

# 新型隐埋 Si/SiO<sub>2</sub> 做底镜的共振腔型探测器的理论分析\*

李 成 杨沁清 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** 本文提出一种新型隐埋 Si/SiO<sub>2</sub> Bragg 反射器结构的 Si 基共振腔型光电探测器, 该结构具有与集成电路相兼容的特点, 理论计算表明量子效率较普通光电探测器提高了 3~4 倍

PACC: 0762, 4200, 7755

## 1 引言

目前光纤通讯用的光波波长为 1.3~1.55 μm, 这是光纤材料——石英的最低损耗窗口。为了实现光纤通讯元器件的硅化, 采用 SiGe/Si 多量子阱材料来制备对 1.3 μm 波长的硅基探测器早已有报道<sup>[1,2]</sup>。SiGe 材料是间接带隙材料, 对 1.3 μm 波长的光的吸收系数很低, 导致这种探测器的量子效率很低。为了提高量子效率, 有人提出用 SiO<sub>2</sub>/Si 的多层结构来制备 Bragg 谐振腔<sup>[3,4]</sup>。但是在 SiO<sub>2</sub> 衬底生长的 Si 或 SiGe 是一种非晶材料, 经过合理的热处理后可获得多晶, 它们并不适合于制备器件。然而, 已有报道在 SiO<sub>2</sub> 表面可以用某种特殊的方法生长 Si 的单晶制备出了 MOS 晶体管<sup>[5]</sup>。如果在图形化的 Bragg 反射结构上(本文称为隐埋 Bragg 共振结构)能生长出质量良好的 SiGe/SiMQW 材料的话, 就可实现带 SiO<sub>2</sub>/Si 谐振腔的 SiGe/SiMQW 探测器件的制作。本文报道的是假定用这种材料制备的 SiGe PN 光电探测器的量子效率等参数的理论计算结果。

## 2 隐埋 Bragg 反射器结构的说明

通常用 SiO<sub>2</sub>/Si 材料制备 Bragg 反射层时, 为使它对 1.3 μm 的波长有足够的反射率, SiO<sub>2</sub>/Si 要有足够的层数<sup>[4]</sup>。为了适应隐埋图形 Bragg 结构的需要, 我们考虑把图形设计成矩形阵列, 如图 1 所示。每一层图形经刻蚀后有 45° 的侧向钻蚀。图 2 中示出了隐埋 Bragg 结构的剖面图, 图中还示出了共振腔的结构示意, 底镜为图形 Bragg 反射器结构, 顶镜是由 Si/

\* 本课题得到了“863”计划[863-307-06-05(03)]项目和国家自然科学基金重点基金 69789802 项目的资助

李 成 男, 博士生, 目前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

1998-03-16 收到, 1998-05-18 定稿

SiO<sub>2</sub> 多层结构或 Si 与空气界面构成的 L<sub>2</sub>(x) 区为以缓冲层为主的 Si 的厚度, αd 为吸收区 (SiGe/SiMQW 区) 的厚度, L<sub>1</sub> 为 Si 的覆盖层厚度 I、III 区均为 Bragg 结构的主要区域 II 区为 45° 侧向钻蚀区 d<sub>1</sub> = λ/8n<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>(x) 可以写为

$$L_2(x) = \begin{cases} d_2 & \text{II 或 III 区} \\ d_2 + d_1 = d_2 + \lambda/8n_1 & \text{I 区} \end{cases} \quad (1)$$

式中 n<sub>1</sub> 为硅的折射率; λ 为工作波长; d<sub>2</sub> 为一常数, 等于外延时的缓冲层厚度 下面的计算中只考虑一维的情形, 并以 1.3 μm 归一化

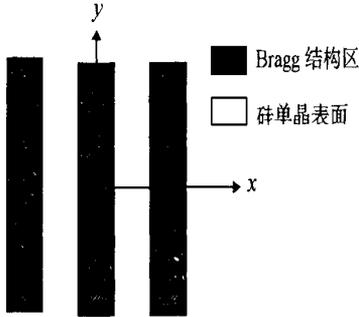


图 1 隐埋 Bragg 结构图形设计

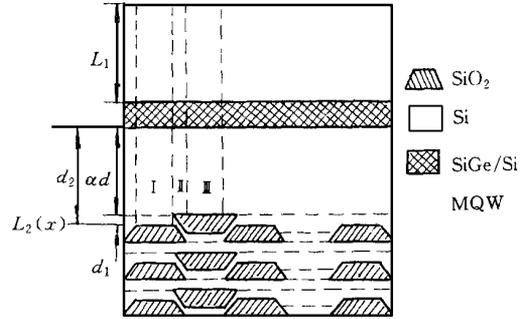


图 2 共振腔光电探测器结构模型示意图

### 3 理论分析

#### 3.1 隐埋 Si/SiO<sub>2</sub> Bragg 反射器反射率 R<sub>2</sub>(x) 的计算

图 3 示出的探测器共振腔底镜 Bragg 反射器是由 Si 和 SiO<sub>2</sub> 交替生长, 相间分布而构成的 Si/SiO<sub>2</sub> 层厚随 x 而变化 根据多层膜系的理论, 可以写出 Si 和 SiO<sub>2</sub> 薄膜的特征矩阵 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 分别为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & -i \sin \beta_1 / \eta_1 \\ -i \eta_1 \sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & -i \sin \beta_2 / \eta_2 \\ -i \eta_2 \sin \beta_2 & \cos \beta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中

$$\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 h_1 \cos \theta \quad \eta_1 = n_1 \cos \theta$$

$$\beta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 h_2 \cos \theta \quad \eta_2 = n_2 \cos \theta$$

n<sub>1</sub>、n<sub>2</sub> 分别为 Si 和 SiO<sub>2</sub> 的折射率; h<sub>1</sub>、h<sub>2</sub> 分别为 Si 和 SiO<sub>2</sub> 层的厚度; θ (i = 1, 2) 为光的入射角 各层薄膜的特征矩阵相乘得到总膜系的特征矩阵 M. 由于 SiO<sub>2</sub> 和 Si 的交替位置以及 SiO<sub>2</sub> 侧面 45° 钻蚀处 Si 和 SiO<sub>2</sub> 厚度均随 x 而变化, 因此膜系的反射率也将随 x 而变化 对我们感兴趣的 1.3 μm 波长的光来说, Si 和 SiO<sub>2</sub> 层分别取为四分之一波长厚度, 在正入射的情况下, θ = 0, 求得底镜反射率 R<sub>2</sub>(x) 随 x 的变化关系, 如图 4 所示 (x 以 1.3 μm 归一化). 为清楚起见, 图中只给出 R<sub>2</sub> 变化较大的 x 区间的结果

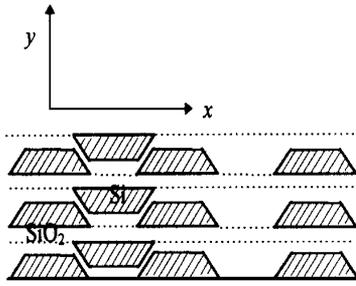


图 3 探测器底镜 Bragg 反射器结构图

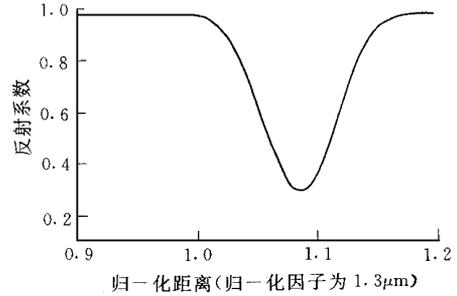


图 4 Bragg 反射器的反射率 R<sub>2</sub>(x) 与 x 的关系

### 3.2 隐埋 Si/SiO<sub>2</sub> 共振腔型 PIN 探测器的量子效率

图 5 给出了计算量子效率所采用的模型 为了分析简化, 提出如下假设: (1) 不考虑吸收区界面的反射; (2) 忽略共振腔自身的损耗 从图 2 和图

4 中可以看出 L<sub>2</sub>(x)、r<sub>2</sub>(x)、t<sub>2</sub>(x) 和 R<sub>2</sub>(x) 都随 x 而变化, 但为了方便, 公式中不写出 x. 吸收系数为 α, n 为量子阱吸收区折射率, 相位 δ =  $\frac{2\pi}{\lambda}nd + \frac{2\pi}{\lambda}n_1[L_1 + L_2(x)]$ , 其它符号均代表通常意义 考虑正入射情况, θ = 0, 反射波的振幅为

$$r = r_1 + t_1 t_1 r_2 e^{-\alpha l} e^{-i2\delta} - t_1 t_1 r_1 r_2 e^{-2\alpha l} e^{-i4\delta} + \dots \quad (4)$$

界面 1 处能量守恒, 有  $t_1 t_1 = 1 - r_1^2$

$$r = (r_1 + r_2 e^{-\alpha l} e^{-i2\delta}) / (1 + r_1 r_2 e^{-\alpha l} e^{-i2\delta}) \quad (5)$$

在衬底透射波的振幅为

$$t = t_1 t_2 e^{-\alpha l} e^{-i\delta} + t_1 t_2 r_1 r_2 e^{-3\alpha l} e^{-i3\delta} + \dots \quad (6)$$

$$t = t_1 t_2 e^{-\alpha l} e^{-i\delta} / (1 + r_1 r_2 e^{-2\alpha l} e^{-i2\delta}) \quad (7)$$

考虑  $r_i = |r_i| e^{-i\phi_i}$  (i = 1, 2), 反射率和透射率分别为 R 和 T

$$R = rr^* = \frac{|r_1|^2 + |r_2|^2 e^{-2\alpha l} + 2|r_1||r_2| \cos(\phi_+ - \phi_- - 2\delta) e^{-\alpha l}}{1 + |r_1|^2 |r_2|^2 e^{-2\alpha l} + 2|r_1||r_2| \cos(\phi_+ + \phi_- - 2\delta) e^{-\alpha l}} \quad (8)$$

$$T = tt^* = \frac{t_1^2 t_2^2 e^{-2\alpha l}}{1 + |r_1|^2 |r_2|^2 e^{-2\alpha l} + 2|r_1||r_2| \cos(\phi_+ - \phi_- - 2\delta) e^{-\alpha l}} \quad (9)$$

吸收率 A 为

$$A = 1 - R - T \quad (10)$$

当  $\cos(\phi_+ - \phi_- - 2\delta) = -1$  时, R 最小, A 最大 此时

$$d = [(2m + 1) + (\phi_+ + \phi_-) / \pi] \frac{\lambda}{4n} - \frac{n_1}{n} [L_1 + L_2(x)] \quad (11)$$

假设在 II、III 区域内, L<sub>2</sub>(x) = d<sub>2</sub> 刚好满足上式, 则

$$A = 1 - \frac{(|r_1| - |r_2| e^{-\alpha l})^2}{(1 - |r_1||r_2| e^{-\alpha l})^2} - \frac{(1 - |r_1|^2)(1 - |r_2|^2) e^{-2\alpha l}}{(1 - |r_1||r_2| e^{-2\alpha l})^2} \quad (12)$$

那么, 在区域 I, L<sub>2</sub>(x) = d<sub>2</sub> + λ/8n<sub>1</sub>, φ<sub>+</sub> - φ<sub>-</sub> - 2δ = (2m + 1/2)π, 则

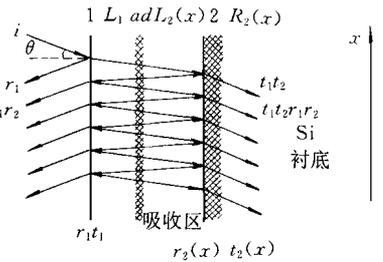


图 5 计算量子效率模型图

$$A = 1 - \frac{|r_1|^2 + |r_2|^2 e^{-2\alpha d}}{1 + |r_1|^2 |r_2|^2 e^{-2\alpha d}} - \frac{(1 + |r_1|^2)(1 - |r_2|^2) e^{-2\alpha d}}{1 - |r_1|^2 |r_2|^2 e^{-4\alpha d}} \tag{13}$$

其中  $|r_1|^2 = R_1$ ;  $|r_2(x)|^2 = R_2(x)$ .

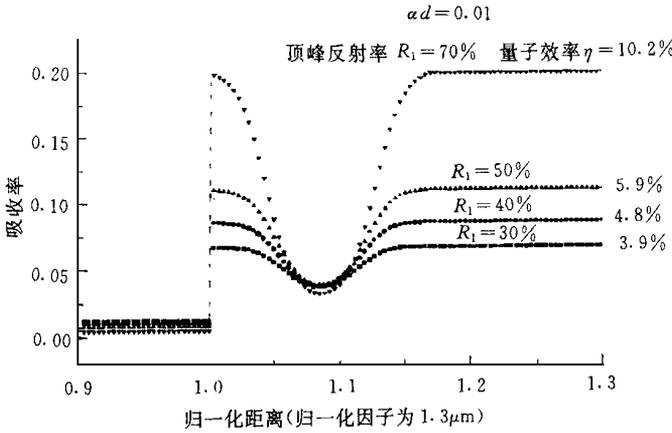


图 6 探测器吸收率随 x 的变化

共振底镜反射率  $R_2(x)$  取

图 4 所示的结果 波长为  $1.3\mu\text{m}$  时, Si/SiGe 多量子阱取  $\alpha d = 0.01$ . 取不同的顶镜反射率  $R_1$ , 计算出吸收率  $A(x)$  的值 所得到的吸收率对面积积分并除以总的面积, 可计算出该共振腔型光电探测器的量子效率 图 6 表示出吸收率随  $x$  的分布情况(以  $1.3\mu\text{m}$  归一化), 以  $R_1$  为参数, 同时给出了不同  $R_1$  时所求得的量子效率 图中只给出一个周期的结果, 可以看出, 由于 I 区与

II、III 区之间有四分之一波长的光程差, 对整个器件来说, 这种隐埋结构的吸收率将比通常的谐振腔结构的吸收率减小约一半. 通常,  $R_1$  为半导体与空气界面的反射率, 约为 30%, 则量子效率为 3.9%, 同普通正入射 Si/SiGe 多量子阱光电探测器的量子效率  $\eta = (1 - R_1)\alpha d$  1% 相比, 提高了 3~ 4 倍

### 4 结论

本文提出了一种新型的隐埋 Si 基共振腔型 PN 光电探测器结构, 并对该器件建立模型, 进行了理论分析和数值计算, 计算结果表明该种结构共振腔型 PN 光电探测器的量子效率较普通 PN 探测器提高了 3~ 4 倍. 这种图形化的隐埋 Bragg 结构, 既运用了 Bragg 反射共振腔提高量子效率的优点, 又可以在含  $\text{SiO}_2$  材料层上生长出 SiGe/Si 单晶结构的 MQW 来制备探测器, 兼顾了提高量子效率的需要和生长单晶材料的需要

### 参 考 文 献

[ 1 ] S Luryi, T. P. Pearsall, H. Tenkin, IEEE Electron Device Lett , 1986, 7(2): 104~ 107.  
 [ 2 ] H. Tenkin, T. P. Pearsall, J. C. Bean, Appl Phys Lett , 1986, 48(15): 963~ 965.  
 [ 3 ] Yuqing Zhu, Q inqing Yang, Q in ing Wang, 47th ECTC, San Jose CA, 1997.  
 [ 4 ] 朱育清, “Si 量子阱材料  $1.3\mu\text{m}$  波长光电探测器的研究”, 中国科学院半导体研究所博士论文, 1997.  
 [ 5 ] Kenichi Ishii, Yutaka Hayashi and Toshihiro Sekigawa, Jpn J. Appl Phys , 1990, 29(4): L 521~ L 523

## Theoretical Analysis of New Resonant Cavity Photodetector with Buried Si/SiO<sub>2</sub> Bragg Reflector

Li Cheng, Yang Qinqing, Wang Qiming

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

Received 16 March 1998, revised manuscript received 18 May 1998

**Abstract** A new resonant cavity photodetector with buried Si/SiO<sub>2</sub> Bragg reflector is proposed. This photodetector process is compatible with the integrated circuits technology. Theoretical analyses show that the quantum efficiency of the photodetector is improved by three to four times comparing with the conventional PN photodetectors without Bragg reflector.

**PACC:** 0762, 4200, 7755