

# 信号流程图理论分析多环谐振滤波器特性

杨鹏勃 梁金龙 曲阳 陈晨 王甲伟 高劭宏

(黑龙江大学物理科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 微环谐振腔以其功能多样、结构简洁、集成度高等特点已经成为当前的研究热点。采用多环结构形成的滤波器能够在通带内比单环谐振滤波器更为陡峭的滚降、更平坦的峰顶和更好的抑制阻带。利用信号流程图法(SFG)推导了串联耦合和并联耦合两种形式的多环谐振滤波器的系统传递函数公式。在串联结构中,滤波器的输出特性主要受到耦合系数和损耗的影响;在并联结构中,通过优化环间距,从而使下载端输出光谱达到比较好的形状。

**关键词** 光学器件;波导光学;光滤波器;微环谐振腔;信号流程图

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.092301

## Signal Flow Graph for Analyzing Characteristics of Multiple-Ring Microring Resonator Filters

Yang Pengbo Liang Jinlong Qu Yang Chen Chen Wang Jiawei Gao Shaohong  
(College of Physical Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** Microring resonator has become a hotspot due to its functionality, compactness, and dense integration. The microring resonators provide passband characteristics of steeper roll-off, flatter top and greater stopband rejection than single ring resonators. Both the transfer functions of series-coupled and parallel-coupled multi-ring microring resonator filters are derived by the signal flow graph method. For the series-coupled structure, the filtering response of filter is determined by the coupling coefficients between rings and the optical loss. For the parallel-coupled structure, the good shape of spectral response is achieved by optimizing the ring distance.

**Key words** optical devices; waveguide optics; optical filter; microring resonator; signal flow graph

**OCIS codes** 230.7370; 130.3120; 130.3990; 130.7408; 200.1130

## 1 引言

当前,基于微环谐振腔的选择性带通滤波器已经成为密集波分复用系统(DWDM)中的关键器件。它具有信道上载下载、信道选择、波分复用和多信道滤波等基本功能<sup>[1~7]</sup>。这些功能的实现都要求微环谐振滤波器具有良好的选择性(能够分离相邻的波)、尽可能低的串扰、平坦的带通和较低的插入损耗。

在单环谐振滤波器输出光谱为洛仑兹曲线的情况下,其谱线两侧的滚降并不能使两信道之间的串扰达到最小化<sup>[2]</sup>。因此,在密集波分复用系统的很多重要应用中其表现并不尽如人意。为此,人们提出了多环结构的谐振滤波器来改善滤波性能,主要可以概括为多环的串联<sup>[4]</sup>和多环的并联结构<sup>[5]</sup>,以及由闫欣等<sup>[6]</sup>提出的 $M \times N$ 多环阵列。相对于单环结构,多环结构使输出光谱得到了很好的优化,从而能够有效地改善滤波特性。

光学滤波器的理论分析,最典型的方法是基于麦克斯韦方程组的耦合模理论,这种方法无论是在空间还是在时间上都可以用数学方程来表示。但是在实际应用时,该方法显得比较笨拙,而且不直观。特别是在分析多环结构时,求解过程比较繁琐。因此,人们又提出了基于频域的传输矩阵、特征矩阵等方法来推导光学滤波器的传输函数。另外,在分析复杂的光学环型腔及快速推导系统传输函数时,一种图示法——信号流程

收稿日期: 2011-03-24; 收到修改稿日期: 2011-04-22; 网络出版日期: 2011-07-29

作者简介: 杨鹏勃(1983—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: wys3941f@126.com

导师简介: 高劭宏(1959—),男,副教授,主要从事光通信方面的研究。E-mail: shgaohit@163.com(通信联系人)

图法(SFG)也被广泛采用。这种方法最早由梅森(Mason)<sup>[7]</sup>提出,最初主要应用于电信号系统中,近年逐渐被应用在光信号系统的分析中<sup>[8]</sup>。

本文利用信号流程图法推导了平行信道单环谐振滤波器的传输函数,并对其输出特性进行了分析。以此为基础对串联双环和并联双环两种结构的谐振滤波器传输函数进行了推导。分析了耦合系数和损耗对串联双环谐振滤波器输出光谱特性的影响,并讨论了环间距对并联双环谐振滤波器输出特性的影响。

## 2 微环谐振腔的系统传递函数

上下载型单微环谐振腔结构如图 1(a)所示,可以把其看成是由  $2 \times 2$  的耦合器和环形腔两部分构成。 $2 \times 2$  的耦合器<sup>[9,10]</sup>用信号流程图 1(b)表示。第  $i$  个耦合器的耦合系数用  $\kappa_i$  表示,而每个耦合器的插入损耗用  $\gamma$  表示,那么传输路径的增益可以表示为:  $c_i = \sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa_i)}$ 。同理,耦合路径的增益则可以由  $-js_i = -j\sqrt{(1-\gamma)\kappa_i}$  来表示。至于光沿着环形腔(闭合路径)传递的增益,可以表示为  $\xi = xz^{-1}$ , 其中  $x = \exp(-\alpha L)$  表示一个周期的损耗系数,  $z^{-1}$  则表示  $Z$  变换参数,用下式表示:

$$z^{-1} = \exp(-j\beta L), \quad (1)$$

式中  $\beta = kn_{\text{eff}}$  为传播常数,  $k = 2\pi/\lambda$  为真空中的波数,  $n_{\text{eff}}$  为波导的有效折射率。微环的周长为  $L = 2\pi R$ , 在这里  $R$  为微环半径。当多环谐振滤波器中各环周长相同时,就称之为标准微环谐振滤波器。自由谱宽也就可以被定义为

$$R_{\text{fs}} = \frac{\lambda^2}{n_g L}, \quad (2)$$

式中  $n_g = n_{\text{eff}}(\lambda_0) + \lambda_0 (dn_{\text{eff}}/d\lambda)_{\lambda_0}$  为微环的群折射率,  $n_{\text{eff}}$  和  $\lambda_0$  分别是有效折射率和中心波长<sup>[9]</sup>。

微环谐振腔在一个高阶级数  $M$  处产生谐振,即在中心波长  $\lambda_0$  处,光绕微环一圈的相位差为  $2\pi$  的整数倍,整数  $M$  就是这一模式下的谐振级数。并且,  $\lambda_0 = M \cdot R_{\text{fs}}$ 。

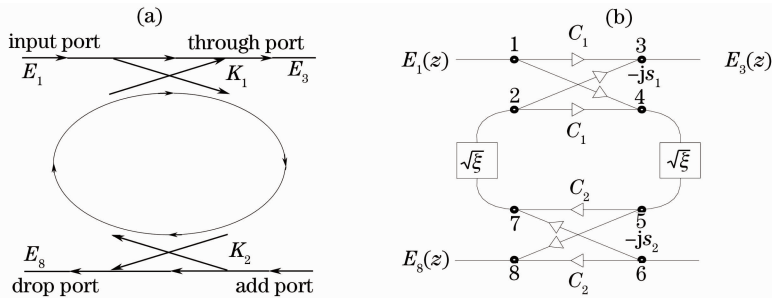


图 1 单环上下载谐振滤波器结构图。(a)波导平面图;(b)信号流程图

Fig. 1 Architecture of single microring resonator add/drop filter. (a) Waveguide layout; (b) signal flow graph (SFG)

表征微环谐振滤波器性能的基本参数有三个:1)  $\tau_{-3\text{dB}}$  ( $-3\text{dB}$  带宽,即谱线功率相对于峰值下降  $3\text{dB}$  的时候,谱线对应的两波长之差)或者半峰全宽( $\tau_{\text{FWHM}}$ );2) 消光比  $R_{\text{ext}}$ ;3) 形状因子  $F_{\text{shape}}$ 。对于无损耗的微环谐振腔,  $\tau_{-3\text{dB}}$  主要由耦合系数和光程差决定。

对于输出端与下载端的消光比来说,其值实际上就是谐振功率与非谐振功率之比。可以表示为

$$R_{\text{ext}} = 10 \lg \frac{P_{\text{max(throughput port)}}}{P_{\text{min(drop port)}}} = 10 \lg \left| \frac{H_t}{H_d} \right|^2.$$

形状因子是用来描述滤波器输出端和下载端的输出谱线的,其定义为

$$F_{\text{shape}} = \frac{\tau_{-1\text{dB}}}{\tau_{-10\text{dB}}}.$$

### 2.1 光信号系统的梅森公式

向前路径,指从一个结点到另一个结点的所有同一方向相连接的支路的集合,并且要求这些支路只能经过同一结点一次。闭环是指起始和终止于同一个结点的向前路径。闭环和向前路径的增益为其各自所包含的支路增益的乘积。如果向前路径和闭环没有相同的结点,那么我们就说它们互不接触。由梅森公式可知

系统的传递函数或者由一点到另一点的传递关系可以由信号流程图理论表示为

$$H = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n T_i \Delta_i, \quad (3)$$

式中  $H$  表示从输入端口到输出端口的传递函数,  $n$  是从输入端口到输出端口的总向前路径数,  $T_i$  表示输入结点到输出结点之间第  $i$  个前向路径的增益,  $\Delta$  是信号流程图所表示的线性方程组的系数矩阵行列式, 通常称为图行列式, 其表达式如下:

$$\Delta = 1 - \sum_i L_i + \sum_{i,j} L_i L_j - \sum_{i,j,k} L_i L_j L_k + \dots, \quad (4)$$

式中  $L_i$  是第  $i$  个闭环的传输增益。式中的乘积仅包括互不接触的闭环乘积。“互不接触”表示闭环没有共同的结点, 即独立闭环。奇数环增益的乘积前为减号, 偶数环增益的乘积前为加号。 $\Delta_i$  表示和第  $T_i$  个向前路径没有任何接触的图行列式  $\Delta$ 。以上对信号流程图理论作了简要的介绍, 下面将用它来表述光学微环谐振滤波器系统。

## 2.2 平行信道单环上下载型谐振滤波器的传递函数

微环谐振滤波器的输出端和下载端相对于输入端  $E_1$  的传递函数可以由梅森公式推导得出。首先推导单环谐振滤波器传输函数, 然后依次对串联双环和并联双环谐振滤波器进行推导。单环上下载型滤波器的信号流程图如图 1(b) 所示, 其中  $E_1(z)$  为输入结点,  $E_3(z)$  和  $E_8(z)$  分别表示输出端结点和下载端结点。

1) 从输入端到输出端的传递函数  $E_3(z)/E_1(z)$ : 根据图 1(b) 可知, 其中包含一个独立的闭环, 可以表示为

$$L_1 = c_1 c_2 \xi. \quad (5)$$

对于输出端来说, 从结点 1 到结点 3 的向前路径, 以及和它互不接触的闭环的图行列式可以表示为

$$T_{1t} = -c_2 s_1^2 \xi, \quad \Delta_1 = 1, \quad (6)$$

$$T_{2t} = c_1, \quad \Delta_2 = 1 - L_1^1 = 1 - c_1 c_2 \xi. \quad (7)$$

按照(4)式, 依梅森公式可得信号流程图的图行列式

$$\Delta = 1 - L_1 = 1 - c_1 c_2 \xi. \quad (8)$$

将(5)~(8)式代入(3)式, 则图 1(b) 所示的输出端的振幅传递函数可以表示为

$$\frac{E_3(z)}{E_1(z)} = H_t = \frac{c_1 - c_2 \xi}{1 - c_1 c_2 \xi}. \quad (9)$$

2) 从输入端到下载端的传递函数  $E_8(z)/E_1(z)$ : 对于下载端来说, 仅有一个向前路径, 而且与(5)式所给出的闭环  $L_1^1$  相接触。因此可以得出

$$T_{1d} = -s_1 s_2 \sqrt{\xi}, \quad \Delta_1 = 1. \quad (10)$$

将(8), (10)式代入(3)式, 则图 1(b) 所示的下载端的振幅传递函数为

$$\frac{E_8(z)}{E_1(z)} = H_d = -\frac{s_1 s_2 \sqrt{\xi}}{1 - c_1 c_2 \xi}. \quad (11)$$

将(9)式和(11)式展开可得

$$\frac{E_3(z)}{E_1(z)} = H_t = \frac{\sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa_1)} - \sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa_2)} \exp(-aL - j\beta L)}{1 - \sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa_1)} \sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa_2)} \exp(-aL - j\beta L)}, \quad (12)$$

$$\frac{E_8(z)}{E_1(z)} = H_d = -\frac{\sqrt{(1-\gamma)\kappa_1} \cdot \sqrt{(1-\gamma)\kappa_2} \exp[1/2(-aL - j\beta L)]}{1 - \sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa_1)} \sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa_2)} \exp(-aL - j\beta L)}. \quad (13)$$

可以看出, 上面两式与耦合模和传输矩阵法给出的传递函数表达式是一样的<sup>[5,11,12]</sup>。由此可见, 将信号流程图理论用在光信号系统的分析中是可行的。

## 2.3 平行信道串联双环上下载型谐振滤波器的传递函数

串联双环谐振滤波器的信号流程图如图 2(b) 所示, 图中输入结点是  $E_1(z)$ , 输出结点和下载结点分别是  $E_3(z)$  和  $E_{12}(z)$ 。

1) 输入端口到输出端口的传递函数  $E_3(z)/E_1(z)$ : 流程图中三个独立的闭环增益, 分别可以表示为

$$L_1^s = c_1 c_2 \xi, \quad (14)$$

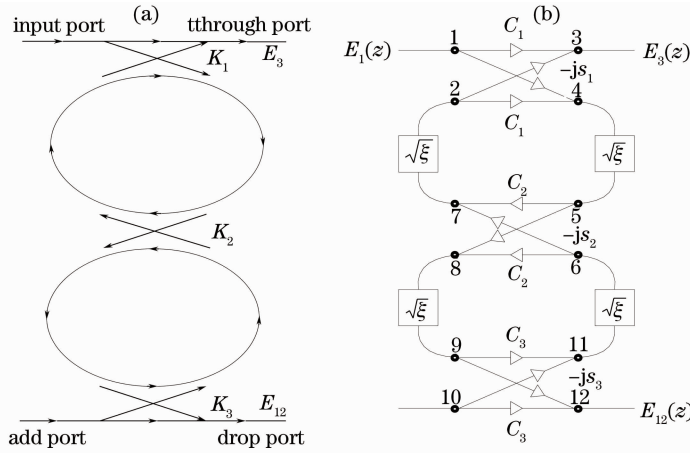


图2 串联双环上下载谐振滤波器结构图。(a) 波导平面图;(b) 信号流程图

Fig. 2 Architecture of series-coupled two-ring resonator add/drop filter. (a) Waveguide layout; (b) SFG

$$L_2^s = c_2 c_3 \xi, \quad (15)$$

$$L_3^s = c_1 \sqrt{\xi} (-js_2) \sqrt{\xi} c_3 \sqrt{\xi} (-js_2) \sqrt{\xi} = -c_1 c_3 s_2^2 \xi^2. \quad (16)$$

从图中可以看出,  $L_1^s$  和  $L_2^s$  是两个互不接触的闭环, 其传输路径的乘积可以表示如下

$$L_{12}^s = c_1 c_2^2 c_3 \xi^2. \quad (17)$$

对于输出端口来说, 从结点 1 到结点 3 的向前路径, 以及和它互不接触的闭环的图行列式可以表示为

$$T_{1t}^s = -c_2 s_1^2 \xi, \quad \Delta_1 = 1 - L_2^s = 1 - c_2 c_3 \xi, \quad (18)$$

$$T_{2t}^s = c_3 s_1^2 s_2^2 \xi^2, \quad \Delta_2 = 1, \quad (19)$$

$$T_{3t}^s = c_1, \quad \Delta_3 = 1 - (L_1^s + L_2^s + L_3^s) + L_{12}^s = 1 - c_1 c_2 \xi - c_2 c_3 \xi + c_1 c_3 s_2^2 \xi^2 + c_1 c_2^2 c_3 \xi^2. \quad (20)$$

按照(4)式, 并利用  $s_i^2 + c_i^2 = 1$ , 由梅森公式可得信号流程图的图行列式为

$$\Delta = 1 - (L_1^s + L_2^s + L_3^s) + L_{12}^s = 1 - c_1 c_2 \xi - c_2 c_3 \xi + c_1 c_3 \xi^2. \quad (21)$$

将(18)~(21)式代入(3)式, 可得出输出端的振幅传递函数为

$$\frac{E_3(z)}{E_1(z)} = H_t^s = \frac{c_1 - c_2 \xi - c_1 c_2 c_3 \xi + c_3 \xi^2}{1 - c_1 c_2 \xi - c_2 c_3 \xi + c_1 c_3 \xi^2}. \quad (22)$$

2) 从输入端到下载端的传递函数  $E_{12}(z)/E_1(z)$ : 对于下载端来说, 从结点 1 到结点 12 仅有一条向前路径, 而且由于它和所有闭环都有接触, 因此

$$T_{1d}^s = js_1 s_2 s_3 \xi, \quad \Delta_1 = 1. \quad (23)$$

将(21), (23)式代入(3)式, 我们可以得出下载端的振幅传递函数为

$$\frac{E_{12}(z)}{E_1(z)} = H_d^s = \frac{js_1 s_2 s_3 \xi}{1 - c_1 c_2 \xi - c_2 c_3 \xi + c_1 c_3 \xi^2}. \quad (24)$$

## 2.4 平行信道并联双环上下载型谐振滤波器的传递函数

并联双环谐振滤波器的信号流程图如图 3(b)所示,  $d$  为主信道上两个耦合节点之间的距离, 即两个微环圆心间的距离。按照文献[12]可知, 其传输增益可以写为  $D = \exp(-ad - \beta d)$ 。图中输入结点是  $E_1(z)$ , 输出结点和下载结点分别是  $E_5(z)$  和  $E_{16}(z)$ 。

1) 输入端口到输出端口的传递函数  $E_5(z)/E_1(z)$ : 流程图中 6 个独立的闭环增益分别可以表示为

$$L_1^p = c_1 \sqrt{\xi} c_4 \sqrt{\xi} = c_1 c_4 \xi, \quad (25)$$

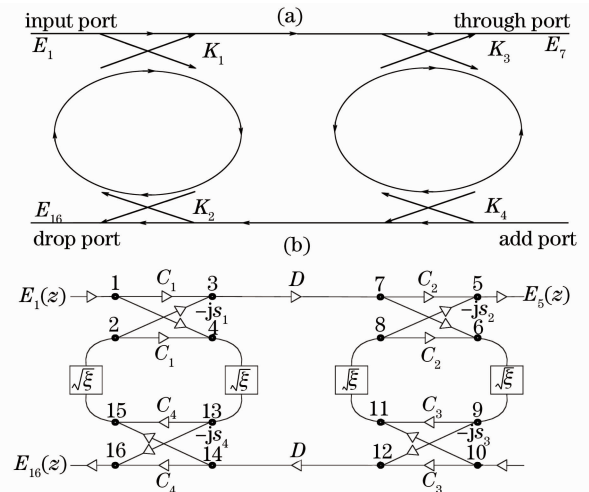


图3 并联双环上下载型谐振滤波器结构图。

(a) 波导平面图;(b) 信号流程图

Fig. 3 Architecture of parallel-coupled two-ring resonator add/drop filter. (a) Waveguide layout; (b) SFG

Fig. 3 Architecture of parallel-coupled two-ring resonator add/drop filter. (a) Waveguide layout; (b) SFG

$$L_2^p = c_2 \sqrt{\xi} c_3 \sqrt{\xi} = c_2 c_3 \xi, \quad (26)$$

$$L_3^p = (-js_1)D(-js_2)\sqrt{\xi}(-js_3)D(-js_4)\sqrt{\xi} = s_1 s_2 s_3 s_4 D^2 \xi, \quad (27)$$

图中有一对两两互不接触的闭环,其增益的乘积可以表示为

$$L_{12}^p = c_1 c_2 c_3 c_4 \xi^2. \quad (28)$$

对于输出端口来说,从结点 1 到结点 5 的向前路径,以及和它互不接触的闭环的图行列式可以表示为

$$T_{1t}^p = (-js_1)\sqrt{\xi}c_4\sqrt{\xi}(-js_1)Dc_2 = -c_2 c_4 s_1^2 D \xi, \quad \Delta_1 = 1 - L_2^3 = 1 - c_2 c_3 \xi, \quad (29)$$

$$T_{2t}^p = c_1 D(-js_2)\sqrt{\xi}c_3\sqrt{\xi}(-js_2) = -c_1 c_3 s_2^2 D \xi, \quad \Delta_2 = 1 - L_3^3 = 1 - c_3 c_4 \xi, \quad (30)$$

$$T_{3t}^p = (-js_1)\sqrt{\xi}c_4\sqrt{\xi}(-js_1)D(-js_2)\sqrt{\xi}c_3\sqrt{\xi}(-js_2) = c_3 c_4 s_1^2 s_2^2 D \xi^2, \quad \Delta_3 = 1, \quad (31)$$

$$T_{4t}^p = c_1 Dc_2, \quad \Delta_4 = 1 - (L_1^3 + L_2^3) + L_{12}^3 = 1 - (c_1 c_4 \xi + c_2 c_3 \xi) + c_1 c_2 c_3 c_4 \xi^2. \quad (32)$$

从(4)式可得信号流程图的图行列式  $\Delta$ ,并利用公式  $s_i^2 + c_i^2 = 1$ ,可以简化为

$$\Delta = 1 - c_1 c_4 \xi - c_2 c_3 \xi - s_1 s_2 s_3 s_4 D^2 \xi + c_1 c_2 c_3 c_4 \xi^2, \quad (33)$$

因此,我们能得出输出端的振幅传递函数为

$$\frac{E_5(z)}{E_1(z)} = H_t^p = \frac{c_1 c_2^2 c_4 s_2^2 D \xi^2 + c_3 c_4 s_1^2 D \xi^2 + c_1^2 c_2^2 c_3 c_4 D \xi^2 - c_2 c_4 D \xi - c_1 c_3 D \xi}{1 - c_1 c_4 \xi - c_2 c_3 \xi - s_1 s_2 s_3 s_4 D^2 \xi + c_1 c_2 c_3 c_4 \xi^2}. \quad (34)$$

2) 从输入端口到下载端口的传递函数  $E_{16}(z)/E_1(z)$ :对于下载端口来说,从结点 1 到结点 16 的向前路径,以及和它互不接触的闭环的图行列式可以表示为

$$T_{1d}^p = (-js_1)\sqrt{\xi}(-js_4) = -s_1 s_4 \xi^{1/2}, \quad \Delta_1 = 1 - L_2^3 - L_3^3 = 1 - c_2 c_3 \xi - s_1 s_2 s_3 s_4 D^2 \xi, \quad (35)$$

$$T_{2d}^p = c_1 D(-js_2)\sqrt{\xi}(-js_3)Dc_4 = -c_1 c_4 s_2 s_3 D^2 \xi^{1/2}, \quad \Delta_2 = 1 - L_1^3 = 1 - c_1 c_4 \xi, \quad (36)$$

$$T_{3d}^p = (-js_1)\sqrt{\xi}c_4\sqrt{\xi}(-js_1)D(-js_2)\sqrt{\xi}(-js_3)Dc_4 = c_4^2 s_1^2 s_2 s_3 D^2 \xi^{3/2}, \quad \Delta_3 = 1. \quad (37)$$

将(35)~(37)式代入(3)式,并利用  $s_i^2 + c_i^2 = 1$  化简,可以得出下载端的振幅传递函数为

$$\frac{E_{16}(z)}{E_1(z)} = H_d^p = \frac{-s_1 s_4 \xi^{1/2} + c_2 c_3 s_1 s_4 \xi^{3/2} - c_1 c_4 s_2 s_3 D^2 \xi^{1/2} + c_1^2 c_4^2 s_2 s_3 D^2 \xi^{3/2} + s_1^2 s_2 s_3 D^2 \xi^{3/2}}{1 - c_1 c_4 \xi - c_2 c_3 \xi - s_1 s_2 s_3 s_4 D^2 \xi + c_1 c_2 c_3 c_4 \xi^2}. \quad (38)$$

### 3 仿真与分析

在这一节中,对滤波器的特性进行模拟分析。如图 4 所示为单环谐振滤波器的输出端口与下载端口滤波特性的模拟。单环谐振滤波器中微环的半径  $R=136 \mu\text{m}$ ,耦合系数  $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.2$ 。让自由光谱范围达到  $100 \text{ GHz}$ ,群折射率则为  $n_g=3.5$ ,并且使波导的本征损耗被完全补偿( $\alpha=0$ )。从图中可以看出,下载端输出光谱的消光比达到了  $19 \text{ dB}$ ,其形状因子约为  $0.165$ 。在图 5 中,当耦合系数  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa < 0.2$  时,下载端的消光比大于  $20 \text{ dB}$ 。

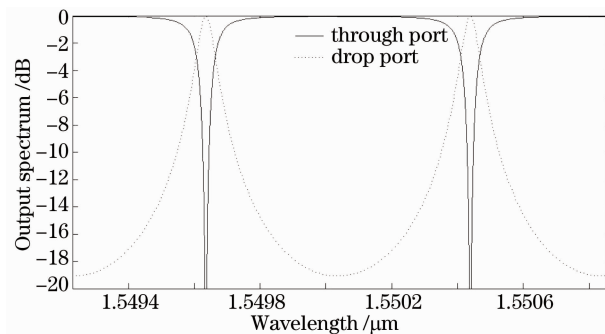


图 4 单环谐振滤波器输出端口(实线)和下载端口(点划线)输出谱线,取  $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.2, \alpha = 0, \gamma = 0, R = 136 \mu\text{m}$   
Fig. 4 Simulation result of the filtering response of single microring resonator, when  $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.2, \alpha = 0, \gamma = 0, R = 136 \mu\text{m}$

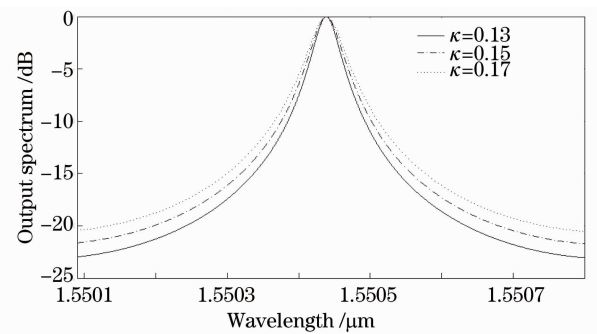


图 5 单环谐振滤波器下载端口输出谱线,  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa < 0.2, \alpha = 0, \gamma = 0, R = 136 \mu\text{m}$   
Fig. 5 Filtering response of the drop port of single microring resonator filter, when  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa < 0.2, \alpha = 0, \gamma = 0, R = 136 \mu\text{m}$

图6为串联双环谐振滤波器的输出谱仿真,其中微环损耗为零,相应的两个外面的耦合器的耦合系数为 $\kappa_1 = \kappa_3 = 0.5$ ,中间的耦合器的耦合系数则为 $\kappa_2 = 0.12$ 。双环谐振腔的输出端的形状因子达到了0.41。从图中可以看到其输出光谱具有相对陡峭的滚降和平坦的顶部。但是,当 $\kappa_2 = 0.2, 0.25, 0.3$ 时,相应地有两个谐振峰值。这意味着单个微环和另一个与其完全相同的环耦合时,每一个单环的谐振点将被分为两个。在图中可以看到峰顶有一个起伏,这是因为每一个单环所对应的谐振点并没有完全匹配。

利用在谐振状态( $\beta L = 2M\pi$ )下的最大传输条件和 $\kappa_1 = \kappa_3, \alpha_{\text{ring } 1,2} = 0, \gamma = 0$ ,可以将中间耦合器的耦合系数 $\kappa_2$ 表示为

$$\kappa_{2c} = \frac{\kappa_1^2}{(\kappa_1 - 2)^2}, \quad (39)$$

定义 $\kappa_{2c}$ 为临界耦合系数。我们发现如果 $\kappa_2 < \kappa_{2c}$ ,两个谐振将合并为一个谐振点。

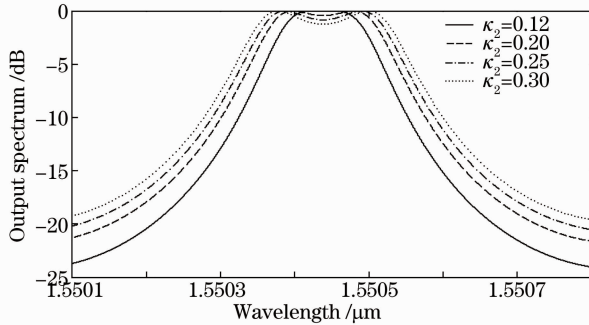


图6 串联双环谐振滤波器下载端口输出谱线,取 $\kappa_1 = \kappa_3 = 0.5, \kappa_2 = 0.12, 0.2, 0.25, 0.3, \alpha_{\text{ring } 1,2} = 0, \gamma = 0$ ,  
 $R = 136 \mu\text{m}$

Fig. 6 Filtering response of the drop port of the series-coupled two-ring resonator filter, when  $\kappa_1 = \kappa_3 = 0.5, \kappa_2 = 0.12, 0.2, 0.25, 0.3, \alpha_{\text{ring } 1,2} = 0, \gamma = 0$ ,  
 $R = 136 \mu\text{m}$

图7给出了 $\kappa_2 < \kappa_{2c}$ 的情况,在两个谐振点合并到一起的同时,输出振幅也随之变小。另外从图6、图7也可以看出,对于无损耗的双环谐振滤波器实现“箱型”输出谱来说,利用两外侧耦合器的耦合系数相同, $\kappa_2$ 的取值范围在0.12~0.14,也能实现下载端的消光比大于20 dB。图8所示为双环谐振滤波器的光学损耗 $\alpha = 3, 5$  dB/cm对输出谱的影响。我们注意到,在微环谐振腔中光学损耗也会导致形状因子和输出振幅的减小。

图9显示了两环间距 $d$ 对并联双环下载端输出谱线的影响。从图中可以看出,当 $d \neq n\pi R$ ( $n$ 为整数)时,例如 $d = 10.5\pi R, 10.75\pi R$ 时,中心谐振峰的形状并不是很好,对称性比较差。当 $d = n\pi R$ ( $n$ 为整数)时,例如 $d = 10\pi R, 20\pi R$ 时,则中心谐振峰的形状很好,而且完全消除了不对称性。图10所示为并联双环下载端输出光谱。由图可知,两环间距 $d$ 越大,旁瓣就越多,下载端输出的非谐振光就越均匀,这与文献[12]中利用耦合模得出的结论是一样的。但是,从图中也可以看到非谐振光强度比较大,使得谐振腔输出谱的旁瓣较大,这将不能有效地增加器件的隔离度、降低信道的串扰。

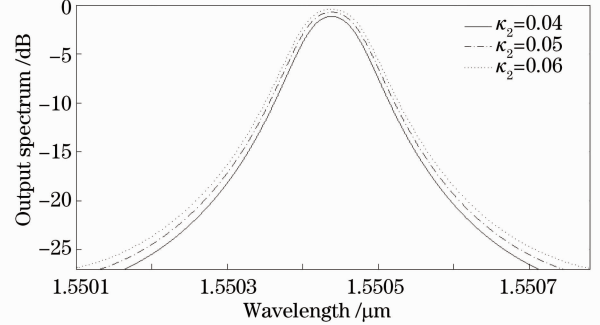


图7  $\kappa_2$ 取小于 $\kappa_{2c}$ 的不同值时,串联双环谐振滤波器下载端口输出谱线,其中 $\kappa_2 = 0.04, 0.05, 0.06, \kappa_1 = \kappa_3 = 0.5, \alpha_{\text{ring } 1,2} = 0, \gamma = 0$

Fig. 7 Filtering response of the drop port of the series-coupled two-ring resonator filter with different values of  $\kappa_2$  which are lower than  $\kappa_{2c}, \kappa_2 = 0.04, 0.05, 0.06, \kappa_1 = \kappa_3 = 0.5, \alpha_{\text{ring } 1,2} = 0, \gamma = 0$

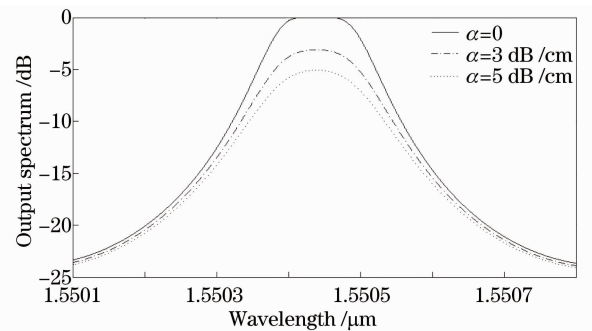


图8 模式损耗对于串联双环谐振滤波器下载端口输出谱线的影响,其中 $\kappa_1 = \kappa_3 = 0.5, \kappa_2 = 0.13$

Fig. 8 Impact of attenuation coefficient on the filtering response of the drop port of the series-coupled two-ring resonator filter with  $\kappa_1 = \kappa_3 = 0.5, \kappa_2 = 0.13$



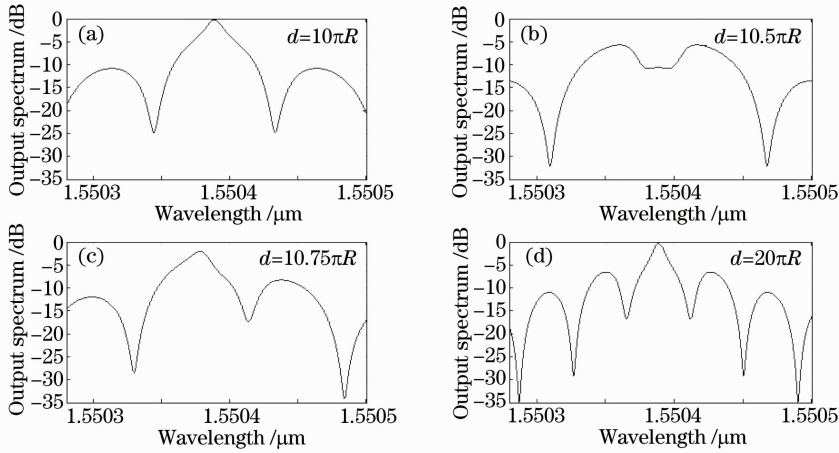


图9 并联双环间距  $d$  对下载端输出光谱的影响,  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = 0.1, R = 136 \mu\text{m}, \alpha_{\text{ring}} = \alpha_d = 0$

Fig. 9 Impact of the distance  $d$  on the filtering response of the drop port of parallel-coupled two-ring microring resonator

filters with  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = 0.1, R = 136 \mu\text{m}, \alpha_{\text{ring}} = \alpha_d = 0$

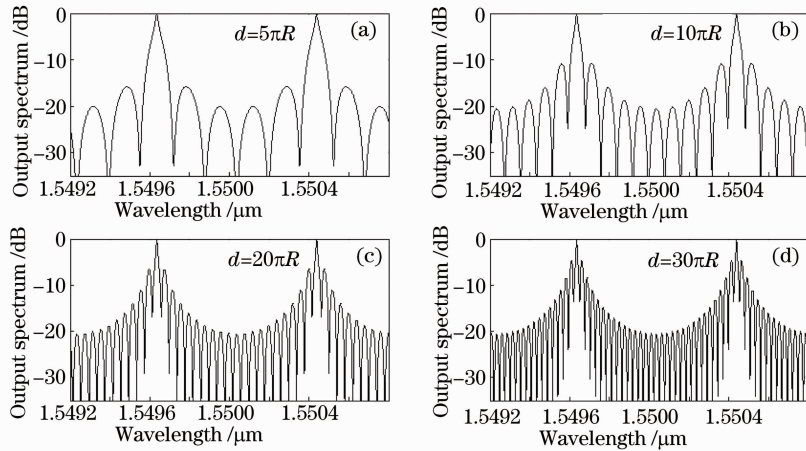


图10 并联双环谐振滤波器下载端输出谱线,其中  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = 0.1, R = 136 \mu\text{m}, \alpha_{\text{ring}} = \alpha_d = 0$

Fig. 10 Filtering response of parallel-coupled two-ring microring resonator filters with  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = 0.1,$

$R = 136 \mu\text{m}, \alpha_{\text{ring}} = \alpha_d = 0$

## 4 结 论

本文采用一种图示的方法对平行信道少量多环谐振滤波器的输出特性进行了分析。利用信号流程图法,快速地推导出了光信号系统的传递函数,并与传统的耦合模方法进行了比较,证明其可行性。然后对输出光谱进行了模拟分析和参数优化,证明了耦合系数对于输出光谱特性有着重要的影响。对于串联双环系统,通过模拟分析得出了实现下载端最大平坦输出波峰的临界耦合系数;对于并联双环系统,则通过优化环与环间直波导的长度,实现下载端输出光谱的对称性。还发现串联双环和并联双环结构并不能形成理想的“箱型”谱线,因此,下一步还需要总结此方法对更多环结构以及微环阵列的分析。

## 参 考 文 献

- 1 A. Melloni, M. Martinelli, Synthesis of direct coupled-resonators bandpass filters for WDM systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 296~303
- 2 Kong Guangming, E Shulin, Deng Wenyuan *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
- 3 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua *et al.*. Characteristics and limitations of optical filters employing single-ring

- microring resonators[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(1): 12~16
- 杨建义, 江晓清, 王明华 等. 采用单环微谐振器的光滤波器特性及其局限性[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(1): 12~16
- 4 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Filtering characteristics of series-coupled double-ring optical microring resonators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1191~1195
- 杨建义, 江晓清, 王明华. 串联双环光微谐振器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1191~1195
- 5 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Transfer matrix method for analyzing the characteristics of multiple-ring higher order microring resonators[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
- 6 Yan Xin, Ma Chunsheng, Xu Yuanzhe *et al.*. Theoretical analysis of  $M \times N$  microring resonator array on silicon[J]. *Journal of Semiconductor*, 2005, **26**(11): 2223~2229
- 闫 欣, 马春生, 徐元哲 等. 硅基  $M \times N$  型微环阵列谐振滤波器的理论分析[J]. *半导体学报*, 2005, **26**(11): 2223~2229
- 7 S. J. Mason. Feedback theory; further properties of signal flow graphs[J]. *Proceedings of the IRE*, 1956, **44**(7): 920~926
- 8 Li Weibin. Signal Flow Graph Theory and Its Applications in the Analysis of Optical Ring Resonator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. 13~19
- 李卫彬. 信号流程图理论及其在光学环谐振腔特性分析中应用的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009. 13~19
- 9 C. K. Madsen, J. H. Zhao. Optical Filter Design and Analysis: A Signal Processing Approach[M]. New York: Wiley, 1999. 95~146
- 10 Zhang Bin, Mao Luhong, Xie Sheng *et al.*. A new spice model of silicon-based microring resonator and application for optical filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 537~541
- 张 彬, 毛陆虹, 谢 生 等. 一种基于 Spice 的硅基微环光学谐振器模型及其在光学滤波器中的应用[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 537~541
- 11 Wang Yuhai, Ma Chunsheng, Yan Xin *et al.*. Analysis on amplifying characteristic of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped microring resonators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 632~637
- 汪玉海, 马春生, 闫 欣 等. 铒镱共掺微环谐振器的放大特性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 632~637
- 12 Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Theory of Optical Waveguide Mode[M]. Changchun: Jilin University Press, 2006. 352~355
- 马春生, 刘式壖. 光波导模式理论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2006. 352~355