

文章编号: 0465-7942(2004)02-0044-05

# 光纤 M-Z 型交错复用器的性能研究

张 婷<sup>1</sup> 王 宁<sup>1</sup> 盛秋琴<sup>1</sup> 开桂云<sup>1</sup> 董孝义<sup>1</sup> 葛春风<sup>2</sup>

(1. 南开大学物理科学学院光电信息科学系, 天津 300071; 2. 天津大学精仪学院, 天津 300072)

**摘要:** 采用熔接和熔融拉锥两种方法, 通过调节臂长差制作出 50GHz 信道间隔的 M-Z 型交错复用器. 针对实验中信道隔离度难以提高的现象, 对影响该性能的主要因素作了分析研究. 研究结果对设计制作该类器件及应用有重要的参考价值.

**关键词:** M-Z 干涉仪; 交错复用器; 复用/解复用器; 熔融拉锥

**中图分类号:** O438

**文献标识码:** A

## 0 引 言

在密集波分复用系统中, 有两种技术方案可以提高光纤带宽的利用率: 一是减小信道中增加信道数目; 二是增加单信道的速率. 对于后一种扩容方案, 研究者们正着手对单信道速率达 40Gbit/s 的传输系统进行商业化开发. 而对于前一种扩容方案, 需要研制超窄带光滤波器. 采用镀膜工艺生产的介质薄膜滤波器虽然是一种性能良好的窄带滤波器, 但是, 镀膜工艺很难将介质膜型器件的信道间隔做重叠 50GHz 以下, 因为信道间隔压窄一半; 就要多镀上百层薄膜, 使误差增加, 成品率下降, 产品价格上升. 交错复用 (Interleaver) 技术回避了传统镀膜工艺的局限, 从而从信道交叉复用的角度解决压缩信道间隔、提高通信容量的问题.

交错复用技术可通过多种方案实现<sup>[1~4]</sup>, 普遍认为, 比较有发展的方案是利用熔融拉锥工艺制作的 M-Z 干涉仪型的交错复用器实现交错复用.

分别采用熔接和熔融拉锥两种方法, 通过调节臂长差制作出 50GHz 信道间隔的 M-Z 型交错复用器. 本文针对实验中信道隔离度提不高的现象, 对影响该性能的因素作了较详细的研究.

## 1 原 理

从结构上讲, 光纤 M-Z 干涉仪型的交错复用器由数个 M-Z 干涉仪组成<sup>[5]</sup>, 其原理相当于数个非平衡的 M-Z 耦合干涉仪, 载波每经过一个干涉仪就将信道间距比前一个干涉仪增加一倍, 于是将密集信道逐渐分离开.

图 1 为单级干涉仪的结构示意, 等效为两个耦合器组成, 耦合器的散射矩阵可表示为<sup>[6]</sup>:

$$S_i = \begin{bmatrix} \cos(k_i z_i) & -j \sin(k_i z_i) \\ -j \sin(k_i z_i) & \cos(k_i z_i) \end{bmatrix} \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

式中,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $i = 1, 2$ ,  $k_1 z_1$  和  $k_2 z_2$  分别是耦合器 1、2 的耦合系数, 其中  $z_1$  和  $z_2$  分别是器件的熔锥区的有效耦合长度. 中间的两个臂可用传输矩阵表示为:

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

收稿日期: 2002-10-16

基金项目: 华为基金资助项目

作者简介: 张婷(1980—), 女, 天津人, 硕士研究生, 主要从事现代光通信和光波技术研究.

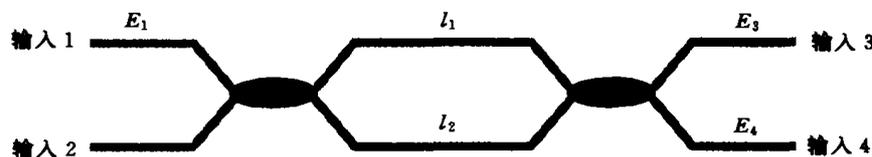


图 1 光纤 M-Z 型交错复用器的结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of fibre M-Z interleaver

式中  $\beta$  为光纤中基模的传输常数,  $\Delta L$  为两臂的几何长度差.

假设光信号只从输入 1 输入, 则器件两个输出端的输出场  $E_3, E_4$  为:

$$\begin{cases} E_3 = \cos(k_1 z_1) \cos(k_2 z_2) \exp(j\beta \Delta L) - \sin(k_1 z_1) \sin(k_2 z_2) \\ E_4 = -j \cos(k_1 z_1) \sin(k_2 z_2) \exp(j\beta \Delta L) - j \sin(k_1 z_1) \cos(k_2 z_2) \end{cases} \quad (3)$$

因此, 其输出光功率分别为:

$$\begin{cases} P_3 = \sin^2(k_1 z_1) \sin^2(k_2 z_2) + \cos^2(k_1 z_1) \cos^2(k_2 z_2) \\ \quad - 1/2 \sin(2k_1 z_1) \sin(2k_2 z_2) \cos(\beta \Delta L) \\ P_4 = \cos^2(k_1 z_1) \sin^2(k_2 z_2) + \sin^2(k_1 z_1) \cos^2(k_2 z_2) \\ \quad + 1/2 \sin(2k_1 z_1) \sin(2k_2 z_2) \cos(\beta \Delta L) \end{cases} \quad (4)$$

可见两个输出端的输出谱与两个耦合器的耦合系数和臂长差等因素有关, 且二者是互补的, 都是  $\beta \Delta L$  的余弦函数.

理想的情况是两个耦合器的耦合系数都严格为  $0.25\pi$ , 此时, 可得:

$$\begin{cases} P_3 = 1/2 [1 - \cos(\beta \Delta L)] \\ P_4 = 1/2 [1 + \cos(\beta \Delta L)] \end{cases} \quad (5)$$

对于实际情况, 两个耦合器是在一对光纤中控制的, 第一个耦合器比较容易测量并可将其较精确控制在  $k_1 z_1 = 0.25\pi$  附近, 而控制第二个耦合器时由于已有干涉效应发生, 测量控制比较复杂, 因此两输出端的光功率分别为:

$$\begin{cases} P_3 = 1/2 [1 - \sin(2k_2 z_2) \cos(\beta \Delta L)] \\ P_4 = 1/2 [1 + \sin(2k_2 z_2) \cos(\beta \Delta L)] \end{cases} \quad (6)$$

由此可见, M-Z 型交错复用器的输出功率是波长的简谐函数, 变化周期是波长和两干涉臂长差的函数:

$$\Delta \lambda = \lambda^2 / n \Delta L \quad (7)$$

极值波长的位置分别为:

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= 2n\Delta L / (2m + 1) \\ \lambda_{\min} &= \frac{n\Delta L}{m} \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $m$  为整数. 两输出口的峰值波长位置相差  $\frac{\Delta \lambda}{2}$ . 因此, 假如在输入载波中含有间隔为  $\frac{\Delta \lambda}{2}$  的两个波长, 那么这两个波长的光波就可以分别从输出口 3 和 4 输出.

## 2 实验现象和分析

假设输入载波的信道频率间隔为 50GHz (波长间隔 0.4nm), 为了在输出端口将其分离成间隔为 100GHz 的信道间隔, 由公式(7)可推导出  $\Delta L$  为 2.04mm. 利用熔接和熔融拉锥两种方法, 分别制作了 M-Z 型交错复用器多个样品, 并将其两臂环绕后加以固定, 以减少温度变化、空气流动、机械振动等外界环境的扰动.



图 2 实验测试装置

Fig 2 Block Diagram of the tested configuration

按图 2 所示装置对样品进行了主要性能测试. 选取两个有代表性的实验数据如下: 用熔接法制作的样品, 臂长差为 1.95mm, 测得相邻谱线的间隔周期为 0.42nm, 隔离度约为 12dB, 图 3 所示; 用熔融拉锥法制作的样品, 臂长差为 1.99mm, 测得相邻谱线的间隔周期为 0.413nm, 隔离度约为 10dB, 图 4 所示. 由于实验条件的不同, 图 3 所测的为普通的输出谱, 而图 4 所测的为归一化输出谱, 两者的区别对以下的分析并没有影响.

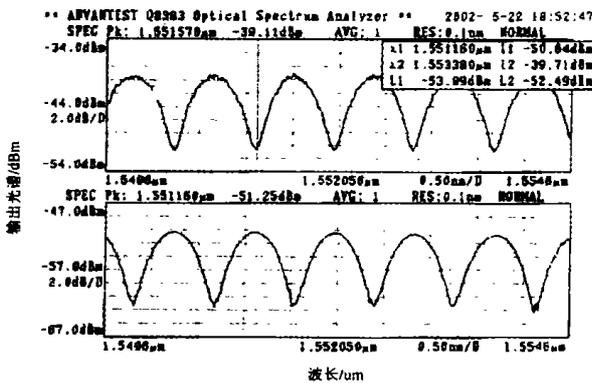


图 3 熔接法 M-Z 型交错复用器输出谱

Fig 3 The measured spectrum of the M-Z interleaver with welded fiber

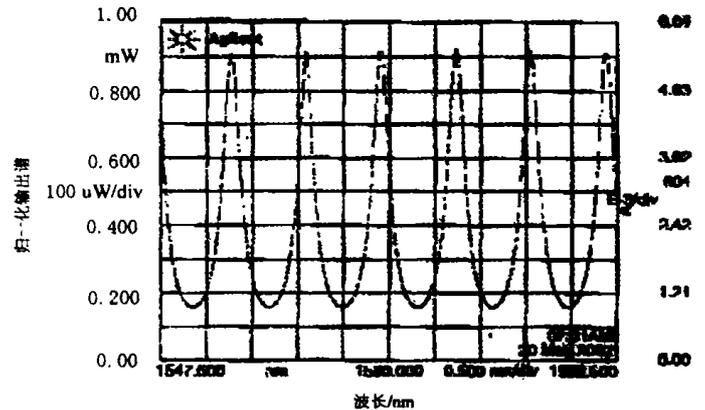


图 4 熔融拉锥法 M-Z 型交错复用器归一化输出谱

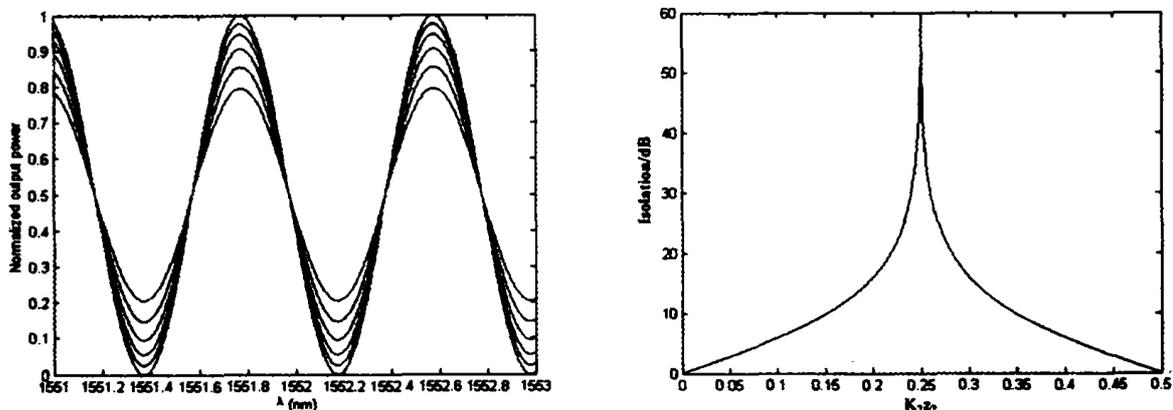
Fig 4 The normalized measured spectrum of the M-Z interleaver with fused biconical taper

在实验中, 改变臂长差或以有效调整信道间隔, 与臂长差决定信道间隔的理论分析相符. 对于隔离度指标, 实际上测得采用两种工艺制作的器件该指标都比较低. 针对这种现象, 对影响器件隔离度的因素作了分析.

### 2.1 耦合系数对隔离度的影响

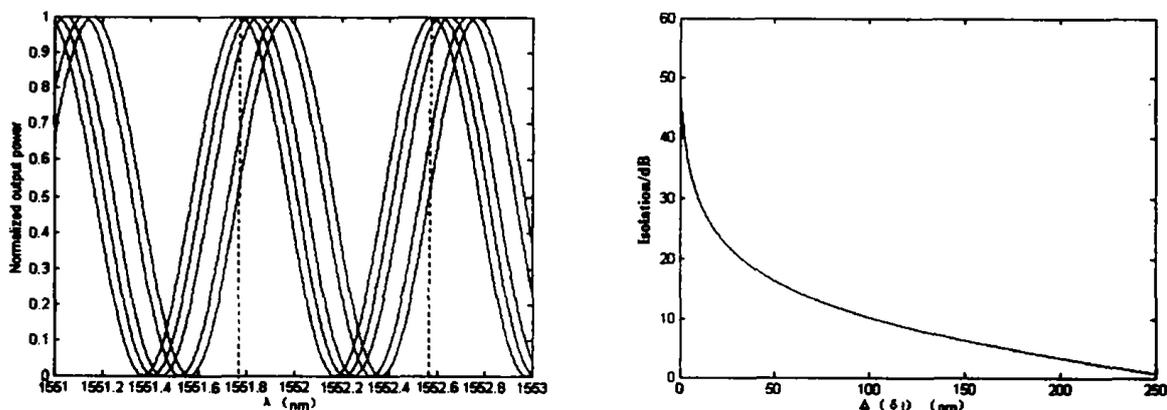
利用熔接方法制作的 M-Z 型交错复用器, 虽然两个耦合器系数均为  $0.25\pi$ , 但由于在熔接过程中不能保证对两臂造成的熔接损耗完全相等, 所以可以等效于第二个耦合器的耦合系数不等于  $0.25\pi$ , 与利用熔融拉锥方法效果一致, 因此两者的实验结果可以等同作以分析.

对耦合器 2 的  $k_2z_2$  取不同值对器件的归一化输出功率以及信道隔离度  $I_{so}$  的影响进行了数值计算, 假如输入相邻信道间隔为 0.4nm, 器件的工作波长在 1552nm 附近, 计算结果如图 5. 图 5(a) 的六条曲线从消光比由低到高的顺序依次对应  $k_2z_2 = 0.10\pi, 0.125\pi, 0.15\pi, 0.175\pi, 0.2\pi$  以及  $0.25\pi$ . 图 5(b) 是不同的  $k_2z_2$  所造成的信道隔离度恶化结果, 从中可以得到: 若要得到信道隔离度大于 10dB 的结果  $k_2z_2$  必须在  $0.15\pi \sim 0.347\pi$  之间, 在  $\pi/4$  的左右两边是对称的; 同理, 若要求信道隔离度大于 15dB, 则  $k_2z_2$  必须在  $0.194\pi \sim 0.306\pi$  之间; 若要求信道隔离度大于 20dB,  $k_2z_2$  必须在  $0.219\pi \sim 0.281\pi$  之间, 若要信道隔离度大于 25dB,  $k_2z_2$  必须在  $0.233 \sim 0.267\pi$  之间. 所以, 为了令器件具有更高的信道隔离度,  $k_2z_2$  就越接近  $0.25\pi$  越好, 理论上  $k_2z_2 = 0.25\pi$  时隔离度趋于极大值, 如图 5(b) 所示. 图中当  $k_2z_2$  取值从 0 到  $0.25\pi$  时, 所得曲线的隔离度依次增大, 说明了在干涉理论中, 在其它条件相同的情况下, 相干光的振幅越接近, 隔离度越大. 在  $k_2z_2$  趋于 0 时曲线将出现趋向平坦情况, 这是由于耦合器 2 的分光比太小造成的两相干光的振幅相差太大, 使  $P_3$  输出谱的隔离度小. 因此, 在实际应用中, 解决耦合器 2 的控制工艺问题归根到底就是控制耦合器的分光比, 耦合器分光比用耦合系数  $k_2z_2$  表示为  $\sin^2(k_2z_2) : \cos^2(k_2z_2), i = 1, 2$ . 控制耦合器 2 的分光比最小程度的偏离 1:1 将具有至关重要的作用.

(a) 不同的  $k_2z_2$  对应的归一化输出功率(b) 不同的  $k_2z_2$  对应的信道隔离度图 5  $k_2z_2$  取不同值是对输出功率和信道隔离度的影响Fig 5 The calculated spectrum of the output power at port 3 and Isolation with different  $k_2z_2$  (a) The normalized output power (b) Isolation

## 2.2 臂长差对性能的影响

为了分析因温度等因素引起臂长差的漂移  $\Delta(\Delta L)$  对器件的影响, 假设两个耦合器的耦合系数均为理想情况, 即  $k_1z_1 = 0.25\pi, k_2z_2 = 0.25\pi$ , 信道间隔仍为  $0.4\text{nm}$ . 考虑两臂长差的相对变化量为  $0 \sim 2.5 \times 10^{-6}$ , 即  $\Delta(\Delta L)$  在  $0 \sim 250\text{nm}$  范围内漂移, 计算结果如图 6 所示.

(a) 不同的  $\Delta(\Delta L)$  对应的归一化输出功率(b) 不同的  $\Delta(\Delta L)$  对应的信道隔离度图 6  $\Delta(\Delta L)$  取不同值是对输出功率和信道隔离度的影响Fig 6 The calculated spectrum of output power at port 3 and Isolation with different  $\Delta(\Delta L)$ 

(a) The normalized output power (b) Isolation

图 6(a) 是不同的臂长差漂移  $\Delta(\Delta L)$  所引起的归一化输出功率漂移, 从左到右的五条曲线依次对应  $\Delta(\Delta L) = 0\text{nm}, 50\text{nm}, 100\text{nm}, 200\text{nm}$  和  $250\text{nm}$ . 图 6(b) 中的曲线反映了臂长差漂移  $\Delta(\Delta L)$  对信道隔离度的影响. 从中可以看到: 若要信道隔离度大于  $10\text{dB}$ , 则臂长差漂移应小于  $105\text{nm}$ ; 若要信道隔离度大于  $15\text{dB}$ , 则臂长差漂移应小于  $58\text{nm}$ ; 若要信道隔离度大于  $20\text{dB}$ , 则臂长差漂移应小于  $34\text{nm}$ ; 若可信道隔离度大于  $25\text{dB}$ , 则臂长差漂移应小于  $17\text{nm}$ , 此时相对变化漂移为  $1.7 \times 10^{-7}$ , 相当于温度差小于  $10^{-1}\text{K}$  量级, 可以看出两臂长差的漂移对信道隔离度的影响很大, 温度等因素需要重点考虑.

## 3 结 论

交错复用技术的出现更新了密集波分复用中分波/合波器件设计的理念, 大大降低传统滤波器件的设计压力, 使许多成熟的滤波技术得以在新应用中继续发挥作用. 随着可配置 DWDM 光网络和高比特率长距离传输系统的迅猛发展, 交错复用技术必将成为解决网络扩容的有效办法. 但就目前情况看, 即使是具

有强大发展潜力的 M-Z 型交错复用器方案,对于 50GHz 信道间隔的交错复用器,其性能还达不到商用要求,其主要难点是耦合器控制工艺问题还有待提高,稳定性、可靠性还有待深入研究。

### 参 考 文 献

- 1 Loh, W H, Zhou F Q, Pan J J. Novel designs for sampled grating-based multiplexers-demultiplexers[J]. *Opt Lett*, 1999,24(21):1457~1459.
- 2 蔡燕民,王昕歌,方祖捷,等. 用于 DWDM 系统的双折射型 Interleaver 原理分析[J]. *中国激光*, 2001,28(11):1017~1020.
- 3 廖先炳, WDM 器件的技术途径[J]. *飞通光电子技术*. 2001,1(1):24~29.
- 4 Dingwei Huang, Tsunghusan Chiu, Yinchieh Lai. Arrayed waveguide grating DWDM interleaver[J]. *OFC*, 2001, paper WDD80.
- 5 Kuznetsov M. Casaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filters for wavelength division multiplexed optical system[J]. *Lighthwave Technol*, 1994,12:226~230.
- 6 Rajiv Ramaswami. *Optical Networks: a practical perspective, Book 1*[M]. San Francisco, : Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1998.

## EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE CHARACTERIZATION OF MACH-ZEHNDER INTERLEAVER

ZHANG Ting<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>1</sup>, SHENG Qiuqin<sup>1</sup>, KAI Guiyun<sup>1</sup>, DONG Xiaoyi<sup>1</sup>, GE Chunfeng  
( 1. *Department of Photoelectricity Information Science, Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China*; 2. *Precision Instrument Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China* )

**Abstract:** In this paper the characteristics of the interleaver based on Mach-Zehnder interferometer is discussed. In experiment, two all-fiber Mach-Zehnder interferometers separately fabricated with welding two 3dB couplers and fused biconical taper technology are studied. The frequency spacing reaches 50GHz through changing the path difference of the two arms. Their spectrum performance bandwidth of channel and isolation are analyzed and simulated. The inclusion has great value to make this device.

**Key words:** Mach-Zehnder interferometer; interleaver; multiplexers/demultiplexers; fused biconical taper