

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0332-04

全光纤反射式马赫-曾德尔干涉型 多波长滤波器的研究*

冯德军 开桂云 刘志国 袁树忠 赵启大 董孝义

(南开大学光子技术中心, 天津 300071)

摘要: 对反射式的马赫-曾德尔干涉型多波长滤波器的性能作了较详细的研究, 得出了两个耦合器的分光比和两臂的臂长差对其输出谱线的影响。结论对设计制作不同性能指标的该型多波长滤波器具有重要的参考价值。实验上用光纤熔融拉锥法制作了该种器件, 实验结果与理论相符合。

关键词: 马赫-曾德尔干涉仪; 滤波器; 分光比; 熔融拉锥

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

随着光纤技术的成熟, 基于全光纤的马赫-曾德尔干涉仪的多种光纤器件由于插损小、与光纤的兼容性好、具有梳状滤波特性等优点而在波分复用光纤通信系统和光纤传感等方面有着重要的应用价值, 近年来受到广泛关注。在光传感领域的应用主要集中在用它作为相位滤波器对多点、多参数的光纤光栅传感信号检测^[1-3]; 在光通信领域主要的应用如上下路复用/解复用器、波长交错器、声光滤波器、多波长光纤激光器中的选模器件等^[4-8]。本文在理论上推导了反射式的全光纤马赫-曾德尔干涉型多波长滤波器的能量传输矩阵, 对其输出谱作了数值模拟, 并利用熔融拉锥法制作出了该器件。

2 理 论

2.1 理论推导

反射式的全光纤马赫-曾德尔干涉仪主要由两个耦合器 C_1 、 C_2 构成, 其中 C_2 的两个输出端连在一起形成环路(透射式的全光纤马赫-曾德尔干涉仪的 C_2 的两个输出端则没有形成环路), 如图 1 所示。两耦合器之间的两个臂的臂长分别用 l_1 、 l_2 表示, l_3 为环路的长度, 两耦合器分光比分别为 k_1 、 k_2 。

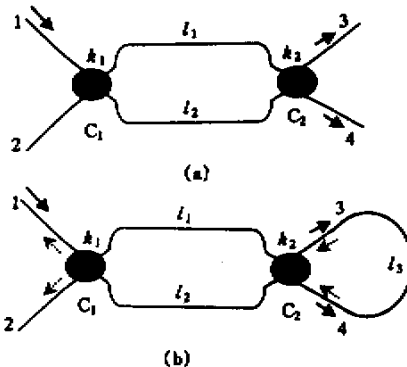


Fig. 1 Schematic diagram of Mach-Zehnder interferometric multi-wavelength filter. (a) Reflected type; (b) Transmitted type

在下面的分析中忽略光纤损耗, 并考虑到光纤耦合器两个输出端的信号存在 $\pi/2$ 的相位差(即耦合臂中光波的相位跟直通臂中的光波的相位相差 $\pi/2$), 光纤及耦合器的耦合熔锥区的偏振效应亦不计, 自端口 1 输入的单位光强的光, 在端口 3 和端口 4 输出的干涉光场可表示为

$$A_3 = k_1^{1/2} k_2^{1/2} \exp(i l_1 \beta) + (1 - k_1)^{1/2} (1 - k_2)^{1/2} \times \exp\left(i \frac{\pi}{2}\right) \exp(i l_2 \beta) \exp\left(i \frac{\pi}{2}\right), \quad (1)$$

$$A_4 = k_1^{1/2} (1 - k_2)^{1/2} \exp\left(i \frac{\pi}{2}\right) \exp(i l_1 \beta) + (1 - k_1)^{1/2} k_2^{1/2} \exp\left(i \frac{\pi}{2}\right) \exp(i l_2 \beta), \quad (2)$$

β 为光纤中基模的传播常数。 A_3 和 A_4 经闭环光纤后作为输入光分别从端口 4 和端口 3 再反向传播并在端口 1 和端口 2 处形成干涉输出。此时在端口 1、端口 2 与端口 3、端口 4 之间的光场满足下式

* 国家自然科学基金(60077012)和天津市科委攻关项目资助课题。

E-mail: kkaigy@eyou.com

收稿日期 2001-01-31; 收到修改稿日期 2001-04-09

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_4 \exp(il_3\beta) \\ A_3 \exp(il_3\beta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{11} &= k_1^{1/2} k_2^{1/2} \exp(il_1\beta) - (1 - k_1)^{1/2} (1 - k_2)^{1/2} \exp(il_2\beta), \\ a_{12} &= ik_1^{1/2} (1 - k_2)^{1/2} \exp(il_1\beta) + ik_2^{1/2} (1 - k_1)^{1/2} \exp(il_2\beta), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{21} &= ik_1^{1/2} (1 - k_2)^{1/2} \exp(il_2\beta) + ik_2^{1/2} (1 - k_1)^{1/2} \exp(il_1\beta), \\ a_{22} &= k_1^{1/2} k_2^{1/2} \exp(il_2\beta) - (1 - k_1)^{1/2} (1 - k_2)^{1/2} \exp(il_1\beta). \end{aligned}$$

整理并利用关系式： $T_1 = A_1 A_1^*$ ， $T_2 = A_2 A_2^*$ ，在端口 1 和端口 2 得到返回来的光场的强度输出谱的表达式为

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 4k_1^2 k_2 (1 - k_2) + 4k_2 (1 - k_1)^2 (1 - k_2) + 4k_1 (1 - k_1) (2k_2 - 1)^2 + \\ &\quad 8(2k_1 - 1)(2k_2 - 1)k_1^{1/2} k_2^{1/2} (1 - k_1)^{1/2} (1 - k_2)^{1/2} \cos(l_1 - l_2)\beta - \\ &\quad 8k_1 k_2 (1 - k_1)(1 - k_2) \cos 2(l_1 - l_2)\beta, \\ T_2 &= (4k_1 k_2 - 2k_1 - 2k_2 + 1)^2 + 8k_1 k_2 (1 - k_1)(1 - k_2) - \\ &\quad 8(2k_1 - 1)(2k_2 - 1)k_1^{1/2} k_2^{1/2} (1 - k_1)^{1/2} (1 - k_2)^{1/2} \cos(l_1 - l_2)\beta - \\ &\quad 8k_1 k_2 (1 - k_1)(1 - k_2) \cos 2(l_1 - l_2)\beta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

因此，只有一个端口输入时，该器件的能量传输矩阵

可表示为 $\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$ 。以上结果表明环路长度 l_3 对 T_1

和 T_2 没有影响。大多数实际使用中在输入端（端口 1）为防止反射回波要加放隔离器，下面的讨论中主要研究端口 2 处的输出谱 T_2 。通过以上分析可见，两个耦合器的分光比、两臂的臂长差取不同值时，该器件将具有不同的输出谱线。

2.2 数值模拟

2.2.1 $k_1 = k_2 = k$ 取不同值

如果两个耦合器的分光比相等，取 $k_1 = k_2 = k$ 分别为 0.1（10 : 90 的耦合器）、0.15（15 : 85 的耦合器）、0.3（30 : 70 的耦合器）、0.4（40 : 60 的耦合器）、0.5（50 : 50 的耦合器）；令 $\Delta l = |l_2 - l_1|$ 为两臂的臂长差，在模拟中取 0.52 mm。图 2 为 T_2 在 k 取不同值时的输出谱线。可见其谱线在波长域（频域）是由一系列等间距的透射峰组成，故可用作多波长滤

波器。随 k 取值不同， T_2 具有不同的周期。可以这样理解， T_2 可表示为

$$T_2 = C - A \cos(l_1 - l_2)\beta + B \cos 2(l_1 - l_2)\beta. \quad (4)$$

其中 C 为常数。图 3 是系数 A 和 B 随 k 的变化关系曲线。 $k < 0.28$ 时， $A > B$ （4）式中第二项的周期是第三项的 2 倍，且其系数也大，叠加后 T_2 的形状主要由其第二项决定，如图 2 中的 a、b 两曲线；当 k 继续增大时， $A < B$ ，第三项逐渐起作用，在原来阻带中间逐渐打开一个通带，如图 2 中的曲线 c、d、e。 k 越大，通带的透射峰值越高， $k = 0.5$ 时（见图 2 曲线 e），透射峰值达到最大，此时（4）式中第二项系数 A 为 0，谱线周期也变为原来的 1/2。即对于 $k = 0.5$ 的反射式马赫-曾德尔干涉型滤波器比同臂长差的透射式马赫-曾德尔干涉型滤波器的峰值波长间隔周期小一半，此时 T_2 与 $\cos 2(l_1 - l_2)\beta$ 有关，而透射式的输出跟 $\cos(l_1 - l_2)\beta$ 有关，这是二者的重要不同之处。

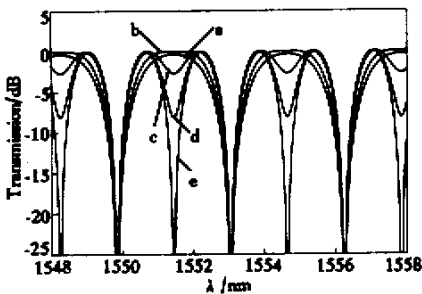


Fig. 2 The calculated transmission spectra at port 2 for different k . a 0.10 b 0.15 c 0.30 d 0.40 e 0.50

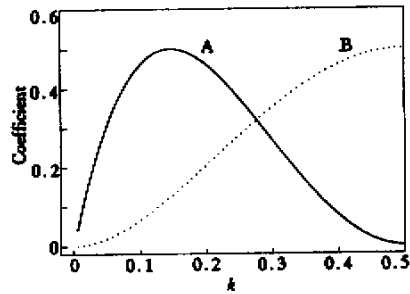


Fig. 3 The coefficients A and B versus $k_1 = k_2 = k$

2.2.2 $k_1 = 0.5, k_2$ 取不同值

当 $k_1 = 0.5$ 时, $T_2 = C + B\cos\alpha(l_1 - l_2)\beta$, T_2 取极大值的条件是 $(l_1 - l_2)\beta = \pi j$, j 为整数, 表示干涉级次。

图 4 是 k_2 取不同值时 T_2 随 $\beta\Delta l$ 的变化曲线, 可见其透射峰值位于 π 的整数倍位置上, 消光比在 $k_2 = 0.5$ 时最大。

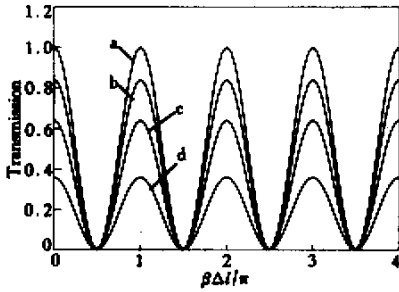


Fig. 4 The relationship between T_2 and $\beta\Delta l$ under different k_2 . a 0.5; b 0.3; (c) 0.2; d 0.1

图 5 是 k 取不同值时波长域的 T_2 谱线, 图中自上而下的五条曲线分别对应的 k_2 为 0.01、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50。由图 4、图 5 可见随着 k_2 的增大, 谱线的消光比也增大, $k_2 = 0.50$ 时达到最大。图 5 中曲线 a 是 $k_2 = 0.01$ 时的情况, 这时由于耦合器 C_2 的分光比太小造成的两相干光的振幅相差太大而造成 T_2 输出谱的消光比太小。图 5 的计算中, Δl 仍取 0.52 mm。

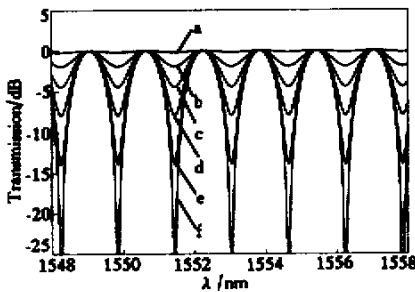


Fig. 5 The calculated transmission spectra at port 2 for different k_2 . a 0.01 b 0.10 c 0.20 d 0.30 e 0.40; f 0.50

两相邻的透射峰之间的波长差近似表示为

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (2n_{\text{eff}}\Delta l),$$

其中 n_{eff} 为纤芯的有效折射率, 可见 $\Delta\lambda$ 主要由 Δl 决定。由于 Δl 的改变比 $\Delta\lambda$ 的相应改变约大 10^6 数量级, 所以平时的实验中调节 Δl 时, 主要表现为谱线的整体平移。如要对指定波长进行滤波, 可通过调

节 Δl 而达到对准指定波长的目的。实际应用中可以通过压电陶瓷、磁致伸缩材料, 施加应力或者调节温度等方法来改变 Δl 达到调谐的目的。调谐方面的实验我们将另文给出。

3 实验结果

实验中利用光纤熔融拉锥工艺制作两个反射式马赫-曾德尔干涉滤波器, 耦合器的 $k_1 = 0.97$, 耦合器的两臂长 l_1 和 l_2 均为 12 cm, 臂长差 Δl 约为 0.5 mm; 由于设备精度限制和技术经验不足, k_2 的控制不是很准确。用宽带光源(掺铒光纤放大器的放大自发辐射谱)自一端输入, 用光谱仪监测到的输出光谱如图 6 所示。图 6(a) 的消光比约为 13 dB, 图 6(b) 的消光比约为 9.8 dB。

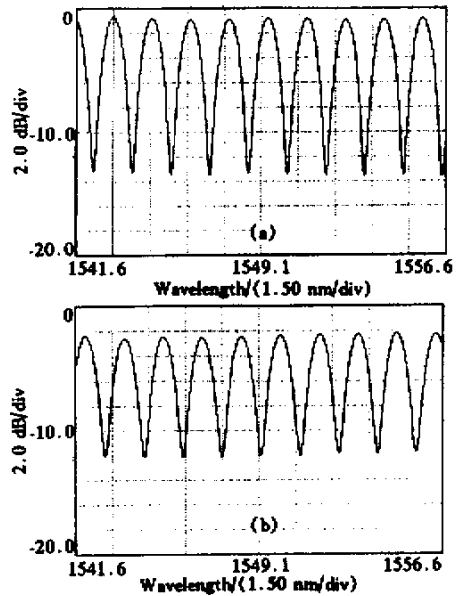


Fig. 6 The measured transmission spectra of the multi-wavelength filter. (a) Extinction ratio is 13 dB; (b) Extinction ratio is 9.8 dB

利用上述理论分析, 取 $k_1 = 0.497$, $\Delta l = 0.52$ mm, k_2 分别取 0.40 和 0.35, 数值模拟出来的谱线如图 7 所示。可见模拟结果跟实验图比较一致。如进一步提高制作精度, 将能制作出性能指标更好的滤波器。

实验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, 这主要是光纤中光的偏振态随外界影响而改变造成的, 在排除了这些因素后, 器件输出很稳定。

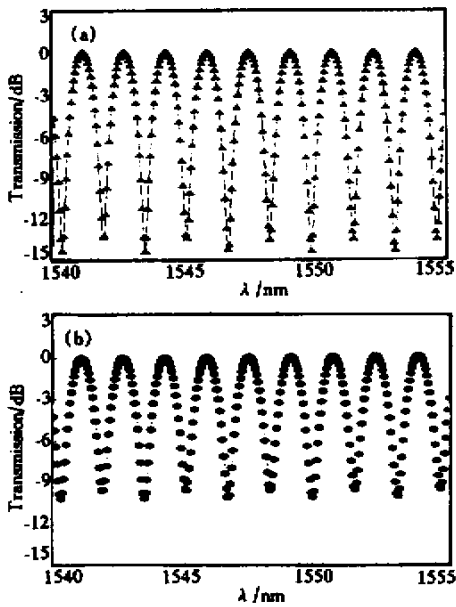


Fig. 7 The calculated transmission spectra of the multi-wavelength filter using these parameters. (a) $k_1 = 0.497$ $k_2 = 0.400$ $\Delta l = 0.52$ mm; (b) $k_1 = 0.497$, $k_2 = 0.350$ $\Delta l = 0.52$ mm

结论 推导了反射式马赫-曾德尔干涉型多波长滤波器的能量传输矩阵。详细讨论了耦合器的分光比和臂长差改变对输出的影响,并讨论了反射式马赫-曾德尔干涉型多波长滤波器跟透射式的主要异同,得出了 $k_1 = k_2 = k$ 时,反射式的谱线的相邻峰值间隔是透射式情况的 1/2 的重要结论。对器件的

稳定性和调谐也作了初步讨论。实验上制作了该器件。理论模拟与实验结果能很好地吻合。

参 考 文 献

- [1] Weis R S, Kersey A D, Berkoff T A. A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12):1469~1472
- [2] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3):236~238
- [3] Song Minho, Yin Shizhuo, Ruffin P B. Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(7):1106~1111
- [4] 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. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(12):1250~1252
- [5] Feng Dejun, Kai Guiyun, Liu Heliang *et al.*. Theoretical study on integrated fiber add/drop multiplexer, *APCC/OECC '99*, (2):1690~1692
- [6] Cullen T J, Rourke H N, Chew C P *et al.*. Fielding compact all-fiber wavelength drop and insert filter. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(25):2160~2162
- [7] Zhao Donghui, Liu Yunqi, Dong Xiaoyi *et al.*. Multiwavelength fiber ring laser utilizing cooled erbium-doped fiber. *Acta Optics Sinica* (光学学报), 2000, **20**(2):201~203 in Chinese
- [8] An H L, Lin X Z, Pun E Y B *et al.*. Multi-wavelength operation of erbium-doped fiber ring laser using a dual-pass Mach-Zehnder comb filter. *Opt. Commun.*, 1999, **169**(1~6):159~165

Study of All-Fiber Reflected Mach-Zehnder Interferometric Multi-Wavelength Filter

Feng Dejun Kai Guiyun Liu Zhiguo Yuan Shuzhong Zhao Qida Dong Xiaoyi

(Center of Photon Technology, Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 31 January 2001; revised 9 April 2001)

Abstract: An all-fiber reflected Mach-Zehnder interferometric multi-wavelength filter was demonstrated and studied in detail. The relationships between the splitting ratio of the couplers, the length difference of the two arms and the intensity transmission were obtained. The conclusions had important value in designing and manufacturing the components with various capabilities. This kind of filter was fabricated with fused biconical taper technics in experiment. The theoretical results were agreement with the experimental ones.

Key words: Mach-Zehnder interferometer; filter; splitting ratio; fused biconical taper