

硅光子中波分复用技术研究

安俊明 张家顺 王玥 王亮亮 潘盼 齐影

中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083

摘要 介绍了硅光子互连中4种波分复用器及相关单片集成发射接收芯片,其中硅纳米线阵列波导光栅及刻蚀衍射光栅波分复用器单个芯片就可以成倍扩展通道数,非常适合大通道数密集波分复用,马赫-曾德尔结构及微环谐振型波分复用器芯片通道数增大时需要多个单元级联,波长准确性及间隔不易控制,比较适合通道数少的芯片应用。同时,给出了自主设计和制备的硅纳米线阵列波导光栅和刻蚀衍射光栅,通过采用阵列波导展宽方法,有效抑制了阵列波导的串扰,实现串扰小于-15 dB;通过在刻蚀衍射光栅反射面引入二维光子晶体反射镜,降低了刻蚀衍射光栅的反射损耗,损耗比普通刻蚀衍射光栅减小了3 dB。

关键词 光学器件;集成光学;硅光子;波分复用;阵列波导光栅;刻蚀衍射光栅;微环谐振器;马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.110006

Study on Wavelength Division Multiplexer for Silicon Photonics

An Junming Zhang Jiashun Wang Yue Wang Liangliang Pan Pan Qi Ying

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract Four kinds of wavelength division multiplexer in silicon photonics are introduced, the silicon nanowire arrayed waveguide grating and the etched diffraction grating can increase output channels easily, which fits to high count dense wavelength division multiplexer application; multi-count Mach-Zehnder inteferometer (MZI) and micro-ring wavelength division multiplexer need to be cascaded, but they can not control their wavelength and channel space easily, which fits to low count application. Meanwhile, the silicon nanowire arrayed waveguide grating and the etched diffraction grating are designed and fabricated. The crosstalk of the arrayed waveguide grating by widening the arrayed waveguide width is less than -15 dB, and the insertion loss is reduced by 3 dB using a 2D photonic crystal mirror. Besides, the related monolithic silicon photonic chips are also shown.

Key words optical devices; integrated optics; silicon photonics; wavelength division multiplexer; arrayed waveguide grating; etched diffraction grating; micro-ring; Mach-Zehnder interferomter

OCIS codes 230.3120; 230.7370; 250.3140

1 引言

伴随智能手机的崛起及社交网络等的普及,通信业务呈现爆炸式增长。从超过1000 km的长途主干网到城域网,从光接入网到局域网/存储网络、数据中心,从设备级的背板互连到板卡级的芯片间互连,甚至芯片内部互连,都在向超宽带、集成化、低功耗的光互连方向发展。能将远至上千公里,近到几毫米的光互连统一到同一个技术平台的,就是炙手可热的硅基绝缘(SOI)CMOS硅光子技术。硅基光互连涉及激光源、光调制、光传输、光分波/合波、光接收等关键技术,除激光源需要键合III-V激光器外,通过充分利用硅的等离子色散效应、Si上外延Ge等技术,被认为在硅上并不擅长的光调制和光接收在CMOS工艺中均得到突破和

收稿日期: 2014-04-02; 收到修改稿日期: 2014-06-04; 网络出版日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61274047,61307034)、国家863计划(2011AA010303,2013AA031101)、集成光电子学国家重点联合实验室自主研究课题。

作者简介: 安俊明(1969—),男,博士,研究员,主要从事硅基、InP基光波导及集成器件等方面的研究。

E-mail: junming@semi.ac.cn

验证,单波长信号光的调制及接收处理能力达到 40 Gb/s^[1-2]。同时,SOI 基片作为波导芯层的硅与埋氧层 SiO₂ 之间的折射率差高达 40%,可以在波导中实现强光学限制,单模硅波导只有几百纳米,称之为硅纳米线波导,波导弯曲半径为 10 μm 左右,硅纳米线传输、光分波/合波芯片有效面积不到 1 mm²,提高了器件的集成度。

硅光子研究报道层出不穷,过去 10 年间,硅光子学吸引了包括 Intel、IBM 等集成电路(IC)巨头、Luxtera、Kotura 等新兴公司及新加坡微电子所、比利时 Ghent 大学、日本电信电话株式会社、LETI 实验室、美国麻省理工学院、康奈尔大学、加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校、加拿大国家研究院、英国 Surrey 大学、意大利 Trento 大学、日本东京大学等研究机构的积极参与。国内中国科学院半导体研究所、浙江大学等科研机构也开展了硅基光互连关键器件的研究^[3-5]。由美国高等研究计划署(DARPA)资助,由 Sun 微系统物理科学中心、Luxtera 和 Kotura 公司联合承担的超高性能纳米光子片内通信项目(UNIC)^[6],目的是解决紧凑超级计算系统高集成度、低功率、大带宽及低延迟光互连,在 90 nm CMOS 工艺平台上取得了 320 fJ/bit 混合键合光发射和 690 fJ/bit 混合键合光接收,发射端和接收端功耗分别为 1.6 mW 和 3.45 mW,实现了 5 Gb/s 的光传输。由欧盟资助的 850 万欧元 CMOS 平台光电功能集成(HELIOS)项目(<http://www.helios-project.eu/>),主要致力于 CMOS 工艺硅光子领域的各个独立部件的开发,包括光源(硅基和硅上的 III-V 族器件),高速调制器和探测器等,由 LETI 实验室牵头,项目包括了 20 个成员,以保持欧洲光子芯片设计和集成领域的领先实力。而英国投资 600 万英镑(约 995 万美元),在英国南安普敦大学带动下,寻找一种廉价地大量生产硅光子芯片的方法,这种硅光子芯片可以用很小的功率高速处理大量的数据,推动下一代低成本光信号数据传输电路板的研究。

目前,CMOS 工艺下的硅光子不再是停留在研发的层面,Intel 发布采用硅光子技术的有源光缆(AOC),现在从事硅光子技术投资与开发的约有 35 家机构,主要应用于有源光缆、100G 以太网和多并发链接的转换线缆模块,Global Information 预测,2016 年 AOC 的销量将达到 78.6 万根,销售额将扩大到 1.75 亿美元^[7],而芯片间及片内光互连的应用将在 2020 年前后实现实用化。

硅光子芯片的优势是集成多个波长的发射和接收,这就需要在发射端合波和接收端分波,波分复用和解复用是必不可少的无源部分,本文对硅光子中阵列波导光栅(AWG)^[8-10]、刻蚀衍射光栅(EDG)、微环谐振器和级联马赫-曾德尔干涉仪(MZI)4 种波分复用器给予介绍,并比较它们之间的差异。同时给出了自主设计制备的硅纳米线 AWG 及 EDG 的实验结果。最后介绍了目前基于波分复用硅基 CMOS 工艺制备的多波长发射及接收芯片发展情况。

2 波分复用器芯片

2.1 硅纳米线 AWG 波分复用

硅纳米线 AWG 弯曲半径最小可达 5 μm,因此弯曲部分可紧凑排列,芯片尺寸极小。2005 年,日本横滨国立大学率先报道了尺寸为 60 μm×70 μm,通道间隔为 11 nm 的硅纳米线 AWG,器件片上插损小于 1 dB,串扰为 -13 dB^[11]。此后,比利时 Ghent 大学制备出了 16 通道、通道间隔为 200 GHz 的硅纳米线 AWG,芯区面积为 200 μm×500 μm,插损为 -3 dB,串扰为 -15 dB~-20 dB^[12]。新加坡 A*STAR 微电子研究所制备了 32 通道的纳米线 AWG^[13],为目前报道的最大通道数。一般硅纳米线 AWG 工作在横电(TE)模式,偏振相关性大。2012 年,比利时 Ghent 大学报道了偏振分离解复用器以解决纳米线 AWG 偏振相关性问题,通过两个完全对称的 AWG 并采用二维光栅耦合,实现了 16 通道、200 GHz AWG 偏振分离解复用器,芯片尺寸为 1400 μm×850 μm,片上损耗为 2.6 dB,串扰为 21.5 dB,偏振相关波长为 0.12 nm,偏振相关损耗为 0.06 dB~2.32 dB^[14]。2013 年,Ghent 大学报道了平坦响应的 12 通道、400 GHz 硅纳米线 AWG,插入损耗、串扰和非均匀性分别为 -3.29 dB,17 dB 和 1.55 dB^[15]。

中国科学院半导体研究所自 2009 年开始 SOI 纳米线 AWG 设计及制备研究^[16-17]。图 1(a)为设计的 8 通道、200 GHz SOI 纳米线 AWG 的整体版图,同时给出了局部放大图[图 1(b)],SOI 纳米线 AWG 响应谱受阵列波导宽度波动影响极大,为了有效减小 SOI 纳米线 AWG 的串扰,采用了在阵列波导直波导局部展宽的方法,直波导展宽为 800 nm,弯曲波导部分仍为 500 nm,整个芯片尺寸为 220 μm×390 μm。通过采用适合大规模生产的深紫外曝光方法,以保证设计波导宽度的均匀性,图 2 为深紫外曝光结合电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀制备

SOI纳米线AWG部分的扫描电子显微镜(SEM)照片,为减小端面反射,在罗兰圆与输出波导界面采用浅刻蚀过渡设计,采用深紫外曝光方法消除了电子束曝光的写场拼结问题,也保证了阵列波导宽度的均匀性。

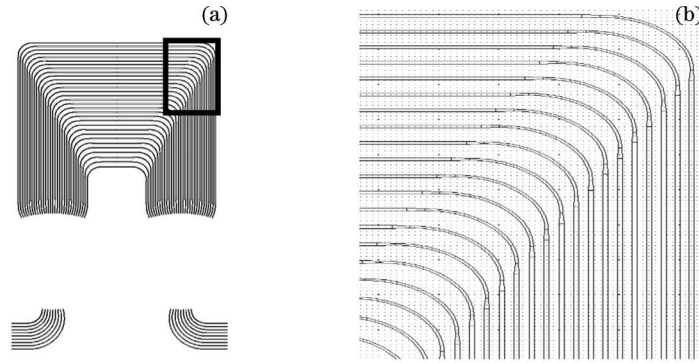


图1 直波导展宽8通道SOI纳米线AWG示意图。(a) AWG整体图;(b) AWG局部图

Fig.1 Schematic of SOI nanowire AWG with broadened 8-channel waveguide. (a) Entire region of AWG; (b) local region of AWG

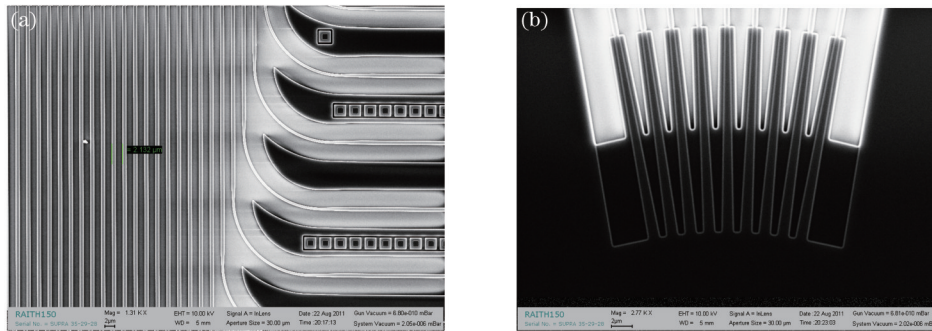


图2 SOI纳米线AWG SEM照片。(a)阵列波导局部SEM照片;(b)输出波导浅刻蚀SEM照片

Fig.2 SEM images of SOI nanowire AWG. (a) SEM image of arrayed waveguide region; (b) SEM image of shallow-etched waveguide at output region

制备的SOI纳米线AWG经过切割、端面抛光后进行输出谱测试。图3为8通道SOI纳米线AWG输出全谱,片上损耗约3 dB,串扰约-15 dB。

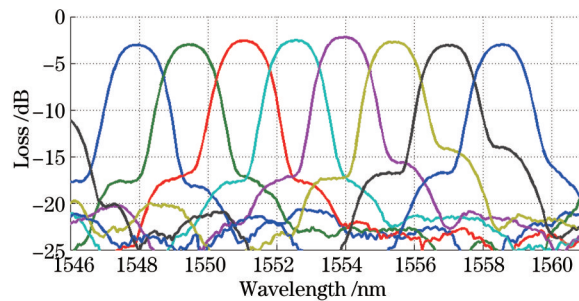


图3 8通道SOI纳米线AWG输出全谱

Fig.3 Output spectra of 8-channel nanowire AWG

2.2 硅纳米线EDG波分复用

硅纳米线EDG以刻蚀锯齿作为光栅,具有更小的尺寸,且不会由于阵列波导光栅随机误差带来较大的串扰,Intel在光收发芯片中采用了4通道EDG作为波分复用器。2012年,IBM报道了90 nm CMOS工艺10通道TE模响应的EDG作解复用器,损耗约5 dB,串扰小于-15 dB^[18]。比利时Ghent大学报道了4通道的普通EDG^[19],为减小衍射光栅反射损耗,他们引入了二阶布拉格光栅代替普通反射面的新型EDG^[20],片上损耗只有1.9 dB,串扰小于-25 dB。

实验室设计并制备了基于二维光子晶体反射镜的EDG器件,通过优化二维光子晶体占空比,形成C波

段TE模全禁带,图4是SOI光子晶体4通道EDG SEM照片,图5是基于光子晶体的EDG和普通结构EDG器件输出谱测试结果比较,其中实线为具有光子晶体反射镜的EDG传输谱,虚线为普通结构EDG传输谱,从图中可以看出具有光子晶体反射镜的EDG比传统的EDG器件损耗减小约3 dB。

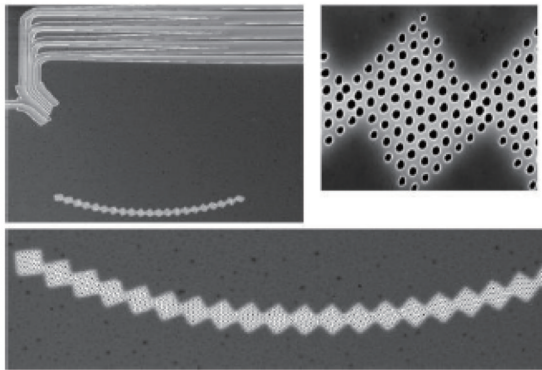


图4 4通道SOI光子晶体反射镜EDG SEM图

Fig.4 SEM image of 4-channel EDG with SOI photonic crystal mirror

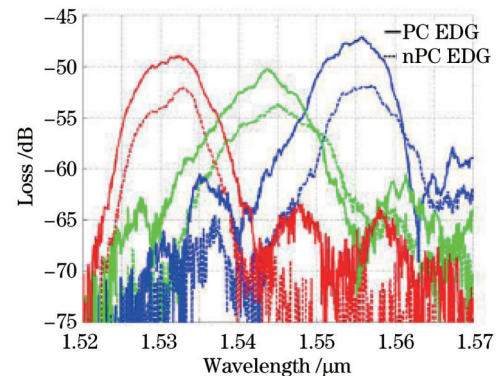


图5 光子晶体EDG器件测试谱图

Fig.5 Output spectra of EDG with photonic crystal

2.3 微环谐振波分复用器

微环谐振器通过微环内特定波长选择,可实现波长的解复用,将多个不同半径微环交联,则可实现多个波长的解复用。IBM在2010 SEMICON报道了用于片间、片上光互连的级联微环谐振器作为6个波长的波分复用器,如图6所示^[21]。新加坡A*STAR微电子研究所制备了8通道微环谐振解复用器^[22],如图7所示。但多个波长解复用需要多个不同半径的微环,受工艺影响,稳定的波长间隔较难控制,一般需要对微环热调谐,增加了额外的功耗。

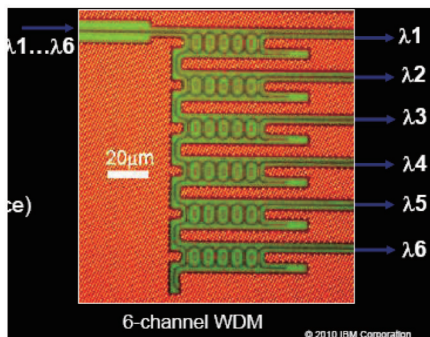


图6 IBM 6通道级联微环谐振解复用器

Fig.6 IBM 6-channel wavelength division multiplexer composed of cascade micro-rings

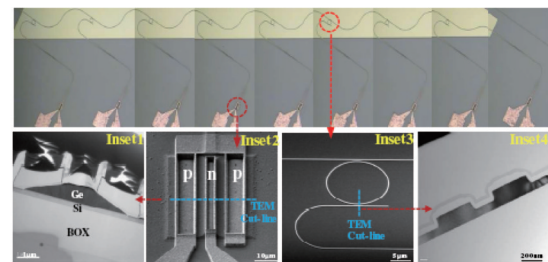


图7 A*STAR 8通道微环谐振解复用器

Fig.7 A*STAR 8-channel wavelength division multiplexer composed of micro-rings

2.4 MZI级联波分复用器

通过设计MZI臂长差,一个MZI可以实现两个波长的解复用,同时利用其波长选择周期性,一级MZI可完成两组波长的解复用功能,即 $\lambda_{1,3,5,7}$ 从一端口输出, $\lambda_{2,4,6,8}$ 从另一端口输出,再次级联不同臂长差的MZI,可

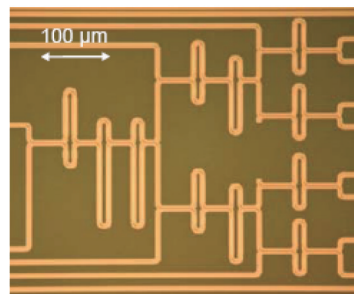


图8 IBM 4通道级联MZI波分复用器

Fig.8 IBM 4-channel wavelength division multiplexer composed of cascade MZIs

实现另一组的解复用,以此类推,通过三级级联,可实现8个波长的解复用。图8为IBM公司8波长MZI级联解复用器^[23]。通道数较多时,随着级联次数的增加,芯片尺寸会成倍增加,不适宜通道数较多的解复用。

3 波分复用器集成芯片

硅光子学取得了系列突破性成果,硅光子单元器件相继研发成功,多波长的发射、接收集成芯片相继问世。美国Luxtera公司研制出了世界上第一块在130 nm CMOS生产线上制造的硅基单片集成高速CMOS光子收发模块,采用级联MZI形式作为波分复用器,数据传输速率为 4×10 Gb/s^[24-25];2010年7月,Intel报道了4路波分复用器单片集成的 4×12.5 Gb/s发射和接收芯片,其中波分复用器采用小尺寸的4通道EDG。2013年,Intel公司在北京举行的Intel信息技术峰会上通过视频首次公开演示了面向数据中心、速度达100 Gb/s的全面集成硅光电模块。2012年,IBM报道了90 nm CMOS工艺10通道WDM刻蚀衍射光栅作解复用器、10个Ge/SOI探测器阵列的集成芯片,芯片面积为 0.96 mm^2 ,接收速率达到 10×25 Gb/s^[18]。2010年,新加坡A*STAR微电子研究所报道了系列研究成果,制备出了L波段 32×10 Gb/s AWG与Ge/Si波导探测器单片集成芯片,误码率为 10^{-11} 时接收灵敏度在 $-16 \text{ dBm} \sim -19 \text{ dBm}$ 之间^[12]。随后又报道了采用微环谐振器做解复用器的4路 4×40 Gb/s和8路 8×20 Gb/s小型化接收芯片^[22]。2013年,著名的硅基光子学公司Kotura研制出40通道EDG与Ge光电探测器阵列集成的光接收芯片,探测器的工作速率达到25 Gb/s,整个芯片实现了1 Tb/s的光接收^[26]。

4 结束语

介绍了硅光子集成中4种波分复用器。其中硅纳米线AWG及EDG单个芯片就可以成倍扩展通道数,非常适合大通道数密集波分复用,目前报道的AWG通道达到32个,且芯片尺寸不会成倍增加,响应谱波长间隔稳定性容易控制。MZI结构及微环谐振型波分复用器芯片比较适合通道数少的芯片应用,通道数增大时需要多个单元级联,波长准确性及间隔不易控制,需要额外的热控制,增加了功耗,目前报道的通道数一般低于10个通道,不适宜较多的密集波分复用。同时给出了自主设计制备的8通道硅纳米线AWG和4通道EDG实验结果。随着技术的成熟及成本的下降,单片集成硅光子芯片将会在毫米至上千公里光互连中得到广泛的应用。

参考文献

- 1 Thomson D J, Gardes F Y, Fedeli J M, *et al.*. 50 Gb/s silicon optical modulator [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(4): 234-236.
- 2 Viven L, Polzer A, Marris-Morini D, *et al.*. Zero-bias 40 Gb/s germanium waveguide photodetector on silicon [J]. Opt Express, 2012, 20(2): 1096-1101.
- 3 Li C, Xue C, Liu Z, *et al.*. Zero-bias high-responsivity and high-bandwidth top-illuminated germanium p-i-n photodetectors [J]. Chin Phys B, 2014, 23(3): 038506.
- 4 Ding J, Chen H, Yang L, *et al.*. Ultra-low-power carrier-depletion Mach-Zehnder silicon optical modulator [J]. Opt Express, 2012, 20(7): 7081-7087.
- 5 Shi Y, Fu X, Dai D. Design and fabrication of a 200 GHz Si-nanowire-based reflective arrayed-waveguide grating (de) multiplexer with optimized photonic crystal reflectors [J]. Appl Opt, 2010, 49(26): 4859-4865.
- 6 Lia G, Zhenga X, Lexaub J, *et al.*. Ultralow-power silicon photonic interconnect for high-performance computing systems [C]. SPIE, 2010, 7607: 760703.
- 7 讯石光通讯咨询网, 硅光子市场发展概况 [N/OL]. [2013-11-15] <http://www.iccsz.com/site/CN/News/2013/11/15/20131115024824726800.htm>
- 8 Han Chao, Yue Yuanbin, Zhao Shimin, *et al.*. Design and fabrication of 650 nm arrayed waveguide grating [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0323002.
韩超, 岳远斌, 赵世民, 等. 650 nm阵列波导光栅波分复用器的设计与制备[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0323002.
- 9 Wang Lei, Li Ran, Niu Xiaoyan, *et al.*. Research and fabrication of an ultraviolet curable polymeric arrayed waveguide grating with nonlinear cladding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0805002.
王雷, 李然, 牛小艳, 等. 非线性包层结构紫外固化聚合物阵列波导光栅研制[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0805002.
- 10 Zhao Jianyi, Chen Xin, Qian Kun, *et al.*. Design and fabrication of 16 channel 200 GHz InP based arrayed waveguide

- gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0605002.
- 赵建宜, 陈鑫, 钱坤, 等. InP基16通道200 GHz阵列波导光栅设计和制备[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0605002.
- 11 Sasaki K, Ohno F, Motegi A, *et al.*. Arrayed waveguide grating of 70 mm × 60 mm size based on Si photonic wire waveguides [J]. *Electron Lett*, 2005, 41(14): 801–802.
- 12 Bogaerts W, Dumon P, Van Thourhout D. Compact wavelength selective functions in silicon-on-insulator photonic wires [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2006, 12(6): 1394–1401.
- 13 Fang Q, Liow T Y, Song J F, *et al.*. WDM multi-channel silicon photonic receiver with 320 Gbps data transmission capability [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 5106–5113.
- 14 Pathak S, Vanslebrouck M, Dumon P, *et al.*. Compact SOI-based polarization diversity wavelength de-multiplexer circuit using two symmetric AWGs [J]. *Opt Express*, 2012, 20(26): B493–B500.
- 15 Pathak S, Vanslebrouck M, Dumon P, *et al.*. Optimized silicon AWG with flattened spectral response using an MMI aperture [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(1): 87–93.
- 16 Zhao L, An J, Zhang J, *et al.*. 16 channel 200 GHz arrayed waveguide grating based on Si nanowire waveguides [J]. *J Semiconductor*, 2011, 32(2): 024010.
- 17 Zhang J, An J, Zhao Z, *et al.*. Ultra compact triplexing filters based on SOI nanowire AWGs [J]. *J Semiconductor*, 2011, 32(4): 044009.
- 18 Pan H, Assefa S, Horst F, *et al.*. 250 Gbps 10-channel WDM silicon photonics receiver [C]. *OFC*, 2012.
- 19 Brouckaert J, Bogaerts S, Dumon P. Planar concave grating demultiplexer fabricated on a nanophotonic silicon-on-insulator platform [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(5): 1269–1275.
- 20 Brouckaert J, Bogaerts W, Selvaraja S. Planar concave grating demultiplexer with high reflective Bragg reflector facets [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(4): 309–311.
- 21 Green W, Assefa S, Tylyakov A, *et al.*. CMOS integrated silicon nanophotonics: enabling technology for exascale computational systems [C]. *SEMICON*, 2010.
- 22 Fang Q, Phang Y T, Tan C W, *et al.*. Multi-channel silicon photonic receiver based on ring-resonators [J]. *Opt Express*, 2010, 18(13): 13510–13515.
- 23 Horst F, Green W M J, Assefa S, *et al.*. WDM filters for silicon photonics transceivers [C]. *16th Opto-Electronics and Communication Conference*, 2011.
- 24 Pinguet T, Analui B, Balmater E, *et al.*. Monolithically integrated high-speed CMOS photonic transceivers [C]. *SPIE*, 2008, 8376: 362–364.
- 25 Pinguet T, Analui B, Masini G, *et al.*. 40 Gb/s monolithically integrated transceivers in CMOS photonics [C]. *SPIE*, 2008, 6898: 689805.
- 26 Feng D, Qian W, Liang H, *et al.*. High-speed receiver technology on the SOI platform [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2013, 19(2): 3800108