

文章编号:1004-4213(2011)08-1143-6

## 基于绝缘硅的微环谐振可调谐滤波器

李帅, 吴远大, 尹小杰, 安俊明, 李建光, 王红杰, 胡雄伟

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:**采用电子束光刻和感应耦合等离子刻蚀等工艺, 研制了一种基于绝缘硅材料的微环谐振可调谐滤波器. 滤波器微环半径为  $5\ \mu\text{m}$  左右, 波导截面尺寸为  $(350\sim 500\ \text{nm})\times 220\ \text{nm}$  不等. 测试结果表明, 波导宽度为  $450\ \text{nm}$  时器件性能最为理想, 其自由频谱宽度为  $16.8\ \text{nm}$ ,  $1.55\ \mu\text{m}$  波长附近的消光比为  $22.1\ \text{dB}$ . 通过对微环滤波器进行热光调制, 在  $21.4\ ^\circ\text{C}\sim 60\ ^\circ\text{C}$  温度范围内实现了  $4.8\ \text{nm}$  波长范围的可调谐滤波特性, 热光调谐效率达到  $0.12\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ . 研究了基于单环和双环的多通道上下载滤波器, 实验结果表明多通道滤波器的信号传输存在串扰, 主要是不同信道之间的串扰, 尤其在信号上载时, 会在相邻信道产生较大串扰.

**关键词:**绝缘硅; 微环谐振; 热光效应; 滤波器; 串扰

**中图分类号:** TN25

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114008.1143

### 0 引言

随着微纳科学技术的迅速崛起与发展, 绝缘硅 (Silicon On Insulator, SOI) 微纳光子器件及集成迅速成为国际关注的热点<sup>[1-2]</sup>. 由于 Si 和  $\text{SiO}_2$  之间折射率差很大 ( $\Delta n=2$ ), Si 波导对光场有很强的限制作用. SOI 微纳波导的弯曲半径可降到几个微米, 为光子器件的小型化和高密度集成提供了巨大的便利. 基于硅纳米线波导的环形谐振腔结构具有性能良好、结构紧凑和功能配置灵活等特点<sup>[3-4]</sup>. 采用硅纳米线波导环形谐振腔结构已经实现了多种光功能器件, 包括高速电光调制器、滤波器、波分复用器、光开关、光学缓存器等<sup>[5-10]</sup>. 硅纳米线波导环形谐振腔的这些特性使它成为实现光学大规模集成回路的理想平台. SOI 中的硅波导材料具有较高的热光系数, 便于采用热光效应进行调制<sup>[11-12]</sup>. 在环形谐振腔中, 根据使用的微环数量, 可以分为基于单个环和基于多个环的谐振腔. 单环谐振腔工艺相对简单, 但滤波谱为顶部尖锐的洛仑兹线形, 并不理想; 多环谐振腔可以改善滤波谱线, 实现谱线顶部平坦化, 但多环结构对工艺准确度要求很高、工艺难度较大<sup>[13-14]</sup>. 目前国内外关于微环谐振滤波器的研究按材料主要分为硅基器件和光子晶体器件, 其中光子晶体器件尚

处于理论研究阶段<sup>[15-17]</sup>. 在硅基器件的研究中, 研究人员主要就基于单环无交叉结构的光学下载滤波器进行了理论分析和模拟<sup>[18-19]</sup>, 并在微环的制作及调制方面做了很多探讨<sup>[20-22]</sup>, 而基于多个环、多通道的上下载滤波器研究还较少<sup>[23-24]</sup>. 本文基于国内微纳波导制备工艺研制出基于 SOI 的单环谐振滤波器, 同时制作了基于单环的五通道上下载滤波器和基于双环的两通道上下载滤波器, 分别进行测试和分析. 本文研制出小尺寸微环谐振偏振无关滤波器, 测得较好的热光特性; 提出基于双环的新型结构, 改善波导交叉串扰; 研制出基于双环的多通道滤波器, 并对比基于单环和双环的滤波器分析了多通道滤波器的串扰问题.

### 1 器件工艺

采用的 SOI 波导材料, 顶层 Si 厚度为  $220\ \text{nm}$ , 下包层  $\text{SiO}_2$  厚度为  $2\ \mu\text{m}$ . 利用中国科学院半导体研究所微纳波导工艺平台进行微环谐振滤波器的制作.

制作工艺流程如图 1, 主要包括 SOI 基片预处理、涂敷光刻胶、电子束光刻、显影、ICP 刻蚀波导芯区、去胶、PECVD 法生长波导上包层、以及高温退火和芯片的切磨抛等工艺过程.

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 (No. 2007AA03Z420) 和国家重点基础研究发展计划 (No. 2007CB613404) 资助

**第一作者:** 李帅 (1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向物理电子学可重构光插分复用器. Email: lshsemi@semi.ac.cn

**导师:** 吴远大 (1974—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光波导无源器件、硅基发光器件及光互连技术等. Email: wuyuanda@red.semi.ac.cn

**收稿日期:** 2011-03-04; **修回日期:** 2011-03-25

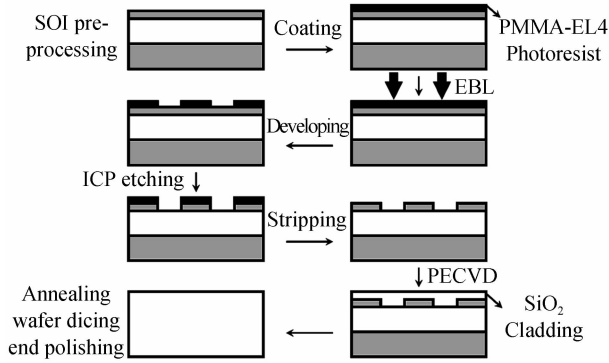


图1 微环谐振滤波器工艺流程

Fig.1 Schematic of process flow to fabricate MMR filters

## 2 器件结构

研制出的滤波器波导结构如图2,纳米线波导芯区 Si 截面宽度 450 nm,高度 220 nm,覆盖层 SiO<sub>2</sub> 厚度 750 nm,下包层 SiO<sub>2</sub> 厚度 2 μm,下包层 Si 厚度 2 μm.

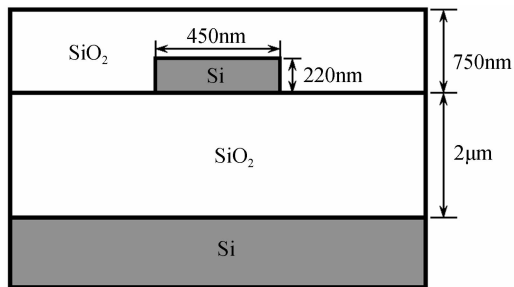


图2 纳米线波导截面结构

Fig.2 Cross section of nanowire waveguides

图3给出了不同滤波器的结构图,分别包括了单环可调谐滤波器和基于单环/双环的多通道滤波器.图3(a)是单环滤波器整体结构的 SEM 照片,包括主通道波导、下载滤波波导和一个谐振微环.图3(b)是微环谐振区的放大照片,从中可以看出,微环的半径约为 5 μm,微环与两条直波导间的间隔

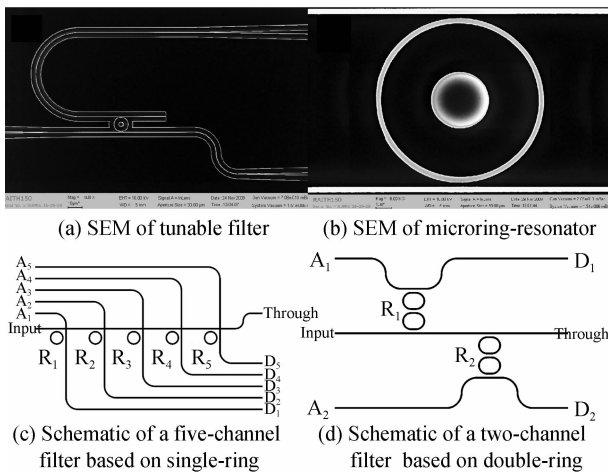


图3 谐振滤波器结构图片

Fig.3 Structures of filters

(Gap)约为 350 nm.图3(c)是基于单环的五通道滤波器,图3(d)是基于双环的两通道滤波器.

## 3 实验结果与分析

采用宽带光源、偏振控制器、拉锥保偏光纤、光谱仪等相关测试部件在安捷伦光学耦合平台上对芯片进行了 TE 偏振态下滤波特性测试.

### 3.1 波导截面尺寸为 450 nm × 22 nm,微环半径为 5 μm 的单环滤波器

测试出的滤波器归一化特征谱如图4.

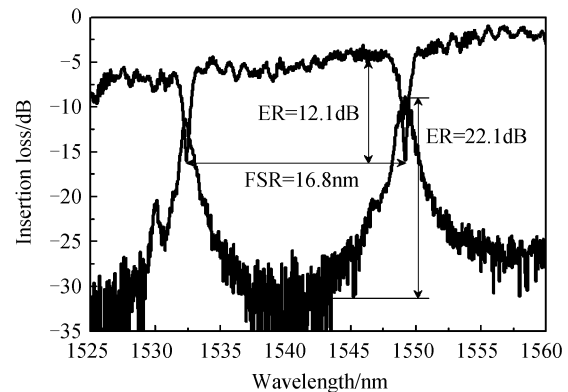


图4 微环谐振滤波器的滤波特征谱

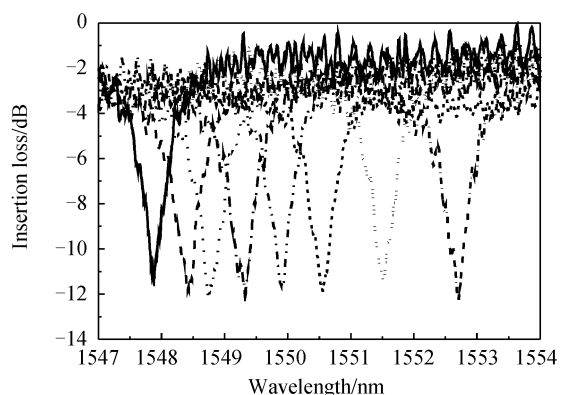
Fig.4 Wavelength response of MMR filters

从图4中可以看出,微环滤波器相邻两个谐振波长峰值分别位于 1532.1 nm 和 1548.9 nm,即其自由频谱宽度(FSR)为 16.8 nm.在 1550 nm 波长附近(峰值波长 1548.9 nm 处),直通端口和下载滤波端口的消光比分别达到了 12.1 dB 和 22.1 dB.

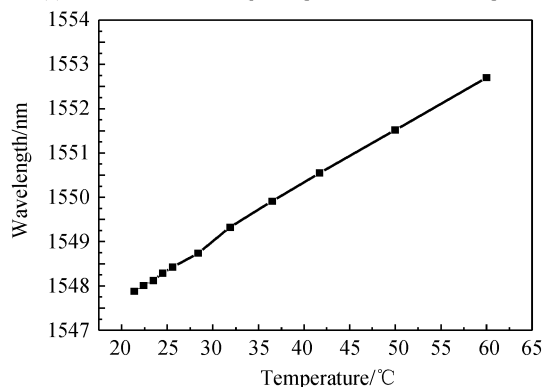
国内外目前报道的可调谐滤波器,主要基于声光调谐、F-P 干涉、布喇格光纤光栅和介质膜干涉等效应,多为分立器件,难以与其它器件集成;而基于光子晶体的可调谐滤波器目前还处于理论探索阶段.本文研究的可调谐滤波器具有小型化和可单片集成等优势,是硅基光子学中的核心部件.

基于硅纳米线波导的微环谐振器具有尺寸小、集成度高、功能丰富等优点,是构建超大规模集成光回路的最佳单元之一.但是,该类型谐振器件对工艺准确度要求很高,谐振波长对波导结构和尺度非常敏感,因此,往往需要对微环结构进行调制以获得所需谐振波长.由于硅波导材料具有良好的热光效应(热光系数约为  $1.86 \times 10^{-4} / \text{K}$ ),所以本实验拟采用对微环整体加热的方式来调整滤波器的谐振波长,同时,期望实现较大范围的可调谐滤波性能.

在实验中,我们选用微型温控装置对谐振微环结构进行动态调制,获得的波长响应特性如图5.图



(a) Normalized wavelength response at different temperatures



(b) Relationship between response peak and temperature

图 5 单环滤波器的温度特性

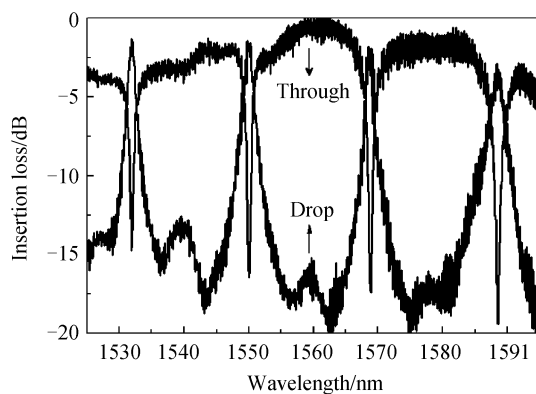
Fig. 5 Thermal character of tunable filters based on single ring

5(a)是不同温度下测试得到的滤波器在 1 550 nm 波长附近的谐振谱,从图中可以看出,当调制温度分别为 21.4 °C、22.4 °C、23.5 °C、24.5 °C、25.6 °C、28.4 °C、31.9 °C、36.5 °C、41.7 °C、50 °C 和 60 °C 时,谐振波长峰值分别位于 1 547.879 nm、1 548.011 nm、1 548.123 nm、1 548.288 nm、1 548.427 nm、1 548.742 nm、1 549.325 nm、1 549.91 nm、1 550.553 nm、1 551.518 nm 和 1 552.703 nm. 很明显,随着调制温度的升高,滤波器的谐振波长发生单调“红移”.当温度从 21.4 °C 上升到 60 °C 时,滤波器实现了 4.8 nm 带宽的可调谐滤波特性.图 5(b)是不同调制温度下谐振波长峰值的曲线图,从图中可以看出,谐振波长随温度的变化呈近似线性关系,经计算,温度每升高 1 °C,谐振波长“红移”量约为 0.12 nm.

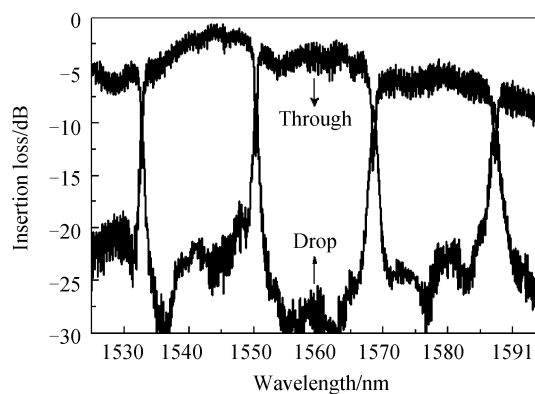
### 3.2 不同截面尺寸,基于单环/双环的多通道滤波器

实验制作了不同截面尺寸(微纳波导芯区 Si 的高度均为 220 nm)的滤波器,在基于单环的单通道滤波器中,四种尺寸(350 nm、400 nm、450 nm、500 nm)下,波导宽度为 450 nm 时滤波谱线最好.

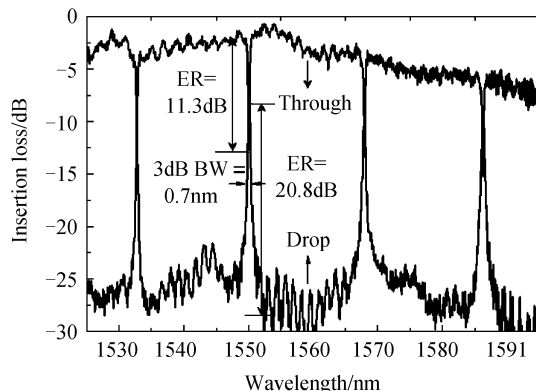
图 6(a)、(b)、(c)、(d)分别给出了波导宽度为 350 nm、400 nm、450 nm、500 nm 情况下的滤波归一化测试谱线.从四组谱线中可以看到,综合考虑谱



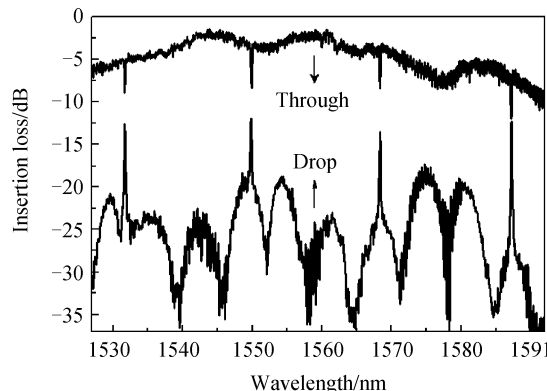
(a) Width=350nm



(b) Width=400nm



(c) Width=450nm



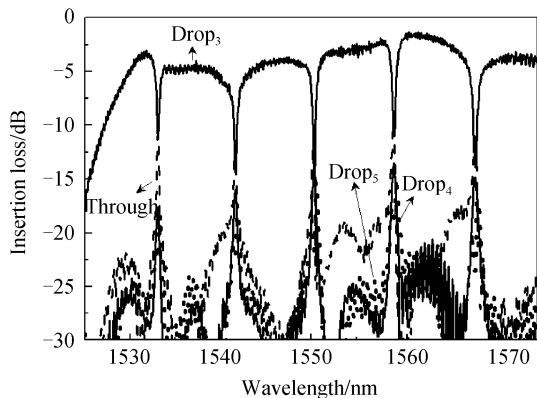
(d) Width=500nm

图 6 不同波导宽度下的滤波器归一化特征谱线

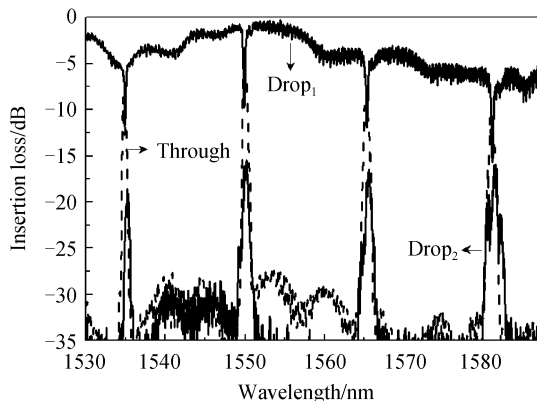
Fig. 6 Normalized wavelength spectrum of filters with different cross-section sizes

线的半高带宽和消光比等因素,在波导宽度为450 nm时,谱线的特性最为理想,其中在1 550 nm波长附近(1 550.1 nm)3 dB带宽为0.7 nm,直通端口和下载端口的消光比分别达到了11.3 dB和20.8 dB.

多通道滤波器的测试响应谱如图7.图7(a)为单环五通道滤波器的一组归一化谱线.从测试谱线可以得到,1 550 nm波长附近(1 550.3 nm),Drop3端口的直通信号消光比11.5 dB,Through端口的正常滤波下载峰半高带宽0.8 nm、消光比19.1 dB,Drop4端口的串扰下载峰消光比15.8 dB,Drop5端口的串扰下载峰消光比14.7 dB.光信号从Add3端口输入,Drop3端口得到直通信号,在相应谐振波长处,谱线出现下凹;Through端口得到正常滤波下载峰,光信号经过第三个微环谐振腔,在满足谐振条件的波长处,从Through端口输出滤波下载峰;Drop4端口得到的是串扰下载峰,由于不同信道的微环谐振腔的半径均不相同,谐振波长也就存在差异,因此经第三个微环滤波后的下载峰在经过第四个微环时,应能直通而从Through端口输出,但实际上在第四个微环处再次谐振,形成串扰下载峰;Drop5端



(a) Normalized wavelength spectrum of five-channel filter based on single-ring



(b) Normalized wavelength spectrum of two-channel filter based on double-ring

图7 多通道滤波器的串扰

Fig. 7 Crosstalk of multi-channel filters

口得到的也是串扰下载峰,经过第四个微环二次谐振后的下载峰经第五个微环处再次发生谐振,满足谐振条件的波长被滤出,形成串扰下载峰.

图7(b)为双环两通道滤波器的一组归一化谱线.从测试谱线可以得到,1 550 nm波长附近(1 549.9 nm),Drop1端口的直通信号消光比9.3 dB,Through端口的正常滤波下载峰半高带宽1.0 nm、消光比25.2 dB,Drop2端口的串扰下载峰消光比16.4 dB.光信号从Add1端口输入,Drop1端口得到直通信号,在相应谐振波长处,谱线出现下凹;Through端口得到正常滤波下载峰,光信号经过第一个微环谐振腔,在满足谐振条件的波长处,从Through端口输出滤波下载峰;Drop2端口得到串扰下载峰,经第一个微环谐振后得到的下载峰,在经过谐振条件不同的第二个微环时,出现二次谐振,形成串扰下载峰.

综合考虑影响串扰的因素,可认为:在多通道滤波器中,串扰主要为上载端加入信号后的正向串扰,而逆向串扰很小,可以忽略.究其原因,在光信号输入时,由于脉冲信号均有一定的宽度,且不同信道之间的微环半径相差很小,因此在中心波长附近的部分信号会在其他信道满足谐振条件而被滤出,从而产生串扰.在器件制作过程中,由于制作工艺中的误差存在,设计参量与实际得到的器件参量会有偏差,因此会加剧串扰的影响.这就要求在实际应用过程中需要对每个信道的微环分别进行调制,使信道间的串扰降至最低.因此,在多通道滤波器研制中,调制设计非常重要.

## 4 结论

基于国内微纳波导加工工艺研制SOI基微纳波导微环谐振可调谐滤波器.在21.4 °C~60 °C温度范围内,滤波器的波长调谐带宽达到4.8 nm.该器件具有尺寸小、自由频谱宽度大(16.8 nm)、消光比高(22.1 dB)、热光调谐效果好等优点.这微环谐振腔结构可以广泛应用于高性能滤波器、高速调制器、多信道可重构光插分复用器(ROADM)、高灵敏度光波导传感器等方面.在单环/双环多通道滤波器的测试中,发现了信号串扰的一些规律性,主要是体现在不同信道之间的串扰,而交叉波导散射等产生的串扰可以通过改善波导结构降低,特别是双环结构多通道滤波器避免了主通道波导与上载波导间的交叉,更好地改善了波导交叉所致的串扰;当在上载端加入信号时,由于微环半径相差甚小,且工艺存在误差,使不同信道间串扰恶化,对信号的上载功能影

响较大,需要进一步提高制作工艺准确度,并在实际应用时对各信道进行独立调制,以降低信道间串扰.多通道上下滤波滤波器具有良好的应用前景,是实现 ROADM 的核心器件,而基于多个微环的滤波器能进一步改善器件的滤波谱线及通带等性能,满足未来光通信的需求.

#### 参考文献

- [1] SOREF R. The past, present, and future of silicon photonics [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(6): 1678-1687.
- [2] RONG Hai-sheng, RICHARD J, LIU An-sheng, *et al.* An all-silicon Raman laser[J]. *Nature*, 2005, **433**(7023): 292-294.
- [3] HONG Jian-xun, WAN Mei-zheng, CHEN Shui-ping, *et al.* Optical waveguide microring resonator with picosecond order switching window[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 965-970.  
洪建勋,万美政,陈水平,等. 具有皮秒量级开关窗口的光波导微环谐振器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 965-970.
- [4] ZHANG Bin, MAO Lu-hong, XIE Sheng, *et al.* A new model of silicon-based micro-ring resonator and application for optical filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 537-541.  
张彬,毛陆虹,谢生,等. 一种基于 Spice 的硅基微环光学谐振器模型及其在光学滤波器中的应用[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 537-541.
- [5] XIAO Shi-jun, KHAN M H, SHEN Hao, *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.
- [6] GENG Min-ming, JIA Lian-xi, ZHANG Lei, *et al.* Compact four-channel reconfigurable optical add-drop multi-channeler using silicon photonic wire [J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(17): 3477-3480.
- [7] XIA Feng-nian, LIDIJA S, YURII V, *et al.* Compact All-optical buffers on a silicon chip[J]. *Advanced Packaging*, 2007, **16**(1): 20.
- [8] BENNECER A, WILLIAMS K A, PENTY R V, *et al.* Directly modulated wavelength-multiplexed integrated microring laser array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(16): 1411-1413.
- [9] KWON M S, STEIER W H. Microring-resonator-based sensor measuring both the concentration and temperature of a solution[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(13): 9372-9377.
- [10] SCHEERLINCK S, SCHRAUWEN J, FREDERIK V L, *et al.* Efficient, broadband and compact metal grating couplers for silicon-on-insulator waveguides [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15): 9625-9630.
- [11] AL-HETAR A M, SUPA'AT A S M, MOHAMMAD A B. A ridge waveguide for thermo-optic application [J]. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2009, **6**: 1-9.
- [12] ADAM D, SIEGFRIED J, RUBIN M, *et al.* Compact and low power thermo-optic switch using folded silicon waveguides[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(13): 10457-14065.
- [13] SCHWELB O. Transmission, group delay, and dispersion in single-ring optical resonators and add/drop filters—a tutorial overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(5): 1380-1394.
- [14] SCHWELB O. Crosstalk and bandwidth of lossy microring add/drop multiplexers [J]. *Optics Communications*, 2006, **265**(1): 175-179.
- [15] WU Yaw-dong, SHIH Tien-tsorng, LEE Jian-Jang. High-quality-factor filter based on a photonic crystal ring resonator for wavelength division multiplexing applications [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(25): 24-30.
- [16] DJAVID M, DARKI B S, ABRISHAMIAN M S. Photonic crystal based cross connect filters [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(5): 1424-1428.
- [17] QANG Ze-xuan, QIU Yi-shen, JIANG Jun-zhen, *et al.* Design of tunable optical Add-Drop multiplexer based on photonic crystal ring resonators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3088-3091.  
强则焯,邱怡申,蒋俊贞,等. 可调谐光子晶体微环腔型光分叉复用器的设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3088-3091.
- [18] ZHENG Xue-zhe, SHUBIN Ivan, LI Guo-liang. A tunable  $1 \times 4$  silicon CMOS photonic wavelength multiplexer/demultiplexer for dense optical interconnects [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(5): 5151-5160.
- [19] WANG Tao, LIU Fang-fei, WANG Jing, *et al.* Pulse delay and advancement in SOI microring resonators with mutual mode coupling [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(21): 4734-4743.
- [20] DONG P, SHAFIHA R, LIAO Shi-rong, *et al.* Wavelength-tunable silicon microring modulator[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(11): 19041-19046.
- [21] MANIPATRUNI S, PRESTON K, CHEN Long, *et al.* Ultra-low voltage, ultra-small mode volume silicon microring modulator[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(17): 18235-18242.
- [22] TAKAYESU J, HOCHBERG M, BAEHR-JONES T, *et al.* A hybrid electrooptic microring resonator-based  $1 \times 4 \times 1$  ROADM for wafer scale optical interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(4): 440-448.
- [23] LIU Xin, KONG Wei, WANG Xue-ping. Influence of loss on filtering characteristics of series coupled two-microring resonators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 247-250.  
刘鑫,孔梅,王雪萍. 损耗对串联双微环谐振器滤波特性影响的分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 247-250.
- [24] LIU Fen-fei, MANI H Z. On the performance of high-Q multiring optical filters[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, **2**(6): 991-1002.

## Tunable Filters Based on SOI Microring-resonator

LI Shuai, WU Yuan-da, YIN Xiao-jie, AN Jun-ming, LI Jian-guang,  
WANG Hong-jie, HU Xiong-wei

*(Optoelectronics Research and Development Center, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)*

**Abstract:** Microring-resonator filters were fabricated based on Silicon on Insulator (SOI) nano-wire waveguide, adopting Electron-Beam photolithography (EBL) and Inductive-Coupled-Plasma (ICP) etching technology, etc. The cross-section size of the strip waveguides were  $(350 \sim 500 \text{ nm}) \times 220 \text{ nm}$ , respectively, and the bending radius of the microring was around  $5 \mu\text{m}$ . The measured results show that performance of devices are much better with waveguide width  $450 \text{ nm}$ , the free spectral range (FSR) is  $16.8 \text{ nm}$ , and extinction ratio (ER) around the wavelength  $1550 \text{ nm}$  is  $22.1 \text{ dB}$ . After thermally tuned, the tuning bandwidth reaches  $4.8 \text{ nm}$ , and the tuning efficient is  $0.12 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . Meanwhile, multi-channel filters were fabricated and studied based on single-ring and double-ring. After experiments, some conclusions were drawn: crosstalk exists in the signal transmission in multi-channel filters, mainly among different transmission channels, and the crosstalk is fairly distinct when there are signals input to add ports.

**Key words:** Silicon On Insulator(SOI); Microring resonator; Thermo-optic effect; Filters; Crosstalk