

智能化可重构硅光集成器件及芯片应用研究

Applications of Intelligent Reconfigurable Silicon Photonic Devices and Circuits



谢意维 /XIE Yiwei, 张涛 /ZHANG Tao, 戴道铨 /DAI Daoxian

(浙江大学, 浙江 杭州 310058)
(Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

摘要: 可重构硅光集成器件和芯片是实现智能化光通信系统的关键技术, 其小尺寸、低能耗、低成本、高灵活性等特性为新一代光通信等应用带来了新的发展机遇。总结和讨论了一系列新型热可重构硅光集成器件及芯片, 包括可调谐滤波器、光开关代表性功能器件。这些器件及芯片具有设计便捷、工艺简单、兼容等突出优点, 被广泛应用于光互连、量子光学和微波光子学等。

关键词: 硅; 可重构; 热光效应; 光子集成芯片

Abstract: Reconfigurable silicon photonic devices and chips are key technologies for intelligent optical communication systems. The small size, low energy consumption, low cost, and high flexibility bring new development opportunities for new-generation optical communication applications. We have reviewed and discussed a series of novel thermally-reconfigurable silicon photonic integrated devices and circuits, including reconfigurable optical filter and optical switches, featuring the advantages of easy design and fabrication, which have been widely applied in optical interconnects, quantum photonics and microwave photonics.

Keywords: silicon; reconfigurable; thermal-optic effect; photonic integrated circuit

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200410.1438.011.html>

网络出版日期: 2020-04-10

收稿日期: 2020-02-19

在过去几十年中, 硅光子学以其互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺兼容和超高集成密度等突出优点得到了巨大发展, 在低成本大规模光子集成回路方面具有广阔的应用前景, 从而满足日新月异的高速大带宽信息传输和处理的重大需求^[1-2]。在信号传输和处理过程中, 智能化需求日益迫

切, 以更为灵活高效地实现带宽及信道资源的优化调配; 因此, 发展可重构光子集成芯片尤为重要。其中, 最具有代表性的可重构器件包括可调谐光滤波器、可调光延时线、光开关等, 这些器件已广泛应用于微波光子学^[1]、量子光学^[2]、机器学习^[3]、光通信^[4]等领域。

实现可重构光子芯片的关键在于根据需要对光波导有效折射率进行调控。常见的几种工作机制主要包括热光效应、电光效应、声光效应、磁光效应等。鉴于热光器件具有结构设计

简单和制造工艺方便等突出优点, 且硅材料具有强热光效应 ($1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$) 和高热传导能力 (约 149 W/mK)^[5], 热光效应是可重构硅光子器件最常用的物理机制之一。近 10 年来, 热可重构硅光器件及芯片以其低损耗、高消光比、紧凑封装和低功耗等特点得到广泛发展^[6]。

作为最具代表性的可重构光子器件之一, 可重构光滤波器在许多光学系统中发挥着重要作用。特别地, 利用可重构光滤波器可灵活地选择任意波长信道, 这对于波分复用 (WDM)

基金项目: 国家重点基础研究发展项目 (2018YFB2200200)、国家杰出青年基金 (61725503)、国家自然科学基金 (91950205、6191101294、11861121002、61905209)、浙江省自然科学基金 (LZ18F050001、LD19F050001)

系统及频谱分析系统尤为重要。当前,已有多种用于实现硅光滤波器的典型结构,如马赫-曾德尔干涉仪(MZI)^[7]、阵列波导光栅(AWG)^[8]、微环谐振器(MRR)^[9]、布拉格光栅滤波器^[10]等,如图1所示。通过进一步引入合适的微加热器构建移相器则可以实现可调光滤波器。

光开关是另一个最具代表性的可重构光子器件,用于实现可重构光网络/系统中全光信号路切换和开关,其中,MZI和MRR是两种最常用实现光开关的结构^[11-14]。MZI开关是一种宽带器件,可实现多个通道的开关切换,而MRR光开关是一种波长选择性开关,适合于单通道的选择性开关切换;因此,这两种开关都是WDM系统关键器件。除了WDM系统,人们还针对模分复用(MDM)系统的需求,开展了多模硅光开关及芯片研究。

在过去几年里,大规模可重构硅光集成回路(PICs)研究取得了巨大的进展,广泛应用于很多领域^[15-17],如图1所示。人们研制多种硅基热可重构光分插复用(ROADM)芯片,以满足

WDM系统、MDM系统甚以及WDM-MDM混合复用系统的重大需求^[18],同时针对微波光子学应用需求,还研制了多种可重构硅基集成电路,实现了片上多功能切换^[1]。此外,可重构硅光子学已经扩展到量子光子学领域^[19],比如,目前已研制出的全重构硅量子集成回路在单个芯片中实现了多个复杂的量子任务。

本文将对可重构硅光子学及其应用的最新进展进行总结和讨论,主要包括可调谐光滤波器、光开关及其可重构硅光集成电路等方面。

1 可重构硅光集成器件

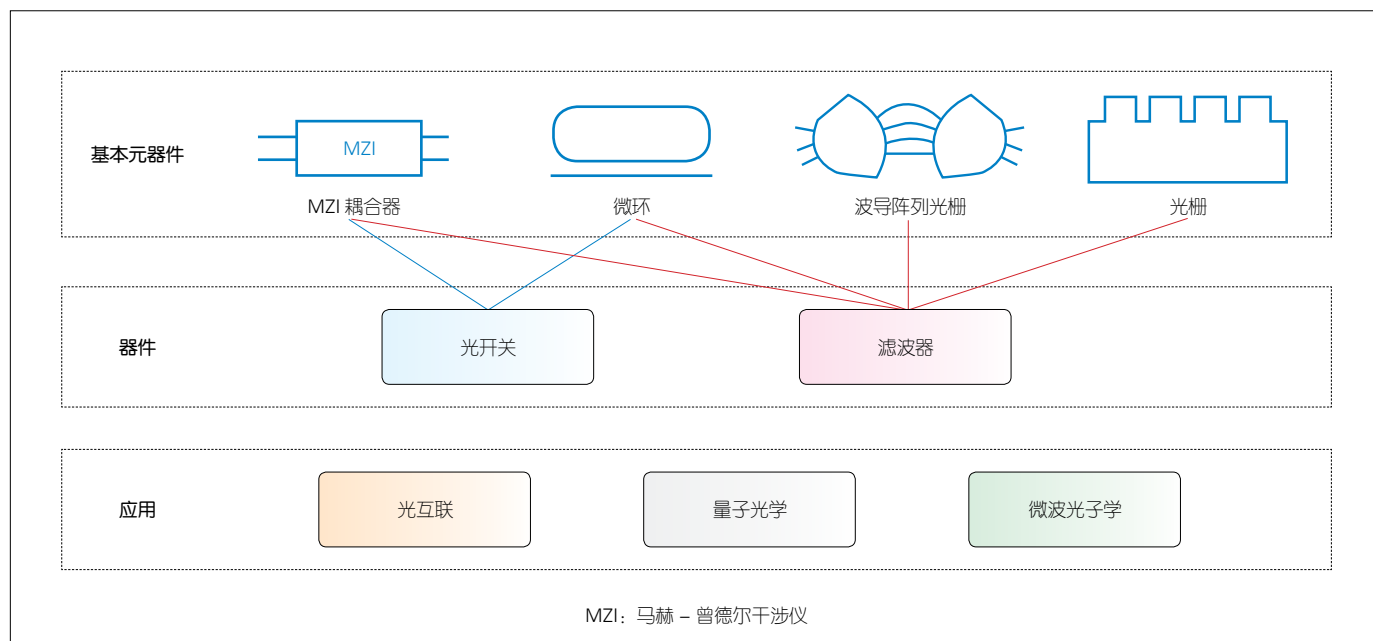
由于硅材料具有显著的热光效应和优异的热传导特性,人们发展了一系列热调可重构硅光集成器件,其中最具代表性的有可调谐滤波器和光开关两种类型的器件。

1.1 可调谐硅光滤波器

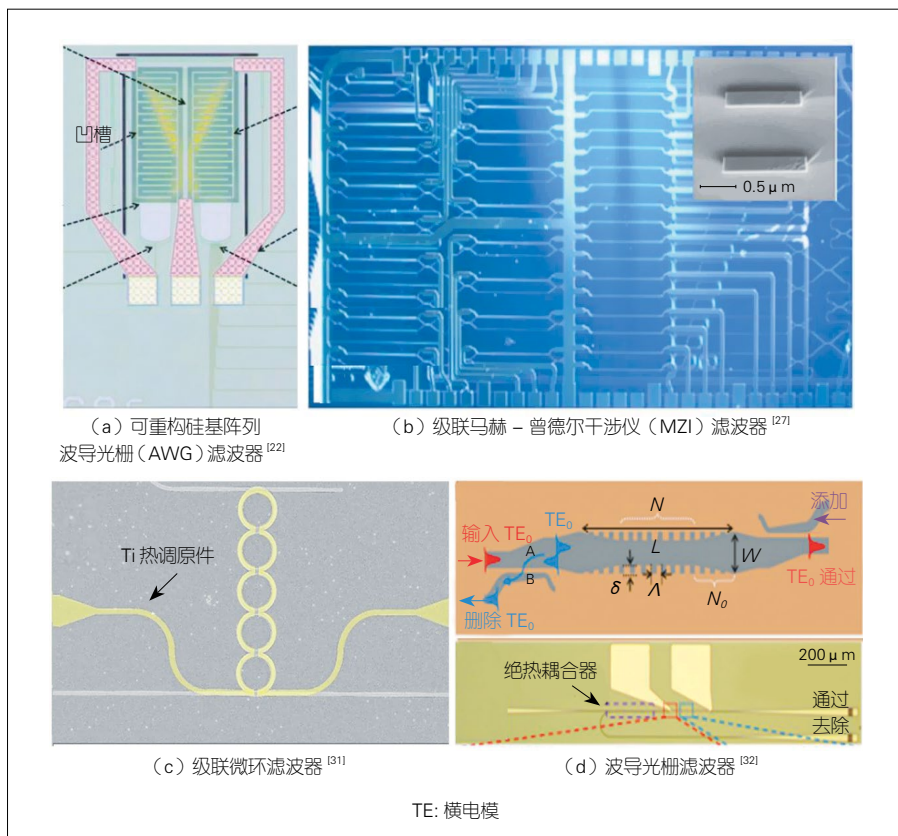
作为一种关键器件,可调谐光滤波器在WDM系统中发挥着非常重要的作用。WDM系统根据信道间距可分

为两类,即粗波分复用(CWDM)和密集波分复用(DWDM)。CWDM具有通道数少、通道间隔大(如 $\Delta\lambda_{ch}=20\text{ nm}$)的特点,对器件温度不敏感性要求较低,广泛应用于O波段数据中心和无源光网络等系统;相比之下,DWDM通道间隔窄(如 $\Delta\lambda_{ch}=0.1、0.2、0.4$ 和 0.8 nm)、通道数多(如40、80或160),通常应用在C波段。为满足不同需求,人们已研制了一系列不同结构的光滤波器,主要包括AWG、MZI、MRR和Bragg光栅等类型。

AWG由于其独特的几何结构,能实现信号傅里叶变换,因而在WDM和正交频分复用(OFDM)系统中都得到了广泛的应用,并实现了可调谐。通过AWG各条阵列波导上引入一个调节元件可精细调控AWG频谱响应,如实现Nyquist响应^[20]、中心波长可调谐滤波^[21]等。值得注意的是,常规AWG尺寸较大,其功耗通常较高。为此,人们研制了更小尺寸的紧凑型8通道硅AWG^[22],如图2(a)所示,并在功耗为1.3 W时实现了600 GHz调谐范围。为进一步减小器件尺寸及功



▲图1 集成芯片基本元器件及其功能和应用



▲图2 不同结构的光滤波器示意图

耗,交叉自由传输区域(FPRs)^[23]和反射光栅等新型AWG设计^[24]被广泛采用。

对于MZI而言,单级结构产生正弦型谱响应,而多级结构可实现平顶谱响应,具有制作简单、尺寸小、易调控等优点。此前,人们采用级联MZI结构并在各个MZI上引入热调元件实现了具有平坦响应的 1×8 WDM滤波器^[25]。为了进一步优化滤波器滚降因子,人们进一步将级联MZI和延迟线相结合构建了平顶Nyquist-DWDM滤波器^[26]。为增加器件灵活性,文献[27]的作者研制了一种具有31个调谐元件的MZI滤波器,其结构图如图2(b)所示。该器件由MZI和时延线组合,且每个MZI都具有一个调谐元件以调控输入信号振幅,各个延迟线都具有一个调谐元件以调控信号相位,热调元件功耗为 $0.23 \pi/W$,可重

构实现不同的滤波器响应。

MRR是另一个典型的光滤波器结构,具有结构简单、尺寸小、可扩展性好等优点。对于MRR,可通过调控其耦合系数及相位来实现带宽及谐振波长的调谐。基于常规单微环结构,人们通过加热整个微环结构实现了热调为 0.8 mW/GHz 的滤波器^[28],而通过在波导上方引入微热元件的方式可实现热调谐效率达 1.44 mW/GHz 的滤波器^[29]。进一步地通过引入悬空结构则可以将其热调谐效率提升至 4.79 nm/mW ^[30]。为获得平顶型频谱响应,人们往往采用多级级联结构,如图2(c)所示^[31],通过引入微加热电极,可实现其中心波长调谐,其热调谐效率为 $0.1 \sim 0.17 \text{ nm/mW}$ 。

Bragg光栅也是实现光滤波器的常用结构,其特点是可突破自由频谱范围的局限;但传统布拉格光栅滤波

器通常只有输入/反射、直通等两个端口^[10],往往需要额外的片外环行器,这使得器件非常复杂,因而其应用受限。最近,人们通过引入光栅辅助的反方向耦合器实现了具有四端口光学滤波器,如图2(d)所示^[32]。通过级联实现的多通道大带宽滤波器,可用于O波段CWDM系统,为光纤到户(FTTH)系统提供有效的方案。在此结构中,通过进一步引入热调谐单元也可实现可调谐光滤波器^[32],其调节效率可达 0.16 nm/mW 。

1.2 硅光开关

光开关在高灵活性可重构光系统中扮演至关重要的作用,例如,光开关是光交叉连接和光上传/下载系统的核心器件,它使得光网络/系统中全光信号路由和交换成为可能。在各种实际应用中,人们希望能够实现低损耗、宽带宽、高消光比、偏振不敏感的高性能光开关。实现光开关有两种常用基本结构:一种是基于MZI的宽带光开关,另一种是基于MRR的波长选择光开关。

对于MZI光开关,当两个干涉臂之间相位差切换为 0 和 π 时,则可切换成交叉状态和直通状态。近年来,人们研制了多种大带宽、高消光比MZI光开关。其中,采用弯曲定向耦合器成功研制的带宽高达 140 nm 的新型MZI光开关^[33],如图3(a)所示,是目前最大带宽MZI光开关。同时,MZI光开关偏振敏感性问题也受到广泛关注。2018年,人们成功研制一种偏振不敏感MZI光开关,在整个C波段范围内横磁模(TM)和横电模(TE)偏振的消光比达 20 dB ^[34]。此外,利用日益成熟的硅光技术,人们基于高性能MZI光开关单元也实现了较大规模 $N \times N$ 光开关阵列及其应用^[35]。

对于MRR光开关,其原理是:

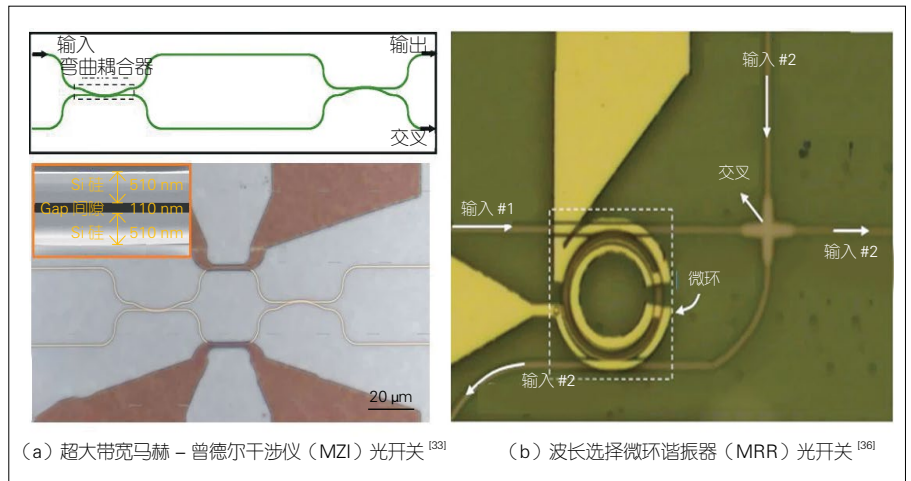
在微环上引入调节元件，通过加热等方式调谐其谐振波长，并利用其波长选择性实现对给定波长通道进行光路切换，如图 3 (b) 所示。进一步地，这种开关可通过级联等方式实现更多波长通道的切换，具有尺寸小、功耗低、结构简单等优点^[36]；因而特别适合于 WDM 系统中相应波长信道的上传 / 下载，具有巨大应用潜力，受到广泛关注。

2 可重构硅光集成回路及其应用

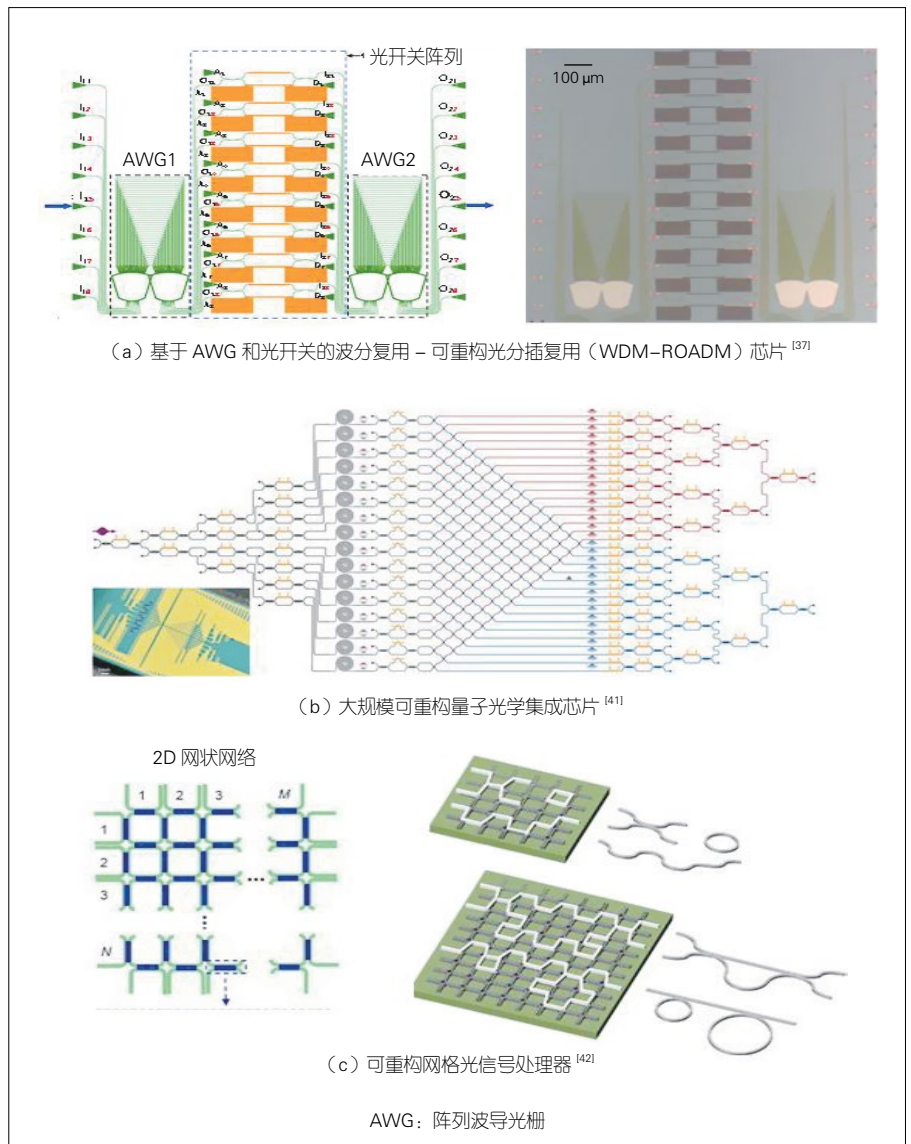
近年来，为提高系统稳定性、降低系统管理复杂度及成本，人们对实现网络节点上全光数据的路由 / 交换日益迫切，大力发展了各种结构可重构硅光集成回路。

ROADM 芯片是其重要代表之一，它通常由多通道复用器 / 解复用器和光开关阵列组成，近年来取得系列重要进展。2016 年，人们针对 WDM 系统应用需求研制了一个由 2 个 8×8 AWG 和 8 个 MZI 光开关单片集成的 ROADM 芯片^[37]，其结构如图 4 (a) 所示，该 ROADM 芯片可实现任意波长通道的上传和下载。此外，MRR 也常被用于 ROADM 的研制。为了降低 MRR 谐振波长精确对准的难度，研究者采用多个 MRR 级联实现平顶滤波效果^[38]。同时，人们将 MZI 和多通道模式复用器的单片集成也成功研制了用于 MDM 系统的 ROADM 芯片，通过 2×2 热光开关可将不同模式通道灵活地上传或下载^[39]。随着传输容量需求的进一步增长，混合复用技术成为一种新兴技术，为此人们研制了多种面向 WDM-MDM 混合复用系统的新型 ROADM 芯片^[40]。

硅光技术也被逐渐应用到量子光学领域，用于实现片上量子态的产生、操纵和测量等功能，为实现量子信息处理、量子计算和量子通信提供了重要基础。2014 年，人们成功研制了可



▲图 3 两种常用光开关结构



▲图 4 不同结构的可重构硅光集成回路示意图

重构硅基量子光集成芯片^[41]，通过四波混频实现了片上量子干涉现象。随着技术的发展，2018年人们成功研制了 15×15 可重构偏振纠缠系统，如图4(b)所示，该芯片包含了550个光学元件、100个可编程相移器等。未来可进一步研制实现多个复杂量子任务的全重构硅光量子回路。

此外，可重构硅光集成芯片还被广泛应用于微波光子学，特别是利用其可重构特性，实现多功能切换。2015年，人们提出了一种可编程网格光信号处理器，其结构如图4(c)所示，该器件可实现不同功能的射频(RF)滤波器^[42]。之后，研究者提出一款电控可编程芯片，可实施一系列的功能，且该芯片集成有源和无源器件，为全集成可编程芯片提供了可行的方案^[43]。2018年，人们又提出了另一种基于六边形MZI网格光处理芯片，可实现20多种不同功能，比如环形谐振腔、单输入输出有限响应滤波器、耦合谐振腔波导等^[44]。未来的研究将进一步降低器件损耗和能耗，实现更大规模的可重构硅光集成芯片。

3 结束语

本文中，我们讨论了可重构硅光子学及其应用的最新进展，包括可调谐光滤波器、光开关及其可重构硅光集成回路。对于光滤波器，主要有AWGs、MZIs、MRRs和Bragg光栅等器件结构，通过加热相移器均可方便地实现热调谐。对于光开关，MZIs和MRRs是两种最常用的结构。其中，MZI光开关适用于WDM系统中同时切换多个信道的宽带操作，而通过弯曲定向耦合器等方式可获得约140 nm超大带宽。当级联多个MZI光开关以实现大规模 $N \times N$ 光开关阵列时，MZI干涉臂随机相位误差使得测量非常复杂；因此改进结构设计和制造精度以

减小随机相位误差显得尤为重要。而MRR光开关具有波长选择性，通过改变调谐波长来切换任意给定的波长通道。为了获得高消光比并降低对波长控制的敏感度，可将MRR光谱响应设计成方形。未来可考虑开发一种新型MRR光开关，通过引入可调控光衰减而无需波长偏移，由此降低相邻信道串扰。

基于这些可重构光器件及其他无源器件，人们已经研制了多种大规模硅基可重构光子集成芯片并应用于许多领域，包括应用于WDM系统、MDM系统以及WDM-MDM混合系统的硅基ROADM芯片。可重构硅光子集成芯片也被应用于量子光学领域，人们已成功研制可编程硅基量子芯片并实现了片上多个复杂量子任务。此外，可重构硅基光子集成芯片还应用于微波光子学领域，用于实现多功能切换。

总而言之，硅光技术的发展为智能化光通信等更多领域应用打开了大门。为了更好地满足未来需求，需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突破，从而真正推进大规模硅光集成回路的发展。

参考文献

- [1] CAMPANY J, GASULLA I, PEREZ D. Micro-wave Photonics: The Programmable Processor[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 6–8. DOI: 10.1038/nphoton.2015.254
- [2] BONNEAU D, SILVERSTONE J W, THOMPSON M G. *Silicon Quantum Photonics*[M]// *Topics in Applied Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016: 41–82. DOI: 10.1007/978-3-642-10503-6_2
- [3] SHEN Y, HARRIS N C, SKIRLO S, et al. Deep Learning with Coherent Nanophotonic Circuits[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(7): 441. DOI: 10.1038/nphoton.2017.93
- [4] XIE Y W, GENG Z H, KONG D M, et al. Selectable-FSR 10-GHz Granularity WDM Superchannel Filter in a Reconfigurable Photonic Integrated Circuit[J]. *Journal of Light-*

- wave Technology*, 2018, 36(13): 2619–2626. DOI: 10.1109/jlt.2018.2819687
- [5] SONG J F, FANG Q, TAO S H, et al. Fast and Low Power Michelson Interferometer Thermo-Optical Switch on SOI[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15304–15311. DOI: 10.1364/oe.16.015304
- [6] CHEN S T, SHI Y C, HE S L, et al. Low-Loss and Broadband 2×2 Silicon Thermo-Optic Mach-Zehnder Switch with Bent Directional Couplers[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 836. DOI: 10.1364/ol.41.000836
- [7] HORST F, GREEN W M J, ASSEFA S, et al. Cascaded Mach-Zehnder Wavelength Filters in Silicon Photonics for Low Loss and Flat Pass-Band WDM (De-)Multiplexing[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11652. DOI: 10.1364/oe.21.011652
- [8] LOWERY A J, XIE Y W, ZHU C. Systems Performance Comparison of Three All-Optical Generation Schemes for Quasi-Nyquist WDM[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21706–21718. DOI: 10.1364/oe.23.021706
- [9] DONG P, FENG N N, FENG D Z, et al. GHz-Bandwidth Optical Filters Based on High-Order Silicon Ring Resonators[J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 23784–23789. DOI: 10.1364/oe.18.023784
- [10] NAGHDI B, CHEN L R. Silicon Photonic Contradirectional Couplers Using Subwavelength Grating Waveguides[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23429–23438. DOI: 10.1364/oe.24.023429
- [11] VLASOV Y, GREEN W M J, XIA F N. High-Throughput Silicon Nanophotonic Wavelength-Insensitive Switch for On-Chip Optical Networks[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 242–246. DOI: 10.1038/nphoton.2008.31
- [12] VAN CAMPENHOUT J, GREEN W M, ASSEFA S, et al. Low-Power, 2×2 Silicon Electro-Optic Switch with 110-nm Bandwidth for Broadband Reconfigurable Optical Networks[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24020–24029. DOI: 10.1364/oe.17.024020
- [13] CHEN L, CHEN Y K. Compact, Low-Loss and Low-Power 8×8 Broadband Silicon Optical Switch[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18977–18985. DOI: 10.1364/oe.20.018977
- [14] CALO G, D'ORAZIO A, PETRUZZELLI V. Broadband Mach-Zehnder Switch for Photonic Networks on Chip[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(7): 944–952. DOI: 10.1109/jlt.2012.2184739
- [15] Editorial. Birth of the Programmable Optical Chip[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 1. DOI: 10.1038/nphoton.2015.265
- [16] PÉREZ D, GASULLA I, CAMPANY J, et al. Reconfigurable Lattice Mesh Designs for Programmable Photonic Processors[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12093–12106. DOI: 10.1364/OE.24.012093
- [17] CAMPANY J, GASULLA I, PEREZ D. Micro-wave Photonics: The Programmable Processor[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 6–8. DOI: 10.1038/nphoton.2015.254
- [18] GRIECO A, PORTER G, FAINMAN Y. Integrated Space-Division Multiplexer for Application to Data Center Networks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(6): 1–6. DOI: 10.1109/jstqe.2015.2492361
- [19] WANG J W, BONNEAU D, VILLA M, et al. Chip-to-Chip Quantum Photonic Intercon-

- nect by Path-Polarization Interconversion[J]. Optica, 2016, 3(4): 407-413. DOI:10.1364/optica.3.000407
- [20] LOWERY A J, XIE Y W, ZHU C. Systems Performance Comparison of Three All-Optical Generation Schemes for Quasi-Nyquist WDM[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 21706-21718. DOI:10.1364/oe.23.021706
- [21] DIECKROGER J, MARZ R, CLEMENS P C, et al. Thermo-Optically Tunable Optical Phased Array in SiO-Si[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(2): 248-250. DOI:10.1109/68.740719
- [22] YANG Y, HU X N, SONG J F, et al. Thermo-Optically Tunable Silicon AWG with above 600 GHz Channel Tunability[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(22): 2351-2354. DOI:10.1109/lpt.2015.2464073
- [23] DAI D X, HE S L. Ultrasmall Overlapped Arrayed-Waveguide Grating Based on Si Nanowire Waveguides for Dense Wavelength Division Demultiplexing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6): 1301-1305. DOI:10.1109/jstqe.2006.879583
- [24] 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. DOI:10.1364/ol.35.002594
- [25] HORST F, GREEN W M J, ASSEFA S, et al. Cascaded Mach-Zehnder Wavelength Filters in Silicon Photonics for Low Loss and Flat Pass-Band WDM (de-)Multiplexing[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11652-11658. DOI:10.1364/oe.21.011652
- [26] GOH T, ITOH M, YAMAZAKI H, et al. Optical Nyquist-Filtering Multi/Demultiplexer with PLC for 1-Tb/s Class Super-Channel Transceiver[C]//Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, California, Washington, D.C.: OSA, 2015. DOI:10.1364/ofc.2015.tu3a.5
- [27] XIE Y W, ZHUANG L M, LOWERY A J. Picosecond Optical Pulse Processing Using a Terahertz-Bandwidth Reconfigurable Photonic Integrated Circuit[J]. Nanophotonics, 2018, 7(5): 837-852. DOI:10.1515/nanoph-2017-0113
- [28] NAWROCKA M S, LIU T, WANG X, et al. Tunable Silicon Microring Resonator with Wide Free Spectral Range[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(7): 071110. DOI:10.1063/1.2337162
- [29] DONG P, FENG N N, FENG D Z, et al. GHz-Bandwidth Optical Filters Based on High-Order Silicon Ring Resonators[J]. Optics Express, 2010, 18(23): 23784-23789. DOI:10.1364/oe.18.023784
- [30] DONG P, QIAN W, LIANG H, et al. Thermally Tunable Silicon Racetrack Resonators with Ultralow Tuning Power[J]. Optics Express, 2010, 18(19): 20298-20304. DOI:10.1364/oe.18.020298
- [31] 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. DOI:10.1364/ol.39.006304
- [32] LIU D J, WU H, DAI D X. Silicon Multimode Waveguide Grating Filter at 2 μ m[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2217-2222. DOI:10.1109/jlt.2019.2900439
- [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. DOI:10.1364/oe.27.000416
- [34] WANG S P, DAI D X. Polarization-Insensitive 2 \times 2 Thermo-Optic Mach-Zehnder Switch on Silicon[J]. Optics Letters, 2018, 43(11): 2531-2534. DOI:10.1364/ol.43.002531
- [35] PRITI R B, LIBOIRON-LADOUCEUR O. A Broadband Rearrangable Non-Blocking MZI-Based Thermo-Optic O-Band Switch in Silicon-on-Insulator[C]//Advanced Photonics 2017 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, PS), New Orleans, Louisiana, Washington, D.C.: OSA, 2017. DOI:10.1364/ps.2017.pm4d.2
- [36] 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. DOI:10.1364/ol.42.002802
- [37] CHEN S T, SHI Y C, HE S L, et al. Compact Eight-Channel Thermally Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers on Silicon[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(17): 1874-1877. DOI:10.1109/lpt.2016.2574459
- [38] XIA F N, ROOKS M, SEKARIC L, et al. Ultra-Compact High Order Ring Resonator Filters Using Submicron Silicon Photonic Wires for On-Chip Optical Interconnects[J]. Optics Express, 2007, 15(19): 11934-11941. DOI:10.1364/oe.15.011934
- [39] WANG S P, WU H, TSANG H K, et al. Monolithically Integrated Reconfigurable Add-Drop Multiplexer for Mode-Division-Multiplexing Systems[J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5298-5301. DOI:10.1364/ol.41.005298
- [40] 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. DOI:10.1002/lpor.201400446
- [41] WANG J W, PAESANI S, DING Y H, et al. Multidimensional Quantum Entanglement With Large-Scale Integrated Optics[J]. Science, 2018, 360(6386): 285-291. DOI:10.1126/science.aar7053
- [42] ZHUANG L M, ROELOFFZEN C G H, HOEK-MAN M, et al. Programmable Photonic Signal Processor Chip for Radiofrequency Applications[J]. Optics, 2015, 2(10): 854-859. DOI:10.1364/optica.2.000854
- [43] LIU W L, LI M, GUZZON R S, et al. A Fully Reconfigurable Photonic Integrated Signal Processor[J]. Nature Photonics, 2016, 10(3): 190-195. DOI:10.1038/nphoton.2015.281
- [44] PEREZ D, GASULLA I, CRUDGINGTON L, et al. Multipurpose Silicon Photonics Signal Processor Core[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 636. DOI: 10.1038/s41467-017-00714-1

作者简介



谢意维，浙江大学讲师；主要研究领域为硅基集成芯片及应用；先后主持和参加国家自然科学基金青年基金等项目；已发表SCI期刊论文20余篇。



张涛，浙江大学在读本科生；主要研究方向为硅基集成芯片；曾获得浙江省创新训练计划优秀奖。



戴道钲，浙江大学求是特聘教授、国家青年科学基金获得者；主要研究领域为硅基纳米光子器件与集成；先后主持国家重点研发计划项目等30余项；在《Nature》《Nature Communications》《Light: Science & Applications》《Proceedings of the IEEE》等期刊已发表SCI论文200余篇，Google Scholar引用9000余次。