

文章编号: 0253-2239(2007)08-1443-6

基于微环谐振器阵列与马赫-曾德尔干涉仪的 反射型滤波器性能分析*

许 鸥 鲁韶华 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: 理论分析了一种将微环谐振器阵列与马赫-曾德尔干涉仪(MZI)相结合实现的反射型滤波器结构。将此结构类比为两类四端口网络级联模型,利用传输矩阵法推导出其通用函数形式,并给出单环及三环结构下的能量反射系数具体公式。通过传输函数矩阵模拟计算了取不同耦合系数值情况下的反射谱形变化,给出了原因分析及讨论。并模拟了引入传输损耗对三环结构谐振峰反射率的影响。数值结果表明:适当选取直波导与微型环以及微型环间耦合系数幅值时,此结构能够作为反射型滤波器应用于密集波分复用(DWDM)系统,也可实现激光器反射镜面的功能;由于传输损耗增加而引起的谐振峰反射率下降程度依赖于所选取的耦合系数值。

关键词: 集成光学; 反射型滤波器; 微环谐振器; 传输函数矩阵; 马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Properties Analysis for Reflection-Type Filter Composed of Microring Resonator Array and Mach-Zehnder Interferometer

Xu Ou Lu Shaohua Dong Xiaowei Pei Li Jian Shuisheng

(*Institution of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044*)

Abstract: The theoretical analysis is presented for the wavelength-selective reflection-type filter realized by combination of microring resonator array and Mach-Zehnder interferometer. By introducing the series-cascaded two kinds of four-port network, the general formulas are derived with the transfer matrix method, and explicit expressions for the power reflection coefficients of single-ring and three-ring structures are given. The changes of the reflection spectrum shapes are computed for different values of coupling coefficients by the transmission function matrices, and detailed analysis and discussions are given for the reason. For the three-ring structure, the influences of transmission loss on the power reflectivity of resonant peaks are simulated. The simulation results show that: when the ring-bus and ring-ring coupling ratios are selected properly, this device can be used as a reflection-type filter in dense wavelength division multiplexing (DWDM) system and an end mirror for lasers; the degradation of the peak reflectivity value with the transmission loss increase depends on the values of selected coupling ratios.

Key words: integrated optics; reflection-type filter; microring resonator; transfer function matrix; Mach-Zehnder interferometer

1 引 言

微环谐振器(Microring resonator, MR)做为一种波长选择器件,具有尺寸小,成本低,集成度高的特点,近年来吸引了越来越多的研究兴趣^[1~4]。随

着密集波分复用系统的发展,基于微环谐振器的各种集成光学器件纷纷涌现,实现了如滤波、波分复用、解复用、调制、波长转换等诸多功能^[5~9]。

目前,在各种基于微环谐振器的结构中,大多为

* 国家自然科学基金(60477017)、北京市自然科学基金(4052023)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0091)资助课题。

作者简介:许 鸥(1981—),女,山西人,博士研究生,主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: aliceseaer@163.com

导师简介:简水生(1929—),男,江西人,中国科学院院士,博士生导师,主要从事全光通信网络关键技术及器件、光电子器件与光纤传感方面的研究。

收稿日期: 2007-01-08; 收到修改稿日期: 2007-02-01

传输型波长选择器件。也有研究者提出了一些具有反射功能的微环谐振器结构,如由奇数个微环谐振器排列呈圆圈状相互耦合形成反射型新型滤波器^[10]、直波导与两微环谐振器同时作用实现反射^[11]等等。这些器件能够代替分布式布拉格反射镜形成单纵模激光器谐振腔,从而简化激光器制作过程^[11]。另外,微环谐振器型反射结构也可以作为反射型滤波器应用于密集波分复用系统,补充完善了原有的传输型滤波功能,使其在系统中发挥更加多样的作用。

本文理论分析了一种微环谐振器结合马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)的新型反射型滤波器结构,该结构尺寸小、集成度高,将其类比为两类四端口网络的级联,运用传输矩阵法给出其函数模型,通过此传输函数能够分析含有任意数量微环谐振器时的反射情况。主要分析了三环串联情况下,直波导与环、环与环间耦合系数以及传输损耗的引入对反射谱特性的影响,给出了模拟结果与讨论。

2 原 理

2.1 通用结构与传输函数

图 1 为微环阵列结合马赫-曾德尔干涉仪形成反射型新型滤波器的通用结构示意图。光信号经过

3 dB 耦合器后被均分为两路进入马赫-曾德尔干涉仪双臂,两臂中传输的光分别耦合进入微环阵列,在微环数量为奇数时,环内得到谐振加强的光信号将从另一臂被反射回来。由于上下两臂的情况完全相同,因此重点分析从上臂输入,下臂反射输出的情况。

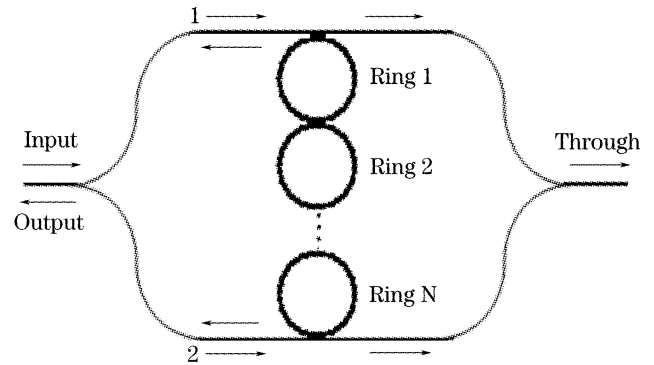


图 1 微环谐振器阵列结合马赫-曾德尔干涉仪(MZI)反射器结构示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the reflector composed of microring array and Mach-Zehnder interferometer

观察发现,马赫-曾德尔干涉仪两臂与中间微环阵列的耦合结构可以归纳为两类四端口网络的级联。其中,上/下臂与相邻环以及微环之间的作用相当于四端口耦合器,如图 2(a)所示, a_i 及 b_i 分别为第 i 个($i=1,2,3,4$)端口的入射及反射信号。通过散射矩阵 S_n 来描述入射信号与反射信号间的关系^[12]:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = S_n \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sqrt{1-\kappa_n^2} & j\kappa_n \\ 0 & 0 & j\kappa_n & \sqrt{1-\kappa_n^2} \\ \sqrt{1-\kappa_n^2} & j\kappa_n & 0 & 0 \\ j\kappa_n & \sqrt{1-\kappa_n^2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

κ_n 为第 n 个方向耦合器的耦合系数, $\sqrt{1-\kappa_n^2}$ 为传输系数, j 为虚变量。这里假设耦合器为无损的。矩阵变换后得到联系第 n 个耦合器输入端口 1,3 与输出端口 2,4 的传输矩阵 T_n :

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ a_4 \\ b_4 \end{bmatrix} = T_n \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ a_3 \\ b_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{j\kappa_n} \begin{bmatrix} -\sqrt{1-\kappa_n^2} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \sqrt{1-\kappa_n^2} & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -\sqrt{1-\kappa_n^2} & 0 \\ -1 & 0 & 0 & \sqrt{1-\kappa_n^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ a_3 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

光信号在微环耦合区外的传输可以类比为两平行传输线的四端口网络作用,如图 2(b)。可以直接得到表示此四端口网络的传输矩阵 P_n 如下:

$$\begin{bmatrix} a'_2 \\ b'_2 \\ a'_4 \\ b'_4 \end{bmatrix} = P_n \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ a_4 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \exp[(\alpha-j\beta)L_n/2] & 0 & 0 \\ \exp[(j\beta-\alpha)L_n/2] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp[(\alpha-j\beta)L_n/2] \\ 0 & 0 & \exp[(j\beta-\alpha)L_n/2] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ a_4 \\ b_4 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

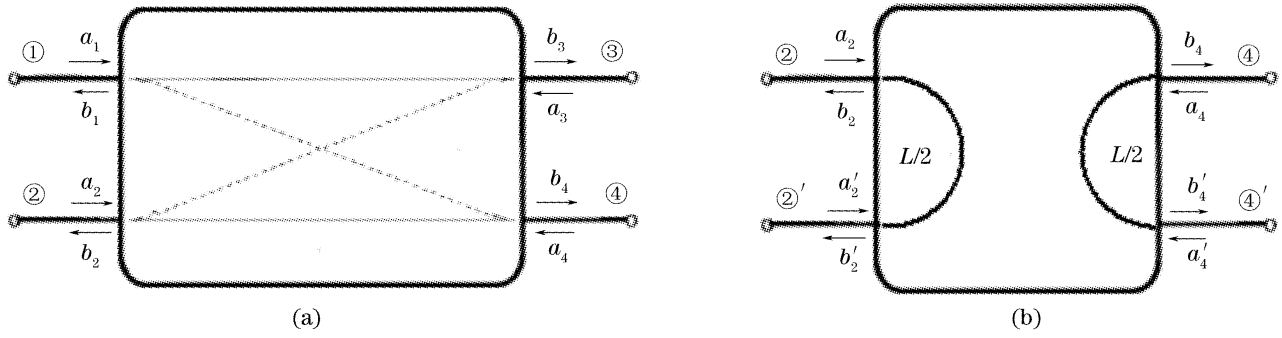


图 2 两类四端口网络结构示意图

Fig. 2 Schematic diagrams for two kinds of four port networks

其中 $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 为传播常数, n_{eff} 为有效折射率, λ 表示信号波长; L_n 为第 n 个微环的周长; α 为波导的传输损耗系数, 典型值为 $\alpha \approx 0.1 \text{ cm}^{-1}$ [8]。随着工艺的进步微环谐振器对光信号的散射损耗、弯曲损耗和泄露损耗都远远小于波导传输损耗 [8], 因此在下面的计算中不再考虑其余几种损耗的影响。

N 个微环组成的反射型新型滤波器传输函数矩阵为表示方向耦合器与平行传输线的传输矩阵级联相乘, 可得

$$\mathbf{G}_N = \prod_{n=1}^N (\mathbf{T}_n \mathbf{P}_n) \mathbf{T}_0, \quad (4)$$

\mathbf{T}_0 为马赫-曾德尔干涉仪上臂与其相邻微环形成的等效四端口耦合器传输矩阵。令 $[a_1, b_1, a_3, b_3]$ 为马赫-曾德尔干涉仪上臂中传输信号, a_1, a_3 为输入信

号; b_1, b_3 为输出信号。 $[a'_1, b'_1, a'_3, b'_3]$ 为下臂中传输信号, a'_1, a'_3 为输入信号; b'_1, b'_3 为输出信号。假设 $a_1 = a'_1 = 1, a_3 = a'_3 = 0$, 则由 (4) 式, 有

$$[1 \ b'_1 \ 0 \ b'_3]^T = \mathbf{G}_N [1 \ b_1 \ 0 \ b_3]^T, \quad (5)$$

在已知各个微环具体参量的情况下, 可由 (2) 式、(3) 式求出矩阵 \mathbf{G}_N 中各元素, 由此通过 (5) 式计算出与波长相关的能量反射系数 $r = |b_1|^2 = |b'_1|^2$, 透射系数 $t = |b_3|^2 = |b'_3|^2$ 。根据此通用传输函数矩阵, 可实现该结构中的耦合系数、微环半径等参量的优化分析, 从而得到所需的反射图谱。

2.2 单环结构

假设在 $\kappa_0 = \kappa_1 = \kappa, \alpha = 0$ 的情况下, 由 (4) 式得到单环结构传输矩阵为

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{T}_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{T}_0 = \frac{1}{-\kappa^2} \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{A} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \exp(j\beta L/2) - (1 - \kappa^2)\exp(-j\beta L/2) \\ \exp(-j\beta L/2) - (1 - \kappa^2)\exp(j\beta L/2) & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \kappa^2}[\exp(-j\beta L/2) - \exp(j\beta L/2)] & 0 \\ 0 & \sqrt{1 - \kappa^2}[\exp(j\beta L/2) - \exp(-j\beta L/2)] \end{bmatrix}, \quad (8)$$

由 (5) 式可以得到与文献 [13] 中一致的结果如下:

$$r = \frac{|\kappa|^4}{|\exp(j\beta L/2) - (1 - \kappa^2)\exp(-j\beta L/2)|^2} = \frac{\kappa^4}{1 + (1 - \kappa^2)^2 - 2(1 - \kappa^2)\cos(\beta L)}. \quad (9)$$

2.3 三环串联结构

除单环结构外, 三环串联结构为这种反射型新型滤波器的典型结构, 将 $N=3$ 代入 (4) 式得到:

$$\mathbf{G}_3 = \mathbf{T}_3 \mathbf{P}_3 \mathbf{T}_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{T}_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{T}_0 = \frac{1}{-\kappa_0 \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3} \begin{bmatrix} 0 & G_{12} & G_{13} & 0 \\ G_{21} & 0 & 0 & G_{24} \\ G_{31} & 0 & 0 & G_{34} \\ 0 & G_{42} & G_{43} & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

结合 (5) 式得到三环串联微环谐振器的能量反射系数为

$$r = |b_1|^2 = |b'_1|^2 = |\kappa_0 \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3|^2 / |G_{12}|^2, \quad (11)$$

$$G_{12} = (p_3 p_2 u_3 - u_3^{-1})(\sqrt{1 - \kappa_0^2} p_1 u_2^{-1} u_1 - u_2^{-1} u_1^{-1}) + u_2 (p_2 u_3^{-1} - p_3 u_3)(\sqrt{1 - \kappa_0^2} u_1 - p_1 u_1^{-1}), \quad (12)$$

其中 $u_n = \exp[(\alpha - j\beta)L_n/2]$, $p_n = \sqrt{1 - \kappa_n^2}$, $n = 1, 2, 3$ 。

3 模拟结果及分析

图 3 为由(9)式得出的单环耦合马赫-曾德尔干涉仪两臂情况下反射频谱响应,这里取微环半径 $R = 108.25 \mu\text{m}$,有效折射率系数 $n_{\text{eff}} = 1.515$,传输系数 $\sqrt{1 - \kappa^2} = 0.85$,得到自由光谱范围(FSR)约为 2.5 nm 。模拟结果与文献[13]中测量结果符合的较好。

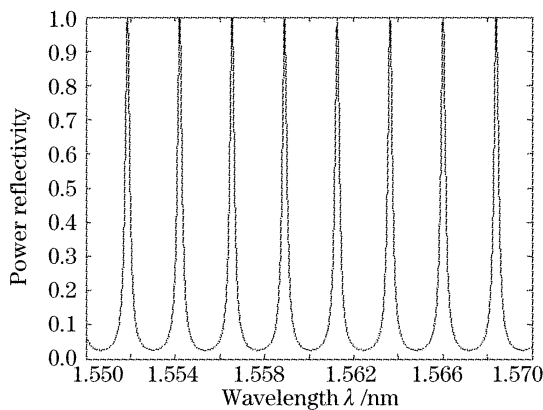


图 3 单环结构反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum for one-ring structure

反射型滤波器结构由多个微环结合马赫-曾德尔干涉仪组成,由于可调参量增多,能够更加灵活地对反射频谱响应进行设计。并且由于微环半径在微米量级,增加环的数量不会明显增大器件尺寸。基于推导出的传输函数矩阵,下面对三环串联结构

的反射特性进行了模拟计算及分析。为了简化分析,在讨论耦合系数值变化对反射谱所起的作用时,先令传输损耗系数 $\alpha = 0$,稍后集中讨论损耗带来的影响。

固定环与环之间的耦合系数($\kappa_1 = \kappa_2 = 0.1$),改变马赫-曾德尔干涉仪上下两臂与其相邻微环间耦合系数 κ_0 及 κ_3 ,得到图 4 所示的反射谐振峰演化过程。这里只展示了以自由光谱范围为 5 nm 间隔分布的图谱中任意一个周期。计算中设三个微环具有相同的半径 $R = 50 \mu\text{m}$,波导在 1550 nm 附近的有效折射率系数为 1.515 。并假设耦合器的插入损耗为零。

图 4(a)中为 $\kappa_0 = \kappa_3$ 分别取 $0.1, 0.2, 0.3$ 时,位于波长 1550.33 nm 附近反射谐振峰的谱型变化过程。可以看出, $\kappa_0 = \kappa_3 = 0.1$ 时,在 1550.33 nm 附近出现了三个窄谐振峰;当 κ_0 与 κ_3 的值逐渐增加时,三个谐振峰逐渐展宽并融合在一起,最终形成一个单峰。在此过程中反射峰的 3 dB 带宽呈增加趋势。图 4(b)中为 $\kappa_0 = \kappa_3$ 分别取 $0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 时得到的反射峰。观察到在融合为单峰的过程中,一个较为平坦的滤波器响应谱形显现出来,也就是说,通过适当调整马赫-曾德尔干涉仪两臂与微环间耦合系数的值能够得到具有平坦响应谱线的反射型滤波器。当 κ_0 与 κ_3 的值大于 0.5 时,随着耦合系数值的增加谐振峰带宽变得越来越窄。这样的谱线形状使它能够为波长选择反射镜应用于可调或固定波长激光器。

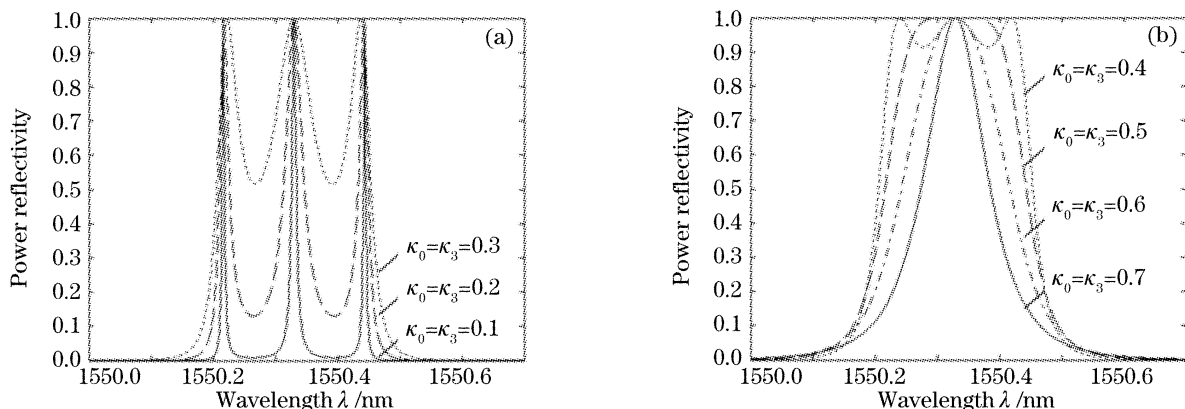


图 4 三环结构在 $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.1$, (a) $\kappa_0 = \kappa_3$ 分别取 $0.1, 0.2, 0.3$ 时, (b) $\kappa_0 = \kappa_3$ 分别取 $0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 时的反射谱

Fig. 4 Reflection spectra of three-ring structure for $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.1$ and (a) $\kappa_0 = \kappa_3 = 0.1, 0.2, 0.3$,

(b) $\kappa_0 = \kappa_3 = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$

令微环与上下两臂间耦合系数值保持不变, $\kappa_0 = \kappa_3 = 0.1$,改变微环间的耦合系数 κ_1, κ_2 ,相应的反射谱如图 5 所示。当 $\kappa_1 = \kappa_2$ 分别取 $0.1, 0.5, 1.0$ 时,得到图中分别用点线、点划线及实线绘出的谱

线。图 5 只显示出呈周期性重复图谱中的一组。可以明显地观察到 $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.1$ 时,在 1550.3 nm 附近出现三个等间距谐振峰,由点线表示。随着耦合系数值的增大,三个谐振峰之间的间距也越来越大,

而峰的形状并不发生改变。由模拟结果得到当微环间耦合系数为 0.1、0.5、1.0 时,每组谐振峰间隔分别为 0.112 nm、0.592 nm、1.682 nm。

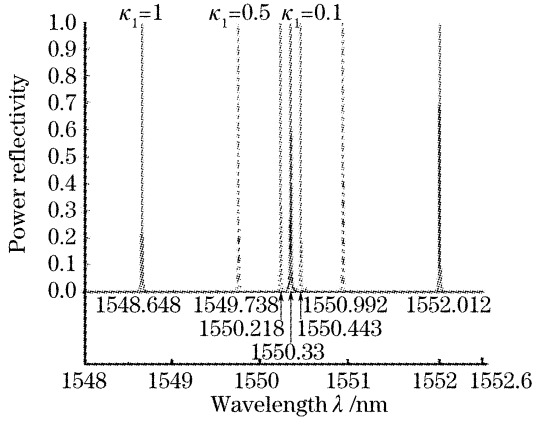


图 5 三环结构在 $\kappa_0 = \kappa_3 = 0.1, \kappa_1 = \kappa_2$ 分别取 0.1(点线)、0.5(点划线)、1.0(实线)时的反射谱

Fig. 5 Reflection spectra of three-ring structure for $\kappa_0 = \kappa_3 = 0.1$ and $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.1$ (dotted line), 0.5 (dot-dash line), 1.0 (solid line) respectively

为了更好地解释上面反射谱的变化行为,先考虑孤立的单微环谐振条件。通常对于一个周长为 L 的微环,其谐振条件可以表示为

$$\frac{2\pi}{\lambda_m} n_{\text{eff}}(\lambda_m) L = m2\pi, \quad (13)$$

$n_{\text{eff}}(\lambda_m)$ 为对应于波长 λ_m 的有效折射率,由于考虑的范围在 1550 nm 附近,计算时取其在 1550 nm 处的值做为近似。由于环与环之间存在耦合关系,应该将光在通过耦合区时的相位改变因素考虑进来。根据文献[11]中的分析方法,得到下面的谐振条件:

$$\frac{2\pi}{\lambda_{m\pm}} n_{\text{eff}}(\lambda_{m\pm}) L \pm \arctan\left(\frac{\kappa_1}{t_1}\right) = m2\pi, \quad (14)$$

除了满足(13)式的波长 λ_m 处发生谐振外,满足(14)式的两波长处也出现了谐振峰,并且三个谐振峰之间的距离与微环间耦合程度的大小呈正比关系,谐振峰位置如下:

$$\lambda_{m\pm} = \frac{2\pi n_{\text{eff}}(\lambda_{m\pm}) L}{2m\pi \pm \arctan(\kappa_1/t_1)}, \quad (15)$$

为了验证这一点,将图 5 中取 $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.1$ 得到的结果与(15)式的预测结果进行了比较。当 $m = 307$ 时,由(13)式得到 $\lambda_m = 1.55033 \mu\text{m}$,正是图 5 中点处的波长值。因为得到图 5 的条件之一为马赫-曾德尔干涉仪两臂与相邻微环间的耦合作用很小,可以近似认为三个串联微环为一独立结构,故可以用(15)式来推测位于中点波长两侧的谐振峰波长。将 $m = 307, \kappa_1 = 0.1, t_1 = \sqrt{1 - \kappa_1^2}$ 代入(15)式,分别得到 $\lambda_{m-} = 1.550218 \mu\text{m}, \lambda_{m+} = 1.550443 \mu\text{m}$,这两个

波长值与图 5 中由传输矩阵法得到的波长值几乎完全相同。说明了正是由于微环间的耦合,形成了在中心谐振波长附近三个谐振峰的出现。

从图 4 可以看出,微环与马赫-曾德尔干涉仪两臂间的耦合程度是决定三个谐振峰展宽及合并的主要因素。综合上面的分析,要想得到窄带宽的单谐振峰反射图谱,应该减弱微环间的耦合,并增强两臂与微环的耦合作用。只要适当选择环-环及环-臂间耦合系数,就有可能得到窄带的强反射谱。图 6 给出了取几组不同耦合系数作用下的反射谱,可以看出,当取图中耦合系数值时,这组反射峰较为平坦。在取其中三组耦合系数值时,反射峰具有 0.15 nm 甚至更窄的 3 dB 带宽。因此,能够通过对耦合系数值的优化设计,来得到满足密集波分复用系统要求的窄带、近似方形的低串扰滤波响应谱线。同时调整微环半径大小,以满足密集波分复用波长要求。

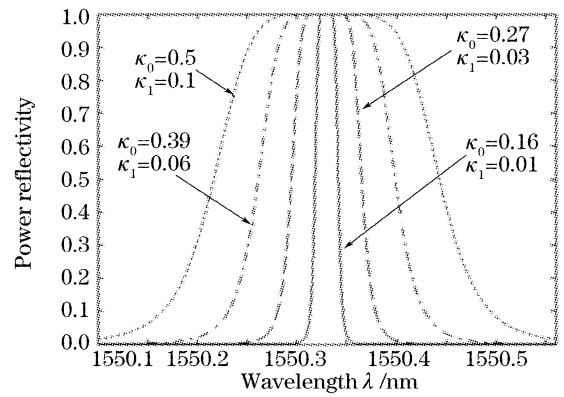


图 6 取适当耦合系数值得到的平坦频谱响应

Fig. 6 Several reflection spectra of flat-top response by selecting appropriate pairs of κ_0 (κ_3) and κ_1 (κ_2)

微环谐振器在传输光信号过程中的损耗主要可以分为散射损耗、泄露损耗、弯曲损耗以及材料的传输损耗。随着制作工艺的不断改进,前三项损耗的损耗系数均可降到 10^{-3} cm^{-1} 以下[14],因此主要损耗由传输损耗决定。分别取 $\alpha = 0, 0.01, 0.1 \text{ cm}^{-1}$ 。仍取三环半径均为 $R = 50 \mu\text{m}$ 。图 7(a)中 $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.1, \kappa_0 = \kappa_3 = 0.3$,可以看出随着传输损耗系数增大,谐振峰反射率下降得很快。计算得到当 $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ 时, $r \approx 3.75 \times 10^{-4}$ 。图 7(b)中 $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.1, \kappa_0 = \kappa_3 = 0.5$,与图 7(a)比较可以看出,此时 α 增大时反射峰下降速度变慢,并且计算得 $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ 时 $r \approx 1.4 \times 10^{-3}$ 。图 7(c)取 $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.1, \kappa_0 = \kappa_3 = 0.7$,观察发现反射峰下降速度较图 7(b)又加快了,最低处降到了 0.34,而图 7(b)中最低峰值反射率则大于 0.4。说明对于三微环结合马赫-曾德尔干涉仪结构来说,由于传输损耗增加而引起的谐振峰反射率下

降程度是依赖于环-环及环-臂间耦合系数值的,或者说是对耦合系数值敏感的,在设计时值得注意。

若损耗过大可以考虑采用引入增益介质的方法进行补偿。

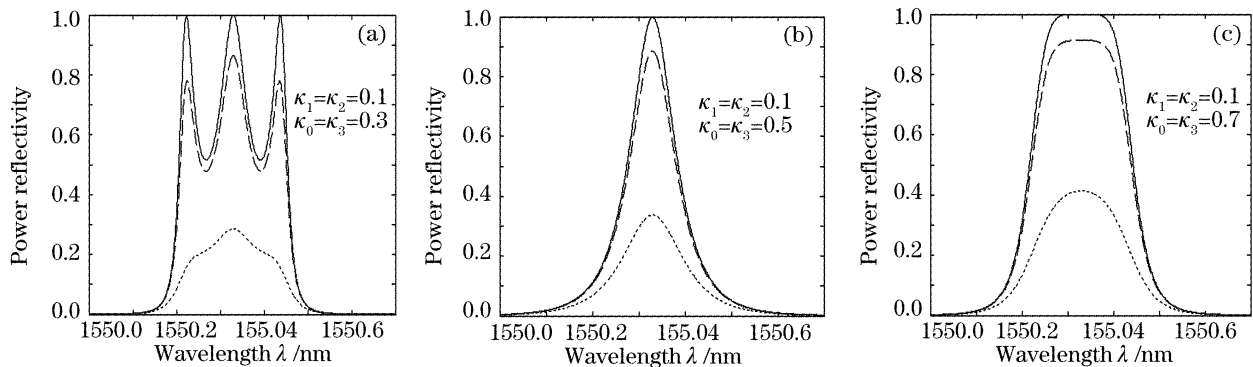


图 7 三环结构取 $\alpha=0$ (实线)、 $\alpha=0.01 \text{ cm}^{-1}$ (虚线)、 $\alpha=0.1 \text{ cm}^{-1}$ (点线) 时的谐振峰反射率变化

Fig. 7 Power reflectivity changes of three-ring structure when $\alpha=0 \text{ cm}^{-1}$ (solid lines), $\alpha=0.01 \text{ cm}^{-1}$ (dashed lines), $\alpha=0.1 \text{ cm}^{-1}$ (dotted lines)

4 结 论

理论分析了一种基于微环阵列及马赫-曾德尔干涉仪的反射型滤波结构,将其归纳为两类四端口网络级联模型,推导出含有任意数量微环谐振器时的传输函数矩阵,并给出了单环及三环结构下能量反射系数的具体表达式。利用推导出的传输函数,重点分析了三环串联型反射滤波器在取不同耦合系数值以及引入传输损耗情况下反射谱的演变过程,对其原因进行了讨论。结果表明,在适当选取耦合系数值的条件下,此类结构可以用来做为激光器的反射镜,也可以做为反射型滤波器应用于密集波分复用系统。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Tymon Barwicz, Miloš A. Popović, Michael R. Watts *et al.*. Fabrication of add-drop filters based on frequency-matched microring resonators[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2207~2218
- 3 Payam Rabiei, William H. Steier, Cheng Zhang *et al.*. Polymer micro-ring filters and modulators[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(11): 1968~1975
- 4 P. P. Absil, J. V. Hryniewicz, B. E. Little *et al.*. Compact microring notch filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(4): 398~400
- 5 Yutaka Hatakeyama, Takamitsu Hanai, Shuichi Suzuki *et al.*. Loss-less multilevel crossing of busline waveguide in vertically coupled microring resonator filter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 473~475
- 6 Amnon Yariv. Critical coupling and its control in optical waveguiding resonator systems[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **14**(4): 483~485
- 7 Tarek A. Ibrahim, W. Cao, Y. Kim *et al.*. All-optical switching in a laterally coupled microring resonator by carrier injection[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1): 36~38
- 8 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Characteristic analyses of series-coupled multiple-ring resonator filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 207~211 (in Chinese)
董小伟, 裴丽, 简水生. 集成串联环型谐振光滤波器特性的数值分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 207~211
- 9 Shen Hao, Li Xinwan, Zhou Junhe *et al.*. Filter performance analysis of a tunable Mach-Zehnder interferometer enhanced with a micro-ring resonator array[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(6): 670~673 (in Chinese)
沈浩, 李新碗, 周俊鹤等. 可调微环阵列加强 MZI 滤波性能分析[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(6): 670~673
- 10 Joyce K. S. Poon, Jacob Scheuer, Amnon Yariv. Wavelength-selective reflector based on a circular array of coupled microring resonators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(5): 1331~1333
- 11 Youngchul Chung, Doo-Gun Kim, Nadir Dagli. Reflection properties of coupled-ring reflectors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1865~1874
- 12 Otto Schwelb. Transmission, group delay and dispersion in single-ring optical resonators and add/drop filters-A tutorial overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(5): 1380~1394
- 13 George T. Palocz, Jacob Scheuer, Amnon Yariv. Compact microring-based wavelength-selective inline optical reflector[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 390~392
- 14 Wang Xianyin, Ma Chunsheng, E Shulin *et al.*. Theoretical analysis for transmission characteristics of polymer microring resonant wavelength multiplexer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 45~50 (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): 45~50