

全光纤密集型波分复用器

曾庆济 黄 勇

(上海交通大学光纤技术研究所, 上海 200052)

摘 要 分析了全光纤 Mach-Zehnder 结构的功率谱特性, 并利用自行设计的耦合器拉锥设备, 研制成功最小波长复用间隔为 0.45 nm 的密集型波分复用器。该类器件具有附加损耗低, 偏振不灵敏和较好的温度及机械稳定性等特点。

关键词 全光纤, 波分复用器, 密集型。

1 引 言

信号的波分复用是成倍提高现有光通信线路传输能力的最有效的方法。用二个波分复用器件完成三十路光信号的传输系统已经得到了演示^[1]。但是由于这种波分复用器的光功率损耗很大和机械及热稳定性较差, 使该系统的信息传输质量受到了严重的影响。为此, 科学家们开始注重研究和进行开发稳定性较好的多路密集型波分复用器(DWDM)^[2~4]。这些器件主要是以集成光路(PIC)为基础, 它们普遍具有附加损耗大^[5]和偏振灵敏的特点^[6]。也有利用一段特殊材料的波导来大大减弱器件对偏振态影响的^[7], 但其附加损耗增加及研制工艺复杂, 致使器件的成本成倍上升。

1994 年 5 月, 英国南安普顿大学 Gambling 教授首次提出了“集成纤维光学”的概念^[8]。它是以光纤为基质, 研究并开发光通信系统所必需的光纤有源和无源器件, 并加以小型化和集成化。因为利用光纤作基质, 一方面可以降低单元器件的成本, 避免器件的偏振灵敏度, 同时还可大为降低器件接入系统的附加损耗。据知 Bures 等人首次报导了利用 Mach-Zehnder 结构研制工作波段在 1450~ 1500 nm 范围内的全光纤式 DWDM 的试验结果^[9], 其波分复用间隔为 1.39 nm, 波长隔离度只有 8.15 dB。该器件的工作波段和波长隔离度均不能满足实际通信的需要。为此, 本文重点对器件的研制工艺及监测方法进行了研究, 目前已研制成功较满意的器件。

2 理论分析

从结构上讲, 密集型波分复用器是一个 Mach-Zehnder 干涉结构, 它是由二个 3 dB 单模光纤耦合器组成, 如图 1 所示。假如二个耦合器的散射矩阵分别为

$$S_1 = \begin{bmatrix} \cos(k_1 z_1) & -j \sin(k_1 z_1) \\ -j \sin(k_1 z_1) & \cos(k_1 z_1) \end{bmatrix}, \quad S_2 = \begin{bmatrix} \cos(k_2 z_2) & -j \sin(k_2 z_2) \\ -j \sin(k_2 z_2) & \cos(k_2 z_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

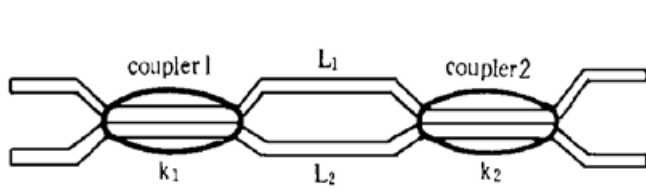


Fig. 1 A Mach-Zehnder interferometer structure of the DWDM

这里 $j = \sqrt{-1}$, k_1 和 k_2 分别是耦合器 1、2 的耦合系数, z_1 和 z_2 分别是器件的有效耦合长度。而中间的传输矩阵可表示为

$$T = \begin{bmatrix} \exp(j\beta\delta L) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里 β 为单模光纤中基模的传播常数, δL 为干涉臂之间的几何长度差。

假定器件的初始注入条件为 $a_1(0) = 1$,

$a_2(0) = 0$, 则器件二个输出端口的输出场为

$$a_1 = \cos(k_{1z_1}) \cos(k_{2z_2}) \exp(j\beta\delta L) - \sin(k_{1z_1}) \sin(k_{2z_2}) \quad (3a)$$

$$a_2 = -j \sin(k_{1z_1}) \cos(k_{2z_2}) \exp(j\beta\delta L) - j \cos(k_{1z_1}) \sin(k_{2z_2}) \quad (3b)$$

因此, 其输出光功率分别为

$$P_1 = \frac{1}{2} [1 + \cos(2k_{1z_1}) \cos(2k_{2z_2}) - \sin(k_{1z_1}) \sin(k_{2z_2}) \cos(j\beta\delta L)] \quad (4a)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} [1 - \cos(2k_{1z_1}) \cos(2k_{2z_2}) + \sin(k_{1z_1}) \sin(k_{2z_2}) \cos(j\beta\delta L)] \quad (4b)$$

在熔融拉锥型耦合中, 上述(1), (2), (3) 式中的 k_i 不仅与耦合器耦合区的位置有关, 而且与

工作波长有关。因此, 对特定的波长而言, 在满足单模传输的情况下, k_{iz_i} 可用 $\int_0^{z_i} k dz$ 来代替,

并令 $\Phi_i = \int_0^{z_i} k dz$, 这里 $i = 1, 2$ 。在理想的情况下, 对于特定的工作波长应尽量满足 $\Phi_1 = \Phi_2 =$

$\pi/4$, 只有这样, 才能使研制的器件具有较高的波长隔离度。但是, 由于这种 Mach-Zehnder 干涉器件具有较短的干涉臂, 实际不可能用二个常规的 3 dB 耦合器熔接而成, 而是需要在短距离内连续熔拉二个 3 dB 器件。一般来说, 熔拉第一个器件是一个十分简单的问题, 但是当开始熔拉第二个器件时, 由于探测器所监测到的光功率并不是单个器件的耦合特性, 而是整个 Mach-Zehnder 器件的耦合特性。假设其干涉臂的长度之差为 δL , 则其输出端的输出功率随拉锥长度或 Φ_i 的变化规律几乎无法事先确定。更重要的是, 由于熔拉第二个耦合器时, 加热源离 Mach-Zehnder 干涉臂的距离很短, 加热源的温度扰动将导致监测光功率在很大范围内出现随机波动。假定(4a) 式中 δL 在 1000~ 1000.5 μm 范围内不确定, 在忽略热扰动的前提下, 器件输出端口 1 的光功率随 Φ_i 的变化关系如图 2 所示。从图中可以看到: 在不考虑热扰动的情况下, 尽管 δL 只在 1000~ 1000.5 μm 范围内不确定, 也会导致输出端口 1 功率耦合情况的强烈变化。

在实际研制 DWDM 中, 很难保证 $\Phi_1 = \Phi_2 = \pi/4$, 但一般可以保证第一个耦合器能达到 3 dB。而第二个耦合器却很难保证达到 3 dB。这样就会严重影响整个器件的波长隔离度。假定 $\Phi_1 = \pi/4$, Φ_2 位于 $\pi/8$ 至 $\pi/4$ 之间时, 整个器件的波长响应如图 3 所示。 $\Phi_2 = \pi/8$ 时, 对应功率幅度变化最小的曲线, 当 $\Phi_2 = \pi/4$ 时, 对应最大幅度变化的曲线。文献[9]中报导的器件其波长隔离度只有 8.15 dB。假定其第一个耦合器的分光比达到了 50·50(即 3 dB), 则第二个器件的分光比大约只有 80·20。实际上, 只要能保证第二个耦合器的分光比达到 60·40, 就可确保整个器件的波长隔离达到 20 dB 以上。因此必须确保耦合器的生产设备具有较好的重复性。这是研制高性能 DWDM 的关键。

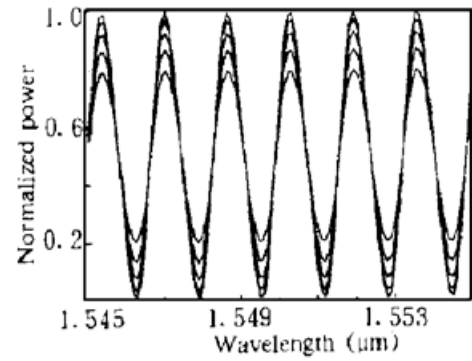
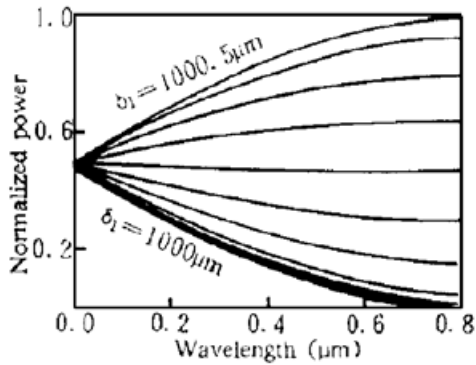


Fig. 2 The relation between optical power of output port 1 and ϕ in the cases of different δL

Fig. 3 Wavelength responses of device when ϕ is in the range from $\pi/8$ to $\pi/4$

3 实验结果与讨论

在自行设计的耦合器件拉锥设备上, 利用 SMF-28 TM 匹配包层单模光纤, 研制了几种具有不同波长复用间隔的 DWDM。它们的研制工艺基本上与常规的光纤耦合器工艺相同, 所不同的是, 在拉制第二个耦合器时, 其拉锥长度不是由监测输出光信号来确定, 而是由第一个耦合器的拉锥长度确定。在工艺重复性较好的情况下, 第二个耦合器的拉锥长度与第一个耦合器的拉锥长度相等。器件中的二个干涉臂的几何长度差是在第一个耦合器拉制结束后通过一个特殊的工艺来保证, 并根据需要可作适当的调整。待第二个耦合器拉制结束后将整个器件一并封装在石英基片上, 以确保其一定的温度稳定性。

图 4 给出了波分复用间隔达 4 nm 的 DWDM 的一个端口的输出损耗谱。在该器件中, 二个干涉臂长差约为 205 μm , 每个耦合器的附加损耗约 0.07 dB 左右。因此, 器件总的附加损耗一般不超过 0.2 dB, 最好的可在 0.1 dB 以下。初步测试表明, 这种器件具有较好的温度和机械稳定性。由于组成器件本身的 3 dB 耦合器具有极小的偏振灵敏度, 经测量发现: 器件与偏振态无关。另外需要说明的是, 从图 4 的损耗谱中似乎看出, 该器件的波长隔离度只有 16.2 dB, 其实不然, 其原因主要是由于光谱分析仪的最小可测功率为 -80 dB, 而利用白光作为光源, 且光谱分析仪的分辨率达到 1 nm 时, 从单模光纤输入光谱仪的最大输入光功率仅为 -63.8 dB, 故在损耗谱特性曲线上端出现了“截止”。图 5 给出了波长复用间隔仅为 0.45 nm 的 DWDM 的一个端口输出谱, 器件中的 δL 约为 1823 μm 。其它技术指标均与上述器件的指标相仿。据悉, 这个器件的波分复用间隔是目前同类 DWDM 中最小的。同时, 该类器件的波分复用间隔还可大幅度减小。

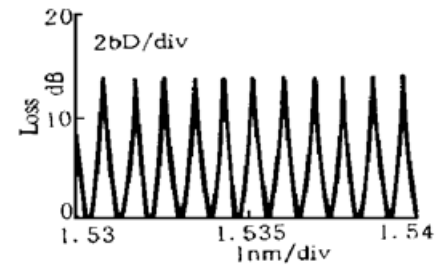
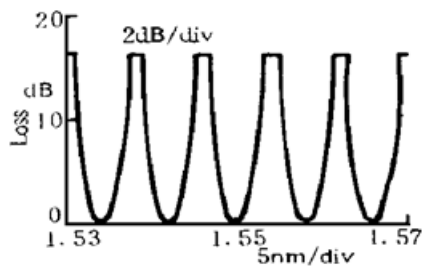


Fig. 4 Insertion loss of the DWDM with a wavelength spacing of 4 nm

Fig. 5 shows the characteristics of spectral response of the DWDM with wavelength spacing of 0.45 nm

目前, 这种器件也存在一些问题, 如器件的长度还较大(约 10 cm), 而且只实现二波长复用, 要实现多波长复用还有许多工作要做。深信用光纤研制成的 DWDM 具有较好的实用前景。

结 论 通过对全光纤 Mach-Zehnder 结构的功率谱特性的分析, 确定了研制全光纤 DWDM 工艺技艺, 并利用自行设计的耦合器拉锥设备研制成多种密集型波分复用器。该类器件具有损耗小, 温度、机械稳定性好及偏振无关等特点。目前器件的最小波长复用间隔已达到 0.45 nm, 暂居于国际同类器件报导中的领先水平。当然, 目前也存在一些问题, 小尺度器件和多波长复用问题还有待于得到解决。

参 考 文 献

- [1] A. M. Hill *et al.*, An experimental broadband and telephony passive optical network. *IEEE Globecom*, 1990, 939~ 940
- [2] C. H. Henry *et al.*, Glass waveguide on silicon for hybrid optical packaging. *J. Lightwave Tech.*, 1989, 7(10): 1530~ 1539
- [3] H. Takahashi *et al.*, Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometer resolution. *Electron. Lett.*, 1990, 26(2): 87~ 88
- [4] J. B. D. Sool *et al.*, Monolithic InP-based grating sepctrometer for wavelength-divisionmultiplexed system at 1.5 μm . *Electron. Lett.*, 1991, 27(2): 132~ 134
- [5] R. Adar *et al.*, Adiabatic 3-dB couplers, filters, and multiplexers made with silica waveguides on silicon. *J. Lightwave Tech.*, 1992, 10(1): 46~ 50
- [6] B. H. Verbeek *et al.*, Integrated four-channel Mach-Zehnder Multi/demultiplexer fabricated with phosphorous doped sio₂ waveguide on si. *J. Lightwave Tech.*, 1988, 6(6): 1011~ 1015
- [7] H. H. Yaffe *et al.*, Polarization-independent silica-on-silicon Mach-Zehnder interferometers. *J. Lightwave Tech.*, 1994, 12(1): 64~ 67
- [8] W. A. Gambling, Fiber-integrated optics. *International Conf. of Optical Fiber Technology*, May 1994, (China), 3
- [9] J. Bures *et al.*, All-fiber dense wavelength division multiplexers. *Proc. SPIE*, 1994, 2321: 455~ 457

All-Fiber Dense Wavelength Division Multiplexers

Zeng Qingji Huang Yong

(*Institute of Optical Fiber Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200052*)

(Received 26 April 1995; revised 23 October 1995)

Abstract The spectral characteristics of all-fiber Mach-Zehnder interferometer structure are analyzed, and the all-fiber dense wavelength division multiplexers (DWDM) with the smallest spacing channel of 0.45 nm are fabricated, using the equipment which we designed for fabricating coupler. The Fabricated DWDM operating wavelength in the range from 1530 to 1570 nm exhibits ultra-low loss, polarization insensitivity, and good temperature and mechanism stability.

Key words all-fiber, dense, wavelength division multiplexer.