

8 × 8 重排无阻塞型 SOI 热光波导开关阵列

陈媛媛^{1,2}, 余金中²

(1. 北京工商大学信息工程学院, 北京 100037; 2. 中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:设计并制作了一种重排无阻塞型的 8 × 8 SOI 热光波导开关阵列。开关单元采用了 MMI - MZI 结构的 2 × 2 光开关。整个器件的开关时间约为 2 μs。器件中开关单元功耗小于 240mW。消光比在 17 ~ 22dB 范围内变化。功耗和开关速度都明显优于 SiO₂ 基和聚合物基的开关阵列。

关键词:开关阵列; 热光; SOI

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A

An 8 × 8 Rearrangeable Nonblocking SOI Thermo-optic Waveguide Switch Matrix

CHEN Yuan-yuan^{1,2}, YU Jin-zhong²

(1. Information Engineering College, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China;
2. State Key Laboratory on Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A rearrangeable nonblocking 8 × 8 thermo-optic waveguide switch matrix is designed and fabricated on silicon-on-insulator (SOI) wafer. General multi-mode interferometers (MMI) and Mach-Zehnder interferometer (MZI) are used to construct 2 × 2 switch cell. The device presents a fast response time of about 2 μs. The power consumption of each switch cell is less than 240mW. The extinction ratios vary from 17dB to 22dB. The power consumption and the response times are much better than that of silica-based or polymer-based switch matrix.

Key words: switch matrix; thermo-optic; SOI

1 引言

光开关是实现光交换的核心器件,也是影响光网络性能的主要因素之一。随着网络中信息量的加大,各种业务不断增加,网络节点如 OXC 和 OADM 都必然需要有大量端口以容纳大量的波长通道。这些都需要依赖于性能良好,价格合理的大规模光开关阵列的实现。然而目前比较成熟的商用光开关阵列几乎都是机械式的光开关,它们在开关速度和稳定性上难以满足要求。使用波导型光开关是一种前景比较好的解决方案^[1-3]。SOI 光波导器件具有以下优点:与传统的 Si 工艺兼容,可以实现光电集成;折射率差大且导波特性好;制备技术成熟多样,成本低廉。同时由于 Si 具有大的热光系数和高的热导率,在波长为 1.55 μm 时,分别为 1.86 × 10⁻⁴/K

和 156W/m · K。因此 SOI 热光开关的响应速度比其他材料如 SiO₂ 和聚合物的热光开关速度要快。

本文采用束传播方法 (BPM) 模拟优化设计了 8 × 8 重排无阻塞型 SOI 热光波导开关阵列。阵列结构选择了拜尼兹型拓扑结构。开关单元为 2 × 2 MMI - MZI 结构的光开关。采用光刻工艺和 ICP 刻蚀技术制作了相应器件,并对实验结果进行了分析讨论。

2 器件设计

光开关阵列的结构按功能分可以分为三类:完全无阻塞型、重排无阻塞型和阻塞型开关阵列。和完全无阻塞阵列相比,重排无阻塞光开关阵列同样

作者简介:陈媛媛(1979 -),女,博士,讲师,主要从事半导体光波导器件的研究。

收稿日期:2008-07-11

可以实现任意端口之间的互连,且所需要的开关单元和互连级数少,交叉波导数目小,结构紧凑,因此近年来有了较大的发展。我们选择了拜尼兹型拓扑结构来制作重排无阻塞型开关阵列。这种结构相对比较简单,同时阵列中任意一条光路所经过的开关单元数目相同,阵列的传输损耗与光路没有明显的依赖关系。其主要缺点是当 N 较大时其所需要的交叉波导多,这不利于阵列的串扰特性。一个 $N \times N$ 拜尼兹型开关阵列,需要 $N/2(2\log_2 N - 1)$ 个开关单元,互连级数为 $2\log_2 N - 1$ 。则 8×8 阵列需要 20 个开关单元 5 级互连而成。开关单元之间使用 S 形弯曲波导进行交叉连接,如图 1 所示。整个开关矩阵的大小尺寸为 $1\text{mm} \times 51\text{mm}$ 。

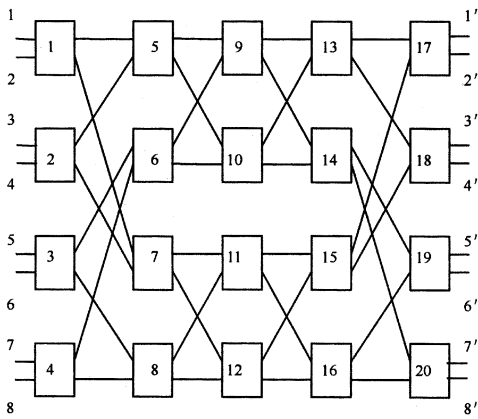


图1 8 × 8 重排无阻塞型光开关阵列结构

2×2 开关单元采用了 MZI 结构,如图 2 所示,该结构由输入输出波导,3dB 分束/合束器,调制臂相移器组成。其工作原理如下:当一束光进入 3dB 耦合器的某一输入单模波导后,经过 3dB 耦合器被分为强度和相位完全相同的两束光进入相移臂。如果两相移臂完全对称,在不加调制的情况下这两束光到达第二个 3dB 耦合器时强度和相位完全一样,经过 3dB 耦合器合束为与输入光强度相等的一束光,由单模波导输出。如果在一个相移臂上加调制或在两个相移臂上加不同的调制电压,相移臂波导的折射率会发生改变,从而改变通过相移臂的光的位相。于是两束强度相同但位相不同的光到达第二个 3dB 耦合器,发生干涉合束后,其输出光的光强将随两束光之间的相位差的不同而变化,即输出光强受到了调制信号的调制。当相位差为 π 的奇数倍时,理论上可以达到完全消光,即输出端光强度为零。而当相位差为 0(未调制时的原始状态)或 π 的偶数倍时,输出光与输入光强度相等。输出光强和相位差之间的关系如式(1)所示:

$$P_{out} = P_0 [\cos(\Delta\phi/2)]^2 \quad (1)$$

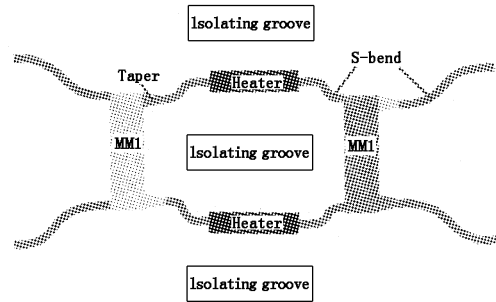


图2 2 × 2 热光波导开关单元结构示意图

常见的分束/合束器有 Y 分支、X 分支,定向耦合器和多模干涉耦合器(MMI)等几种类型。相对于其他耦合器件,MMI 有如下优点:尺寸较小,结构紧凑,制作容差大,波长带宽大,对偏振不敏感等^[4-5]。基于这些优异特性,同时为了降低器件工艺制作难度,我们选择了普通干涉的 MMI 耦合器作为 3dB 分束/合束器。通过 BPM 模拟,确定了 MMI 中 $20\mu\text{m}$ 宽的多模波导其最佳长度为 $1920\mu\text{m}$ 。由于 MMI 映像光场相对输入光场有一定程度的扩散,为减小损耗,在 MMI 多模波导的输入端采用了单模直波导输入,在输出端则采用一段 $200\mu\text{m}$ 长的锥形波导进行过渡再连接单模直波导。

在两个调制臂间引入了深刻蚀的隔离槽,隔离槽处的波导被一直刻蚀到埋层 SiO_2 ,从而完全避免了两个调制臂间的光耦合。同时隔离槽还可以有效阻止热量在两个调制臂间的扩散。对热光开关来说,调制方式为利用 Si 的热光效应通过电极加热改变 Si 的折射率,从而改变相位。而 Si 的热扩散系数较大,热量容易从被加热的调制臂扩散到另一个调制臂,影响调制效果,增加功耗。 SiO_2 的热扩散系数很小,深刻蚀到 SiO_2 层的隔离槽能有效避免热量扩散。为了进一步减小器件功耗同时保持光场的对称性,在两个调制臂的外侧也刻蚀了同样的隔离槽。

为了提高波导与光纤的耦合效率,在整个开关阵列的输入和输出端加上了在水平面上作楔形变换的模斑变换波导^[6-7]。我们的实验中采用的是 BE-SOI 片,顶层 Si 厚 $8\mu\text{m}$ 。我们将波导层厚定为 $4\mu\text{m}$,上面的锥形厚度定为 $4\mu\text{m}$ 。具体模斑变换器(SSC)的结构如图 3 所示。为了保证光刻过程的对准容差 $2\mu\text{m}$,SSC 最上面一层脊宽度小于中间一层脊宽度,上脊宽为 $8\mu\text{m}$,中脊宽为 $12\mu\text{m}$ 。这样当套刻完全对准时,上脊在中脊的正中间;只要套刻偏差小于 $2\mu\text{m}$,上脊不会超出中脊的范围,对器件的性能就不会有太大的影响。单模波导的脊高和脊宽分别定义为 $2\mu\text{m}$ 和 $3.5\mu\text{m}$ 。

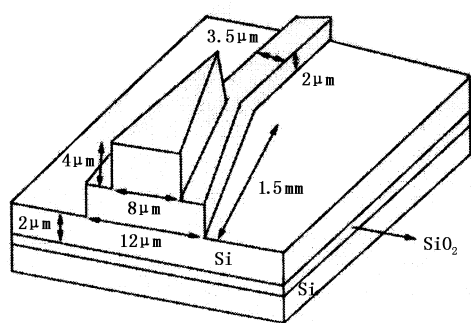


图3 SSC的结构图

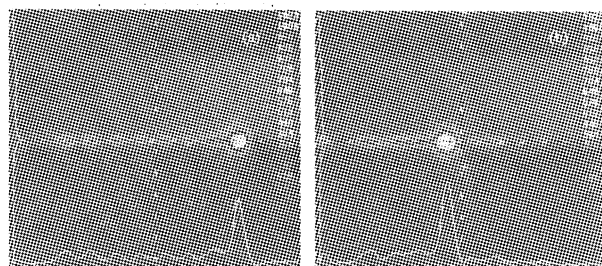
3 实验结果

采用标准的微电子工艺制作开关阵列。BESOI基片顶层 Si 厚 $8\mu\text{m}$, 埋层 SiO_2 厚 $0.5\mu\text{m}$ 。通过两次光刻和感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀, 分别刻蚀出模斑变换器图形和热光开关波导图形。接着进行热氧化, 在波导表面形成 100nm 的氧化层。氧化层一方面可以保护波导, 避免金属电极对波导中所传输光的吸收, 另一方面热氧化过程也可以改善 ICP 刻蚀中造成的波导侧壁的粗糙度。然后在开关单元的调制臂上溅射 Cr/Au 金属电极。最后 ICP 刻蚀隔离槽图形。再经过了划片, 抛光等后续工艺, 整个开关阵列就制作完成了。

测试时将光波直接从单模光纤耦合到器件中, 工作波长为 $1.55\mu\text{m}$, 在输出端用光功率计观测输出端口的光场能量。开关阵列 8 个端口的插入损耗分别在 $23.9 \sim 26.6\text{dB}$ 之间。串扰光输出端口的最大串扰为 -13.5dB , 最小串扰为 -26.6dB 。整个器件的插入损耗偏大, 损耗一部分来源于器件设计本身所引起的附加损耗, 一部分也来源于 ICP 干法刻蚀形成的粗糙表面所引起散射损耗以及光纤和波导之间的耦合损耗。

通过调制控制开关单元的开关状态, 阵列可实现任意输入输出端口之间的互连。例如当光从开关阵列的 4 端口输入后, 未加调制时所有开关单元处于交叉态, 光将会从输出端口 8 输出。若对中间级开关单元 9 的调制臂电极进行加热, 使其光场相位发生 π 相移, 开关单元 9 将变为直通态。此时光将会从输出端口 4 输出。相应光场能量分布的 CCD 照片如图 4 所示。光从端口 4 输出时的光强比从端口 8 输出时略大, 这是因为 4-8 的光路比 4-4 的光路经过了更多的弯曲波导, 光路更长, 传输损耗更大。此外除理想输出端口外, 其他输出端口也有一定程度的光输出造成器件串扰。在图 4(b) 中串扰主要出现在上半部分端口是因为 4-4 的光路仅经过了阵列的上半部分。最大串扰端口出现在与理想输出端口位于最后一级同一

开关单元的临近输出端口, 说明串扰主要受单个开关单元串扰特性影响。提高开关单元的性能是改善整个开关阵列开关特性的关键。输出端口的光功率随调制电功率变化的关系如图 5 所示。开关的消光比为 19.7dB , 功耗为 230.7mW 。对其他开关单元进行调制也可以获得类似的结果。消光比在 $17 \sim 22\text{dB}$ 范围内变化, 功耗为 $220 \sim 240\text{mW}$ 。



(a) 调制前 (b) 调制后

图4 光场分布

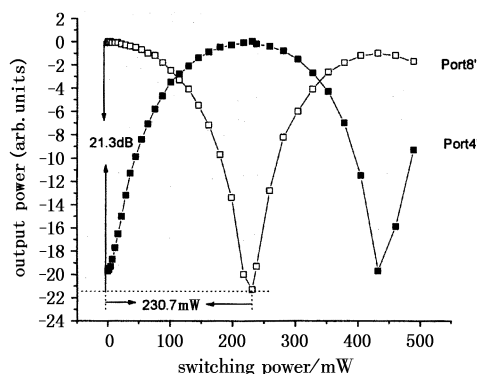


图5 输出功率与调制电功率的关系

在光开关电极上加方波形式的电脉冲驱动光开关, 从而获得输出光脉冲。利用光电探测器将光脉冲转化为电脉冲, 并利用示波器测量光开关的上升和下降时间。如图 6 所示, 开关上升时间为 $2.18\mu\text{s}$, 开关下降时间 $2.63\mu\text{s}$ 。

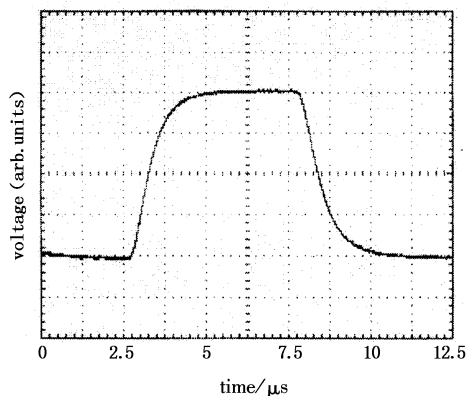


图6 响应时间

4 结束语

设计并制作了 8×8 重排无阻塞型 SOI 热光波导开关阵列。阵列采用了拜尼兹型拓扑结构, 共有

20 个开关单元经过 5 级互连而成。开关单元为 2×2 MMI-MZI 光开关。在阵列中引入了 SSC 和隔离槽来减小损耗,降低功耗。整个器件的消光比大于 17dB。器件中开关单元功耗小于 240mW。开关上升时间为 2.18 μ s,下降时间为 2.63 μ s,比类似结构的 SiO₂ 开关阵列快了约 100 倍^[2]。阵列插入损耗特性较差,超过了 23dB。如果能够提高大面积 ICP 刻蚀的均匀性,减小粗糙表面所引起散射损耗,器件的损耗特性将会有明显改善。

参考文献:

- [1] YangDi, Li Yan-Ping, Sun Fei, et al. Fabrication of a 4×4 strictly nonblocking SOI switch matrix [J]. Opt. Commun., 2005, 250: 48-53.
- [2] Goh T. Recent advances in large-scale silica based thermo-optic switches [C]//SPIE, 2001, 4582: 49-56.
- [3] Moosburger R, Petermann K. 4×4 digital optical matrix

switch using polymeric oversized ribwaveguides [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1998, 10(5): 684-686.

- [4] Soldano L B, Penning E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications [J]. IEEE J. Lightwave Technol., 1995, 13(4): 615-627.
- [5] Soldano L B, Veerman F B, Smit M K, et al. Planar monomode optical couplers based on multimode interference effects [J]. IEEE J. Lightwave Technol., 1992, 10(12): 1843-1850.
- [6] Day I, Evans I, Knights A, et al. Tapered silicon waveguides for low insertion loss highly-efficient high-speed electronic variable optical attenuators [C]//Opt. Fiber Commun., 2003, 1: 249-251.
- [7] Li Yan-Ping, Yu Jin-Zhong, Chen Shao-Wu. A silicon-on-insulator-based thermo-optic waveguide switch with low insertion loss and fast response [J]. Chin. Phys. Lett., 2005, 22(6): 1449-1451.

(上接第 41 页)

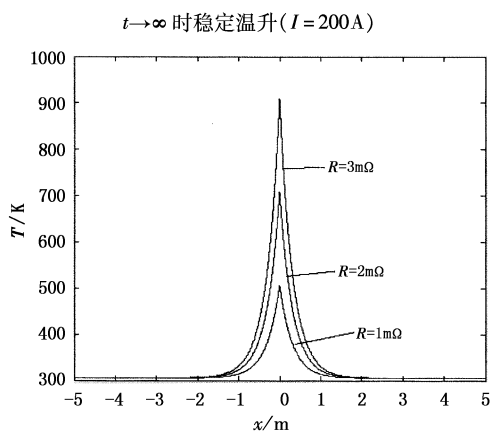


图 6 线路电流 $I=200A$ 时,不同故障接头附近稳态温升曲线

根据以上理论及图表分析,我们得出以下结论:
 $t \rightarrow \infty$ 时,导线温升为稳态温升,其大小与距故障点的距离及电流大小有关, $x=0$ 处温升最高,距故障点越远、温升越小,电流越小、温升越小,接头电阻越小、温升越小。另外,我们从图 4~6 中可看出,远处温升与线路电流、接头电阻无关, x 越大时,接触电阻影响变得越小,即接触电阻产生的热只对触点及其附近的导线产生影响,这与实际情况吻合。且比较三个图中还可看出高压输电电缆上距故障点 2m 处的温度与无穷远处的温度几乎无差别,因此可作为温度比较的基准,并由此判定故障点的位置,这与文献[4]的结论有一定差别,这可能是辐射项造成的。

4 结论

目前在电力设备红外诊断技术领域的基础理论研究仍然十分落后,这是制约红外诊断技术水平迅

速发展的根本原因。为提高诊断的客观性和准确性,应该开展大量的基础理论研究工作^[8]。电气设备故障红外诊断的基础在于探测与识别故障目标温度的特征性变化与分布。本文针对有热故障点的一维输电线路,建立了具有普遍意义的红外热诊断理论模型,给出了输电线路故障点及距故障点任意距离处的温度随时间变化的普遍解析表达式,并进行了模拟结果分析,所得结论为一维输电线路热故障的红外热诊断提供了充分可靠的理论依据,同时也拓宽了红外测温技术的应用前景,有利于促进红外技术的快速发展。

参考文献:

- [1] 谌青昊,吴功平,骆敏华,等. 高压输电线路红外诊断系统开发[J]. 机械与电子, 2004, (3): 31-33.
- [2] 戴文进,郭世才. 高压输电线路故障的红外诊断技术[J]. 电力建设, 2005, (4): 46-47.
- [3] 尹增谦. 输电线路接头热故障红外检测的电阻判据[J]. 红外技术, 2000, 22(5): 54-56.
- [4] 尹增谦,陈素敏,黄明强,等. 高压输电线路热故障红外诊断的理论分析和模拟实验[J]. 激光与红外, 1994, 24(3): 23-25, 59.
- [5] 程尚模. 传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [6] 徐世良. 数学物理方法解题分析[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1982.
- [7] 李震彪,程礼椿. 短路电流下的电器发热分析[J]. 低压电器, 1995, (6): 28-30.
- [8] 陈衡,侯善敬. 电力设备故障红外诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.