

doi:10.3788/gzxb20154407.0713003

# 单环和双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器的特性分析

晏崇宇, 高劭宏, 宋东雨, 安利民, 刘剑波, 肖德航, 张子欣

(黑龙江大学 物理科学与技术学院, 哈尔滨 150080)

**摘要:**将微环谐振腔应用于普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器中,构成一种新型滤波器,用信号流程图法推导了其输出端传递函数,并对其输出结果进行了模拟.结果表明:该滤波器能输出透过率近似平顶和平底的矩形方波,自由光谱范围达 111 GHz,消光比达 10.2 dB.和普通的马赫-曾德尔干涉仪滤波器相比,自由光谱范围、消光比、精细度都显著提高.改变微环谐振腔和马赫-曾德尔干涉仪滤波器的组合方式,得到更多的输出波形.讨论了各项参量对器件输出性能的影响.

**关键词:**波导光学;光滤波器;信号流程图;微环谐振腔;马赫-曾德尔干涉仪;光学器件;光通信

中图分类号:TN252

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)07-0713003-8

## Characteristic Analysis of Single and Double Micro Ring Resonant Cavity Used in Mach-Zehnder Interferometer Filter

YAN Chong-yu, GAO Shao-hong, SONG Dong-yu, AN Li-min, LIU Jian-bo,  
XIAO De-hang, ZHANG Zi-xin

(College of Physical Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The single microring resonator was applied to ordinary Mach-Zehnder interferometer filter constituting a new type filter. The output transfer function was derived by the signal flow graph method, and the output spectra were simulated and analyzed. The results show that the improved filter can give rectangular waves approximating flat top and flat bottom, The free spectral range up to 111 GHz, the extinction ratio of 10.2dB. Compared with Mach-Zehnder interferometer filter, free spectral range, the extinction ratio, precision are improved obviously. By changing the way of combination of micro ring resonator and Mach-Zehnder interferometer filter, more output waveforms were got. The effects of various parameters on the output performance of the device was discussed.

**Key words:** Waveguide optics; Optical filter; Singal flow graph; Microring resonator; Mach-Zehnder interferometer; Optical devices; Optical communication

**OCIS Codes:** 130.7408; 140.4780; 230.3990; 230.7370; 230.3120

## 0 引言

微环谐振腔以其功能多样,结构简洁,集成度高<sup>[1]</sup>等优点近年来被广泛应用于光学滤波器、波分复用器、解复用器、调制解调器、波长转换器、微环激光器、光开关<sup>[2-8]</sup>.

由于单环谐振滤波器输出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>[9]</sup>,限制了其在大规模

集成波分复用系统中的应用.为此,人们提出了用多环组成的滤波器来改善滤波性能,主要包括串联多环<sup>[10]</sup>结构和并联多环<sup>[11]</sup>结构,以及由 Hryniewicz 等提出的阵列多环<sup>[12-13]</sup>结构.相对于单环结构,输出光谱得到了优化,能有效改善滤波器的滤波特性.

光学滤波器的分析理论,主要有传输矩阵法、基于麦克斯韦方程组的耦合模理论、保角变换法、特征矩阵法和时域差分法等<sup>[14]</sup>.其中最为常用的是传输矩阵

**基金项目:**黑龙江省自然科学基金(No. A201105)和黑龙江省教育厅科学技术研究项目(No. 12521414)资助

**第一作者:**晏崇宇(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为光通信. Email:597309234@qq.com

**导师(通讯作者):**高劭宏(1959-),男,副教授,博士,主要研究方向为光通信器件及半导体光电子技术. Email:shgaohit@163.com

**收稿日期:**2015-01-12; **录用日期:**2015-04-14

<http://www.photon.ac.cn>

法,其运算速度快,精确度高,在多微环系统的研究中有着广泛的应用.但是当拓扑结构变得复杂时,其计算量极大,难以满足日常应用的需求.信号流程图法<sup>[15]</sup>结构简单,理论清晰,可视性很强,近年来被广泛应用于光学系统的分析中.

马赫-曾德尔干涉仪滤波器(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)结构简单、制作成本低、插入损耗小、与系统的兼容性强、信道均匀,被应用于多波长光纤激光器、波长交错滤波器、相位滤波器、声光滤波器等<sup>[16-19]</sup>.但普通的马赫-曾德尔干涉仪滤波器只能输出余弦波,滤波性能有限,难以满足近年来不断发展的大规模集成波分复用系统的滤波需求.

为改善普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器的滤波性能,本文利用 $2 \times 2$ 耦合器<sup>[20]</sup>将单环微环谐振腔应用于普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器的单臂中,用信号流程图法推导了其传递函数,并对其输出端输出光谱进行了模拟和分析.在此基础上,又将双环微环谐振腔应用于普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器中,对其传递函数和输出结果进行了推导和模拟,并计算分析了各个参量的微小变化对输出结果的影响.

## 1 结构原理和传递函数

单环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器的单臂中的结构图和信号流程图分别如图1(a)和(b)所示,利用一个 $2 \times 2$ 耦合器将单环微环谐振腔加入到普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器的单臂中,用 $\kappa_i$ 表示第 $i$ 个耦合器的耦合系数,用 $\gamma$ 表示每个耦合器的插入损耗;那么第 $i$ 个耦合器的传输路径的增益可以表示为 $C_i = \sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa_i)}$ ;耦合路径的增益可以表示为 $Y_i = j \sqrt{(1-\gamma)(\kappa_i)}$ .用 $n_0, n_1, n_2$ 分别表示光纤,第一个微环,第二个微环的有效折射率,那么他们的传播常量分别为 $B_0 = kn_0, B_1 = kn_1, B_2 = kn_2$ ,其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数.用 $a_0, a_1, a_2$ 分别表示光纤,第一个微环,第二个微环的波导本征损耗;用 $R_1, R_2$ 分别表示第一个微环和第二个微环的周长;那么光在第一个微环中循环一次的增益可以表示为 $F_1 = \exp(-a_1 R_1 - jB_1 R_1)$ ;第二个微环中为 $F_2 = \exp(-a_2 R_2 - jB_2 R_2)$ .用 $d_i$ 表示两臂上第 $i$ 段光纤的长度,那么第 $i$ 段光纤的传输路径的增益可以表示为 $D_i = \exp(-a_0 d_i - jB_0 d_i)$ .

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, $\lambda_0 = M \cdot \text{FSR}$ ,其中FSR为自由谱宽(Free Spectral Range, FSR).为得到更好的输出光谱,本文中耦合器的插入损耗忽略不计.

### 1.1 单环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器的单臂中

如图1所示,利用一个 $2 \times 2$ 耦合器将单环微环谐振腔加入到普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器的单臂中.其中, $E_1$ 为输入端输入信号, $E_3$ 为输出端输出信号.

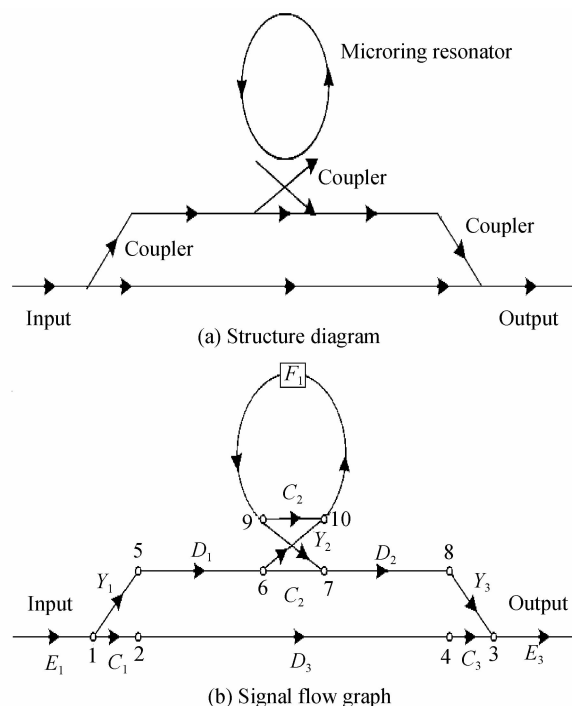


图1 单环微环谐振腔应用于 MZI 的单臂中

Fig.1 Single micro ring resonator applied to MZI in the arm

其传递函数 $\frac{E_3}{E_1}$ :根据图1(b)可知,其中只有一个环路,环路增益可以表示为

$$L_1^s = C_2 F_1 \quad (1)$$

用 $T_i$ 表示路径增益,从输出端结点1到输出端结点3,向前路径共有3条,以及和它互不接触的环路的图行列式可以表示为

$$T_1^s = C_1 C_3 D_3 \quad (2)$$

$$S_1^s = 1 - L_1^s = 1 - C_2 F_1 \quad (3)$$

$$T_2^s = C_2 Y_1 Y_3 D_1 D_2 \quad (4)$$

$$S_2^s = 1 - L_1^s = 1 - C_2 F_1 \quad (5)$$

$$T_3^s = Y_1 Y_2^2 Y_3 F_1 D_1 D_2 \quad (6)$$

$$S_3^s = 1 \quad (7)$$

系统总图行列式

$$S^s = 1 - L_1^s = 1 - C_2 F_1 \quad (8)$$

则输出端传递函数可以表示为

$$\frac{E_3}{E_1} = H^s = \frac{1}{S^s} \sum_{i=1}^n T_i^s S_i^s = (T_1^s S_1^s + T_2^s S_2^s + T_3^s S_3^s) / S^s \quad (9)$$

### 1.2 双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的同一侧

双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的同一侧的结构图和信号流程图分别如图2(a)

和(b)所示,利用两个  $2 \times 2$  耦合器将双环微环谐振腔加入到马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的同一侧.其中,  $E_1$  为输入端输入信号,  $E_3$  为输出端输出信号.

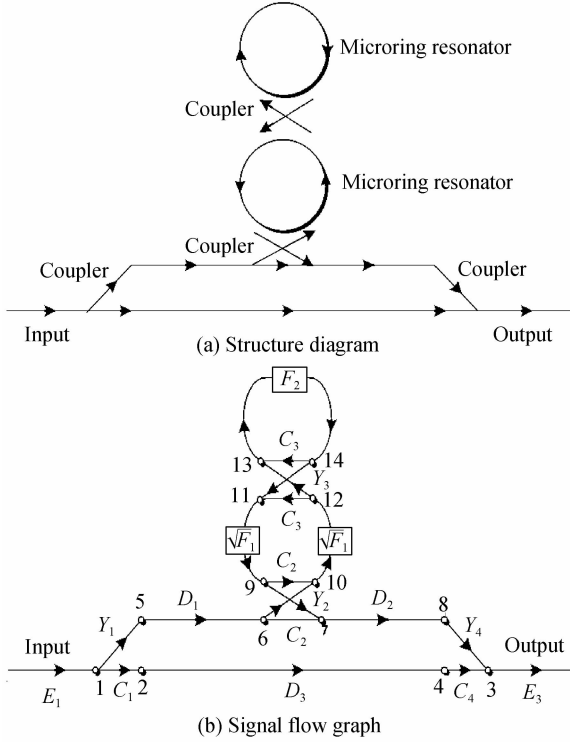


图2 双环微环谐振腔应用于 MZI 单臂的同一侧  
Fig. 2 Double micro ring resonator applied to MZI one arm on the same side

其传递函数  $\frac{E_3}{E_1}$ : 根据图 2(b) 可知, 其中只有三个环路, 环路增益可以表示为

$$L_1^u = C_2 \sqrt{F_1} C_3 \sqrt{F_1} = C_2 C_3 F_1 \quad (10)$$

$$L_2^u = C_3 F_2 \quad (11)$$

$$L_3^u = C_2 \sqrt{F_1} Y_3 F_2 Y_3 \sqrt{F_1} = C_2 Y_3^2 F_1 F_2 \quad (12)$$

其中有两个互不接触的环路. 其环路增益的乘积可以表示为

$$L_{12}^u = C_2 C_3^2 F_1 F_2 \quad (13)$$

从输出端结点 1 到输出端结点 3, 向前路径共有 3 条, 以及和它互不接触的环路的图行列式可以表示为

$$T_1^u = C_1 D_3 C_4 = C_1 C_4 D_3 \quad (14)$$

$$S_1^u = 1 - L_1 - L_2 - L_3 + L_{12} = 1 - C_2 C_3 F_1 - C_3 F_2 - C_2 Y_3^2 F_1 F_2 + C_2 C_3^2 F_1 F_2 \quad (15)$$

$$T_2^u = Y_1 D_1 C_2 D_2 Y_4 = C_2 Y_1 Y_4 D_1 D_2 \quad (16)$$

$$S_2^u = 1 - L_1 - L_2 - L_3 + L_{12} = 1 - C_2 C_3 F_1 - C_3 F_2 - C_2 Y_3^2 F_1 F_2 + C_2 C_3^2 F_1 F_2 \quad (17)$$

$$T_3^u = Y_1 D_1 Y_2 \sqrt{F_1} C_3 \sqrt{F_1} Y_2 D_2 Y_4 = C_3 Y_1 Y_2^2 Y_4 F_1 D_1 D_2 \quad (18)$$

$$S_3^u = 1 - L_2 = 1 - C_3 F_2 \quad (19)$$

$$T_4^u = Y_1 D_1 Y_2 \sqrt{F_1} Y_3 F_2 Y_3 \sqrt{F_1} Y_2 D_2 Y_4 = Y_1 Y_2^2 Y_3^2 Y_4 F_1 F_2 D_1 D_2 \quad (20)$$

$$S_4^u = 1 \quad (21)$$

系统总图行列式为

$$S^u = 1 - L_1 - L_2 - L_3 + L_{12} = 1 - C_2 C_3 F_1 - C_3 F_2 - C_2 Y_3^2 F_1 F_2 + C_2 C_3^2 F_1 F_2 \quad (22)$$

则输出端传递函数可以表示为

$$\frac{E_3}{E_1} = H^u = \frac{1}{S^u} \sum_{i=1}^n T_i^u S_i^u = (T_1^u S_1^u + T_2^u S_2^u + T_3^u S_3^u + T_4^u S_4^u) / S^u \quad (23)$$

### 1.3 双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的上下两侧

双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的上下两侧的结构图和信号流程图分别如图 3(a) 和(b)所示. 利用两个  $2 \times 2$  耦合器将双环微环谐振腔分别加入到马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的上下两侧. 其中,  $E_1$  为输入端输入信号,  $E_3$  为输出端输出信号.

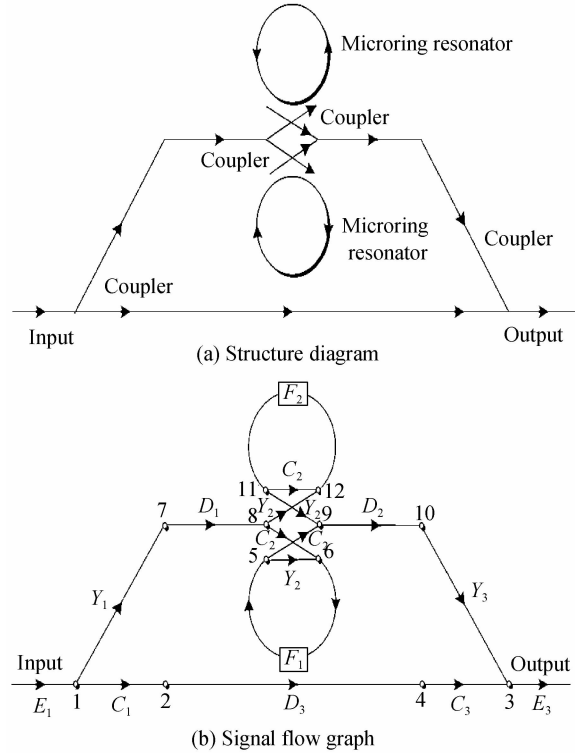


图3 双环微环谐振腔应用于 MZI 单臂的上下两侧  
Fig. 3 Double micro ring resonator applied to MZI one arm on the both sides

其传递函数  $\frac{E_3}{E_1}$ : 根据图中(b)可知, 其中只有两个环路, 环路增益可以表示为

$$L_1^c = Y_2 F_1 \quad (24)$$

$$L_2^c = C_2 F_2 \quad (25)$$

其中有两个互不接触的环路. 其环路增益的乘积可以表示为

$$L_{12}^c = C_2 Y_2 F_1 F_2 \quad (26)$$

从输出端结点 1 到输出端结点 3, 向前路径共有 3 条, 以及和它互不接触的环路的图行列式可以表示为

$$T_1^c = C_1 D_3 C_3 = C_1 C_3 D_3 \quad (27)$$

$$S_1^c = 1 - L_1 - L_2 + L_{12} = 1 - Y_2 F_1 - C_2 F_2 + C_2 Y_2 F_1 F_2 \quad (28)$$

$$T_2^c = Y_1 D_1 C_2 F_1 C_2 D_2 Y_3 = C_2^2 Y_1 Y_3 F_1 D_1 D_2 \quad (29)$$

$$S_2^c = 1 - L_2 = 1 - C_2 F_2 \quad (30)$$

$$S_3^c = 1 - L_1 = 1 - Y_2 F_1 \quad (31)$$

$$T_3^c = Y_1 D_1 Y_2 F_2 Y_2 D_2 Y_3 = Y_1 Y_2^2 Y_3 F_2 D_1 D_2 \quad (32)$$

系统总图行列式为

$$S^c = 1 - L_1 - L_2 + L_{12} = 1 - Y_2 F_1 - C_2 F_2 + C_2 Y_2 F_1 F_2 \quad (33)$$

则输出端传递函数可以表示为

$$\frac{E_3}{E_1} = H^c = \frac{1}{S^c} \sum_{i=1}^n T_i^c S_i^c = (T_1^c S_1^c + T_2^c S_2^c + T_3^c S_3^c) / S^c \quad (34)$$

#### 1.4 双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器的双臂上

双环微环谐振腔分别应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器的双臂上的结构图和信号流程图分别如图4(a)和(b)所示. 利用两个  $2 \times 2$  耦合器将双环微环谐振腔分别加入到马赫-曾德尔干涉仪滤波器的双臂上. 其中,  $E_1$  为输入端输入信号,  $E_3$  为输出端输出信号.

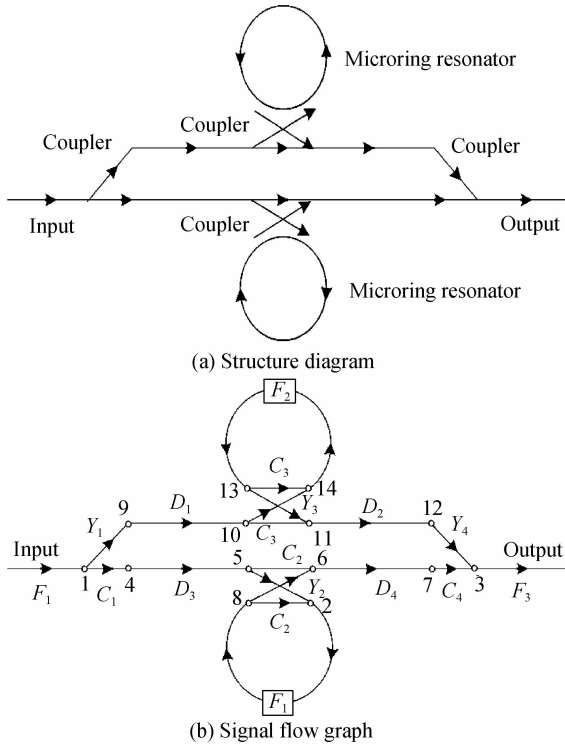


图 4 双环微环谐振腔分别应用于 MZI 的双臂上  
Fig. 4 Double micro ring resonator used in MZI arms

其传递函数  $\frac{E_3}{E_1}$ : 根据图中(b)可知, 其中只有两个

环路, 环路增益可以表示为

$$L_1^p = C_2 F_1 \quad (35)$$

$$L_2^p = C_3 F_2 \quad (36)$$

其中有两个互不接触的环路. 其环路增益的乘积可以

表示为

$$L_{12}^p = C_2 C_3 F_1 F_2 \quad (37)$$

从输出端结点 1 到输出端结点 3, 向前路径共有 3 条, 以及和它互不接触的环路的图行列式可以表示为

$$T_1^p = C_1 D_3 Y_2 F_1 Y_2 D_4 C_4 = C_1 C_4 Y_2^2 F_1 D_3 D_4 \quad (38)$$

$$S_1^p = 1 - L_2 = 1 - C_3 F_2 \quad (39)$$

$$T_2^p = C_1 D_3 C_2 D_4 C_4 = C_1 C_4 C_2 D_1 D_4 \quad (40)$$

$$S_2^p = 1 - L_1 - L_2 + L_{12} = 1 - C_2 F_1 - C_3 F_2 - C_2 C_3 F_1 F_2 \quad (41)$$

$$T_3^p = Y_1 D_1 C_3 D_2 Y_4 = C_3 Y_1 Y_4 D_1 D_2 \quad (42)$$

$$S_3^p = 1 - L_1 - L_2 + L_{12} = 1 - C_2 F_1 - C_3 F_2 - C_2 C_3 F_1 F_2 \quad (43)$$

$$T_4^p = Y_1 D_1 Y_3 F_2 Y_3 D_2 Y_4 = Y_1 Y_3^2 Y_4 F_2 D_1 D_2 \quad (44)$$

$$S_4^p = 1 - L_1 = 1 - C_2 F_1 \quad (45)$$

系统总图行列式为

$$S^p = 1 - L_1 - L_2 + L_{12} = 1 - C_2 F_1 - C_3 F_2 - C_2 C_3 F_1 F_2 \quad (46)$$

则输出端传递函数可以表示为

$$\frac{E_3}{E_1} = H^p = \frac{1}{S^p} \sum_{i=1}^n T_i^p S_i^p = (T_1^p S_1^p + T_2^p S_2^p + T_3^p S_3^p + T_4^p S_4^p) / S^p \quad (47)$$

## 2 仿真与分析

对滤波器的性能进行仿真和分析. 图 5 为单环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂中的仿真输出光谱, 其中耦合器耦合系数  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 0.2$ , 波导本征损耗:  $a_0 = a_1 = 0$ , 有效折射率都为 1.5, 上下臂长差  $\Delta L = d_3 - d_2 - d_1 = 1.8$  mm, 微环周长,  $R_1 = 3.624$  mm. 从图中可以看出, 输出端输出光谱谱线的顶端和底端平坦, 带通边缘陡峭, 谱线的形状近似于方形; 输出光谱中自由光谱范围约为 111 GHz, 输出端输出光谱的消光比达到了 10.2 dB,  $-3$  dB 带宽为 53.6 GHz, 形状因子约为 0.675, 精细度为 2.07. 相对于普通的马赫-曾德尔干涉仪滤波器输出的余弦波, 滤

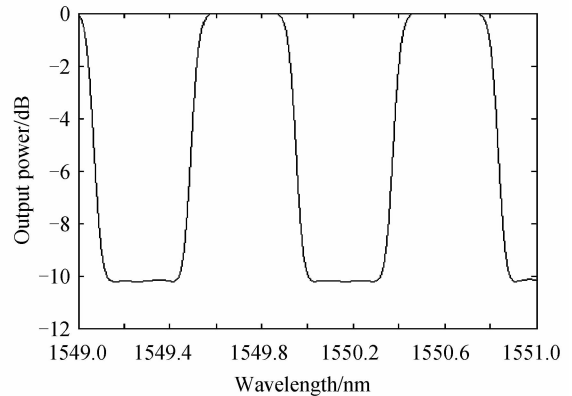


图 5 单环微环谐振腔应用于 MZI 的单臂中的输出光谱  
Fig. 5 The output spectrum of single micro ring resonator applied to MZI in the arm

波性能发生了较大的改善。

当上下臂长差发生微小变化时,对输出端输出光谱的影响如图 6 所示,发现当上下臂长差增加 50 nm 或者 100 nm 时,对输出光谱的自由谱宽和半高全宽影响很小,消光比并没有明显变化,但是方波的顶端和底端的平台发生了很大的改变,平整性变差,以前平坦的带通发生了很大的波动,谐振峰被一分为二,而且上下臂长差改变值越大,影响也越大,说明输出端输出光谱对于上下臂长差的微小改变很敏感。

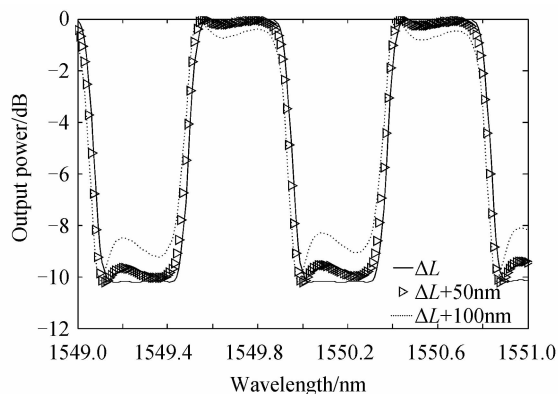


图 6 上下臂长差对滤波器输出光谱的影响

Fig. 6 The upper and lower arm length difference effect on the output spectrum

当微环周长发生微小改变时,对输出端输出光谱的影响如图 7 所示,发现当微环周长增加 100 nm 或者 200 nm 时,输出端输出光谱的自由谱宽和半高全宽的变化都很小,消光比也几乎不变,但方波顶端和底端的平台发生了很大的波动,平整性变差,以前平坦的带通发生了较大的波动,谐振峰被一分为二;从图上看,当微环周长增大时,输出光谱的谱线发生了向右的平移,其实是输出光谱中的谐振峰向右漂移所导致的。而且漂移的程度随着微环周长的增加而增大。微环周长每增加 100 nm,大约向右漂移 6.5 GHz。综上可知,输出端输出光谱对于上下臂长差或微环周长的微小变化都十分敏感,即使是纳米级别的变化,也能导致输出结

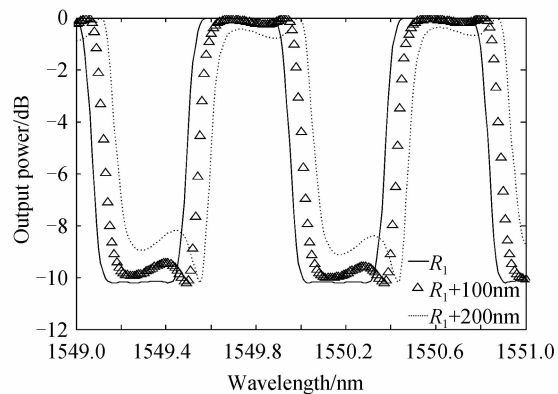


图 7 微环周长对滤波器输出光谱的影响

Fig. 7 Effect of perimeter micro ring resonant cavity on the output spectrum

果发生改变,所以将其应用于温度、压力、生物等方面的传感器时,对传感器的灵敏度会有很大的提高。

双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的同一侧的仿真输出光谱如图 8 所示,其中耦合器耦合系数  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = 0.2 = \kappa$ ,波导本征损耗:  $a_0 = a_1 = a_2 = 0$ ,有效折射率都为 1.5,上下臂长差  $\Delta L = d_3 - d_2 - d_1 = 0$ ,微环周长,  $R_1 = 2$  mm,  $R_2 = 2$  mm。如图 1 所示,其中出现了两个谐振峰连续出现的现象,且它们都靠得很近,那是因为输出光谱加强区域的中间发生了相干相消,谐振峰被一分为二;相邻谐振峰之间的谱宽有两个,一个为 14.3 GHz,另一个为 85.4 GHz,输出端输出光谱的消光比达到了 10.2 dB,每个谐振峰从峰值下降 3dB 时对应的带宽为 1.43 GHz,形状因子约为 0.05。

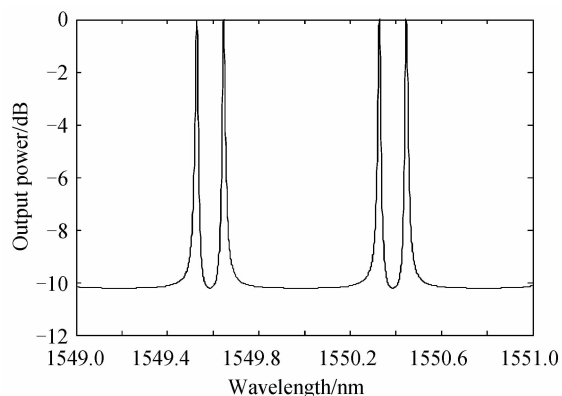


图 8 双环微环谐振腔应用于 MZI 单臂的同一侧的输出光谱

Fig. 8 The output spectrum of double micro ring resonator applied to MZI one arm on the same side

当耦合器的耦合系数发生微小改变时,对输出端输出光谱的影响如图 9 所示,发现当每一个耦合器的耦合系数都减小 0.05 变为 0.15 时,谐振峰所处的频率不变,谐振峰之间的谱宽也没有明显的变化。但是消光比变为 7.1 dB,相比耦合系数都为 0.2 时,消光比减小了 3.1 dB。当每个耦合器的耦合系数都增大 0.05 变为 0.25 时,谐振峰所处的频率仍不变,但消光比变

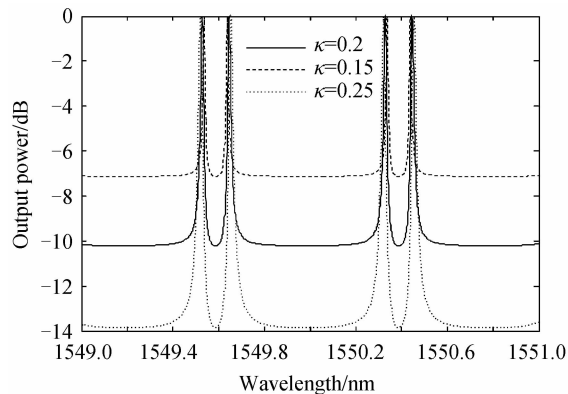


图 9 耦合系数对滤波器输出光谱的影响

Fig. 9 Influence of coupling coefficient on the output spectrum

为 13.9 dB,相比耦合系数都为 0.2 时,消光比增大了 3.8 dB. 所以当耦合器的耦合系数改变时,输出端输出光谱的消光比也会随之改变;当耦合系数减小时,消光比减小;当耦合系数增大时,消光比也增大.

双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的上下两侧的仿真输出光谱如图 10 所示,其中

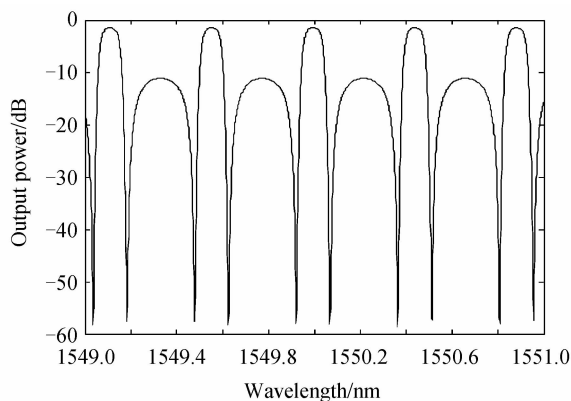


图 10 双环微环谐振腔应用于 MZI 单臂的上下两侧的输出光谱

Fig. 10 The output spectrum of double micro ring resonator applied to MZI one arm on the both sides

耦合器耦合系数  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 0.5$ ,波导本征损耗:  $a_0 = a_1 = a_2 = 0.1$  dB/cm,有效折射率都为 1.5,上下臂长差  $\Delta L = d_3 - d_2 - d_1 = 0$ ,微环周长,  $R_1 = 3.616$  mm,  $R_2 = 3.616$  mm. 由图 10 可知,输出光谱中两个相邻的脉冲不等高,一个的带宽较大,另一个的带宽较小;输出光谱中自由谱宽约为 55.5 GHz,其消光比达到了 56.1 dB, -3 dB 带宽为 10.2 GHz,其形状因子约为 0.579,精细度为 5.44.

当第二个微环的周长发生微小变化时,对输出端输出光谱的影响如图 11 所示,发现当第二个微环的周长增加 530 nm 时,以前输出光谱中相邻的两个不等高脉冲合并成了一个平顶峰;当周长增加 1 060 nm 时,输出光谱谱线又变回了以前的波形;当周长增加 1 590 nm 时,输出波形和周长增加 530 nm 时得到的输出波形相同. 说明当第二个微环的周长发生微小改变时,会使输出光谱发生巨大的变化,且周长每增加 1 060 nm 时,这种变化就会发生一次循环.

双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的上下两侧也可以输出矩形方波,其结果如图 12 所示. 其中耦合器的耦合系数  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 0.2$ ,波

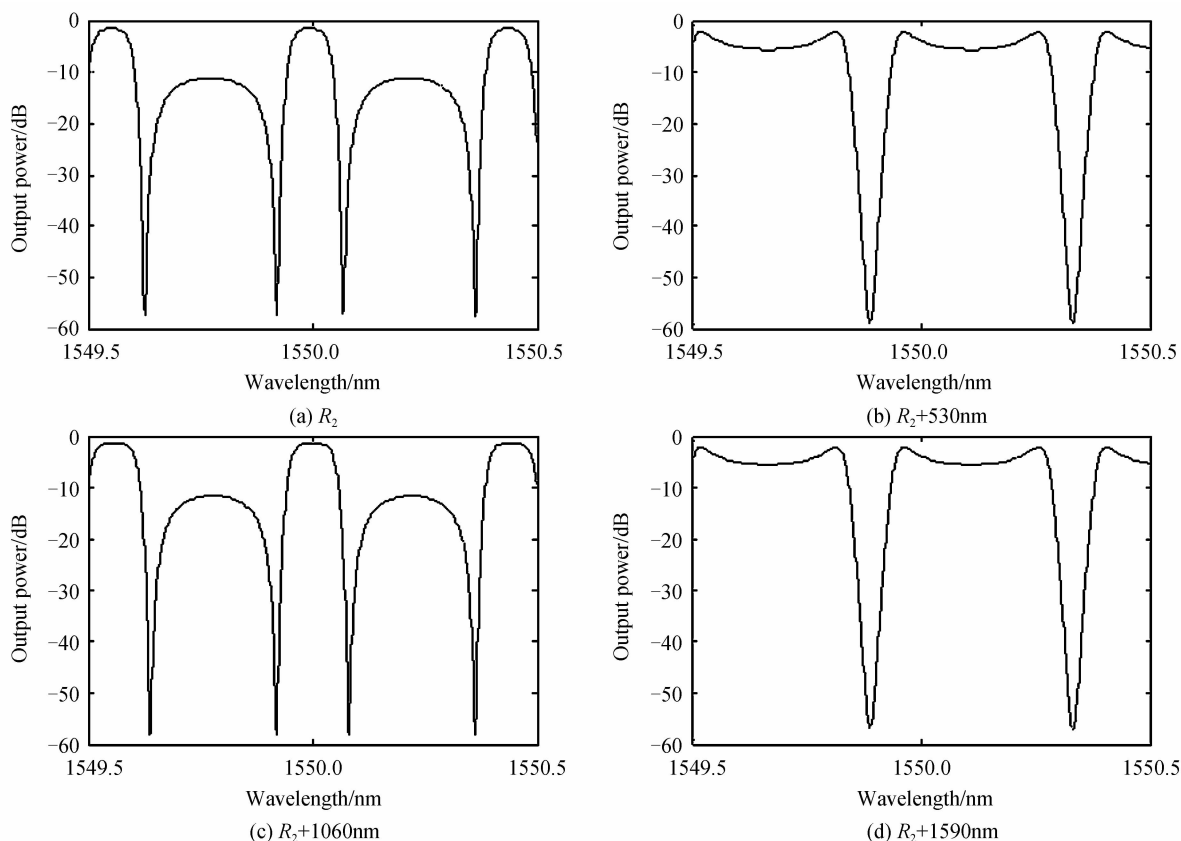


图 11 第二个微环的周长对滤波器输出光谱的影响

Fig. 11 The influence of the second micro ring resonator circumference on the output spectrum

导本征损耗:  $a_0 = a_1 = a_2 = 0 = a$ ,有效折射率都为 1.5,上下臂长差  $\Delta L = d_3 - d_2 - d_1 = 1.8$  mm,微环周长,  $R_1 = 3.616$  mm,  $R_2 = 10$   $\mu$ m. 从图中可以看出,输出端

输出光谱谱线的顶端和底端平坦,带通边缘陡峭,谱线的形状近似于方形,表明双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的上下两侧也是可以输出波

形较好的矩形方波;和普通的马赫-曾德尔干涉仪滤波器比起来滤波性能有了较大的改善;和加入单环微环谐振腔的马赫-曾德尔干涉仪滤波器比起来,其输出谱线的种类较多,能满足更多的滤波需求。

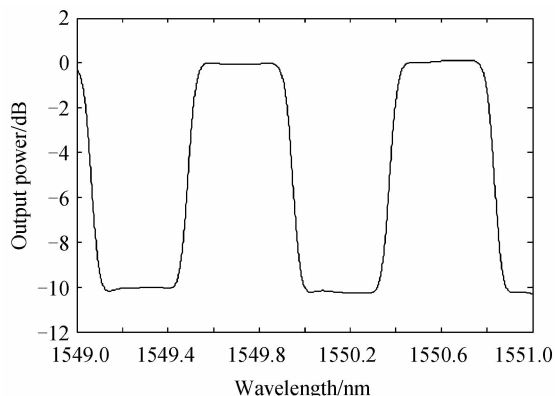


图 12 双环微环谐振腔应用于 MZI 单臂的上下两侧输出矩形方波

Fig. 12 Rectangular pulse arm double micro ring resonator applied to MZI on the two sides of the output

当波导本征损耗发生微小变化时,对输出端输出光谱的影响如图 13 所示.结果表明,波导本征损耗变大时,输出端输出光谱中谐振峰的峰值骤然变小,当  $a=0$  时,峰值无限接近于零;当  $a=0.2$  dB/cm 时,峰值减小为  $-2.3$  dB;当  $a=0.5$  dB/cm 时,峰值减小为  $-5.7$  dB.另外方波的平顶和平底也变成了平滑的圆弧状,方波的平整性受到了影响.由此可知,波导本征损耗的增大,对滤波器会产生不利的影响,应该尽量使其减小.

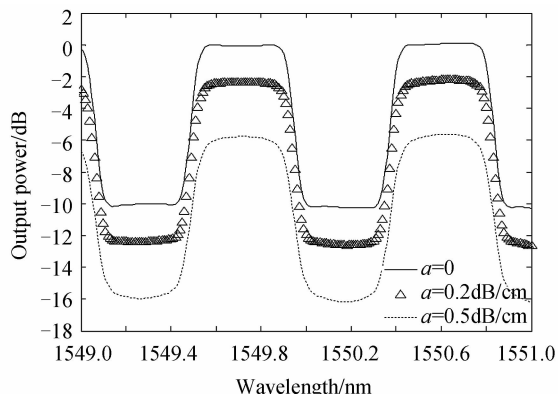


图 13 波导本征损耗对滤波器输出光谱的影响

Fig. 13 Influence of syndrome loss on output spectra

双环微环谐振腔分别应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器两臂中的仿真输出光谱如图 14 所示,其中耦合器耦合系数  $\kappa_1 = \kappa_4 = 0.1, \kappa_2 = \kappa_3 = 0.5$ ,波导本征损耗:  $a_0 = a_1 = a_2 = 0.1$  dB/cm,有效折射率都为 1.5,上下臂长差  $\Delta L = d_4 + d_3 - d_2 - d_1 = 0.2$  mm,微环周长,  $R_1 = R_2 = 3$  mm.结果表明,在以上波段范围内,出现了 3 个完整的谐振峰,且他们的峰值随着频率的减小而增大,相邻的两个谐振峰之间的谱宽约为 68 GHz,每个谐振

峰的一 3 dB 带宽为 63 GHz.

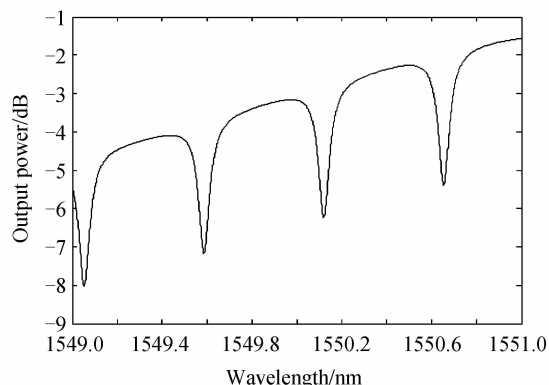


图 14 双环微环谐振腔分别应用于 MZI 的两臂的输出光谱  
Fig. 14 The output spectrum of double micro ring resonator used in MZI arms

当上下臂长差发生微小变化时,对输出端输出光谱的影响如图 15 所示.由图可知,当上下臂长差增加 50 nm 时,输出光谱中每个谐振峰都发生了向上的浮动,峰值增加了 0.7 dB;当上下臂长差增加 100 nm 时,谐振峰进一步向上浮动,且浮动的程度增加.说明该滤波器对上下臂长差的变化非常敏感,即使上下臂长差只发生了微小的变化,对输出端输出光谱也会产生很大的影响.所以将其应用于温度、压力、生物等方面的传感器或调制器时,它们的灵敏度将会有很大的提高,经过计算表明,上下臂长差的变化不宜超过 20 nm.

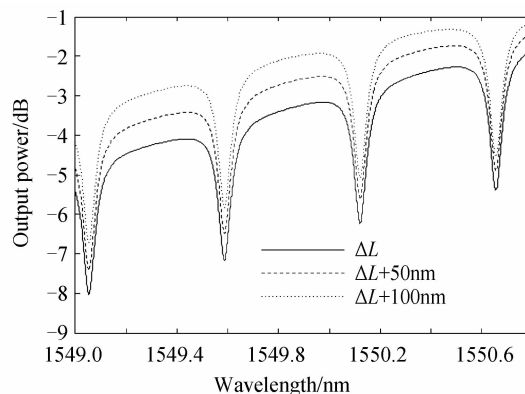


图 15 上下臂长差对滤波器输出光谱的影响

Fig. 15 The upper and lower arm length difference effect on the output spectrum 1

### 3 结论

为改善普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器的滤波性能,本文将单环微环谐振腔应用于普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器的单臂中,用信号流程图法对其输出端传递函数进行了推导,对其输出端输出结果进行了模拟,得到了一种输出光谱谱线近似于平顶和平底的矩形方波,相比于普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器,其滤波性能得到了极大的优化;并研究了当上下臂长差或微环周长发生微小变化时,对输出光谱的影响,结果显示,

其只要发生纳米数量级的变化,对输出光谱就会产生较大的影响.在此基础上,研究了将双环微环谐振腔应用于普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的同一侧,其输出光谱中的两个谐振峰会连续出现,耦合系数的微小变化可以使输出光谱的消光比发生改变.又将双环微环谐振腔应用于普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器单臂的上下两侧,输出光谱中两个连续谐振峰不等高;通过改变参量的数值,也可以使输出光谱中出现矩形方波;同时当波导本征损耗增大时,输出光谱谱线向下移动,输出功率变小,对滤波器产生了不利的影响.最后将双环微环谐振腔分别应用于普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器的两臂中,在波段范围内出现了一种谐振峰被不断抬高的输出光谱;当上下臂光差增大时,其输出光谱谱线发生了向上的浮动.输出功率变大.以上的所有结果表明,微环谐振腔应用于普通马赫-曾德尔干涉仪滤波器时,能使其滤波性能产生较大的改善;其对参量的微小变化十分敏感,将其应用于密集型波分复用系统和各种传感器中,相信会有广阔的前景.

#### 参考文献

- [1] XU Ou, LU Shao-hua, DONG Xiao-wei, *et al.* Properties analysis for reflection-type filter composed of microring resonator array and Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **22**(8): 283-294.
- 许鸥, 鲁韶华, 董小伟, 等. 基于微环谐振腔阵列与马赫-曾德尔干涉仪的反射型滤波器性能分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1443-1446.
- [2] HATAKEYMA Y, HANAI T, SUZUKI S, *et al.* Loss less multilevel crossing of busline waveguide in vertically coupled microring resonator or filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(2): 473-475.
- [3] YARIV A. Critical coupling and its control in optical waveguiding resonator systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **14**(4): 483-485.
- [4] TAREK A, IBRAHIM, WANG C, *et al.* All-optical switching in a laterally coupled microring resonator or by carrier injection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(1): 36-38.
- [5] DONG Xiao-wei, PEI Li, JIAN Shui-sheng. Characteristic analyses of series coupled multiple ring resonator filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 207-211.
- 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.
- [6] SHEN Hao, LI Xin-wan, ZHOU Jun-he, *et al.* Filter performance analysis of a tunable Mach-Zehnder interferometer enhanced with a micro ring resonator array[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, **15**(6): 670-673.
- 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, **15**(6): 670-673.
- [7] YAN Shen-lin, HE Long-qin, WU Hai-yong, *et al.* Study on the method of polarization chaos control for dual ring erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 192-194.
- 颜森林, 何龙庆, 吴海勇, 等. 双环掺铒光纤激光器混沌偏振控制方法研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 192-194.
- [8] DENG Wen-yuan, E Shu-lin, MA Chun-sheng, *et al.* Multi channel access micro ring resonator wavelength selective switching characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2394-2401.
- 邓文渊, 鄂书林, 马春生, 等. 多信道接入微谐振环波长选择开关特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2394-2401.
- [9] YANG Jian-yi, JIANG Xiao-qing, WANG Ming-hua, *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.
- [10] YANG Jian-yi, JIANG Xiao-qing, WANG Ming-hua. Filtering characteristics of series-coupled double-ring optical microring resonators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 31-35.
- 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): 31-35.
- [11] DONG Xiao-wei, PEI Li, JIAN Shui-sheng. Transfer matrix method for analyzing the characteristics of multiple-ring higher order microring resonators[J]. *Chinese Journal of 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.
- [12] YAN Xin, MA Chun-sheng, XU Yuan-zhe, *et al.* Theoretical analysis of  $M \times N$  microring resonator array on silicon[J]. *Journal of Semiconductors*, 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.
- [13] LITTLE B E, CHU S T, HRYNIEWICZ J V, *et al.* Filter synthesis for periodically micro-ring resonators[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(5): 344-346.
- [14] 杨鹏勃. 基于信号流程图理论的微环谐振腔特性分析[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2011: 3.
- [15] WANG Jia-wei, GAO Shao-hong, YANG Peng-bo, *et al.* Analysis of the micro ring resonant cavity single ring and three ring using signal flow graph method[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2012, **41**(9): 2432-2437.
- 王甲伟, 高劭宏, 杨鹏勃, 等. 采用信号流程图法的单环和三环微环谐振波分复用器特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(9): 2432-2437.
- [16] WANG Hua, YAO Min-yu, ZHANG Hong-ming, *et al.* Multi wavelength fiber ring laser with semiconductor optical amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **24**(11): 1502-1506.
- 王华, 姚敏玉, 张洪明, 等. 采用半导体光放大器的多波长光纤环型激光器[J]. *中国激光*, 2007, **24**(11): 1502-1506.
- [17] DONG Xiao-wei, PEI Li, XU Ou, *et al.* Study of interleaver based on ring resonator assisted Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 638-642.
- 董小伟, 裴丽, 许鸥, 等. 环形谐振腔辅助马赫-曾德尔干涉仪波长交错滤波器的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 638-642.
- [18] SONG M, YIN S, PAUL B, *et al.* Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature amplification of a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(7): 1106-1111.
- [19] BETHUYS S, LABLONDE L, RIVOALLAN L, *et al.* Optical add/drop multiplexer based on UV-written Bragg grating in twin-core fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Iet Electronics Letters*, 1998, **34**(12): 1250-1252.
- [20] 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, 2000: 31.