

# 基于对称结构的光纤谐振环辅助马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器的研究

鲁怀伟<sup>1</sup> 鄢开俊<sup>1</sup> 魏 贇<sup>1</sup> 王春丽<sup>2</sup> 蒋占军<sup>2</sup> 罗冠炜<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 兰州交通大学数理与软件工程学院, 甘肃 兰州 730070  
<sup>2</sup> 兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 为了改善常规马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型滤波器的输出特性, 提出了一种由双耦合器和单模光纤构成的“8”字形谐振环, 将该光纤谐振环与一个 3 dB 光纤方向耦合器相结合, 利用光纤谐振环反馈回路引入的相位调节效应, 选择合适的谐振环耦合角, 设计出一种基于对称结构的光纤谐振环梳状滤波器, 具有平坦滤波响应的输出光谱。与普通 MZI 型梳状滤波器和双级级联 MZI 型梳状滤波器相比, 阻带抑制和过渡带滚降特性明显加强; 与不对称结构的光纤谐振环辅助 MZI 型梳状滤波器相比, 在考虑传输损耗的情况下, 相干涉的两束光信号不存在幅度差异, 降低了传输损耗对梳状滤波器消光特性的影响。

**关键词** 光纤光学; 梳状滤波器; 马赫-曾德尔干涉仪; 环形谐振环

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1106005

## Study of a Novel Symmetrical Interleaver Based on Ring Resonator Assisted Mach-Zehnder Interferometer

Lu Huaiwei<sup>1</sup> Wu Kaijun<sup>1</sup> Wei Yun<sup>1</sup> Wang Chunli<sup>2</sup> Jiang Zhanjun<sup>2</sup> Luo Guanwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mathematics, Physics and Software Engineering, Lanzhou Jiaotong University,  
Lanzhou, Gansu 730070, China

<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract** In order to improve the transmission performance of the conventional Mach-Zehnder interferometer (MZI), a novel interleaver combining ring resonator with a single fiber coupler of 3 dB direction is proposed. The ring resonator shaped like an “8” form is based on double-coupler and single-mode fiber. Based on the phase modification provided by the ring resonator, a flatness filtering response is obtained by optimizing the coupling angle of resonator. Compared with the traditional MZI-interleaver and two-stage MZI-interleaver, the isolation in stopband and the rolloff in transition band are strengthened. Compared with the interleaver based on an asymmetrical MZI with a resonator in one arm, there is no difference between the intensities of two coherent light beams in the condition of considering the influence of the propagation loss. Theoretical analysis shows that the influence of the propagation loss on extinction ratio can be effectively reduced by proposed interleaver.

**Key words** fiber optics; interleaver; Mach-Zehnder interferometer; ring resonator

**OCIS codes** 060.4510; 060.2310; 060.2330; 060.2340

## 1 引 言

随着人们对通信容量需求的不断增加, 减小信道间隔和增加信道数成为密集波分复用技术进一步发展的必然趋势。然而随着信道间隔的减小, 研制密集

型波分复用器所遇到的技术困难和成本却在急剧上升。在这种情况下, 一种新型的滤波器件——梳状滤波器应运而生<sup>[1]</sup>, 该器件能够把均匀分布的信道按照奇数和偶数分为两组, 从而使信道间隔增倍。

**收稿日期**: 2012-05-07; **收到修改稿日期**: 2012-06-28

**基金项目**: 国家自然科学基金(10972095)和甘肃省教育厅研究生导师科研项目(1204-01)资助课题。

**作者简介**: 鲁怀伟(1959—), 男, 硕士, 教授, 主要从事光纤通信以及光纤无源器件等方面的研究。

E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn

这样,在信道间隔缩小一半的情况下,只需增加一个梳状滤波器,原来的复用和解复用器件还可以继续适用。目前梳状滤波器的主要类型有晶体双折射型<sup>[2]</sup>、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型<sup>[3]</sup>、光纤光栅组合型<sup>[4]</sup>、法布里-珀罗干涉滤光片型<sup>[5]</sup>、光子晶体型<sup>[6]</sup>、 $2 \times 2$  和  $3 \times 3$  光纤耦合器混合型<sup>[7,8]</sup> 以及 Gires-Tournois(GT)腔+MZI干涉仪<sup>[9]</sup> 等。其中 MZI 型梳状滤波器具有结构简单、制作成本低、信道均匀性好、与系统兼容性强、插入损耗低等优点,成为人们研究的热点之一。但是常规 MZI 型梳状滤波器的通带形状为余弦型,其峰值特性和通带宽度还不能满足实际需要,实用时容易产生较大的插损和串扰。为满足实用需要,提出了多级 MZI 串联型<sup>[10~12]</sup> 和不对称光纤谐振环辅助 MZI 型梳状滤波器<sup>[13~16]</sup>。虽然多级级联 MZI 型和不对称光纤谐振环辅助 MZI 型梳状滤波器可以提高响应通带平坦性,但级联造成 MZI 总干涉臂长增加,会影响器件结构的简洁性和性能的稳定性<sup>[12]</sup>;而不对称光纤谐振环辅助 MZI 型梳状滤波器在实际使用时需要有源补偿传输损耗,否则信道隔离度将明显下降<sup>[15]</sup>。本文提出了另一种改进方案——基于对称结构的光纤谐振环辅助 MZI 型梳状滤波器,分析结果表明,器件透射率形态近似于方波,且能有效降低传输损耗对梳状滤波器消光特性的影响。

## 2 结构原理

具有对称结构的光纤谐振环结构如图 1 所示,它由光纤耦合器 DC<sub>1</sub>、DC<sub>2</sub> 以及光纤  $l_1$  和  $l_2$  组成。DC<sub>1</sub> 和 DC<sub>2</sub> 通过一个“8”字形光纤连接起来,其中一个耦合器的输入端口和另外一个耦合器输出端口互相连通,形成一个  $2 \times 2$  端口的“8”字形光纤谐振环。如图 1 所示,DC<sub>1</sub> 的下输出端口(各耦合器的左端为输入端口,右端为输出端口)和 DC<sub>2</sub> 的上输入端口通过  $l_1$  连接,DC<sub>1</sub> 的下输入端口和 DC<sub>2</sub> 的上输出端口由  $l_2$  连接。 $l_1$  和  $l_2$  之间互相独立传输。

假设输入光从  $E_{in}^1$  输入,经 DC<sub>1</sub> 后分成两束  $E^1-1$  和  $E_{out}^1-1$ ;  $E^1-1$  经光纤  $l_1$  传输到 DC<sub>2</sub>,又被分成  $E^2-1$  和  $E_{out}^2-1$ ;  $E^2-1$  经光纤  $l_2$  返回到 DC<sub>1</sub>,被 DC<sub>1</sub> 分为  $E^1-2$  和  $E_{out}^1-2$ ;  $E^1-2$  经过和  $E^1-1$  相似的传输过程,再次分为  $E^2-2$  和  $E_{out}^2-2$ ; 然后  $E^2-2$  又进入下一轮循环,经过多次循环后,在两个输出端口分别有  $E_{out}^1-1, E_{out}^1-2, \dots, E_{out}^1-j, \dots$  和  $E_{out}^2-1, E_{out}^2-2, E_{out}^2-j, \dots, E_{out}^2$  和

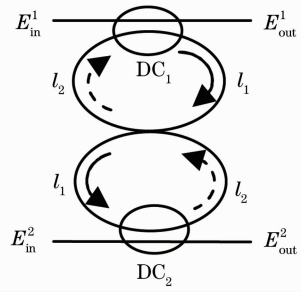


图 1 “8”字形光纤谐振环结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of an “8”-shaped fiber ring resonator

$E_{out}^2$  可以表达为

$$\begin{cases} E_{out}^1 = \sum_{j=1}^{\infty} E_{out}^1 - j \\ E_{out}^2 = \sum_{j=1}^{\infty} E_{out}^2 - j \end{cases} \quad (1)$$

从上面分析可以看出,多光束  $E_{out}^1 - j$  和  $E_{out}^2 - j$  之间的相位差为  $\beta l_1$  ( $\beta$  是光纤传播常数),具有明显的法布里-珀罗谐振腔效应。

利用光纤  $l_3$  和  $l_4$  将“8”字形光纤谐振环与 DC<sub>3</sub> 连接组成一种新型 MZI 干涉仪,其结构如图 2 所示。 $E_{out}^1$  和  $E_{out}^2$  在 DC<sub>3</sub> 输出端口形成多光束等相位差干涉。

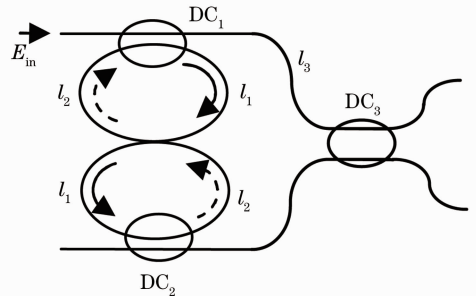


图 2 基于对称结构的光纤谐振环辅助 MZI 型梳状滤波器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a symmetrical interleaver based on ring resonator assisted MZI

假定初始注入条件为  $E_{in}^1 = 1$  和  $E_{in}^2 = 0$ ,忽略光纤耦合器的损耗,利用传输矩阵法<sup>[3,13,15]</sup> 推导出归一化输出功率表达式为

$$\begin{cases} P_1 = a_0 + a_1 \sin[\beta(l_3 - l_4)] + a_2 \cos[\beta(l_3 - l_4)] \\ P_2 = b_0 + b_1 \sin[\beta(l_3 - l_4)] + b_2 \cos[\beta(l_3 - l_4)] \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned}
 a_0 &= (C_3^2 + C_4^2) \sin^2 k_3 + (C_1^2 + C_2^2) \cos^2 k_3, \\
 b_0 &= (C_3^2 + C_4^2) \cos^2 k_3 + (C_1^2 + C_2^2) \sin^2 k_3, \\
 a_1 &= (C_1 C_3 + C_2 C_4) \sin(2k_3) = -b_1, \\
 a_2 &= (C_1 C_4 - C_2 C_3) \sin(2k_3) = -b_2, \\
 C_1 &= A^{-1} \{ \cos k_1 (1 + \tau^2 \cos^2 k_2) - \tau \cos k_2 (1 + \cos^2 k_1) \cos[\beta(l_1 + l_2)] \}, \\
 C_2 &= A^{-1} \tau \sin^2 k_1 \cos k_2 \sin[\beta(l_1 + l_2)], \\
 C_3 &= -A^{-1} \sin k_1 \sin k_2 [\cos(\beta l_1) - \tau \cos k_1 \cos k_2 \cos(\beta l_2)], \\
 C_4 &= A^{-1} \sin k_1 \sin k_2 [\sin(\beta l_1) + \tau \cos k_1 \cos k_2 \sin(\beta l_2)], \\
 A &= 1 - 2\tau \cos k_1 \cos k_2 \cos[\beta(l_1 + l_2)] + \tau^2 \cos^2 k_1 \cos^2 k_2,
 \end{aligned}$$

$k_j$  是第  $j$  个  $2 \times 2$  光纤耦合器的耦合角,  $\tau = \exp[-\alpha(l_1 + l_2)]$  ( $\alpha$  为损耗系数) 为光信号在谐振环中循环一周的归一化损耗。

### 3 分析讨论

#### 3.1 最佳耦合角的确定

从图 2 可以看出, 实验中提出的梳状滤波器在结构上具有对称性。对(2)式进行分析以后发现, 当

DC<sub>1</sub> 和 DC<sub>2</sub> 具有相同的耦合角时, 传输信号无论从上输入端口  $E_{in}^1$  输入, 还是从下输入端口  $E_{in}^2$  输入, 传输到输出耦合器 DC<sub>3</sub> 相干涉的两束光信号的光程相差不大。为了保证在 DC<sub>3</sub> 的两个输出端口得到相同波形的输出光谱, DC<sub>3</sub> 应为 3 dB 耦合器。因此设  $k_2 = k_1 = k, k_3 = \pi/4$ 。取  $l_3 - l_4 = \Delta l, l_1 = 3l_4, l_2 = l_4$ , 则(2)式可以简化为

$$\begin{cases} P_1(\theta) = \frac{1}{2} \{ 1 + B[(\tau^2 - 1) \cos k + 2(\tau + 1) \sin \theta] \} \\ P_2(\theta) = \frac{1}{2} \{ 1 + B[(\tau^2 - 1) \cos k - 2(\tau + 1) \sin \theta] \} \end{cases}, \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} \theta = 2\beta \Delta l \\ B = \frac{\sin^2 k \cos k}{[(\tau \cos^2 k - 1)^2 + 4\tau \cos^2 k \sin^2 \theta]} \end{cases}$$

由于  $P_1(\theta)$  和  $P_2(\theta)$  具有相同的输出波形, 为了简单起见, 只对(3)式中的  $P_1(\theta)$  进行分析, 并忽略传输损耗, 即  $\tau = 1$ 。对  $P_1(\theta)$  进行求导, 并令  $dP_1(\theta)/d\theta = 0$ 。经过简单的计算, 当  $\theta = \theta_1 = \pi/2$  和  $\theta = \theta_{2,3} = \pi/2 \pm \Delta\theta = \pi/2 \pm \arcsin[\sin^2 k / (2\cos k)]$  时,  $P_1(\theta)$  有极值存在, 可表示为

$$\begin{cases} P_1(\theta_1) = \frac{1}{2} + \frac{2\sin^2 k \cos k}{\sin^4 k + 4\cos^2 k} \\ P_1(\theta_{2,3}) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

从上面的分析可以得出,  $\Delta\theta = \arcsin[\sin^2 k / (2\cos k)]$  越大, 输出波形的通带和阻带宽度越宽。但光学梳状滤波器的另一个指标是信道隔离度, 在保证通带和阻带宽度的前提下, 同时也必须保证一定的信道隔离度。通过求  $\max\{|P_1(\pi/2) - P_1(\pi/2 + \pi)|\}$  可以选取适当的  $k$  得到最大的信道隔离度, 可表示为

$$\left| P_1\left(\frac{\pi}{2}\right) - P_1\left(\frac{3\pi}{2}\right) \right| = \frac{4\sin^2 k \cos k}{\sin^4 k + 4\cos^2 k} \quad (5)$$

将(5)式进行数值计算, 其结果如图 3 所示, 当  $k = 1.131 \approx \pi/2.8$  时,  $|P_1(\pi/2) - P_1(\pi/2 + \pi)|$  有最大值。

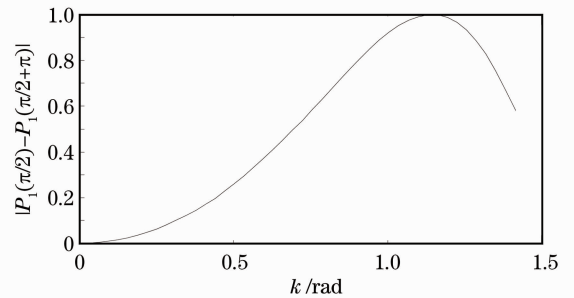


图 3 (5)式随  $k$  变化的计算结果

Fig. 3 Simulation results of Eq. (5) varied with  $k$

在数值模拟分析中, 取光纤的纤芯有效折射率  $n = 1.457$ , 传输中心波长  $\lambda_0 = 1550$  nm, 耦合器 DC<sub>1</sub>、DC<sub>2</sub> 和 DC<sub>3</sub> 的耦合角分别取为  $k_1 = k_2 = k = \pi/2.8$  和  $k_3 = \pi/4$ 。光纤干涉臂长差  $\Delta l = 2.04$  mm, 计算结果如图 4 所示(在图 4 中, 实线和虚线分别代表输出的

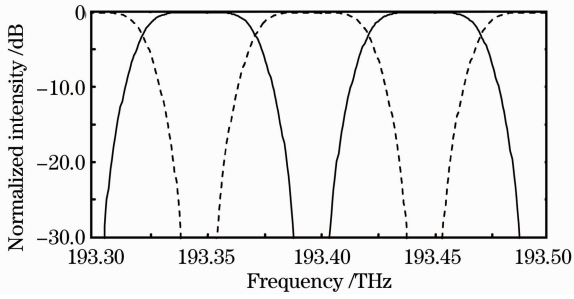


图 4 当  $k_1 = k_2 = k = \pi/2.8$  和  $k_3 = \pi/4$  时,梳状滤波器的输出光谱图

Fig. 4 Calculated transmission spectra of the proposed interleaver using  $k_1 = k_2 = k = \pi/2.8$  and  $k_3 = \pi/4$

归一化输出光强  $P_1$  和  $P_2$ )。

经过计算可以得到其 0.5 dB 通带带宽约为 35 GHz, 25 dB 截止带带宽约为 18.4 GHz。而普通 MZI 型梳状滤波器的 0.5 dB 通带带宽和 25 dB 截止带带宽分别为 21.3 GHz 和 3.6 GHz<sup>[16]</sup>。通过光纤谐振环的相位调制,输出曲线  $P_1(\theta)$  和  $P_2(\theta)$  产生了陡峭边缘,近似于方波的曲线,过渡带的滚降特性明显加强。与常规 MZI 梳状滤波器和双级级联 MZI 梳状滤波器相比,0.5 dB 通带带宽分别增加了 15 GHz 和 5 GHz; 25 dB 截止带带宽分别增加了 15 GHz 和 2.6 GHz<sup>[11]</sup>。可以看出,实验中设计的新结构具有更宽的 0.5 dB 通带带宽和 25 dB 截止带带宽。

### 3.2 耦合比对输出光谱的影响

对于对称结构的光纤谐振环辅助 MZI 型梳状滤波器,新增参量的变化是影响其滤波性能的关键因素,两个耦合器的耦合角  $k_1$  和  $k_2$  的选取决定了输出谱的形状和信道隔离度的大小。同时,由于制作工艺以及实验条件等原因的限制,光纤耦合器分光比的实际值与期望值之间往往有一定的偏差。

设  $\Delta k$  代表耦合角的偏差值,取  $\Delta k = k \times 10\%$ , 将  $k_1 = k \pm \Delta k$  和  $k_2 = k \pm \Delta k$  分别代入(2)式进行数值计算,计算结果如图 5 所示。

在图 5(a)中,耦合角  $k_1$  和  $k_2$  同时大于最佳耦合角  $k$ , 即  $k_1 = k_2 = k + \Delta k$ 。从计算结果可以看出,0.5 dB 通带带宽和 25 dB 截止带带宽明显下降,因此,耦合角  $k_1$  和  $k_2$  最好不要同时大于最佳耦合角  $k$ 。图 5(b) 是耦合角  $k_1$  和  $k_2$  同时小于最佳耦合角  $k$  时的计算结果。结果显示,通带顶端更加平坦,0.5 dB 通带宽度变宽,但旁瓣电平升高,信道隔离度下降。进一步计算表明,当  $\Delta k = k \times 2\%$  时,信道隔离度高于 25 dB,0.5 dB 通带带宽和 25 dB 截止带带宽分别为 35.3 GHz 和 21.3 GHz,和图 5 的计算结果相

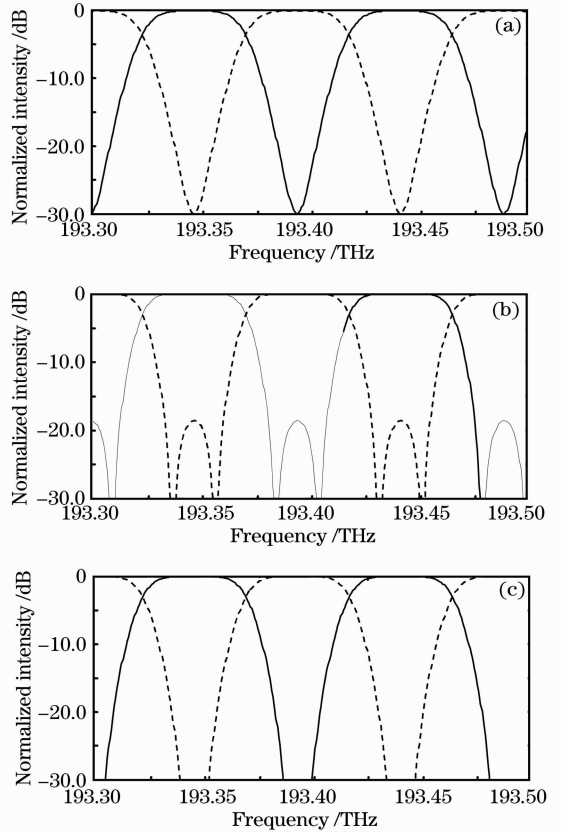


图 5 取  $k_3 = \pi/4$ , (a)  $k_1 = k_2 = k + \Delta k$ , (b)  $k_1 = k_2 = k - \Delta k$ , (c)  $k_1 = k + \Delta k, k_2 = k - \Delta k$  时,梳状滤波器的输出光谱图

Fig. 5 Output spectra of the proposed interleaver with  $k_3 = \pi/4$ , (a)  $k_1 = k_2 = k + \Delta k$ , (b)  $k_1 = k_2 = k - \Delta k$ , (c)  $k_1 = k + \Delta k, k_2 = k - \Delta k$

比略有增加。也就是说如果耦合角  $k_1$  和  $k_2$  的取值范围在  $[k - k \times 2\%, k]$  范围内,信道隔离度不仅可以满足 25 dB 的要求,同时还可以适当提高 0.5 dB 通带带宽和 25 dB 截止带带宽。图 5(c) 是取  $k_1 = k + \Delta k, k_2 = k - \Delta k$  的计算结果,0.5 dB 通带带宽和 25 dB 截止带带宽分别为 34.1 dB 和 17.5 dB 和图 4 的计算结果比较,均下降了 0.9 dB。

另外,由于实验中设计的“8”字形光纤谐振环其结构对称,通过计算也证明取  $k_1 = k - \Delta k, k_2 = k + \Delta k$  的计算结果和  $k_1 = k + \Delta k, k_2 = k - \Delta k$  的计算结果完全一样。图 5(c) 的计算结果说明,如果耦合角  $k_1$  和  $k_2$  其中一个大于最佳耦合角,而另外一个小于最佳耦合角,器件的输出光谱对光纤耦合器耦合比的要求不是十分苛刻,具有一定的抗偏差能力,在一定程度上可以减小实际制作的难度。

### 3.3 传输损耗对梳状滤波器响应特性的影响

传统的利用光纤谐振环辅助 MZI 型梳状滤波器,结构不对称,光纤谐振环和 MZI 两个干涉臂中

的一个干涉臂耦合。文献[16]报道的梳状滤波器结构如图6所示,其中 $DC_1$ 和 $DC_4$ 均为3 dB耦合器。也有的不包含耦合器 $DC_3$ ,直接将光纤 $l_1$ 和 $l_2$ 连接在一起的不对称MZI梳状滤波器<sup>[9,14,15]</sup>。

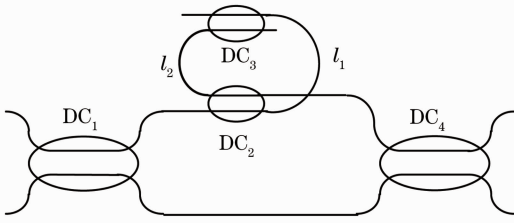


图6 文献[16]报道的不对称梳状滤波器结构示意图

Fig. 6 Structure of the asymmetrical interleaver reported in Ref. [16]

根据文献[16]的报道,其梳状滤波器的0.5 dB通带带宽和25 dB截止带带宽可以达到41.9 GHz和32.2 GHz,环形谐振环对改善梳状滤波器性能非常有利。但该结果是在不考虑光信号传输情况下得到的,是一种理想状态,和实际有很大差距。从图6可以看出,传输信号经3 dB耦合器 $DC_1$ 分束后,两束等幅的光信号分别进入MZI的上下干涉臂中传输,上干涉臂中的部分传输信号要多次经过光纤谐振环传输后进入耦合器 $DC_4$ 的上输入端口,而下干涉臂中的传输信号直接传输到耦合器 $DC_4$ 下输入端口。可以看出,与下干涉臂中直接传输的传输信号相比,上干涉臂中的传输信号分为直接传输和经过光纤谐振环传输两部分,经光纤谐振环传输的信号其光程和时延呈现累加效应,随着循环的次数增加,光程差和时延也随之增大。正是由于光纤谐振环会产生累加的时延和光程差,因此对光纤谐振环的长度有着严格的限制<sup>[14]</sup>。

另外,当存在传输损耗时,损耗也会随之增加。由于光纤谐振环的存在,组成光纤谐振环的光纤不可避免地会出现弯曲,光纤弯曲就会增大传输损耗。显然,当存在传输损耗时,上干涉臂中经过光纤谐振环传输信号的幅度要比下臂中直接传输信号的幅度衰减厉害,当这两束相干光信号到达耦合器 $DC_4$ 时,其幅度和时延有明显的差异。由干涉原理可知,当互相干涉的两束光信号存在幅度差异时,势必造成梳状滤波器输出光谱消光特性恶化,导致密集波分复用信道间的串话干扰大大增加。

文献[15]的研究结果表明,在实际使用这种不对称结构的光纤谐振环辅助MZI型梳状滤波器的过程中,除非采取有源的方式对传输损耗进行补偿,否则在损耗的作用下,谐振环的幅度响应将表现出

波长依赖性。当 $\tau \leq 0.6$ 时,阻带抑制将低于20 dB,导致梳状滤波器输出信道间隔度明显降低;当归一化损耗 $\tau \approx 0.4$ 时,谐振波长处的输出功率甚至降至为0。

为了分析传输损耗对实验中设计的对称型全光纤梳状滤波器输出性能的影响,取不同的归一化损耗 $\tau$ 值进行模拟计算。图7是分别取 $\tau = 0.9$ 、 $\tau = 0.6$ 和 $\tau = 0.4$ 时的输出光谱图。结果显示,在这三种情况下,和没有考虑损耗的图4计算结果相比,下降的值分别为0.09、0.42、0.64 dB,虽然峰值均产生下降,但阻带抑制均大于30 dB。

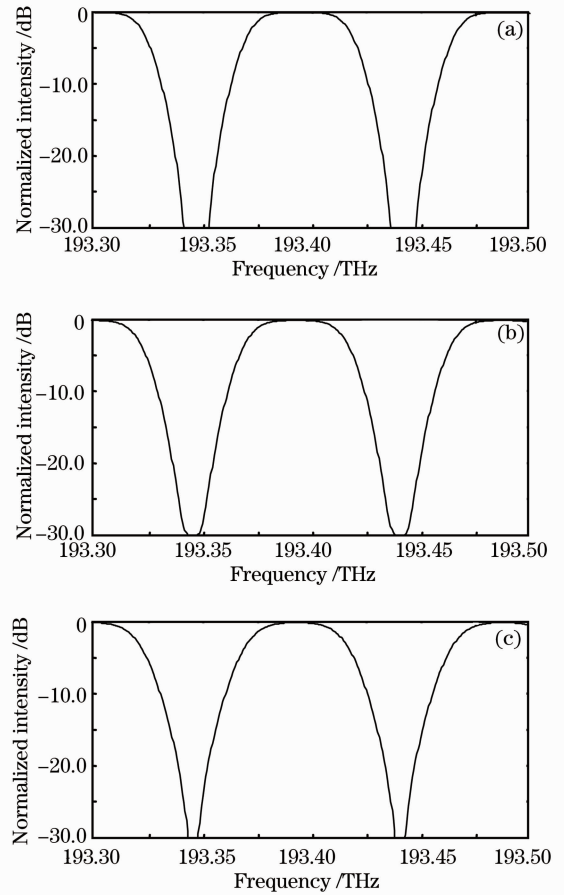


图7 取(a)  $k = \pi/2.8$ ,  $\tau = 0.9$ , (b)  $k = \pi/3$ ,  $\tau = 0.6$ , (c)  $k = \pi/3.1$ ,  $\tau = 0.4$ 时,传输损耗对梳状滤波器消光特性的影响

Fig. 7 Influence of transmission loss on extinction ratio of proposed interleaver with (a)  $k = \pi/2.8$ ,  $\tau = 0.9$ , (b)  $k = \pi/3$ ,  $\tau = 0.6$  and (c)  $k = \pi/3.1$ ,  $\tau = 0.4$

从这里可以看出,和传统的基于不对称结构的光纤谐振环辅助MZI型梳状滤波器比较,这种基于对称结构的光纤谐振环辅助MZI型梳状滤波器具有明显的优势。另外,在结构上也更加简洁,图6所示的梳状滤波器需要4个光纤耦合器,文献[3]提供

的最简单的透射型梳状滤波器需要 5 个光纤耦合器,而实验中设计的新结构梳状滤波器只需要 3 个光纤耦合器。

## 4 结 论

在深入研究耦合角和传输损耗对环形谐振环幅度和相位时延影响的基础上,利用谐振环反馈回路对光信号引入的相位调节,实现了梳状滤波器滤波通带响应的平坦和过渡带滚降特性的加强。另外,分析了传输损耗对梳状滤波器性能的影响,分析结果表明,和不对称光纤谐振环辅助 MZI 型梳状滤波器相比,在考虑信号的传输损耗情况时,两束互相干涉的信号在幅度上无明显差异,有效降低了传输损耗对梳状滤波器消光特性的影响,使其在未来密集波分复用系统中发挥重要的作用。

## 参 考 文 献

- M. Oguma, K. Jinguji, T. Kitoh *et al.*. Flat passband interleaver filter with 200 GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(15): 1299~1300
- Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu. A tunable interleaver filter based on analog birefringent units[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**(4-6): 283~294
- Xu Ou, Lu Shaohua, Dong Xiaowei *et al.*. Properties analysis for reflection-type filter composed of microring resonator array and Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1443~1446  
许 鸥, 鲁韶华, 董小伟 等. 基于微环谐振阵列与马赫-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
- Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Narrow bandwidth add-drop channel filter based on fiber-Bragg-grating-coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 621~625  
董小伟, 裴 丽, 简水生. 光纤布拉格光栅耦合器型窄带上下话路滤波器的数值分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 621~625
- Qing Ye, Ronghui Qu, Zujie Fang. Generation of millimeter-wave sub-carrier optical pulse by using a Fabry-Perot interferometer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 8~10
- Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua *et al.*. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1695~1699  
张文富, 方 强, 程益华 等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1695~1699
- Lu Huaiwei, Zhang Baoge, Wu Kaijun *et al.*. Design of all-fiber interleaver with unequal passband based on cascaded Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2406~2411  
鲁怀伟, 章宝歌, 邬开俊 等. 级联马赫-曾德尔干涉仪型不等带宽交错滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2406~2411
- Lu Huaiwei, Wei Yun, Wu Kaijun *et al.*. Design of all-fiber asymmetric interleaver with  $2 \times 2$  and  $3 \times 3$  fiber couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1106002  
鲁怀伟, 魏 贲, 邬开俊 等. 基于  $3 \times 3$  和  $2 \times 2$  光纤耦合器的全光纤不等带宽梳状滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1106002
- Wang Xiulin, Zhang Yu, Huang Wencai *et al.*. Novel transmissive Gires-Tournois interleaver based on composite coupler and its dispersion compensation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 070602  
王秀琳, 张 宇, 黄文财 等. 基于复合型耦合器的新型透射式 GT 交错复用器及色散补偿[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(7): 070602
- R. J. Orazi, T. T. Vu, M. N. McLandrich *et al.*. Cascaded narrow channel fused fiber wavelength division multiplexers[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(4): 368~370
- S. W. Kok, Y. Zhang, C. Y. Wen *et al.*. Design of all fiber optical interleavers with a given specification on passband ripples [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**(1-6): 241~248
- M. Kuznetsov. Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filters for wavelength-division multiplexed optical systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(2): 226~230
- Zhang Jianing, Han Xiuyou, Song Hongyan *et al.*. Study on time delay characteristics of integrated waveguide microring resonator with tunable coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2098~2103  
张佳宁, 韩秀友, 宋红妍 等. 可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2098~2103
- Zhou Guang, Zhao Chunliu, Huang Yonglin *et al.*. Improvement of the capability of nonsymmetrical Mach-Zehnder interferometric interleaver using fiber loop [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 702~705  
周 广, 赵春柳, 黄勇林 等. 光纤环对非平衡马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器性能的改善[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 702~705
- Dong Xiaowei, 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. 环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 638~642
- Li Weibin, Sun Junqiang. Analysis of characteristics of the interleaver based on a double-coupler resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1191~1194  
李卫彬, 孙军强. 一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1191~1194

栏目编辑: 王晓球