

# Si基Ge薄膜共振腔增强型光电探测器的设计与模拟

周志文 沈晓霞 李世国

深圳信息职业技术学院电子与通信学院, 广东 深圳 518172

**摘要** 设计了Si衬底上Ge薄膜共振腔增强型光电探测器的器件结构,理论计算了上下反射镜Si/SiO<sub>2</sub>的对数、吸收区Ge薄膜的厚度、有源区面积等参数对器件的外量子效率、带宽等性能的影响。当器件上下反射镜Si/SiO<sub>2</sub>的对数分别为2和3,Ge薄膜的厚度为0.46 μm,器件的台面面积小于176 μm<sup>2</sup>时,探测器在中心波长1.55 μm处的外量子效率达到0.64,比普通结构提高了30倍,同时器件的带宽达到40 GHz。

**关键词** 光电子学;共振腔增强型;光电探测器;锗

中图分类号 TN315 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.122302

## Design and Simulation of Resonant Cavity Enhanced Ge Film Photodiode on Si Substrate

Zhou Zhiwen Shen Xiaoxia Li Shiguo

School of Electronic Communication Technology, Shenzhen Institute of Information Technology,  
Shenzhen, Guangdong 518172, China

**Abstract** Resonant cavity enhanced Ge film photodiode on Si substrate is proposed, and the effect of the pair value of Si/SiO<sub>2</sub> forming the top and bottom mirrors, thickness of the Ge absorption film, and mesa area of the active zone on the characteristics of the device such as external quantum efficiency and bandwidth is theoretically calculated. The optimized structure is as follows: the pair value of Si/SiO<sub>2</sub> is 2 and 3 for top and bottom mirrors, respectively, the thickness of Ge film is 0.46 μm and the mesa area is less than 176 μm<sup>2</sup>. Under this condition, an external quantum efficiency of 0.64 at a wavelength of 1.55 μm, which is 30 times larger than the conventional one, and a bandwidth of 40 GHz are achieved.

**Key words** optoelectronics; resonant cavity enhanced; photodiode; germanium

**OCIS codes** 230.0040; 130.0250; 040.5160; 160.5140

## 1 引言

光电探测器是硅基光子学领域的一项重要研究内容<sup>[1]</sup>。由于与现有硅集成电路工艺兼容,以及在近红外波段有较大的吸收系数,锗薄膜材料成为硅基片上集成光电探测器的最佳选择<sup>[1-5]</sup>。近年来,笔者所在小组成功报道了制作在Si衬底和SOI(绝缘体上的硅)衬底上的Ge薄膜光电探测器<sup>[4-5]</sup>,器件在波长1.31 μm处的外量子效率达到21%。然而,由于Ge的吸收系数在波长1.55 μm以上急剧减小(不足0.046 μm<sup>-1</sup>),要想获得高的量子效率,势必要增加吸收区的厚度,这样会降低器件的带宽。一种有效的解决途径是采用共振腔增强型结构<sup>[6]</sup>,将吸收区Ge薄膜放置于两个反射镜之间,使入射光在共振腔内多次来回反射而被充分吸收。该结构的优点是:增加光的有效吸收长度,提高量子效率;降低吸收区的物理厚度,减少光生载流子的渡越时间,提高带宽。基于此,本文优化设计了Si衬底上Ge薄膜共振腔增强型光电探测器的器件结构,理论计算了探测器结构参数对器件性能的影响。

## 2 器件结构

Si基Ge薄膜共振腔增强型光电探测器的器件结构如图1所示。衬底是Si晶圆,有源吸收区为外延的

收稿日期: 2014-04-21; 收到修改稿日期: 2014-07-03; 网络出版日期: 2014-11-04

基金项目: 深圳市科技计划(JCYJ20120821162230170)

作者简介: 周志文(1982—),男,博士,副教授,主要从事光电材料与器件等方面的研究。E-mail: zhouzw@sziit.com.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

Ge 薄膜, 上下反射镜为  $1/4$  波长厚 Si/SiO<sub>2</sub> 构成的分布布拉格反射镜 (DBR), 顶层是  $1/2$  波长厚的 SiO<sub>2</sub> 抗反射膜。光垂直入射进入器件, 经上下反射镜多次反射而被 Ge 薄膜充分吸收。外延 Ge 薄膜的厚度根据理论计算量子效率和带宽而优化确定。上下反射镜中 Si/SiO<sub>2</sub> 的对数分别为整数  $x$  和  $y$  ( $0, 1, 2, \dots$ )。设计的入射光中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , Si 和 SiO<sub>2</sub> 的折射率分别为 3.5 和 1.45, 每对 Si/SiO<sub>2</sub> 中 Si 和 SiO<sub>2</sub> 的厚度分别为  $0.11 \mu\text{m}$  和  $0.27 \mu\text{m}$ 。对于图 1 所示的器件结构, 其制作工艺如下: 1) 采用循环氧化-键合-刻蚀减薄技术在 Si 衬底上制备下反射镜<sup>[7]</sup>; 2) 采用低温缓冲层技术在超高真空化学气相沉积系统中外延 Ge 薄膜<sup>[8]</sup>; 3) 采用等离子增强化学气相沉积系统交替生长 Si/SiO<sub>2</sub> 制备上反射镜<sup>[9]</sup>。

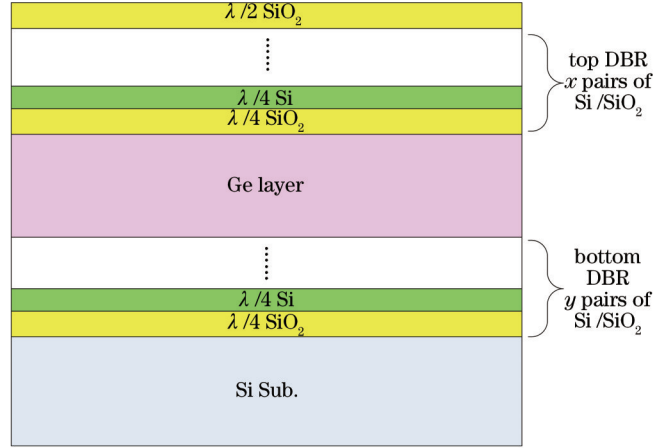


图 1 Si 基 Ge 薄膜共振腔增强型光电探测器的器件结构

Fig.1 Schematic of resonant cavity enhanced Ge photodiode on Si substrate

### 3 理论模型

#### 3.1 传输矩阵法

采用传输矩阵法<sup>[9-10]</sup>计算器件的反射谱和吸收谱。传输矩阵法计算的多层介质膜结构如图 2 所示, 每层介质膜用复折射率  $N_r = n_r - ik_r$  和厚度  $d_r$  来表征。对于第  $r$  层介质膜, 其内部沿传输方向  $x$  处的光场强度  $E_r(x)$  为:

$$E_r(x) = A_r(x) + B_r(x) = A_r \exp(-i\beta_r x) + B_r \exp(i\beta_r x), \quad (1)$$

式中  $A_r(x)$  表示前进波,  $B_r(x)$  表示后退波。光从入射层(图 2 中的第 0 层)到出射层(图 2 中的第  $N$  层)的总矩阵可以表示为:

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = D_0^{-1} \cdot D_1 \cdot P_1 \cdot D_1^{-1} \cdot D_2 \cdot P_2 \cdots D_N \cdot \begin{bmatrix} A'_N \\ B'_N \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $D_r$  和  $D_r^{-1}$  为透射矩阵及其逆矩阵,  $D_r = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \eta_r & -\eta_r \end{bmatrix}$ ;  $P_r$  为传输矩阵,  $P_r = \begin{bmatrix} \exp(i\phi_r) & 0 \\ 0 & \exp(-i\phi_r) \end{bmatrix}$ , 其中  $\phi_r$  为相位因子,  $\phi_r = \frac{2\pi(n_r - ik_r)d_r \cos \theta_r}{\lambda}$ ,  $\theta_r$  为入射角;  $\eta_r$  为光导纳, 对于 TE 偏振,  $\eta_r = 2.6544 \times 10^{-3}(n_r - ik_r)\cos \theta_r$ , 对于 TM 偏振,  $\eta_r = 2.6544 \times 10^{-3}(n_r - ik_r)/\cos \theta_r$ 。

代入相关参量得到总传输矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = D_0^{-1} \cdot \prod_{r=1}^{N-1} \begin{bmatrix} \cos \phi_r & \sin \phi_r / (i\eta_r) \\ i\eta_r \sin \phi_r & \cos \phi_r \end{bmatrix} \cdot D_N \cdot \begin{bmatrix} A'_N \\ B'_N \end{bmatrix}. \quad (3)$$

化简为:

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'_N \\ B'_N \end{bmatrix}. \quad (4)$$

假设出射介质膜为无限厚或完全吸收, 即后退波  $B'_N = 0$ , 则反射系数和透射系数分别为:

$$r = M_{21}/M_{11}, \quad t = 1/M_{11}. \quad (5)$$

从而得到整个多层介质膜结构的反射率  $R$  和透射率  $T$  分别为:

$$R = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2, T = \frac{n_s}{n_0} \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2, \quad (6)$$

式中  $n_s$  表示衬底的折射率。

则多层介质膜结构的吸收率  $A$  (即外量子效率  $\eta$ ) 为:

$$A = \eta = 1 - R - T. \quad (7)$$

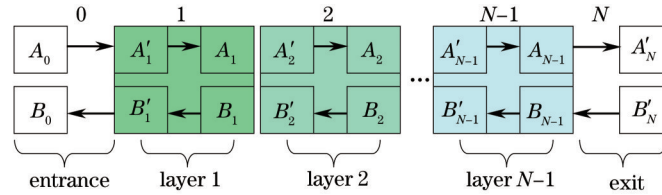


图2 传输矩阵的多层结构示意图

Fig.2 Multilayer structure of transfer matrix method

### 3.2 响应时间和带宽

器件的响应时间主要由光生载流子在吸收区的渡越时间和结电容的充放电时间决定。渡越时间是指吸收区内的载流子在电场作用下从产生到被电极收集所需要的时间,受吸收区厚度和载流子饱和速度的影响。Ge材料的空穴漂移速度比电子的慢,渡越时间主要取决于空穴漂移速度。由载流子在吸收区中的渡越时间决定的探测器带宽可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$f_{tr} = 0.45v_h/d, \quad (8)$$

式中  $d$  为吸收区的厚度,  $v_h$  为空穴饱和漂移速度。

结电容充放电时间( $RC$ 时间常数)主要取决于探测器的结电容和串联电阻。 $RC$ 时间限制的探测器带宽可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi R_1 C} = \frac{d}{2\pi R_1 \epsilon_r \epsilon_0 S}, \quad (9)$$

式中  $\epsilon_r$  是半导体的相对介电常数,  $S$  是探测器的面积,  $R_1$  是总电阻。高的响应速度需要小的面积和好的欧姆接触。探测器的总带宽可以描述为<sup>[11]</sup>:

$$f_{3dB} = \sqrt{\frac{1}{1/f_{tr}^2 + 1/f_{RC}^2}}. \quad (10)$$

## 4 结果与讨论

### 4.1 反射镜

图3(a)是硅衬底上不同对数 Si/SiO<sub>2</sub> 反射镜的反射谱。计算参数为:入射光中心波长为 1.55  $\mu\text{m}$ , Si 和 SiO<sub>2</sub> 的折射率分别为 3.5 和 1.45, Si 和 SiO<sub>2</sub> 的厚度分别为 0.11  $\mu\text{m}$  和 0.27  $\mu\text{m}$ , 并且假定 Si 对所考虑波段内的入射光没有吸收。当 Si 衬底上没有反射镜时,即 Si/SiO<sub>2</sub> 的对数为 0, 反射率为 0.3 左右;当 Si 衬底上有反射镜时,在 1.1~2.2  $\mu\text{m}$  范围内反射率随着 Si/SiO<sub>2</sub> 对数的增加急剧增加。Si/SiO<sub>2</sub> 的对数为 3 时,反射率已经接近 1。反射谱的半峰全宽为 1  $\mu\text{m}$  左右。图3(b)为不同对数 Si/SiO<sub>2</sub> 的反射镜在中心波长 1.55  $\mu\text{m}$  的反射率。在 Si/SiO<sub>2</sub> 的对数为 2 时,反射率达到 0.96, 对数增加,反射率增加,直至 1。Si 和 SiO<sub>2</sub> 的折射率相差较大,使得反射镜只需要少数几对 1/4 波长厚的 Si/SiO<sub>2</sub> 就可以获得很高的反射率。

### 4.2 吸收区 Ge 薄膜的厚度

图4是理论计算器件在不同结构、不同吸收系数  $\alpha$  (分别为 0.046  $\mu\text{m}^{-1}$  和 0.3  $\mu\text{m}^{-1}$ ) 下量子效率  $\eta$  与吸收区 Ge 薄膜厚度  $d$  的关系。当没有反射镜时,图中  $x=0, y=0$ , 也即普通结构的探测器,量子效率随着 Ge 薄膜厚度的增加近似线性地增大,同时吸收系数越大,量子效率也越高;当有反射镜时,图中  $x=0$  和 1,  $y=2$ , 也即共振腔增强型结构的探测器,量子效率随着 Ge 薄膜厚度的增加周期性地出现共振峰,峰值比普通结构的量子效率要高,量子效率得到增强。从图4可以看出,对于共振腔增强型结构,量子效率峰值处 Ge 薄膜的厚度分别为:0.09, 0.28, 0.46  $\mu\text{m}$  等。可以得出,峰值处 Ge 薄膜的厚度  $d$  满足如下关系式:

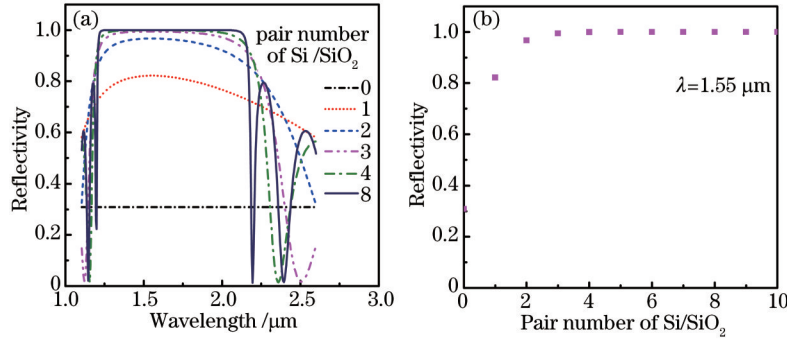


图3 (a) 不同Si/SiO<sub>2</sub>对数反射镜的反射谱; (b) 反射率与反射镜Si/SiO<sub>2</sub>对数的关系。中心波长为1.55 μm

Fig.3 (a) Simulated reflectivity for mirrors with various pairs of Si/SiO<sub>2</sub>; (b) relationship between reflectivity of mirrors and pair number of Si/SiO<sub>2</sub>. Center wavelength is 1.55 μm

$$d = (2M + 1) \cdot \lambda_0 / (4n_{Ge}) \quad (M = 0, 1, 2, \dots), \quad (11)$$

式中 $\lambda_0$ 为中心波长,  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $n_{Ge}$ 为Ge的折射率,  $n_{Ge} = 4.2$ 。另外, 峰值处Ge薄膜的厚度与吸收系数无关, 与上下反射镜Si/SiO<sub>2</sub>的对数 $x$ 和 $y$ 也无关。因此确定了器件的中心波长, 就可以根据(11)式确定Ge薄膜的厚度。

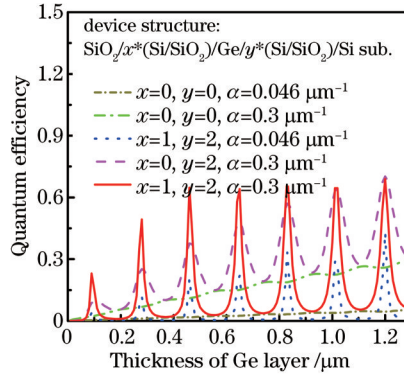


图4 不同结构器件的量子效率与吸收区Ge薄膜厚度的关系

Fig.4 Relationship between quantum efficiency and thickness of Ge film of different structures

### 4.3 器件的面积

器件的面积对其带宽影响较大, 因此从器件带宽的需求来确定器件的面积。根据(8)~(10)式计算器件带宽与器件面积和吸收区Ge薄膜厚度的关系, 如图5所示。计算中选取的参数为: 总电阻 $R_T = 50 \Omega$ , Ge的相对介电常数 $\epsilon_r = 16$ , 空穴饱和速度 $v_h = 6 \times 10^6 \text{ cm/s}$ , Ge薄膜的厚度根据(11)式确定, 这里选取三种值, 分别为: 0.28、0.46、0.65 μm。从图5可知, 当器件面积较小时(小于100 μm<sup>2</sup>), 器件的带宽主要受渡越时间限制, 几乎与器件的面积无关, 只是随着Ge薄膜厚度的增加(渡越时间增加)而下降。随着器件面积的增加, 出现转折点, 带宽变为受RC时间限制, 带宽随着器件面积的增加而急剧下降, 随着Ge薄膜厚度的增加反而增加。转折点出现在渡越时间和RC时间相等时, 根据(8)式和(9)式, 此时器件的面积为:

$$S = \frac{d^2}{0.9\pi R v_h \epsilon_r \epsilon_0}, \quad (12)$$

转折点处的面积与Ge薄膜厚度的平方成正比。将(12)式代入(10)式中, 可以得到探测器的最大带宽与器件面积(或Ge薄膜厚度)的关系为:

$$f_{3\text{dB}} = \sqrt{\frac{0.45v_h}{4\pi R \epsilon_r \epsilon_0 S}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{0.45v_h}{d}, \quad (13)$$

最大带宽与器件面积的关系如图5中紫色的实线标出。对于满足(11)式的吸收区Ge薄膜厚度0.28、0.46、0.65 μm, 根据(12)式计算器件带宽转折点的面积为65, 176, 350 μm<sup>2</sup>, 对应带宽分别为68, 41, 29 GHz。

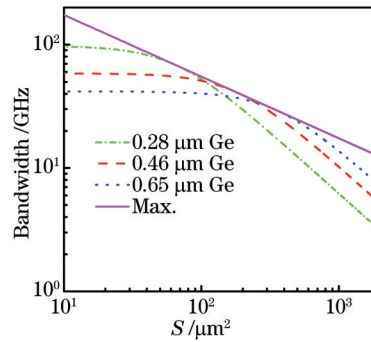
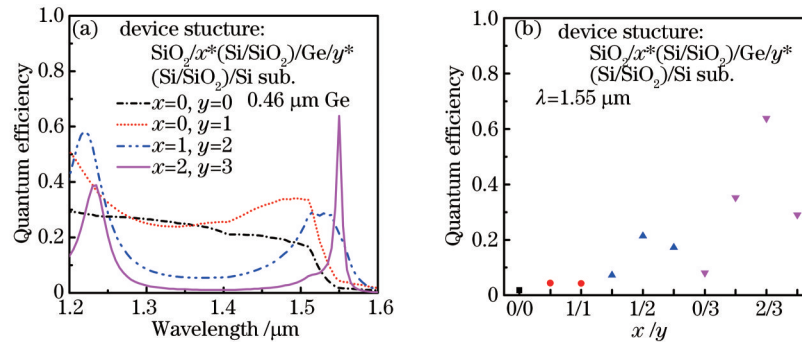


图5 理论计算不同吸收区厚度的带宽与面积的关系

Fig.5 Simulated bandwidth versus device area

#### 4.4 器件的总体结构和性能

设定探测器工作的中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 根据前文的理论分析, 并根据实际的制备工艺, 设计器件的结构参数为: 上下反射镜  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  的对数  $x$  和  $y$  分别为 2 和 3, 每对  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  中  $\text{Si}$  和  $\text{SiO}_2$  的厚度分别为  $0.11 \mu\text{m}$  和  $0.27 \mu\text{m}$ ,  $\text{Ge}$  薄膜的厚度为  $0.46 \mu\text{m}$ , 器件的面积小于  $176 \mu\text{m}^2$ 。器件的理论带宽将达到  $40 \text{GHz}$  以上。器件的响应光谱如图 6(a) 所示。为了方便比较, 也给出了  $x$  和  $y$  为其他值时的数据。共振腔增强型结构的探测器, 量子效率出现明显的共振峰, 共振峰位于中心波长  $1.55 \mu\text{m}$  处。器件在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处的量子效率与  $x$  和  $y$  取值的关系如图 6(b) 所示。当  $x$  一定时, 量子效率随  $y$  的增加而增加; 当  $y$  一定时, 量子效率随  $x$  的增加先增加后减小, 其最大值在  $x/y$  的值小于 1 时取得。主要是因为反射率太低, 共振效果不明显; 反射率太高, 进入共振腔的光的比例变小, 上下反射镜的反射率存在优化配对。在所考虑的  $x$  和  $y$  取值范围内, 取  $x=2, y=3$  时器件的量子效率最大, 为  $0.64$ ;  $x=0, y=0$  时, 器件的量子效率最小, 为  $0.02$ 。共振腔增强型结构的探测器比普通的提高了 30 倍。

图6 (a) 不同结构器件的量子效率与入射波长的关系; (b) 波长  $1.55 \mu\text{m}$  处量子效率与器件结构的关系Fig.6 (a) Relationship between quantum efficiency and wavelength of different structures; (b) quantum efficiency at  $1.55 \mu\text{m}$  with different structures

## 5 结 论

优化设计了  $\text{Si}$  衬底上  $\text{Ge}$  薄膜共振腔增强型光电探测器, 其结构参数为: 上下反射镜为  $1/4$  波长厚的  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ , 其对数分别为 2 和 3, 吸收区  $\text{Ge}$  薄膜的厚度为  $1/4$  波长的奇数倍, 取值为  $0.46 \mu\text{m}$ , 器件的面积小于  $176 \mu\text{m}^2$ 。在此参数下, 探测器在中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$  处的量子效率达到  $0.64$ , 比普通型的探测器提高了 30 倍, 器件的带宽达到  $40 \text{GHz}$ 。

### 参 考 文 献

- 1 Michel J, Liu J, Kimerling L. High-performance Ge-on-Si photodetectors[J]. Nature Photon, 2010, 4(8): 527-534.
- 2 Kang Y, Liu H, Morse M, et al.. Monolithic germanium/silicon avalanche photodiodes with 340 GHz gain-bandwidth product[J]. Nature Photon, 2008, 3(1): 59-63.
- 3 Xue H Y, Xue C L, Cheng B W, et al.. Zero biased Ge-on-Si photodetector with a bandwidth of 4.72 GHz at 1550 nm[J].

- Chinese Physics B, 2009, 18(6): 2542–2544.
- 4 Cai Zhiming, Zhou Zhiwen, Li Cheng, *et al.*. Characteristics of Si-based metal-germanium-metal photodetectors[J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2008, 19(5): 587–590.  
蔡志猛, 周志文, 李成, 等. 硅基外延锗金属-半导体-金属光电探测器及其特性分析[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(5): 587–590.
- 5 Zhou Zhiwen, He Jingkai, Wang Ruichun, *et al.*. Fabrication of Ge PIN photodiodes on silicon-on-insulator substrates under normal incidence[J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(11): 1609–1613.  
周志文, 贺敬凯, 王瑞春, 等. SOI基垂直入射 Ge PIN 光电探测器的研制[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(11): 1609–1613.
- 6 Dosunmu O I, Cannon D D, Emsley M K, *et al.*. Resonant cavity enhanced Ge photodetectors for 1550 nm operation on reflecting Si substrates[J]. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2004, 10(4): 694–701.
- 7 Emsley, M K, Dosunmu O, Unlu M S. High-speed resonant-cavity-enhanced silicon photodetectors on reflecting silicon-on-insulator substrates[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(4): 519–521.
- 8 Zhou Zhiwen, He Jingkai, Li Cheng, *et al.*. Growth of high quality Ge epitaxial films on Si substrate by low temperature buffer technique[J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(7): 1030–1033.  
周志文, 贺敬凯, 李成, 等. 采用低温缓冲层技术在 Si 衬底上生长厚 Ge 薄膜[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(7): 1030–1033.
- 9 Li Chuanbo. The Epitaxy of Material and the Fabrication of Si-Based RCE Detector Operating at 1.55  $\mu\text{m}$  [D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2005. 30–45.  
李传波. Si 基 1.55  $\mu\text{m}$  RCE 探测器的材料生长与器件制作[D]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 2005. 30–45.
- 10 Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light[M]. Oxford: Pergamon Press, 1964. 60–100.
- 11 Liu J, Michel J, Giziewicz W, *et al.*. High-performance, tensile-strained Ge p-i-n photodetectors on a Si platform[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(10): 103501.