

# 采用楔形连接波导和自对准反射镜的 $8 \times 8$ 阻塞型热光开关\*

李智勇<sup>†</sup> 李运涛 刘敬伟 陈少武 余金中

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 通过改进热光开关单元和全内反射镜, 设计并制作了基于 SOI 材料的  $8 \times 8$  阻塞型热光开关矩阵. 开关设计中, 在单模波导和多模干涉耦合器之间引入楔形连接波导并进行优化, 增大单模波导与多模波导之间的耦合效率, 减小开关单元的损耗. 此外, 采用自对准方法提高了全内反射镜的光刻容差. 开关矩阵各端口的平均插入损耗约为 21dB, 单个反射镜引起的附加损耗约为 1.4dB, 串扰少于 -21dB. 实验结果说明新设计改善了开关器件的整体特性, 与理论分析一致.

**关键词:** 热光开关; SOI; 楔形波导; 全内反射镜; 自对准

**EEACC:** 4270; 4330B; 6260M

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0516-04

## 1 引言

大规模光开关矩阵在光交叉连接(OXC)和光分插复用(OADM)等光通信领域有重要的应用. 基于绝缘体上硅(SOI)材料的低功耗、快响应光波导开关已有报道<sup>[1~3]</sup>, 但开关阵列一直受限于 S 形弯曲波导(S-bend)而难以大规模扩展. 原因之一是器件设计须选取较大半径的弯曲波导以避免弯曲损耗, 使得波导间交叉角很小而器件长度大大增加, 传输损耗和端口串扰均较大. 此外, 采用 S-bend 连接光开关单元的阵列呈细条形, 长度可达几个厘米, 不利于实现光子集成.

为改善器件性能, 我们在设计中采用全内反射镜(TIR)代替传统的 S-bend, 用于连接开关阵列中各级单元, 如图 1(b)所示, 开关光路反复折叠. 开关芯片的长宽比成倍缩减而光路总长度并未增大, 且波导交叉角几乎都是  $90^\circ$ , 因此由交叉引起的光路串扰近似为零. 根据该设计思路, 我们采用湿法刻蚀工艺在 SOI 材料上制作了  $4 \times 4$  折叠式热光开关阵列, 但器件附加损耗高达 12dB, 各开关单元(SE)平均附加损耗大于 2.5dB; 而且, 反射镜位置精度严重依赖于光刻的套刻精度, 位置容差通常小于  $2\mu\text{m}$ .

报道了经过设计改进后的  $8 \times 8$  阻塞型 SOI 波导热光开关, 在多模干涉(MMI)耦合器与人出射单

模波导之间引入楔形连接波导, 以提高波导过渡界面处的耦合效率, 并采用自对准方法控制反射镜位置. 实际器件的测量结果显示, 开关端口的平均插入损耗大约 21dB, 反射镜引起的附加损耗约 1.4dB, 各端口串扰小于 -21dB.

## 2 设计与优化

阻塞型阵列结构具有交叉点数少、拓扑结构简单、易于扩展为重排无阻塞或完全无阻塞型阵列等优点<sup>[4]</sup>, 因此具有重要的研究和应用价值. 文中的热光开关即采用阻塞型结构, 如图 1(a)和(b)所示. 图 1(c)是  $2 \times 2$  开关单元的示意图, 其中包括 MMI 分束合束器、热光调制臂(Heater)、隔离槽(Groove)和挡光槽等. 由于单晶硅的热光系数较大, 所以相位调制过程通过加热调制臂, 利用热光效应改变单模波导的有效折射率以产生相位差, 并利用马赫-曾德干涉仪(MZI)实现干涉输出.

在我们以前报道的开关阵列中, 单模波导和多模波导之间没有考虑楔形连接波导. 由于不同波导的本征模场分布不同, 在连接处存在显著的模场失配, 所以 MMI 入射端口和出射端口的模场耦合效率都不高, 以致 MMI 自映像效果变差, 基于 MMI-MZI 结构的开关单元附加损耗较大. 因此, 我们考虑引入楔形连接波导, 使光场在不同波导区域之间渐变过渡, 以改善开关单元的损耗特性. 模场传

\* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 60336010)、国家基础研究发展规划(批准号: G2000-03-66)及国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA312060)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: lizhy@semi.ac.cn

2006-11-17 收到, 2006-12-10 定稿

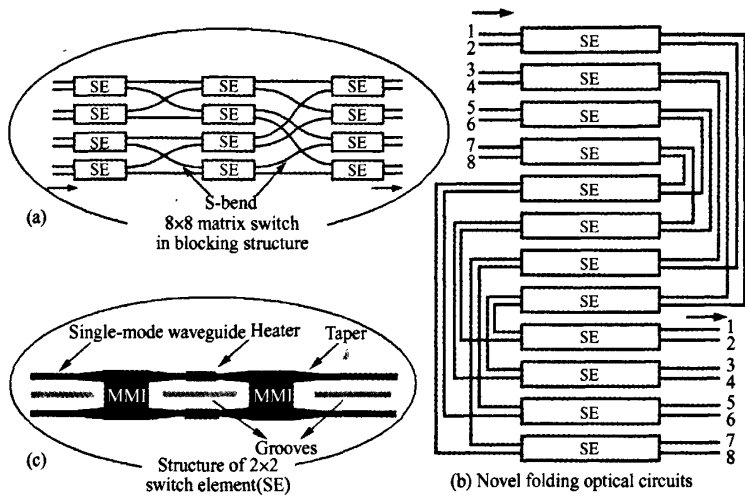


图1 折叠式矩阵开关的结构设计 (a)传统 8×8 阻塞型光开关;(b)折叠式光路;(c)2×2 开关单元示意图  
 Fig.1 Structure design of folded matrix switches (a) A blocking 8×8 matrix switch; (b) Folded optical paths; (c) Schematic of 2×2 switch element

输过程可通过束传播法(BPM)进行模拟分析.结果显示,在 MMI 端口处没有设计渐变过渡波导时,波导连接处存在光场散射,整个开关单元由此产生 12% 的能量损失.而增加楔形连接波导后,相邻区域间的模场重叠积分比没有楔形波导时增大一倍,这显然有利于提高界面处的耦合效率,减小单元的附加损耗并改善开关的其它相关特性<sup>[5]</sup>,如串扰、波长相关损耗(WDL)等.

根据 SOI 脊形光波导的单模条件<sup>[6,7]</sup>,若矩形截面的单模脊形波导高度为 5μm,相应刻蚀深度为 2μm,其宽度可选为 5μm.单模波导调制臂和加热电极的长度分别为 4500μm 和 3300μm.对于宽度为 30μm 的 MMI,准 TE 模和准 TM 模的自映像长度约为 4250μm.需要优化的楔形波导参数有:中心位置  $X_{input}$ 、MMI 入口宽度  $W_{in}$ 、MMI 出口宽度  $W_{out}$ 、入射楔形长度  $L_{in}$ 、出射楔形长度  $L_{out}$  等.分析表明,  $X_{input}$ 、 $W_{in}$  和  $W_{out}$  三个参数是主要影响因素.首先优化  $X_{input}$ ,它表示楔形波导中心位置相对于 MMI 中轴的偏移量.如图 2 所示,  $X_{input}$  的优化值为 10μm,此时开关单元的损耗最小,单模调制臂内的能量均衡性也最好.图 3 和图 4 说明楔形波导与 MMI 连接处的宽度  $W_{in}$  和  $W_{out}$  越大越好,但由于需要考虑隔离槽和套刻精度等因素,所以两宽度值均选为 10μm.而  $L_{in}$  和  $L_{out}$  经过模拟后分别优化为 750μm 和 1000μm.开关单元完成上述优化后,准 TE 模的附加损耗和串扰分别为 0.09dB 和 -31dB,而准 TM 模的结果分别为 0.13dB 和 -34.5dB.从理论分析得知,开关单元的附加损耗可从 1.4dB 降低到 0.13dB,串扰可减小到 -31dB,而且准 TE 模

和准 TM 模之间的差别也很小.

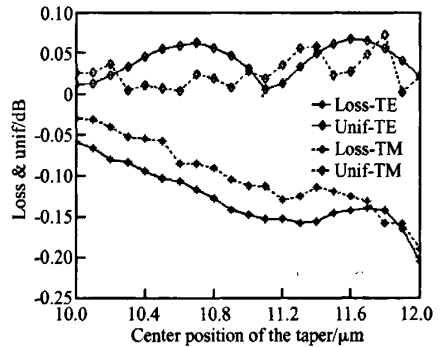


图2 单元附加损耗和调制臂均衡性与楔形波导中心位置的关系  
 Fig.2 Effect of the taper center positions on the excess loss and the uniformity of an element

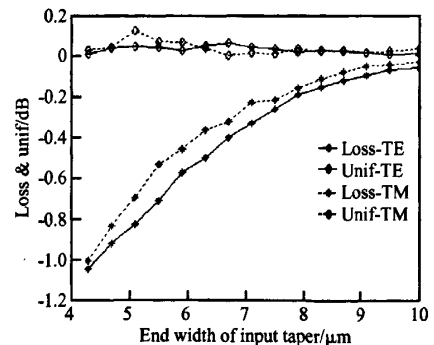


图3 单元附加损耗和调制臂均衡性与 MMI 入射端楔形波导宽度的关系  
 Fig.3 Effect of input tapers with various end widths

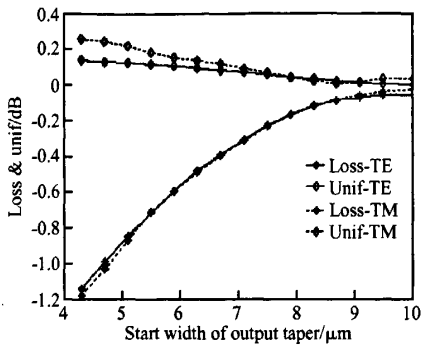


图 4 单元附加损耗和调制臂均衡性与 MMI 出射端楔形波导宽度的关系

Fig. 4 Effect of output tapers with various start widths

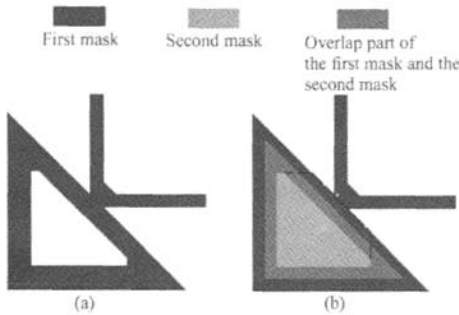


图 5 利用自对准方法改进反射镜设计 (a) 第一次光刻图形; (b) 第二块掩模与第一次光刻图形的叠加

Fig. 5 Novel mirror process by the self-aligned method (a) First mask for waveguides; (b) Second mask for deeply etching window

开关矩阵设计中的另一重要因素是全内反射镜. 在制作过程中, 由于光刻工艺存在误差, 难以使对反射镜同时具有精确位置和反射方向, 这会给开关光路带来更多的附加损耗. 因此, 我们采用自对准技术设计反射镜. 第一次光刻首先确定光波导图形和反射镜预留位置窗口, 见图 5(a). 在保留第一次光刻掩模情况下, 第二块光刻掩模版用于在预留窗口上再开一个三角形镜面刻蚀窗口, 其尺寸比预留窗口略大, 用于湿法腐蚀制作反射镜, 如图 5(b) 所示, 图中黑色虚线即表示镜面最终位置. 通过这一技术, 制作反射镜的套刻容差由以前容许的  $1\mu\text{m}$  增大为  $3\mu\text{m}$ , 更加符合套刻要求, 增大了器件设计自由度.

### 3 结果

实验所用 SOI 晶圆表面为 (100) 晶面, 顶层硅

厚度为  $5\mu\text{m}$ , 埋氧层厚度为  $1\mu\text{m}$ , 波导沿  $\langle 110 \rangle$  晶向, 采用电感耦合等离子体反应离子刻蚀 (ICP-RIE) 加工制作, 波导传输损耗约  $1\text{dB/cm}$ . 反射镜也为 (100) 晶面, 并与波导图形平面完全垂直, 由于采用化学湿法腐蚀, 其表面粗糙度均方根 (RMS) 小于  $5\text{nm}$ . 器件面积仅为  $20\text{mm} \times 3.2\text{mm}$ , 而用 S-bend 连接各开关单元时阵列总长度可达  $52\text{mm}$ .

芯片测量采用中心波长为  $1.55\mu\text{m}$  的分布反馈 (DFB) 半导体激光器 and 安捷伦公司生产的 Agilent 8164A 系统. 测得单模波导的传输损耗约为  $0.76\text{dB/cm}$ , 每个反射镜的附加损耗为  $1.4\text{dB}$ , 单个  $2 \times 2$  开关的插入损耗和串扰分别为  $9.9\text{dB}$  和  $-25\text{dB}$ .  $8 \times 8$  开关阵列的平均插入损耗约为  $21\text{dB}$ , 各端口最差串扰值在  $-21 \sim -23\text{dB}$ . 假定波导端面耦合损耗和反射损耗之和为  $7\text{dB}$ , 可知每个单元的平均附加损耗约为  $1.3\text{dB}$ . 在光纤通信 C 带 (即  $1525\text{nm}$  至  $1565\text{nm}$ ) 波长范围内, 波长相关损耗 (WDL) 起伏大小约为  $2.6\text{dB}$ . 测量结果显示, 热光开关的响应时间小于  $7.5\text{ms}$ , 开关驱动功耗约为  $140\text{mW}$ .

### 4 结论

通过引入楔形连接波导增强单模波导和多模波导间的耦合效率并予以优化, 使得 SOI 光波导开关单元的附加损耗以及整个开关阵列的插入损耗均显著减小, 串扰特性有所改善. 同时, 采用自对准方法可使全内反射镜的位置误差得到有效控制, 设计容差提高到  $3\mu\text{m}$ , 足以适应普通光刻的套刻精度要求, 有利于提高反射效率以减小反射镜引起的损耗. 理论分析和实验数据均表明以上改进确实提高了 SOI 光波导开关的基本特性, 但实验结果仍和模拟结果有所差距, 这显示器件结构设计和制作工艺两方面都还有待改进. 如果选择更适合的 SOI 材料和合理的工艺步骤, 比如减小 SOI 顶硅层厚度和采用更先进的 ICP 干法刻蚀工艺, 将会制作出性能更加优良的器件.

### 参考文献

- [1] Wei H, Yu J, Zhang X, et al. Compact 3-dB tapered multi-mode interference coupler in silicon-on-insulator. Opt Lett, 2001, 26(12): 878
- [2] House A, Whiteman R, Kling L, et al. Silicon waveguide integrated optical switching with microsecond switching speed. OFC, 2003: 449
- [3] Liu J, Yu J, Chen S, et al. Integrated folding  $4 \times 4$  optical matrix switch with total internal reflection mirrors on SOI by anisotropic chemical etching. IEEE Photonics Technol Lett, 2005, 17(6): 1187

- [ 4 ] Murphy E J, Murphy T O, Ambros A F, et al.  $16\times 16$  strictly nonblocking guided-wave optical switching system. *J Light-wave Technol*, 1996, 14(3), 352
- [ 5 ] Lorenzo R M, Lorente C, Abril E J, et al. Improved self-imaging characteristics in  $1\times N$  multimode couplers. *IEE Proc Optoelectronics*, 1998, 145(1), 65
- [ 6 ] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO<sub>2</sub>. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27(8), 1971
- [ 7 ] Xia J, Yu J, Li Y, et al. Single-mode condition for silicon rib waveguides with large cross-sections. *Opt Eng*, 2004, 43(9), 1953

## Compact Blocking $8\times 8$ Optical Matrix Switch on SOI with Taper Waveguides and Self-Aligned Total Internal Reflection Mirrors\*

Li Zhiyong<sup>†</sup>, Li Yuntao, Liu Jingwei, Chen Shaowu, and Yu Jinzhong

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Novel folding  $8\times 8$  matrix switches based on silicon-on-insulator (SOI) were demonstrated. In the design, single mode rib waveguides and multimode interferences (MMIs) are connected by optimized tapered waveguides to reduce the mode coupling loss between the two types of waveguides. And the self-aligned method was applied to the key integrated turning mirrors for perfect positions and low loss of them. The switch element (SE) with high switching speed and low power consumption is presented in the matrix. The average insertion loss of the matrix is about 21dB and the excess loss of one mirror is measured to be 1.4dB. The worst crosstalk is larger than -21dB. Experimental results show that some of the main characteristics of optical matrix switches are developed in the modified design, which agree with the theoretical analyses.

**Key words:** thermo-optical switch; silicon-on-insulator; taper waveguide; total internal reflection mirror; self-aligned method

EEACC: 4270; 4330B; 6260M

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0516-04

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60336010), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G2000-03-66), and the National High Technology Research and Development of China (No. 2002AA312060)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: lizhy@semi.ac.cn

Received 17 November 2006, revised manuscript received 10 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics