

doi: 10.3788/gzxb20144305.0523004

基于 Kerr 效应的微环谐振腔延时器件

高磊, 王涛

(华中科技大学 国家光电实验室, 武汉 430074)

摘 要:对基于光学 Kerr 效应的微环谐振腔延时器件进行了研究. 采用耦合模式理论计算了波导与微环谐振腔间的耦合系数, 给出了所研究器件的材料及各层组分, 提出不同阶数微环的情况下延时数值的控制方法. 结果表明: 微环谐振腔半径为 $300\ \mu\text{m}$, 波导截面尺寸为 $450 \times 1\ 000\ \text{nm}^2$, 在小于 $\pm 5\ \text{ps}$ 抖动的条件下, 每个通道达到超过 $130\ \text{ps}$ 的延时数值, 同时延时带宽达 $20\ \text{GHz}$, 自由光谱范围达 $50\ \text{GHz}$, 工作波段在 $1\ 550\ \text{nm}$ 附近, 满足密集波分复用系统的要求. 整个结构全光控制, 且能耗不超过 $0.8\ \text{dBm}$, 响应速度达到 ps 量级, 体积不超过 $3\ \text{mm}^3$, 便于集成, 满足多信道光学延时的要求, 为全光通信网络中延时线的研究提供了参考.

关键词:集成光学; 微环谐振腔; 光学 Kerr 效应; 延时线; 高密度波分多路复用

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0523004-5

Time Delay Characteristics of Microring Resonator Device Based on Optical Kerr Effect

GAO Lei, WANG Tao

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The time delay characteristics of microring resonator device based on optical Kerr effect were studied. The coupling coefficient was calculated by the coupled mode theory. The designed parameters were introduced including the material and component. The radius of microring was $300\ \mu\text{m}$. The sectional dimension was $400 \times 1\ 000\ \text{nm}^2$. The controlling methods of time delay was presented. The motivation was large time delay value as much as possible on the condition of less than $\pm 5\ \text{ps}$ ripple. The results show that the delay time is more than $130\ \text{ps}$; compensating bandwidth is about $20\ \text{GHz}$; free spectral range is $50\ \text{GHz}$; the working wavelength which is $1\ 550\ \text{nm}$ satisfies the demand of dense wavelength division multiplexing system. The energy consumption is less than $0.8\ \text{dBm}$. The fast operating speed is ps order and small capacity which is less than $3\ \text{mm}^2$ is great advantages for the device. The devices provide references for the delay lines in all optical communication networks.

Key words: Integrated optics; Microring resonator; Time delay; Optical Kerr effect; Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

OCIS Codes: 230.1150; 230.3120; 230.4320

0 引言

微环谐振腔在光子集成工艺中具有结构紧凑、高度集成^[1]的特点, 可以构成不同类型的光学器件, 如滤波器、光开关以及光分差复用等, 在全光通信网络中^[2-3]有着极其重要的作用和应用前景. 实际应用中

可以通过先进的集成工艺将整个延时器件制备于芯片上, 与光源、探测器等其他器件集成, 有利于减小系统体积.

基于微环谐振腔的光学延时线已经成为近年来全光通信网络的研究热点之一. 微环谐振腔做光学延时线最早由加州理工大学的 Yariv 在 1999 年提出^[4], 随

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61376055)和国家基础研究发展计划(No. 2010CB923204)资助

第一作者: 高磊(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微环谐振腔. Email: m201172939@hust.edu.cn

导师(通讯作者): 王涛(1961—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光子晶体与全光开关. Email: wangtao@hust.edu.cn

收稿日期: 2013-09-05; 录用日期: 2013-11-07

<http://www.photon.ac.cn>

后为了实现对于延时量的连续可控调制,2004年, Maleki 等人提出一种可调谐延时的双微环结构^[5]; 2005年, Leimeng Zhuang 提出了树形结构的级联微环结构从而获得不同的延时量大小^[6]; 2010年9月, Jaime 等人利用热光效应在基于 SOI 材料的微环上改变微环的延时量大小以及谐振频率^[7], 在 10 GHz 带宽内实现 135 ps 的延时调谐范围. 然而采用加电加热等方法的延时器件在未来全光信号网络的使用中较为不便, 功耗以及速度都有一定的缺陷. 因此需考虑在完全光控的条件下, 尽量减小延时器件的功耗和损耗, 同时使其适用于全光网络.

本文介绍了基于光学 Kerr 效应的微环谐振腔延时器件, 对级联微环延时的机理^[8-9]与微环相移的改变进行分析, 给出了器件的结构参量以及具体调节方法, 不仅满足了多信道延时的要求, 同时使得延时量在一定范围内可调.

1 理论分析

微环谐振腔可使光波在微环内多次传输从而对光波产生延时作用, 可用较小的体积实现较大的延时, 利于微纳集成, 在延时设计中有着极为重要的作用. 所以设计需要在较小抖动的条件下, 达到较大的延时数值, 同时延时带宽满足高密度波分多路复用 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) 系统的要求.

1.1 微环谐振腔的延时计算

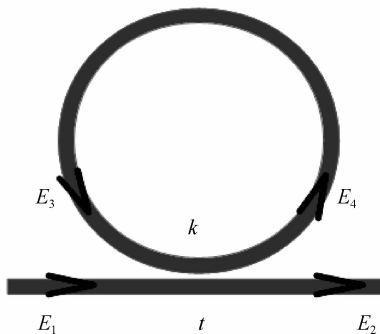
由于微环谐振腔对于特定频率的光波存在延时效应, 因此可以对 DWDM 系统中各个通道传输的光波进行延时处理.

如图 1(a), 光波从直波导左端输入, 场强为 E_1 , 部分光波经耦合进入微环谐振腔, 光场为 E_4 , 经微环运行后场强为 E_3 的光波再次进入直波导. 经直波导右端输出的光场为 E_2 . 设 t 和 k 分别是微环谐振腔的透射系数和耦合系数, 满足 $t^2 + k^2 = 1$, 并且设 t 和 k 与波长无关. 则光场之间的关系为

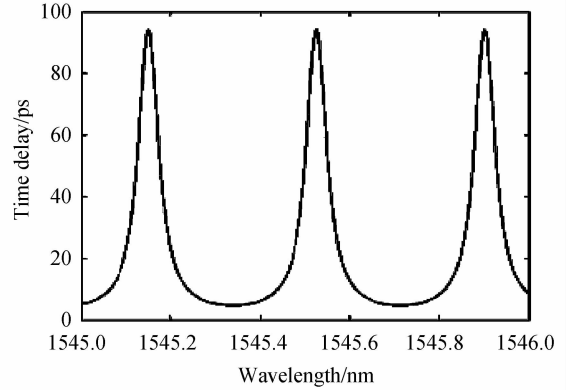
$$E_2 = tE_1 + ikE_3 \quad (1)$$

$$E_4 = tE_3 + ikE_1 \quad (2)$$

$$E_3 = a \exp(i\varphi) E_4 \quad (3)$$



(a) Time delay model



(b) Single microring time delay

图 1 微环谐振腔延时计算

Fig. 1 Time delay calculation of microring

式中 φ 为环路相位变化, $a = \exp(-\alpha L)$ 为损耗因子. 可以得出

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{t - a \exp(i\varphi)}{1 - at \exp(i\varphi)} \quad (4)$$

输出光相移为

$$\Phi = \arctan \left[\frac{ak^2 \sin \varphi}{t(1+a^2) - a(t^2+1) \cos \varphi} \right] \quad (5)$$

为简化设 $a = \exp(-\alpha L)$ 为 1, 则

$$\Phi = \arctan \left[\frac{k^2 \sin \varphi}{2t - (t^2+1) \cos \varphi} \right] \quad (6)$$

相位对于波长求导得到延时为

$$\tau(\lambda) = \frac{d\Phi}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \cdot \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad (7)$$

归一化群延时为

$$\tau_n = \frac{k^2}{(1+t^2) - 2t \cos \varphi} \quad (8)$$

群延时为

$$\tau_g = \frac{n_{\text{eff}} L}{c} \tau_n \quad (9)$$

图 1(b) 为单一微环的延时曲线. 将依据微环延时理论进行延时器的设计计算.

1.2 基于 Kerr 效应的相移计算

延时采用微环谐振腔的延时方法, 通过控制光波在环形腔内的相移和微环与直波导的耦合系数控制延时数值与带宽. 分析中采用三阶非线性 Kerr 效应, 通过注入泵浦光改变光在微环内的非线性相移, 达到控制延时的目的. Kerr 效应是瞬态的非线性效应, 具有极高的响应速度, 小于 ps 量级^[10], 对于延时的影响较小.

基于微环谐振腔结构的相移 $\Delta\varphi$ 的改变是由于折射率 n_0 的改变. 光强 I 与折射率的改变 Δn 的关系为 $\Delta n = n_2 I$. n_2 是非线性系数, 对于 AlGaAs 来说是 $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{W}$ ^[11], 微环谐振腔结构的相移表达式为^[12]

$$\Delta\varphi = -\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right) \cdot L \cdot \left(\frac{c}{V_g}\right) \cdot \left(\frac{n_2}{n_0}\right) \cdot I \quad (10)$$

式中, L 代表微环谐振腔的周长, λ_0 为输入微环的波长, c 是光速等于 3×10^8 m/s. 对于 AlGaAs 导光层的 n_0 是 3.346. 用 $\Delta n = \bar{n}_2 |E|^2$ 代替 $\Delta n = n_2 I$, 相移 $\Delta\varphi$ 也可以表示为

$$\Delta\varphi = -\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)L\left(\frac{c}{V_g}\right)\left(\frac{\bar{n}_2}{n_0}\right) \cdot |E|^2 = -\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)L\left(\frac{c}{V_g}\right)\left(\frac{1}{V_g}\right)^2 \cdot \bar{n}_2 \cdot \left(\frac{2}{\epsilon}\right) \cdot I \quad (11)$$

式中 ϵ 是介电常量, $I = V_g \cdot (\epsilon/2) |E|^2$. \bar{n}_2 对应于非线性光学极化参量 $\text{Re}[\chi^{(3)}]$. 并且相移 $\Delta\varphi$ 与群速度 V_g 的平方呈反比. 图 2 为在相应条件下, 微环谐振腔内非线性相移随泵浦功率的变化.

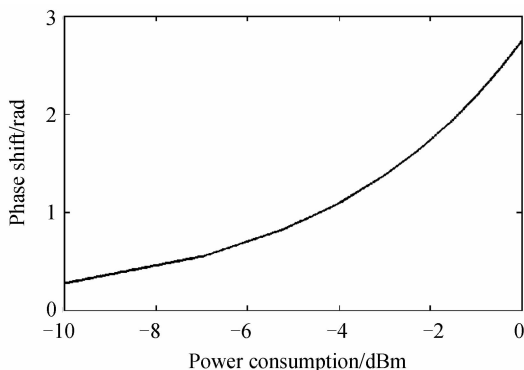


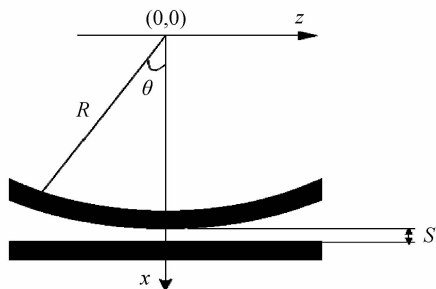
图 2 微环内非线性相移随着泵浦功率的变化
Fig. 2 Nonlinear phase shift versus power consumption

1.3 耦合系数计算

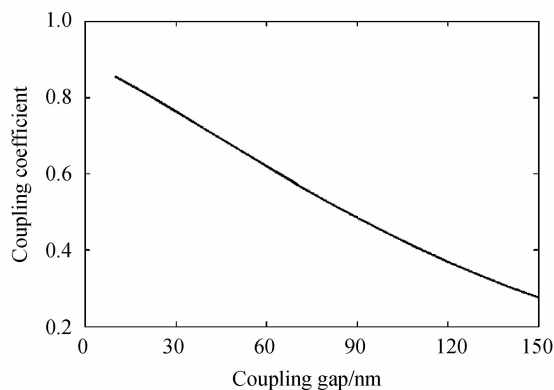
影响直波导与微环谐振腔之间耦合系数的主要因素是它们的间距^[13]. 采用耦合模式理论的方法进行分析, 首先将耦合波导与直波导细分为若干小段, 通过计算每一小段的耦合系数得出整个结构的耦合系数. 假设直波导和弯曲波导的折射率为 n_1 , 空气的折射率为 n_2 , 直波导与弯曲波导的最小间距为 S , 弯曲波导和直波导的半宽长度为 W , 微环谐振腔的半径为 R . 将弯曲波导划分为沿着 z 方向的 n 个小段, 其中每一段的划分步长为 h_z , 计算思路是将每一小段弯曲波导都视为直波导进行近似处理.

由图 3(a)通过耦合模式理论可以得到任意 z 点处的耦合系数为

$$K(z) = \frac{\omega\epsilon_0}{4} \int_{\text{bend}} (n_1^2(x, y, z) - n_2^2(x, z)) \cdot E_b(x, z) \cos \theta \cdot E_s(x, z) \cdot dx \quad (12)$$



(a) The coupling theory model



(b) Coupling coefficient versus coupling gap

图 3 耦合系数计算

Fig. 3 The calculation of Coupling coefficient

从而整个系统的耦合系数为

$$\kappa = \sin\left(\sum_{k=1}^n K_k h_z\right) \quad (13)$$

式中 K_k 表示沿着 z 方向的每一个小段处的耦合系数. 由仿真可以得到耦合系数与最小间距之间的关系如图 3(b).

2 级联微环谐振腔结构延时计算

所设计微环谐振腔结构中, 微环谐振腔的半径为 $300 \mu\text{m}$, 微环半径决定了自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)为 50 GHz , 适合 DWDM 系统. 直波导和微环波导的宽度为 450 nm , 其中最小耦合间距为 100 nm . 整个器件的衬底为 $3 \mu\text{m}$ GaAs 埋层, 其上为 600 nm 的 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缓冲层, 250 nm 的 $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$ 导光层以及 150 nm 的 $\text{Al}_{0.62}\text{Ga}_{0.38}\text{As}$ 盖层. 垂直方向结构由分子束外延实现, 而水平方向结构由光刻形成, 如图 4. 因为 AlGaAs 的非线性系数比 Si 大, 可以大大地减小所需的泵浦能量, 因此, 选择 AlGaAs 作为材料.

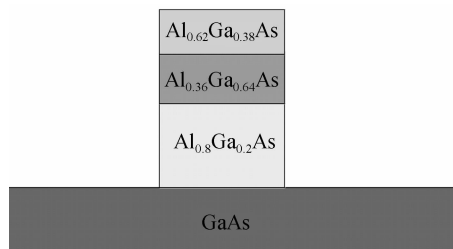


图 4 三微环级联结构及时延曲线

Fig. 4 Structure and time delay of three order microring

随着微环数量的增加, 群延时增加, 因此级联微环结构比单环结构延时以及带宽都更大^[14]. 相同半径下, 不同级联微环结构曲线变化的趋势相同, 并且 FSR 没有大的变化. 而微环半径的增大时, 会带来群延时增大, 缩小 FSR 会影响到信道的数目. 在设计仿真过程中, 可以通过调节微环谐振腔的耦合系数以及腔内的相位, 达到控制延时数值、带宽与抖动的目的, 使之达到 DWDM 系统要求的水平.

仿真主要集中于微环数量不超过 4 个时延与带宽的变化. 图 5 中, 信号光从左侧注入直波导, 泵浦光从微环外侧注入, 与微环谐振腔内信号光作用, 利用 Kerr 效应改变环腔内非线性相移. 以三阶和四阶微环为例, 计算可知, 其中在三阶微环中, 对微环 2 相移改变 $\pi/4$, 泵浦光强度为 -5.2 dBm, 对微环 3 相移改变 $\pi/2$, 泵浦光强度为 -2.3 dBm. 微环 1、2、3 与直波导间的耦合系数为 0.7、0.77、0.7, 耦合间距设定为 42 nm、28 nm、42 nm. 在四阶微环中, 对于微环 2、3、4 的相移改变分别为 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$, 相对应的泵浦光强度为 -5.2 dBm、 -2.3 dBm、 -5.2 dBm. 而微环 1、2、3、4 与直波导间的耦合系数为 0.6、0.68、0.68、0.6, 相对应的耦合间距为 63 nm、46 nm、46 nm、63 nm. 由图 6 可知, 当级联微环的数目增加时, 对应于每个

DWDM 信道的延时数值以及延时带宽都增加. 对于三阶微环与四阶微环, 带宽由 12.5 GHz 增加到 19.7 GHz, 延时数值由 117 ps 增加到 135 ps. 值得注意的是, 在相同阶数的微环谐振腔结构下, 带宽与延时数值可以在一定范围内可控.

图 7 为不同微环个数时, 器件延时带宽与延时数值的关系. 对于同一微环结构, 延时增加的同时, 相对应的带宽减小, 带宽增加时延时减小. 且当微环数目增加时, 延时带宽与数值均得到优化, 但是工艺制造的难度进一步加大, 器件的尺寸与损耗也会有所增加.

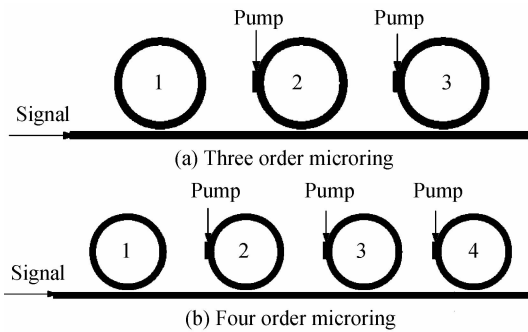


图 5 微环级联结构

Fig. 5 Structure of the microring

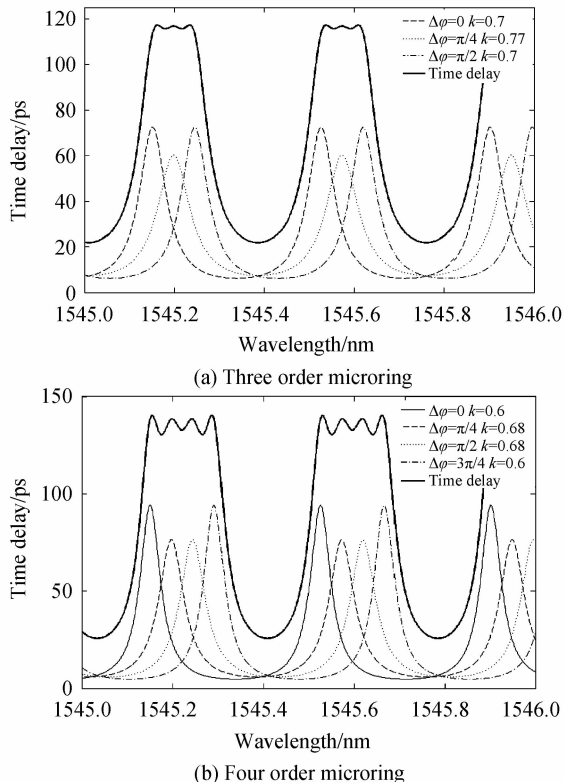


图 6 微环时延曲线

Fig. 6 Time delay of the microring

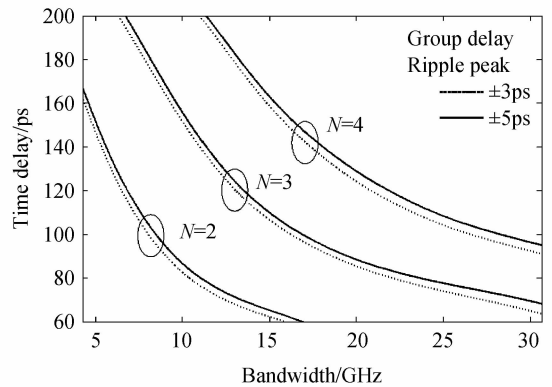


图 7 不同微环个数下的延时带宽以及数值

Fig. 7 Time delay and bandwidth of microring

图 8 为对于相似结构不同微环个数的延时以及带宽的对比. 当延时带宽均为 20 GHz 时, 在延时抖动 $\leq \pm 5$ ps 的条件下, 随着微环个数的增加, 延时数值由 55 ps 增加到 205 ps. 当每个通道延时均为 130 ps 时, 在延时抖动 $\leq \pm 5$ ps 的情况下, 随着微环数量的增加, 带宽也由 6 GHz 增加到 38 GHz.

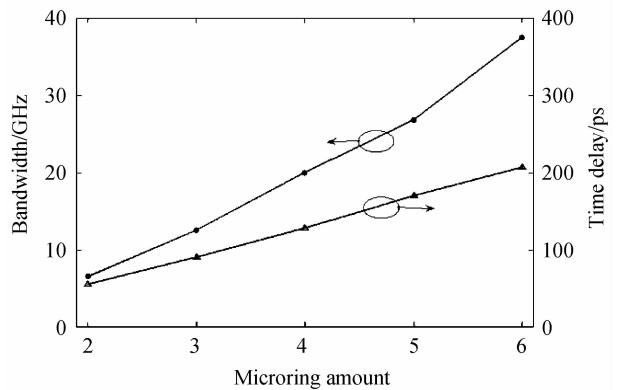


图 8 级联微环个数与带宽、延时的关系

Fig. 8 Bandwidth and time delay versus microring amount

3 结论

本文研究了基于光学 Kerr 效应的微环谐振腔延时器件的工作原理与性能特点, 通过理论分析与计算, 给出了所设计器件经过优化后的参量以及性能参量.

研究的器件可以在小于 ± 5 ps 抖动的条件下,每个通道达到超过 130 ps 延时数值,同时延时带宽达到 20 GHz,满足 DWDM 系统的要求.整个结构的能耗较小不超过 0.8 dBm,响应速度快,体积小便于集成,完全光控.下一步可以通过采用非线性特性更强的材料替代 AlGaAs,进一步减小泵浦能量.本文为基于微环谐振腔的延时器件的设计提供了参考.

参考文献

- [1] RASRAS M S, MADSEN C K, CAPPUZZO M A, *et al.* Integrated resonance enhanced variable optical delay lines[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(4): 834-836.
- [2] GUAN Ai-hong, WANG Bo-yun, ZHANG Yuan, *et al.* A deflection routing algorithm based on priority and burst loss threshold in OBS networks[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2015-2019.
管爱红,王波云,张元,等. OBS 网络中一种基于优先级和门限的偏射路由算法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(11): 2015-2019.
- [3] GUAN Ai-hong, WANG Bo-yun, FU Hong-liang, *et al.* A deflection routing algorithm based on priority and burst segmentation in optical burst switching networks [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 127-132.
- [4] YARIV A, XU Y, LEE R K, *et al.* Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(11): 711-713.
- [5] MALEKI L, MATSKO A B, SAVCHENKOV A A, *et al.* Tunable delay line with interacting whispering-gallery-mode resonators[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(6): 626-628.
- [6] ZHUANG Lei-meng. Ring resonator based broadband photonic beam former for phased array antennas [D]. Netherlands: University of Twente, 2010.
- [7] JAIME C, MARK A F, SHERWOOD D N, *et al.* Wide bandwidth continuously tunable optical delayline using silicon microring resonators[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26525-26534.
- [8] KHURGIN J B, MORTON P A. Tunable wideband optical delay line based on balanced coupled resonator structures[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(17): 2655-2657.
- [9] SHEN H, CHEN J P, LI X W. *et al.* Group delay and dispersion analysis of compound high order microring resonator all-pass filter[J]. *Optics Communications*, 2006, **262**(2): 200-205.
- [10] ZHAO Xu, WANG Ming-hua. Ultrahigh speed semiconductor all-optical switching [J]. *Study on Optical Communications*, 2001, **1**(103): 58-62.
赵旭,王明华. 超高速半导体全光开关技术[J]. *光通信研究*, 2001, **1**(103): 58-62.
- [11] HEEBNER J E, LEPESHKIN N N, SCHWEINSBERG A, *et al.* Enhanced linear and nonlinear optical phase response of AlGaAs microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(7): 769-771.
- [12] INOUE K, ODA H, IKEDA N, *et al.* Enhanced third-order nonlinear effects in slow-light photonic-crystal slab waveguides of line-defect[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(9): 7206-7216.
- [13] 余小燕. 基于耦合模理论的微环谐振腔模型研究[D]. 浙江: 浙江大学信息科学与工程学院, 2008.
- [14] LIU X, KONG M. Variations of group delay and transmittance with parameters of coupled double-ring resonators[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, **60**(3): 213-219.