

doi: 10.3788/gzxb20144302.0213001

硅基矩形结构马赫-曾德 2×2 热光开关的设计与仿真

刘克¹, 牟思璇¹, 黄晖¹, 崔永浩²

(1 北京工业大学 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

(2 Department of Electrical Engineering, University of Texas at Dallas, Richardson, TX 75080, USA)

摘 要: 高速光开关是实现光传输路径变换的关键器件之一. 对于目前马赫-曾德型光开关本身占据的尺寸较大或者在一维方向上尺度较长的缺点, 提出了一种利于高度集成的矩形马赫-曾德 2×2 光开关单元结构. 器件由基于受抑全内反射原理的沟槽型微纳分光/合光器和 90° 弯曲波导的 L 型参考/相移臂两者构成, 极大地减小了由此构成的马赫-曾德光开关器件的尺寸. 利用硅的热光效应, 举例设计了开关器件的 L 型相移臂上升 50°C 实现 π 相移时需要的总长度约为 $84 \mu\text{m}$. 同时采用有限元法分析得到在 NiCr 金属电极加热器上施加电压 3.5 V 时, 可以使相移臂内的脊波导层上升温度约为 50°C ; 模拟了介质覆盖上包层不同 SiO_2 厚度时的时间响应特性, 选用上包层 SiO_2 厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 时得到器件上升时间 $35 \mu\text{s}$ 、下降时间 $48 \mu\text{s}$ 的开关速度. 最后使用 Rsoft FullWAVE 软件模块时域有限差分法仿真验证了热光开关器件的开关功能. 设计的硅基矩形结构马赫-曾德 2×2 热光开关的平面尺寸为 $56 \times 38 \mu\text{m}^2$. 器件具有高效紧凑的特点, 使其布局配置易于向二维方向扩展, 并潜在应用于硅基高密度光子集成回路及片上光互连系统.

关键词: 集成光学; 光学器件; 有限元法; 时域有限差分法; 热光开关; 马赫-曾德干涉仪; 受抑全内反射; 90° 弯曲波导

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0213001-6

Design and Simulation of Silicon-based Rectangular Mach-Zehnder 2×2 Thermo-optical Switch

LIU Ke¹, MU Si-xuan¹, HUANG Hui¹, CUI Yong-hao²

(1 Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2 Department of Electrical Engineering, University of Texas at Dallas, Richardson, TX 75080, USA)

Abstract: High speed optical switches are critical components in the realization of light transmission path switching technology for optical networks. Current Mach-Zehnder Interferometer type optical switches either occupy larger footprint or have a longer one-dimensional scale. A Silicon-based rectangular Mach-Zehnder 2×2 thermo-optical switch unit is proposed for the highly integrated applications. The novel optical switch consists of trench-based nanophotonic frustrated total internal reflection couplers and total internal reflection mirror-based 90° waveguide bends. The switching operation is achieved through thermo-optical effect of Silicon. As a design example, the $\sim 84 \mu\text{m}$ long L-shape phase-shifting arm is determined for π phase shift when its temperature of the arm is increased up to 50°C . A switching voltage of 3.5 V on a NiCr metal electrode heater is obtained by using finite element method. The voltage may

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61377059)、教育部留学回国人员科研启动基金资助项目、北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(No. 002000543113508)、北京工业大学“京华人才”支持项目(No. 002000543113526)和北京工业大学博士科研启动基金项目(No. 002000543112533)资助

第一作者: 刘克(1973.9—),男,教授,博士,主要研究方向为集成光子学材料与器件. Email:liuke@bjut.edu.cn

收稿日期: 2013-07-02; **录用日期:** 2013-08-26

<http://www.photon.ac.cn>

lead to the increase of 50°C for an optical ridge waveguide in the L-shape phase-shifting arm. The time response of the device is simulated as a function of different upper dielectric thickness of SiO_2 , and the response time including raise time of $35\ \mu\text{s}$ and fall time of $48\ \mu\text{s}$ is optimized for the device with $0.5\ \mu\text{m}$ thickness of upper SiO_2 . The switching function of the thermo-optical switch is simulated and verified by Rsoft FullWAVE software, a finite difference time domain method. The chip size of $56 \times 38\ \mu\text{m}^2$ is designed for the Silicon-based rectangular Mach-Zehnder 2×2 optical switch. The device is ultra-compact, and its configuration is beneficial to extend at two-dimensional directions, making them attractive for Silicon-based high dense photonic integrated circuits and on-chip optical interconnect system.

Key words: Integrated optics; Optical devices; Finite element method; Finite difference time domain method; Thermo-optical switch; Mach-Zehnder interferometer; Frustrated total internal reflection; 90° waveguide bend

OCIS Codes: 130.0130; 230.3120; 230.2090

0 引言

光开关是实现光传输路径变换的关键器件,被广泛应用于光链路层的光交叉连接器、光分插复用器、光网络监控以及片上光互连等方面^[1-2]. 新一代器件的特征是它们在光域性能的提高和多功能的集成^[3-4]. 近几年随着低成本和高性能光芯片的需求,基于光子集成回路(Photonic Integrated Circuits, PIC)的单片光器件逐渐得到业界的广泛关注. 例如作为业界先驱美国 Infinera 公司的产品在单一芯片上实现 100Gb/s 密集波分复用系统展示了 PIC 技术的实用性和强大的市场竞争力^[5]. 大规模基于光子集成技术的开关阵列是光网络节点实现光交叉连接和光上下路复用器的核心部件,通常由 2×2 光开关单元按一定的拓补结构级联而成^[6-8].

目前光通信网络中实用化的光开关主要有机械式光开关、微机电光开关和波导型光开关. 基于集成波导技术的光开关在响应速度、器件体积和性能稳定性等方面显示了极高的应用前景,对构成高密度 PIC 或者片上光互连系统而言具有独特的优势. 典型的波导型光开关有定向耦合器型、马赫-曾德干涉型(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)、多模干涉耦合器型和 X 结/Y 分支全内反射型等. 其中 MZI 型是应用最为广泛的开关结构,国内基于 GaAs、InP 和 Polymer 材料的 MZI 型光开关均有报道^[9-11]. 硅材料因热光系数较大被认为是热光开关的最佳材料,同时制备的光开关具有工艺简单、产品成品率高、没有伴随的附加损耗、利于做成集成开关阵列等特点,也是目前较为成熟的商品化开关. 中科院半导体所报道的最快硅基热光开关已经达到亚微秒量级的时间响应^[12].

对于硅基 MZI 型光开关,人们为提高速度、降低功耗以及减小器件尺寸,尝试了多种马赫-曾德开关的光学结构及开关方式. 如采用多模干涉耦合器作为常规 MZI 结构中分光/合光器的热光开关^[13]; 采用定向耦合器和折叠硅纳米线波导作为相移臂的热光开

关^[14]; 采用定向耦合器和悬浮波导相移臂的低功耗热光开关^[15]; 采用定向耦合器和 Polymer/Silica 混合集成波导相移臂的热光开关等^[16]. 尽管这些新型马赫-曾德热光开关展示了不同的技术特色,如高的开关速率/较低的功耗等,但是器件普遍存在占据的单片尺寸较大或者一维方向上尺度仍然较长的问题,至少都是在毫米量级,不利于提高硅基光子回路芯片内分立元件的集成数量. 因此在技术上需要实现一种二维方向上占据面积更小的高速低功耗光开关.

本文提出了一种基于沟槽的微纳分光/合光器和 90° 弯曲波导两者构成的矩形马赫-曾德 2×2 热光开关的光学结构. 首先介绍了其构成并分析了工作原理,计算了等功分比分光/合光器所用沟槽填充不同介质材料时的开口宽度和波导材料折射率的关系. 举例设计了 L 型参考/相移臂的长度. 采用 COMSOL Multiphysics 有限元数值分析软件模拟了电极加热器的温度分布及器件的热响应速度,并确定了开关电压. 最后使用基于时域有限差分法的 Rsoft FullWAVE 仿真软件验证了器件的开关功能. 本文的创新之处在于采用基于受抑全内反射原理的沟槽型微纳光子耦合器替代马赫-曾德结构中的光耦合器,如常规的 Y 分支、定向耦合器或者多模干涉耦合器等,极大地减小了由此构成的开关器件的尺寸. 另外,跟传统相移臂长度只能向一维方向级联比较,L 型参考/相移臂便于器件在二维方向上扩展集成.

1 器件结构与工作原理

矩形结构马赫-曾德 2×2 热光开关器件如图 1,它由 3 dB 分光器, L 型波导参考臂/相移臂和 3 dB 合光器组成. 其中 3 dB 分光/合光器是在两条波导交汇处刻蚀与光波的传播方向成 45° 角微纳沟槽而构成. 沟槽型分光/合光器的工作原理均是利用光波的受抑全内反射(Frustrated Total Internal Reflection, FTIR)现象^[17],即从输入波导进入沟槽的光倏逝波与沟槽的宽度相比拟时,一部分倏逝波穿过沟槽到达对面的介质

界面而形成穿透光波;另一部分倏逝波通过古斯-汉欣位移现象而形成反射光波. 与传统 Y 分支、定向耦合器或者多模干涉耦合器比较,沟槽型微纳光子耦合器的平面尺寸和交叉波导的面积相当,极大地减小了器件的尺寸. 另外,L 型波导参考臂/相移臂是分别在拐角位置刻蚀与光波传播方向成 45°角的全反射切面而构成,从而形成 90°弯曲波导. 此设计能够在小区域范围内使光场传输方向发生较大改变. 跟传统相移臂长度只能向一维方向级联比较,L 型参考/相移臂便于器件在二维方向上扩展集成.

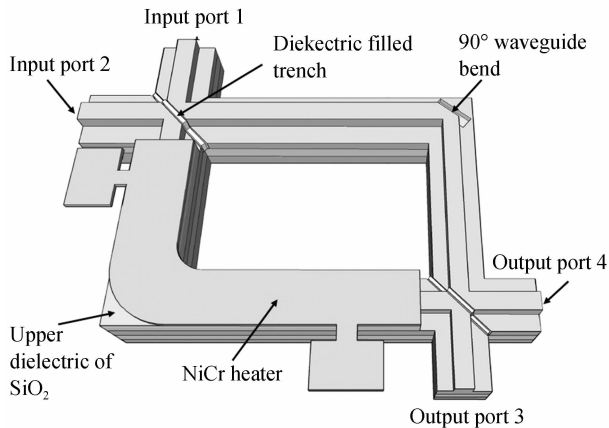


图1 硅基矩形结构马赫-曾德 2×2 热光开关

Fig. 1 Schematic of a Silicon based rectangular Mach-Zehnder 2×2 thermo-optical switch

通过焦耳效应的电-热方式是实现微纳光器件局部加热最有效的方法之一. 器件的工作原理是利用硅的热光效应引起波导层的有效折射率发生变化,从而对光波产生相位调制的作用. 实践上通过给金属薄膜电极加热器施加电压使其流经电流而产生焦耳热,由于电流的热效应使得 L 型相移臂的介质覆盖层 SiO₂ 和 Si 波导层的温度上升. 跟 L 型参考臂的相位比较,当 L 型相移臂的相位改变了 π 时,就实现了开关功能. 根据光波在不同的输入端口,可以控制光路在直通状态(端口 1→3, 2→4)与交叉状态(端口 1→4, 2→3)之间切换.

2 器件设计

2.1 沟槽开口宽度

考虑一平面波入射到两条波导交汇处的微纳沟槽,此时入射角应大于由波导材料和沟槽内填充材料的介质界面的全反射角. 根据波导模式的平面波近似法推导了反射光波的电场强度的通用解析表达式为^[17]

$$E_R(n_1, n_2, \theta_1, \theta_2, d) = [E_0(n_1^2 \cos^2 \theta_1 - n_2^2 \cos^2 \theta_2)] / \{ [n_1^2 \cos^2 \theta_1 + n_2^2 \cos^2 \theta_2 + 2n_1 n_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 (1 + e^{j2k_x n_2 d \cos \theta_2})] / (1 - e^{j2k_x n_1 d \cos \theta_1}) \} \quad (1)$$

式中, E_R 是反射光波的电场强度, E_0 是入射光波的电

场强度, n_1 是光波导的有效折射率, n_2 是填充沟槽的介质的折射率, θ_1 是光波的入射角, θ_2 是沟槽内光波的折射角, d 是沟槽的开口宽度.

图 2 为在 TE 偏振光下 3 dB 等功分比时的沟槽宽度与光波导折射率的关系,其中 Air, $n=1.0$; PMMA, $n=1.48$; SU-8, $n=1.57$; Sapphire, $n=1.75$; ZrO₂, $n=2.1$. 可见填充微纳沟槽不同的介质材料时,在等功分比条件下沟槽宽度将会不同. 在选定某种波导材料的情况下,填充折射率大的介质材料使沟槽开口宽度增大,进而缓解器件加工工艺的难度. 对于采用绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI)材料($n=3.45$)制备光波导而言,沟槽填充介质材料选用 SU-8 聚合物,此时需要的沟槽开口宽度拓宽为 120 nm.

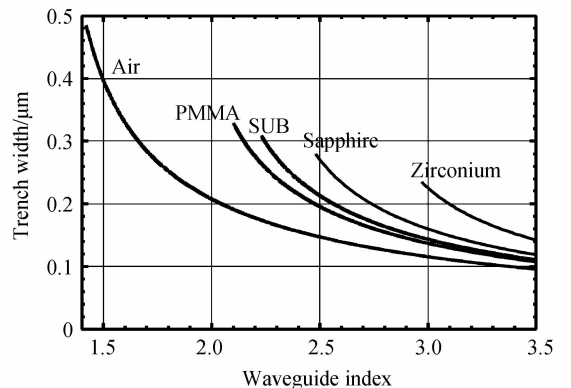


图2 填充沟槽不同的介质材料实现 TE 偏振光 3 dB 微纳分光器所需要的沟槽宽度

Fig. 2 Trench width required for 3 dB power splitting of TE polarized light as waveguide index varies for multiple dielectric filled in the trench

2.2 开关电压

硅材料具有较大的热光系数,在 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 时, $dn/dT=1.86 \times 10^{-4}/\text{K}$ ^[1]. 马赫-曾德尔结构 L 型相移臂的相位变化为

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta TL_w \frac{dn}{dT} \quad (2)$$

式中 λ 是光波的波长, L_w 是相移臂相位调制区域的长度, ΔT 是相移臂相位调制区域的温度变化. 利用式(2)计算通过马赫-曾德尔结构 L 型相移臂的光波的相移为 π 时, ΔTL_w 的乘积是恒定值. 本文设计举例当 L 型相移臂的温度上升了 50°C, 相移臂的相位调制区域的总长度约等于 84 μm 时可以实现开关的切换.

为了使马赫-曾德光开关的 L 型波导相移臂上升至需要的温度,同时考虑到金属电极加热器的热量向空气、介质覆盖 SiO₂ 层和波导芯层扩散的过程中必然导致热损耗,需要确定加热器上施加的电压值. 由于 NiCr 合金具有高的电阻值和熔点温度,器件采用 NiCr 合金作为电阻式加热器. 图 3 是 COMSOL 有限元仿真的不同施加电压条件下 NiCr 加热器的表面温度分布曲线,中间的凹陷来自于 L 型电极加热器拐角部分

的不均匀温度分布. 图 4(a)展示了施加电压 3.5 V 条件下 NiCr 加热器及附近介质的表面温度分布, 可见此时 NiCr 加热器直条部分的表面温度分布均匀, 约为 100 °C. 尽管 NiCr 加热器三处拐角位置存在温度分布不均匀的问题, 但是还能保证 L 型相移臂脊波导芯层的温度上升了 ~50 °C, 如图 4(b)所示, 从而满足开关条件.

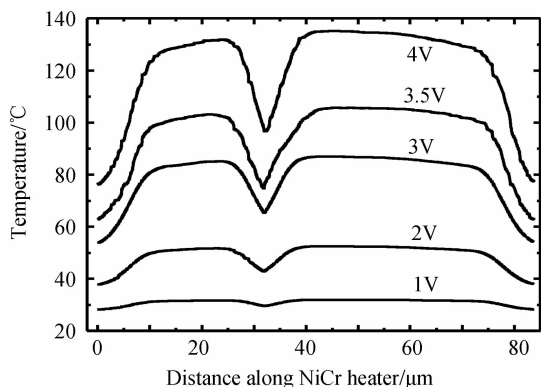


图 3 COMSOL 有限元仿真不同的施加电压条件下 NiCr 加热器的表面温度分布曲线

Fig. 3 Temperature profile on the surface of NiCr heater by COMSOL simulation at various applied voltages

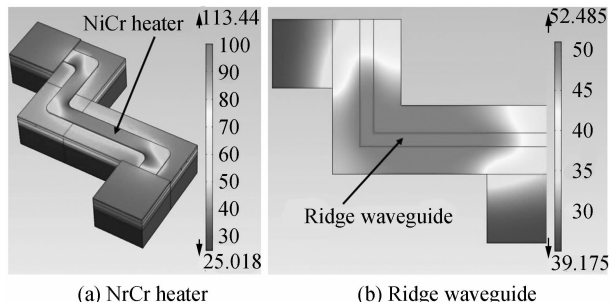


图 4 施加电压 3.5 V 时 COMSOL 有限元仿真 L 型相移臂的不同介质表面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution on the different dielectrics of the L-shape phase-shifting arm by COMSOL simulation at an applied voltage of 3.5 V

2.3 开关时间

图 5 是在介质覆盖上包层 SiO₂ 具有不同厚度时的 COMSOL 有限元仿真的相移臂热响应曲线, ΔT 表示相移臂上升的温度与室温之差. 插图显示了选用的波导相移臂的横截面示意图, h 表示介质覆盖脊波导内脊部分上包层 SiO₂ 的厚度. 可见器件的时间响应速度随着上包层 SiO₂ 厚度的减小而提高. 即减小波导芯层与电极加热器间的距离, 可以减小热光开关的开关时间. 但是考虑到太薄的介质覆盖层会使金属加热电极对波导中传输的光产生较大的损耗, 同时将引起波导中的模场与光纤中的模场失配, 从而增大波导与光纤的耦合损耗. 最后选定 $h = 0.5 \mu\text{m}$ 时, 器件上升时间为 $35 \mu\text{s}$, 下降时间为 $48 \mu\text{s}$. 一种基于多模干涉耦合器的 SOI 马赫-曾德 2×2 热光开关也获得了类似的开

关时间实验值^[18].

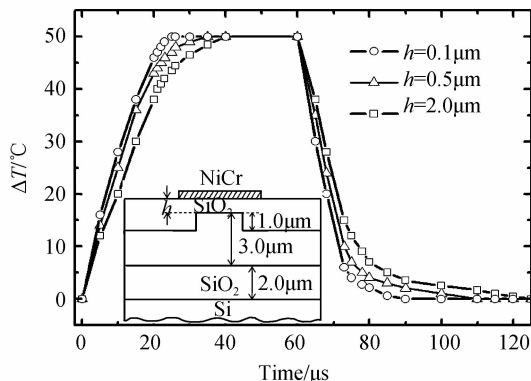
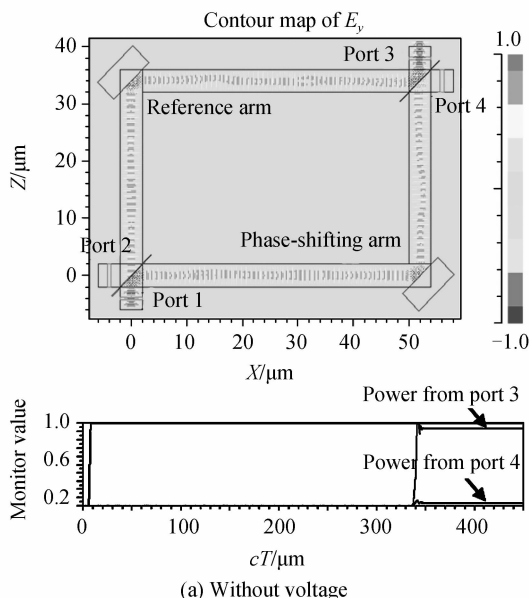


图 5 介质覆盖上包层不同 SiO₂ 厚度时的相移臂热响应曲线, 插图表示光波导相移臂的横截面示意图

Fig. 5 Thermal response curve of phase-shifting arm at different upper dielectric thickness of SiO₂, and inset shows a cross section of an optical waveguide of phase-shifting arm

3 器件功能仿真及讨论

采用基于时域有限差分 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 法的美国 Rsoft 公司 64 位 FullWAVE 仿真软件模拟验证了矩形结构马赫-曾德 2×2 热光开关器件的开关功能. 图 6(a) 和 (b) 分别是相位调制金属薄膜电极未施加电压和施加电压 3.5 V 两种情况下的热光开关的光场传输分布的对比图, 即电压控制实现器件输出端口 E_y 电场分量切换的时域有限差分模拟图. 输入的仿真参量如下: 输入光波长 $1.55 \mu\text{m}$, 脊形波导宽度 $4.0 \mu\text{m}$, 内脊高 $3.0 \mu\text{m}$, 外脊高 $2.0 \mu\text{m}$, 设计的大截面脊波导尺寸满足单模传输条件, 并使用 Rsoft 公司的光束传播法模式求解器做了验证. 介质覆盖内脊部分的上包层 SiO₂ 厚度为 $0.5 \mu\text{m}$; 脊形光波



(a) Without voltage

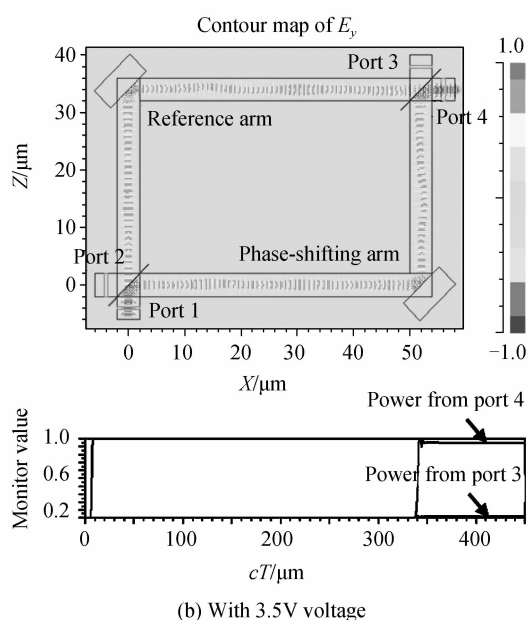


图6 硅基矩形结构马赫-曾德 2×2 热光开关电压控制相移臂使输出端口 E_y 电场分量切换的FDTD模拟图

Fig. 6 Switching simulation of E_y component of electric field from the port 3 and port 4 for a voltage-controlled rectangular Mach-Zehnder 2×2 thermal-optical switch

导的下包层 SiO_2 的厚度是 $2.0\ \mu\text{m}$;分光/合光器的微纳沟槽的宽度 $0.12\ \mu\text{m}$;沟槽填充介质材料SU-8聚合物的折射率是1.57;L型参考臂/相移臂总长度分别确定为 $84\ \mu\text{m}$,其中横向臂长 $52\ \mu\text{m}$ 且竖向臂长 $32\ \mu\text{m}$;相位调制金属薄膜电极NiCr合金的厚度 $0.5\ \mu\text{m}$,之上沉积Au金属膜厚度是 $0.2\ \mu\text{m}$.从光场分布情况可以看出,光波从输入端口1进入器件,由于未施加电压条件下参考臂和相移臂具有相等的折射率,所以光波从输出端口3输出.当施加电压 $3.5\ \text{V}$ 时,由于硅的热光效应增大了相移臂的折射率,当光波的相移变化为 π 时,光波从输出端口3切换到输出端口4输出,实现了器件的开关功能.

3 dB分光/合光器是矩形马赫-曾德光开关的核心部件,微纳沟槽的制备质量决定了由其构成的光耦合器的性能.Hermersdorf M.等人采用深度反应离子刻蚀和优化的Bosch工艺成功制备硅基开口宽度 $103\ \text{nm}$,深宽比高达19的微纳沟槽^[19].因此本文设计的开口宽度 $120\ \text{nm}$ 且具有类似深宽比沟槽的制备在实验上可行.Nordin G. P.研究组测量了SOI基沟槽型分光器的效率,得到其固有损耗在 $1.0\sim 1.5\ \text{dB}$ 之间的实验结果^[20].另外,本文作者曾成功实现InP基四端口沟槽型受抑全内反射分光器,由制备的开口宽度 $180\ \text{nm}$,深宽比高达22的“X”型微纳沟槽构成^[21].通过测量各端口的光功率,表征其固有损耗也约为 $1.0\ \text{dB}$.考虑到 90° 弯曲波导的损耗 $\sim 1.0\ \text{dB}$,并未包括器件端口波导与光纤的耦合损耗,同时忽略单模脊波导的传播损耗(通常 $1.0\ \text{dB/cm}$),矩形马赫-曾德光

开关器件的固有插入损耗估计约为 $4.0\sim 5.0\ \text{dB}$ 之间.

基于沟槽型光子耦合器构成的光器件可以使其在—维方向上的堆积级联转向在二维方向上的拓展集成,例如由GaInAsP/InP“X”型沟槽四端口微纳光子耦合器构成的二维有源光子格型滤波器^[22].因此矩形马赫-曾德干涉仪结构将为硅基光子集成电路提供了一种二维方向高度集成的新思路和新方法.

4 结论

针对目前马赫-曾德型光开关本身占据的尺寸较大或者在一维方向上尺度较长的缺点,本文提出了利于高度集成的矩形马赫-曾德 2×2 光开关单元结构.采用受抑全内反射原理的沟槽型微纳光子耦合器作为MZI的3 dB分光器;马赫-曾德光开关的参考/相移臂是使用 90° 弯曲波导的L型结构,两者极大地减小了由此构成的马赫-曾德光开关器件的尺寸.举例设计了L型相移臂的温度上升了 50°C 实现 π 相移时需要的总长度约 $84\ \mu\text{m}$,有限元法模拟了开关电压 $3.5\ \text{V}$ 和选用上包层 SiO_2 厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 时得到上升时间 $35\ \mu\text{s}$ 、下降时间 $48\ \mu\text{s}$ 的开关速度.最后采用Rsoft FullWAVE时域有限差分法仿真验证了器件的开关功能.新颖矩形结构马赫-曾德 2×2 热光开关的平面尺寸设计为 $56\times 38\ \mu\text{m}^2$.器件具有高效紧凑的特点,使其布局配置易于向二维方向扩展,并潜在应用于硅基高密度光子集成电路及片上光互连系统.

参考文献

- [1] LI Xian-Yao, YU Yu-De, YU Jin-Zhong. Thermo-optic, electro-optic, and all-optical switches and arrays[J]. *Physics*, 2013, **42**(04): 272-279.
李显尧,俞育德,余金中.硅基热光、电光、全光开关及其阵列的研究进展[J].物理,2013, **42**(04): 272-279.
- [2] WENG Zi-hua, ZHU Jin-pan, HE Jing-yan, et al. All-fiber magneto-optic switch with the nanosecond-level switching-time [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1441-1446.
翁梓华,朱金攀,何竞彦,等.纳秒量级开关时间的全光纤磁光开关[J].光子学报,2012, **41**(12):1441-1446.
- [3] LU Zhi-yong, WAN Ling-yu, CHAO Liang-fang. Design and simulation of planar 4×4 electro-optic switches based ferroelectric inverted domains [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 794-799.
卢智勇,万玲玉,超亮芳.畴反转结构片状集成 4×4 电光开关的设计与仿真[J].光子学报,2012, **41**(7):794-799.
- [4] ZHANG Yan, CHEN Kai-xin, ZHENG Jun-Kai. Hybrid integrated SiON/polymer low power thermo-optic switch with total internal reflection effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(11): 1117001-1-6.
张燕,陈开鑫,郑军凯.基于氮氧化硅与聚合物混合集成低功耗全内反射热光开关[J].中国激光,2011, **38**(11): 1117001-1-6.
- [5] KISH F A, WELCH D, NAGARAJAN R, et al. Current status of large-scale InP photonic integrated circuits [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(6): 1470-1489.
- [6] YANG Jian, CHEN Wei-wei, WANG Wan-jun, et al. A 4×4

- MMI-MZ optical switch matrix on SOI based on carrier injection[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(1): 16-20.
- 杨建,陈伟伟,王皖君,等. 基于载流子注入的 SOI 4×4 MMI-MZ 光开关阵列[J]. *光电子 • 激光*, 2013, **24**(1): 16-20.
- [7] CHEN Yuan-yuan, YU Jin-zhong. An 8×8 rearrangeable nonblocking SOI thermo-optic waveguide switch matrix[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(1): 46-49.
- 陈媛媛,余金中. 8×8 重排无阻塞型 SOI 热光波导开关阵列[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(1): 46-49.
- [8] YE Xin-wei, MA Wei-dong, HUANG Xiao-dong, *et al.* Modeling of $N \times N$ optical switch based on two-dimensional multi-mode interference effects[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1789-1792.
- 叶新威,马卫东,黄晓东,等. 基于二维多模干涉效应的 $N \times N$ 光开关模型[J]. *光子学报*, 2011, **40**(12): 1789-1792.
- [9] WANG Ming-hua, QI Wei, YU Hui, *et al.* Research of high speed optical switch based on compound semiconductor[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(20): 3040-3045.
- 王明华,戚伟,余辉,等. 基于化合物半导体材料高速光开关的研究[J]. *科学通报*, 2009, **54**(20): 3040-3045.
- [10] MA Qiong-fang, HUANG Yong-qing, HUANG Hui, *et al.* Study on an integrated optical switch based on multimode interference coupler[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(9): 1276-1279.
- 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.
- [11] WANG Wei, SUN Xiao-qiang, WANG Xi-bin, *et al.* Low power consumption polymer thermo-optic switch with Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 610-623.
- 王微,孙小强,王希斌,等. 低功耗聚合物 Mach-Zehnder 热光开关[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 610-613.
- [12] LI Yun-tao, YU Jin-zhong, CHEN Shao-wu, *et al.* Submicrosecond rearrangeable nonblocking silicon-on-insulator thermo-optic 4×4 switch matrix [J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(6): 603-604.
- [13] YANG Di, YU Jin-zhong, CHEN Shao-wu. An improvement on 2×2 silicon-on-insulator Mach-Zehnder thermo-optical switch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 931-934.
- [14] DENSMORE A, JANZ S, MA R, *et al.* Compact and low power thermo-optic switch using folded silicon waveguides [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(13): 10457-10465.
- [15] FANG Q, SONG J F, LIOW T Y, *et al.* Ultralow power Silicon photonics thermo-optic switch with suspended phase arms[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(8): 525-527.
- [16] YAN Yun-fei, ZHENG Chuan-tao, SUN Xiao-qiang, *et al.* Fast response 2×2 thermo-optic switch with polymer/silica hybrid waveguide[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(9): 92-94.
- [17] HUNTOON N R, CHRISTENSEN M P, MACFARLANE D L, *et al.* Integrated photonic coupler based on frustrated total internal reflection[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(30): 5682-5690.
- [18] WANG Zhang-tao, XIA Jin-song, FAN Zhong-chao, *et al.* Fabrication of thermo-optic switch in Silicon-on-insulator[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, **20**(12): 2185-2187.
- [19] HERMERSDORF M, HIBERT C, GROGG D, *et al.* High aspect ratio sub-micron trenches on silicon-on-insulator and bulk silicon [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, **88**: 2556-2558.
- [20] QIAN Yu-sheng, SONG Ji-guo, KIM Seunghyun, *et al.* Compact 90° trench-based splitter for silicon-on-insulator rib waveguides [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(25): 16712-16718.
- [21] MACFARLANE D L, CHRISTENSEN M P, LIU Ke, *et al.* Four-port nanophotonic frustrated total internal reflection coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(1): 58-60.
- [22] NAGDI A El, LIU Ke, LAFAVE JR T P, *et al.* Active integrated filters for RF-photonics channelizers[J]. *Sensors*, 2011, **11**: 1297-1320.