

# 基于 SOI 的 $2 \times 2$ MMI 耦合器的设计

董夏叶<sup>1</sup> 李鸿强<sup>1</sup> 陈弘达<sup>2</sup> 李恩邦<sup>1,3</sup> 柳智慧<sup>1</sup> 魏可嘉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387

<sup>2</sup>中国科学院半导体研究所, 北京 100083

<sup>3</sup>悉尼大学光学系统超宽带器件中心, 澳大利亚 新南威尔士州 2006

**摘要** 设计了一种可用于阵列波导光栅(AWG)解调集成微系统的绝缘体上硅(SOI)基  $2 \times 2$  多模干涉(MMI)耦合器,用光束传播法(BPM)对 MMI 耦合器进行了模拟。耦合器输入/输出波导采用倒锥形,多模干涉区尺寸为  $6 \mu\text{m} \times 57 \mu\text{m}$ 。在 TE 偏振中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时,器件附加损耗为 0.46 dB,不均匀性为 0.06 dB。在  $1.49 \sim 1.59 \mu\text{m}$  波长范围内耦合器的附加损耗小于 1.55 dB。仿真结果表明所设计的  $2 \times 2$  MMI 耦合器体积小、附加损耗低、波长响应范围宽、分光均匀,符合片上集成系统的要求。

**关键词** 光学器件;多模干涉;耦合器;绝缘体上硅;损耗

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.090602

## Design of a $2 \times 2$ MMI Coupler Based on SOI

Dong Xiaye<sup>1</sup> Li Hongqiang<sup>1</sup> Chen Hongda<sup>2</sup> Li Enbang<sup>1,3</sup>

Liu Zhihui<sup>1</sup> Wei Kejia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

<sup>2</sup>Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

<sup>3</sup>Centre for Ultrahigh Bandwidth Devices for Optical Systems, The University of Sydney, New South Wales 2006, Australia

**Abstract** We design the  $2 \times 2$  multimode interference (MMI) coupler based on silicon-on-insulator (SOI), which can be used in the array waveguide grating (AWG) demodulation integration microsystem. The coupler is simulated using the beam propagation method (BPM). Taper waveguides are used as input/output waveguides. The footprint of the MMI regions is only  $6 \mu\text{m} \times 57 \mu\text{m}$ . The excess loss is 0.46 dB and the uniformity is 0.06 dB with TE polarization when the center wavelength is  $1.55 \mu\text{m}$ . The maximum excess loss is 1.55 dB in the range of  $1.49 \sim 1.59 \mu\text{m}$ . The simulation results show that the  $2 \times 2$  MMI coupler with small size exhibits low excess loss, wide bandwidth and good uniformity, which can meet the requirement of system on chip.

**Key words** optical devices; multimode interference; coupler; silicon-on-insulator; loss

**OCIS codes** 060.1810; 060.2350; 060.2370

## 1 引言

近年来,绝缘体上硅(SOI)基光学器件已成为研究热点之一。SOI 材料的芯层(Si)和覆层( $\text{SiO}_2$ )存在巨大的折射率差,因此 SOI 基光学器件损耗低、尺寸小<sup>[1,2]</sup>。同时,SOI 基光学器件与标准的 CMOS 工艺兼容,便于光电集成。

收稿日期: 2012-05-18; 收到修改稿日期: 2012-06-11; 网络出版日期: 2012-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(61177078,60877049)和高等学校博士学科点专项科研基金(20101201120001)资助课题。

作者简介: 董夏叶(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感解调、光电子集成等方面的研究。

E-mail: xiayedong0728.com@163.com

导师简介: 李鸿强(1975—),男,博士,副教授,主要从事光纤光栅传感解调、光电子集成等方面的研究。

E-mail: lihongqiang@tjpu.edu.cn(通信联系人)

相对于传统的光耦合器而言,多模干涉(MMI)耦合器具有器件结构紧凑、制作工艺简单、工艺参数容差好、损耗低、偏振不敏感、体积小以及便于集成制造等优点<sup>[3]</sup>。随着集成光学的快速发展,MMI耦合器得到了越来越广泛的应用,如马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪、光开关、相位多变网络、调制器、多信道上下载光复用器、均衡与相关探测器、环形激光器、相干光横向滤波器等<sup>[4~6]</sup>。

2006年,Solehmainen等<sup>[7]</sup>制作了基于SOI的 $2 \times 2$  MMI耦合器,其多模干涉区尺寸为 $30.5 \mu\text{m} \times 1394.0 \mu\text{m}$ ,附加损耗为0.5 dB,波长响应范围为 $1.51 \sim 1.57 \mu\text{m}$ ;Xu等<sup>[8]</sup>制作了同类型的用于环形振荡器的多模干涉区尺寸为 $5 \mu\text{m} \times 54 \mu\text{m}$  MMI耦合器。2007年,Tseng等<sup>[9]</sup>制作了多模干涉区尺寸为 $24 \mu\text{m} \times 1080 \mu\text{m}$ ,波长响应范围为 $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的同类型的耦合器。

本文设计了可用于阵列波导光栅(AWG)解调集成微系统的 $2 \times 2$  MMI耦合器,用光束传播法(BPM)对其进行了软件模拟仿真,研究了多模波导宽度对耦合器性能的影响<sup>[10,11]</sup>,并对其输入/输出波导进行了优化设计<sup>[12]</sup>,测量了其波长响应范围。

## 2 AWG解调微系统简介

AWG解调微系统的解调原理如图1所示。宽带光源(BBS)经过光隔离器后从端口1进入光耦合器C1,再经端口2进入光纤布拉格光栅(FBG)阵列,满足条件的光由FBG阵列反射回来,其他光透射出去。反射回来的光经耦合器从端口3进入AWG,以实现光的复用-解复用。AWG各输出通道的光经过光电探测器(PD)阵列转换为电信号,所得电信号经过放大和模/数(A/D)转换后由信号处理单元进行处理,最后计算出各传感光栅的反射中心波长。

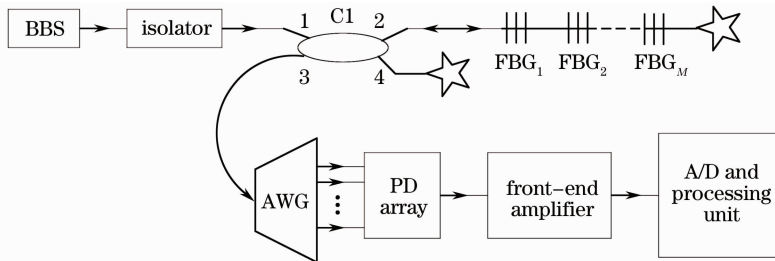


图1 AWG解调微系统框图

Fig. 1 AWG demodulation integration microsystem

此系统所需的耦合器必须是 $2 \times 2$ 的,且要求AWG输入端接收到的光功率尽量大。影响AWG输入端光功率的因素主要有附加损耗和分光比。设端口1输入的光功率为 $P_1$ ,分光比为 $R = x : y (1 : 99 \leq x : y \leq 50 : 50)$ ,附加损耗为 $z$ ,则最终从端口3输出的光功率 $P_2$ 为

$$P_2 = \frac{xy}{(x+y)^2} \cdot P_1 \cdot 10^{-0.2z}. \quad (1)$$

求偏导数,并令

$$\frac{\partial P_2}{\partial x} = \frac{y(y-x)}{(x+y)^3} P_1 \cdot 10^{-0.2z} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial y} = \frac{x(x-y)}{(x+y)^3} P_1 \cdot 10^{-0.2z} = 0, \quad (3)$$

得 $x = y$ 。因此,当 $x = y$ 时, $P_2$ 最大。为使从端口3输出的光功率最大,就要使耦合器的分光比尽量接近 $50 : 50 (1 : 1)$ 。

传统的方向(X型)耦合器、双模干涉(TMI)耦合器及 $2 \times 2$ 的MMI耦合器均可满足本系统要求。X型耦合器对波长的依赖性较大,要求精确控制耦合区的波导长度、宽度和波导间隙,且器件尺寸较大。TMI耦合器体积较小,可作为X型耦合的替代物<sup>[6]</sup>,但它同样具有对波长依赖性较大、偏振敏感等缺陷。而MMI耦合器对偏振不敏感,工作带宽可达几百纳米,器件体积小,制作容差好,器件损耗小,故本设计采用了 $2 \times 2$ 的MMI耦合器。

### 3 MMI 耦合器原理

自映像效应<sup>[13,14]</sup>是 MMI 耦合器的理论基础。自映像效应是指输入光场在多模波导中沿传播方向周期性地复制出单像或者多像。它是多模波导中被激励的多个模式相长干涉的结果。MMI 耦合器有 3 种干涉机制:普通干涉(GI,  $N \times N$ ), 配对干涉(PI,  $2 \times N$ ), 对称干涉(SI,  $1 \times N$ )。普通干涉对输入场的位置没有限制, 激发模是任意的, 是一般性干涉。配对干涉和对称干涉统称为限制性干涉, 多模波导内只有部分模被激发, 模相位因子的长度周期减少, 因而限制性干涉下器件的尺寸较小。

本设计所采用的是配对干涉, 其原理如图 2 所示。

输入波导设置在  $\pm \omega_e/6$  处,  $\omega_e$  为多模波导的有效宽度:

$$\omega_e = \omega + \frac{\lambda_0}{\pi} \left( \frac{n_c}{n_r} \right)^{2\sigma} (n_r^2 - n_c^2)^{-1/2}, \quad (4)$$

式中  $\omega$  为多模波导宽度;  $\lambda_0$  为自由空间波长;  $\sigma$  为模式极化因子, 对于 TE 模  $\sigma = 0$ , 对于 TM 模  $\sigma = 1$ ,  $n_c$  为侧向限制层的有效折射率;  $n_r$  为多模波导区的有效折射率。在高折射率差波导中,  $\omega_e \approx \omega$ 。

设多模波导中导模个数为  $m$ , 阶数分别为  $\nu = 0, 1, 2, \dots, m-1$ , 则  $\beta_\nu$  为第  $\nu$  阶模的传播常数, 根据波导色散方程可得:

$$k_{y\nu}^2 + \beta_\nu^2 = k_0^2 n_r^2, \quad (5)$$

式中  $k_{y\nu}$  为多模波导中第  $\nu$  阶模的横向波数:

$$k_{y\nu} = \frac{(\nu+1)\pi}{\omega_e}, \quad (6)$$

$k_0$  为真空中波矢, 可表示为

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad (7)$$

考虑到  $k_{y\nu}^2 \ll k_0^2 n_r^2$ , 对(5)式进行二项式展开, 将(6)、(7)式带入其中, 进而得到:

$$\beta_\nu = (k_0^2 n_r^2 - k_{y\nu}^2)^{1/2} \approx k_0 n_r - \frac{k_{y\nu}^2}{2k_0 n_r} = k_0 n_r - \frac{(\nu+1)^2 \pi \lambda_0}{4n_r \omega_e^2}. \quad (8)$$

配对干涉中  $N$  镜像出现的第一个位置为  $L_\pi/N$ , 其中  $N$  为正整数,  $L_\pi$  为最低阶导模  $\nu = 0, 1$  的拍长:

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4n_r \omega_e^2}{3\lambda_0}. \quad (9)$$

因此,  $2 \times 2$  MMI 耦合器多模干涉区长度为

$$L_{\text{MMI}} = \frac{L_\pi}{2} \approx \frac{2n_r \omega_e^2}{3\lambda_0}, \quad (10)$$

## 4 $2 \times 2$ MMI 耦合器的设计

### 4.1 材料的选择

设计所选取的材料为 SOI, 其结构为典型的“三明治”结构: 底层(衬底)材料为 Si, 中间层材料为  $\text{SiO}_2$ , 顶层(器件层)材料为 Si。SOI 光波导的芯层(Si, 折射率  $n_1 = 3.46$ )和覆层( $\text{SiO}_2$ , 折射率  $n_2 = 1.45$ )存在巨大的折射率差:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\% = 58.1\%. \quad (11)$$

这使得光在波导中的传输效率大大增加, 传输损耗减少, 多模波导中成像更加清晰。 $\text{SiO}_2$  的折射率与空气相近, 即使器件表面没有覆盖层, 仍具有较好的对称环境, 很大程度上简化了器件的制造工艺。Si 和  $\text{SiO}_2$  在光通信窗口 1310 nm 和 1550 nm 都是透明的, 这种特殊的结构使 SOI 材料具有独特的光学性能。

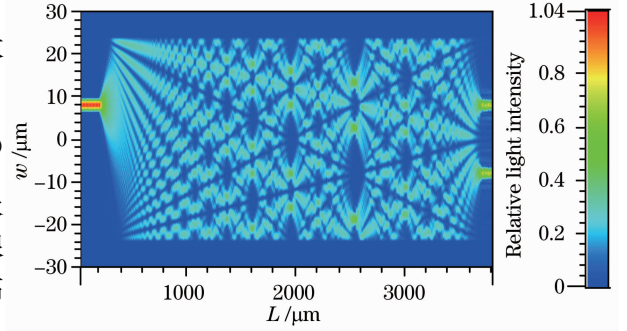


图 2 配对干涉原理图

Fig. 2 Principle of paired interface

SOI 基光学器件已成为硅基光电子集成技术的重要趋势之一。图 3 为 SOI 基  $2 \times 2$  MMI 耦合器的示意图。

#### 4.2 多模波导宽度的选择及最佳映像点的选取

采用 BPM 对  $2 \times 2$  的 MMI 耦合器进行了模拟。多模波导宽度  $w$  越大, 可被激发的模式数目就越多, 映像点就越清晰, 但同时器件的尺寸会越大。因此, 设计中从  $w = 48 \mu\text{m}$  开始, 逐步缩小多模波导的尺寸, 以寻求器件尺寸较小、性能良好的  $2 \times 2$  MMI 耦合器。图 4 为插入损耗、附加损耗、分光比随多模波导宽度变化的关系曲线图。由图 4 可知, 随着  $w$  的减小, 耦合器的插入损耗和附加损耗有所增加。在  $6 \mu\text{m} \leq w \leq 48 \mu\text{m}$  时, 这种变化不明显, 当  $w$  从  $6 \mu\text{m}$  减小到  $3 \mu\text{m}$  时, 损耗明显增大, 器件均匀性差, 而且映像点模糊不清, 器件长度明显比理论值大。

在对不同  $w$  的 MMI 耦合器进行仿真后, 兼顾器件体积和损耗要求, 最终取  $w = 6 \mu\text{m}$ 。将数据代入(4)、(10)式, 求得: 在 TE 偏振模式下,  $L_{\text{MMI}} \approx 56.41 \mu\text{m}$ , 在 TM 偏振模式下,  $L_{\text{MMI}} \approx 54.07 \mu\text{m}$ 。

在仿真过程中对映像点进行观察分析, 寻求最佳映像点, 使分光更均匀, 附加损耗更低。最终取  $L_{\text{MMI}} = 57 \mu\text{m}$ 。图 5 为最初仿真所得的光场和光强分布图。

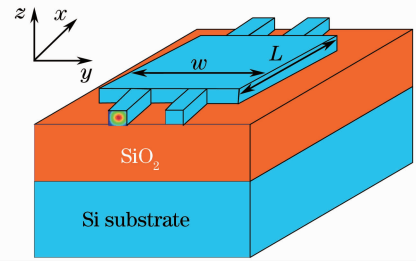


图 3 SOI 基  $2 \times 2$  MMI 耦合器示意图

Fig. 3 Schematic illustration of  $2 \times 2$  SOI MMI coupler

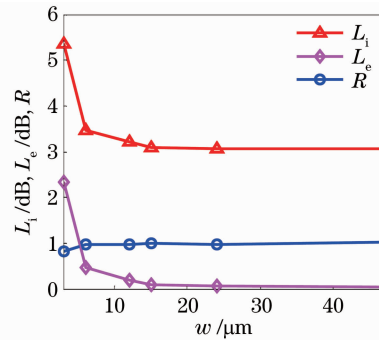


图 4 插入损耗  $L_i$ , 附加损耗  $L_e$  及分光比  $R$  与  $w$  的关系

Fig. 4 Insert loss  $L_i$ , excess loss  $L_e$  and splitting ratio  $R$  versus  $w$

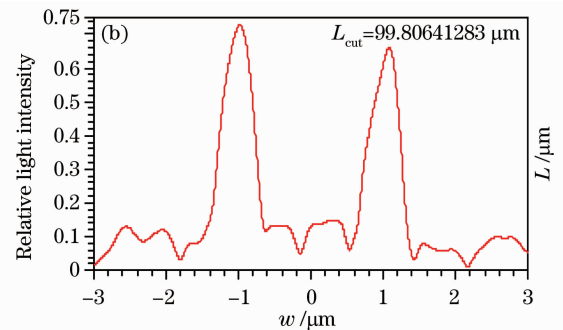
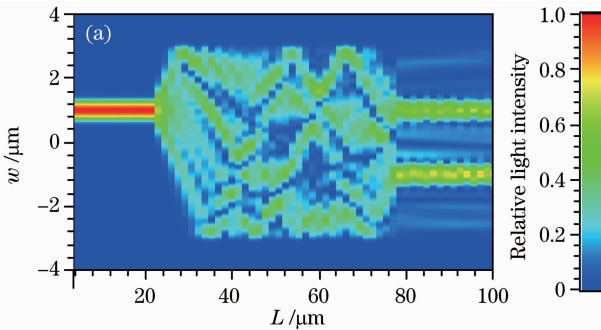


图 5 输入/输出波导为直波导,  $w = 6 \mu\text{m}$  时的光场分布图(a)和光强分布图(b)

Fig. 5 (a) Optical field and (b) output power of the MMI coupler with a linear input/output waveguide when  $w = 6 \mu\text{m}$

#### 4.3 输入/输出波导的优化设计

输入/输出波导采用倒锥形结构, 可使映像点更清晰, 减小器件的附加损耗, 改善分光比。图 6 为优化后

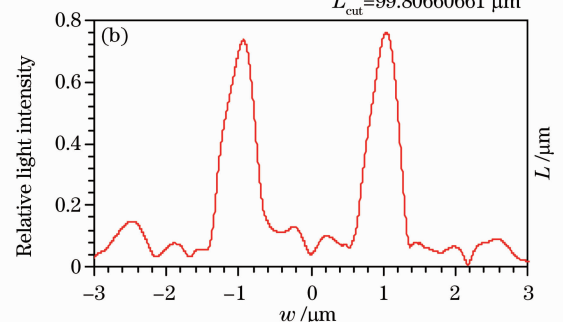
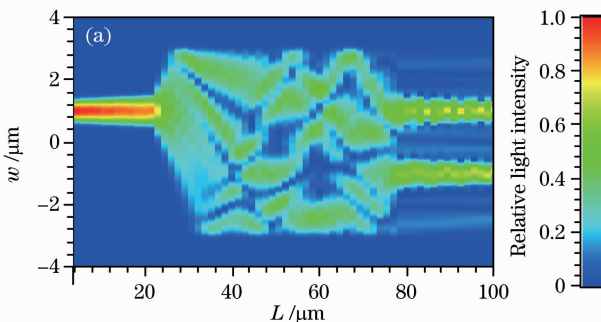


图 6 输入/输出波导为锥形波导,  $w = 6 \mu\text{m}$  时的光场分布图(a)和光强分布图(b)

Fig. 6 (a) Optical field and (b) output power of the MMI coupler with a taper input/output waveguide when  $w = 6 \mu\text{m}$

输出端的光场和光强分布图。优化前,耦合器的附加损耗为 1.09 dB,分光比为 0.903(47.4:52.6);优化后,耦合器的附加损耗为 0.46 dB,分光比为 1.013(50.3:49.7)。改善后的耦合器附加损耗明显减少,分光比得到了明显的改善。

#### 4.4 耦合器偏振特性的分析

由(4)式可知,对于弱限制性波导, $n_c/n_r \approx 1$ ,在 TE 和 TM 偏振模式下,所得的  $L_{\text{MMI}}$  大致相同,因此 MMI 耦合器的偏振特性良好;而对于强限制性波导,如  $n_c = 1.45, n_r = 3.46, n_c/n_r = 0.419$ ,在 2 种不同的偏振模式下所求得的  $L_{\text{MMI}}$  有较明显的差异,且  $\omega$  越小差异越明显,因此,器件的偏振特性相对较差。图 7 为  $\omega = 15 \mu\text{m}$  和  $\omega = 6 \mu\text{m}$  时 TM 偏振模式下的光场和光强分布图。由图可知,前者的偏振特性优于后者。

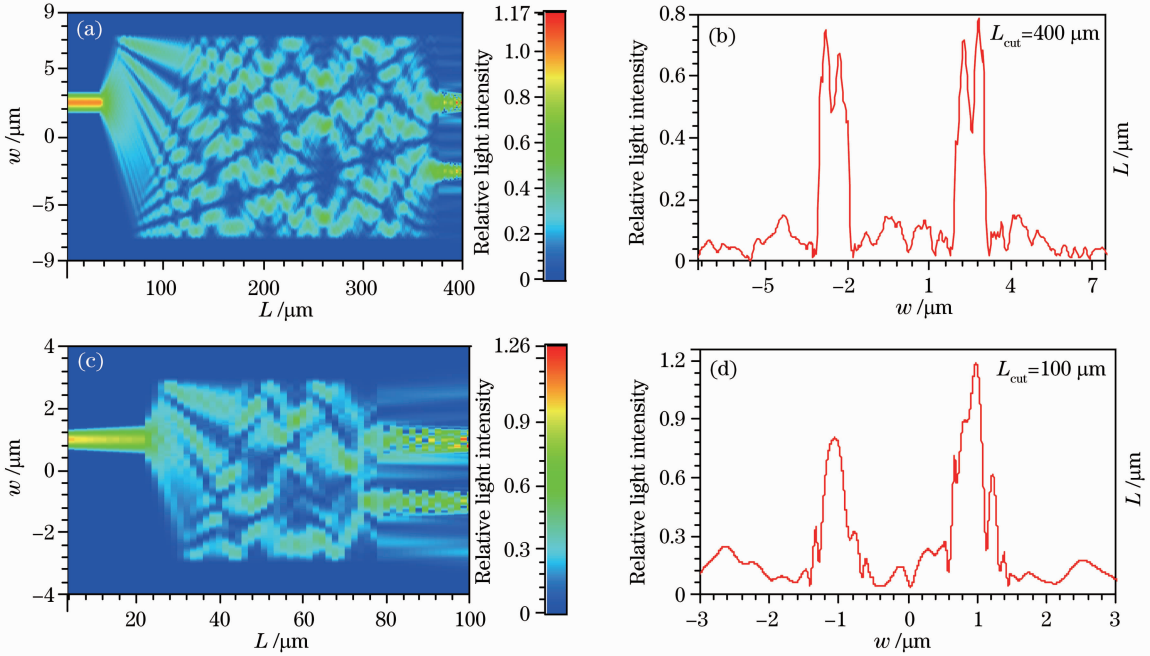


图 7 (a)  $w = 15 \mu\text{m}$  时 TM 偏振模式下的光场分布图; (b)  $w = 15 \mu\text{m}$  时 TM 偏振模式下的光强分布图; (c)  $w = 6 \mu\text{m}$  时 TM 偏振模式下的光场分布图; (d)  $w = 6 \mu\text{m}$  时 TM 偏振模式下的光强分布图

Fig. 7 (a) Optical field and (b) output power in TM mode of the MMI coupler when  $w = 15 \mu\text{m}$ ; (c) optical field and (d) output power in TM mode of the MMI coupler when  $w = 6 \mu\text{m}$

#### 4.5 $2 \times 2$ MMI 耦合器的波长响应

改变入射光的中心波长  $\lambda$ , 观察耦合器的输出特性。图 8 为插入损耗、附加损耗、分光比随中心波长变化的关系曲线图。由图可知,在  $1.49 \sim 1.59 \mu\text{m}$  波长范围内耦合器的附加损耗小于 1.55 dB。仿真结果表明本文所设计的耦合器具有较宽的波长响应范围。

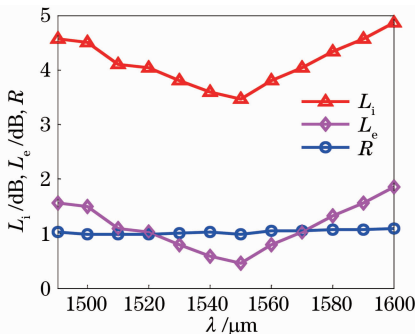


图 8 插入损耗  $L_i$ , 附加损耗  $L_e$  及分光比  $R$  与  $\lambda$  的关系

Fig. 8 Insert loss  $L_i$ , excess loss  $L_e$  and splitting ratio  $R$  versus  $\lambda$

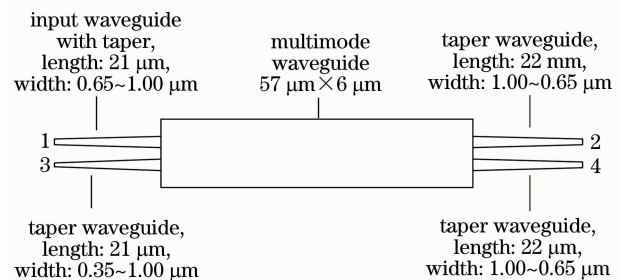


图 9  $2 \times 2$  MMI 耦合器的版图 ( $w = 6 \mu\text{m}$ )

Fig. 9 Layout of  $2 \times 2$  MMI coupler ( $w = 6 \mu\text{m}$ )

#### 4.6 耦合器版图

图9为最终设计的MMI耦合器的版图。为使损耗降至最低,输入/输出波导与多模波导相连的一端宽度均设为 $1.00\ \mu\text{m}$ 。1,2,4号锥形波导末端宽度设为 $0.65\ \mu\text{m}$ 。为了便于和AWG连接,3号锥形波导末端宽度设置为 $0.35\ \mu\text{m}$ 。器件具体尺寸如图9所示。

### 5 耦合器与外围器件的连接

耦合器的4个端口分别接光源、FBG阵列、AWG和匹配液(IMG)。在进行系统测试时,耦合器与光源、FBG阵列及匹配液的需要以单模光纤(SMF)为中介。

光波导与光纤耦合时,由于截面面积及折射率的差异,不可避免地会产生模式失配损耗。当波导与光纤尺寸差异较大时,光经波导进入光纤时会激发高阶模。因此,波导与光纤直接耦合时模场失配严重,耦合效率低,损耗大。在光波导与光纤之间加入模斑转换器(SSC)后,可抑制高阶模,减少耦合损耗,实现从光纤模式到波导模式的转换。耦合器各端口的连接示意图如图10所示。

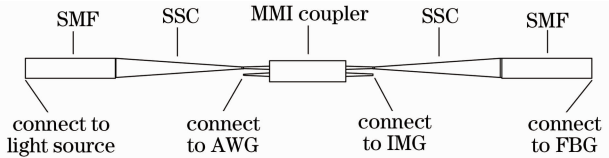


图10 耦合器与模斑转换器的连接

Fig. 10 Connection of MMI coupler and SSC

### 6 结 论

设计了一种用于AWG解调集成微系统的SOI基 $2\times 2$  MMI耦合器,用BPM对器件进行了仿真模拟,根据多模波导自映像理论,寻求最佳映像点,并对输入/输出波导进行了优化设计。最终设计的耦合器多模波导尺寸为 $6\ \mu\text{m}\times 57\ \mu\text{m}$ ,器件总长度为 $100\ \mu\text{m}$ 。对耦合器进行优化设计后,附加损耗可降低至 $0.46\ \text{dB}$ ,不均匀性降低至 $0.06\ \text{dB}$ ,在 $1490\sim 1590\ \text{nm}$ 波长范围内器件性能良好。

### 参 考 文 献

- Liu Jun, Yuan Xiaodong, Luo Zhang *et al.*. Loss measurement of small-size silicon-on-insulator ridge waveguide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 021301  
刘 军, 袁晓东, 罗 章 等. 小尺寸硅绝缘体光波导损耗测量[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(2): 021301
- Wang Jianwei, Dai Daoxin, Shi Yaocheng *et al.*. Design of compact TE/TM polarization beam splitter based on silicon-on-insulator ridge nanowire directional coupler[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051301  
王剑威, 戴道锌, 时尧成 等. 基于绝缘体上硅脊型纳米线光波导方向耦合器的TE/TM偏振分束器[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(5): 051301
- Le Zichun, Huang Sungang, Hu Jinhua *et al.*. General self-imaging properties for line-tapered multimode interference couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0611003  
乐孜纯, 黄孙港, 胡劲华 等. 锥形多模干涉耦合器一般成像特性分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0611003
- Ye Xinwei, Ma Weidong, Huang Xiaodong *et al.*. Design and simulation of a  $4\times 4$  InP-based MMI combiner[J]. *Study on Optical Communications*, 2011, **37**(5): 25~27  
叶新威, 马卫东, 黄晓东 等. InP基 $4\times 4$  MMI合波器的设计与仿真[J]. 光通信研究, 2011, **37**(5): 25~27
- Liu Yexin, Chen Xiaowen, Xing Xiaobo *et al.*. Multimode interference  $1\times 3$  splitter incorporated with functions of electroabsorption modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1406~1410  
刘叶新, 陈晓文, 邢晓波 等. 具有调制功能的多模干涉型 $1\times 3$ 分束器[J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1406~1410
- L.-B. Soldano, F.-B. Veerman, M.-K. Smit *et al.*. Planar monomode optical couplers based on multimode interference effects[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(12): 1883~1890
- K. Solehmainen, M. Kapulainen, M. Harjanne *et al.*. Adiabatic and multimode interference couplers on silicon-on-insulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2287~2289
- D. Xu, S. Janz, P. Cheben. Design of polarization-insensitive ring resonators in silicon-on-insulator using MMI couplers and cladding stress engineering[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(2): 343~345
- S. Y. Tseng, C. F. Hernandez, D. Owens *et al.*. Variable splitting ratio  $2\times 2$  MMI couplers using multimode waveguide holograms[J]. *Opt. Express*, 2007, **14**(15): 9015~9021

- 10 Wang Qiming. State of the art and future prospect in development of optoelectronic devices applied in optical communication network[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2002, (2): 89~94  
王启明. 支撑光网络发展的光电子器件研发现状与趋势[J]. 中国科学院院刊, 2002, (2): 89~94
- 11 M.-T. Hill, X.-J.-M. Leijtens, G. D. Khoe *et al.*. Optimizing imbalance and loss in  $2 \times 2$  3-dB multimode interference couplers via access waveguide width[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2305~2313
- 12 P.-A. Besse, E. Gini, M. Bachmann *et al.*. New  $2 \times 2$  and  $1 \times 3$  multimode interference couplers with free selection of power splitting ratios[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(10): 2286~2293
- 13 J. Leuthold, C.-H. Joyner. Multimode interference couplers with tunable power splitting ratios [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(5): 700~706
- 14 Gao Renxi, Fan Guanghua, Chen Baoxue *et al.*. Design and simulation of microfluidic chips based on multimode interference waveguide for measuring refractive index of liquid[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1180~1183  
高仁喜, 范光华, 陈抱雪 等. 多模干涉光波导型微流控液体折射率监测用芯片的设计[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1180~1183