

GSM BE 原位生长 SiGe HBT 材料*

黄大定 刘金平 李建平 林燕霞 刘学锋 李灵霄 孙殿照 孔梅影 林兰英

(中国科学院半导体研究所材料中心 北京 100083)

摘要 采用 GSM BE 工艺生长的单晶 SiGe HBT 结构材料, 经 X 射线双晶衍射, 透射电镜和扩展电阻深度分布测量说明: 该材料晶体完整性好, 无应力弛豫, 界面平整陡峭, 发射区 N 型掺杂浓度 $2 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 100~200nm; 基区 SiGe 合金 Ge 组分 0.05~0.20, P 型掺杂浓度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 40~100nm; 集电极浓度 $\sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. 达到了生长 SiGe HBT 材料的条件.

PACC: 6855, 7340

1 引言

SiGe 异质结双极晶体管(HBT)因其截止频率高(一般 $f_T = 50\text{GHz}$), 低温特性好, 噪音低, 可与硅集成电路工艺完全兼容而受到重视, 并正在进入无绳电话 IC 市场^[1]. SiGe HBT 工艺的关键是获得符合器件结构要求, 无应力弛豫, 晶体完整性好的材料. 现在广泛采用的有超高真空气相反应淀积(UHV/CVD)^[2,3]、分子束外延(MBE)^[4,5]及气体源分子束外延(GSM BE)^[6,7]等.

用 UHV/CVD 工艺生长 SiGe HBT 材料, 可获得高质量掺杂的 SiGe 基区. 但用单晶硅作发射区时, 生长温度都在 700 以上^[8], 会造成基区 SiGe 层的弛豫产生大量失配位错, 从而使 HBT 器件性能变坏, 故此工艺多采用低温多晶硅做发射极^[2]. 固相源 MBE 可以获得低温连续生长的 HBT 材料, 器件截止频率 f_T 最高可达到 116GHz, 但由于磷、砷蒸汽压过高, 难以控制, 而采用锑作 N 型掺杂. 可是锑的严重分凝现象又会使其在表面富集^[9].

本工作采用的 GSM BE 法, 除具有固相源 MBE 所具有的低温连续生长的优点外, 因引入了乙硅烷(Si_2H_6)、双硼烷(B_2H_6)及磷烷(PH_3)等气相源, 使掺杂易于控制. 由于氢化物裂解后产生的氢的存在, 可抑制缺陷产生及表面分凝作用, 并可以进行选择性外延. 本文介绍采用此工艺生长 SiGe HBT 材料所取得的结果.

* 国家九五攻关项目

黄大定 男, 高级工程师, 现从事 SiGe 半导体材料的化学束外延生长研究

刘金平 男, 博士生, 现从事 SiGe 半导体材料的化学束外延生长研究

李建平 男, 实验师, 现从事 SiGe 半导体材料的化学束外延生长研究

1999-02-02 收到, 1999-06-10 定稿

2 生长实验

2.1 生长工艺条件

在国产 GSMBE 设备上生长 SiGe 合金的工艺及结果已有报道^[10-12]。为了生长 SiGe HBT 结构, 我们使用 N 型重掺杂 Sb 直拉硅(001)单晶片, 直径 50.8cm 及 76.2cm, 电阻率 $\rho \sim 0.01\Omega \cdot \text{cm}$, 硅片经硫酸除蜡后, 稀释 HF 腐蚀, 去离子水冲净后, 进入真空室, 于 250 $^{\circ}\text{C}$ 除气 10h。在结构材料生长前, 硅片在 $1 \times 10^{-7}\text{Pa}$ 真空度先加热到 850 $^{\circ}\text{C}$ 除气 30min, 直到用高能电子衍射(RHEED)监测看到清晰的 2×1 再构为止。在此后的材料生长全过程中, 用 RHEED 观察生长的全过程, 使 2×1 再构保持不变。

在生长 SiGe HBT 结构材料过程中, 为了提高低温下硅生长速度, 我们将乙硅烷(Si_2H_6)的裂解温度维持在 470 $^{\circ}\text{C}$ ^[13], 乙硅烷流量 4sccm。收集区生长时只通入乙硅烷, 生长温度为 700 $^{\circ}\text{C}$, 时间 30min。此后开始生长 SiGe 合金, 固体锗炉温度保持在 1060 $^{\circ}\text{C}$, 硼烷(B_2H_6)流量 2sccm, 生长温度为 550 $^{\circ}\text{C}$, 时间 14min。发射区生长时, 生长温度保持 570 $^{\circ}\text{C}$, 磷烷(浓度 0.1%)流量 0.6sccm, 生长时间 110min。

2.2 测试分析

除在材料生长过程中, 对生长全过程进行 RHEED 原位分析外, 还对材料进行了二次离子质谱(SMS)、扩展电阻深度剖面(SRP)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)及 X 射线双晶衍射(DCXR)结构分析。

对于 RHEED、SMS、SEM 等在过去的文章中已有介绍^[11,12]。这里将着重介绍 DCXR、SRP、TEM 的结果。

DCXR 实验分析是在 SLX-1AL 型 X-光机上进行的。仪器角测量精度为 0.001 $^{\circ}$; 分辨率为 0.01 $^{\circ}$ 。测量时将 2θ 角选定为 Si(004)衍射峰, 对 ϕ 角进行扫描, 获得 SiGe 合金回摆曲线结果。

TEM 结果是在 JEM-200CX 型透射电子显微镜上对样品横截面进行的观察, 并对 SiGe 层进行了 TEM 高分辨衍射测量, 测量加速电压为 200kV, 点分辨率为 0.45nm。

SRP 是在 A SR-100C/2 型扩展电阻仪上进行测量的。将样品磨角 3 $^{\circ}$; 对其纵向杂质分布进行测试, 线度分辨率为 10nm。

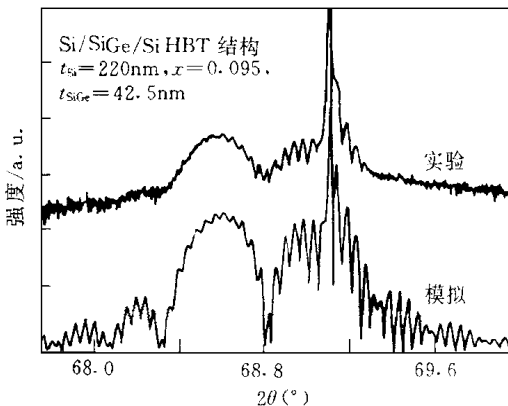


图 1 原位生长的 n-p-n Si/SiGe/Si HBT 器件结构材料的 X 射线双晶衍射谱

3 结果与讨论

3.1 结果与分析

DCXR 结果示于图 1, 可以看到在 SiGe 峰两边有清晰的 Pendellosung 条纹存在, 说明生长的三层 Si/SiGe/Si 结构界面平整, 各层晶体结构完整, 厚度均匀, 生长方向上 Ge 含量没有变化。图中的计算机模拟结果是根据畸变晶体的动力学衍射理论^[14], 假设 SiGe 与硅晶体

完全共格而得到的, 设定的结构相关值: $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的 Ge 组分 $x = 0.095$, 厚度 $d_{\text{SiGe}} = 42.5\text{nm}$, 发射区厚度 $d_{\text{Si}} = 220\text{nm}$. 可以看到, 测量结果与理论模拟的理想材料的曲线符合得很好. 由此可见, 生长的 SiGe 合金完整性很好, 界面平整, 无应力弛豫

图 2(a) 给出的是该材料的横截面 TEM 像, 图 2(b) 为 SiGe 层高分辨衍射谱, 可见外延层晶体完整性好, 均匀、平整, 合金结构未见失配位错. 由图中可直接测量得到 $d_{\text{SiGe}} \cong 42\text{nm}$, $d_{\text{Si}} = 220\text{nm}$, 与 DCXRD 结果符合得很好.

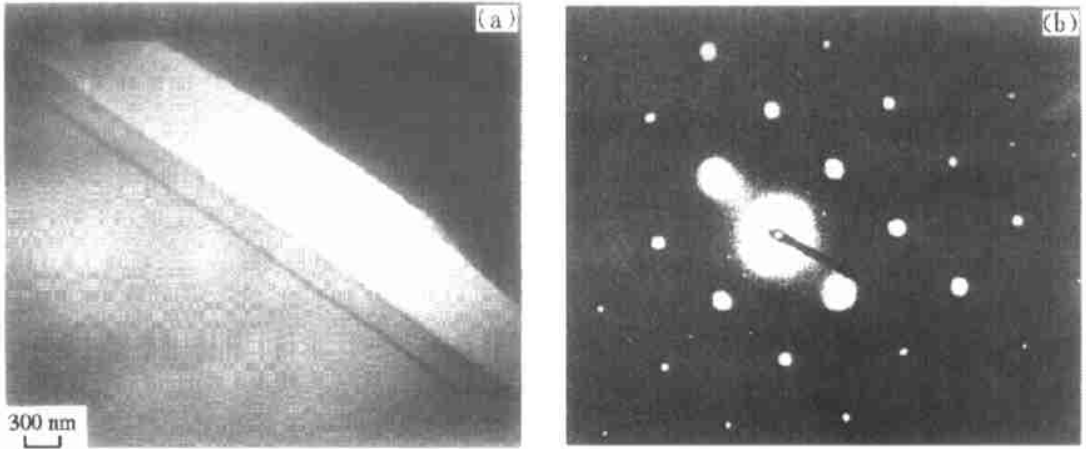


图 2 原位生长的 n-p-n Si/SiGe/Si HBT 器件结构材料的
(a) 横截面 TEM 像及 (b) TEM 衍射谱

图 3 是材料的 SRP 深度剖面结果, 显示此材料为 npn 三层结构. 发射区 N 型均匀掺杂, 浓度 $2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, 厚度在 220nm 左右; 基区 P 型掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 厚度 ~ 50nm; 收集区 (未掺杂) 杂质浓度为 $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 以下. 此结果也与 DCXRD 分析结果符合得很好.

3.2 讨论

以上是我们生长的 Si/SiGe/Si npn HBT 结构的典型测试结果. 采用 GSMBE 工艺, 我们已获得晶体完整性好, 无应力弛豫, Ge 组分均匀, $x = 0.1$ (在 0.05 到 0.20 范围内可调), P 型均匀掺杂浓度近 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 厚度 d_{SiGe} 为 40~100nm 的 SiGe 合金层; 发射区为低温连续生长的单晶硅层, N 型磷掺杂均匀, 浓度在 $2 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$, 厚度近 100~200nm; 收集区不掺杂时, 杂质背景浓度小于 $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$.

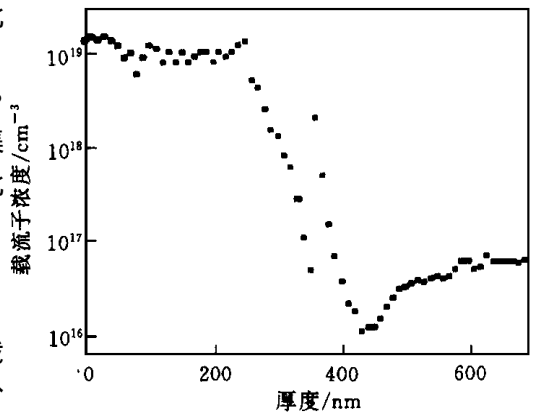


图 3 原位生长的 n-p-n Si/SiGe/Si HBT 器件结构材料的 SRP 深度剖面

在我们以前发表的文章中^[11], 曾报道 Si/SiGe/Si 结构 SMS 结果与 XRD 及 TEM 结果一致, 基区硼掺杂区与 SiGe 生长区重合得很好, 即 HBT 结构中 pn 结的位置与 Si/SiGe 异质结重合. 文献[11]中给出了 Si/SiGe/Si 生长过程中 RHEED 结果及外延层表面的 SEM 结果. 可以看到材料生长过程中外延层生长一直保持二维生长, 晶体结构完整, 外延层表面

光滑、平整,不存在结构缺陷

4 结论

采用 GSMBE 技术,可在低温下连续生长 Si/SiGe/SiHBT 结构材料,其晶体完整性好,无应力弛豫,界面平整、陡峭,其主要参数为:

发射区硅层: N 型磷掺杂浓度 $2 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 100~ 200nm;

基区 SiGe 层: P 型硼掺杂浓度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 40~ 100nm, Ge 组分 $x = 0.05 \sim 0.20$;

系统背景掺杂浓度小于 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

由此,我们已具有了根据器件制备设计要求生长 SiGe HBT 材料的条件.

致谢 作者对中国科学院半导体研究所王玉田教授进行 DCXRD 测量,吴巨博士测量 TEM,杨丽卿测量扩展电阻表示感谢

参 考 文 献

- [1] Compound Semiconductor Winter I(1998) p30 及 Fall II (1998) p7.
- [2] John D. Cressler, IEEE Trans Microw. Theory Tech., 1998, **46**(5): 572
- [3] 张进书,金晓军,钱佩信,等,半导体学报,1998, **19**(5): 394
- [4] A. Sch öppen *et al*, IEEE International Electron Devices Meeting, 1995, p743
- [5] 邹德恕,陈建新,沈光地,等,半导体学报,1997, **18**(5): 367
- [6] Hiroyuk Wado *et al*, J. Crystal Growth, 1995, **147**: 320
- [7] 邹吕凡,王占国,孙殿照,等,半导体学报,1997, **18**(5): 333
- [8] B. S Meyerson, Appl Phys Lett, 1986, **48**(12): 797.
- [9] K. Nakagawa *et al*, Abstract Book of 10th International Conference MBE, Paris, France, 1998, 546
- [10] 李建平,等,第四届全国分子束外延学术会议,1997. 9,江苏无锡, p114
- [11] 刘学锋,刘金平,李建平,等,半导体学报,1998, **19**(12): 896
- [12] J. P. Liu *et al*, J. Crystal Growth, 1998, **193**: 35.
- [13] 李建平,等,半导体学报,1999, **20**(7): 559
- [14] L. Tapter *et al*, J. Appl Phys, 1990, **67**(3): 1298

In Situ Growth of SiGe HBT Structural Materials by GSMBE

Huang Dading, Liu Jinping, Li Jianping, Lin Yanxia, Liu Xuefeng,

Li Lingxiao, Sun Dianzhao, Kong Meiyang, Lin Lanying

(Material Center, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 2 February 1999, revised manuscript received 10 June 1999

Abstract In situ GSMBE growth of Si/SiGe/Si n-p-n HBT device material is demonstrated with designed structural and electrical profiles, as verified from characterizations by X-ray diffraction, transmission electron microscopy, and spreading resistance profiling analysis. The material for fabrication of SiGe HBT devices can now be grown, in which the emitter is 100~200nm thick with Phosphor doping level is $2 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, the base is 40~100nm, Ge composition is 0.05~0.20, and the base Boron doping level is $> 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, the carrier concentration in the collector is $\sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

PACC: 6855, 7340