

# 基于微环谐振腔的可调谐硅基反射腔镜

李霞 王超 余辉 江晓清

浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027

**摘要** 针对片上光互连用光源对谐振腔单色性、可调性的要求,基于互补金属氧化物半导体技术和绝缘衬底上的硅材料,设计并制作了一种基于微环谐振腔的可调谐硅基反射腔镜。利用转移矩阵方法分析了该反射腔的性能,发现该反射腔具有较好的尖锐度和消光比。实验结果表明,该反射腔在波长 1549 nm 处反射率可达 90%,品质因素  $Q$  值为  $3 \times 10^4$ ,自由光谱范围(FSR)为 9.6 nm。通过对微环谐振腔进行热光调制,在 0~40.5 mW 功率范围内实现了在 FSR 内的波长可调。

**关键词** 光学器件; 反射腔; 热调特性; 微环谐振腔

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1223002

## Tunable Silicon Reflection Cavity Mirror Based on Microring Resonator

Li Xia Wang Chao Yu Hui Jiang Xiaoqing

College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Considering the requirement of monochromaticity and tunability for resonator used in on-chip optical interconnect source, we design and make a tunable silicon reflection cavity mirror based on microring resonator, using complementary metal-oxide-semiconductor technology and silicon material on insulating substrate. The performance of the reflection cavity is analyzed by the transfer-matrix method, and we find that the reflection cavity shows good properties in sharpness and extinction ratio. The experimental results show that the reflectivity of the reflection cavity can reach 90% at the wavelength of 1549 nm, the quality factor is  $3 \times 10^4$ , and the free spectral range (FSR) is 9.6 nm. By applying the thermo-optic modulation to the microring resonator, the wavelength tunability in FSR can be realized within the power range of 0-40.5 mW.

**Key words** optical devices; reflection cavity; thermal tuning property; microring resonator

**OCIS codes** 230.5750; 230.5750; 230.4040

## 1 引 言

近年来,随着微纳技术的迅速发展,绝缘硅微纳光子器件及其集成成为研究者们关注的焦点<sup>[1-2]</sup>。基于绝缘衬底上硅(SOI)材料的硅波导非常适用于高密度光子集成,且制备工艺和现有的微电子互补金属氧化物半导体(CMOS)标准工艺兼容性高,成为未来光子集成芯片的首选技术。由于硅和二氧化硅的折射率差较大,硅波导对光场具有较大的限制作用,SOI微纳波导的弯曲半径可降低至几微米,从而为光子器件的小型化和高密度集成提供了可能。基于硅波导的微环谐振腔结构具有性能良好、结构紧凑、功能配置灵活等优点<sup>[3]</sup>。采用硅基微环谐振腔可实现多种光功能器件,包括高速电光调制器、滤波器等<sup>[4-6]</sup>。针对片上光互连用光源对谐振腔性能的要求,为在集成光学器件中实现高效的光路反射,需要在简单端面上制作高反射膜,但是高反射膜的制作过程通常比较复杂,甚至无法实现。布拉格光栅是最常见的反射结构,但是布拉格光栅的制作较微环复杂,并且波长可调范围较小<sup>[7-9]</sup>。微环谐振腔具有波长选择性,可用于混合外腔激光器反射

**收稿日期:** 2016-07-08; **收到修改稿日期:** 2016-08-03

**基金项目:** 国家 973 计划(2013CB632105)、国家自然科学基金(61177055,61307074)、浙江省杰出青年基金(LR15F050002)

**作者简介:** 李霞(1988—),女,博士研究生,主要从事微环谐振腔在硅基集成光子器件中的应用方面的研究。

E-mail: 21131062@zju.edu.cn

**导师简介:** 江晓清(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事集成光学器件和光电子技术应用等方面的研究。

E-mail: iseejq@zju.edu.cn(通信联系人)

腔镜的设计;硅材料的热光系数较高,可对微环谐振峰进行热光调谐;二者为构造波长可调的多路硅基光源创造了条件。

本文设计了一种基于微环谐振腔的可调谐硅基反射腔镜,采用传输矩阵方法讨论了该反射腔的优良特性,实验测得反射腔在波长 1549 nm 处的反射率可达 90%,FSR 为 9.6 nm。对微环谐振腔进行热光调制,实现了高效的波长可调谐功能,符合激光器光源对谐振腔的要求。

## 2 器件结构及原理

可调谐反射腔镜结构示意图如图 1 所示,图中  $I_i$  为输出光能量, $I_r$  为反射光能量, $I_a$  为进入耦合环的能量, $I_b$  为经耦合环反射的能量。波导芯区硅截面宽度为 450 nm,高度为 220 nm,微环半径为 10  $\mu\text{m}$ 。采用扫描电子显微镜(SEM)观察微环谐振腔,照片图如图 2 所示。从图 2 可以看出,使用不同间距的器件可观察不同间距对器件性能的影响。新加坡微电子研究所硅光子工艺线代加工器件,选取厚度为 20.32 cm 的 SOI 晶圆,其中顶层硅厚度为 220 nm,埋层氧化硅厚度为 2  $\mu\text{m}$ ,并在微环上制作氮化钛金属热电极。

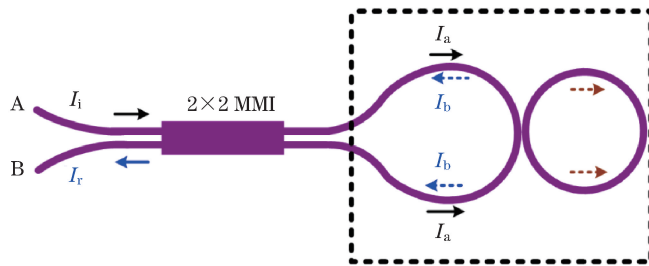


图 1 可调谐反射腔镜结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of tunable reflection cavity mirror

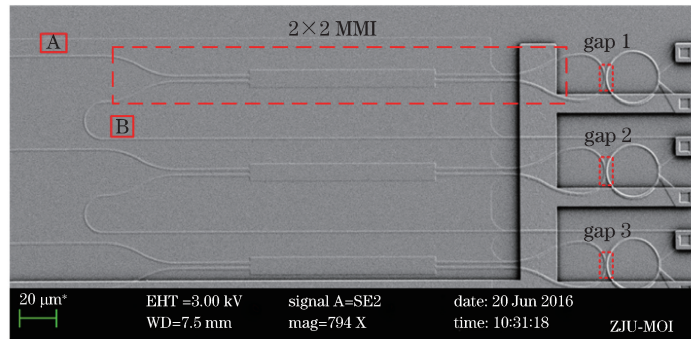


图 2 可调谐反射腔镜的 SEM 照片

Fig. 2 SEM image of tunable reflection cavity mirror

可调谐反射腔镜结构可分为两部分,一部分为图 1 方框中的结构,另一部分为  $2 \times 2$  多模干涉(MMI)。若不考虑  $2 \times 2$  MMI 结构,该结构可看作由一个 Y 分支器与微环谐振腔构成。光经过 Y 分支器后分为两束,分别进入微环谐振腔,绕环一周后在耦合区会合,然后形成输出信号。此时,输出信号为直通端的滤波信号,而非反射信号。若使用  $2 \times 2$  MMI 结构代替 Y 分支器,从 A 端输入光,经过  $2 \times 2$  MMI 结构时分离的两束光产生  $\pi/2$  的相位差;反射后经过  $2 \times 2$  MMI 结构时也产生  $\pi/2$  的相位差,从而可以达到信号反射的目的。

采用转移矩阵方法计算得到该器件反射端的归一化传输函数  $T(t)$  为

$$T(t) = \frac{I_r}{I_i} = \frac{I_b}{I_a} = \frac{\alpha^2 + |t|^2 - 2\alpha|t|\cos(\theta + \phi_t)}{1 + \alpha^2|t|^2 - 2\alpha|t|\cos(\theta + \phi_t)}, \quad (1)$$

式中  $\theta$  为绕环一周的相位变化,  $\theta = 2\pi n_{\text{eff}}L/\lambda$ , 其中  $L$  为环的周长,  $n_{\text{eff}}$  为波导有效折射率,  $\lambda$  为光波波长;  $t$  为通过耦合区域后的传输系数,  $t = |t|\exp(i\phi_t)$ ;  $\alpha$  为波导的传输损耗;  $\phi_t$  为光通过耦合环一周的相位。

由 Y 分支器与微环谐振腔构成的反射腔可以构成两种反射腔结构,一种为本文提出的结构,另外一种为图 3 所示的结构<sup>[10]</sup>。这两种结构的不同之处在于:图 3 中反射腔结构的总线波导和环形波导包含两个耦

合区域;本文提出的反射腔结构只有一个耦合区域,相比于第一种结构,降低了由上下耦合区域的不对称产生的影响。为了比较这两种结构的差别,选定相同的耦合条件和损耗条件,模拟两种结构的滤波曲线,如图4所示。从图4可以看出,本文提出的反射腔的消光比和波形尖锐度都优于双耦合反射腔镜。

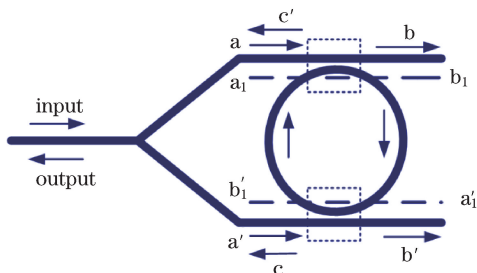


图3 Y分支器与微环谐振腔构成的双耦合反射腔镜结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of dual-coupling reflection cavity mirror consisting of Y-branch and microring resonator

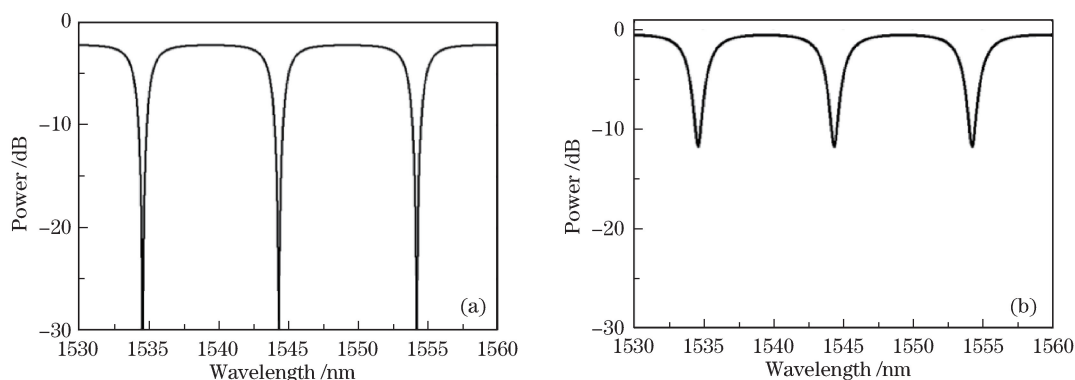


图4 相同耦合系数和损耗系数下两种反射腔的滤波曲线。(a) 本文提出的反射腔;  
(b) Y分支器与微环谐振腔构成的双耦合反射腔

Fig. 4 Filtering curves of two kinds of reflection cavities with the same coupling coefficient and loss coefficient.  
(a) Proposed reflection cavity; (b) dual-coupling reflection cavity consisting of Y-branch and microring resonator

### 3 实验结果

利用悬浮型端面耦合结构设计器件<sup>[11]</sup>,采用端面耦合测试平台测试该反射腔。入射光源采用放大式自发射宽带光源,输入光通过输入光纤进入反射腔A端,反射后从反射腔B端输出,通过输出光纤连接至光谱仪,利用光谱仪观察反射谱线。测试得到的反射端输出功率谱(去除了端面损耗)如图5所示。两个谐振峰之间的距离为9.6 nm,消光比约为12 dB。

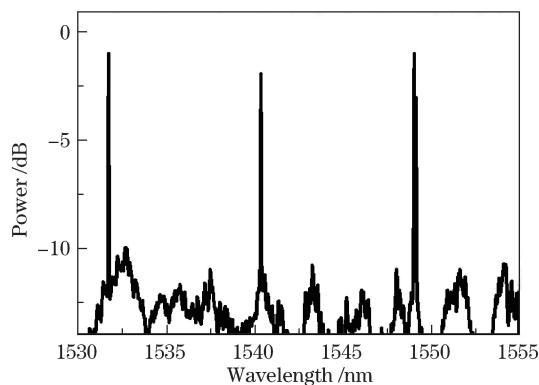


图5 反射腔反射端输出功率

Fig. 5 Output power of reflection end of reflection cavity

将图 5 中的反射信号功率转变为反射率,如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,该器件的反射率可达 90%,将谐振波长 1531.76 nm 处的反射曲线放大,得到图 6(b)所示的曲线。经计算,得到半峰全宽 (FWHM)为 0.04 nm,对应的  $Q$  值为  $3 \times 10^4$ 。

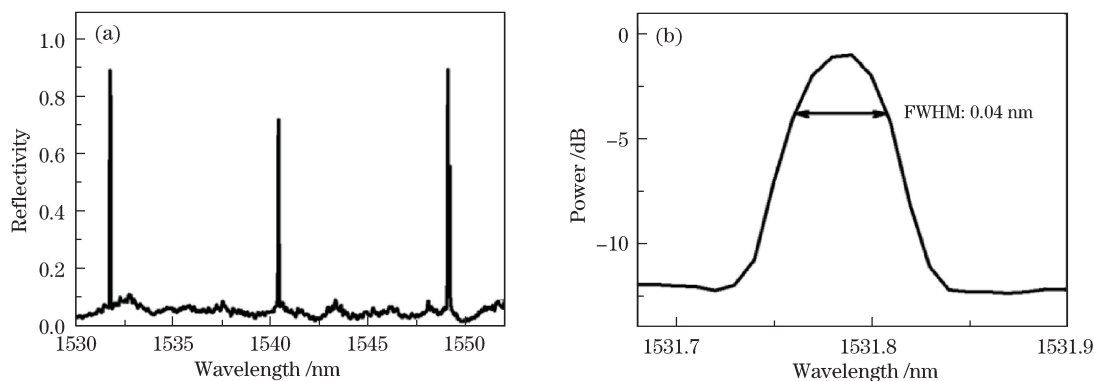


图 6 (a) 图 5 对应的反射率;(b) 波长为 1531.76 nm 处的放大反射谱

Fig. 6 (a) Reflectivity corresponding to Fig. 5; (b) magnified reflection spectrum at 1531.76 nm

为观察两个环之间的间距对反射率的影响,设置不同的间距。图 2 中反射腔内 3 个间距分别为 180, 200, 220 nm。图 7(a)、(b)分别为实验、仿真得到的 3 种不同间距对应的反射率。由图 7 可知,间距为 200 nm 时,反射率达到最高,这是由于间距为 200 nm 时更接近临界耦合条件。实验得到的反射率略低于理论值,带宽也小于理论值,这是由于带宽与耦合系数相关,在工艺制作过程中,间距可能存在偏差,进而改变耦合系数。

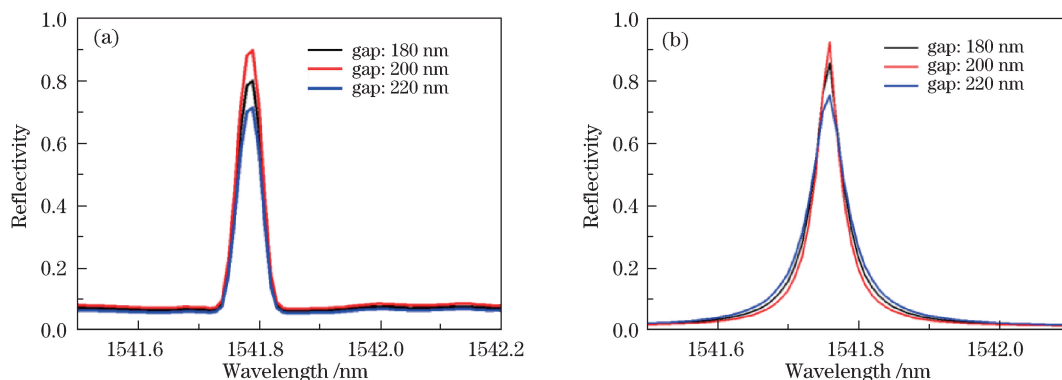


图 7 (a)实验和(b)仿真得到的不同间距对应反射腔的反射率

Fig. 7 Reflectivity of reflection cavity with different gaps obtained in (a) experiment and (b) simulation

由于微环谐振腔对工艺要求比较高,谐振波长对波导结构和尺寸比较敏感,需要对微环结构进行调制以获得所需的谐振波长;同时由于硅波导材料具有良好的热光效应(热光系数大约为  $1.86 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ );因此该实验采用对微环整体加热的方式来调整滤波器的谐振波长,并期望实现较大范围的可调谐滤波功能。从图 8(a)可以看出,随着施加于加热器的功率的增加,微环谐振腔的反射谱出现了红移,当功率为 40.5 mW 时,反射谱线移动了一个自由光谱范围(FSR)。图 8(b)为反射谱移动范围随加热功率的变化情况,计算得到其调谐效率为 5 mW/nm。

#### 4 分析与讨论

表 1 为不同类型反射腔的性能参数比较。经比较可得,本文提出的反射腔在 FWHM、反射率、可调谐性等方面具有很大的优势。

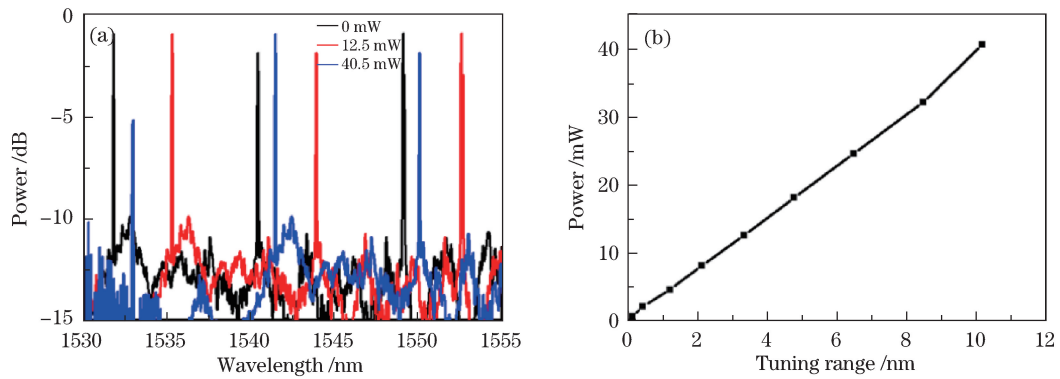


图 8 (a) 加热功率分别为 0, 12.5, 40.5 mW 时的反射谱; (b) 调谐范围随加热功率的变化

Fig. 8 (a) Reflection spectra when the heating power applied on the heater is 0, 12.5, 40.5 mW, respectively; (b) relationship between tuning range and heating power

表 1 不同类型反射腔的性能参数

Table 1 Performance parameters of different reflection cavities

Type of reflection cavity	FWHM /nm	Reflectivity /%	Extinction ratio /dB	Tuning range /nm	Tuning efficiency / (mW•nm)
Proposed reflector	0.04	90	12	9.6	5
Silicon reflector consisting of Y-branch and microring resonator <sup>[10]</sup>	0.2	90	8	9.2	5.3
Tunable silicon Bragg reflector <sup>[7]</sup>	0.8	80	15	—	—
Inline reflector based on single microring resonator <sup>[12]</sup>	0.6	12.12	5	8	3.125

## 5 结 论

利用波长为 248 nm 的深紫外线光刻方法,并应用 CMOS 技术在 SOI 片上制作了一种基于微环谐振腔的可调谐反射腔镜。反射腔的 FSR 为 9.6 nm,反射端消光比为 12 dB,波长为 1549 nm 附近的反射率高达 90%, $Q$  值可达  $3 \times 10^4$ ,相较于同类反射腔具有更好的尖锐度。利用硅材料的热光效应,在 0~40.5 mW 范围内波长调谐范围可以达到一个 FSR。基于以上优点,该器件可用作混合硅激光器的反射腔,达到波长可调谐的目的。基于多个微环的反射腔可以进一步提高 FSR,增大调谐范围,满足未来光通信的要求,具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- Soref R. The past, present and future of silicon photonics[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6): 1678-1687.
- Rong H S, Liu A S, Jones R, *et al.* An all-silicon Raman laser[J]. Nature, 2005, 433(7023): 292-294.
- Hong Jianxun, Wan Meizheng, Chen Shuiping, *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.
- 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.
- Geng M M, Jia L X, Lei Z, *et al.* Compact four-channel reconfigurable optical add-drop multiplexer using silicon photonic wire[J]. Optics Communications, 2009, 282(17): 3477-3480.
- Xia F N, Sekaric L, Vlasov Y, *et al.* Ultracompact optical buffers on a silicon chip[J]. Nature Photonics, 2007, 16(1): 65-71.
- Giuntoni I, Gajda A, Krause M, *et al.* Tunable Bragg reflectors on silicon-on-insulator rib waveguides [J]. Optics Express, 2009, 17(21): 18518-18524.

- 8 Zilkie A J, Seddighian P, Bijlani B J, *et al.* Power-efficient III-V/silicon external cavity DBR lasers[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23456-23462.
- 9 Veerasubramanian V, Beaudin G, Giguère A, *et al.* A vertical SG-DBR based tunable hybrid silicon evanescent laser[C]. IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics, 2011: JTuI10.
- 10 Li X, Wan Y J, Hu T, *et al.* A tunable silicon ring reflector[J]. Journal of Optics, 2015, 44(1): 26-29.
- 11 Fang Q, Liow T Y, Song J F, *et al.* Suspended optical fiber-to-waveguide mode size converter for silicon photonics[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 7763-7769.
- 12 Yang S Y, Zhang Y, Grund D W, *et al.* A single adiabatic microring-based laser in 220 nm silicon-on-insulator[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 1172-1180.