

光纤布拉格光栅可调谐双向光分插复用器关键技术

杨康 李国玉 李燕 贾素梅

邯郸学院信息技术研究所, 河北 邯郸 056005

摘要 提出一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的可调谐双向光分插复用器(Bi-OADM), 并对该OADM进行了理论分析和实验搭建。分别利用开环和闭环压电陶瓷(PZT)对OADM的上/下载波长进行调谐, 调谐范围可达到6 nm(商用的8波长复用系统波长范围为5.6 nm), 实验发现在小电压时采用开环控制, 在大于80 V时采用闭环控制, 加载电压和卸载电压曲线重复性好。与此同时利用光开关和可选择路径机制, 使OADM具有双向传输的功能, 实验结果显示可调谐Bi-OADM的插入损耗能降低到4 dB, 由于采用了双向结构, 当某一方向的光路(顺行)发生断路时, 另一方向(逆行)能够继续传输信号, 因此大大提高了OADM的可靠性。

关键词 光纤光学; 双向光分差复用器; 光纤布拉格光栅; 压电陶瓷

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.120604

Tunable Bi-Directional Optical Add-Drop Multiplexer Based on Fiber Bragg Grating

Yang Kang Li Guoyu Li Yan Jia Sumei

Institute of Information Technology, Handan College, Handan, Hebei 056005, China

Abstract A tunable bi-directional optical add-drop multiplexer (Bi-OADM) based on fiber Bragg grating (FBG) is proposed and demonstrated. The center wavelength of the optical add-drop multiplexer (OADM) is tuned without chirp by using open and closed piezoelectric ceramic (PZT) separately. The tunable range can reach 6 nm, while the range of commercial eight wavelengths multiplexing system is 5.6 nm. The experiment shows a good reproducibility in the voltage load and unload curves when using open loop in small voltage and using closed loop in big voltage (more than 80 V). Employing optical switches and alternate-path switching scheme, the bi-directional transmission can make one-direction light path normally transmit when the other direction light path is fail in the ring network, which can greatly improve the reliability of OADM. The experimental results indicate that the tunable Bi-OADM shows a low insert loss (4 dB).

Key words fiber optics; bi-directional optical add-drop multiplexer; fiber Bragg grating; piezoelectric ceramic

OCIS codes 060.2330; 060.2340; 230.1150

1 引言

为了满足日益增长的带宽需求, 波分复用(WDM)被广泛应用于光网络中, 但是, 最早用于WDM系统的分插复用器还需要借助于电子器件, 以“光-电-光”的处理方式, 逐一处理每个信号波长。面对WDM和密集波分复用(DWDM)系统中几个甚至几十个信道, 所需集成的电子器件数越来越多, 而电子速率根本无法满足对光信号的及时响应, 这就催生了替代传统分插复用器^[1-2]的光分插复用器(OADM)。OADM由全光器件构成, 可透明传输各种接入方式的数据, 在光域上可实现信息流的选路、交换、传输和故障恢复等功能, 一方面提高了网络信号上下载的灵活性, 另一方面也增加了整个网络的可控性和生存性, 在光通信系统中有着举足轻重的地位^[3-4]。

近几十年里, OADM在业界特别是发达国家和地区, 有相当大的声势, 这在很大程度上是由于几个重要的运营商(包括AT & T Corp、SBS Communication Inc、Version Communication Inc)对用OADM来升级自

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-06-25; 网络出版日期: 2015-11-13

基金项目: 河北省自然科学基金(F2014109015)、邯郸学院自然科学研究课题(14102, 14104)

作者简介: 杨康(1984—), 女, 讲师, 主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: engineeringmaster@126.com

己的网络产生了浓厚的兴趣^[5-6]。2013年美国电信操作商 Paletto Net 在他们长达 3 km 的全光网络中利用 Ciena 公司的可重构光分插复用器(ROADM)技术,提高了网络容量和设备的灵活性。根据权威市场调研公司 Infonetics 于 2014 年发布的 ROADM 组件市场报告,2013 年上半年全球 ROADM 组件市场收入为 1.11 亿美元,相比上半年上涨 4%,2013 年基于光设备(不包括零部件) WDM ROADM 的全球收入相比 2012 年增长 11%,即达到 45 亿美元,据 Infonetics 预计,基于光设备的 WDM ROADM 将保持快速增长,预计其 2013~2018 年复合增长率(CAGR)为 13%,由此可见,OADM 特别是 ROADM 仍有较大的发展潜力。

我国早在 2001 年,在国家 863 项目的支持下,中国高速信息示范网(CANONET)就部署了国内厂家和高校研制的光交叉连接器(OXC)和可调谐 OADM 设备,但那时设备还不够成熟,市场应用环境还不具备,且成本高昂,因此为适应广泛应用的需求,固定波长上/下的 OADM 占据了市场的主流位置。而今天,随着市场形势的发展,特别是 P2P 和 IPTV 的快速发展,ROADM 的应用特别是在本地/城域网络中的应用,引起了业内特别是运营商的关注^[7]。

本文提出了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的可调谐双向 OADM (Bi-OADM),分析了 Bi-OADM 的基本理论,描述了系统模型和选择路径的机制,并对提出的这种 Bi-OADM 结构进行了实验,实现了双向传输。

2 理论分析及系统模型的建立

马赫-曾德尔干涉仪(MZI)由于其便于连接、结构紧凑、损耗低、稳定性高,被广泛应用于波分复用中^[8-10]。本文提出的可调谐 Bi-OADM 基于 FBG 的 MZI 结构。采用的 FBG 是利用掩模板在紫外激光下暴露写制而成^[11],光栅周期可由著名的布拉格光栅方程获得:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda, \quad (1)$$

式中 λ_B 表示中心波长, n_{eff} 表示纤芯的有效折射率, Λ 表示光刻掩模板的周期。由于 FBG 的中心波长会随着外力、温度、湿度等外界因素的改变而发生调谐,可调谐的 OADM 正是基于此原理(主要是应力)进行不同波长信号的下载和上传。实验中利用压电陶瓷(PZT)对 Bi-OADM 的上/下载波长进行调谐^[12]。波长调谐的大小与外界应力成正比,即

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.79\varepsilon_x, \quad (2)$$

式中 ε_x 表示水平方向的应变,可进一步表示为

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \frac{F}{S}, \quad (3)$$

其中 E 表示杨氏模量, S 为光纤的横截面积, F 表示应力。因此在有效折射率和模板周期一定的前提下, λ_B 不变,如果想要增加波长调谐量,只能增加 ε_x 的值。由(2)和(3)式可以看出,增加 F 应力的大小或者减小横截面积 S 均可增大调谐量。减小横截面积能够在相同应力的前提下获得更大的波长调谐,但是减小横截面积之后的光纤由于其纤芯变得非常细,在利用紫外光刻法进行写制光栅时,非常不易聚焦,写制过程大大加长,且写制深度有限,因此主要讨论增加应力 F 的值,增加波长的调谐量,以获得更多的波长下载个数。

图 1 为可调谐 Bi-OADM 的原理图。正常工作状态下,入射端(Tx)光开关 1(Optical switch 1)指向端口 1,

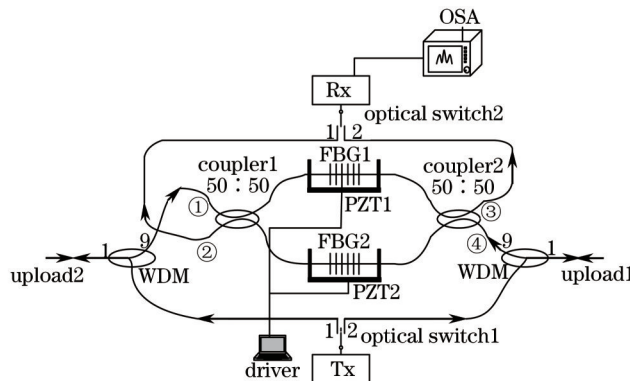


图 1 基于 MZI-FBG 的可调谐 Bi-OADM 原理图

Fig.1 Block diagram of the tunable Bi-OADM based on MZI-FBG

此时信号按顺时针(CW)方向通过耦合器1的1端口,经过MZI反射后下载信号(中心波长与FBG1和FBG2的中心波长一致)由耦合器1的2端口输出给接收端(Rx,此时光开关2指向端口1),上载信号由耦合器upload1输入,通过MZI反射与下载后的信号整合输出给接收端(此时光开关2指向端口2),最终由光谱仪(OSA)测出输出光谱特性。

如果这部分光路发生断路,在接收端不能正常接收到下载信号和上传信号,就可以启动备用模式,让光开关1指向端口2,此时信号按逆时针(CCW)方向通过耦合器2的4端口,经过MZI后下载信号通过耦合器2的3端口输出给接收端(此时光开关2指向端口2),上载信号由耦合器upload2输入,通过MZI反射与下载后的信号整合输出给接收端(此时光开关2指向端口1)。可调谐范围为1547~1553 nm。

3 实验结果与分析

在实验中,将MZI的2个臂上的FBG严格对准后中心波长为1547.64 nm,3 dB带宽为0.3 nm,调制深度为15 dB。由于顺时针和逆时针方向信号传输的原理相同,因此主要以顺时针方向分析可调谐Bi-OADM的各项性能指标。

宽带光源通过梳状滤波器以实现多波长传输,其中每个信道间隔为0.8 nm,3 dB带宽为0.3 nm,符合实际光通信中WDM的要求。输入光谱如图2(a)所示。如图2(b)表示下载端信号的光谱图(光开关2打到1端口的输出),中心波长为1547.58 nm,深度为15 dB。图2(c)表示耦合器2的3端口未加载上载信号时的光谱图,通过与图2(b)对比,可见下载波长与此时耦合器2的3端口输出信号缺失波长完全对应,表明该结构OADM能够完成特定波长的下载功能,插入损耗小于5 dB。图2(d)表示增加上载信号后输出的光谱图(光开关2达到2端口的输出)。

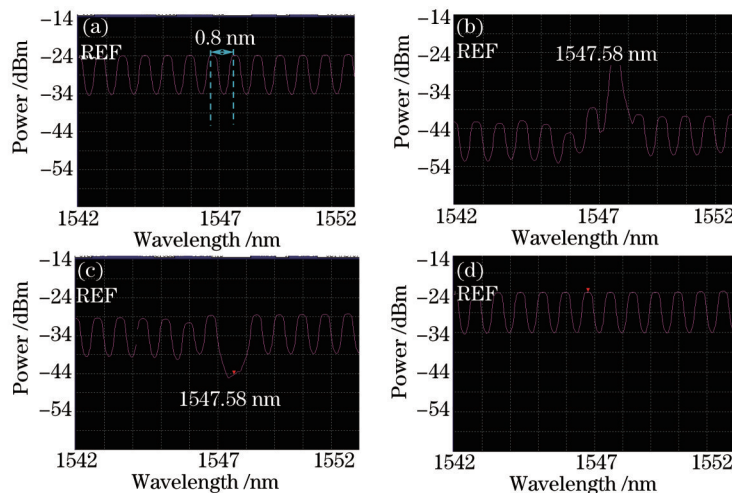


图2 顺时针方向下Bi-OADM的光谱图。(a)可调谐Bi-OADM输入信号光谱图;(b)波长为1547.58 nm信号下载光谱图;(c)通过信号的光谱图;(d)加载信号后的输出光谱

Fig.2 Spectrum characteristics of the Bi-OADM in CW direction. (a) Input signal of the tunable Bi-OADM; (b) spectrum of the drop signal (FBG at 1547.58 nm); (c) spectrum of the pass signal of the tunable Bi-OADM; (d) output signal with added channel

可调谐光分插复用器的调谐范围依赖于MZI的2个臂长的FBG中心波长的调谐范围。本文对这种Bi-OADM的FBG进行了调谐实验,图3为基于PI(power integratiions)公司PZT进行开环控制的波长调谐曲线图,图4为基于芯明天公司PZT闭环控制的波长调谐曲线图,以方形点连接的曲线代表峰值波长随着电压的升高而增加,以圆形点连接的曲线代表峰值波长随着电压的降低而减小。调谐电压范围为0~150 V,步进为5 V,中心波长调谐范围从1544.69~1551.97 nm,由图3、图4可见,无论是加载曲线还是卸载曲线基本重合,这就说明了此方法调谐具备重复性。通过对比开环控制和闭环控制PZT的实验结果发现,当控制电压小于60 V时,开环控制的电压加载和卸载曲线的重合性要优于闭环控制时2条曲线的重合性,故在小电压时宜采用开环控制;同理在大电压时(特别是控制电压超过80 V)采用闭环控制的电压加载和卸载曲线的重合性要优于开环控制时2条曲线的重合性,故在大电压(控制电压超过80 V)时,闭环控制的2条曲线重复性好。

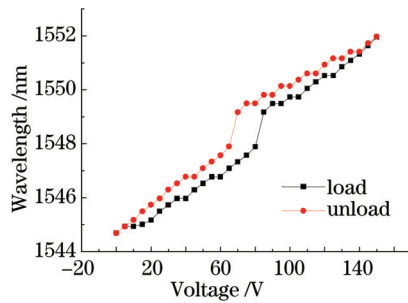


图3 基于PZT开环离散调谐FBG的调谐曲线

Fig.3 Tuning curves of FBG based on open-loop PZT discrete modulation

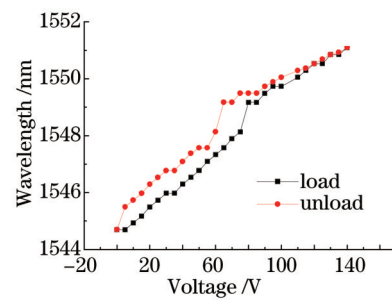


图4 基于PZT闭环离散调谐FBG的调谐曲线

Fig.4 Tuning curves of FBG based on closed-loop PZT discrete modulation

4 结 论

本文提出一种全新的可调谐 Bi-OADM, 并对其调谐范围和性能进行了实验和分析, OADM 的下载波长主要依靠 PZT 对 MZI 的 2 臂上的 FBG 进行应力调谐, 调谐范围能够达到 6 nm, 在调谐过程中要使 2 个 FBG 的中心波长完全一致, 否则下载波长会有较大的损耗, 从而影响 OADM 的性能。在进行调谐实验时分别采用了开环控制和闭环控制, 通过实验结果发现在小电压时采用开环控制 PZT, 加载电压和卸载电压的曲线重复性好, 在大电压(超过 80 V)时, 采用闭环控制 PZT, 加载电压和卸载电压的曲线重复性好。另外, 这种双向光分插复用器在正常工作状态下, 信号由顺时针方向下载输出给光开关 2 的 1 端口, 当这部分光路出现断路时, 信号还可由逆时针方向(此时光开关 1 打到 2 端口)下载输出给光开关 2 的 2 端口, 这样大大提高了 OADM 的可靠性。

参 考 文 献

- 1 An Junming, Zhang Jiashun, Wang Yue, *et al.*. Study on wavelength division multiplexer for silicon photonics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 110006.
安俊明, 张家顺, 王 玥, 等. 硅光子中波分复用技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 110006.
- 2 Chen Yue, Hua Nan, Zheng Xiaoping. Inner-port connectivity aware dynamic routing schemes in optical wavelength division multiplex networks[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0405005.
陈 悦, 华 楠, 郑小平. 波分复用光网络中考虑端口连通性限制的动态路由机制[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0405005.
- 3 Zhang Jianya, Huang Yonglin. A novel FBG-based two-way transmission tunable optical add-drop multiplexer[J]. *Study on Optical Communications*, 2015, 41(2): 4-6.
张建亚, 黄勇林. 基于 FBG 的新型双向传输可调谐光分插复用器[J]. *光通信研究*, 2015, 41(2): 4-6.
- 4 Li Heng, Huang Yonglin. Mach-Zehnder interferometer and sampled gratings tunable optical add-drop multiplexer[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(1): 52-55.
李 恒, 黄勇林. 基于 MZI 和取样光栅的可调谐光分插复用器[J]. *半导体光电*, 2013, 34(1): 52-55.
- 5 Ahmed N Z Rashed. Transmission performance evaluation of optical add drop multiplexers (OADMs) in optical telecommunication ring networks[J]. *American Journal of Engineering and Technology Research*, 2012, 12(1): 23-37.
- 6 Paul Urquhart. Resilient optical fiber ladder network with OADMs to multiplex sensors: Binary-state connectivity analysis[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(10): 2950-2967.
- 7 Zhang Ming, Dong Zhanglong, Quan Bisheng, *et al.*. A novel reconfigurable optical add/drop multiplexer and its networking performance analysis[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(12): 73-79.
张 明, 董章龙, 全必胜, 等. 新型可重构光分插复用器及其联网性能分析[J]. *光电工程*, 2013, 40(12): 73-79.
- 8 Liu Bo, Guo Jianying, Sun Yongquan. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1503-1509.
刘 泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1503-1509.
- 9 Zhu Xiaoliang, Zhang Xiaodong. Study on optical bistability using fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 080601.
朱晓亮, 张晓东. 利用光纤马赫曾德尔干涉仪实现的光学双稳性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 080601.

- 10 Sun Jingwen, Sun Jian, Wang Yanshuang, *et al.*. Polymeric MZI thermo-optic switch with low power consumption[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0706001.
孙静雯, 孙 健, 王艳双, 等. 低功耗聚合物MZI结构热光开关研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0706001.
- 11 Fan Linyong, Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, *et al.*. Comb-filter based on Mach-Zehnder interferometer using a twin-core fiber[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 1-9.
范林勇, 江微微, 赵瑞峰, 等. 双芯光纤马赫曾德尔干涉仪型梳状滤波器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 1-9.
- 12 Liu Kangkang, Liu Hongli, Zhao Ruchen, *et al.*. Enhancement of tunability and stability of a continuous-wave deep ultraviolet laser by feed-forward control method[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1202004.
刘亢亢, 刘洪力, 赵儒臣, 等. 用前馈控制方法提高连续紫外激光器的调谐性和稳定性[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1202004.

栏目编辑: 王晓琰