

# 红外焦平面技术的重要进展

## ——单片式 SiGe 红外焦平面阵列的物理基础和关键技术

魏同立 郑 茫 吴 金

(东南大学微电子中心,南京 210018)

由 SiGe 合金与 Si 构成的应变层异质结构、量子阱是 80 年代中期发展起来的一种新型半导体材料。本文着重讨论了单片式 SiGe 红外焦平面阵列的物理基础、高质量 SiGe 材料的制备以及低温 SiGe 器件研制中的几个关键技术。

### 一、焦平面阵列的物理原理、应用和技术途径

红外焦平面阵列 (IRFPA) 能用于红外成像,这正如电荷耦合器件 (CCD) 用于可见光成像一样,均为集成化二维固态探测器阵列用于传感图象。同 CCD 一样,IRFPA 是能替代真空二极管和机械扫描的更紧凑、更灵敏和分辨率更高的器件。实际上,与基于 CCD 的摄影录像机相当的 IRFPA 已有商业产品。目前很多学科的科学家和工程技术人员都在研究或已使用 IRFPA 技术,因为它能提供十分详细和准确的信息。例如:

夏威夷天文台已把  $128 \times 128$  元的 IRFPA 用于红外天文学,天文台的一位有 40 多年工作经验的天文学家声称,使用此阵列在第一个夜晚所收集的数据比他 40 年来从事这项工作所收集的数据总和还要多;

在卫星上可使用 IRFPA 测定上层大气层的温度,探测地面况藏、水资源和农业收成,记录气象图形;

医学研究人员正在试验和采用 IRFPA 来诊断皮肤疾病、循环或神经系统紊乱、胸癌以及新生儿健康状况;

工业界的工程师们正在研究将 IRFPA 应用于多种场合,如印刷电路板的生产、大楼热耗散的测量、高温处理控制、元件检验等。

十分重要的是 IRFPA 可广泛应用于国防工程,例如精确末制导弹技术等,成为各国竞

相发展的一种高新技术。

实现焦平面阵列的技术途径一般有混合式、单片式和 Z 平面三种类型,这三种焦平面的三种器件各有千秋,竞相发展。但根据我国的实际与未来的要求,当前应着力研制单片型结构。单片型阵列即用同一个芯片完成探测和多路传输功能,因其集成度很高,所以费用低廉。单片型阵列常用 PtSi 和非本征硅制成,这些硅类材料非常适用于多路传输,但红外探测能力较弱,人们正在开发全部使用窄能隙半导体,如 HgCdTe 或 InSb 材料做成 CCD(电荷耦合器件)结构的全单片形阵列,这种阵列红外探测灵敏度高。但是,大多数 IR 成像都要求在单元中具有较高的电荷处理能力,而在窄能隙半导体材料上,因其击穿电压低,同时当通过窄能隙 CCD 移动电荷来完成读出功能时,噪声和电荷俘获还存在严重问题,所以仅用窄能隙半导体材料来制造单片型阵列,其 CCD 多路传输和读出电路的电荷存储容量有限。单片式结构的设计方法是在硅衬底上异质外延生长窄能隙探测器材料(如 SiGe 材料),硅衬底上同时包含多路传输器。这种方法将取决于成功的异质外延技术,目前正处于发展阶段。

由 SiGe 合金和 Si 构成的 SiGe/Si 应变层结构、量子阱和超晶格(简称“新型 SiGe 材料”)是 80 年代中期发展起来的一种新型半导体材料,因其独特的物理性质和重要的技术应用价值,以及与现代硅微电子工艺相兼容的特性,受到人们的高度重视,被认为是 90 年代新

型光电子和微电子材料,通过改变材料的组分、应变层厚度和掺杂情况,可以根据需要自由剪裁材料的光电性质,发展各种新型的光电子和微电子器件<sup>[1]</sup>。目前,利用 SiGe/Si 量子阱子能级跃迁已制成高灵敏度、低噪声的远红外(8—4 $\mu\text{m}$ )光电探测器;利用 SiGe/Si 异质结构制成了  $f_T$  高达 75GHz 的 SiGe HBT (异质结双极晶体管)器件和  $t_{pd}$  小于 30ps 的 SiGe ECL (发射极耦合逻辑)门电路<sup>[2,3]</sup>;利用 SiGe 的高电子迁移率制成了高性能 MOSFET (金属/氧化物/半导体场效应晶体管)等<sup>[4]</sup>。这些研究结果表明, SiGe 合金是一种很有希望的制造单片型红外焦平面阵列的材料, SiGe 单片式红外焦平面阵列器件的研究将成为国内外学术界、经济界和军事部门十分重视的技术发展方向。

## 二、单片式 SiGe 红外焦平面阵列及其高质量 SiGe 材料的制备

量子阱红外探测器是近几年来发展起来的一种新型红外探测器,是目前红外传感器技术的方向,它具有响应速度快、量子效率高、可变波长、热稳定性和均匀性好等优点。国内外在此方面的工作大多基于 III-V 族材料,美国洛克威尔国际公司于 1991 年成功研制出长波红外  $128 \times 128$  元 GaAs/AlGaAs 超晶格多量子阱探测器混成式焦平面阵列,截止波长为 7.7 $\mu\text{m}$ ,信号处理电路采用 CMOS 电路。中国科学院表面物理国家重点实验室和航空航天部 803 所于 1992 年研制成功了截止波长为 9.2 $\mu\text{m}$  的 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器,与国外研究成果相比,器件的主要性能参数 ( $T = 77\text{K}$ ,  $R = 9.7 \times 10^5 \text{V/W}$ , 波长带宽 0.5 $\mu\text{m}$ ,  $D_{BB}^*(500\text{K}) = 1.46 \times 10^9 \text{cm}\sqrt{\text{Hz/W}}$ ,  $D_{\lambda}^*$  达  $6 \times 10^{10} \text{cm}\sqrt{\text{Hz/W}}$ ) 已达到目前国际先进水平<sup>[5]</sup>。中国科学院物理研究所和河北光电研究所也于 1992 年研制成功 45° 耦合及光栅耦合两类探测器,具有国际先进水平,然而由于 GaAs 工艺与 Si 工艺兼容性差,制造单片式 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测阵列还存在相当的困难。

SiGe 外延技术的发展使红外探测器与硅平面工艺兼容成为可能, SiGe/Si 多量子阱红外探测器正日益受到人们的重视。美国加利福尼亚大学电子工程系于 1991 年报道了他们的研究成果,研制成功的 SiGe/Si 多量子阱长波红外探测器的中心波长为 9 $\mu\text{m}$ ,光谱响应范围为 6—12 $\mu\text{m}$ ,峰值响应度为 0.3A/W,77K 时探测率为  $D^* = 1 \times 10^9 \text{cm}\sqrt{\text{Hz/W}}$  ( $\lambda = 9.5\mu\text{m}$ )。这种探测器可与处理信号电路用于焦平面阵列。

另一种新颖的 SiGe/Si 长波红外焦平面阵列是利用 SiGe/Si 异质结势垒内光电发射原理制成的,这种阵列已于 1991 年在美国麻省理工学院林肯实验室研制成功。实验室用分子束外延技术在 P 型硅(100 晶向,  $\rho = 20\text{--}40 \Omega \text{cm}$ ) 衬底上生长的 40nm 厚的 SiGe/Si 层上制备了具有光腔结构的  $\text{Si}_{0.53}\text{Ge}_{0.47}$  异质结势垒内光电发射长波(9.3 $\mu\text{m}$ )红外探测器,并且与 BCCD (埋沟电荷耦合器件)多路传输器集成在同一硅衬底上,元数为  $400 \times 400$ ,工作温度为 53K。该器件明显的优点是制备工艺与硅 VLSI 工艺兼容。

SiGe/Si 红外探测器研制中的关键技术是高质量 SiGe 材料的外延生长。SiGe 应变层材料应在低温( $<700^\circ\text{C}$ )下形成,含氧量应特别低,且需精确控制生长速率和 Ge 的组分。目前用来生长 SiGe 应变层的方法主要有以下几种。

### 1. 分子束延 (MBE)

MBE 是在超高真空条件下生长晶体的方法。它可以在原子级精度控制外延生长的厚度,渐变或突变地改变外延层的组分,实现复杂的掺杂曲线,掺杂浓度范围广;此外,它的生长温度低(400—800 $^\circ\text{C}$ ),易于控制,可使外扩散和自掺杂减至最小。存在的问题是生长效率低,选择外延困难,表面缺陷较大。

### 2. 超高真空化学气相淀积 (UHV/CVD)

UHV/CVD 是普通 CVD 的改进型,与普通 CVD 不同的是:晶体生长温度低(约 500 $^\circ\text{C}$ ),淀积工艺中采用了超纯生长环境。为

了消除碳和氧的玷污,保持类似于 MBE 的超真空基压,由于严格的 UHV 环境,可获得高质量的界面。SiGe 外延生长率由衬底温度和反应压力决定,而对掺杂和 Ge 组分的控制则是通过入口气体组分的改变来实现的。与 MBE 相比,UHV/CVD 在控制缺陷密度、掺杂的灵活性、材料纯度、生产性等方面显示出更大的优越性。

### 3. 快速辐射加热、超低压化学气相淀积(RRH/VLP CVD)

近年来,南京大学在跟踪国际研究的同时,创新发展了用于生长 SiGe 材料(包括 SiGe 异质结构、量子阱、超晶格)的快速辐射加热、超低压化学气相淀积(RRH/VLP CVD)的新型原子级外延方法。这种方法具有成本低廉、操作简便、生长效率高、速率可调、适用范围广等特点。

其他的外延生长方法还包括限制反应工艺(LRP/CVD)、快速加热化学气相淀积(RT/CVD)等。

### 三、低温 SiGe 器件研制的关键技术<sup>[6]</sup>

无论是混成型还是单片型红外焦平面阵列,其工作温度大都在低温区,所以用作信息处理的硅集成电路也应在低温下工作。为获得良好电性能,必须专门设计适于低温工作的硅器件和集成电路,以达到最优化的目的。

在红外焦平面阵列中,硅互补逻辑金属/氧化物/半导体结构(CMOS)电路常用于信号处理。总体上说,MOS 和 CMOS 器件处于低温状态工作具有显著的优越性能,与常温 MOS 器件相比较,其速度和增益上升,功耗下降,可靠性综合指标提高。表 1 给出了低温 MOS 和 CMOS 器件的电参数性能。

图 1 给出了三种不同沟道和衬底掺杂分布,它们都是提供同一阈值电压。第一种分布是最简单的 MOS 工艺技术,但由于背栅和体效应作用,其衬底灵敏度最差,并有较大的结电容;第二种分布是通常常温 MOS 器件的制造工艺,可良好地控制阈值电压和衬底灵敏度,但

物理

表 1 低温 MOS 和 CMOS 器件电参数性能

电参数性能	提高倍数
1. 开关速度	亚微米器件: 1.5—2.5 倍, 长沟道器件: 3—5 倍
2. 压城区斜率	下降了 2.5—4 倍
3. 背栅灵敏度	下降
4. 金属内连线电阻率	下降了 6 倍
5. 重掺杂硅或多晶硅层电阻率	下降了 1—2 倍
6. 金半接触电阻	下降
7. 小信号 MOS 电容	基本不变或略有下降
8. 电迁移电阻	~1000 倍
9. 自锁效应	维持电流: 2—3 倍, 维持电压: 2—3 倍
10. PN 结漏电容	下降~1000 倍
11. SiO <sub>2</sub> 击穿	~1000 倍
12. 热噪声	下降
13. 热载流子效应	增大

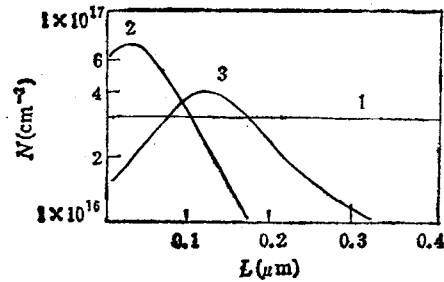


图 1 三种不同的沟道和衬底掺杂分布

沟道中杂质浓度较高,77K 下杂质散射作用较强,因而导致迁移率下降,影响低温 MOS 器件性能;第三种分布是一种最优化的工艺技术,它既可良好地控制阈值电压和衬底灵敏度,结电容又小,此外工艺技术与现有 CMOS N 阱工艺兼容,表面浓度较低,所以反型层中电子迁移率较高,并且有利于提高漏源击穿电压和减小热载流子效应。

SiGe 是一种低温器件使用的优异材料,这是因为 SiGe 材料具有较高的电子迁移率。加拿大滑铁卢大学研究结果表明,对于 N 型 SiGe 沟道 MOSFET,其跨导是 N 型 Si MOSFET 的 1.5 倍,漏电导变高,阈值电压减小。图 2 示出了二者直流输出特性的比较。

众所周知,CMOS 电路的性能很大程度上

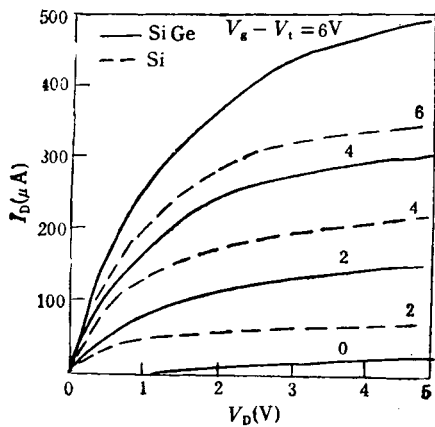


图2 N型 SiGe 和 Si MOSFET 的电学性能比较

受到 PMOS 管的制约,解决这一问题的一个较好的方法就是在 PMOS 管的栅下设计 SiGe 埋层来提高空穴迁移率,从而提高 PMOS 管的跨导。由于 SiGe 埋层造成能带的不连续性,所以它实际上为空穴提供了一量子阱,如图 3 所示。这种结构从两方面提高了空穴的迁移率:(1)反型层不是形成在 Si-SiO<sub>2</sub> 下面,而是在 SiGe 埋层中,且与界面隔有硅缓冲层,这样就减小了表(界)面散射对空穴迁移率的影响;(2) SiGe 层中的应力提高了空穴的迁移率。

同质结硅双极晶体管处于 77K 工作时失去电流放大能力,并且频率性能在低温下也严重退化,造成这一结果的原因是硅晶体管发射区禁带变窄效应和基区中补偿浅能级杂质陷阱效应的作用。经研究表明,硅双极晶体管常温直流理论并不适合低温双极晶体管。在 77K 下,电流增益将随发射区中的杂质浓度的下降和基区中杂质浓度的上升而上升,这一电流增益变化规律完全相反于常温理论<sup>[7]</sup>。所以,为获得高性能的低温同质结硅双极晶体管,必须首

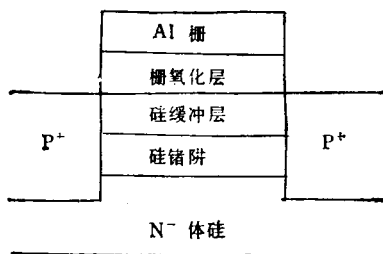


图3 PMOST 中的 SiGe 异质结构

先开展其低温设计理论的研究。

利用轻掺杂发射区和重掺杂基区技术,现已获得了几种高性能的低温双极晶体管。利用多晶硅、非晶硅和含氧半绝缘多晶硅制作发射区构成的异质结或多晶硅发射区双极晶体管,可望获得好的低温性能。但这些方法有如下限制:基区时间常数难以降低,结质量不理想,体电阻和结触电阻相对较大。

SiGe HBT 的一大优势性能是低温下电流增益  $H_{FE}$  反而提高,如图 4 所示。这与 Si 器件恰恰相反。当 SiGe HBT 基区薄层电阻为  $7.5k\Omega/\square$  时,室温下  $H_{FE}$  为 290,在液氮温度下可高达 1000,即增大 5 倍。基区 Ge 含量不同,低温下  $H_{FE}$  的增大量也不同。图 5 示出了基区不同 Ge 含量的各种 HBT 在低温下集电极电流增加与温度的关系曲线,目前已经制成在 133K 时  $H_{FE}$  超过 11000 的 SiGe HBT。SiGe HBT 基区中也不存在低温下半导体浅能级杂质的陷阱效应,所以其  $f_T$  的低温性能与 Si BJT (双极型晶体管)相反,低温下将上升。美国的研究结果表明, SiGe HBT 低温下  $f_T$  为 59GHz [ $f_T(300K) = 53GHz$ ], 由此构成的 SiGe ECL 门电路延迟时间在低温下小于 30ps。这些性能指标高于 Si 器件所能达到的最高极限频率 50GHz。目前已研制出常温  $f_T$  达到 75GHz 的 SiGe HBT。人们预计,低温下 SiGe HBT 的最高截止频率  $f_T$  可达 350GHz,可与 GaAs HBT 相比较。以上研究结果表明, SiGe HBT

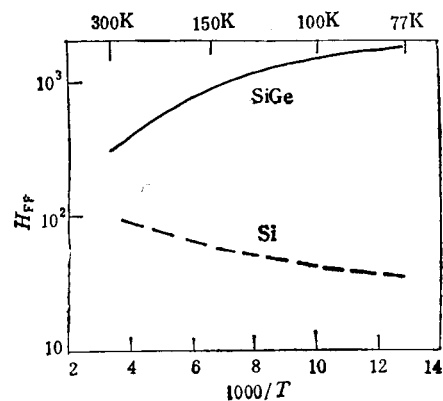


图4 纯 Si 和 SiGe 基区双极器件  $H_{FE}$  与温度的关系

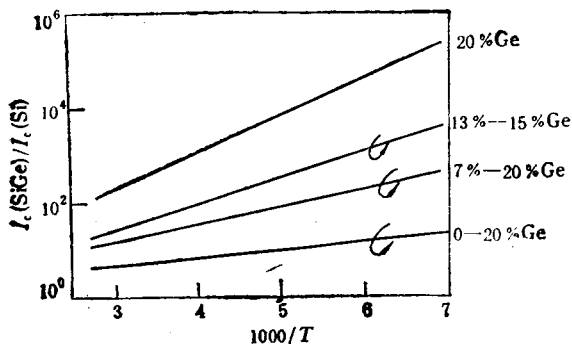


图5 基区不同 Ge 含量的各种 HBT 在低温  $I_c$  与温度的关系

的出现为低温硅双极晶体管和低温超高速双极电路的发展奠定了基础。而事实上,适于低温工作的高性能双极器件也是红外焦平面阵列前置放大器的关键部件。

综上所述,采用 SiGe 技术研制红外焦平

面阵列中的半导体低温器件和电路不仅必要,而且可能,并且 SiGe 微电子器件和电路低温下具有比普通 Si 器件和电路远为优越的电性能。另一方面,采用 SiGe 技术研制 SiGe/Si 量子阱异质结红外探测器也已成为现实,并且将随着外延技术的进步可望获得更优异的性能指标。我们充分相信,随着 SiGe 技术的深入研究,将会使红外焦平面的技术大跨度发展。

- [1] S. C. Jain et al., *Semicond. Sci. Technol.*, **6** (1991), 547.
- [2] G. L. Patton et al., *IEEE Electron Devices Letters*, **EDL-11** (1990), 171.
- [3] J. D. Cressler et al., *IEEE Electron Devices Letters*, **EDL-12** (1991), 166.
- [4] C. R. Selvakumar et al., *IEEE Electron Devices Letters*, **EDL-12** (1991), 444.
- [5] 何春藩,红外与毫米波学报,**11**(1992),102.
- [6] 郑荏等,大自然探索,**10**(1991),33.
- [7] Zheng Jiang et al., *Solid-State Electronics*, **35** (1992), 1697.

## 物理专业毕业生在首都钢铁公司显示的优势

郝玉敏 吴起恕 于培泽

(北京钢铁学院分院,北京 100041)

改革开放给各行各业带来了深刻和深远的影响,高等教育和科研领域也不例外。对物理专业来说,现实的问题之一,就是有一定比例的毕业生到工矿企业工作。

物理专业毕业生到工矿企业后能否发挥作用?他们和工科毕业生相比,是否有竞争力?是否有独具的优势?这些问题十分有必要求得社会舆论界、学生本人及教育工作者的共识。

从首都钢铁公司(简称首钢,下同)的情况看,在企业现代化进程中,物理专业毕业生是大有可为的。钢铁生产过程是物理化学过程。在钢铁生产的工艺系统、控制检测系统和动力系统中,全面涉及到力学、电学、热学、光学的原理和物理量的测量。光谱分析、红外测温、激光测量、光纤传感、光纤通信、光纤图像传递、同位素检测、红外成像等现代物理技术,在首钢已经和

正在被广泛采用。炼铁过程的数学模型,属国际冶金领域尖端技术,该软件的开发就涉及到流量、压力、温度、湿度、阻力、料重、料位高度、布料角度等多项物理参数的动态测定,而焦碳水分的测定需要采用核物理的中子测水技术,在参数的取得、传递和计算机控制中又采用了光纤技术。

又如,1992年3月,首钢炼铁厂的4号高炉进行改造性大修,为最大限度的缩短工期,首钢采用了新的技术方案,即在原高炉没有停产前,就将新高炉炉体建在临时滑道上,待旧炉体拆除后,直接将新炉炉体平移过去。如何将这个高32.90m、直径14.09m、重2442t的庞然大物平移到位呢?首先要解决的问题就是要准确测算出在这种高接触应力下的滑动摩擦系数,以此为依据来确定推动力的大小及动力装