

文章编号: 0258-7025(2005)07-0929-04

传输矩阵法分析多环高阶谐振滤波器特性

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 与输入/输出波导耦合的环型谐振腔能形成结构简洁、性能良好、集成度高的信道滤波器。为实现通带内频率响应平坦度高、滚降时间快的滤波效果,采用多环结构形成的高阶滤波器。利用传输矩阵法推导了环与环间通过串联耦合和并联耦合两种方式形成的多环高阶谐振滤波器的传输函数公式。对于并联耦合结构,通过优化直接影响下话路滤波特性的环与环间直波导的长度,实现了下话路光谱的对称性。对于串联结构,影响其特性的主要因素为环与环间的耦合系数,要实现最大平坦的通带特性,通过数值计算得出各个环间耦合系数必须从中间到两侧对称增加的特性。

关键词 导波光学;光滤波器;环型谐振腔;传输矩阵;串联耦合;并联耦合

中图分类号 TN 252

文献标识码 A

Transfer Matrix Method for Analyzing the Characteristics of Multiple-Ring Higher Order Microring Resonators

DONG Xiao-wei, PEI Li, JIAN Shui-sheng

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

Abstract The microring resonator coupled with the input/output channel waveguides can be applied in filter due to its compactness, functionality, and the possibility of dense integration. In order to achieve flatter tops and sharper rolloff in the passband, the multiple-ring higher order structure is employed. Both the transfer functions of “series-coupled” and “parallel-coupled” multi-ring high order filters are derived using the transfer matrix method. For the “parallel-coupled” structure, the symmetric spectral response is achieved by optimizing the ring distance, while for the “series-coupled” structure, the performance is determined by the coupling coefficients between the ring and ring. In order to obtain maximally flat response passbands, the numerical results show that the proper coupling coefficients should be symmetric and smaller in the middle of the structure.

Key words waveguide optics; optical filter; microring resonator; transfer matrix; series-coupled; parallel-coupled

1 引言

随着光通信中密集波分复用(DWDM)系统的推广和应用,实现上下话路的信道滤波器的研究不断深入^[1],环型谐振滤波器因其功能强、结构简洁、集成度高等优点而成为研究热点^[2,3]。目前主要采用两种多环结构来形成高阶滤波效果:环与环间通过串联耦合和并联耦合。相对于单环结构,级联的多环高阶结构能有效地改善滤波性能。但是,对高阶环型谐振滤波器特性详细分析的报道很少,文献

[4]中采用时域耦合模方法,只能对某一特定谐振波长处的滤波性能进行分析,不仅十分复杂,而且不易形成明确的物理概念。本文采用一种传输矩阵法,对两种多环高阶滤波器的特性进行了分析比较,提出了实现性能优化的设计方案。

2 理论分析

图 1(a),(b)分别为并联和串联耦合结构多环谐振滤波器,为分析它们的特性,将其拆分为多个单

收稿日期:2004-07-19;收到修改稿日期:2004-11-17

基金项目:国家 863 计划(2001AA312230),国家自然科学基金(60337010)和霍英东基金(91062)资助项目。

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方面的研究。

E-mail: waydongxiao@sohu.com

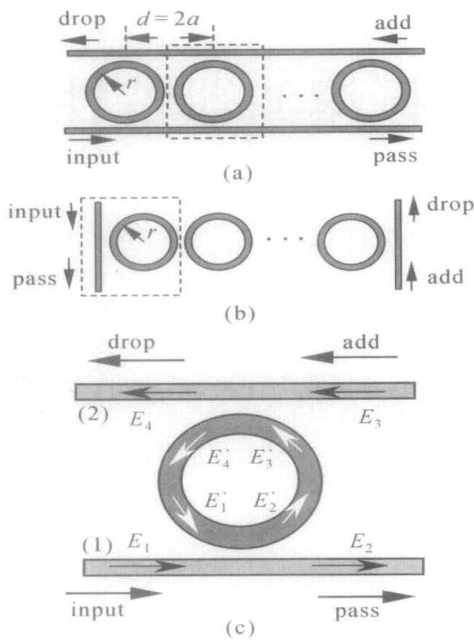


图 1

(a) 并联耦合结构多环谐振滤波器; (b) 串联耦合结构多环谐振滤波器; (c) 与输入/输出直波导耦合的单环谐振腔

Fig. 1

(a) parallel-coupled multiple-ring resonator filter; (b) series-coupled multiple-ring resonator filter; (c) the structure of single-ring resonator coupled with input/output waveguides

环谐振腔与直波导耦合(见图 1(c))的级联。应用耦合模理论,则单环谐振腔和输入/输出直波导中的场有矩阵关系^[5]

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ E'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & ik \\ ik & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E'_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} E_4 \\ E'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & ik \\ ik & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ E'_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 t 为传输系数, k 为耦合系数, i 为虚变量。虽然微环的损耗对滤波器的通路和下话路的消光比会产生一定的影响,但是通过工艺的进步可极大地改善,因此假设没有损耗的作用,此时 $t^2 + k^2 = 1$ 。

在环中传输的场满足

$$E'_3 = E_2 e^{i\phi}, \quad (3)$$

$$E'_1 = E_4 e^{i\phi}, \quad (4)$$

其中 $\phi = k_0 n_{\text{ring}} \cdot (\pi \cdot r) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{ring}} \cdot (\pi \cdot r)$ 为光在半个环中的相移; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数; λ 为真空中波长; n_{ring} 为环的折射率; r 为环的半径。

联立式(1)~(4),可以得出输入/输出波导各个端口之间的联系,其中“输入”、“通路”、“下话路”和

“上话路”各端口的场分量分别用 E_{in} , E_{pass} , E_{drop} , E_{add} 表示。

2.1 并联结构环型谐振滤波器

对于并联结构,由于耦合是通过各个环单元间的直波导实现的,因此直波导长度引起的相位 $e^{i\theta}$ 直接影响输出滤波性能,因此必须考虑。其中 $\theta = k_0 n_{\text{bus}} (d/2) = k_0 n_{\text{bus}} a$, n_{bus} 为环间直波导的折射率, d 为环间的直波导长度, a 为环间直波导长度的一半。因此,并联耦合的多环谐振滤波器的传输关系可表达为

$$\begin{bmatrix} E_{\text{pass}} \\ E_{\text{add}} \end{bmatrix} = H_1 \cdot H_2 \cdot \dots \cdot H_n \begin{bmatrix} E_{\text{in}} \\ E_{\text{drop}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 H_m 为第 m 个环的传输矩阵,可表达为端口 2,3 和端口 1,4 的关系

$$\begin{bmatrix} E_{2(a)} \\ E_{3(a)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(e^{i2\phi} - t^2)e^{i2\theta}}{t(e^{i2\phi} - 1)} & \frac{k^2 e^{i\phi}}{t(e^{i2\phi} - 1)} \\ -\frac{k^2 e^{i\phi}}{t(e^{i2\phi} - 1)} & \frac{(t^2 e^{i2\phi} - 1)e^{-i2\theta}}{t(e^{i2\phi} - 1)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_4 \end{bmatrix} = H_m \begin{bmatrix} E_{1(-a)} \\ E_{4(-a)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2.2 串联结构环型谐振滤波器

对于串联结构,信号从直波导耦合到环,然后通过环与环间的耦合实现下话路滤波,因此其传输矩阵可表达为

$$\begin{bmatrix} E_{\text{drop}} \\ E_{\text{add}} \end{bmatrix} = G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_n \begin{bmatrix} E_{\text{in}} \\ E_{\text{pass}} \end{bmatrix} = G_{1(\text{bus-ring})} \cdot G_{1(\text{ring})} \cdot G_{1(\text{ring-ring})} \cdot G_{2(\text{ring})} \cdot G_{2(\text{ring-ring})} \cdot \dots \cdot G_{n(\text{ring})} \cdot G_{n(\text{ring-bus})} \begin{bmatrix} E_{\text{in}} \\ E_{\text{pass}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中, $G_m = G_{\text{bus-ring}} \cdot G_{\text{ring}} \cdot G_{\text{ring-bus}} =$

$$\begin{bmatrix} \frac{i}{k} & -\frac{it}{k} \\ \frac{it}{k} & -\frac{i}{k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\phi} & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i}{k} & -\frac{it}{k} \\ \frac{it}{k} & -\frac{i}{k} \end{bmatrix} \text{ 为第 } m \text{ 个环的传}$$

输矩阵。

至此推导出了传输矩阵表示的两种级联方式的多环谐振滤波器的特征函数,根据(5)式和(7)式,对通路和下话路的滤波传输函数 $E_{\text{pass}}/E_{\text{in}}$ 和 $E_{\text{drop}}/E_{\text{in}}$ 进行化简后,可发现传输函数的分母为 $e^{i\phi}$ 的 n 阶(n 为环数)多项式,可以采用与电滤波器设计相同的方法,根据滤波器所要达到的性能指标对环型谐振器的各个参数如:耦合系数、环间距或环半径等进行选择,调整传输函数的极点,即可设计出性能指标达到

所要求的滤波器结构。

3 数值计算

3.1 并联结构环型谐振滤波器的优化设计

基于推导出的传输函数,在并联结构中,环单元间的直波导长度引起的相位 $e^{i\theta}$ 直接影响各个环下话路间的相位差,从而影响其下话路滤波特性。因此对并联结构滤波特性的改善是通过对环间距的优化选择实现的。

首先考虑两个环结构相同的情况,采用的参数为:环与输入/输出直波导间的耦合系数: $k = 0.1$, $n_{\text{ring}} = n_{\text{bus}} = 1.7$, $r = 8 \mu\text{m}$,图 2 为在环间距 d 分别为 $20 \mu\text{m}$, $24 \mu\text{m}$, $28 \mu\text{m}$ 情况下,下话路端口在 $\lambda_c = 1553.7 \text{ nm}$ 谐振波长处的归一化传输函数。从图可见,环间距设置不当时,不仅导致边瓣的产生,还直接影响下话路光谱的对称性。经过数值计算发现,当环间距在谐振波长处引起的相移为 π 的奇数倍时,就可消除不对称性。这可通过将并联耦合结构类比于光纤光栅来解释,每个环对信号的下话路类似于光栅对输入信号的反射,只有当环间直波导长度引起的相移为 π 的奇数倍,即环间的上下两个直波导引起的相移为 2π 的整数倍时,各个环下话路的信号才能实现相位加强效果,从而改善滤波效果。

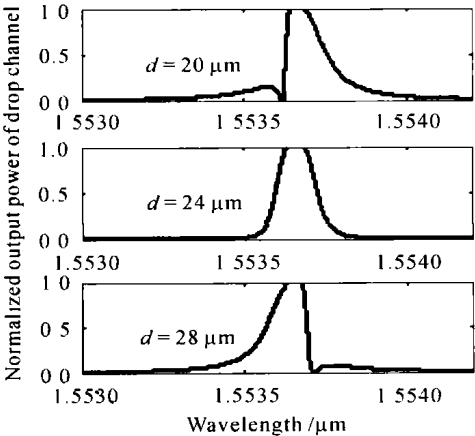


图 2 环间距对下话路滤波性能的影响
Fig.2 Transmission spectra at drop channel with varying interresonator gap

在分析了两个环的基础上,图 3 为环个数增加情况下,下话路滤波传输特性的比较。根据图 2 的分析,将环间距设定为 $d = 24 \mu\text{m}$ 。随着环型谐振腔个数的增加,下话路光谱通带变得更平坦,滚降时间更快。但同时由于边瓣的增强,对串话会造成一

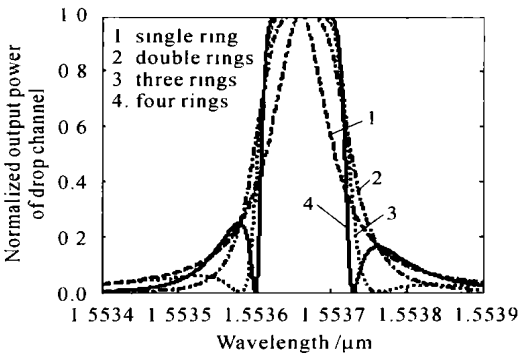


图 3 环型谐振腔个数对下话路滤波性能的影响
Fig.3 Transmission spectra at drop channel of single-, double-, three- and four-ring resonator filters

定的影响。

3.2 串联结构环型谐振滤波器的优化设计

由于串联耦合多环谐振滤波器采用的下话路机制与并联结构不同,通过优化设计环间的耦合系数,可在实现最大平坦的情况下消除边瓣。经过数值计算,表 1 列出了环个数分别为 2,3,5 时,实现最大平坦滤波特性所需满足的耦合系数关系,即各环间耦合系数从中间到两侧对称并且增加时,可优化下话路的滤波效果。

表 1 为实现最大平坦时环与环间耦合系数的优化设计
Table 1 Optimization design of the ring-ring coupling coefficients to achieve maximally flat response passbands

The number of the ring	Coupling coefficients between the rings	Coupling coefficient between the ring and waveguide
2	$k_{1-2} = 5 \times 10^{-3}$	$k_{\text{bus-ring}} = 0.1$
3	$k_{1-2} = k_{2-3} = 3.535 \times 10^{-3}$	$k_{\text{bus-ring}} = 0.1$
5	$k_{1-2} = k_{4-5} = 3.09 \times 10^{-3}$ $k_{2-3} = k_{3-4} = 1.718 \times 10^{-3}$	$k_{\text{bus-ring}} = 0.1$

图 4 为在环与环间耦合系数不同时,两环谐振滤波器的下话路光谱特性。其中环间的耦合系数分别为: 3×10^{-3} (曲线 1), 5×10^{-3} (曲线 2), 7×10^{-3} (曲线 3),可见当 $k_{\text{ring-ring}} = 5 \times 10^{-3}$ 时,可实现最大平坦滤波特性,验证了表 1 的结果。

随着环数的增加,如图 5 所示,平坦性增强,滚降时间更快。但与并联结构相比,却没有边瓣的产生,性能更加优越。

结 论

采用传输矩阵法推导出两种级联方式形成的多

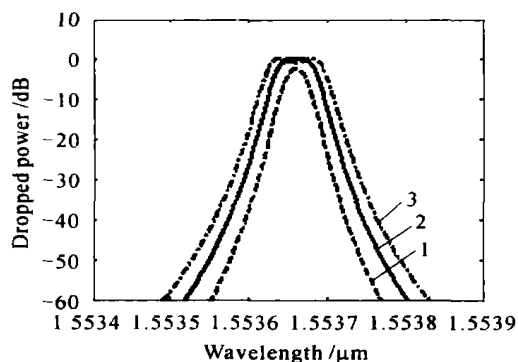


图4 环间耦合系数对下话路滤波平坦度的影响

Fig. 4 Flat responses of drop channel with interresonator coupling coefficients

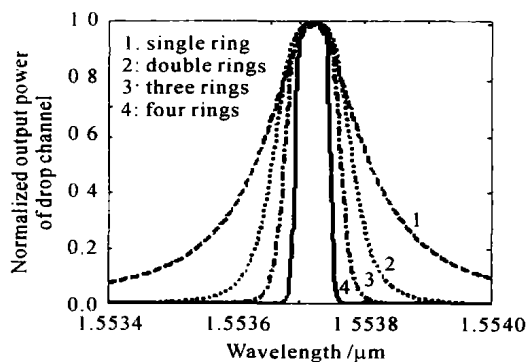


图5 环型谐振腔个数对下话路滤波性能的影响

Fig. 5 Transmission spectra at drop channel of single-, double-, three- and four-ring resonator filters

环高阶谐振滤波器的传输函数,通过结构参数的优化,改善了它们的滤波特性。通过仿真分析得出了与文献[6]一致的结论,即对于串联耦合结构形成的多环谐振滤波器,通过对环与环间耦合系数的优化,能在实现最大平坦特性的同时,形成对称的滤波响应特性,并且有效地抑制边瓣的产生,性能较并联结构更加优越。

参考文献

- 1 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
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
- 2 Song Kang, Li Yigui, Chen Shuliang. Micro-cavity filter based on MEMS micro-fabrication technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):659~661
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
- 3 Hirofumi Haeiwa, Toshiki Naganawa, Yasuo Kokubun. Wide range center wavelength trimming of vertically coupled microring resonator filter by direct UV irradiation to SiN ring core [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1):135~137
- 4 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
- 5 A. Yariv. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4):321~322
- 6 P. P. Absil, S. T. Chu, D. Gill *et al.*. Very high order integrated optical filters [C]. *OFC2004*, TuL3:37~39