

文章编号: 0253-2239(2006)02-0207-5

# 集成串联环型谐振光滤波器特性的数值分析\*

董小伟 裴 丽 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要:** 将串联结构的环型谐振滤波器类比为四端口网络, 利用传输矩阵法推导出通路和下话路传输函数的通用公式。对表征串联双环谐振滤波器响应的特性参量: 幅度平坦性、通带带宽、相位群时延进行了数值计算和优化设计。结果表明, 尽管损耗将引起滤波响应幅度的轻微降低, 但在目前改善了的制作工艺下, 损耗对器件的影响可以忽略; 滤波器的传输特性主要由环与环间耦合系数决定, 通过优化使其从中间到两侧对称增加, 可以在实现滤波响应最大平坦性的同时, 改善通带带宽和过渡带的滚降特性。与单环结构相比, 不仅幅度特性得到了明显的改善, 而且消除了二阶群时延色散效应。

**关键词:** 集成光学; 光滤波器; 微环谐振滤波器; 传输函数; 串联耦合

中图分类号: TN252; TN256 文献标识码: A

## Characteristic Analyses of Series-Coupled Multiple-Ring Resonator Filter

Dong Xiaowei Pei Li Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract:** By introducing the equivalent four-port network, the general formulas for the series-coupled multiple-ring resonator were derived with the transfer matrix method. The characteristic parameters of series-coupled double-rings resonator such as, amplitude flatness, bandwidth and phase group delay, were analyzed and optimized. Numerical results demonstrated that the propagation loss on the device was negligible with improved fabrication techniques. Since filter performances were determined by the coupling coefficients, the maximal flat response with sharper rolloff could be achieved by setting coupling coefficients symmetric and smaller in the middle. Compared with single-ring resonator, the series-coupled multiple-rings structure obviously improved the amplitude response and eliminated the second-order group delay dispersion.

**Key words:** integrated optics; optical filter; microring resonator filter; transfer function; series-coupled

### 1 引 言

密集波分复用(DWDM)系统的推广和应用使得光纤带宽的利用率显著提高, 通信容量不断增长。光滤波器作为波分复用中的一种关键器件, 其性能对波分复用系统具有直接的影响<sup>[1]</sup>。近年来, 基于环型谐振腔的光滤波器因其功能强、结构简洁、集成度高等优点引起了人们的广泛关注<sup>[2,3]</sup>。与法布里-珀罗(F-P)谐振滤波器相比, 环型谐振滤波器具有四个端口作为输入和输出, 避免了两端口法布里-珀罗滤波器为分离输入与反射信号所必须使用的昂贵的环型器。单环谐振滤波器的响应函数为洛伦兹

型, 在信道间隔较小的情况下, 将提高对激光器的要求, 不利于实际使用<sup>[4]</sup>。随着制作工艺的进步, 将多个环型谐振腔串联形成的高阶光滤波器, 可以得到近似方形的滤波效果。目前, 通过调整波导芯子和包层材料的折射率差, 在不恶化器件损耗的情况下, 微环谐振腔的半径已经可以小于  $10 \mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>; 并且输入/输出直波导与环型谐振腔采用分层垂直耦合, 集成的 11 阶串联环型谐振滤波器已经设计成功<sup>[2]</sup>, 在器件尺寸极大降低的同时, 性能也得到了明显的改善。

但是对串联环型谐振滤波器的分析主要是基于

\* 国家自然科学基金(60337010)、国家 863 计划(2001AA312230)和霍英东基金(91062)资助课题。

作者简介: 董小伟(1978~), 女, 天津人, 北京交通大学光波技术研究所博士研究生, 主要从事光通信器件的研究。

E-mail: way7803@163.com

收稿日期: 2005-02-21; 收到修改稿日期: 2005-06-22

有限差分域法(FDTD)<sup>[6]</sup>和时域耦合模理论<sup>[7]</sup>,不仅十分复杂,而且不易于形成明确的物理概念。本文通过将串联结构的环型谐振滤波器类比为四端口网络,推导出通路和下话路传输函数的通用公式,并对影响滤波响应特性的结构参量进行了优化设计。

## 2 理论分析

### 2.1 通用结构和传输函数

图1(a)为典型的 $N$ 个环型谐振腔串联的结构示意图。光信号从端口 $a_1$ 输入,通过方向耦合器进入环型谐振腔,当环个数为奇数时,在环内循环并满

足相位相干加强的光信号,从端口 $a_2$ 下话路滤波输出;当环个数为偶数时,从端口 $b_2$ 输出。而其它不满足相干加强的光信号,其输出端口则为 $b_1$ 。

串联环型谐振滤波器可以类比为四端口网络<sup>[8]</sup>,其中端口 $b_1$ 相当于网络的反射端, $a_2$ (或 $b_2$ )相当于网络的传输端,而方向耦合器的作用相当于网络中的连接元件,环型谐振腔的波导部分实现网络中的传输线功能。这样 $N$ 个环串联的谐振滤波器结构就可拆分为 $N+1$ 个方向耦合器和半环波导的级联[如图1(b)所示]。

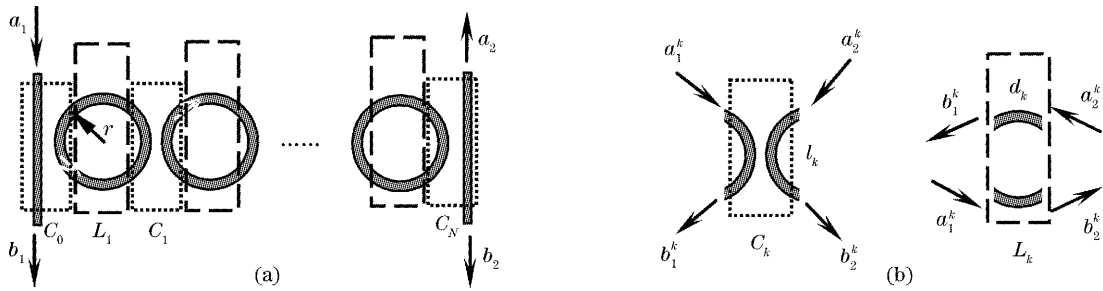


图1 (a) 串联耦合多环谐振滤波器, (b) 串联谐振滤波器拆分为方向耦合器(点线框)和半环波导(虚线框)的级联  
Fig. 1 (a) Series-coupled multiple-rings resonator (MRR) filter, (b) MRR is divided into the directional coupler (dotted line) and the uncoupled guides (dash line)

根据光波导的耦合模理论,第 $k$ 个方向耦合器的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} b_1^k \\ b_2^k \end{bmatrix} = \exp(j\beta l_k) \begin{bmatrix} \cos(c_k l_k) & j\sin(c_k l_k) \\ j\sin(c_k l_k) & \cos(c_k l_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^k \\ a_2^k \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$j$ 为虚变量。定义: $T_k = \exp(j\beta l_k) \cos(c_k l_k)$ ,  $K_k = \exp(j\beta l_k) \sin(c_k l_k)$  分别为方向耦合器的归一化传输系数和耦合系数,即  $T_k^2 + K_k^2 = 1$ 。将上面的方程进行矩阵变换,得到联系端口对 $(a_1^k, b_1^k)$ 和 $(b_2^k, a_2^k)$ 的矩阵关系,即

$$\begin{bmatrix} b_2^k \\ a_2^k \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} 1/K_k & -T_k/K_k \\ T_k/K_k & -1/K_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^k \\ b_1^k \end{bmatrix} = G_k^c \begin{bmatrix} a_1^k \\ b_1^k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

由于器件的损耗主要由波导的传输损耗决定<sup>[9]</sup>,令

$$\tau_k = \exp(-\alpha_p \cdot 2\pi R_k),$$

其中 $\alpha_p$ 为波导的传输损耗系数, $R_k$ 为微环的半径。此时第 $k$ 个半环波导的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} b_2^k \\ a_2^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_k^{1/2} \cdot \exp(j\beta d_k) & 0 \\ 0 & \tau_k^{-1/2} \cdot \exp(-j\beta d_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^k \\ b_1^k \end{bmatrix} = G_k^v \begin{bmatrix} a_1^k \\ b_1^k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

利用传输矩阵法,将方向耦合器和半环波导的传输矩阵级联相乘,就可得到用矩阵表示的串联环型谐振滤波器的传输函数:

$$G = \prod_{k=1-N} (G_k^c \cdot G_k^v) \cdot G_0^c = j^{N+1} \left\{ \prod_{k=1-N} \begin{bmatrix} \tau_k^{1/2} \cdot \exp(j\beta d_k) / K_k & -\tau_k^{-1/2} \cdot \exp(-j\beta d_k) \cdot T_k / K_k \\ \tau_k^{1/2} \cdot \exp(j\beta d_k) \cdot T_k / K_k & -\tau_k^{-1/2} \cdot \exp(-j\beta d_k) / K_k \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} 1/K_0 & -T_0/K_0 \\ T_0/K_0 & -1/K_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 $k$ 表示方向耦合器和半环波导所在的位置; $c_k$ ,  $l_k$ 分别为耦合器的耦合系数和长度; $\beta = (\omega/c)n_{\text{eff}}$ 为传输常数, $\omega$ 为信号的角频率, $n_{\text{eff}}$ 为有效折射指数;

$c$ 为光速, $d_k$ 为半环的长度。

定义光信号在环型谐振腔循环一周的累计相位为 $\phi_k = \beta(l_k + l_{k-1} + 2d_k) = \beta \cdot 2\pi R_k$ ,这样,通路和

下话路的滤波传输函数就可表示为  $T(\omega) = b_1/a_1 = -G_{21}/G_{22}$  和  $D(\omega) = b_2/a_1 = 1/G_{22}$ ，通过对谐振器结构参量的优化，设计出所需响应特性的滤波效果<sup>[10]</sup>。

## 2.2 串联双环结构

尽管串联双环结构是串联谐振滤波器中最简单

的，但其所有特性均可推广到更高阶的串联结构，并且由于通路和下话路传输函数的互补性，因此下面对串联双环谐振滤波器下话路特性的分析同样适用于通路特性的研究。

将  $N = 2$  代入(4)式，则串联双环下话路的传输函数可简化为

$$D(\omega) = \frac{b_2}{a_1} = \frac{jK_1 K_2 K_3 \tau_1^{1/2} \tau_2^{1/2} \exp[j(\phi_1 + \phi_2)/2]}{1 - [T_1 T_2 \tau_1 \exp(j\phi_1) + T_2 T_3 \tau_2 \exp(j\phi_2)] + T_1 T_3 \tau_1 \tau_2 \exp[j(\phi_1 + \phi_2)]}, \quad (5)$$

$D(\omega) = |D(\omega)| \exp(j\Phi)$  为复数，因此滤波器响应由幅度和相位特性共同决定。从(5)式可知，其幅度函数为

$$|D(\omega)|^2 = \frac{K_1^2 K_2^2 K_3^2 \tau_1 \tau_2}{|1 - [T_1 T_2 \tau_1 \exp(j\phi_1) + T_2 T_3 \tau_2 \exp(j\phi_2)] + T_1 T_3 \tau_1 \tau_2 \exp[j(\phi_1 + \phi_2)]|^2}, \quad (6)$$

同时，相位函数可表达为：

$$\Phi = \frac{\pi + \phi_1 + \phi_2}{2} - \arctan \left[ \frac{T_1 T_3 \tau_1 \tau_2 \sin(\phi_1 + \phi_2) - T_1 T_2 \tau_1 \sin \phi_1 - T_2 T_3 \tau_2 \sin \phi_2}{1 + T_1 T_3 \tau_1 \tau_2 \cos(\phi_1 + \phi_2) - T_1 T_2 \tau_1 \cos \phi_1 - T_2 T_3 \tau_2 \cos \phi_2} \right], \quad (7)$$

## 3 数值计算和优化

基于上面推导出的传输函数，对两种不同结构的串联双环谐振滤波器的幅度平坦性、通带带宽和相位群时延特性的进行数值分析，以实现滤波响应特性的优化。

### 3.1 环半径相同情况的讨论

随着目前制作工艺的进步，环型谐振滤波器对光信号的散射损耗、弯曲损耗和泄漏损耗的损耗系数均可降到  $10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  以下，因此器件的损耗主要由波导的传输损耗决定<sup>[9]</sup>。图2给出了两环半径同为  $10 \mu\text{m}$  时，波导传输损耗对滤波器幅度特性的影响(实线)。为验证方法的正确性，图中同时给出了利用文献[7]中的时域耦合模公式(17)计算的结果(虚线)。两者符合得很好；并且在目前传输损耗典型值  $\alpha_p \approx 0.1 \text{ cm}^{-1}$  的条件下，损耗只引起幅度响应的轻微下降，即使损耗达到  $\alpha_p \approx 1 \text{ cm}^{-1}$ ，其降低程

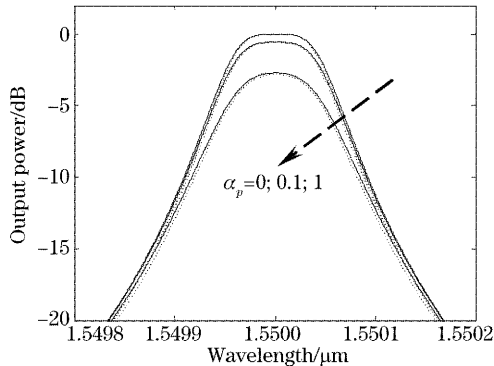


图2 损耗对下话路滤波幅度响应的影响

Fig. 2 Effect of the propagation loss on the amplitude response at drop port

度也小于 3 dB。

两环半径相等，即  $R_1 = R_2 = R$ ，此时  $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ ，从(6)式可见：当  $K_1 = K_3$  时， $|D(\omega)|^2$  的极大值为 1，此时对应的光信号在环型谐振腔循环一周的累计相位  $\phi = \arccos\left(\frac{1+T_1^2}{2T_1} T_2\right)$ ，而当累计相位  $\phi_{\text{res}} = 2m\pi$  ( $m$  为整数)时通带内的幅度达到极小值  $\delta_0$ ，因此若要求通带内的幅度波动小于  $\delta_0$ ，在  $\phi_{\text{res}}$  处应有  $|D(\omega)|^2 \geq 1 - \delta_0$ ，则环间耦合系数  $K_2$  需满足<sup>[11]</sup>

$$\frac{1 - \sqrt{\delta_0}}{\sqrt{1 - \delta_0}} \frac{K_1^2}{2 - K_1^2} \leq K_2 \leq \frac{1 + \sqrt{\delta_0}}{\sqrt{1 - \delta_0}} \frac{K_1^2}{2 - K_1^2}, \quad (8)$$

为实现最大平坦滤波器的设计，通带纹波应为  $\delta_0 = 0$ ，因此串联双环结构中各耦合系数之间应满足

$$K_1 = K_3, \quad K_2 = \frac{K_1^2}{2 - K_1^2} \approx \frac{K_1^2}{2}, \quad (9)$$

即耦合系数从中间到两侧对称增加。图3数值模拟

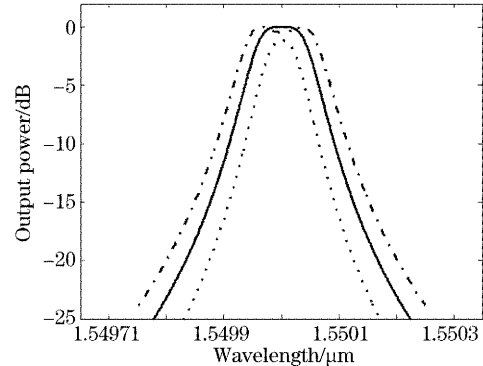


图3 耦合系数对下话路幅度平坦特性的影响

Fig. 3 Amplitude flatness at drop port under different coupling coefficients

了串联双环谐振滤波器在不同耦合系数时下话路的光谱特性。虚线、实线、点划线对应的耦合系数分别为： $[0.1, 3 \times 10^{-3}, 0.1]$ ， $[0.1, 5 \times 10^{-3}, 0.1]$ ， $[0.1, 7 \times 10^{-3}, 0.1]$ ，可见实线对应最大平坦的滤波特性，与上面的分析一致。

带宽比是表征滤波器通带响应形状和过渡带滚降特性的重要参量，为调查耦合系数对带宽比的影响，图4给出了双环谐振滤波器带宽随耦合系数 $K_1$ 变化的情况 $[K_2, K_3]$ 由满足最大平坦特性的关系式(9)得到]，并与单环的情况进行了比较。尽管双环和单环结构的带宽都随 $K_1$ 的增加而增大，但在耦合系数较小的情况下，带宽比基本保持不变。通过对10 dB与1 dB带宽比的数值计算发现，双环结构的带宽比仅为2.43，较带宽比为5.94的单环结构有明显的降低，通带形状更接近方形。

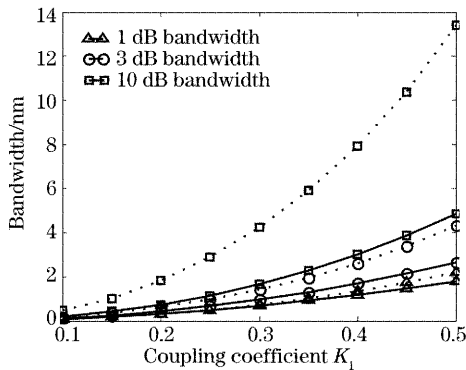


图4 单环(虚线)和双环(实线)谐振滤波器带宽随耦合系数 $K_1$ 的变化

Fig. 4 Bandwidths of single-ring (dash line) and double-rings (solid line) resonant filters vary with the coupling coefficient  $K_1$

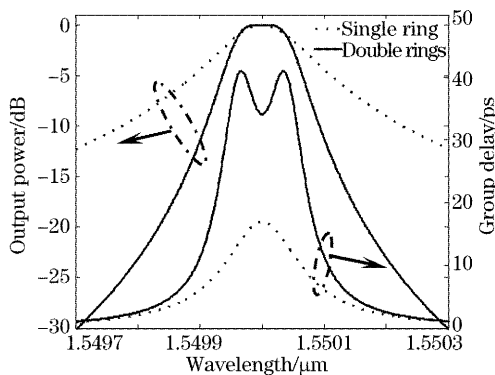


图5 双环与单环谐振滤波器下话路传输函数幅度和群时延特性的比较

Fig. 5 Comparison of amplitude and group delay characteristics between single-ring and double-rings resonator filter

除幅度特性外，相位群时延特性对于滤波器的应用也十分重要。根据(7)式，利用 $d\Phi/d\omega$ 可得到环型谐振滤波器的群时延特性，图5给出了具有最大平坦特性的双环谐振滤波器的幅度和相位群时延特性，并与单环谐振的情况进行了对比。在幅度响应的平坦性和滚降特性都得到了明显改善的同时，双环谐振的群时延在滤波器的中心频率附近更加平坦，因此消除二阶色散效应，对被滤波信号造成的失真作用更小。

### 3.2 环半径不同情况的讨论

在波分复用系统应用中，有时需要在很宽的频谱范围内只对单一信道进行下话路，而不干扰其它信道，这就要求滤波器的自由光谱范围(FSR)必须覆盖整个系统的带宽，而单环谐振滤波器的自由光谱范围与环的半径近似成反比，要扩展自由光谱范围，例如覆盖整个掺铒光纤放大器(EDFA)的增益范围(近似30 nm)，环的半径必须小于 $5 \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>，制作工艺的要求将十分苛刻。为解决这一困难，将具有不同半径的环串联耦合，此时只有在两个环中同时满足谐振加强条件的光信号才能下话路输出。根据游标效应，如果两个环单独谐振时的自由光谱范

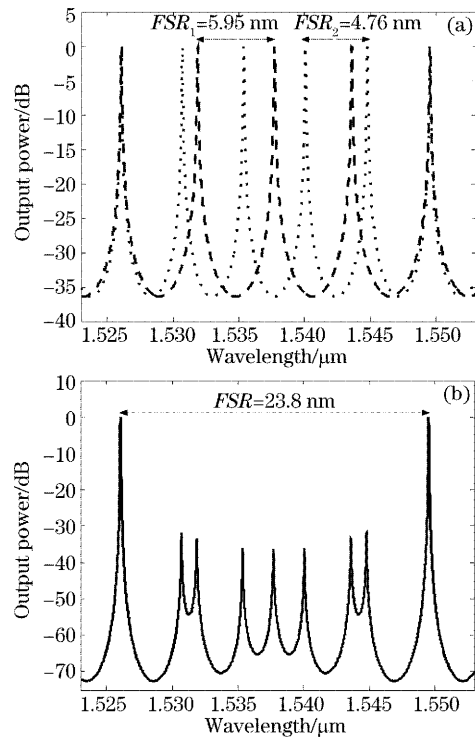


图6 (a)环单独谐振时的响应光谱,(b)两个环串联耦合时自由光谱范围的扩展

Fig. 6 (a) Response spectrum of single-ring resonator, (b) Free spectrum range (FSR) enhanced by series-coupled double-rings structure

围分别为  $FSR_1$  和  $FSR_2$ , 则串联结构的自由光谱范围  $FSR$  应为  $FSR_1$  和  $FSR_2$  的最小公倍数, 即  $FSR = m \cdot FSR_1 = n \cdot FSR_2$  (其中  $m, n$  为整数)。图 6(a) 为半径分别为  $40 \mu\text{m}$  (虚线) 和  $50 \mu\text{m}$  (点线) 的两个环单独谐振时的响应光谱, 其中  $FSR_1 = 5.95 \text{ nm}$ ,  $FSR_2 = 4.76 \text{ nm}$ ; 图 6(b) 为两环串联耦合时的情况, 可见自由光谱范围  $FSR = 23.8 \text{ nm}$ , 得到了成倍的扩展。

## 4 结 论

通过对串联双环谐振滤波器的设计发现: 当两个环半径相等时, 优化环间耦合系数使其沿中心向两侧对称增加, 可以在实现最大平坦滤波响应特性的同时, 改善通带带宽和过渡带滚降特性, 并消除了二阶群时延色散效应; 而利用游标效应, 将两个环设计成半径不等的结构, 自由光谱范围将极大地增加, 从而改善信道间的串扰。本文利用传输矩阵法推导出的通用公式简单实用, 对串联环型谐振滤波器的设计具有重要指导意义。

## 参 考 文 献

- Xiao Yueyu, He Sailing. The design of cascaded Mach-Zehnder interferometer filter based on digital filter technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 346~350 (in Chinese)  
肖悦娱, 何赛灵. 一种级联马赫-曾德尔滤波器设计的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 346~350
- P. P. Absil, S. T. Chu, D. Gill *et al.*. Very high order integrated optical filters[C]. *OFC 2004*. **TuL3**: 37~39
- Song Kang, Li Yigui, Chen Shuliang. Micro-cavity filter based on MEMS micro-fabrication technology[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(6): 659~661 (in Chinese)  
宋康, 李以贵, 陈水良. 基于微细加工技术的微谐振腔型滤波器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 659~661
- Shuichi Suzuki, Yasuo Kokubun, Masataka Nakazawa *et al.*. Ultrashort optical pulse transmission characteristics of vertically coupled microring resonator add/drop filter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(2): 266~271
- B. E. Little, S. T. Chu, W. Pan *et al.*. Vertically coupled glass microring resonator channel dropping filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2): 215~217
- C. Arnaud, P. Feron, M. Boustimi *et al.*. FDTD simulation of  $30 \mu\text{m}$  diameter polymer micro-ring[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(17): 1249~1250
- 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
- R. Orta, P. Savi, R. Tascone *et al.*. Synthesis of multiple-ring resonator filters for optical systems[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(12): 1447~1449
- 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 (in Chinese)  
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
- Christopher J. Kaalund, Gang-Ding Peng *et al.*. Pole-zero diagram approach to the design of ring resonator-based filters for photonic applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(6): 1548~1559
- Jianyi Yang, Qingjun Zhou, Feng Zhao *et al.*. Characteristics of optical bandpass filters employing series-cascaded double-ring resonators[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(1~3): 91~98