

850/1550nm 智能集成分波光开关的理论设计*

李章健 陈志文 朱启乐 赵玉周 林旭彬 李 静 蔡志岗 王 钢 李宝军

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

摘要: 理论分析和设计了一种用于 850 和 1550nm 两个光通信窗口的、集波长信号分离和光开关功能于一体的智能集成分波光开关, 并将弧形结构全内反射面用于该集成结构中. 基于 Si 基半导体 SiGe 合金材料的等离子体色散效应, 对该结构智能集成分波光开关的串音、损耗、消光比等特性进行了分析和模拟计算. 计算得到, 作为光开关时器件的平均串音、插入损耗和消光比分别为 $-19, 1.3$ 和 21dB , 作为分波器时平均串音和插入损耗分别为 -11 和 1.1dB . 设计结果表明, 该集成器件不仅能够实现 850 和 1550nm 两种波长光信号的开关, 而且还能对这两种波长的光信号进行分离, 是一种有前途的智能化集成分波光开关.

关键词: 分波光开关; 智能集成; 光波导; Si 基光电子学

PACC: 4280L; 4265P

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0225-04

1 引言

随着光纤通信特别是波分复用技术的迅猛发展^[1], 以光开关^[2,3]、波长信号分离器^[4]及调制器^[5,6]等为代表的控光器件已成为该领域的关键和核心元器件. 然而, 这些关键和核心元器件目前还只是以单片集成或混合集成甚至以分立器件的形式被应用, 这给光电子器件芯片的微型化发展带来了应用上的障碍. 能否将这些关键元器件在实现单片集成的同时实现智能化集成成为一个非常重要的、有战略意义的研究课题. 为此, 本文基于 Si 基 SiGe 半导体材料, 针对光纤通信的第一个窗口(800~900nm)和第三个窗口(1500~1600nm)的光波, 从理论上分析和设计了一种集波长信号分离和光开关功能于一体的智能集成分波光开关.

2 器件结构和理论基础

图 1 是所提出的非对称结构智能集成分波光开关结构示意图. 它是一个由从 W_0 到 W_1 的直波导和从 W_0 到 W_2 的弯曲波导组成的 Y 型分支结构,

且在其分叉处设计有一个曲率半径为 R 的弯曲载流子注入区(carrier injection region), 通过载流子注入引起材料折射率的变化, 形成全内反射面, 实现对 850 和 1550nm 两个波长光信号的分离和开关. 图中 W_0, W_1, W_2 分别为所对应的波导的宽度, R 是弧形波导的曲率半径, L 为载流子注入反射面沿水平方向的长度.

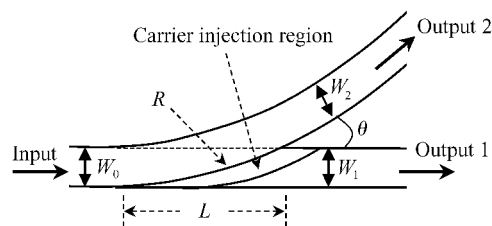


图 1 非对称结构智能集成分波光开关结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an asymmetrical intelligently integrated wavelength dividing switch

为了完成对两种不同波长光信号的分离和开关, 器件设计用材料为 Si 基 SiGe 半导体. 其原因是以 Si 为主体的 SiGe 合金材料除了具有载流子注入引起的等离子体色散效应外, 还因其晶格常数、禁带宽度、折射率等都随 Ge 组分的变化而变化, 给这种新型结构的智能集成分波光开关的设计带来了优

* 教育部科学技术研究基金(批准号:104144), 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20040558009)和广东省科技计划重大专项基金(批准号:2003A1060201)资助项目

势. 我们知道, 半导体材料 Si 中自由载流子浓度的任何变化都将引起其折射率(n)和吸收系数(α)的变化, 从而对在其中传播的光产生一定的影响, 这就是 Si 的等离子体色散效应^[7]. 利用 SiGe 材料制作光波导器件时, Ge 组分一般小于 10%. 因而 SiGe 合金材料仍是以 Si 为主体, 有类似于 Si 的等离子体色散效应表达式^[7]:

$$\Delta n_{\text{SiGe}} = -\frac{e^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 n_{\text{SiGe}} \epsilon_0} \left[\frac{\Delta N_e}{m_{\text{ce}}^*(\text{SiGe})} + \frac{\Delta N_h}{m_{\text{ch}}^*(\text{SiGe})} \right] \quad (1)$$

式中 λ 是光波波长; e 是电子电荷; ϵ_0 是真空介电常数; c 是光速; n_{SiGe} 是 SiGe 合金材料的折射率; $m_{\text{ce}}^*(\text{SiGe})$ 和 $m_{\text{ch}}^*(\text{SiGe})$ 分别是 SiGe 合金材料电子和空穴的电导有效质量^[8]; ΔN_e 和 ΔN_h 分别是电子和空穴浓度相对于本征浓度 N_i 的变化量.

由于 850 和 1550nm 对应的 Si 折射率分别为 $n_{\text{Si}} = 3.67$ 和 3.47 , 因而由 $n_{\text{SiGe}} = n_{\text{Si}} + 0.18x$ 可得出对应于不同 Ge 组分(x)以及 850 和 1550nm 两种不同波长时的折射率. 为了使所设计的光波导器件与单模光纤数值孔径匹配, 根据文献^[9]的报道, 这里取 Ge 组分也为 4%, 从而得到不同载流子浓度变化时所对应的 SiGe 材料的折射率变化, 如表 1 所示^[7]. 从表 1 可以看出, 在相同载流子浓度变化下, 波长越长, 其折射率改变越大. 对于 850 和 1550nm 这两种波长来说, 其折射率变化之比为 $\Delta n_{850} : \Delta n_{1550} \approx 1 : 3.3$, 本文正是利用这种原理完成智能集成分波光开关设计的.

表 1 850 和 1550nm 两种不同波长光在不同载流子浓度变化时所对应的 SiGe 材料(Ge 组分 4%)折射率的变化值

Table 1 Variations of the refractive index of SiGe (with 4% Ge) in different carrier concentrations at 850nm and 1550nm

λ/nm	n	Δn		
		$\Delta N = 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$	$\Delta N = 2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$	$\Delta N = 3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$
850	3.677	0.003	0.007	0.01
1550	3.477	0.01	0.022	0.033

3 器件设计

从上面的分析可知, 当在图 1 所示的载流子注入区(通常是一个 pn^+ 结或 p^+n 结, 这里以 p^+n 结为例)上加一正向偏压时, 便有大量的空穴从 p^+ 区注入到 n 区, 致使 n 区的载流子浓度增加, 由(1)式可知, 将引起 SiGe 材料的折射率下降, 从宽度为 W_0 的波导中输入的光便会在该区域发生折射或反射.

假设 850 和 1550nm 所对应的全内反射临界角分别为 θ_{c1} 和 θ_{c2} , 则由 Snell 定律容易得到关系式 $\theta_{\text{c1}} > \theta_{\text{c2}}$. 当入射角 θ 满足 $\theta_{\text{c2}} < \theta < \theta_{\text{c1}}$ 时, 波长为 1550nm 的光将发生全反射并从宽度为 W_2 的端口 (Output2) 输出, 波长为 850nm 的光将折射并从宽度为 W_1 的端口 (Output1) 输出. 表 2 是根据几何光学和单模光波导设计的原则(与单模光纤的数值孔径匹配、单模性、大截面)所得到的该器件几何结构参数.

表 2 非对称结构智能集成分波光开关的设计参数值

Table 2 Designed parameters of an asymmetrical intelligently integrated wavelength dividing switch

Parameters	$\theta/(\text{^\circ})$	$W_0/\mu\text{m}$	$W_1/\mu\text{m}$	$W_2/\mu\text{m}$	R/mm	$L/\mu\text{m}$
Value	3.9	8	10	6	16	183

4 模拟分析和开关特性

通过解 Maxwell 方程并利用二维光束传播法 (2D-BPM) 对所设计的智能集成分波光开关进行了模拟分析, 并通过模拟对分波光开关的串音、损耗、消光比等参数进行了计算. 图 2 所示为无载流子注入时两种波长光的传输. 由于无载流子注入时, SiGe 材料的折射率没有变化, 因而没有形成全内反射面, 所以 850 和 1550nm 两种不同波长光都沿着从 W_0 到 W_1 的直波导输出, 路径均无变化. 在适度载流子注入情况下(即 $\Delta N = 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$) 两种波长被分离成两路输出, 如图 3 所示. 图 4 所示为在大载流子

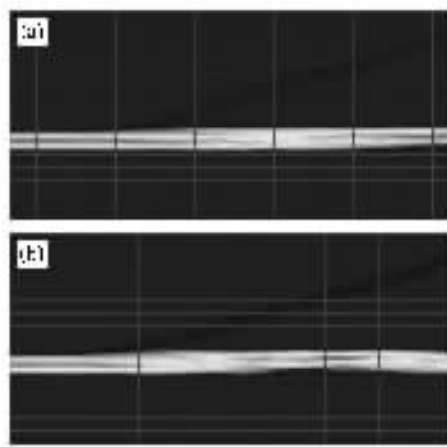


图 2 无载流子注入时两种波长沿直波导输出 (a) $\lambda = 850\text{nm}$ (OFF state); (b) $\lambda = 1550\text{nm}$ (OFF state)
Fig. 2 Two wavelengths propagate and be output from OFF state without carrier injection (a) $\lambda = 850\text{nm}$ (OFF state); (b) $\lambda = 1550\text{nm}$ (OFF state)

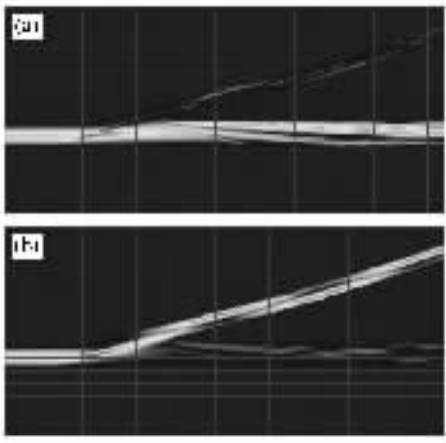


图3 适度载流子注入时两种波长被分离成两路输出 (a) $\lambda=850\text{nm}$ (OFF state);(b) $\lambda=1550\text{nm}$ (ON state)

Fig. 3 Two wavelengths are divided and be output from different state with a proper carrier injection (a) $\lambda=850\text{nm}$ (OFF state);(b) $\lambda=1550\text{nm}$ (ON state)

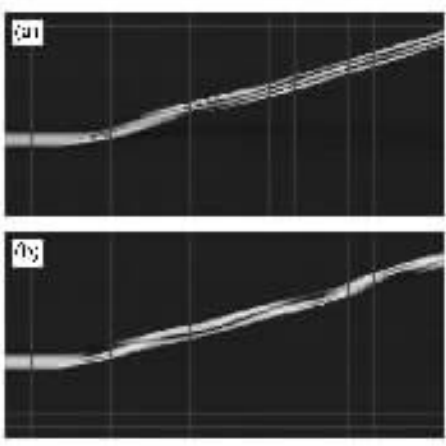


图4 大载流子注入时两种波长光路的改变 (a) $\lambda=850\text{nm}$ (ON state);(b) $\lambda=1550\text{nm}$ (ON state)

Fig. 4 Two wavelengths are reflected and be output from ON state under a high carrier injection (a) $\lambda=850\text{nm}$ (ON state);(b) $\lambda=1550\text{nm}$ (ON state)

注入情况下(即 $\Delta N=3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$)两种波长光的传输.从图中看出,在大载流子注入情况下两种不同波长光信号的输出光路被改变了.进一步模拟分析发现,当器件用于分波时,载流子注入反射区的长度 L 越短、曲率半径 R 越大,则对短波长传输越有利,反之则对长波传输有利.

进一步计算得到,对图3所示的适度载流子注入(相当于分波器)的情况,对应850和1550nm的串音、插入损耗分别是-9.6, 0.4dB和-12.3, 1.8dB;当用作光开关时(直通态为OFF,反射态为

ON),该结构器件的详细参数见表3.需要说明的是,本文的器件设计中未考虑材料对光的吸收.

表3 智能集成分波光开关的计算参数 dB

Table 3 Calculated performance of the wavelength dividing optical switch dB

	Crosstalk	Insertion loss	Extinction ratio
850nm(OFF)	-16.4	0.05	11.4
850nm(ON)	-13.4	2	18.9
1550nm(OFF)	-16	0.5	34.5
1550nm(ON)	-32	1.5	18.2

5 结论

利用SiGe(Ge组分4%)合金材料的等离子色散效应,通过计算机模拟和计算,设计出了一种用于850和1550nm两个光通信窗口的、集波长信号分离和光开关功能于一体的新型智能集成分波光开关.器件作为光开关用时的平均串音、损耗和消光比分别约为-19, 1.3和21dB;作为分波器用时平均串音和损耗分别为-11和1.1dB.该结构器件可用于新一代光纤通信系统中,并对850和1550nm两种不同光通信窗口的波长信号进行分离和开关,是一种有前途的智能化集成分波光开关.

参考文献

- [1] Svidzinskiy K K. Silicon-based optical integrated circuits for terabit-rate optical networks. *Microelectron Eng*, 2003, 69: 221
- [2] Abdalla S, Ng S, Barrios P, et al. Carrier injection-based digital optical switch with reconfigurable output waveguide arms. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16(4): 1038
- [3] Jiang Xiaoqing, Yang Jianyi, Zhan Hengzheng, et al. Photon-induced total internal reflection all-optical switches. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16(2): 443
- [4] Li Baojun, Wan Jianjun, Li Guozheng, et al. Y-branch 1.3/1.55 μm wavelength demultiplexer based on the plasma dispersion effect. *Thin Solid Films*, 2000, 69: 419
- [5] Li Guozheng, Gao Yong, Liu Xiding, et al. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ plasma dispersion effect and electro-optic modulator. *Semiconductor Optoelectronics*, 1996, 17(2): 154(in Chinese)[李国正,高勇,刘西钉,等. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 等离子体色散效应及光电调制器. *半导体光电*, 1996, 17(2): 154]
- [6] Kleine-Ostmann T, Dawson P, Pierz K, et al. Room temperature operation of an electrically driven terahertz modulator. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(18): 3555
- [7] Soref R A, Bennett B R. Electro-optical effects on silicon.

- IEEE J Quantum Electron, 1987, 23(1):123
- [8] Tain S C, Roulston D J. A simple expression for band gap narrowing (BGN) in heavily doped Si, Ge, GaAs and GeSi strained layers. Solid-State Electron, 1991, 34(5):453
- [9] Li Baojun, Li Guozheng, Liu Enke. Optimizing design of $\text{Si}_{1-x}\text{-Ge}_x$ waveguide and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ MQW photodetector for 1.55 μm operation. Acta Optica Sinica, 1997, 17(12):1718 (in Chinese)[李宝军, 李国正, 刘恩科. 1.55 μm $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光波导与 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 多量子阱探测器集成的优化设计. 光学学报, 1997, 17(12):1718]

Theoretical Analysis and Design of Intelligently Integrated Optical Switches for 850 and 1550nm Applications*

Li Zhangjian, Chen Zhiwen, Zhu Qile, Zhao Yuzhou, Lin Xubin, Li Jing,
Cai Zhigang, Wang Gang, and Li Baojun

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: An intelligently integrated optical switch with wavelength dividing function is analyzed and designed for 850 and 1550nm applications. Its crosstalk, insertion loss, and extinction ratio are calculated by using beam propagation method through solving Maxwell equations. The results show that for optical switch use, the average crosstalk, insertion loss, and extinction ratio are -19, 1.3, and 21dB, respectively; for optical wavelength divider use, the average crosstalk and insertion loss are -11 and 1.1dB, respectively. It is a kind of multifunctional component for optical fiber communication applications.

Key words: wavelength dividing switch; intelligent integration; optical waveguide; Si-base optoelectronics

PACC: 4280L; 4265P

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0225-04

* Project supported by the Key Project of Chinese Ministry of Education(No. 104144), the Foundation of Guangdong Provincial Science and Technology Program(No. 2003A1060201), and the Doctoral Foundation of Institute of Higher Education of China(No. 20040558009)

Received 21 October 2004, revised manuscript received 5 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics