

文章编号: 0253-2239(2004)02-203-5

硅基脊型波导器件过渡区损耗及偏振效应*

唐衍哲¹ 王跃林^{1,2} 吴亚明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: 在绝缘层上的硅材料上制作了四种具有不同输入输出结构的星形耦合器并进行了测试,对脊形波导与平板波导相互过渡时过渡区的损耗问题进行了研究和讨论,计算得到在所使用的材料参量下利用锥形结构可以得到 1 dB 左右的最小损耗,这一损耗是由于脊型波导与平板波导间的模式失配造成的。以文献中的实验数据为出发点,分析了脊形波导的偏振问题,并通过对脊型波导器件层厚度、脊高、脊宽进行优化设计,得到了不同偏振模式的有效折射率差仅为 10^{-5} 量级的单模脊型波导结构,这样的偏振效应在器件设计中可以忽略。

关键词: 集成光学; 绝缘层上的硅波导器件; 偏振效应; 过渡损耗

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Transition Loss and Polarization Effect in Planar Lightwave Circuits Based on Silicon-on-Insulator Rib Waveguides

Tang Yanzhe¹ Wang Yuelin^{1,2} Wu Yaming²

(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 23 August 2002; revised 19 February 2003)

Abstract: Four kinds of star couplers with different structures at rib-to-slab and slab-to-rib transition region on silicon-on-insulator are fabricated. The testing results are consistent with the theoretical calculation in which transition loss about 1 dB by using taper waveguides was obtained. The loss is caused by mode mismatching between the rib waveguides and slab waveguides. Polarization effect in SOI rib waveguides is also discussed. Experimental data in the released literature are quoted to validate the analysis method. And the effective index difference which is as low as 10^{-5} order between two polarizations of single mode rib waveguides is obtained by optimal design for the rib waveguide thickness, rib height, rib width. In fact this so little effect can be neglected in practical design.

Key words: integrated optics; optical waveguide devices in silicon-on-insulator (SOI); polarization effect; transition loss

1 引 言

绝缘层上的硅材料(SOI)的晶片制造技术的突

飞猛进推动了其在集成光学中的应用。基于绝缘层上的硅材料的集成光波导器件在制作工艺上与现有的集成电路(IC)工艺相兼容,其高折射率差的波导结构更利于光器件的紧凑性,给多种器件的集成带来便利,并且在混合集成上有着其它材料所不可替代的优势。

在国内外已经发表的文献中,绝缘层上的硅材

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999033104)资助课题。

E-mail: tangyz@mail.sim.ac.cn

收稿日期:2002-08-23; 收到修改稿日期:2003-02-19

料已被应用于多种集成光学器件的制作中,如光功率分配器、光栅器件、波导开关、调制器等等^[1~6],我们实验室也利用绝缘层上的硅材料进行了光功分器,阵列波导光栅(AWG),刻蚀光栅等无源器件的研制工作^[3~5]。与目前应用较多的条形波导相比,绝缘层上的硅脊形波导在单模条件、模场分布、偏振性等方面都有其独特的一面。文献[7,8]对绝缘层上的硅脊形波导的单模条件进行了理论分析和实验验证,但是绝缘层上的硅波导器件设计中遇到的不同波导间的过渡、波导的弯曲及偏振等问题没有文献进行过专门的讨论。而大折射率差绝缘层上的硅脊形波导(图1)的特殊结构使得它在这些方面有独特的性质,不能沿用已有的一些弱折射率差条形波导的分析结果。

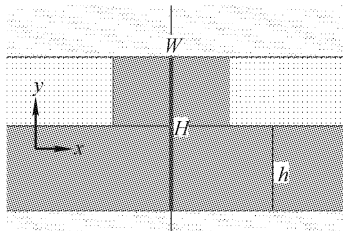


Fig. 1 Cross-sectional profile of SOI rib waveguide

本文从实验出发,对绝缘层上的硅波导器件中波导过渡区损耗,脊形波导的偏振问题两方面内容进行了讨论。通过制作不同过渡结构的星形耦合器,对输出光场进行观察,加以理论分析,给出了通过锥形波导可以得到的过渡区最小损耗情况。脊形波导偏振问题讨论引用了文献[6]中阵列波导光栅的实验结果,对理论计算加以验证,并进行了优化设计得到几乎与偏振无关的单模波导结构。

2 脊形波导与平板波导的过渡损耗

脊形波导与平板波导的过渡损耗是影响星形耦合器性能的最主要的因素。随着器件集成度的提高,用星形耦合器制作大通道的功分器、耦合器被十分看好,同时星形耦合器也是阵列波导光栅器件的核心组成部分,其性能指标将是很多器件成败的关键所在。

2.1 器件的设计、制作和测试

我们设计了四种不同输入输出过渡结构的 1×50 的星形耦合器进行实验,图2为星形耦合器整体结构示意图,图3为星形耦合器输入输出部分详细结构示意图,图3(a)为输入输出单模波导与平板波导间直接耦合,没有锥形过渡区;图3(b)为输入有锥形过渡区

而输出没有;图3(c)为输入无过渡区而输出有锥形过渡区;(d)为输入输出均有锥形过渡区。

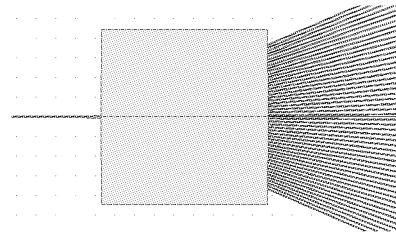


Fig. 2 1×50 star coupler

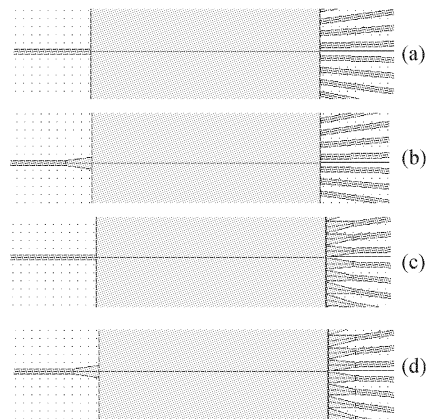


Fig. 3 Four kinds of star coupler in different input and output structure

绝缘层上的硅脊形波导结构:器件层厚度 $H = 4.5 \mu\text{m}$,波导宽度 $W = 5 \mu\text{m}$,刻蚀深度 $H - h = 2 \mu\text{m}$;锥形波导采用线性结构,过渡区长 $1000 \mu\text{m}$,与平板波导相连一端输入锥形波导宽度为 $10 \mu\text{m}$,输出为 $13 \mu\text{m}$;星形耦合器耦合区长度为 $8500 \mu\text{m}$,输出端相邻波导间隔为 $15 \mu\text{m}$ 。

器件结构经光刻由 KOH 溶液湿法腐蚀而成。端面经抛光处理后进行测试。由于星形耦合器输出端口间距没有拉开,不能用光纤阵列(FA)耦合进行定量测量,所以我们对光场近场输出情况进行了定性的观察。 $1.55 \mu\text{m}$ 的红外光场经光纤由输入端耦合进入芯片,用透镜和红外摄影机组合系统观察输出光场。由于同时显示 50 个输出端的光场不利于观察比较,因此我们调整了透镜的放大倍数以便能够清楚地比较出不同结构输出光场的变化情况,图4为四种结构中同样部位六个端口的光场输出情况。

2.2 讨论及分析

1) 通过图4中(a)和(b),(c)和(d)的输出光场比较,中心光场两边的泄漏光没有明显减弱,意味着在脊形波导至平板波导的过渡区,波导展览对输出光场的改善不大。但从理论上来说,脊形波导与平

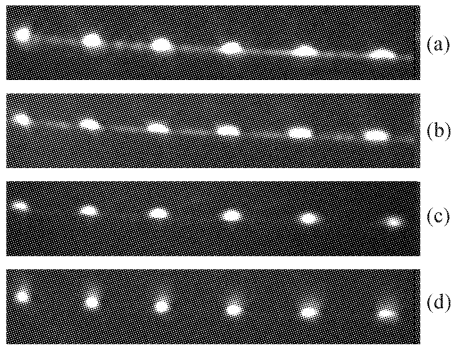


Fig. 4 Output optical field of the corresponding structure 板波导的相互过渡过程中器件层厚度不连续变化以及芯层和包层间的大折射率差($\Delta n \approx 2$),必然会在过渡过程中激发高阶模而引起损耗。我们用三维模式解析器 MODE3D 计算了不同脊宽下脊形波导的

模场分布(E_1)及在该模场的激励下平板波导中的初始场分布(E_2),结果如图 5 所示,通过(1)式的 E_1 和 E_2 的功率交迭积分 I_{POI} :

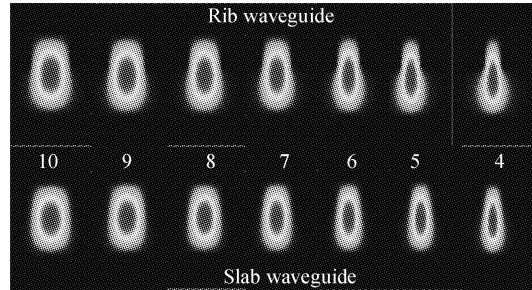


Fig. 5 Mode distribution in rib waveguide and in slab waveguide with the former as excited field in rib width from 4 μm to 10 μm

$$I_{POI} = \frac{\left| \iint_{\text{mesh}} E_1(x, y) * E_2^*(x, y) dx dy \right|^2}{\iint_{\text{mesh}} |E_1(x, y)|^2 dx dy * \iint_{\text{mesh}} |E_2(x, y)|^2 dx dy}, \quad (1)$$

(其中 mesh 为积分范围)计算二者的耦合效率,得到脊形波导向平板波导过度时损耗随脊宽的变化情况(图 6)。由计算结果,无锥形过渡区时损耗在 0.1 dB 以下,随着脊宽的增加, E_1 和 E_2 的分布越相似,过渡损耗可以降到 0.01 dB 以下。由于损耗比较小,所以在实验中难以观察出来。对于制作单纯的功率分配器来说,该过渡区的影响可以忽略不计,但是对光栅这类对相位敏感、串扰要求较高的器件来说,就需要精心的设计来避免平板波导内这些少量的高阶模导致的影响。

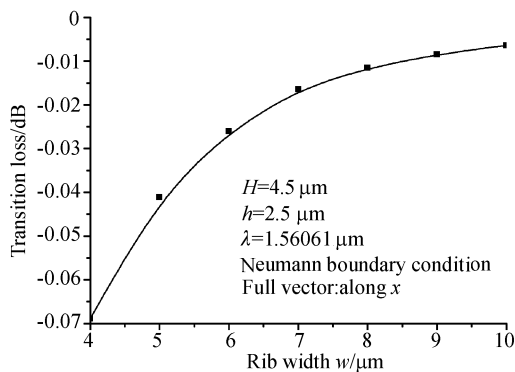


Fig. 6 Transition loss at rib-to-slab point

2) 由图 4 中 (a) 和 (c), (b) 和 (d) 的输出光场比较发现,星形耦合器输出端的锥形过渡区使得输出中心光场两边的泄漏光明显减少,大大改善了性能。

同样,令脊形波导的模场分布为 E_1 , 平板波导光场 E_2 在 x 方向上波导间隔范围内近似为恒值,而 y 方向上满足三层平板波导的基模分布,由(1)式可得不同脊宽下平板波导至脊型波导的过渡损耗(图 7)。由结果可知,单模脊形波导的过渡损耗约为 4~4.5 dB,随波导宽度的增加损耗会大幅度降低;另一方面,当脊形波导的宽度展宽到近于相邻波导间隔的程度时(在工艺上是很难实现的),由于模式的不匹配仍然会有近 1 dB 的损耗。

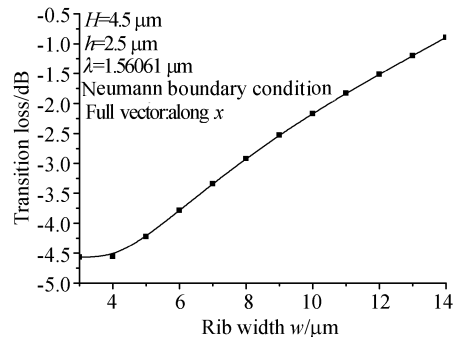


Fig. 7 Transition loss at slab-to-rib point

因此,星形耦合器用于制作大通道数($N > 16$)的功率分配器时,在工艺许可范围内可将片内损耗控制在 2 dB 以内,加上其结构的紧凑性,相对于 1×2 级连的方式实现多通道分光的方法有着绝对的优

势。若要进一步降低损耗,就必须在连接处采用特殊的结构如掺杂、制作垂直锥形过渡区等^[9],但这会使设计和工艺变得复杂,而且在某些器件中虽然损耗得到减小,却可能会恶化其它性能。

3 绝缘层上的硅脊形波导的偏振效应

波导器件的许多重要指标,如偏振相关损耗(PDL),偏振相关中心波长(PDW),偏振相关波长漂移(PDS)等都由波导的偏振效应决定。众所周知,以二氧化硅等为材料条形波导由于应力原因使得波导的偏振效应非常明显,所以在器件制作中必须进行偏振补偿(如半波片,偏振分光器等^[10]),绝缘层上的硅波导中不存在应力问题^[11],偏振效应源于脊形波导截面形状的不对称,但是其偏振效应的强弱,对器件性能的影响程度,则少有文献专门研究过。庆幸的是,Trinh 等^[6]用绝缘层上的硅材料制作的列阵波导光栅器件在没有进行任何偏振补偿的情况下测到了弱偏振效应,偏振相关中心波长的漂移(PDS)、偏振相关损耗(PDL)在各类材料中是最小的。下面我们用文献^[6]中的数据从理论上进行计算,比较实验结果和理论结果,并得出了一系列结论。

文献^[6]中的相关数据为:绝缘层上的硅材料器件层厚度 $H = 5 \mu\text{m}$,阵列波导相邻波导长度差 $\Delta L = 86.7 \mu\text{m}$,衍射级数 $m = 193$,测得在两种刻蚀深度 $H-h = 2 \mu\text{m}, 3 \mu\text{m}$,偏振相关中心波长的漂移分别为 0.04 nm 和 0.02 nm 。图 8 为利用三维模式解析器计算的相应参量下波导不同偏振模式的折射率差及相应的偏振相关中心波长的漂移约为 $\Delta n \cdot \Delta L / m$,横轴为波导的脊宽,左纵轴为折射率差,右纵轴为相应的偏振相关中心波长的漂移。可

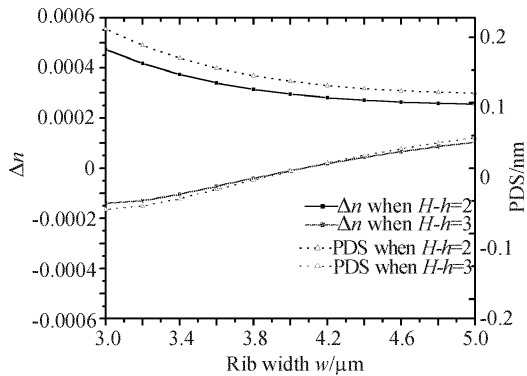


Fig. 8 Results simulated by mode solver 3-D using the structure parameters in ^[6]. Two etching depths are shown in the figure for comparison. PDS : polarization-dependent shift

以看出:

1) 计算结果和实验结果在具体数值上略有差异,但在趋势和效果上吻合得很好。当波导的刻蚀深度变深后,波导的双折射现象明显减弱。数值上的差异源于实验时具体工艺过程、测试过程及环境因素等。

2) 当刻蚀深度为 $3 \mu\text{m}$ 时,零偏振效应的波导结构是存在的,但是该参量的波导不满足单模条件,会导致输出光谱产生歧变。

3) 根据 2) 的结论,我们认为通过优化设计可以得到满足单模条件的零偏振或者偏振效应极弱的波导结构,且在进一步的计算中,得到了预期的结果。表 1 列出了我们设计的一系列波导结构,其中黑体数字部分的波导结构满足单模条件。可以看出虽然没有达到零偏振,但单模波导的偏振相关折射率差仅为 10^{-5} 量级,这样的偏振效应是可以忽略的。

Table 1 Simulation results of the effective refractive index difference between TE mode and TM mode in optimized structures

$W / \mu\text{m}$	$H=8.5, h=4.5$	$H=8, h=4.5$	$H=7.5, h=4$
	Δn_1	Δn_2	Δn_3
3	3.3103×10^4	2.6937×10^4	2.6863×10^4
4	1.7045×10^4	1.6993×10^4	1.6304×10^4
5	8.7890×10^5	9.8670×10^5	8.3590×10^5
6	6.5190×10^5	6.8010×10^5	5.0630×10^5
7	6.2550×10^5	5.8750×10^5	4.2160×10^5
8	6.4950×10^5	5.7020×10^5	4.1710×10^5
9	6.8040×10^5	5.7660×10^5	4.3450×10^5

4) 由上述结论,我们认为绝缘层上的硅波导器件的设计无需额外的偏振补偿措施,在进行器件设计时可以根据材料要求和器件性能要求来进行优化设计,得到满足条件的单模波导结构。

结论 本文对使用不同过渡区结构的星形耦合器进行了实验,观察其输出光场情况,结合理论分析,发现在脊形到平板的过渡区中,由于器件层不连续带来的模失配损耗在 0.1 dB 左右,通过增加脊宽可以把损耗降到极低;在平板到脊形的过渡过程中,单模脊形波导的过渡损耗在 4.5 dB 左右,通过增加脊宽损耗被明显地降低,最低值在 1 dB 左右,更低的损耗值需要通过其它方式(如掺杂或小岛结构)来实现。

本文还就 Trinh 等人的实验结果对脊形波导的偏振情况进行了分析和波导结构的优化设计,得到了不同偏振模式的折射率差仅为 10^{-5} 量级的单模脊形波导,其偏振效应在器件设计中可以忽略。

参 考 文 献

- 1 Zhao Cezhou, Chen Aihua, Liu E K *et al.*. Silicon-on-insulator asymmetric optical switch based on total internal reflection. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(8): 1113~1115
- 2 Ahmad R U, Pizzuto F, Camarda G S *et al.*. Ultracompact corner-mirrors and T-branches in silicon-on-insulator. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1):65~67
- 3 Li Baiyang, Jiang Xiaoqing, Tang Yanzhe *et al.*. Design of AWG demultiplexer with TIR mirrors based on SOI material. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9): 1100~1103 (in Chinese)
- 4 Tang Yanzhe, Wang Wenhui, Li Tie *et al.*. A kind of optical splitter in silicon-on-insulator. *Piezoelectrics and Acoustooptics*(压电与声光), 2001, **23**(5):334~336 (in Chinese)
- 5 Tang Y Z, Wang W H, Li T *et al.*. Integrated waveguide turning mirror in silicon on insulator. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1):68~70
- 6 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, **9**(7):940~942
- 7 Pogossian S P, Vescan L, Vonsovici A. The single-mode condition for semiconductor rib waveguides with large cross section. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(10): 1851~1853
- 8 Rickman A G, Reed G T, Namavar F. Silicon-on-insulator optical rib waveguide loss and mode characteristics. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(10):1771~1776
- 9 Sugita A, Kaneko M A, Okamoto K *et al.*. Very low insertion loss arrayed-waveguide grating with vertically tapered waveguides. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9):1180~1182
- 10 Yasuyuki Inoue, Hiroshi Takahashi, Shinji Ando *et al.*. Elimination of polarization sensitivity in silica-based wavelength division multiplexer using a polyimide half waveplate. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(10):1947~1957
- 11 Jalali B, Yegnanarayanan S, Yoon T *et al.*. Advances in silicon-on-insulator optoelectronics. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 1998, **4**(6):938~947