

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1100-04

基于绝缘体上的硅材料的全内反射型 阵列波导光栅器件的设计*

李柏阳¹⁾ 江晓清¹⁾ 唐衍哲¹⁾ 杨建义¹⁾ 王明华¹⁾ 李 铁²⁾ 吴亚明²⁾ 王跃林¹⁾²⁾

(1), 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027

(2), 中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点联合实验室, 上海 200050

摘要: 设计了一种基于绝缘体上的硅材料的全内反射型阵列波导光栅解复用器件。将一全内反射波导镜引入原弯曲的波导阵列中, 该波导镜具有偏振补偿的功能和缩小器件尺寸的特点。在器件数值模拟的基础上, 制作了原理性器件, 并获得了初步的实验结果。

关键词: 密集波分复用; 阵列波导光栅; 全内反射

中图分类号: TN256 文献标识码: A

1 引 言

随着通信技术及业务的飞速发展, 密集波分复用(DWDM)技术目前被认为是解决大容量光纤通信最有效的方法, 因此作为密集波分复用技术的关键器件——波分复用器件的研究是当前集成光学器件研究的热点。波分复用器件是全光通信网络的关键器件, 在光纤通信系统中起着重要作用, 密集波分复用技术复用的路数从 2 路到现今的 32 路、64 路、256 路甚至更高。波分复用器件采用的技术从熔融拉锥到薄膜、光纤光栅、全息光栅、阵列波导光栅(AWG)等技术, 其中阵列波导光栅器件被认为是最有前景的集成光子器件。

目前二氧化硅(SiO₂)材料阵列波导光栅器件研究是近期密集波分复用器件实用化研究的主流^[1,2], 器件发展方向是改善其性能, 降低工艺制作难度和成本, 拓宽制作材料, 如采用绝缘体上的硅(silicon-on-insulator, 缩写为 SOI)^[3]、有机聚合物^[4]材料的阵列波导光栅器件。绝缘体上的硅材料是一种非常实用的材料, 基于绝缘体上的硅的光器件的制作工艺与微电子工艺兼容, 材料成本低, 具有广泛的应用前景。Bookham 公司和 E-tek 公司已合作推出商用绝缘体上的硅—阵列波导光栅器件。采用绝

缘体上的硅材料的阵列波导光栅器件, 其器件基本结构若采用 Smit 提出的典型阵列波导光栅结构^[2], 由于要考虑同光纤的耦合问题, 一般采用大截面光波导结构, 光波导具有弱限制波导特性, 所以波导曲率半径较大, 整个器件尺寸也较大, 如 1×4 的阵列波导光栅器件尺寸一般在 27 mm×27 mm 量级^[3]。我们提出一种基于绝缘体上的硅材料、具有偏振补偿功能、结构紧凑的全内反射型 1×4 阵列波导光栅解复用器件, 本文给出了器件的数值模拟和设计, 以及器件制作的工艺和实验验证。

2 器件设计

考虑到同光纤的耦合效率, 基于绝缘体上的硅材料且具有 SiO₂ 覆盖层的大截面波导如图 1 所示, 脊波导为梯形截面, 底角 $\theta = 54.74^\circ$ ^[5], 为用氢氧化钾对(100)面绝缘体上的硅基片进行各向异性腐蚀所形成的脊波导的实际结构。

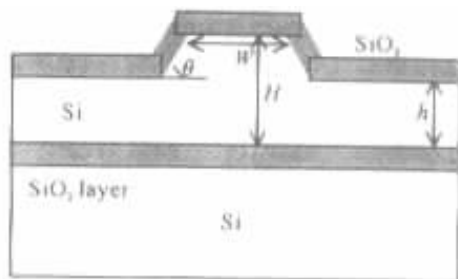


Fig.1 Schematic diagram of the SOI waveguide
根据大截面脊形波导的单模条件^[6,7]

* 国家重点基础研究发展规划(G1999033104)及教育部
高校骨干教师基金资助课题。

E-mail libaiyang@sohu.com

收稿日期 2002-02-05; 收到修改稿日期 2002-03-13

$$\frac{W}{H} \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}}, \quad r = \frac{h}{H} > 0.5, \quad (1)$$

和文献[8]梯形脊波导的有效折射率等效方法,取 $W = 5 \mu\text{m}$, $H = 5 \mu\text{m}$, $h = 3 \mu\text{m}$ 覆盖的 SiO_2 层大于 $0.3 \mu\text{m}$ 。

我们设计的全内反射型结构紧凑的阵列波导光栅器件是在典型的阵列波导光栅结构中,将全内反射波导镜引入原来的弯曲波导阵列中(图2),采用直波导代替原弯曲波导,同时利用全内反射时 TE、TM 模产生的相位变化差不同来补偿由于非对称波导结构传输产生的 TE、TM 模偏振差。典型结构的阵列波导光栅器件设计在 Smit 的文章^[21]中已有充分的论述,这里只针对改进部分的设计进行分析。

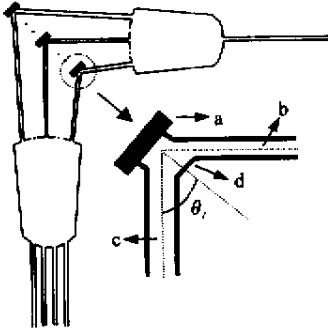


Fig.2 The AWG device and TIR mirror

该设计阵列波导的每一路均由两根对称的直波导(图2中的 b、c)构成,夹角为 $2\theta_i$ (θ_i 即为光波在波导镜处反射时的入射角),最中间一根的 θ_i 为 45° ,而外侧的 θ_i 小于 45° ,内侧的 θ_i 大于 45° ,这样的设计是起到偏振补偿的作用(见后面说明)。图2中标识为 a 的部分为全内反射镜的凹槽部分,d 是补偿光波反射损耗的部分。

图3是阵列波导的几何参量示意图,图中只画出了具有代表性的三根直波导以及全内反射镜面。器件的另一半与图中的部分对称,对称线即为图中的 45° 斜线。 O 点是输入波导和平板波导的交接处,

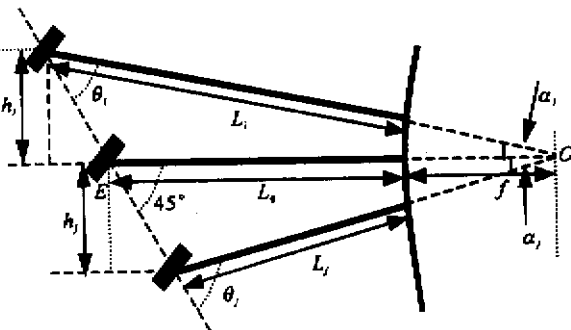


Fig.3 Geometrical parameters of the arrayed waveguides

并且是图中平板波导圆弧的圆心,半径为 f ,最中间的直波导长度为 L_0 。

相邻两路阵列波导的长度差恒定是阵列波导光栅器件设计的基本条件。当外侧的第 i 根直波导(OE 上方)和内侧的第 j 根直波导(OE 下方)分别满足下列关系式:

$$\left. \begin{aligned} L_i &= L_0 + i\Delta L/2, \\ \theta_i + \alpha_i &= 45^\circ, \\ \frac{L_i + f}{\sin 135^\circ} &= \frac{L_0 + f}{\sin \theta_i}, \\ h_i &= (L_i + f)\sin \alpha_i; \\ L_j &= L_0 - j\Delta L/2, \\ \theta_j - \alpha_j &= 45^\circ, \\ \frac{L_j + f}{\sin 45^\circ} &= \frac{L_0 + f}{\sin \theta_j}, \\ h_j &= (L_j + f)\sin \alpha_j; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 ΔL 为相邻两路阵列波导的长度差时,便能满足这一条件。

又因为光波在发生反射时,有电场平行于反射面(反射面与文中的全内反射镜面垂直)和垂直于反射面两种情况,其反射的相位变化分别为

$$\delta_{//} = 2\arctan\left[\frac{n_1^2(\sin^2\theta_i - n_2^2/n_1^2)^{1/2}}{n_2^2 \cos\theta_i}\right], \quad (4)$$

$$\delta_{\perp} = 2\arctan\left[\frac{(\sin^2\theta_i - n_2^2/n_1^2)^{1/2}}{\cos\theta_i}\right], \quad (5)$$

相对波导来看,波导中的 TE 模和 TM 模在全内反射波导镜反射时产生的相位变化分别对应于(4)式和(5)式,即可以表示为 $\delta_{\text{TE}} = \delta_{//}$ 和 $\delta_{\text{TM}} = \delta_{\perp}$ 。(4)式和(5)式中的 n_1 、 n_2 分别指波导(Si)和外包层(SiO_2)的折射率。在满足图1的波导结构和图2的几何结构情况之下,TE、TM 模反射时的相位差 $\Delta\delta = \delta_{\text{TE}} - \delta_{\text{TM}}$ 应该随入射角 θ 线性变化,如图4, $\Delta\delta$ 在 45° 附近的变化率为

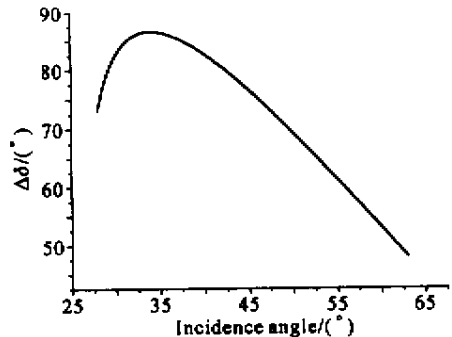


Fig.4 Phase difference of TE and TM modes reflecting at the TIR mirror

$$\gamma = \left. \frac{d(\Delta\delta)}{d\theta} \right|_{\theta=45^\circ} \approx -1.6. \quad (6)$$

因此,TE 模和 TM 模光波经过输入端平板波导、一路阵列波导、输出端平板波导后总的相位变化为

$$\phi_{iTE} = 2\pi \left(\frac{2fn_{TE}}{\lambda} + \frac{2L_i n_{TE}}{\lambda} \right) - \delta_{TE}, \quad (7)$$

$$\phi_{iTM} = 2\pi \left(\frac{2fn_{TM}}{\lambda} + \frac{2L_i n_{TM}}{\lambda} \right) - \delta_{TM}, \quad (8)$$

$2L_i$ 为第 i 根阵列波导的长度, $2L_{i+1} = 2L_i + \Delta L$, ΔL 为相邻阵列波导长度差。 f 为平板波导的长度, λ 为光波在真空中的波长, n_{TE} 和 n_{TM} 分别为 TE 模和 TM 模在平板波导中的有效折射率。根据相邻干涉级干涉原理^[9],若能使 $\phi_{iTE} - \phi_{iTM} = 2\pi k$ (k 为整数)则 TE、TM 模传输产生的偏振差就能得到补偿。

由于引进的全内反射波导镜,既能紧缩器件结构又能起到补偿偏振的效果,同时没有弯曲波导,降低了工艺制作难度,没有弱限制波导弯曲辐射损耗问题。利用(100)面绝缘体上的硅材料各向腐蚀异性特性,单一全内反射波导镜的损耗可降到 0.5 dB 以下^[10]。

3 数值模拟

为了尽可能满足 $\phi_{iTE} - \phi_{iTM} = 2\pi k$,从而实现偏振补偿的功能,我们设计的新型结构的阵列波导光栅器件基本能满足这一要求。在一级近似条件下,(2)式和(3)式中的 L_i 随 i 线性变化,而入射角 θ 也随 i 线性变化。TE、TM 模反射时的相位差在 45° 附近曲线具有较好的线性,所以我们将最中间一根阵列波导的入射角 θ_i 设为 45° ,同时外侧波导的 θ_i 小于 45° ,内侧的 θ_i 大于 45° ,正好具有补偿由于不同波导阵列长度差 TE、TM 模传输产生偏振差的作用。根据(2)式、(3)式和(6)式,在一级近似条件下,该全内反射波导镜产生的相位补偿量为

$$\Delta\phi \approx \frac{\Delta L \gamma}{\lambda(f + L_0)}. \quad (9)$$

图 5 给出补偿前后该结构阵列波导光栅输出的 TE 模和 TM 模光强的数值模拟结果,偏振差从 0.2 nm 减小到 0.04 nm,可见器件的偏振敏感度大大降低。数值模拟中器件的参量为:四路波长为 1550.92 nm,1554.13 nm,1557.36 nm 和 1560.61 nm,阵列波导数为 35 条, $\Delta L = 53.73 \mu\text{m}$,干涉级为 120,相邻阵列波导的入射角 θ_i 之差为 0.5° 左右。

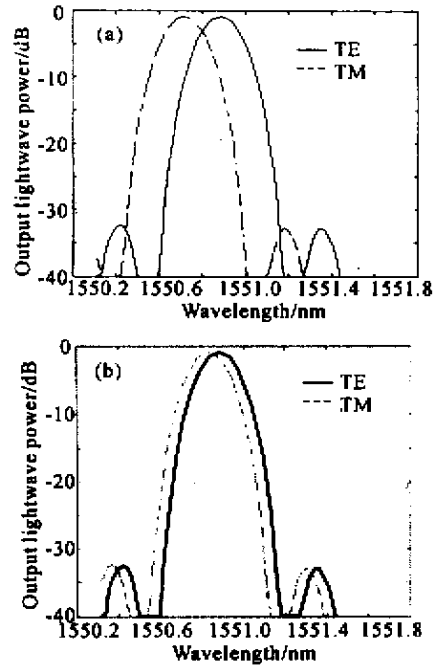


Fig. 5 Simulation results of output lightwave power before and after compensation

4 器件制作和验证

我们采用器件层为 $5 \mu\text{m}$ 厚的绝缘体上的硅材料制作了 1×4 该结构的阵列波导光栅原理性器件,并利用 Si 材料(100)面制作光滑的波导镜面^[10]。波导制作主要工艺如下:先采用 SiO_2 作掩膜,在 50°C 条件下,用 50% 氢氧化钾液相 ($\text{KOH}:\text{H}_2\text{O} = 1:1$) 湿法腐蚀波导镜凹槽约 30 min,然后通过套刻制作波导,再采用 50% 氢氧化钾液相 ($\text{KOH}:\text{H}_2\text{O} = 1:1$) 湿法腐蚀约 20 min。

图 6 是器件局部波导镜和波导的扫描电镜照片,波导镜凹槽约为 $5 \mu\text{m}$,实测波导脊高约 $2.1 \mu\text{m}$ 。由图 6 可见,波导镜及波导的制作效果较好。

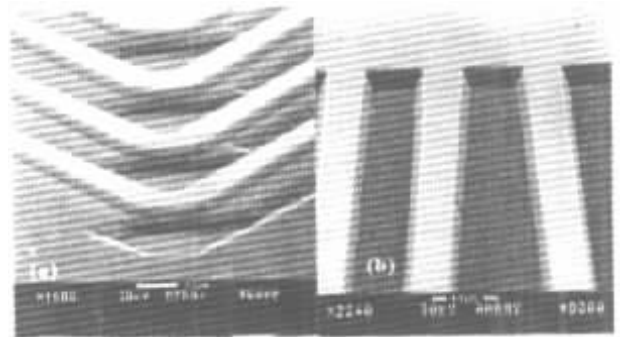


Fig. 6 SEM pictures of TIR mirrors and waveguides

图 7 为使用普通 $1.55 \mu\text{m}$ 宽带光源对 1×4 阵列波导光栅器件的解复用功能进行测试的近场光

斑 初步证明该设计的阵列波导光栅器件可以实现波分功能。

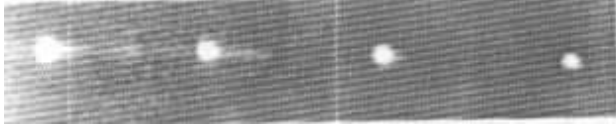


Fig.7 Output of the 1×4 demultiplexer

图 7 左侧的图像模糊是因红外摄像机调焦引起的,测试条件待改进,进一步的实验正在进行。

结论 我们采用绝缘体上的硅材料设计了具有偏振补偿功能的 1×4 全内反射型阵列波导光栅原理性器件,因利用了全内反射波导镜,器件具有结构紧凑、尺寸小等特点,同时由于弯曲波导减少,器件制作难度也相应降低。虽然初步的实验结果不是很好,但验证了该方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] Miya T. Silica-based planar lightwave circuits : Passive and thermally active devices. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.* , 2000 , (1) 38 ~ 45
- [2] Smit M K. Phaser-based WDM-devices : principle , design and applications. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.* , 1996 , (2) 236 ~ 250
- [3] Trinh P D , Yegnanarayanan S , Coppinger F *et al.* . Silicon-on-insulator (SOI) phased-array wavelength multi/demultiplexer with extremely low-polarization sensitivity. *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 1997 , (7) 940 ~ 942
- [4] Keil N , Yao H H , Zawadzki C *et al.* . A thermal all-polymer AWG multiplexer. *Electron. Lett.* , 2001 , (37) 579 ~ 580
- [5] Schmidtchen J , Splett A , Schuppert B *et al.* . Low loss single-mode optical waveguide with large cross-section in silicon-on-insulator. *Electron. Lett.* , 1991 , (27) 1486 ~ 1488
- [6] Soref R A , Schmidtchen J , Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J. Quant. Electron.* , 1991 , (27) 1971 ~ 1974
- [7] Pogossian S P , Vescan L , Vonsobici A. The single-mode condition for semiconductor rib waveguide with large cross section. *J. Lightwave Technology* , 1998 , (16) 1851 ~ 1853
- [8] Yin Rui , Yang Jianyi , Wang Minghua. Analysis of rib waveguide with trapezoidal cross-section. *Acta Optica Sinica* (光学学报) , 2000 , (20) 1494 ~ 1498 (in Chinese)
- [9] Spiekman L H , Amersfoot M R , de Vreede A H *et al.* . Design and realization of polarization independent phased array wavelength demultiplexers using different array orders for TE and TM. *J. Lightwave Technology* , 1996 , (14) 991 ~ 995
- [10] Tang Y Z , Wang W H , Li T *et al.* . Integrated waveguide turning mirror in silicon-on-insulator. *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 2002 , (14) 68 ~ 70

Design of AWG Demultiplexer with TIR Mirrors Based on SOI Material

Li Baiyang¹⁾ Jiang Xiaoqing¹⁾ Tang Yanzhe¹⁾ Yang Jianyi¹⁾
Wang Minghua¹⁾ Li Tie²⁾ Wu Yaming²⁾ Wang Yuelin¹⁾²⁾

(1) , Department of Information and Electronic Engineering , Zhejiang University , Hangzhou 310027)
(2) , State Key Laboratories of Transducer Technology , Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology , the Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200050)

(Received 5 February 2002 ; revised 13 March 2002)

Abstract : An arrayed waveguide grating (AWG) demultiplexer with total internal reflection (TIR) mirrors is designed based on silicon-on-insulator (SOI) material. Fabrication technology is developed based on numerical simulation results of the device. The device has function of polarization compensation and characteristic of compact structure. The primary results show that the AWG can realize function of demultiplexing well.

Key words : dense wavelength division multiplexing ; arrayed waveguide grating ; total internal reflection