

文章编号: 0258-7025(2005)03-0423-04

# 基于马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅的光分插复用器

黄勇林<sup>1</sup>, 董兴法<sup>1,2</sup>, 李 杰<sup>2</sup>, 董孝义<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 苏州科技学院电子系, 江苏 苏州 215011; <sup>2</sup> 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要** 光分插复用器(OADM)是波分复用(WDM)系统中的关键器件之一。提出了一种结构新颖的基于马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪和光纤光栅(FBG)的光分插复用器,它由两个三端口光环形器、一个光纤光栅和一个马赫-曾德尔干涉仪组成,马赫-曾德尔干涉仪起着光开关的作用。对光分插复用器的输出特性进行了实验研究,实验中调节干涉仪的臂长差,可以实现信号的上下载或直通功能,上下载时通道的隔离度大于 20 dB。这种结构的光分插复用器具有结构简单、体积小、价格低等优点,在波分复用技术中具有实际应用价值。

**关键词** 光通信;光分插复用器;马赫-曾德尔干涉仪;光纤光栅

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Research of Optical Add-Drop Multiplexer Based on Mach-Zehnder Interferometer and Fiber Bragg Grating

HUANG Yong-lin<sup>1</sup>, DONG Xing-fa<sup>1,2</sup>, LI Jie<sup>2</sup>, DONG Xiao-yi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Department of Electronics, Suzhou Institute of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China*)  
(<sup>2</sup> *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

**Abstract** Optical add-drop multiplexer (OADM) is one of the key components for wavelength division multiplexing (WDM) system. A novel OADM based on Mach-Zehnder (M-Z) interferometer and fiber Bragg grating (FBG) is proposed. The OADM consists of two three-port optical circulators, a FBG, and a M-Z interferometer. In the structure, the M-Z interferometer acts as an optical switch. The characteristic of the OADM is studied experimentally. In the experiment, the OADM can add/drop one of the multi input channel or pass the channel directly by adjusting the difference of the two arms of the interferometer. The channel isolation is more than 20 dB. The OADM has many advantages such as simple structure, small size, low cost and so on. It can be used in practical WDM system.

**Key words** optical communication; optical add-drop multiplexer; Mach-Zehnder interferometer; fiber Bragg grating

## 1 引 言

波分复用(WDM)技术作为超高速、大容量全光通信网的主要技术之一,在光纤通信领域中一直是人们研究的热点。光分插复用器(OADM)是光传送网的重要器件,将在波分复用系统中得到广泛应用。人们提出了许多种不同类型的光分插复用器

件,例如阵列波导栅(AWG)型<sup>[1]</sup>,光纤光栅(FBG)的马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪型<sup>[2]</sup>,基于光纤光栅和光环形器型<sup>[3~5]</sup>等,在这些光分插复用器件中,基于光纤光栅和光环形器的光分插复用器倍受人们的关注,因其具有结构简单、插入损耗小、串扰低、偏振无关等优点。在这种光分插复用器结构中,一个光纤光栅和两个三端口光环形器的组合是最简单的,如

收稿日期:2003-11-19;收到修改稿日期:2004-02-16

基金项目:建设部信息化项目(01-4-048)和天津市自然科学基金(013601811)资助项目。

作者简介:黄勇林(1964—),男,河南人,苏州科技学院电子系教授,博士,主要从事光纤通信和光纤传感方面的研究工作。

E-mail:huangyonglin@eyou.com

果对光纤光栅进行调谐,它可成为波长选择的光分插复用器。这种结构的光分插复用器虽然能够对所需要的波长进行上下载,但是它存在一定的不足:第一,当光栅中心波长对准某一信道,此信道被光栅反射下载,该光分插复用器不具备对此信道直通的功能;第二,光纤光栅的调谐速度直接影响系统的性能,如果调谐速度较慢,在调谐过程中就会产生数据丢失。为了克服以上不足,人们通常采用光纤光栅和传统的机械光开关或微机电系统(MEMS)光开关的组合<sup>[6]</sup>,为了选择下载不同的通道,需要多个光开关和光纤光栅的级联。但传统的机械光开关具有开关速度慢(5~15 ms)、体积大、功耗高、价格昂贵等问题。微机电系统光开关虽然解决了开关速度慢等问题,但制作复杂。文献[7]中,采用压电陶瓷(PZT)调节类似迈克尔逊结构干涉仪的一个臂的光纤开关,开关速度小于1 ms。基于干涉仪作为光开关具有开关速度快的特点,我们用马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅组合构成一种结构新颖的光分插复用器,这里马赫-曾德尔干涉仪具有与光开关等效的功能。

## 2 光分插复用器的结构原理

基于马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅组合的光分插复用器如图1所示。它由两个三端口光环形器、一个光纤光栅和一个马赫-曾德尔干涉仪组成,实验所用的马赫-曾德尔干涉仪是常规的单通道4端口干涉仪,第一个光环形器的输出端口和第二个光环形器的输入端口分别与马赫-曾德尔干涉仪的一个输入端口和一个输出端口相连接。光纤光栅对准信道的波长,通过调节马赫-曾德尔干涉仪的臂长差可以控制信号的状态,这样就构成一个结构新颖的光分插复用器。多波长信号从传输线进入第一个光环形器的输入端,与光纤光栅中心波长相同的信道光被反射,经光环形器的输出端下载,然后进入马赫-曾德尔干涉仪的输入端口1,与光栅不匹配的其他光信号通过光栅继续传输到第二个光环形器。当马赫-曾德尔干涉仪的状态为交叉态时,被光栅反射的光信号从干涉仪输出端的4端口下载。与此同时,与下载波长相同的上载信号可以通过另一路径从马赫-曾德尔干涉仪的输入端的2端口到输出端的3端口,该上载信号经光栅反射与透过光栅的其他光信号一起从第二个光环形器的输出端输出。相反当马赫-曾德尔干涉仪的状态处于直通态时,被光

栅反射的光信号从干涉仪的输入端口1端直接到达输出端口3端,然后与透过光栅的光信号一起输出。光分插复用器的性能由光纤光栅的反射率,马赫-曾德尔干涉仪的性能决定。

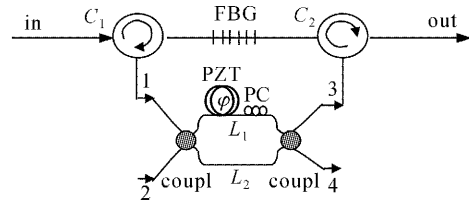


图1 光分插复用器结构图

Fig. 1 Schematics of the OADM

如图1所示,马赫-曾德尔干涉仪通常是由两个3 dB耦合器连接而成的。假定器件的初始注入条件为 $E_1(0) = 1, E_2(0) = 0$ ,忽略光纤及耦合器损耗,且耦合器在梳状滤波器件工作波长范围内具有相同的耦合系数。根据马赫-曾德尔干涉仪的传输特性,从3端和4端的输出光 $E_3$ 和 $E_4$ 可写作

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j\Delta\Phi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(j\Delta\Phi) - 1 & -j[1 + \exp(j\Delta\Phi)] \\ -j[1 + \exp(j\Delta\Phi)] & 1 - \exp(j\Delta\Phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \exp(j\Delta\Phi) - 1 \\ -j[1 + \exp(j\Delta\Phi)] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $j = \sqrt{-1}$ ,  $\Delta\Phi = 2n_{\text{eff}}\pi\Delta L/\lambda$ 代表马赫-曾德尔干涉仪两个干涉臂的传输相位差,其中 $\Delta L$ 为干涉仪两臂差, $n_{\text{eff}}$ 为光纤有效折射率, $\lambda$ 为工作波长。3端口和4端口的归一化的输出端光强可表示为

$$\begin{aligned} P_3 &= \frac{1}{2}[1 - \cos(\Delta\phi)], \\ P_4 &= \frac{1}{2}[1 + \cos(\Delta\phi)], \end{aligned} \quad (2)$$

可见,两个输出端的输出谱都是 $\Delta\phi$ 的余弦函数,而且两者是互补的。 $\Delta L$ 发生变化, $\Delta\phi$ 相应改变,其结果是干涉仪的功率谱产生平移。大于 $\pi$ 的相位移动很容易实现,因此,这种器件可用作波长选择开关。

## 3 实验结果

实验中,马赫-曾德尔干涉仪起着开关的作用,它的特性直接影响光分插复用器的性能,其中一个重要的参数是马赫-曾德尔干涉仪的消光比。如图

1, 马赫-曾德尔干涉仪的两臂长分别为  $L_1$  和  $L_2$ , 臂长差  $\Delta L$ 。将干涉仪的一个臂粘贴在压电陶瓷上, 另一个用作参考臂, 当有电压加在压电陶瓷上时, 压电陶瓷的伸缩效应使光纤拉伸(或缩短), 引起干涉仪两臂差发生改变, 使得光谱仪观察的功率谱产生移动。PC 为偏振控制器, 其作用是调节光的偏振态, 可以改变输出光的消光比。为了减小环境干扰的影响(如外界温度波动和机械波动), 对实验系统中所用的干涉仪采取了稳定措施, 将大约各 2 m 的两臂尽可能地环绕起来, 粘贴并封装在一个密闭盒中, 保证两臂差的改变仅由压电陶瓷的伸缩决定。图 2 是在分辨力为 0.1 nm 光谱仪 (ADVANTEST Q8383) 上测得的干涉仪的输出光谱特性, 两相邻峰值波长间隔  $\Delta\lambda$  为 5.46 nm, 对应马赫-曾德尔干涉仪的臂长差  $\Delta L$  约为 0.33 mm, 干涉消光比约为 22.8 dB。用连续增大电压的方法来微量调节马赫-曾德尔干涉臂长差, 就会看到干涉谱图向同一个方向的连续移动, 实验测量了电压在 0~70 V 范围内变化时干涉光谱的移动情况, 干涉曲线的位移与所加电压的关系如图 3 所示, 电压从 0~57 V, 实验测得干涉曲线大约移动了半个周期。

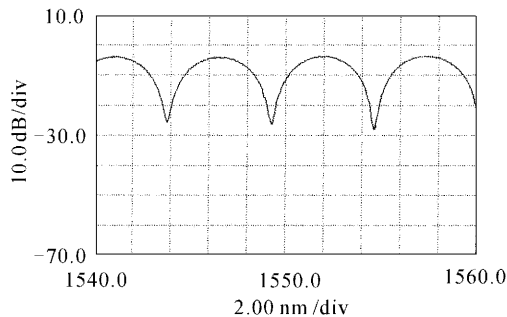


图 2 M-Z 干涉仪的输出谱  
Fig. 2 Spectrum of Mach-Zehnder interferometer

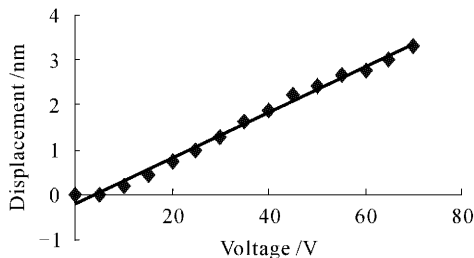


图 3 波长位移和电压之间的关系  
Fig. 3 Relationship between the wavelength displacement and the electric voltage

实验所用光纤光栅的透射谱如图 4 所示, 光栅

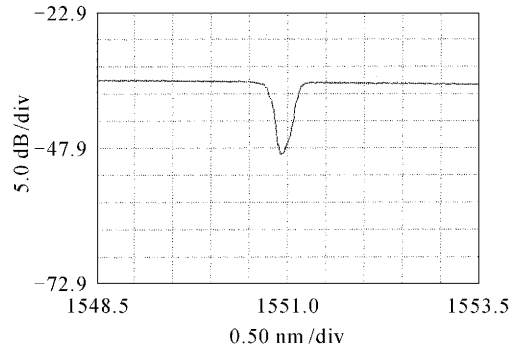


图 4 光纤光栅的透射谱  
Fig. 4 Transmission spectrum of the FBG

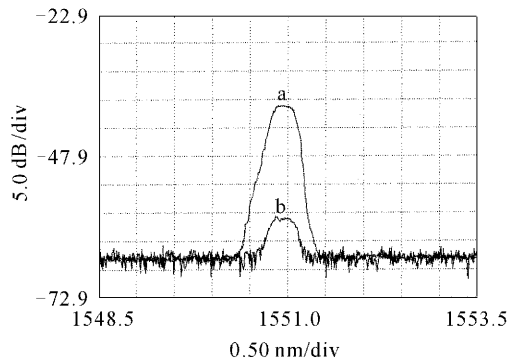


图 5 下载端的光谱  
a: “开”状态; b: “关”状态  
Fig. 5 Spectrum of drop port  
a: “on” state; b: “off” state

的中心波长为 1550.91 nm, 透射深度为 14.25 dB, 对应的反射率为 96%。为了研究这种光分插复用器的性能, 产生宽带光的宽带光源从输入端口输入, 用光谱分析仪分别监测下载端和输出端的光谱。

图 5 给出的是当马赫-曾德尔干涉仪的电压在 0~70 V 范围内变化时下载端的信号, 调节加在压电陶瓷上的电压, 可以从下载端的光谱明显看到器件的“开”和“关”两种状态。图 5 中曲线 a 和 b 是对应压电陶瓷两端的电压分别为 11 V 和 63.7 V 的情况下从下载端测得的“开”状态和“关”状态的下载谱, 消光比差大于 20 dB。输出端的谱与图 5 相似, 只是干涉仪的“开”状态对应输出端的“关”状态, 干涉仪的“关”状态对应输出端的“开”状态。如果增大光栅的反射率和马赫-曾德尔干涉仪的消光比, 可以进一步增大干涉仪“开”和“关”两种状态的消光比差。尽管如此, 20 dB 的消光比差足以满足波分复用系统的需要。

## 4 结 论

提出了一种结构新颖的基于马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅的光分插复用器,它可以实现信号的上下载或直通功能,通过电压调节干涉仪的臂长差,得到了大于 20 dB 的通道隔离度。增大光纤光栅的反射率和马赫-曾德尔干涉仪的消光比,可提高通道的隔离度。与常规的机械光开关或微机电系统光开关和光纤光栅组合构成的光分插复用器相比,这种结构的光分插复用器具有结构简单、体积小、价格低等优点,因此在波分复用技术中具有实用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Yoshiaki Tachikawa, Yasuyuki Inoue, Motohaya Ishii *et al.*. Arrayed-waveguide grating multiplexer with loop-back optical paths and its applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6):977~984
  - 2 F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault *et al.*. An all-fiber dense wavelength-division multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4):388~390
  - 3 An Vu Tran, Wen De Zhong, Rodney C. Tucker *et al.*. Optical add-drop multiplexers with low crosstalk [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(6):582~584
  - 4 Tao Zhenning, Wu Deming, Zhang Jie. A novel OADM based on fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(4):325~329
  - 5 S.-K. Liaw, K.-P. Ho, S. Chi. Multichannel add/drop and cross-connect using fibre Bragg gratings and optical switches [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(16):1601~1603
  - 6 J. Li, A. Q. Liu, Q. X. Zhang *et al.*. A hybrid reconfigurable OADM using MEMS switch and FBG [C]. *SPIE*, 2002, **4907**:9~15
  - 7 Zhao Hao, Qu Ronghui, Fang Zujie. A wavelength-selective switch based on fiber Bragg grating and fiber loop mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1425~1428
- 赵 浩,瞿荣辉,方祖捷. 基于光纤光栅和光纤环形镜的波长选择开关[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10):1425~1428