave Performance of the Self-Aligned HBT

连续波微波功率测量是在 2.5GHz 频率下, 单指自对准结构的 HBT 上完成的, 线性增益高达 19dB. 在 1dB 增益压缩时, 单指 HBT 可以提供 100mW 的输出功率, 对应的功率密度为 6.67W/mm, 此时的功率附加效率为 61.4%, 功率饱和时单

指 HBT 可以提供 112mW 的输出功率, 对应功率密度为 7.48W/mm, 功率附加效率为 67%.

4 结束语

利用各向异性的湿法刻蚀和侧墙隔离实现了 AlGaAs/GaAs HBT 发射极金属和基极金属的自对准. 采用该自对准技术成功地研制出了自对准结构的 AlGaAs/GaAs 异质结构双极晶体管, 器件不但呈现出良好的直流和高频特性, 而且具有优良的功率特性, 这为大功率 HBT 的研制奠定了基础.

致谢 本论文的全部实验是在新加坡南洋理工大学完成的. 作者感谢 Dr. Ng 提供的方便, 感谢 Mr. Wang Hong 和 Mr. Pan Yang 给予的支持和帮助. 感谢 Mr. Subrata Halder 所做的微波和功率测量.

参考文献

- [1] T. Isibashi *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1983, **35**(4): 401—404.
- [2] B. Bayraktaroglu *et al.*, IEEE Trans. Electron Device Lett., 1993, **14**(10): 493—495.
- [3] N. L. Wang *et al.*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1990, **38**(10): 1381—1389.
- [4] J. J. Chen *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1989, **36**(10): 2165—2172.
- [5] P. K. Ikalainen *et al.*, 20W Linear, High Efficiency Internally Matched HBT at 7.5GHz, in IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1994, 679—682.
- [6] T. Shimura *et al.*, IEEE Trans. Electron Device, 1995, **42**(11): 1890—1895.
- [7] A. Khatibzadeh *et al.*, High-Efficiency X-Band HBT Power Amplifier, in IEEE MMWMC Symp. Dig., 1994, 117—120.
- [8] A. Khatibzadeh *et al.*, 12W Monolithic X-Band HBT Power Amplifier, in IEEE MMWMC Symp. Dig., 1992, 47—50.
- [9] G. B. Gao *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1992, **39**(9): 1987—1997.

Self-Aligned Structure AlGaAs/GaAs HBT with High Power Density^{*}

YAN Bei-ping, ZHANG He-ming and DAI Xian-ying

(Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A self-aligned technology has been developed and applied to AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors using wet-etch and sidewall techniques. The DC current gain is more than 20, the current gain cutoff frequency, f_T , is more than 30GHz and the maximum oscillation frequency, f_{max} , is more than 50GHz. The CW power measurements show that output power of 100mW (output power density: 6.67mW/mm) with power-added efficiency (PAE) of 61.4% at 1dB gain compression has been achieved from a single finger HBT and that output power of 112mW (output power density: 7.48mW/mm) with PAE of 67% can be achieved at the power saturated point.

Key words: self-aligned HBT; heterojunction

EEACC: 2560J: 0170E

Article ID: 0253-4177(2001)02-0247-04

* Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69676033.

YAN Bei-ping, a senior member of Chinese Institute of Electronics, received his B. S. degree from Beijing Institute of Technology, Beijing, in 1982, and the M. S. and Ph. D degree from Xi'an Jiaotong University, Xian, in 1986 and 1995, respectively. He is currently working as an associate professor in Institute of Xidian University to research and teach the semiconductor devices and device physics.

ZHANG He-ming graduated from Xidian University, Xi'an, in 1970, He is an associate professor in Microelectronics Institute of Xidian University, researching the device physics and power device. He is a senior member of The Chinese Institute of Electronics.

DAI Xian-ying received the B. S. degree from University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu, in 1982, He is currently employed by Microelectronics Institute of Xidian University to work on the semiconductor material and power devices. He is a senior engineer and senior member of The Chinese Institute of Electronics.