

SOI 光波导和集成波导光开关矩阵*

陈少武 余金中 刘敬伟 王章涛 夏金松 樊中朝

(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: 报道了基于 SOI(silicon-on-insulator)材料的光波导和集成波导光开关矩阵的最新研究进展. 给出了截面为梯形的脊波导的单模条件, 设计制备了 MMI(multimode interference)集成耦合器和基于 Mach-Zehnder 光波导干涉仪的热光型 2×2 光开关, 开关转换速度达到了 $5 \sim 8 \mu\text{s}$, 驱动功耗仅为 140mW, 是当前国际上同类型光开关中转换速度最快的. 在此基础上制备成功了 4×4 波导光开关矩阵, 并实现了光信号在不同信道间的转换.

关键词: 光波导; SOI 材料; 单模条件; 光开关/光开关矩阵

EEACC: 4270

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0212-04

1 引言

在全光网(AON)的节点技术及光交换系统中, 光开关作为基本的构成单元起着不可替代的作用, 是光上/下载路复用(OADM)和光交叉互连(OXC)模块的基础, 目前光开关已经引起了人们广泛的研究兴趣并成为光电子领域的一个研究热点. 传统的波导光开关一般在 SiO_2 上制备, 但由于 SiO_2 的导热性较差, 开关速度往往较慢, 一般为毫秒量级, 要实现高速波导光开关就必须考虑新型的材料. 在 SOI 材料上制备光波导和光开关矩阵具有以下的技术优势: 制备工艺与成熟的 CMOS 工艺兼容; 可实现极快的开关速度和低的开关功耗; 具备 OEIC 单片集成的潜力^[1,2]. 因此, 在 SOI 材料上制备光开关是技术发展的必然趋势. 在此研究背景下, 我们设计制备了基于 SOI 材料的脊型单模光波导, MMI 多模干涉耦合器, 2×2 Mach-Zehnder 干涉型热光光开关以及 4×4 波导光开关矩阵, 对器件的性能进行了分析测试.

2 SOI 脊形光波导和单模条件

由于 SOI 材料的折射率差别很大(Si 的折射率

约为 3.5, SiO_2 的折射率约为 1.46), 因此为了获得大截面尺寸的单模光波导就必须采用脊形光波导结构. 用 ICP 干法刻蚀技术制备的脊形光波导截面为矩形, 其单模条件已经由 Soref 给出^[3]. 但是, 用各向异性化学腐蚀工艺制备的脊型光波导截面为梯形, Soref 的单模条件不再适用. 为此, 我们用新的离散格式研究了梯形截面脊型光波导的单模条件^[4], 其结构参数必须满足以下关系:

$$t < -1.12 + 2.04r + \frac{0.63r}{(1 - 1.03r^2)^{0.5}}, \quad r \geq 0.5 \quad (1)$$

式中 $t = W_t/H$, W_t 为脊形波导梯形截面的顶宽; $r = h/H$, H 为内脊高, h 为外脊高. 图 1 为梯形脊波导的 SEM 照片, AFM 测试表明湿法腐蚀工艺制备出的光波导具有较高的表面光洁度 (RMS = 1.49nm), 较高的表面光洁度有利于降低光波导的传输损耗. 用比较法测量的传输损耗为 0.75dB/cm.

3 SOI 多模干涉耦合器

MMI 耦合器的工作原理是基于多模光波导中的光场自映像效应. MMI 耦合器的优点包括结构紧凑, 工艺容差大, 传输带宽大, 偏振依赖度低. 图 2 为

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312060)及国家重点基础研究发展规划(批准号:G20000366)资助项目

陈少武 男, 1968 年出生, 副研究员, 主要从事硅基光子集成研究.

2004-09-10 收到, 2004-12-01 定稿

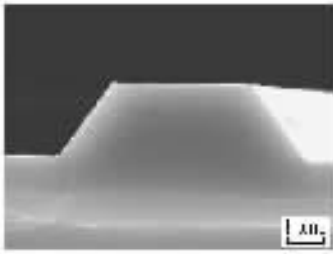


图 1 梯形脊波导的 SEM 照片

Fig. 1 SEM image of the trapezoidal rib waveguide

MMI 3dB 耦合器的显微照片和近场输出光斑图, 测试表明 MMI 3dB 耦合器两输出信道间的功率均衡度达到 0.2dB. MMI 3dB 耦合器是构成 Mach-Zehnder 干涉型光开关的关键构件, 其输出信道间的功率均衡度直接影响到光开关的消光比和信道间串扰性能.

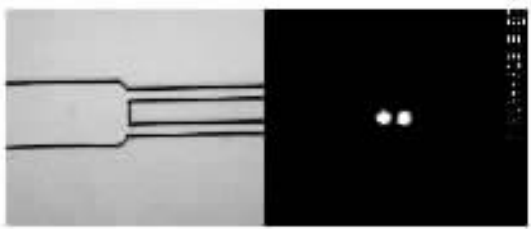


图 2 MMI 3dB 耦合器的显微照片和近场输出光斑图

Fig. 2 Micrograph and near-field output pattern of the MMI 3dB coupler

4 2×2 Mach-Zehnder 干涉型热光光开关

2×2 光开关是构成大规模光开关矩阵的基本构建单元. 基于 Mach-Zehnder 光波导干涉仪的热光型 2×2 光开关的结构如图 3 所示, 包括两个配对干涉型 3dB MMI 耦合器, 一对相移波导, 热光调制器和输入输出波导. 热光调制是由相移波导上的金属薄膜加热实现的. 通过热光调制改变两相移波导的相位差, 从而实现光在两个输出信道间的切换. 输入/输出单模波导的宽度为 4μm, MMI 的宽度为 40μm, 长度为 3000μm. 热光调制器加热膜长度为 3000μm. 通过理论计算, 对于 1.55μm 的工作波长, 要实现光在两输出信道间的切换, 热光调制区需要有 1.4℃的温升.

由于 Si 具有高的热导率, 因此 SOI 光开关的开关速度远远快于 SiO₂ 和 Polymer 光开关^[5,6]. 图 4

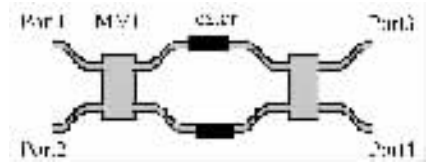


图 3 2×2 Mach-Zehnder 干涉型热光光开关的结构

Fig. 3 Structure of the 2×2 Mach-Zehnder interferometer TO optical waveguide switch

是用高速数字示波器记录下来的光开关响应曲线, 调制信号为加载到金属薄膜上的方波电流. 光开关的上升/下降时间分别为 8μs 和 5μs.

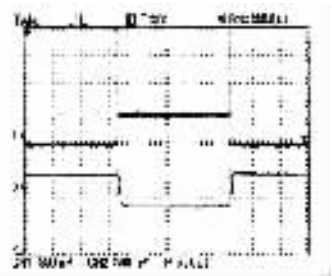


图 4 光开关响应曲线

Fig. 4 Response curve of the switch

图 5 是光开关的调制特性. 开关功耗为 235mW, 消光比和信道串扰为 17dB. 通过在两相移波导间设置隔热槽, 并且减薄波导的 SiO₂ 上包层, 可进一步降低光开关的功耗^[7]. 经改进后光开关的功耗降低到 140mW, 这一指标同开关速度一样均为目前国际上已报道的同类型光开关中最好的.

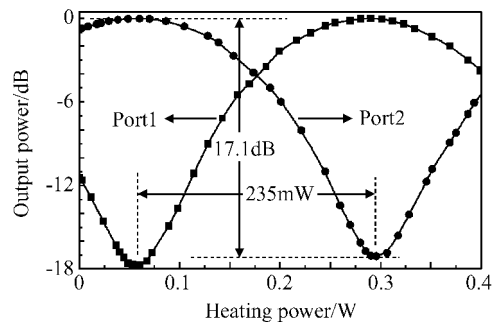


图 5 光开关的调制特性

Fig. 5 Modulation characteristic of the switch

5 4×4 集成光开关矩阵

采用上述的 2×2 光开关作为基本构建单元, 我

们首次用 SOI 材料制备出了 4×4 集成光开关矩阵实验芯片. 光开关矩阵的拓扑结构如图 6 所示, 由 5 个 2×2 光开关单元连接而成, 属于重排无阻塞型.

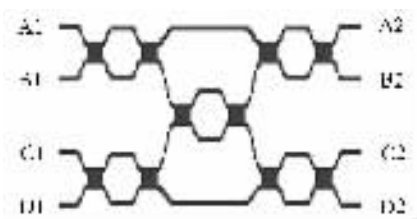


图 6 4×4 光开关矩阵的拓扑结构

Fig. 6 Topology of the 4×4 switch matrix

为了演示光开关矩阵的路由性能, 测量了输入端口 A1 到四个输出端口的传输状况. 图 7 是光开关矩阵的四种工作状态, 左边是四个输出端口 A2, B2, C2, D2 的输出近场, 右边是相应的光开关单元组配模式. 其中连通的光路用粗线表示, 2×2 光开关单元的交叉态和直通态分别用 (\times) 和 $(=)$ 表示. 测试结果表明成功地实现了预期的连接状态. 由于不同的开关状态下光经过的 2×2 光开关单元数不同, 因此不同开关状态下光的附加损耗也不相同. 经过两个 2×2 光开关单元的光附加损耗为 6.6dB, 经过三个 2×2 光开关单元的光附加损耗为 10.1dB. 光开关矩阵的信道间串扰在 -12dB 和 -19.8dB 之间. 光开关矩阵综合性能的提高还需要进一步的工作.

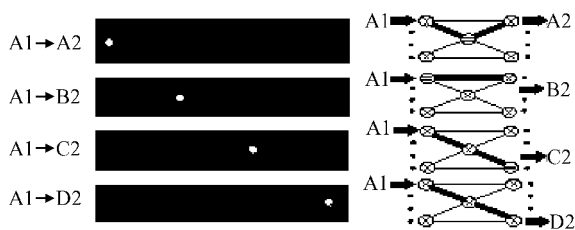


图 7 光开关矩阵的四种工作状态

Fig. 7 Four switching states of the 4×4 switch matrix

6 结论

本文给出了截面为梯形的脊波导的单模条件, 依据此条件设计制备了单模脊波导, 传输损耗测量为 0.75dB/cm . 设计制备了基于 Mach-Zehnder 波导干涉仪的热光型 2×2 光开关, 开关转换时间小于 $10\mu\text{s}$, 是当前国际上同类型光开关中转换速度最快的, 器件功耗仅为 140mW . 在此基础上首次制备成功了 4×4 波导光开关矩阵实验芯片并实现了光信号在不同信道间的转换. 本工作证明了 SOI 材料在光开关制备中的技术优势和应用潜力.

参考文献

- [1] Papadimitriou G I, Papazoglou C, Pomportsis A S. Optical switching: switch fabrics, techniques, and architectures. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(2): 384
- [2] Jalali B, Yegnanarayanan S, Yoon T, et al. Advances in silicon-on-insulator photoelectronics. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1998, 4(6): 938
- [3] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi/Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27(8): 1971
- [4] Xia J S, Yu J Z. Single-mode condition for silicon rib waveguides with trapezoidal cross-section. *Optics Communications*, 2004, 230: 253
- [5] Lai Q, Hunziker W, Melchior H. Low-power compact 2×2 thermo-optic silica-on-silicon waveguide switch with fast response. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1998, 10(5): 681
- [6] Lee M H, Min H Y, Park S. Fully packaged polymeric four arrayed 2×2 digital optical switch. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 14(5): 615
- [7] Liu Jingwei, Wang Xiaolong, Chen Shaowu, et al. Analyses of relations between modulating area structure and switch speed and power consumption of SOI thermo-optic switch based on finite element method. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(10): 1315 (in Chinese) [刘敬伟, 王小龙, 陈少武, 等. SOI 热光开关调制区结构与速度和功耗关系的有限元分析. *半导体学报*, 2004, 25(10): 1315]

Silicon-on-Insulator Based Optical Waveguide and Integrated Switch Matrix*

Chen Shaowu, Yu Jinzhong, Liu Jingwei, Wang Zhangtao, Xia Jinsong, and Fan Zhongchao

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

Abstract: Recent research progress on SOI based optical waveguide and integrated switch matrix is presented. The large cross-section single-mode trapezoidal rib waveguide, the MMI coupler, the 2×2 switch element are fabricated. The switch shows a much quicker response speed of $8\mu\text{s}$ (rise time)/ $5\mu\text{s}$ (fall time) and a very low power consumption of 140mW , which is the best result among all the reported silicon-based thermo-optic waveguide switches. Based on this, a 4×4 switch matrix is initially demonstrated.

Key words: optical waveguide; SOI material; single-mode condition; optical waveguide switch/switch matrix

EEACC: 4270

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0212-04

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2002AA312060), the State Key Development Program for Basic Research of China(No. G20000366)

Chen Shaowu male, was born in 1968. His research interests are in Si-based optoelectronics integrated.

Received 10 September 2004, revised manuscript received 1 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics