

# 基于微环谐振腔的可调谐滤波器的研究

吴丹宁 吴远大 王 玥 安俊明 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** 采用深紫外光刻及等离子体刻蚀等工艺制备基于绝缘体上硅材料的环形滤波器,且微环半径仅为 $5\ \mu\text{m}$ 。制备基于单微环的4通道光分插复用器,器件尺寸仅为 $3000\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$ 。测试结果表明,该器件可以很好地实现上下下载功能。其自由频谱宽度约为 $19.6\ \text{nm}$ ,最大消光比为 $19.76\ \text{dB}$ 。同时优化设计制备基于跑道型双微环可调谐光分插复用器。对这两种结构的光分插复用器的相邻信道间串扰进行测试,基于单微环滤波器和跑道型双微环滤波器的信道间最大串扰分别为 $-11.94\ \text{dB}$ 和 $-20.04\ \text{dB}$ 。所设计的基于双微环光分插复用器上下下载通道与主信道间没有交叉波导结构,因此相邻通道串扰明显低于单环型的光分插复用器。同时设计并制备基于双微环PIN结型电光调制器。当偏置电压增加到 $1.6\ \text{V}$ 时,谐振峰发生 $0.78\ \text{nm}$ 的蓝移,并对测试结果进行分析。

**关键词** 光学器件;脊形波导;可调谐滤波器;电光调制器;光复用技术;谐振腔

中图分类号 TN256 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0123002

## Research on Tunable Filter Based on Micro-Ring Resonators

Wu Danning Wu Yuanda Wang Yue An Junming Hu Xiongwei

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

**Abstract** Deep ultraviolet photolithography and inductively coupled plasma etching processes are adopted to fabricate the filters based on silicon-on-insulator micro-ring resonators, and the radius is only  $5\ \mu\text{m}$ . A four-channel optical add-drop multiplexer based on single micro-ring is fabricated, and the size of the device is only  $3000\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$ . The test results show that the device can perfectly realize the upload and download functions. The free spectral range is about  $19.6\ \text{nm}$  and the maximum extinction ratio is  $19.76\ \text{dB}$ . Meanwhile, a reconfigurable optical add-drop multiplexer based on dual racetrack micro-ring resonator is optimally designed and fabricated. The adjacent crosstalks of the two kinds of optical add-drop multiplexer based on single micro-ring and dual racetrack micro-ring respectively are tested, and the maximum adjacent crosstalks are  $-11.94\ \text{dB}$  and  $-20.04\ \text{dB}$ , respectively. Because there is no cross-section between the add-drop channels and the backbone in dual racetrack optical add-drop multiplexer, the adjacent crosstalk is apparently less than the single micro-ring optical add-drop multiplexer. PIN junction modulator based on dual racetrack micro-ring resonators is designed and fabricated. When the added voltage reaches  $1.6\ \text{V}$ , the resonant peak has a blue shift of  $0.78\ \text{nm}$ , finally the test results are analyzed.

**Key words** optical devices; integrated optics; slab waveguides; tunable filters; electro-optic modulators; multiplexing; resonators

**OCIS codes** 230.7400; 120.2440; 250.7360; 060.4230; 230.5750

## 1 引言

可重构光分插复用器(ROADM)位于多节点光纤通信网络的中间节点处,可以有选择性地从光纤中下载

收稿日期: 2015-06-06; 收到修改稿日期: 2015-07-06

基金项目: 国家863计划(2013AA031402)、国家自然科学基金(61274047, 61275029, 61205044)

作者简介: 吴丹宁(1990—),女,硕士研究生,主要从事物理电子学可重构光分插复用器方面的研究。

E-mail: wudanning@semi.ac.cn

导师简介: 吴远大(1974—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光波导无源器件、硅基发光器件及光互连技术等方面的研究。E-mail: wuyuanda@semi.ac.cn(通信作者)

某个光信号到本地、上载本地用户的信号进入光纤信道以及直通那些不需要在本地节点进行任何处理的光信号。它可以不经过光/电/光转换即可实现波分复用信道的分插功能,大大降低交换成本。目前已有基于布拉格光纤光栅<sup>[1-2]</sup>、阵列波导光栅<sup>[3]</sup>、光开关阵列<sup>[4]</sup>、声光可调谐滤波器<sup>[5]</sup>等的ROADM,其中基于微环谐振腔的ROADM具有尺寸小、结构简单、便于集成等优点。其基本单元微环谐振腔由于具有结构简单、灵敏度高及波长选择特性好等优点而得到广泛应用<sup>[6-10]</sup>。因此,对其性能的研究具有十分重要的意义。由于硅是中心反演对称晶体,没有线性电光效应,硅基波导中的电光调制往往利用的是硅材料的等离子体色散效应。微环型电光调制器的电学结构可以采用PIN结型<sup>[11-12]</sup>、反向PN结型<sup>[13-14]</sup>、场效应晶体管型<sup>[15-16]</sup>。针对以上3种结构,PIN结型结构在工艺上相对容易实现,载流子浓度调制区域与光场传输区域重叠度大,调制效率比较高。但在正向偏压下载流子注入是扩散过程,调制速率比较低,且有较大功耗。因此,综合各种因素采用PIN结型结构实现调制功能。

设计了绝缘体上硅结构(SOI)单模脊型波导结构,采用PIN结型结构实现调制功能,并对PIN结型调制器进行设计。设计制备基于单微环的4通道光分插复用器(OADM)及基于双微环跑道型PIN结型电光调制器,并对制备的器件进行分析与测试。结果表明,4通道单微环OADM可以很好地实现上下载功能;基于双微环新型跑道型OADM,在主信道上没有交叉波导结构,大大降低相邻信道间串扰;所设计的基于双微环跑道型PIN电光调制器经测量得到了较好的电光特性。

## 2 理论分析

### 2.1 波导结构的设计

当波导中存在多个模式时,各种模式会相互耦合,在环形结构传输过程中会导致光波信号的畸变,因此应该保证波导中的光是单模的。所使用的SOI芯片顶层硅厚度为 $H=220\text{ nm}$ ,掩埋层厚度为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。在平板区厚度 $h=70\text{ nm}$ 的条件下,利用基于薄膜模式匹配法的光波导仿真软件Fimmwave模拟SOI脊型波导内模场的有效折射率随波导宽度 $W$ 的变化,如图1所示。随着波导宽度 $W$ 的减小,波导中存在的导波模式数越来越少,且当 $W$ 小于 $400\text{ nm}$ 时,此种结构的波导只存在 $\text{TE}_0$ 模式,此时其有效折射率和群折射率分别为 $2.41$ 和 $3.82$ 。

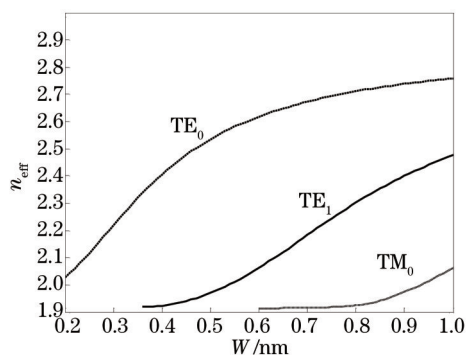


图1 脊型波导内有效折射率随波导宽度的变化

Fig.1 Effective refractive index changes with the waveguide width in ridge waveguide.

### 2.2 PIN电光调制器

PIN电光调制器工作原理是在脊型波导的两侧分别进行N型、P型的重掺杂形成PIN结型结构,通过在PIN结上施加一定的外加偏压,波导中的载流子浓度发生相应的变化,进而引起波导内折射率的变化。采用半导体器件模拟软件Silvaco模拟了PIN结中的载流子变化,利用Soref<sup>[17]</sup>给出的经验公式,即 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波长时硅的吸收系数和折射率随载流子注入浓度的变化为

$$\Delta\alpha = 8.5 \times 10^{-18} \cdot \Delta N_c + 6.0 \times 10^{-18} \cdot \Delta N_h, \quad (1)$$

$$\Delta n = -[8.8 \times 10^{-22} \cdot \Delta N_c + 8.5 \times 10^{-18} \cdot \Delta N_h^{0.8}], \quad (2)$$

式中 $\Delta N_c$ 和 $\Delta N_h$ 分别为电子和空穴的浓度变化量。由于在波导中的载流子浓度分布不是均匀的,波导中折射率也存在空间差异。要得到不同偏压下的有效折射率,严格的方法是根据波导的折射率分布求解Maxwell方程,但此种方法不仅耗时且计算复杂。采用重叠积分法来近似计算波导的有效折射率<sup>[18]</sup>,根据微

扰理论,当波导的有效折射率分布发生  $\Delta n(x,y)$  的改变时,其有效折射率的改变值为

$$\Delta n_{\text{eff}} = \frac{1}{n_{\text{eff}}^{(0)}} \frac{\iint \Delta n(x,y) \cdot n^{(0)}(x,y) \cdot |E^{(0)}(x,y)|^2 dx dy}{\iint |E^{(0)}(x,y)|^2 dx dy}, \quad (3)$$

式中  $n_{\text{eff}}^{(0)}$  为无外加偏压时的有效折射率,  $n^{(0)}(x,y)$  为无外加偏压时的折射率分布,  $E^{(0)}(x,y)$  为无外加偏压时的模场分布,无偏压时的模场分布可由 Fimmwave 软件得出。

利用 2.1 节中的波导结构, P 型掺杂和 N 型掺杂的粒子浓度均为  $5.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  时, 掺杂区边界到脊边界间距离为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $1 \mu\text{m}$  的情况下进行模拟, 光吸收系数及有效折射率随外加偏压的变化, 如图 2 所示。当脊边界与掺杂区间距离越小, 加同样的正偏压折射率变化越大, 但与此同时光损耗也会有很大增加。因此选择脊边界和掺杂区间的距离要综合考虑损耗和调制效率。在偏置电压为  $1 \text{ V}$  时, 脊边界与掺杂区距离分别为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $1 \mu\text{m}$  的情况下, 半径为  $5 \mu\text{m}$  的微环谐振腔波导内的有效折射率的变化分别为  $2.11 \times 10^{-3}$  和  $1.60 \times 10^{-3}$ , 经计算其谐振波长分别发生  $0.65 \text{ nm}$  和  $0.86 \text{ nm}$  的蓝移。

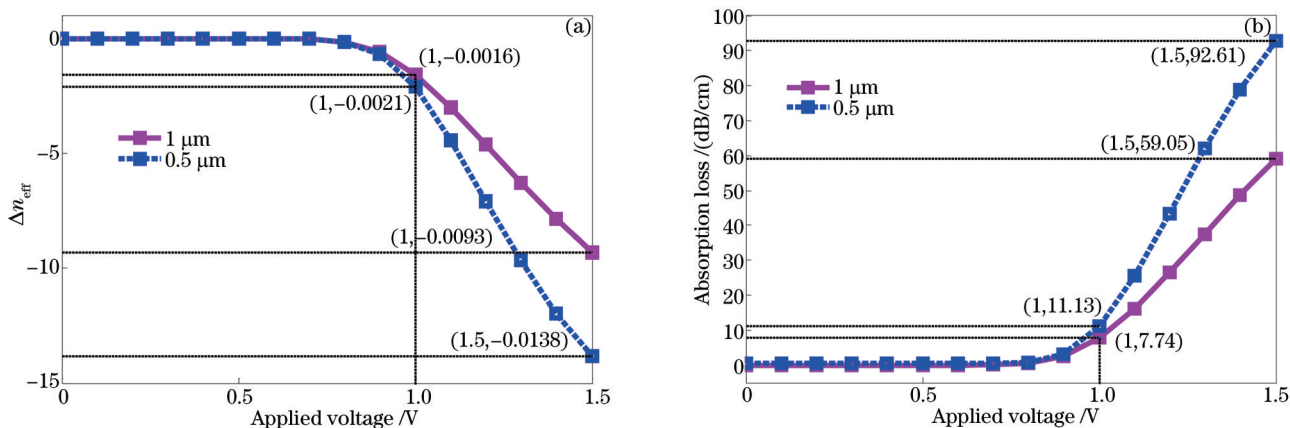


图 2 (a) 有效折射率和(b)吸收系数随外加偏压的变化

Fig.2 (a) Effective refractive index and (b) absorption loss change with applied voltage.

图 3 为 PIN 结型电光调制器的截面结构。N 型重掺杂区和 P 型重掺杂区的粒子浓度为  $5.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 宽度为  $3 \mu\text{m}$ 。为了避免过多的光吸收带来的损耗, 掺杂区到脊边界间的距离选取为  $1 \mu\text{m}$ , 引线金属为铝, 厚度为  $1 \mu\text{m}$ 。

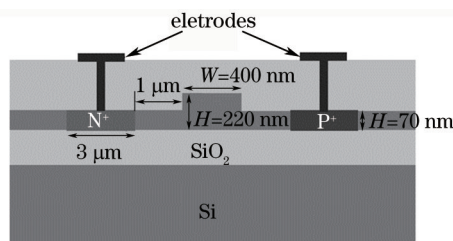


图 3 PIN 结型电光调制器的截面结构

Fig.3 Corss-section of the PIN electro-optic modulator

### 3 器件设计

所制作的 SOI 微纳波导采用深紫外光刻, 感应耦合等离子体刻蚀, 等离子体增强化学气相沉积等制作工艺。设计了两种 OADM, 如图 4 所示。图 4(a) 为基于单微环的 OADM, 器件包括一个输入端, 一个直通端, 4 个下载端 D1~D4 及 4 个上载端 A1~A4, 该器件的面积为  $3000 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ , 微环 R1~R4 的半径分别为  $5, 5.03, 5.06, 5.09 \mu\text{m}$ , 微环与直波导间距为  $G_{\text{ap}}=180 \text{ nm}$ 。图 4(c) 为基于双跑道型微环的 ROADM, 微环 R1~R4 的半径分别为  $5.01, 5.02, 5.03, 5.04 \mu\text{m}$ , 微环与直波导间距为  $G_{\text{ap}}=260 \text{ nm}$ , 微环与微环间距为  $500 \text{ nm}$ 。

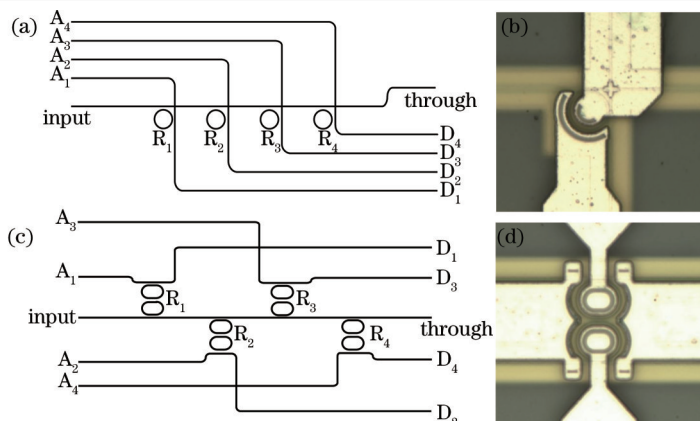


图4 器件结构及其电镜图片。(a) 4通道单微环 OADM; (b) 单微环谐振腔的电镜图片; (c) 4通道双跑道型微环 ROADMs; (d) 双微环谐振腔电镜图片

Fig.4 Structure and device and its microscope. (a) Four-channel OADM based on single micro-ring resonator (MRR); (b) microscope of single MRR; (c) four-channel ROADMs based on dual racetrack MRR; (d) microscope of dual racetrack MRR

## 4 测试与结果分析

### 4.1 4 通道单微环 OADM 静态测试

SOI 微纳器件测试过程中使用到的仪器主要为放大式自发辐射(ASE)光源、单模保偏拉锥光纤、偏振控制仪、光功率计、直流可调谐稳压电源、光谱分析仪、六维光学对准平台等。ASE 光源发射出的激光通过偏振控制仪及起偏器耦合进待测器件输入端口,经过器件在输出端口接入光谱分析仪,直流可调谐稳压电源通过探针加到待测器件上。首先对 4 通道单微环 OADM 的静态响应进行测试。OADM 有 4 种不同配置,分别为“输入端至下载端”、“输入端至直通端”、“上载端至直通端”、“上载端至下载端”。

图 5(a)为“输入端至下载端”配置下的测试结果,光信号由输入端输入,分别在 D1~D4 端口检测器件的响

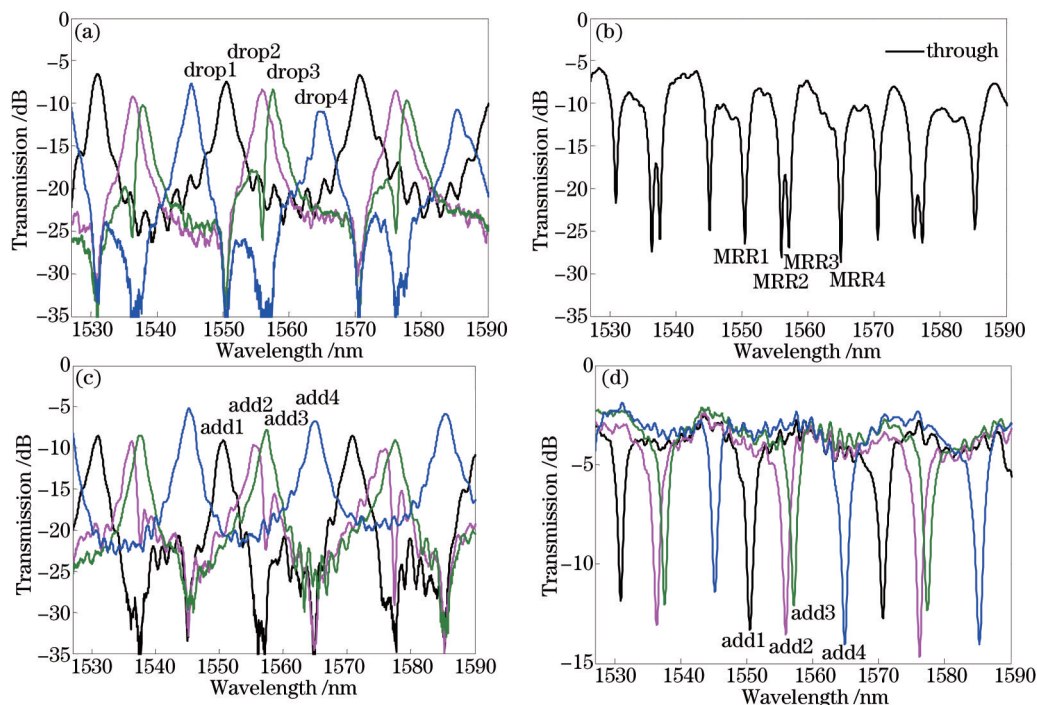


图 5 单微环 OADM 的静态响应谱线。(a)“输入端至下载端”; (b)“输入端至直通端”; (c)“上载端至直通端”; (d)“上载端至下载端”

Fig.5 Static response spectra of the OADM based on single MRR. (a) “Input to drop”; (b) “input to through”; (c) “add to through”; (d) “add to drop”

应谱。在这种配置下,该器件从主信道下载信号至下载端口。以 1550 nm 附近为例, D1~D4 下载端口最小插入损耗分别为 6.6、8.59、8.71、11.22 dB。各个端口间的最小插入损耗不同,这是由于不同端口经过的交叉节点数不同。各个端口的谐振波长分别为 1550.52、1555.96、1557.54、1564.85 nm,对应的信道间隔分别为 5.44、1.58、7.31 nm。可以看出微环滤波器的谐振峰出现了偏移,这是由工艺误差导致的,微环结构对于半径变化十分敏感<sup>[9]</sup>,对于设计的半径为 5 μm 的结构,半径每增加 1 nm 谐振峰会有 200 GHz 的红移。同时由于设计版图格式转换及深紫外光刻工艺误差等原因,谐振峰有较大的偏移,也使部分通道的信道间串扰增大。其中, D2 通道对 D1 通道的串扰为 -24.80 dB,但是 D2 通道对 D3 通道的串扰为 -6.24 dB。为了解决这个问题,可以在波导上方制作一个加热电极,利用硅的热光效应对谐振峰进行微调,以补偿由于工艺带来的误差。另外, D1~D4 下载端口的消光比分别为 14.83、16.40、16.49、16.25 dB,自由频谱宽度分别为 19.53、19.56、19.66、19.66 nm,由此可见各个微环谐振腔的性能较一致。

图 5(b)为“输入端至直通端”配置下的测试结果,光信号由输入端口输入,在直通端探测器件的响应光谱。在这种配置下,该器件经下载端口下载信号,在直通端口可以看到对应的波长凹陷。在直通端口的凹陷与图 5(a)中的下载相互对应。直通端的最小插入损耗为 6.29 dB。对应 R1~R4 的谐振峰深度分别为 18.14、19.76、19.52、16.47 dB,近乎达到临界耦合。

图 5(c)为“上载端至直通端”配置下的测试结果,光信号分别由 A1~A4 端口输入,在输出端口检测器件的响应光谱。在这种配置下,该器件由本地向主信道上载信号,并输出至直通端。A1~A4 的谐振峰分别为 1550.6、1555.9、1557.44、1564.93 nm。自由光谱范围(FSR)分别为 19.67、19.63、19.77、19.68 nm。各信道间最小插入损耗为 9.07、9.83、9.77、6.75 dB。另外 A1~A4 端口的消光比分别为 14.67、14.61、17.35、14.38 dB。R1~R4 上载和下载时的性能参数略有差异,这是由于实际得到的谐振腔的耦合结构是非对称的,谐振腔的滤波性能与信号的输入端口相关,但没有过大偏差。

图 5(d)为“上载端至下载端”配置下的测试结果,光信号分别由 A1~A4 端口输入,在 D1~D4 端口检测器件的响应光谱。在这种配置下,该器件由本地向主信道上载信号,经下载端口输出,输出端的波长凹陷对应上载至主信道的波长。在直通端口的凹陷与图 5(c)中的上载相互对应。对应 R1~R4 的谐振峰深度分别为 10.01、10.07、8.93、10.64 dB。各信道最小插损为 3.1 dB,这是由于在该种配置下,从 A1~A4 端口输入的信号没有经历环内损耗直接由 D1~D4 输出,所以有较小的插入损耗。

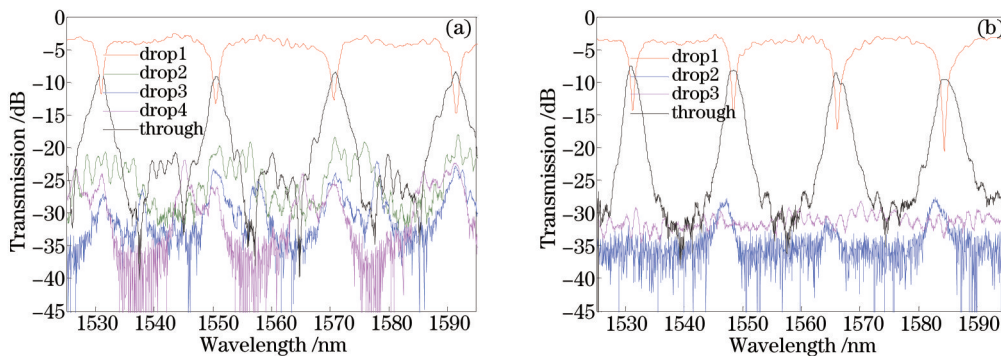


图 6 当光信号由 A1 端口输入时, (a) 基于单微的 OADM 和 (b) 基于双跑道微环型的 OADM 的光谱响应

Fig.6 When the signal is coupled into the A1 port, the response spectra of (a) single-MRR-based OADM and (b) dual racetrack-MRR-based OADM

当光信号由 A1 端口输入,在 D1~D4 端口及直通端口分别检测器件的光谱响应。图 6(a)是基于单微的 OADM 的光谱响应曲线,与直通端相邻通道 D2~D4 的串扰分别为 -11.94、-11.67、-17.53 dB。越靠近直通端串扰越大。图 6(b)是基于双跑道微环型的 OADM 的光谱响应曲线,与直通端相邻通道 D2 和 D3 的串扰分别为 -21.81 dB 和 -20.04 dB。可以看出基于双跑道型的 OADM 的相邻信道间串扰比基于单微环型 OADM 的更小,这是由于前者的上下载信道与主信道没有交叉节点,这样会减少信道间的串扰。

#### 4.2 双跑道型滤波器电光调制特性

采用 4.1 节中的测试平台,在 PIN 的电极加上直流可调谐稳压电源,使 PIN 结正向偏置。与此同时,光信号

由 A1 输入,在 D1 端检测器件光谱响应,如图 7 所示。可以看出随着结电压的升高,谐振峰发生蓝移,且谐振峰强度降低,这与模拟的结果相同。当偏置电压增加到 1.6 V 时,谐振峰发生 0.78 nm 的蓝移,这与模拟的结果有偏差,可能的原因是当结电压升高时,PIN 结内的温度也会升高,由于硅具有良好的热光系数,随温度升高会造成谐振峰的红移,这样就导致了热光效应和电光效应相互的抵消。为了解决这个问题,需采用合适的控温装置。

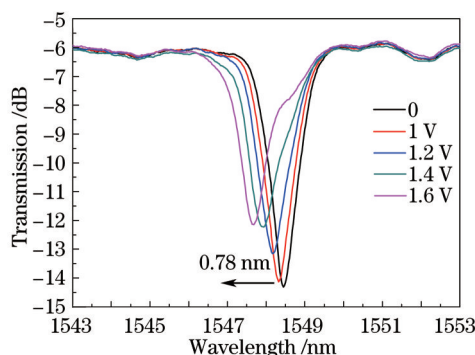


图 7 跑道型双微环电光调制器静态测试

Fig.7 Static response of electro-optic modulator based on dual racetrack MRR.

## 5 结 论

设计并制备基于 SOI 微环谐振腔的滤波器且微环半径仅为  $5\ \mu\text{m}$ ,并制备基于单微环的 4 通道 OADM。测试结果表明,该器件能够很好地实现上下载功能,该器件具有尺寸小( $3000\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$ )、自由频谱宽度大(19.6 nm)、结构对称等特点。但由于工艺模板转换等因素,导致信道间隔不均匀,可采用热光调制等方式对工艺误差进行补偿,以实现均匀的信道间隔实现,也需要进一步提高制作工艺准确度;双微环滤波器 OADM 的上下载通道与主信道间没有交叉波导结构,故串扰明显低于单环型滤波器 OADM,同时可以优化交叉波导结构以得到更小的串扰;采用 PIN 结型结构实现可重构功能,当偏置电压增加到 1.6 V 时,谐振峰发生 0.78 nm 的蓝移。PIN 结型电光调制器有调制速率快、在工艺上相对容易实现等优点,需要进一步改善并研究其性能。多通道上下载滤波器具有良好的应用前景,是实现 ROADM 的核心器件,进一步改善可调谐滤波器的滤波性能,以满足不断发展的光通信的需求。

## 参 考 文 献

- 1 P R Neves, Jr F Kuller, C Marconcini, *et al.*. Experimental and simulation analysis of unbalanced Mach-Zehnder fiber Bragg grating OADM [C]. Microwave and Optoelectronics, 2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference, 2005: 5-8.
- 2 Huang Yonglin, Xiang Yang, Li Jie, *et al.*. Homodyne crosstalk performance of optical add-drop multiplexer based on fiber gratings and circulators[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(4): 438-440.  
黄勇林, 项 阳, 李 杰, 等. 光纤光栅和环形器组成的光分插复用器同频串扰特性研究[J]. 光学学报, 2003, 23(4): 438-440.
- 3 L Kwanil, L Sang Bae, M Sil-Gu, *et al.*. Novel architecture for reconfigurable optical add-drop multiplexer using single arrayed waveguide grating[C]. Optical Internet, 2007 and the 2007 32nd Australian Conference on Optical Fibre Technology, 2007: 1-3.
- 4 T A Strasser, J L Wagener. Wavelength-selective switches for ROADM applications[J]. Quantum Electronics IEEE, 2010, 16(5): 1150-1157.
- 5 N Kataoka, K Sone, N Wada, *et al.*. Field trial of 640-Gbit/s-throughput, granularity-flexible optical network using packet-selective ROADM prototype[J]. Lightwave Technology, 2009, 27(5-8): 825-832.
- 6 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(2): 0205006.  
刘 毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.
- 7 Han Xiyou, Song Hongyan, Zhang Jianing, *et al.*. Study on the integrated waveguide optical delay line based on microring resonators [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 782-786.  
韩秀友, 宋红妍, 张佳宁, 等. 微环谐振腔集成波导光延时线研究[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 782-786.
- 8 P Feng, Y Zhang, Y Wang, *et al.*. A novel hybrid III-V/silicon deformed micro-disk single-mode laser[J]. Journal of Semiconductors,

- 2015, 36(2): 024012.
- 9 Yin Chenglong, Gu Jinyi, Zhang Zhuo, *et al.*. Optimization research on refractometric sensor based on microcapillary[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728002.  
阴成龙, 顾进益, 张 卓, 等. 基于微毛细管折射率传感器的优化研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0728002.
- 10 Zhang Fanfan, Zhang Lei, Yang Lin. Directed logic circuits based on silicon microring resonators[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 110004.  
张凡凡, 张 磊, 杨 林. 基于硅基微环谐振器的光学导向逻辑器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 110004.
- 11 S Manipatruni, X Qianfan, B Schmidt, *et al.*. High speed carrier injection 18 Gb/s silicon micro-ring electro-optic modulator[C]. *Lasers and Electro-Optics Society the 20th Annual Meeting of the IEEE*, 2007: 537-538.
- 12 H Chen, J Ding, L Yang. 12.5 Gb/s carrier-injection silicon Mach-Zehnder optical modulator[J]. *Journal of Semiconductors*, 2012, 33(11): 114005.
- 13 X Xiao, X Li, H Xu, *et al.*. 44-Gb/s silicon microring modulators based on zigzag PN junctions[J]. *Photonics Technology Letters*, 2012, 24(19): 1712-1714.
- 14 F Y Gardes, A Brimont, P Sanchis, *et al.*. High-speed modulation of a compact silicon ring resonator based on a reverse-biased Pn diode [J]. *Opt Express*, 2009, 17(24): 21986-21991.
- 15 R Soref, J Guo, G Sun. Low-energy MOS depletion modulators in silicon-on-insulator micro-donut resonators coupled to bus waveguides [J]. *Opt Express*, 2011, 19(19): 18122-18134.
- 16 Huang Beijiu, Chen Hongda, Liu Jinbin, *et al.*. A High-performance silicon electro-optic phase modulator with a triple MOS capacitor [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(12): 2089-2093.  
黄北举, 陈弘达, 刘金彬, 等. 高性能硅基 MOS 电光相位调制器[J]. *半导体学报*, 2006, 27(12): 2089-2093.
- 17 R A Soref, B R Bennett. Electrooptical effects in silicon[J]. *Quantum Electronics*, 1987, 23(1): 123-129.
- 18 L Eldada, J T Yardley. Modal analysis for optimization of single-mode waveguide pigtailed and fiber splicing[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(33): 7747-7751.
- 19 Q Xu, B Schmidt, J Shakya, *et al.*. Cascaded silicon micro-ring modulators for WDM optical interconnection[J]. *Opt Express*, 2006, 14(20): 9431-9435.

栏目编辑: 张 雁