

# 带有 Bragg 反射镜的谐振腔增强型 Si 光电探测器<sup>\* \*</sup>

李 成<sup>1\* \*</sup>, 赖虹凯<sup>1</sup>, 陈松岩<sup>1</sup>, 王启明<sup>2</sup>

(1. 厦门大学物理系, 半导体光电子学研究中心, 福建 厦门 361005; 2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 采用电子束蒸发和键合技术, 制作了具有高反射率的、表面为薄层单晶 Si 的分布 Bragg 反射器。用标准光刻工艺在单晶 Si 薄层上制作出窄带谐振腔增强型(RCE)金属-半导体-金属(MSM)光电探测器, 响应峰值波长分别在 836、900、965 和 1030 nm 处, 其中在 900 nm 处峰值半高宽为 18 nm。该器件具有波长选择特性, 可有效抑制相邻频道间的串扰, 而且容易制成集成面阵。

**关键词:** Si 光电探测器; 谐振腔; 键合

中图分类号: TN304 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2006)01-0062-03

## Resonant Cavity-enhanced Si Photodetectors with Distributed Bragg Reflector

LI Cheng<sup>1\* \*</sup>, LAI Hong-kai<sup>1</sup>, CHEN Song-yan<sup>1</sup>, WANG Qi-ming<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Research Center for Semiconductor Optoelectronics, Xiamen University, Xiamen, 361005, China; 2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Si distributed Bragg reflector with crystal Si thin film on the reflector was fabricated by electron beam evaporation and bonding techniques. Narrow band Si resonant-cavity-enhanced(RCE) metal-semiconductor-metal(MSM) photodetectors were fabricated by standard photolithography with responsivity peaks at 836 nm, 900 nm, 965 nm and 1030 nm respectively. The full-width at half maximum was about 18 nm at 900 nm. The wavelength selectivity of the device could eliminate crosstalk between channels, and the integrated array could be easily realized.

**Key words:** Si photodetectors; resonant cavity; wafer bonding

## 1 引言

Si 基光互连技术是当前的热点, 基于 Si 工艺的光电集成电路(OEIC)具有高的集成度和可靠性, 可以集多种功能于一个芯片上, 工艺成熟, 成本低, 环保, 适于批量生产。Si 光电探测器对波长小于 1 100 nm 光具有好的响应, 如果采用带有分布 Bragg 反射镜的谐振腔结构, 将有利于进一步提高探测器的响应度和带宽。同时, 利用其波长的选择特性, 在 WDM 系统和光互连中可能得到进一步的应用。

在过去的几年里, 报道了用各种方法研制的 Si 谐振腔增强型(RCE)光电探测器<sup>[1-6]</sup>。第 1 种方法是将 Si RCE 光探测器制作于绝缘体上 Si 单晶(SOI)衬底上, 用埋在 SOI 中的 SiO<sub>2</sub> 层作下反射镜, 其优点是 SOI 片上制作的电子电路具有较高的性能, 缺点是 SiO<sub>2</sub> 作反射镜反射率太低, 因而器件的增强作用和波长选择性较差。第 2 种方法是制作 SiO<sub>2</sub>/Si Bragg 反射器, 然后在反射器上生长多晶 Si 作为吸收区构成 RCE 光电探测器, 它的缺点是制作器件的材料为多晶, 器件的暗电流大, 更主要的是与 Si 集成

\* 收稿日期: 2005-05-15 修订日期: 2005-09-12

\* 基金项目: 福建省青年科技人才创新资助项目(2004J021)

\* \* E-mail: lich@xmu.edu.cn

电路不兼容, 不能实现单片集成, 因此也失去了研制的根本意义。第 3 种方法是先在 Si 片上用分子束外延(MBE)或超高真空化学沉积(UHV/CVD)系统生长 SiGe/Si Bragg 反射器, 然后再外延 Si 吸收区, 由于 SiGe 晶格失配较大, SiGe 材料的生长受到临界厚度的限制, 不能得到高反射率的 Bragg 反射器, 另外工艺比较复杂, 成本高。第 4 种方法是采用选择性外延技术在 SiO<sub>2</sub>/Si 上横向生长 Si 外延层, 形成高质量的器件结构, 缺点是材料生长困难, 工艺复杂。

我们提出一种制作具有高反射率、低成本的 Si 基衬底的方法<sup>[7]</sup>, 本文采用该衬底制作了 Si RCE 光电探测器, 得到较好的波长选择特性, 而且具有成本低、制作工艺简单、下反射镜反射率高以及与集成电路完全兼容等特点。

## 2 器件结构和制作

用键合和智能剥离技术制作了具有隐埋反射镜、表面为薄层单晶的 Si 基衬底。该技术首先用电子束蒸发的方法在抛光的 Si 衬底上生长多层 Si/SiO<sub>2</sub> 反射镜, 在另一块 Si 中注入 H<sup>+</sup>, 用硅乳胶作键合中间层, 将反射镜和注 H-Si 键合在一起, 在退火的过程中注 H-Si 自动剥离, 在 Si/SiO<sub>2</sub> 反射镜上形成单晶 Si 薄膜, 具体制作过程可参见文献[7]。实验中, 隐埋在 Si 衬底中的是采用蒸发的方法制作的 5 对 Si(120 μm)/SiO<sub>2</sub>(220 μm) 反射镜结构, 在反射镜的上面是用作有源区的单晶 Si 薄膜, 其厚度约为 1.2 μm, Si 膜的厚度可以很方便地通过改变注入 H<sup>+</sup> 的能量而调整。在此材料上, 利用标准 Si 工艺技术, 在薄层单晶 Si 上制作了金属-半导体-金属(MSM)结构探测器, 电极采用叉指状结构。图 1 是 MSM 探测器剖面结构示意图。由图可见, 谐振腔是由下底反射镜和单晶

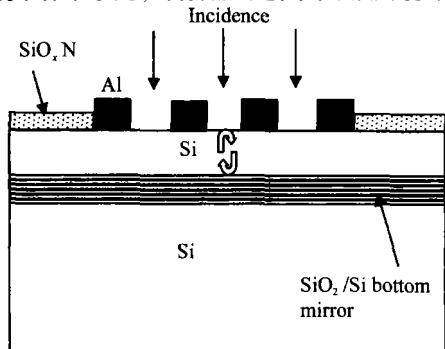


图 1 带有分布 Bragg 反射镜 Si RCE 光电探测器截面示意图

Fig. 1 Cross sectional schematic of Si RCE

photodetector with bottom distributed Bragg reflector

Si 与空气界面构成的, 吸收层为反射镜上面薄的单晶 Si 层。当入射光从上表面入射进入探测器, 由于上下 2 个反射面形成的谐振腔使得入射光在探测器内发生共振, 单晶 Si 对入射光的吸收有选择性地增强, 在共振波长处提高了探测器的响应度和量子效率。器件面积为 10 μm × 90 μm。

## 3 结果与讨论

图 2 给出用传输矩阵法计算的下底分布 Bragg 反射镜的反射谱<sup>[8]</sup>, 计算中计入了在这一波段用作反射镜的 Si 层对入射光吸收的影响。从图可以看出, 在 900 nm 时具有较高的反射率, 约为 68%。该底镜可通过改变介质膜的厚度进一步优化, 得到更高的反射率。利用该反射镜作底镜, 空气与 Si 界面(反射率约为 30%)作顶镜, 构成谐振腔结构光电探测器。

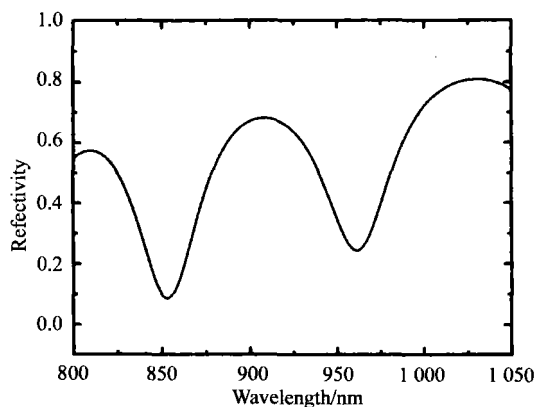


图 2 模拟下底分布 Bragg 反射镜反射谱

Fig. 2 Simulated reflectance spectrum of the bottom distributed Bragg reflector

图 3 是在零偏压下测得的该探测器的光电流谱。光电流谱测试所用光源为碘钨灯, 经过透镜聚焦后, 进入光栅, 通过 25 cm 光栅进行分光后几乎垂直照射在样品表面, 产生的光电流用锁相放大器将信号放大后记录下来, 扫描范围为 800~1100 nm。从图可以看出, 峰值响应波长分别在 836、900、965 和 1030 nm。响应最强的波长为 900 nm, 波峰与波谷差约为 400%, 波峰与波峰之间的距离约为 67 nm。峰值半高宽为 18 nm, 具有较好的波长的选择性, 在 900 nm 处估算的量子效率约为 12%。如果在器件表面作一顶镜, 同时优化底镜的反射率, 峰值半高宽将进一步减小, 而量子效率会得到进一步的提高。由于 SiO<sub>2</sub> 具有较好的绝缘性能, 入射光在此介质反射镜中产生的载流子不会对器件的频率特性产生影响, 因此器件的高频特性不会由于谐振腔的采用而下降。相反, 采

用了谐振腔后,在保证足够大的量子效率的前提下,可以将有源层做的较薄,从而提高探测器的频率特性。本文仅仅从原理上演示了实现 Si 短波长谐振腔探测器的可行性。根据谐振腔探测器理论和模拟结果<sup>[9-11]</sup>,将探测器结构优化,特别是优化设计探测器 2 个反射镜的反射率,可以得到更大的光电流和更好的波长选择性,提高器件的抗串扰能力。另外,探测器的高频性能参数的测试和器件产业化有待更深入的工作。

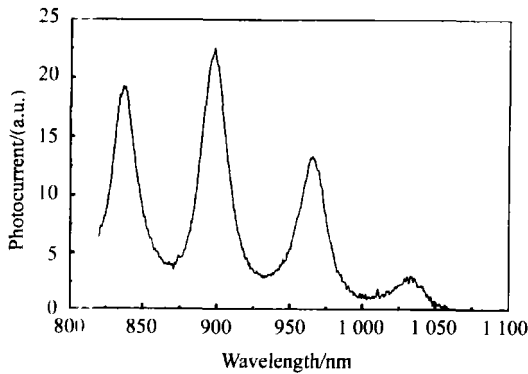


图 3 探测器在零偏压下的光电流谱  
Fig. 3 Photocurrent spectrum of the photodetector under zero biased voltage

#### 4 结 论

采用电子束蒸发和键合技术制作的带有分布 Bragg 反射镜的 Si RCE 光电探测器,光电流谱具有波长选择特性,在 900 nm 处量子效率为 12%,而峰值半高宽为 18 nm。该探测器结构具有成本低、易于制作集成平面阵列、与 Si 基集成电路兼容等符合产业化发展的特点,而且对光的响应具有波长选择性、串扰小等优点,适合于 Si 基集成光电子模块。

#### 参考文献:

[1] Sinnis V S, Seto M, Hooft G W, et al. Si based resonant cavity enhanced photodiode with a buried SiO<sub>2</sub> reflector [J]. Appl Phys Lett, 1999, 74(9): 1203-1205.

- [2] Schow C L, Li R, Schaub J D, et al. Design and implementation of high speed planar Si photodiodes fabricated on SOI substrates [J]. IEEE J of Quantum Electronics, 1999, 35(10): 1478-1482.
- [3] Diaz D C, Schow C L, Qi Jie ming, et al. Si/SiO<sub>2</sub> resonant cavity photodetector [J]. Appl Phys Lett, 1996, 69(19): 2798-2790.
- [4] Bean J C, Qi Jie ming, Schow C L, et al. High speed polysilicon resonant cavity photodiode with SiO<sub>2</sub>-Si Bragg reflectors [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(6): 806-808.
- [5] Murtaza S S, Nie H, Campbell J C, et al. Short wavelength, high speed, Si based resonant cavity photodetector [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(7): 927-929.
- [6] Neudeck G W, Denton J, Qi J, et al. Selective epitaxial growth Si resonant cavity photodetector [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(1): 129-231.
- [7] Li Cheng, YANG Qin qing, WANG Hong jie, et al. Low cost, High reflectivity silicon on reflector for optoelectronic device application [J]. Chinese J Semiconductors, 2001, 22(3): 261-263.
- [8] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. Pergamon: Oxford, 1991.
- [9] Li Cheng, Huang C J, Cheng Buwen, et al. Si Ge/Si resonant cavity enhanced photodetectors for 1.3 μm operation fabricated using wafer bonding techniques [J]. J Appl Phys, 2002, 92(3): 1718-1720.
- [10] CAI Xiao, ZUO Yu hua, WANG Qi ming. Fabry Perot thermo optical tunable filter of flat top response [J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子·激光), 2004, 15(10): 1144-1146. (in Chinese)
- [11] WU Peng, HUANG Hui, HUANG Yong qing, et al. Study on a novel waveguide photodetector with wavelength selectivity [J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子·激光), 2005, 16(2): 129-134. (in Chinese)

#### 作者简介:

李成 (1970-), 男, 副教授, 主要从事新型 Si 基量子结构材料的生长和电子、光电子器件的研制。