

文章编号: 0253-2239(2010)04-0965-06

# 具有皮秒量级开关窗口的光波导微环谐振器

洪建勋<sup>1</sup> 万美政<sup>1</sup> 陈水平<sup>2</sup> 周立民<sup>3</sup> 李成军<sup>1</sup> 葛 华<sup>1</sup> 吴友宇<sup>1</sup> 陈 伟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070; <sup>2</sup> 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070)  
<sup>3</sup> 武汉工程大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430073

**摘要** 提出一种可以产生皮秒量级开关窗口的光波导微环谐振器, 对其设计与性能进行了分析和研究。采用多环层叠结构来设计微环谐振器的传输特性曲线, 利用特性曲线的非线性特征, 在正弦电压的作用下改变材料的折射率可获得一个较窄的开关窗口。采用耦合矩阵理论研究了系统的调制特性以及开关窗口特性, 分析了开关窗口宽度和消光比与驱动电压的关系。研究结果表明, 10 GHz 驱动电压情况下, 开关窗口宽度、消光比和插入损耗可以分别优于 10 ps, 40 dB 和 1 dB。只需要电的控制信号而无需高质量的光控制脉冲, 且具有工作速率高、结构简单、消光比高、传输损耗小和工作电压低等特点。

**关键词** 光通信; 微环谐振器; 开关窗口; 皮秒; 消光比

中图分类号 TN252; TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.0965

## Optical Waveguide Microring Resonator with Picosecond Order Switching Window

Hong Jianxun<sup>1</sup> Wan Meizheng<sup>1</sup> Chen Shuiping<sup>2</sup> Zhou Limin<sup>3</sup> Li Chengjun<sup>1</sup>  
Ge Hua<sup>1</sup> Wu Youyu<sup>1</sup> Chen Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

<sup>2</sup> School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology,  
Wuhan, Hubei 430070, China

<sup>3</sup> School of Material Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430073, China

**Abstract** An optical waveguide microring resonator for picosecond switching window generation is reported. The design and simulation are presented. The multiple-ring-cascaded structure is adopted to design the transmission characteristic curve of the microring resonator. Utilizing the nonlinearity of the transmission characteristic curve, a narrow switching window can be generated with a sine-wave electrical control signal to shift the refractive index of the material. The modulation characteristics and switching window are researched with coupling matrix formalism. The dependences of the width and extinction ratio of the switching window on the driving voltage are analyzed. Results show that the width, extinction ratio and the insertion loss of the switching window driven by 10 GHz electrical voltage are better than 10 ps, 40 dB and 1 dB, respectively. The proposed picosecond switching window generation technology only requires electrical control signal instead of high-quality optical control pulse. It possesses a high operation speed with simple structure, low transmission loss, high extinction ratio and low operation voltage.

**Key words** optical communications; microring resonator; switching window; picosecond; extinction ratio

## 1 引 言

具有皮秒量级宽度的开关窗口在光时分复用<sup>[1]</sup>、光时域分插复用<sup>[2]</sup>、光脉冲的产生<sup>[3]</sup>以及光分

组头的串并转换<sup>[4]</sup>等方面具有重要的应用价值。产生时域窄开关窗口的方法很多, 一般都是利用非线性的物理现象来实现的。常见的有: 基于 SOA 非

收稿日期: 2009-03-21; 收到修改稿日期: 2009-05-27

基金项目: 武汉市青年晨光计划项目(200750731271)资助课题。

作者简介: 洪建勋(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光通信、导波光学与光波导等方面的研究。

E-mail: honjx@126.com

线性增益特性<sup>[5]</sup>或交叉相位调制特性的方法<sup>[6]</sup>、基于电吸收调制器的非线性增益特性的方法<sup>[7]</sup>以及基于非线性光学环路镜的方法<sup>[8]</sup>。以上提及的几种处理方法中<sup>[5,6,8]</sup>,一般都需要一个高质量的光控制脉冲或需要采用干涉仪结构。微环谐振器具有极好的波长选择性,有较宽的自由频谱范围和较高的消光比,在光器件领域得到了广泛的应用<sup>[9~12]</sup>, Ghisa 等<sup>[13]</sup>提出采用微环谐振器的非线性特性进行光脉冲波形重整。本文提出采用光波导微环谐振器实现皮秒量级开关窗口,利用微型环谐振器的结构灵活性和良好的可设计性,采用多环层叠结构合理设计微环谐振器的特性曲线,假定微环谐振器采用电光聚合物材料制备<sup>[14]</sup>,利用特性曲线的非线性特征,在电控制信号的作用下改变材料的折射率获得一个较窄的时域开关窗口。采用耦合矩阵理论研究微型环谐振器的调制特性,分析开关窗口的宽度和消光

比及其与驱动电压的关系。

## 2 耦合矩阵理论

由  $N$  个环层叠耦合组成的微环谐振器如图 1 所示,设第  $n$  个环的半径为  $R_n$ ,令  $a_n, b_n, a'_n$  和  $b'_n$  为第  $n$  个环中的电场幅度。根据模式耦合理论两个波导之间的耦合可用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} b'_n \\ b_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & \kappa \\ -\kappa^* & t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_n \\ a_{n+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $t$  为直通耦合比,  $\kappa$  为交叉耦合比,可分别表示为

$$t = \cos(\kappa L), \quad \kappa = -i \sin(\kappa L), \quad (2)$$

式中  $L$  为耦合区的长度;  $\kappa$  为耦合系数,与两个波导中的场分布有关,其表达形式许多教科书已给出<sup>[15]</sup>,由(2)式可知,  $t$  和  $\kappa$  满足关系式  $|t|^2 + |\kappa|^2 = 1$ 。

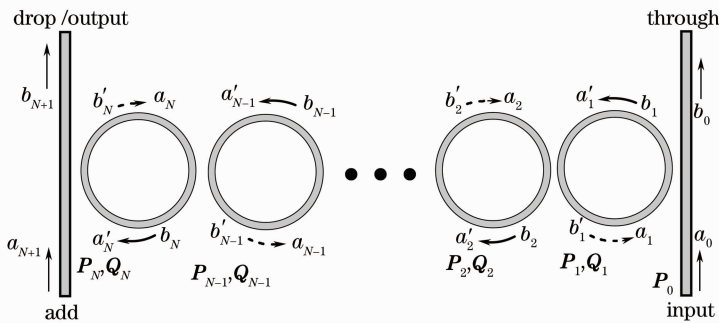


图 1 多环层叠微环谐振器

Fig. 1 Schematic of a multiple-ring-cascaded microring resonator

根据(1)式可得第  $n$  个环和第  $n+1$  个环中场幅度之间的关系为

$$b'_n = t a'_n + \kappa a_{n+1}, \quad b_{n+1} = -\kappa^* a'_n + t^* a_{n+1}, \quad (3)$$

(3)式可变换为

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= \frac{1}{\kappa} (-t a'_n + b'_n), \\ b_{n+1} &= \frac{1}{\kappa} [- (|t|^2 + |\kappa|^2) a'_n + t^* b'_n], \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式可以写成矩阵的形式,表示为

$$\begin{bmatrix} a_{n+1} \\ b_{n+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\kappa} \begin{bmatrix} -t & 1 \\ -1 & t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

矩阵  $\mathbf{P}$  描述了耦合区的耦合情况,可写为

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\kappa} \begin{bmatrix} -t & 1 \\ -1 & t^* \end{bmatrix}. \quad (6)$$

光信号在环中传输时,会经历相位的变化,而且还存在功率损耗,故有

$$a'_n = \exp(-i\phi_n) b_n, \quad b'_n = \exp(-i\phi_n) a_n. \quad (7)$$

同理,(7)式也可以写成矩阵的形式,表示为

$$\begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-i\phi_n) \\ \exp(i\phi_n) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

矩阵  $\mathbf{Q}$  描述了相位变化和功率衰减,可写为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-i\phi_n) \\ \exp(i\phi_n) & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中  $\phi_n$  的表示形式为

$$\phi_n = \frac{1}{2} (\theta - i\alpha_L L_n), \quad (10)$$

式中  $L_n$  为第  $n$  环的周长,  $\alpha_L$  为单位长度上的衰减,  $\theta$  为光在环中传输一周产生的相位差,  $\theta$  可表示为

$$\theta = \frac{2\pi n_0 L_n}{\lambda}, \quad (11)$$

式中  $n_0$  为环的材料折射率,  $\lambda$  为真空中的光波长。这里假设有效折射率近似等于折射率<sup>[10]</sup>。

由(5)和(8)式可得

$$\begin{bmatrix} a_{n+1} \\ b_{n+1} \end{bmatrix} = \mathbf{P} \mathbf{Q} \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix}, \quad (12)$$

因此,对  $N$  环层叠微环谐振器反复使用(12)式可以得到

$$\begin{bmatrix} a_{N+1} \\ b_{N+1} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_N \mathbf{Q}_N \mathbf{P}_{N-1} \mathbf{Q}_{N-1} \cdots \mathbf{P}_2 \mathbf{Q}_2 \mathbf{P}_1 \mathbf{Q}_1 \mathbf{P}_0 \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中  $a_{N+1}$  为上路端口的场量。令  $a_{N+1} = 0$ , 根据(13)式可得传输函数为

$$\begin{aligned} T_{\text{thr}} &= \left| \frac{b_0}{a_0} \right|^2 = \left| \frac{A}{B} \right|^2, \\ T_{\text{drop}} &= \left| \frac{b_{N+1}}{a_0} \right|^2 = \left| C - \frac{AD}{B} \right|^2. \end{aligned} \quad (14)$$

### 3 系统结构与原理

产生开关窗口的方案如图 2 所示,正弦电控制信号作用在微环谐振器(microring resonator, MRR)的电极上,改变微环谐振器的材料折射率,产生开关窗口。

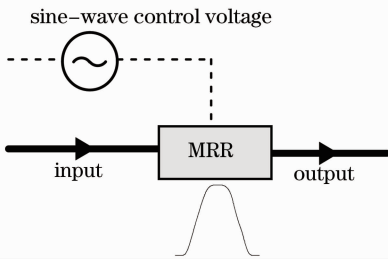


图 2 开关窗口的产生

Fig. 2 Generation of the switching window

采用三环层叠结构来设计微环谐振器,因为多环结构与单环结构相比具有更灵活的可设计性和较大的折射率调谐性;三环层叠结构能减小微环谐振器的特性曲线的边翼<sup>[13,16]</sup>,增强非线性特性,同时使谐振区得到一定的展宽。微环谐振器的结构如图 3 所示,其中输出输入直波导完全相同,即有  $\mathbf{P}_3 = \mathbf{P}_0$ 。

由(11)和(14)式可知,微环谐振器的输出功率是折射率的函数。假定制备微环谐振器的材料具有

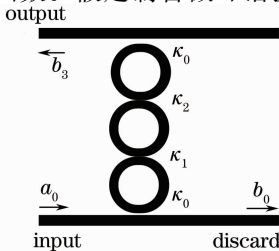


图 3 微环谐振器的结构

Fig. 3 Structure of the proposed microring resonator

电光效应,则在正弦电场的作用下折射率将产生正弦规律的扰动,利用微环谐振器的传输函数的非线性特性可获得时域开关窗口。由于微环谐振器的传输特性是非线性的,所以开关窗口的宽度远小于正弦控制信号的宽度。

## 4 结果与讨论

### 4.1 微环谐振器的调制特性

Emelett 分析了基于半导体电光材料的微环谐振器型光开关的性能<sup>[10]</sup>,研究中我们考虑采用电光聚合物材料,电光聚合物通常具有电光系数大、介电常数小、易于加工集成、成本低廉等特点<sup>[17]</sup>,Y. Enami 等报道了电光系数可达到 100 pm/V 以上的交联型电光聚合物 PMMA-AMA/BMI/AJC146<sup>[18]</sup>。根据线性电光效应原理,折射率改变量与外加电场之间的关系为

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_0^3 r_{33} E, \quad (15)$$

式中  $r_{33}$  为材料的电光系数, $E$  为电压  $V$  在材料中产生的电场。电光系数不同,产生相同的折射率改变量所需的电压不同。根据(14)和(15)式可以得到输出光强与电压的关系,即其电压调制特性,进而分析开关窗口的特性。

设电光系数为 100 pm/V,两个驱动电极之间的距离为 3  $\mu\text{m}$ 。如图 3 所示,取环的半径为 50  $\mu\text{m}$ ,交叉耦合比  $\kappa_0 = -0.4i, \kappa_1 = \kappa_2 = -0.08i$ ,材料损耗为 1 dB/cm,折射率为 1.643,光波长为 1.55  $\mu\text{m}$ 。聚合物的折射率差通常较小,为了保证较小的弯曲损耗,所以选择了较大的环半径;通过合理选择谐振器的波导间距等结构常数可以获得所需交叉耦合比。目前的半导体加工工艺完全能够处理 1  $\mu\text{m}$  甚至更小尺寸的加工要求,因此,图 3 所示微环谐振器可以采用半导体光刻、刻蚀等工艺来制备。

根据以上参数计算得到微环谐振器的电压调制特性如图 4 所示,其中图 4(a)是图 4(b)的峰值放大图。

图 4 中纵坐标表示归一化光功率,其中图 4(a)的纵坐标无量纲,图 4(b)的纵坐标的单位取为 dB。图 4 中同时给出了相同参数的单环和双环谐振器的电压调制特性曲线,显然,三环层叠谐振器的电压调制特性曲线具有较高的消光比和更陡峭的边翼,陡峭的边翼可以确保获得较窄的开关窗口,利用曲线 ABC 段的非线性特性可以获得一个较窄的时域开关窗口。

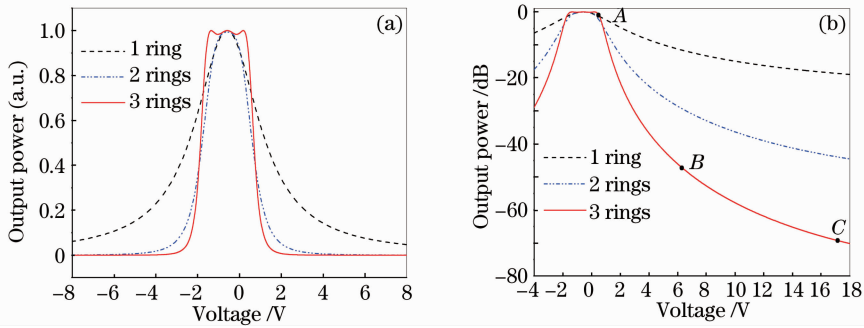


图 4 微环谐振器的调制特性。(a)纵坐标无量纲;(b)纵坐标的单位为 dB

Fig. 4 Modulation characteristics of the proposed microring resonator. (a) vertical coordinate unit is arbitrary; (b) vertical coordinate unit is dB

## 4.2 开关窗口特性

微环谐振器的材料折射率在正弦电场的作用下发生扰动,产生正弦电场的电压施加在器件的两个电极上,驱动电压的形式可表示为

$$V(t) = V_b + V_m \sin(2\pi ft + \phi_0), \quad (16)$$

式中  $V_b$  为直流偏置电压,  $V_m$  为正弦电压的幅度,  $f$  为正弦电压的频率,  $\phi_0$  为初始相位,  $t$  为时间。

取  $V_b, V_m$  分别为 4.5 和 4 V, 设频率  $f$  为 10 GHz, 计算得到开关窗口如图 5 所示, 开关窗口的半高全宽 (FWHM) 为 10.9 ps, 消光比达到 38.9 dB, 显然能够适应速率为 40 Gb/s 的光信号的处理。若频率为 40 GHz, 则开关窗口的 FWHM 可达到 2.7 ps, 可以适应速率为 160 Gb/s 的光信号的处理。

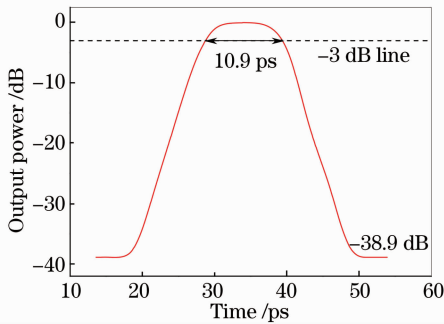


图 5 微环谐振器的开关窗口

Fig. 5 Switching windows of the proposed microring resonator

开关窗口的宽度与偏置电压  $V_b$  和电压幅度  $V_m$  有关, 不同偏置电压和电压幅度时的开关窗口宽度如图 6 所示。由图 6 可知, 随着电压幅度的增大, 开关窗口宽度明显变小; 相同电压幅度时, 随着偏置电压的增大, 开关窗口宽度增大, 即开关窗口变宽。偏置电压较小时, 即偏置点位于图 4 中的 AB 段时, 开关窗口宽度随电压幅度的变化非常明显, 较小的电压幅度就可以获得较窄的开关窗口, 因为 AB 段特性曲线的非线性特性较强; 偏置电压较大时, 即偏置

点位于图 4 中的 BC 段时, 开关窗口宽度随电压幅度的变化缓慢一些, 为了获得较窄的开关窗口, 必须采用较大的电压幅度, 因为 BC 段特性曲线的非线性特性相对较差。

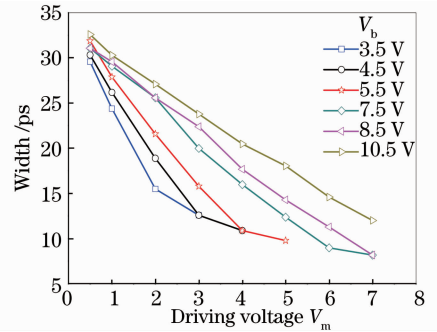


图 6 开关窗口宽度与驱动电压的关系

Fig. 6 Width of the generated switching window versus different driving voltages

不同偏置电压和电压幅度时开关窗口的消光比如图 7 所示。由图可知, 随着电压幅度的增大, 开关窗口的消光比增大; 随着偏置电压的增大, 开关窗口的消光比减小。当电压幅度很小时, 难以提高消光比; 当偏置电压很大时, 消光比较小, 为获得大的消光比, 必须采用很大的电压幅度; 当偏置电压适中,

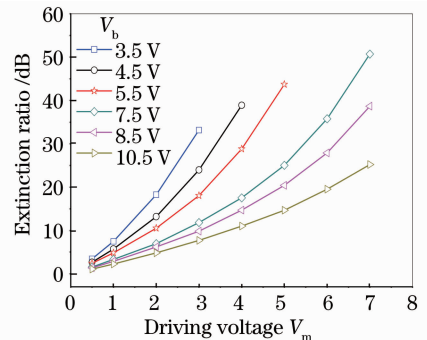


图 7 开关窗口消光比与驱动电压的关系

Fig. 7 Extinction ratio of the generated switching window versus different driving voltages

即偏置点位于图 4 中的  $B$  点附近时, 消光比受偏置电压的影响明显, 且容易获得较高的消光比。

另外, 从图 4 可以看出, 当偏置电压很大时, 由开关窗口引入的附加插入损耗会很大, 输出光功率小。为了获得较好的性能和较低的功耗, 应综合考虑开关窗口宽度、消光比和插入损耗来确定驱动电压。一般来说, 偏置点应设置在图 4 所示  $B$  点附近, 电压幅度取值应使得驱动电压峰值处于特性曲线  $AB$  段的最陡峭部分。如取  $V_b, V_m$  分别为 5.5 V 和 5 V, 则开关窗口宽度为 9.8 ps, 消光比为 43.7 dB, 开关窗口峰值处的插入损耗约 1 dB。若电压频率为 40 GHz, 则开关窗口的 FWHM 可小于 3 ps, 消光比优于 40 dB, 可以用于  $4 \times 40$  Gb/s 的光脉冲信号的产生<sup>[3]</sup>。

可见, 由于微环谐振器的传输特性具有较强的非线性特性, 所以能够获得宽度比正弦驱动电压的宽度小得多的时域开关窗口。为了获得理想的宽度和消光比应该将驱动电压的工作范围选择在特性曲线的非线性最明显的区段, 一般该区段位于陡峭的边翼附近, 这样还能够获得很低的插入损耗并降低工作电压的幅度。微环谐振器具有灵活的结构, 因此可以通过合理的结构来设计其传输特性曲线。

若将驱动电压偏置点设置在图 4 所示的  $A$  附近的平顶区段, 则利用驱动电压的正半周可以产生一个与图 5 所示开关窗口互补的开关窗口, 两个互补的开关窗口可以完成光时分复用中的 Add/Drop 功能。另外, 利用微环谐振器的直通端口(Through port)也可以产生两个互补的开关窗口, 此时可以同时采用多环层叠结构和多级环级联结构来设计谐振器的传输特性曲线<sup>[19]</sup>。

## 5 结 论

提出了一种可以产生皮秒量级开关窗口的光波导微环谐振器, 采用多环层叠结构来优化微环谐振器的传输特性曲线, 在正弦电压的控制下可获得较窄的时域开关窗口。采用耦合矩阵方法分析了微环谐振器的电压调制特性, 研究了开关窗口的特性及其与驱动电压的关系。结果显示采用较低的驱动电压幅度, 便可以获得皮秒量级的开关窗口, 且具有较高的消光比和较低的插入损耗, 能适应高速时分复用光信号的处理。该方法具有无需高质量的光控制脉冲, 开关窗口窄, 消光比高, 传输损耗小, 结构简单灵活, 工作电压低等特点, 可应用于光时分复用、光分插复用、光脉冲的产生、光分组头串并转换等。

## 参 考 文 献

- 1 Chou Hsufeng, Chiu Yijen, Wang Wei *et al.*. Compact 160-Gb/s demultiplexer using a single-stage electrically gated electroabsorption modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10): 1458~1460
- 2 Liu Xianning, Ye Peida. An EAM-based optical add-drop multiplexer in  $4 \times 10$  Gbit/s OTDM systems[J]. *High Technol. Lett.*, 2000, **10**(9): 27~31  
刘贤炳, 叶培大.  $4 \times 10$  Gbit/s 光时分复用(OTDM)系统中基于电吸收调制器(EAM)的光分插复用器[J]. 高技术通讯, 2000, **10**(9): 27~31
- 3 Chou Hsufeng, Chiu Yijen, J. E. Bowers. Standing-wave enhanced electroabsorption modulator for 40-GHz optical pulse generation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2): 215~217
- 4 R. Takahashi, H. Suzuki. 1-Tb/s 16-b all-optical serial-to-parallel conversion using a surface-reflection optical switch [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2): 287~289
- 5 C. Schubert, S. Diez, J. Berger *et al.*. 160-Gb/s all-optical demultiplexing using a gain-transparent ultrafast-nonlinear interferometer (GT-UNI) [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 475~477
- 6 S. Nakamura, Y. Ueno, K. Tajima *et al.*. Demultiplexing of 168-Gb/s data pulses with a hybrid-integrated symmetric Mach-Zehnder all-optical switch [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(4): 425~427
- 7 Chou Hsufeng, J. E. Bowers, D. J. Blumenthal. Compact 160-Gb/s add-drop multiplexer with a 40-Gb/s base rate using electroabsorption modulators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6): 1564~1566
- 8 Yang Yanfu, Lou Caiyun, Zhao Xiaofan *et al.*. Demultiplexing from 160 Gb/s to 10 Gb/s using nonlinear optical loop mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 611~616  
杨彦甫, 娄采云, 赵晓凡等. 利用非线性光纤环镜 160~10 Gb/s 解时分复用[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 611~616
- 9 Zhang Xiaobei, Huang Dexiu, Hong Wei *et al.*. Transfer matrix method for analyzing transmission characteristics of microring resonator arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1585~1592  
张小贝, 黄德修, 洪伟等. 传输矩阵法分析微环谐振器阵列传输特性[J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1585~1592
- 10 S. J. Emelett, R. Soref. Design and simulation of silicon microring optical routing switches [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1800~1807
- 11 Xu Ou, Lu Shaohua, Dong Xiaowei *et al.*. Properties analysis for reflection-type filter composed of microring resonator array and Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1443~1448  
许鸥, 鲁韶华, 董小伟等. 基于微环谐振器阵列与马赫-曾德尔干涉仪的反射型滤波器性能分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1443~1448
- 12 Li Weibin, Sun Junqiang. Analysis of characteristics of the interleaver based on a double-coupler resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1191~1194  
李卫彬, 孙军强. 一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1191~1194
- 13 L. Ghisa, Y. Dumeige, N. Nguyen Thi Kim *et al.*. Performances of a fully integrated all-optical pulse reshaper based on cascaded coupled nonlinear microring resonators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(9): 2417~2426
- 14 Kong Guangming, E. Shulin, Deng Wenyan *et al.*. Study on polymer double-ring resonant filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 134~138  
孔光明, 鄂书林, 邓文渊等. 聚合物双环谐振滤波器的研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 134~138

- 15 Wu Chongqing. Theory of Optical Waveguides [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 139~147  
吴重庆. 光波导理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 139~147
- 16 B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus *et al.*. Microring resonator channel dropping filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 998~1005
- 17 Y. Enami, D. Mathine, C. T. Derose *et al.*. Hybrid cross-linkable polymer/sol-gel waveguide modulators with 0.65 V half wave voltage at 1550 nm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(9): 093505
- 18 Y. Enami, C. T. Derose, D. Mathine *et al.*. Hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators with exceptionally large electro-optic coefficients [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(3): 180~185
- 19 Hong Jianxun, Li Chengjun, Zhou Jianxin *et al.*. Design and simulation of microring resonators for time-domain optical add-drop multiplexing [C]. *SPIE*, 2008, **7134**: 713447