

文章编号 1004-924X(2010)07-1483-08

全光纤 MZI 型三信道波长交错滤波器的改进

任恩恩¹, 鲁彦², 鲁怀伟¹, 罗冠炜¹

- (1. 兰州交通大学 数理与软件工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 西南交通大学 峨眉校区电气工程系, 四川 峨眉 614202)

摘要:为改善全光纤三信道波长交错器的输出特性,提出了一种不对称结构的三光纤臂 Mach-Zehnder 干涉仪(A-MZI),这种光纤干涉仪由一个一字型 3×3 单模光纤耦合器和一个品字型 3×3 单模光纤耦合器以及三条光纤干涉臂组成,其中一字型 3×3 单模光纤耦合器作为输入耦合器,品字型 3×3 单模光纤耦合器作为输出耦合器。推导了该器件的输出表达式,并进行了数值模拟。模拟结果表明,与常规的全光纤 MZI 型三信道波长交错器(C-MZI)相比,本文提出的交错滤波器的信道间功率旁瓣降低了约 13.6 dB,并且具有对器件参数偏差 insensitive 等优点。用光纤熔融拉锥法实验制作了该器件,实验结果与理论分析吻合得很好,实验样品的信道间功率旁瓣值 < -34.6 dB,插入损耗 < 1.0 dB,信道隔离度 > 30 dB。

关键词: 光纤光学; 光纤耦合器; 交错滤波器; Mach-Zehnder 干涉仪; 波分复用

中图分类号: TN256; TN713 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1483

Improvement of all-fiber three-channel interleaver based on Mach-Zehnder interferometer

REN En-en¹, LU Yan², LU Huai-wei¹, LUO Guan-wei¹

- (1. School of Mathematics, Physics & Software Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Department of Electrical Engineering, Emei Campus, Southwest Jiaotong University, Emei 614202, China)

Abstract: In order to improve the transmission performance of the all-fiber three-channel interleaver, a novel asymmetrical structure of a Mach-Zehnder interferometer(A-MZI) with three fiber arms is proposed. The A-MZI consists of a fused planar 3×3 coupler, a fused triangular 3×3 single mode fiber coupler and three fiber arms in series, in which the planar 3×3 coupler is used as an input coupler, and the triangular 3×3 coupler as an output coupler. The output expression is derived and the numerical simulation is performed. The simulation indicates that the crosstalk characteristics and the coupling-coefficient-angle tolerance can be improved greatly, and the sidelobe level of channel of the proposed device has been reduced more than 13.6 dB as compared with that of the conventional all-fiber three-channel interleaver. A interleaver is fabricated with the fused biconical taper technics in an experiment. The experimental results are in good agreement with the analytical ones. The result shows that the measured sidelobe level and the insertion loss are less than -34.6 dB and 1.0 dB, respectively,

收稿日期:2010-03-20; 修订日期:2010-06-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10972095); 甘肃省自然科学基金资助项目(No. 0803RJ ZA027)

and the channel isolation is higher than 30 dB.

Key words: fiber optics; fiber coupler; interleaver; Mach-Zehnder interferometer; wavelength-division-multiplexing

1 引言

波分复用技术是光纤通信中增加通信容量的一种重要技术手段。近年来,密集波分复用技术的提出和应用,使光纤网的通信容量得到了很大的提高,同时开拓了许多单波长通信所完全不能有的功能,为网络的设计提供了极大的灵活性。波长交错滤波器作为波分复用技术中的关键器件之一,近年来也取得了很大的进展,人们提出了各种各样的技术方案^[1-4]。在众多方案中,全光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型波长交错器以其插入损耗小,与光纤的兼容性好,具有梳状滤波特性等优点,在光纤通信波分复用系统中有着重要的应用价值。在实现多于 2 个信道数的波分复用功能时,利用二光纤臂 MZI 须多级级联 MZI 实现,而利用三光纤臂 MZI 可以减少级联 MZI 的数目,在工艺和结构上比用二光纤臂 MZI 级联组成的器件更简单。目前传统的全光纤 MZI 型三信道波长交错器(Conventional Three-Channel MZI, C-MZI)^[5-7]大都是对称结构,输入输出耦合器均采用品字型 3×3 单模光纤耦合器组成。C-MZI 型波长交错滤波器输出端口信道间的旁瓣值比较大,该值的大小直接和串扰有关,尤其是当耦合器的分光比偏离理想值时,信道间的旁瓣值就会明显增高,直接影响 C-MZI 型波长交错滤波器的实用价值。

在光波分复用系统当中,当波长交错滤波器用于上下路复用解复用器时,信道间的串扰大小对上下路波长隔离度等因素的影响极为重要,如何降低波长交错滤波器的串扰成为亟待解决的课题。本文提出了一种不对称结构的三光纤臂 MZI(Asymmetrical Structure of Three-Channel MZI, A-MZI) 型波长交错滤波器,相对 C-MZI 而言,其信道间功率旁瓣被大大消弱,串扰特性和信道隔离度得到了改善;当耦合器分光比偏离理想值时,A-MZI 对输出光谱的影响也比 C-MZI 小。

2 原理

A-MZI 型波长交错滤波器如图 1 所示。它是在 3 条相同的单模光纤上连续熔拉 2 个 3×3 单模光纤耦合器 DC₁ 和 DC₂ 而成,其中 DC₁ 是一字型 3×3 耦合器,DC₂ 是品字型 3×3 耦合器。和传统 C-MZI 不同之处就是用一字型 3×3 耦合器替换品字型 3×3 耦合器作为三光纤臂 MZI 的输入耦合器。

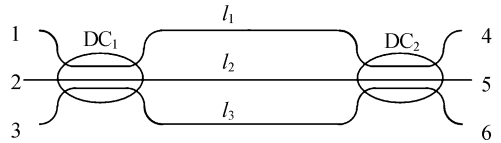


图 1 三干涉臂 M-Z 干涉仪结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber Mach-Zehnder Interferometer with three arms

假设输入光场 E^{in} ($E_1^{\text{in}} = 0, E_2^{\text{in}} = 0, E_3^{\text{in}} = E^{\text{in}}$) 从耦合器 DC₁ 的输入端口 3 输入,输入光场 E^{in} 经耦合器 DC₁ 分别传输到光纤 l_1, l_2 和 l_3 ,由光纤 l_1, l_2 和 l_3 再传输到耦合器 DC₂,3 束光在 DC₂ 中产生干涉。设端口 4~6 的归一化输出光强分别为 $T_j(\theta_1, \theta_2)$ ($= |E_j^{\text{out}}|^2 / |E^{\text{in}}|^2, j=4, 5, 6$),根据 MZI 的传输特性,可以推导出 $T_j(\theta_1, \theta_2)$ 的表达式为^[8-10]:

$$\begin{cases} T_4(\theta_1, \theta_2) = a_1 \sin(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_2) + \\ \quad a_4 \sin(\theta_2 + \theta_1) + a_5 \cos(\theta_2 + \theta_1) + a_6 \\ T_5(\theta_1, \theta_2) = b_1 \sin(\theta_1) + b_2 \cos(\theta_1) + b_3 \sin(\theta_2) + \\ \quad b_4 \cos(\theta_2) + b_5 \cos(\theta_2 + \theta_1) + b_6 \\ T_6(\theta_1, \theta_2) = c_1 \sin(\theta_1) + c_2 \cos(\theta_1) + c_3 \sin(\theta_2) + \\ \quad c_4 \sin(\theta_2 + \theta_1) + c_5 \cos(\theta_2 + \theta_1) + c_6 \end{cases}, \quad (1)$$

式(1)中 $a_1 \sim a_6, b_1 \sim b_6$ 和 $c_1 \sim c_6$ 分别为:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{8B_2B_3}{9} \sin^2\left(\frac{3k_P}{4}\right), a_2 = \frac{4B_1B_2}{9} \sin^2\left(\frac{3k_P}{4}\right), \\ a_3 &= \frac{-2B_1B_2}{3} \sin\left(\frac{3k_P}{4}\right), a_4 = \frac{2B_1B_3}{3} \sin\left(\frac{3k_P}{2}\right), \\ a_5 &= \frac{-4B_1B_3}{9} \sin^2\left(\frac{3k_P}{4}\right), a_6 = B_1^2 |A_1|^2 + (B_3^2 + B_2^2) |A_2|^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{-4B_3B_2}{9} \sin^2\left(\frac{3k_P}{4}\right), b_2 = \frac{-2B_3B_2}{3} \sin\left(\frac{3k_P}{2}\right), \\
 b_3 &= \frac{4B_1B_2}{9} \sin^2\left(\frac{3k_P}{4}\right), b_4 = \frac{2B_1B_2}{3} \sin^2\left(\frac{3k_P}{2}\right), \\
 b_5 &= \frac{8B_1B_3}{9} \sin^2\left(\frac{3k_P}{4}\right), b_6 = B_2^2 |A_1|^2 + (B_3^2 + B_1^2) |A_2|^2, \\
 c_1 &= \frac{-4B_3B_2}{9} \sin^2\left(\frac{3k_P}{4}\right), c_2 = \frac{2B_3B_2}{3} \sin\left(\frac{3k_P}{2}\right), \\
 c_3 &= \frac{-8B_1B_2}{9} \sin^2\left(\frac{3k_P}{4}\right), c_4 = \frac{-2B_1B_2}{3} \sin\left(\frac{3k_P}{2}\right), \\
 c_5 &= \frac{-4B_1B_3}{9} \sin^2\left(\frac{3k_P}{4}\right), c_6 = B_3^2 |A_1|^2 + (B_3^2 + B_1^2) |A_2|^2.
 \end{aligned}$$

其中: $A_1 = [\exp(-ik_P) + 2\exp(-ik_P/2)]/3$, $A_2 = [\exp(-ik_P) - \exp(-ik_P/2)]/3$, $B_1 = \cos^2(k_L/2)$, $B_2 = \sin(k_L/2)/2^{1/2}$, $B_3 = -\sin^2(k_L/2)$, $B_4 = \cos(k_L)$; k_L 和 k_P 分别是一字型 3×3 耦合器和品字型 3×3 耦合器的耦合系数与有效耦合长度的乘积; $\theta_1 = \beta(l_2 - l_1) = \beta\Delta l_1$, $\theta_2 = \beta(l_3 - l_2) = \beta\Delta l_2$, $\theta_3 = \beta(l_3 - l_1) = \beta(l_3 - l_2) + \beta(l_2 - l_1) = \theta_2 + \theta_1$ 。很显然, T_4 、 T_5 、 T_6 之和满足能量守恒, 即

$$T_4(\theta_1, \theta_2) + T_5(\theta_1, \theta_2) + T_6(\theta_1, \theta_2) = 1, \quad (2)$$

$$\begin{cases}
 T_4(\theta) = \frac{1}{3} - \frac{\sqrt{2}\sin(k_L)\sin(\theta)}{3} - \frac{\sin^2(k_L)\cos(2\theta)}{6} \\
 T_5(\theta) = \frac{1}{3} - \frac{\sqrt{2}\sin(k_L)\sin(\theta + \frac{\pi}{3})}{3} - \frac{\sin^2(k_L)\cos(2\theta - \frac{\pi}{3})}{6} \\
 T_6(\theta) = \frac{1}{3} - \frac{\sqrt{2}\sin(k_L)\sin(\theta - \frac{\pi}{3})}{3} - \frac{\sin^2(k_L)\cos(2\theta + \frac{\pi}{3})}{6}
 \end{cases}, \quad (4)$$

由于 3 个输出通道具有相同的输出波形, 简单起见, 只对式(4)中的 $T_4(\theta)$ 进行分析。从式(4)中看出: 当 $\theta = -\pi/2$ 时, $T_4(\theta)$ 有极大值 T_{\max} ; 当 $\theta = -\pi/2 + \pi$ 时, $T_4(\theta)$ 有次极大值 $T_{\text{hypo-max}}$ 。

$$\begin{cases}
 T_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sin(k_L) + \frac{1}{6} \sin^2(k_L) + \frac{1}{3} \\
 T_{\text{hypo-max}} = -\frac{\sqrt{2}}{3} \sin(k_L) + \frac{1}{6} \sin^2(k_L) + \frac{1}{3}
 \end{cases}, \quad (5)$$

波长交错滤波器信道之间的功率旁瓣会产生串扰, 严重限制了波长交错滤波器的使用。在一定意义上, 次最大值 $T_{\text{hypo-max}}$ 反映了信道之间的功率旁瓣的大小, 通过求 $\max\{T_{\max} - T_{\text{hypo-max}}\}$ 可以得到信道间的最小功率旁瓣

$$T_{\max} - T_{\text{hypo-max}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin(k_L), \quad (6)$$

3 器件最佳参数的确定

一个理想的三光纤臂 MZI 型波长交错滤波器在输出端口应该具有相同的输出波形, 从公式(2)可以看出, 参数 $a_1 \sim a_6$ 、 $b_1 \sim b_6$ 和 $c_1 \sim c_6$ 是输入耦合器 k_L 和输出耦合器 k_P 的函数, 所以可以归结为确定最佳输入和输出耦合器的分光比, 而 θ_1 和 θ_2 是干涉臂长差的函数, 因此器件的设计就可以归结为确定耦合器的分光比和干涉臂长差的取值。

三光纤臂 MZI 型波长交错滤波器在输出端口具有相同输出波形, 这就要求输出波形 $T_i(\theta_1, \theta_2)$ 必须满足下列条件:

$$T_4(\theta_1, \theta_2) = T_5(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}, \theta_2 + \frac{2\pi}{3}) = T_6(\theta_1 + \frac{4\pi}{3}, \theta_2 + \frac{4\pi}{3}), \quad (3)$$

经过简单的推导计算得出, 只有当 $k_P = 8\pi/9$ 时, 式(3)成立。将 $k_P = 8\pi/9$, $\theta_1 = \theta$ 和 $\theta_2 = \theta + 2\pi/3$ 代入式(1), 式(1)可简化为:

显然当 $k_L = \pi/2$ 时, $\max\{T_{\max} - T_{\text{hypo-max}}\}$ 有最大值。经过上述分析, 得到了 A-MZI 型波长交错滤波器的最佳设计参数, 输入耦合器 DC_1 、输出耦合器 DC_2 的耦合系数与有效耦合长度的乘积以及干涉臂的传输位相差分别为 $k_L = \pi/2$ 、 $k_P = 8\pi/9$, $\theta_2(\lambda) = \theta_1(\lambda) + 2\pi/3 = \theta(\lambda) + 2\pi/3$ 和 $\theta_3(\lambda) = 2\theta(\lambda) + 2\pi/3$ 。

设输入光场为 $E^{\text{in}}(\lambda)$, $E^{\text{in}}(\lambda)$ 从器件端口 3 输入, 端口 1 和端口 2 无输入光场。在数值模拟分析中, 取光纤的纤芯折射率 $n = 1.457$, 传输中心波长 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$, 耦合器 DC_1 和 DC_2 的耦合系数与有效耦合长度的乘积分别取为 $k_L = \pi/2$ 和 $k_P = 8\pi/9$ 。取 $\theta_2(\lambda) = \theta_1(\lambda) + 2\pi/3 = \theta(\lambda) + 2\pi/3$, $\theta_3(\lambda) = \theta_2(\lambda) + \theta_1(\lambda) = 2\theta(\lambda) + 2\pi/3$, 光纤干涉

臂长差 $\Delta l=1$ mm。在图中,实线、虚线和点划线分别代表端口 4、5 和 6 光功率曲线。

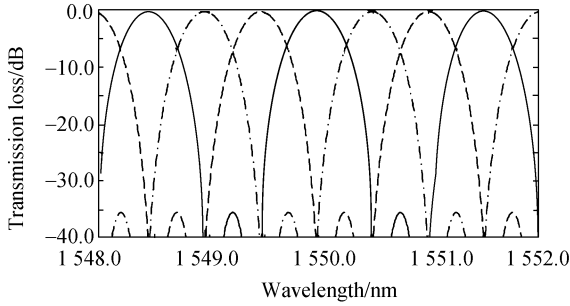


图 2 $k_L = \pi/2, k_P = 8\pi/9$ 时, A-MZI 的计算结果
Fig. 2 Calculation results of A-MZI with $k_L = \pi/2$ and $k_P = 8\pi/9$

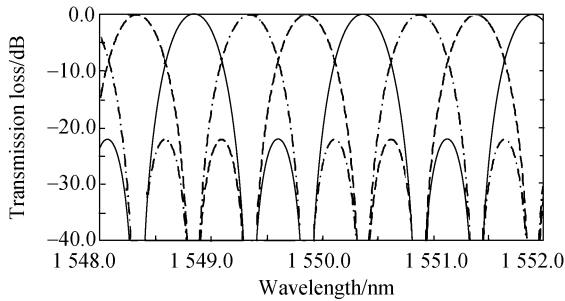


图 3 $k_{in} = 8\pi/9, k_{out} = 8\pi/9$ 时, C-MZI 的计算结果
Fig. 3 Calculation results of C-MZI with $k_{in} = 8\pi/9$ and $k_{out} = 8\pi/9$

在 C-MZI 型波长交错滤波器设计中,实现最佳输出性能的条件是两个耦合器都是品字型 3×3 耦合器,并且其分光比都为 $1:1:1$,也就是说两个耦合器的耦合系数与有效耦合长度的乘积应该为 $k_{in} = k_{out} = 8\pi/9$ (k_{in} 和 k_{out} 分别为其输入和输出耦合器耦合系数与有效耦合长度的乘积)。作为对比,根据文献[5-6]的理论分析, C-MZI 型滤波器的计算结果显示在图 3 中。在图 3 的计算中,分别取 k_{in} 和 k_{out} 为最佳值 $8\pi/9$ [5-6]。从图 2 和图 3 的比较结果可以看出,图 2 中的信道间的旁瓣峰值比图 3 下降了约 13.6 dB。

4 耦合比的影响

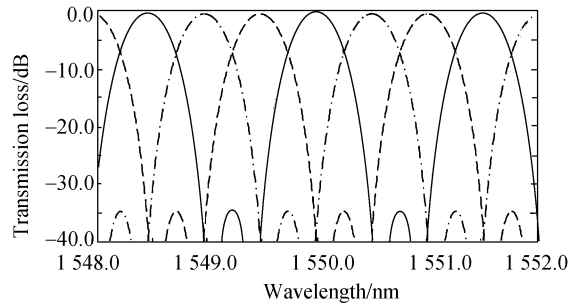
在实际制作过程中,由于光纤熔接会引入波导不连续性,对光纤插损和光波偏振态产生不可预期的影响,因此必须对耦合器采用连续熔融拉锥的方法。现有的光纤熔锥技术已经很完善,第

一个耦合器的分束比可以精确地控制在所需要的分光比,误差对干涉仪耦合干涉造成的影响可忽略。但是在第二个耦合器控制过程中由于监视光会产生干涉效应,因此不能通过监视输出光功率来控制分光比,所以其分束比较难控制,一般只能凭经验控制。

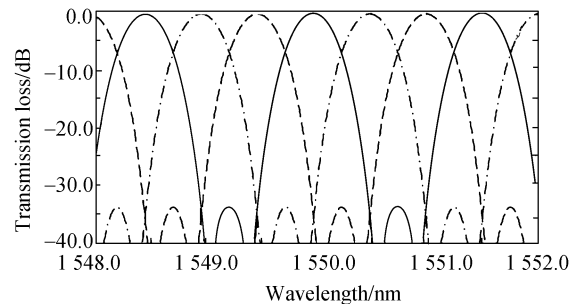
为了讨论简单起见,这里不考虑输入耦合器和输出耦合器的分光比同时出现误差的情况,只讨论其单独发生偏差对 A-MZI 和 C-MZI 输出光谱的影响。对输入耦合器和输出耦合器的分光比偏离最佳条件的情况进行了模拟计算,分别设 $k_L = \pi/2 \pm \Delta\varphi, k_{in} = 8\pi/9 \pm \Delta\varphi, k_P = 8\pi/9 \pm \Delta\varphi, k_{out} = 8\pi/9 \pm \Delta\varphi, \Delta\varphi$ 代表偏离最佳耦合器耦合系数与有效耦合长度乘积的误差值,模拟计算的结果如图 4~7 所示。

图 4 和图 5 是 $\Delta\varphi$ 引入到输入耦合器的计算结果,图 6 和图 7 是 $\Delta\varphi$ 引入到输出耦合器的计算结果。其中图 4 和图 6 针对 A-MZI,而图 5 和图 7 针对 C-MZI。

可以看出图 4 所示的信道间的功率旁瓣峰值在 -35 dB 左右,和图 2 相比,图 4 在旁瓣峰值、通道隔离度以及输出波形等方面劣化不大。



(a) $k_L = \pi/2 + \pi/18, k_P = 8\pi/9$



(b) $k_L = \pi/2 - \pi/12, k_P = 8\pi/9$

图 4 A-MZI 的计算结果

Fig. 4 Calculation results of A-MZI

图 5(a)中所示的信道间的功率旁瓣峰值增加了不少, 信道间的功率旁瓣已经接近 -12.5 dB。图 5(b)中虽然光功率旁瓣峰值低于 -40 dB, 但通道峰值有所下降, 另外 25 dB 截止带宽度明显变窄, 信道隔离度减小。

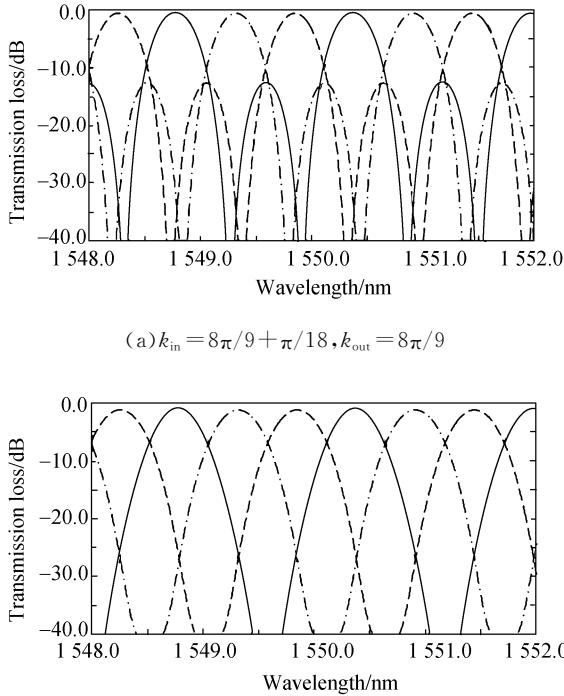


图 5 C-MZI 的计算结果
Fig. 5 Calculation results of C-MZI

从图 4 和图 5 的比较结果看出, 当输入耦合器分光偏离最佳值时, C-MZI 型波长交错滤波器的输出波形的变化明显比 A-MZI 型波长交错滤波器的输出波形严重。

图 6 和图 7 中分别取 $\Delta\varphi = \pm\pi/18$ 。从图 6 和图 7 中的数值计算结果可以很明显地看出, 图 7 所示的信道间的功率旁瓣峰值明显高于图 6。另外, 无论是 A-MZI 型波长交错滤波器还是传统的 C-MZI 型波长交错滤波器, 当输出耦合器的分光比偏离最佳值时, 3 个输出端口的波形不再具有相同性和对称性。

对于全光纤 MZI 干涉仪来说, 输入耦合器起到了光功率的分配作用, 而输出耦合器起产生多光束干涉作用。综合比较图 4~图 7 表明, 输出耦合器分光比率的偏差对器件输出谱的影响明显高于输入耦合器分光比率的偏差, 因此对三光纤臂 MZI 型波长交错滤波器而言, 输出耦合器分

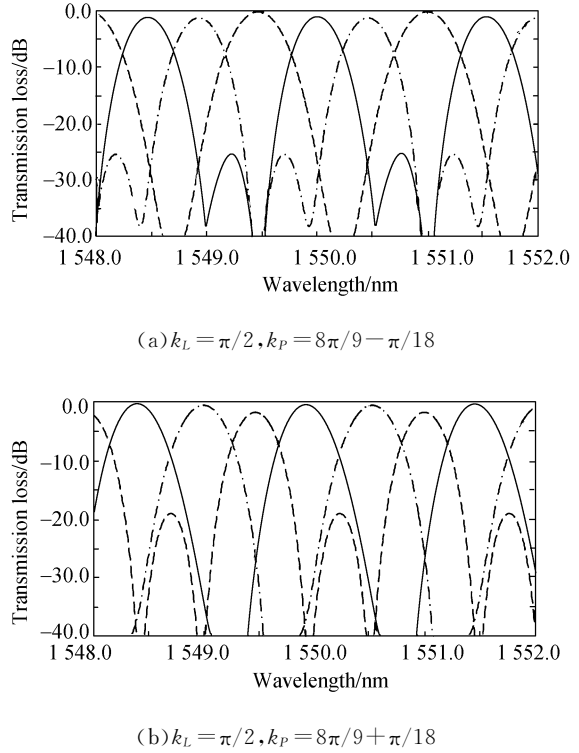


图 6 A-MZI 的计算结果
Fig. 6 Calculation results of A-MZI

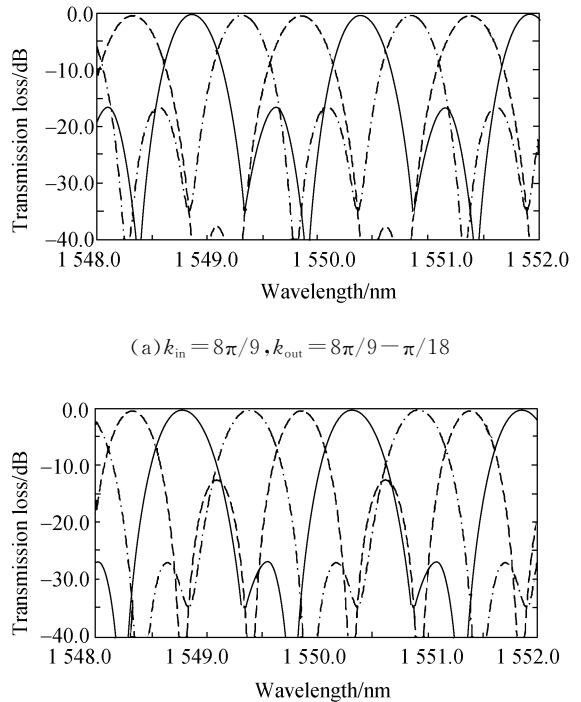


图 7 C-MZI 的计算结果
Fig. 7 Calculation results of C-MZI

光比的精确性显得更为重要, 需要更精确地控制。

5 实验及其结果

全光纤 MZI 型波长交错滤波器的制作有两个关键技术,其一是光纤方向耦合器的分光比的控制,其二是光纤干涉臂长差的控制。如前文所述,光纤 MZI 在制作过程中,第一个光纤方向耦合器的分光比容易控制,但在熔拉第二个耦合器时只能凭经验熔拉。

根据上面的分析结果,为了保证输出光谱在 3 个输出端口有相同的光谱,应确保输出耦合器分光比的准确度,输出光纤耦合器分光比应该尽量接近理想值 1:1:1。为了达到精确控制其分光比的目的,制作全光纤三干涉臂 MZI 的第一步是制作输出耦合器 DC₂。在实验中,采用标准的单模光纤,用高温 H₂-O₂ 焰对光纤进行熔融拉锥来制作耦合器 DC₁ 和 DC₂, H₂-O₂ 焰的宽度约为 6 mm。监测光源是中心波长为 1 550 nm 的半导体激光器。在熔融拉锥 DC₂ 的过程中,在任意一输入端口输入检测光,在输出端口用光功率计对输出光功率进行测量,当输出端口的光功率达到预定值时立即停止熔拉。在制作好分束比为 1:1:1 的 3×3 耦合器 DC₂ 以后,参照文献[5-6]的方法,对 3 个光纤干涉臂 l_1 , l_2 和 l_3 进行初步设置,将其 3 个输出端口的光纤臂 l_1 , l_2 和 l_3 紧密呈一平面地沿圆型薄片绕一角度 α , 其中间一根光纤臂 l_2 比内圈光纤臂长 l_1 长 Δl , 使外圈的光纤臂 l_3 比中间一根光纤臂 l_2 长 Δl 。然后对输入光纤耦合器 DC₁ 进行熔融拉锥,由于光的干涉效应,DC₁ 的熔融拉锥无法利用监视光实时控制分光比,只能凭经验熔融拉锥。整个融拉过程采用计算机进行控制,拉伸速度为 120 $\mu\text{m/s}$ 。

在输入输出光纤耦合器熔融拉锥完毕后,对 3 个光纤干涉臂 l_1 , l_2 和 l_3 进行精密微调,通过改变干涉臂长差使光谱相位差发生变化^[10]。通常的方法是用紫外光照射干涉仪的干涉臂,或对其中的干涉臂局部加热,或将其粘在压电陶瓷(PZT)上拉伸,由此很容易实现大于 π 的相位移动。本实验是将干涉臂粘贴在 PZT 上,利用 PZT 的伸缩特性改变臂长差。利用谱线在 C 波段高平坦的稳定掺 Er 光纤(EDF)超荧光光纤光源作为输入光源,取实验样品输入耦合器两侧任意端口作为输入端口,用光谱分析仪在实验样品输出

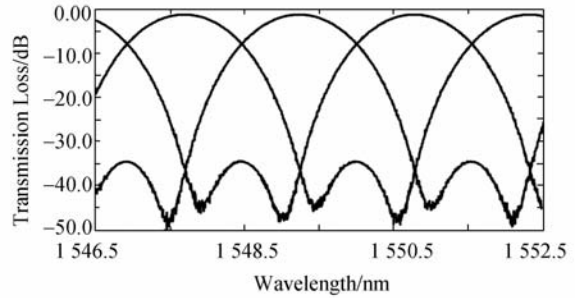


图 8 实验品输出光谱的测量值

Fig. 8 Measured power transmission for three output channels of obtained device

端口观察输出图案。通过调节 PZT 上驱动电压的方法改变光纤臂长差,同时在光谱分析仪中观察输出图案,直到理想的输出图案出现。此过程中还发现器件的输出稳定性受外界的气流、震动等因素影响比较大,因此,设计了一个恒温密封装置,将实验品密封以减少外界干扰。

对制作的实验品进行了性能测试。光源采用 Santec 公司生产的 TSL2210 型波长可调谐激光器,调谐波长为 1 540~1 560 nm,从输入耦合器的输入端口 1 输入一线偏振光,在 3 个输出端口分别用自行研制开发的光功率数据采集器获取输出信号,光功率数据采集器直接和计算机连接,图 8 所示为实验样品的测试结果。比较图 2 和图 8 可以看出,图 8 的实验谱线和图 2 的理论谱线非常接近。图 8 的信道间的功率旁瓣峰值和图 2 的相比略显的有点高,原因在于输入耦合器的分光比存在误差。图 8 中实验谱线峰值之间的波长间隔约为 1.6 nm,3 个输出谱线具有相同的波形,信道间的功率旁瓣峰值约为 -34.6 dB,信道隔离度 > 30 dB,插入损耗 < 1 dB。

6 结 论

本文对由一字型 3×3 单模光纤耦合器和品字型 3×3 单模光纤耦合器组成的 A-MZI 型波长交错滤波器进行了理论分析和实验研究,理论分析和实验结果都表明:A-MZI 型输出信道间的功率旁瓣峰值明显低于 C-MZI 型,在两者结构参数都为最佳值时,前者的信道间功率旁瓣峰值比后者约低 13.6 dB;尤其是耦合器的分光比偏离最佳值时,A-MZI 型的输出特性明显优于 C-MZI 型,这为全光纤 MZI 型三信道波长交错滤波器的

实际制作提供了方便。另外当组成全光纤 MZI 型三信道波长交错滤波器的两个耦合器的分光比偏离最佳值时,无论 A-MZI 型或 C-MZI 型,其输出耦合器分光比的偏差对器件输出特性的影响都

比较大,因此,在实际制作过程中,精密控制输出耦合器的分光比是制作全光纤 MZI 型三信道波长交错滤波器输出的关键步骤,应该先拉制输出耦合器以保证其分光比的精度。

参考文献:

- [1] LU S, YAN Y B, JIN G F. A novel DWDM interleaver scheme based on phased-array wavelength demultiplexer with multimode interference couplers [J]. *Chinese Opt. Lett.*, 2004, 2(6): 314-315.
- [2] LU H W, ZHANG Y E, LUO G W. Study of all-fiber flat-top passband interleaver based on 2×2 and 3×3 fiber couplers [J]. *Opt. Commun.*, 2007, 276: 116-121.
- [3] CAO S, LIN C, YANG C, *et al.*. Gires-Tournois interferometer (BGTD) for DWDM interleaving [C]. *in Proc. OFC, Anaheim, CA*, 2002: 395-396.
- [4] LU H W, ZHANG B G, LI M Z, *et al.*. A novel all-fiber optical interleaver with flat-top passband [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, 18: 1469-1471.
- [5] 姚寿铨, 王子华. 用三干涉臂马赫-曾德尔干涉仪制成的光纤密集型波分复用器 [J]. *光学学报*, 2000, 20(7): 952-956.
- YAO S Q, WANG Z H. A dense-wavelength-division-multiplexer by using a three arm mach-zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica.*, 2000, 20(7): 952-956.
- [6] YAO S, WANG Z H. Theoretical analysis and experiment of 3 arm interferometric DWDM [J]. *Acta Photonica Sinica.*, 2000, 29(4): 339-343.
- [7] WEIHS G, RECK M, WEINFURTER H, *et al.*. All-fiber three-path Mach-Zehnder interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(4): 302-304.
- [8] 潘炜, 邹龙方, 罗斌, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪的全光逻辑异或门理论研究 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3): 339-347.
- PAN W, ZOU L F, LUO B, *et al.*. Theoretical study of all optical XOR using Mach-Zehnder interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 339-347. (in Chinese)
- [9] 鲁怀伟, 张玉斌, 罗冠炜. 基于 2×2 和 3×3 耦合器的级联马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 339-347.
- LU H W, ZHANG Y E, LUO G W.. Flat-top interleaver of cascaded M-Z interferometer with 2×2 and 3×3 fiber couplers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 339-347. (in Chinese)
- [10] WANG Q J, ZHANG Y, SON Y C. All-Fiber 3×3 Interleaver design with flat-top passband [J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 2004, 16(1): 168-170.

作者简介:



任恩恩(1955-),男,陕西周至人,教授,博士生导师,1982年于西南交通大学获得学士学位,1988年至1989年在德国济根大学进修,主要从事光纤无源器件、光电控制等方面的研究。E-mail: renen@mail.lzjtu.cn



鲁彦(1988-),男,甘肃临夏人,西南交通大学峨眉校区电气工程系学生,主要从事光电控制、嵌入式软硬件设计以及实验等方面的工作。E-mail: luy-an1988515@gmail.com



鲁怀伟(1959—),男,甘肃天水人,教授,1982年于电子科技大学获得硕士学位,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



罗冠炜(1963—),男,湖南双峰人,教授,1998年于西南交通大学获得博士学位,主要从事智能控制等方面的研究。E-mail: luogw@mail.lzjtu.cn

●下期预告

主成分分析在光全散射特征波长选择中的应用

唐 红,郑文斌,李宪霞

(1. 中国计量学院 计量测试工程学院,杭州 浙江 310018;

2. 中国计量学院 信息工程学院,杭州 浙江 310018)

在光全散射法颗粒粒径测量中,被测颗粒系的每个波长下的消光值都不同程度地包含有颗粒系粒径、折射率等信息。如果选择波长时选用了粒径影响较小的波长,而遗漏了重要的波长,可能导致粒径分布的反演结果不准确。在可见及可见-红外波段内,对粒径服从单峰 R-R 分布颗粒系的消光光谱,一阶微分以及二阶微分消光光谱进行了主成分变换。通过分析比较,提出一种特征波长的选择方法。该方法首先对颗粒系的一阶微分消光光谱进行主成分变换,然后将每个波长下的一阶微分消光光谱对主成分贡献率的大小作为特征波长选择的主要依据,同时将光谱范围的边界波长也作为特征波长。文中分别对粒径服从单峰及双峰 R-R 分布的颗粒系进行数值仿真,并采用标准颗粒的实测数据进行验证。采用基于主成分分析的波长选择方法得到的标准颗粒粒径反演误差均小于 3%。该方法具有计算方便、易于实现等特点,采用这样的波长选择方法能够保证选出的光谱消光值具有较高的信息量。