

# 基于相变材料的可重构模式复用光波导开关

吕元帅<sup>1,2</sup>, 汪成根<sup>1,2</sup>, 袁伟<sup>1,2</sup>, 张桂菊<sup>1,2\*</sup>, 齐开悦<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;

<sup>2</sup>江苏省先进光学制造技术重点实验室与教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

<sup>3</sup>上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240

**摘要** 基于光学相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  和光波导结构, 提出一种可重构的  $2 \times 4$  模式复用光开关器件, 用来提高光通信容量。该器件由两个含倾斜波导结构的  $1 \times 2$  复用开关单元和一个结构对称的  $2 \times 2$  复用开关单元构成。首先通过模式耦合理论分析波导中的模式传输特性, 然后采用三维时域有限差分法对光开关器件进行建模, 最后使用模型进行实验研究。研究表明, 当工作波长为 1550 nm 时,  $1 \times 2$  开关单元在相变材料为晶态和非晶态下的插入损耗分别低至 0.60 dB 和 0.06 dB, 消光比分别高达 19.55 dB 和 27.58 dB;  $2 \times 4$  模式复用开关在整个 C 波段 (1530~1565 nm) 插入损耗的最小值为 0.23 dB, 消光比的最大值为 19.12 dB。

**关键词** 光学器件; 光波导开关; 相变材料; 模式复用; 光通信

中图分类号 TN25

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1723001

## Reconfigurable Mode Multiplexer Waveguide Switch Based on Phase Change Material

Lü Yuanshuai<sup>1,2</sup>, Wang Chenggen<sup>1,2</sup>, Yuan Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Guiju<sup>1,2\*</sup>, Qi Kaiyue<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>2</sup>Key Lab of Advanced Optical Manufacture Technologies of Jiangsu Province & Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>3</sup>School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Based on the optical phase change material  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  and the optical waveguide structure, a reconfigurable  $2 \times 4$  mode multiplexing optical switch device is proposed to improve the optical communication capacity. The device is composed of two  $1 \times 2$  multiplexing switch units with a slanted waveguide structure and a  $2 \times 2$  multiplexing switch unit with symmetrical structure. First, the mode transmission characteristics in the waveguide are analyzed by the mode coupling theory. Second, the optical switching device is modeled by the three-dimensional finite difference time domain method. Finally, the model is used for experimental research. The research results show that when the working wavelength is 1550 nm, the insertion loss of the  $1 \times 2$  switch unit when the phase change material is in the crystalline state and the amorphous state is as low as 0.60 dB and 0.06 dB, and the extinction ratio is as high as 19.55 dB and 27.58 dB, respectively. The minimum insertion loss of the  $2 \times 4$  mode multiplex switch in the entire C-band (1530~1565 nm) is 0.23 dB, and the maximum extinction ratio is 19.12 dB.

**Key words** optical devices; optical waveguide switch; phase change material; mode-division multiplexing; optical communication

**OCIS codes** 230.7370; 160.4670; 230.7380; 060.1810

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-03-10; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 苏州大学校级横向科研合作项目(P110800320)

通信作者: \*gjzhang@suda.edu.cn; \*\*tommy-qi@sjtu.edu.cn

# 1 引言

随着光通信的传输容量逐渐逼近香农极限,寻找新的复用技术成为了光通信领域中新的研究热点。将空间维度作为信息承载的新资源,为网络技术带来了新变化<sup>[1-3]</sup>。空间维度的复用增加了通信网络的物理维度和信息容量,为此这是一种亟待发展和利用的复用技术。空间模式复用简称“模分复用”(Mode-division Multiplexing, MDM),是空间维度复用技术的一种,其利用正交的空间模式为每个工作波长提供多个信号通道,使得光通信的传输容量得到显著的提升<sup>[4-5]</sup>。为了能够在硅芯片上构建 MDM 网络,模式多路复用器/解复用器、模式滤波器、模阶转换器、双模功率分配器和可重构的模式复用开关等均是构建该复用网络的基本器件<sup>[6-9]</sup>。可重构的模式复用开关(Reconfigurable Mode Multiplexer Switch, RMMS)是 MDM 网络中最基本的器件之一,可以在多模式频道实现数据和信号的切换,是构建更加灵活、有效的 MDM 网络以及实现硅芯片全光网络功能必不可少的一部分<sup>[10]</sup>。

光开关是模式复用与数据交换的核心单元,目前硅基光波导开关的类型主要有<sup>[11-18]</sup>基于光干涉原理的马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)型和微环谐振器(Micro-Ring Resonator, MRR)型以及 MEMS(Micro-Electro Mechanical Systems)驱动波导型等。Yang 等<sup>[12]</sup>提出一种基于 MZI 的  $2 \times 2$  四模式复用光开关,在 1525~1565 nm 的波长范围内可以获得大于 15.30 dB 的消光比和小于 6 dB 的耦合损耗。Sun 等<sup>[14]</sup>设计了一种紧凑的  $2 \times 2$  多模复用开关,由两个基于 MZI 的  $1 \times 1$  多模开关单元和两个基于 MRR 的  $2 \times 2$  单模开关单元组成,该开关可以实现空间模式的可重构复用,无需另外的解复用结构,而且方便升级,能够获得低至 0.30 dB 的插入损耗和 -16.60 dB 的串扰。Xiong 等<sup>[17]</sup>提出一种两模式复用的光开关单元,该单元由一个 Y 型分束器、一个相移器和一个  $2 \times 2$  多模干涉(Multimode Interference, MMI)结构组成,可以实现基模(TE<sub>0</sub>)和 1 阶模(TE<sub>1</sub>)的复用;相移器由一个硅掺杂的 PN 结构成,干涉臂长达到 267  $\mu\text{m}$ ,使得整个单元开关结构的尺寸偏大。硅基光波导开关中的干涉臂长受限于硅材料的热光系数,其折射率变化  $\Delta n$  一般小于  $10^{-2}$ <sup>[19]</sup>,因此造成光干涉臂长及波导结构尺寸一般为数百微米。

近年来,相变材料(Phase-Change Material, PCM)在非易失性集成光子学器件的应用中显示出巨大的潜力<sup>[20-22]</sup>,通过对相变材料施加电脉冲或短光脉冲,可以在非晶态和晶态之间可逆切换,其折射率变化  $\Delta n > 1$ 。光学相变材料主要有过渡金属氧化物和硫系化合物两大类<sup>[23]</sup>,代表材料有二氧化钒(VO<sub>2</sub>)和锗锑碲合金(Ge-Sb-Te, GST, 例如, Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>)。特别是, GST 在相变过程中具有巨大光学参数的差异( $\Delta n > 2.5$ )<sup>[24]</sup>,有望实现基于 GST 高效的光开关。GST 在非晶态和晶态中的消光系数分别为 0.12 和 1.49<sup>[25]</sup>(波长为 1550 nm),导致该材料制备的光波导器件在重要的通信波段存在很高的光波传输损耗。Zhang 等<sup>[26-27]</sup>用 Se 替代 Te 制备了锗锑硒碲合金(Ge-Sb-Se-Te, GSST, 例如, Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>Te<sub>1</sub>),增加了 GST 的光学带隙,并且降低了该材料在非晶态和晶态中的消光系数。GSST 材料与光波导结构结合,可用于模式复用光开关和可调谐的模阶转换器等<sup>[28-31]</sup>,GSST 保持了硫系化合物的非易失性特点,使得光开关在没有外界能量的持续激励下维持当前状态,直到下一次相变被触发。但是,目前该类结构的消光比(Extinction Ratio, ER)普遍偏低,插入损耗(Insertion Loss, IL)大且结构相对复杂。

本文采用 GSST 相变材料薄膜与硅材料所组成的平板波导结构,建立可复用和可重构的  $1 \times 2$  和  $2 \times 2$  光开关单元,并设计和实现  $2 \times 4$  的多路多通道光开关器件。利用模式耦合理论(Coupled Mode Theory, CMT)和三维时域有限差分法(Three-Dimensional Finite Difference Time Domain, 3D-FDTD)计算和分析波导中的模式分布及光开关的能量传输特性。该类器件方便实现了光信号的切换和模式的转换,具有尺寸紧凑和结构简单的特点。

## 2 模式复用结构

将硅材料与相变材料薄膜沉积和刻蚀在 SiO<sub>2</sub> 基底上形成光波导开关结构,用来研究由平面薄膜构成的平板光波导的传输问题,常用耦合模理论分析和处理不同模式之间耦合与能量传递<sup>[32]</sup>。光在不同的波导结构中具有不同的传递模式及其相应的有效折射率,当相邻两根波导的传递模式满足相位匹配条件时,倏逝场的存在使得波导中的光发生耦合,即光波从一根波导耦合到另一根波导<sup>[33]</sup>。光波在两根波导之间的耦合传播需要经过一定的耦合长度后被转移,采用超模理论分析波导中的耦合情况,

通过求出波导中产生超模的有效折射率即可求出耦合长度等参数<sup>[34-36]</sup>。

本节利用耦合模理论分析了波导之间的相位匹配条件,利用超模耦合理论计算了波导间的耦合长度,设计出一种可重构的  $1 \times 2$  模式复用开关单元和基于三波导定向耦合的  $2 \times 2$  光开关单元。在可复用和可重构的  $1 \times 2$  与  $2 \times 2$  光开关单元的基础上设计多路多通道和可重构的  $2 \times 4$  模式复用开关,该结构由一个  $2 \times 2$  光开关单元和两个  $1 \times 2$  光开关单元构成。

### 2.1 $1 \times 2$ 模式复用开关

$1 \times 2$  模式复用开关结构如图 1 所示,其中 WG-1、WG-2 和 WG-3 为三个基于 Si 薄膜的波导层, WG-g 为基于 Si 薄膜与 GSST 相变材料薄膜复合的倾斜波导层, I1 为输入端口,  $L_{\text{GSST}}$  为 WG-g 的长度,  $\theta$  为波导倾斜角度,  $L_c$  为最佳耦合长度,  $g_1$  为 WG-1 与 WG-2 之间的距离,  $g_2$  为 WG-1 与 WG-3 之间的距离,  $H_{\text{GSST}}$  为 GSST 薄膜的厚度,  $W_1$ 、 $W_2$

和  $W_3$  分别为 WG-1、WG-2 和 WG-3 波导的宽度,  $W_g$  为复合波导的宽度, O1 和 O2 为输出端口,  $H$  为 WG-1、WG-2 和 WG-3 的厚度。在  $\text{SiO}_2$  衬底上沉积 4 根条形 Si 波导结构,构成单进-双出开关单元。该结构主要由三个基于 Si 薄膜波导层(WG-1、WG-2 和 WG-3)和一个基于 Si 薄膜与 GSST 相变材料薄膜复合的倾斜波导层(WG-g)构成,如图 1(a)所示。图 1(b)和图 1(c)分别为该结构的俯视图和正视图。相变材料在不同的工作条件下具有晶态和非晶态两种材料相态,即表现出两种不同的折光系数。当 GSST 为非晶态时,在 WG-1、WG-g 和 WG-2 满足相位匹配的条件下, WG-1 输入的 TM 偏振基模(TM0)转换为 1 阶模(TM1)并从端口 O1 输出。当 GSST 为晶态时, WG-1 与 WG-g 相位失配, TM0 模不与 WG-g 耦合,将继续沿着 WG-1 传播,在 WG-1 与 WG-3 满足相位匹配的条件下, TM0 模耦合至 WG-3 并转换为 TM1 模,最后从端口 O2 输出。

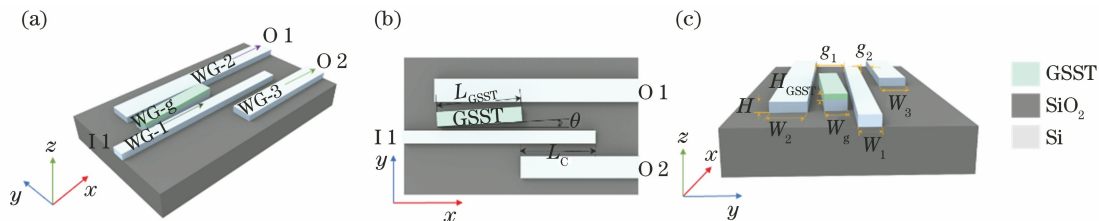


图 1  $1 \times 2$  模式复用开关。(a)结构示意图;(b)俯视图;(c)正视图

Fig. 1  $1 \times 2$  mode multiplexer switch. (a) Schematic of structure; (b) top view; (c) front view

Salandrino 等<sup>[37]</sup>提出采用三个具有相同模式的单模脊柱波导实现能量定向传输的三芯绝热耦合器,其中两个波导平行放置,中间波导倾斜放置,用于降低平行波导之间的消逝场重叠,从而提高波导之间的耦合效率。平行直波导与倾斜波导的耦合效率随着倾斜角度的增加呈现指数增大或减小<sup>[38-39]</sup>,耦合效率  $\kappa(x') = \kappa_0 \exp(\pm \theta x')$ ,其中  $\kappa_0$  为倾斜波导与两侧平行波导具有相同耦合量的耦合常数,  $x'$  为波导方向的长度。在开关单元中,将 WG-g 倾斜一定角度可以提高器件的消光比以及降低插入损耗。当 GSST 为非晶态时,倾斜一定角度的 WG-g 使得 WG-1 与 WG-3 的消逝场不再有重叠区,光耦合至 WG-g 中后, WG-3 与 WG-1 不发生能量耦合。WG-1、WG-g 和 WG-2 具有相同的传播常数,随着传播距离的增加, WG-1 与 WG-g 之间的耦合效率呈指数减小, WG-2 与 WG-g 之间的耦合效率呈指数增大。其中倾斜波导 WG-g 的中心点位于 WG-1 与 WG-2 之间的中心位置, WG-g 与光传播方向( $x$

轴)的夹角为  $\theta$ 。图 2 为  $1 \times 2$  光开关单元中输出端口 O1 和 O2 的归一化输出功率(Normalized Power, NP)与倾斜角度的关系,其中 AM 表示相应的 GSST 薄膜处于非晶态, CR 表示相应的 GSST 薄膜处于晶态。当 GSST 为非晶态时,若获得高 ER 和低 IL,且 WG-1 波导内的光能量完全耦合至 WG-2 内以实现绝热耦合,只要控制 WG-1 与 WG-g 的耦合系数的指数衰减率,选择合适的倾斜角  $\theta$ , O1 将获得一个最佳的输出功率。从图 2 可以看到,当  $\theta = 0.63^\circ$  时,端口 O1 具有最大的归一化输出功率,大于 0.99。当 GSST 为晶态时,端口 O2 的最大归一化输出功率达到 0.86,其损耗偏大的根本原因是由晶态 GSST 较高的吸收系数引起的。WG-1、WG-2 和 WG-3 厚度  $H$  均为 1 nm,宽度分别为 400, 955, 955 nm,  $g_1 = 900$  nm,  $g_2 = 200$  nm,  $L_{\text{GSST}} = 19.63 \mu\text{m}$ ,  $H_{\text{GSST}} = 70$  nm。

本课题组目前在实验中采用激光脉冲沉积(Pulsed Laser Deposition, PLD)法制备 GSST 薄

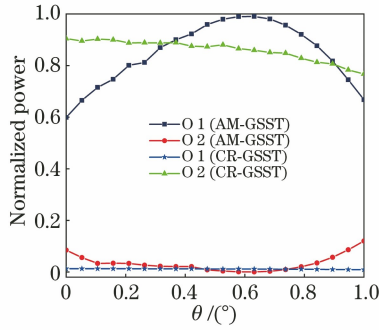


图 2 波导 WG-g 的倾斜角度与 1×2 开关的归一化输出功率的关系

Fig. 2 Relationship between tilt angle of waveguide WG-g and normalized output power of 1×2 switch

膜材料,实验测得该材料薄膜在晶态和非晶态下的折射率与波长的关系如图 3 所示,其中在波长为 1550 nm 处,非晶态和晶态下的复折射率分别为  $3.23+3.6 \times 10^{-2}i$  和  $4.93+0.25i$ 。本文研究的模式复用型光开关结构中的 GSST 薄膜的光学参数,以实验测得值作为参考。

波导中的传导模式及有效折射率与波导宽度相

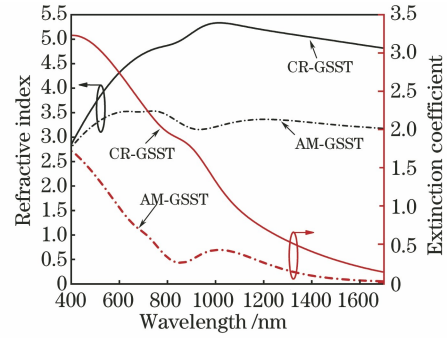


图 3 不同相态下 GSST 薄膜的不同参数与波长的关系  
Fig. 3 Relationship between wavelength and different parameters of GSST films in different phase states

关。硅波导宽度与 TM 偏振模的有效折射率的关系如图 4(a)所示。从图 4 可以看到,宽度为 300~720 nm 的波导中存在基模(TM0),宽度为 720~1200 nm 的波导中存在一阶模(TM1);当波导宽度为 400 nm 时, TM0 模的有效折射率  $n_{\text{eff}}=2.231$ ,与之相位匹配的 TM1 模在波导内传输需要的宽度为 955 nm。满足相位匹配的 TM0 模与 TM1 模的模场分布如图 4(b)和图 4(c)所示。

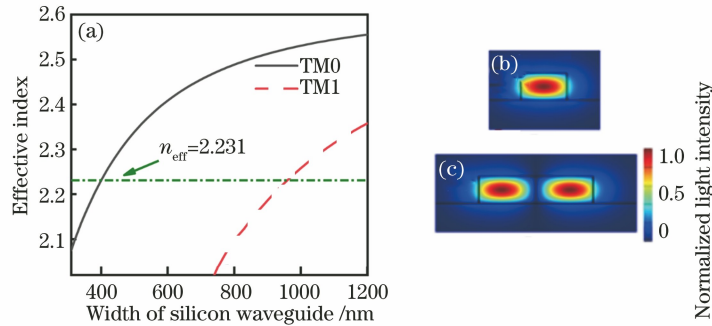


图 4 硅波导的性能曲线和模场分布。(a)有效折射率与硅波导宽度的关系;(b) TM0 模的模场分布;(c) TM1 模的模场分布

Fig. 4 Performance curves and mode field distribution of silicon waveguide. (a) Relationship between effective refractive index and width of silicon waveguide; (b) mode field distribution of TM0 mode; (c) mode field distribution of TM1 mode

复合波导 WG-g 中 GSST 薄膜的厚度影响模式传输及有效折射率,图 5(a)为 TM0 模的有效折射率与相变材料薄膜厚度  $H_{\text{GSST}}$  的关系。从图 5(a)可以看到,为了使 WG-1 与 WG-g 满足相位匹配条件,GSST 的最佳厚度为 70 nm。满足该条件的 GSST 为非晶态,即输入的 TM0 模通过波导 WG-g 耦合到 WG-2 中。图 5(b)为 WG-g 中 TM0 模的模场分布。

当 GSST 为晶态时, TM0 模将沿着 WG-1 传播,耦合至 WG-3 并转换为 TM1 模,最终从 O 2 端口输出,此时 WG-1 与 WG-3 的组合称为定向耦合器。根据超模耦合理论,光从 WG-1 波导输入,在传输过程中同时激发两种具有相同初始相位的偶对称

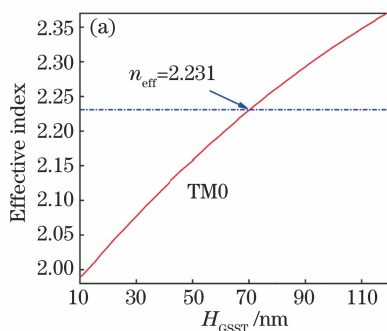
超模和奇对称超模,对应的传播常数分别为  $\beta_{\text{Even}}$  和  $\beta_{\text{Odd}}$ ,当奇对称超模相对于偶对称超模产生  $\pi$  相位时,光的能量完全转移至 WG-3。此时,光波同时在 WG-1 和 WG-3 中的传播距离为波导的最佳耦合长度。波导耦合长度的计算公式为<sup>[40]</sup>

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_{\text{Even}} - \beta_{\text{Odd}}} = \frac{\lambda_0}{2(n_{\text{Even}} - n_{\text{Odd}})}, \quad (1)$$

式中:  $n_{\text{Even}}$  和  $n_{\text{Odd}}$  分别为奇超模和偶超模在对应工作波长下的有效折射率;  $\lambda_0$  为工作波长。由(1)式计算可知,当工作波长为 1550 nm 时,  $L_c = 12.3 \mu\text{m}$ 。图 6 为使用 Lumerical Mode Solution 软件仿真计算定向耦合器产生的两种超模式的光场强

度分布,其中  $g_2 = 200 \text{ nm}$ 。

通过对器件耦合长度  $L_C$  以及复合波导长度



$L_{GSST}$  的计算,该器件的总长度可以用  $L_C + L_{GSST}$  来表示,器件的长度约为  $32 \mu\text{m}$ 。

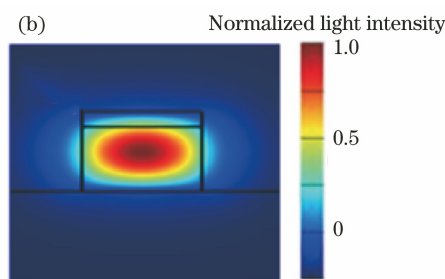


图 5 复合波导的性能曲线和模场分布。(a) TM0 模的有效折射率与 GSST 薄膜厚度的关系;(b) TM0 模的模场分布

Fig. 5 Performance curve and mode field distribution of composite waveguide. (a) Relationship between effective refractive index of TM0 mode and thickness of GSST film; (b) mode field distribution of TM0 mode

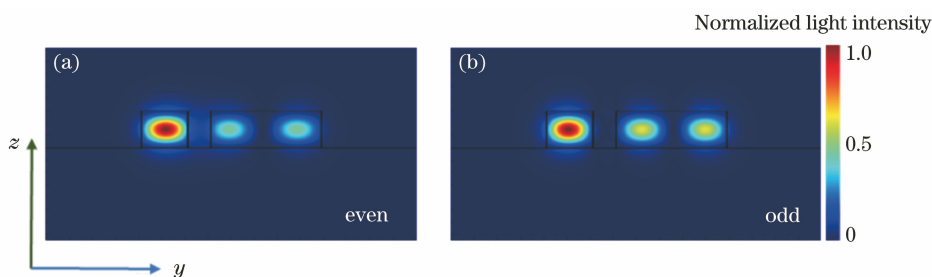


图 6 定向波导耦合器中超模光场强度分布。(a)奇模的光场强度分布;(b)偶模的光场强度分布

Fig. 6 Optical field intensity distribution of supermode in directional waveguide couplers. (a) Optical field intensity distribution of even supermode; (b) optical field intensity distribution of odd supermode

## 2.2 2×2 复用开关

图 7 为  $2 \times 2$  复用开关的结构。该开关主要由两个基于 Si 薄膜波导层(WG I、WG II)和一个基于 Si 薄膜与 GSST 相变材料薄膜复合的波导层(WG III)构成,其是一个关于  $x$  方向对称的结构,如图 7(a)所示,其中  $G$  为 WG I 与 WG II 之间的

距离。以端口 I 1 输入 TM0 模为例,当 GSST 为晶态时, TM0 模从 O 1 端口输出;当 GSST 为非晶态时, TM0 模从 O 2 端口输出。覆盖 GSST 薄膜波导的宽度、厚度和长度分别用  $W_G$ 、 $H_{GSST}$  和  $L_{GSST}$  来表示。耦合区域的横截面结构如图 7(b)所示。

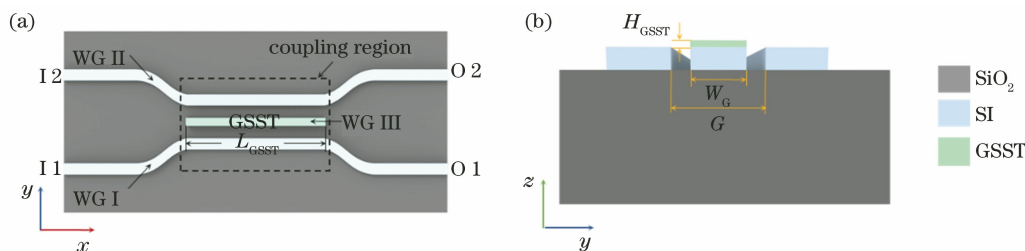


图 7  $2 \times 2$  复用开关。(a)俯视图;(b)耦合区域的横截面图

Fig. 7  $2 \times 2$  multiplexer switch. (a) Top view; (b) cross-section of coupling region

当 GSST 为非晶态时,  $L_{GSST}$  的设计应该尽可能实现输入波导 WG I 和交叉波导 WG II 之间的能量转移。由于耦合区域两侧存在弯曲波导,为此将耦合区域看作一个三波导定向耦合器,通过计算出满足三波导定向耦合器的长度可以大致估算出

$L_{GSST}$ 。为了确定耦合区域中三波导之间的相位匹配条件和耦合长度,需考虑耦合区域存在的三种超模(TM0-A、TM0-B 和 TM0-C)之间的耦合关系,三种超模光场强度的分布如图 8 所示。三波导满足相位匹配条件,则 TM0-A、TM0-B 和 TM0-C 超模的

有效折射率可表示为<sup>[40]</sup>

$$\frac{1}{2}(n_{\text{TM0-A}} + n_{\text{TM0-C}}) = n_{\text{TM0-B}}, \quad (2)$$

式中： $n_{\text{TM0-A}}$ 、 $n_{\text{TM0-B}}$  和  $n_{\text{TM0-C}}$  分别为 TM0-A、TM0-B 和 TM0-C 的有效折射率。 $n_{\text{TM0-A}}$ 、 $n_{\text{TM0-B}}$ 、 $n_{\text{TM0-C}}$  和  $(n_{\text{TM0-A}} + n_{\text{TM0-C}})/2$  随  $W_G$  宽度的变化如图 9(a) 所示。从图 9(a) 可以看到， $n_{\text{TM0-A}}$  值和  $n_{\text{TM0-C}}$  值均随着  $W_G$  的增大而增大，但  $n_{\text{TM0-B}}$  值并不随着  $W_G$  发生改变，始终是一个常数，这是因为 TM0-B 仅仅

局限在 WG I 与 WG II 当中，即使当  $W_G$  变化时，该超模依然稳定存在。通过(2)式计算出满足相位匹配的  $W_G = 253 \text{ nm}$ ， $H_{\text{GSST}} = 70 \text{ nm}$ ， $G = 900 \text{ nm}$ 。同样，可计算出三波导定向耦合器的耦合长度为  $28.2 \mu\text{m}$ 。WG I 耦合至 WG II 中的归一化输出功率随相变薄膜长度  $L_{\text{GSST}}$  的变化如图 9(b) 所示。从图 9(b) 可以看到，最佳的  $L_{\text{GSST}} = 26.6 \mu\text{m}$ 。该  $2 \times 2$  光开关的长度可以表示为耦合区域与弯曲波导之和，该器件的长度约为  $40 \mu\text{m}$ 。

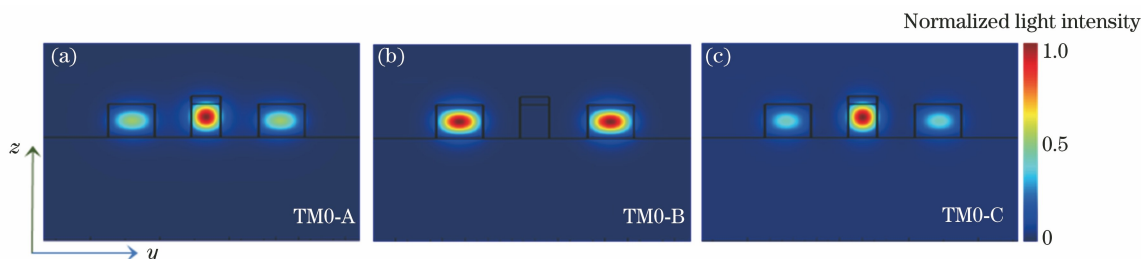


图 8 三波导定向耦合器的超模场光场强度分布。(a) TM0-A 超模的光场强度分布；(b) TM0-B 超模的光场强度分布；(c) TM0-C 超模的光场强度分布

Fig. 8 Optical field intensity distribution of supermode in triple directional waveguide couplers. (a) Optical field intensity distribution of TM0-A supermode; (b) optical field intensity distribution of TM0-B supermode; (c) optical field intensity distribution of TM0-C supermode

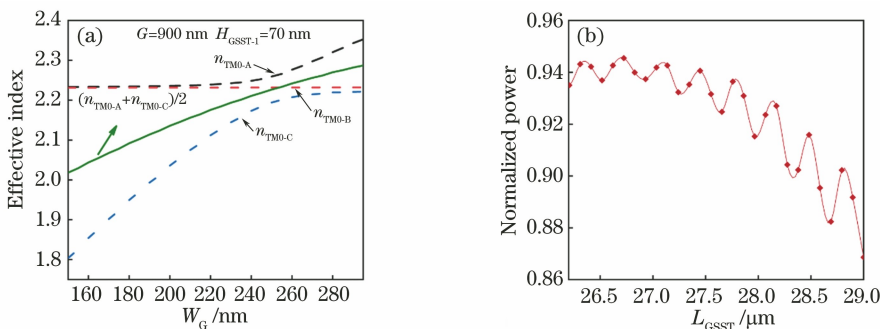


图 9 三波导中不同超模的色散曲线。(a) 有效折射率随复合波导宽度的变化曲线；(b) 归一化输出功率随复合波导长度的变化曲线  
Fig. 9 Dispersion curves of different supermodes in triple waveguide. (a) Variation curves of effective index with width of composite waveguide; (b) variation curve of normalized power with length of composite waveguide

### 2.3 可重构的 $2 \times 4$ 模式复用开关

图 10 为多路多通道和可重构的  $2 \times 4$  模式复用

开关的结构，其主要由模块 I (module I) 和模块 II (module II) 构成，其中 module I 为  $2 \times 2$  复用开

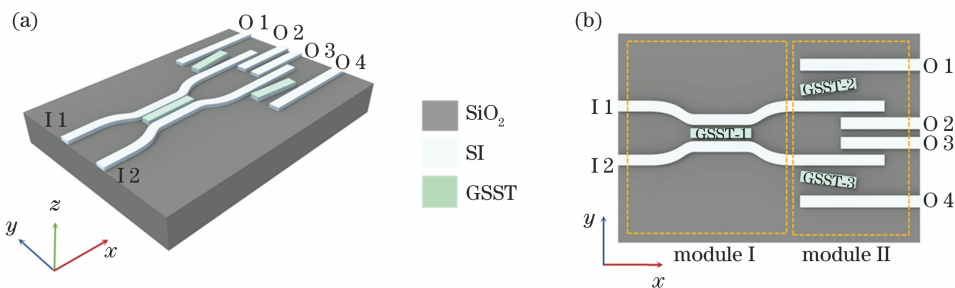


图 10 可重构的  $2 \times 4$  模式复用开关。(a) 结构图；(b) 俯视图

Fig. 10 Reconfigurable  $2 \times 4$  mode multiplexer switch. (a) Schematic of structure; (b) top view

关, module II 为两个  $1 \times 2$  模式复用开关单元, 长度均约为  $72 \mu\text{m}$ 。该结构是一个关于  $x$  方向超对称的结构。通过改变相变材料 GSST 的相态, 即可实现对四路信号端口  $O_1 \sim O_4$  选择输出的功能。

采用 IL 和 ER 描述和辨别传输信号在多路复用光开关之间的传输特性以及评价性能。光开关的输出端口  $j$  相对于输入端口  $i$  的插入损耗可表示为

$$I_L = -10 \lg(P_{O_j}/P_{I_i}) \quad (3)$$

$(i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N),$

式中:  $P_{O_j}$  为  $j$  端口的输出功率;  $P_{I_i}$  为  $i$  端口的输入功率。输出端口  $j$  的消光比定义为该端口的输出功率与其他端口  $i'$  输出功率之和的比值, 可表示为

$$E_R = 10 \lg(P_{O_j} / \sum_{i'=1}^N P_{O_{i'}}) \quad (i' \neq j). \quad (4)$$

对于  $2 \times 4$  模式复用开关,  $M=2, N=4$ 。若干个  $2 \times 2$  光开关单元可以组成具有非阻塞的  $N \times N$  光开关,  $N \times N$  光开关在输出端口与  $M$  个  $1 \times 2$  模式复用开关单元构成具有  $N$  个输入端口和  $2M$  个输出端口的模式复用开关。例如: 6 个  $2 \times 2$  光开关单元可以组成  $4 \times 4$  光开关,  $4 \times 4$  光开关可以与 4 个  $1 \times 2$  模式复用开关单元构成具有 4 路输入和 8 路输出的  $4 \times 8$  模式复用开关。

### 3 结果与分析

本节基于三维时域有限差分法的 FDTD

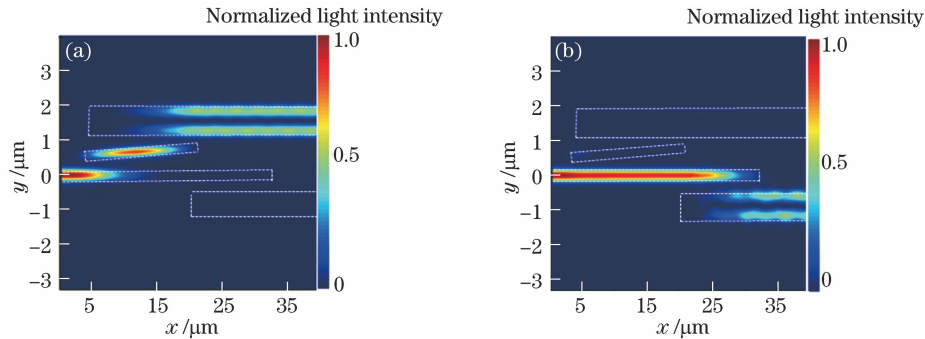


图 11  $1 \times 2$  模式复用开关各端口的仿真结果。(a) 非晶态 GSST 的光场强度分布; (b) 晶态 GSST 的光场强度分布

Fig. 11 Simulation results of each port of  $1 \times 2$  mode multiplexer switch. (a) Optical field intensity distribution for amorphous GSST; (b) optical field intensity distribution for crystalline GSST

$2 \times 2$  的光开关是一个关于  $x$  方向对称的器件, 当端口  $I_1$  的输入为  $TM_0$  模时, 改变 GSST 的相态即可实现对光信号传输通道的选择。当 GSST 为不同相态时, 每路光信号传输的光场强度分布如图 12 所示。从图 12(a) 可以看到, 当 GSST 为非晶态时, WG I 中的能量绝大部分耦合至 WG II 中, ER 值和 IL 值分别为 14.07 dB 和 0.24 dB。从图 12(b) 可以

Solutions 模拟仿真光开关器件中每一个开关单元及整体开关的输入输出特性。图 11 为  $1 \times 2$  模式复用开关单元中的 GSST 相变薄膜分别在非晶态和晶态下的光场强度分布, 设定工作波长  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 。从图 11(a) 可以看到, 当 GSST 为非晶态时, WG-1 波导中的能量耦合到 WG-2 波导内且不与 WG-3 波导耦合, 实现了绝热耦合。当 GSST 为非晶态时, 输出端口  $O_1$  的 ER 值和 IL 值分别为 27.58 dB 和 0.06 dB, 当 GSST 为晶态时, 输出端口  $O_2$  的 ER 值和 IL 值分别为 19.55 dB 和 0.60 dB。当 GSST 为非晶态时, 插入损耗低至 0.06 dB 的主要原因是非晶态 GSST 的消光系数仅为  $3.6 \times 10^{-2}$ , 光在 WG-g 中传输由消光系数引起的损耗可以忽略不计。但是晶态下, 插入损耗较非晶态高出 0.54 dB, 考虑主要由两种原因造成。一是 GSST 晶态的消光系数远远大于非晶态; 二是 WG-g 与 WG-1 之间较低的有效折射率失配 ( $\Delta n_{\text{eff}} = 0.533$ ), 导致部分能量被晶态的 GSST 吸收, 吸收的归一化功率为 0.116。值得注意的是, 当 GSST 为晶态时, 输出的光场强度有一定的振荡, 表明输出模式实际上由混合模式组成, 其中 WG-3 可以允许传播两种 TM 模式 ( $TM_0$  和  $TM_1$ ), 采用模式展开法计算了混合模式的归一化功率, 结果表明 WG-3 传播的模式由  $TM_0$  模式与  $TM_1$  模式组成, 归一化功率分别占总输出功率的 1.38% 和 98.62%, 如图 11(b) 所示。

看到, 当 GSST 为晶态时, WG I 与 WG III 不满足相位匹配条件,  $TM_0$  模将沿着 WG I 继续传播, ER 值和 IL 值分别为 15.07 dB 和 0.62 dB。

可重构的  $2 \times 4$  模式复用开关由两个  $1 \times 2$  模式复用开关单元和一个  $2 \times 2$  模式复用开关单元组成, 也是一个关于  $x$  方向超对称的器件, 通过改变 GSST 的相态即可实现对两路输入通道和四路输出

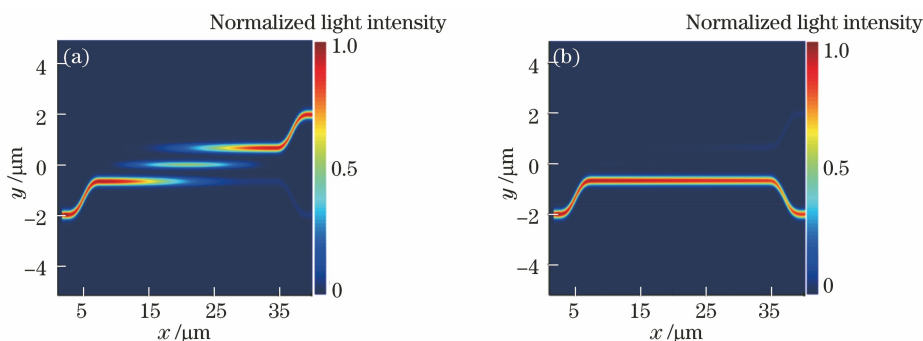


图 12  $2 \times 2$  模式复用开关各端口的仿真结果。(a)非晶态 GSST 的光场强度分布;(b)晶态 GSST 的光场强度分布

Fig. 12 Simulation results of each port of  $2 \times 2$  mode multiplexer switch. (a) Optical field intensity distribution for amorphous GSST; (b) optical field intensity distribution for crystalline GSST

通道的自由选择。当 GSST 为不同相态时,各通道信号传输的光场强度分布如图 13 所示,其中图 13(a)~13(d)对应的是 I 1 为输入端口和 O 1~

O 4 4 个输出端口的传输光场强度分布,图 13(e)~13(h)对应的是 I 2 为输入端口和 O 1~O 4 4 个不同输出端口的传输光场强度分布。

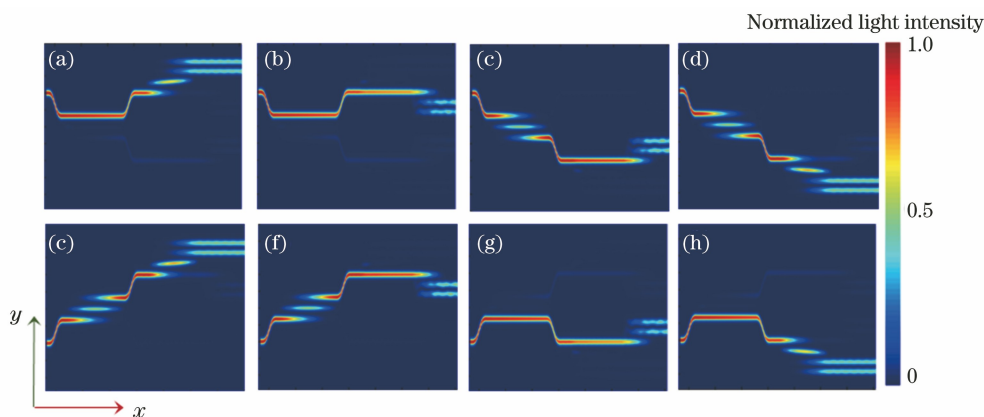


图 13 GSST 薄膜在不同状态下  $2 \times 4$  光波导复用开关各端口光场强度仿真输出。(a) I 1-O 1;(b) I 1-O 2;(c) I 1-O 3;(d) I 1-O 4;(e) I 2-O 1;(f) I 2-O 2;(g) I 2-O 3;(h) I 2-O 4

Fig. 13 Simulation output of optical field intensity of each port of  $2 \times 4$  optical waveguide multiplexing switch under different states of GSST film. (a) I 1-O 1; (b) I 1-O 2; (c) I 1-O 3; (d) I 1-O 4; (e) I 2-O 1; (f) I 2-O 2; (g) I 2-O 3; (h) I 2-O 4

表 1 为  $2 \times 4$  光开关中每一个输入-输出端口的插入损耗和消光比的计算结果。从表 1 可以看到,当 GSST 均为晶态时,插入损耗最大值为 1.22 dB,当光开关中的 GSST 有两次处于非晶态时,插入损耗低至 0.31 dB。光信号在传输过程

中,每经过一次晶态的相变材料,光的能量都会被吸收一部分。为了改善器件在晶态下的性能,可以通过改良制备 GSST 薄膜的工艺来降低其在晶态下的消光系数和增大 GSST 相变前后的光学差异( $\Delta n$ )。

表 1 GSST 在不同相态下  $2 \times 4$  光开关中相应输出端口的 IL 和 ER 值

Table 1 IL and ER values of corresponding output ports of GSST in  $2 \times 4$  optical switch in different phase states

Input	Output	GSST-1	GSST-2	GSST-3	IL /dB	ER /dB
I 1	O 1	CR	AM	CR	0.69	14.20
I 1	O 2	CR	CR	CR	1.22	13.85
I 1	O 3	AM	CR	CR	0.73	18.50
I 1	O 4	AM	CR	AM	0.31	16.38
I 2	O 1	AM	AM	CR	0.31	16.38
I 2	O 2	AM	CR	CR	0.73	18.50
I 2	O 3	CR	CR	CR	1.22	13.85
I 2	O 4	CR	CR	AM	0.69	14.20



可重构的多路复用  $2 \times 4$  光开关的工作带宽是构建 MDM 网络的关键,不同输出端口在不同工作波长下 IL 和 ER 的变化曲线如图 14 所示。从图 14 可以看到,在整个通讯 C 波段(1530~1565 nm)下,

各个端口的 ER 值均大于 12.30 dB, IL 值均小于 1.50 dB。计算结果表明,本文提出和研究的多路复用  $2 \times 4$  光开关为构建 MDM 网络提供了一种高效灵活的方法。

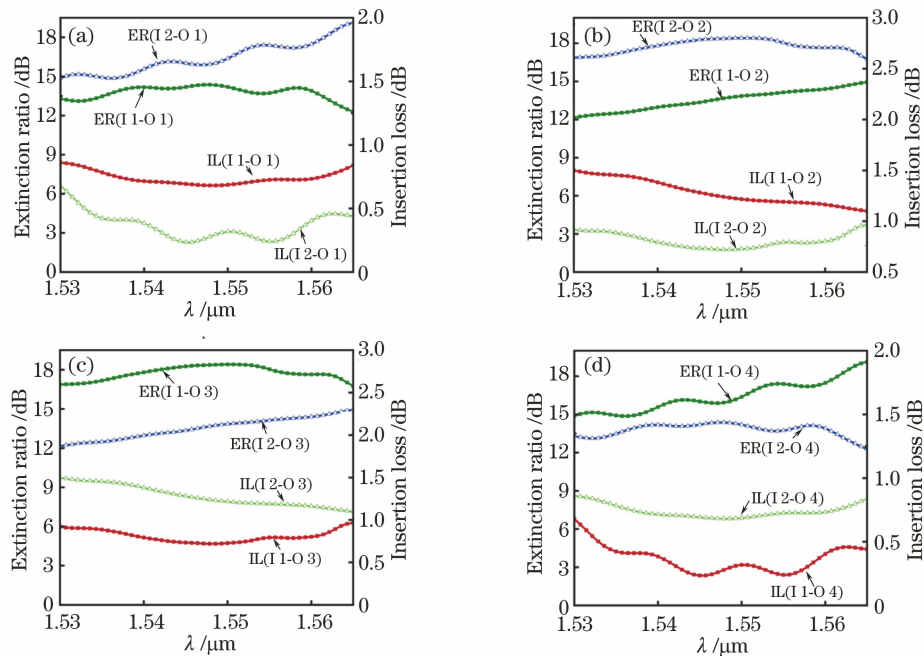


图 14 不同端口的消光比、插入损耗与波长的关系。(a) O 1 端口的消光比和插入损耗;

(b) O 2 端口的消光比和插入损耗;(c) O 3 端口的消光比和插入损耗;

(d) O 4 端口的消光比和插入损耗  
Fig. 14 Relationship among extinction ratio, insertion loss and wavelength of different ports. (a) Extinction ratio and insertion loss of O 1 port; (b) extinction ratio and insertion loss of O 2 port; (c) extinction ratio and insertion loss of O 3 port; (d) extinction ratio and insertion loss of O 4 port

## 4 结 论

本文基于 Ge-Sb-Se-Te 四元相变材料薄膜及条形波导结构,提出一种具有非易失性和低损耗的可重构的多路  $2 \times 4$  模式复用光波导开关器件,该器件由两个  $1 \times 2$  模式复用开关单元和一个  $2 \times 2$  模式复用开关单元组成。采用三维时域有限差分法和模式耦合理论对该器件进行建模,并使用实验中表征的 GSST 相变薄膜特性进行仿真计算分析。结果表明,该类基于相变材料的可重构模式复用光波导开关具有良好的输出状态和低的器件功耗; $1 \times 2$  开关在 GSST 薄膜为非晶态的情况下,插入损耗低至 0.06 dB;晶态和非晶态两种情况下的 ER 值分别为 19.55 dB 和 27.58 dB。 $2 \times 4$  开关在 C 波段各个端口输出的情况下,插入损耗的最小值为 0.23 dB,消光比的最大值为 19.12 dB,其余端口的插入损耗均小于 1.50 dB,消光比均大于 12.30 dB。通过合理控制相变薄膜及光波导结构单元,可实现高效多路

进-出的可重构模式复用光开关应用。

## 参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] Chen H M, Zhuang Y Y. Research progress on key technologies in mode division multiplexing system [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018, 38(1): 37-44.  
陈鹤鸣, 庄煜阳. 模分复用系统关键技术研究进展 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 37-44.
- [3] Li X, Zhang L J, Huang B, et al. Stokes space multiplexing system using spectrum compression [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 090602.  
李霞, 张黎杰, 黄斌, 等. 基于频谱压缩的斯托克斯空间复用系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 090602.

- [4] He Y, Zhang Y, Zhu Q M, et al. Silicon high-order mode (de) multiplexer on single polarization [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5746-5753.
- [5] Wang F, Yang J Y, Chen L M, et al. Optical switch based on multimode interference coupler [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(2): 421-423.
- [6] Luo L W, Ophir N, Chen C P, et al. WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3069.
- [7] Wang L L, Zhang D M, Lian T H, et al. Polymeric waveguide thermo-optic switch based on directional coupler[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0704002.  
王力磊, 张大明, 廉天航, 等. 基于定向耦合结构的聚合物波导热光模式开关研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0704002.
- [8] Tao H, Mi Y A, Ren W H, et al. Vector mode conversion based on tilted long-period fiber grating written in ring fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0606002.  
陶洪, 卞月安, 任文华, 等. 基于环形光纤的倾斜长周期光纤光栅的矢量模式转换[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0606002.
- [9] Sun J, Wu Y D, Wu W F, et al. Optimization of polarization-dependent loss of arrayed waveguide grating demultiplexer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0106003.  
孙健, 吴远大, 吴卫锋, 等. 阵列波导光栅解复用器的偏振相关损耗的优化[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0106003.
- [10] Stern B, Zhu X L, Chen C P, et al. On-chip mode-division multiplexing switch [J]. *Optica*, 2015, 2(6): 530-535.
- [11] Tu X, Chen Z M, Fu H Y. Review of silicon photonic switches[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(10): 104210.  
涂鑫, 陈震旻, 付红岩. 硅基光波导开关技术综述[J]. *物理学报*, 2019, 68(10): 104210.
- [12] Yang L, Zhou T, Jia H, et al. General architectures for on-chip optical space and mode switching [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 180-187.
- [13] 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.
- [14] Sun C L, Wu W H, Yu Y, et al. De-multiplexing free on-chip low-loss multimode switch enabling reconfigurable inter-mode and inter-path routing[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(9): 1571-1580.
- [15] Ye M Y, Yu Y, Sun C L, et al. On-chip data exchange for mode division multiplexed signals [J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 528-535.
- [16] Zhou L, Soref R, Chen J. Wavelength-selective switching using double-ring resonators coupled by a three-waveguide directional coupler [J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 13488-13498.
- [17] 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.
- [18] Nie L X, Zhang Y, Xian S L, et al. High-speed and low-insertion-loss silicon waveguide phase shifter based on high mobility transparent conductive oxides [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 152302.  
聂立霞, 张燕, 鲜仕林, 等. 基于高迁移率透明导电氧化物的高速、低插入损耗硅基光波导移相器研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 152302.
- [19] Zheng J J, Khanolkar A, Xu P P, et al. GST-on-silicon hybrid nanophotonic integrated circuits: a non-volatile quasi-continuously reprogrammable platform [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(6): 1551-1561.
- [20] Wuttig M, Yamada N. Phase-change materials for rewriteable data storage[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(11): 824-832.
- [21] Shportko K, Kremers S, Woda M, et al. Resonant bonding in crystalline phase-change materials [J]. *Nature Materials*, 2008, 7(8): 653-658.
- [22] Wuttig M, Bhaskaran H, Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 465-476.
- [23] Miller K J, Haglund R F, Weiss S M. Optical phase change materials in integrated silicon photonic devices: review [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(8): 2415-2429.
- [24] Hudgens S, Johnson B. Overview of phase-change chalcogenide nonvolatile memory technology [J]. *MRS Bulletin*, 2004, 29(11): 829-832.
- [25] Stegmaier M, Ríos C, Bhaskaran H, et al. Nonvolatile all-optical  $1 \times 2$  switch for chipscale photonic networks [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(1): 1600346.
- [26] Zhang Y F, Li J Y, Chou J, et al. Broadband transparent optical phase change materials [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2017: JTh5C.4.
- [27] Zhang Q H, Zhang Y F, Li J Y, et al. Broadband nonvolatile photonic switching based on optical phase

- change materials: beyond the classical figure-of-merit [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 94-97.
- [28] Jiang W F. Nonvolatile and ultra-low-loss reconfigurable mode (de) multiplexer/switch using triple-waveguide coupler with  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  phase change material [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 15946.
- [29] de Leonadis 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.
- [30] Chen H X, Jia H, Wang T, et al. Broadband nonvolatile tunable mode-order converter based on silicon and optical phase change materials hybrid meta-structure [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(7): 1874-1879.
- [31] Jiang W F, Rahman B M A. Compact and nonvolatile mode-selective switch with nano-heater [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 1-10.
- [32] Hardy A, Streifer W. Coupled mode theory of parallel waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 3(5): 1135-1146.
- [33] Xiao H F, Liu Z L, Han X, et al. On-chip reconfigurable and scalable optical mode multiplexer/demultiplexer based on three-waveguide-coupling structure [J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 22366-22377.
- [34] Marom E, Ramer O, Ruschin S. Relation between normal-mode and coupled-mode analyses of parallel waveguides [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, 20(12): 1311-1319.
- [35] Wilson D W, Glytsis E N, Gaylord T K. Supermode analysis of electron wave directional coupling using a multilayer waveguide approach [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 73(7): 3352-3366.
- [36] Lee S Y, Darmawan S, Lee C W, et al. Transformation between directional couplers and multi-mode interferometers based on ridge waveguides [J]. *Optics Express*, 2004, 12(14): 3079-3085.
- [37] Salandrino A, Makris K, Christodoulides D N, et al. Analysis of a three-core adiabatic directional coupler [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(23): 4524-4526.
- [38] Chen X, Meng W, Lou C B. Structure of adiabatic coupled supersymmetric waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0223001.  
陈欣, 孟伟, 楼慈波. 绝热耦合超对称光波导结构 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0223001.
- [39] Yariv A. *Quantum electronics* [M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 1989: 600-640.
- [40] Ye C R, Liu K, Soref R A, et al. A compact plasmonic MOS-based  $2 \times 2$  electro-optic switch [J]. *Nanophotonics*, 2015, 4(3): 261-268.