

文章编号: 1004-4213(2011)02-0247-4

损耗对串联双微环谐振器滤波特性的影响

刘鑫, 孔梅, 王雪萍

(长春理工大学 理学院 物理系, 长春 130022)

摘 要:对存在光损耗的串联双微环谐振器的滤波特性进行了研究. 在理想耦合条件下, 当环间耦合系数确定时, 分析了光损耗的大小对主谐振峰的透过率、带宽、形状因子, 以及伪模峰值透射率的影响, 揭示了光损耗对滤波特性影响的规律. 分析结果表明: 主谐振峰和伪模的透射率随损耗的增大而下降, 环与直波导间的耦合系数随损耗的增大而变小, 而带宽和形状因子无明显变化; 有损耗时环与直波导间的耦合系数不能过大也不能过小.

关键词:集成光学; 微环谐振器; 滤波特性; 损耗; 耦合系数

中图分类号: TN256

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114002.0247

0 引言

微环谐振器作为一种光波导器件, 近年来得到了广泛的研究^[1-2]. 如今基于其光学滤波功能微环谐振器已经被大量地设计应用于波分复用器^[3-4], 分插复用器^[5-6], 电光开关^[7-8]等重要光学元器件.

微环谐振器的自由光谱范围与环的半径成反比, 要增大自由光谱范围则需要减小环的半径, 但是小半径微环谐振器的加工和制作都存在极大的困难. 利用不同半径微环谐振器的级联, 可以使自由光谱范围增大通带特性^[9-10]得到改善. 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, 本课题组已给出一般条件下的理想耦合条件, 分析了在忽略微环损耗的情况下的滤波特性^[10], 对于有损耗的情况, 现有分析都是针对两微环与直波导间的耦合系数相等的情况^[11], 本文计算在理想耦合条件下, 当环间的耦合系数确定时, 损耗对串联双微环谐振器主谐振峰的带宽、形状因子及伪模抑制的影响, 并与无损耗理想耦合条件下的滤波特性进行对比, 揭示损耗对滤波特性影响的规律.

1 传递函数和理想耦合条件

图 1 为串联双微环结构, 设两个微环的周长分别为 L_1 和 L_2 , 利用各部分光场之间的关系, 可以得到它的传递函数为^[12]

$$D = b_6/a_1 = -[-ik_1k_2k_3\alpha_1\alpha_2 \exp(i\phi_1 + i\phi_2)] / [1 - \alpha_1t_1t_2 \exp(2i\phi_1) - \alpha_2t_2t_3 \exp(2i\phi_2) + \alpha_1\alpha_2t_1t_3 \exp(2i\phi_1 + 2i\phi_2)] \quad (1)$$

式中: k_i 为耦合系数; $t_i = \sqrt{1 - k_i^2}$ ($i = 1, 2, 3$) 为透射系数; $\phi_{1,2} = \pi R_{1,2}\beta$, $\phi_{1,2}$ 、 $\alpha_{1,2}$ 分别为光绕微环传输半周产生的相移和振幅传递因子 ($\alpha_{1,2}$ 减小对应损耗的增大, $\alpha_{1,2} = 1$ 为无损耗情况), β 为传输常量.

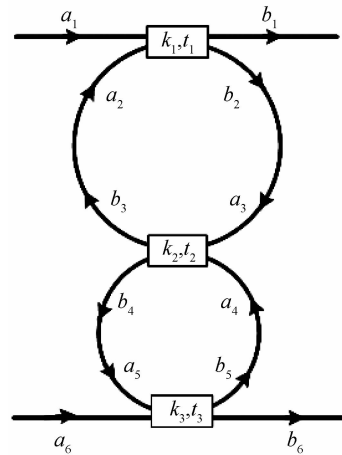


图 1 串联双微环谐振器结构
Fig. 1 Structure of the series coupled two-microring resonator
同时满足两环谐振条件的主谐振峰的强度透射率为

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

求 $|D|^2$ 的极值条件可以得到使串联双微环谐振器主谐振峰透射率最大的最佳耦合条件^[10]

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

第一作者: 刘鑫(1984—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为波导微环谐振器. Email: tliuxin0921@163.com

导师(通讯作者): 孔梅(1967—), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为光纤及光波导器件物理及应用. Email: kongmei03@yahoo.com.cn

收稿日期: 2010-06-25; 修回日期: 2010-08-18

2 有损耗时耦合系数的取值

本文计算时选择两环周长为 $L_1 = 396.8 \mu\text{m}$, $L_2 = 297.6 \mu\text{m}$, 直波导和微环的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.5$, 环间耦合系数 $k_{20} = 0.05$.

由式(3)可知, 当两环间的耦合系数确定时, 在理想耦合条件下, 两环与直波导的耦合系数 k_1 和 k_3 有确定的关系

$$k_3 = \sqrt{1 - \left[\frac{\sqrt{1-k_1^2}\alpha_1 - \sqrt{1-k_{20}^2}}{\sqrt{(1-k_1^2)(1-k_{20}^2)}\alpha_1\alpha_2 - \alpha_2} \right]^2} \quad (4)$$

计算表明: 对于 $\alpha_{1,2} = 1$ 的无损耗情况, k 在 $(0, 1)$ 范围内的取值都能使 k_3 有正实数解; 而在 $\alpha_{1,2} < 1$ 的有损耗情况, 为使 k_3 有正实数解需有

$$k_1 < \sqrt{1 - \left[\frac{\sqrt{1-k_{20}^2} - \alpha_2}{\alpha_1 - \sqrt{1-k_{20}^2}\alpha_1\alpha_2} \right]^2} = k_c \quad (5)$$

可见, 在有损耗情况下, 为实现理想耦合, k_1 只能在 $(0, k_c)$ 的范围内取值.

图 2 为在理想耦合条件下, 当串联双微环谐振器中无损耗和有不同损耗值时, k_3 随 k_1 变化的情况.

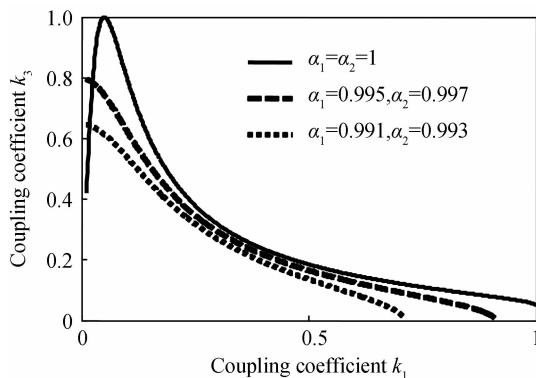


图 2 理想耦合条件下 k_3 随 k_1 的变化

Fig. 2 k_3 versus k_1 under the perfect coupling condition

由图 2 可知, 与无损耗情况相比, 在相同取值下, 有损耗时 k_1 的最大值 k_c 要小于 1, 且损耗越大 k_c 值越小. k_1 和 k_3 近似反比, k_1 值越小 k_3 值越大.

在式(3)中, k_1 和 k_3 位置对称, 所以当 k_{20} 和损耗一定时, k_3 与 k_1 的表现应该是一样的, k_3 也有小于 1 的最大值. 这一点在图 2 中也可以看到.

3 有损耗时的滤波特性

3.1 损耗对主谐振峰的影响

图 3 给出在理想耦合条件下, 当串联双微环谐振器中无损耗和有不同损耗值时, 1 550 nm 处的通带的透射率特性.

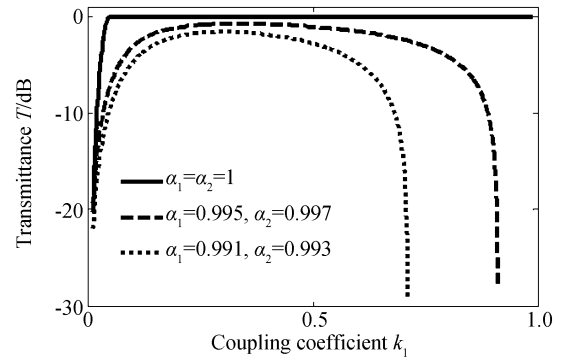


图 3 主谐振峰的透射率随 k_1 的变化

Fig. 3 Transmittance of the main resonance peaks versus k_1

在一定的 k_1 值范围内, 尽管有损耗系统的主谐振峰透射率小于 1, 但其透射率还是非常高的. 损耗越大, 主谐振峰透射率越小, 高透射率的 k_1 范围越小. 在 k_1 接近其极限值时, 主谐振峰的透射率快速下降, 其原因是此时 k_3 值很小, 能从下路通道输出的光强很小.

图 4 和图 5 对比了有无损耗时 3 dB 带宽和形状因子随 k_1 变化的情况.

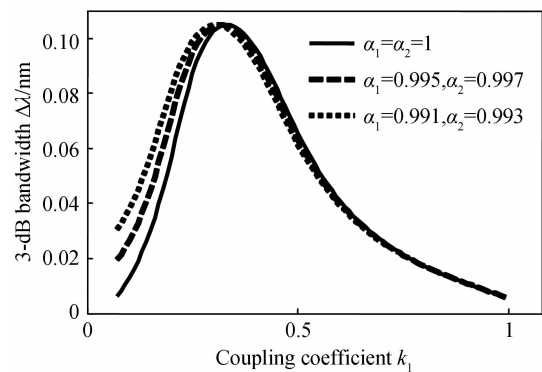


图 4 理想耦合条件下主谐振峰 3 dB 带宽随 k_1 的变化

Fig. 4 3-dB bandwidth of the main resonance peak versus k_1 under the perfect coupling condition

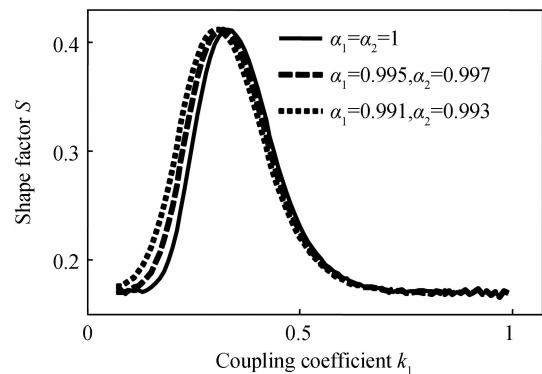


图 5 理想耦合条件下形状因子随 k_1 的变化

Fig. 5 Shape factor versus k_1 under the perfect coupling condition

结果表明, 微环中的损耗对 3 dB 带宽和形状因

子无明显影响.有损耗时 3 dB 带宽和形状因子极值对应的 k_1 值略小于无损耗时的.在 k_1 接近其极限值时,通带带宽窄,通带边沿下降缓慢,通带特性变差.

3.2 损耗对伪模峰值透射率的影响

本文计算的串联双微环谐振器在一个自由光谱范围内对称地分布有五个伪模,其中波长较小的三个伪模位于 1 554. 047 nm, 1 555. 401 nm 和 1 558. 115 nm 处,据计算显示波长为 1 558. 115 nm 的伪模的峰值透射率总是低于波长为 1 554. 047 nm 的,所以只需分析前两个伪模的影响情况.图 6 对比了在理想耦合条件下,有无损耗时这两个伪模的峰值透射率随 k_1 变化的情况.

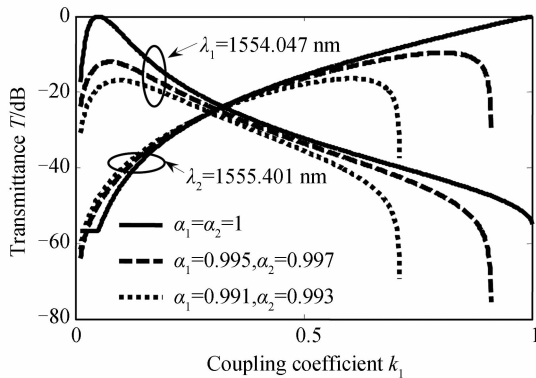


图 6 伪模 1 和伪模 2 的峰值透射率随 k_1 的变化
Fig. 6 Peak transmittance of spurious mode 1 and 2 versus k_1

微环中存在光损耗时,与无损耗趋势类似的,只是在接近 k_1 的极值时,伪模透射率迅速下降,但由于此时主谐振峰透射率也非常小,所以串联双微环谐振器仍不能工作在 k_1 接近极限值的条件下.

3.3 损耗对滤波特性影响的物理意义的分析

计算表明,很小的损耗没有改变系统透射谱的形状,而是使系统的透射谱整体向下平移,如图 7.

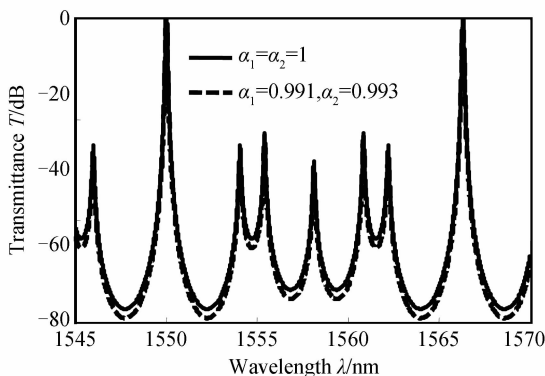


图 7 串联双微环谐振器的透射谱
Fig. 7 Transmittance spectra of the series coupled two-microring resonator

所以,损耗增大,主谐振峰的透射率下降(图 3),但主谐振峰的带宽和形状因子改变很小(图 4 和

图 5).两个伪模峰值透射率的交叉点出现在更小的 k_1 处(图 6),交叉点对应的伪模的抑制也略有增强,这也是由于损耗带来的透射谱整体下移造成的.

微环中存在损耗时,随着损耗的增大, k_1 的极大值 k_c 减小,最佳耦合条件下 3 dB 带宽和形状因子的极值所对应的 k_1 值减小,由于 k_1 和 k_3 位置对称,所以 k_3 值增大,微环中的损耗对 3 dB 带宽和形状因子无明显影响,只是曲线呈现一定的左移(图 4 和图 5).

4 结论

对于串联双微环谐振器结构,本文在理想耦合条件下,当环间耦合系数确定时,详细分析了损耗对主谐振峰的透射率、带宽和形状因子,以及对伪模抑制的影响.分析结果表明:对于串联双微环谐振器,很小的损耗没有改变系统透射谱的形状,而是使系统的透射谱整体向下平移;但为了保证通带带宽和透过率,应尽量减少微环中的损耗,因为过大的损耗能引起环与直波导间的耦合系数极值的减小,导致从下路通道输出的光强很小,并且使通带特性变差,微环谐振器滤波特性的恶化.

本文对有损耗的串联双微环谐振器滤波特性的分析,为微环谐振器的设计和使用提供了更多的参考,可避免优化过程的盲目性.

参考文献

- [1] XU Yu-feng, HUANG Hui, HUANG Yong-qing, *et al.* Optimization of finite-size effects in coupled microring resonator optical waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 1991-1995.
徐玉峰,黄辉,黄永清,等.耦合微环谐振腔光波导有限尺寸优化的效应[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8): 1991-1995.
- [2] HAN Xiu-you, ZHANG Jia-ning, JIN Ting-ting, *et al.* Design of athermal polymer waveguide microring resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 100-104.
韩秀友,张佳宁,金婷婷,等.聚合物波导微环谐振器的无热化设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 100-104.
- [3] 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.
- [4] GOEBUCHI Y, KATO T, KOKUBUN Y. Multiwavelength and multiport hitless wavelength-selective switch using series-coupled microring resonators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(9): 671-673.
- [5] RIZIOTIS C, ZERVAS M N. Performance comparison of Bragg grating-based optical add-drop multiplexers in WDM transmission systems[J]. *Instit Elect Eng Pro*, 2002, **149**(3): 179-186.
- [6] KOHTOKU M, OKU S, KADOTA Y, *et al.* 200-GHz FSR periodic multi/demultiplexer with flattened transmission and rejection band by using a Mach-Zehnder interferometer with a ring resonator[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, **12**(9): 1174-1176.

- [7] YAN Xin, MA Chun-sheng, WANG Xian-yin, *et al.* Simulation and optimization of polymer electro-optic microring resonator switches[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2374-2378.
闫欣, 马春生, 王现银, 等. 聚合物微环电光开关的模拟和优化[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2374-2378.
- [8] YAN Xin, MA Chun-sheng, CHEN Hong-qi, *et al.* Switching characteristics of a electro-optic polymer microring resonator switch array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 1915-1919.
闫欣, 马春生, 陈宏起, 等. 信道聚合物微环谐振器电光开关阵列的开关特性[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8): 1915-1919.
- [9] 马春生, 刘式墉. 光导波模式理论[M]. 长春: 吉林大学出版, 2007: 335-375.
- [10] LIU Xin, KONG Mei, WEN Quan. Influence of coupling coefficients on filtering characteristics of series coupled two-microring resonators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(11): 2885-2890.
刘鑫, 孔梅, 文权. 耦合系数对串联双微环谐振器滤波特性影响的分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2885-2890.
- [11] YANG Jian-yi, JIANG Xiao-qing, WANG Ming-hua. 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. 串联双环光微谐振器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1191-1195.
- [12] RABUS D G. Integrated ring resonators; the compendium [M]. Berlin: Springer, 2007: 18-19.

Influence of Loss on Filtering Characteristics of Series Coupled Two-Microring Resonators

LIU Xin, KONG Mei, WANG Xue-ping

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

Abstract: The influence of filtering characteristics of lossy series coupled two-microring resonators was studied. When the coupling coefficients between the two rings were fixed, under the perfect coupling condition, the influence of the loss on transmittance of the main resonance peak, bandwidth, shape factor and peak transmittance of the spurious modes were analyzed. The effects of the loss on these filtering characteristics were demonstrated. Analysis shows that the transmittance of the spurious modes and the main resonance peak decrease with the optical loss, the coupling coefficients between the two rings and the straight waveguides become smaller, and the bandwidth and the shape factor of the main resonance peak change little. The coupling coefficients between the rings and the straight waveguides should not be too big or small.

Key words: Integrated optics; Microring resonators; Filtering characteristics; Optical loss; Coupling coefficients