

文章编号 1004-924X(2007)07-1021-05

基于 2×2 和 3×3 耦合器的级联 马赫-曾德干涉仪型波长交错滤波器

鲁怀伟^{1,2}, 张玉娥³, 罗冠炜¹

(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; 3. 兰州交通大学 资产与后勤管理处, 甘肃 兰州 730070)

摘要:针对全光纤级联 Mach-Zehnder 干涉仪型(CMZI)波长交错滤波器在实际制作过程中存在的问题,提出了由一个 2×2 和两个 3×3 单模光纤耦合器级联组成的全光纤 CMZI 型波长交错滤波器并进行了分析。分析结果表明:组成滤波器干涉臂的第二对臂长差为第一对臂长差的偶数倍时,耦合器分光比取一些定值得到输出波形通带平坦、阻带加宽、透射率形态近似于方波的波长交错滤波器。与通常的 CMZI 相比,最大的优点是在实际制作时可以对每个耦合器的分光比进行准确的监测和控制,大大降低了 CMZI 型波长交错滤波器的制作困难。最后进行了实验研究,实验所得结果与理论结果相吻合。

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

中图分类号: TN253; TN929.11 **文献标识码:** A

Flat-top interleaver of cascaded M-Z interferometer with 2×2 and 3×3 fiber couplers

LU Huai-wei^{1,2}, ZHANG Yu-e³ LUO Guan-wei¹

(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*;
3. *Office of Assets and Rear Service Management, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: An all-fiber flat-top interleaver of Cascaded M-Z Interferometer (CMZI) using a 2×2 and two 3×3 fiber couplers with approximate rectangular wavelength response was developed. The relationships among the coupling ratios of the couplers, the length difference of interference arms, and the intensity transmission spectrum were analyzed. The results indicate that a uniform flat-top spectral response can be obtained by the configuration when the length difference of interference arms and the coupling coefficient of the couplers are some certain values and the passband and stopband of optical interleaver can be improved remarkably. Compared with conventional CMZI, the most advantage of the present method is that the coupling ratio of couplers can be controlled accurately. Finally, a novel

收稿日期: 2006-08-18; **修订日期:** 2007-03-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50475109, 10572055); 甘肃省教育厅研究生导师科研资助项目(No. 0604-07); 兰州交通大学“青蓝”工程资助项目

structure of interleaver is fabricated using fused biconical taper technics in experiment. The experiment results agree with the analytical ones well.

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

1 引言

随着光纤熔融拉锥技术的成熟,全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)型波长交错滤波器的结构简单、制作成本低、信道均匀性好、与系统的兼容性强,较低的偏振相关损耗和附加损耗等优点更加突出。采用多个 2×2 耦合器串联而成的级联 MZI 具有光学滤波的优良性能,在光传感和光通信领域中均具有重要的应用。例如,在光传感领域,将其用作相位滤波器可对多点、多参数的光纤光栅传感信号进行检测^[1];在光通信领域,已将其用于分插复用器、波长交错器、声光滤波器及多波长光纤激光器中的选模器件等^[2],因而,该器件近年来得到了科研人员的广泛关注。

由 2×2 耦合器组成的级联 MZI 干涉仪型波长交错滤波器(Cascaded M-Z Interferometer CMZI)存在一定的制作困难,实际制作时,除第一个耦合器的分光比可以准确控制外,其余耦合器的分光比由于光的干涉效应而无法实时监控,因此难以准确控制,经常凭经验来拉伸,给制作高精度的波长交错滤波器带来一定的困难。本文提出了由一个 2×2 耦合器和两个平行排列一字型的 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这种结构的全光纤 CMZI 干涉仪型波长交错滤波器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,还在实际制作过程中避开了监视光的干涉效应,可对每个耦合器的分光比进行准确控制,克服了以往制作全光纤 CMZI 型波长交错滤波器的不足,具有一定的实用价值。

2 器件模型

用 D_j^i 表示第 j ($j=0,1,2$) 个耦合器的第 i ($i=1, \dots, 6$) 个端口,由一个 2×2 耦合器(DC_1)和两个一字型的 3×3 耦合器(DC_0 和 DC_2)组成的全光纤型波长交错滤波器结构如图 1 所示。 D_0^4 和 D_0^6 与 D_1^1 和 D_1^2 分别用光纤 l_1 和 l_2 连接,

D_1^3 和 D_1^4 与 D_2^1 和 D_2^2 分别由光纤 l_3 和 l_4 连接,形成一个级联 Mach-Zehnder 干涉仪型波长交错滤波器。

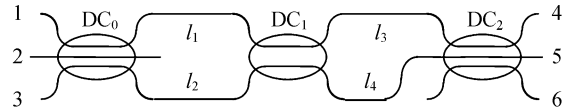


图 1 全光纤波长交错滤波器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of all-fiber interleaver

考虑输入光强 P^{in} 仅从耦合器 DC_0 的中间输入端口 D_0^2 输入,调整 DC_0 的分光比为 $0.5 : 0.0 : 0.5$,则端口 D_0^5 无输出光^[3-4]。输入光被平均分配到光纤 l_1 和 l_2 ,并传输到耦合器 DC_1 ,在 DC_1 中产生第一次干涉;从 DC_1 输出的光再经光纤 l_3 和 l_4 传输到耦合器 DC_2 ,在 DC_2 中产生第二次干涉。在此前提下,设输出端口 D_2^k ($k=4, 5, 6$) 的归一化输出光强分别为 $T_k = P_k^{\text{out}} / P^{\text{in}}$,根据光耦合和传输理论^[3-4],推导出 T_k 表达式为:

$$\begin{bmatrix} T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 b_1 c_1 d_1 \\ a_2 b_2 c_2 d_2 \\ a_3 b_3 c_3 d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(2\theta_1) \\ \sin[2(\theta_1 - \theta_2)] \\ \sin[2(\theta_1 + \theta_2)] \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.25 \sin(2k_1) [2 \cos^4(0.5k_2) - \sin^2(k_2)] \\ a_2 &= 0.25 \sin(2k_1) [1 - 3 \cos^2(k_2)] \\ a_3 &= 0.125 \sin(2k_1) [3 \cos^2(k_2) - 2 \cos(k_2) - 1] \\ b_1 &= -\sqrt{2} \sin^2(k_1) \cos^3(0.5k_2) \sin(0.5k_2) \\ b_2 &= 0.25 \sqrt{2} \sin^2(k_1) \sin(2k_2) \\ b_3 &= \sqrt{2} \sin^2(k_1) \sin^3(0.5k_2) \cos(0.5k_2) \\ c_1 &= \sqrt{2} \cos^2(k_1) \cos^3(0.5k_2) \cos(0.5k_2) \\ c_2 &= -0.25 \sqrt{2} \cos^2(k_1) \sin(2k_2) \\ c_3 &= -\sqrt{2} \cos^2(k_1) \sin^3(0.5k_2) \cos(0.5k_2) \\ d_1 &= 0.5 \cos^2(0.5k_2) [1 + \sin^2(0.5k_2)] \\ d_2 &= 0.25 [1 + \cos^2(k_2)] \\ d_3 &= 0.5 [1 + \cos^2(0.5k_2)] \sin^2(0.5k_2) \\ \theta_1 &= \beta(l_2 - l_1) / 2 = \beta \Delta l_1, \theta_2 = \beta(l_4 - l_3) / 2 = \beta \Delta l_2, \end{aligned}$$

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。 $k_1 = \alpha s$, $k_2 = \gamma z$, 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。

3 理论分析

由 Fourier 级数理论可知, 周期性的方波可展开成一系列余弦波的叠加, 反过来, 也可以利用满足 Fourier 关系的多个余弦波的叠加来构造方波。在式(1)中取 $\Delta l_2 = 2\Delta l_1$, 即 $\theta_2 = 2\theta_1 = \theta$, 则式(1)可以写成:

$$\begin{bmatrix} T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 - b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 - b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 - b_3 & c_3 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(3\theta) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

由式(2)可以看出: 器件的透射光强 T_i ($i=4, 5, 6$) 的各项正好构成了傅里叶级数的基波项与谐波项。利用以上的推导结果, 经计算机模拟, 即可得到该干涉仪的干涉谱图。计算中, 光纤纤芯的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.457$, 耦合器 DC_1 和 DC_2 的耦合系数和有效耦合长度乘积为 $\alpha s = 2\pi/7$ 和 $\gamma z = \pi/12$, 光纤臂长差 $\Delta l_1 = 1 \text{ mm}$, $\Delta l_2 = 2 \text{ mm}$ 。经计算得到了如图 2 所示的周期谱图。

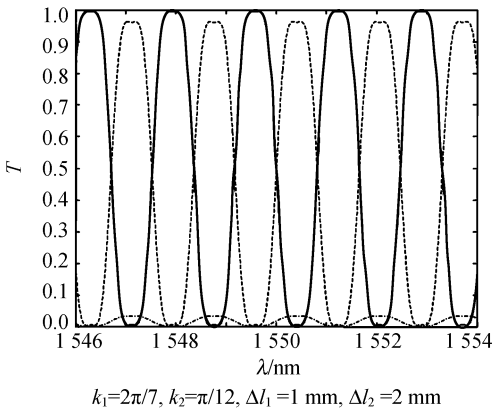


图 2 式(2)随波长变化的计算结果

实线: 端口 4; 虚线: 端口 5; 点划线: 端口 6

Fig. 2 Simulation results of Eq. (2) varied with wavelength λ

图 2 中实线代表端口 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, 点划线代表端口 6 的归一化输出光功率曲线。输出谱线 T_4 和 T_5 出现平顶 (flat-top), T_6 的输

出光强很弱。 T_4 和 T_5 的平顶效应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, 所以该器件可以作为波长交错滤波器。

经过分析发现, 器件对于干涉臂长差的比例关系并不是唯一的, 如果取 $\Delta l_2 = 4\Delta l_1$, 既 $\theta_2 = 4\theta_1 = 2\theta$, 则式(1)可以写成:

$$\begin{bmatrix} T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(3\theta) \\ \sin(5\theta) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

取 $\alpha s = \pi/3$ 和 $\gamma z = \pi/15$, 两对光纤臂长差 $\Delta l_1 = 1 \text{ mm}$, $\Delta l_2 = 4 \text{ mm}$, 图 3 显示了式(3)中的 T_i 随波长变化的计算结果。图 3 中输出光的消光比虽然变差了, 输出峰值有所降低, 但边缘更加陡峭, 边模抑制比明显得到提高, 更接近于方波。

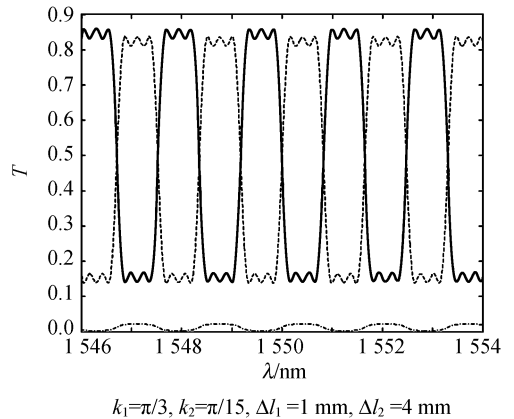


图 3 式(3)随波长变化的计算结果

实线: 端口 4; 虚线: 端口 5; 点划线: 端口 6

Fig. 3 Simulation results of Eq. (3) varied with wavelength λ

图 2 和图 3 清楚地显示器件端口 4 和端口 5 的输出光谱是互相错开的、具有一定周期的近似方波。由式(2)和(3)可以得出波长周期 $\Delta \lambda$ 取决于传输相位差 θ , $\Delta \lambda$ 的表达式为:

$$\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2 \lambda_1 / (2n_{\text{eff}} \Delta l_1) \approx \lambda^2 / (2n_{\text{eff}} \Delta l_1). \quad (4)$$

分析还发现: 器件输出透射率形态近似于方波的光谱对耦合器的分光比要求不是十分严格。将图 2 和图 3 中耦合器的耦合系数与有效耦合长度的乘积分别改为 $\alpha s = \pi/4$, $\gamma z = \pi/15$ 和 $\alpha s = 5\pi/16$, $\gamma z = \pi/12$, 重新计算得到的输出谱图如图 4 和图 5 所示。图 4 和图 2、图 5 和图 3 比较可知, 器件的输出谱线形状变化不大。

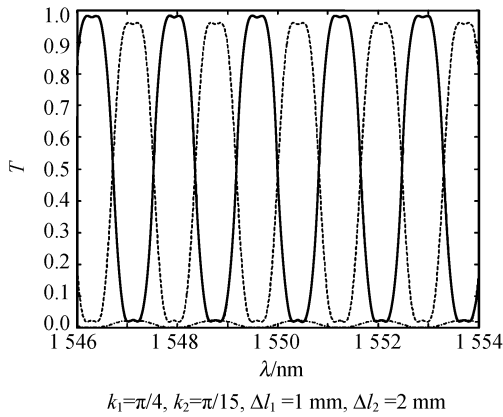


图 4 公式(2)随波长变化的计算结果
实线:端口 4;虚线:端口 5;点划线:端口 6
Fig. 4 Simulation results of Eq. (2) varied with wavelength λ

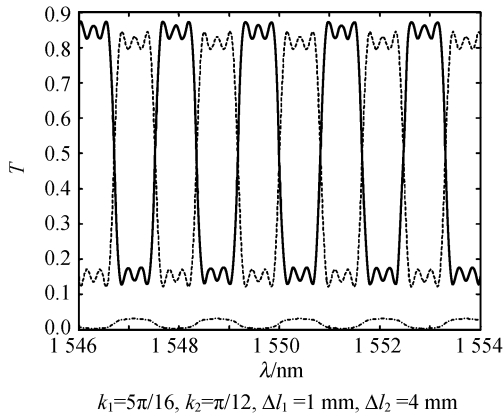


图 5 公式(3)随波长变化的计算结果
实线:端口 4;虚线:端口 5;点划线:端口 6
Fig. 5 Simulation results of Eq. (3) varied with wavelength λ

4 实验及其结果

由图 1 可以看出,耦合器 DC_0 和 DC_2 各有一对输入和输出端口空闲,在熔拉耦合器的时候,可以用这些空闲端口监测分光比,达到精确控制其分光比的目的。在实验中,采用标准的单模光纤,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 1 550 nm 的半导体激光器,整个融拉过程采用计算机控制,拉伸速度为 $120 \mu\text{m/s}$ 。

首先按常规的方法控制 2×2 耦合器 DC_1 为 3 dB 耦合器;在控制耦合器 DC_0 时,往 DC_1 抽出的两根同向光纤中插入另一根光纤,三根光纤同时熔拉。监控方法是:从 D_0^5 端注入监测光,在端口 D_0^1 、 D_0^2 和 D_0^3 同时监测输出光功率,当端口 D_0^2 的光功率为零时停止熔拉,一个分光比为 0.5 : 0 : 0.5 的耦合器就可以制成。由光传输的互易性可知,当 D_0^2 为输入端时,端口 D_0^5 的输出光功率也为零,端口 D_0^4 和 D_0^6 的光功率很接近,分别为输入光的 50% (有少量的插入损耗)。采用同样步骤熔拉 DC_2 , 待分光比达到要求时停止熔拉。由此可见,在熔拉过程中,利用空闲端口作为监视端口,避开了光的干涉效应,使得耦合器的分光比可以被控制,熔锥型光纤耦合器以及干涉臂长差 Δl_1 和 Δl_2 的控制方法参照文献[5-6]的方法。

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 1 540~1 560 nm,从端口 D_0^2 输入光功率为 1 mW 的线偏振光,在输出端口 D_2^1 和 D_2^2 分别用两只光功率计对输出功率进行测量,测试结果如图 6 所示。可以看出,该谱线和图 3 的理论曲线非常接近,输出谱线具有明显的平顶效果,线峰之间的波长间隔约为 1.6 nm,通道隔离度 >10 dB。

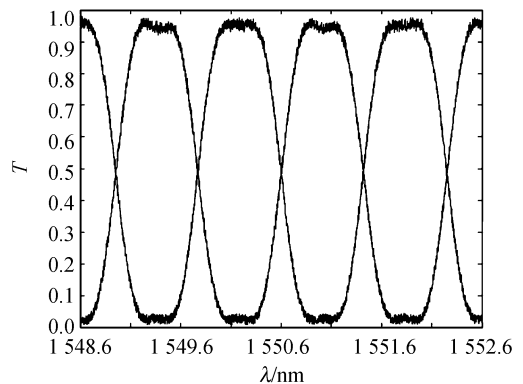


图 6 取参数 $k_1 = \pi/4$ 、 $k_2 = \pi/15$ 、 $\Delta l_1 = 1 \text{ mm}$ 和 $\Delta l_2 = 2 \text{ mm}$ 时,交错滤波器输出光谱随波长变化的实验测量值
Fig. 6 Experimental results of two output spectral responses of a designed interleaver with $k_1 = \pi/4$, $k_2 = \pi/15$, $\Delta l_1 = 1 \text{ mm}$ and $\Delta l_2 = 2 \text{ mm}$

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 耦合器和两个一字型的 3×3 耦合器组成的,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。在实际制作这种结构的波长交错滤波器时,由于避开了监视光的干涉效应,每个耦

合器的分光比以及干涉臂长差可以精确控制。从结构上可以看到 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相对有所增加,归一化输出峰值略小于1。理论和实验都证明,这种CMZI型结构的全光纤波长交错滤波器具有峰值平坦,信道均匀性好,带宽,价格低等优点,具有一定的应用前景,同时也为设计全光纤梳状滤波器等全光纤无源器件提出了一种新的思路和方法。

参考文献:

- [1] SONG M H, YIN S Z, RUFFIN P B. Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(7): 1106-1111.
- [2] 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.
- [3] 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)
- [4] 鲁怀伟, 章宝歌, 李敏芝, 等. 基于双耦合器的平坦型全光纤波长交错滤波器[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(2): 145-150.
LU H W, ZHANG B G, LI M ZH, *et al.*. All-fiber flat-top interleaver based on double single mode couplers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 145-150. (in Chinese)
- [5] 帅词俊, 段吉安, 钟振. 熔锥型光纤耦合器流变成形的工艺敏感性研究[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(1): 40-46.
SHUAI C J, DUAN J A, ZHONG J. Technical sensitiveness in the rheological Manufacture progress of fused taper coupler [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 40-46. (in Chinese)
- [6] 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:鲁怀伟(1959—),男,甘肃天水人,现在兰州交通大学工作,主要从事光纤通信,光纤无源器件等教学及科研工作。E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn