

光学学报

高性能无源硅光波导器件:发展与挑战

刘大建, 赵伟科, 张龙, 宋立甲, 郭敬书, 谢意维, 李欢, 俞泽杰, 刘柳, 时尧成, 戴道铎*

浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310058

摘要 硅光技术凭借其 CMOS 兼容性和高集成度等突出优势, 被认为是最具发展潜力的新一代光子集成主流技术, 在全球范围内受到极大关注。近年来, 无源/有源硅光器件及其集成芯片研究均取得了重要进展。而随着光通信、光互连、光传感、光测量及光计算等新兴领域的飞速发展, 硅光技术迎来了更为广阔的应用空间。与此同时, 硅光器件及芯片也面临着更高性能、更高密度和更大规模等重要挑战。本文聚焦于面向波分复用、偏振复用、模式复用及混合复用等应用的高性能无源硅光波导器件, 重点阐述了其性能突破及功能拓展, 并探讨了硅光波导器件的发展前景。

关键词 集成光学; 硅光; 波分复用; 偏振复用; 模式复用; 高性能

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1713001

High-Performance Passive Silicon Photonic Waveguide Devices: Progress and Challenges

Liu Dajian, Zhao Wei, Zhang Long, Song Lijia, Guo Jingshu, Xie Yiwei, Li Huan,

Yu Zejie, Liu Liu, Shi Yaocheng, Dai Daoxin*

College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China

Abstract Due to its prominent advantages such as complementary metal oxide semiconductor (CMOS) compatibility and high integration, silicon photonics technology is recognized as the most promising new generation of mainstream photonic integration technologies and has thus attracted great attention worldwide. On the one hand, great progress has been made in the research field of passive/active silicon photonic devices and integrated circuits in recent years. Silicon photonics technology has ushered in a broader space for application owing to the rapid development of emerging fields, such as optical communication, optical interconnection, optical sensing, optical measurement, and optical computing. On the other hand, silicon photonic devices and circuits are also exposed to various challenges as they are desired to achieve better performance, higher density, and larger scale. This paper focuses on high-performance passive silicon photonic waveguide devices for wavelength division multiplexing, polarization multiplexing, mode multiplexing as well as hybrid multiplexing, particularly on their performance breakthrough and function expansion. Finally, the prospects of silicon photonic waveguide devices are discussed and presented.

Key words integrated optics; silicon photonics; wavelength division multiplexing; polarization multiplexing; mode multiplexing; high performance

1 引言

众所周知, 集成光电子器件具有小体积、高性能、高可靠性、便于大规模生产等突出优点, 经过多年发展已经在光通信、光计算、光传感和量子信息等系统中占据了不可替代的位置。在众多光子集成材料体系中, 硅材料以其互补金属氧化物半导体 (CMOS) 兼容性和高集成度等独特优势赢得了业界青睐。具体而言, 硅

材料及波导主要有以下优势: 1) 硅光波导通常采用 SOI (silicon-on-insulator) 晶圆, 其芯区为硅 (折射率 $n_{\text{co}} \approx 3.48$ @1550 nm)、包层则为 SiO_2 ($n_{\text{cl}} \approx 1.44$ @1550 nm), 其超高折射率差使硅光波导具有超强的光场束缚能力, 因此可实现微米级超紧凑弯曲, 进而有望获得超高集成密度及超大规模光子集成; 2) 相比于 LiNbO_3 、InP、GaAs 等价格昂贵、尺寸受限的材料体系, SOI 价格低、尺寸大、质量高, 力学性能好且工艺成

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-07-30; 录用日期: 2022-08-08

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (61725503)、国家自然科学基金 (91950205, 92150302, 61961146003)

通信作者: *dx dai@zju.edu.cn

熟,为大规模光子集成提供了极具潜力的基础平台。经过多年的发展,相关研究取得重要进展并形成了“硅基光子”方向,硅基大规模光子集成能力已初步显现,为未来实现低成本、低能耗、多功能的光电子芯片提供了有利条件。目前,硅基光子集成器件及芯片将在光通信等领域发挥重要作用已成为业界共识^[1-3],其关键包括支撑高速光-电转换的电光调制器与光电探测器等有源器件、支撑多通道复用传输的先进复用-解复用器件等无源器件。值得注意的是,无源器件在未来大规模集成芯片中占据相当大的比例,是举足轻重的部分。有鉴于此,本文着重讨论分析无源硅光波导器件的发展与挑战。

在无源器件中,复用-解复用器件是最具代表性的功能器件之一,是支撑光通信系统利用多通道复用技术显著提升其传输容量的根本保障。过去几十年间,应用最广泛、最成功的无疑是波分复用(WDM)技术。它的特点是利用不同波长载波携带相应通道信号,将通信容量扩展几十倍甚至上百倍,其核心器件之一是波分复用器件。随着硅基光子学的兴起,硅基波分复用器件以其超小尺寸的特点引起了国内外研究人员的极大兴趣^[4]。作为国际上最早报道超小型硅纳米线阵列波导光栅(AWG)器件的团队之一,戴道铎课题组率先在国内开展了硅纳米线 AWG 波分复用器件的研究,并成功研制出尺寸约为 $40\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 的超小型 AWG^[5]、国际上第一个反射式硅纳米线 AWG^[6]等。目前硅纳米波导波分复用器件的相关研究已取得长足进展,具有良好的性能指标^[7]。而随着波分复用容量日趋饱和,其他复用技术也逐渐兴起,特别是模式复用已成为近年来光通信领域的研究热点^[8-9],作为其关键核心器件之一的模式复用器件也受到了重点关注^[10-15]。2012年,文献^[10]率先提出并实现了基于级联非对称定向耦合器结构的多通道(≥ 4)硅基片上模式复用-解复用器,吸引了国内外同行的关注^[14-17]。应当注意的是,单一复用技术(波分复用或模式复用)并不能满足未来超大容量的需求。如何综合利用波长、模式、偏振等光学参量,将模式复用、偏振复用、波分复用等技术^[18-20]相结合形成多维混合复用技术成为学界需要解决的根本问题^[20-21],其关键正是各类高性能波分复用器件(光滤波器)、片上偏振调控器件及多模光子器件等的制备。

可喜的是,经过国内外研究团队多年的不懈努力,硅光技术在单元器件及集成芯片等方面都取得了长足的进展^[22-24]。本文将对高性能无源硅光波导器件,包括波分复用器件、偏振调控器件、模式复用器、模式转换器、多模弯曲波导、多模交叉波导、超低损耗展宽波导及器件、超低随机相位误差马赫-曾德尔干涉仪(MZI)光开关及阵列、波长-偏振-模式多维复用器件及多维可重构光插分复用器(ROADM)等的研究进展进行总结分析,重点阐述这些器件的性能突破及功能拓展,并对其未来发展前景进行展望。

2 高性能无源硅光波导器件

2.1 硅光滤波器

光滤波器是一种具有波长选择功能的代表性无源器件,在光通信、光传感、光量子 and 光计算等领域都发挥了重要作用^[25]。例如,对于现代光通信系统,多通道光滤波器可实现不同波长通道的合/分束等操控,为通过波分复用技术实现超大容量光通信系统提供了关键器件技术支撑。

众所周知,实现光滤波器最根本的物理原理是采用双光束干涉或多光束干涉,其具体结构主要包括 MZI^[26]、微环谐振腔(MRR)^[27]、波导布拉格光栅^[28]、AWG^[29]和刻蚀衍射光栅(EDG)^[30]等。基于以上结构,人们利用硅光波导技术先后发展了具有不同通道间隔 $\Delta\lambda_{\text{ch}}$ 和通道数 N 的各类片上光滤波器,形成了比较完整的体系。

值得注意的是,硅光波导具有超高折射率差和超小截面尺寸,而制造工艺不完善往往会导致较大的随机相位误差,致使器件性能受限。特别是硅光 AWG 器件,其插损和通道串扰通常较大,距离实际应用要求还有较大差距。相比之下,EDG 的核心结构是平板波导凹面光栅,可避免条形相移波导,通常可获得较低的通道串扰,但存在凹面光栅反射率不高所导致的插损较大的问题。可见,尽管硅光 AWG 和 EDG 从原理上比较适用于多通道波分复用,但在性能上仍存在较大不足。相比之下,MZI、MRR、布拉格光栅这三类光滤波器有可能获得更高性能,且其结构设计更为灵活,特别是可通过级联等方式构建出中心波长和带宽均可自由设置的单通道、少通道及多通道波分复用器件,这对很多应用领域具有极大的吸引力。

对于硅光波导体系,其超强的弯曲能力使得 MRR 结构的优势发挥得淋漓尽致^[31-38]。硅光 MRR 以其结构紧凑、设计灵活、功能多样等特点成为独具魅力的代表性器件结构,在全球范围内备受关注。由于 MRR 的自由频谱范围(FSR)与腔长成反比,人们期望最大限度地减小 MRR 波导弯曲半径,但受到弯曲损耗的限制,其弯曲半径的减小幅度有限。因此,为了兼顾 MRR 品质因子 Q 和 FSR,人们通常将其弯曲半径选为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$,对应的 FSR 通常不超过 $20\ \text{nm}$,未能覆盖光通信系统常用的 C 波段。为了突破 FSR 的局限性,人们开展了大量研究并进行了有益的探索,例如将硅光波导截面从常用的 $450\ \text{nm} \times 220\ \text{nm}$ 调整为 $300\ \text{nm} \times 340\ \text{nm}$ 以增强光场约束能力,从而实现弯曲半径 R 仅为 $1\ \mu\text{m}$ 的超小 MRR,最终获得达 $80.5\ \text{nm}$ 的超大 FSR,该 MRR 附加损耗约为 $1\ \text{dB}$ 、带宽约为 $3.3\ \text{nm}$ ^[31]。对于超小弯曲半径 MRR,接入波导和微环波导之间的耦合是关键,其难点在于如何克服相位失配和高阶模激发等问题。

为此,戴道铎课题组在前期工作^[32]的基础上,提出了新思路^[33]:1)引入多模弯曲波导(宽度 $W=800\ \text{nm}$),从而增强光场的约束能力,获得亚微米量

级的超小弯曲半径 ($R=800\text{ nm}$); 2) 引入弯曲耦合结构以防止多模弯曲波导中的高阶模激发, 并获得充分的倏逝场耦合。基于这一设计, 成功研制出一种亚微米弯曲半径的宽波导 MRR 滤波器, 如图 1(a) 所示。其测试结果表明: 下载端透射光谱的 3 dB 带宽为 0.8 nm 、附加损耗为 1.8 dB , 特别是其 FSR 高达 93 nm (迄今报道的最大值)。同时, 该 MRR 采用 SiO_2 上包层 (而非空气包层), 具有优异的可靠性和稳定性, 且具有可与其他功能器件单片集成的工艺兼容性。

值得注意的是, 单环 MRR 滤波谱线为洛伦兹型, 并非理想的方形, 一定程度限制了单环 MRR 的应用。所幸的是, 通过多环级联设计有望获得具有低损耗和高滚降度的方形谱线, 其关键是优化设计各耦合区, 使其耦合系数均符合优选值。Xiao 等^[34] 基于空气上包层截面尺寸为 $600\text{ nm} \times 250\text{ nm}$ 的微环波导研制出一种二阶级联微环滤波器, 其弯曲半径仅为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$, FSR 却高达 32 nm 。然而, 该设计中接入波导和微环波导之间的狭缝仅为 100 nm , 导致其加工难度增大, 因此如何解决超大 FSR 级联 MRR 的耦合问题是其面临的关键挑战。Liu 等^[35] 提出一种绝热渐变椭圆环 (AEM), 并结合弯曲耦合器结构, 制备出一种新型高阶级联 MRR 滤波器, 如图 1(b) 所示, 其核心原理是: 1) 耦合区选取窄波导和大半径, 从而减弱光场约束和增加耦合区等效长度, 使得相邻波导即使有较大间距也能发生足够强的耦合, 以获得比较理想的方形谱线; 2) 非耦合区则选取宽波导, 以增强光场约束, 进而选取超小半径, 使其总腔长最小化, 保证其 FSR 最大

化。最终的实验测试结果表明: 所研制的高阶 AEM 下载端口的透射谱线 FSR 高达 37 nm (迄今为止所报道高阶 MRR 的最大值)。同时, 该设计中相邻波导狭缝宽度达到 180 nm , 满足当前标准化流片加工平台要求, 避免以往设计中狭缝尺寸过小等问题。

对级联 MRR 滤波器而言, 要进一步提升其方形滤波光谱特性, 可采用更高阶级联结构。然而, 其面临的挑战是器件制备加工误差较大, 导致 MRR 谐振波长失准。在以往文献中, 通常采用热调谐技术, 即在各微环分别引入相应的热电极进行独立调谐, 进而实现各微环间谐振波长的对准。例如, 文献^[36] 通过这一方式实现了性能优良的 14 阶级联 MRR 滤波器, 其消光比为 73 dB 、损耗为 7 dB 。然而, 该方案不仅增大了器件总体尺寸及回路复杂度, 也导致器件的功耗较大, 使其不易扩展。采用更先进的制备工艺技术是另一途径 (如采用 193 nm ArF 浸入式光刻等^[37]), 但无疑会增加其加工难度和制造成本。为克服这一难题, Liu 等^[38] 采用 AEM 设计, 成功研制出高性能的 10 阶 MRR 滤波器 [图 1(c)]。在此设计中, AEM 波导宽度相比于传统 MRR 设计具有明显的展宽, 且单个 AEM 的尺寸仅为 $5.6\text{ }\mu\text{m} \times 4.6\text{ }\mu\text{m}$, 因此从原理上有望显著降低各环谐振波长偏差。基于低成本 180 nm 标准流片工艺, 成功研制出具有 37 nm 超大 FSR 和 60 dB 超高消光比的 10 阶微环滤波器。更重要的是, 各 AEM 显示出优异的一致性, 无需对各个微环进行单独热调谐和精细校准, 从而极大地降低了微环滤波器的结构复杂度并突破了其扩展性, 使得高阶微环滤波器在诸多应用中更具吸引力。

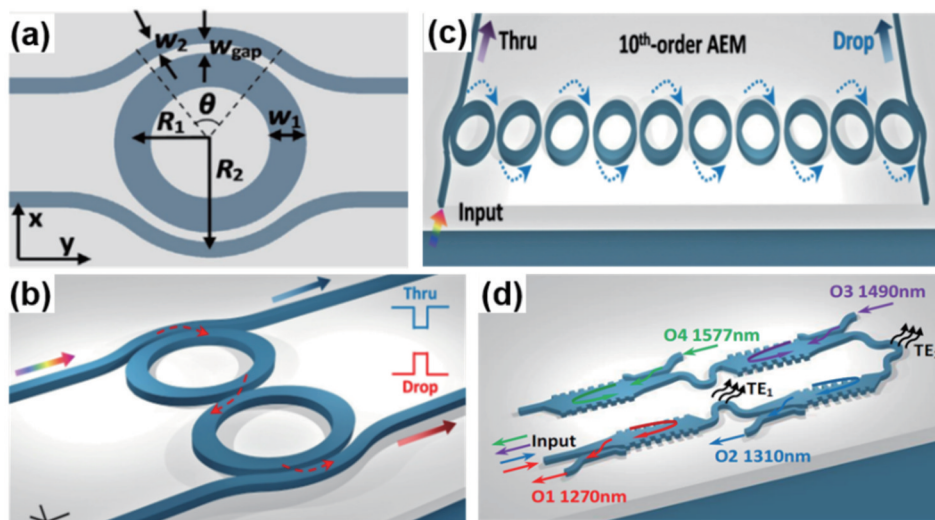


图 1 光学滤波器。(a) 基于多模宽波导的单环滤波器^[33]; (b) 基于 AEM 的高阶环滤波器^[35]; (c) 基于 AEM 的 10 阶环滤波器^[38]; (d) 基于级联多模波导光栅的单纤四向复用器^[39]

Fig. 1 Optical filters. (a) Single MRR filter based on multimode waveguide^[33]; (b) high-order MRR filter based on AEM^[35]; (c) 10th-order AEM filter^[38]; (d) silicon quadplexer based on cascaded MWG^[39]

除微腔之外, 布拉格光栅是另一种实现波长选择功能的基本元件, 被广泛应用于半导体激光器、光纤滤波器等部件或系统^[40]。其基本原理是: 通过改变材料折射率或波导尺寸, 获得传播方向上呈周期性变化的

有效折射率。相比于其他结构的光滤波器, 布拉格光栅滤波器具有光谱响应平坦、波长选择灵活和 FSR 几乎无限大等突出优点, 因而备受瞩目。然而, 传统布拉格光栅通常只有两个端口, 即输入/反射端口和直通端

口,因此往往需要引入环形器将返回至输入端口的反射光输出,致使整体系统极度复杂、难以集成,且不易扩展至更多通道。对于这一问题的比较有效的解决方案是:结合其他波导结构构建四端口(输入端口、直通端口、下载端口和上传端口)插分型光学滤波器。目前,主要的结构包括MZI波导光栅结构^[41-42]、非对称波导光栅结构^[43-46]、多模波导光栅结构(MWG)^[47-53]等。此前,人们对非对称波导光栅开展了很多研究,并成功制备出高性能硅光滤波器^[43-46]。2020年,Hammond等^[43]报道了一种基于非对称波导光栅级联的高性能4通道波分复用器,其实验测试结果表明:通道间串扰为 $-37\text{ dB}\sim-45\text{ dB}$,损耗小于 1 dB , 3 dB 带宽约为 6.5 nm 。应当注意的是,硅光波导的光场约束很强,非对称波导光栅中相邻波导间耦合较弱,难以获得足够大的耦合强度,导致传统的非对称硅光波导光栅带宽普遍小于 10 nm ,这就限制了其在大带宽分束/合束等方面的应用。

近年来,随着多模光子学的发展,高阶模辅助开辟了突破传统硅光波导设计瓶颈的新路径,受到极大关注^[54]。例如,引入MWG并利用基模-高阶模转换以及模式复用/解复用机制^[46-53],制备出三端口或四端口的新型光滤波器,可解决基于传统波导光栅的双端口光滤波器存在的问题。更重要的是,利用MWG光滤波器,可比较方便地通过级联的方式制出多通道波分复用器件,这对于光接入网和数据中心等应用极具吸引力^[50-52]。光接入网的应用主要涉及两类波分复用器件,即 $1310/1490/1550\text{ nm}$ 3通道波分复用器件及 $1270/1310/1490/1577\text{ nm}$ 4通道波分复用器件。值得注意的是,这类粗波分复用器的波长覆盖范围大,通道间隔大且不均匀,通道带宽大且不均匀,与常规的密集波分复用器件截然不同,因此常规的滤波器设计无法满足实际需求。为此,文献^[52]提出了级联MWG滤波器的新设计,通过对各级MWG中心波长、通道带宽及FSR等进行综合优化,研制出国际首个片上单纤四向复用器(quadplexer)。实验结果表明,该器件具有平坦的光谱响应及低损耗($\sim 1\text{ dB}$)和低串扰($< -30\text{ dB}$)等优异特性,其工作波长覆盖O、S、L波段,各通道的带宽

灵活可控,充分展示了MWG结构的高灵活性和高扩展性,这就使得MWG滤波器有望在数据中心和光纤到户等更多场景中取得更多推广应用。

2.2 偏振调控器件

偏振调控器件是几乎所有光电子系统中不可或缺的关键器件,在相干光通信、量子信息等领域都发挥着重要作用,受到广泛关注。偏振调控器件主要包括起偏器、偏振分束器(PBS)和偏振分束旋转器(PSR)。为实现紧凑的高性能偏振调控器件,通常需要对TE和TM偏振模的有效折射率及模场分布进行有效操控。众所周知,硅光波导由于具有超高折射率差及亚微米截面结构,往往具有超强双折射效应。例如,对于 $500\text{ nm}\times 220\text{ nm}$ 硅光波导,其TE和TM偏振模的有效折射率分别为2.4和1.8。因此,绝大多数硅光器件都呈现相当显著的偏振相关性。同时,超强双折射也使得硅光波导具有很强的保偏能力,导致片上偏振旋转的实现极具挑战。下面将从起偏器、PBS、PSR进行讨论。

2.2.1 起偏器

起偏器的功能是允许某一偏振模式在实现低损耗传输的同时滤除另一正交偏振模式,通常可采用具有损耗或相位偏振相关特性的结构^[55-64]。对于损耗偏振相关的起偏器,通常利用具有特殊几何形状的波导结构,如浅脊型波导(shallow-ridge WG)、超薄波导(ultra-thin WG)和硅基混合表面等离子体波导(HPWG)等;而对于相位偏振相关的结构则常采用布拉格光栅、光子晶体(PhC)、非对称定向耦合器(ADC)等。表1汇总了最近报道的各类硅基片上起偏器的性能参数,其中 $BW_{20\text{ dB}}$ 为偏振消光比(PER)在 20 dB 以上的工作带宽。可以看到,硅基起偏器目前在缩减结构尺寸、增大工作带宽等方面都取得显著的突破。例如,文献^[57]采用亚波长光栅波导(SWG)结构[图2(a)],利用其TE偏振有效折射率远大于TM偏振的特点,通过精心选取结构参数,使其TM偏振工作于亚波长范围而TE偏振工作于布拉格反射条件,从而获得TM偏振透过型起偏器。基于这一原理研制的起偏器长度仅为 $9\text{ }\mu\text{m}$,且性能优越: 1550 nm 中心波长

表1 近年来报道的各类硅基起偏器

Table 1 Summary of silicon-based on-chip optical polarizers reported in recent years

Ref.	Structure	Footprint	Loss /dB	PER /dB	$BW_{20\text{ dB}} /\text{nm}$
[55]	Shallow-ridge WG	$>1000\text{ }\mu\text{m}$	/	>25	100
[56]	Ultra-thin WG	$>10000\text{ }\mu\text{m}$	<0.3	>38	120
[57]	Bragg grating	$9\text{ }\mu\text{m}$	0.5	27	60
[58]	SWG WG	$60\text{ }\mu\text{m}$	<0.4	30	110
[59]	PhC WG	$4\text{ }\mu\text{m}$	1	34	50
[60]	ADC	$\sim 30\text{ }\mu\text{m}$	~ 1	29.8	80
[61]	Cascaded bend	$9.5\text{ }\mu\text{m}\times 63\text{ }\mu\text{m}$	<0.37	>27.6	100
[62]	Disordered PhC	$12.9\text{ }\mu\text{m}$	0.6	39.6	210
[63]	HP Bragg grating	$6\text{ }\mu\text{m}$	~ 5	>24	60
[64]	SWG bend	$6.5\text{ }\mu\text{m}\times 13\text{ }\mu\text{m}$	<1	>20	415

处的偏振消光比为 27 dB, 附加损耗为 0.5 dB。文献 [64] 提出并实现了一种基于特殊 180° 弯曲波导的 TE 偏振透过型起偏器, 其结构如图 2(b) 所示。该设计的特殊之处在于其弯曲波导外侧引入了亚波长结构。此时, TE 偏振模仍具有较强的光场约束能力, 而 TM 偏

振模的约束能力明显减弱, 因此其弯曲泄漏损耗形成了非常显著的偏振相关性。实验结果表明, 该器件在 1260~1675 nm 波长范围内都具有 >20 dB 的偏振消光比, 且损耗也小于 1 dB, 是首个带宽大于 415 nm 的超小型硅光起偏器。

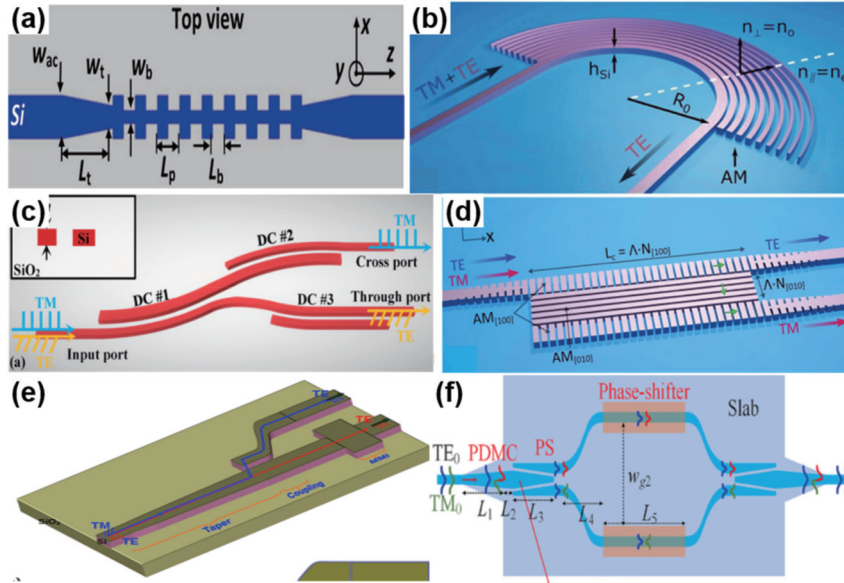


图 2 偏振调控器件。(a) 基于 SWG 的起偏器^[57]; (b) 基于 SWG 的 180° 弯曲起偏器^[64]; (c) 基于级联弯曲波导的 PBS^[65]; (d) 基于亚波长光栅异质结的 PBS^[66]; (e) 基于绝热转换的 PSR^[67]; (f) 基于脊型硅光波导的 MZI 偏振光开关^[68]

Fig. 2 Polarization handling devices. (a) SWG-based polarizer^[57]; (b) polarizer based on 180° bending with SWG^[64]; (c) PBS based on cascaded bent waveguides^[65]; (d) PBS based on hetero-anisotropic SWG^[66]; (e) PSR based on adiabatic converter^[67]; (f) polarization switch based on an MZI with ridge waveguide^[68]

2.2.2 PBS

PBS 的功能是将 TE/TM 偏振的光分开, 其挑战在于如何在超大波长范围获得超低损耗和超高消光比。人们在过去很长时间内为之不懈努力, 并发展了多种不同结构的 PBS^[65-66, 69-84], 主要包括非对称定向耦合器^[65, 69-72]、多模干涉器^[73-74]、Y 分支波导^[75]、拓扑结构^[76]、光栅和亚波长光栅波导^[66, 77]等, 部分器件如表 2 所示。总体而言, 硅基片上 PBS 在小型化方面取得了突破性进展, 同时在偏振消光比和工作带宽等性能方面也有了极大的提升。其中, 非对称定向耦合器设计自 2011 年提出以来受到极大关注^[65, 69-72], 具有设计简便和性能优越等优势, 已成为最受欢迎的设计结构之一。文献 [65] 提出并实现了基于级联弯曲定向耦合结构的高性能 PBS, 如图 2(c) 所示。该器件尺寸仅为 6.9 μm × 20 μm, 1550 nm 中心波长处 TE/TM 偏振的消光比均高于 40 dB、损耗小于 0.35 dB。该 PBS 具有超大工作带宽, 其消光比高于 30 dB 的工作带宽达 70 nm, 且损耗低于 0.5 dB 的工作带宽达 85 nm。更重要的是, 该 PBS 工艺容差达 ±40 nm, 为其相关应用提供了极具竞争力的选择。此外, 文献 [66] 提出横向/纵向亚波长结构融合的设计思路, 巧妙地融入了横向和纵向两种不同取向的亚波长结构波导, 使之呈现出显著的偏振相关性, 获得全新硅光 PBS [图 2(d)]。对于 TM 偏振模, 整体结构可等效为多模干涉耦合器, 光从

输入波导入射后激发了多个导模并发生多模干涉, 通过选取其多模波导区长度为 3L_π (L_π 为其最低两阶模式的拍长), 可将入射光成像于交叉端输出波导; 而对于 TE 偏振模, 整体结构可等效为定向耦合器, 由于其耦合间距大, 光从输入波导入射后几乎不发生倏逝场耦合, 最终到达直通端输出波导。进一步地, 通过亚波长结构波导色散调控, 将该 PBS 工作带宽延展至 >200 nm。所研制的超宽带 PBS 长度仅为 12.5 μm, 在 215 nm 带宽范围 (1.46~1.675 μm) 内具有低损耗 (<1 dB)、高偏振消光比 (>20 dB) 等突出优点, 覆盖了 S、C、L、U 波段。除了常见的 220 nm 硅芯厚度规格, 其他厚度规格 (如 340 nm) 的硅光波导也受到关注。值得注意的是, 340 nm 厚单模硅光波导的宽度通常取 340 nm, 其双折射效应较弱, 因而难以采用常规结构设计实现高性能 PBS。为此, Li 等^[77] 利用亚波长光栅波导的偏振双折射效应, 提出一种基于亚波长光栅波导的级联双芯绝热锥形波导结构, 获得了显著偏振选择性, 实现了超大带宽的高性能 PBS: 1550 nm 中心波长处的消光比约为 25 dB, 1440~1670 nm 波长范围内的 TE/TM 偏振消光比约为 25 dB、损耗小于 1 dB, 呈现出优越的器件性能。

2.2.3 PSR

PSR 是将偏振分束和偏振旋转功能相融合的一个重要偏振调控器件, 可将入射的 TE/TM 偏振分

表 2 近年来报道的各类硅基 PBS

Table 2 Summary of silicon-based on-chip PBS reported in recent years

Ref.	Structure	Footprint	Loss /dB	PER /dB	BW _{20dB} /nm
[78]	MMI	133 μm	2.2	28	40
[79]	3WG-DC	7.5 μm	1.7	22.5	100
[80]	BDC	3 μm \times 22.5 μm	<1	>20	60
[81]	Reflective ADC	27.5 μm	<1	>30	27
[65]	Cascaded BDC	7 μm \times 20 μm	0.35	>40	135
[82]	3WG-BDC	13 μm	0.6	>20	90
[83]	SWG ADC	2 μm	0.3	20	20
[84]	Reflective MMI	71.5 μm	0.8	32	77
[77]	SWG 3-WG ADC	75 μm	1	20	240
[66]	Anisotropic metamaterial	2 μm \times 12.5 μm	1	20	215

开并将其一进行旋转,在偏振复用、偏振透明和相干接收等方面具有重要应用。实现片上偏振旋转的关键在于产生偏振模杂化,进而利用杂化偏振模演化或干涉实现偏振旋转^[85]。2011年,戴道铨课题组^[85]指出:当硅光波导截面呈现垂直方向非对称性(如上包层为非SiO₂材料),在某些特定宽度范围内存在TM₀-TE₁偏振模杂化区,利用缓变锥形波导结构可实现TM₀-TE₁偏振模转化。基于这一原理,进一步结合非对称耦合结构,可实现TE₁-TE₀模式转化及分离,最终获得一种全新的PSR。此后,戴道铨课题组^[86-87]进一步阐明了脊型截面硅光波导和梯形截面硅光波导都因其结构的垂直非对称性存在偏振模杂化区,为实现PSR设计提供了更多选择,同时也指出:偏振模杂化可能给硅光波导器件设计带来一些干扰,应给予重视和关注,以避免器件设计失败。为了实现更高性能,戴道铨课题组^[67]研制了一种由绝热锥形波导、ADC和多模干涉(MMI)型滤模器构成的新型PSR,如图2(f)所示。该PSR结构的总长度约为70 μm ,MMI滤模器的引入极大地提高了PSR消光比。实验测试结果表明,该PSR在50 nm带宽内的消光比均高于20 dB。这种利用截面垂直非对称性波导中偏振模杂化的思想为实现片上PSR提供了全新思路,受到了广泛关注^[88-92],并被推广至薄膜铌酸锂波导等体系^[93]。

2.2.4 可控偏振器件

动态可重构偏振控制/解调是构建量子光学、相干光通信等系统的核心功能,而可动态调节正交偏振态分量比例的偏振开关是其核心基础器件。但是,传统片上偏振光开关往往存在尺寸大、带宽小、工艺复杂等突出问题。为此,Zhao等^[68]提出并实现了一种基于脊型硅光波导模式杂化机制的MZI偏振光开关,如图2(f)所示。该开关的输入/输出端各引入一个偏振相关模式转换器,其原理是:基于脊型硅光波导模式杂化机制,利用锥形波导结构实现TM₀-TE₁模式转换以及TE₀模绝热无损透过传输。进一步利用1 \times 1 MZI对TE₀和TE₁两个模式通过分束相移调控,从而实现二者的转换。特别地,该1 \times 1 MZI采用了一种基于三芯波导超模演化原理的新型多模分/合束器。基于标

准硅光流片工艺平台,Zhao等^[68]研制了高性能硅基片上偏振光开关,其核心功能区域尺寸仅为246 μm \times 40 μm 。当处于off状态($\Delta\varphi=0$)时,入射的TE₀和TM₀模式几乎无损通过,模间串扰低于-25 dB;当处于on状态时,入射的TE₀和TM₀模式实现高效转换,其插入损耗约为0.6 dB,1530~1600 nm波长范围内串扰低于-19 dB。该器件具有结构紧凑、带宽大、串扰低、插损低等突出优点,为实现片上硅光集成系统的偏振调控奠定了重要基础。

2.3 多模光子器件

模式是描述波导光场传输的重要维度。突破单模条件并引入高阶模不仅能显著提升光互连传输容量,而且为片上光子集成器件设计提供了一个新的自由度。因此,近年来硅基多模光子学逐渐兴起,受到越来越多的关注并获得迅速发展^[54,94]。目前,人们已成功研制了多通道模式(解)复用器^[11,95-103]、模式转换器^[104-113]、超紧凑多模弯曲波导^[114-122]、高性能多模交叉波导^[123-129]、多模功分器^[130-131]等核心功能器件。同时,利用模式这一新维度,也实现了一系列高阶模辅助型功能器件,包括偏振控制器件^[132-134]、多模波导光栅滤波器^[135-136]、高Q微腔、超低损耗多模波导延迟线^[137-141]、模式编码量子器件^[142-144]等。

2.3.1 多通道模式(解)复用器及模式转换器

多模光子学中最具代表性的工作是模式复用及解复用技术,通常可采用ADC、MMI、Y分支波导、MZI以及逆向设计结构等实现^[95-103]。其中,ADC基于跨阶模相位匹配耦合原理,具有结构紧凑、拓展性强等优点,是目前最为典型的模式复用/解复用结构之一。图3(a)所示为多模硅光波导模式的有效折射率 N_{eff} 。由此可见,通过合理选取两个波导的宽度,可使窄波导基模和宽波导的某一特定模式匹配,从而实现二者的完全耦合。基于这一原理,文献^[11]提出并实现了一种基于ADC结构的4通道模式复用器,如图3(b)所示。此结构包含了对应于不同模式通道的多级非对称耦合系统,并采用特定参数的锥形波导将不同宽度多模波导依次级联,最终构建了多模总线波导宽度渐变的全新多通道模式复用-解复用器件,可实现模式复用系统

中各通道相应阶次模式的高效上传/下载,具有易扩展、小尺寸、大带宽、低损耗和低串扰等突出优点。文献[98]引入了一种基于亚波长光栅波导结构的 ADC,实现了可操控 11 个 TE 模式通道的模式复用器。由此可见,级联 ADC 结构为大容量多通道模式复用光互连系统提供了具有优异单一模式选择能力的核心功能器

件。进一步地,文献[102]提出利用非对称耦合系统中模式/偏振选择性突破单偏振限制的新思路,实现了如图 3(c)所示的双偏振基模-高阶模耦合器件,进一步研制出大带宽的 8 通道双偏振模式复用器件,成功解决了波长、偏振模式等不同维度复用技术不可兼容的问题。

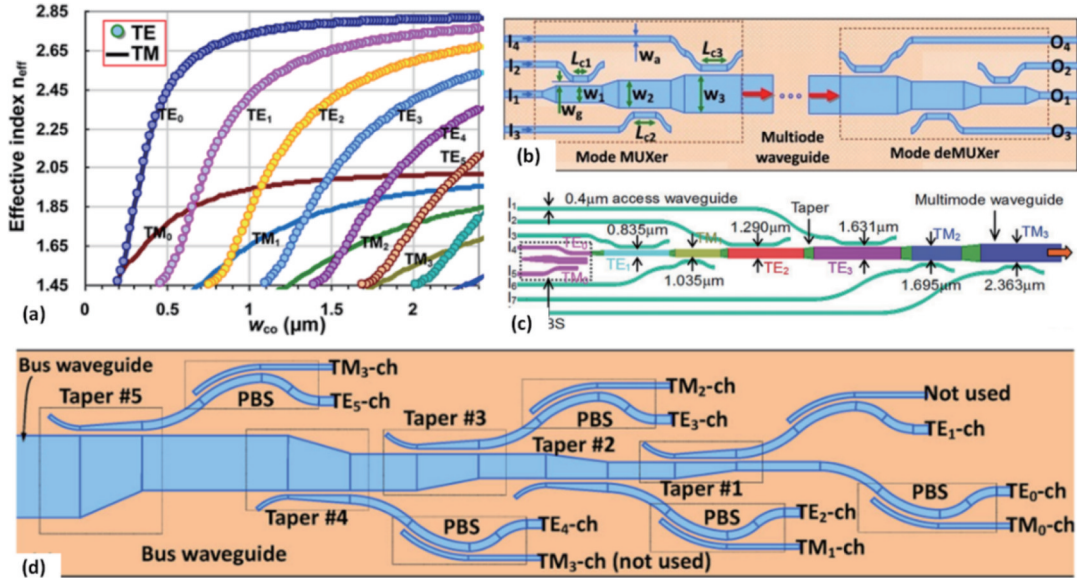


图 3 模式复用器。(a)多模硅波导的色散曲线^[103]; (b)基于 ADC 的 4 通道模式复用器^[11]; (c)基于 ADC 的 8 通道双偏振模式复用器^[102]; (d)基于绝热模式演变耦合器和 PBS 的 10 通道模式复用器^[103]

Fig. 3 Mode multiplexer. (a) Dispersion curves of multimode silicon waveguide^[103]; (b) 4-channel mode multiplexer based on ADC^[11]; (c) 8-channel dual-polarization mode multiplexer based on ADC^[102]; (d) 10-channel mode multiplexer based on adiabatic coupler and PBS^[103]

为了获得更大制造容差,文献[103]提出了双偏振多模转化调控机理以及一种特殊设计的双芯渐变光波导结构,基于独特模场局域化及双偏振超模演化原理,发展了一次性操控双偏振高阶模通道的新方法。该方法能同时选取不同偏振的两个模式通道,进而通过单片集成的高性能片上 PBS 进行偏振操控,明显降低了芯片设计与加工难度,显著缩小了器件尺寸,且具有极佳的扩展性。基于这一全新设计思想,文献[103]创建了多级双芯渐变光波导结构,实现了

具有 10 通道的双偏振模式复用-解复用器件,该器件包含 6 个 TE 偏振模及 4 个 TM 偏振模,如图 3(d)所示,展示出低损耗、高消光比、大带宽等突出优点及波分复用兼容性,为未来超大容量多维复用光互连提供了关键技术支撑。表 3 总结了目前报道的代表性多通道模式复用器的情况。可以看到,ADC 型模式复用器具有良好的拓展性,能支持多达 10 个双偏振模式或者 11 个单偏振模式,同时具有低损耗和低串扰等突出性能。

表 3 近年来报道的各类硅基多通道模式复用器

Table 3 Summary of silicon-based multi-channel mode multiplexers reported in recent years

Type	Year	Footprint	Capacity	Loss /dB		Crosstalk /dB		Bandwidth / nm	
				Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
MMI ^[95]	2012	80 μm	2	1	/	<-40	/	60	/
ADC ^[11]	2013	~100 μm	4	0.1	1	-25	-23	/	20
Y branch ^[97]	2016	~350 μm	3	0.32-0.82	5.7	-44.9--11.9	-9.7--31.5	120	29
Adiabatic ADC ^[103]	2018	/	10	~0.5	1.8	<-30	-15--25	70	/
SWG ADC ^[98]	2018	507 μm	11	/	0.1-2.6	/	-15.4--26.4	/	50
MMI ^[99]	2020	136 μm	2	0.22-1.30	1.8	-25.2--20	-20	60	60
Inverse design ^[100]	2022	20 μm × 30 μm	4	/	0.62-5	/	-10--25	/	100

此外,模式转换也是多模光子学体系中的一个重要问题。模式转换的本质是模场强度及相位操纵,可采用定向耦合器、Y分支波导、MZI等结构^[95-101]。近年来人们发展了多种基于SWG的新型模式转换器^[104-113],具有超小尺寸等优点。文献^[113]则提出并实现了一种基于模式激发及模式干涉调控机制的超紧凑模式转换器,如图4所示,其关键在于通过亚波长结

构优化设计实现模式功率分配-相移调控-合束干涉等物理过程。所研制的TE₀₋₁、TE₀₋₂模式转换器尺寸仅为1.3 μm×2.7 μm,且在近200 nm的超宽波长范围内附加损耗低于0.65 dB、串扰低于-10 dB。表4总结了目前报道的代表性模式转换器的工作情况。其中,基于SWG结构的模式转换器在尺寸、损耗、串扰及带宽方面具有优异的综合性能^[113]。

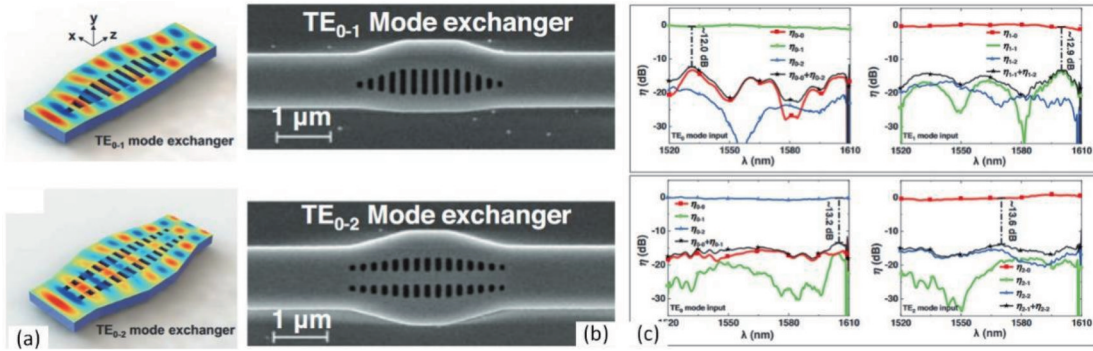


图4 基于超材料局域定义折射率的TE₀₋₁和TE₀₋₂模式转换器^[113]。(a)器件传输仿真;(b)制作器件的SEM图像;(c)器件的传输谱
Fig. 4 TE₀₋₁ and TE₀₋₂ mode converters with locally defined refractive index based on metamaterials^[113]. (a) Simulated light propagations for mode exchangers; (b) SEM images of fabricated devices; (c) measured transmission spectra

表4 近年来报道的各类硅基片上模式转换器

Table 4 Summary of silicon-based on-chip mode converters reported in recent years

Type	Year	Footprint / (μm×μm)	Loss /dB		Extinction ratio /dB		Bandwidth /nm	
			Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
MZI ^[105]	2006	3×18	0.4	0.4	—	—	200	—
Cascaded taper ^[106]	2015	2.83×13.12	~0.06	—	—	—	>60	—
LPG ^[107]	2016	1×23	0.36	~0.55	14.5	13	—	—
Phase gradient metasurface ^[108]	2017	0.6×12	14.8-4.4	—	>3 dB	—	1600	—
Inverse design ^[109]	2018	1.6×4	0.86	1.34	—	~9.14	40	40
LPG ^[110]	2018	1.1×5.75	~1	<1	11	>10	20	21
SWG structure ^[111]	2020	1.3×2.7	0.19	0.23	19	>12	407	>80
SWG structure ^[112]	2022	1.23×2.7	1.5	~3.8	~8	~7	100	30-60

2.3.2 多模传输器件

由于存在模式色散,多模波导中光场传输相比于单模波导要复杂得多。实现超低损耗和超低串扰的多模式通道传输是该领域面临的重要挑战,亟需发展多模弯曲波导、多模交叉波导、多模锥形波导等基础元器件。

众所周知,多模弯曲波导与多模直波导存在模场失配。若采用常规的圆弧弯曲结构,则往往存在显著的弯曲损耗及模间串扰,因此通常需要选取相当大的弯曲半径(数百微米)。文献^[118]提出了一种欧拉曲线多模弯曲波导,如图5(a)所示,其特点是:该弯曲波导曲率半径由极大值R_{max}渐变至极小值R_{min}再渐变至极大值R_{max}。此时,选取足够大的R_{max}(数百微米)可使弯曲波导与直波导接近匹配;同时,选取合适的R_{min}(10 μm量级)使弯曲波导结构最为紧凑。基于这一思路,可将4通道多模波导的等效弯曲半径减小至45 μm。为了进一步实现更小的弯曲半径,文献^{[117,}

119]提出了基于SWG结构的多模弯曲波导方案,如图5(b)所示。该方案巧妙地在直波导或弯曲波导中引入SWG结构,通过调控其等效折射率分布实现直波导与弯曲波导的模场匹配。利用这一思路,可将多模波导的等效弯曲半径减小至10 μm,并实现3个TE模式通道的低损耗、低串扰传输。文献^[120]则进一步将SWG结构与欧拉曲线结合,实现了有效弯曲半径仅为10 μm的多模弯曲波导,可支持3个TE和3个TM模式的双偏振多模传输,如图5(c)所示。在此基础上,文献^[122]进一步提出基于自由曲线的多模弯曲波导设计,如图5(d)所示。该设计可将支持3通道传输的多模波导有效弯曲半径减小至9.35 μm,其附加损耗低于0.04 dB、模间串扰低于-29 dB。表5总结了目前报道的代表性多模弯曲波导的情况。其中,基于曲率渐变设计(特别是自由曲线)的多模弯曲波导具有最低的损耗和串扰,工艺简单,且弯曲半径较小,具有突出的应用潜力。

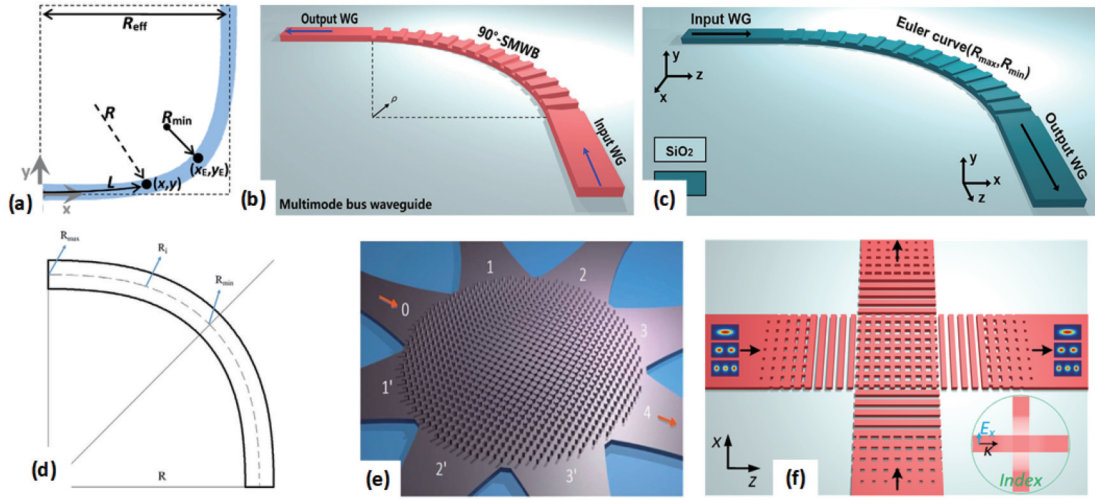


图 5 多模传输器件。(a) 基于欧拉弯曲的多模弯曲波导结构^[118]；(b) 基于 SWG 结构的多模弯曲波导^[119]；(c) 基于 SWG/欧拉组合结构的多模弯曲波导^[120]；(d) 基于自由曲线的多模弯曲波导结构^[122]；(e) 基于 Maxwell lens 的星型交叉波导^[126]；(f) 基于各向异性 SWG 的多模交叉波导^[129]

Fig. 5 Multimode transmission devices. (a) Multimode bending waveguide structure based on Euler bending^[118]; (b) multimode bending waveguide based on SWG structure^[119]; (c) multimode bending waveguide based on SWG/Euler combined structure^[120]; (d) multimode bending waveguide structure based on free curves^[122]; (e) start-crossing waveguide based on Maxwell lens^[126]; (f) multimode crossing waveguide based on anisotropic SWG^[129]

表 5 近年来报道的各类硅基多模弯曲波导

Table 5 Summary of silicon-based multimode bending waveguides reported in recent years

Type	Year	Radius / μm	Channel number	Loss /dB		Crosstalk /dB		Bandwidth /nm	
				Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
Gradient index ^[116]	2012	78.8	4	—	<3	—	—	—	—
Gradient index ^[117]	2018	<30	4	0.88	1.5	<-20	<-20	80	80
Euler curves ^[118]	2018	~45	4	<0.1	0.5	<-25	-19.2	100	90
Gradient index ^[119]	2019	10	3	0.1-0.5	0.1-0.7	<-30	-22	100	80
Corner-bend ^[120]	2020	>7	2-10	<0.18	<0.53	<-36	<-15	>420	280
Inverse design ^[121]	2020	3.9	4	<1.1	<1.8	<-20	<-17	40	40
Free-form ^[122]	2021	9.35	3	0.04	0.17	-24	-21	100	80

多模交叉波导是另一类重要光波导结构,特别是对于复杂的集成光子回路。比较常见的多模交叉波导是利用模式复用/解复用及单模波导交叉相结合的结构,其不足在于尺寸过大、结构复杂^[123-124]。为此,文献^[125]提出了基于逆向设计的双模交叉波导,其缺点是制备难度大、扩展性不强;文献^[126, 128]提出了基于亚波长结构鱼眼透镜的多模交叉波导,如图 5(e)所示,通过超表面结构等效折射率调控实现了多端口多模交叉,具有易扩展、低损耗和低串扰等优点。

文献^[129]则创新性地提出一种具有全新机制的多模交叉波导,如图 5(f)所示。该结构基于全新的一/二维复合亚波长交叉结构,巧妙利用其各向异性,使其交叉重叠区域的等效折射率高于两侧区域,此时交叉区域可等效为具有较高折射率差的直波导,仍可支持各阶导模传输。所提出的波导结构形成了与传统交叉波导截然不同的工作机制,避免了光场发散及其导致的模场失配等严重问题,为实现低损耗/低串

扰多模交叉波导传输提供了全新路径。实验结果表明,该交叉结构在 1530~1610 nm 超宽波长范围内,TE₀、TE₁、TE₂模式的传输损耗分别低于 0.06 dB、0.15 dB、0.26 dB,且串扰低于 -20 dB,表明其具有超低损耗和低串扰特性。此外,该结构仅需简单地扩展波导宽度即可满足更多模式通道的应用需求,扩展性极佳,为实现高性能多模波导交叉提供了一种有效途径。表 6 总结了目前报道的代表性多模交叉波导结果,可以看到,高性能多模交叉波导大多采用亚波长结构来实现光场的有效调控。其中,文献^[129]提出的利用二维亚波长结构各向异性设计的多模交叉波导以其独特的工作机制而具有设计简单、性能优异、易于扩展等独有优势。

2.3.3 基于展宽波导的低传输损耗/低相位误差器件
随着硅光技术的发展,CMOS 工艺兼容性与超高集成密度使得超大规模光子集成成为可能,这也是 1969 年首次提出集成光学概念以来众多研究人员孜

表 6 近年来报道的各类硅基多模交叉波导

Table 6 Summary of silicon-based multimode crossing waveguides reported in recent years

Type	Year	Footprint / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	Capacity	Loss / dB		Crosstalk / dB		Bandwidth / nm	
				Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
MMI couplers ^[123]	2016	29×29	2	1.7	1.5	-32	-18	100	80
Asymmetric Y-junction ^[124]	2018	34×34	3	1.5	2.0	-22	-20	60	60
Inverse design method ^[125]	2018	4.8×4.8	2	0.5	0.6	-30	-24	80	60
Fisheye lens ^[126]	2018	18×18	2	0.3	0.5	-20	-20	100	65
2D SWG ^[129]	2022	14.8×14.8	3	0.15	0.26	-42	-20	300	>80

孜孜以求的目标。超大规模光子集成芯片往往包含数量极其庞大的无源光子器件以及累积长度达 10~100 cm 的传输波导,因此波导损耗无疑成为制约其进一步发展的瓶颈。可以预见,未来超大规模光子集成芯片对更低损耗的要求将达到前所未有的高度,亟需发展新一代极低损耗的硅光波导。

针对这一问题,文献[138]基于三维体电流法分析模型从理论上对硅光波导基模散射损耗进行全面理论研究,明确其光场传输损耗主要来源于粗糙侧壁的散射。为此,文献[138]突破单模条件制约,提出了均匀展宽波导模场调控理念,通过引入特殊的欧拉曲线弯

曲结构,获得了超紧凑弯曲结构且有效避免了模间交叉耦合,成功实现了均匀展宽波导弯曲结构中基模的单模传输。基于标准流片工艺实现了 $Q > 10^7$ 极高 Q 值的硅光微腔,其对应的波导损耗仅为 0.065 dB/cm (仅为传统硅光波导损耗的数十分之一),如图 6(a) 所示。在此基础上,进一步研制了 3 dB 带宽仅为 20.6 MHz 的超窄线宽硅基可调谐光滤波器和长达 1 m 的超长硅光波导延迟线^[139],如图 6(b) 所示。由此可见,发展超越单模的新思路对突破极低损耗硅光波导及器件发展瓶颈具有重要意义,为基于标准工艺实现下一代超大规模硅光集成提供了新的可能。

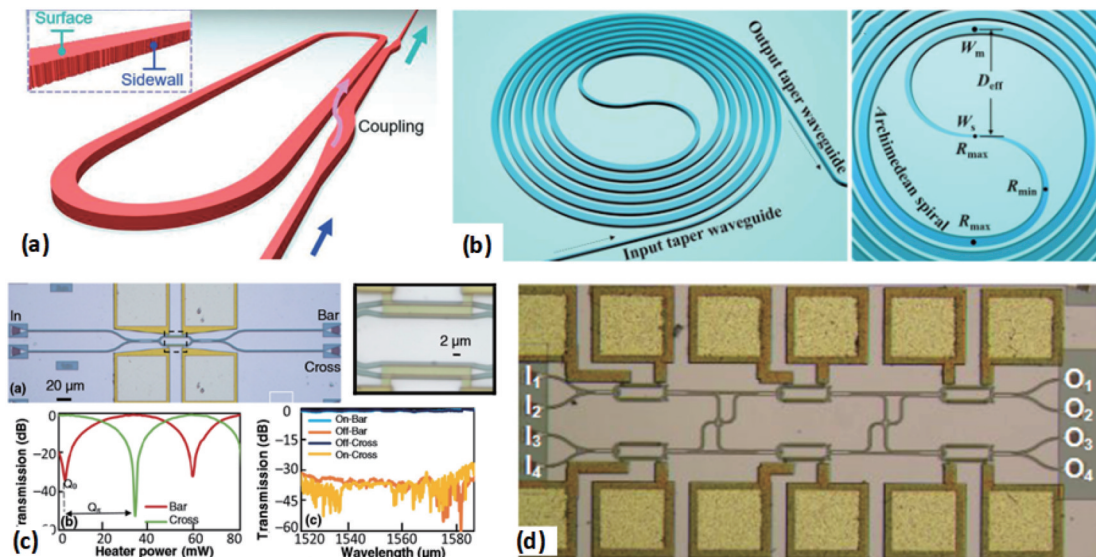


图 6 基于展宽波导的高性能硅光器件。(a) 超高 Q MRR^[138]; (b) 低损耗延迟线^[139]; (c) 低随机相位误差 2×2 MZI 开关^[140]; (d) 低随机相位误差 4×4 MZI 开关^[141]

Fig. 6 High-performance silicon photonic devices based on broadened waveguide. (a) Ultrahigh Q MRR^[138]; (b) low-loss delay line^[139]; (c) 2×2 MZI switch with low random phase error^[140]; (d) 4×4 MZI with low random phase error^[141]

同时,展宽硅光波导还为降低光场传输的累积随机相位误差提供可能,对实现免校准 MZI 光开关等干涉型器件具有重大意义。由于工艺制作存在误差,传统 MZI 光开关存在显著的随机相位误差,使得开关状态严重偏离,需引入额外的加热功率来校准,这就显著增加了系统功耗和复杂性,严重限制了光开关在光互连系统的实际应用。文献[140]提出基于展宽波导降低随机相位误差的机制,设计了宽波导相移臂和超紧凑宽度渐变欧拉 S 弯曲结构,并结合滤模结构,获得免校准 MZI 光开关单元,如图 6(c) 所示。在此基础上,

进一步实现了免校准的 4×4 MZI 开关阵列^[141],如图 6(d) 所示,在免校准状态下实现了 60 nm 波长范围内 20 dB 的消光比,并验证了 4×4 光开关阵列在 30 Gbit/s 的 NRZ 光信号的数据传输。这种基于展宽波导抑制随机相位误差的方法解决了传统 2×2 及 $N \times N$ MZI 的随机相位误差导致的光开关阵列调校复杂、功耗高等问题,也为实现其他高性能相位敏感型硅光器件提供了新的思路,这对于发展下一代免校准硅光器件具有重要意义。

2.4 多维混合复用器件

为提升大容量数据传输能力,除了提高单通道比特率外,采用复用技术也是有效方式之一。在引入 n 个波长通道的基础上,将 m 个模式和 2 个偏振融合,可构建波长-模式-偏振多维混合复用技术,将通道数提升 $2m$ 倍,因此该技术被认为是极具潜力的新一代光互连传输技术,在全球范围内受到广泛关注^[145]。相应地,其关键器件已取得系列进展,包括多维混合复用-解复用器、多维混合复用光开关、多维 ROADM^[146-154]等。

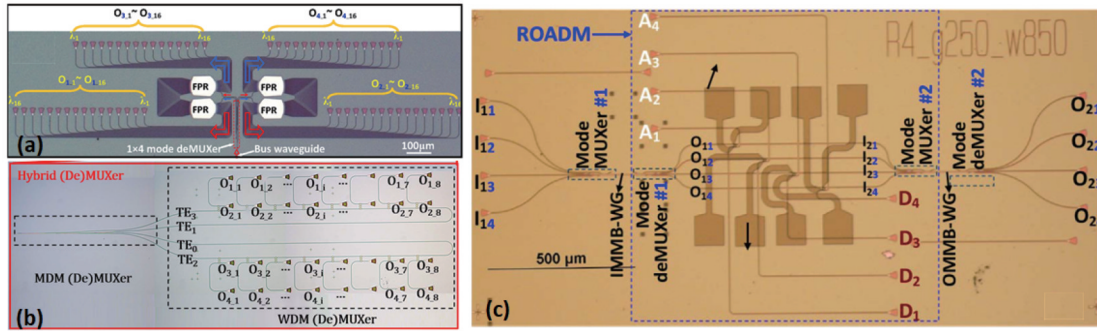


图 7 多维复用系统。(a)基于模式复用器与 AWG 的模式/波长多维复用器^[146];(b)基于模式复用器与 MRR 的多维复用器^[149];
(c)基于模式复用器与微环开关阵列的 ROADM^[153]

Fig. 7 Hybrid multiplexing systems. (a) Mode/wavelength hybrid multiplexer based on mode multiplexer and AWG^[146]; (b) hybrid multiplexer based on mode multiplexer and MRR^[149]; (c) ROADM based on mode multiplexer and MRR array^[153]

将多维混合复用-解复用器件与光开关集成,则可实现多维复用光开关,从而对多维混合复用系统的信号进行交换及上传/下载。例如,文献^[151]基于模式转换器及微环阵列成功研制出 2×2 的混合复用光开关。同样作为复用系统关键器件的 ROADM 也受到广泛关注,例如文献^[153]提出一种基于多维复用系统的 ROADM 方案,如图 7(c) 所示。该多维复用 ROADM 由 4 通道模式复用器、微环开关阵列、4 通道模式解复用器构成,可通过控制微环开关状态选择性地实现任意模式/波长通道上传/下载。该结构框架具有优越的可拓展性:通过提升模式及微环开关数量,可灵活处理更多模式/波长通道的上传/下载。特别地,文献^[154]将模式复用器与微环调制器阵列相结合,实现了可支持 $4 \times 4 \times 32$ Gbit/s 信号传输的硅基片上多维调制器。

3 总结与展望

主要分析了高性能无源硅光波导器件的研究进展,重点包括:1)MRR、多模布拉格光栅等波分复用器件;2)起偏器、PBS、PSR、偏振开关等片上偏振调控器件;3)模式复用器、模式转换器、多模弯曲波导、多模交叉波导、超低损耗展宽波导及器件、超低随机相位误差 MZI 光开关及阵列;4)波长-偏振-模式多维复用器件及多维 ROADM 等。可以看出,无源硅光波导器件在更高性能和更强功能方面取得了突出进展,为大规模硅光集成芯片的发展奠定了重要基础,但仍然面临着诸多挑战,亟需持续努力推进。

文献^[146]提出并实现了一种 64 通道的波长-模式复用器,如图 7(a) 所示。该器件由一个 4 通道模式复用器、4 个 16 通道 AWG 构成。进一步地,文献^[147]采用双向 AWG 实现了另一种更为紧凑的 64 通道波长-模式混合复用-解复用器。正如前文所述,相比于 AWG, MRR 型波分复用-解复用器具有结构尺寸更小、串扰更低、设计更灵活等优势。文献^[148-149]报道了基于微环滤波器阵列及模式复用器的级联设计,实现了 32 通道(4 个模式、8 个波长)多维混合复用器,如图 7(b) 所示。

首先,亟需全面提升硅光器件的性能。随着人工智能、增强现实、5G、量子光学等技术的兴起,光通信及光互连系统对硅光器件及芯片提出了更低功耗、更高集成、更低损耗、更低串扰、更大容量、更大容差等更为严苛的要求。例如,对于波分复用器件,如何实现超低串扰、超低损耗及超多通道等优异性能并突破其温度敏感性和偏振敏感性的限制仍然极具挑战。具体地,对于集成量子光学系统,如何实现消光比 > 100 dB 的片上带阻滤波器以消除其泵浦光干扰是一项颇具挑战的任务。类似地,对于偏振调控和模式调控,其难点在于如何在获得超小尺寸的同时实现在超大带宽范围内具有超高消光比及超低损耗的超高性能功能器件。因此,仍需持续努力推进硅光技术研究,以期在全面指标体系下获得更高性能,以满足实际应用需求。

其次,重点关注硅光器件工艺的兼容性。对于硅光技术的发展,核心问题是如何保证在标准流片工艺平台上制备高性能硅光器件,这也是硅光器件推广应用及系统集成的核心要求。相应地,硅光器件设计需要考虑以下两个方面:1)标准流片工艺的最小结构尺寸要求;2)器件结构的工艺容差大小。当前,为了突破器件集成度和功能性瓶颈,人们发展了逆向智能设计方法,基于亚波长结构实现了超小尺寸的硅光功能器件,但是这些器件的最小结构尺寸通常仅数十纳米,不符合当前的常规标准流片要求。因此,亟需将器件设计与芯片制造结合,更好地发展标准工艺框架下的高性能硅光器件体系。

再次,加快推进更大规模硅光集成。规模集成是

硅光器件迈向应用的关键。在大规模集成芯片中,各单元器件的一致性和鲁棒性至关重要。因此,应特别关注器件结构的容差问题,同时重点研究制造工艺的均匀性问题,从而解决大规模集成芯片的良率低问题。在此基础上,还需重点关注大规模集成芯片的封装测试难题。免校准器件或自校准技术可极大地缩小片上系统的测试结构尺寸、降低芯片功耗以及控制系统复杂度等,有望成为推动大规模硅光集成发展的有效途径。

最后,不断探索硅光集成的新应用。硅光技术在光互连、光传感、光测量及光计算等领域具有巨大的应用潜力,被寄予厚望。然而,面对不同应用场景,硅光器件的性能及功能要求也不尽相同,甚至工作波段也有明显差异。例如,此前硅光技术研究主要聚焦于面向光通信/光互连的 1310/1550 nm 波段,而光传感等领域可能需要延伸至中红外波段。因此,亟需针对不同的新应用,不断研制相应的硅光器件及芯片,以积极推动其更为广泛的实际应用。

总而言之,硅光技术经过长期积累,已具有比较完备的技术体系和比较深厚的技术储备,被看作光电子集成领域目前最具潜力的新兴主流平台,目前正处在迈向产品化和产业化的关键阶段。为了促进硅光领域更快更好地发展,一方面要进一步提升硅光器件设计和制造水平,在超低损耗、超低功耗、超高消光比和超低串扰等高性能硅光器件方面取得根本性突破;另一方面,要结合市场实际需求,促进产学研融合,推进具有前景的硅光新应用,形成更加完善的硅光技术及产业发展生态圈。

参 考 文 献

- [1] Dong P, Chen Y K, Duan G H, et al. Silicon photonic devices and integrated circuits[J]. *Nanophotonics*, 2014, 3(4/5): 215-228.
- [2] Xiang Y L, Cao H Z, Liu C Y, et al. High-speed waveguide Ge/Si avalanche photodiode with a gain-bandwidth product of 615 GHz[J]. *Optica*, 2022, 9(7): 762-769.
- [3] Doylend J K, Knights A P. The evolution of silicon photonics as an enabling technology for optical interconnection[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(4): 504-525.
- [4] Selvaraja S K, Bogaerts W, Dumon P, et al. Subnanometer linewidth uniformity in silicon nanophotonic waveguide devices using CMOS fabrication technology[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 16(1): 316-324.
- [5] Dai D, Liu L, Wosinski L, et al. Design and fabrication of an ultrasmall overlapped AWG demultiplexers based on α -Si nanowire waveguides[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(7): 400-402.
- [6] Dai D X, Fu X, Shi Y C, et al. Experimental demonstration of an ultracompact Si-nanowire-based reflective arrayed-waveguide grating (de)multiplexer with photonic crystal reflectors[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2594-2596.
- [7] Pathak S, van Thourhout D, Bogaerts W. Design trade-offs for silicon-on-insulator-based AWGs for (de)multiplexer applications[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 2961-2964.
- [8] Doerr C R, Taunay T F. Silicon photonics core-, wavelength-, and polarization-diversity receiver[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(9): 597-599.
- [9] Randel S, Ryf R, Sierra A, et al. 6×56 -Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16697-16707.
- [10] Dai D X. Silicon mode-(de)multiplexer for a hybrid multiplexing system to achieve ultrahigh capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light[C]//Asia Communications and Photonics Conference, November 7-10, 2012, Guangzhou, China. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2012: ATh3B.3.
- [11] Dai D X, Wang J, Shi Y C. 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.
- [12] Wang J, Dai D X. On-chip Si optical interconnect with 8-channel hybrid (de)multiplexer enabling mode- and polarization-division-multiplexing simultaneously[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2013, November 12-15, 2013, Beijing. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2013: AF2A.3.
- [13] Wang J, He S L, Dai D X. On-chip silicon 8-channel hybrid (de)multiplexer enabling simultaneous mode- and polarization-division-multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(2): L18-L22.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Qiu H Y, 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] Xing J J, Li Z Y, Xiao X, et al. Two-mode multiplexer and demultiplexer based on adiabatic couplers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3468-3470.
- [18] Shi W, Tian Y, Gervais A. Scaling capacity of fiber-optic transmission systems via silicon photonics[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(16): 4629-4663.
- [19] Zhou Z P, Bai B W, Liu L. Silicon on-chip PDM and WDM technologies via plasmonics and subwavelength grating[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(3): 4600413.
- [20] Dai D, Bowers J E. Silicon-based on-chip multiplexing technologies and devices for Peta-bit optical interconnects [J]. *Nanophotonics*, 2014, 3(4/5): 283-311.
- [21] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division

- multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [22] Miller S A, Yu M J, Ji X C, et al. Low-loss silicon platform for broadband mid-infrared photonics[J]. *Optica*, 2017, 4(7): 707-712.
- [23] Doerr C, Chen L. Silicon photonics in optical coherent systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(12): 2291-2301.
- [24] Saber M G, Vall-Llosera G, Patel D, et al. Silicon-based optical links using novel direct detection, coherent detection and dual polarization methods for new generation transport architectures[J]. *Optics Communications*, 2019, 450: 48-60.
- [25] Liu D J, Xu H N, Tan Y, et al. Silicon photonic filters [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(9): 2252-2268.
- [26] Xu H N, Dai D X, Shi Y C. Low-crosstalk and fabrication-tolerant four-channel CWDM filter based on dispersion-engineered Mach-Zehnder interferometers[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20617-20631.
- [27] Bogaerts W, de Heyn P, van Vaerenbergh T, et al. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47-73.
- [28] Cheng R, Chrostowski L. Spectral design of silicon integrated Bragg gratings: a tutorial[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(3): 712-729.
- [29] Zou J, Ma X, Xia X, et al. High resolution and ultra-compact on-chip spectrometer using bidirectional edge-input arrayed waveguide grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4447-4453.
- [30] Melati D, Verly P G, Delage A, et al. Compact and low crosstalk echelle grating demultiplexer on silicon-on-insulator technology[J]. *Electronics*, 2019, 8(6): 687.
- [31] Prabhu A M, Tsay A, Han Z, et al. Extreme miniaturization of silicon add-drop microring filters for VLSI photonics applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(3): 436-444.
- [32] Chen P X, Chen S T, Guan X W, et al. High-order microring resonators with bent couplers for a box-like filter response[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6304-6307.
- [33] Liu D J, Zhang C, Liang D, et al. Submicron-resonator-based add-drop optical filter with an ultra-large free spectral range[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 416-422.
- [34] Xiao S J, Khan M H, Shen H, et al. Silicon-on-insulator microring add-drop filters with free spectral ranges over 30 nm[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(2): 228-236.
- [35] Liu D J, Zhang L, Tan Y, et al. High-order adiabatic elliptical-microring filter with an ultra-large free-spectral-range[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(18): 5910-5916.
- [36] Jayatilaka H, Shoman H, Chrostowski L, et al. Photoconductive heaters enable control of large-scale silicon photonic ring resonator circuits[J]. *Optica*, 2019, 6(1): 84-91.
- [37] Jeong S H, Shimura D, Simoyama T, et al. Low-loss, flat-topped and spectrally uniform silicon-nanowire-based 5th-order CROW fabricated by ArF-immersion lithography process on a 300-mm SOI wafer[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30163-30174.
- [38] Liu D J, He J H, Xiang Y L, et al. High-performance silicon photonic filters based on all-passive tenth-order adiabatic elliptical-microrings[J]. *APL Photonics*, 2022, 7(5): 051303.
- [39] Liu D J, Zhang L, Jiang H X, et al. First demonstration of an on-chip quadplexer for passive optical network systems[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 757-763.
- [40] Wang X. Silicon photonic waveguide Bragg gratings[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2013.
- [41] Xie S J, Zhan J H, Hu Y W, et al. Add-drop filter with complex waveguide Bragg grating and multimode interferometer operating on arbitrarily spaced channels[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6045-6048.
- [42] Charron D, Shi W. O-band add-drop filter in Bragg-grating-assisted Mach-Zehnder interferometers for CWDM[C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 5-10, 2019, San Jose, CA, USA. Washington, C. D.: Optica Publishing Group, 2019: JTh2A.44.
- [43] Hammood M, Mistry A, Yun H, et al. Four-channel, silicon photonic, wavelength multiplexer-demultiplexer with high channel isolations[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [44] Charron D, St-Yves J, Jafari O, et al. Subwavelength-grating contra directional couplers for large stopband filters[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 895-898.
- [45] Yun H, Hammood M, Lin S, et al. Broadband flat-top SOI add-drop filters using apodized sub-wavelength grating contra directional couplers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(20): 4929-4932.
- [46] Hammood M, Mistry A, Yun H, et al. Broadband, silicon photonic, optical add-drop filters with 3 dB bandwidths up to 11 THz[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2738-2741.
- [47] Qiu H Y, Jiang J F, Hu T, et al. Silicon add-drop filter based on multimode Bragg sidewall gratings and adiabatic couplers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(9): 1705-1709.
- [48] Jiang J F, Qiu H Y, Wang G C, et al. Silicon lateral-apodized add-drop filter for on-chip optical interconnection [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(30): 8425-8429.
- [49] Oser D, Mazeas F, Le Roux X, et al. Coherency-broken Bragg filters: overcoming on-chip rejection limitations[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(8): 1800226.
- [50] Liu D J, Wu H, Dai D X. Silicon multimode waveguide grating filter at 2 μm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10): 2217-2222.
- [51] Liu D J, Zhang M, Shi Y C, et al. Four-channel CWDM (de)multiplexers using cascaded multimode waveguide gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(4): 192-195.

- [52] Liu D J, Zhang M, Dai D X. Low-loss and low-crosstalk silicon triplexer based on cascaded multimode waveguide gratings[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(6): 1304-1307.
- [53] Liu D J, Dai D X. Silicon-based polarization-insensitive optical filter with dual-gratings[J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20704-20710.
- [54] Li C L, Liu D J, Dai D X. Multimode silicon photonics [J]. *Nanophotonics*, 2018, 8(2): 227-247.
- [55] Dai D X, Wang Z, Julian N, et al. Compact broadband polarizer based on shallowly-etched silicon-on-insulator ridge optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27404-27415.
- [56] Bauters J F, Heck M J R, Dai D, et al. Ultralow-loss planar Si_3N_4 waveguide polarizers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(1): 6600207.
- [57] Guan X W, Chen P X, Chen S T, et al. Low-loss ultracompact transverse-magnetic-pass polarizer with a silicon subwavelength grating waveguide[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4514-4517.
- [58] Xiong Y L, Xu D X, Schmid J H, et al. High extinction ratio and broadband silicon TE-pass polarizer using subwavelength grating index engineering[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(5): 1-7.
- [59] Kim D W, Lee M H, Kim Y, et al. Ultracompact transverse magnetic mode-pass filter based on one-dimensional photonic crystals with subwavelength structures[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21560-21565.
- [60] Xu H N, Shi Y C. On-chip silicon TE-pass polarizer based on asymmetrical directional couplers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(11): 861-864.
- [61] Zafar H, Moreira P, Taha A M, et al. Compact silicon TE-pass polarizer using adiabatically-bent fully-etched waveguides[J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31850-31860.
- [62] Zhou W, Cheng Z Z, Zhu B Q, et al. Hyperuniform disordered network polarizers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(6): 288-294.
- [63] Bai B W, Yang F H, Zhou Z P. Demonstration of an on-chip TE-pass polarizer using a silicon hybrid plasmonic grating[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(3): 289-293.
- [64] Xu H N, Dai D X, Shi Y C. Anisotropic metamaterial-assisted all-silicon polarizer with 415-nm bandwidth[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(12): 1432-1439.
- [65] Wu H, Tan Y, Dai D X. Ultra-broadband high-performance polarizing beam splitter on silicon[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6069-6075.
- [66] Xu H N, Dai D X, Shi Y C. Ultra-broadband and ultra-compact on-chip silicon polarization beam splitter by using hetero-anisotropic metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(4): 1800349.
- [67] Dai D X, Wu H. Realization of a compact polarization splitter-rotator on silicon[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2346-2349.
- [68] Zhao W K, Liu R R, Peng Y Y, et al. High-performance silicon polarization switch based on a Mach-Zehnder interferometer integrated with polarization-dependent mode converters[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(10): 2293-2301.
- [69] Wang J, Liang D, Tang Y B, et al. Realization of an ultra-short silicon polarization beam splitter with an asymmetrical bent directional coupler[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 4-6.
- [70] Lu Z Q, Wang Y, Zhang F, et al. Wideband silicon photonic polarization beam splitter based on point-symmetric cascaded broadband couplers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29413-29422.
- [71] Chen S T, Wu H, Dai D X. High extinction-ratio compact polarisation beam splitter on silicon[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(12): 1043-1045.
- [72] Li C L, Dai D X. Compact polarization beam splitter based on a three-waveguide asymmetric coupler with a 340-nm-thick silicon core layer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(11): 2129-2134.
- [73] Guan X W, Wu H, Shi Y C, et al. Extremely small polarization beam splitter based on a multimode interference coupler with a silicon hybrid plasmonic waveguide[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 259-262.
- [74] Huang Y W, Tu Z, Yi H X, et al. Polarization beam splitter based on cascaded step-size multimode interference coupler[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(7): 077103.
- [75] Hu T, Qiu H D, Zhang Z C, et al. A compact ultrabroadband polarization beam splitter utilizing a hybrid plasmonic Y-branch[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(4): 4802209.
- [76] Frelsen L F, Ding Y H, Sigmund O, et al. Topology optimized mode multiplexing in silicon-on-insulator photonic wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16866-16873.
- [77] Li C L, Zhang M, Bowers J E, et al. Ultra-broadband polarization beam splitter with silicon subwavelength-grating waveguides[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2259-2262.
- [78] Yin M, Yang W, Li Y P, et al. CMOS-compatible and fabrication-tolerant MMI-based polarization beam splitter [J]. *Optics Communications*, 2015, 335: 48-52.
- [79] Kim D W, Lee M H, Kim Y, et al. Planar-type polarization beam splitter based on a bridged silicon waveguide coupler[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 998-1004.
- [80] Chen S T, Wu H, Dai D X. High extinction-ratio compact polarisation beam splitter on silicon[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(12): 1043-1045.
- [81] Zhang Y, He Y, Wu J Y, et al. High-extinction-ratio silicon polarization beam splitter with tolerance to waveguide width and coupling length variations[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6586-6593.
- [82] Ong J R, Ang T Y L, Sahin E, et al. Broadband silicon polarization beam splitter with a high extinction ratio using a triple-bent-waveguide directional coupler[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4450-4453.
- [83] Li C L, Dai D X. Compact polarization beam splitter for

- silicon photonic integrated circuits with a 340-nm-thick silicon core layer[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4243-4246.
- [84] Xu L H, Wang Y, El-Fiky E, et al. Compact broadband polarization beam splitter based on multimode interference coupler with internal photonic crystal for the SOI platform[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1231-1240.
- [85] Dai D X, Bowers J E. Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10940-10949.
- [86] Dai D X, Tang Y B, Bowers J E. Mode conversion in tapered submicron silicon ridge optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13425-13439.
- [87] Dai D X, Zhang M. Mode hybridization and conversion in silicon-on-insulator nanowires with angled sidewalls[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32452-32464.
- [88] Xu H N, Shi Y C. Ultra-broadband silicon polarization splitter-rotator based on the multi-mode waveguide[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18485-18491.
- [89] Ma M L, Park A H K, Wang Y, et al. Sub-wavelength grating-assisted polarization splitter-rotators for silicon-on-insulator platforms[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17581-17591.
- [90] Tan K, Huang Y, Lo G Q, et al. Experimental realization of an O-band compact polarization splitter and rotator[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3234-3241.
- [91] Yuan C, Dai J C, Jia H, et al. Design of a C-band polarization rotator-splitter based on a mode-evolution structure and an asymmetric directional coupler[J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(12): 124008.
- [92] Xie C J, Zou X H, Li P X, et al. Ultracompact silicon polarization splitter-rotator using a dual-etched and tapered coupler[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(30): 9540-9547.
- [93] Lin Z J, Lin Y M, Li H, et al. High-performance polarization management devices based on thin-film lithium niobate[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 93.
- [94] Fazea Y, Mezhuyev V. Selective mode excitation techniques for mode-division multiplexing: a critical review[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 45: 280-288.
- [95] 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.
- [96] Wang J, Chen P, Chen S, et al. Improved 8-channel silicon mode demultiplexer with grating polarizers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 12799-12807.
- [97] Chen W W, Wang P J, Yang T J, et al. Silicon three-mode (de)multiplexer based on cascaded asymmetric Y junctions[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2851-2854.
- [98] 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.
- [99] Chack D, Hassan S, Qasim M. Broadband and low crosstalk silicon on-chip mode converter and demultiplexer for mode division multiplexing[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(12): 3652-3659.
- [100] Zhou H L, Wang Y L, Gao X Y, et al. Dielectric metasurfaces enabled ultradensely integrated multidimensional optical system[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(4): 2100521.
- [101] Dai D X, Wang S P. Asymmetric directional couplers based on silicon nanophotonic waveguides and applications[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2016, 9(3): 450-465.
- [102] Wang J, He S L, Dai D X. On-chip silicon 8-channel hybrid (de)multiplexer enabling simultaneous mode- and polarization-division-multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(2): L18-L22.
- [103] Dai D X, Li C L, Wang S P, et al. 10-channel mode (de)multiplexer with dual polarizations[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(1): 1700109.
- [104] González-Andrade D, Wangüemert-Pérez J G, Velasco A V, et al. Ultra-broadband mode converter and multiplexer based on sub-wavelength structures[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 2201010.
- [105] Huang Y Y, Xu G Y, Ho S T. An ultracompact optical mode order converter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(21): 2281-2283.
- [106] Chen D G, Xiao X, Wang L, et al. Low-loss and fabrication tolerant silicon mode-order converters based on novel compact tapers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11152-11159.
- [107] Liu Q, Gu Z H, Kee J S, et al. Silicon waveguide filter based on cladding modulated anti-symmetric long-period grating[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29954-29963.
- [108] Li Z Y, Kim M H, Wang C, et al. Controlling propagation and coupling of waveguide modes using phase-gradient metasurfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(7): 675-683.
- [109] Jia H, Zhou T, Fu X, et al. Inverse-design and demonstration of ultracompact silicon meta-structure mode exchange device[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1833-1838.
- [110] Ohana D, Desiatov B, Mazurski N, et al. Dielectric metasurface as a platform for spatial mode conversion in nanoscale waveguides[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7956-7961.
- [111] Guo J S, Ye C C, Liu C Y, et al. Ultra-compact and ultra-broadband guided-mode exchangers on silicon[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(7): 2000058.
- [112] Xiang J L, Tao Z Y, Li X F, et al. Metamaterial-enabled arbitrary on-chip spatial mode manipulation[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 168.
- [113] Guo J S, Ye C C, Liu C Y, et al. Ultra-compact and ultra-broadband guided-mode exchangers on silicon[J]. *Laser & Photonics Review*, 2020, 14(7): 2000058.
- [114] Dai D X. Multimode optical waveguide enabling microbends with low inter-mode crosstalk for mode-multiplexed optical interconnects[J]. *Optics Express*,

- 2014, 22(22): 27524-27534.
- [115] Sun C L, Yu Y, Chen G Y, et al. Ultra-compact bent multimode silicon waveguide with ultralow inter-mode crosstalk[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 3004-3007.
- [116] Gabrielli L H, Liu D, Johnson S G, et al. On-chip transformation optics for multimode waveguide bends[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1217.
- [117] Xu H N, Shi Y C. Ultra-sharp multi-mode waveguide bending assisted with metamaterial-based mode converters[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(3): 1700240.
- [118] Jiang X H, Wu H, Dai D X. Low-loss and low-crosstalk multimode waveguide bend on silicon[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17680-17689.
- [119] Wu H, Li C L, Song L J, et al. Ultra-sharp multimode waveguide bends with subwavelength gratings[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(2): 1800119.
- [120] Wang Y, Dai D X. Multimode silicon photonic waveguide corner-bend[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9062-9071.
- [121] Xie H C, Liu Y J, Li W X, et al. Demonstration of an ultra-compact bend for four modes based on pixelated meta-structure[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [122] Sun S S, Dong P H, Zhang F C, et al. Inverse design of ultra-compact multimode waveguide bends based on the free-form curves[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2100162.
- [123] Xu H N, Shi Y C. Dual-mode waveguide crossing utilizing taper-assisted multimode-interference couplers [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5381-5384.
- [124] Chang W J, Lu L, Ren X S, et al. An ultracompact multimode waveguide crossing based on subwavelength asymmetric Y-junction[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 4501008.
- [125] Chang W J, Lu L, Ren X S, et al. Ultracompact dual-mode waveguide crossing based on subwavelength multimode-interference couplers[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(7): 660-665.
- [126] Xu H N, Shi Y C. Metamaterial-based Maxwell's fisheye lens for multimode waveguide crossing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(10): 1800094.
- [127] Sun C L, Yu Y, Zhang X L. Ultra-compact waveguide crossing for a mode-division multiplexing optical network [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4913-4916.
- [128] Li S Y, Zhou Y Y, Dong J J, et al. Universal multimode waveguide crossing based on transformation optics: publisher's note[J]. *Optica*, 2019, 6(2): 125.
- [129] Zhao W K, Yi X L, Peng Y Y, et al. Silicon multimode waveguide crossing based on anisotropic subwavelength gratings[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2100623.
- [130] Xu H N, Shi Y C. Ultra-broadband dual-mode 3 dB power splitter based on a Y-junction assisted with mode converters[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5047-5050.
- [131] Ye C C, Zhang M, Shi Y C, et al. Broadband dual-mode 2×2 3 dB multimode interference couplers with a shallowly etched multimode section[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(24): 7308-7312.
- [132] Yin Y L, Li Z Y, Dai D X. Ultra-broadband polarization splitter-rotator based on the mode evolution in a dual-core adiabatic taper[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(11): 2227-2233.
- [133] Dai D X. Silicon polarization beam splitter based on an asymmetrical evanescent coupling system with three optical waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(20): 3281-3287.
- [134] Dai D. Advanced passive silicon photonic devices with asymmetric waveguide structures[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(12): 2117-2143.
- [135] Huang Q Z, Liu Q, Xia J S. Traveling wave-like Fabry-Perot resonator-based add-drop filters[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5158-5161.
- [136] Huang Q Z, Jie K, Liu Q, et al. Ultra-compact, broadband tunable optical bandstop filters based on a multimode one-dimensional photonic crystal waveguide [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20542-20553.
- [137] Zhang L, Jie L L, Zhang M, et al. Ultrahigh-Q silicon racetrack resonators[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 684-689.
- [138] Zhang L, Hong S H, Wang Y, et al. Ultralow-loss silicon photonics beyond the singlemode regime[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(4): 2100292.
- [139] Hong S H, Zhang L, Wang Y, et al. Ultralow-loss compact silicon photonic waveguide spirals and delay lines [J]. *Photonics Research*, 2022, 10(1): 1-7.
- [140] Song L J, Li H, Dai D X. Mach-Zehnder silicon-photonic switch with low random phase errors[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(1): 78-81.
- [141] Song L J, Chen T N, Liu W X, et al. Toward calibration-free Mach-Zehnder switches for next-generation silicon photonics[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3): 793-801.
- [142] Feng L T, Zhang M, Zhou Z Y, et al. On-chip coherent conversion of photonic quantum entanglement between different degrees of freedom[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11985.
- [143] Feng L T, Zhang M, Xiong X, et al. On-chip transverse-mode entangled photon pair source[J]. *npj Quantum Information*, 2019, 5: 2.
- [144] Feng L T, Zhang M, Xiong X, et al. Transverse mode-encoded quantum gate on a silicon photonic chip[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(6): 060501.
- [145] He Y, Zhang Y, Wang H W, et al. Design and experimental demonstration of a silicon multi-dimensional (de)multiplexer for wavelength-, mode- and polarization-division (de)multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2846-2849.
- [146] Wang J, Chen S T, Dai D X. Silicon hybrid demultiplexer with 64 channels for wavelength/mode-division multiplexed on-chip optical interconnects[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6993-6996.
- [147] Dai D X, Wang J, Chen S T, 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.
- [148] Wang S P, Wu H, Zhang M, et al. A 32-channel hybrid wavelength-/mode-division (de) multiplexer on silicon[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(13): 1194-1197.
- [149] Tan Y, Wu H, Wang S P, et al. Silicon-based hybrid demultiplexer for wavelength- and mode-division multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1962-1965.
- [150] Jia H, Zhou T, Zhang L, et al. Optical switch compatible with wavelength division multiplexing and mode division multiplexing for photonic networks-on-chip [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20698-20707.
- [151] Stern B, Zhu X L, Chen C P, et al. On-chip mode-division multiplexing switch[J]. *Optica*, 2015, 2(6): 530-535.
- [152] Cao X P, Zheng S, Zhou N, et al. On-chip multi-dimensional 1×4 selective switch with simultaneous mode-/polarization-/wavelength-division multiplexing[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(5): 8400608.
- [153] Wang S P, Feng X L, Gao S M, et al. On-chip reconfigurable optical add-drop multiplexer for hybrid wavelength/mode-division-multiplexing systems[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2802-2805.
- [154] Jia H, Zhang L, Ding J F, et al. Microring modulator matrix integrated with mode multiplexer and demultiplexer for on-chip optical interconnect[J]. *Optics Express*, 2017, 25(1): 422-430.

约稿专家简介:



戴道铎(1979—), 博士, 教授/博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者(2017年)、美国光学学会会士(2021年)。2000年毕业于浙江大学光电信息工程学系获学士学位, 同年免试直接攻读博士学位, 2004年初赴瑞典皇家工学院学习, 并于2005年6月获博士学位。现为浙江大学光电科学与工程学院院长、教育部光子学与技术国际合作联合实验室主任、Springer Nature出版的SCI收录期刊*Optical and Quantum Electronics*的主编。主要从事硅基光电子器件及集成研究, 主持了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重大研究计划集成项目等, 在*Nature*、*Nature Communications*、*Light: Science & Applications*、*Proceedings of the IEEE*、*Laser & Photonics Reviews*、*Optica*等光学领域著名国际期刊发表论文260余篇, 获授权国家发明专利30余项。入选历年爱思唯尔“中国高被引学者榜单”, 获浙江省自然科学奖一等奖、中国光学学会光学科技奖一等奖、王大珩光学奖等。E-mail: dxdai@zju.edu.cn。