

一种单基极引出结构的硅晶体管*

杨 茹 李国辉 姬成周 田晓娜 韩德俊 马本^方

(北京师范大学低能核物理所, 北京 100875)

摘要: 为研究单基极薄基区晶体管的特性,设计了一种单侧基极引出结构薄基区的晶体管,在 p 型 SOI 衬底上全离子注入实现了基区宽度为 80nm 的 npn 纵向结构,基区的平均浓度为 10^{18}cm^{-3} . 经过版图设计和工艺流片,在 2 μm 实验工艺线上研制了这种器件. 基极采用电压输入, V_{be} 在 1.1V 附近,跨导和电流增益都达到峰值,小信号电流增益 $\beta_{ac}(I_c/I_b) = 2.7$,小信号跨导 $g_{mac}(I_c/V_{be}) = 0.45 \text{mS}$,且 $g_{mac}/g_m(I_c/V_{be})$ 比 $\beta_{ac}(I_c/I_b)$ 大得多,跨导比电流增益更能准确地描述器件特性,这种器件更倾向于电压控制型器件,特别适用于数字电路的开发和应用.

关键词: 单基极; 薄基区; 全离子注入

EEACC: 2560J; 2530B; 2550B

中图分类号: TN322 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)02-0345-04

1 引言

迄今为止,对双极晶体管的讨论主要集中在本征器件上,器件在很多情况下被视为一维结构,基区电阻是影响器件性能的一个寄生因素. 为了减小少子在基区的渡越时间,目前先进的材料外延工艺可以做到 100nm 以下的薄基区^[1,2],在这样的情况下,宽基区晶体管中可以忽略的由基区电阻引起的二维寄生效应就会凸显出来,所以很有必要研究薄基区下晶体管的器件特性和基区中少子的输运.

随着基区宽度的减小,横向基区电阻也相应增大,当 B-E 结处于大注入状态 ($V_{be} > 0.9\text{V}$) 时,有相当一部分电压降在外基区的电阻上. 根据黄敬教授提出的纵向偶载场效应晶体管^[3]的原理:由于基区多子电流的不均匀分布,这部分电压会在有效基区中产生纵向电场分布,载流子在有效基区中的运动既有漂移运动又有扩散运动. 为证明这个二维效应对晶体管特性的影响,我们用全离子注入实现了薄基区的 npn 的纵向结构,版图设计采用单基极引出的非对称结构,并在 SOI 衬底上实现了上述器件结构.

2 器件制作

设计各区杂质浓度及宽度为:发射区浓度 10^{19}cm^{-3} ,宽度 200nm;基区浓度 10^{18}cm^{-3} ,宽度小于 100nm;集电区浓度 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,宽度 300nm. 在两个 pn 结自然耗尽的情况下,有效基区的宽度小于 60nm. 采用 p 型 (20 μm) 的 SOI 衬底,首先用 SiO_2 做掩蔽,选择区域注入施主杂质 P 形成集电区埋层,再依次大面积注入 B 和 As,形成 npn 晶体管的纵向结构. 离子注入后用白光快速退火 (RTP) 激活杂质,在退火过程中,注入杂质都有不同程度的扩散再分布,尤其是 B 和 P 的扩散尤为严重,所以在窄基区的注入搭配中,杂质的扩散行为必须要考虑在内. 图 1 是用高斯分布模型计算得到的掺杂分布,图 2 是用扩展电阻方法测量的载流子浓度. 比较两图可以看出:在确定的退火条件下,重掺杂的发射区和基区杂质的激活率接近百分之百,As-B 在退火过程中的扩散再分布对 B-E 结的位置影响不大,但 B-C 结却有很大的变化;B 和 P 原子之间的扩散很严重,使 B-C 结的位置向表面推移,基区的实际宽度比设计宽度窄,也使得集电区载流子浓度比预先设计浓度低. 但最主要的是,基区的宽度和掺杂浓度已基本

* 国家自然科学基金资助项目 (批准号:60244004)

2004-02-13 收到,2004-05-08 定稿

符合设计要求,且实验重复性好.

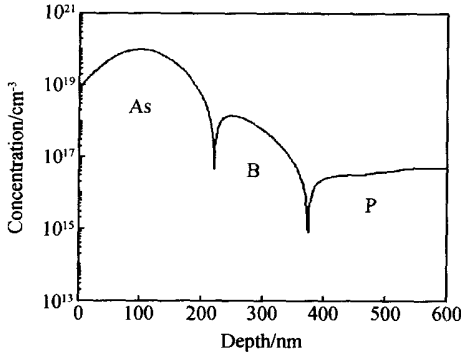


图 1 离子注入高斯模型的掺杂分布
Fig. 1 Doping profile by Gauss model

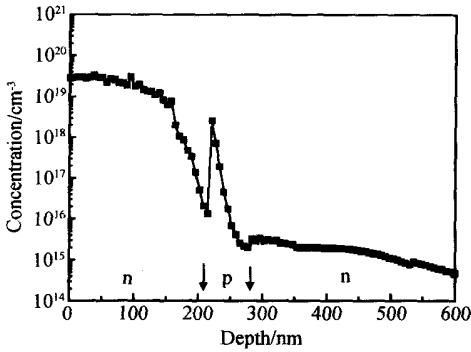


图 2 扩展电阻法测量的载流子分布
Fig. 2 Doping profile by SPR

器件的横向设计采用单侧基区接触的非对称结构,以减小基极接触下的基区面积,从而减小基极集电极电容^[4],发射极面积为 $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$. 用干法刻蚀工艺形成台面结构,欧姆接触采用 Al,芯片经过划片,热压焊,封装而得到测试样品.

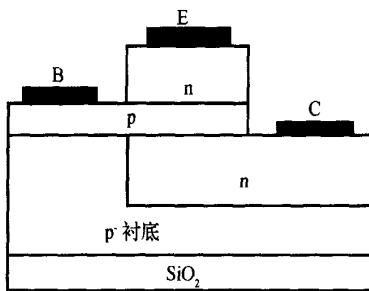


图 3 器件台面结构图
Fig. 3 Schematic cross section of the device

3 器件特性

使用 HP4156C 晶体管参数分析仪测量了器件的直流特性. 图 4 是器件的输出特性,基极采用电压输入, $V_{be} = 0.1\text{V}$,基区穿通电压为 20V 左右. 由图 4 可以看出,器件较好的输出特性是 V_{be} 在 $1.0 \sim 1.2\text{V}$ 之间,而此时 V_{be} 已经接近或大于 B-E 结热平衡时的内建电势 (1V 左右),必然有相当一部分电压降在基区电阻上. 图 5 是器件的 Gummel 图,在 $V_{be} < 0.6\text{V}$ 时, $I_b > I_c$, 电流增益小于 1,这是 B-E 结表面漏电流的影响. 在 $V_{be} = 0.9\text{V}$ 之后, I_c, I_b 曲线的斜率减小,趋于饱和,电流增益小于 1,根据 Gummel-Poon 模型,这是因为受到较大发射极电阻 R_e 的影响^[5].

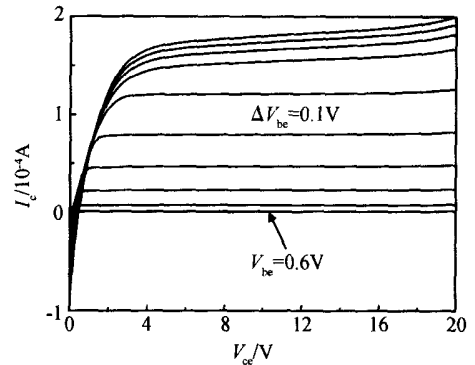


图 4 器件输出特性
Fig. 4 Output characteristics

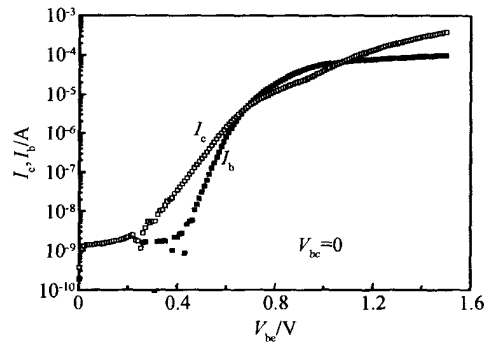


图 5 器件的 Gummel 图
Fig. 5 Gummel plot of the device

图 6 是 $V_{ce} = 10\text{V}$ 时,器件的直流跨导 $g_m (I_c / V_{be})$ 和小信号跨导 $g_{mac} (I_c / V_{be})$ 随 V_{be} 的变化. 由于 HP4156C 在提供基极输入电压的同时也测量基极电流,所以在测量跨导的同时很容易得到图 7

中直流电流增益 (I_c/I_b) 与小信号电流增益 β_{ac} (I_c/I_b) 的曲线. 在图 6 中, g_m 与 g_{mac} 的变化趋势差别很大, g_{mac} 在 $V_{be} = 1.15V$ 附近达到峰值 $0.45mS$, 比 g_m 大 4 倍多, 在 $V_{be} > 1.25V$ 之后, $g_{mac} < g_m$, 而在图 7 中相应的状态下, 电流增益的变化小得多. 在 $V_{be} = 1.17V$ 时, β_{ac} 开始小于 β .

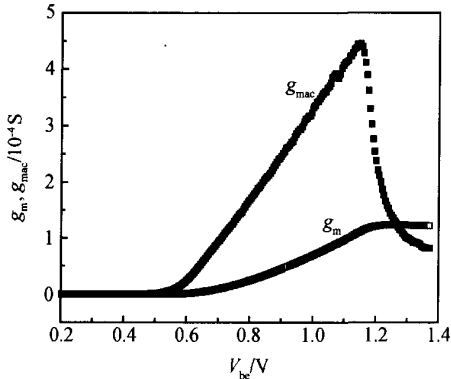


图 6 跨导随 V_{be} 的变化曲线

Fig. 6 Transconductance- V_{be} curves

的主要来源是发射极欧姆接触电阻. 可能有两方面的原因导致欧姆接触电阻过大: 一是较大的离子注入剂量使发射区的损伤比较严重, 快速退火没能使注入造成的损伤完全恢复, 从而影响了欧姆接触的效果; 二是考虑到发射区的高掺杂, 在欧姆接触工艺之前没有做高浓度注入, 所以在发射区表面可能会存在高阻的薄层, 使欧姆接触电阻变大.

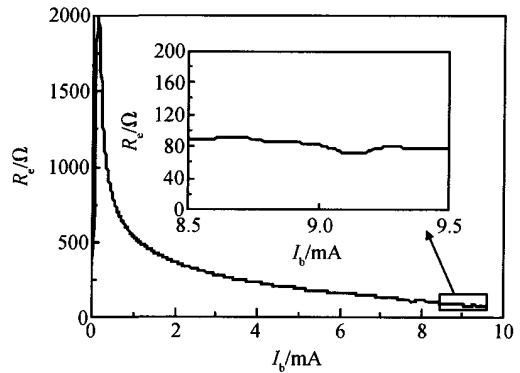


图 8 dV_c/dI_b 随 I_b 的变化曲线

Fig. 8 dV_c/dI_b-I_b

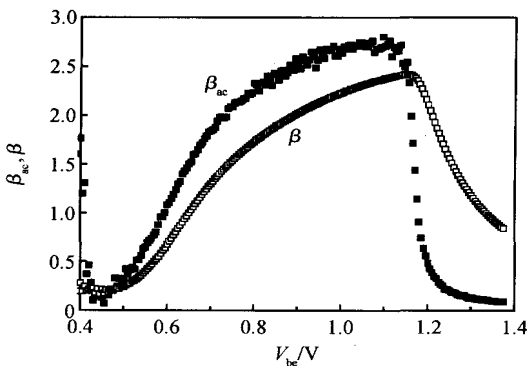


图 7 电流增益随 V_{be} 的变化曲线

Fig. 7 Current gain V_{be} curves

4 讨论

4.1 发射极电阻

为了确切知道发射极电阻, 采用了 R_e -Flyback 的测量方法^[6], 在 $I_c = 0$ 的情况下, 测量集电极电压与基极注入电流的变化关系. 在较大的注入电流下, $R_e = dV_c/dI_b$. 图 8 就是 dV_c/dI_b 随基极电流的变化, R_e 约为 90Ω . 根据发射极实际载流子浓度和几何尺寸, 计算得到的发射区电阻为 0.043Ω , 所以 R_e

4.2 跨导与电流增益

器件采用电压控制模式, 与 MOS 器件相同, 用跨导代替电流增益来作为衡量直流特性的重要指标. 在 $V_{be} = 1.1V$ 附近跨导和电流增益达到最大, 对以往的双极器件来说已工作在大注入状态, β 值会下降. 由于这种器件的基区很薄, 基区电阻较大, 基区电阻上的电压降也增大, 特性参数峰值对应的输入电压也会相应增大. 对比图 6 和图 7, 在 $V_{be} = 0.8 \sim 1.2V$ 之间, g_{mac}/g_m 要比 β_{ac}/β 大得多, 由此可以预期当器件工作在交流状态时, 对应跨导的频率特性会优于对应电流增益的频率特性, 相关实验数据将另文发表.

g_{mac} 在峰值附近会很快地下降, 所以在测量交流特性的时候, 直流工作点的确定是至关重要的. 对于这个器件, 最佳的直流工作点应该在 $V_{be} = 1.1V$, 这时跨导和电流增益都是比较大的. g_{mac} 随 V_{be} 的变化非常敏感, 所以这种器件有希望在高速数字电路中中得到应用.

5 结论

采用全离子注入在 p-衬底上实现了 npn 的纵向结构, 基区宽度为 $80nm$. 经过版图设计和工艺流

片,在 SOI 材料上研制了这种新型器件,并对部分样管进行了封装.这种器件更倾向于电压控制型器件,器件直流特性的结果表明:跨导比电流增益更能准确地描述器件特性,这种器件更倾向于电压控制型器件,特别适用于数字电路的开发和应用.

参考文献

- [1] Harame D L , Stork J M C , Meyerson B S , et al. Epitaxial base transistor with ultrahigh vacuum chemical vapor deposition (UHV/CVD) epitaxy: Enhanced profile control for greater flexibility in device design. *IEEE Electron Device Lett* ,1989 ,10 : 156
- [2] Böck J , Knapp H , Aufinger K , et al. High-performance Implanted base silicon bipolar technology for RF applications. *IEEE Trans Electron Devices* ,2001 ,48(11) :2514
- [3] Huang Chang , Yang Yinghua , Xu Ping , et al. Microwave performance of vertical dual carrier field effect transistors and integrated circuits. *2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings* ,2000 ,1 :13
- [4] Slater D , Enquist P , Hutchby J , et al. Pnp HBT with 66GHz f_{max} . *IEEE Electron Device Lett* ,1994 ,15 :91
- [5] Getreu L E. Model of bipolar junction transistor. Beijing : Science Press ,1981 :118 (in Chinese) [格特鲁 L E. 双极晶体管模型. 北京 : 科学出版社 ,1981 :118]
- [6] Gacioletto L J. Measurement of emitter and collector series resistances. *IEEE Trans Electron Devices* ,1972 ,ED-19 :692

A New Structure of One-Base-Contact Transistor *

Yang Ru , Li Guohui , Ji Chengzhou , Tian Xiaona , Han Dejun , and Ma Benkun

(Institute of Low-Energy Nuclear Physics , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China)

Abstract : A newly structured transistor with one-base contact is designed. This npn transistor 's structure is formed fully by ions implantation on a p-type wafer ,the base width is about 80nm and the carrier concentration is 10^{18}cm^{-3} . The transistor is fabricated on a 2 μm laboratory line. The base is biased by voltage signals ,and when V_{be} is about 1.15V , $\beta_{ac} (I_c / I_b) = 2.7$, $g_{mac} (I_c / V_{be}) = 0.45 \text{mS}$. g_{mac} / g_m is far higher than β_{ac} . Therefore the transistor can be characterized or described accurately by its g_m ,and this type of transistor tends to be a voltage-controlled device ,and can be used in digital circuits.

Key words : one-base-contact ; narrow base ; ion implantation

EEACC : 2560J ; 2530B ; 2550B

Article ID : 0253-4177(2005)02-0345-04

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60244004)

Received 13 February 2004 , revised manuscript received 8 May 2004