

# 相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关

郑栋飞<sup>1</sup>, 孔德军<sup>1</sup>, 林健<sup>1</sup>, 洪昶辉<sup>1</sup>, 汪鹏君<sup>2</sup>, 符强<sup>1</sup>, 李军<sup>1\*</sup>, 陈伟伟<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;

<sup>2</sup>温州大学电气与电子工程学院, 浙江 温州 325035

**摘要** 提出一种相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关, 该器件包括偏振分束单元、偏振合束单元、定向耦合结构单元、偏振不敏感交叉波导以及模式转换单元。通过调谐相变材料的晶态与非晶态, 可实现偏振不敏感的多模光开关功能。利用粒子群智能算法和时域有限差分法对所提出的器件进行优化并分析其性能。仿真结果表明, 在 1535~1569 nm 波长范围内: 输入 TE<sub>0</sub> 模式时, 所设计器件的插入损耗小于 1.37 dB, 串扰小于 -13.12 dB; 输入 TM<sub>0</sub> 模式时, 所设计器件的插入损耗小于 1.61 dB, 串扰小于 -17.39 dB。

**关键词** 集成光学; 硅基光子学; 模式光开关; 偏振不敏感; 非易失性

中图分类号 TN491

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222074

## 1 引言

大数据时代对海量数据的传输和处理能力提出了巨大的挑战。多核处理器的发展极大地缓解了数据处理的压力。然而, 片内和片间数据传输和交换的大容量需求仍然是亟待解决的关键问题<sup>[1-5]</sup>。多维复用技术通过充分利用时间、频率、偏振态、正交性、空间等物理维度的数据加载能力, 满足不断增长的带宽需求, 可为解决上述问题提供较有潜力的解决方案<sup>[6-11]</sup>。其中, 模分复用(MDM)技术因利用信号搭载至不同光模式上实现成倍提升传输容量而备受关注<sup>[12-13]</sup>。

模式光开关是模分复用系统的核心器件之一。近年来, 许多学者对其开展了研究工作。2015年, Stern等<sup>[14]</sup>提出一种基于微环结构的 1×2 模式光开关, 该光开关采用热光调谐方式, 支持 TE<sub>0</sub> 模式和 TE<sub>1</sub> 模式的传输与切换。实验结果表明, 器件的串扰小于 -16.8 dB。2017年, Priti等<sup>[15]</sup>提出一种支持 TE<sub>0</sub> 和 TE<sub>1</sub> 模式的光开关, 该模式光开关采用马赫-曾德尔干涉结构, 并利用热光效应进行调谐。实验结果表明, 在 C 波段内, 器件的消光比大于 25 dB, 串扰小于 -12 dB。2017年, Xiong等<sup>[16]</sup>提出一种支持 TE<sub>0</sub> 和 TE<sub>1</sub> 模式的 1×2 模式光开关, 该光开关由 Y 分支、多模干涉耦合器、相移臂构成, 其中相移臂利用自由载流子

色散效应进行电光调谐。实验结果表明, 在 1530~1570 nm 波长范围内, 器件的插入损耗小于 5.5 dB, 串扰小于 -14.5 dB。2021年, Truong等<sup>[17]</sup>提出一种支持 TE<sub>0</sub> 至 TE<sub>3</sub> 模式的 2×2 模式光开关, 该光开关采用热光调谐, 并由 Y 分支和多模干涉耦合器构成。仿真结果表明, 在 1525~1575 nm 波长范围内, 器件的插入损耗小于 3 dB, 串扰小于 -19 dB。虽然硅材料中的热光效应和载流子色散效应可用于改变折射率, 继而很好地完成开关功能, 但是为了维持开关状态, 其需要持续消耗功率。因此, 非易失的模式光开关研究逐渐引起研究人员的兴趣。2020年, Jiang等<sup>[18]</sup>提出一种基于相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>Te<sub>1</sub> 辅助三波导耦合结构的 1×2 模式光开关。当相变材料处于非晶态时, 器件输出 TM<sub>1</sub> 模式; 当相变材料处于晶态时, 器件输出 TM<sub>0</sub> 模式。仿真结果表明, 在 1500~1600 nm 波长范围内, 器件损耗小于 2.23 dB, 消光比大于 15.81 dB。2021年, 吕元帅等<sup>[19]</sup>提出一种基于相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>Te<sub>1</sub> 辅助光波导结构的 2×4 模式光开关, 通过调控相变材料的状态, 即非晶态或晶态, 可实现输入的 TM<sub>0</sub> 模式在任意输出端口输出 TM<sub>1</sub> 模式。仿真结果表明, 在 1530~1565 nm 波长范围内, 器件的损耗小于 1.50 dB, 消光比大于 12.30 dB。2022年, Atri等<sup>[20]</sup>提出一种基于相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>Te<sub>1</sub> 辅助直波导结构的 1×1 模式光开

收稿日期: 2022-11-30; 修回日期: 2022-12-17; 录用日期: 2023-02-09; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(62275134, 62234008, 61875098)、浙江省自然科学基金(LY20F050003)、宁波市自然科学基金(2022J099, 202003N4159)

通信作者: \*chenweiwei@nbu.edu.cn; \*\*lijun@nbu.edu.cn

关。当相变材料为非晶态时,器件处于开启状态,输入的  $TE_0$ 、 $TE_1$ 、 $TM_0$  和  $TM_1$  模式将在输出端口输出;当相变材料为晶态时,器件处于关闭状态,输出端口没有任何模式输出。仿真结果表明,在 1500~1600 nm 波长范围内,器件的损耗小于 0.8 dB,消光比大于 20.21 dB。虽然上述基于相变材料辅助的非易失性硅基模式光开关拥有良好的性能,但是硅芯层与包层的高折射率差使得双折射效应凸显,容易导致严重的偏振失配问题。

本文提出一种相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感  $1 \times 2$  模式光开关。该器件由偏振分束单元、偏振合束单元、定向耦合结构单元、偏振不敏感交叉波导以及模式转换单元级联而成。通过调谐相变材料  $Ge_2Sb_2Te_5$  的晶态与非晶态,控制在不同的输出端口输出不同模式信号,从而实现偏振不敏感的模式光开关功能。为了提升器件性能,通过利用时域有限差分法并结合粒子群智能优化算法,优化器件结构参数。在参数优化的基础上,对器件的传输性能和容差进行分析,为进一步优化非易失性偏振不敏感模式光开关的设计提供参考。

## 2 器件原理与设计

### 2.1 器件原理

图 1 为相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感

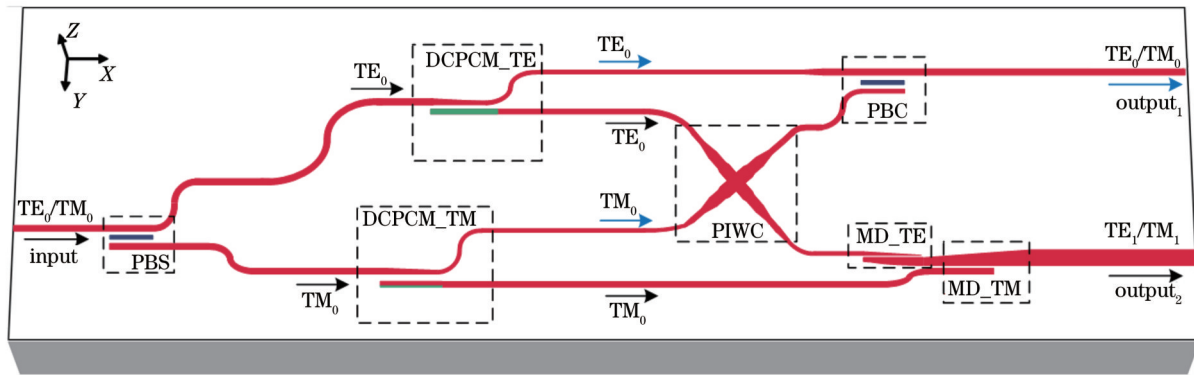


图 1 所提相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感  $1 \times 2$  模式光开关结构示意图

Fig. 1 Schematic of the proposed non-volatile polarization-insensitive silicon-based  $1 \times 2$  optical mode switch using phase-change materials

### 2.2 偏振分束/合束单元设计与优化

图 2 为所涉及的偏振分束/合束单元的结构示意图和相应的截面图。其中,硅波导的宽度和高度分别被设置为  $W_1=0.50 \mu\text{m}$  和  $h_2=0.22 \mu\text{m}$ ,以便同时支持  $TE_0$  和  $TM_0$  两种模式。由于随着波导宽度的增加,  $TM_0$  模式有效折射率的变化小于  $TE_0$  模式有效折射率的变化,因此偏振分束/合束单元被设计成在交叉端  $O_{b2}$  输出  $TM_0$  模式信号,在直通端  $O_{b1}$  输出  $TE_0$  模式信号。为了实现低插入损耗和高偏振消光比,需要对相应的耦合区域结构参数进行优化。

$1 \times 2$  模式光开关结构示意图。其中,偏振分束单元记为 PBS,偏振合束单元记为 PBC,定向耦合结构单元记为 DCPCM\_TE 和 DCPCM\_TM,偏振不敏感交叉波导记为 PIWC,模式转换单元记为 MD\_TE 和 MD\_TM。当  $TE_0$  模式从 input 端口输入时,会直接通过 PBS 直通端进入 DCPCM\_TE。 $TM_0$  模式因模式等效折射率匹配而发生耦合,并从 PBS 交叉端输出,进入 DCPCM\_TM。当相变材料  $Ge_2Sb_2Te_5$  处于非晶态时; $TE_0$  模式因模式等效折射率匹配耦合到相邻波导中,传输至 PIWC,然后经过 MD\_TE 转化为  $TE_1$  模式,并从 output<sub>2</sub> 端口输出; $TM_0$  模式同样由于模式等效折射率匹配耦合至相邻波导中,并经过 MD\_TM 转化为  $TM_1$  模式,并从 output<sub>2</sub> 端口输出。当相变材料  $Ge_2Sb_2Te_5$  被调控为晶态时; $TE_0$  模式因模式等效折射率失配而从 DCPCM\_TE 直通端输出,并沿着直波导从 output<sub>1</sub> 端口输出; $TM_0$  模式也因模式等效折射率失配而从 DCPCM\_TM 直通端输出,经过 PIWC 传输至 PBC,并因模式等效折射率匹配而耦合到相邻波导中,从 output<sub>1</sub> 端口输出。为了获得紧凑、高性能的非易失性硅基偏振不敏感  $1 \times 2$  模式光开关,需对偏振分束单元、偏振合束单元、定向耦合结构单元、偏振不敏感交叉波导以及模式转换单元的结构参数进行优化。

在 1550 nm 工作波长下,所设计偏振分束/合束单元的插入损耗和偏振消光比随间距  $G_s$ 、耦合长度  $L$ 、宽度  $W_2$  和厚度  $h_1$  的变化情况如图 3 所示。这里偏振分束/合束单元的插入损耗和偏振消光比的定义为  $I_{L, TE_0(TM_0)} = -10 \lg T_{TE_0(TM_0)}^{O_{b1}(O_{b2})}$  和  $R_{PE, TE_0(TM_0)} = 10 \lg \left[ \frac{T_{TE_0(TM_0)}^{O_{b1}(O_{b2})}}{T_{TE_0(TM_0)}^{O_{b2}(O_{b1})}} \right]$ ,其中  $T_{TE_0}^{O_{b1}}$  为  $I_b$  端口输入  $TE_0$  模式时  $O_{b1}$  端口  $TE_0$  模式的透射率,  $T_{TM_0}^{O_{b2}}$  为  $I_b$  端口输入  $TM_0$  模式时  $O_{b2}$  端口  $TM_0$  模式的透射率,  $T_{TE_0}^{O_{b2}}$  为  $I_b$  端口输入  $TE_0$  模式时  $O_{b2}$  端口  $TE_0$  模式的透射率,  $T_{TM_0}^{O_{b1}}$  为  $I_b$  端口输入  $TM_0$  模式时  $O_{b1}$  端口  $TM_0$  模式的透射率。从

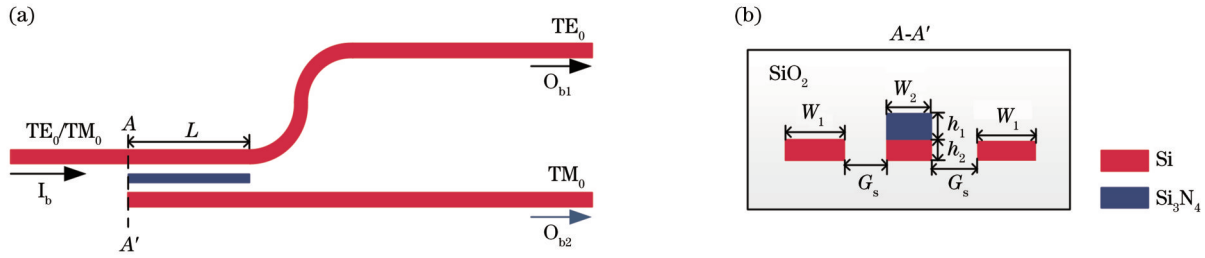


图 2 所提出的偏振分束/合束单元。(a)结构示意图;(b)截面图

Fig. 2 Proposed polarization beam splitter/combiner. (a) Schematic of structure; (b) cross-sectional view

图 3 可以看出,当  $L=6.50 \mu\text{m}$ 、 $G_s=0.20 \mu\text{m}$ 、 $W_2=0.30 \mu\text{m}$ 、 $h_1=0.23 \mu\text{m}$  时,所提出的偏振分束/合束单元可以获得最大偏振消光比和最小插入损耗。图 4 描述了偏振分束/合束单元的偏振消光比和插入损耗随

波长的变化关系。当波长从 1500 nm 变化至 1573 nm 时,偏振分束/合束单元的插入损耗小于 0.50 dB,偏振消光比大于 18.70 dB,且最高的偏振消光比为 38.52 dB。

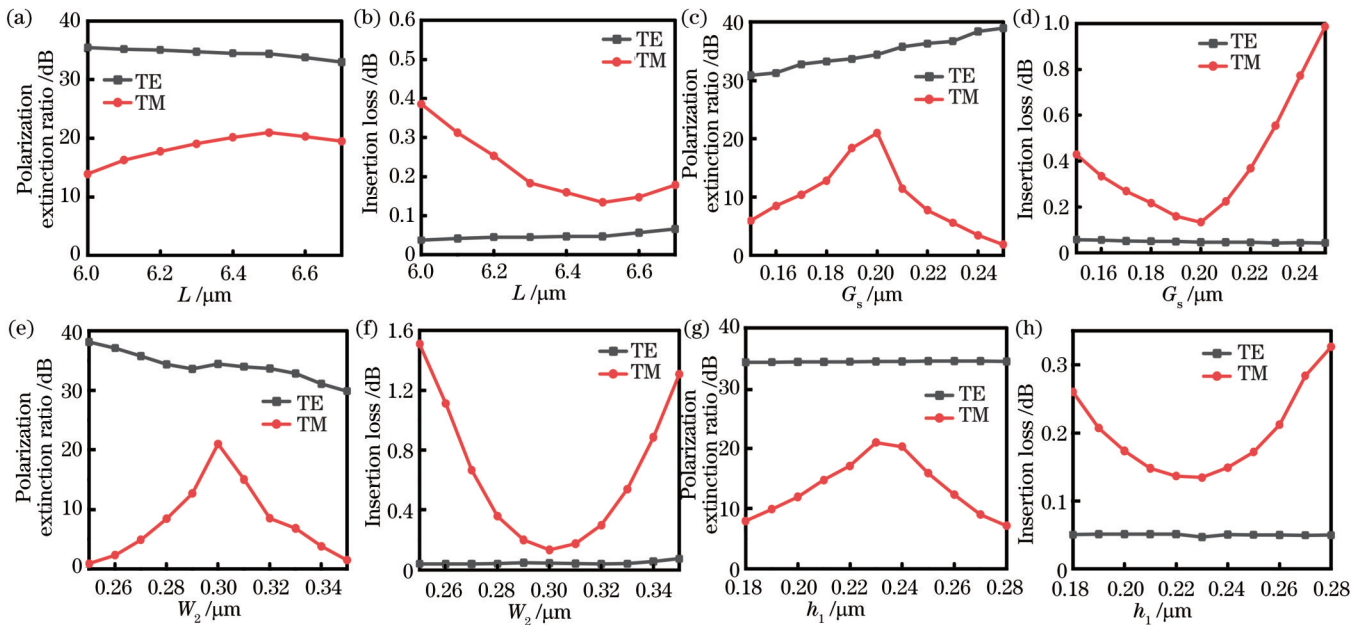


图 3 所提偏振分束/合束单元的结构参数优化。(a)(b)偏振消光比、插入损耗随耦合长度  $L$  ( $G_s=0.20 \mu\text{m}$ ,  $W_2=0.30 \mu\text{m}$ ,  $h_1=0.23 \mu\text{m}$ ) 的变化关系;(c)(d)偏振消光比、插入损耗随耦合间距  $G_s$  ( $L=6.50 \mu\text{m}$ ,  $W_2=0.30 \mu\text{m}$ ,  $h_1=0.23 \mu\text{m}$ ) 的变化关系;(e)(f)偏振消光比、插入损耗随宽度  $W_2$  ( $L=6.50 \mu\text{m}$ ,  $G_s=0.20 \mu\text{m}$ ,  $h_1=0.23 \mu\text{m}$ ) 的变化关系;(g)(h)偏振消光比、插入损耗随厚度  $h_1$  ( $L=6.50 \mu\text{m}$ ,  $G_s=0.20 \mu\text{m}$ ,  $W_2=0.30 \mu\text{m}$ ) 的变化关系

Fig. 3 Optimization of structural parameters of proposed polarization beam splitter/combiner. (a) (b) Polarization extinction ratio and insertion loss as a function of the coupling length  $L$  ( $G_s=0.20 \mu\text{m}$ ,  $W_2=0.30 \mu\text{m}$ , and  $h_1=0.23 \mu\text{m}$ ); (c) (d) polarization extinction ratio and insertion loss as a function of the gap  $G_s$  ( $L=6.50 \mu\text{m}$ ,  $W_2=0.30 \mu\text{m}$ , and  $h_1=0.23 \mu\text{m}$ ); (e) (f) polarization extinction ratio and insertion loss as a function of the width  $W_2$  ( $L=6.50 \mu\text{m}$ ,  $G_s=0.20 \mu\text{m}$ , and  $h_1=0.23 \mu\text{m}$ ); (g) (h) polarization extinction ratio and insertion loss as a function of the thickness  $h_1$  ( $L=6.50 \mu\text{m}$ ,  $G_s=0.20 \mu\text{m}$ , and  $W_2=0.30 \mu\text{m}$ )

### 2.3 定向耦合结构单元设计与优化

图 5 为所提定向耦合结构单元 DCPCM\_TE 和 DCPCM\_TM 的结构示意图和相应的截面图。从图 5 可以看出,定向耦合结构单元是由锥形硅波导和混合波导组成的,其中混合波导由 Si-Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>-ITO 构成,宽度分别为  $W_{E1}$ 、 $W_{M1}$ ,相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 的相变是由覆盖的 ITO 引起的。定向耦合结构单元 DCPCM\_TE

和 DCPCM\_TM 中 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 的高度分别为  $h_{A-GST}$  和  $h_{C-GST}$ ,ITO 的高度设为  $h_{ITO}$ ,混合硅波导 Si-Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>-ITO 与锥形硅波导的间距分别为  $G_c$  和  $G_m$ 。通过合理优化混合波导宽度,使其满足模式等效折射率匹配条件,便可实现在相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于非晶态的情况下,将输入的 TE<sub>0</sub>/TM<sub>0</sub> 模式信号耦合至相邻的混合波导,并从 O<sub>e2</sub>/O<sub>m2</sub> 端口输出;在相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 切换



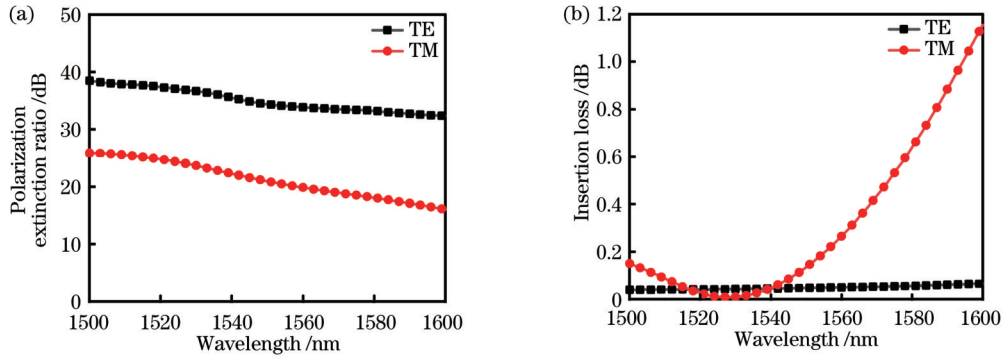


图 4 所设计偏振分束/合束单元的性能。(a)偏振消光比随波长的变化关系;(b)插入损耗随波长的变化关系

Fig. 4 Performance of the designed polarization beam splitter/combiner. (a) Polarization extinction ratio as a function of the wavelength; (b) insertion loss as a function of the wavelength

到晶态情况下,相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  晶态与非晶态之间存在较大的折射率差异,导致模式等效折射率失配,输入的  $\text{TE}_0/\text{TM}_0$  模式将保持正向模式传播,并从端口  $\text{O}_{e1}/\text{O}_{m1}$  输出。为了获得最佳耦合效率,需要对  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  的长度  $L_{ge}$  和  $L_{gm}$  进行优化。图 6 展示了所提定向耦合结构单元 DCPCM\_TE、DCPCM\_TM 的耦合效率和传输效率分别随长度  $L_{ge}$ 、 $L_{gm}$  的变化情况。从图 6(a) 可以看到,在 DCPCM\_TE 中,  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  和 ITO 的高度取值为  $h_{\text{A-GST}}=20 \text{ nm}$  和  $h_{\text{ITO}}=50 \text{ nm}$ , 间距  $G_c=$

150 nm, 当  $L_{ge}=10 \mu\text{m}$  时,在相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  处于非晶态情况下,耦合效率的最优值为 86.29%,而在相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  处于晶态情况下,直通效率达到 80.95%;从图 6(b) 可以看到,在 DCPCM\_TM 中, Si 波导的宽度、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  和 ITO 的高度分别为  $W_{\text{msi}}=180 \text{ nm}$ 、 $h_{\text{C-GST}}=220 \text{ nm}$  和  $h_{\text{ITO}}=50 \text{ nm}$ , 间距  $G_m=440 \text{ nm}$ , 当  $L_{gm}=9 \mu\text{m}$  时,在相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  处于非晶态情况下,耦合效率最优值为 81.15%,而在相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  处于晶态情况下,直通效率达到 81.36%。

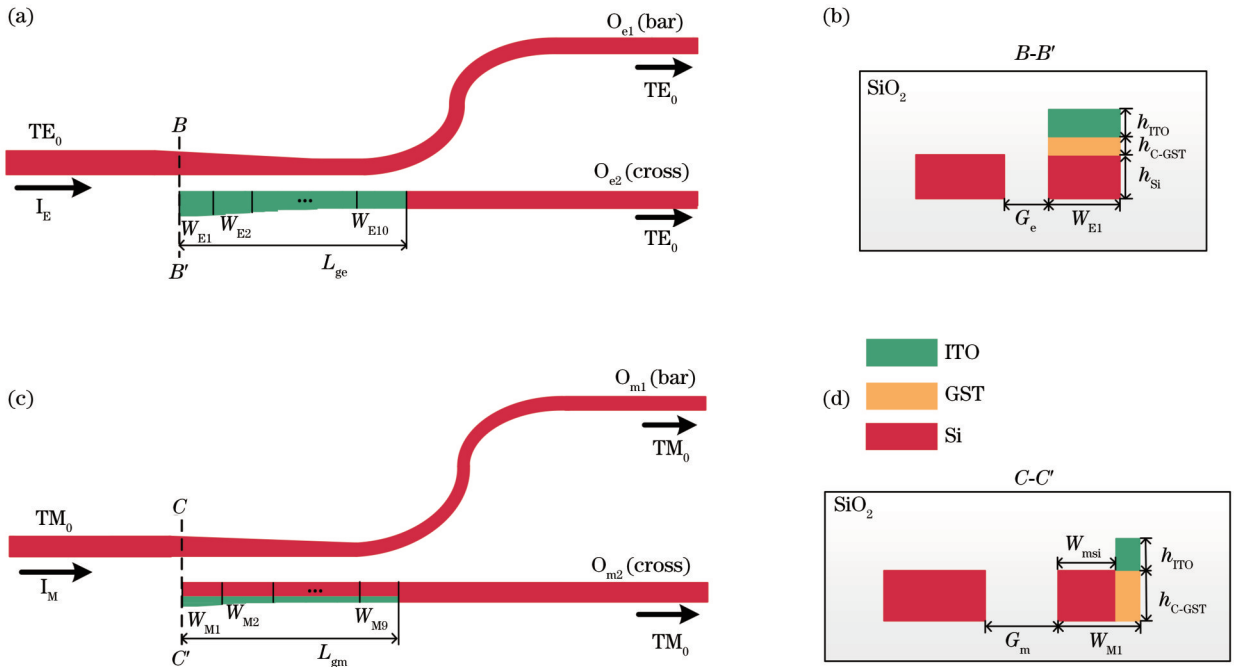


图 5 定向耦合结构单元 DCPCM\_TE 和 DCPCM\_TM。(a)(c)结构示意图;(b)(d)截面图

Fig. 5 Directional couplers with phase-change materials operating in the  $\text{TE}_0$  or  $\text{TM}_0$  modes, which are respectively named as DCPCM\_TE and DCPCM\_TM. (a)(c) Schematics of structures; (b)(d) cross-sectional views

为了获得较低的串扰和插入损耗,采用时域有限差分方法和粒子群优化算法对耦合区域的结构参数进行进一步优化。定向耦合结构单元 DCPCM\_TE 中的混合波导被分成等长 10 段,每段长度为  $L_a=1 \mu\text{m}$ ,每段宽度表示为  $W_{E,i}(i=1,2,\dots,10)$ ;定向耦合结构单

元 DCPCM\_TM 中的混合波导被分成等长 9 段,每段长度为  $L_b=1 \mu\text{m}$ ,每段宽度表示为  $W_{M,n}(n=1,2,\dots,9)$ 。品质因数 ( $F_{\text{om}}$ ) 的定义为:  $F_{\text{om}} = T_{\text{A}}^{O_{e2}/O_{m2}} + T_{\text{C}}^{O_{e1}/O_{m1}}$ , 其中  $T_{\text{A}}^{O_{e2}/O_{m2}}$  为  $I_{\text{E}}/I_{\text{M}}$  端口输入  $\text{TE}_0/\text{TM}_0$  模式且  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  处于非晶态时  $\text{O}_{e2}/\text{O}_{m2}$  端口输出  $\text{TE}_0/\text{TM}_0$  模

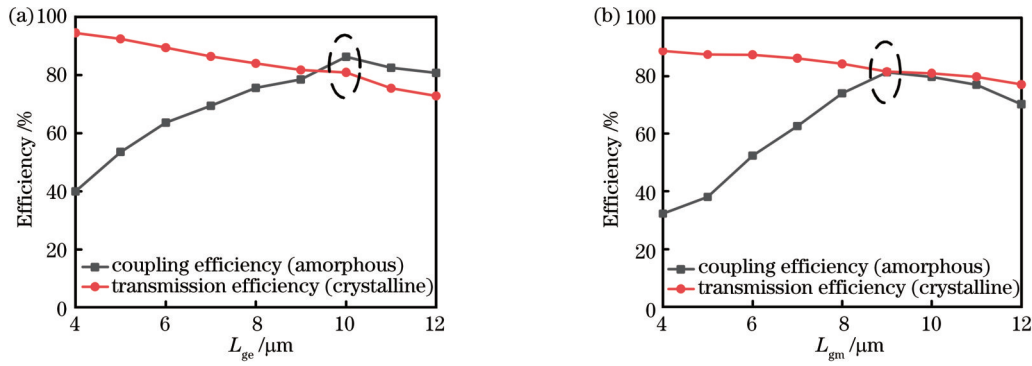


图 6 定向耦合结构单元的耦合效率和传输效率随  $L_{ge}$  或  $L_{gm}$  的变化情况。(a) DCPCM\_TE 的耦合效率和传输效率随长度  $L_{ge}$  的变化情况;(b) DCPCM\_TM 的耦合效率和传输效率随长度  $L_{gm}$  的变化情况

Fig. 6 Coupling efficiency and transmission efficiency of the proposed directional couplers changing with the length  $L_{ge}$  or  $L_{gm}$ . (a) Coupling efficiency and transmission efficiency of DCPCM\_TE changing with the length  $L_{ge}$ ; (b) coupling efficiency and transmission efficiency of DCPCM\_TM changing with the length  $L_{gm}$ .

式的透射率,  $T_C^{O_{e1}/O_{m1}}$  为  $I_E/I_M$  端口输入  $TE_0/TM_0$  模式且  $Ge_2Sb_2Te_5$  处于晶态时  $O_{e1}/O_{m1}$  端口输出  $TE_0/TM_0$  模式的透射率。在粒子群优化算法中,每段波导的宽度及其变化范围被视为粒子的位置和速度。粒子的位置和速度的更新采用以下公式<sup>[21-22]</sup>:

$$v_{p,j+1(k+1)} = w_e \times v_{p,j(k)} + c_1 \times \text{rand}(\bullet) \times [g_{b,j(k)} - p_{p,j(k)}] + c_2 \times \text{rand}(\bullet) \times [g_{b,j(k)} - p_{p,j(k)}], \quad (1)$$

$$p_{p,j+1(k+1)} = p_{p,j(k)} + v_{p,j(k)}, \quad (2)$$

式中:  $c_1$ 、 $c_2$  和  $w_e$  分别为认知率、社交率和惯性权重;对于定向耦合结构单元 DCPCM\_TE,  $v_{p,j}$  为粒子的速度 ( $j=1, 2, \dots$ ),  $p_{p,j}$  为粒子的位置,  $g_{b,j}$  为全局最佳位置;对于定向耦合结构单元 DCPCM\_TM,  $v_{p,k}$  为粒子的速度 ( $k=1, 2, \dots$ ),  $p_{p,k}$  为粒子的位置,  $g_{b,k}$  为全局最佳位置;  $\text{rand}(\bullet)$  为  $[0, 1]$  区间以均匀分布方式生成的随机数。优化后混合波导的各段宽度如表 1 所示。

图 7 所示为所设计定向耦合结构单元 DCPCM\_TE 和 DCPCM\_TM 的传输谱线。对于所设计定向耦

表 1 优化后混合波导的各段宽度

Table 1 Optimized segment's width for the hybrid waveguides

TE <sub>0</sub>		TM <sub>0</sub>	
Parameter	Value / $\mu\text{m}$	Parameter	Value / $\mu\text{m}$
$W_{E1}$	0.50	$W_{M1}$	0.36
$W_{E2}$	0.45	$W_{M2}$	0.27
$W_{E3}$	0.43	$W_{M3}$	0.27
$W_{E4}$	0.38	$W_{M4}$	0.26
$W_{E5}$	0.39	$W_{M5}$	0.26
$W_{E6}$	0.39	$W_{M6}$	0.25
$W_{E7}$	0.39	$W_{M7}$	0.25
$W_{E8}$	0.39	$W_{M8}$	0.25
$W_{E9}$	0.39	$W_{M9}$	0.26
$W_{E10}$	0.39		

合结构单元 DCPCM\_TE, 随着波长从 1535 nm 变化到 1573 nm: 当  $Ge_2Sb_2Te_5$  处于非晶态时, 其插入损耗从 0.61 dB 变化至 0.76 dB, 串扰从 -18.28 dB 变化至 -15.01 dB; 当  $Ge_2Sb_2Te_5$  处于晶态时, 其插入损耗从 0.88 dB 变化至 1.13 dB, 串扰从 -21.08 dB 变化至 -19.37 dB。对于所设计定向耦合结构单元 DCPCM\_TM, 随着波长从 1535 nm 变化到 1599 nm: 当  $Ge_2Sb_2Te_5$  处于非晶态时, 其插入损耗从 0.88 dB 变化至 1.13 dB, 串扰从 -34.08 dB 变化至 -15.20 dB; 当  $Ge_2Sb_2Te_5$  处于晶态时, 其插入损耗从 0.74 dB 变化至 1.28 dB, 串扰从 -18.39 dB 变化至 -15.05 dB。定向耦合结构单元的插入损耗和串扰被定义为  $C_{T,A(C)} = 10 \lg [T_{A(C)}^{O_{e1}/O_{m1}(O_{e2}/O_{m2})} / T_{A(C)}^{O_{e2}/O_{m2}(O_{e1}/O_{m1})}]$  和  $I_{L,A(C)} = -10 \lg T_{A(C)}^{O_{e2}/O_{m2}(O_{e1}/O_{m1})}$ , 其中  $T_{A(C)}^{O_{e1}/O_{m1}}$  为  $I_E/I_M$  端口输入  $TE_0/TM_0$  模式且  $Ge_2Sb_2Te_5$  处于非晶态时  $O_{e1}/O_{m1}$  端口输出  $TE_0/TM_0$  模式的透射率,  $T_C^{O_{e2}/O_{m2}}$  为  $I_E/I_M$  端口输入  $TE_0/TM_0$  模式且  $Ge_2Sb_2Te_5$  处于晶态时  $O_{e2}/O_{m2}$  端口输出  $TE_0/TM_0$  模式的透射率。

## 2.4 偏振不敏感的交叉波导单元设计与优化

图 8 为所提偏振不敏感交叉波导的结构示意图。从图 8 可以看到, 所提偏振不敏感交叉波导由两个正交的多模波导组成, 每根多模波导呈镜像对称。其中, 虚框内为锥形结构的放大图。为了同时支持  $TE_0$  和  $TM_0$  两种模式, 输入端口  $I_{p0}$ 、输出端口  $O_{p1}$  的波导宽度被设置为  $W_{x1} = 500 \text{ nm}$ 。通过合理地优化锥形结构的参数, 可以使得从  $I_{p0}$  端口输入的  $TE_0$  和  $TM_0$  两种模式沿着水平波导传输, 最终在  $O_{p1}$  端口输出  $TE_0$  和  $TM_0$  两种模式。

为了获得较低的串扰和插入损耗, 采用时域有限差分法和粒子群优化算法对锥形结构参数进行优化。偏振不敏感交叉波导单元 PIWC 中的锥形结构被等分为 12 段, 每段长度为  $L_x = 0.375 \mu\text{m}$ , 每个截面的宽度为  $W_{xd} (d=1, 2, \dots, 13)$ 。品质因数定义为  $F_{OM} =$

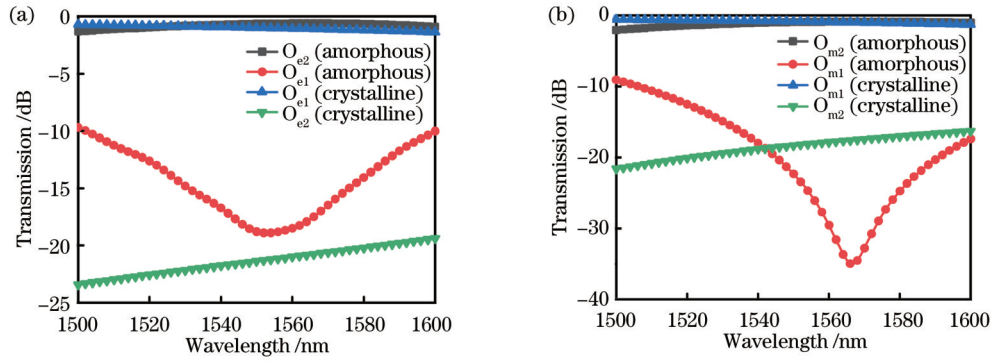


图 7 所设计定向耦合结构单元的传输谱线。(a) DCPCM\_TE 的传输谱线; (b) DCPCM\_TM 的传输谱线

Fig. 7 Transmission spectra of the designed directional couplers. (a) Transmission spectra of DCPCM\_TE; (b) transmission spectra of DCPCM\_TM

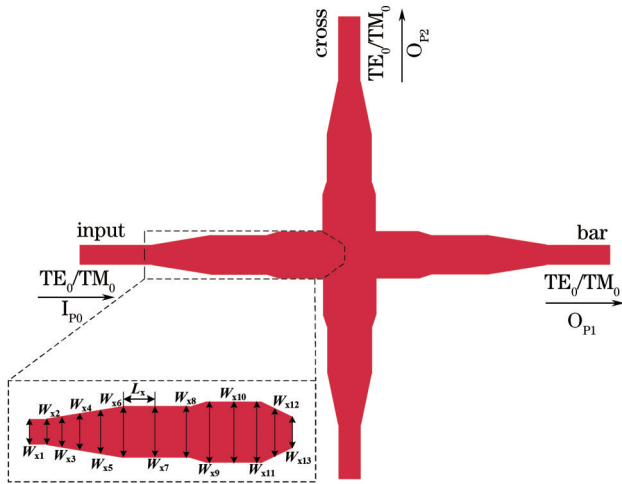


图 8 所提偏振不敏感硅基交叉波导的结构示意图

Fig. 8 Schematic of proposed polarization-insensitive silicon-based crossing waveguide structure

$T_{TE_0}^{O_{p1}} + T_{TM_0}^{O_{p1}}$ , 其中  $T_{TE_0}^{O_{p1}}$  为  $I_{p0}$  端口输入  $TE_0$  模式时  $O_{p1}$  端口  $TE_0$  模式的透射率,  $T_{TM_0}^{O_{p1}}$  为  $I_{p0}$  端口输入  $TM_0$  模式时  $O_{p1}$  端口  $TM_0$  模式的透射率。在粒子群优化算法中, 每个截面的宽度及其变化范围分别被视为粒子的位置和速度, 更新公式详见式(1)、(2)。表 2 给出了优化后锥形波导的各段宽度。

表 2 所提偏振不敏感硅基交叉波导中锥形波导各截面的优化宽度

Table 2 Optimized width of each section for the tapered waveguides in the proposed polarization-insensitive silicon-based crossing waveguide

Parameter	Value / $\mu\text{m}$	Parameter	Value / $\mu\text{m}$
$W_{x1}$	0.500	$W_{x8}$	1.520
$W_{x2}$	0.600	$W_{x9}$	1.680
$W_{x3}$	0.950	$W_{x10}$	1.620
$W_{x4}$	1.320	$W_{x11}$	1.760
$W_{x5}$	1.440	$W_{x12}$	2.150
$W_{x6}$	1.460	$W_{x13}$	0.500
$W_{x7}$	1.466		

图 9 展示了所设计的偏振不敏感交叉波导的传输谱线。随着波长从 1500 nm 增加到 1600 nm; 当输入  $TE_0$  模式时, 器件的插入损耗从 0.04 dB 变化至 0.11 dB, 串扰从 -37.47 dB 变化至 -27.55 dB; 当输入  $TM_0$  模式时, 器件的插入损耗从 0.21 dB 变化至 0.41 dB, 串扰从 -34.17 dB 变化至 -30.41 dB。这里偏振不敏感交叉波导单元的串扰和插入损耗被定义为:  $C_{T, TE_0(TM_0)} = 10 \lg [T_{TE_0(TM_0)}^{O_{p2}} / T_{TE_0(TM_0)}^{O_{p1}}]$  和  $I_{L, TE_0(TM_0)} = -10 \lg T_{TE_0(TM_0)}^{O_{p1}}$ , 其中  $T_{TE_0}^{O_{p2}}$  为  $I_{p0}$  端口输入  $TE_0$  模式时  $O_{p2}$  端口  $TE_0$  模式的透射率,  $T_{TM_0}^{O_{p2}}$  为  $I_{p0}$  端口输入  $TM_0$  模式时  $O_{p2}$  端口  $TM_0$  模式的透射率。

### 2.5 模式转换单元设计与优化

图 10 为所提模式转换单元的结构示意图。该模式转换单元采用互为倒锥结构, 通过合理优化锥形波导宽度, 使其满足模式等效折射率匹配条件, 便可实现将  $I_{s1}/I_{s2}$  端口输入的  $TE_0/TM_0$  模式信号耦合到相邻宽波导中, 并从  $O_{s1}/O_{s2}$  端口输出  $TE_1/TM_1$  模式。为了获得最佳耦合效率, 需要对耦合长度  $L_c, L_m$  进行优化。图 11 展示了所提模式转换单元 MD\_TE、MD\_TM 在工作波长为 1550 nm 情况下, 其转换效率随耦合长度  $L_c, L_m$  的变化关系。如图 11(a) 所示, 在  $TE_0$  模式转换单元中, 间距  $G_{c1} = 100 \text{ nm}$ , 当  $L_c = 13 \mu\text{m}$  时, 转换效率最优值为 98.62%; 如图 11(b) 所示, 在  $TM_0$  模式转换单元中, 间距  $G_{m1} = 200 \text{ nm}$ , 当  $L_m = 6 \mu\text{m}$  时, 转换效率最优值为 96.66%。

为了在较宽的波长范围内获得较高的转换效率, 采用时域有限差分法和粒子群优化算法对转换区域的结构参数进行进一步优化。  $TE_0$  模式转换单元的锥形波导被等分为 13 段, 每段长度为  $L_{z1} = 1 \mu\text{m}$ , 每段宽度表示为  $W_{Ao}$  ( $o = 1, 2, \dots, 13$ );  $TM_0$  模式转换单元的锥形波导被等分为 6 段, 每段长度为  $L_{z2} = 1 \mu\text{m}$ , 每段宽度表示为  $W_{Bq}$  ( $q = 1, 2, \dots, 6$ )。品质因数定义为  $F_{oM} = T_{TE_0/TM_0}^{O_{s1}} / T_{TE_0/TM_0}^{O_{s2}}$ , 其中  $T_{TE_0}^{O_{s1}}$  为  $I_{s1}$  端口输入  $TE_0$  模式时  $O_{s1}$  端口  $TE_1$  模式的透射率,  $T_{TM_0}^{O_{s2}}$  为  $I_{s2}$  端口输入  $TM_0$  模式时  $O_{s2}$  端口  $TM_1$  模式的透射率。在粒子群优化算法中, 每段

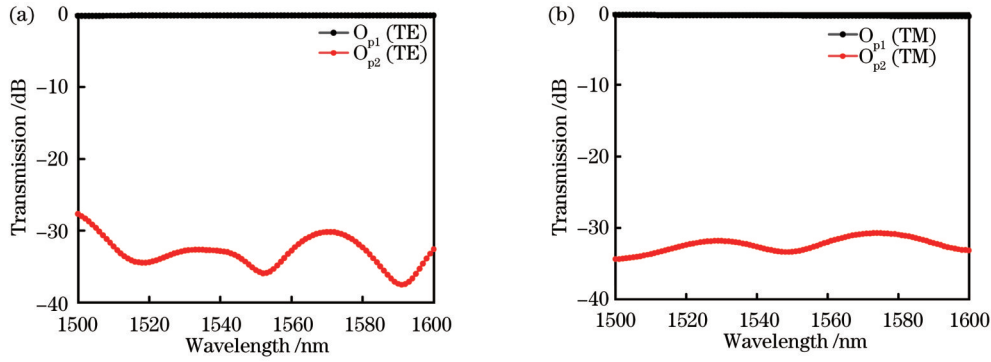


图 9 所设计偏振不敏感硅基交叉波导的传输谱线。(a)输入 TE<sub>0</sub>模式时的传输谱线;(b)输入 TM<sub>0</sub>模式时的传输谱线

Fig. 9 Transmission spectra of designed polarization-insensitive silicon-based crossing waveguide. (a) Transmission spectra when input TE<sub>0</sub> mode; (b) transmission spectra when input TM<sub>0</sub> mode

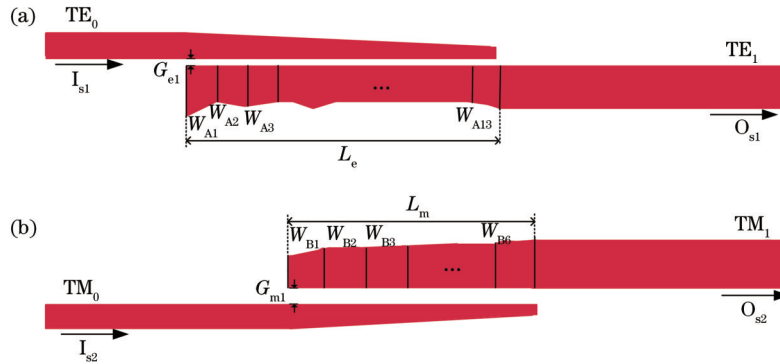


图 10 所提模式转换单元的结构示意图。(a) MD<sub>TE</sub>的结构示意图;(b) MD<sub>TM</sub>的结构示意图

Fig. 10 Schematics of the proposed mode converters. (a) Schematic of MD<sub>TE</sub>; (b) schematic of MD<sub>TM</sub>

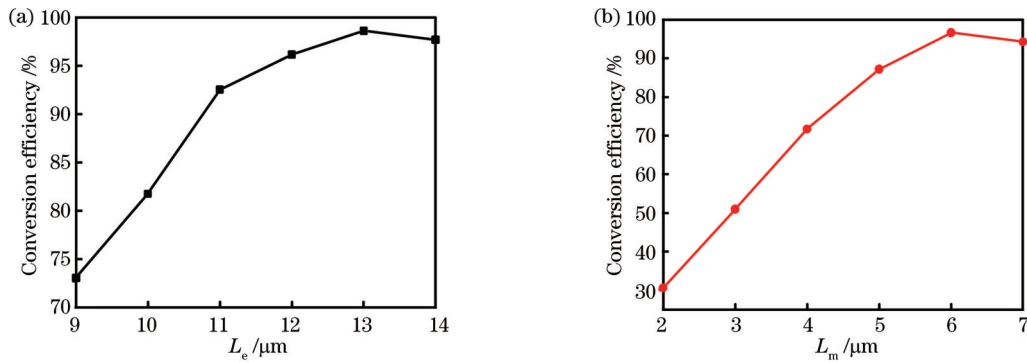


图 11 所提模式转换单元的转换效率随长度  $L_e$  或  $L_m$  的变化情况。(a) MD<sub>TE</sub>的转换效率随长度  $L_e$  的变化情况;(b) MD<sub>TM</sub>的转换效率随长度  $L_m$  的变化情况

Fig. 11 Conversion efficiency of the proposed mode converters changing with the length  $L_e$  or  $L_m$ . (a) Conversion efficiency of MD<sub>TE</sub> changing with the length  $L_e$ ; (b) conversion efficiency of MD<sub>TM</sub> changing with the length  $L_m$

波导的宽度及其变化范围分别被视为粒子的位置和速度,更新公式详见式(1)、(2)。表3给出了模式转换单元MD<sub>TE</sub>和MD<sub>TM</sub>中锥形波导的各段优化宽度信息。图12给出了模式转换单元的转换效率随波长的变化情况。随着波长从1500 nm增加到1600 nm,TE<sub>0</sub>模式转换单元的转换效率从98.08%变化至94.62%,TM<sub>0</sub>模式转换单元的转换效率从98.75%变化至94.58%。

### 3 仿真结果与分析

在1550 nm工作波长下,所设计相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感1×2模式光开关的传输光路如图13所示。从图13(a)、(d)可以看出,当相变材料Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>处于晶态时,输入的TE<sub>0</sub>和TM<sub>0</sub>模式向前传播,并最终从output<sub>1</sub>端口输出TE<sub>0</sub>和TM<sub>0</sub>;从图13(b)、(c)可以看出,当相变材料Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>处于非晶态时,输入的TE<sub>0</sub>和TM<sub>0</sub>模式被切换,并从output<sub>2</sub>端口



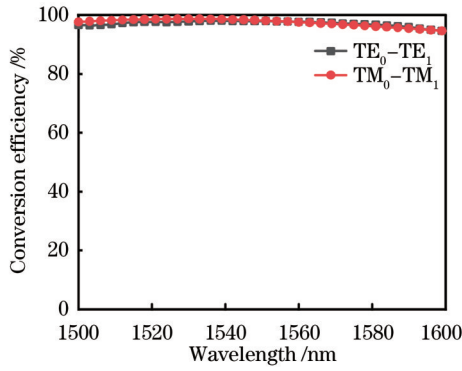


图 12 所设计模式转换单元 MD\_TE 和 MD\_TM 的转换效率随波长的变化情况

Fig. 12 Conversion efficiency of designed MD\_TE and MD\_TM changing with the wavelength

输出 TE<sub>1</sub> 和 TM<sub>1</sub>。图 14 展示了所设计 1×2 模式光开关的传输谱线。在 1535~1569 nm 波段范围内:对于 TE<sub>0</sub> 模式,所设计器件的插入损耗小于 1.37 dB,串扰小于 -13.12 dB;对于 TM<sub>0</sub> 模式,所设计器件的插入损耗小于 1.61 dB,串扰小于 -17.39 dB。在 1550 nm

波长下:当输入 TE<sub>0</sub> 模式时,所设计器件的插入损耗从 0.93 dB 变化至 1.13 dB,串扰从 -29.86 dB 变化至 -14.94 dB;当输入 TM<sub>0</sub> 模式时,所设计器件的插入损耗从 1.07 dB 变化至 1.32 dB,串扰从 -20.15 dB 变化至 -19.44 dB。这里器件的串扰和插入损耗被定义为:  $C_{T, TE_0(TM_0), A} = 10\lg\left[T_{TE_0(TM_0), A}^{O_1}/T_{TE_0(TM_0), A}^{O_2}\right]$ ,  $C_{T, TE_0(TM_0), C} = 10\lg\left[T_{TE_0(TM_0), C}^{O_2}/T_{TE_0(TM_0), C}^{O_1}\right]$ ,  $I_{L, TE_0(TM_0), A} = -10\lg T_{TE_0(TM_0), A}^{O_2}$  和  $I_{L, TE_0(TM_0), C} = -10\lg T_{TE_0(TM_0), C}^{O_1}$ , 其中  $T_{TE_0(TM_0), A}^{O_2}$  为 input 端口输入 TE<sub>0</sub>/TM<sub>0</sub> 模式且 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于非晶态时 output<sub>2</sub> 端口输出 TE<sub>1</sub>/TM<sub>1</sub> 模式的透射率,  $T_{TE_0(TM_0), C}^{O_1}$  为 input 端口输入 TE<sub>0</sub>/TM<sub>0</sub> 模式且 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于晶态时 output<sub>1</sub> 端口输出 TE<sub>0</sub>/TM<sub>0</sub> 模式的透射率,  $T_{TE_0(TM_0), A}^{O_1}$  为 input 端口输入 TE<sub>0</sub>/TM<sub>0</sub> 模式且 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于非晶态时 output<sub>1</sub> 端口输出 TE<sub>0</sub>/TM<sub>0</sub> 模式的透射率,  $T_{TE_0(TM_0), C}^{O_2}$  为 input 端口输入 TE<sub>0</sub>/TM<sub>0</sub> 模式且 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于晶态时 Output<sub>2</sub> 端口输出 TE<sub>1</sub>/TM<sub>1</sub> 模式的透射率。

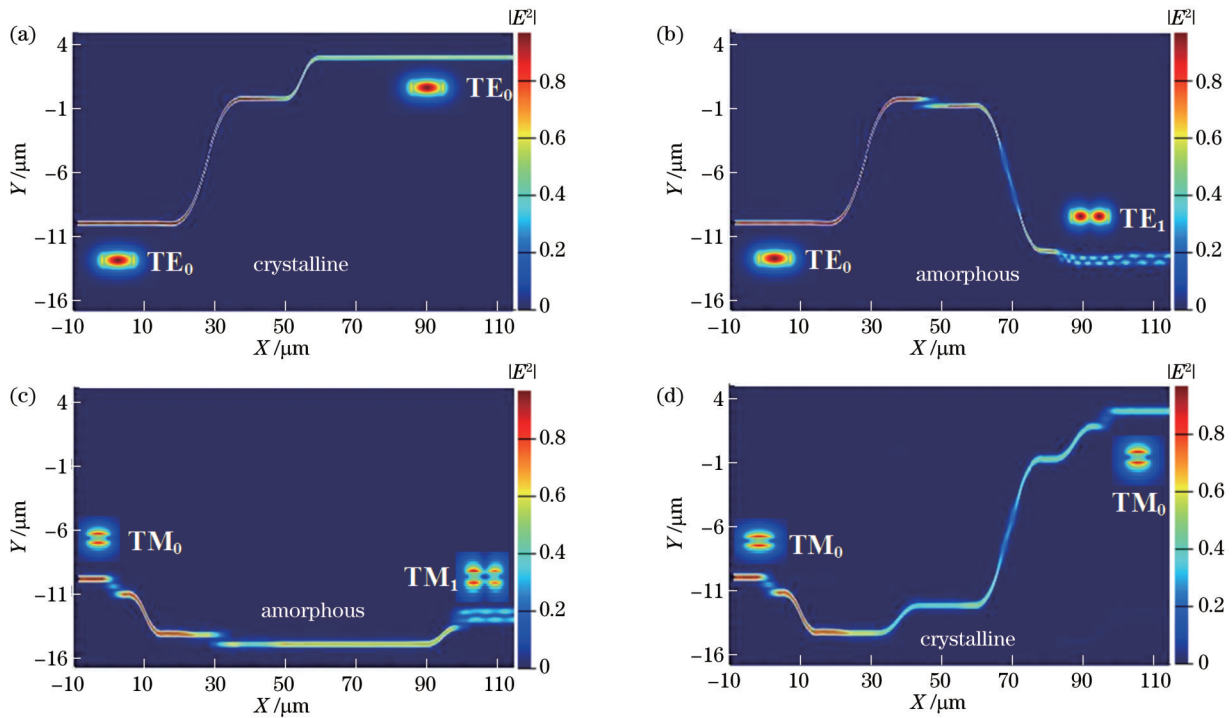


图 13 在 1550 nm 波长下,相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关的传输光路。(a) 当输入 TE<sub>0</sub> 模式以及 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于晶态时,所设计器件的传输光路;(b) 当输入 TE<sub>0</sub> 模式以及 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于非晶态时,所设计器件的传输光路;(c) 当输入 TM<sub>0</sub> 模式以及 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于晶态时,所设计器件的传输光路;(d) 当输入 TM<sub>0</sub> 模式以及 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于非晶态时,所设计器件的传输光路

Fig. 13 Simulated lightpaths in the designed non-volatile polarization-insensitive silicon-based 1×2 optical mode switch using phase-change materials at a wavelength of 1550 nm. (a) Simulated lightpath in the designed device when the TE<sub>0</sub> mode is input and Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> is in the crystalline state; (b) simulated lightpath in the designed device when the TE<sub>0</sub> mode is input and Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> is in the amorphous state; (c) simulated lightpath in the designed device when the TM<sub>0</sub> mode is input and Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> is in the amorphous state; (d) simulated lightpath in the designed device when the TM<sub>0</sub> mode is input and Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> is in the crystalline state



表 3 所提模式转换单元 MD\_TE 和 MD\_TM 中锥形波导的各段优化宽度

Table 3 Optimized segment's width for the tapered waveguides in the proposed MD\_TE and MD\_TM

Parameter	TE <sub>0</sub>		TM <sub>0</sub>		
	Value / $\mu\text{m}$	Parameter	Value / $\mu\text{m}$	Parameter	Value / $\mu\text{m}$
$W_{A1}$	0.98	$W_{A8}$	0.82	$W_{B1}$	0.76
$W_{A2}$	0.80	$W_{A9}$	0.80	$W_{B2}$	0.80
$W_{A3}$	0.80	$W_{A10}$	0.88	$W_{B3}$	0.80
$W_{A4}$	0.88	$W_{A11}$	0.94	$W_{B4}$	0.86
$W_{A5}$	0.82	$W_{A12}$	1.00	$W_{B5}$	0.92
$W_{A6}$	0.80	$W_{A13}$	0.92	$W_{B6}$	0.98
$W_{A7}$	0.90				

图 15 描述了模拟的动态热过程。如图 15(a) 所示,当施加持续时间为 2  $\mu\text{s}$  的 5 V 脉冲时,温度上升到 600 K,达到 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 结晶温度,在此过程中,相应的电流约为 1.09 mA。如图 15(b) 所示,当 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 由

持续时间为 1  $\mu\text{s}$  的 10 V 脉冲驱动时,温度高于熔化温度 1000 K,在此过程中,相应的电流约为 1.57 mA。

表 4 列出了仿真中使用的相关材料特性。

图 16 所示为波导宽度变化  $\Delta W$  和相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 高度变化  $\Delta h$  对器件性能的影响。从图 16 可以看出,在  $\Delta W$  从 -10 nm 增加到 10 nm 的过程中:当 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 为非晶态时,器件的插入损耗小于 1.70 dB,串扰从 -14.94 dB 变化至 -7.02 dB;当 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 为晶态时,器件的插入损耗小于 1.56 dB,串扰从 -19.44 dB 变化至 -18.15 dB。在  $\Delta h$  从 -15 nm 增加到 15 nm 的过程中:当 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 为非晶态时,器件的插入损耗小于 8.10 dB,串扰从 -14.94 dB 变化至 -5.55 dB;当 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 为晶态时,器件的插入损耗小于 4.71 dB,串扰从 -21.53 dB 变化至 -15.83 dB。由此可见,波导宽度变化  $\Delta W$ 、Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 高度变化  $\Delta h$  对所设计器件的串扰和插入损耗的影响较大,需要对波导宽度和相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 高度进行精准控制。

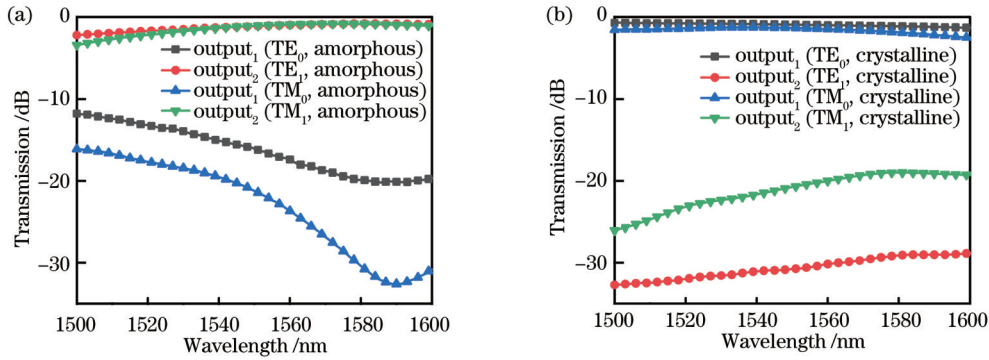


图 14 相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关的传输谱线。(a) Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于非晶态情况下的传输谱线; (b) Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 处于晶态情况下的传输谱线

Fig. 14 Transmission spectra of the designed non-volatile polarization-insensitive silicon-based 1×2 optical mode switch using phase-change materials. (a) Transmission spectra with Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> is in the amorphous state; (b) transmission spectra with Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> is in the crystalline state

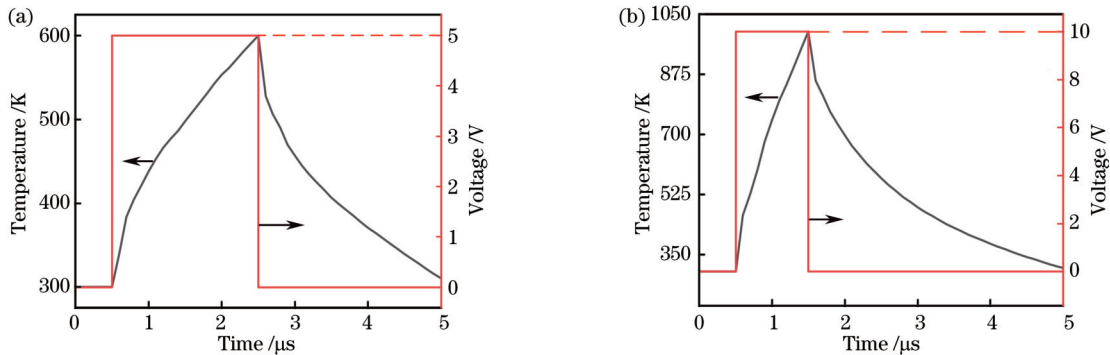


图 15 温度随时间的变化情况。(a) 在 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 结晶过程中,温度随时间的变化情况;(b) 在 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 非结晶化过程中,温度随时间的变化情况

Fig. 15 Temperature changing with the time. (a) Temperature changing with the time in the crystallization process of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>; (b) temperature changing with the time in the re-amorphization process of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>

为了进一步改善串扰和减小插入损耗,可采用 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>Te<sub>1</sub> 相变材料<sup>[25]</sup>。表 5 列出了在 1550 nm 工

作波长下,具有相同结构参数的相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关和相

表 4 仿真中采用的材料参数  
Table 4 Adopted material parameters in the simulation

Material	Si <sup>[23]</sup>	SiO <sub>2</sub> <sup>[23]</sup>	ITO <sup>[24]</sup>	Am-GST <sup>[24]</sup>	Cr-GST <sup>[24]</sup>
Density / (kg·m <sup>-3</sup> )	2330	2200	7100	5900	6300
Thermal conductivity / (W·mK <sup>-1</sup> )	149.00	1.38	11.00	0.27	0.91
Thermal conductivity / (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	720	740	1290	212	212

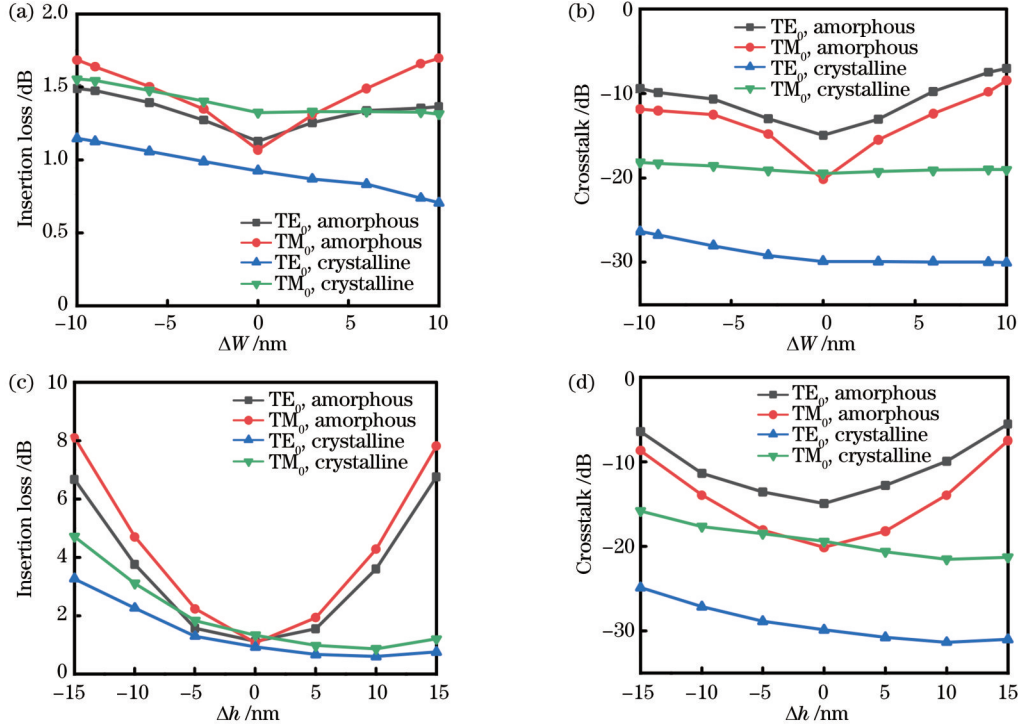


图 16 相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关的插入损耗与串扰随 ΔW 或 Δh 的变化情况。(a) 插入损耗随 ΔW 的变化情况；(b) 串扰随 ΔW 的变化情况；(c) 插入损耗随 Δh 的变化情况；(d) 串扰随 Δh 的变化情况

Fig. 16 Insertion loss and crosstalk of the designed non-volatile polarization-insensitive silicon-based 1×2 optical mode switch using phase-change materials changing with ΔW or Δh. (a) Insertion loss changing with ΔW; (b) crosstalk changing with ΔW; (c) insertion loss changing with Δh; (d) crosstalk changing with Δh

变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>Te<sub>1</sub> 辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关的性能对比情况。从表 5 可以明显看出,相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>Te<sub>1</sub> 辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关的最小插入损耗和最差串扰

变化均优于相变材料 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关。因此,未来可采用具有更为优异性能的相变材料设计高性能的非易失性集成光子器件。

表 5 两种非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关的性能对比情况

Table 5 Performance comparison of two non-volatile polarization-insensitive silicon-based 1×2 optical mode switches

Type	State	Input mode	Insertion loss / dB	Crosstalk / dB
Proposed non-volatile polarization-insensitive silicon-based 1×2 optical mode switch utilizing Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>5</sub>	Amorphous	TE <sub>0</sub>	1.13	-14.94
	Amorphous	TM <sub>0</sub>	1.07	-20.15
	Crystalline	TE <sub>0</sub>	0.93	-29.86
	Crystalline	TM <sub>0</sub>	1.32	-19.44
Proposed non-volatile polarization-insensitive silicon-based 1×2 optical mode switch utilizing Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> Te <sub>1</sub>	Amorphous	TE <sub>0</sub>	0.85	-19.87
	Amorphous	TM <sub>0</sub>	0.76	-23.74
	Crystalline	TE <sub>0</sub>	0.67	-33.21
	Crystalline	TM <sub>0</sub>	0.95	-23.83

## 4 结 论

提出一种由偏振分束单元、偏振合束单元、定向耦合结构单元、偏振不敏感交叉波导以及模式转换单元级联而成的相变材料辅助非易失性硅基偏振不敏感  $1 \times 2$  模式光开关, 并利用粒子群智能算法和时域有限差分法对其进行优化与分析。结果表明, 通过控制相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  的晶态与非晶态, 可实现偏振不敏感的多模光开关功能。在  $1535 \sim 1569 \text{ nm}$  波长范围内: 输入  $\text{TE}_0$  模式时, 所设计器件的插入损耗小于  $1.37 \text{ dB}$ , 串扰小于  $-13.12 \text{ dB}$ ; 输入  $\text{TM}_0$  模式, 所设计器件的插入损耗小于  $1.61 \text{ dB}$ , 串扰小于  $-17.39 \text{ dB}$ 。上述结果可为优化设计非易失性偏振不敏感模式光开关提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] Tkach R W. Scaling optical communications for the next decade and beyond[J]. Bell Labs Technical Journal, 2010, 14(4): 3-9.
- [2] Essiambre R J, Tkach R W. Capacity trends and limits of optical communication networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1035-1055.
- [3] Winzer P J. Scaling optical fiber networks: challenges and solutions[J]. Optics and Photonics News, 2015, 26(3): 28-35.
- [4] Miller D A B. Device requirements for optical interconnects to silicon chips[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(7): 1166-1185.
- [5] Mizuno T, Miyamoto Y. High-capacity dense space division multiplexing transmission[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 35: 108-117.
- [6] 项彤, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 硅基电光调制与模分复用集成器件[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1106001.  
Xiang T, Chen H M, Hu Y C. Silicon-based integrated device for electro-optic modulation assembly with mode-division multiplexing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1106001.
- [7] 廖琨, 甘天奕, 胡小永, 等. 基于介质超表面的片上集成纳米光子器件[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823001.  
Liao K, Gan T Y, Hu X Y, et al. On-chip nanophotonic devices based on dielectric metasurfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823001.
- [8] Dai D X, Bowers J E. Silicon-based on-chip multiplexing technologies and devices for Peta-bit optical interconnects[J]. Nanophotonics, 2014, 3(4/5): 283-311.
- [9] Rottondi C, Boffi P, Martelli P, et al. Optimal resource allocation in distance-adaptive few-modes backbone networks with flexible grid[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2015, November 19-23, 2015, Hong Kong, China. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2015: AS4H.2.
- [10] Chen Y D, Yin S, Guo S J, et al. Crosstalk-aware routing, spectrum, and core assignment in space-division multiplexing networks with bidirectional multicore fibers[J]. Optical Engineering, 2019, 58(11): 116110.
- [11] Zhao Y L, Hu L Z, Zhu R J, et al. Crosstalk-aware spectrum defragmentation by re-provisioning advance reservation requests in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multi-core fiber[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5014-5032.
- [12] Dai D X. Silicon nanophotonic integrated devices for on-chip multiplexing and switching[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 572-587.
- [13] Mehrabi K, Zarifkar A, Babaei M. Compact, high-performance, and fabrication friendly two-mode division multiplexer based on a silicon bent directional coupler[J]. Applied Optics, 2020, 59(12): 3645-3651.
- [14] Stern B, Zhu X L, Chen C P, et al. On-chip mode-division multiplexing switch[J]. Optica, 2015, 2(6): 530-535.
- [15] Priti R B, Bazargani H P, Xiong Y L, et al. Mode selecting switch using multimode interference for on-chip optical interconnects[J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4131-4134.
- [16] Xiong Y L, Priti R B, Liboiron-Ladouceur O. High-speed two-mode switch for mode-division multiplexing optical networks[J]. Optica, 2017, 4(9): 1098-1102.
- [17] Truong C D, Hang D N T, Chandralim H, et al. On-chip silicon photonic controllable  $2 \times 2$  four-mode waveguide switch [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 897.
- [18] Jiang W F, Azizur Rahman B M. Compact and nonvolatile mode-selective switch with nano-heater[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(5): 1-10.
- [19] 吕元帅, 汪成根, 袁伟, 等. 基于相变材料的可重构模式复用光波导开关[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1723001.  
Lü Y S, Wang C G, Yuan W, et al. Reconfigurable mode multiplexer waveguide switch based on phase change material[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1723001.
- [20] Atri A, Zarifkar A, Compact Mehrabi K., broadband, and low-loss multimode optical switch based on phase-change material for mode division multiplexing systems[J]. Applied Optics, 2022, 61(7): 1784-1790.
- [21] Zhang Y, Yang S Y, Lim A E J, et al. A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1310-1316.
- [22] Zhang B H, Chen W W, Wang P J, et al. Particle swarm optimized polarization beam splitter using metasurface-assisted silicon nitride Y-junction for mid-infrared wavelengths[J]. Optics Communications, 2019, 451: 186-191.
- [23] Zhang H Y, Zhou L J, Xu J, et al. Nonvolatile waveguide transmission tuning with electrically-driven ultra-small GST phase-change material[J]. Science Bulletin, 2019, 64(11): 782-789.
- [24] Rios C, Stegmaier M, Cheng Z G, et al. Controlled switching of phase-change materials by evanescent-field coupling in integrated photonics[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(9): 2455-2470.
- [25] De Leonardis F, Soref R, Passaro V M N, et al. Broadband electro-optical crossbar switches using low-loss  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  phase change material[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3183-3191.



# Non-Volatile Polarization-Insensitive Silicon-Based $1 \times 2$ Optical Mode Switch Using Phase-Change Materials

Zheng Dongfei<sup>1</sup>, Kong Dejun<sup>1</sup>, Lin Jian<sup>1</sup>, Hong Changhui<sup>1</sup>, Wang Pengjun<sup>2</sup>, Fu Qiang<sup>1</sup>,  
Li Jun<sup>1\*\*</sup>, Chen Weiwei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

<sup>2</sup>College of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China

## Abstract

**Objective** The development of multi-core processors has greatly relieved the pressure of data processing. However, the capacity requirement for data transmission and exchange is still a challenge. Multi-dimensional multiplexing technologies are explored to meet the growing bandwidth requirements and provide a promising solution to address such a challenge. Among these technologies, mode division multiplexing in which each guided mode acts as an independent data channel has attracted much attention. Silicon-based optical mode switches are indispensable for reconfigurable on-chip mode division multiplexing. Previously, these switches have been demonstrated by a Y-junction combined with a multimode interference coupler and phase shifters, Y-junction couplers combined with  $2 \times 2$  multimode interference couplers, and microrings. Although these devices can have good performance, sustained power consumption is required to maintain the switch states, which means they are volatile. In addition, due to the high refractive index contrast of the silicon-on-insulator platform, a strong polarization dependence would be formed. Thus, non-volatile polarization-insensitive silicon-based optical mode switches are highly desired. Owing to their outstanding properties, phase change materials are considered attractive candidate materials for realizing non-volatile integrated optical devices. To the best of our knowledge, non-volatile polarization-insensitive silicon-based optical mode switches employing phase change materials are never discussed before. Therefore, we wish to propose, design, and analyze a non-volatile polarization-insensitive silicon-based  $1 \times 2$  optical mode switch using phase-change materials.

**Methods** The proposed non-volatile polarization-insensitive silicon-based  $1 \times 2$  optical mode switch using phase-change materials is composed of a polarization beam splitter, a polarization beam combiner, two directional couplers with phase-change materials operating in the  $TE_0$  and  $TM_0$  modes, a polarization-insensitive silicon waveguide crossing, and two-mode converter operating in the  $TE_0$  and  $TM_0$  modes. The proposed polarization beam splitter/combiner is based on a triple-waveguide coupler comprising two silicon waveguides on both sides and a Si-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hybrid waveguide in the middle. By optimizing the structural parameters in the coupling region, a low-insertion-loss, and high-polarization-extinction-ratio polarization beam splitter/combiner can be obtained. For the two directional couplers with phase-change materials, a tapered silicon waveguide and a Si-Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>-ITO hybrid waveguide are employed to form the coupling region. The finite difference time domain method and particle swarm optimization algorithm are adopted to optimize the coupling region to obtain low insertion loss and excellent crosstalk. Similarly, the two-mode converters are based on counter-tapered couplers. With an aim at achieving high conversion efficiency in a wide wavelength range, the corresponding coupling regions are optimized through the finite difference time domain method and particle swarm optimization algorithm. The proposed polarization-insensitive silicon waveguide crossing consists of two orthogonal multimode waveguides in which the input and output tapers are mirror-symmetrical. The finite difference time domain method and particle swarm optimization algorithm are employed to optimize these tapers and finally realize low insertion loss and excellent crosstalk. As a result, a non-volatile polarization-insensitive silicon-based  $1 \times 2$  optical mode switch with good performance can be achieved by tuning the phase state of phase-change materials.

**Results and Discussions** The functionality of the designed non-volatile polarization-insensitive silicon-based  $1 \times 2$  optical mode switch is executed well (Fig. 13). When Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> is in the amorphous state, the input  $TE_0$  and  $TM_0$  modes are transformed into  $TE_1$  and  $TM_1$  modes and emerge from the port output<sub>2</sub>. The input  $TE_0$  and  $TM_0$  modes will propagate forward and come out from port output<sub>1</sub>, if Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> is in the crystalline state. When the designed device is operating in TE polarization, the crosstalk is less than  $-13.12$  dB and the insertion loss is smaller than  $1.37$  dB within a bandwidth from  $1535$  nm to  $1569$  nm (Fig. 14). For TM polarization, within a bandwidth from  $1535$  nm to  $1569$  nm, the designed device exhibits a crosstalk of lower than  $-17.39$  dB and an insertion loss of smaller than  $1.61$  dB. The corresponding fabrication tolerance is also discussed (Fig. 16). The waveguide width variation  $\Delta W$  and the variation of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> thickness  $\Delta h$  exert great influence on the crosstalk and insertion loss of the designed device. Thus, the waveguide width

and  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  thickness should be precisely controlled.  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  can be employed to improve the crosstalk and reduce insertion loss further (Table 5).

**Conclusions** We propose a non-volatile polarization-insensitive silicon-based  $1\times 2$  optical mode switch using phase-change materials. The proposed optical mode switch consists of a polarization beam splitter, a polarization beam combiner, two directional couplers with phase-change materials operating in the  $\text{TE}_0$  and  $\text{TM}_0$  modes, a polarization-insensitive silicon waveguide crossing, and two-mode converter operating in the  $\text{TE}_0$  and  $\text{TM}_0$  modes. The polarization-insensitive mode switching behavior is realized by adjusting the phase state of phase-change materials. The finite difference time domain method and particle swarm optimization algorithm are employed to design and analyze the presented device in detail. For the designed non-volatile polarization-insensitive silicon-based  $1\times 2$  optical mode switch using  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , when the  $\text{TE}_0$  mode is input, the insertion loss is lower than 1.37 dB and the crosstalk is less than  $-13.12$  dB within a bandwidth from 1535 nm to 1569 nm. As the  $\text{TM}_0$  mode is input, the insertion loss is smaller than 1.61 dB and the crosstalk is lower than  $-17.39$  dB within a bandwidth from 1535 nm to 1569 nm. The results can provide references for optimizing the design of non-volatile polarization-insensitive optical mode switches.

**Key words** integrated optics; silicon-based photonics; optical mode switch; polarization-insensitivity; non-volatility