

微空气桥隔离的自对准 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: 利用微空气桥隔离和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. 器件展现出良好的直流和高频特性. 对于发射极面积为 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 的器件, 直流电流增益大于 10, 失调电压 (Offset voltage) 200mV; 电流增益截止频率 f_T 大于 30GHz, 最高振荡频率 f_{max} 约为 50GHz.

关键词: AlGaAs/ GaAs 异质结双极晶体管; 自对准结构; 微空气桥隔离

中图分类号: TN304.2⁺3; TN325⁺.3; TN322⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 11-0132-03

Self-aligned AlGaAs/ GaAs HBT with Micro-airbridge Isolation

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

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

Abstract: A micro-airbridge isolation technique has been developed and applied to the AlGaAs/ GaAs heterojunction bipolar transistors. Self-aligned AlGaAs/ GaAs HBTs with excellent dc and microwave performance have been successfully realized. For the device with $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ emitter, a current gain more than 10 and an offset voltage of 200mV can be obtained; the current gain cutoff frequency f_T is higher than 30GHz and the maximum oscillation frequency f_{max} is about 50GHz.

Key words: AlGaAs/ GaAs HBT; self-aligned structure; micro-airbridge isolation

1 引言

AlGaAs/ GaAs 异质结双极晶体管 (HBT) 在高速数字电路和微波功率领域有非常诱人的应用前景, 这是由于 HBT 具有许多内在的优点. 例如, 基区少数载流子渡越时间短^[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精确控制击穿电压等^[4]. 高性能的 HBT 数字电路和功率放大器已经得到证实. 为了实现高性能的 HBT, 先进工艺技术的发展是必不可少的. 隔离技术是实现高性能 HBT 的前提. 迄今为止, 主要的隔离手段是离子注入隔离, 这是因为离子注入具有良好的可控性. 但是离子注入隔离必须依赖于昂贵的离子注入机. 本文提出了一种新的微空气桥隔离技术, 其方法是采用湿法刻蚀所具有的侧向腐蚀特点, 刻蚀掉发射极和基极互连下面的半导体层, 从而形成微空气桥隔离. 采用该隔离方法, 结合自对准技术, 成功地研制出了自对准的 AlGaAs/ GaAs 异质结双极晶体管. 器件展现出良好的直流和高频特性.

2 器件制造

图 1 给出了该 HBT 材料的外延层结构. 外延层是用 MOCVD 技术生长的. 发射结的铝组分是缓变的, 重掺杂基区的厚度和掺杂浓度分别为 100nm 和 $4 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, 集电极厚度和掺杂浓度设计给出集电极击穿电压大于 15V.

器件制造从限定发射区开始. 在光刻发射区后, 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面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. 接着光刻集电区, 并湿法刻蚀到子集电区, 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 10 秒. 然后光刻互连, 接着 Ti/ Au 被用于连接三个不同的电极. 最后采用微空气桥技术实现器件隔离. 正胶保护有源区, 用 $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{H}_2\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} = 10 : 4 : 500$ 作为微空气桥隔离的腐蚀液. 在经过深刻蚀以后, 发射极和基极互连金属下面的半导体材料被侧向刻蚀掉, 从而实现了器件间的隔离. 最终器件的 SEM 照片如图 2 所示.

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 表明了典型的共发射极 $I-V$ 特性. 器件面积为 $2\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$. 可以看到, 小电流下器件具有均匀的电流增益, 直流电

收稿日期: 1999-11-12; 修回日期: 2000-04-13

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69676033)

	x	doping
20 nm ($n^+ \text{In}_{0.15} \text{Ga}_{0.85} \text{As}$)		1×10^{19}
80 nm ($n^+ \text{GaAs}$)		4.5×10^{18}
30 nm ($n \text{Al}_{1-x} \text{Ga}_{1-x} \text{As}$)	-0-	
120 nm ($n \text{Al}_{1-x} \text{Ga}_{1-x} \text{As}$)	-0.3-	5×10^{17} Emitter
30 nm ($n \text{Al}_{1-x} \text{Ga}_{1-x} \text{As}$)	-0.3-	
30 nm ($p \text{GaAs}$)	-0-	
30 nm ($p \text{GaAs}$)		4×10^{19} Base
500 nm ($n^+ \text{GaAs}$)		5×10^{16} Collector
600 nm ($n^+ \text{GaAs}$)		4.5×10^{18} Subcollector
SI substrate		

图1 HBT材料的外延层结构

流增益大于 10. 大电流下器件展现出明显的负阻特性, 这是因为在大电流下器件结温升高, 引起电流增益下降, 从而导致负阻现象. 这种由于器件自热效应所引起的负阻特性已经有文献报道^[5]. 另外, 在大电流下器件呈现较大的拐点电压, 这可能是由于隔离腐蚀后发射极和基极台面缩小造成的. 因为有源区面积减小将造成接触电阻增大, 从而引起较大的拐点电压. 较大的拐点电压将限制最大输出功率和功率附加效率. 这对于功率应用是不利的. 图 4 为测量出的 Gummel 曲线. 可

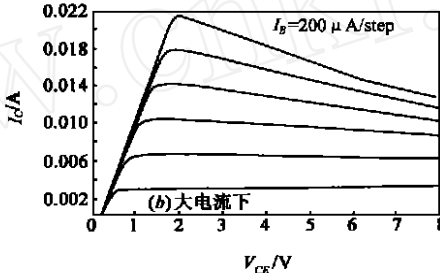
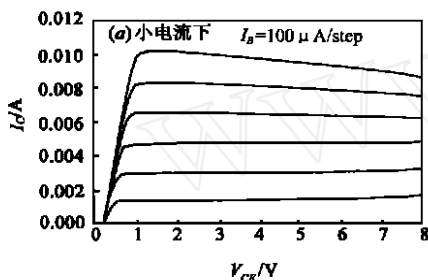


图3 微空气桥隔离 HBT 的共发射极特性曲线

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 并可以外推出器件的 f_T 大于 30 GHz, f_{MAX} 约 50 GHz.

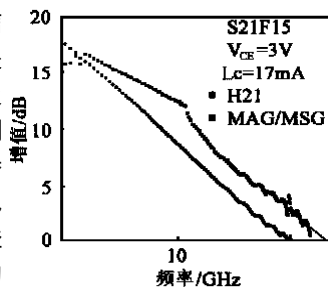


图5 微空气桥隔离 HBT 的高频特性

4 结束语

本文提出了一种新的 HBT 器件隔离技术. 其特点是采用湿法刻蚀技术特有的侧向腐蚀特点, 刻蚀掉基极和发射极互连下面的半导体层, 从而形成微空气桥隔离. 采用该隔离方法结合自对准技术, 成功地研制出了自对准结构的 AlGaAs/GaAs 异质结双极晶体管. 器件展现出良好的直流和高频特性.

致谢 本论文的全部实验是在新加坡南洋理工大学完成



图2 微空气桥隔离的 HBT 扫描电镜照片

以看到在极低集电极电流下 ($I_C < 10^{-7} \text{A}$), 基极电流 I_B 随 V_{BE} 缓慢增加. 基区电流很小, 这反映出发射结材料质量良好. 在 $I_C > 10^{-7} \text{A}$, 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体内复合电流. 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.

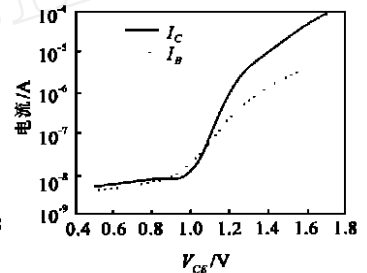


图4 微空气桥隔离 HBT 的 Gummel 特性曲线

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 所做微波测量.

作者简介:



严北平 1960 年生, 1982 年毕业于北京理工大学, 1986 和 1995 年在西安交通大学分别获硕士、博士学位. 现为西安电子科技大学微电子所副教授, 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等方面的研究工作.



张鹤鸣 1947 年生, 1970 年毕业于西安电子科技大学, 现为西安电子科技大学微电子所教授, 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等方面的研究工作.

(下转第 136 页)

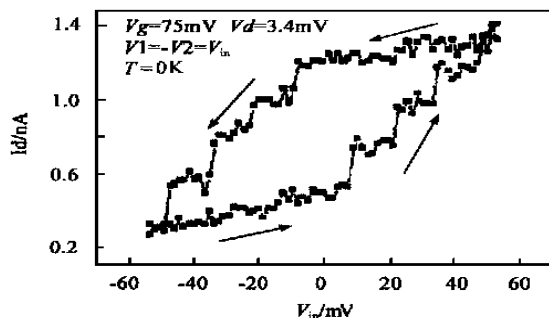


图3 静电计漏电流与存储单元输入电压关系

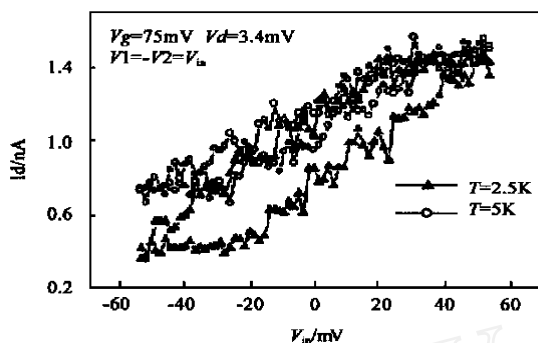


图4 不同温度下的静电计漏电流

器的双稳态特性还可以清楚地看出,这表明电路在该温度下还能正常工作,该温度比 K. Nakzato 所做存储器的工作温度高的多。要提高工作温度,只有进一步减小系统的电容。

最后,我们估算一下该电路的稳定性和功耗。热扰动和共隧道效应都可造成陷阱中的电荷跑掉,由它们决定的陷阱中存储电荷的寿命分别为^[6]

$$\tau_0 = R_j C_j \exp(-U / K_B T) \quad (1)$$

$$\tau_c = 2 R_j C_j \left(\frac{4}{R_Q} \right)^{N-1} \frac{(2N-1)! / (N-1)!^2}{(N/2)^{2N}} \quad (2)$$

其中 $U = \frac{e^2}{2 C_j} \frac{2 N^2 C_c}{C_j + 2 N C_c}$ 为介观隧道结阵列两端的势垒, $R_Q = h / e^2 \approx 25 \text{ k}\Omega$ 为电阻量子, R_j 、 C_j 分别为介观隧道结电阻和电容, N 为介观隧道结的数目, C_c 为耦合电容。在 $T = 2.5 \text{ K}$ 时该电路的 $\tau_0 \approx 200 \text{ s}$, $\tau_c \approx 10^9 \text{ s}$, 可见电荷在陷阱中能保持较长时间。另外,由于电荷进出陷阱时介观隧道结阵列中无电流流过,整个电路的功耗即为静电探测计的功耗。根据图 4 大致

可估算出电路正常工作时的功耗不超过 10^{-10} W 。如果假设该电路的集成度为 $10^{10} / \text{cm}^2$, 其整个功耗也只是 $1 \text{ W} / \text{cm}^2$ 左右。与常规 MOS 器件存储器相比,其功耗小得多。

5 结论

研究表明,电子空穴对单电子陷阱存储器与其它单电子存储器有同样的存储特性。但由于采用了电子空穴耦合型结构,使得该存储器具有更强的稳定性。同时,我们设计采用 STM 技术来制作该电路,使电路结构更加简单,电路尺寸更小,从而有利于降低介观隧道结电容,提高电路的工作温度和集成度。直接从电路结构出发,计算出电路的电容参数,用来模拟电路特性,因而其结果更具可靠性,可以作为实验研究的指导。

参考文献:

- [1] K. Nakzato, R. J. Blaikie, J. Appl. Phys. 1994, 75 (10): 5123 - 5134.
- [2] K. A. Matsuo, K. K. Likharev, P. Dresselhaus, et al. J. Appl. Phys. 1997, 81 (5): 2269 - 2281.
- [3] Christoph Wasthuber, Hans Kosina, and Siegfried Selberherr. IEEE Trans. Electron Devices, 1998, 45 (11): 2365 - 2371.
- [4] K. Matsumoto, M. Ishii, K. Segawa, J. Vac. Sci. Technol. 1996, B14 (2): 1331 - 1334.
- [5] 黄萍. 用 STM 加工单电子器件的基础研究 [D]. 上海交通大学硕士学位论文, 2000, 1.
- [6] P. D. Dresselhaus, L. Ji, Siyuan Han, et al. Phys. Rev. Lett. 1994, 72 (20): 3226 - 3229.
- [7] SJTU-Nano-FCAC1; SJTU-Nano-SEDCMC1. 上海交通大学微米纳米技术研究院纳米电子学研究室.

作者简介:



程子川 1973 年出生, 1995 年毕业于成都电子科技大学微电子科学与工程系微电子专业, 获工学学士学位。目前是上海交通大学微电子技术研究所硕士研究生, 研究方向是纳米电子学和纳米器件加工技术。

蒋建飞 1961 年毕业于浙江大学, 现任上海交通大学微电子技术研究所教授、博士生导师。长期从事超导电子学和半导体微电子技术研究。中国集成电路大全前八分册编著委员。日本应用物理学会会员。目前研究的兴趣是纳米电子学、单电子电子学以及超导电子学。

(上接第 133 页)

参考文献:

- [1] T. Ishibashi, et al. A possible near-ballistic collection in an AlGaAs/GaAs HBT with a modified collector structure [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1988, 35 (4): 401 - 404.
- [2] B. Bayraktaroglu, et al. Very high-power-density CW operation of GaAs/AlGaAs microwave heterojunction bipolar transistors [J]. IEEE Trans. Electron Device Lett., 1993, 14 (10): 493 - 495.

- [3] N. L. Wang et al. Ultrahigh power efficiency operation of common-emitter and common-base HBTs at 10 GHz [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1990, 38 (10): 1381 - 1389.
- [4] J. J. Chen et al. Breakdown behavior of GaAs/AlGaAs HBTs [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1989, 36 (10): 2165 - 2172.
- [5] G. B. Gao et al. Heterojunction bipolar transistor design for power applications [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1992, 39 (9): 1987 - 1997.