

引用格式: CAO Heng-ying, CHEN He-ming, BAI Xiu-li. Orbital Angular Momentum Modes Generator and Multiplexer Based on Silicon Waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12):1248003

曹恒颖,陈鹤鸣,白秀丽. 基于硅基波导光子轨道角动量的产生及复用[J]. *光子学报*, 2019, 48(12):1248003

# 基于硅基波导光子轨道角动量的产生及复用

曹恒颖<sup>1</sup>, 陈鹤鸣<sup>2</sup>, 白秀丽<sup>1</sup>

(1 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 微电子学院, 南京 210023)

(2 南京邮电大学 贝尔英才学院, 南京 210023)

**摘 要:**设计了一种基于硅基波导光子轨道角动量的产生及复用器,该器件主要由非对称定向耦合器和带沟槽的波导两部分组成,根据相位匹配条件,基模  $TE_{00}$  通过非对称定向耦合器耦合成一阶模  $TE_{10}$ ,带沟槽的波导可支持光轴相对于水平和垂直方向旋转  $45^\circ$  的两个正交的本征模,调整两个正交的本征模的相位差,使其进行简并,可进一步将  $TE_{10}$  转换为多种轨道角动量模式,并在第二个沟槽结构中进行复用.采用时域有限差分法进行仿真计算,结果表明:该器件可以实现拓扑荷为  $+1, 0, -1$  的光子轨道角动量模式的产生及复用,且器件结构紧凑,尺寸小于  $80 \mu\text{m} \times 5.3 \mu\text{m}$ ,损耗小于  $0.24 \text{ dB}$ ,适用波长范围为  $1.47 \sim 1.58 \mu\text{m}$ .该器件制作工艺简单,易于集成,可应用于轨道角动量复用系统等领域.

**关键词:**光通信;轨道角动量;轨道角动量多路复用;时域有限差分法;硅基波导;相位匹配;模式耦合

中图分类号: TN814

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1248003

## Orbital Angular Momentum Modes Generator and Multiplexer Based on Silicon Waveguides

CAO Heng-ying<sup>1</sup>, CHEN He-ming<sup>2</sup>, BAI Xiu-li<sup>1</sup>

(1 College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(2 Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Based on an integrated silicon platform, a device for generating and multiplexing optical orbital angular momentum modes is proposed, which is consisted of asymmetric directional coupler and trench waveguides. According to the principle of phase matching, the fundamental mode  $TE_{00}$  is coupled to the first-order mode via an asymmetric directional coupler. Single-trench waveguide can support two orthogonal linear polarization-like modes whose optical axes are rotated by around  $45^\circ$  with respect to the horizontal and vertical directions. Adjusting the phase difference of two orthogonal eigenmodes to make them degenerate,  $TE_{00}$  can be converted into orbital angular momentum modes with various topological charges, and multiplexed in the second trench. The simulation is carried out with finite difference domain method. The results show that the device can realize the generation and multiplex of orbital angular momentum modes with topological charges of  $+1, 0, -1$ . The proposed device is very compact with a footprint of  $< 80 \mu\text{m} \times 5.3 \mu\text{m}$  and an insertion loss of  $0.24 \text{ dB}$ , and is fit for a wavelength range from  $1.47 \mu\text{m}$  to  $1.58 \mu\text{m}$ . The structure is simple and easy to integrate, having a good application in orbital angular momentum multiplexing system.

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos.61077084, 61571237),江苏省自然科学基金(No.BK20151509),江苏省研究生科研创新计划(No.KYLX15\_0835)

**第一作者:**曹恒颖(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向为光子轨道角动量的产生及复用. Email: 1017030921@njupt.edu.cn

**导师(通讯作者):**陈鹤鸣(1958-),男,教授,学士,主要研究方向为光通信技术、信息光电子技术和光波技术. Email: chhm@njupt.edu.cn

**收稿日期:**2019-05-28; **录用日期:**2019-08-22

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

**Key words:** Optical communication; Orbital angular momentum modes; Orbital angular momentum modes multiplex; Finite difference time domain method; Silicon waveguides; Phase matching; Mode coupling

**OCIS Codes:** 060.2230; 060.4230; 060.4510; 050.4865

## 0 引言

近年来随着互联网的高速发展,各类移动通信业务层出不穷,社会对于通信容量的需求越来越大.在光通信领域中,现有的复用技术在频谱利用率和系统容量上趋近香农极限,并不能满足日益增长的通信容量要求.空分复用技术(Space-Division Multiplexing, SDM)为增加光通信系统容量提供了一种新的方法<sup>[1-2]</sup>.光子轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)复用是 SDM 的一种实现方式.基于 OAM 的复用通信相比其他的复用方式,主要优势在于:1)不同 OAM 模式具有正交性<sup>[3]</sup>,提高了信息的可靠性;2)由于 OAM 的拓扑荷  $l$  和方位角  $\theta$  之间的不确定关系,OAM 的复用通信可以有效防止窃听,提高了安全性;3)采用 OAM 复用通信的频谱利用率远远高于 LTE(Long Term Evolution)、802.11n 和地面数字视频广播.因此,基于 OAM 这一新型自由度的复用通信引起了业界的极大关注<sup>[4]</sup>.

2012 年,美国 WILLER A E<sup>[5]</sup> 利用空间光调制器实现了 OAM 复用新型高速通信模型,用 4 束不同的 OAM 光束以及正交振幅编码的信号进行多路复用,使得自由空间光通信系统传输速率达到 1 369.9 Gbit/s.后通过进一步扩展,利用承载 OAM 模的 8 路信号进行偏振复用,传输速率达到 2 560 Gbit/s.2014 年通信速率达到了 1 Pb/s<sup>[6]</sup>.2016 年,WANG<sup>[7]</sup> 等验证了双 OAM 模态在少模光纤中的复用,在没有使用多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)均衡技术的情况下,实验测得单 OAM 模态的光信噪比的变化在误码率为  $3.8 \times 10^{-3}$  时小于 1 dB,双 OAM 模态复用时小于 2 dB.

OAM 的产生主要分为腔内转化法和腔外转化法,腔内转化<sup>[8-9]</sup>法指的是能直接从激光腔中输出单值或多值涡旋光束的方法,腔外转化法指的是在腔外将一个普通高斯光束直接转化成涡旋光束的方法.腔外转化法中,可以采用螺旋相位板<sup>[10]</sup>、衍射相位光栅<sup>[11]</sup>、超材料<sup>[12-13]</sup>、Q 板<sup>[14]</sup>以及液晶空间光调制器<sup>[15]</sup>等多种光学器件实现光学涡旋的产生,但是利用这些方法产生 OAM 时,器件体积较大,不利于集成且成本较高.在波导产生法中,平面波导器件运用最多的材料主要为玻璃、聚合物(Polymer)和半导体.基于离子交换的玻璃波导性能良好,偏振不敏感.使用 Polymer 材料的波导可以精确地控制模的厚度,其缺点是容易受外界温度的影响.硅基材料近年来也备受关注,SOI 光波导器件与光纤的结构相似,非常适合做平面波导回路.SiO<sub>2</sub> 光波导和 CMOS 电路工艺兼容,同时波导损耗也不大,便于光电子的集成.

基于光纤或硅绝缘体材料(Silicon-on-insulator, SOI)产生的 OAM,具有器件尺寸小、速度快、成本低等明显优势<sup>[16-17]</sup>.然而,基于硅基波导的腔外 OAM 光束生成器仍然是一项艰难的挑战.2012 年 WANG Jian 课题组提出了一种定向耦合器的设计<sup>[18]</sup>,利用光纤之间较小的间距、彼此导模的相互耦合作用来产生光纤中的 OAM 模式分布.2017 年,王健课题组在提出利用硅基波导产生及复用 OAM<sup>[19]</sup>,但是该方法设计的波导尺寸大,其复用部分结构长达 100  $\mu\text{m}$ ,结构设计要求高,所适用的波段范围仅为 1.52~1.58  $\mu\text{m}$ .

本文设计的基于硅基波导的 OAM 产生及复用器,能够在在一根带沟槽的多模波导上实现模式耦合以及模式转换的功能,大大减小了器件的尺寸,易于集成,降低了后续的传输以及解复用集成结构成本.

## 1 结构模型与理论分析

设计的基于硅基波导轨道角动量(OAM)的产生及复用器结构如图 1(a)所示.主要由单模输入波导 Input1、Input3,弯曲波导  $S_1$ 、 $S_2$ ,单模直波导 wg1、wg3,多模直波导 wg2,以及两个沟槽 Trench1、Trench2 组成.单模直波导与多模波导的间距  $g=0.03 \mu\text{m}$ ,耦合长度即单模直波导的长度  $\ell=12.7 \mu\text{m}$ ,沟槽长度  $L=15 \mu\text{m}$ .沟槽的截面如图 1(b)所示,其中  $w=0.12 \mu\text{m}$ , $h=0.34 \mu\text{m}$ , $W=1 \mu\text{m}$ , $H=1.1 \mu\text{m}$ .在不影响光源以及控制器件体积的情况下,弯曲波导中  $h'=1.5 \mu\text{m}$ , $w'=5 \mu\text{m}$ .该器件采用 SiO<sub>2</sub> 作为包层材料,波导材料设置为 Si,在 Port1、Port2、Port3 中输入 TE<sub>00</sub>,波长设置为通信波段中的 1 550 nm.

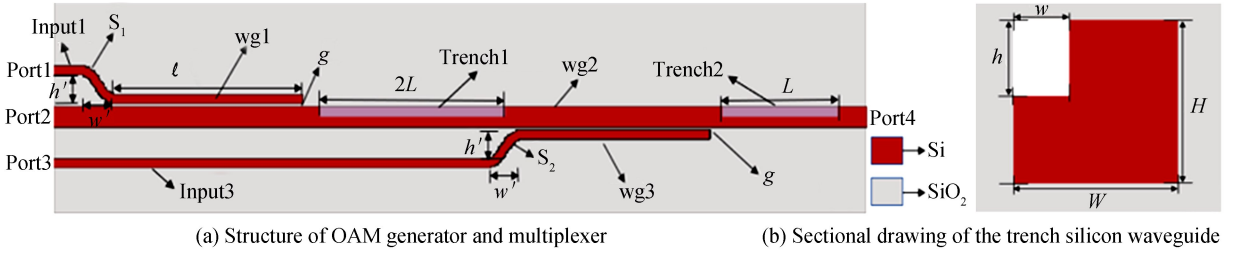


图1 轨道角动量的结构及其沟槽波导的截面图  
Fig.1 OAM structure diagram and its trench section

令单模波导  $wg_1$  中传输光波的复振幅为  $A_1$ , 多模波导  $wg_2$  中传输光波的复振幅为  $A_2$ , 当两波导中光波沿  $z$  方向传输时, 会发生横向耦合, 根据横向耦合模理论<sup>[20]</sup>, 其线性微分方程组可表示为

$$\begin{aligned} d(A_1)/dz &= -j\beta_1 A_1(z) + \kappa_{12} A_2(z) \\ d(A_2)/dz &= -j\beta_2 A_2(z) + \kappa_{21} A_1(z) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\beta_1, \beta_2$  为单模波导和多模波导中光波的传播常数,  $\kappa_{12}, \kappa_{21}$  为耦合系数, 设置边界条件, 当  $z = 0$  时,  $A_1(0) = 1, A_2(0) = 0, \kappa_{12} = \kappa_{21} = jc$ ,  $c$  是常数. 经推导可得多模和单模波导中光波的传输功率为

$$\begin{cases} P_2 = |A_2|^2 = \sin^2(\sqrt{1+Q^{-2}} cz) / (1+Q^{-2}) \\ P_1 = 1 - P_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $Q = 2c / (\beta_1 - \beta_2)$ . 当  $\beta_1 = \beta_2$  时, 两个波导中光波的复振幅可以表示为

$$\begin{aligned} A_1(z) &= \cos(cz) \\ A_2(z) &= \sin(cz) \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可得, 当  $cz = n\pi/2$  ( $n$  为正奇数) 时,  $A_1(z) = 0, A_2(z) = 1$ , 即传输功率发生转换, 在单模波导中传输的光波能完全耦合到多模波导中传输.

因此波导中, 要实现模式的最佳横向耦合, 需要光波在单模波导中的传播常数与多模波导中的传播常数相等, 即

$$\beta_1 = \beta_2 \quad (4)$$

为了耦合效率达到最高, 也需要选择合适的耦合长度  $\ell$ .

沟槽波导通常用来实现偏振旋转器以及模式转换器, 利用沟槽来打破矩形波导中的旋转对称性. 一阶模可以激发为两个不同传播常数 ( $\beta_a$  和  $\beta_b$ ) 的本征模, 当两个本征模传输一段距离时 (即沟槽的长度  $L$ ), 两个正交的本征模之间会产生相位差, 如图 2 所示. 当两个正交本征模的相位差为  $\pi/2$  以及  $3\pi/2$  时,  $TE_{10}$  模将会分别转化成拓扑荷为  $+1$  和  $-1$  的 OAM 模式; 当相位差为  $\pi$  时,  $TE_{10}$  模将会转化成为  $TE_{01}$  模; 若是相位差为  $0$  或  $2\pi$  时,  $TE_{10}$  模仍是  $TE_{10}$  模输出. 转换为 OAM 模式所需要的传输距离为<sup>[21-22]</sup>

$$L_{OAM+1} = \frac{\pi}{2(\beta_a - \beta_b)} \quad (5)$$

$$L_{OAM-1} = \frac{3\pi}{2(\beta_a - \beta_b)} \quad (6)$$

光束在矩形波导中传输时, 因为矩形波导具有固有的对称性, 所以模式传输时不会发生旋转, 而沟槽打破了矩形波导的固有对称性, 从而使得模式发生旋转. 根据相移要求, 产生  $OAM_{-1}$  的沟槽长度是产生  $OAM_{+1}$  沟槽长度的 3 倍, 不同拓扑电荷之间的 OAM 相互正交, 在传输过程中互不影响, 因此整个结构的沟槽设置为两部分, 第一个沟槽 Trench1 的长度设置为第二个沟槽 Trench2 的两倍.

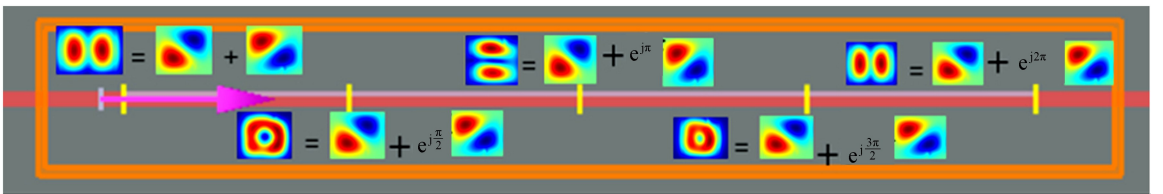


图2 OAM 生成器的沟槽结构和原理  
Fig.2 Concept and principle of OAM generator

如图3所示,在Port1中输入基模 $TE_{00}$ ,经过不对称定向耦合器后在多模波导wg2中转化为 $TE_{10}$ , $TE_{10}$ 在经过长沟槽Trench1后,模式转化为 $TE_{01}$ ,再经过短凹槽Trench2后,模式由 $TE_{01}$ 转化为 $OAM_{-1}$ ,在Port4输出 $OAM_{-1}$ ;从Port2向波导wg2中输入的是基模 $TE_{00}$ , $TE_{00}$ 在整个波导wg2中传输时并未发生模式转化,所以在输出端Port4仍是以 $TE_{00}$ 输出,即 $OAM_0$ ;从Port3向波导wg3中,输入基模 $TE_{00}$ ,同波导wg1类似,先经过不对称定向耦合器后在多模波导wg2中转化为高阶模 $TE_{10}$ ,再经过一个短沟槽Trench2后,进行模式转化,由 $TE_{10}$ 转化 $OAM_{+1}$ ,在Port4输出 $OAM_{+1}$ .

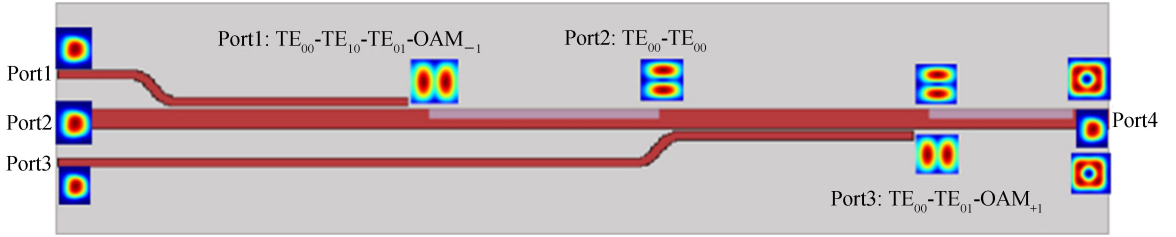


图3 各波导中的模式转化  
Fig.3 Mode conversion in waveguides

波导间的耦合效率定义为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, $P_{out}$ 表示不定向耦合器输出端输出的功率, $P_{in}$ 表示不定向耦合器输入的功率.

在复用/解复用系统中,需要考虑的主要性能指标是插入损耗和信道串扰.插入损耗定义为

$$\gamma = 10 \log \left( \frac{I_{in}}{I_{out}} \right) \quad (8)$$

式中, $I_{in}$ 是输入光强, $I_{out}$ 是传输信道的输出光强.

信道串扰定义为

$$C = 10 \log \left( \frac{I'_{out}}{I_{out}} \right) \quad (9)$$

式中, $I'_{out}$ 为传输信道进入相邻信道的光强, $I_{out}$ 为输出信道的输出光强.

## 2 仿真优化及性能分析

带沟槽的多模波导wg2中,若截面为正方形( $W=H$ ), $TE_{10}$ 会在多模波导中杂化.采用时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD),以完全匹配层(Perfect Matching Layer, PML)作为吸收边界条件,进行三维结构模拟.S波导对波导耦合有一定的影响,调节S波导的高度 $h'$ 以及宽度 $w'$ ,观察其对耦合效率的影响,如图4.

仿真结果看出,相同情况下,当弯曲波导的高度 $h'$ 大于宽度 $w'$ 时,耦合效率较低,当 $h'$ 小于宽度 $w'$ 时,耦合效率较高,且S波导越平缓,则耦合效率越好,所以设置S的高度是 $1.5 \mu\text{m}$ ,宽度是 $5 \mu\text{m}$ .

多模波导wg2的宽度设置为 $W=1 \mu\text{m}$ ,高度

$H=1.1 \mu\text{m}$ ,在通信波长 $1550 \text{ nm}$ 时,多模波导wg2中 $TE_{10}$ 模式有效折射率 $n_{\text{eff}TE_{10}}=3.123744$ ,调节波导单模wg1的高度 $H_1$ ,使得波导wg1中 $TE_{00}$ 模式的有效折射率和多模波导wg2中 $TE_{10}$ 的有效折射率相同.单模波导wg3的高度 $H_3$ 、宽度 $W_3$ 的取值与单模波导wg1相同.单模波导wg1内 $TE_{00}$ 模式的有效折射率随波导wg1的高度 $H_1$ 的变化如图5所示,图5(b)是图5(a)的局部放大图.

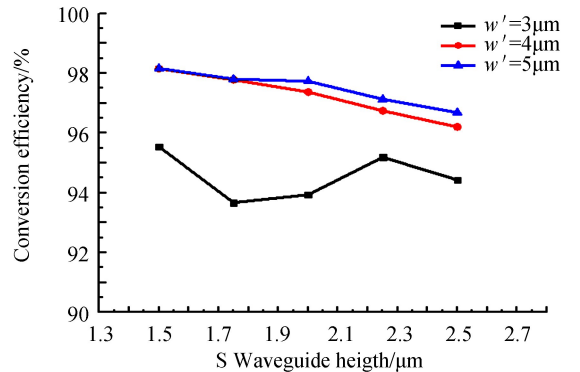


图4 S波导的高度和宽度对耦合效率的影响  
Fig.4 Conversion efficiency versus different height and width of S waveguide



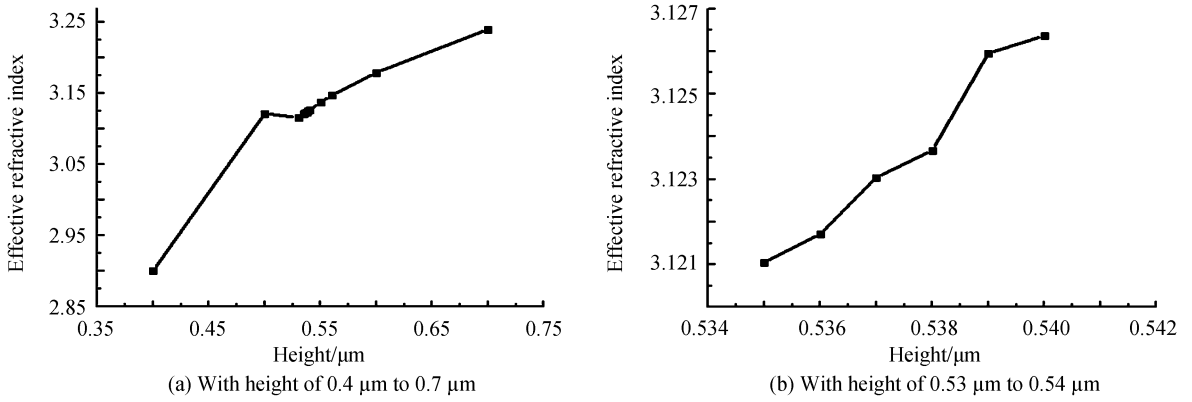


图5 硅基波导内模式的有效折射率随波导高度的变化  
Fig.5 Effective index of modes in waveguide versus height of waveguide

当  $H_1 = 0.538 \mu\text{m}$  时,波导 wg1 中的有效折射率  $n_{\text{effTE}00} = 3.123677$ ,与波导 wg2 中有效折射率  $n_{\text{effTE}10}$  率近似相同。

在仿真中设置合适的波导间隔  $g$ ,调节耦合长度  $\ell$ ,使得耦合效率  $\eta$  达到最高.不同波导间隔  $g$  对应的耦合长度  $\ell$  与耦合效率的关系如图 6 所示。

由仿真结果可得:当波导间隔  $g = 0.03 \mu\text{m}$  时,耦合长度  $\ell = 12.7 \mu\text{m}$ ,波导 wg1 中  $\text{TE}_{00}$  耦合到波导 wg2 中的效率最高,可达到 98.8%,当耦合长度达到  $18 \mu\text{m}$  时,模式开始杂化;当波导间隔  $g = 0.04 \mu\text{m}$  时, $\text{TE}_{00}$  从  $13 \mu\text{m}$  开始转化为  $\text{TE}_{10}$ ,当耦合长度  $\ell = 18.6 \mu\text{m}$ ,波导 wg1 中  $\text{TE}_{00}$  耦合到波导 wg2 中的效率最高,可达 97.1%,当耦合长度到  $23 \mu\text{m}$  时,模式开始杂化;当波导间隔  $g = 0.05 \mu\text{m}$  时, $\text{TE}_{00}$  从  $14 \mu\text{m}$  开始转化为  $\text{TE}_{10}$ ,当耦合长度  $\ell = 20.8 \mu\text{m}$ ,波导 wg1 中  $\text{TE}_{00}$  耦合到波导 wg2 中的效率最高,可达 98.58%。综上,设置波导间隔  $g = 0.03 \mu\text{m}$ ,耦合长度  $\ell = 12.7 \mu\text{m}$ 。

利用沟槽来打破矩形波导中的旋转对称性,需要注意的是,若是沟槽的尺寸太长,则会导致波导中的本征模传播常数差异过大,会在沟槽边界处发生模式失配的问题,所以沟槽的尺寸应该设计得较小,即沟槽的宽度  $w$  和高度  $h$  设计相对较小.同时要注意的是,为了产生高纯度的 OAM,要求波导激发的相互正交的本征模在波导中的重叠积分各为 0.5<sup>[20]</sup>.分别调节沟槽的高度  $h$ 、宽度  $w$ ,使得相互正交的本征模在带沟槽的多模波导中的重叠积分尽可能接近 0.5.仿真结果如图 7 所示。

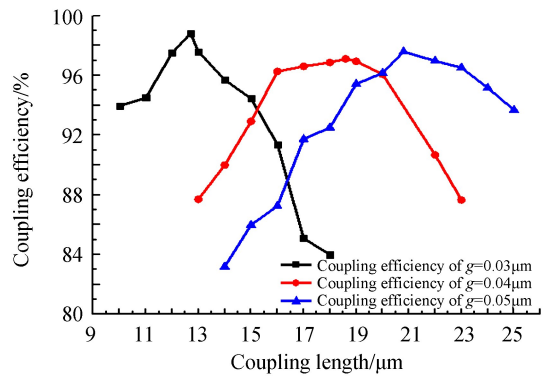


图6 不同波导间隔对应的波导 wg1 的耦合长度与耦合效率的关系

Fig.6 Conversion efficiency of wg1 versus coupling length between different waveguide distances

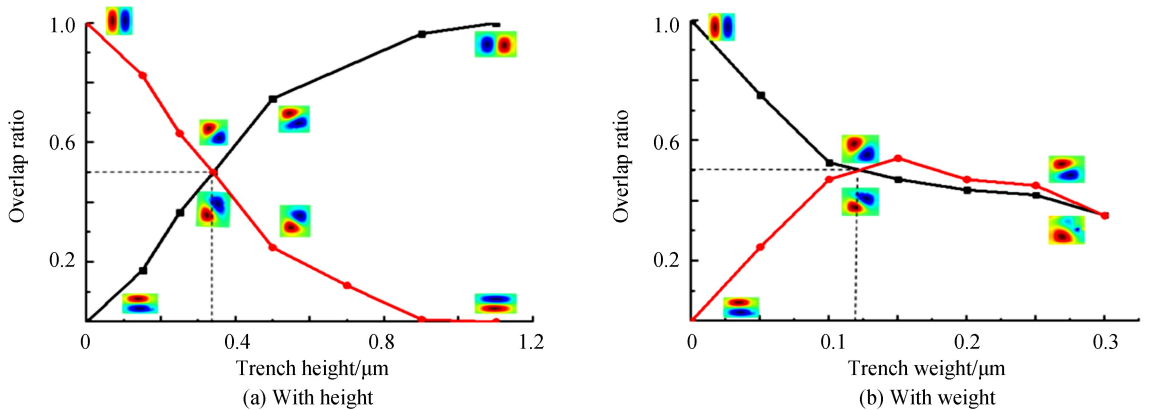


图7 1550 nm 处正交本征模的重叠积分与沟槽尺寸的变化

Fig.7 Overlap of orthogonal eigenmode at 1550 nm versus size of trench

经仿真优化,取沟槽的宽度  $w=0.12 \mu\text{m}$ ,高度  $h=0.34 \mu\text{m}$ ,两个相互正交的本征模的重叠积分最接近 0.5.此时,经过计算,旋转模在沟槽中的有效折射率为 3.123 159,多模波导中的模式与其高度耦合,可以忽略其反射损耗.

根据式(8)设置  $\text{OAM}_{+1}$ 的沟槽长度  $L$ ,以波导 wg3 通道为例,让高阶模  $\text{TE}_{10}$  进入沟槽中转换  $\text{OAM}_{+1}$ ,检测其转换效率,以此确定沟槽  $L$  的长度.由此得出沟槽的长度  $L$  与  $\text{OAM}_{+1}$ 的转化效率如图 8 所示.可得, $L=15.6 \mu\text{m}$  时,转化效率最高.

波长为 1 550 nm 的  $\text{TE}_{00}$  从 Port1 入射时,检测出 Port2、Port3、Port4 的光强,其模场分布如图 9 (a)所示.同理,波长为 1 550 nm 的  $\text{TE}_{00}$  从 Port2 输入,检测出 Port1、Port3、Port4 的光强,其模场图如图 9(b)所示;波长为 1 550 nm 的  $\text{TE}_{00}$  从 Port3 输入时,检测出 Port1、Port2、Port4 的光强,其模场图如图 9(c)所示.

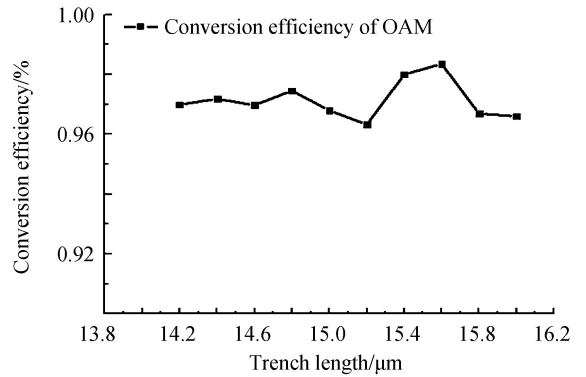


图 8 沟槽长度对应的模式透过率  
Fig.8 Conversion efficiency of OAM versus trench length

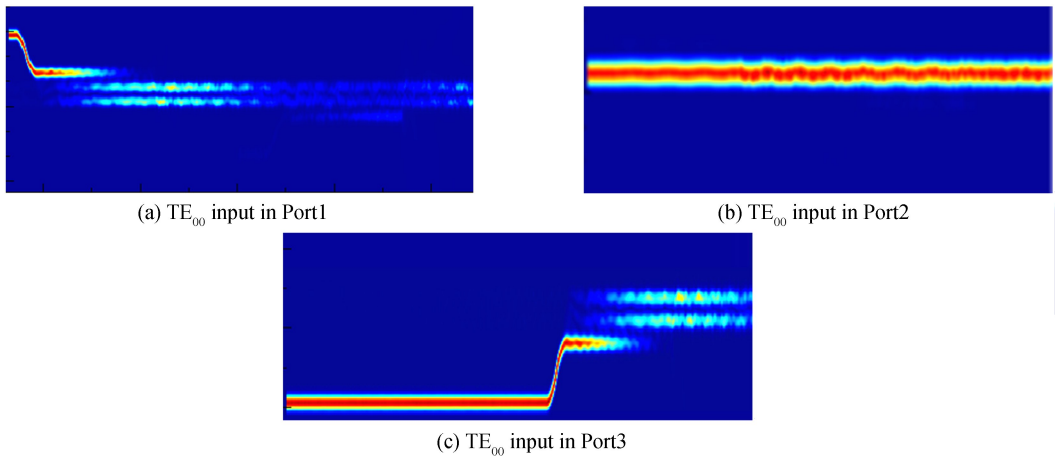


图 9  $\text{TE}_{00}$  分别从 Port1、Port2、Port3 入射时,在其他端口处检测到的光场  
Fig.9 Detected light field at other ports with  $\text{TE}_{00}$  input in Port1, Port2 and Port3, respectively

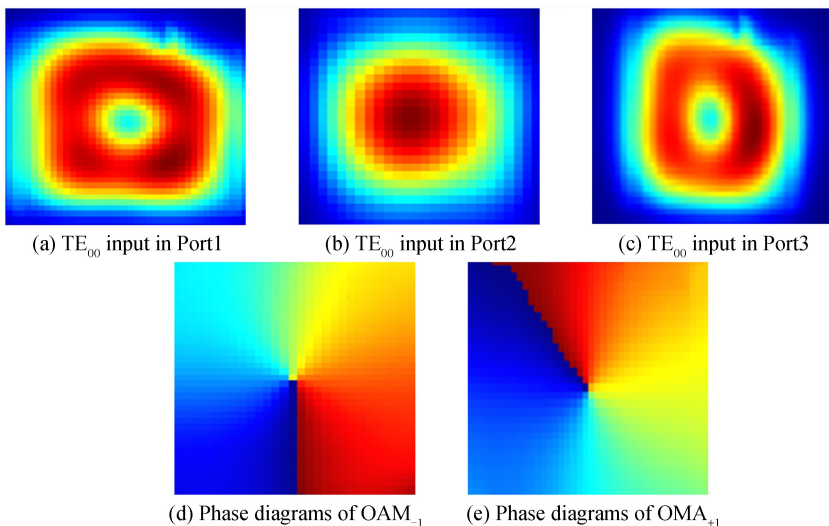


图 10 在端口 4 检测到  $\text{TE}_{00}$  从不同端口入射的光场以及  $\text{OAM}_{\pm 1}$  对应的相位  
Fig.10 Light field of  $\text{TE}_{00}$  incident from different ports detected at Port 4 and  $\text{OAM}_{\pm 1}$

从图 9 和图 10 可以看出,当  $\text{TE}_{00}$  模式从 Port1 输入,经过模式耦合以及模式转换后在 Port4 生成

$OAM_{-1}$ ;  $TE_{00}$ 从 Port2 输入,在 Port4 产生  $OAM_0(TE_{00})$ ;  $TE_{00}$ 从 Port3 输入经过模式耦合以及模式转换后在 Port4 产生  $OAM_{+1}$ .由于  $TE_{00}$  经过不对称定向耦合器后,并未完全转化为  $TE_{10}$ ,沟槽的参数设计也是尽可能地满足正交本征模的重叠积分为 0.5,那么剩余的光会对产生的 OAM 有影响,造成探测器探测到的场分布并不完美.影响 OAM 复用的性能参数是插入损耗以及串扰,利用式(8)计算得到插入损耗见表 1,利用式(9)计算得到信道串扰见表 2.

表 1 波长 1 550 nm 时的各信道的插入损耗

Table 1 The insertion loss value of the channels with  $\lambda = 1\ 550\ \text{nm}$ 

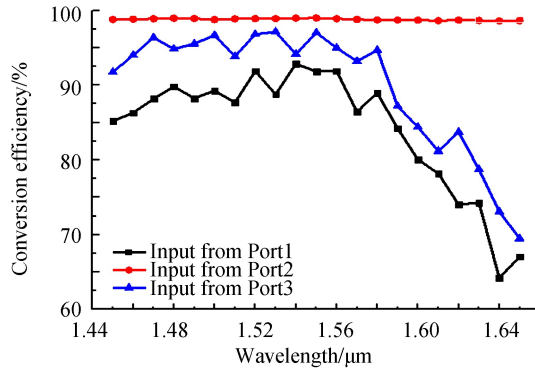
	$OAM_{-1}$	$OAM_0$	$OAM_{+1}$
Insertion loss/dB	0.24	0.13	0.14

表 2 波长 1 550 nm 时各信道的串扰

Table 2 The crosstalk value of the channels with  $\lambda = 1\ 550\ \text{nm}$ 

Crosstalk/dB	Port1	Port2	Port3
Port1	-	-20.05	-22.51
Port2	-34.12	-	-31.77
Port3	-28.26	-21.37	-

由表 1 和表 2 可以看出,基于硅基波导 OAM 的产生及复用器的插入损耗最大为 0.24 dB,最小为 0.13 dB,其通道的信道串扰最大为 -20.05 dB,最小为 -34.12 dB,复用性能良好.

图 11 波长范围为 1.45~1.65  $\mu\text{m}$  时 OAM 的转换效率Fig.11 Conversion efficiency of OAM with wavelength of 1.45~1.65  $\mu\text{m}$ 

通过仿真得到器件在 1.45~1.65  $\mu\text{m}$  波段范围内的转换效率,如图 11,可知该器件可以在 1.47~1.58  $\mu\text{m}$  波长范围有很好的转换效率,该基于硅基波导的 OAM 产生及复用器适用波段范围为 1.47~1.58  $\mu\text{m}$ ,波段范围广.

### 3 结论

本文提出一种基于硅基波导的 OAM 的产生及复用器,该器件结构由耦合部分以及带沟槽的波导两部分组成,调节单模波导的高度和宽度,使得基模  $TE_{00}$  通过非对称定向耦合器耦合成高阶模  $TE_{10}$ ,经过沟槽产生不同的相位差后,两个正交的本征模进行简并形成  $OAM_{\pm 1}$ .该器件结构简单,可实现波长范围为 1.47~1.58  $\mu\text{m}$  的 OAM 产生及复用,插入损耗低,信道串扰小,结构紧凑,尺寸小于  $80\ \mu\text{m} \times 5.3\ \mu\text{m}$ ,可应用于 OAM 复用系统及显微镜、捕获粒子和光子纠缠.

#### 参考文献

- [1] HECKENBER N R. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(3):221-223.
- [2] JIA D, ZHANG H, ZHE J I, *et al.* Optical fiber amplifiers for space-division multiplexing[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2012, **5**(4):351-357.
- [3] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: Origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, **3**(2):161-204.
- [4] SHEN Y, CAMPBELL G T, HAGE B, *et al.* Generation and interferometric analysis of high charge optical vortices[J].

- Journal of Optics*, 2013, **15**(4):1-7.
- [5] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(7):488-496.
- [6] WANG J, LI S, LUO M, *et al.* N-dimensional multiplexing link with 1.036-Pbit/s transmission capacity and 112.6-bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM-8QAM signals over 368 WDM pol-muxed 26 OAM modes[C]. IEEE European Conference on Optical Communication, 2014:1-3.
- [7] WANG J, ZHU L, ZOU K, *et al.* Experimental demonstration of orbital angular momentum (OAM) modes (De) multiplexing and transmission in 2-km fiber with Nyquist 32-QAM coherent detection signals[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016, SW4F:SW4F.2.
- [8] VAUGHAN J M, WILLETTS D V. Temporal and interference fringe analysis of TEM<sub>01</sub> \* laser modes[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, **73**(8):1018-1021.
- [9] LEE A J, ZHANG Chun-yu, OMATSU T, *et al.* An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(5):5400-5409.
- [10] LI Y, DEMG J, LI J, *et al.* Sensitive orbital angular momentum (OAM) monitoring by using gradually changing-period phase grating in OAM-multiplexing optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **8**(2):1-6.
- [11] SU M, LIU J, He Y, *et al.* Optical orbital angular momentum demultiplexing and channel equalization by using equalizing Damman vortex grating[J]. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2017, **2017**(2):1-9.
- [12] YU N, GENEVENT P, KATS M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334**(6054):333-337.
- [13] KARIMI E, SCHULZ S A, DE L I, *et al.* Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, **3**(5):1-4.
- [14] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, VEEN H E L O, *et al.* Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, **96**(1):123-132.
- [15] CURTIS J E, KOSS B A, GRITE D G. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Optics Communications*, 2002, **207**(1):169-175.
- [16] XIA F, SEKARIC L, VLASOV Y. Ultracompact optical buffers on a silicon chip[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(1):65-71.
- [17] CHEN Yuan-yuan, YANG Di. Applications of SOI in opto-electronics[J]. *Laser and Infrared*, 2012, **42**(1):13-17.  
陈媛媛, 杨笛. SOI 材料在光电子学中的应用[J]. *激光与红外*, 2012, **42**(1):13-17.
- [18] YAN Yan, WANG Jian, ZHANG Lin, *et al.* Fiber coupler for generating orbital angular momentum modes[J]. *Optics Letters*, 2012, **36**(21):4269-4271.
- [19] ZHENG Shuang, WANG Jian. On-chip orbital angular momentum modes generator and (de) multiplexer based on trench silicon waveguides[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(15):18492-18501.
- [20] QIAN Jing-ren. Coupled-mode theory and its application to fiber optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5):1188-1192.  
钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5):1188-1192.
- [21] NAKAYMA K, SHOJI Y, MIZUMOTO T. Single trench SiON waveguide TE-TM mode converter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(15):1310-1312.
- [22] WANG J, ZHAO D, XU J, *et al.* High-order mode rotator on the SOI integrated platform [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(2):1-8.