

新型 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结远红外探测器

龚大卫 杨小平 卫星 郑国祥*

胡际璜 张翔九 盛 篓 王 迅

复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433

董健民 吴作良 梁平治

中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

(1992年7月10日收到; 1992年11月14日收到修改稿)

用分子束外延技术结合硅平面工艺研制成了 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结远红外探测器。测试结果表明, 界面势垒高度低于 0.09eV , 预计对应的工作波长可从 $2\mu\text{m}$ 到 $12\mu\text{m}$ 以上。 50K 时的探测率(黑体 $D_{50\text{K}}^*$)优于 $2 \times 10^8\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 30K 为 $6 \times 10^8\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 对 500K 黑体, 30K 工作温度下 $D_{500\text{K}}^*$ 为 $1.6 \times 10^8\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。由于探测器为宽带型, 虽然峰值 D^* 并不高, 但在 30°C 的环境辐射背景下, 对人体温度的辐射也有较强烈的响应。

PACC: 6865

1. 引言

工作于 $3-5\mu\text{m}$ 和 $8-12\mu\text{m}$ 波段的远红外探测器在遥感、制导、夜视等高技术方面有着重要应用。传统的器件采用 HgCdTe 材料制备, 虽然在探测率等性能上已达到很高水平, 但由于材料的均匀性差, 不易做成大面积阵列, 也不易与读出电路在工艺上兼容。近年来用 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ 多量子阱制造远红外探测器受到极大重视, 并且也已达到很高的性能, 但这种探测器不能用垂直光照激发, 需要有比较复杂的光耦合结构, 也不容易实现大面积阵列。1990年美国加州理工学院的林住荣(Lin)等^[1]发展了一种新型的锗硅异质结远红外探测器, 它具有金属硅化物肖特基势垒探测器的优点, 即工艺简单, 大面积的均匀性好, 读出电路简单, 能和硅大规模集成电路相容, 并且可以在垂直光照下工作, 而它的工作波长比 PtSi/Si 和 IrSi/Si 肖特基势垒探测器更长, 量子效率更高。1991年, 美国麻省理工学院的 Tsaur 等人^[2]用它制成了 400×400 单元的红外焦平面阵列。上述作者都没有报道他们所研制的器件的关键参数, 即探测率 D^* 。

我们采用分子束外延技术生长了 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结, 并用 B_2O_3 源进行 P 型掺杂, 在 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 外延层中获得了 10^{20}cm^{-3} 的掺杂浓度, 从而制成了具有远红外辐射响应特性的探测器。在结构及工艺没有优化的情况下, 其黑体 D^* 值已进入了 $10^8\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 的量级, 为此类探测器首次报道的探测率数据。

2. 实验与结果

* 现在复旦大学材料科学系工作。

1) 材料器件的制备

Ge_xSi_{1-x}/Si 异质结的生长是在 Riber 生产的硅分子束外延系统中进行的。器件的结构是在轻掺杂的 P 型 Si 衬底上生长重掺杂的 $p^+-Ge_xSi_{1-x}$ 合金层，并调节合金层中的 Ge 含量 x 来控制界面势垒高度，从而控制其波长响应范围。一般在 Si 分子束外延时，衬底的清洁处理采用 Shiraki 方法^[3]，在我们的工作中采用缓冲 HF 处理^[4]，在超高真空中加热到 700°C，即可获得清洁有序的表面，C、O 沾污小于 0.03 单层，RHEED 观察到 (2×1) 再构。此方法使得表面清洁处理的温度可以比 Shiraki 方法低 200°C 左右。

为了在 Ge_xSi_{1-x} 层中获得强的红外吸收，必须有高的 P 型掺杂浓度，Lin 等人采用 HBO_2 和元素 B 作为掺杂源，在 Ge_xSi_{1-x} 层中分别获得了 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 和 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂浓度，但 HBO_2 性质不稳定，而元素 B 掺杂必须有高温束源炉，二者使用均不很方便。我们用 B_2O_3 作为掺杂源，对 Ge_xSi_{1-x} 合金层进行高浓度掺杂。过去认为这种掺杂方法只能达到 10^{19} cm^{-3} 量级的浓度。而我们在源温为 925°C，衬底温度为 500°C 的情况下进行掺杂，四探针和扩展电阻测得合金层中的载流子浓度超过 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。室温下的红外透射谱显示该合金层对红外辐射有强烈吸收，且吸收随波长变长而增强，如图 1 所示。分析表明，在长波长区域，吸收是以自由载流子吸收为主。

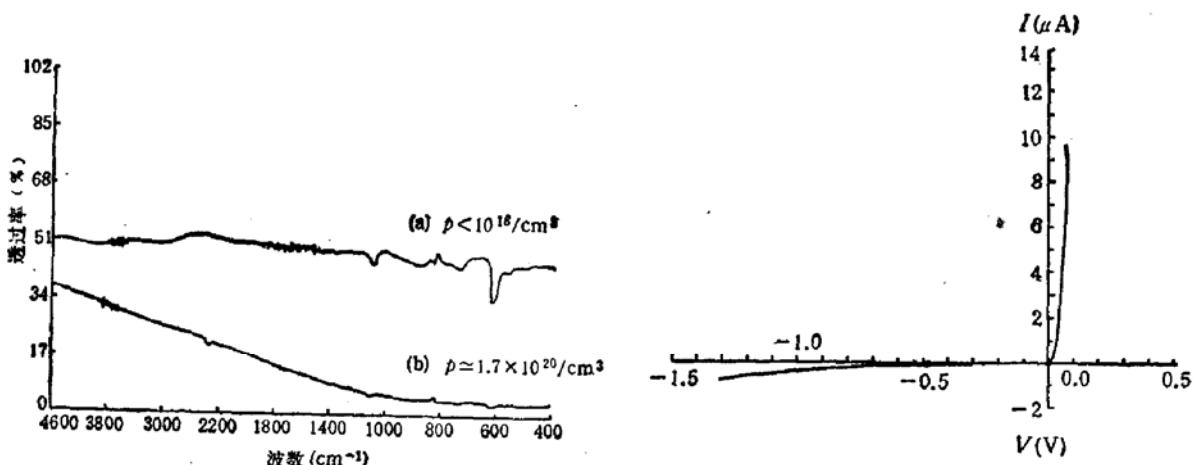


图 1 掺杂前后锗硅合金层的红外透射谱
(a) 未掺 (b) 高掺 $p > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

图 2 40K 时器件的伏安特性曲线

在成功地生长上述 $p^+-Ge_xSi_{1-x}/p^-Si$ 异质结的基础上，我们用普通硅平面工艺制备了平面型异质结远红外探测器 (HIP)。衬底电阻率为 $18\Omega \cdot cm$ ， Ge_xSi_{1-x} 层厚度为 120nm， x 为 0.4。用 n 型保护环来防止结的边缘漏电。器件为正入射光照型，光敏区面积为 $400\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ ，没有蒸镀增透膜和光腔，因而光照可以从正面 (Ge_xSi_{1-x}) 入射，也可以从背面 (Si 衬底) 入射。

电学测试表明，室温下器件为电阻性，冷却到 77K 时开始出现二极管特性，温度进一步下降，其反向漏电流迅速下降，这同该异质结的预期伏安特性相符。40K 时，二极管的伏安特性如图 2 所示。根据伏安特性及反向漏电流随温度的变化可以估计其界面势垒高度 $\phi_B \leq 0.09 \text{ eV}$ 。关于 ϕ_B 与 x 值及掺杂浓度的依赖关系将另文讨论。

2) 器件的红外特性

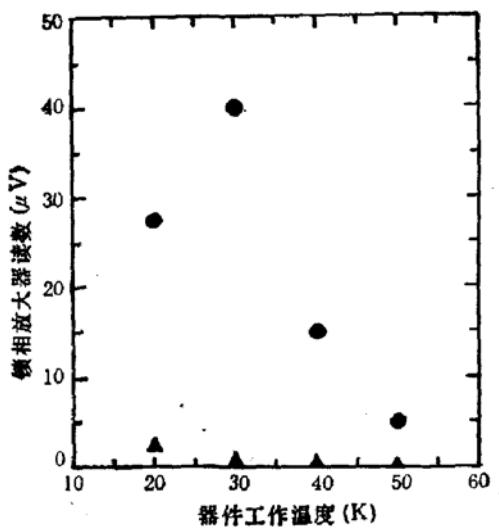


图 3 不同工作温度下, 器件对于 500K 黑体的信号电压和噪声电压 ●信号 ▲噪声

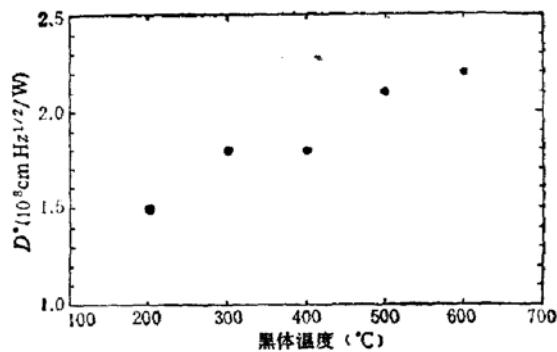


图 4 D^* 随黑体温度的变化曲线

根据界面势垒高度, 器件的工作波长可以从 $2\mu\text{m}$ 延伸到 $12\mu\text{m}$ 左右, 工作温度不超过 60K . 我们在 40K 温度下, 观察到该器件对人体的红外辐射有较灵敏的响应。

以黑体作为红外辐射源, 测试了器件的黑体探测率 D_{bb}^* . 由于器件是光伏型, 故测试时未加偏压. 黑体辐射经斩波器调制, 调制频率为 210Hz , 器件两端的交变电压信号直接由锁相放大器 (EG&G Model 9505) 检测, 锁相输入阻抗为 $100\text{M}\Omega$, 时间常数设定为 30ms 或 100ms . 图 3 为不同工作温度下器件对于 500K 黑体的信号电压和噪声电压情况. 器件信噪比在 30K 工作温度下为最高, 高温下由于漏电流大信噪比降低, 至 60K 时信号逐渐淹没在噪声中. 当工作温度过低时, 信噪比也有所降低, 这可能是由于低温反向阻抗提高以及器件串联电阻变大或由于异质结所引入的噪声增大所造成的.

根据器件实际接收到的黑体辐射功率计算 D_{bb}^* 和信号电压响应率 R 得到在 30K 工作温度下:

$$D_{873\text{K}}^* \approx 6 \times 10^8 \text{cm Hz}^{1/2}/\text{W},$$

$$D_{500\text{K}}^* \approx 1.6 \times 10^8 \text{cm Hz}^{1/2}/\text{W},$$

$$R_{500\text{K}} \approx 2.2 \times 10^3 \text{V/W}.$$

固定 30K 工作温度而改变黑体温度, D_{bb}^* 值随黑体辐射源温度的降低而减小, 但减小的变化率要比一般 PtSi/Si 金属硅化物肖特基器件小得多, 如图 4 所示是某 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结器件的 D_{bb}^*-T 图. 这说明 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 器件的响应截止波长较长且响应曲线较金属硅化物器件平坦. 从原理上考虑, 高掺杂的 P 型 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结型器件是靠锗硅合金层中的空穴气对红外线产生吸收, 由于空穴分布集中在费米能级与价带顶之间, 态密度较高, 红外光子产生的有效激发可以比金属硅化物材料中强. 实验已经发现^[2], 硅化物肖特基势垒探测器的量子效率在长波长方向随波长是指数衰减, 而 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结探测器的衰减较慢.

3. 结论

利用 $\text{P}^+\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结结构制成了远红外探测器. 器件采用正入射方式激发.

30K 工作温度下 $D_{500\text{K}}^* \simeq 1.6 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 电压响应率 $R_{V_{500\text{K}}} \simeq 2.2 \times 10^3 \text{V/W}$, 且 $D_{\text{黑体}}^*$ 受黑体温度变化影响较小, 预计有较长截止响应波长和较平坦的光谱响应曲线。由于该器件对人体的红外辐射亦有较灵敏响应, 故可望通过进一步优化结构参数和器件工艺, 提高其性能, 并有望利用 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 材料与硅集成工艺可兼容的优点而制成大规模二维红外探测阵列。

致谢: 本工作得到了复旦大学电子工程系传感器组和上海无线电七厂有关同志的帮助, 并得到国家自然科学基金和航天部八〇三所的部分资助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] T. L. Lin and J. Maserjian *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 422(1990).
- [2] Bor-Yeu Tsaur, Chen C. K. and S. A. Marino *IEEE Electron Device Lett.*, **12**, 293(1991).
- [3] Akitoshi Ishizaka and Yasuhiro Shiraki *J. Electrochem. Soc.*, **133**, 666—671(1986).
- [4] D. J. Eaglesham, G. S. Higashi and M. Cerullo *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 685—687(1991).

A New Type of Far Infrared Detector Based on $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ Heterojunction

Gong Dawei, Yang Xiaoping, Wei Xing, Zheng Guoxiang*, Hu Jihuang,
Zhang Xiangjiu, Sheng Ch and Wang Xun

National Key Laboratory for Applied Surface Physics Fudan University, Shanghai 200433

* Department of Material Science, Fudan University Shanghai 200433

Dong Jianmin, Wu Zuoliang and Liang Pingzhi

Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai 200083

(Received 10 July 1992; revised manuscript received 14 November 1992)

Abstract

A $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ heterojunction infrared detector was fabricated by molecular beam epitaxy (MBE) combined with Si planar technology. The barrier height is no more than 0.09eV and the photoresponse range may be extended from $2\mu\text{m}$ to $12\mu\text{m}$. The blackbody detectivity $D_{873\text{K}}^*$ is $2 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ at temperature of 50K and $6 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ at 30K, respectively. Also at 30K $D_{500\text{K}}^*$ is $1.6 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$. Since its photoresponse range is broad, the detector is sensitive to the radiation from humanbody under the background of 300K though its peak detectivity is still low.

PACC: 6865