

文章编号 1004-924X(2006)02-0145-06

基于双耦合器的平坦型全光纤波长交错滤波器

鲁怀伟^{1,2}, 章宝歌¹, 李敏芝², 罗冠炜²

(1. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 数理与软件工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:提出了由一个 3×3 单模光纤耦合器和一个 2×2 单模光纤耦合器级联组成的波长交错滤波器,给出了其基本结构形式。将 3×3 耦合器中的两边两个输出端口连接在一起,中间端口为反射回路,形成一个3阶级联反射式 Mach-Zehnder 干涉仪,利用傅里叶级数展开的方法对其输出特性进行了分析。分析结果表明:组成滤波器的两个耦合器分光比和干涉臂的臂长差取一些定值时,可得到输出波形通带平坦的波长交错滤波器,其输出稳定性和隔离度均得到了提高。与通常的3阶级联 Mach-Zehnder 干涉仪相比,耦合器数目减少,在实际制作时可以对耦合器的分光比和干涉臂臂长差进行准确监测和控制。

关键词:应用光学;梳状滤波器;Mach-Zehnder 干涉仪;波长交错滤波器;定向耦合器

中图分类号: TN253; TN929.11 **文献标识码:** A

All-fiber flat-top interleaver based on double single mode couplers

LU Huai-wei^{1,2}, ZHANG Bao-ge¹, LI Min-zhi², LUO Guan-wei²

(1. *Key Laboratory of Opto-electronic Technology and Intelligent Control of the Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China*; 2. *School of Mathematics, Physics & Software Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: The transmission function of a interleaver consisting of a 2×2 and 3×3 single mode fiber coupler in series was analyzed. Based on the Fourier series digital approximation method, the relationship among the splitting ratios of the couplers, the length difference of interference arms and intensity transmission spectrum was discussed. The results indicate that this configuration can achieve an approximate rectangular wavelength response when the length difference of interference arms and coupling coefficients of the couplers are given by a certain value in order, its stability and isolation is improved greatly. An advantage of this interleaver is that the coupling ratio of coupler and the proportion of the length differences can be controlled accurately because light interference effect can be sheered away in fabricating. A novel structure of interleaver is fabricated with fused biconical taper technics in experiment. The experiment results are in good agreement with the theoretical analysis.

Key words: applied optics; comb-filter; Mach-Zehnder interferometer; interleaver; directional coupler

收稿日期:2005-10-14;修订日期:2006-01-04.

基金项目:国家自然科学基金(No. 50475109,10572055)、兰州交通大学“青蓝”工程资助项目。

1 引言

Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI) 型波长交错滤波器以其结构简单、制作成本低、信道均匀性好、与系统兼容性强以及较低的偏振相关损耗和附加损耗等优点,在光纤通信波分复用系统中有着重要的应用价值。例如上下路复用解复用器、波长交错器 ((Interleaver)、声光滤波器、多波长光纤激光器等^[1-3],但是一般的 MZI 其带通形状为正弦型,如果在非平衡 MZI 的干涉臂中加入光纤环^[4],或者采用多次熔锥的方法形成多级 MZI 串联结构^[5],都可使得光学梳状滤波器透射率形态近似于方波。前者由于光纤环直径要求非常小,实际制作存在一定的困难。在实际制作多级串联 MZI 时,由于光的干涉作用,一般只能对第一个耦合器的分光比准确控制,其余耦合器的分光比由于光的干涉作用而无法监测和控制,只能凭经验去融拉,分光比难以准确控制。本文提出了由一个 2×2 耦合器和一个平行排列的 3×3 耦合器构建波长交错滤波器的新方法,理论分析和实验证明该器件不仅实现了透射谱近似为方波、边模抑制比较高的波长交错滤波器功能,而且在实际制作过程中可以对每个耦合器的分光比和干涉臂长差进行准确控制,克服了以往制作全光纤 MZI 型波长交错滤波器的不足。

2 原理

本文提出的全光纤型波长交错滤波器结构如图 1 所示,它主要由一个 2×2 耦合器 (DC₁) 和一个一字型的 3×3 耦合器 (DC₂) 以及一个光隔离器 (Isolator) 组成,其中 DC₂ 的 3 端口与光隔离器串接在一起,只让输入光进入耦合器 DC₂,阻止反射光反射到光源;耦合器 DC₂ 的输出端口 1' 和 3' 通过光纤 l_1 联接在一起形成环路,在端口 2' 引出长度为 l_2 的光纤,并且在端面上镀反射膜 MR;连接臂 l_3 、 l_4 把耦合器 DC₁ 和 DC₂ 联接在一起,形成一个 MZI。

由于光在器件中传输的距离比较短,忽略其

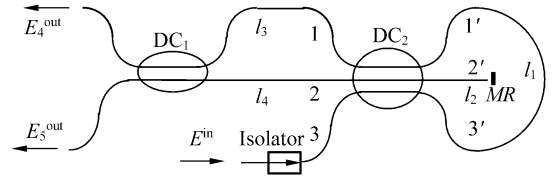


图 1 基于双耦合器的平坦型全光纤波长交错滤波器的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an all-fiber optical interleaver having approximate rectangular wavelength response

传输损耗。光信号在单模光纤中传输满足 $E_i = E_0 \exp(i\beta L)$ (其中 L 为光纤的等效光程)。系统的分析基于熔锥型单模光纤定向耦合器的散射矩阵, S_2 和 S_3 分别为 2×2 耦合器和 3×3 耦合器的散射矩阵, 3×3 耦合器为一字型耦合器。散射矩阵 S_2 和 S_3 可分别表示为^[6-7]:

$$S_2 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha s) & i \sin(\alpha s) \\ i \sin(\alpha s) & \cos(\alpha s) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} \cos^2(\gamma z/2) & \frac{i}{\sqrt{2}} \sin(\gamma z) & -\sin^2(\gamma z/2) \\ \frac{i}{\sqrt{2}} \sin(\gamma z) & \cos(\gamma z) & \frac{i}{\sqrt{2}} \sin(\gamma z) \\ -\sin^2(\gamma z/2) & \frac{i}{\sqrt{2}} \sin(\gamma z) & \cos^2(\gamma z/2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 α 和 s 分别是 2×2 耦合器的耦合系数和有效耦合长度, γ 和 z 分别是 3×3 耦合器的耦合系数和有效耦合长度。

假设输入光场 E^{in} 从耦合器 DC₂ 端口 3 输入,经过隔离器 (Isolator) 后进入耦合器 DC₂,在 DC₂ 的 3 个端口 1'、2' 和 3' 的输出光场分别为 $E_{1'}^{\text{out}}$ 、 $E_{2'}^{\text{out}}$ 和 $E_{3'}^{\text{out}}$, $E_{1'}^{\text{out}}$ 和 $E_{3'}^{\text{out}}$ 经过光纤 l_1 传输后分别从端口 3' 和 1' 进入耦合器 DC₂, $E_{2'}^{\text{out}}$ 在光纤 l_2 传输后又被反射回到端口 2' 再次进入到耦合器 DC₂,这三束光在耦合器 DC₂ 中形成第一次干涉,干涉后的输出光分别为 E_1^{out} 、 E_2^{out} 和 E_3^{out} 。 E_3^{out} 被光隔离器 (Isolator) 阻断, E_1^{out} 和 E_2^{out} 分别经过干涉臂 l_3 和 l_4 后,在耦合器 DC₁ 中形成第二次干涉,所产生的干涉输出谱 E_4^{out} 和 E_5^{out} 分别从 DC₁ 端口 4、5 输出,其表达式为:

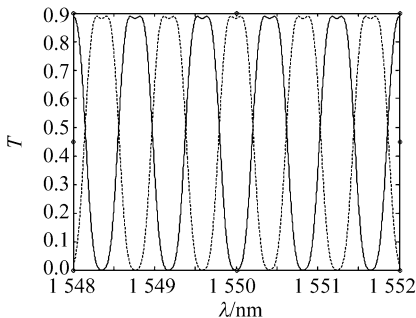
$$\begin{bmatrix} E_4^{\text{out}} \\ E_5^{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\cos(\theta_1/2)\cos^2(\gamma z) + i\sin(\theta_1/2)]\cos(\alpha s) - \frac{1}{\sqrt{2}}\sin(2\gamma z)\cos(\theta_1/2)\sin(\alpha s)\exp(-i\theta_2) \\ i[\cos(\theta_1/2)\cos^2(\gamma z) + i\sin(\theta_1/2)]\sin(\alpha s) + \frac{i}{\sqrt{2}}\sin(2\gamma z)\cos(\theta_1/2)\cos(\alpha s)\exp(-i\theta_2) \end{bmatrix} E_1^{\text{in}}, \quad (3)$$

式中 $\theta_1 = \beta(2l_2 - l_1) = \beta\Delta l_1$, $\theta_2 = \beta(l_4 - l_3) = \beta\Delta l_2$, $i = (-1)^{1/2}$, θ_1 和 θ_2 代表两个干涉臂的传输相位差, Δl_1 和 Δl_2 是干涉仪两臂长差。根据光强公式 $P = E \cdot E^*$ (其中 E^* 是 E 的共轭复数), 输入光强为 $P^{\text{in}} = E^{\text{in}} \cdot E^{\text{in}*}$, 则端口 4 和端口 5 的输出光强分别为 $P_4 = E_4^{\text{out}} \cdot E_4^{\text{out}*}$ 和 $P_5 = E_5^{\text{out}} \cdot E_5^{\text{out}*}$, 归一化输出光强 $T_4 = P_4/P^{\text{in}}$, $T_5 = P_5/P^{\text{in}}$ 。由于共同项 $\exp(-i\beta l_1)$ 和 $\exp(-i\beta l_3)$ 对输出光强没有贡献, 所以在式(3)中将忽略。

$$\begin{bmatrix} T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4702 - 0.4982\cos(\beta\Delta l_2) - 0.0299\cos(2\beta\Delta l_2) + 0.0581\cos(3\beta\Delta l_2) \\ 0.4702 + 0.4982\cos(\beta\Delta l_2) - 0.0299\cos(2\beta\Delta l_2) - 0.0581\cos(3\beta\Delta l_2) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

在计算中, 假设光纤的纤芯有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.457$ 。由式(4)可以看出, 器件的透射光强 T_4 和 T_5 的各项正好构成了傅里叶级数的基波项与谐波项, 对式(4)计算得到了如图 2 所示的周期谱图。实线代表端口 4 的归一化输出光功率曲线, 虚线代表端口 5 的归一化输出光功率曲线。输出谱线出现平顶 (flat-top), 这在应用中是很重要的, 它可以抵消信道波长漂移带来的不利影响, 可以作为波长交错滤波器。

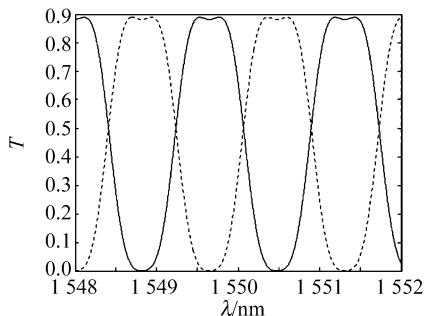
当保持两个干涉臂的臂长差比例不变, 调节其大小时, 其输出峰间隔会得到相应调节, 即如果维持各个干涉臂的臂长差比例关系不变而增大其大小, 则梳状谱的峰值间隔将会相应变小, 反之增大, 如图 2 所示。在图 2(b)中, 耦合器的分光比



(a) $\alpha s = \pi/4$ and $\gamma z = \pi/5$, $\Delta l_1 = 1$ mm, $\Delta l_2 = -0.5$ mm

3 数值模拟

由傅里叶级数展开原理可知: 周期性方波可以经傅里叶展开成一系列正弦或余弦函数的叠加, 反之, 也可以利用满足傅里叶级数关系的多个正弦或余弦波的叠加来构造方波。根据此原理, 经计算机模拟计算, 发现当取耦合器 DC_1 和 DC_2 的耦合系数和有效耦合长度乘积分别为 $\alpha s = \pi/4$ 和 $\gamma z = \pi/5$, 两对光纤臂长差 $\Delta l_1 = -2\Delta l_2$ 时, 归一化输出光强 T_4 和 T_5 可表示为:



(b) $\alpha s = \pi/4$ and $\gamma z = \pi/5$, $\Delta l_1 = 0.5$ mm, $\Delta l_2 = -0.25$ mm

图 2 交错滤波器随波长变化的输出曲线
实线: 对应端口 4; 点线: 对应端口 5

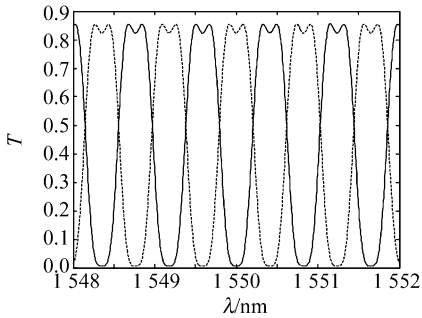
Fig. 2 Transmission variation with wavelength at out-port of the interleaver

Solid: at P_4^{out} port; Dot: at P_5^{out} port

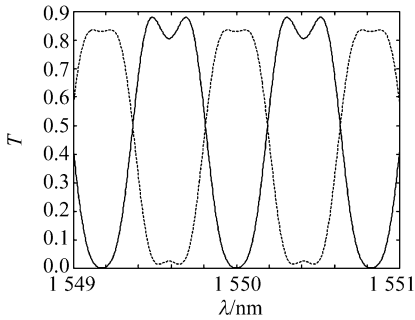
与图 2(a)中的完全一样, 仅改变光纤臂长差 $\Delta l_1 = 0.5$ mm, $\Delta l_2 = -0.25$ mm。可以看出图 2(b)中梳状谱的峰值间隔比图 2(a)中大 1 倍, 其它基本没有变化。

分析还发现: 器件输出光谱对耦合器的分光比不是特别敏感, 也就是说, 如果耦合器的分光比略微偏离最佳值, 也能得到比较理想的输出谱图。将图 2 中耦合器的耦合系数与有效耦合长度的乘积分别改为 $\alpha s = \pi/4$, $\gamma z = 2\pi/9$ 和 $\alpha s = 2\pi/9$, $\gamma z =$

$2\pi/9$,重新计算得到的输出谱图如图 3 所示。和图 2 比较图 3 所示的谱线形状变化不大,图 3(a)中曲线的峰值略有下降,但边模抑制比有所改善;在图 3(b)中,由于耦合器 DC_1 不是 3 dB 耦合器,两个端口的输出峰值略有差异,输出波形也不再对称,端口 4 输出曲线的中心稍微有些下凹,但两个端口的输出曲线都基本保持了平顶,因此对波长交错滤波器功能带来的影响不是太大。



(a) $\alpha s = \pi/4, \gamma z = 2\pi/9, \Delta l_1 = 1.0 \text{ mm}, \Delta l_2 = -0.5 \text{ mm}$



(b) $\alpha s = 2\pi/9, \gamma z = 2\pi/9, \Delta l_1 = 1.0 \text{ mm}, \Delta l_2 = -0.5 \text{ mm}$

图 3 交错滤波器随波长变化的输出曲线
实线:对应端口 4;点线:对应端口 5

Fig. 3 Transmission variation with wavelength at ports of the interleaver

Solid: at P_4^{out} port; Dot: at P_5^{out} port

4 实验制作与测量结果

全光纤干涉型滤波器的制作有两个关键技术,第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。一般的 MZI 在制作过程中,第一个光纤方向耦合器的分光比比较容易控制,在熔拉第二个光纤方向耦合器时,由于通过第一个耦合器的光已经是相干光,只要在第二

个耦合器内的光强有互相耦合就会产生干涉,所以在熔拉第二个耦合器时已不能用一般的监测光功率来控制其耦合长度,而只能凭经验熔拉。如果是级联 MZI,不仅光纤耦合器的分光比难以控制,而且第二对光纤干涉臂差 Δl_2 与第一对光纤干涉臂差 Δl_1 的比例关系也难于控制到非常匹配。而本文提出的干涉型滤波器很好地解决了这两个难题,下面简述一下其制作与检测过程。

实验采用标准的单模光纤,并采用高温 H_2-O_2 焰对光纤进行熔融拉锥来制作耦合器 DC_1 和 DC_2 , H_2-O_2 焰的宽度约为 6 mm。监测光源是中心波长为 1 525 nm 的半导体激光器。融拉过程参照文献[8]的方法,第一步先制作 2×2 耦合器 DC_1 ,然后把其两个输出端口的光纤臂 l_3 和 l_4 紧密呈一平面地沿圆型薄片绕一角度 α ,使外圈的光纤臂 l_4 比内圈光纤臂 l_3 长 Δl ,把监测光的输入端改在光隔离器(Isolator)的前端,让输入光通过光隔离器后再进入端口 3(参照图 1)。在熔融拉锥前,用剪断法准确确定输入光的功率,在端口 2' 用光功率计对输出光功率进行测量,当端口 2' 的光功率达到理论预定值时立即停止熔拉。整个融拉过程采用计算机进行控制,拉伸速度为 120 $\mu\text{m/s}$ 。可以看出,在熔拉耦合器 DC_2 的过程中,输入光从端口 3 入,从端口 2' 出,中间只通过耦合器 DC_2 ,没有任何干涉,所以可以准确控制 DC_2 的分光比。

由前面的分析可以看出,在光纤耦合器分光比确定以后,器件的输出光谱形状与两对光纤臂长差 Δl_1 和 Δl_2 的比例有关,这个比例关系完全可以由 Δl_2 来调节。如果没有特殊要求,在融拉耦合器 DC_2 的过程中, Δl_1 的精度可以适当放宽,这样就降低了制作难度。同样光纤环 l_1 的长度也没有必要精确控制,取个近似值就可以了,而 Δl_2 可以只通过改变光纤臂 l_2 的长度来调节,使之满足器件对 Δl_1 和 Δl_2 的比例要求。目前对光纤臂 l_2 的长度的调节只能通过研磨—镀膜—试验观察—再研磨—...这样一个复杂过程来逐步接近,这样一个过程虽然比较繁琐,但不可控制量大大减少,有关工艺和技术方面的问题有待于进一步开发和研究解决。

对制作的滤波器进行了性能测试。光源采用 Santec 公司生产的 TSL 2210 型波长可调谐激光器,调谐波长为 1 500~1 580 nm,从端口 3 输入

光功率为 1 mW 的光,在输出端口 4 和 5 分别用两只光功率计对输出功率进行测量,得到如图 4 所示的测试结果(曲线上的一些微小起伏已经过光滑处理)。可以看出,该谱线和图 2 的理论曲线非常接近,图形也比较理想,两条谱线峰之间的波长间隔约为 1.6 nm,样品输出曲线顶部和底部的一些畸变可能是由于实验样品的两条干涉臂的

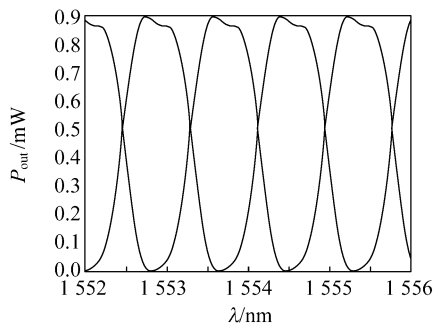


图 4 交错滤波器端口 3 输出光谱随波长变化的实验测量值

Fig. 4 Output spectra of port 3 of the interleaver versus wavelength obtained from experiment

长度差 ΔL_1 和 ΔL_2 之间比例关系存在的误差所致。

5 结 论

提出了一种新型的全光纤波长交错滤波器,它是由一个 2×2 耦合器和一个一字型的 3×3 耦合器所组成的,当耦合器的分光比和光纤干涉臂满足一定条件时,可以实现波长交错滤波器、梳状滤波器等功能。另外组成器件的两个耦合器的分光比以及两对光纤干涉臂长差在实际制作过程中可以精确控制,在工艺上克服了制作 MZI 时,其第二个耦合器的分光比无法直接测量而只能凭经验控制的缺点。这种器件缺点是:由于 3×3 耦合器的一个端口的输出没有利用,所以器件的附加损耗以及插入损耗加大,归一化输出峰值小于 1;另外一字型 3×3 耦合器的制作过程相对于 2×2 耦合器要复杂,实验过程要求非常严格。这些问题有待于进一步研究解决。总之,本文为设计和制作光纤梳状滤波器,波长交错滤波器等提出了一种新的思路。

参考文献:

- [1] BETHUYS S, LABLONDE L, RIVOALLAN L, *et al.* Optical add/drop multiplexer based on UV-written Bragg grating in twincore fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Electron Lett*, 1998, 34(12):1250-1252.
- [2] MIAO T Q, JIN N S, ZHOU F, *et al.* Development of DWDM filter manufacture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(5):487-492.
- [3] CULLEN T J, ROURKE H N, CHEW C P, *et al.* Compact all-fiber wavelength drop and insert filter[J]. *Electron Lett*, 1994, 30(25):2160-2162.
- [4] 沈浩,李新碗,周俊鹤,等.可调微型环阵列加强马赫-曾德尔滤波性能分析[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(6):670-673.
SHEN H, LI X W, ZHOU J H, *et al.* Filter performance analysis of a tunable Mach-Zehnder interferometer enhanced with a micro-ring resonator array[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(6):670-673. (in Chinese)
- [5] 瞿荣辉,赵浩,方祖捷.级联非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪型复用器特性分析[J]. *光电子·激光*, 2001, 12(3):254-257.
ZHAI R H, ZHAO H, FANG Z J. Analysis of optical multiplexer/demultiplexer based on cascaded non-balanced Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12(3):254-257.
- [6] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(3):339-347. (in Chinese)

- [7] 何娜, 吴重庆, 卫炎, 等. 熔锥平行排列 3×3 单模光纤耦合器的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(3):323-327.
HE N, WU C Q, WEI Y, *et al.* Fused planar 3×3 single mode fiber coupler[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(3):323-327. (in Chinese)
- [8] 姚寿铨, 陈凯旋. 光纤马赫-陈德尔干涉型 8 波分超窄波分复用器的研制[J]. 光学学报, 1998, 18(8):1114-1118.
YAO S Q, CHEN K X. A 8-Channel fiber Mach-Zehnder interferometric super narrow spacing wavelength-division-multiplexer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(8):1114-1118. (in Chinese)

作者简介:鲁怀伟(1959—),男,甘肃人,1978—1982年在西南交通大学应用物理专业学习,1986—1989年在电子科技大学电磁场与微波技术专业学习,现在兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室工作,主要研究方向为光纤无源器件、光信息处理。Email: luhw@mail.lzjtu.cn lu5059@126.com

章宝歌(1980—),女,河南人,兰州交通大学硕士研究生,主要研究方向为光纤通信。Email: zhangbg@mail.lzjtu.cn