

在液氮温度下具有高增益的 SiGe/Si HBT*

邹德恕 陈建新 沈光地 高 国 杜金玉 张时明 袁 颖 王东凤 邓 军

*(北京工业大学电子工程系和北京市光电子技术实验室 北京 100022)

W. X. Ni and G. V. Hansson

(Department of Physics, Linköping University, s-581 83 Linköping, Sweden)

摘要 本文分析了硅双极晶体管电流增益在低温下减小的原因. 通过优化设计, 研制出在液氮温度下具有高增益的 SiGe/Si HBT, 并分析了其工作机理.

EEACC: 2560J

1 引言

由于科学技术的迅速发展, 人们对低温电子领域的微电子技术研究开发日益重视. 特别是红外技术的发展, 如碲镉汞、多量子阱砷化镓等高灵敏度红外探测器, 它们都工作在液氮温度, 实现了低噪声、高灵敏度、高稳定性. 因此, 在液氮温度下工作, 具有高增益的前置放大和信号处理的器件就成为迫切要解决的关键问题.

2 影响硅同质结双极晶体管低温增益的主要因素

硅的同质结晶体管, 要保证一定的电流增益, 发射区一般高掺杂, 其浓度要高于基区浓度 2 个数量级左右, 这就给低温工作带来了困难.

2.1 低温下发射区禁带变窄

杂质浓度高到一定程度, 使孤立的杂质能级展宽成为一个杂质能带, 在低温时杂质能带的导电性不断地表现出来, 使得发射区禁带变窄效应更加明显^[1], 使发射效率明显下降.

2.2 低温下发射区与基区间势垒增高

由于发射区与基区之间一般是突变结, 当温度降低时, 由于硅的禁带宽度是负温度系数, 禁带要变宽, 因而使之正向势垒增高, 使发射效率下降.

2.3 低温下基区载流子冻析效应^[2](freeze-out)

在低温下, 当杂质浓度为 $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ (N 型) 时, 载流子易被杂质原子俘获而不能导电,

* 本项目为国家“863”计划资助项目

邹德恕 男, 1940 年出生, 高级工程师, 现从事微电子技术, SiGe/Si HBT 及 IC 的研究工作
1996 年 2 月 20 日收到初稿, 1996 年 7 月 3 日收到修改稿

在表面态及体内陷阱增多时,冻析效应更明显,这使电流增益进一步下降.

由于上述原因,硅同质结晶体管的电流增益在低温下很低,而无法工作.

3 SiGe/Si 异质结双极晶体管低温高增益的机理

在硅(100)衬底上直接外延生长 SiGe 应变层,其主要特点是禁带变窄而且是价带上移. 用 Si/Si_{1-x}Ge_x/Si 三层结构制成 n-p-n 异质结双极晶体管^[3,4],基区是窄带材料,发射区及收集区都是宽带材料. 基区中价带上移了 ΔE_g ,这使得基区中的空穴向发射区注入时遇到更高的势垒阻挡,而发射区中的电子向基区注入时势垒仍很低,这就使发射效率大大提高. 而在低温时,空穴的能量降低,再加之基区高掺杂既克服了载流子冻析效应,又使禁带进一步变窄,结果使低温电流增益提高.

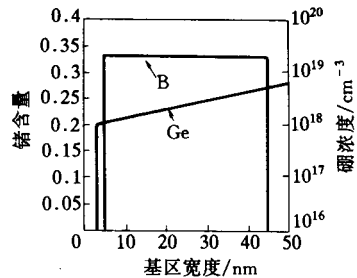
4 SiGe/Si 异质结双极晶体管的设计与制造

4.1 SiGe/Si 异质结双极晶体管的设计

为了保证有一定的电流增益,同时要有足够临界厚度,基区 SiGe 合金 Ge 含量选为 20% 渐变至 28%,基区掺杂浓度定为 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$,厚度为 50nm. 为满足电流增益和一定的 V_{eb} 结反向特性的要求,选取发射区杂质浓度为 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$,厚度为 100nm;同时为得到良好的欧姆接触,在发射区上生长 100nm 硅帽层,掺杂浓度 $> 5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$. 收集区要保证有足够的击穿电压,选取杂质浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,厚度为 400nm. 如图 1a 所示,详细纵向结构如图 1b 所示. 横向结构采用双台面形式,发射区面积为 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$,基区面积 $75 \times 140 \mu\text{m}^2$.

$n^+ \text{-Si} > 5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	100nm	接触层
$n \text{-Si} \ 5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	100nm	发射区
$p^+ \text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$	50nm	基区
$n^+ \text{-Si} \ 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	400nm	收集区
$n^+ \text{-Si}(100) \ 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	500 μm	衬底

(a)



(b)

图 1 SiGe/Si HBT 的纵向结构

4.2 SiGe/Si 异质结双极晶体管的制造

SiGe/Si HBT 纵向结构的生长是由瑞典林雪平大学完成的. 他们使用 Balzers UMS-630 Si MBE 系统进行基片生长. 该系统具有 Si 和 Ge 的电子束蒸发源,一个低能 Sb 离子源,一个 Sb 热蒸发源和一个用作不同掺杂的高温 B 源. 在该系统中,Si,Ge,B 和 Sb 的束流均可用质谱仪精确监控.

器件的生长过程如下:首先在掺杂为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的 $n^+(100)$ 衬底上生长 400nm 的 n-Si,生长温度 800°C ,同时利用低能 Sb 离子源进行掺杂,掺杂至 $7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. 然后将生长温度降至 520°C ,生长 50nm SiGe 层,同时利用高温 B 源进行掺杂,掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$.

再继续生长 100nm 发射区,利用低能 Sb 离子源使浓度掺杂到 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$. 最后生长 100nm n^+ -Si, 同时利用 Sb 蒸发源使掺杂浓度大于 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$. 整个生长过程利用高分辨率 X 射线衍射(HRHRD)的 2 维 K 空间图显示 MBE 生长的 Si 和 SiGe 层,可以得到很好的质量保证.

HBT 样管的制作是在北京工业大学电子工程系进行的. 其工艺流程如下:在生长好的基片上首先利用 PECVD 生长一层 SiO_2 , 光刻出基区台面,利用选择性腐蚀液腐蚀掉 n 型 Si, 露出 p 型 SiGe 层(该选择性腐蚀液基本不腐蚀 SiGe 层). 然后用干法刻蚀,将 SiGe 层刻掉, n 型收集区刻蚀掉 50~100nm. 光刻发射区台面,利用选择性腐蚀液将发射区台腐蚀出来,同时将收集区腐蚀到 n^+ 层, 这样三个台面均已形成. 最后光刻引线孔,蒸铝,光刻铝电极,合金,压焊即作出了 SiGe/Si HBT.

5 测试结果

把封装好的 SiGe/Si HBT 放到液氮中,测出低温直流增益,并在室温条件下,测出室温直流增益,测试结果见表 1.

表 1 室温 β 和低温 β 比较表

	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5
室温 β_{\max}	154	133	27	240	284
低温 $\beta_{\max}(77\text{K})$	4200	8158	1666	8100	2800

从表中可以看出低温 $\beta(77\text{K})$ 与室温 β 比值的典型值为 10~30,最大可达 60 多. 电流增益随温度变化曲线如图 2 所示. 从中可以看出从室温到液氮温度 β 有一个迅速增大到逐渐平滑的过程. 图 3 给出了样品 4 室温和低温输出特性曲线. 从图 3 中得到,室温 $\beta_{\max} = 240$, 低温 $\beta_{\max} = 8100$.

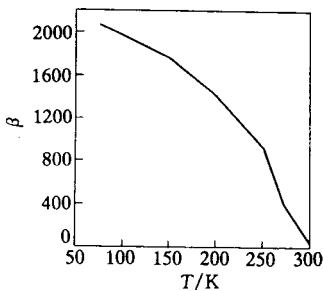


图 2 β - T 的关系曲线

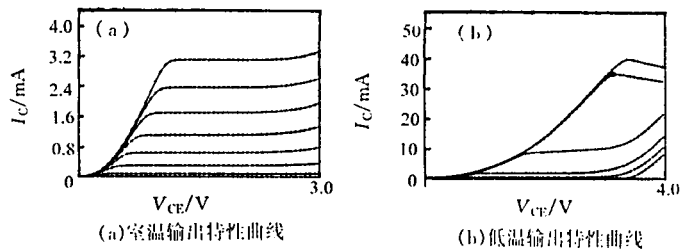


图 3 SiGe/Si HBT 的输出特性曲线

- (a) 室温输出特性曲线; $\beta = 240$, $\Delta I_b = 3 \mu\text{A}$;
 (b) 低温输出特性曲线; $\beta = 8100$, $\Delta I_b = 3 \mu\text{A}$.

6 结 论

SiGe/Si HBT 在液氮温度下显示出良好的低温性能, 电流增益不但下降, 反而增加几倍到几十倍. 这一新技术克服了普通硅晶体管的缺点, 促进了低温电子技术的发展. 我们研制出的器件的低温 β 已达到目前国际同类器件水平^[4]. 该技术有良好的发展前景.

参 考 文 献

- [1] S. E. Swirburn *et al*, IEDM, 1986.
- [2] 吴金, 等, 《微电子学与计算机》, 1991, **10**: 41.
- [3] G. L. Pattern *et al*, IEEE Electron Device Lett., 1990, **1**(14): 171.
- [4] A. Gruhle *et al*, IEEE Electron Device Lett., 1992, **13**(4): 206.

High Gain SiGe/Si Heterojunction Bipolar Transistor at Liquid Nitrogen Temperature

Zou Deshu, Chen Jianxin, Shen Guangdi, Gao Guo, Du jinyu,
Zhang Shiming, Yuan Ying, Wang Dongfeng and Deng Jun

(*Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022*)

W. X. Ni and G. V. Hansson

(*Department of Physics, Linkoping University, s-581 83 Linkoping, Sweden*)

Received 20 February 1996, revised manuscript received 3 July 1996

Abstract The decrease of current gain of silicon bipolar transistor at low temperature has been analysed. High gain SiGe/Si HBT at liquid nitrogen temperature has been persented by optimizing related parameters. Its operating mechanism has also been analysed.

EEACC: 2560J