

文章编号: 0253-2239(2003)05-0575-06

马赫-曾德尔干涉仪型波长交错器研究*

孟义朝^{1,2} 黄肇明² 王陆唐²

(1 上海大学(嘉定校区)光纤研究所, 上海 201800
2 上海大学通信学院光波技术实验室, 上海 200072)

摘要: 提出薄膜器件与光纤器件构成组合器件的概念,详细研究了薄膜 Gires-Tournois 干涉仪型光学全通滤波器与光纤马赫-曾德尔干涉仪组合成的波长交错器的传输特性。并讨论了反射系数、损耗、色散、耦合比等参量对器件性能的影响。最后,提出一个双向马赫-曾德尔干涉仪组合器件的方案及其在双向波分复用系统中的应用。

关键词: 导波光学; 波长交错器; 光学全通滤波器; 马赫-曾德尔干涉仪; 光纤定向耦合器

中图分类号: TN253; TN929.11 文献标识码: A

1 引 言

光纤通信网的扩容技术包括:借助宽带光放大器,拓展光纤通信系统的带宽;减小信道间隔,增加通信带宽内的信道数;采用光时分复用(OTDM)技术提高单信道的速率。

当信道间隔由 200 GHz 减小到 100 GHz、50 GHz、甚至 25 GHz 时,原来铺设的波分复用器若弃之不用,则会造成资源浪费;况且,研制密集型波分复用器所遇到的技术困难和成本随着信道间隔的减小急剧上升。于是出现了一种新型光子器件——波长交错器(interleaver)。该器件能够把均匀分布的密集波分复用信道按照奇数和偶数分为两组,从而使信道间隔增倍。它是一种新型接口器件,是采用不同信道间隔的网络或网络的不同部分之间的枢纽。

波长交错器的实现方案有:阵列波导光栅(AWG)^[1]、基于双折射晶体的偏振型干涉仪^[2]、多腔结构法布里-珀罗干涉仪和带 Gires-Tournois 薄膜谐振腔的迈克耳孙干涉仪等^[3]。光学全通滤波器是一种相位滤波器,在一定带宽内幅度响应接近常量,相位响应随频率变化。环形腔和薄膜 Gires-Tournois 干涉仪是两种实现方式,可利用其非线性相位响应改善带通滤波器的传输特性^[4~6]。本文详细研究了基于直线型 3×3 光纤定向耦合器、嵌入薄膜 Gires-Tournois 光学全通滤波器的 3×2 马赫-曾德尔干涉

仪型波长交错器的传输特性;讨论了损耗、色散、Gires-Tournois 干涉仪中部分反射镜的反射系数、光纤定向耦合器的耦合角的偏差对器件性能的影响;提出一种 6 端口双向波长交错器的设计方案。

2 理论分析

3×2 马赫-曾德尔干涉仪型波长交错器由一个直线型 3×3 光纤定向耦合器 C1 和一个 2×2 光纤定向耦合器 C2 组成(图 1),C1、C2 的分束比分别为 1:0:1 和 1:1。在一个干涉臂内嵌入薄膜 Gires-Tournois 干涉仪形成反射式法布里-帕罗干涉仪光学全通滤波器,简记为 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器。单腔结构 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器(GTI-OAPF)由一个部分反射镜、一个间隔层和一个全反射镜构成。

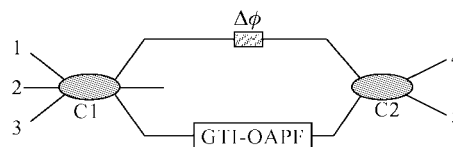


Fig. 1 MZI-Interleaver with GTI-OAPF inserted

假定光波信号仅从端口 2 注入, $a_1 = a_3 = 0$, $a_2 = 1$, 耦合器 C1 的三个输出端口(从上至下依次为 11、22、33)的归一化输出幅度由(1)式求得^[7,8]:

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{22} \\ a_{33} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} 0.5(1+m) & x & 0.5(m-1) \\ & x & m & x \\ 0.5(m-1) & x & 0.5(1+m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$a_{11} = a_{33} = k_1 x$, 式中 $m = (1 - k_r^2)^{1/2}$, $x = jk_r/\sqrt{2}$,

* 上海市教委青年基金(02AQ77)、上海市重点学科建设资金资助课题。

E-mail: mengyichao@sh163.net

收稿日期:2002-01-25; 收到修改稿日期:2002-08-28

$k_r = \sin \sqrt{2}\theta$, 耦合角 $\theta = kz$, k 和 z 分别表示定向耦合器的耦合系数和耦合长度。为了便于研究损耗的

影响, 引入参量 $k_i (i = 1, 2, 3, 4)$, 端口 4 和端口 5 的归一化输出幅度 a_4 和 a_5 由(2) 式求得:

$$\begin{bmatrix} a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = k_4 \begin{bmatrix} \cos \phi & j \sin \phi \\ j \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_2 \exp[j(\beta L_0 + \Delta\phi)] & 0 \\ 0 & k_3 \exp\{j[\beta(L_0 + \Delta L) + \xi]\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{33} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} a_4 &= k_1 k_4 x \left(k_2 \cos \phi \exp[j(\beta L_0 + \Delta\phi)] + j k_3 \sin \phi \exp\{j[\beta(L_0 + \Delta L) + \xi]\} \right) \\ a_5 &= k_1 k_4 x \left(j k_2 \sin \phi \exp[j(\beta L_0 + \Delta\phi)] + k_3 \cos \phi \exp\{j[\beta(L_0 + \Delta L) + \xi]\} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

相应的归一化输出功率用(4) 式表示, 后面的计算对 I_4 和 I_5 作 $10 \lg I_i$ 变换, 单位为 dB.

$$\left. \begin{aligned} I_4 &= (k_1 k_4 x)^2 [k_2^2 \cos^2 \phi + k_3^2 \sin^2 \phi + k_2 k_3 \sin 2\phi \sin(\Delta\phi - \beta\Delta L - \xi)] \\ I_5 &= (k_1 k_4 x)^2 [k_2^2 \sin^2 \phi + k_3^2 \cos^2 \phi - k_2 k_3 \sin 2\phi \sin(\Delta\phi - \beta\Delta L - \xi)]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\xi = \arg \{ [r + \exp(-j\varphi)] / [1 + r \exp(-j\varphi)] \}, \quad \varphi \approx 4\pi n d \cos \vartheta / \lambda, \quad (5)$$

(2)式~(5)式中各参量的物理意义: ϕ 为定向耦合器 C2 的耦合角, β 为单模光纤内基模的传播常量, L_0 和 $L_0 + \Delta L$ 为马赫-曾德尔干涉仪双干涉臂的几何长度, 不包括 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器, ξ 为光波通过 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器引入的附加相移, r 为 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器的部分反射镜的反射系数, φ 为光波在 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器谐振腔内的单程相移, d 为 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器的腔长, ϑ 为光波在 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器腔内的折射角, n 为 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器腔内介质的折射率, 本文采用石英玻璃作为腔内介质. 理想情况下, 不考虑损耗, 幅度透射系数 $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1$.

3 影响波长交错器传输特性的因素

在分析各种因素对波长交错器传输特性的影响之前, 先对衡量该器件特性的一个重要指标(隔离度)作一说明. 不同光子器件对隔离度有不同的定义, 例如隔离器和波分复用器^[9]. 文献[9]中定义波分复用器的隔离度

$$I_{\lambda_1} = -10 \lg \frac{P_{\lambda_1}^{[3]}}{P_{\lambda_1}^{[2]}} = 10 \lg P_{\lambda_1}^{[2]} - 10 \lg P_{\lambda_1}^{[3]},$$

波长为 λ_1 和 λ_2 的信号从端口 1 注入, 信号 λ_1 从端口 2 输出, 信号 λ_2 从端口 3 输出, 对信号 λ_1 来说, 端口 2 的输出 $P_{\lambda_1}^{[2]}$ 为信号功率, 端口 3 的输出 $P_{\lambda_1}^{[3]}$ 为串扰功率. 波长交错器作为一种特殊的波分复用器, 对端口 4 来说, 用 $\Delta = I_4 - I_5$ 表示隔离度与以上定义一致, 式中 I_4 和 I_5 表示归一化输出功率, 单位为 dB.

未归一化时, 如果输入功率为毫瓦, 则输出功率 I_4 和 I_5 取对数后单位用 dBm 表示.

3.1 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器中部分反射镜的反射系数的影响

当波导的折射率取 $n = 1.44404$ 时, 要得到自由谱范围 $R_{FS} = 100$ GHz 的波长交错器, Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器的腔长 $d = 2076.06 \mu\text{m}$, 马赫-曾德尔干涉仪的双干涉臂的几何长度差 $\Delta L = d$, 相位修正项 $\Delta\phi = \pi/2$. 当 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器的部分反射镜的幅度反射系数取值不同时, 功率传输谱不同, 计算结果如图 2 所示, 图中实线和虚线分别对应端口 4 和端口 5 的归一化输出功率.

由图 2 可知, 当其它参量选定后 ($k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1, \theta = 3.331 \text{ rad}, \phi = \frac{\pi}{4}, \vartheta = 0, d = 2076.06 \mu\text{m}, \Delta L$

$= d, \Delta\phi = \frac{\pi}{2}$), 影响该器件传输特性的主要因素是

Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器中部分反射镜的反射系数, 当等于 1 或 0 时, 即: 光波不经过 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器(相当于未嵌入 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器的马赫-曾德尔干涉仪), 或光波不在 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器内形成多次反射(一次全部通过), 该器件的传输特性与常规马赫-曾德尔干涉仪相同. 随着 r 的增大 ($r = 0.34$), 透射峰由抛物线变为平顶, 通带的边缘由缓和变陡峭, 相邻信道间的串扰特性得到改善. r 继续增大 ($r = 0.5$), 次峰增高, 通带边缘进一步变陡, 但隔离度降低. $r = 0.85$ 时器件的传输特性明显变差. 因此, 参量 r 的大小一定要选得合适.

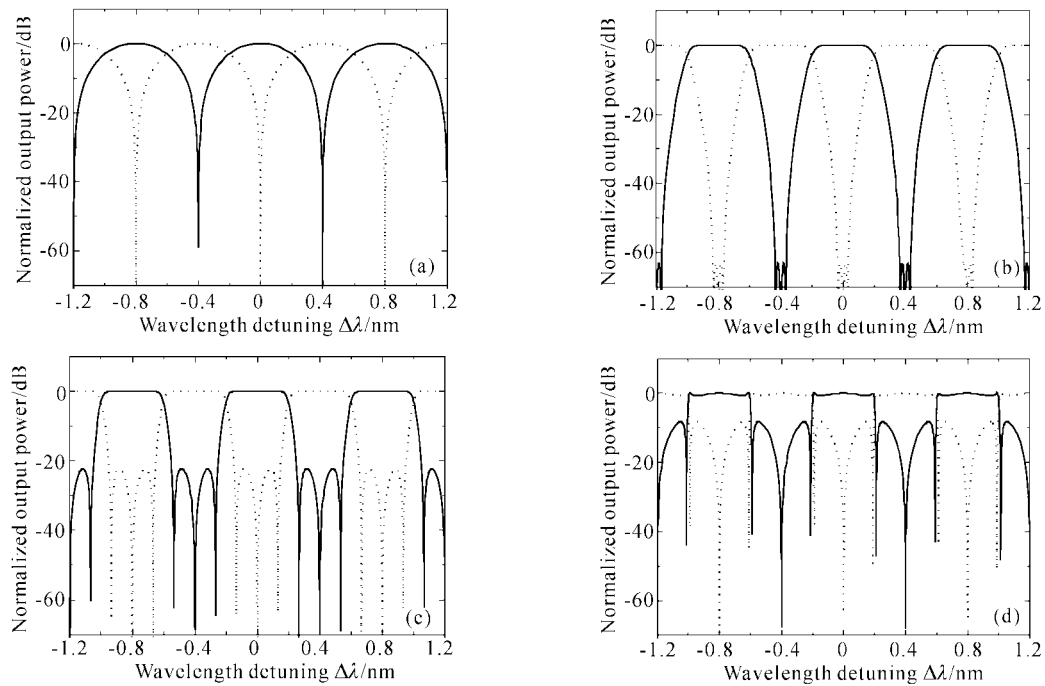


Fig. 2 Power transmission spectra of MZI-GTI-OAPF Interleaver for different r of the partial reflector in GTI-OAPF, normalized output power from port 4 (solid line) and port 5 (dash line), (a) $r=0$ or $r=1$; (b) $r=0.34$; (c) $r=0.5$; (d) $r=0.85$

3.2 损耗的影响

损耗包括传输损耗、插入损耗等,为了便于分析各种损耗对器件传输特性的影响,在公式中引入了

多个与波长无关的参量 k_i 。数值分析表明: k_2 和 k_3 影响器件的隔离度,两者相同时,设计波长 1548.51 nm附近的隔离度较大[如图 3(a)和 3(b)

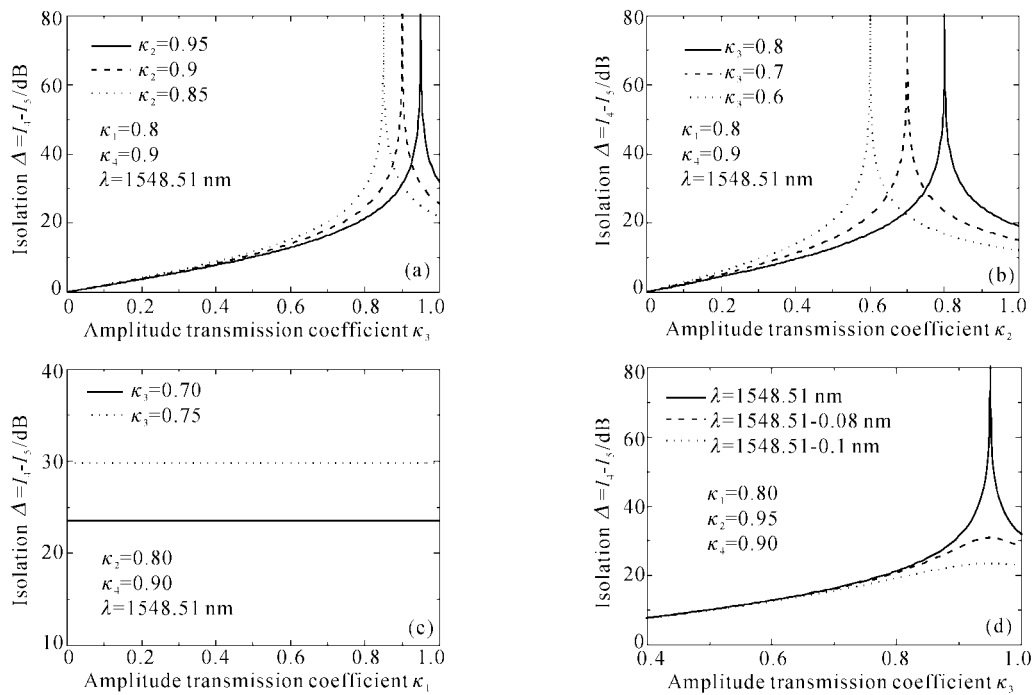


Fig. 3 Influence on the isolation degree of the interleaver by the following parameters considering loss. (a) k_3 , (b) k_2 , (c) k_1 or k_4 , (a)~(c) at wavelength 1548.51 nm, (d) for wavelengths detuning from 1548.51 nm

所示]。事实上,由于在马赫-曾德尔干涉仪的一个干涉臂内串入了薄膜 Gires-Tournois 光学全通滤波器,必然导致双干涉臂损耗的不同。损耗的差值越小,隔离度越高。一旦 k_2 和 k_3 确定, k_1 和 k_4 只会影响器件的透射率,这两个参量对端口 4 和端口 5 的影响相同,因此隔离度不变[如图 3(c)所示]。偏离中心波长时,隔离度随之降低[如图 3(d)所示]。

为了便于观察损耗对器件功率传输谱的影响,图 4(a)列出三种情况端口 4 和端口 5 的归一化输出功率谱, A(1, 1, 1, 1), B(0.8, 0.95, 0.7, 0.9),

C(0.8, 0.95, 0.5, 0.9), 括号中的 4 个参量依次表示 k_1, k_2, k_3 和 k_4 。A₁、B₁ 和 C₁ 代表端口 4 的输出, A₂、B₂ 和 C₂ 代表端口 5 的输出。

对于波长交错器,理想情况下端口 4 和端口 5 的输出应为两组互补的周期性方波。通带和阻带的带宽近似相等、通带边缘陡峭是对该器件功率传输谱的理想要求。图 4(b)作为隔离度曲线清晰地表明了隔离度和相应带宽的关系,间接反映了以上要求。图 4(b)中纵坐标的单位为 dB,横坐标轴的中心对应波长为 1548.51 nm。

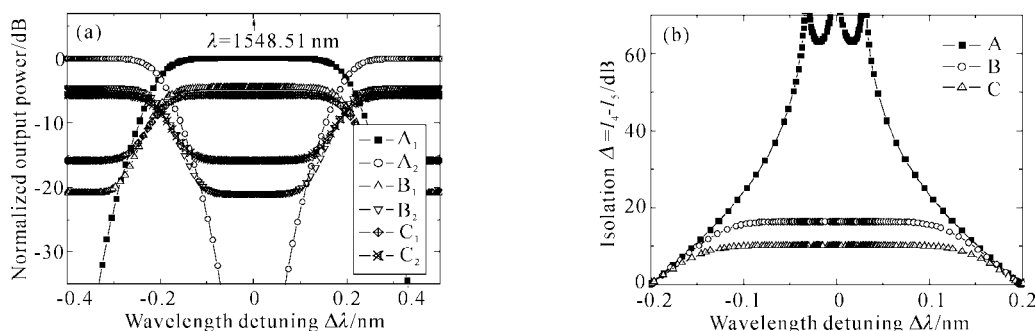


Fig. 4 Transmission spectra and isolation degree of the interleaver for different parameters (k_1, k_2, k_3, k_4). A(1, 1, 1, 1), B(0.8, 0.95, 0.7, 0.9), C(0.8, 0.95, 0.5, 0.9). In Fig. 4(a), A₁, B₁ and C₁ represent normalized output power from Port 4; A₂, B₂ and C₂ represent normalized output power from Port 5. In Fig. 4(b), the isolation degree is $\Delta = I_4 - I_5$ (unit of I_4 and I_5 : dB)

3.3 光纤定向耦合器的分束比对器件传输特性的影响

理想状态下,直线型 3×3 光纤定向耦合器和 2×2 光纤定向耦合器的耦合角分别等于 3.331 rad 和 π/4 时,耦合器的分束比分别等于 1:0:1 和 1:1。由于工艺条件等原因,分束比的实测值与期望值之间往往有偏差,该偏差对波长交错器传输特性的影

响如图 5 所示。图 5(a)表明:随着光纤定向耦合器的耦合角与理想值的偏差的增大,中心波长 1548.51 nm 处的透射率降低。图 5(b)表明:两个定向耦合器的耦合角与理想值的偏差均较大时,主峰降低,次峰增大,隔离度相应减小。偏差达到一定程度(曲线 D)已经失去意义。因此,研制器件时各参量的误差范围的控制非常关键。

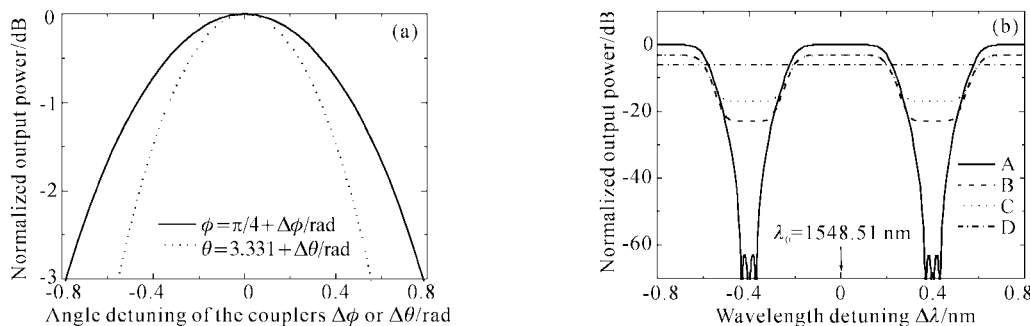


Fig. 5 Influence on the transmission characteristics of the interleaver by the detuning of the fiber couplers' coupling angles from ideal values. (a) Port 4 at $\lambda = 1548.5$ nm; (b) Port 4, ($\Delta\theta, \Delta\phi$), A(0, 0), B(-0.55, 0.1), C(-0.55, 0.2), D(-0.55, -0.78) (unit: rad)

3.4 材料色散对器件传输特性的影响

常规单模通信光纤由石英介质构成,在不考虑

温度的影响时,其折射率随波长的变化用以下 Sellmeier 公式表示:

$$n = \left(1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - B_i} \right)^{1/2},$$

$$A_1 = 0.6961663, \quad B_1 = 0.0684043,$$

$$A_2 = 0.4079426, \quad B_2 = 0.1162414,$$

$$A_3 = 0.8974794, \quad B_3 = 9.8961610,$$

式中, 波长 λ 的单位 μm 。色散的影响主要体现在: 相邻透射峰的间隔(自由谱范围)随波长变化, 当某

个 ITU 标准信道与透射峰的中心完全对准时, 远离该波长的信道与相应透射峰的中心发生偏离如图 6(a)所示。当信道 1548.51 nm(设计波长)与透射峰对准, 不考虑材料色散, 信道 1560.61 nm 基本位于透射峰的中心, 考虑材料色散, 则偏离约 0.16 nm, 如图 6(b)所示。

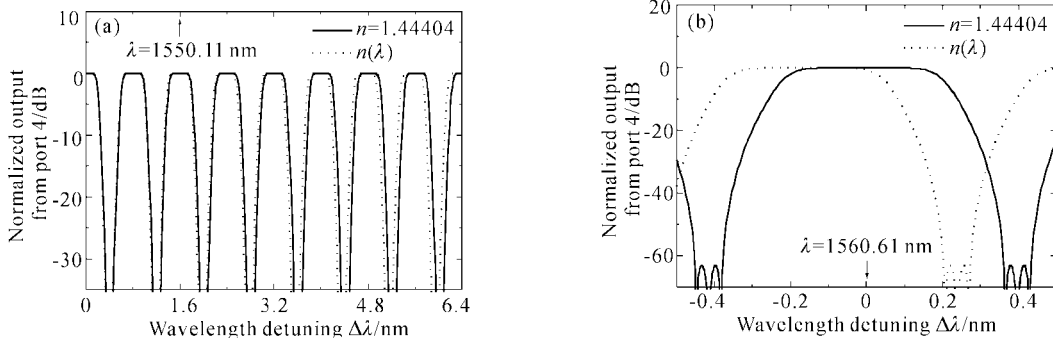


Fig. 6 Influence on the transmission spectrum of the interleaver at output port 4 by chromatic dispersion

4 六端口双向马赫-曾德尔干涉仪 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器型波长交错器的结构及其应用

在前面讨论的基础上, 本文提出一种新型双向马赫-曾德尔干涉仪型波长交错器, 结构如图 7 所示, 若光波从端口 1 注入, 则从端口 3 和 4 输出; 若光波从端口 2 注入, 则从端口 5 和 6 输出。在结构

上它相当于两个 3×2 马赫-曾德尔干涉仪共用一个 3×3 光纤定向耦合器, 两个 3×2 马赫-曾德尔干涉仪的设计不受限制, 可以针对相同信道间隔, 也可以针对不同信道间隔, 透射峰的中心与某一标准信道波长的最佳匹配的调节也是相互独立的。为了减小后向反射的影响, 端口 1 和端口 2 可以串接隔离器。如果用多端口光环行器替代光隔离器, 该器件还具有信道监测功能。该器件有望在双向光放大模块, 双向光分插复用(OADM)节点, 以及双向传输光纤城域网中得到应用。

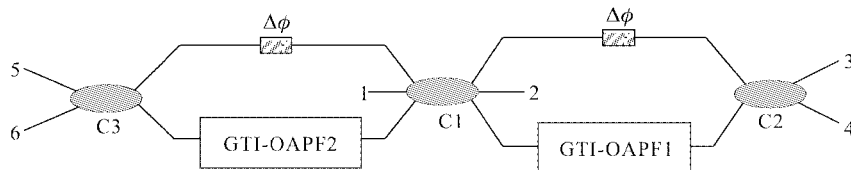


Fig. 7 Schematic of six-port bi-directional interleaver based on two 3×2 MZI with GTI-OAPF

结论 通过以上数值计算和分析, 得到以下结论:

1) 光学全通滤波器可以用来改善马赫-曾德尔干涉仪型波长交错器的传输特性。

2) 采用 3×3 光纤定向耦合器, 带来工艺上的方便和结构上的灵活性。本文提出的共用一个 3×3 光纤定向耦合器、6 端口双向波长交错器就体现了这一点。必须指出的是, 它破坏了常规马赫-曾德尔干涉仪的光路互易性, 因此该器件只能用来分波, 不能用来合波。

3) Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波

器中部分反射镜的反射系数影响传输谱的形状, 反射系数接近 $1/3$ 时, 传输谱的通带平坦, 且器件的隔离度高。Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器的设计以及 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器和马赫-曾德尔干涉仪干涉臂的耦合是关键之一。

4) 耦合器的耦合角的选择要适中, 与理想值的偏差不宜过大。宽带光纤耦合器的研制是关键之二。

5) 材料色散影响波长信道与透射峰的中心的对准。采用色散位移光纤, 还应考虑波导色散的影响。

6) 损耗的影响不容忽视, 双干涉臂的损耗的偏差是导致器件隔离度降低的一个主要原因。

两点说明: 本文在理论分析时, 已假定马赫-曾德尔干涉仪的单臂中嵌入了单个 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器, Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器的谐振腔用石英介质构成(与光纤相同), 光波垂直入射, 这样简化了设计模型。其实可以采用多个 Gires-Tournois 薄膜干涉仪光学全通滤波器合理串接, 谐振腔可以用空气替代石英介质, 光波也可以斜入射。宽带光纤定向耦合器的研制可以采用预熔锥技术。

本文的数值计算和分析针对的是光纤波导, 由于光纤环的直径不宜过小(cm 量级), 因此, 本文采用了薄膜 Gires-Tournois 干涉仪型光学全通滤波器。若采用相对折射率差较大的平面波导(例如 $\Delta n = 1.5\%$, 有效折射率 $n > 3$), 器件的尺寸会大幅度减小, 平面波导型波长交错器中采用环形腔结构光学全通滤波器更合适。此外, 该器件的温度稳定性, 嵌入光学全通滤波器的 $N \times N$ 马赫-曾德尔干涉仪型密集波分解复用器的优化设计有待深入研究。采用大分束比光纤定向耦合器的全光纤结构马赫-曾德尔干涉仪型波长交错器将会对该方案构成挑战, 它面临着以下技术难点: 连续熔拉分束比不同的宽带光纤耦合器, 各干涉仪的双干涉臂光程差的调整, 大分束比光纤耦合器不同输出端口偏振损耗的差别较大等。

参 考 文 献

- 1 Chiba T, Arai H, Ohira K *et al.*. Novel Architecture of wavelength interleaving filter with fourier transform-based MZIs. OFC '2001, WB5
- 2 Tai K, Chang B, Chen J *et al.*. Wavelength-interleaving bi-directional circulators. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(4):320~322
- 3 Dingel B B, Izutsu M. Multifunction optical filter with a Michelson-Gires-Tournois interferometer for wavelength-division multiplexed network system applications. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(14):1099~1101
- 4 Lenz G, Madsen C K. General optical all-pass filter structures for dispersion control in WDM systems. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7):1248~1254
- 5 Oda K, Takato N, Toba H *et al.*. A wide-band guided-wave periodic multi/demultiplexer with a ring resonator for optical FDM transmission systems. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6):1016~1023
- 6 Kohtoku M, Oku S, Kadota Y *et al.*. 200 GHz FSR periodic multi/demultiplexer with flattened transmission and rejection band by using a Mach-Zehnder interferometer with a ring resonator. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9):1174~1176
- 7 Chew Y H, Tjhung T T, Mendis F V C. Performance of single- and Double-ring resonators using 3×3 optical fiber coupler. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(12):1998~2008
- 8 Huang Yong, Zeng Qingji. Analysis of coupling characteristics of three fused-biconical planar optical fibers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(8):847~853 (in Chinese)
- 9 Zhang Jinsong, Tao Zhiyong, Yun Xiang. *Optical Wavelength-Division-Multiplexing Techniques* (光波分复用技术). Beijing University of Posts and Telecommunications Press, July 2002. 144, 213 (in Chinese)

Transmission Characteristics of Interleaver Based on Mach-Zehnder Interferometer with Optical All Pass Filter Inserted

Meng Yichao^{1,2} Huang Zhaoming² Wang Lutang²

(¹ Institute of Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 201800

² School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

(Received 25 January 2002; revised 28 August 2002)

Abstract: A novel design for DWDM interface device interleaver is proposed and discussed, which is composed by 3×2 Mach-Zehnder interferometer with thin film Gires-Tournois interferometer type optical all pass filter (GTI-OAPF) inserted. Influences on its transmission characteristics by such factors as the reflection coefficient of the partial reflector in the GTI-OAPF, detuning of the coupling angles of the directional fiber couplers from ideal values, chromatic dispersion and various losses are numerically analyzed in detail. At last, a novel six-port bi-directional interleaver, which will be used in bi-directional multi-function photonic module and bi-directional WDM transmission system is proposed as well.

Key words: guiding wave optics; interleaver; optical all pass filter (OAPF); Mach-Zehnder interferometer (MZI); fiber directional coupler