

文章编号: 0258-7025(2010)11-2885-06

耦合系数对串联双微环谐振器滤波特性的影响

刘鑫¹ 孔梅¹ 文权²

(¹ 长春理工大学理学院物理系, 吉林 长春 130022
² 呼伦贝尔学院计算机科学与技术学院, 内蒙古 呼伦贝尔 021008)

摘要 多个光波导微环谐振器的组合可扩展自由光谱范围和改善滤波特性。推导了串联双微环谐振器中两个微环与直波导的耦合系数不限定为相同时的理想耦合条件, 针对无损耗情况时光从与小环耦合的直波导入射的情形, 计算了理想耦合条件下主谐振峰带宽、形状因子以及伪模的峰值透射率随耦合系数变化的情况, 显示了耦合系数对滤波特性影响的规律。计算分析表明, 当两个微环与直波导的耦合系数不相等时, 可以取得较为均衡的良好滤波特性, 同时有更多的设计灵活性。

关键词 集成光学; 微环谐振器; 耦合系数; 滤波特性; 伪模

中图分类号 TN256 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2885

Influence of Coupling Coefficients on Filtering Characteristics of Series Coupled Two-Microring Resonators

Liu Xin¹ Kong Mei¹ Wen Quan²

¹ Department of Physics, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² School of Computer Science and Technology, Institutes of HulunBuir, HulunBuir, Inner Mongolia 021008, China

Abstract Compound of several optical waveguide microring resonators can extend the free spectral range and improve the filtering properties. For series coupled two-microring resonators, the perfect coupling condition is derived when the coupling coefficients between the two rings and the straight waveguides are not limited to be equal. When the light is input through the straight waveguide coupled with the smaller ring under perfect coupling condition, the changing of main resonance peak bandwidth, shape factor, and peak transmittance of the spurious modes with the coupling coefficients are calculated. The influence patterns of the coupling coefficients on these filtering characteristics are demonstrated. Calculation and analysis show that when the coupling coefficients between the two rings and the straight waveguides are different, balanced filtering characteristics can be realized, and more flexibility of design can be provided.

Key words integrated optics; microring resonator; coupling coefficient; filtering characteristics; spurious mode

1 引 言

近几年微环谐振器已成为导波光学和集成光学领域中一个非常活跃的研究方向^[1,2]。人们对微环谐振器的制备、结构设计、特性分析和实际应用进行了广泛而深入的研究。

微环谐振器具有带通滤波特性, 可用作波分复

用器^[3~5]和分插复用器^[6~8]等功能器件, 对其带通滤波特性的改善是这些应用的基础。单微环谐振器的自由光谱范围与环半径成反比, 所以为得到大的自由光谱范围, 需使用小半径微环谐振器。但小半径微环谐振器制作困难, 传输损耗大, 很难实际应用。同时, 单微环谐振器的通带结构存在严重的局

收稿日期: 2010-02-01; 收到修改稿日期: 2010-05-04

作者简介: 刘鑫(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事光波导微环谐振器滤波特性方面的研究。E-mail: tlx0921@163.com

导师简介: 孔梅(1967—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤及光波导器件物理及应用方面的研究。

E-mail: kongmei@cust.edu.cn

限性,即通带带宽小且带边不够陡直^[9]。为此,人们常采用多环串联或并联结构的复合微环谐振器来扩展自由光谱范围和改善通带特性^[10~13]。相对于其他复杂结构,串联双微环结构最简单,而且可以得到良好的滤波特性。

对于串联双微环谐振器,当两微环与直波导的耦合系数不限定为相同时,理想耦合条件的推导比较复杂,因而现有的关于串联双微环谐振器的分析都是基于两微环与直波导的耦合系数相同的方案^[11~15]。当尝试选取两微环与直波导的耦合系数不同,对滤波器的带宽和伪模抑制进行优化时,由于不掌握此时的理想耦合条件,往往以牺牲主谐振峰通带的透射率为代价,优化过程具有盲目性^[15]。

本文推导了串联双微环谐振器当两个微环与直波导的耦合系数不限定为相同时的理想耦合条件,在忽略损耗的情况下,计算了耦合系数对通带带宽、形状因子及伪模抑制的影响,揭示了耦合系数对这些滤波特性影响的规律。计算分析表明,均衡而良好的滤波特性并不出现在通常采用的两个微环与直波导的耦合系数相等的条件下。本文给出的一般情况下的串联双微环谐振器的最佳耦合条件可用于该结构滤波器的设计和优化,可以提供更大的设计灵活性,并避免优化过程中的盲目性。

2 传递函数和理想耦合条件

平行信道串联双微环谐振器结构如图 1 所示,它由两个串联的微环和两条平行直波导信道组成。设两个微环的半径分别为 R_1 和 R_2 , k_1 和 k_3 分别为环 1 和环 2 与直波导之间的耦合系数, k_2 为两环之间的耦合系数。光波从上波导左端输入,从下波导右端输出。用 a_i, b_i 代表进、出耦合器的光场复振幅,利用各部分光场之间的关系,可以得到串联双微环谐振器的传递函数。

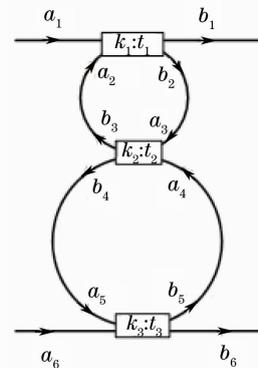


图 1 串联双微环谐振器结构

Fig. 1 Structure of series coupled two-microring resonator

当下信道无光功率输入($a_6=0$)时,系统的传递函数为^[16,17]

$$D = \frac{b_6}{a_1} = \frac{-ik_1k_2k_3\alpha_1\alpha_2 \exp(i\phi_1 + i\phi_2)}{1 - \alpha_1t_1t_2 \exp(2i\phi_1) - \alpha_2t_2t_3 \exp(2i\phi_2) + \alpha_1\alpha_2t_1t_3 \exp(2i\phi_1 + 2i\phi_2)}, \quad (1)$$

式中 $t_i = \sqrt{1-k_i^2}$ ($i=1,2,3$) 为耦合器的透射系数, $\phi_{1,2} = \pi R_{1,2}\beta$, α_1, α_2 分别为光绕微环传输半周产生的相移和振幅传递因子, β 为传输常数。根据维尔纳原理^[14],同时满足两环谐振条件的光能在整个结构中谐振,并全部或大部分从下信道输出,所以下信道的主谐振峰,即系统的通带,出现在能同时满足两环谐振条件的波长处。在(1)式中取 $\phi_{1,2} = n\pi$ (对于环 1 和环 2, n 为不相等的整数),得到同时满足两环谐振条件的主谐振峰的强度透射率为

$$|D|^2 = \left| \frac{k_1k_2k_3\alpha_1\alpha_2}{1 - t_1t_2\alpha_1 - t_2t_3\alpha_2 + t_1t_3\alpha_1\alpha_2} \right|^2. \quad (2)$$

利用 k_i 与 t_i 之间的关系,令(2)式关于 k_2 的导数为 0,得到当 k_1, k_3 取定时,可使主谐振峰透射率最大的 k_2 值为

$$k_{20} = \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{1-k_3^2}\alpha_2 + \sqrt{1-k_1^2}\alpha_1}{1 + \sqrt{1-k_3^2}\sqrt{1-k_1^2}\alpha_1\alpha_2} \right)^2}. \quad (3)$$

(3)式为串联双微环谐振器的最佳耦合条件,在 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ 的无损耗情况下,最佳耦合条件下主谐振峰透射率为 1,在 α_1, α_2 小于 1 的有损耗情况下,可使 $|D|^2$ 获得 k_1, k_3 取定时的最大值。

以上推导结果适用于 k_1 和 k_3 任意取值的情况,也包括以往常用的 $k_1 = k_3$ 的特殊情况。

3 无损耗时耦合系数对滤波特性的影响

重点考虑在忽略损耗情况下耦合系数对滤波特性的影响,计算模型如图 1 所示。选择两环周长为 $L_1 = 297.6 \mu\text{m}$, $L_2 = 396.8 \mu\text{m}$,直波导和微环的有效折射率 $n_e = 1.5$,计算光从与小环耦合的直波导输入的情况。

图 2 首先对比了周长分别为 L_1 和 L_2 的单微环谐振器的透射谱和由这两个微环串联组成的滤波器

的透射谱,表明两环串联结构的主谐振峰出现在两个单环共同的谐振波长处,串联结构的自由光谱范围约为 2 THz,是环 1 的 3 倍,环 2 的 4 倍,相当于半径为 100 μm 的环的自由光谱范围。可见多环串联结构可以用比较大的环实现大的自由光谱范围。在图 2 中还可以看到两环串联结构的透射谱在每个单环的谐振波长处有残余的透射峰,即伪模。伪模的存在影响微环谐振器的性能,在结构设计时需要对其进行抑制。

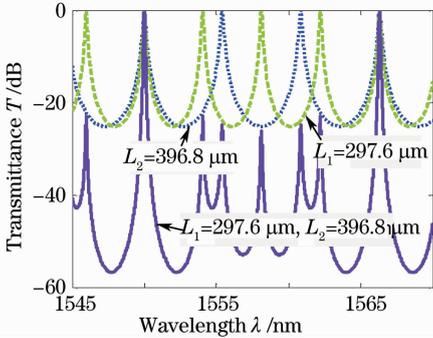


图 2 两个单环和由其串联构成的双环谐振器的透射谱
Fig. 2 Transmission spectra of two single-ring resonators and the resonator series coupled by the two rings

串联双环结构两环的半径决定了整个系统的自由光谱范围,而环与直波导及环间的耦合系数影响主谐振峰的通带特性和伪模抑制的情况。

3.1 理想耦合条件下 k_1 与 k_3 的关系

由(3)式可知,在理想耦合条件下,当两环间的耦合系数 k_{20} 取定时, k_1 与 k_3 不再独立。图 3 给出在不同的 k_{20} 取值下, k_3 随 k_1 变化的情况。

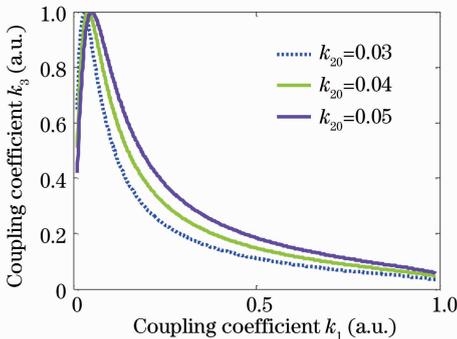


图 3 理想耦合条件下 k_3 随 k_1 的变化
Fig. 3 Coupling coefficient k_3 versus k_1 under perfect coupling condition

由图 3 可见,当 $k_1 < k_{20}$ 时,随 k_1 增大, k_3 也增大;在 $k_1 = k_{20}$ 处, $k_3 = 1$,即图 1 环 2 中的光 a_5 将全部进入下信道成为 b_6 ,从而该结构退化为平行信道单环谐振器;当 $k_1 > k_{20}$ 时,随 k_1 增大, k_3 减小。计算

表明在 $k_1 < k_{20}$ 的区域,与环 1 谐振对应的伪模不能被抑制,所以只针对 $k_1 > k_{20}$ 的情况进行计算分析。

3.2 耦合系数对主谐振峰的影响

在理想耦合条件下,主谐振峰的峰值透射率为 100%,但耦合系数的选取对其带宽和边沿陡峭程度都有影响。图 4 给出在理想耦合条件下,3 组不同的耦合系数取值对应的 1550 nm 处的通带的透射率特性。

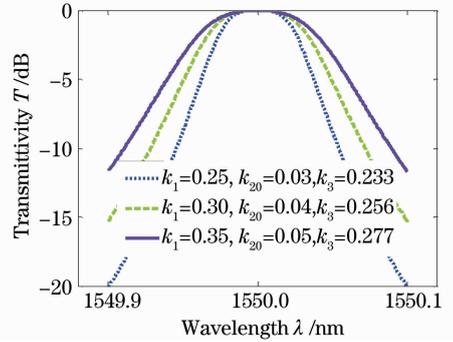


图 4 不同耦合系数下串联双微环谐振器主谐振峰的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of the main resonance peaks of series coupled two-microring resonators with different coupling coefficients

为了深入揭示耦合系数对通带带宽的影响,计算了不同 k_{20} 取值下,主谐振峰的 3 dB 带宽随 k_1 变化的情况,如图 5 所示。图 5 显示,当 k_{20} 分别为 0.03, 0.04 和 0.05 时,3 dB 带宽的极大值对应的 k_1 分别为 0.225, 0.259 和 0.289。由前面对图 3 的计算给出,当 k_{20} 分别为 0.03, 0.04 和 0.05 时,对应的 $k_1 = k_3$ 时的环与直波导的耦合系数 k_1 分别为 0.241, 0.277 和 0.309。可见 3 dB 带宽的极大值对应的 k_1 总是略小于 $k_1 = k_3$ 时的耦合系数 k_1 。

当 k_1 较小时(如图 5 中小于 0.18),在相同的 k_1

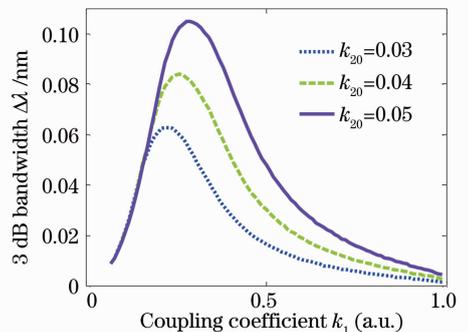


图 5 理想耦合条件下主谐振峰 3 dB 带宽随 k_1 的变化
Fig. 5 3 dB bandwidth of the main resonance peak versus k_1 under the perfect coupling condition

取值下,两环之间的耦合系数 k_{20} 对主谐振峰带宽几乎没有影响;而当 k_1 较大时,两环之间的耦合系数 k_{20} 越大,3 dB 带宽越大,3 dB 带宽的极值也越大。

为了描述通带边沿的陡峭程度,参考文献[18]引入形状因子的定义

$$S = \frac{-1 \text{ dB}}{-10 \text{ dB}} \tag{4}$$

图 6 给出了耦合系数对主谐振峰形状因子的影响。计算结果表明形状因子的极大值与 3 dB 带宽一样,当 k_{20} 分别为 0.03,0.04 和 0.05 时,出现在 k_1 分别为 0.225,0.259 和 0.289 处。在出现极值之前, k_1 一定时, k_{20} 越大,形状因子越小,出现极值之后, k_{20} 越大,形状因子越大。当 $k_1 > 0.6$,不同 k_2 对应的形状因子均约为 0.17,表明当 $k_1 > 0.6$ 时,通带边沿下降缓慢,通带特性变差。

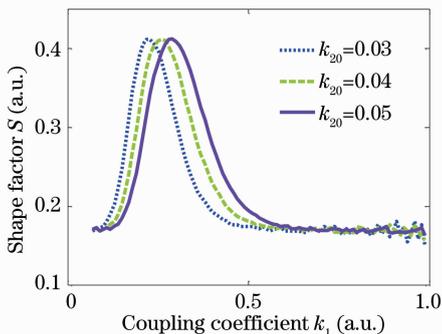


图 6 理想耦合条件下形状因子 S 随 k_1 的变化
Fig. 6 Shape factor S versus k_1 under perfect coupling condition

3.3 耦合系数对伪模峰值透射率的影响

图 2 显示的双微环谐振器的透射谱在一个自由光谱范围内对称地分布有 5 个伪模,所以只分析耦合系数对波长较小的 3 个伪模的抑制情况即可。图 7 给出当 $k_{20} = 0.05$ 时,波长分别为 1554.047, 1555.401 和 1558.115 nm 的 3 个伪模的峰值透射

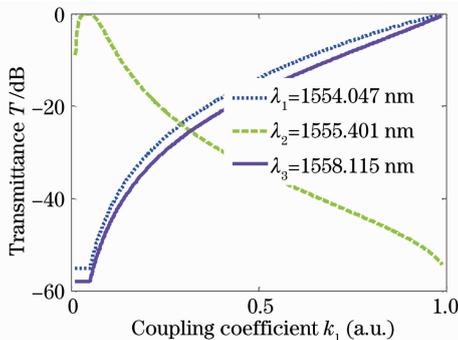


图 7 伪模的峰值透射率随 k_1 的变化
Fig. 7 Peak transmittance of three spurious modes versus k_1

率随耦合系数 k_1 的变化。

依波长由小到大,分别用 1,2,3 标示这 3 个伪模。从图 7 可以看出,在 $k_1 > k_{20}$ 的区域,随 k_1 增大,伪模 1 和伪模 3 的峰值透射率增大,而伪模 2 透射率减小,同时,伪模 3 的透射率总是小于伪模 1。伪模 1 和伪模 2 的峰值透射率交叉点出现在 $k_1 = 0.294$ 处。在 $k_1 = k_3 = 0.309$ 处,伪模 1 的透射率大于伪模 2 和伪模 3。

图 8 对比了不同的环间耦合系数下,伪模 1 和伪模 2 的峰值透射率,表明对不同的 k_{20} ,当 k_1 相同时,伪模 1 的峰值透射率不变,而伪模 2 的峰值透射率随 k_{20} 增大而增大。当 k_{20} 增大时,伪模 1 和伪模 2 峰值透射率的交叉点出现在更大的 k_1 处,交叉点对应的峰值透射率增加。

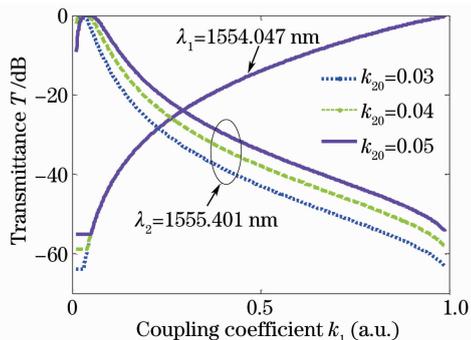


图 8 伪模 1 和伪模 2 的峰值透射率随 k_1 的变化
Fig. 8 Peak transmittance of spurious mode 1 and 2 versus k_1

综合以上计算结果可以看出,在理想耦合条件下,耦合系数 k_1 的选取应略小于 k_3 值,这样就可以获得带宽、形状因子和伪模抑制都接近最优的滤波效果,选取较大的 k_{20} 有利于带宽和形状因子的增加,但不利于伪模抑制。

4 光传输损耗的影响

光波导微环谐振器中总要存在一定的传输损耗,图 9 为有损耗和无损耗的串联双微环结构,当 $k_1 = 0.35, k_3 = 0.277$ 时,各自理想耦合条件下通带的透射率。

有损耗时的 k_{20} 比无损耗时的要大,表明为克服传输损耗,将谐振波长光尽可能从下信道输出,相比于无损耗时,需增大两环间的耦合程度。

由图 9 可以看出损耗对串联双环结构通带特性的影响:峰值透射率下降,3 dB 带宽略有增大,形状因子无明显变化。此外,进一步的计算表明有损耗时伪模的透射率也会下降。

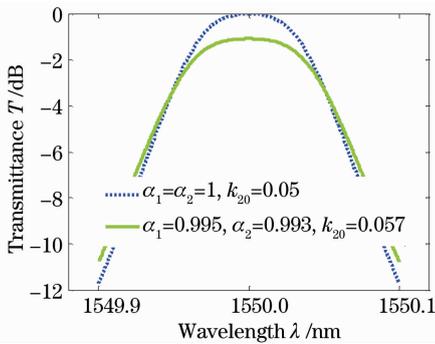


图 9 光传输损耗对串联双微环通带的影响

Fig. 9 Influence of propagation loss on the passband of series coupled two-microring resonators

实际应用中,应完善制作工艺,尽量抑制微环谐振器的损耗,从而保证主谐振峰处的透射率。对于有损耗微环的优化,可在(3)式给出的最佳耦合条件下,参考3节中关于无损微环耦合系数对滤波特性影响的计算分析过程进行。

5 结 论

对于串联双微环谐振器结构,推导给出了两微环与直波导的耦合系数不限定为相等的一般情况下的理想耦合条件。在忽略损耗的情况下,计算了理想耦合条件下,两微环与直波导的耦合系数之间的关系,计算了当入射光从与小环耦合的直波导输入时,耦合系数对主谐振峰带宽和形状因子以及对伪模峰值透射率的影响。计算结果表明,在理想耦合条件下,随环与直波导耦合系数变化,主谐振峰带宽和形状因子都有一个极大值,该极值并不出现在通常所选取的 $k_1=k_3$ 的条件下,而是出现在略小的 k_1 处,即上直波导与小环的耦合系数略小于下直波导与大环的耦合系数。几个伪模的峰值透射率呈现此起彼伏的情形,其均衡点对应的 k_1 也略小于 $k_1=k_3$ 时的 k_1 取值。

对于入射光从与大环耦合的直波导输入的情况,给出的理想耦合条件公式也是适用的,计算时只需将 k_1 和 k_3 分别定义为直波导与大环和小环的耦合系数即可,光仍由 a_1 端口输入,由 b_6 端口输出。

此外,可根据微环中存在损耗时的最佳耦合条件,进行有损耗串联双微环谐振器滤波特性的优化。因此,一般情况下的串联双微环谐振器的最佳耦合条件可用于该结构滤波器的设计和优化,可以提供更多的设计灵活性,并避免优化过程的盲目性。

参 考 文 献

- Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Transfer matrix method for analyzing the characteristics of multiple-ring higher order microring resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 929~932
- 董小伟,裴丽,简水生. 传输矩阵法分析多环高阶谐振滤波器特性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 929~932
- Gao Zhensen, Li Chunfei. Optical properties of the series-coupled microring resonators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 675~679
- 高震森,李淳飞. 串联微环谐振器的光学特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 675~679
- Yan Xin. Simulation and Analysis of Microring Resonant Wavelength Multiplexers [D]. Changchun: Jilin University, 2006. 45~93
- 闫欣. 微环谐振波分复用器的模拟与分析[D]. 长春: 吉林大学, 2006. 45~93
- Y. Goebuchi, T. Kato, Y. Kokubun. Multiwavelength and multiport hitless wavelength-selective switch using series-coupled microring resonators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(9): 671~673
- Wang Xianyin, Ma Chungsheng, E. Shulin *et al.*. Theoretical analysis for transmission characteristics of polymer microring resonant wavelength multiplexer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 46~50
- 王现银,马春生,鄂书林等. 聚合物微环谐振波分复用器传输特性的理论分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 46~50
- S. T. Chu, B. E. Little, W. Pan. An eight-channel add-drop filter using vertically coupled microring resonators over a cross grid [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 691~693
- B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus *et al.*. Microring resonator channel dropping filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(16): 998~1005
- T. Barwicz, M. A. Popovic, P. T. Rakich *et al.*. Microring-resonator-based add-drop filters in SiN: fabrication and analysis [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(7): 1437~1442
- Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua *et al.*. Characteristics and limitations of optical filters employing single-ring microresonators [J]. *J. Optoelectronics • Letters*, 2003, **14**(1): 12~16
- 杨建义,江晓清,王明华等. 采用单环谐振器的光滤波特性及局限性[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(1): 12~16
- C. Ma, Y. Xu, X. Yan *et al.*. Optimization and analysis of series-coupled microring resonator arrays [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **262**(1): 41~46
- P. P. Absil, J. V. Hryniewicz, B. E. Little *et al.*. Vertically coupled microring resonators using polymer wafer bonding [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(1): 49~51
- Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Theory of Optical Waveguide Modes [M]. Changchun: Jilin University Press, 2007. 335~375
- 马春生,刘式塘. 光导波模式理论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2007. 335~375
- 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. 串联双环光微环谐振器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1191~1195
- O. Schwelb. The nature of spurious mode suppression in extended FSR microring multiplexers [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **271**(2): 424~429

- 15 Wen Quan. Analysis on Spurious Mode Suppression of Microring Resonator Filters [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007. 11~15
文 权. 微环谐振滤波器的伪模抑制分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2007. 11~15
- 16 D. G. Rabus. Integrated Ring Resonators: The Compendium [M]. Berlin: Springer, 2007. 18~19
- 17 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Characteristic analyses of series-coupled multiple-ring resonator filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 207~211
董小伟, 裴 丽, 简水生. 集成串联环型谐振光滤波器特性的数值分析[J]. 光学学报, 2006, **26**(2): 207~211
- 18 Y. Yanagase, S. Suzuki, Y. Kokubun *et al.*. Box-like filter response and expansion of FSR by a vertically triple coupled microring resonator filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(8): 1525~1529