

# 光纤马赫-陈德尔干涉型 8 波分 超窄波分复用器的研制

姚寿铨 陈凯旋\*

(上海大学光纤研究所, 上海 201800)

**摘 要** 报道了采用 7 个单模光纤马赫-陈德尔(Mach-Zehnder)干涉仪进行三级串联而组成的 8 波分复用器, 既保留了干涉型光纤波分复用器超窄波分复用间隔的优点, 又消除了其复用路数少的缺点。文中介绍了这类波分复用器的原理、设计方法和制造技术。实验样品的使用波段为 1.5  $\mu\text{m}$ , 波长复用间隔为 2.4 nm, 整个器件的附加损耗约为 1.5 dB。

**关键词** 马赫-陈德尔干涉仪, 光纤波分复用器, 单模光纤耦合器。

## 1 引 言

光波分复用技术是将多路光信号以不同的波长同时在一根单模光纤中传输。波分复用的光通信系统具有增加每根光纤的传输容量、减少系统建造的费用、兼容不同信号调制的制式以及在现有光缆线路上实现扩容等优点<sup>[1]</sup>。特别是 1.5  $\mu\text{m}$  波段的光放大器商品化以来, 人们更迫切希望在光放大器具有的(30~40) nm 带宽内实现多路窄波分复用, 窄波分复用的波长间隔目前一般公认为 1.6 nm 和 2.4 nm 两档。因此作为窄波分复用的关键器件——光纤窄波分复用器的研究是当今的一个迫切的课题。

目前波分复用器的形式有许多种类<sup>[1]</sup>, 如有源的和无源的, 波长选择和非波长选择的(如偏振选择等)。其中最简单和常见的形式是无源光波分复用器。角度色散器件就是目前较多采用的一种<sup>[1]</sup>, 它是利用棱镜或光栅的角度色散特性将不同波长的光投射到安放在不同位置的光纤端面上去, 其优点是结构紧凑, 并可应用于数量很大的多路信道, 但是由于单模光纤芯径很细, 所以不易获得足够的波长带宽, 附加损耗也较大(4 dB 以上)。另一种是熔锥形全光纤波分复用器, 它是利用两种不同波长的光波在两根光纤的熔锥中传播时具有不同的传播常数  $\beta$ , 并使得它们的  $\Delta\beta$  和熔锥耦合区长度的乘积正好等于  $\pi$  来实现波长分离的。这种熔锥型波分复用器的优点是附加损耗小(约 0.5 dB), 缺点是分离波长间隔不能很窄, 在制作时复用波长不能任意连续调节, 且只能实现两波分复用。目前已有售品的 1310 nm/1550 nm 的波分复用器就属这种类型。虽然超长熔锥区的这类器件的波长复用间隔可以做得稍窄(约 20 nm), 但此时光纤熔锥的腰区直径非常细(约 11  $\mu\text{m}$ )<sup>[2, 3]</sup>, 使得本来就很脆弱的光纤更易

\* 上海大学实验室管理处, 上海 201800。

收稿日期: 1998-02-23; 收到修改稿日期: 1998-05-06

折断，另一方面由于其太细，腰部的振动稳定性极差而使得复用波长很不稳定，所以很难实际应用。1994 年 Bures 提出采用单模光纤马赫-陈德尔干涉仪作为波分复用器，其波长复用间隔可以小到 1 nm 左右<sup>[4]</sup>。事实上，采用光纤马赫-陈德尔干涉仪作为波分复用器时，其复用波长的间隔仅仅取决于两条干涉臂之间的长度差，即复用波长间隔可以做到任意小。而能否做好此类器件的关键在于两条光纤干涉臂中的相干光在传播时其偏振态能否保持完全一致。Inoue 等人早在 1988 年就采用集成光波导型的马赫-陈德尔干涉仪制成带宽为 5 GHz(复用波长间隔为 0.04 nm)的波导型频分复用器<sup>[5]</sup>，其两条干涉臂的长度之差为 2.04 cm。当然由于光源的稳定性等诸多原因，复用波长间隔这样窄的器件在光波分复用技术中很难实际应用。

本文采用 7 个马赫-陈德尔干涉仪进行 3 级串联而成 8 波分复用器，这样克服了单个马赫-陈德尔干涉仪只能进行两波分复用的缺点。该实验样品的使用波段为 1.55 μm，波长复用间隔为 2.4 nm，插入损耗约为 1.5 dB。这类器件在未来的光通信领域内是很有前景的。

## 2 马赫-陈德尔干涉型多波分复用器的基本原理

图 1 是单模光纤马赫-陈德尔干涉仪的示意图，它是在两条相同的单模光纤上连续熔拉 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 两个耦合器而成的。它的耦合模理论分析以及当耦合器 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 具有不同分光比时的干涉特性可参阅文献[6]。当单模光纤耦合器 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 的分光比都是 1:1、且两条干涉臂 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 之间存在长度差 ΔL 时，干涉仪输出端口 3 和 4 的波长传输特性如图 2 所示。

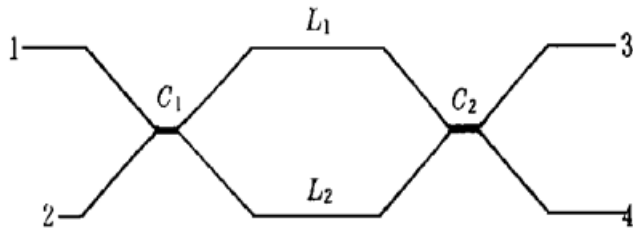


Fig. 1 Schematic diagram of fiber Mach-Zehnder interferometric WDM

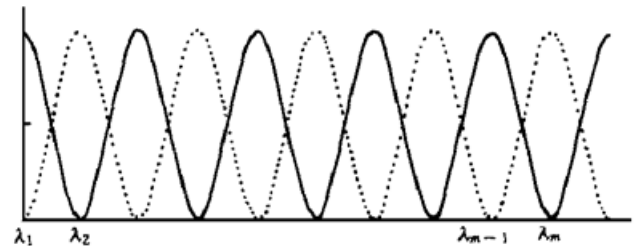


Fig. 2 Transmission variation with wavelength for an individual fiber M-Z interferometric WDM

λ<sub>1</sub>、λ<sub>2</sub> 和 ΔL 的关系可表示为:

$$k\lambda_1 = (k - 1/2)\lambda_2 = n\Delta L \tag{1}$$

其中 n 为单模光纤的等效折射率，n ≈ 1.5；λ<sub>2</sub> = λ<sub>1</sub> + Δλ；Δλ 为该干涉仪波分复用的波长间隔；k 为 1/2 的整数倍。由(1)式可得:

$$k = \frac{\lambda_1}{2\Delta\lambda} + \frac{1}{2} \tag{2}$$

$$\Delta L = \frac{\lambda_1}{3} \left( \frac{\lambda_1}{\Delta\lambda} + 1 \right) \tag{3}$$

由于在单模光纤耦合器中耦合臂输出的光波比直通臂输出的光波落后 π/2，当 λ<sub>1</sub>/2Δλ 为整数，即 k = 1/2 的奇数倍时，光波从图 1 中的 1 端口输入，其 3 端口的波长特性对应于图 2 中的实线部分，4 端口的波长特性对应于图 2 中的虚线部分。当 λ<sub>1</sub>、Δλ 和 ΔL 都确定后，在图 2 中的 λ<sub>m</sub> 处(m = 3, 4, 5……)，并令 λ<sub>m</sub> = λ<sub>1</sub> + Δλ<sub>m</sub>，则有:

$$k\lambda_1 = \left( k - \frac{m-1}{2} \right) \lambda_m$$

经计算, 有

$$\Delta\lambda_m = \frac{\lambda_1(m-1)\Delta\lambda}{\lambda_1 - (m-2)\Delta\lambda}$$

当  $m$  不很大, 且  $\Delta\lambda \ll \lambda_1$  时, 上式可近似为

$$\Delta\lambda_m \approx (m-1)\Delta\lambda \tag{4}$$

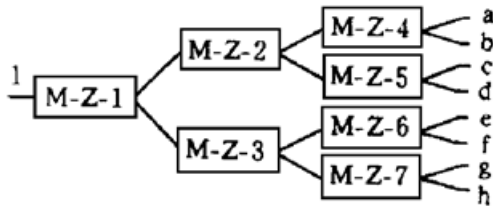


Fig. 3 Block diagram of a 8-channel fiber M-Z interferometric WDM

(4) 式表示当  $m$  不很大时,  $\lambda_m$  和  $\lambda_{m-1}$  之间波分复用的波长间隔都近似于  $\Delta\lambda$ 。例如当  $\lambda_1 = 1530$  nm,  $\Delta\lambda = 2.4$  nm,  $m = 8$  时,  $\lambda_8 - \lambda_7 = 2.45$  nm。所以第一个波长的复用间隔和最后一个波长的复用间隔仅相差 0.05 nm, 误差为 2%。利用 (3) 式并考虑 (4) 式就可以设计出多个具有不同  $\Delta L$  的马赫-陈德尔干涉仪来组成一个单模光纤多波分复用器。

图3是用7个单模光纤马赫-陈德尔干涉仪连接成一个8波分复用器的方框图, 其复用波长范围为(1530~1546.8) nm, 复用波长间隔为2.4 nm, 它的各个马赫-陈德尔干涉仪的参数见表1。单个干涉仪1、2、4的第3端口输出的波长特性以及它们三个串联起来的输出的特性如图4所示。整个波分复用器的复用中心波长与图3中输出端口对应表列于表2。

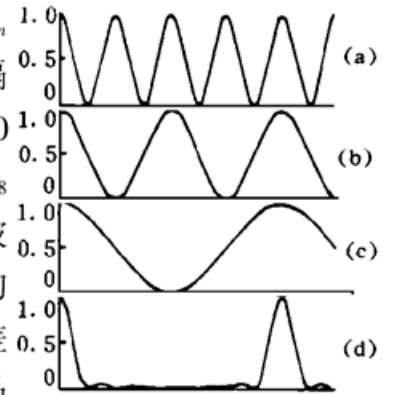


Fig. 4 Transmission variation with wavelength for a 3 stage cascaded fiber M-Z interferometric WDM. (a) M-Z-1, (b) M-Z-2, (c) M-Z-4, (d) Cascaded by M-Z-1, M-Z-2 and M-Z-4

Table 1. The designing parameters of a 8-channel fiber M-Z interferometric WDM

M-Z	$\lambda_1$ /nm	$\Delta\lambda$ /nm	$\Delta L$ / $\mu\text{m}$	M-Z	$\lambda_1$ /nm	$\Delta\lambda$ /nm	$\Delta L$ / $\mu\text{m}$
1	1530.0	2.4	325.6	5	1534.8	9.6	82.3
2	1530.0	4.8	163.1	6	1532.4	9.6	82.0
3	1532.4	4.8	163.6	7	1537.2	9.6	82.5
4	1530.0	9.6	81.8				

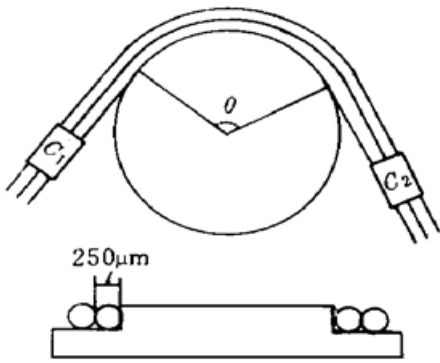
Table 2. Wavelength of signals going out from every channel of the 8-channel fiber M-Z interferometric WDM

exit	a	b	c	d	e	f	g	h
multiple wavelength/nm	1530.0	1539.6	1534.8	1544.4	1532.4	1542.0	1537.2	1546.8

### 3 马赫-陈德尔干涉仪的制造方法

实验样品采用美国康宁公司 SMF-28™ 单模光纤制作的。光纤的截止波长  $\lambda_c < 1.3 \mu\text{m}$ , 外径  $125 \mu\text{m}$ , 芯径  $2a = 9.3 \mu\text{m}$ , 涂敷层直径  $250 \mu\text{m}$ 。干涉仪中  $C_1$  是分光比为 1:0.1 的  $1 \times 3$  耦合器,  $C_2$  是分光比为 1:1 的  $2 \times 2$  耦合器。采用这样两个耦合器解决了在连续熔融拉伸两个耦合器来组成马赫-陈德尔干涉仪的过程中由于干涉的作用而无法实际监视光功率来控制第二个耦合器的分光比的问题<sup>[7]</sup>。

在实际制作中两条干涉臂之间的长度差  $\Delta L$  的确定方法如图 5 所示。在一块平面基板上粘上一块圆型薄片, 圆型薄片的边缘刻有 360 等分的刻度, 用透明胶纸把已制作好的分光比为 1:1 的  $C_2$  耦合器平粘在平面基板上, 把  $C_2$  一端的两条输出光纤臂紧密平行地沿圆型薄片



的边缘平绕一角度  $\theta$ ，当采用光纤的涂敷层直径为  $250 \mu\text{m}$  时，容易得出  $\theta$  和  $\Delta L$  的关系为

$$\theta = \frac{360}{500\pi} \Delta L$$

然后在这两条光纤上制作另一个耦合器  $C_1$ 。为了尽量测准  $\theta$ ，可以在基板上预先作两条圆型薄片的切线，使之相切于  $\theta$  角两条边与圆薄片边缘的交点。这样只要使平绕  $\theta$  角的两边的光纤臂分别和两条切线重合，就能比较正确地得到  $\Delta L$ 。 $C_1$  耦合器完成后，连同已完成的  $C_2$  耦合器一起用环氧胶固定在条型石英基片上。为了提高器件的稳定性，干涉仪 1 器件的两条干涉臂也用环氧胶固定在石英基片上，而其它 6 个干涉仪的两臂却不能胶死，这是为了在其干涉臂上粘上压电陶瓷，用电调压电陶瓷伸缩来修补各自的  $\Delta L$ ，使其能与干涉仪 1 的复用中心波长对准。把分别制作好的 7 个马赫-陈德尔干涉仪用单模光纤焊接机如图 3 焊接好，就成了一个 8 波分复用器。

Fig. 5 The sketch of determining every small  $\Delta L$  for a M-Z interferometer

### 4 实验结果与讨论

图 6 是用钨卤素灯作为白光光源，通过单色仪对马赫-陈德尔干涉型 8 波分复用器实验样品测试得到的输出特性曲线。8 条曲线分别对应于图 3 中 a~ h 的 8 个输出端口。单色仪的入射狭缝为  $0.1 \text{ mm}$ ，出射狭缝为  $0.02 \text{ mm}$ 。图 7 是采用安立公司生产的 MS9701B 型光谱仪测得的该样品单个输出端口的特性图(光谱仪的分辨率为  $0.2 \text{ nm}$ )，图中 A 线为  $1.53144 \mu\text{m}$ ，B 线为  $1.53380 \mu\text{m}$ ，二线间隔为  $2.36 \text{ nm}$ ，所以图中 3 dB 带宽为  $2.36 \text{ nm}$ ，与设计要求  $2.4 \text{ nm}$  基本相符。该器件的附加损耗是在器件的 8 个输出端口所对应的波长上用截断法分别对 8 个输出端口测得的附加损耗的平均值，其数值约  $1.5 \text{ dB}$ 。

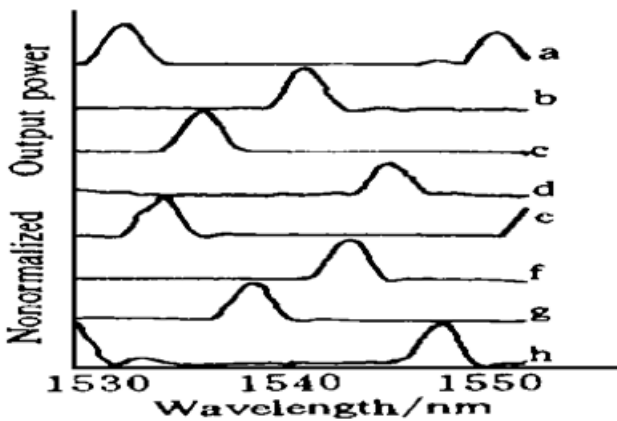


Fig. 6 Measured transmission of every channel for a WDM sample by using a monochromator as a wavelength scanning source

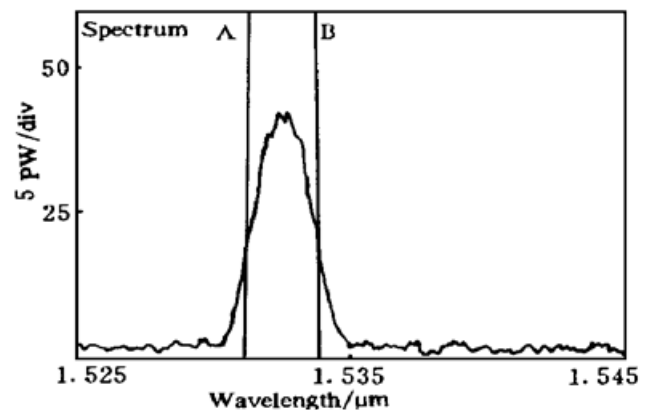


Fig. 7 Measured transmission of a channel for the WDM sample by using a spectrometer

器件的温度稳定性主要取决于马赫-陈德尔干涉仪两干涉臂的光程差  $n\Delta L$  的稳定性<sup>[6]</sup>，它可表示为

$$\frac{d}{dt}(n\Delta L) = \left[ \frac{dn}{dt} + \frac{n}{\Delta L} \frac{d\Delta L}{dt} \right] \Delta L$$

式中  $dn/dt \approx 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$  为光纤折射率的温度系数;  $(1/\Delta L) d\Delta L/dt \approx 5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$  为石英光纤的温度系数。并从式中可以看出器件的稳定性和  $\Delta L$  成正比。本实验样品中, 干涉仪 1 的  $\Delta L = 325.6 \mu\text{m}$  为最大, 把这些数据代入上式, 可得干涉仪 1 的相位温度系数:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{dt}(n\Delta L) = 0.014 \text{ rad}/^\circ\text{C}$$

由此可以看出在室温的变化范围内器件还是能比较稳定地工作。干涉仪 2~ 7 的  $\Delta L$  要短些, 它们的稳定性就会更好些。实验时由于串联各级的马赫-陈德尔干涉仪的  $\Delta L$  在制作时存在一定的误差而使得各级干涉极大的中心波长对得不准, 为此在光纤臂上粘贴压电陶瓷进行调正<sup>[6]</sup>, 但此时由于压电陶瓷与石英光纤的温度系数不一致, 因此整个器件的温度稳定性会下降些。若采用紫外激光照射局部光纤臂, 使得局部光纤臂永久地改变折射率来达到修正  $n\Delta L$  的目的, 则器件的稳定性会好些。

本器件由于采用三级马赫-陈德尔干涉仪串联而成, 它们的中心波长对准度总存在误差, 所以它的波长隔离度不会很高, 按照图 7 估计, 隔离度约十几分贝, 这样用于合波器是完全可以的, 但用于分波器时需在输出端口串接上对应波长的光纤光栅滤波器才能达到理想的交调指标。

总之, 采用 7 个单模光纤马赫-陈德尔干涉仪组合成了波长复用间隔为 2.4 nm、附加损耗为 1.5 dB 光纤 8 波分复用器。这种波分复用器的波长复用间隔仅仅取决于两干涉臂的光程差  $n\Delta L$ 。所以波长复用间隔是可以任意设计制作的。与角度色散型波分复用器相比, 它具有较小的附加损耗和较大的使用波长带宽, 并且制造工艺也较简单; 与熔锥型波分复用器相比, 如此窄的复用波长间隔是熔锥型所达不到的, 且熔锥型的复用波长间隔是不可以任意连续调节的。因此, 马赫-陈德尔干涉型波分复用器是一个未来前景非常看好的超窄波分复用器。

本文在测量实验中得到本校王子华老师、罗祺禄老师、王春华老师和李郁老师的大力帮助, 在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] H. Ishio, J. Minowa, K. Nosu, Review and status of wavelength-division multiplexing technology and its application. *J. Lightwave Technology*, 1984, **2**(4): 448~ 463
- [2] O. Parriaux, F. Bernoux, G. Chartier, Wavelength selective distribution coupling between single-mode optical fiber for multiplexing. *J. Opt. Commun.*, 1981, **2**(2): 105~ 109
- [3] M. N. Melandrich, R. J. Orazi, H. R. Marlin, Polarization independent narrow channel wavelength division multiplexing fiber couplers for 1.55  $\mu\text{m}$ . *J. Lightwave Technology*, 1991, **9**(4): 442~ 447
- [4] J. Burns, All-fiber dense wavelength division multiplexers. *Proc. SPIE*, 1994, **2321**: 455~ 459
- [5] K. Inoue, N. Takato, H. Toba *et al.*, A four-channel optical waveguide multi/demultiplexer for 5-GHz spaced optical FDM transmission. *J. Lightwave Technology*, 1988, **6**(2): 339~ 345
- [6] 吴芳, 黄肇明, 姚寿铨, 光纤干涉型波分复用器件的研究. *光学学报*, 1996, **16**(5): 683~ 687
- [7] 姚寿铨, 王子华, 高性能三端口全光纤开关. *光学学报*, 1998, **18**(6): 779~ 782

## A 8-Channel Fiber Mach-Zehnder Interferometric Super Narrow Spacing Wavelength-Division-Multiplexer

Yao Shouquan      Chen Kaixuan

(*Institute of Optical Fiber, Shanghai University, Jiading, Shanghai 201800*)

(Received 23 February 1998; revised 6 May 1998)

**Abstract** A 8-channel wavelength-division-multiplexer (WDM) has been fabricated by using 3-stage cascaded 7 single-mode fiber Mach-Zehnder interferometers. The device not only keeps the merit of super narrow-wavelength spacing but also eliminates the drawback of channel number limit for an individual Mach-Zehnder interferometric WDM. The principles, design considerations and manufacture techniques are described. The experimental sample tested offers 2.4 nm wavelength division spacing and 1.5 dB total insertion loss at 1.5  $\mu\text{m}$  working wavelength.

**Key words** Mach-Zehnder interferometer, wavelength-division-multiplexer, single-mode fiber couplers.