

文章编号: 1005-5630(2024)02-0069-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202303120054

## 二氧化硅平面波导集成光开关器件研究

郭松<sup>1</sup>, 袁硕<sup>1</sup>, 陈益姝<sup>1</sup>, 玄洪文<sup>2</sup>, 冯吉军<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 广东大湾区空天信息研究院, 广东 广州 510535)

**摘要:** 基于二氧化硅平面光波导平台, 设计并制作了一种多模干涉马赫曾德型的低功耗热光开关。该器件结合了多模干涉耦合器的稳定性及二氧化硅波导和热光开关的低损耗等优势。经仿真, 对器件参数进行了优化, 并讨论了金属层与波导的间距对传输光强及功耗的影响。测试结果表明, 该器件的结构稳定, 偏振依赖小, 插入损耗低于 2 dB, 能够实现开关的转换, 功耗为 450 mW 左右, 开关响应时间为 103  $\mu$ s 和 113  $\mu$ s, 在 1564 nm 工作波长下消光比超过 16 dB, 尺寸为 2.30 cm $\times$ 0.25 mm。该器件不仅与互补金属氧化物半导体工艺相兼容, 同时与光纤之间也有较好的兼容性。二氧化硅波导光开关器件具有成本低, 产量大, 性能稳定的优势, 能给光通信及光计算的未来发展提供可靠的基础。

**关键词:** 平面光波导; 多模干涉器; 热光开关; 光通信; 光计算

**中图分类号:** TN 256 **文献标志码:** A

## Research on silicon dioxide planar waveguide integrated optical switch devices

GUO Song<sup>1</sup>, YUAN Shuo<sup>1</sup>, CHEN Yishu<sup>1</sup>, XUAN Hongwen<sup>2</sup>, FENG Jijun<sup>1</sup>

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Greater Bay Area Branch of Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510535, China)

**Abstract:** Based on the silicon dioxide planar waveguide platform, a low power thermo-optical switch with multi-mode interference Mach-Zender is designed and fabricated. This device combines the stability of multi-mode interference coupler with the advantages of silicon dioxide waveguide and thermo-optical switch. The device parameters are optimized by simulation and the influence of the distance between the metal layer and the waveguide on the transmitted light intensity and power consumption is discussed. The test results show that the device has stable structure, small polarization dependence, insertion loss less than 2 dB. It can realize switch

收稿日期: 2023-03-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFE0107400); 国家自然科学基金 (11774235, 61705130, 11933005); 上海市高校特聘教授 (东方学者) 岗位计划 (GZ2020015)

第一作者: 郭松 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为矩阵光开关。E-mail: 1774062054@qq.com

通信作者: 冯吉军 (1984—), 男, 教授, 研究方向为集成光电子器件。E-mail: fjijun@usst.edu.cn

conversion. The power consumption is about 450 mW. The switching response time is 103  $\mu\text{s}$  and 113  $\mu\text{s}$ . The extinction ratio is more than 16 dB at 1 564 nm wavelength, and the size is 2.3 cm $\times$ 0.25 mm. The device is not only compatible with CMOS technology, but also has good compatibility with optical fiber. Due to the advantages of low cost, large output and stable performance, the silicon dioxide waveguide optical switching devices provide a solid foundation for the development of optical communication and optical computing in the future.

**Keywords:** planar optical waveguide; multimode interferometer; thermo-optic switch; optical communication; optical computing

## 引 言

随着“互联网+”的广泛应用, 云端互联使得数据网络井喷式发展, 大量的信息交互需要更快的数据交换速率<sup>[1]</sup>。在光通信网络中, 光开关处理数据信号的物理切换和逻辑操作的速率优于传统的电子器件<sup>[2]</sup>, 所以利用全光技术替代电子半导体来打破摩尔定律及解决冯·诺伊曼架构问题是非常具有潜力的<sup>[3]</sup>。在光通信领域, 光开关是全光网络中光分插复用系统和光交叉连接系统的核心器件<sup>[4]</sup>。在光计算领域, 光开关是实现数据传输切换或进行逻辑操作不可或缺的部分。二氧化硅平面光波导(planar lightwave circuit, PLC)技术具有与互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)工艺兼容的优点, 被大量用于集成光波导器件的制作中<sup>[5-8]</sup>。相较于硅基波导, 二氧化硅波导具有更好的物理和化学稳定性, 与光纤之间有良好的兼容性, 其成本低廉, 可以大规模量产。平面光波导技术的这些优势使得其在未来技术的发展中具有很大的潜力<sup>[9]</sup>, 且伴随着全光网络的发展, 器件集成在平面波导上的研究变得更有价值。

2017年, Wang等<sup>[10]</sup>对基于平面光波导技术2 $\times$ 2马赫曾德干涉型热光开关展开研究, 讨论定向耦合器结构的功率分配比误差(偏离0.5)对开关性能的影响, 分析波导尺寸与折射率之间的相互关系和波导宽度与折射率之间的误差补偿。当器件插入损耗为1.5 dB以下, 消光比大于20 dB, 开关功率约510 mW时, 该器件可实现的平均容差率为 $\pm 5.0\%$ 。此工作旨在改进器件

的加工容差范围。2021年, Duan等<sup>[11-12]</sup>设计了一种2 $\times$ 2高速热光开关, 是由多模干涉马赫曾德型光开关级联构成。金属加热器位于波导一侧平板区, 移相臂用横向支撑的脊型悬挂波导来提高热调谐效率。结果表明, 开关功耗仅1.07 mW, 开关时间为4.7  $\mu\text{s}$ , 消光比为3 dB, 光损耗约0.5 dB。与传统热光开关相比, 改变加热调制方式可使其品质因子提高了一个数量级。该研究在网络重构和片上互连中具有潜在的应用前景。

硅和氮化硅虽然器件集成度高, 但它们具有很强的偏振依赖性, 其耦合传输损耗较高, 加工精度要求高<sup>[13-14]</sup>。而二氧化硅波导尺寸为数微米, 加工较为简易, 与单模光纤有着相似的折射率和模场直径, 且偏振依赖小, 耦合传输损耗低<sup>[15]</sup>, 但其热光系数相对硅和氮化硅来说较小<sup>[16-18]</sup>, 开关功耗会更大。因此, 本文提出基于二氧化硅平台的多模干涉马赫曾德型光开关, 将光开关器件应用于平面波导技术<sup>[19]</sup>, 结合对称热光开关<sup>[20]</sup>进行研究。针对多模耦合器的结构参数设计<sup>[21]</sup>, 利用仿真进行优化, 使整体设计更加高效, 成本相对更低。采用时域有限差分法进行数值分析, 根据耦合模理论设计耦合器的重要参数, 并对其进行验证。所制备的二氧化硅芯片整体呈对称结构, 长和宽分别为2.3 cm和0.25 mm。测得2个开关臂被溅射的金属钛长度为1.41 mm。随后对其静态性能、电压调制特性和调制响应频率进行表征。结果表明, 在二氧化硅平面波导上, 它能实现光开关的低偏振敏感传输和通道选通。该光开关器件功耗低, 响应速度较快, 能和其他半导体器件很好地集成, 在拓扑集成之后, 它将在光通信和光计算领域拥有巨大的应用前景<sup>[22-25]</sup>。

# 1 平面波导光开关的设计、仿真与制备

## 1.1 光开关结构和原理

马赫曾德干涉结构有集成度高,开关时间短,窗口平滑,体积小等优势;多模干涉耦合器(multimode interference, MMI)有频带宽,插耗

低,偏振不敏感,制作容差大和工艺简单等优势,两者在集成光子器件中应用广泛。本文介绍的 $2 \times 2$ 多模干涉马赫曾德热光调制光开关,其整体结构对称,示意图见图1。输入光进入多模干涉耦合器后,因自镜像效应,被分成2束能量相同但相位差是 $\pi/2$ 的光。均分的光进入参考臂和调制臂。每条臂都溅射了金属电极,并留出引脚作电压调制使用。均分的光再由多模干涉耦合器合束。

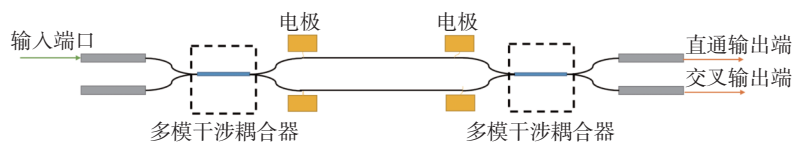


图1 对称 $2 \times 2$ 多模干涉耦合器型光开关结构示意图

Fig. 1 Symmetrical  $2 \times 2$  structure of multimode interference coupler optical switch

不使用调制臂调制时,2束光从器件的交叉端输出。使用一侧调制臂进行相位调制,即用金属探针向电极上施加不同的电压以产生热量,让调制臂波导的折射率发生改变。调制光束与通过参考臂的光束形成 $\pi$ 相位的差,此时光开关的交叉状态转换为直通状态。热光调制产生热量的原理是,由于在波导上溅射了一层金属薄膜形成加热移相器,加热移相器工作后使调制臂的温度升高,从而导致该处波导折射率发生改变,使得调制后的两光束产生相应的相位差<sup>[26]</sup>。对于二氧化硅波导,在基膜热光系数相似时,波导长度的变化对相位的改变可忽略不计,可近似简化得出相位差变化为 $\pi$ 时波导有效折射率的变化<sup>[27]</sup>,由此得出导热过程中相位调制变化和波导结构之间的关系。

## 1.2 光开关设计与优化

多模干涉耦合器的结构示意图和波导截面示意图如图2所示。多模干涉耦合器由矩形波导和梯形波导组成,器件可实现光场的均分与合束,让进入参考臂和调制臂的光强相等。其理论基础为自映像,即当光从窄波导传输到宽波导中时,在两者的交界处介电常数发生变化,折射率突变导致高阶模触发,再利用有效折射率等方法进行模式分析。由本征模式的正交性推得波导内光场为本征模展开的傅里叶级数,高阶模在满足一定

的相位条件后会以干涉的方式消除,只留输入光模式,消除的点叫做自成像点<sup>[28]</sup>。

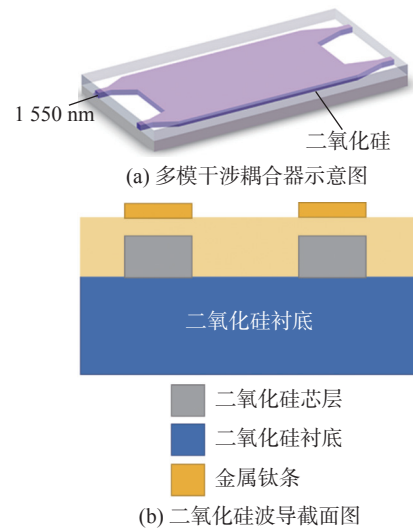


图2 平面光波导光开关多模干涉耦合器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multimode interference coupler of plane light waveguide light switch

通过计算自成像距离,代入1550 nm的工作波长,得到相应的拍长,从而计算出多模干涉耦合器的耦合长度<sup>[29]</sup>。将计算所得器件参数代入光束传播仿真软件中进行初步仿真,通过对光束传播光场图的结果进行分析讨论,得到耦合器的大致结构参数。由于该参数不够精细,且本研究希望该对称多模干涉耦合器能将通过光开关臂的2束光合束,使其从单端口输出,实现最优情

况，所以换用时域有限差分法对结构参数进行优化。将光束传播仿真得到的参数导入有限时域差分软件中，对其结构参数进行优化之后，使用有限时域差分法继续对多模干涉耦合器进行仿真优化，多次优化仿真参数后得到了一组最优的参数。图 3 所示为优化后耦合器输出的光场分布图。多次优化导致多模干涉耦合器结构长度较之前有所增加，但大尺寸结构更适用于二氧化硅平面波导。最终耦合器的大小设计为：长 2.3 mm，宽 60  $\mu\text{m}$ ，主要结构参数如表 1 所示。

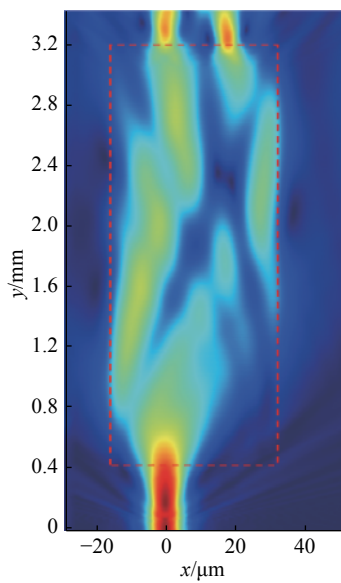


图 3 有限时域差分法优化后的光场传播图

Fig. 3 Optical field propagation after finite-difference time-domain optimization

表 1 耦合器的主要参数

Tab. 1 Parameters of coupler

多模干涉耦合器设计参数	数值
通道数目	2
波导中心波长/nm	1550
锥度宽度/ $\mu\text{m}$	10.5
输入端口宽度/ $\mu\text{m}$	7
耦合区域长度/mm	2.3
耦合区域宽度/ $\mu\text{m}$	60
中间耦合区宽度/ $\mu\text{m}$	48

在优化好耦合器参数后，对调制臂上金属钛和波导距离的参数进行仿真，以确定其最佳的间

距，两者的分布见图 2 (b)。在仿真软件中将二氧化硅波导和金属钛的参数设置好，以 0.1  $\mu\text{m}$  为步长，从间距 0  $\mu\text{m}$  开始对间距和传输效率的关系进行仿真验算，仿真计算至 3  $\mu\text{m}$  时可获得大致结论。导出仿真的数据点，用作图软件将它们拟合成曲线，结果如图 4 所示。由此分析得，金属钛和波导的间距超过 2.5  $\mu\text{m}$  之后，距离对波导的影响已经不大。当间隔距离太近时，金属会吸收光，导致损耗加大；当间隔距离太远时，热光调制的效率很低，同时也会增加器件的损耗。所以选择 2.5  $\mu\text{m}$  作为两者的间距，用这个最佳间距做波导的包覆层，这样可以实现低功耗的平面波导光开关。

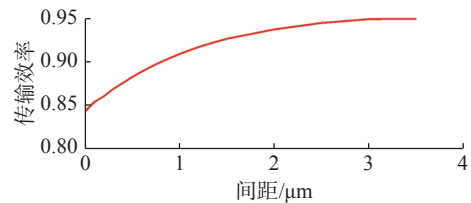


图 4 金属钛和波导的间距与传输效率曲线

Fig. 4 Distance between metal titanium and waveguide and transmission efficiency

### 1.3 光开关的制备

通过仿真设计优化得到平面波导光开关的设计参数，用以对结构进行流片。二氧化硅的平面波导制片流程和使用硅或氮化硅的流程相似，通过光刻、显影和反应离子刻蚀来制备。制备时，先在石英晶片上生长一层掺锗氧化硅作为芯层，再镀上一层铬膜，进行光刻和显影，显影出图案之后通过反应离子刻蚀 (reactive ion etching, RIE) 去除铬膜，除去胶后再刻蚀芯层氧化硅，最后用火焰水解沉积 (flame hydrolysis deposition, FHD) 约 20  $\mu\text{m}$  厚的二氧化硅包覆层。这个包层可以提供足够的折射率修改范围、平滑的膜轮廓、低传播损耗、低耦合和反射损耗。制备成的波导截面见图 2。将波导切割成小尺寸后进行抛光打磨。波导具有 1 个锗掺杂的石英芯，其截面是边长为 6.5  $\mu\text{m}$  的正方形。最终制备出的实验所需的二氧化硅平面波导芯片，其光开关尺寸为：长 2.3 cm，宽 0.25 mm。平面波导光开关结构实物图和电极显微镜图见图 5。由于器件为二



氧化硅波导, 在电极显微镜图中只能看到其电极结构, 无法清晰观察到波导。加入反射棱镜后观察波导结构, 发现波导结构较长, 用显微镜下的最小倍数仍无法观察其全貌, 只能使用相机来观察它的整体结构, 用显微镜观察其局部结构。图 5 的下半部分为金属电极的 5 倍显微镜图, 图中金属钛的长度为 1.41 mm, 钛条两侧为磁共溅射的金薄膜, 用于给探针组施加电压。此模块长、宽分为 220  $\mu\text{m}$  和 150  $\mu\text{m}$ 。金属钛的电阻率  $\rho = 4.2 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ , 整体加热模块电阻由钛条与金薄膜产生, 实际测量电阻约为 220  $\Omega$ 。

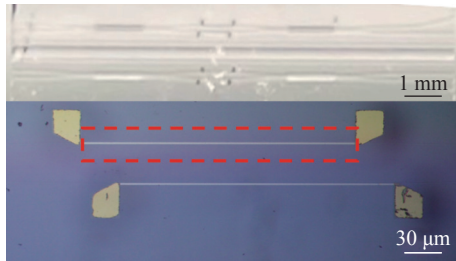


图 5 平面波导光开关实物图和电极显微镜图

Fig. 5 Picture of planar waveguide optical switch and electrode microscope

## 2 平面波导光开关性能测试

### 2.1 光开关性能表征

在芯片制作完成后, 对其进行性能表征, 实验装置如图 6 所示。对二氧化硅平面光波导芯片进行超声清洗后, 将芯片放置在三维平台上, 利用气泵将芯片与平台之间吸真空, 使芯片牢牢固定在耦合平台上。光源的输入使用的是放大的自发辐射光源(amplified spontaneous emission, ASE),

波长范围是 1 520~1 620 nm, 输出功率约为 10 mW。输入光纤选用锥头或阵列波导光纤, 输出光纤选用平头光纤, 调整三维位移平台后让输入输出光纤和待测芯片位于同一水平, 此过程中通过红外显微镜进行实时观察。三维平台精度高于 100 nm, 红外显微镜可放大 5~20 倍, 两者结合保证芯片能精确耦合。

输出光纤接收到的通过芯片耦合之后的光, 经过一个机械开关可选择性地传输给功率计或光谱分析仪。先用功率计结合屏幕上的红外成像对芯片进行耦合操作, 当功率计示数耦合至最大时, 拨动机械开关将输出光信号导通至光谱仪中, 并使用光谱仪软件的扫描程序将光谱以及光谱数据读出并保存。再测试只经过传输波导损耗后得到的参考光谱, 通过软件将光谱数据归一化处理, 得到图 7。测试期间, 通过调整偏振控制器来观察耦合输出功率, 发现器件对偏振不敏感。从性能表征的透射光谱图可以看出, 未进行调制时交叉端是导通的, 直通端是关闭的。实际制备器件的最佳工作波长为 1 564 nm。在此波长下, 光开关的消光比为 16 dB。

### 2.2 光开关调制性能测试

通过观察实验表征出的透射光谱发现, 制作的平面波导光开关在 1 564 nm 波长下的传输最佳, 所以进行电压调制实验时, 将宽谱光源换成可调谐激光器作为输入, 选用 1 564 nm 波长的光输入。通过掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)将输入光功率放大, 使得耦合出的功率更大。输入光放大后经过偏振控制器输入到二氧化硅芯片上, 利用三维位移平台将

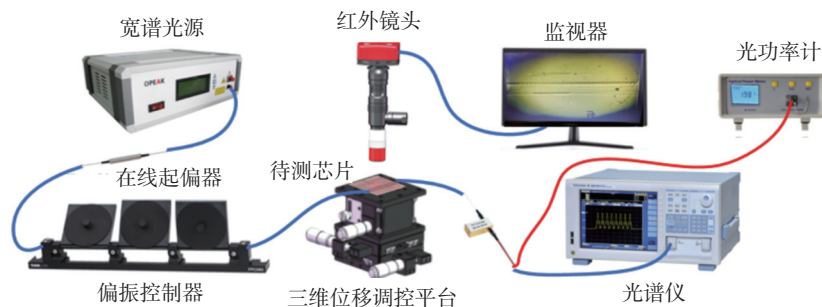


图 6 性能表征流程示意图

Fig. 6 Flow diagram of the performance characterization

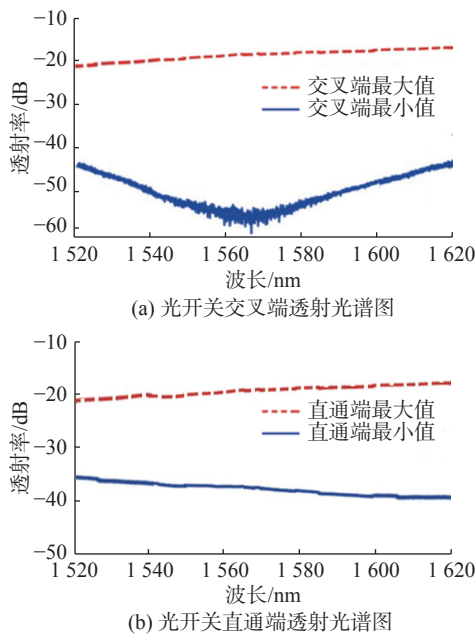


图 7 平面波导光开关交叉段与直通端透射光谱图  
 Fig. 7 Transmission spectrum of cross and bar of planar waveguide optical switch

输入光耦合进芯片中，然后将机械开关调至光谱分析仪。把探针组放置在调制臂的电极上，通过恒流电压源(0~12 V)向探针组施加电压，施压范围为 0~10 V，步长为 1 V。每次增加电压后，记录光谱参数，分别对直通端和交叉端进行加电压调制，整合数据拟合成曲线图，如图 8 所

示。由图可得，随着电压的增加，交叉端功率随之下降，直通端功率随之上升，即光开关的选通随之交替。这表明，制作的二氧化硅平面波导光开关调制结果和预期相符，能够实现基本的通道选通，从而能完成光路中基本的光交换功能。由图 8 可知，开关转换时电压为 10 V 左右，代入测得的电阻可知，功耗约为 450 mW，对比二氧化硅平面波导上的开关，此功耗优势明显。

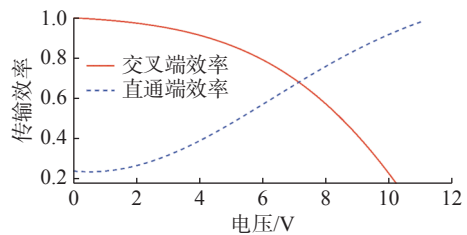


图 8 相位调制光强随电压变化图  
 Fig. 8 Variation of phase modulated light intensity with voltage

针对光开关调制响应的时间也进行了测试，以保证光开关能在较快的时间内完成电压调制相位，即开关通道转换。相位调制响应时间的测试实验示意图如图 9 所示，使用信号发生器分别向探针组和示波器发送方波信号作为触发信号和同步信号，可调谐激光器依旧使用最佳工作波长为 1 564 nm 的输入。

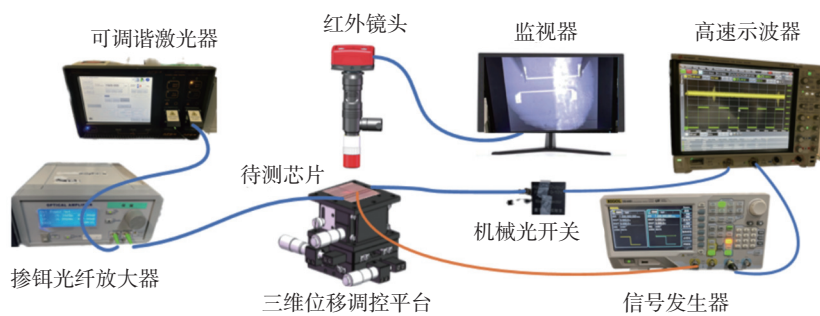


图 9 相位调制响应时间测试回路示意图  
 Fig. 9 Schematic diagram of the phase modulation response time test circuit

测试时，探针组输入占空比为 50%，高电压 10 V 的方波信号作为触发，输出光由光电转换器转成电学信号，接入数字示波器里。示波器上会实时显示信号发生器同步过来的方波和经过芯片的方波，通过 1 个包络的上升时间和下降时间来分析光开关的响应速度。将响应曲线的数据

导出处理后得到的包络如图 10 所示，芯片响应的上升时间和下降时间分别为 103  $\mu$ s 和 113  $\mu$ s。上升及下降时间略长，说明二氧化硅的导热性能不足以影响相位的调制性能。替换更佳的金属材料或对包层处的二氧化硅做掺杂以提升热光调制的性能，有助于改善开关的上升及下降时间。

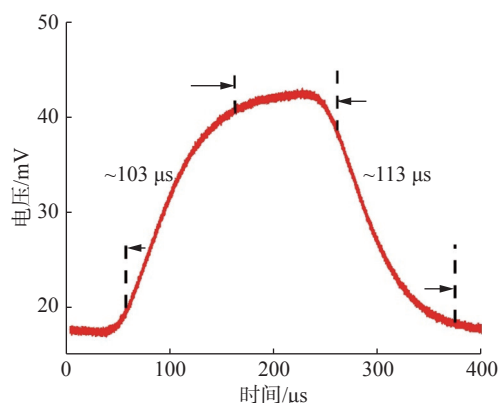


图 10 光开关响应时间曲线图

Fig. 10 Response time of the optical switch

### 3 结 论

本文在二氧化硅平面波导上设计了一款多模干涉耦合器的低功耗  $2 \times 2$  马赫曾德干涉光开关, 制备该芯片并对其进行实验表征和调试测试。其在  $1564 \text{ nm}$  的波长下能够实现超过  $16 \text{ dB}$  的消光比。由于制备过程中存在误差, 工作波长与设计波长有些许出入, 但光开关的开关状态与理论一致, 光开关的响应速度在百微秒左右。该结构可靠性高, 加工简易, 成本低, 偏振依赖小, 耦合传输损耗低, 功耗仅为  $450 \text{ mW}$ 。改进芯片制备工艺能使波导截面处更加平滑, 镀金属电极能减少损耗, 光开关的性能将进一步得到提升。更加先进的制造技术可使器件性能加强。通过拓扑集级联形成的多端集成芯片, 配合优化算法实现开关路由, 这在未来全光器件的光通信及光计算领域将会发挥重要作用。

#### 参考文献:

- [1] KUMAR A, GUPTA M, PITCHAPPA P, et al. Phototunable chip-scale topological photonics: 160 Gbps waveguide and demultiplexer for THz 6 G communication[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5404.
- [2] CABANES V D, VAN DYCK C, OSELLA S, et al. Challenges for incorporating optical switchability in organic-based electronic devices[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(24): 27737 – 27748.
- [3] 孙小强, 刘崧岳, 李鹏飞, 等. 硅基光开关及阵列研究进展 [J]. *半导体光电*, 2022, 43(2): 207 – 217.
- [4] 查英, 孙德贵, 刘铁根, 等. 扩展 BANYAN 网络的可重构无阻塞  $8 \times 8$  矩阵光开关 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1): 50 – 56.
- [5] TAKAHASHI M, YAMASAKI S, UCHIDA Y, et al. Compact and low-loss  $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$  PLC-Based  $8 \times 8$  multicast switch for CDC-ROADM application[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(8): 1712 – 1716.
- [6] KUDO M, OHTA S, TAGUCHI E, et al. A proposal of Mach-Zehnder mode/wavelength multi/demultiplexer based on Si/silica hybrid PLC platform[J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 168 – 172.
- [7] HONJO T, INOUE K, SAHARA A, et al. Quantum key distribution experiment through a PLC matrix switch[J]. *Optics Communications*, 2006, 263(1): 120 – 123.
- [8] CHERCHI M, HARJANNE M, YLINEN S, et al. Flat-top MZI filters: a novel robust design based on MMI splitters[C]//Proceedings of SPIE 9752, Silicon Photonics XI. San Francisco: SPIE, 2016: 975210.
- [9] NIRLAULA B B, RIZAL C. Design of a  $2 \times 4$  Hybrid MMI-MZI configuration with MMI phase-shifters[J]. *Materials*, 2019, 12(9): 1555.
- [10] WANG J, YI J, GUO L J, et al. Improved silica-PLC Mach-Zehnder interferometer type optical switches with error dependence compensation of directional coupler[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 89: 208 – 213.
- [11] 周林杰, 陆梁军, 郭展志, 等. 集成光开关发展现状 & 关键技术 (特邀)[J]. *光通信研究*, 2019(1): 9 – 26.
- [12] DUAN F, CHEN K, CHEN D, et al. Low-power and high-speed  $2 \times 2$  thermo-optic MMI-MZI switch with suspended phase arms and heater-on-slab structure[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(2): 234 – 237.
- [13] 马琼芳, 黄永清, 黄辉, 等. 一种基于多模干涉耦合器的集成光开关研制 [J]. *光电子·激光*, 2010, 21(9): 1276 – 1279.
- [14] 杨长屹, 黄永清, 黄辉, 等.  $2 \times 2$  InP/InGaAsP MMI-MZI 型光开关设计与实验 [J]. *电子器件*, 2009, 32(3): 485 – 488.
- [15] CHEN J, FENG J J, LIU H P, et al. Femtosecond laser modification of silica optical waveguides for potential bragg gratings sensing[J]. *Materials*, 2022, 15(18): 6220.
- [16] SUN X Y, FENG J J, ZHONG L M, et al. Silicon nitride based polarization-independent  $4 \times 4$  optical matrix switch[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019,

- 119: 105641.
- [17] DING M S, WONFOR A, CHENG Q X, et al. Hybrid MZI-SOA InGaAs/InP photonic integrated switches[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(1): 3600108.
- [18] SUZUKI K, KONOIKE R, SUDA S, et al. Low-loss, low-crosstalk, and large-scale optical switch based on silicon photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 233 – 239.
- [19] SUZUKI K, KONOIKE R, HASEGAWA J, et al. Low-insertion-loss and power-efficient  $32 \times 32$  silicon photonics switch with extremely high- $\Delta$  Silica PLC connector[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 116 – 122.
- [20] GAO L, SUN J, SUN X Q, et al. Simulation and optimization of a polymer  $2 \times 2$  multimode interference-Mach Zehnder interferometer electro-optic switch with push-pull electrodes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(1): 85 – 92.
- [21] LIAO M, WU B, Huang W, et al. Synchronous driving scheme for silicon-based optical switches to critically compensate for thermo-optic effect in carrier injection[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2): 205 – 210.
- [22] SHASTRI B J, TAIT A N, DE LIMA T F, et al. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 102 – 114.
- [23] ZHOU H L, ZHAO Y H, WANG X, et al. Self-learning photonic signal processor with an optical neural network chip[Z]. *ACS Photonics*, 2020, 7: 792 – 799.
- [24] TANIZAWA K, SUZUKI K, TOYAMA M, et al. Ultra-compact  $32 \times 32$  strictly-non-blocking Si-wire optical switch with fan-out LGA interposer[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17599 – 17606.
- [25] SHOKRANEH F, GEOFFROY-GAGNON S, LIBOIRON-LADOUCEUR O. The diamond mesh, a phase-error- and loss-tolerant field-programmable MZI-based optical processor for optical neural networks[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23495 – 23508.
- [26] DIEMEER M B J. Polymeric thermo-optic space switches for optical communications[J]. *Optical Materials*, 1998, 9(1/4): 192 – 200.
- [27] SOLDANO L B, PENNINGE E C M. Optical multimode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(4): 615 – 627.
- [28] 马春生, 刘式墉. 光波导模式理论 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2006.
- [29] 孙一翎, 江晓清, 王明华. 多模干涉耦合器重叠成像特性分析 [J]. *光电子·激光*, 2004, 15(2): 134 – 137.

(编辑: 李晓莉)