

两种不同结构 InGaP/GaAs HBT 的直流特性分析*

林 玲^{1,2} 徐安怀¹ 孙晓玮¹ 齐 鸣^{1,†}

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: InGaP/GaAs 异质结双极晶体管(HBT)是当前微波毫米波领域中具有广阔发展前景的高速固态器件,其直流特性是器件重要参数之一.本文采用 Medici 软件对两种 InGaP/GaAs 外延结构 HBT 的直流特性和高频特性进行了模拟计算,并实际制备出了两种材料结构的大尺寸(发射极面积 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$)双台面 InGaP/GaAs HBT 器件,对其直流特性进行了测试和分析,两种外延结构的器件共射直流增益分别为 50 和 350,模拟得其最大截止频率分别为 8 和 10GHz.

关键词: 异质结双极晶体管; InGaP/GaAs; 直流特性
EEACC: 2560J

中图分类号: TN385 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)S0-0426-04

1 引言

InGaP/GaAs 异质结双极晶体管(HBT)由于其可靠性高、成本较低和工艺相对成熟,成为当前微波毫米波领域中极具竞争力和具有广阔应用前景的高速固态器件之一.从 Delage 等人于 1991 年第一次研制出用于微波器件的高频 InGaP/GaAs HBT 以来,人们对它的研究兴趣一直不减.时至今日,其已被广泛应用于高速电路、功率电路和射频微波系统. InGaP/GaAs 材料体系具有诸多优点,如:(1)价带偏移大,导带偏移小,有利于提高 HBT 的电流增益;(2)不含 Al 组分,不存在深能级复合中心,因而器件的增益与 $1/f$ 噪声特性良好,同时有利于提高 HBT 器件的可靠性和稳定性;(3) InGaP 和 GaAs 材料之间具有良好的选择腐蚀比,因此工艺重复性好,成品率高^[1].

本文模拟了两种外延结构的 InGaP/GaAs HBT 的直流特性,并实际制备了两种材料结构发射极面积为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 的双台面 InGaP/GaAs HBT 器件,对模拟和实测结果进行了比较和分析,并模拟了器件的高频特性,研究结果有助于高性能器件的研制.

2 InGaP/GaAs HBT 直流特性模拟

HBT 的外延结构设计要综合考虑各方面性能

要求,选择合适的各外延层厚度和掺杂浓度.实验所用材料是在中国科学院上海微系统与信息技术研究所的 V90 型气态源分子束外延(GSMBE)设备上生长的.表 1 所示为在(100)晶向的半绝缘 GaAs 衬底上生长的两种结构材料:A 结构和 B 结构. A 结构比 B 结构具有较厚的基区(80nm versus 45nm)和集电区(1000nm versus 350nm),而其集电区掺杂浓度($1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)则比 B 结构($3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)稍低.由基区渡越时间 $\tau_B = W_B^2/2D_B$ (其中 W_B 为基区厚度, D_B 为扩散系数)可知,较厚的基区可以减小本征基区电阻,但会增大基区渡越时间,使器件的截止频率下降.提高基区掺杂浓度可降低本征基区电阻和基区接触电阻.另外,由于在 MBE 生长时容易发生基区杂质 Be 向发射区扩散的问题,所以在基区两侧生长了非故意掺杂的隔离层. A 结构的集电区厚度较大,可以提高击穿电压,但也会导致截止频率的下降.集电区掺杂浓度的上限由击穿电压决定,集电区掺杂浓度越大,击穿电压越小;它的下限由 Kirk 效应决定,集电区掺杂浓度越大,则集电区电流越大.

本文使用 Synopsys 公司的二维器件模拟工具 Medici 对如表 1 所示的两种外延结构 InGaP/GaAs HBT 的直流特性进行了模拟.模拟中采用了 SRH 复合、Auger 复合、平行电场迁移率等模型,并考虑了禁带宽度变窄效应和迁移率受杂质浓度等的影响.

利用 Medici 模拟得到的 A, B 结构 InGaP/

* 国家重点基础研究规划资助项目(批准号:2002CB311902)

† 通信作者. Email: mqi@mail.sim.ac.cn

2006-11-14 收到

GaAs HBT器件的 Gummel 图和电流增益 β 随集电极电流 I_c 的变化分别如图 1 至图 4 所示. 从模拟结果看, B 结构的最大直流增益为 406, 较 A 结构的 301 大, 对应的直流特性较好.

表 1 两种 InGaP/GaAs HBT 外延材料结构参数

Table 1 Two kinds of epitaxial structures of InGaP/GaAs HBTs

外延层	A		B	
	厚度 /nm	掺杂浓度 /cm ⁻³	厚度 /nm	掺杂浓度 /cm ⁻³
In _{0.6} Ga _{0.4} As	50	>1×10 ¹⁹ ; Si	50	>1×10 ¹⁹ ; Si
In _{0.6} Ga _{0.4} As-GaAs	50	>1×10 ¹⁹ ; Si	50	>1×10 ¹⁹ ; Si
GaAs	250	5×10 ¹⁸ ; Si	100	5×10 ¹⁸ ; Si
In _{0.5} Ga _{0.5} P	50	3×10 ¹⁷ ; Si	50	3×10 ¹⁷ ; Si
GaAs	3	undoped	5	undoped
GaAs	80	4.5×10 ¹⁹ ; Be	45	4×10 ¹⁹ ; Be
GaAs	2	undoped	2	undoped
GaAs	1000	1×10 ¹⁶ ; Si	350	3×10 ¹⁶ ; Si
GaAs	500	5×10 ¹⁸ ; Si	500	5×10 ¹⁸ ; Si

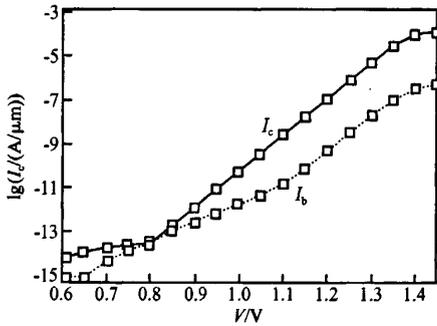


图 1 A 结构 InGaP/GaAs HBT 的 Gummel 图

Fig.1 Gummel plot of InGaP/GaAs HBT of structure A

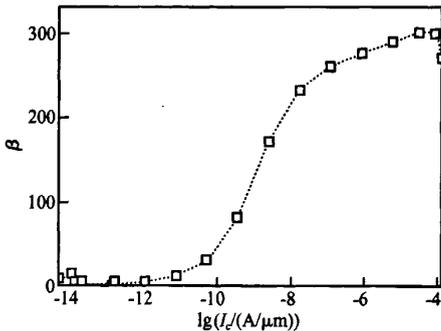


图 2 A 结构 InGaP/GaAs HBT 电流增益 β 与集电极电流 I_c 的关系 $\beta_{max} = 301$

Fig.2 β - I_c relationship of InGaP/GaAs HBT with structure A $\beta_{max} = 301$

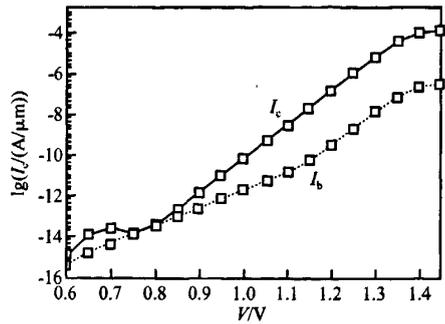


图 3 B 结构 InGaP/GaAs HBT 的 Gummel 图

Fig.3 Gummel plot of InGaP/GaAs HBT of structure B

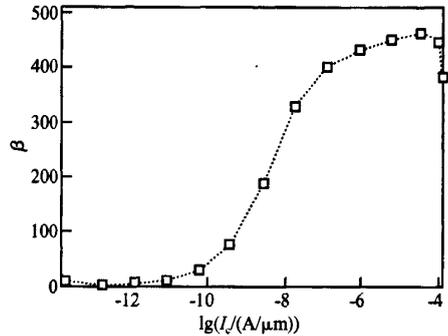


图 4 B 结构 InGaP/GaAs HBT 电流增益 β 与集电极电流 I_c 的关系 $\beta_{max} = 460$

Fig.4 β - I_c relationship of InGaP/GaAs HBT with structure B $\beta_{max} = 460$

3 器件制备与测试

本文在进行上述模拟分析的同时,还在本所的 GaAs 工艺线上采用湿法腐蚀双台面工艺制备了两种材料结构的大尺寸 InGaP/GaAs HBT 器件. 主要工艺流程包括外延片清洗、光刻、剥离、电子束蒸发发射极电极金属 Ti/Pt/Au(= 30/20/150nm)、发射区台面腐蚀、电子束蒸发基极电极金属 Ti/Pt/Au(= 20/20/40nm)、集电极区腐蚀、蒸发集电极金属 AuGeNi(= 200nm)、375℃ 快速热退火合金 60s 和器件腐蚀隔离. 采用柠檬酸系腐蚀液腐蚀 InGaAs 和 GaAs, 用 HCl : H₃PO₄ = 1 : 1 腐蚀液腐蚀 InGaP 发射区, 用台阶仪测试腐蚀深度和用探针测击穿电压来监控腐蚀是否到位. 实际制备的器件结构如图 5 所示, 发射极面积为 100 μ m×100 μ m.

利用 HP4156A 半导体参数仪测得的 A 和 B 两种结构 InGaP/GaAs HBT 器件的共射极输出特性曲线如图 6,7 所示.

由两者的输出特性曲线可见, A 结构器件的膝

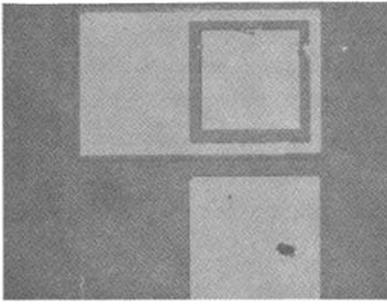


图 5 制备的 InGaP/GaAs HBT 器件的电子显微镜照片 发射极面积为 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$.

Fig. 5 Electron microscope photo of the InGaP/GaAs HBT The emitter area is $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$.

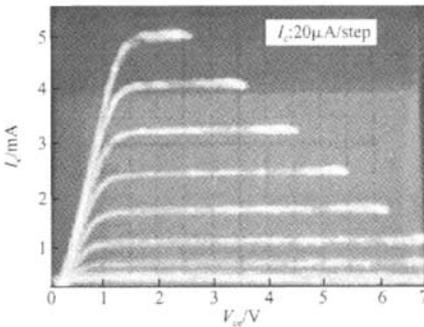


图 6 A 结构 InGaP/GaAs HBT 的共射极输出特性曲线
Fig. 6 Common-emitter I - V characteristics of the InGaP/GaAs HBT with structure A

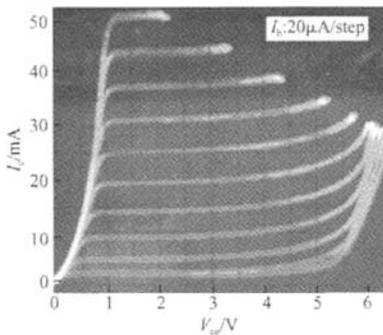


图 7 B 结构 InGaP/GaAs HBT 的共射极输出特性曲线
Fig. 7 Common-emitter I - V characteristics of InGaP/GaAs HBT with structure B

点电压 V_{knee} 约为 1.5V , 偏移电压 $V_{\text{offset}} = 0.3\text{V}$, 电流增益 $\beta = 20, 36, 50$, 击穿电压大于 8V ; B 结构器件的膝点电压 $V_{\text{knee}} = 1\text{V}$, 偏移电压 $V_{\text{offset}} = 0.2\text{V}$, 电流增益 $\beta = 350$, 击穿电压约为 5.5V . 无论 A 结构还是 B 结构, 器件的输出特性曲线放大区均较为平

直, 说明其厄利电压较大. B 结构器件在同一 V_{ce} 下 I_c 随 I_b 以固定的比例增长, 直流增益非常均匀. A 结构的击穿电压比 B 结构的击穿电压大, 这是因为 A 结构具有较厚的集电区, 而 B 结构器件的电流增益远高于 A 结构, 这与 Medici 的模拟结果是一致的. 两种结构材料的器件各有所长, A 结构材料适合作为要求较高击穿电压的功率器件, 而 B 结构材料的电流增益较高, 可满足放大电路对器件的增益要求. A 结构的偏移电压为 300mV , B 结构的偏移电压为 200mV . 偏移电压均较小, 将减小器件的功耗, 有利于电路集成度和功率附加效率的提高^[2]. 一般来说, 对于微波功率应用只要电流增益大于 40 就足够了. 综合看来, 这两种结构均适合于在微波电路中的应用.

利用 Medici 模拟得到的两种结构器件的截止频率 f_T 与集电极电流 I_c 的关系分别如图 8 和 9 所示, 可见 A 结构和 B 结构两种器件的截止频率最大值分别为 8 和 10GHz .

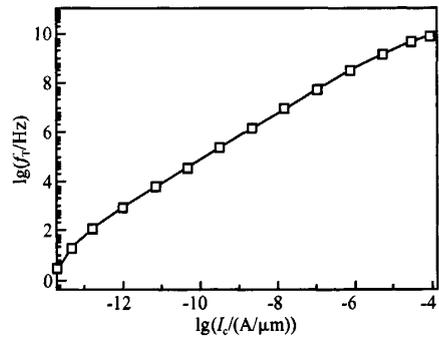


图 8 A 结构 InGaP/GaAs HBT 截止频率 f_T 与集电极电流 I_c 的关系
Fig. 8 High frequency performance of InGaP/GaAs HBT with structure A

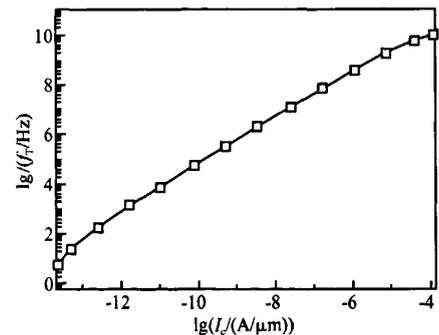


图 9 B 结构 InGaP/GaAs HBT 截止频率 f_T 与集电极电流 I_c 的关系
Fig. 9 High frequency performance of InGaP/GaAs HBT with structure B

4 结论

本文利用 Medici 软件模拟计算了两种外延材料结构 InGaP/GaAs HBT 的直流特性和高频特性. 使用自行研制的 InGaP/GaAs HBT 材料实际制备出了两种材料结构的大尺寸(发射极面积 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) 双台面的 InGaP/GaAs HBT 器件, 并对其直流特性进行了测试和分析. 器件 A 获得最大直流增益为 50, 击穿电压大于 8V; 器件 B 的电流增益为 350, 击穿电压约 5.5V. 模拟和实际测试结果表明, A 结构的 HBT 器件击穿电压较高, 而 B 结构的 HBT 器件直流增益更大, 频率更高, 两种结构都适合在微波电路中的应用.

致谢 感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室艾立鹏和孙浩同学在外延材料生长方面提供的帮助.

参考文献

- [1] Houston P A. High-frequency heterojunction bipolar transistor device design and technology. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 2000, 10: 220
- [2] Li Binghan, Liu Wenchao, Zhou Jian, et al. DC performance of AlGaInP/GaAs HBT. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2003, 9(3): 327 (in Chinese) [李冰寒, 刘文超, 周健, 等. AlGaInP/GaAs 异质结双极晶体管直流特性研究. *功能材料与器件学报*, 2003, 9(3): 327]

DC Performance of InGaP/GaAs HBT with Two Different Structures*

Lin Ling^{1,2}, Xu Anhuai¹, Sun Xiaowei¹, and Qi Ming^{1,†}

(1 *State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: InGaP/GaAs HBT is the most promising device in microwave and millimeter wave fields. It's DC characteristic is one of the most important parameters. In this work, the Medici program was used to simulate the DC and high frequency performances of two different InGaP/GaAs HBT epitaxial structures. The large size (emitter area is $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) double-mesa InGaP/GaAs HBTs were fabricated, and their DC performance was tested and analyzed experimentally. It was shown that the common emitter current gains by the test for these two structures were 50 and 350 respectively and their maximum f_T by the simulation were 8 and 10GHz respectively.

Key words: heterojunction bipolar transistor; InGaP/GaAs; DC performance

EEACC: 2560J

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0426-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No.2002CB311902)

† Corresponding author. Email: mqj@mail.sim.ac.cn

Received 14 November 2006