

基于 MBE 生长的一种 Be 掺杂 InGaAs 基区的新结构 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT^{*}

苏树兵^{1,†} 徐安怀² 刘新宇¹ 齐 鸣² 刘训春¹ 王润梅¹

(1 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 报道了一种以 InGaAs 为基区的新结构 InGaP/InGaAs/GaAs 双异质结晶体管, 获得了直流性能良好的器件. 其共射直流增益 β 达到 100, 残余电压 V_{offset} 约为 0.4V, 膝点电压 V_{knee} 约为 1V, 击穿电压 BV_{ceo} 超过 10V, 器件的基极和集电极电流理想因子分别为 $n_b = 1.16$, $n_c = 1.11$, 可应用于低功耗、高功率领域.

关键词: MBE; InGaAs 基区; 双异质结双极晶体管

EEACC: 2550H; 2550R; 2560F

中图分类号: TN385

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)06-1064-04

1 引言

InGaP/GaAs HBT 是无线及高速通信应用中最重要的电子器件之一, 具有优良的高频及低噪声特性, 成为广大科研人员关注的焦点^[1,2].

从材料本身的性质来说, 以 InGaAs 材料为基区有以下优点^[3]: (1) InGaAs 比 GaAs 有更高的电子迁移率; (2) InGaAs 基区有很低的表面复合速率 (仅为 $1 \times 10^3 \text{ cm/s}$), 即使缩小其尺寸也不会导致电流增益下降; (3) 基区 InGaAs 具有较低的空穴有效质量, 空穴迁移率相对来说比较大, 这样使得迁移率较高 ($300 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$), 基区电阻较低; (4) 基区 InGaAs 能带间距较小为 0.75eV, 则开启电压也低, 这样在数字电路中可以减少功率损耗; (5) 基区采用 InGaAs, 有利于提高欧姆接触质量.

从器件角度分析, 采用 InGaAs 基区, 一方面可以通过改善基区的电子传输来提高 HBT 高频性能, 另一方面通过改变有效的能带不连续性使器件直流增益增加, 因此是一个值得研究的方向. 采用 InGaAs 材料为基区是一种新颖的 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT, 国外曾报道过采用渐变 InGaAs 基区的 HBT, 获得了良好的器件性能^[4,5].

本文研究了一种采用 InGaAs 为基区的新结构 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT. 由于采用的是均匀基区, 所以相对于渐变基区而言, 利于基区外延生长

的控制.

2 材料结构设计与生长

多元化合物半导体中, 在不影响晶格匹配的条件下, 通过改变组分, 可以在很大的范围内改变外延层的禁带宽度、电子和空穴的有效质量、迁移率这些重要的半导体参数. 然而, 当设计 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 材料结构时, 要在 GaAs 衬底上生长 InGaAs 材料将可能引起晶格失配从而产生位错. 由于生长中的层位错处于非热平衡态, 一般来讲, 位错可能产生复合中心也可能充当散射中心角色, 因此将降低载流子的迁移率和寿命^[6~11]. 对于晶格失配产生的应力, Matthews 引入了临界厚度 h_c 来描述这一特征^[12,13], 即对应一定组分的 InGaAs 应有一个确定的临界厚度. 当小于该临界厚度时, 应变是弹性的, 失配应力的存在不会导致失配位错的产生; 当大于临界厚度时, 应变则会弛豫, 并产生失配位错. h_c 可由公式求解并配合实验得到, 文献[4,9]中给出了 InGaAs 的临界厚度和 In 组分关系的计算结果, 可以看出随着 In 组分的增加, 临界厚度在减小. 因此, 在设计此 HBT 时, 作为基区的 InGaAs 材料的厚度不能随意选取, 而要受到相应组分下临界厚度的限制, 否则将会导致失配位错的产生, 使器件性能急剧下降.

根据以上分析, 我们设计并提出了表 1 所示的

* 国家重点基础研究发展规划(批准号: G2000068304, 2002CB311902)和中国科学院重点创新(批准号: KG CX2-SW-107)资助项目

† 通信作者. Email: sushubing@163.com

2005-09-22 收到, 2005-11-22 定稿

材料结构. 在此结构中, 重掺杂薄基区用来减小寄生的基区电阻, 考虑到基区高掺杂的 Be 杂质容易向发射区及集电区扩散, 故在其两边各生长了 5nm 的 spacer 层来防止 pn 结的偏移. 因为非掺杂的 spacer 层减小了导带不连续性, 这将阻止杂质和空穴从重掺杂基区扩散, 也减小了空穴在 BE 结的热效应和隧穿效应, 从而有效提高发射效率.

表 1 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 的材料结构

Table 1 Epitaxial structure of InGaP/InGaAs/GaAs DHBT

材料名称	厚度/nm	掺杂浓度/cm ⁻³
In _{0.5} Ga _{0.5} As	50	>1×10 ¹⁹
GaAs	100	5×10 ¹⁸
In _{0.5} Ga _{0.5} P	80	3×10 ¹⁷
GaAs	5	-
In _{0.05} Ga _{0.95} As	60	3×10 ¹⁹
GaAs	5	-
GaAs	700	3×10 ¹⁶
GaAs	500	5×10 ¹⁸

本研究所用的 In_{0.5}Ga_{0.5}P/In_{0.05}Ga_{0.95}As/GaAs DHBT 外延材料生长在 50mm 半绝缘 GaAs 衬底(100)面上, 所用生长系统为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的 V90 型 GSMBE 系统. 材料生长过程中, 采用高纯金属 Ga 和 In 作为 III 族源, V 族源则是由高纯砷烷(AsH₃)和磷烷(PH₃)高温裂解后得到的 As 和 P, Si 和 Be 分别为 n 型和 p 型掺杂.

3 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 器件制备

InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 器件的制备是在中国科学院微电子研究所的化合物半导体器件及电路研究室的 100mm GaAs 生产线上完成. 主要由普通的光学接触曝光、BE 金属自对准、湿法腐蚀等工艺技术实现. 首先, 光刻好 U 型发射极^[14]图形窗口后蒸发发射极金属 Ti/Au, 剥离后以发射极金属为掩膜分别用柠檬酸系、HCl 系腐蚀液腐蚀帽层及 InGaP 发射区; 接着, 利用自对准技术制作基极金属 Ti/Pt/Au 并剥离; 然后, 湿法腐蚀 BC 台面再腐蚀至半绝缘 GaAs 衬底表面从而实现器件隔离; 最后, 蒸发集电极金属 AuGeNi/Au 来完成器件的制备.

制作的 U 型发射极器件的显微照片如图 1 所示.



图 1 U 型发射极器件的显微照片

Fig. 1 Microscope photograph of HBT with U-shaped emitter

4 结果与讨论

我们制作的 HBT 器件直流特性的测试在 HP4155A 参数测试仪上完成. 图 2 为 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 的 BE 与 BC 结的 $I-V$ 特性曲线

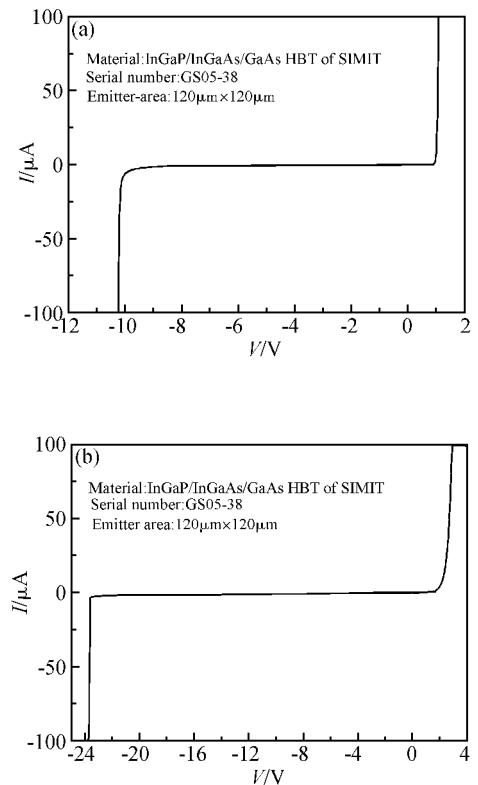


图 2 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 的 BE(a)与 BC(b)结 $I-V$ 特性曲线

Fig. 2 BE(a) and BC(b) junction characteristics of InGaP/InGaAs/GaAs DHBT

线图.可以看出,BE 结正向开启电压比较低,仅为 0.9V,而常规 InGaP/GaAs HBT 的则为 1.1V,这是由于采用了窄禁带宽度的 InGaAs 材料作为基区,因此可以在低功耗领域得到应用.设计中集电区采用较低掺杂,BC 结反向击穿电压超过了 23V.

图 3 所示为 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 共射 $I-V$ 特性曲线.从图中可以看出,器件的直流增益 β 达到 100,残余电压 V_{offset} 约为 0.4V,膝点电压 V_{knee} 约为 1.0V,击穿电压 BV_{ceo} 超过 10V,说明在高功率方面也可得到一定的应用.而器件的 $I-V$ 特性曲线中存在比较明显的 Early 效应,这与基区掺杂水平、基区厚度等有关.高掺杂基区获得如此高的直流增益,说明此基区材料的外延质量很好,也说明价带不连续性有效阻止了空穴反向注入发射区.

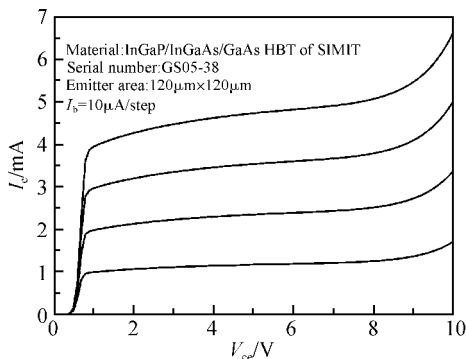


图 3 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 共射 $I-V$ 特性曲线

Fig. 3 Common-emitter $I-V$ characteristics of InGaP/InGaAs/GaAs DHBT

从图 4 中 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 集电极电流与直流增益关系可以看到,随着集电极电流的变化,直流增益 β 值比较均匀.

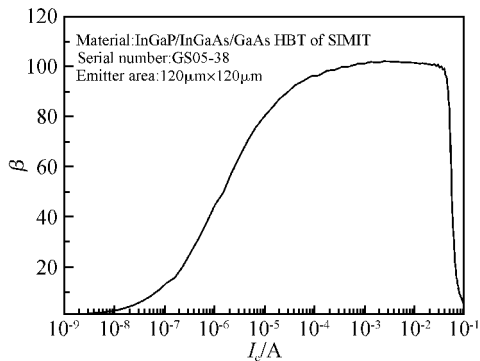


图 4 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 集电极电流与直流增益关系

Fig. 4 I_c - β characteristics of InGaP/InGaAs/GaAs DHBT

器件的基区和集电极电流理想因子分别为 $n_b = 1.16$, $n_c = 1.11$,如图 5 所示,说明 BE、BC 结特

性良好.

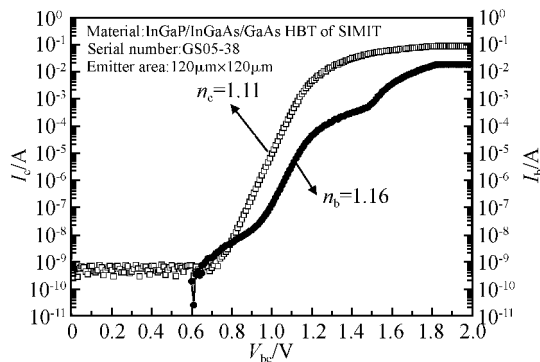


图 5 InGaP/InGaAs/GaAs DHBT 的 Gummel Plot 图
Fig. 5 Gummel plot of InGaP/InGaAs/GaAs DHBT

5 结论

成功设计并制作了一种新结构的 InGaP/InGaAs/GaAs 双异质结晶体管.实验表明:器件的共射直流增益 β 达到 100,残余电压 V_{offset} 约为 0.4V,膝点电压 V_{knee} 约为 1.0V,击穿电压 BV_{ceo} 超过 10V,器件的基区和集电极电流理想因子分别为 $n_b = 1.16$, $n_c = 1.11$,说明器件直流性能良好,可应用于低功耗、高功率领域.

参考文献

- [1] Liu W. Handbook of III-V heterojunction bipolar transistor. John Wiley & Sons, 1998
- [2] Qian Yongxue, Liu Xunchun, Wang Runmei, et al. Self-aligned GaInP/GaAs HBT device. Chinese Journal of Semiconductors. 2002, 23(5): 513 (in Chinese) [钱永学, 刘训春, 王润梅, 等. 自对准 GaInP/GaAs HBT 器件. 半导体学报, 2002, 23(5): 513]
- [3] Yi Changyun. InP-based HBTs for high speed and RF applications: advanced emitter-base designs. Doctorial Dissertation of the Georgia Institute of Technology, 2002
- [4] Jin Hyoun Joe, Mohamed Missous. High gain InGaP/GaAs HBTs with compositionally graded InGaAs bases grown by MBE. IEEE, 2002: 237
- [5] Ahmari D A, Hartmann Q J, Fresina M T, et al. High-speed InGaP/GaAs HBTs with a strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ base. IEEE Electron Device Lett, 1996, 17(5): 226
- [6] Qu Yi. Design and analysis of 980nm strained quantum well lasers. Doctorial Dissertation of Jilin University, 2001 (in Chinese) [曲屹. 980nm 应变量子阱激光器的设计与分析. 吉林大学博士学位论文, 2001]
- [7] Bai Liwei, Hu Lizhong. Critical layer thickness of heterostructure stain layer. Semiconductor Technology, 2002, 27(2): 69 (in Chinese) [白利伟, 胡礼中. 异质结应变层的临界厚度的确定. 半导体技术, 2002, 27(2): 69]
- [8] Zhang Haipeng, Zhang Hongfang, Lü Youhua. Basic properties and application prospects of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{SOI}$ material. Semiconductor Technology, 2004, 29(3): 35 (in Chinese) [张海鹏, 章红芳, 吕幼华. $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{SOI}$ 材料的基本性质与应用

- 前景. 半导体技术, 2004, 29(3):35]
- [9] Chinkyo Kim. Strain relaxation mechanism of semiconductor thin films. PhD Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1998
- [10] Zeng W, Jiang S S, Huang X R, et al. Reduction of misfit dislocation density in strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures via growth on patterned GaAs (001) substrate. *IL Nuovo Cimento*; 1997, 19(2~4):241
- [11] Carrie Anne Carter Coman. Compound semiconductor compliant substrates for extension of the conventional critical thickness in mismatched overlayers and strain-modulated epitaxy. PhD Dissertation, Georgia Institute of Technology, 1996
- [12] Matthews J W. Epitaxial growth (Part B). New York: Academic Press, 1975; 559
- [13] Matthews J W. Defects associated with the accommodation of misfit between crystals. *J Vac Sci Tech*, 1975, 12:126
- [14] Bai Dafu, Liu Xunchun, Wang Runmei, et al. Super performance InGaP/GaAs HBT with novel structure. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(7):756 (in Chinese) [白大夫, 刘训春, 王润梅, 等. 高性能新结构 InGaP/GaAs 异质结双极型晶体管. 半导体学报, 2004, 25(7):756]

A Novel InGaP/InGaAs/GaAs DHBT Grown by MBE Using Beryllium as p-Type Dopant*

Su Shubing^{1,†}, Xu Anhuai², Liu Xinyu¹, Qi Ming², Liu Xunchun¹, and Wang Runmei¹

(¹ Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(² Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: We fabricate a novel InGaP/InGaAs/GaAs double hetero-junction bipolar junction (DHBT) with an InGaAs base for the first time in China. Good DC performance is obtained. The common-emitter DC current gain is 100, the offset voltage approximates 0.4V, the knee voltage is about 1.0V, and the open-base breakdown voltage is over 10V. The ideality factors for the base and collector current are 1.16 and 1.11 respectively. These results indicate that the InGaP/InGaAs/GaAs DHBTs are suitable for applications in low power-dissipation and high power.

Key words: MBE; InGaAs base; double hetero-junction bipolar junction

EEACC: 2550H; 2550R; 2560F

Article ID: 0253-4177(2006)06-1064-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Nos. G2000068304, 2002CB311902) and the Key Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KGCX2-SW-107)

† Corresponding author. Email: sushubing@163.com

Received 22 September 2005, revised manuscript received 22 November 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics