

doi:10.3788/gzxb20174611.1123002

# 基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器

杨甜军, 李仕琪, 汪鹏君, 陈伟伟

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘 要:**设计了一种采用锥形渐变不对称耦合结构的模式复用/解复用器, 并利用商用的  $0.18 \mu\text{m}$  互补金属氧化物半导体兼容工艺进行制备. 通过控制锥形波导的宽度, 基于模式有效折射率匹配原则, 实现锥形波导中的基模与多模波导中的高阶模式相互转化. 测试结果表明: 当器件用于  $\text{TE}_0$ 、 $\text{TE}_1$  和  $\text{TE}_2$  三个模式复用与解复用时, 在  $1530 \text{ nm}$  到  $1570 \text{ nm}$  波长范围内, 串扰低于  $-8.05 \text{ dB}$ ; 而当器件复用与解复用  $\text{TE}_0$  和  $\text{TE}_2$  时, 串扰低于  $-16.43 \text{ dB}$ .

**关键词:**硅基光子学; 光互连; 模分复用; 锥形渐变不对称耦合; 波导

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1123002-6

## Mode Multiplexer and Demultiplexer Utilizing Tapered Couplers

YANG Tian-jun, LI Shi-qi, WANG Peng-jun, CHEN Wei-wei

(Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract:** In this paper, we design and demonstrate a mode (de)multiplexer using tapered couplers on a silicon-on-insulator substrate by commercial  $0.18 \mu\text{m}$  complementary metal-oxide-semiconductor compatible processes. By controlling the width of a tapered waveguide, the mutual conversion between the fundamental mode in the tapered waveguide and the high-order mode in the multimode straight waveguide can be realized due to the matching of modal effective indexes. For the multiplexing and demultiplexing of the  $\text{TE}_0$ ,  $\text{TE}_1$  and  $\text{TE}_2$  modes, the fabricated device, which is composed of a mode multiplexer, a multimode straight waveguide, and a mode demultiplexer, exhibits crosstalk lower than  $-8.05 \text{ dB}$  within a bandwidth from  $1530 \text{ nm}$  to  $1570 \text{ nm}$ . The crosstalk is less than  $-16.43 \text{ dB}$  for the multiplexing and demultiplexing of the  $\text{TE}_0$  and  $\text{TE}_2$  modes.

**Key words:** Silicon Photonics; Optical interconnects; Mode-division Multiplexing; Tapered coupler; Waveguide

**OCIS Codes:** 230.7370; 060.4230; 130.0130; 130.3120

## 0 引言

由于半导体工艺尺寸不断缩减, 芯片集成度持续提升, 传统电互连在速度、带宽以及能耗等方面存在着电子瓶颈, 严重限制了高性能微处理器进一步地发展<sup>[1]</sup>. 而硅基光互连具有高速、宽带、低功耗以及易于光电集成等特点, 可为解决这一问题提供有效的处理方案<sup>[2-5]</sup>. 同时, 随着网络技术的持续发展与云计算等新业务的积极推动, 数据流量呈井喷式增长. 为了满足日益增长的带宽需求, 波分复用、偏振复用和模分复用等技术常被用于增加通信容量<sup>[6-8]</sup>. 而在这些技术中, 模分复用技术, 即利用光模式作为独立的信道进行数据传输, 因不需要添加额外的激光器实现低成本的容量扩增而备受关注<sup>[9]</sup>.

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 61675108, 61234002, 61307071)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20133305120004)和集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(No. IOSKL2015KF03)资助

**第一作者:**杨甜军(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为集成光电子器件及其系统层面应用. Email: 1511082703@nbu.edu.cn

**通讯作者:**陈伟伟(1986—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为集成光电子器件及其系统层面应用. Email: chenweiwei@nbu.edu.cn

**收稿日期:**2017-06-19; **录用日期:**2017-07-27

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

模式复用/解复用器是模式复用传输系统中的关键器件之一.近年来,不同光学结构已被用于设计硅基模式复用/解复用器,譬如不对称Y分支结构<sup>[10-12]</sup>、多模干涉耦合器<sup>[13]</sup>、绝热耦合器<sup>[14-15]</sup>、多模光栅辅助耦合器<sup>[16]</sup>、不对称定向耦合器<sup>[17-18]</sup>和锥形定向耦合器<sup>[19-21]</sup>.基于不对称Y分支结构的硅基模式复用/解复用器用于复用与解复用  $TE_0$  和  $TE_1$  两个模式时,在C波段范围内,串扰低于 $-9.0$  dB<sup>[10]</sup>.基于多模干涉耦合器的硅基模式复用/解复用器通过利用多模干涉器的自映像特性并结合相移器实现模式的转换与复用,但不易进行多路信道扩展.基于绝热耦合器的硅基模式复用/解复用器具有较好的串扰特性,但器件长度偏长,不利于级联扩展.基于级联多模光栅辅助耦合器的硅基模式复用/解复用器可实现多路模式信号复用与解复用,但带宽受限.基于级联不对称定向耦合器的硅基模式复用/解复用器利用不定向耦合器在主干波导的不同位置激发起不同阶次的光模式从而实现模式复用,但需要对耦合长度和强度进行精确控制.基于级联锥形定向耦合器的硅基模式复用/解复用器相对而言因具备宽带、低串扰以及易于扩展等特点而备受关注.此前已有基于不同结构锥形定向耦合器的硅基模式复用/解复用器相继被报道<sup>[19-21]</sup>.

鉴于此,本文将提出一种采用锥形渐变不对称耦合结构用以构建模式复用/解复用器.该模式复用/解复用器可通过控制锥形波导的宽度,实现锥形波导中的基模有效折射率同多模直波导中的高阶模式有效折射率相匹配,以达到锥形波导中的基模与多模直波导中的高阶模式相互转化.为了提升器件理论设计的精确度,本文采用商用的 $0.18\ \mu\text{m}$ 互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)兼容工艺制备基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器,并利用垂直耦合测试平台对制备的器件进行测试分析.本文工作可为优化基于耦合器结构模式复用/解复用器设计,提升器件性能提供实验数据支撑.

## 1 器件原理与设计

图1是基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器结构示意图.该器件包括三个部分,分别为 $3\times 1$ 模式复用模块,多模直波导模块和 $1\times 3$ 模式解复用模块.其中,模式复用模块与模式解复用模块镜像对称.器件的三个输入端口标记为 $\text{Input}_1$ 、 $\text{Input}_2$ 和 $\text{Input}_3$ ,而相对的输出端口分别为 $\text{Output}_1$ 、 $\text{Output}_2$ 和 $\text{Output}_3$ .输入单模直波导通过锥形波导同多模直波导相连接.输入单模S弯曲波导与倒锥波导、正锥波导组合相连接.其中,倒锥波导、正锥波导组合与多模直波导形成渐变不对称耦合结构.记输入单模直波导和S弯曲波导的宽度为 $W_0$ ,倒锥波导DZ2、DZ4大头端的宽度为 $W_1$ ,倒锥波导DZ1、DZ3大头端的宽度为 $W_2$ ,多模直波导的宽度为 $W_3$ .倒锥波导DZ2、DZ4和倒锥波导DZ1、DZ3的长度分别被标记为 $L_0$ 和 $L_1$ .倒锥波导DZ2、DZ4大头端与多模直波导的间距为 $G_0$ ,而倒锥波导DZ1、DZ3大头端与多模直波导的间距为 $G_1$ .根据模式有效折射率匹配原则可推知<sup>[22]</sup>,当多模直波导第 $i$ 阶( $i=1,2,3,\dots$ )模式的有效折射率位于宽度为倒锥

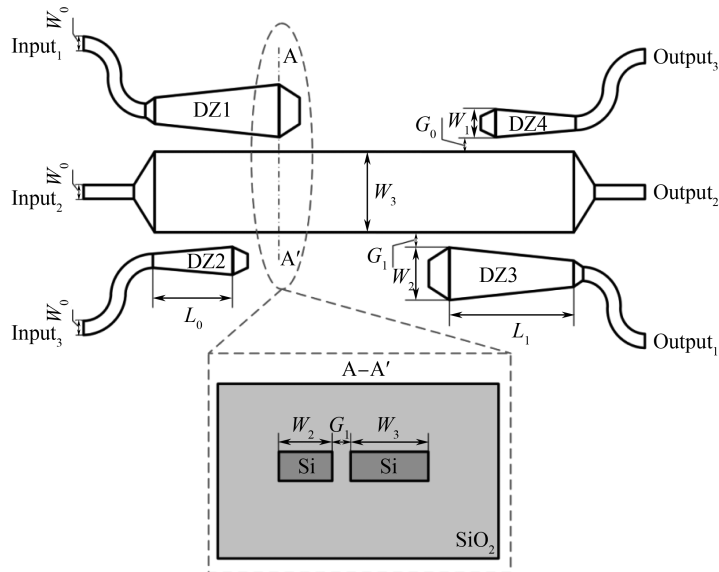


图1 基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器结构示意图

Fig.1 Schematic drawing of mode multiplexer and demultiplexer based on tapered couplers

波导小头端宽度的直波导基模有效折射率与宽度为倒锥波导大头端宽度的直波导基模有效折射率之间时,基模从输入单模 S 弯曲波导输入,经倒锥波导传输,将激发并转化成多模直波导第  $i$  阶模式,该第  $i$  阶模式沿着多模直波导向前传输,经渐变不对称耦合区时,将转变为倒锥波导的基模,继而从输出单模 S 弯曲波导输出。

图 2 为基模从不同输入端口输入时,光波在所设计器件中的传输情况。其中,工作波长为 1 550 nm。当基模从 Input<sub>1</sub> 端口输入时,经单模 S 弯曲波导、倒锥波导传输,由于多模直波导一阶模式有效折射率大于宽度为倒锥波导 DZ1、DZ3 小头端宽度的直波导基模有效折射率且小于宽度为倒锥波导 DZ1、DZ3 大头端宽度的直波导基模有效折射率,所以多模直波导中一阶模式被激发,并在解复用器时,转化成基模,从 Output<sub>1</sub> 端口输出。与此类似,基模从 Input<sub>3</sub> 端口输入时,经单模 S 弯曲波导并进入倒锥波导,倒锥波导 DZ2、DZ4 大头端和小头端宽度满足上述的模式有效折射率关系,激发出多模波导中二阶模式,该二阶模式沿着多模波导向前传输,经渐变不对称耦合区,转化成基模,从 Output<sub>3</sub> 端口输出。而当基模从 Input<sub>2</sub> 端口输入时,基模沿着单模直波导、多模直波导和单模直波导向前传输,并从 Output<sub>2</sub> 输出。在仿真过程中,本文主要考虑的是 TE 模式,采用三维光束传播法(Three-Dimensional Beam Propagation Method, 3D-BPM)。硅和二氧化硅的折射率分别被取为 3.467 和 1.444,而具体结构参数仿真设置如下:单模直波导和 S 弯曲波导的宽度  $W_0$  为 0.45  $\mu\text{m}$ ,倒锥波导 DZ2、DZ4 大头端宽度  $W_1$  为 0.505  $\mu\text{m}$ ,倒锥波导 DZ1、DZ3 大头端宽度  $W_2$  为 0.78  $\mu\text{m}$ ,多模直波导的宽度  $W_3$  为 1.58  $\mu\text{m}$ ,倒锥波导长度  $L_0$  和  $L_1$  分别为 143  $\mu\text{m}$  和 454  $\mu\text{m}$ ,间距  $G_0$  和  $G_1$  皆为 0.18  $\mu\text{m}$ 。

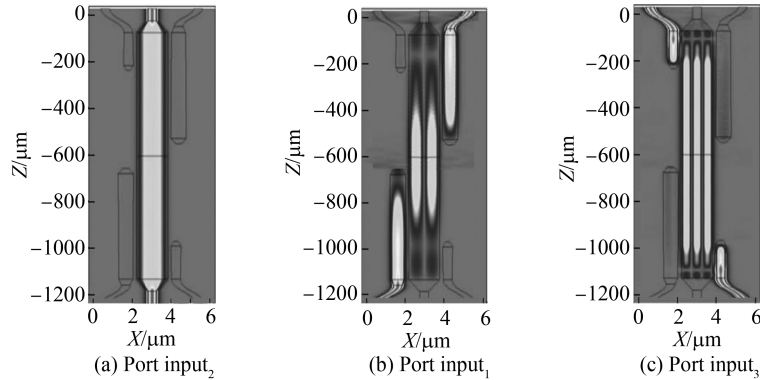


图 2 当基模分别从各端口输入时,模式传输的 BPM 仿真图

Fig.2 BPM simulation of the designed mode multiplexer and demultiplexer using tapered couplers, when the fundamental mode is injected into different input ports

## 2 实验结果与分析

所设计的基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器是采用商用的 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 兼容工艺进行制备<sup>[23]</sup>。其中,硅绝缘体(Silicon-On-Insulator, SOI)基片上的顶硅层厚度为 0.22  $\mu\text{m}$ ,掩埋层二氧化硅厚度为 2  $\mu\text{m}$ 。器件的实现是先通过标准 248 nm 深紫外(Ultraviolet, UV)光刻,再采用电感耦合等离子体刻蚀(Inductively-Coupled-Plasma, ICP)工艺进行全刻蚀,最后利用等离子体增强化学的气相沉积(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)工艺生长 1.5  $\mu\text{m}$  的二氧化硅。图 3 所示的为在高倍显微镜下被放大的基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器图片。其中,虚框表示的是在不同位置处拍摄的渐变不对称耦合区。

利用垂直耦合测试平台,采用可调谐半导体激光器(Tunable Semiconductor Laser, TSL)和光功率计(HP8153a)对制备的基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器进行光功率传输谱线测试分析。输入光纤一端接激光器,另外一端通过光栅耦合器,将输入光耦合进入待测试的器件,经器件传输,再次利用光栅耦合器,将输出光耦合到输出光纤,而输出光纤另外一端接光功率计。通过利用 LabVIEW 将激光器输出范围设置为 1 530 nm-1 570 nm,步进为 0.5 nm 对基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器进行扫描,分别测试 Input<sub>1</sub>-Output<sub>1</sub>、Input<sub>1</sub>-Output<sub>2</sub>、Input<sub>1</sub>-Output<sub>3</sub>、Input<sub>2</sub>-Output<sub>1</sub>、Input<sub>2</sub>-Output<sub>2</sub>、Input<sub>2</sub>-Output<sub>3</sub>、Input<sub>3</sub>-Output<sub>1</sub>、Input<sub>3</sub>-Output<sub>2</sub> 和 Input<sub>3</sub>-Output<sub>3</sub> 各通道的输出光功率。同时,利用同一片子上的直波导光功率测试结果进行归一化处理,绘制基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器的光功率传输谱线,具

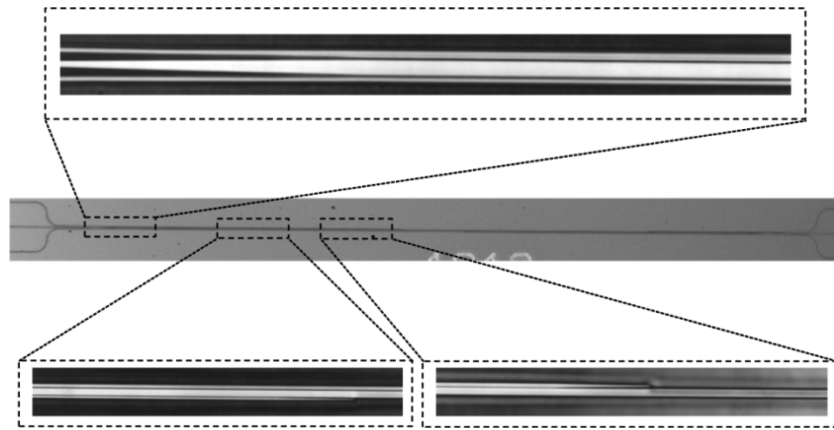


图3 基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器显微镜扫描图

Fig.3 Top view of the fabricated device composed of a mode multiplexer, a multimode straight waveguide, and a mode demultiplexer

体如图4所示。从光功率传输谱线不难发现,在1530 nm到1570 nm波长范围内,当光信号从Input<sub>1</sub>端口输入时,器件的插入损耗小于15.04 dB,串扰低于-8.05 dB;当光信号从Input<sub>2</sub>端口输入时,器件的插入损耗小于1.33 dB,串扰低于-14.72 dB;当光信号从Input<sub>3</sub>端口输入时,器件的插入损耗小于8.03 dB,串扰低于-15.33 dB。由此可见,该器件基本上实现TE<sub>0</sub>、TE<sub>1</sub>和TE<sub>2</sub>三个模式复用与解复用。但是在Input<sub>1</sub>端口输入时,器件的串扰和损耗过大。其主要原因在于实际制备器件时,工艺误差导致倒锥波导小头端和大头端宽度没有达到理想中状况,使得渐变不对称耦合区的耦合情况未达到最佳,即对应的输出端口输出光功率大大减小。当器件作为TE<sub>0</sub>和TE<sub>2</sub>两个模式复用与解复用时,如图5所示,在1530 nm到1570 nm波长范围内,串扰低于-16.43 dB。工作波长为1550 nm时,器件插入损耗小于5.29 dB,串扰低于-27.66 dB。

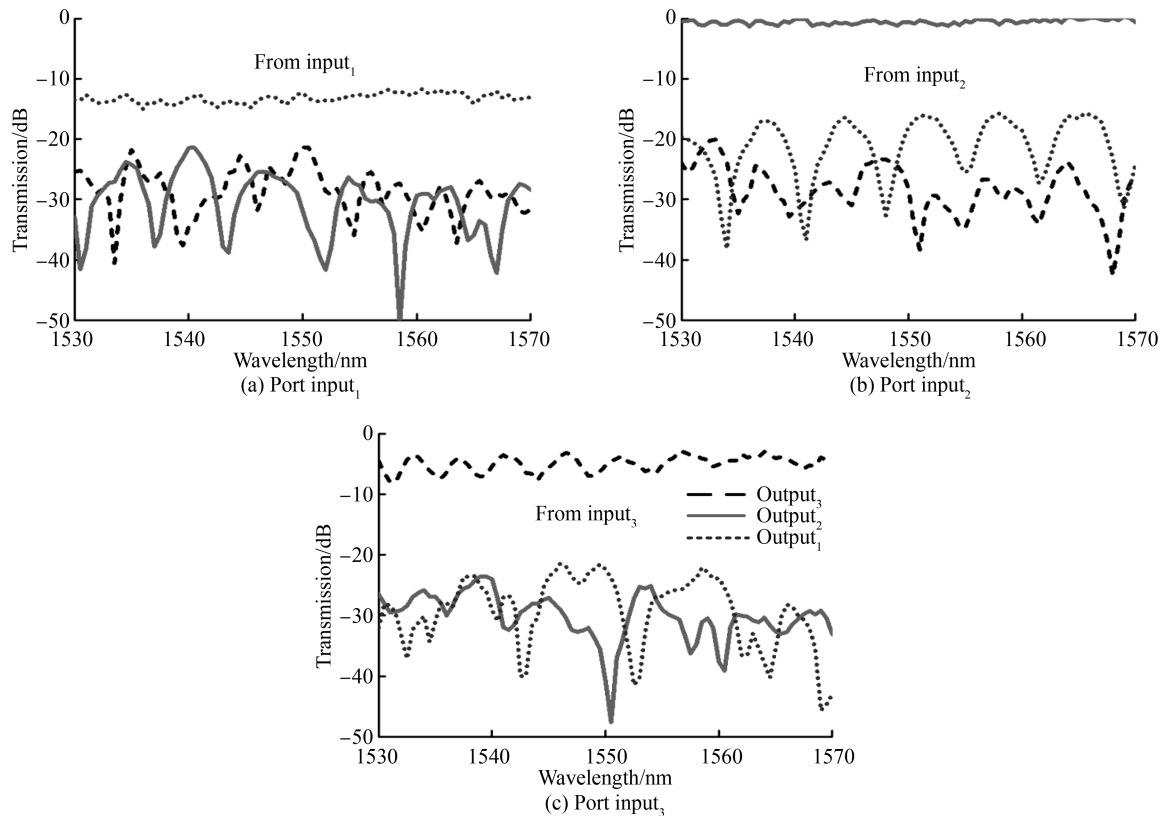
图4 当器件用于TE<sub>0</sub>、TE<sub>1</sub>和TE<sub>2</sub>三个模式复用/解复用时,光分别从各端口输入,各输出端口输出的传输谱线

Fig.4 Measured transmission spectra of the fabricated device at the three output ports, when the light beam is launched into different input ports

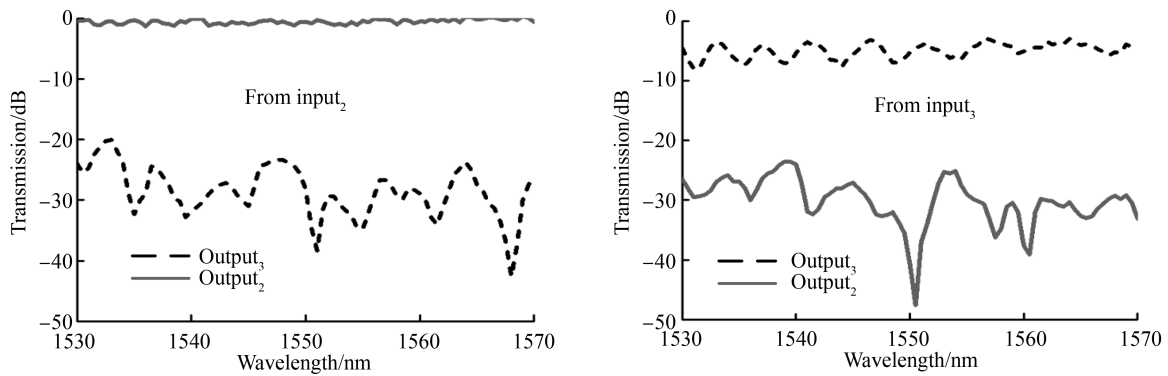


图5 当器件用于  $TE_0$  和  $TE_2$  两个模式复用/解复用时,光分别从  $Input_2$  端口和  $Input_3$  端口输入, $Output_2$  和  $Output_3$  输出端口输出的传输谱线

Fig.5 Measured transmission spectra of the fabricated device at the  $Output_2$  and  $Output_3$  ports, when the light beam is input from ports  $Input_2$  and  $Input_3$

### 3 结论

本文提出了一种基于锥形渐变不对称耦合的模式复用/解复用器,并采用商用的  $0.18 \mu\text{m}$  CMOS 兼容工艺加以实现验证.实验结果表明:利用模式有效折射率匹配,可实现多模波导中的高阶模式同锥形波导中的基模进行相互转换.当该器件用于  $TE_0$ 、 $TE_1$  和  $TE_2$  三个模式复用与解复用时,在  $1530 \text{ nm}$  到  $1570 \text{ nm}$  波长范围内,插入损耗小于  $15.04 \text{ dB}$ ,串扰低于  $-8.05 \text{ dB}$ ;而当器件复用与解复用  $TE_0$  和  $TE_2$  两个模式时,插入损耗小于  $8.03 \text{ dB}$ ,串扰低于  $-16.43 \text{ dB}$ .通过优化倒锥波导大头端和小头端的宽度可进一步减小插入损耗和串扰.本文所设计的器件是模式复用技术中的关键器件,有望集成其它功能器件,以应用于未来大容量片上光互连,突破现有带宽瓶颈.

#### 参考文献

- [1] MILLER D A B. Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, **88**(6): 728-749.
- [2] GUNN C. CMOS photonics for high-speed interconnects[J]. *IEEE Micro*, 2006, **26**(2): 58-66.
- [3] MILLER D A B. Device requirements for optical interconnects to silicon chips[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, **97**(7): 1166-1185.
- [4] PANICCIA M J. A perfect marriage: optics and silicon[J]. *Optik & Photonik*, 2011, **6**(2): 34-38.
- [5] KIRCHAIN R, KIMERLING L. A roadmap for nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(6): 303-305.
- [6] LEE B G, CHEN X, BIBERMAN A, et al. Ultrahigh-bandwidth silicon photonic nanowire waveguides for on-chip networks[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(6): 398-400.
- [7] QIAN D, HUANG M F, IP E, et al. 101.7-Tb/s ( $370 \times 294$ -Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over  $3 \times 55$ -km SSMF using pilot-based phase noise mitigation[C]. NFOEC, 2011: PDPB5.
- [8] LI G, BAI N, ZHAO N, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, **6**(4): 413-487.
- [9] DAI D, WANG J, SHI Y. Silicon mode (de) multiplexer enabling high capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(9): 1422-1424.
- [10] DRISCOLL J B, GROTE R R, SOUHAN B, et al. Asymmetric Y junctions in silicon waveguides for on-chip mode-division multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(11): 1854-1856.
- [11] CHEN W, WANG P, YANG J. Mode multi/demultiplexer based on cascaded asymmetric Y-junctions[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(21): 25113-25119.
- [12] CHEN W, WANG P, YANG T, et al. Silicon three-mode (de) multiplexer based on cascaded asymmetric Y junctions [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(12): 2851-2854.
- [13] UEMATSU T, ISHIZAKA Y, KAWAGUCHI Y, et al. Design of a compact two-mode multi/demultiplexer consisting of multimode interference waveguides and a wavelength-insensitive phase shifter for mode-division multiplexing transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(15): 2421-2426.
- [14] XING J, LI Z, XIAO X, et al. Two-mode multiplexer and demultiplexer based on adiabatic couplers[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(17): 3468-3470.
- [15] SUN C, YU Y, YE M, et al. An ultra-low crosstalk and broadband two-mode (de) multiplexer based on adiabatic

- couplers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6.
- [16] QIU H, YU H, HU T, *et al.* Silicon mode multi/demultiplexer based on multimode grating-assisted couplers[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 17904-17911.
- [17] LUO L W, OPHIR N, CHEN C P, *et al.* WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip[J]. *Nature Communications*, 2014, 5.
- [18] DAI D, WANG J, CHEN S, *et al.* Monolithically integrated 64-channel silicon hybrid demultiplexer enabling simultaneous wavelength and mode division multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, **9**(3): 339-344.
- [19] DING Y, XU J, DA ROS F, *et al.* On-chip two-mode division multiplexing using tapered directional coupler-based mode multiplexer and demultiplexer[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(8): 10376-10382.
- [20] WANG J, XUAN Y, QI M, *et al.* Broadband and fabrication-tolerant on-chip scalable mode-division multiplexing based on mode-evolution counter-tapered couplers[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(9): 1956-1959.
- [21] Sun Y, Xiong Y, Winnie N Y. Experimental demonstration of a two-mode (de) multiplexer based on a taper-etched directional coupler[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(16): 3743-3746.
- [22] DAI D, WANG J, SHI Y. Silicon mode (de) multiplexer enabling high capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(9): 1422-1424.
- [23] DAI T, SHEN A, WANG G, *et al.* Bandwidth and wavelength tunable optical passband filter based on silicon multiple microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(20): 4807-4810.