

# 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关

刘毅<sup>1</sup> 仝晓刚<sup>2</sup> 于晋龙<sup>1</sup> 薛晨阳<sup>2</sup> 王文睿<sup>1</sup> 郭精忠<sup>1</sup> 王菊<sup>1</sup> 韩丙辰<sup>1</sup> 杨恩泽<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>天津大学电子信息工程学院, 天津 30072  
<sup>2</sup>中北大学仪器科学与动态测量教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要** 易于集成、高消光比是目前全光开关的研究目标。采用硅基串联双微环谐振腔的方案, 双环半径均为  $10\ \mu\text{m}$ , 理论分析认为串联双微环谐振腔可以有效改善光开关的消光比, 并在此基础上进一步研究了基于硅基串联双微环谐振腔热非线性效应全光开关的基本特性。实验中, 通过易耦合的离面耦合方法, 利用面内单光注入技术, 得到串联双微环谐振腔同谐振波长处最大陷波深度为 27 dB, 并通过调节注入光功率, 实验得到基于热非线性效应的最大开关消光比为 20.2 dB, 热非线性红移变化量为  $136.4\ \text{pm/mW}$ ; 采用面内双光注入技术, 测得开关时间分别为  $2.84\ \mu\text{s}$  和  $3.04\ \mu\text{s}$ , 并与面内单光注入测试结果进行了对比分析。实验测试结果与理论分析相符, 为高集成化、高性能光路由和光调制器提供可行的方案。

**关键词** 集成光学; 全光开关; 串联双微环谐振腔; 消光比

**中图分类号** TN629.1; TN814+.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0205006

## All-Optical Switching in Silicon-on-Insulator Serially Coupled Double-Ring Resonator Based on Thermal Nonlinear Effect

Liu Yi<sup>1</sup> Tong Xiaogang<sup>2</sup> Yu Jinlong<sup>1</sup> Xue Chenyang<sup>2</sup> Wang Wenrui<sup>1</sup>  
Guo Jingzhong<sup>1</sup> Wang Ju<sup>1</sup> Han Bingchen<sup>1</sup> Yang Enze<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

**Abstract** One of the major challenges in realizing all-optical switching is urgent demand for dense integration and high extinction ratio (ER). In this paper, all-optical switching in silicon-on-insulator (SOI) serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect is proposed. The radii of double ring resonator are both  $10\ \mu\text{m}$ . Theoretically, switching ER is improved at the same resonance wavelength of serially coupled double-ring resonator. Then, basic characteristics of all-optical switching in serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect are researched. In experiments, firstly measured by single pump injection technology with easily coupling surface grating coupler method, the highest notch of serially coupled double-ring resonator is 27 dB. And the highest ER is 20.2 dB based on thermal nonlinear effect by adjusting the power of injected light. The slope of resonant wavelength as a function of injected pump is  $136.4\ \text{pm/mW}$ . Secondly, switching time measured by two pump injection technology is  $2.84\ \mu\text{s}$  and  $3.04\ \mu\text{s}$ , respectively. The results which are in agreement with theory between single and two-pump-injection technology are compared and analyzed. Those provide efficient method for optical router and modulation with dense integration and high performance.

**Key words** integrated optics; all-optical switching; serially coupled double-ring resonator; extinction ratio

**OCIS codes** 130.4815; 190.4390; 230.3120

收稿日期: 2012-09-11; 收到修改稿日期: 2012-10-26

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603, 2012CB315704)资助课题。

作者简介: 刘毅(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事集成光学光波导器件及特性方面的研究。E-mail: liuyi28@163.com

导师简介: 于晋龙(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光纤通信系统、光微波和光纤传感等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

# 1 引 言

随着光网络的发展,光开关得到了广泛的关注。光开关按原理可分为电光、磁光和热光效应开关。电光开关<sup>[1]</sup>的优势在于超高速,是制作高速光开关的有利方案,但在波导中的电光效应较弱,而且相比之下,器件较长、体积较大;磁光开关<sup>[2]</sup>在速度上仅次于电光开关,且稳定性高,串扰小,工艺较简单,但不易集成化;而热光效应虽然在速度上优势不明显,但其器件制作简单,而且可以实现较高的消光比。相对于Ⅲ-V族混合半导体材料<sup>[3,4]</sup>,硅基光波导材料工艺简单、易于集成、成本低以及导热能力强,不仅折射率与光纤材料相近,而且制作出的平面波导器件可以很好地与光纤进行匹配。近年来,用绝缘体上硅结构(SOI)制作出硅基微环谐振腔<sup>[5,6]</sup>越来越受到国内外研究者的亲睐,此结构不仅有很大的折射率差,而且对光场具有很高的束缚性。在阈值方面,基于热非线性效应光学双稳态全光开关的最小阈值只有  $45 \mu\text{W}$ <sup>[7]</sup>;在速率方面,有基于注入氧离子 SOI 微环谐振腔的  $25 \text{ ps}$  全光开关<sup>[8]</sup> 和速率为  $0.9 \text{ Gb/s}$  的全光波长变换<sup>[9]</sup>;调制深度方面,有基于面外双光子吸收(TPA)技术,调制深度达  $94\%$ <sup>[5]</sup>、 $97\%$ <sup>[6]</sup> 的全光开关;另外,还有基于自由载流子色散(FCD)<sup>[10]</sup> 光学双稳态、背向散射特性<sup>[11]</sup>、延时特性研究<sup>[12,13]</sup> 的全光开关,以及多波长全光梳齿开关<sup>[14]</sup>、纳米腔全光开关<sup>[15]</sup>、等离子聚合物全光开关<sup>[16]</sup> 和绝缘等离子波导热光开关<sup>[17]</sup> 等。

上述基于热非线性硅基微环谐振腔全光开关方案都采用单微环谐振腔,但是由于加工工艺的局限性,实现临界耦合状态和减小硅基环形波导损耗受到了制约,为了进一步提高开关的消光比,本文采用了两个半径相同的硅基双微环串联谐振腔的方案,理论分析了硅基串联双微环改善光开关消光比的原理,实验测得双微环谐振腔陷波深度为  $27 \text{ dB}$ ,最大光开关消光比为  $20.2 \text{ dB}$ 。

## 2 串联双微环谐振腔结构及其基本特性

### 2.1 串联双微环谐振腔结构

实验采用  $10 \mu\text{m}$  半径串联双微环谐振腔,微环与直波导耦合的空气隙及双环间空气间隙都为  $100 \text{ nm}$ ,如图 1(a)所示。SOI 最上层为  $220 \text{ nm}$  厚的晶体硅,底层为硅衬底,中间为  $3 \mu\text{m}$  厚的二氧化硅缓冲层。首先采用电子束曝光技术,形成器件结构的模板,再通过感应耦合等离子体刻蚀技术和反应离子刻蚀技术,刻蚀出  $220 \text{ nm}$  厚的晶体硅层,横截面为  $450 \text{ nm} \times 220 \text{ nm}$ 。在直波导的每一个末端,采用离面耦合系统,周期为  $590 \text{ nm}$ ,如图 1(b)所示。在通信波长  $1540 \text{ nm}$  处, $1 \text{ dB}$  带宽有  $40 \text{ nm}$ ,只支持 TE 模。耦合时,将光纤与垂直方向成  $9.5^\circ$  放置,横向与纵向的调节误差为  $\pm 1 \mu\text{m}$ ,实验测得,纤对纤的插入损耗大约为  $20 \text{ dB}$ 。

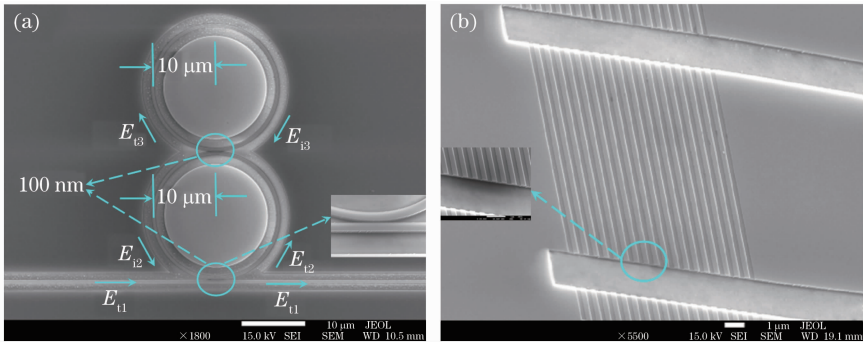


图 1 (a) 串联双微环谐振腔和(b)离面耦合系统的扫描电子显微镜图

Fig. 1 Scanning electron microscopy photographs of (a) serially coupled double-ring resonator and (b) vertical coupling system

### 2.2 串联双微环谐振腔基本特性

串联双微环谐振腔采用双端口网络的传输矩阵法进行分析,设输入为  $E_{i1}$ ,  $E_{i2}$  和  $E_{i3}$ , 输出光为  $E_{o1}$ ,  $E_{o2}$  和  $E_{o3}$ , 与直波导耦合的环为环 1, 另一个为环 2, 对应关系矩阵可表示为<sup>[18,19]</sup>:

$$\begin{pmatrix} E_{o1} \\ E_{o2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & \frac{\kappa_1 \alpha_1 \exp\left(j \frac{\theta_1}{2}\right)}{2} \\ -\kappa_1^* & \frac{t_1^* \alpha_1 \exp\left(j \frac{\theta_1}{2}\right)}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} E_{i2} \\ E_{i3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{t_2^* \alpha_1 \exp(j\frac{\theta_1}{2})}{2} & -\kappa_2^* \\ \frac{\kappa_2 \alpha_1 \exp(j\frac{\theta_1}{2})}{2} & t_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i2} \\ E_{i3} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\kappa_1, \kappa_2$  分别为直波导与环 1、环 1 与环 2 之间的耦合系数,  $t_1, t_2$  为传输系数,  $*$  为共轭复数,  $t$  和  $\kappa$  满足  $|\kappa^2| + |t^2| = 1$ ;  $E_{i3}$  和  $E_{i3}$  满足:  $E_{i3} = \alpha_2 \cdot$

$\exp(j\theta_2)E_{i3}$ , 其中  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为绕环 1 和环 2 一圈的损耗系数, 零损耗对应  $\alpha = 1$ ;  $\theta = \omega L/c$ ,  $L$  为环长,  $L = 2\pi r$ ,  $r$  为环半径,  $c$  为微环中的相速度,  $c = c_0/n_{\text{eff}}$ ,  $c_0$  为真空中光速,  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率. 假设  $E_{i1} = 1, t = t^*, \kappa = -\kappa^*$ , 且无耦合损耗, 据(1)、(2)式及  $E_{i3}$  和  $E_{i3}$  的关系, 可得到串联双微环谐振腔的传输函数<sup>[18]</sup>:

$$\frac{E_{t1}}{E_{i1}} = \frac{-t_1 \kappa_1^2 \alpha_1 \exp(j\theta_1) [\alpha_2 \exp(j\theta_2) - t_2]}{1 - t_2 \alpha_2 \exp(j\theta_2) - t_2 t_1 \alpha_1 \exp(j\theta_1) + t_1 \alpha_1 \alpha_2 \exp(j\theta_1) \exp(j\theta_2)}. \quad (3)$$

设  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, t_1 = t_2 = t$ , 得到谐振时传输能量:

$$P_{t1} = \left| \frac{E_{t1}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{\alpha^2 t^2 (1-t^2)^2 (t-\alpha)^2}{[1-at(1+t-\alpha)]^2} \approx \frac{(1-t^2)^2 (t-\alpha)^2}{(1-\alpha t)^2}. \quad (4)$$

与单环  $\frac{(t-\alpha)^2}{(1-\alpha t)^2}$  进行对比, 可以发现, 多出系数  $(1-t^2)^2$ , 说明比单环谐振腔陷波深度大, 那么在同等条件下, 双环谐振腔可以有效改善全光开关消光比.

串联双环谐振腔有效半径可以表示为 ( $r_1 \neq r_2$ )

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (5)$$

谐振条件为  $m\lambda_m = 2\pi R n_{\text{eff}}$ ,  $m$  为整数,  $\lambda_m$  为谐振波长. 自由频谱宽为

$$R_{fs} = N \cdot R_{fs1} = M \cdot R_{fs2}, \quad (6)$$

$$R_{fs} = |M - N| \frac{R_{fs1} \cdot R_{fs2}}{|R_{fs1} - R_{fs2}|}, \quad (7)$$

式中  $N, M$  为自然数或素数. 双环半径不一样时, 可以用来做大自由频谱宽度的无源滤波器; 双环半

径相同时, 自由频谱宽与单环对应的自由频谱宽一致.

当功率为  $P_p$  的抽运光注入微环谐振腔时, 吸收的能量最终会转换成热能从而导致谐振腔温度变化, 设温度变化量为  $\Delta T$ , 可以表示为<sup>[9]</sup>

$$\frac{d\Delta T}{dt} + \frac{\Delta T}{\tau_\theta} = \frac{P_p}{\rho CV}, \quad (8)$$

式中  $\tau_\theta$  是硅的热消散时间, 约为  $1 \mu\text{s}$ , 热调节的响应时间就取决于热消散时间, 因此热非线性开关的时间在微秒量级.  $\rho = 2.3 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$  为晶体硅密度,  $C = 705 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$  为热容量,  $V$  为微环的体积. 折射率与温度的变换关系为:  $\Delta n = k\Delta T$ ,  $k = 1.86 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . 因为  $k > 0$ ,  $\Delta n$  与  $\Delta T$  成正比例关系, 因此会引起透射谱的红移<sup>[10]</sup>. 由于硅的热光系数非常大, 因此只需要低的抽运功率就会有热非线性效应, 面内单光注入原理如图 2(a) 所示. 面内注入是相对于面外注入, 后者将抽运光与探测光以相互垂直方向注入到波导中, 前者抽运光与探测光同向注入.

基于硅基串联双微环谐振腔热非线性效应的双

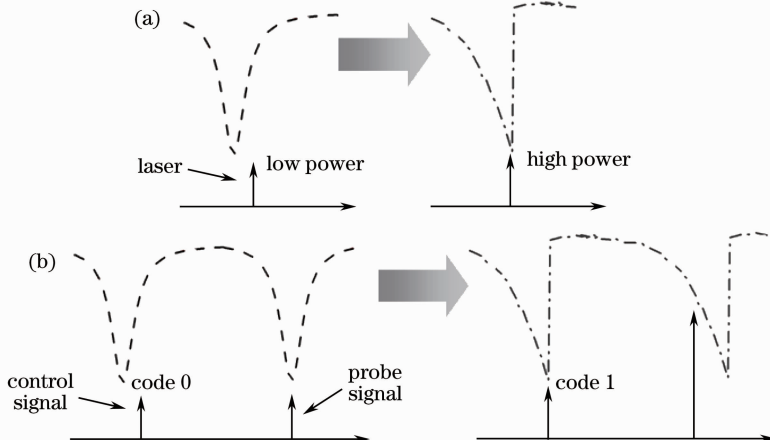


图 2 (a) 面内单光注入全光开关原理图; (b) 面内双光注入全光开关原理图

Fig. 2 Principle of (a) in-plane single pump injection and (b) in-plane two pump injection

光注入全光开关基本原理如图 2(b)所示,采用面内双光注入技术,将探测光置于第一个谐振波长处,控制光置于相邻谐振波长右侧,当控制光注入功率为低电平时,谐振谱没有变化,探测光为“0”,处于“关”状态;当控制光注入功率为“1”时,由于热非线性效应,谐振谱发生红移,探测光远离谐振波长,此时为高电平,处于“开”状态。

### 3 实验与分析

用面内单光注入实验方案,对谐振谱进行测试,实验装置如图 3 所示,其中 TLD 为安捷伦高精度可调光源(Agilent-81640A),EDFA 为掺铒光纤放大器,PC 为偏振控制器,BPF 为光带通滤波器,PWM 为光功率计。实验时,输入光功率取 0 dBm,实际注入功率大约为 -17 dBm,步进取 0.1 pm 进行扫描,得到 3 个谐振波长对应的谐振谱如图 4 所示。串联双微环的前两个谐振波长一致,陷波深度明显比第三个谐振波长深,谐振腔自由频谱宽为 8.06 nm。图 4(a)为谐振波长为 1540.4 nm 时对应的透射谱,3 dB 带宽为 0.11 nm,对应的 Q 值为 14000,精细度 F 为 73,得到 27 dB 的陷波深度。图 4(b)为谐振波长

为 1548.46 nm 时对应的透射谱,3 dB 带宽为 0.12 nm,得到 27 dB 的陷波深度,对应 Q 值为 12900,精细度 F 为 67。图 4(c)为谐振波长为 1556.52 nm 对应的透射谱,两谐振峰间隔 0.3 nm,有 10 dB 的陷波深度。根据频谱特性反推出串联双环谐振腔的耦合系数  $\kappa$  和损耗系数  $\alpha$ (假设  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, \kappa_1 = \kappa_2 = \kappa$ ),由文献[20]可以得到耦合系数、损耗与 3 dB 带宽  $\Delta\omega_{FWHM}$ 、陷波深度  $\rho$  和自由频谱宽  $R_{fs}$  的关系表示如下:

$$\kappa = \sqrt{\pi(1 + \rho)\Delta\omega_{FWHM}/R_{fs}}, \quad (9)$$

$$\alpha = \pi(1 - \rho)\Delta\omega_{FWHM}/(R_{fs}L). \quad (10)$$

综合上述参数可得耦合系数  $\kappa = 0.201$ , 损耗系数  $\alpha = 5.8$  dB/cm。

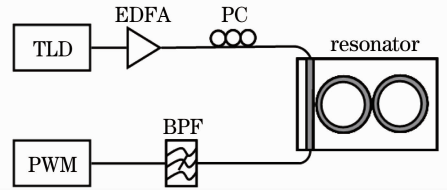


图 3 面内单光注入实验装置

Fig. 3 Experimental setup of in-plane single pump injection

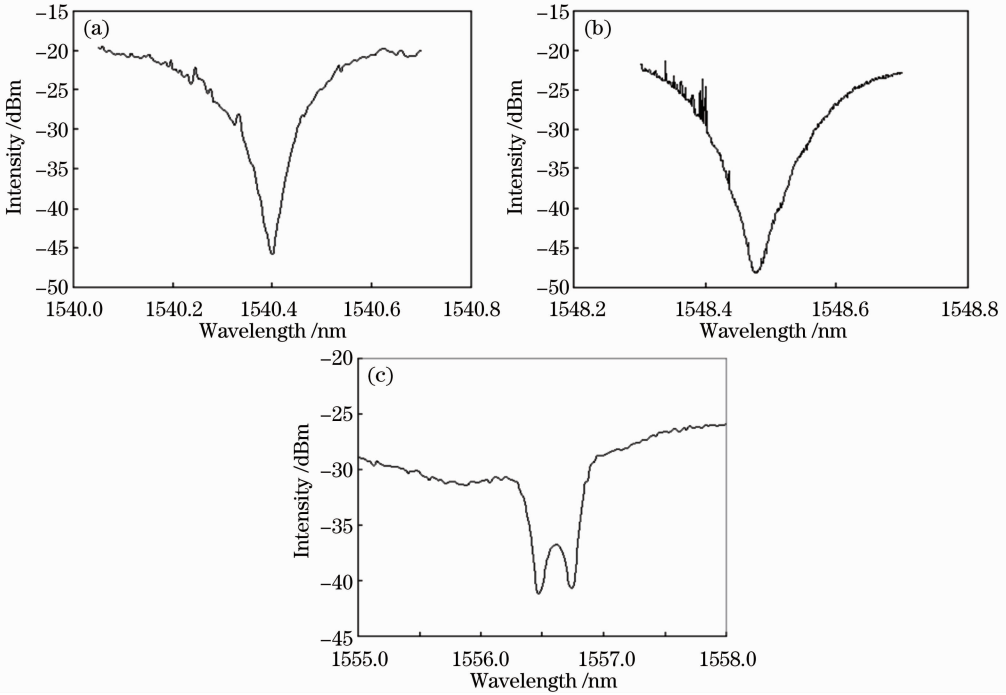


图 4 谐振波长为(a) 1540.4 nm, (b) 1548.46 nm 和(c) 1556.52 nm 时的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of resonant wavelengths at (a) 1540.4 nm, (b) 1548.46 nm and (c) 1556.52 nm respectively

同样利用面内单光注入技术,研究了谐振波长在 1540.4 nm 处的热非线性效应,在实际注入功率分别为 -9.7 dBm, -7.8 dBm, -6.8 dBm, -4.8 dBm,

-3.9 dBm, -2.8 dBm, -1.8 dBm, -0.8 dBm, 0.2 dBm, 1.2 dBm 和 2.2 dBm 情况下,扫描对应的透射谱,如图 5(a)所示,将输出功率减去输入功率

得到插入损耗图,如图 5(b)所示。分析可知,在谐振波长为 1540.4 nm 处消光比最大,对应的消光比为 20.2 dB,将输入功率转换为毫瓦值,并进行直线

拟合后得到曲线斜率为  $\Delta\lambda/\Delta P_{in} = 136.4 \text{ pm/mW}$ ,图 5(c)为红移量与实际注入功率的变化关系。

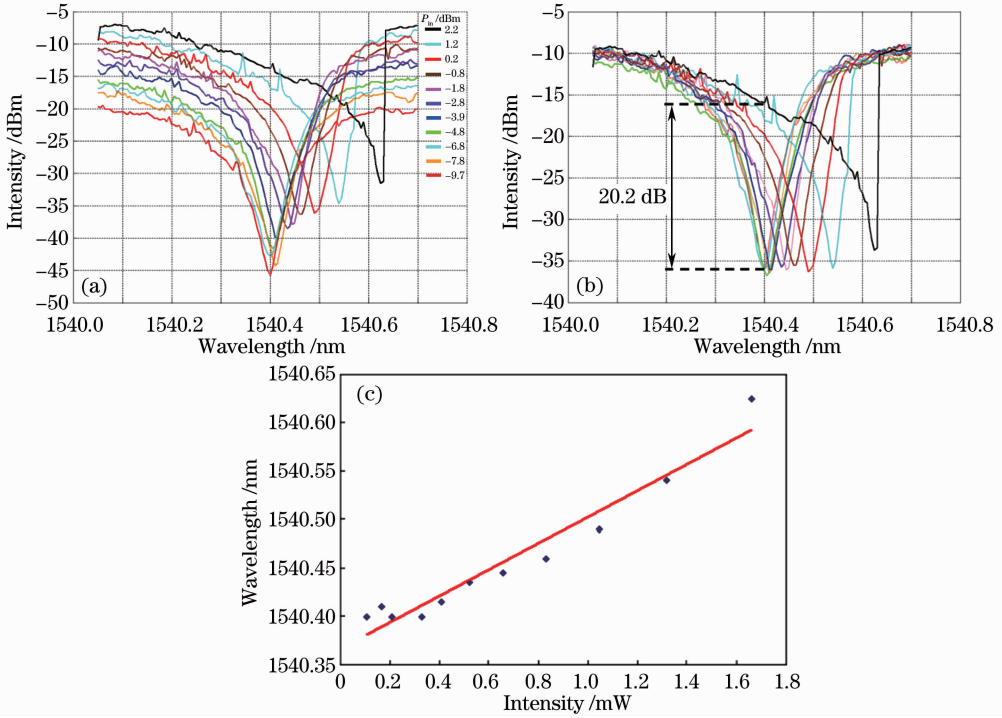


图 5 (a)不同实际注入功率下的透射谱;(b)输入与输出插入损耗图;(c)谐振波长与实际注入功率关系曲线

Fig. 5 (a) Transmission spectra with different injected pump powers; (b) insert loss between pump and probe; (c) relationship between resonant wavelength and injected pump power

为了进一步研究串联双微环全光开关的特性,搭建如图 6 所示的基于硅基串联双微环谐振腔热非线性效应的面内双光注入全光开关实验装置,一路为控制光,另一路为探测光,图中 TLD 为高精度可调光源,IM 为马赫-曾德尔强度调制器,BPF 为光带通滤波器,OSC 为示波器。

可调激光器 TLD1(安捷伦可调光源)作为控制光,用 PC1 调节控制光的偏振态后,通过马赫-曾德

尔电光强度调制器调制信号,调制以后的光信号通过可调大功率 EDFA 放大,带宽为 1 nm 的 BPF1 对准 TLD1,滤除带外放大的自发辐射噪声(ASE),然后通过调节 PC3 进入耦合器。可调激光器 TLD2 作为探测光,经过 PC2 后进入耦合器。控制光与探测光通过 1:1 耦合器同时注入到串联双微环谐振腔内,PC2 和 PC3 用来调节控制光和探测光的偏振态,以对准串联双微环谐振腔的 TE 模式。谐振腔输出信号功率小,用两级 EDFA 进行放大和两级 BPF 进行处理,BPF 中心波长对准 TLD2 对应的波长。

为了保证有足够多的抽运光能耦合进串联双微环谐振腔,控制光 TLD1 的波长应大于谐振波长 1548.46 nm,实验中取 1548.57 nm,当注入功率达到一定大小时,热非线性导致的频谱红移会使控制光接近谐振波长,同时加调制频率为 100 kHz 的方波测试开关时间,将 IM 的偏置电压置于  $V_{\pi} = 5 \text{ V}$ ,调节 PC1,使信号输出最大,如图 7(a)所示。

将探测光 TLD2 的波长置于谐振波长 1540.4 nm 处,实际注入功率为 -1.8 dBm 时,热非线性效应不

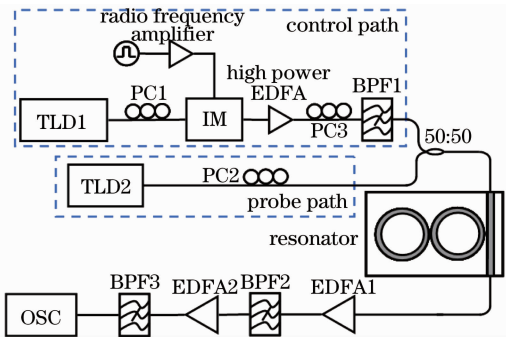


图 6 串联双微环谐振腔面内双光注入全光开关实验装置  
Fig. 6 Experimental setup of all-optical switching in serially coupled double-ring resonator with in-plane two pump injection

明显,有 1.6 dB 的消光比,如图 7(b)所示。增加控制光注入功率,调节 PC2、PC3,此时两路光都对准了谐振腔的 TE 模,使输出信号消光比最大,此时实际注入功率为 2.2 dBm,如图 7(c)所示,消光比为 6 dB。进一步测量基于硅基热非线性效应的开关速度,图 8 为输出信号上升下降沿波形图,可见,上升时间(10%~90%)为 2.84  $\mu\text{s}$ ,下降时间(10%~90%)为 3.04  $\mu\text{s}$ ,与理论值微秒量级吻合,此即为全

光开关时间。实际测量的光开关消光比最大为 6 dB,小于面内单光注入所测值 20.2 dB,主要原因是串联双微环谐振腔输出的光信号很弱,经过两级 EDFA 放大后,信噪比较低,而通过两级 1 nm 带宽的 BPF 后,只能抑制部分的带外噪声,从而导致消光比测量值偏低。如果采用窄带光滤波器及低频电滤波器,输出信号消光比可以得到改善。

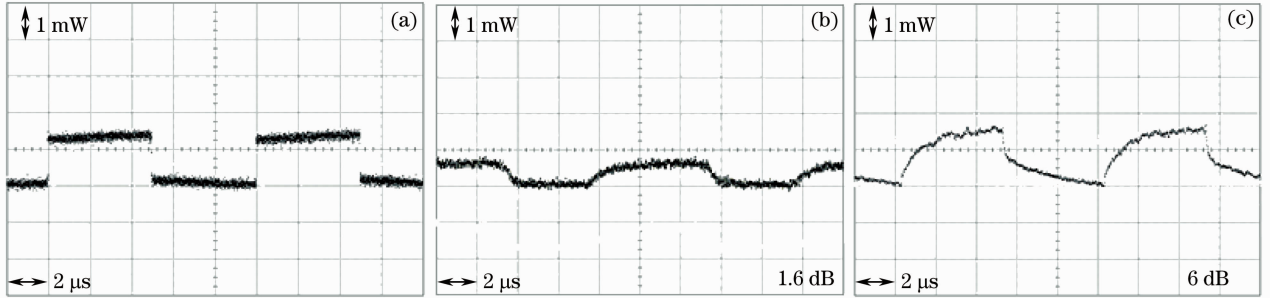


图 7 (a)调制信号;(b)注入功率-1.8 dBm 的输出信号图;(c)注入功率 2.2 dBm 的输出信号图

Fig. 7 Temporal waveforms of (a) modulation, (b) -1.8 dBm injected pump power and (c) 2.2 dBm injected power pump

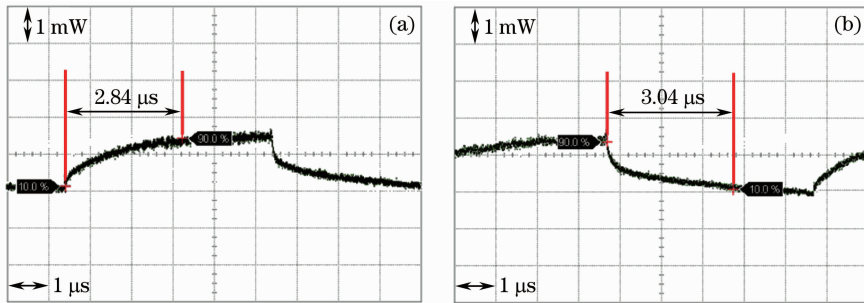


图 8 谐振腔输出信号。(a)上升时间;(b)下降时间

Fig. 8 Output waveforms of resonator. (a) Rise time; (b) fall time

## 4 结 论

采用半径相同的(10  $\mu\text{m}$ )、陷波深度为 27 dB 的硅基串联双微环谐振腔,通过离面耦合方式,在面内单光注入时,测得最大消光比高达 20.2 dB,并测试热非线性效应引起的红移量为 136.4 pm/mW。采用面内双光注入方式,测试得到上升、下降时间分别为 2.84  $\mu\text{s}$  和 3.04  $\mu\text{s}$ ,与理论热消散时间吻合,并与面内单光注入方式进行了对比分析。理论与实验结果为高性能、高集成化的光路由和光调制器提供了可行的方案。

## 参 考 文 献

1 Shi Liyong, Liu Baiyu, Ouyang Xian *et al.*. High-speed and high-voltage electrical pulse generation for electro-optical switch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1501~1504  
时利勇, 刘白玉, 欧阳嫻 等. 一种用于电光开关的高速、高压电

脉冲的产生[J]. *光子学报*, 2006, **10**(35): 1501~1504  
2 Weng Zihua, Chen Zhimin, Zhu Yun *et al.*. A micro high-speed  $1 \times 2$  magneto-optic switch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 357~361  
翁梓华, 陈智敏, 朱 贇 等. 高速微型  $1 \times 2$  磁光开关[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 357~361  
3 V. Van, T. A. Ibrahim, K. Ritter *et al.*. All-optical nonlinear switching in GaAs-AlGaAs microring resonators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(1): 74~76  
4 T. A. Ibrahim, W. Cao, Y. Kim *et al.*. All-optical switching in a laterally coupled microring resonator by carrier injection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(1): 36~38  
5 V. R. Almeida, C. A. Barrios, R. R. Panepucci *et al.*. All-optical control of light on a silicon chip [J]. *Nature*, 2004, **431**(7012): 1081~1084  
6 V. R. Almeida, C. A. Barrios, R. R. Panepucci *et al.*. All-optical switching on a silicon chip[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(24): 2867~2869  
7 V. R. Almeida, M. Lipson. Optical bistability on a silicon chip [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(24): 2387~2389  
8 M. Waldow, T. Plötzing, M. Gottheil *et al.*. 25 ps all-optical switching in oxygen implanted silicon-on-insulator microring

- resonator[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7693~7702
- 9 Q. Xu, V. R. Almeida, M. Lipson. Micrometer-scale all-optical wavelength converter on silicon[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20): 2733~2735
- 10 Q. Xu, M. Lipson. Carrier-induced optical bistability in silicon ring resonators[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **3**(31): 341~343
- 11 Ma Huilian, Bao Huiqiang, Jin Zhonghe. Backscattering in a silica optical waveguide ring resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 105~109  
马慧莲, 鲍慧强, 金仲和. 二氧化硅光波导环形谐振腔的背向散射特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 105~109
- 12 Zhang Xiaobei, Ding Yunhong, Zhang Xinliang *et al.*. Analytical study of spectral and delaying characteristics of lossy series cascaded dual microring resonators[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 105~109  
张小贝, 丁运鸿, 张新亮等. 有损串联双微环谐振器谱线与延迟特性的解析研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 105~109
- 13 Han Xiuyou, 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
- 14 B. G. Lee, A. Biberman, Po Dong *et al.*. All-optical comb switch for multiwavelength message routing in silicon photonic networks [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(10): 767~769
- 15 M. Belotti, M. Galli, D. Gerace *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator photonic wire nano-cavities [J]. *Opt. Express*, 2010, **2**(18): 1450~1461
- 16 D. Perron, M. Wu, C. Horvath *et al.*. All-plasmonic switching based on thermal nonlinearity in a polymer plasmonic microring resonator[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(14): 2731~2733
- 17 O. Tsilipakos, E. E. Kriezis, S. I. Bozhevolnyi. Thermo-optic microring resonator switching elements made of dielectric-loaded plasmonic waveguides[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **109**(7): 073111
- 18 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Filtering characteristics of series-coupled double-ring optical microresonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1191~1195  
杨建义, 江晓清, 王明华. 串联双环光微谐振器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1191~1195
- 19 D. G. Rabus. *Integrated Ring Resonators* [M]. Berlin: Springer, 2007. 4~21
- 20 C. Manolatu, M. Lipson. All-optical silicon modulators based on carrier injection by two-photon absorption[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(3): 1433~1439

栏目编辑:张腾