

用三干涉臂马赫-曾德尔干涉仪制成的 光纤密集型波分复用器*

姚寿铨 王子华

(上海大学光纤研究所, 上海 201800)

摘 要 提出一种新型的光纤干涉仪, 它是采用二个 3×3 单模光纤耦合器组成三光纤系统的马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪, 当干涉仪的三条光纤干涉臂两两之间分别存在长度差 ΔL 和 $2\Delta L$ 时, 干涉仪形成了一个波分复用间隔相等的三波分复用器, 波分复用的波长间隔仅仅取决于 ΔL 的大小。实验样品的使用波段为 $1.55 \mu\text{m}$, 波长复用间隔为 1.6 nm , 附加损耗为 0.6 dB 。

关键词 单模光纤耦合器, 马赫-曾德尔干涉仪, 光纤密集型波分复用器。

1 引 言

光纤密集型多波分复用是实现信息高速公路的关键技术之一, 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 $30 \sim 40 \text{ nm}$ 带宽范围内实现多波分复用, 目前国际上已一致公认多波分复用的波长间隔为 0.8 nm 的整数倍。现在最常见的光纤密集型多波分复用器有角度色散型和马赫-曾德尔干涉型两类, 而马赫-曾德尔干涉型又可分为平面光波导型和全光纤型。角度色散型波分复用器是利用棱镜或光栅的角度色散特性将不同波长的光色散以后投射到安放在不同位置上的光纤端面上去^[1], 其优点是结构紧凑, 可应用于 $1 \times N$ 路通道的波分复用, 但是由于单模光纤的芯径很细, 所以不易获得足够的波长带宽, 附加损耗也较大($4 \sim 8 \text{ dB}$), 目前此类器件国外已有售品, 但价格昂贵。平面波导马赫-曾德尔干涉型器件目前大多是在硅基片上蒸发, 光刻上介质波导而成的。Vellekoop 等人^[2]在 1991 年就报道了 1×4 平面波导干涉型分波器, 其使用波段为 780 nm , 波长间隔为 1.55 nm , 在不计入输入光纤和输出光纤与之连接的损耗时, 其 1 和 4 通道的附加损耗为 2.26 dB ; 2 和 3 通道的附加损耗为 0.25 dB ; 隔离度为 45 dB 。Zirngibl 等人^[3]在 1993 年报道了 8×8 平面波导马赫-曾德尔干涉型波分复用器, 其使用波段为 $1.55 \mu\text{m}$, 波长复用间隔为 0.71 nm , 在不计入输入和输出光纤与之连接的损耗时, 其每个通道的附加损耗均为 5 dB , 隔离度为 20 dB , 整个器件放在恒温容器内。Takahashi 等人^[4]在 1995 年报道了 16×16 平面光波导马赫-曾德尔干涉型波分复用器, 其波长复用间隔为 0.8 nm , 包括输入、输出光纤与之连接的损耗在内的总的附加损耗为 5 dB , 隔离度为 30 dB , 整个器件放在恒温容器内。我们早些时候曾经用 7

* 上海市科学技术委员会基金项目(99JC14004)。

收稿日期: 1999-05-24; 收到修改稿日期: 1999-09-06

个单模光纤马赫-曾德尔干涉仪进行三级串连而制成 1×8 全光纤波分复用器^[5], 其使用波段为 $1.55 \mu\text{m}$, 波分复用间隔为 2.4 nm , 附加损耗为 1.5 dB 。综上所述, 角度色散型器件由于经色散后的光波要重新注入单模光纤, 所以其附加损耗较大 ($4 \sim 8 \text{ dB}$), 它的隔离度较高 ($25 \sim 55 \text{ dB}$); 平面波导干涉型器件能做成 $N \times N$ 型, 它除了具有波分复用的功能外, 在进行适当的连接后还能在网络上实现指定波长的上下线功能, 即 add/drop 功能以及网络路由器 (router) 功能。它由于存在和输入、输出光纤接接的损耗, 所以附加损耗也较大 (5 dB 以上), 其隔离度较高 ($20 \sim 45 \text{ dB}$); 全光纤干涉型器件由于每一级中心波长对准存在误差, 所以其隔离度不够高 (约 15 dB 左右), 附加损耗较小 (小于 1.5 dB), 其工艺要比其他两种器件简单得多, 它特别适用于对隔离度没有要求的合波器, 若用于分波器则需串接上光纤滤波器, 幸好目前光纤光栅滤波器能满足这一要求。所以预计在今后的信息高速公路网络中这三种器件都能发挥自己的特色, 在最合适的地方得到应用。

本文提出采用两个 3×3 单模光纤耦合器组成一个三光纤系统的马赫-曾德尔干涉仪, 这种具有三条光纤干涉臂的一个干涉仪就能进行三波分复用, 若采用 4 个这样的干涉仪进行二级串连就能实现 9 波分复用, 这样在实现同样信道数的波分复用时, 在工艺和结构上比用二光纤系统组成的器件更简单。

2 三光纤臂的马赫-曾德尔干涉型波分复用器的基本原理

三光纤臂的马赫-曾德尔干涉仪如图 1 所示。它是在三条相同的单模光纤上连续熔拉 C_1 和 C_2 二个 3×3 单模光纤耦合器而成的, C_1 、 C_2 耦合器的分光比均为 $1:1:1$ 。其中 C_1 可以是平面型 3×3 耦合器, 也可以是品字型 3×3 耦合器, 它的作用仅仅是将输入光强一分为三。当 C_1 采用品字型 3×3 耦合器时, 其输入端口可以是三根输入光纤中的任意一根, 仅仅是当改变输入光纤端口时, 由于 C_1 耦合器各输出臂之间的附加相位有所变化而导致整个马赫-曾德尔干涉仪的各输出端口的输出波长有所改变。当 C_1 采用平面型 3×3 耦合器时, 则输入光纤端口限定于中间一根光纤, 否则它的输出分光比将不是 $1:1:1$ ^[6]。而 C_2 必须是品字型耦合器, 它是要把三条光纤干涉臂内存在不同相位差的三束相干光合在一起进行干涉, 然后按不同波长分三个端口输出。三条光纤干涉臂两两之间分别存在长度差 ΔL 和 $2\Delta L$ 。这样从干涉仪 1 端输入信号时, 其 4、5、6 输出端口的相位是由两部分组成: 其一是由各条干涉臂不同的长度而产生的相位差 δ , 其中包括 C_1 耦合器各条耦合臂之间产生的附加相位差, 其二是 C_2 耦合器各条耦合臂之间产生的附加相位差 $2\pi/3$, 它们决定干涉后的信号从哪个端口输出, 各个端口的功率传输系数表达式如下:

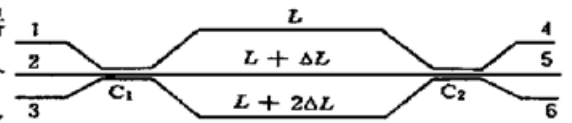


Fig. 1 Schematic diagram of a three arm fiber M-Z interferometric WDM. M-Z stands for Mach-Zehnder

$$\left. \begin{aligned} T_{1-4} &= \frac{1}{9} \sin^2 \frac{3\delta}{2} / \sin^2 \frac{\delta}{2}, \\ T_{1-5} &= \frac{1}{9} \sin^2 \frac{3}{2} \left(\delta + \frac{2}{3} \pi \right) / \sin^2 \frac{1}{2} \left(\delta + \frac{2}{3} \pi \right), \\ T_{1-6} &= \frac{1}{9} \sin^2 \frac{3}{2} \left(\delta + \frac{4}{3} \pi \right) / \sin^2 \frac{1}{2} \left(\delta + \frac{4}{3} \pi \right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n\Delta L$, n 为光纤的有效折射率。

对应于波长 λ_1 , $n\Delta L = K\lambda_1$ (K 为正整数), 则 $T_{1-4} = 1$, $T_{1-5} = T_{1-6} = 0$ 。

对应于波长 λ_2 , $n\Delta L = (K - 1/3)\lambda_2$, 则 $T_{1-5} = 1$, $T_{1-4} = T_{1-6} = 0$ 。

对应于波长 λ_3 , $n\Delta L = (K - 2/3)\lambda_3$, 则 $T_{1-6} = 1$, $T_{1-4} = T_{1-5} = 0$ 。

功率传输系数随波长的变化曲线如图 2 所示, 实线为 T_{1-4} , 虚线为 T_{1-5} , 点线为 T_{1-6} 。并且由 $n\Delta L = K\lambda_1 = (K - 1/3)\lambda_2 = (K - 2/3)\lambda_3$ 及 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_3 - \lambda_2$, 可以得到它的波分复用的波长间隔 $\Delta\lambda$ 和 ΔL 的关系:

$$n\Delta L = \frac{\lambda_1}{3} \left(\frac{\lambda_1}{\Delta\lambda} + 1 \right). \quad (2)$$

这里用 $n\Delta L$ 一个变量来同时控制 λ_1 、 $\Delta\lambda$ 两个参数, 看起来是困难的, 然而从上面的叙述中 $n\Delta L$ 还要满足 $\lambda_1/\Delta\lambda$ 为整数, 所以对于确定的 $n\Delta L$, λ_1 和 $\Delta\lambda$ 总是成对出现的。在一般情况下, $\Delta\lambda \ll \lambda_1$, 所以用 $n\Delta L$ 一个参数同时得到的 λ_1 和 $\Delta\lambda$ 与设计要

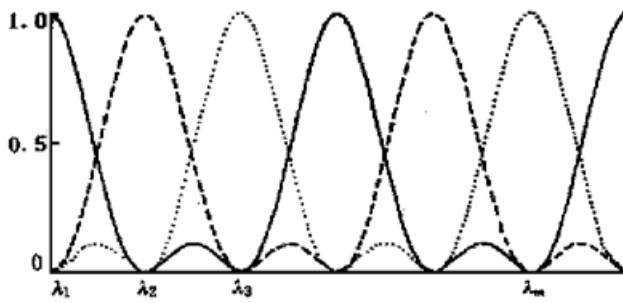


Fig. 2 Transmission variation with wavelength for a three arm fiber M-Z interferometric WDM

求是非常接近的。例如, 设计要求 $\lambda_1 = 1550$ nm, $\Delta\lambda = 1.6$ nm, 由 (2) 式得到 $n\Delta L = 501.0375 \mu\text{m}$, 但此时 $\lambda_1/\Delta\lambda = 968.75$, 不是整数, 若改成 $\lambda_1 = 1550$ nm, $\Delta\lambda = 1.599587$ nm, 则 $\lambda_1/\Delta\lambda = 969$ 是整数。此时 $n\Delta L = 501.1667 \mu\text{m}$ 。这一组实际得到的参数与设计要

求几乎是相同的。当 λ_1 、 $\Delta\lambda$ 和 ΔL 都确定后, 在图 2 中的 λ_m 处 ($m = 4, 5, 6, \dots$) 并令 $\lambda_m = \lambda_1 + \Delta\lambda_m$, 则有 $K\lambda_1 = [K - (m - 1)/3]\lambda_m$ 。经计算有:

$$\Delta\lambda_m = \frac{\lambda_1(m - 1)\Delta\lambda}{\lambda_1 - (m - 2)\Delta\lambda}. \quad (3)$$

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

$$\Delta\lambda_m \approx (m - 1)\Delta\lambda. \quad (4)$$

(4) 式表示当 m 不很大时, λ_m 和 λ_{m-1} 之间的波长复用间隔都近似相同, 且等于 λ_1 和 λ_2 之间的波长复用间隔 $\Delta\lambda$ 。例如 $\lambda_1 = 1550$ nm, $\Delta\lambda = 1.6$ nm 时, $\lambda_9 - \lambda_8 = 1.62$ nm, 与第一个波长间隔仅相差 0.02 nm, 误差为 1.25%。利用 (2) 式并考虑 (4) 式就可以设计出多个具有不同的 $\Delta\lambda$ 的三光纤系统的马赫-曾德尔干涉仪来连接成一个单模光纤密集型多波分复用器。

图 3 是采用 4 个三光纤系统的马赫-曾德尔干涉仪进行二级串连而成 9 波分复用器的方框图, 其复用波长范围为 1550~1562.8 nm, 波长复用间隔为 1.6 nm。它的各个马赫-曾德尔干涉仪的参数见表 1, 其中光纤有效折射率 $n = 1.446$ 。单个干涉仪 1 和 2 的一个输出端口的波长特性和它们串连起来后 9 个输出端口之中的一个输出端口的波长特性见图 4。

Table 1. The designing parameters of a 9-channel fiber M-Z interferometric WDM

M-Z	λ_1 /nm	$\Delta\lambda$ /nm	ΔL /μm
1	1550.0	1.6	346.6
2	1550.0	4.8	115.8
3	1551.6	4.8	115.9
4	1553.2	4.8	116.0

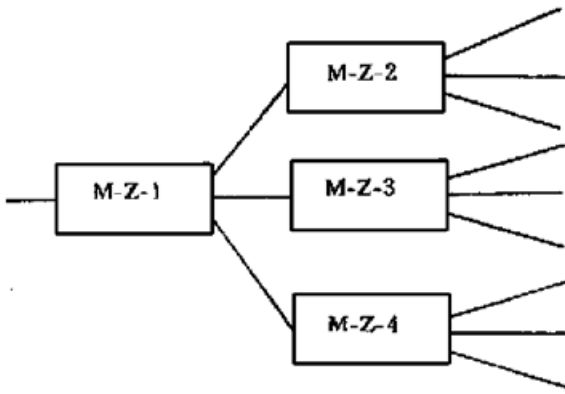


Fig. 3 Block diagram of a 9-channel M-Z interferometric WDM

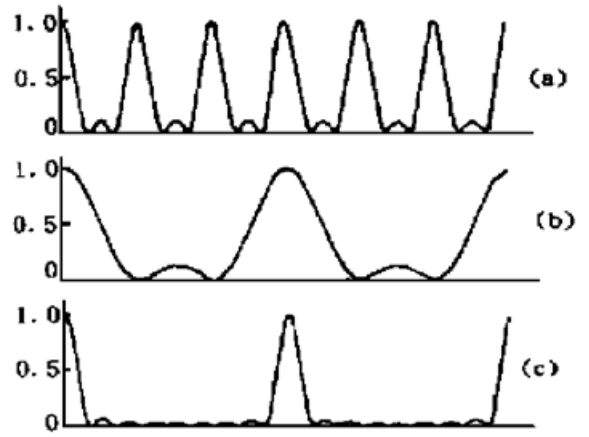


Fig. 4 Transmission variation with wavelength for a cascaded M-Z interferometer system. (a) M-Z-1, (b) M-Z-2, (c) Cascaded by M-Z-1 and M-Z-2

3 实验制作与测量结果

三光纤臂马赫-曾德尔干涉仪的实验样品采用美国康宁公司 SMF-28TM 单模光纤制作。光纤的截止波长 $\lambda_c < 1.3 \mu\text{m}$, 光纤外径 $125 \mu\text{m}$, 芯径 $2a = 9.3 \mu\text{m}$, 涂敷层直径 $250 \mu\text{m}$ 。在先制作好分束比为 $1:1:1$ 的 C_1 3×3 耦合器以后, 把其三个输出端口的光纤臂紧密呈一平面地沿圆型薄片绕一角度 θ , 使其中间一根光纤臂比内圈光纤臂长 ΔL , 外圈光纤臂比内圈光臂长 $2\Delta L$, 此方法与制作二光纤系统干涉型波分复用器的方法相同^[5]。再在此三根光纤臂上制作 C_2 3×3 耦合器。由于通过 C_1 耦合器的三束光已经是相干光, 只要 C_2 耦合器内光强有互相耦合就会产生干涉, 所以在熔拉 C_2 耦合器时已不能用实际监测光功率来控制拉锥长度而只能凭经验来做, 结果从样品的测量曲线看, 显然 C_2 耦合器的分光比不完全是 $1:1:1$ 。图 5 是我们的三光纤系统马赫-曾德尔干涉型波分复用器的实验样品在光谱仪上测的谱线。光谱仪是采用安立公司的 MS-9710B 型, 由于该光谱仪一幅画面只能画两根谱线, 所以图 5 只能显示该三波分复用器中的两个端口的输出谱线, 该谱线和图 2 的理论曲线基本相同, 两条谱线峰之间的波长间隔约为 1.6 nm 就是设计的复用波长间隔, 两条谱线中的零点不完全重合是由于实验样品的三条干涉臂两两之间的长度差 ΔL 和 $2\Delta L$ 之间存在的误差所致。另外还用发光二极管通过单色仪对实验样品进行了隔离度和附加损耗的测试, 测试波长分别为 1550.7 nm 、 1552.3 nm 和 1553.9 nm 。对应端口的隔离度分别为 12 dB 、 16 dB 和 13 dB 。三个端口的平均附加损耗约 0.6 dB 。

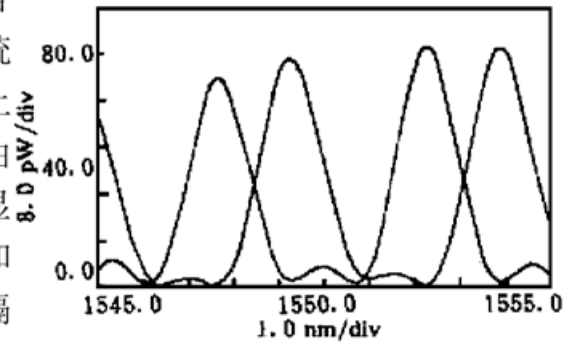


Fig. 5 Measured transmission variation with wavelength for two output channels of a three arm M-Z interferometric DWDM by using a spectrometer

结 论 提出了一种新型的光纤干涉仪, 它是由两个 3×3 单模光纤耦合器和三条光纤干涉臂所组成的。当这三条光纤干涉臂两两之间分别存在长度差 ΔL 和 $2\Delta L$ 时, 这种三光纤系统

的马赫-曾德尔干涉仪就形成了一个波分复用波长间隔相等的三波分复用器,其复用波长间隔仅仅取决于 ΔL 。如果采用四个适当不同 ΔL 的这种干涉型波分复用器进行组合就能得到 9 波分复用器,这样在组成同样信道的光纤密集型波分复用器时,在工艺上要比采用二光纤干涉仪组成的器件更简单,这种全光纤多波分复用器件虽然隔离度不高,但附加损耗很小,最适合用于合波器。

本器件在测量中得到中国科学院上海光学精密机械研究所瞿荣辉博士的大力帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Ishio H, Minowa J, Nosu K. Review and status of wavelength-division multiplexing technology and its application. *J. Lightwave Technology*, 1984, **2**(4) : 448~ 463
- [2] Vellekoop A R, Smit M K. Four-channel integrated-optic wavelength demultiplexer with weak polarization dependence. *J. Lightwave Technology*, 1991, **9**(3) : 310~ 314
- [3] Zirngibl M, Hibino Y, Ohmori Y *et al.*. Polarization independent 8×8 waveguide grating multiplexer on InP. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(2) : 201~ 202
- [4] Takahashi H, Oda K, Toba H *et al.*. Transmission characteristics of arrayed waveguide $N \times N$ wavelength multiplexer. *J. Lightwave Technology*, 1995, **13**(3) : 447~ 455
- [5] 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. *光学学报*, 1998, **18**(8) : 1113~ 1118
- [6] 姚寿铨, 黄 勇, 陆善达. 熔锥直线型 3×3 单模光纤定向耦合器的光功率耦合分析. *光学学报*, 1990, **10**(11) : 1040~ 1046

A Dense-Wavelength-Division-Multiplexer by Using a Three Arm Mach-Zehnder Interferometer

Yao Shouquan Wang Zihua

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

(Received 24 May 1999; revised 6 September 1999)

Abstract A new type fiber interferometer has been fabricated. It is a Mach-Zehnder Interferometer made of two 3×3 single-mode fiber couplers connected by 3 single-mode fibers. The lengths of these 3 single-mode fiber are L , $L + \Delta L$, and $L + 2\Delta L$ respectively. This interferometer acts as a 3 channel wavelength-division-multiplexer. The wavelength between two channels is dependent on ΔL only. The experimental sample tested offers 1.6 nm wavelength division spacing and 0.6 dB total insertion loss at $1.5 \mu\text{m}$ working wavelength.

Key words single mode fiber coupler, Mach-Zehnder Interferometer, fiber dense wavelength-division-multiplexer.