

硅基波导光开关及开关阵列的研究进展

陈媛媛¹, 吴静珠¹, 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:光开关是光网络中实现光交换的核心器件。硅基波导光开关作为一类重要的开关器件,具有体积小、开关速度快、兼容性好等优点。近年来随着硅基波导制作技术的成熟,硅基波导光开关及开关阵列的研究日益受到人们的重视。文章介绍了 SOI(silicon-on-insulator)光波导、聚合物光波导和 SiO₂ 光波导等三类常见的硅基波导在光开关及开关阵列方面的一些研究进展。

关键词:光开关;光波导;SOI;聚合物;SiO₂

中图分类号:TN252;TN256

文献标识码:A

Recent Progress in Silicon-based Waveguide Optical Switches and Switch Arrays

CHEN Yuan-yuan¹, WU Jing-zhu¹, 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: Optical switches are key components in optical network to implement optical exchanges. Silicon-based waveguide optical switches are important switch devices because of small bulk, fast switch speed, and good compatibility. Recent years, with the maturation of facture technology of silicon-based waveguides, the research on silicon-based waveguide optical switches and switch arrays has attracted more and more attentions. In this paper, the recent developments in optical switches and switch arrays based on three kinds of silicon-based waveguides, including SOI(silicon-on-insulator), polymer and SiO₂, are reviewed.

Key words: optical switch; optical waveguides; SOI(silicon-on-insulator); polymer; SiO₂

1 引 言

硅作为一种成本低廉、制作和加工工艺成熟的半导体材料,在微电子学方面已经有着广泛的应用。近年来在导波光学领域,各种硅基波导器件的研究也越来越多。作为光纤通信网络中光分插复用(OADM)和光交叉连接(OXC)核心器件的光开关器件就是其中一类。硅基光波导器件按材料的不同可以分为聚合物光波导、SiO₂光波导、SiGe/Si光波导和SOI光波导等。其中SiGe/Si光波导材料外延生长制作相对困难,故SiGe/Si光波导开关报道很少。本文主要介绍了其他三类硅基波导光开关的一些特性及其在国际国内的研究进展。

2 SOI 光开关

SOI材料最初由于具有抗辐射等优点主要是被应用于微电子技术中。20世纪80年代后期90年代初,SOI材料开始被用于制作介质光波导、无源波导器件以及有源波导器件(主要是调制开关)。SOI波导光开关的优越性主要表现在以下几点:与传统的Si工艺兼容,可以实现光电集成;折射率差大而且具有很好的导波特性和;单个器件可以做得很小,有利于大规模集成;制备技术成熟多样,成本低廉。

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。E-mail:chen.yy@163.com

收稿日期:2008-05-05

Si 是一种很好的热光开关材料,具有大的热光系数和高的热导率,在波长为 $1.55\mu\text{m}$ 时,分别为 $1.86 \times 10^{-4}/\text{K}$ 和 $156\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 。因此,SOI 热光开关的响应速度比其他材料(如 SiO_2 和聚合物)的要快,可以达到微秒量级甚至更小。热光开关通常采用 MZI 结构。它们都是在介质材料上先做上波导结构,然后在波导上蒸镀金属膜加热器,当金属膜通电发热时,其下面的波导折射率就会发生变化,从而实现了对光的调制。G. V. Treyz 采用 Y 分支型 MZI 结构,用 Ni(80% Ni + 20% Cr) 作为波导臂加热膜制作的 SOI 光波导开关,调制深度为 40%,功率为 30mW,开关时间为 $50\mu\text{s}$ ^[1]。U. Fischer 等研制的 1×2 和 2×2 的 MZI 型热光开关,采用 Ti 金属膜作为相移区的加热膜,当工作波长为 $1.3\mu\text{m}$ 时, 1×2 和 2×2 的热光开关损耗分别为 7dB 和 8dB,交叉串扰为 -6dB 和 -5dB,功耗为 85mW ^[2]。最近几年关于 SOI 热光波导开关的新的报道也很多。美国 Columbia 大学的 Osgood 小组 2003 年制作的 1×1 MZI 热光开关^[3],采用了 $0.6\mu\text{m} \times 0.26\mu\text{m}$ 的矩形截面的单模波导。在波长 $1.55\mu\text{m}$ 时,开关功耗 50mW,开关时间小于 $3.5\mu\text{s}$ 。由于波导截面尺寸太小,由边界粗糙造成的散射损耗很大,使得单模波导的传输损耗高达 11dB/mm;尽管在输入、输出端通过楔形波导将波导水平宽度从 $0.6\mu\text{m}$ 增加到了 $3\mu\text{m}$,和光纤的耦合损耗还是很大。传输损耗和耦合损耗使得整个开关的插入损耗高达 32dB,这在实际应用时是无法接受的。Bookham 公司的 A. House 等人在 OFC2003 上报到了 2×2 的 MMI - MZI 热光开关^[4],单模波导采用大截面脊型波导结构。开关性能如下:开关功耗 400mW,响应时间 $10 \pm 2\mu\text{s}$,消光比 23.5dB,附加损耗 1.0dB。芬兰 Helsinki 大学和 VTT 研究所在 2004 年共同报道了 2×2 的 MZI 热光开关^[5],开关是基于 $10\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ 的大截面脊型 SOI 单模波导。开关由数字信号处理器和简单的电子回路驱动,采用差分控制技术获得快速响应,响应时间小于 $1\mu\text{s}$ 。在大规模开关阵列研究方面,我国中科院半导体所作出了重要成绩,先后报道了 4×4 , 16×16 开关阵列, 16×16 开关阵列器件响应时间小于 $3\mu\text{s}$ ^[6]。

Si 属于中心反演对称的晶体,Pockels 效应很弱,电光系数很小。因此对 Si 折射率的调制只能通过自由载流子的等离子色散效应来实现。制作 SOI

电光开关工艺复杂,制作难度大,但是电光开关可以实现纳秒量级的开关速度,是热光开关所不能企及的。电光开关的结构有定向耦合器型、交叉波导全内反射型、数字光开关型以及 MZI 型等几种。定向耦合器光开关要实现高消光比,要求两耦合波导的长度精确等于耦合长度的奇数倍,而耦合长度与两耦合波导的间距成指数关系。因此定向耦合器开关对制作精度要求很高。MZI 型光开关的分支结构主要有 Y 分支型、定向耦合器型、X 结型、多模干涉耦合器(MMI)型等。瑞士的 P. Dainesi 等在 2000 年报道了基于 Y 分支和 MMI 结构的 1×1 的电光开关^[7],开关时间大约 100ns,消光比分别是 20dB 和 14dB。Bookham 公司的 I. Day 等人在 2003 年的 OFC 上报到了基于 Si 的等离子色散效应的可变光衰减器^[8]。在器件的输入、输出端采用了选择外延形成的模斑变换器,使输入、输出端面 and 标准光纤的耦合损耗小于 0.5dB。整个器件在 1530 ~ 1590nm 的波段内的插入损耗在 1dB 左右,偏振相关损耗小于 0.1dB。调制器的响应时间小于 300ns。Intel 公司在 2004 年初利用成熟的微电子工艺在 SOI 上实现了调制速率达到 GHz 的光调制器^[9]。器件利用 Si 的自由载流子色散效应,采用 MZI 结构,调制区和 CMOS 二极管相似,如图 1 所示。它提供了在 Si 上制作高速开关器件的方向。

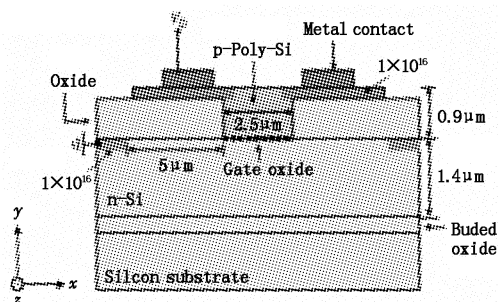
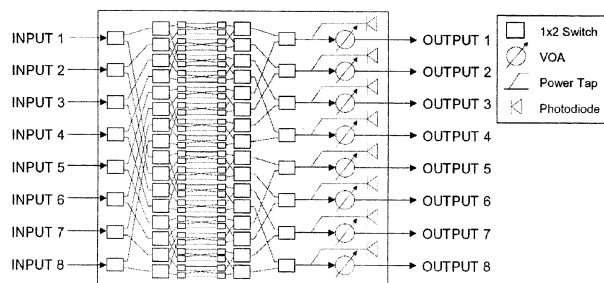


图1 Intel 开发的高速调制器的调制区截面图

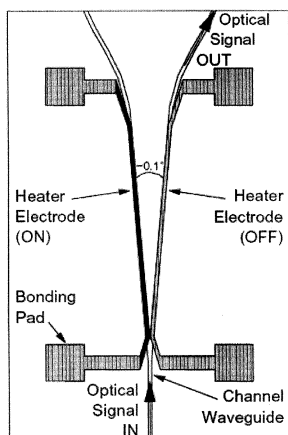
3 聚合物光开关

有机聚合物能在硅基片上生长,成本低廉、工艺简单、制备温度低。聚合物波导传输损耗小于 $0.1\text{dB}/\text{cm}$ ^[10],此外它与光纤的耦合损耗也很小,因此适合于大规模的阵列集成和准单片集成。但聚合物光开关也有着非常严重的缺点,主要是热稳定性、抗湿性、长期可靠性比较差。常见的有机聚合物开关是利用聚合物的热光效应制成的热光开关。开关结构有定向耦合器型、马赫曾德干涉仪型和数字型光开关等几种。数字式光开关具有受驱动功率起伏

影响小,同时对波长和偏振变化不敏感的优点,日益受到人们的关注。1998年,Moosburger等人报道了聚合物 4×4 光开关阵列^[11],它由24个 1×2 Y分支光开关单元组成。在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下,阵列的平均串扰为28.8dB,开关时间约 $250 \mu\text{s}$ 。为降低波导交叉引起的串扰,Hauffe等人在交叉波导处引入锥形结构,可将开关阵列的平均串扰优化为42dB,明显改善串扰特性^[12]。2001年OFC会议上报道的 1×2 数字式光开关通过在Y分支处引入衰减器或者采用双电极区结构,也可以将串扰特性提高到40dB以上^[13-14]。OFC2005上,DuPont光子技术公司报道了集成了 8×8 开关功能、功率监控和均衡功能的八通道OXC子系统^[15]。芯片包含了1个由112个 1×2 开关单元构成的 8×8 完全无阻塞型热光阵列,8个光功率分支,8个集成的光二极管(功率监控)和8个可变光衰减器(功率控制),如图2(a)所示。其中开关单元采用聚合物热光 1×2 的Y分支数字光开关,如图2(b)所示。OXC模块的工作波长范围为 $1528 \sim 1610 \text{nm}$,插入损耗4dB,消光比45dB,串扰 -50dB ,开关响应时间3ms,功耗4W。



(a)



(b)

图2 具有功率监控和自动功率均衡功能的 8×8 OXC(a)及 1×2 Y分支结构图(b)

聚合物种类繁多,其电光系数也很大。聚合物

在宏观上并不显示极性,而只有通过强电场的极化后才显示出极性。目前极化聚合物的线性电-光系数可达到 55pm/V ^[16]。而非线性更强、热稳定性更好的聚合物材料也正在研究之中。已经报道过的聚合物电光开关开关速度可达到吉赫兹,损耗在1dB左右,消光比大于 20dB ^[17]。如果进一步改善聚合物材料极性,优化设计电极结构,开关速度可能达到 100GHz 。

4 SiO_2 光开关

SiO_2 光波导具有稳定的热光系数,在波长 $1000 \sim 16000 \text{nm}$ 范围内约为 $1.1 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$,一般用于制作热光开关。 SiO_2 热光开关的主要优势在于:光波导的损耗很小,可低达 0.04dB/cm ,光波导的折射率与光纤的折射率匹配,减小了波导与光纤端面的反射损耗,同时与光纤的模式匹配也非常好,耦合损耗很低。传统的Y分支器、定向耦合器、非对称X结等3dB耦合器通常要求较高的加工精度,而且器件的尺寸较长,不利于器件的大规模集成。以MMI作为3dB耦合器,具有结构紧凑、制作容差大、容易实现大规模集成等优点,因而越来越受到人们的关注。Bell实验室研制的 SiO_2 4×4 光开关阵列由8个 $1 \times 4 \text{MMI-MZI}$ 开关单元组成,开关的插入损耗为2.8dB,串扰为 35.2dB ^[18]。在 SiO_2 热光开关阵列研究方面,日本NTT公司具有领先优势。Takashi Goh等使用 SiO_2 平面光波回路(PLC)技术制作了 16×16 的热光开关阵列^[19],阵列的互联级数为15级,开关单元总数为256个,总功耗17W,插入损耗5.6dB,平均消光比61dB,开关时间为毫秒量级。整个器件大小为 $107 \text{mm} \times 100 \text{mm}$ 。开关单元采用双MZI结构,如图3所示,消光比可以比普通MZI开关的消光比提高一倍。在OFC2005上又报道了在此基础上改进的 16×16 光开关模块^[20],如图4(b)所示。波导芯层折射率差从0.75%增加到1.5%。器件尺寸缩小为 $85 \text{mm} \times 45 \text{mm}$,只有原结构的36%。最大插入损耗7.2dB,消光比46.3dB,总功耗4.8W,只有改进前的37%。

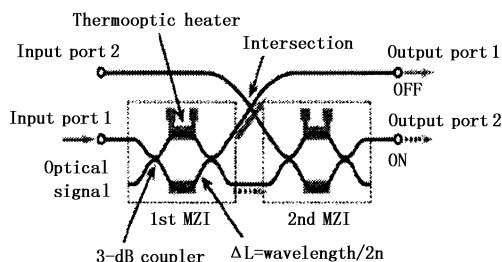


图3 双MZI结构

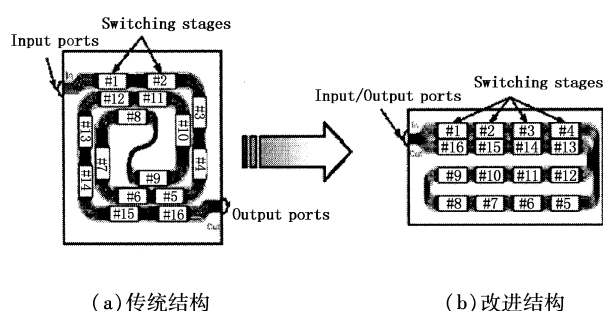


图4 SiO_2 的完全无阻塞 16×16 光开关阵列

5 结束语

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。在 WDM 全光网络中,光开关可以实现在全光层的路由选择、波长选择、光交叉连接和自愈保护等功能。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。使用硅基波导型光开关是一种前景比较好的解决方案。随着光网络技术的发展,硅基光开关和开关阵列的性能必将进一步提高,获得更加广泛的应用。

参考文献:

- [1] G V Treyz. Silicon Mach-Zehnder waveguide interferometers operating at $1.3\mu\text{m}$ [J]. Electron Lett., 1991, 27: 118 – 120.
- [2] U Fischer, T Zinke, K Petermann. Integrated optical waveguide switches in SOI [C]//Proceedings 1995 IEEE International SOI Conference, 1995: 141 – 142.
- [3] R L Espinola, M C Tai, James T Yardley, et al. Fast and low-power thermo-optic switch on thin silicon-on-insulator [J]. Photon. Technol. Lett., 2003, 15: 1366 – 1368.
- [4] House A, Whiteman R, Kling L, et al. Silicon waveguide integrated optical switching with microsecond switching speed [C]//Opt. Fiber Conf., 2003(2): 449 – 450.
- [5] M Harjanne, M Kapulainen, T Aalto, et al. Sub- μs switching time in silicon-on-insulator Mach-Zehnder thermo-optic switch [J]. Photon. Technol. Lett., 2004, 16: 2039 – 2041.
- [6] Chen Yuan-yuan, Li Yan-ping, Sun Fei, et al. SOI-based 16×16 thermo-optic waveguide switch matrix [J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23(7): 1823 – 1825.
- [7] P Dainesi, et al. CMOS compatible fully integrated Mach-Zehnder interferometer in SOI technology [J]. Photon.

Technol. Lett., 2000, 12(6): 660 – 662.

- [8] I Day, I Evans, A Knights, et al. Tapered silicon waveguides for low insertion loss highly-efficient high-speed electronic variable optical attenuators [J]. Opt. Fiber Commun., 2003, 1: 249 – 251.
- [9] A Liu, R Jones, et al. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. Nature, 2004, 427: 615 – 618.
- [10] Im amuras, Yoshimuraz, Izawat. Polymer channel waveguides with low loss at $1.3\mu\text{m}$ [J]. Electronics letters, 1991, 27(15): 1342 – 1343.
- [11] Moosburger R, Petermann K. 4×4 Polymer digital matrix switch using polymeric oversized rib waveguides [J]. Photon. Technol. Lett., 1998, 10(5): 684 – 686.
- [12] Ralf Hauffe, Ulrich Siebel, Klaus Petermann. Crosstalk-optimized integrated optical switching matrices in polymers by use of redundant switch elements [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2001, 13(3): 200 – 202.
- [13] Siebel U, Hauffe R, Petermann K. An improved polymer digital optical switch with cross talk of -46 dB [C]//OFC2001, WR4 – 1 ~ WR4 – 3.
- [14] Ken Sakuma, Daigo Fujita, Shimon Ishikawa, et al. Low insertion-loss and high isolation polymeric Y-branching thermo-optic switch with partitioned heater [C]//OFC2001, WR3 – 1 ~ WR3 – 3.
- [15] Louay Eldada, Reinald Gerhardt, Junichiro Fujita, et al. Intelligent optical cross-connect subsystem on a chip [C]//Opt. Fiber Conf., 2005, NTuL2.
- [16] Markus Ahlhecen, Manguerite Barzoukas, Bedworth PV, et al. Chromophores with strong heterocyclic acceptors: a poled polymer with a large electro-optic coefficient [J]. Science, 1996, 271(19): 335 – 337.
- [17] Oh M C, Lee M H, et al. Asymmetric X-junction thermo-optic switches based on fluorinated polymer waveguides [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(6): 813 – 815.
- [18] M P. Earnshaw. Compact, low-loss 4×4 optical switch matrix using multimode interferometers [J]. Electron. Lett., 2001, 37: 115 – 116.
- [19] T Goh, M Yasu, K Hattori, et al. Low-loss and high extinction ratio strictly nonblocking 16×16 thermo-optic matrix switch on 6-inch wafer using silica-based planar lightwave circuit technology [J]. Lightwave Technol., 1999, 19(3): 371 – 379.
- [20] Shunichi Sohma, Toshio Watanabem, Tomohiro Shibata, et al. Compact and lower power consumption 16×16 optical matrix switch with silica-based PLC technology [C]//Opt. Fiber Conf., 2005, OThV4.