

文章编号: 0253-2239(2003)10-1191-5

串联双环光微谐振器的滤波特性*

杨建义 江晓清 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 详细研究了串联双环光微谐振器的光带通滤波特性, 给出了其通带带宽的公式, 分析了出/入环光耦合系数和环间光耦合系数对通带特性的影响, 计算并特别强调了滤波通带的结构特点, 也分析了微环中存在的光损耗对串联双环光微谐振器的滤波特性的影响。

关键词: 集成光学; 光波导; 光微环谐振器; 光滤波器

中图分类号: TN256 文献标识码: A

1 引 言

随着近年来平面加工工艺水平的不断提高, 基于平面波导的光微环谐振器受到人们的关注和研究, 相关技术迅速发展^[1~6]。利用光微环谐振器对光波所具有的滤波功能来研制光滤波器, 是光微环谐振器的主要应用目标之一。人们已经在 III-V 族化合物半导体、SOI(Silicon-on-Isolator)和二氧化硅等光波导材料上研制了采用微环光谐振器的光滤波器^[3,4,7]。由于采用单环光谐振器的光滤波器在通带结构上固有的局限性^[8], 人们提出了采用多环串联耦合或并联耦合结构的高级次光谐振器来改善通带结构^[9~11]。应用这种高级次的多环串联或并联耦合结构固然可以设计出通带结构极佳的光带通滤波器, 但是实际制作中遇到的问题是, 它要求多环彼此间严格调谐, 而且环与环间和环与输入/输出光引导波导间的光功率耦合必须精确控制。为此, 研究低级次的微环串联或并联耦合结构, 明确其中的通带可构造性, 更具有实际应用意义。

相对其它高级次结构, 二级微环结构具有最为简单的调谐要求。本文将对双环串联耦合结构的二级光谐振器(简称串联双环光微谐振器)的光滤波特性进行分析。首先给出串联双环光微谐振器的传递函数; 在此基础上进行其滤波特性分析, 明确环与环间和环与输入/输出光引导波导间的光功率耦合大小对滤波特性的影响, 清晰通带结构及可控性, 比较

相对于单环光谐振器的不同与改进; 同时, 也将给出微环中光损耗对其滤波特性的影响。

2 串联双环光微谐振器的传递函数

用作光滤波器的串联双环光微谐振器的基本构成包括, 两个相互耦合的光微环, 以及分别与两微环相耦合的用于光波输入与输出的光引导波导。图 1 所示是采用串联双环光微谐振器的光滤波器常用结构, 其中采用了定向耦合器结构实现两根引导波导与两环间的耦合。在图 1 中, 要求光波导为单模波导。定义 K_1 和 K_3 分别为衡量两引导波导与两微环间光波耦合量的出/入环光耦合系数, 即对于引导波导与两个微环间的两处耦合用 2×2 定向耦合器, 单位功率光波由定向耦合器的一支波导输入时, 从另一支波导耦合输出的分量(在此, 不计入光波传输损耗)分别为 K_1^2 和 K_3^2 。同样地, 定义 K_2 为衡量两微环间光波耦合量的环间光耦合系数。

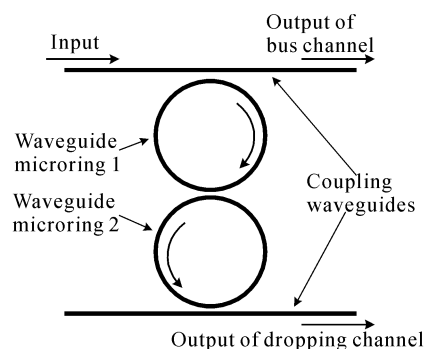


Fig. 1 The schematic diagram of an optical resonator with 2nd-order series-coupled microrings

采用转移矩阵法(Transfer-matrix method)^[11], 可以得到串联双环光微谐振器由输入端至下路通道输

* 国家重点基础研究发展规划(973)(G1999033104)、国家自然科学基金(69907004、60177012)资助课题。

E-mail: yangjy@zju.edu.cn

收稿日期: 2002-09-02; 收到修改稿日期: 2002-10-10

出端和主通道输出端的传递函数。在本文中,要讨论的是调谐的串联微环情况,即要求两个微环各自单环工作时所具有的谐振频率(波长)一致。忽略环

与波导间和环间耦合对谐振频率的影响。此时,对图 1 所示的串联双环光微谐振器,我们推导出由输入端至下路通道输出端的光波传递函数为

$$D(\theta) = \frac{j\alpha_{12}\alpha_{21}K_1K_2K_3\exp(-j\theta)}{1 - (\alpha_1T_1T_2 + \alpha_2T_3T_2)\exp(-j\theta) + \alpha_1\alpha_2T_1T_3\exp(-j2\theta)}, \quad (1)$$

式中, $T_i^2 = 1 - K_i^2$ ($i = 1, 2, 3$); α_k ($k = 1, 2$) 为单位功率光波在单个孤立微环 i 中传输一周后的功率值, α_{12} 则为其中从主通道波导与环 1 间的耦合点沿环 1 顺时针传输至环 1 与环 2 间的耦合点后的功率值, α_{21} 为从环 1 与环 2 间的耦合点沿环 2 逆时针传输至环 2 与下路通道波导间的耦合点后的功率值。 θ 定义为归一化光波频率

$$\theta = 2\pi\nu/R_\nu, \quad (2)$$

即不同频率 ν 的光波在单个微环中传输一周后的相位延迟量。 R_ν 为微环的频率自由谱范围。由于(1)式对归一化频率 θ 所具有的 2π 周期性,所以仅需分析(1)式在 θ 零点附近的一个周期,即可明确串联双环光微谐振器的整体滤波特性。

相应地,由输入端至主通道输出端的光波传递函数为

$$B(\theta) = \frac{T_1 - (\alpha_1T_2 + \alpha_2T_1T_2T_3)\exp(-j\theta) + \alpha_1\alpha_2T_3\exp(-j2\theta)}{1 - (\alpha_1T_1T_2 + \alpha_2T_3T_2)\exp(-j\theta) + \alpha_1\alpha_2T_1T_3\exp(-j2\theta)}. \quad (3)$$

3 串联双环光微谐振器的带通滤波特性

由于微环光谐振器对光波所具有的带通滤波特性是通过由输入端至下路通道输出端的光路实现的,本文的分析主要针对的将是(1)式给出的光波传递函数。在此,将首先考虑微环无损耗且 $K_3 = K_1$

情况下的串联双环光微谐振器的滤波特性,然后分析微环中存在光损耗时的情况。

3.1 谐振点

不考虑光在微环中的损耗,则 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{12} = \alpha_{21} = 1$,下路通道相应的光强传递函数为

$$|D(\theta)|^2 = \frac{(K_1K_2K_3)^2}{|1 - (T_1T_2 + T_3T_2)\exp(-j\theta) + T_1T_3\exp(-j2\theta)|^2}. \quad (4a)$$

图 2 给出了在含零点的一个归一化频率周期内的一例光强传递函数曲线,为一典型带通滤波谱。

从图 2 中可以看到,该带通谱存在两个零点对称的最大值点 θ_{res} ,即为谐振点。可知,当两调谐的微环串联耦合时,所构成的串联双环光微谐振器的谐振频率将由原来的每一个变成相对应的两个。分

析(4a)式可知,当 $T_3 = T_1$ 时,在谐振点的光强传递函数值达到最大值 1,光功率将完全由输入端传输至下路通道输出。这正是我们所要的情况,所以下面的分析将主要针对 $T_3 = T_1$ 情况,亦即 $K_3 = K_1$ 情况。此时,下路通道相应的光强传递函数为

$$|D(\theta)|^2 = \frac{K_1^4K_2^2}{|1 - 2T_1T_2\exp(-j\theta) + T_1^2\exp(-j2\theta)|^2}. \quad (4b)$$

相应的归一化谐振频率值 θ_{res} 满足下式

$$\cos \theta_{\text{res}} = \frac{1 + T_1^2}{2T_1}T_2. \quad (5)$$

由(5)式可知,当 $T_2 \geq 2T_1/(1 + T_1^2)$ 时,亦即当 K_2 满足下式时

$$K_2 \leq K_1^2/(2 - K_1^2). \quad (6a)$$

两谐振点将简并至归一化频率零点,即 $\theta_{\text{res}} = 0$,且传递函数最大值将随 K_2 的减小而减小。

从图 2 中也可以看到,当存在两个谐振点时,通带中间呈现凹陷,在归一化频率的零值点 $\theta = 0$,传递

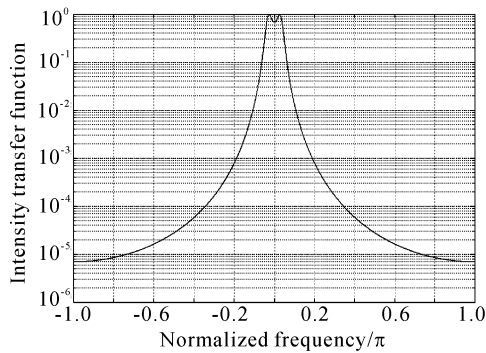


Fig. 2 A typical curve of the intensity transfer function of the dropping channel. The employed parameters:

$$K_1^2 = K_3^2 = 0.1, \text{ and } K_2^2 = 0.01$$

函数值 $|D(0)|^2$ 存在极小值点, 小于谐振点处的值 $|D(\theta_{\text{res}})|^2$, 即小于 1。作为带通滤波器, 通常要求一定通带带宽内的光强传递函数的起伏必须控制在一定范围内, 使得整个通带内所有的值在最大值的一定百分比值 ζ 内, 如 ζ 取为约 90%, 以满足 0.5 dB 带宽要求。考虑到通常 $K_i^2 (i = 1, 2)$ 相当小, 由式 (4b) 可以得到满足 $|D(0)|^2$ 的 K_2 的取值范围为

$$\frac{1 - \sqrt{1 - \zeta}}{\sqrt{\zeta}} \frac{K_1^2}{2 - K_1^2} \leq K_2 \leq \frac{1 + \sqrt{1 - \zeta}}{\sqrt{\zeta}} \frac{K_1^2}{2 - K_1^2}. \quad (6b)$$

事实上, 这其中包含了谐振点简并情况。为此, 结合式 (6a) 和 (6b), 可知, 在 $|D(\theta_{\text{res}})|^2 = 1$ 且 $|D(0)|^2 \geq \zeta$ 要求下, K_2 必须控制为

$$K_2 = \rho \frac{K_1^2}{2 - K_1^2}, \quad (7)$$

其中 $\rho = \frac{1 + \sqrt{1 - \zeta'}}{\sqrt{\zeta'}}$, 且 $\zeta \leq \zeta' \leq 1$ 。可见, K_2 值是 K_1^2 量级。此时, 当 K_1^2 相当小时, 谐振点在零值点附近, 有近似公式

$$\theta_{\text{res}}^2 \approx \sin^2 \theta_{\text{res}} = \frac{K_2^2 - K_1^4/4 - K_1^2 K_2^2 + K_2^2 K_1^4}{1 - K_1^2} \approx \frac{K_2^2 - K_1^4/4}{1 - K_1^2}. \quad (8)$$

3.2 通带的带宽及其结构

光滤波通带的结构是带通滤波器的一项重要指标。理想的带通滤波器要求在通带带顶平坦, 而带边则迅速截止。这一特性是通过比较包括 3 dB 带宽和 20 dB 带宽在内的不同定义下的滤波器带宽间的大小比例来衡量的。

我们先分析图 2 所示的滤波特性曲线中的消光比特性, 即曲线中最大值与最小值的比值 $10 \lg(|D(\theta)|_{\text{max}}^2 / |D(\theta)|_{\text{min}}^2)$ 。在微环无损耗且 $K_3 =$

K_1 情况下, 曲线在谐振点达到最大值 1。最小值点则是在归一化频率为 π 处

$$|D(\pi)|^2 = \frac{K_1^4 K_2^2}{(1 + 2T_1 T_2 + T_1^2)} \approx \frac{K_1^4 K_2^2}{16}, \quad (9)$$

式中的近似在 $K_i^2 (i = 1, 2)$ 相当小时成立。由于 K_2 值取在 K_1^2 量级, 可以发现, 与单环光微谐振器相对比^[8], 串联双环光微谐振器的带通滤波谱最大消光比的值增大了约一倍 (指 dB 值), 其用作滤波器所具有的串音性能得以大大改善。

对串联双环光微谐振器的下路通道带宽特性, 可以通过分析式 (4b) 等号右边的分母来进行。在归一化频率的零值附近, 通过近似分析, 并结合归一化谐振频率的表达式 (8), 分母项 $d(\theta)$ 可以近似为

$$d(\theta) \approx [(1 - K_1^2)\theta^2 - (K_2^2 - K_1^4/4)]^2 + K_1^4 K_2^2. \quad (10)$$

假设滤波器通带带宽远远小于频率自由谱范围——这是器件应用设计时的实际情况, 即对带宽的分析仅需考虑谐振点附近, 则由式 (10) 可得下路通道传输函数的通带归一化带宽表示式:

$$W_\eta = 2 \left(\frac{\sqrt{\eta - 1} K_1^2 K_2 + K_2^2 - K_1^4/4}{1 - K_1^2} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

式中 η 定义为带宽因子, (11) 式给出的即为光强降低 $-10 \lg \eta$ (dB) 后的通带归一化带宽。结合 (7) 式, (11) 式可以近似为

$$W_\eta \approx (2\rho \sqrt{\eta - 1} + \rho^2 - 1)^{1/2} \frac{K_1^2}{T_1}. \quad (12)$$

在不同 ζ' 值下, 对 1 dB 带宽 ($1/\eta \approx 0.8$)、3 dB 带宽 ($1/\eta \approx 0.5$)、20 dB ($1/\eta = 0.01$) 带宽和 30 dB 带宽 ($1/\eta = 0.001$), 图 3 给出了 (12) 式的近似程度分析。从图中可以看到, 对 1 dB 和 3 dB 带宽, (12) 式在 K_1^2 达到 0.5 时依然足够精确; 对 20 dB 和 30 dB 带宽, (12) 式给出的值略微偏小, 但即使 K_1^2 达到 0.2 时, 仍然相当精确。

当 $\zeta' = 1$ 时, $\rho = 1$, (12) 式变化为 $W_\eta = (2\sqrt{\eta - 1})^{1/2} (K_1^2/T_1)$ 。比较在微环无损耗且 $K_2 = K_1$ 情况下单环光微谐振器的归一化带宽公式 $W_\eta = 2\sqrt{\eta - 1} (K_1^2/T_1)$ ^[8], 可以看到, 串联双环光微谐振器的通带结构得到了极大的改善。表 1 具体列出了 $\zeta' = 1$ 时串联双环光微谐振器的常用归一化带宽表达式, 以及各带宽间的大小比例。同时也给出了单环时的表达式与比例值, 以进行比较。需要指出的是, 表中各带宽间的大小比例是不依赖于微环光滤波器的任何设计参量的, 包括自由谱范围与出/入环光耦合系数和环间光耦合系数。近似条件说明, 它在带

宽值远远小于单个微环的频率自由谱范围时成立;若出/入环光耦合系数过大,表中的比例将会变大,特别是 1 dB/3 dB 带宽与 20 dB/30 dB 带宽间的比例。

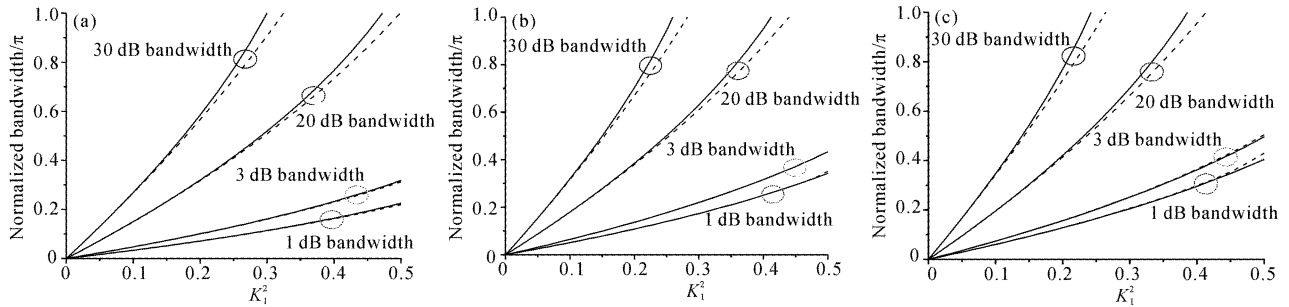


Fig. 3 The approximation analysis of Formula (12). The solid line-the accurate bandwidth, the dash line-the bandwidth given by Formula (12). (a) $\zeta'=1$; (b) $\zeta'=0.9$; (c) $\zeta'=0.8$

Table 1 The formulas of the commonly used normalized bandwidth (BW) of the series-coupled double-ring (SDR) ($\zeta'=1$) and single-ring (SR) optical microresonators and the related proportion

		Formula	1 dB BW	3 dB BW	20 dB BW	30 dB BW
1 dB BW	SDR	$W_{1\text{ dB}} \approx K^2/T$	1:1	1:1.41	1:4.47	1:7.95
	SR	$W_{1\text{ dB}} \approx K^2/T$	1:1	1:2	1:20	1:63.2
3 dB BW	SDR	$W_{3\text{ dB}} \approx \sqrt{2}K^2/T$	1.41:1	1:1	1:3.16	1:5.62
	SR	$W_{3\text{ dB}} \approx 2K^2/T$	2:1	1:1	1:10	1:31.6
20 dB BW	SDR	$W_{20\text{ dB}} \approx \sqrt{20}K^2/T$	4.47:1	3.16:1	1:1	1:1.78
	SR	$W_{20\text{ dB}} \approx 20K^2/T$	20:1	10:1	1:1	1:3.16
30 dB BW	SDR	$W_{30\text{ dB}} \approx \sqrt{63.2}K^2/T$	7.95:1	5.62:1	1.78:1	1:1
	SR	$W_{30\text{ dB}} \approx 63.2K^2/T$	63.2:1	31.6:1	3.16:1	1:1

若 ζ' 适量减小, ρ 将大于 1, 在 η 为小值(如 1 dB 和 3 dB 带宽所对应的值约为 1.25 和 2)时, 将有效增大(12)式中因子 $(2\rho\sqrt{\eta-1} + \rho^2 - 1)^{1/2}$ 的值, 1 dB/3 dB 带宽与 20 dB/30 dB 带宽间的比例将缩小, 通带结构将会进一步改善。

3.3 微环中光损耗的影响

在光波导微环中, 弯曲损耗和波导传输损耗是不可避免的。为此, 明确微环中光的损耗对微环光

谐振器滤波特性的影响是必要的。定义:

$$T^2 = \alpha_1 \alpha_2 T_1 T_2, \quad (13a)$$

$$K^2 = 1 - T^2, \quad (13b)$$

$$c_1 = \alpha_1 T_1/T, \quad c_2 = \alpha_2 T_3/T, \quad (13c)$$

$$\Gamma = (c_1 + c_2)/2, \quad (13d)$$

$$T'_2 = \Gamma T_2, \quad (13e)$$

$$K_2^2 = 1 - T_2^2, \quad (13f)$$

则下路通道的光强传递函数的可以表示为

$$|D(\theta)|^2 = \frac{\alpha_{12}^2 \alpha_{21}^2 K_1^2 K_2^2 K_3^2}{K^4 K_2^2} \frac{K^4 K_2^2}{|1 - 2TT'_2 \exp(-j\theta) + T_2^2 \exp(-j2\theta)|^2}, \quad (14)$$

与(4b)式进行比较, (14)式等号右边第二项为一无损耗的串联双环光微谐振器的光强传递函数, 其两个出/入环光耦合系数相等, 均为 K , 其环间耦合系数则是 K'_2 。右边第一项是一项与归一化频率无关的因子。由此可知, 微环中存在的损耗对滤波通带的结构影响表现在第二项中, 而第一项则给出了衰减因子。

大的损耗导致 T 变小, K 增大, 由(12)式可知, 串联双环光微谐振器的带宽将会增大。但通带形状将不会明显变化。仅当损耗严重时, K 过大, 通带带宽比例将恶化, 并且由于滤波曲线最大消光比值

的减小, 甚至可能会使滤波通带无法满足要求。需要注意的是, 由于损耗导致 K 增大, 而同时 K'_2 却会变小, 会引起两谐振点简并, 通带幅度进一步衰减。

损耗引入的最大影响是通带幅度的衰减, 小的损耗值就会导致下路通道输出端的滤波光输出迅速下降, 如图 4。当 T_1 给定时, 若 $T_3 = T_1/(\alpha_1 \alpha_2)$, 主通道光强传递函数在满足 $\cos \theta = \frac{\alpha_1^2 + T_1^2}{2\alpha_1 T_1} T_2$ 的归一化频率处存在零值, 但此时的下路通道输出光强度却会随损耗增大而急骤下降, 远未达到可能的最大

输出。若将 T_3 控制在 $\alpha_1\alpha_2 T_1$ 附近时, 下路通道可以有最大光强度输出。假设 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 且 $\alpha_{12} = \alpha_{21} = \alpha^{1/2}$, 图 4 比较了 T_3 分别为 $T_3 = T_1/\alpha^2$, $T_3 = T_1$ 和 $T_3 = \alpha^2 T_1$ 时, 微环中光损耗对下路通道谐振点光输出的影响。图中的计算中, K_1^2 取为 0.1, 对 K 和 K'_2 间关系, 取 $\zeta' = 1$ 。

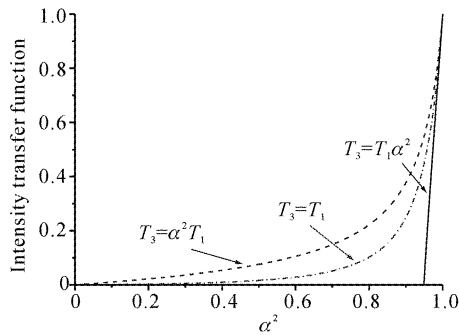


Fig. 4 The influence of the optical loss on the output of the dropping channel at the resonant point

总的来说, 微环中光的损耗必然控制得尽可能小, 以控制微环光谐振器的滤波特性恶化。

结论 本文对串联双环光微谐振器的光带通滤波特性进行了详细的分析。分析了出/入环光耦合系数和环间光耦合系数对通带结构形状、通带带宽以及通带消光比特性的影响。从中可以看到, 为了控制通带在带顶的形状, 环间光耦合系数必然控制在出/入环光耦合系数的平方量级。由此, 串联双环光微谐振器的滤波特性谱中的最大消光比值较单环光谐振器的值有了很大的提高, 这为研制低串音光滤波器提供了极大的设计冗余度。串联双环光微谐振器的归一化通带带宽与出/入环光耦合系数的平方成正比。与单环光谐振器相比较, 串联双环光微谐振器的滤波通带结构也有了很大的改善, 已经可以满足当前一些光通信系统对光滤波器的要求。此外,

文中也分析了微环中存在的光损耗对串联双环光微谐振器的滤波特性的影响。尽可能减小微环弯曲损耗与波导损耗是极其重要的, 否则, 小的损耗就会引起其带通输出的信号相当大的衰减, 更为严重的损耗将损害通带的结构与消光比特性。对损耗存在情况, 为在下路通道获得尽可能大的光强度输出, 对出/入环光耦合系数的进行合理控制是必要的。

参 考 文 献

- Zhang J P, Chu D Y, Wu S L *et al.*. Photonic-wire laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(14):2678~2681
- Masayuki Fujita, Toshihiko Baba. Microgear laser. *App. Phys. Lett.*, 2002, **80**(12):2051~2053
- Hryniewicz J V, Absil P P, Little B E *et al.*. Higher order filter response in coupled microring resonators. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(3):320~322
- Little B E, Foresi J S, Steinmeyer G *et al.*. Ultra-compact Si-SiO₂ microring resonator optical channel dropping filters. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4):549~551
- Rabiei P, Steier W, Zhang C *et al.*. Integrated WDM polymer modulator. *OFC '2002*, 2002, **TuF6**:31~33
- Haus H A, Manolatou C. High density optical integration. *OFC '2000*, 2000, **3**:126~130
- Kato T, Suzuki S, Kokubun Y. Vertically coupled microring resonator filter with ARROW busline. *CLEO/Pacific Rim 2001*, 2001, **1**:I-398~I-399
- Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua *et al.*. Characteristics and limitation of optical filters employing single-ring microresonator. *J. Optoelectronics • Lasers* (光电子 • 激光), 2003, **14**(1):12~16 (in Chinese)
- Little B E, Chu S T, Haus H A *et al.*. Microring resonator channel dropping filters. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6):998~1005
- Griffel G. Synthesis of optical filters using ring resonator arrays. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7):810~812
- Orta R, Savi P, Tascone R *et al.*. Synthesis of multiple-ring-resonator filters for optical systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(12):1447~1449

Filtering Characteristics of Series-Coupled Double-Ring Optical Microresonators

Yang Jianyi Jiang Xiaoqing Wang Minghua

(Department of Information Science and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310037)

(Received 2 September 2002; revised 10 October 2002)

Abstract: The band-pass-filtering characteristics of series-coupled double-ring optical microresonators are studied. Based on the transfer function, the related bandwidth formula of the passing band is derived. The influences the into-/out-of-ring and ring-to-ring coupling coefficients on the filtering characteristics are analyzed. The structure of the passing band is calculated and emphasized. The influence of the optical loss in the microring is also analyzed.

Key words: integrated optics; optical waveguide; optical microring resonator; optical filter