

硅基波导共振增强型光电探测器的设计与模拟^{*}

陈荔群 李 成[†]

(厦门大学物理系 半导体光子学研究中心, 厦门 361005)

摘要: SiGe 是间接带隙材料,吸收系数非常小,因而 SiGe 探测器在红外波段的量子效率很低. 本文提出一种新型的探测器结构,即波导共振增强型光电探测器,该器件主要由两个介质布拉格反射镜和波导吸收区构成,器件尺寸较传统波导型探测器大为减小,吸收区的长度不受 SiGe 临界厚度的限制,实现了量子效率和响应速度的优化. 本文在数值模拟的基础上,对器件结构进行了优化设计,结果表明 7.6 μm 长的波导探测器可以得到 20% 以上的量子效率.

关键词: Si/SiGe; 波导共振增强型; 探测器

PACC: 0670D; 4280S

中图分类号: TN304

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)08-1476-04

1 引言

随着光通信事业的不断发展和半导体新材料的不断开拓,以光纤通信、光互连为代表的光电子集成技术对半导体光电子器件和电路提出了越来越严格的要求. 其中一个课题就是如何以成熟的硅工艺技术为基础,利用新原理和新材料,在硅衬底上直接制作与硅微电子工艺兼容的、能在近红外波段(1.3~1.55 μm)有效工作的高性能价格比的硅基光电探测器及其集成器件.

SiGe 是间接带隙材料,吸收系数非常小,因此普通型的 SiGe 探测器量子效率非常低,无法达到实用化. 为了提高 SiGe 探测器量子效率,通常采用的器件结构有: (1) 采用波导结构^[1,2],实现对入射光的完全吸收. 但是用这种方法制作的器件的尺寸通常很大,约毫米量级,响应速度小,没有从根本上解决响应频率与量子效率的矛盾. 而且由于波导层较薄,耦合效率也是一个限制因素,不利于硅基光电子器件的集成. (2) 采用雪崩倍增探测器^[3],利用其具有内部增益的特点,实现量子效率的提高. 但是在一般情况下雪崩噪声大,对材料质量要求高,很难在 SiGe 外延材料中实现. (3) 采用共振腔增强型(RCE)结构,该结构最早由 Chin 和 Chang^[4]提出,用于提高探测器的量子效率,但由于受 Si 与 SiGe 晶格失配的影响, SiGe 层的厚度受到临界值的限制,理论预期的量子效率为 20%,已经被实验证实

的最大量子效率仅为 5%^[5~7].

本文提出了一种新型高量子效率的 Si 基光电探测器,工作波长从可见到近红外波段. 它结合了波导探测器与共振腔型探测器的优点,与传统波导探测器相比,器件尺寸大为减小,在相同的量子效率下可以得到更高的响应速度. 与垂直共振腔结构探测器相比,吸收区的长度不受 SiGe 临界厚度的限制,可以灵活设计,从而达到优化器件的目的.

2 器件结构设计

图 1 是波导共振增强型光电探测器的三维结构示意图. 该结构包括在绝缘体上硅(SOI)衬底上制作一脊型 SiGe 波导,作为吸收区,材料为 20 周期的 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ (6nm)/Si (20nm) 多量子阱. 在波导的传播方向上制作了两个数对 SiGe 量子阱层/空气分布布拉格反射镜,构成共振腔. 入射光从波导的一端布拉格反射镜输入,在波长和腔体的模式相匹配的情况下,光顺利进入腔体,在两反射镜之间构成的共振腔中发生共振吸收,从而有效地把入射光转换为载流子,光电流由波导上、下接触层电极引出. 入射光通过光波导和共振腔共同实现三维限制,从而提高探测器的量子效率;反之,如果波长和腔体模式不匹配,那么大部分入射光将被反射,即探测器对此波长的光没有响应,因此器件具有波长选择特性及增强作用. 适用于波分复用集成光探测技术.

^{*} 福建省青年科技人才创新基金(批准号:2004J021), 回国留学人员基金, 集成光电子学国家重点实验室和国家自然科学基金(批准号:60336010)资助项目

[†] 通信作者. Email: lich@xmu.edu.cn

2006-01-07 收到, 2006-03-20 定稿

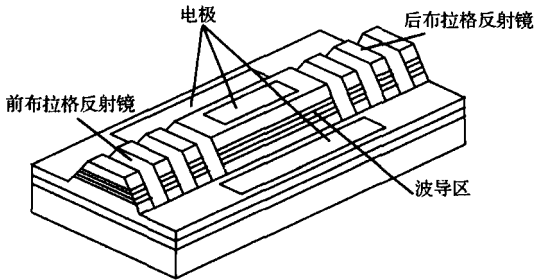


图 1 波导共振增强型光电探测器的三维结构示意图

Fig. 1 Schematic of the resonant-cavity-enhanced waveguide photodetector

2.1 布拉格反射镜的设计

布拉格(Bragg)反射镜的设计是整个器件设计的重点,为了得到比传统探测器高的量子效率,设计的方案是在 Si Ge/ Si 多量子阱波导型探测器的两端加上一定对数的布拉格反射镜,形成共振腔.布拉格反射镜的材料是根据增反膜原理选取的,在 Si Ge 材料系中,可以选择 Si/ SiO₂, Si/ air, air/ SiO₂ 及 Si Ge/ Si 等介质折射率相差较大的两种材料交替而成^[8].为了在共振波长中能得到高反射率,布拉格反射镜介质膜层的厚度 t 应为:

$$t = (2k + 1) \frac{\lambda}{4n}, \quad k \text{ 为整数}$$

其中 λ 是工作波长; n 是材料的折射率.随着介质膜厚度的增加,布拉格反射镜的反射率谱宽也变窄,所以在设计中结合工艺要求应选择适当的厚度.本文中 choice 以 Si Ge 量子阱层/ air 作为反射镜, Si Ge 量子阱的横向厚度为 $2.3\mu\text{m}$, air 层的厚度为 $2.3\mu\text{m}$.对于不同对数的反射镜,其反射率也不同,图 2 是不同对数的布拉格反射镜的反射谱的模拟结果,其中中心工作波长为 $1.3\mu\text{m}$.由图可以看出,取 3 对布拉格反射镜时,反射率可以达到 99 %.

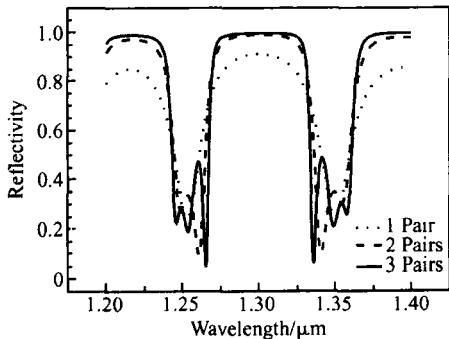


图 2 不同对数反射镜的反射谱,中心工作波长为 $1.3\mu\text{m}$

Fig. 2 Reflectivity spectra of the mirrors of various pairs of SiGe/air at the center wavelength of $1.3\mu\text{m}$

2.2 吸收率数值模拟和吸收区的设计

探测器由两个布拉格反射镜构成谐振腔,在腔中间夹着一定尺寸的波导层,入射光通过谐振腔,在特定的波长发生共振,使入射光在波导中充分的吸收,得到高的量子效率.设吸收区 Si_{1-x}Ge_x 的长度为 d ,波导长度应选取为:

$$nd = k \frac{\lambda}{2}, \quad k \text{ 为整数}$$

波导层吸收率是根据矩阵传输方程来模拟的,多量子阱有源层作为一层来计算,为了精确模拟入射光在每一层的吸收,每一层用复折射率 $N_i = n_i - jk_i$ 和厚度 d_i 来表征, Si_{1-x}Ge_x 材料的折射率 n_i 由 Si 和 Ge 组分线性插值来确定, $k_i = \frac{\alpha}{4\pi}$, 每一层的特征矩阵为^[9]:

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(k_i d_i) & i \sin(k_i d_i) / Y_i \\ i Y_i \sin(k_i d_i) & \cos(k_i d_i) \end{bmatrix},$$

$$Y = \frac{\sqrt{\epsilon_0}}{\sqrt{\mu_0}} n \cos \theta$$

$$h = nd \cos \theta$$

光从前布拉格反射镜的端面入射,在多层结构中传播到最后一层,场强关系为:

$$\begin{bmatrix} E_{OD} \\ E_{OT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{SD} \\ E_{ST} \end{bmatrix},$$

E_{OD}, E_{OT} :空气中前、后行波

E_{SD}, E_{ST} :底层中后、前行波

式中 $\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ 为总传输矩阵.传输矩阵将场强的切向分量从空气传到衬底,器件的反射率 R ,透射率 T ,吸收率 A 分别表示为:

$$R = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2$$

$$T = \frac{n_s}{n_0} \times \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2$$

$$A = 1 - R - T$$

式中 n_0, n_s 分别为空气和底层的折射率.

根据共振腔增强型探测器的原理^[10],器件的后布拉格反射镜的反射率值通常要求较高,前布拉格反射镜的反射率值要根据材料的吸收性质而定.图 3 是对不同对数的前反射镜构成的共振腔探测器模拟得到的吸收率,其中后反射镜具有三对介质层,其反射率为 99 %,与前反射镜的反射率 R_1 、吸收系数 α 、有源层厚度 d 的关系为 $R_1 = R_2 e^{-2\alpha d}$ ^[10]. Si_{0.65}-Ge_{0.35}/ Si 多量子阱波导芯的吸收系数在 $1.3\mu\text{m}$ 处取优化值: $\alpha_{\text{eff}} = \alpha \tau = 113\text{cm}^{-1}$, τ 为该波导的光场限制因子.从图中可以看出,前布拉格反射镜的介质层仅取 1 对时,对 $1.3\mu\text{m}$ 波长最大的吸收率可达到

86%, 波导长度的最优值为 $7.6\mu\text{m}$ 。若前布拉格反射镜的介质层仅取 0 对时, 对 $1.3\mu\text{m}$ 波长最大的吸收率可达到 90%, 波导长度的最优值为 $30\mu\text{m}$ 。为了比较, 在图 3 中画出相同材料的传统波导型探测器的量子效率。可以看出, 优化后的具有共振腔结构的探测器, 在 $1.3\mu\text{m}$ 处的量子效率比相同尺度的传统波导型探测器提高近 10 倍。

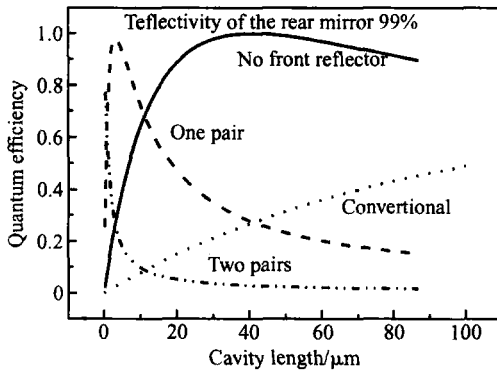


图 3 采用不同对数的前反射镜, 量子效率与腔长的关系

Fig. 3 Quantum efficiency of photodetector versus the cavity length with various pairs of front mirror

2.3 波导的光场限制

用 BPM 波束传播方法三维模拟脊型波导结构 TE 光场的分布如图 4 所示。模拟中所用参数为波导宽度 $10\mu\text{m}$, 脊高 $1.0\mu\text{m}$ 。可以看出, 设计的波导为单模传播, 光场主要分布于 SiGe/Si 多量子阱所在的区域, 在材料生长方向得到光场限制因子为 84%。

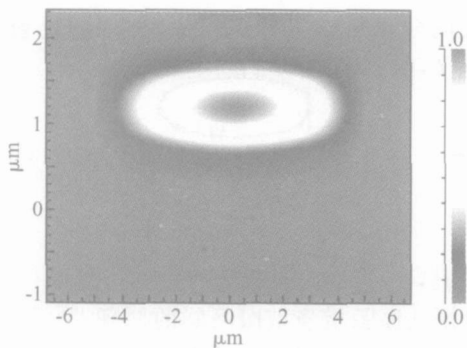


图 4 脊型波导探测器单模 TE 模场分布

Fig. 4 Distribution of TE mode of the SiGe/Si rib waveguide photodetector

3 结果与讨论

SiGe 波导共振腔增强型探测器光响应谱示于图 5, 该探测器具有好的波长选择特性和高的量子效率。在 $1.3\mu\text{m}$ 处, 内量子效率可以达到 86% 以上,

半高宽小于 1nm , 适合于密集波分复用系统使用。在端耦合的情况下, 假设入射光为高斯光束, 则耦合效率大约为 23%, 有望得到 20% 以上的量子效率。传统波导型探测器要达到较高的量子效率, 波导的长度需毫米量级, 因此增加共振腔后器件的面积将大为减小。

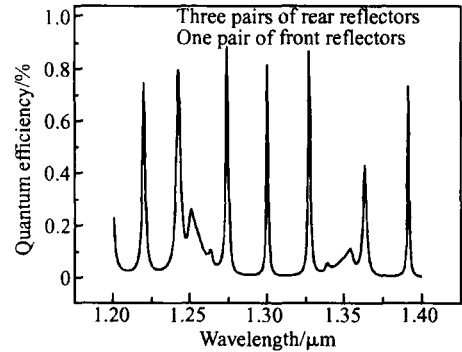


图 5 SiGe 波导共振腔型探测器量子效率和波长的关系

Fig. 5 Dependence of quantum efficiency on wavelength of SiGe resonant-cavity-enhanced waveguide photodetector

在 pin 结构探测器中, 影响器件响应速度的因素有: (1) 耗尽层渡越时间; (2) 探测器本征和寄生的电容放电时间 (RC 时间常数); 对于波导共振腔增强型探测器, 由于载流子的传输方向与光波导方向垂直, 载流子渡越时间主要由外延层的厚度决定, 该厚度小于 $1\mu\text{m}$, 在应用反向偏压时, 载流子渡越时间达到 ps 量级。因此探测器的响应速度主要由器件的电容 (即面积) 决定。 $10\mu\text{m}$ 宽, $7.6\mu\text{m}$ 长的波导吸收区, 估算响应频率可达到 30 GHz 以上。

4 结论

本文提出并设计了一种 SiGe 波导共振腔增强型光电探测器, 该结构在 SiGe/Si 多量子阱波导的两端制作两组反射镜, 从而在小尺寸 ($10\mu\text{m}$ 量级) 波导内对特定波长的入射光得到共振增强, 模拟结果表明该探测器具有高频和高的量子效率, $7.6\mu\text{m}$ 长的波导探测器量子效率可达到 20% 以上, 且具有良好的波长选择特性, 半高宽小于 1nm 。这种器件结构适合于具有间接带特性的 Si 基光电探测器。

参考文献

- [1] Temkin H, Pearsall T P, Bean J C, et al. Ge_xSi_{1-x} strained-layer superlattice waveguide photodetectors operating near $1.3\mu\text{m}$. Appl Phys Lett, 1986, 48(15): 963
- [2] Li B J, Li G Z, Liu E K, et al. Monolithic integration of a SiGe/Si modulator and multiple quantum well photodetector for $1.55\mu\text{m}$ operation. Appl Phys Lett, 1998, 73(24): 3504

- [3] Shi J W, Liu Y H, Liu C W. Design and analysis of separate-absorption-transport-charge-multiplication traveling-wave avalanche photodetectors. *J Lightwave Technol*, 2004, 22 (6) : 1583
- [4] Chin A, Chang T Y. Multilayer reflectors by molecular-beam epitaxy for resonance enhanced absorption in thin high-speed detectors. *J Vac Sci Technol B*, 1990, 8(2) : 339
- [5] Li C, Yang Q Q, Wang H J, et al. Si_{1-x}Ge_x/Si resonant-cavity-enhanced photodetectors with a silicon-on-oxide reflector operating near 1.3 μm . *Appl Phys Lett*, 2000, 77(2) : 157
- [6] Ramam A, Chowdhury G K, Chua S J. An approach to the design of highly selective resonant-cavity-enhanced photodetectors. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(17) : 171104
- [7] Li Chuanbo, Mao Rongwei, Zuo Yuhua, et al. Fabrication of SiGe/Si multi-quantum wells resonant-cavity-enhanced detector. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25 (12) : 1576 (in Chinese) [李传波, 毛荣伟, 左玉华, 等. SiGe 共振腔增强型探测器的制备. *半导体学报*, 2004, 25(12) : 1576]
- [8] Mao Rongwei, Zuo Yuhua, Li Chuanbo, et al. Fabrication of 1.5 μm Si-based resonant cavity enhanced photodetectors. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(2) : 271 (in Chinese) [毛荣伟, 李传波, 左玉华, 等. 硅基 1.5 μm 共振腔增强型探测器. *半导体学报*, 2005, 26(2) : 271]
- [9] Born M, Wolf E. *Principles of optics*. Oxford : Pergamon, 1991
- [10] Ulun M, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices. *J Appl Phys*, 1995, 78 : 607

Design and Simulation of Si-Based Resonant-Cavity Enhanced Waveguide Photodetectors^{*}

Chen Liqun and Li Cheng[†]

(Semiconductor Photonics Research Center, Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract : We propose a novel SiGe resonant-cavity-enhanced photodetector that operates at 1.3 μm . The device is composed of two Bragg reflectors and a waveguide absorption region. Compared to conventional waveguide photodetectors, the device can be designed with a small enough area for high-speed operation. The limitation of the SiGe critical thickness is circumvented, and the photodetector is expected to have high quantum efficiency. The structure is optimized through numerical simulation and a quantum efficiency of 20 % is expected with a 7.6 μm -long waveguide.

Key words : Si/SiGe; resonant-cavity-enhanced waveguide; photodetector

PACC : 0670D; 4280S

Article ID : 0253-4177(2006)08-1476-04

^{*} Project supported by the Innovation Projects for Young Scientific Researchers of Fujian Province (No. 2004J021), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of the State Education Ministry, and the National Natural Science Foundation of China (No. 60336010)

[†] Corresponding author. Email: lich@xmu.edu.cn

Received 7 January 2006, revised manuscript received 20 March 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics