

垂直入射 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ 多量子阱光电探测器^{*}

李 成 杨沁清 王红杰 罗丽萍 成步文 余金中 王启明

(集成光电子国家重点联合实验室 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 报道了正入射 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ 多量子阱结构光电探测器的制作和实验结果. 测试了它的光电流谱和量子效率. 探测器的响应波长扩展到了 $1.3\mu\text{m}$ 以上波段. 在 $1.3\mu\text{m}$ 处量子效率为 0.1%. 量子效率峰值在 $0.95\mu\text{m}$ 处达到20%.

关键词: 光电探测器; 多量子阱; SiGe/Si

PACC: 0762; 4280S

中图分类号: TN 215 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)05-0480-03

Normal-Incident $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ Multiple Quantum Wells Photodetectors^{*}

LI Cheng, YANG Qin-qing, WANG Hong-jie, LUO Li-ping,
CHENG Bu-wen, YU Jin-zhong and WANG Qi-ming

(National Integrated Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Received 5 February 1999, revised manuscript received 18 May 1999

Abstract: The fabrication and experimental results of the normal-incident $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ multiple quantum wells (MQWs) photodetectors are reported. The photocurrent spectra and quantum efficiency of the detectors are measured. The wavelength range for which the photodetectors can response has been expanded to $1.3\mu\text{m}$ and even more. The quantum efficiency of the photodetectors is 0.1% at $1.3\mu\text{m}$ and 20% at $0.95\mu\text{m}$ respectively.

Key words: photodetectors; MQW; SiGe/Si

^{*} 国家自然科学基金重大基金(69896260)、国家自然科学基金重点基金(69789802)和国家“863”计划863-307-15-4(03)资助项目 [Project Supported by National Natural Foundation of China Under Grant No. 69896260 and No. 69789802 and by Chinese National High Technology (863) Plan Under Grant No. 863-307-15-4(03)].

李 成 男, 博士生, 主要从事硅基光电探测器的研究.

杨沁清 男, 研究员, 主要从事硅基集成光电子器件的研究.

王启明 男, 中国科学院院士, 研究员, 主要从事硅基及III-V族基光电子学的研究.

1999-02-05收到, 1999-05-18定稿

PACC: 0762; 4280S

Article ID: 0253-4177(2000)05-0480-03

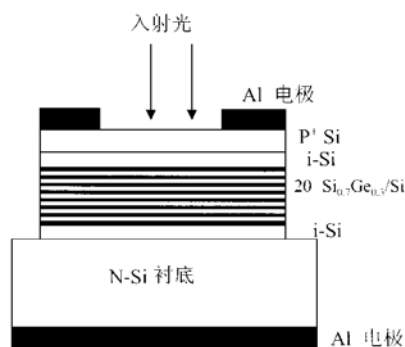
1 引言

SiGe 合金将硅基吸收范围扩展到了适合光通信的 $1.3\text{--}1.55\mu\text{m}$ 波段, 为制造硅基集成光通信接收机提供了可能. SiGe 合金仍属间接带隙材料, 吸收系数小, 因而大多数探测器都制作成波导结构以提高探测器的量子效率^[1-4]. 波导结构探测器的主要问题是耦合效率低, 西安交通大学的李宝军等人^[5,6]进行了波导与 SiGe/Si 超晶格探测器的集成以及分支器与探测器的集成, 得到了较高的量子效率.

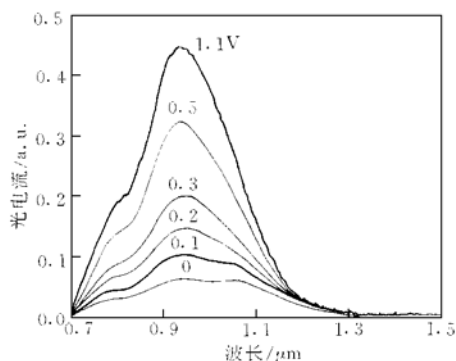
本文报道 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ 多量子阱结构正入射光电探测器的制作, 测得光电流谱和量子效率. 在 $1.3\mu\text{m}$ 处量子效率为 0.1% , 最大量子效率在 $0.95\mu\text{m}$ 处, 为 20% . 最后提出了提高 SiGe/Si 多量子阱正入射光电探测器量子效率的可行途径.

2 器件结构和制作

$\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ 多量子阱结构正入射光电探测器结构如图1所示. 在 N 型 $\text{Si}(100)$ 衬底上用 VG-MBE 生长了 100nm 本征 Si 缓冲层, 然后生长了 20 周期 (10nm) $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}(30\text{nm})$ 多量子阱结构作吸收区, 其上覆盖了 100nm 本征 Si 和 100nm P^+Si 做接触层. 生长温度 750°C . 器件是用标准硅工艺制造的. 先用 SF_6/SiO_2 反应离子刻蚀出深 $1.5\mu\text{m}$ 、直径为 1mm 的圆形台面, 用 PECVD 法生长了 500nm SiO_2/N 做保护层. 然后光刻出环形电极孔, 蒸 Al 制作环形上电极. 背面减薄至 $100\mu\text{m}$ 左右, 蒸 Al 制成下电极, 最后在 450°C 下合金. 入射光从环形电极窗口入射.

图1 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ 探测器结构示意图FIG. 1 Diagram of $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ Detector

用傅里叶变换光谱仪测得不同反向偏压下正入射光电流响应谱如图2所示. 测试中探测器串联电阻为 $1\text{k}\Omega$, 光源为钨

图2 SiGe/Si 探测器光电流响应谱FIG. 2 Photocurrent Spectra of SiGe Detector

灯. 测得最大响应在 $0.95\mu\text{m}$ 处, 探测器的响应谱范围已扩展到 $1.3\mu\text{m}$ 以上, 在 $1.3\mu\text{m}$ 处有光响应. 随着反向偏压的增加, 光电流在不同波长范围有不同程度的增加, 在 $1.3\mu\text{m}$ 处, 光电流随反向偏压的增加变化相对较小. 在低反向偏压下 ($< 0.3\text{V}$) 电流谱分别在 0.8 、 0.95 、 $1.06\mu\text{m}$ 处出现三个明显的峰值, 这对应着电子从轻重空穴带到导带不同能级间的跃迁. 但在反向偏压高于 0.3V 时, $1.06\mu\text{m}$ 处峰值消失, 这可能是由于反向偏压降低了势阱对空穴的限制作用所致.

量子效率是用 InGaAs 探测器校准测得的, 如图3所示. $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金是间接带隙材料, 用单声子模型, 吸收系数可表示为^[7]

$$\alpha = \begin{cases} 0 & h\nu \leq E_g - k\theta \\ A_a \frac{(h\nu - E_g + k\theta)^2}{\exp(\theta/T) - 1} & E_g - k\theta \leq h\nu \leq E_g + k\theta \\ A_a \frac{(h\nu - E_g + k\theta)^2}{\exp(\theta/T) - 1} + A_e \frac{(h\nu - E_g - k\theta)^2}{1 - \exp(-\theta/T)} & h\nu \geq E_g + k\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中 A_a, A_e 分别为表示吸收和发射声子的贡献, E_g 是间接带隙宽度, k 为玻尔兹曼常数, $h\nu$ 为光子能量. θ 为声子等效温度, T 为温度. 外量子效率可表示为:

$$\eta = (1 - R)(1 - e^{-\alpha(\lambda)d}) \quad (2)$$

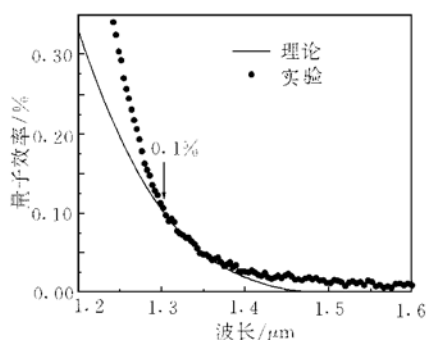


图3 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ 多量子阱光电探测器的量子效率

FIG. 3 Quantum Efficiency of $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ MQW Photodetector

式中 R 为空气与硅界面的反射率, d 为探测器有效吸收长度. 图3中的实线为量子效率的计算结果. 在 $1.3\mu\text{m}$ 处量子效率约为0.1%. 对于实用化来说, SiGe/Si 多量子阱探测器在 $1.3\mu\text{m}$ 处0.1%的量子效率太小, 但是我们可以通过制作带 Bragg 反射器的共振腔型探测器提高其量子效率. 已有报道用硅-硅键合或低能离子注入的方法获得带 Bragg 反射器的衬底^[8,9]. 这为制作高量子效率硅基共振腔型光电子探测器指出了希望.

4 结语

在 VG-MBE 生长的 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ 多量子阱结构材料上成功制作了正入射型光电探测器, 其响应波长扩展到 $1.3\mu\text{m}$ 以上, 测得在 $1.3\mu\text{m}$ 处的量子效率为0.1%, 在 $0.95\mu\text{m}$ 处的量子效率约为20%. 并指出了提高探测器量子效率的可行的

方法.

参 考 文 献

- [1] H. Temkin, T. P. Pearsall, J. C. Bean *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1986, **48**(15): 963—965.
- [2] T. P. Pearsall, H. Temkin, J. C. Bean *et al.*, IEEE Electron Device Lett., 1986, **ED-7**(5): 330—332.
- [3] A. Splett, T. Zinke, K. Petermann *et al.*, IEEE Photonics Technology Lett., 1994, **6**(1): 59—61.
- [4] 刘育梁, 杨沁清, 王启明, 半导体学报, 1996, **17**(9): 667—673 [LIU Yuliang, YANG Qinqing, WANG Qiming, Chinese Journal of Semiconductors, 1996, **17**(9): 667—673 (in Chinese)].
- [5] 李宝军, 李国正, 刘恩科, 半导体学报, 1998, **19**(5): 115—120 [LI Baojun, LI Guozheng, LIU Enke, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(5): 115—120 (in Chinese)].
- [6] 万建军, 李国正, 等, 半导体学报, 1998, **19**(8): 597—602 [WAN Jianjun, LI Guozheng *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(8): 597—602 (in Chinese)].
- [7] L. Naval, B. Jalali, L. Gomelsky *et al.*, J. Lightwave Technology, 1996, **14**(5): 787—797.
- [8] R. T. Carline, V. Nayar, D. J. Robbins *et al.*, IEEE Photonics Technology Lett., 1998, **10**(12): 1775—1777.
- [9] Yukari Ishikawa and N. Shibata, Appl. Phys. Lett., 1996, **69**(25): 3881—3883.