

# SOI 波长信号分离器的研制

赵策洲\* 李国正 刘恩科 刘西钉 高 勇

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

**摘 要** 根据大截面单模脊形波导理论和双模干涉机制, 在硅片直接键合、背面抛光减薄的 SOI 材料上, 通过氢氧化钾各向异性腐蚀的方法, 成功地研制出 SOI 波长信号分离器, 在波长为  $1.3 \mu\text{m}$  时, 其插入损耗为  $4.81 \text{ dB}$ , 串音小于  $-18.6 \text{ dB}$ 。

**关键词** SOI, 集成光学, 光通讯, 光信号分离器。

全硅光集成技术自 80 年代中期间世以来, 传输损耗小于  $1 \text{ dB/cm}$  数量级以下的大截面 SOI 单模脊形光波导的成功研制<sup>[1~3]</sup>, 使硅光集成迈出了可喜的一步。波长信号分离器是集成光学中重要的无源器件之一。在光纤通讯方面, 波长信号分离器能用于增加光纤的通道容量<sup>[4]</sup>。目前已成功研制出 GaAs<sup>[5]</sup> 和 AlGaInAs/InP<sup>[4]</sup> 介质波长信号分离器。鉴于目前尚未见到有关 SOI 波长信号分离器的报道, 本文简单介绍它的理论, 报道 SOI 平板波导和波长信号分离器的制备工艺, 并给出测试结果。

## 1 理论分析

图 1 给出了波长信号分离器及其单模脊形波导的截面图。

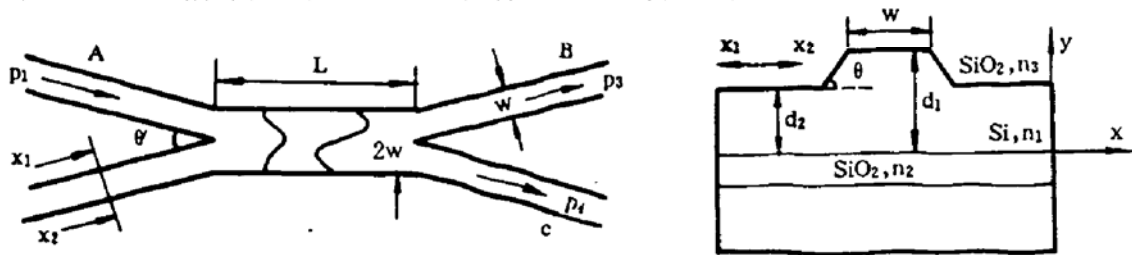


Fig. 1 Schematic structure of SOI wavelength demultiplexer and cross-section  $X_1$ - $X_2$  of single-mode rib waveguides structure

单模 SOI 脊形波导的导波条件为<sup>[3]</sup>

$$W/d_1 \leq 0.3 + r/\sqrt{1-r^2}, \quad r = d_2/d_1 \geq 0.5, \quad W \leq 10 \mu\text{m} \quad (1)$$

对于功率为  $P_1$  的单模激光, 从单模脊形波导 A 入射后, 在双模干涉区入口端激发成传播常数为  $\beta_{00}$  的基模和传播常数为  $\beta_{10}$  的一阶模, 其输出功率分配为:

\* 现工作单位: 西安电子科技大学微电子所, 西安 710071。

收稿日期: 1994 年 9 月 3 日; 收到修改稿日期: 1994 年 10 月 25 日

$$P_3/P_1 = \sin^2(\pi L/2L_c), \quad P_4/P_1 = \cos^2(\pi L/2L_c), \quad (2)$$

$$\text{式中 } L_c \text{ 为耦合长度, 满足 } (\beta_{00} - \beta_{10})L_c = \pi \quad (3)$$

其中  $\beta_{mn}$  由脊宽为  $2W$  的梯形截面脊形波导的本征值方程<sup>[6,7]</sup>确定:

$$\frac{4k_0}{T} [(WT + 1)(n_1^2 - R^2 - \frac{\beta_{mn}^2}{k_0^2})^{1/2} - R \cos^{-1}(\frac{R^2}{n_1^2 - \beta_{mn}^2/k_0^2})] = (2m + 1)\pi \quad (4)$$

$$R = (n + 1)\pi/(s + k_0 d_1), \quad T = k_0 \operatorname{tg} \theta / (s + k_0 d_1)$$

$$S = \begin{cases} (n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} & \text{对 } E_{mn}^x \text{ 模} \\ (n_2^2/n_1^2)(n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_3^2/n_1^2)(n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} & \text{对 } E_{mn}^y \text{ 模} \end{cases}$$

其中  $k_0$  为真空波数,  $m, n = 0, 1, 2, \dots$  分别为  $x$  和  $y$  方向导模阶数。

对于  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  的光波,  $\text{SiO}_2$  的折射率  $n_2 = n_3 = 1.45$ , 硅的折射率  $n_1 = 3.505$ 。因此由上述公式可确定波长信号分离器的尺寸, 如表 1 所列。

Table 1. SOI wavelength demultiplexer structure parameters

$W (\mu\text{m})$	4	4	6	6	6	8	8	8
$d_1 (\mu\text{m})$	6	8	6	8	10	6	8	10
$d_2 (\mu\text{m})$	3	4	4	4	5	5	5	5
$E_{mn}^x L_c (\mu\text{m})$	534.81	685.60	946.45	1103.20	1301.03	1520.69	1679.17	1879.80
$E_{mn}^y L_c (\mu\text{m})$	527.73	676.63	939.33	1093.37	1287.45	1511.72	1669.71	1867.88

## 2 波长信号分离器的制备与测量

波长信号分离器的制备分两个阶段, 第一阶段制备 SOI 平板波导, 其工艺为: 清洗→亲水→衬底片氧化( $\text{SiO}_2$  厚  $400 \sim 500 \text{ nm}$ )→高温键合(氧气份, 温度  $1200^\circ\text{C}$ , 2 h)→减薄(背面精磨至  $20 \mu\text{m}$  后再抛光到所要求的厚度  $d_1$ , 其不平整性为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ , 样片大小为  $7.6 \text{ cm}$ , 该机械减薄工艺是关键, 比目前的有关报道<sup>[8]</sup>要均匀), 从而制备出波导芯厚度为  $d_1$  的平板硅片直接键合 SOI 波导。第二阶段为 SOI 波长信号分离器的制备, 其工艺为: 制掩膜板→氧化→光刻→氢氧化钾各向异性腐蚀(腐蚀掉的硅厚度为  $d_1 - d_2$ , 其成份为  $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O} = 7:3$ )→氧化(使包层也为  $\text{SiO}_2$ )→划片→端面机械抛光, 从而制备出信号分离器。掩膜板上条宽 ( $W$  和  $2W$ ) 及双模干涉区长度  $L$  ( $L = L_c$  和  $L = 2L_c$  两种) 由表 1 确定, 单模脊形波导分支角可取  $\theta' = 3 \sim 4^\circ$ <sup>[4]</sup>, 本工作中, 掩膜版上分支角  $\theta'$  取  $3^\circ$  和  $4^\circ$ , 单模波导长度在  $A$  端为  $2000 \mu\text{m}$ , 在  $B, C$  端大于  $2000 \mu\text{m}$ 。另外掩膜版上还有条宽为  $W$  的单波导。

用波长为  $1.3 \mu\text{m}$  的单模激光对器件进行测试, 其测试系统如图 2 所示。首先对单波导

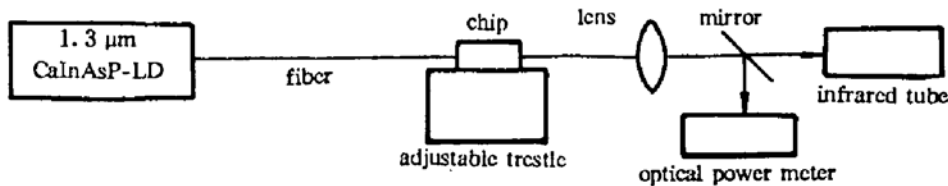


Fig. 2 SOI wavelength demultiplexer measurement system

进行测量, 通过光功率计可计算出单模脊形波导的传输损耗小于  $0.85 \text{ dB/cm}$ 。再对信号分离器进行光斑显示测量, 对于如图 3 所示的分离器, 当输入光从信号分离器的输入端  $A$  输入时, 对于  $L = L_c$  的器件, 只有一个输出端  $B$  有光斑, 如图 4(a)所示; 对于  $L = 2L_c$  的器件, 只

有 C 端有光斑, 如图 4(b) 所示, 因此初步证实了设计的可行性。进一步对  $L = L_c$  的器件进行测试, 测得透镜吸收损耗为 0.83 dB, 光纤与器件的耦合损耗为 0.71 dB, 器件的插入损耗为 4.81 dB, 因此总的损耗为 6.35 dB。通过测量输出端 B 和 C 的光功率  $P_3$  和  $P_4$ , 可以得到波长信号分离器的串音  $10\lg(P_3/P_4)$ , 对于  $L = L_c$  的器件, 测量串音小于  $-18.6$  dB。因此进一步证实了 SOI 波长信号分离器的实用性。

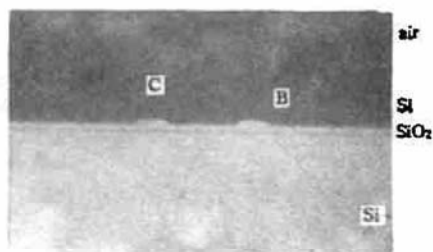


Fig. 3 Photo of cross-section of two output waveguides in the SOI wavelength demultiplexer

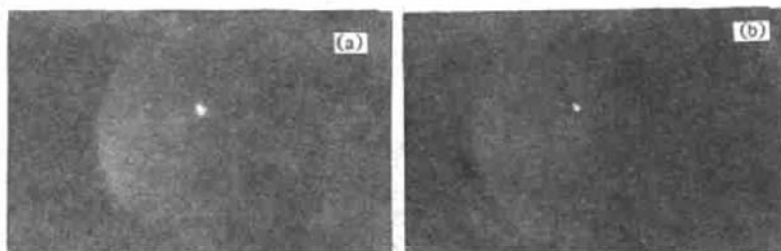


Fig. 4 Photos of output optical mode pattern in the SOI wavelength demultiplexer

(a) output optical mode pattern from B waveguide in the device ( $L = L_c$ ), (b) output optical mode pattern from C waveguide in the device ( $L = 2L_c$ )

### 参 考 文 献

- [1] 赵策洲, 刘恩科, 李国正, SOI 梯形大截面单模脊形波导的研究. 光学学报, 1994, 14(7): 783~783
- [2] R. A. Soref, J. Schmidtchen, K. Petermann, Large single-mode Rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-Si<sub>2</sub>. IEEE J. Quant. Electron., 1991, 27(8): 1971~1974
- [3] J. Schmidtchen, A. Splett, B. Schupper et al., Low loss singlemode optical waveguides with large cross-section in silicon-on-insulator. Electron. Lett., 1991, 27(16): 1486~1487
- [4] C. D. Bernardi, S. Morasca, C. Rigo et al., Wavelength demultiplexer integrated on AlGaInAs/InP for 1.5  $\mu$ m operation. Electron. Lett., 1989, 25(22): 1488~1489
- [5] 冯浩, 李锡华, 王明华等, CaAs 对称定向耦合光开关的研究. 半导体学报, 1993, 14(5): 286~291
- [6] 马春生, 刘式端, 梯形截面介质波导的模吸收损耗. 光学学报, 1992, 12(3): 247~251
- [7] 刘育梁, 刘恩科, 梯形截面硅脊形波导的模式特性及其等离子体色散效应. 光学学报, 1991, 11(8): 727~732
- [8] 李金华, 林成鲁, G. T. Reed et al., 硅键合 SOI 平面光波导探索. 光学学报, 1994, 14(2): 169~172

### Fabrication of SOI Wavelength Demultiplexer

Zhao Cezhou      Li Guozheng      Liu Enke

Liu Xiding      Gau Yong

(Electronic Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 3 September 1994; revised 25 October 1994)

**Abstract** Silicon-on-Insulator (SOI) wavelength demultiplexers are studied by using the large cross-section single-mode rib waveguides conditions and the two-mode interference principle in silicon direct bonding SOI with back-polishing. They are fabricated by using KOH anisotropic etching. Their insertion loss are measured to be down to 4.81 dB at the wavelength of 1.3  $\mu$ m, and crosstalk is less than  $-18.6$  dB at 1.3  $\mu$ m.

**Key words** SOI, integrated optics, optical communications, optical demultiplexers.