

## 微环谐振器中各参数对光速控制输出脉冲畸变的影响仿真分析

刘 鑫, 孔 梅\*, 徐亚萌, 王雪萍

(长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 利用微环谐振器进行光速控制时, 各参数对光脉冲传输的影响是不可忽略的, 它除了导致光脉冲展宽, 还引起脉冲的畸变。基于微环谐振器的传输特性, 推导了单环谐振器的二阶色散和三阶色散表达式, 针对无损耗/增益情形, 分析了利用微环谐振器进行光速控制时, 高阶色散和输入脉冲中心波长对输出脉冲畸变的影响, 分析了损耗/增益对单环谐振器输出脉冲畸变的影响。结果表明, 二阶色散导致脉冲展宽, 三阶色散导致脉冲畸变, 输入脉冲中心波长位置影响脉冲分裂谷底的深浅, 而损耗和增益影响脉冲畸变情况。为利用微环谐振器实现光速控制的应用提供了设计优化依据。

**关键词:** 集成光学; 微环谐振器; 色散; 光速控制; 脉冲畸变

中图分类号: TN256 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0918002

## Simulation analysis of the influence of various parameters on output pulse distortion of group velocity control in microring resonator

Liu Xin, Kong Mei\*, Xu Yameng, Wang Xueping

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** When using microring resonators to realize group velocity control, the influences of various parameters on optical pulse transmission cannot be neglected. The parameters lead to the pulse broadening and the pulse distortion. The expressions of the second-order and third-order dispersions in single ring resonator were derived based on the transmission characteristics of the microring resonator. Aiming at the resonator without loss/gain, the pulse distortions resulted from the higher-order dispersions and the input pulse center wavelength were analyzed, during using microring resonator to realize the control of the group velocity. In addition, the influence of loss/gain on output pulse distortion of single ring resonator was derived. The results show that the second-order dispersion leads to pulse broadening and the third-order dispersion is accounted for the pulse distortion and the position of the central wavelength of the input pulse affects the depth of the pulse splitting bottom while the loss and gain affect the pulse distortion. This work provides design basis for applications of microring resonators in group velocity control.

**Key words:** integrated optics; microring resonator; dispersion; group velocity control; pulse distortion

收稿日期: 2019-04-11; 修订日期: 2019-05-21

基金项目: 长春理工大学科技创新基金(QN2017002); 吉林省科技发展计划项目优秀青年人才基金(20180520177JH)

作者简介: 刘鑫(1984-), 女, 讲师, 博士, 主要从事导波光学方面的研究。Email: liuxin0921@cust.edu.cn

通讯作者: 孔梅(1967-), 女, 教授, 博士, 主要从事导波光学方面的研究。Email: kongmei@cust.edu.cn

## 0 引言

微环谐振器用于光速控制是集成光学领域的一个研究热点<sup>[1-5]</sup>。微环谐振器由于具有独特的结构色散特性,可以通过结构设计就可以实现大的色散,得到较显著的光速控制效果<sup>[6-7]</sup>。

大量分析表明,介质中的高阶色散效应对光脉冲传输的影响是不可忽略的,它除了导致了光脉冲展宽,还引起脉冲的畸变。以光纤中的脉冲传输为例,二阶色散造成输出脉冲的展宽,而三阶色散造成输出脉冲的形变<sup>[8-13]</sup>。以此为借鉴,微环谐振器中的二阶色散和三阶色散应该是导致输出脉冲产生畸变的因素。对于利用微环谐振器实现的光速控制,现有分析表明损耗将导致输出脉冲能量低,脉冲畸变严重等问题,而在微环中引入增益时,输出脉冲不分裂且可实现较大的输出强度<sup>[14-15]</sup>,文中在此基础上系统地分析了损耗/增益大小对脉冲畸变的影响机制。

文中基于微环谐振器的传输特性,首先分析了在无损耗/增益的情况下,高阶色散和输入脉冲中心波长对输出脉冲畸变的影响。然后又分析了损耗/增益对单环谐振器输出脉冲畸变的影响。文中给出的各参数对微环谐振器输出脉冲的影响,对微环谐振器的光速控制应用具有重要的指导意义。

## 1 微环谐振器的色散

单环谐振器由单微环和一个总线波导组合而

$$\frac{d^2 \phi_1^{(eff)}(\phi_1)}{d\phi_1^2} = \frac{a_1 t_1 (1-t_1^2) \sin \phi_1 \left\{ 8a_1^3 t_1 (1+t_1^2) \cos \phi_1 + (1+a_1^2) \left[ (t_1^2 - a_1^2) (1-t_1^2 a_1^2) - 4t_1^2 a_1^2 (\cos^2 \phi_1 + 1) \right] \right\}}{\left[ t_1^2 + a_1^2 - 2a_1 t_1 \cos \phi_1 \right]^2 \left[ 1 + t_1^2 a_1^2 - 2a_1 t_1 \cos \phi_1 \right]^2} \quad (4)$$

$$\frac{d^3 \phi_1^{(eff)}(\phi_1)}{d\phi_1^3} = a_1 t_1 (1-t_1^2) \cos \phi_1 \left\{ \frac{KMN + 8t_1^2 a_1^2 KM \left[ (1+a_1^2) t_1 \cos \phi_1 - a_1 (1+t_1^2) \right] \sin^2 \phi_1 - 4a_1^3 t_1 N \sin \phi_1 \left[ (1+a_1^2)(1+t_1^2) \sin \phi_1 - 2a_1 t_1 \sin(2\phi_1) \right]}{1/k^3 M^3} \right\} \quad (5)$$

其中,

$$M = t_1^2 + a_1^2 - 2a_1 t_1 \cos \phi_1 \quad (6)$$

$$N = 1 + t_1^2 a_1^2 - 2a_1 t_1 \cos \phi_1 \quad (7)$$

$$P = 8a_1^3 t_1 (1+t_1^2) \cos \phi_1 + (1+a_1^2) \left\{ (t_1^2 - a_1^2) (1-t_1^2 a_1^2) - 2t_1^2 a_1^2 [\cos(2\phi_1) + 3] \right\} \quad (8)$$

成,其结构如图 1 所示,由于振幅传递因子中包含耦合器损耗,所以文中的耦合器是无损耗的。整个系统

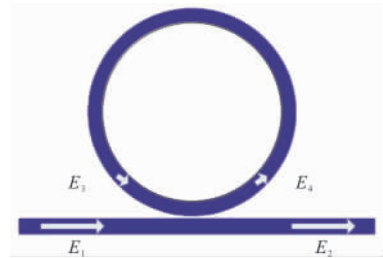


图 1 单环谐振器

Fig.1 Single ring resonator

的传递函数为:

$$\tau_1(\phi_1) = \frac{E_2}{E_1} = \frac{t_1 - a_1 \exp(i\phi_1)}{1 - t_1 a_1 \exp(i\phi_1)} = |\tau_1| \exp[i\phi_1^{(eff)}] \quad (1)$$

其中,  $\phi_1^{(eff)}(\phi_1) = \arg[\tau_1(\phi_1)] =$

$$\arctan \left[ \frac{a_1 (t_1^2 - 1) \sin \phi_1}{t_1 (1 + a_1^2) - a_1 (1 + t_1^2) \cos \phi_1} \right] \quad (2)$$

式中: $\phi_1^{(eff)}$ 为有效相移; $\phi_1$ 为光绕环传输一周的相移; $a_1$ 为振幅传递因子; $t_1$ 为环与直波导间透射系数。

有效相移的一阶导数对应于归一化群延迟,单环谐振器有效相移的一阶导数可以写为:

$$\frac{d\phi_1^{(eff)}}{d\phi_1} = \frac{a_1 (t_1^2 - 1) \left[ t_1 (1 + a_1^2) \cos \phi_1 - a_1 (1 + t_1^2) \right]}{\left[ 1 + a_1^2 t_1^2 - 2a_1 t_1 \cos \phi_1 \right] \left[ t_1^2 + a_1^2 - 2a_1 t_1 \cos \phi_1 \right]} \quad (3)$$

对单环谐振器的一阶色散公式(3)求导就可以得到其二阶色散和三阶色散分别为:

由于高阶色散是由低阶色散求导得到,所以有效相移的一阶色散(正比于群折射率)的极值点是二阶色散的零点,也是三阶色散的极值点;而二阶色散的极值点是三阶色散的零点,如图 2 所示,图 2(a)、(b)分别给出了欠耦合和过耦合情况下有效相移、一阶色散、二阶色散和三阶色散随  $\phi_1$  的变化情况。

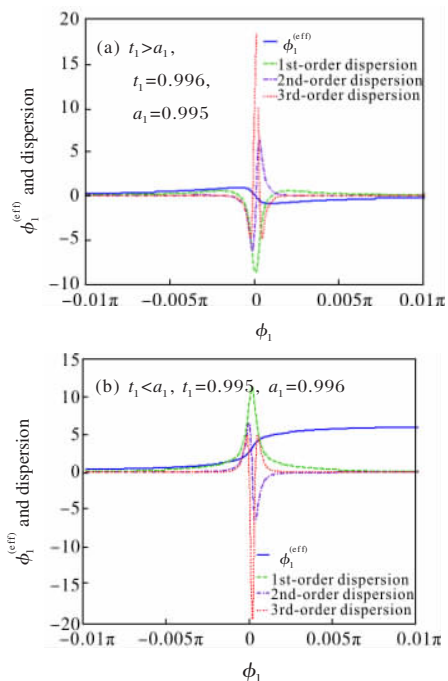


图 2 不同耦合条件下单环谐振器有效相移和高阶色散光谱计算举例

Fig.2 Examples of calculating the effective phase shifts and high-order dispersion spectra of single ring resonator under different coupling conditions

## 2 各参数对时域脉冲的影响

### 2.1 色散对脉冲畸变的影响

为了考察二阶色散和三阶色散对时域脉冲的影响,需把入射高斯脉冲频谱和环的一阶色散谱宽度对比分析,确保入射高斯脉冲频谱小于环的一阶色散谱宽度,从而排除由于入射脉冲频谱较宽而引起的脉冲形变。

设输入为高斯脉冲:

$$A(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{t_d}\right) \exp(i2\pi ct/\lambda_0) \quad (9)$$

式中:  $\lambda_0 = 1\ 550.127\ 95\ \text{nm}$  为单环谐振器的谐振波长;  $t_d = 6\ \text{ns}$  为入射脉宽。文中选择微环的半径为  $300\ \mu\text{m}$ , 直波导的长度为  $1\ \text{cm}$ , 直波导和微环的有效折射率都为 3。

为了去除损耗和增益对脉冲传输的影响,突出色散作用,以没有损耗/增益的结构为例,分析产生慢光时,二阶色散和三阶色散对时域脉冲的影响。为了尽可能隔离二阶和三阶色散的作用,把输入脉冲波长分别选在谐振波长(此处二阶色散为零,三阶色

散最大)和二阶色散极值点(此处三阶色散为零)。输入高斯脉冲频谱与微环一阶色散谱的宽度关系见图 3。

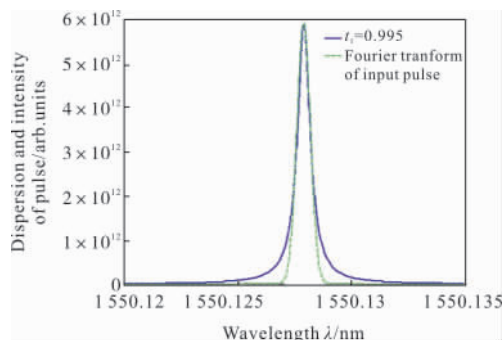
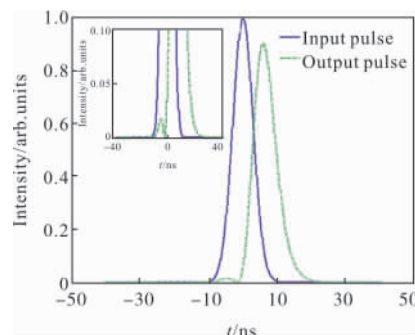


图 3 单环谐振器一阶色散和入射光频谱宽度的比较

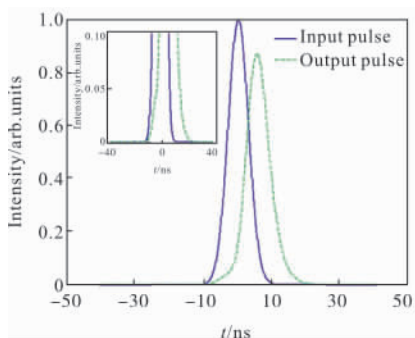
Fig.3 Comparison of the spectrums width of the input pulse with the first-order dispersion width of the ring resonator

计算得到两个脉冲经微环谐振器后的输出脉冲见图 4。由图 4(a)可见,位于谐振波长处的输出脉



(a) 输入脉冲与谐振波长处的输出脉冲

(a) Input pulse and output pulse at the resonance wavelength



(b) 输入脉冲与二阶色散极值点处的输出脉冲

(b) Input pulse and output pulse at the extreme value point of the second-order dispersion

图 4 单环谐振器不同波长的输入脉冲与输出脉冲,

$t_d = 6\ \text{ns}, t_1 = 0.996$

Fig.4 Input pulse and output pulse at different wavelengths of single ring resonator,  $t_d = 6\ \text{ns}, t_1 = 0.996$

冲在前沿出现分裂,表明三阶色散导致脉冲分裂,由图 4(b)可见,位于二阶色散极值点的脉冲根部展宽,其输出脉冲峰值(0.870 9)低于位于谐振波长处(0.904 1)的脉冲,也从另一方面表明脉冲能量在时间分布上的展宽。

这样,通过确定二阶色散零点(同时是三阶色散极值点)和极值点(同时是三阶色散零点),并在这两个波长下分别输入谱宽较窄的光脉冲,分别确定了三阶和二阶色散对脉冲波形的影响,即三阶色散导致脉冲的分裂、二阶色散带来脉冲的展宽。由于计算时选择的是没有损耗和增益的环形谐振器,所以也在计算结果中排除了损耗和增益的影响。

当单环谐振器中没有损耗/增益( $a_1=1$ )时,只产生慢光,为了分析产生快慢光时脉冲分裂产生振荡的情况,在微环中引入损耗/增益,考察微环谐振器处于过耦合和欠耦合情况下,三阶色散对脉冲畸变的影响机制。通过上面的分析可知,产生快光还是慢光是由一阶色散决定的,而一阶色散也决定了三阶色散的正负,具体情况可以由公式(3)、(5)给出。在谐振点,当单环谐振器处于欠耦合( $t_1 > a_1$ )时,有  $\frac{d\phi_1^{(eff)}}{d\phi_1} <$

0,此时系统产生快光,  $\frac{d^3\phi_1^{(eff)}(\phi_1)}{d\phi_1^3} > 0$ ,脉冲在后沿产生振荡,如图 5 中实线所示,而当单环谐振器处于过耦合 ( $t_1 < a_1$ ) 时,有  $\frac{d\phi_1^{(eff)}}{d\phi_1} > 0$ ,此时系统产生慢光,

$\frac{d^3\phi_1^{(eff)}(\phi_1)}{d\phi_1^3} < 0$ ,在脉冲前沿产生振荡,如图 5 中虚线所示。

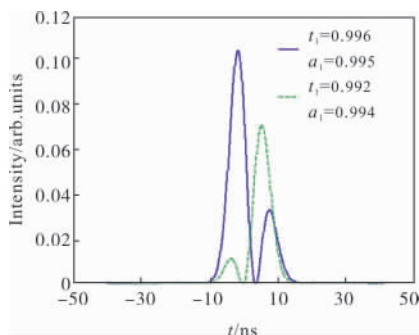


图 5 三阶色散对单环谐振器输出脉冲的影响,  $t_d=6$  ns

Fig.5 Influence of the third order dispersion on output pulse of the single ring resonator,  $t_d=6$  ns

## 2.2 输入脉冲中心波长对脉冲畸变的影响

从图 4(a)中还可以看出,当输入脉冲中心波长位于单环谐振器的谐振点,脉冲分裂谷底为 0,这是由于微环中的透射率和各阶色散都是关于谐振点呈奇对称或偶对称,所以在分裂点所在时刻,光在微环中实现各波长相消干涉,导致输出光强能量为 0。而当入射波长逐渐偏离谐振点时,脉冲分裂的谷底逐渐变浅直至不产生脉冲分裂,如图 6 所示。输入光脉冲强度不再相对于谐振波长对称,与传输特性相对于谐振波长对称的微环谐振器作用,不能在某一时刻使得所有波长光同时相消干涉。输入脉冲中心波长偏离谐振波长越远,输入脉冲能量的对称中心与谐振器的对称中心偏差越大,相消干涉越弱。

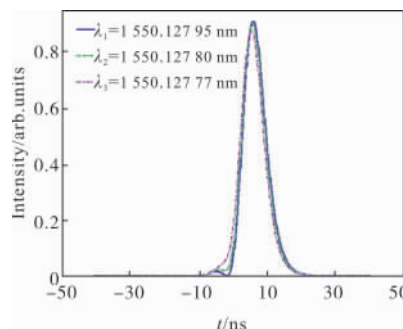


图 6 随着输入脉冲中心波长变化输出脉冲分裂的谷底逐渐变浅,  $t_1=0.996$

Fig.6 Bottom of pulse splitting became shallower with the change of the input pulse center wavelength,  $t_1=0.996$

## 2.3 损耗/增益大小对脉冲畸变的影响

上面分析了无损耗/增益情况下,单环谐振器色散和输入脉冲中心波长对时域脉冲影响,为了更好地了解时域脉冲产生畸变的影响因素,此节分析了在谐振波长处损耗/增益对时域脉冲的影响。在此节计算中,取透射系数为  $t_1=0.995$ 。

对于带有损耗的单环谐振器,在谐振波长处,如图 7(a)所示,当单环谐振器处于过耦合时,将产生慢光,单环谐振器时域脉冲产生分裂,图中  $a_1=0.995$  时的分裂峰透射率最大,脉冲畸变最严重,这是由于越接近临界耦合点三阶色散数值越大。从图中还可以看出,随着损耗的减小,分裂峰的透射率减小,而主峰的透射率逐渐增大,脉冲畸变越小。

对于带有增益的单环谐振器,在谐振波长处,从



图 7(b)可以看出,单环谐振器产生脉冲分裂,分裂峰的透射率随着增益的增大而减小。继续增大增益值,如图 7(c)所示,当  $a_1=1/0.999\ 3$  时,脉冲畸变消失,随着增益的增大,输出脉冲强度增大。

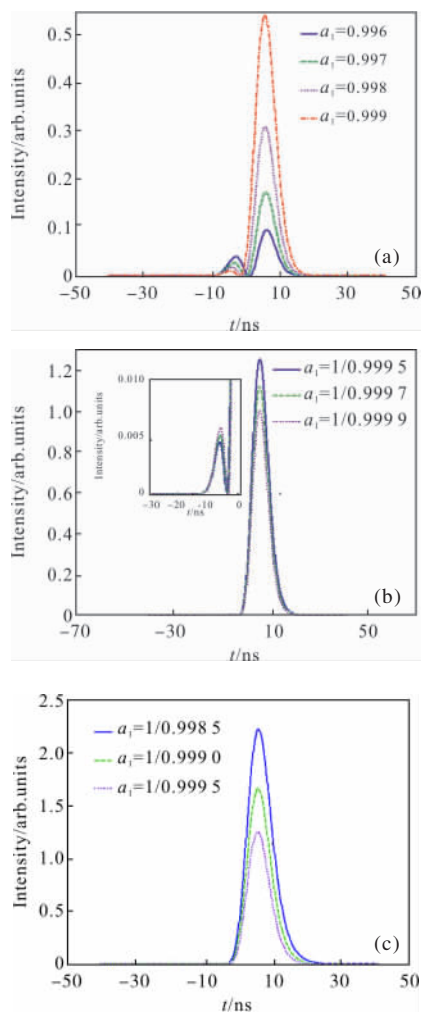


图 7 分裂峰的透射率随  $a_1$  的变化,  $t_1=0.995$

Fig.7 Transmittance of split peak versus  $a_1$ ,  $t_1=0.995$

由上面的分析可知,对于利用微环谐振器实现的光速控制,在谐振波长处,从逐渐减小损耗到引入增益且慢慢增大增益值,发现脉冲畸变逐渐减小直至消失。这符合损耗/增益对微环谐振器光速控制脉冲畸变影响的机制<sup>[15]</sup>,即对于带有损耗的微环谐振器,振幅时域响应有正有负,不能弥补色散效应产生的脉冲分裂,而对于带有增益的微环谐振器,振幅时域响应始终为正值,这就使得由于色散效应产生的脉冲分裂消失,从而在输出脉冲中不表现为分裂。

### 3 结 论

文中分析了微环谐振器中各参数对输出脉冲的影响。通过分析入射脉冲中心波长在三阶色散极值点(二阶色散零点)和二阶色散极值点(三阶色散零点)的输出脉冲光谱,得到微环谐振器中的二阶色散导致脉冲展宽,三阶色散导致脉冲分裂。此外,还指出,当输入脉冲中心波长位于谐振点时,脉冲分裂谷底为零,在非谐振波长处,二阶色散不为零,随着远离谐振波长,分裂谷底逐渐变浅直至消失。由于分析二阶和三阶色散对单环谐振器输出脉冲的影响时选择的是没有损耗和增益的环形谐振器,所以在计算结果中排除了损耗和增益的影响。分析和计算还表明,当微环谐振器中产生快光时,在脉冲后沿产生分裂,产生慢光时,在脉冲前沿产生分裂。对于带有损耗的微环谐振器,随着损耗的增大,脉冲畸变情况越来越严重,当引入增益时,脉冲畸变情况变小直至消失。文中对微环谐振器中高阶色散、输入脉冲中心波长和损耗/增益对脉冲畸变影响的分析,为克服利用微环谐振器进行光速控制时的脉冲畸变问题提供了理论指导分析依据。

### 参 考 文 献:

- [1] Guan Lei, Wang Zhuoran, Yuan Guohui, et al. Sensing performance of microring differential optical biosensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47 (2): 0222002. (in Chinese)
- [2] Liu Heng, Ma Tao, Yu Chongxiu, et al. Highly sensitive biosensor based on two -layer dielectric -loaded plasmonic microring [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0322003. (in Chinese)
- [3] Ying Yuhai. Design of new kind of tunable microring resonator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (6): 0620002.
- [4] Deng Lili, Shi Qiang, Zhang Hui, et al. Investigation on the sensing performances of strip and rib SOI waveguides microring structures[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 752-757.
- [5] Wang Wei, Zhang Aihua, Yang Keng, et al. Design of ultra-compact microwave photonic filter based on SOI microring resonators [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 752-757.

- Engineering*, 2013, 42(8): 2162–2166. (in Chinese)
- [6] Liu Xin, Kong Mei. Variations of group delay and transmittance with parameters of coupled double-ring resonators[J]. *J Mod Opt*, 2013, 60(3): 213–219.
- [7] Gao Lei, Wang Tao. Time delay characteristics of microring resonator device based on optical Kerr effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(5): 0523004. (in Chinese)
- [8] Govind Agrawal. Nonlinear Fiber Optics[M]. San Diego: Academic Press, 2013.
- [9] Song Yang, Wang Li. Effect of fiber dispersion on pulse width [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 568–571. (in Chinese)
- [10] Huang Tianshui, Cao Wenhua, Yin Xinfu, et al. Influence of high-order dispersion on gauss optical pulse in optical fiber [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(4): 564–567. (in Chinese)
- [11] Zhang Shu, Song Wenmiao. Influence of higher-order dispersion on optical pulse propagates along single-mode [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2003, 30(4): 90–92. (in Chinese)
- [12] Sang Zhiwen, Luo Kaiji, Sang Minghuang, et al. Influence of the third-order dispersion on the propagation properties of Gaussian-shaped pulses in optical fibers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 26(2): 946–950. (in Chinese)
- [13] Xie Xiaoping, Zhao Shanghong, Wang Xianhua, et al. The high-order factor analysis of femtosecond soliton pulse propagating in fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(4): 429–432. (in Chinese)
- [14] Hao Ying, Kong Mei. Symmetry between the transfer properties of micro-ring resonators with gain and with loss[J]. *J Mod Opt*, 2010, 57(21): 2183–2186.
- [15] Wu Yongfeng, Kong Mei, Liu Xin, et al. Effects of loss and gain on group-velocity control in microring resonators[J]. *Phys Rev A*, 2013, 88(1): 13811.