

9 μm $\text{p}^+\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{p-Si}$ 异质结 内光电红外探测器*

龚大卫 卢学坤 卫星 杨小平
胡际璜 盛麓 张翔九 王迅

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海, 200433)

周涛 叶红娟 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海, 200083)

摘要 用分子束外延方法生长了 $\text{p}^+\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{p-Si}$ 异质结, 并用平面工艺制成了内光电红外探测器, 器件截止响应波长达 $9\mu\text{m}$, 在 52 K 时, $R_{\nu,500\text{K}} = 3.3 \times 10^3 \text{ V/W}$.

关键词 异质结, 锗硅合金, 红外探测器.

引言

$\text{p}^+\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{p-Si}$ 异质结内光电发射型红外探测器是一种截止波长可调的新型红外探测器, 由于它保留了硅基器件容易集成的优点, 又可以将截止波长调到 $8 \sim 12\mu\text{m}$ 大气吸收窗口区, 故在红外 CCD 面阵方面有很好的应用前景.

器件的工作原理是: $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金层中的空穴在红外辐射的激发下获得能量, 并以热空穴方式向界面输运, 当热空穴到达界面处时, 若具有大于势垒高度的能量 (或通过隧穿机制), 就可越过界面进入硅衬底而产生光生伏特效应. 改变合金层组分和掺杂浓度可以改变势垒高度, 从而获得对应不同截止波长的探测器.

本文用 MBE 方法在 p 型 Si (100) 衬底上生长 p^+ 锗硅合金层, 从而形成异质结构, 并结合平面硅工艺将其制成了平面型的内光电发射型红外探测器件. 用傅利叶红外光谱仪测量了此器件的光谱响应曲线, 得到的截止波长大于 $9\mu\text{m}$, 用 500 K 黑体作为红外辐射源, 测量了探测器的电压响应率和探测率.

* 国家自然科学基金资助项目

本文 1993 年 4 月 30 日收到, 修改稿 1994 年 1 月 18 日收到

1 实验结果与讨论

器件结构如图 1 所示. 采用此结构的目的在于使器件的工艺与 PtSi/Si 列阵工艺兼容. 先用平面硅工艺制作 p^+ 接触区和 n^- 保护环, 并开出光敏区窗口以便生长高掺杂的锗硅合金层. $p^+-Ge_xSi_{1-x}$ 合金层是在复旦大学表面物理实验室的 Rib erSSC 超高真空蒸发系统中生长的. 其中 p^+ 掺杂剂采用 B_2O_3 , 选择适当的源温和衬底温度, 可使掺杂后合金层中载流子浓度达到 $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$, 红外透射谱证明该层对红外辐射具有强烈的吸收. $p^+-Ge_xSi_{1-x}$ 合金层通过 n^- 保护环中的一个 n^+ 区引出. 由于内光电器件可探测正入射红外辐射, 故无需象 GaAs/AlGaAs 多量子阱探测器那样磨抛 45° 入射斜面, 在我们的试验器件中, 也没有蒸镀增透膜和光腔.

由于 $p^+-Ge_xSi_{1-x}/p^-Si$ 间的异质结势垒很低, 在室温下热发射造成的反向漏电流很大, 器件的 $I-V$ 曲线是一直线. 随着温度下降, 热发射电流减小, 在 77 K 下, 器件已具有异质结二极管的整流特性. 进一步降低工作温度, 热发射造成的反向漏电流会继续减小. 假设异质结 $I-V$ 关系遵从热发射型机制, 由反向漏电流的数值, 可根据肖特基二极管的公式估算出异质结势垒高度 φ_B 约为 0.11 eV.

为了测试器件的红外响应特性, 在傅利叶红外光谱仪上测量了器件的光谱响应曲线. 由于器件为光伏型, 故测试时可直接测量器件两端的光伏信号. 图 2 是器件的光谱响应曲线, 器件的工作温度约为 50 K. 由图 2 可见器件的实际截止波长大于 $9 \mu\text{m}$, 已进入 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的大气吸收窗口. 它与 PtSi/Si 器件相比, p^+-GeSi/Si 异质结器件的光谱响应范围可向长波方向扩展 $3 \mu\text{m}$ 左右, 并且响应曲线也非常平坦, 在 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 范围内几乎没有下降, 显示该器件在中长波段红外应用方面具有其优越性. 从物理上讲, p^+-GeSi/Si 异质结内光电器件的响应率随波长增大而衰减较慢, 主要是由于在 p^+-GeSi 层中, 待激发的空穴集中分布在价带顶到费密能级之间, 其能量宽度只有 $0.1 \sim 0.2 \text{ eV}$ 左右, 而 PtSi 是金属性的, 在费密能级以上有几个电子伏特的能量范围都为空穴所填充, 因而, 同样能量的一个红外光子被吸收后, 在高掺杂的锗硅合金层中产生大于势垒高度的热空穴的几率,

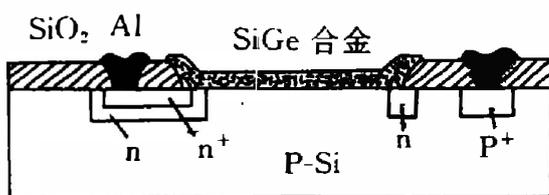


图 1 器件结构剖面图

Fig. 1 Schematic cross-section of the device

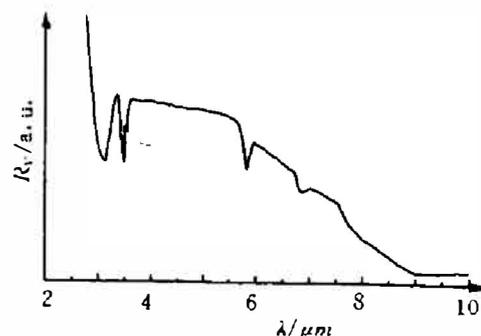


图 2 器件光谱响应曲线

Fig. 2 Photoreponse of the detector measured by FTIR spectrometer at 50 K

要比在 PtSi 层中的产生几率大得多, 所以, 前者有更高的量子效率. 由截止波长算得的 $\varphi_B = 0.13\text{eV}$, 比由电学测量估算的数值大一些, 原因是电学测量时除热发射电流外, 还存在其它原因导致的反向漏电流, 使表观势垒高度变小.

异质结势垒高度 φ_B 是器件所有参数中最重要的一个, 它决定了器件的截止波长: $\lambda = hc/\varphi_B$. φ_B 的数值与 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 间的价带失配值 E_V 和合金层的掺杂浓度有关, 其中合金层的高浓度掺杂不仅使费密能级进入价带内, 同时还会引入多体效应对 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层的能隙修正, 使能隙变窄, 价带顶上升 (ΔE_V^{mb}). 考虑到这些因素, 可写出 $\varphi_B = E_V - E_F + \Delta E_V^{mb[1]}$.

由本文的器件结构条件可知, $E_V = 0.15\text{eV}$, $E_F = 0.16\text{eV}$, 由此可推算出 ΔE_V^{mb} 约为 0.12eV , 这与文献 [2] 报道的对应掺杂浓度 $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 时的多体效应修正值相符.

用 500K 黑体作红外辐射源测量了器件的电压响应率和探测率, 在 52K 的工作温度下, 得到的结果为:

$$R_{v500K} = 3.3 \times 10^3 \text{ V/W},$$

$$D_{500K}^* = 2.0 \times 10^8 \text{ cmHz}^{\frac{1}{2}}/\text{W}.$$

提高黑体温度, D^* 会逐渐升高, 工作温度为 40K , 黑体为 1000K 时, D_{1000K}^* 达 $1.0 \times 10^9 \text{ cmHz}^{\frac{1}{2}}/\text{W}$. 这主要是由于器件在短波红外量子效率比长波红外区高的缘故 (见图 2).

2 结语

我们利用 $\text{p}^+\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{p-Si}$ 异质结构实现了对黑体辐射的探测, 截止响应波长大于 $9\mu\text{m}$, 52K 温度下 $D_{500K}^* = 2.0 \times 10^8 \text{ cmHz}^{\frac{1}{2}}/\text{W}$, 40K 温度下, $D_{1000K}^* = 1.0 \times 10^9 \text{ cmHz}^{\frac{1}{2}}/\text{W}$, 电压响应率 $R_{V500K} = 3.3 \times 10^3 \text{ V/W}$. 通过优化结构参数, 改进器件工艺, 该器件的性能可望进一步提高.

致谢 对复旦大学电子工程系及中科院上海技术物理研究所 6 室在常规平面工艺方面给予的帮助, 表示感谢.

参考文献

- 1 Liu HC, Li Lujian, Baribeau JM, et al. *J. Appl. Phys.*, 1992,71(4):2039
- 2 Overstraeten RJ van, Mertens RP. *Solid State Electron.*, 1987,30:1077

$p^+-Ge_xSi_{1-x}/p-Si$ INTERNAL PHOTOEMISSION INFRARED DETECTOR WITH $9\mu m$ CUT-OFF WAVELENGTH*

Gong Dawei Lu Xuekun Wei Xin Yang Xiaoping
Hu Jihuang Sheng Chi Zhang Xiangjiu Wang Xun
(*Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

Zhou Tao Ye Hongjuan Shen Xuechu
(*Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Abstract A $p^+-Ge_xSi_{1-x}/p-Si$ heterojunction infrared detector is reported with $9\mu m$ cut-off wavelength and R_{v500k} of $3.3 \times 10^3 V/W$ at 52 K.

Key words heterojunction, germanium-silicon alloy, infrared detector.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China