

基于 Mach-Zehnder 干涉仪和光纤光栅型 光分插复用器

刘明生^{1,2} 郑文华¹ 杨康³ 李国玉³ 李燕³

¹河北工业大学信息工程学院, 天津 300400

²石家庄铁路职业技术学院信息工程学院, 河北 石家庄 050000

³邯郸学院信息工程学院, 河北 邯郸 056000

摘要 提出了一种结构新颖的基于 Mach-Zehnder 干涉仪和光纤光栅的光分插复用器。它由 Mach-Zehnder 干涉仪、2 个环形器和 3 个光纤光栅构成, 2 个环形器之间的光纤光栅起波长选择开关作用, 调节光纤光栅的中心波长, 可以实现光信号的上下载或直通功能, 光信号上下载时通道的最大隔离度大于 23 dB, 同频串扰低于 -40 dB, 该系统不仅可以实现针对特定波长的上下载, 还可以实现对上下载波长的可调谐。基于 Mach-Zehnder 干涉仪和光纤光栅的新型结构光分插复用器具有结构简单、成本低、灵活性强等特点, 在光纤通信波分复用系统中具有良好的实际应用价值。

关键词 光通信; 光分插复用器; Mach-Zehnder 干涉仪; 光开关

中图分类号 TN915

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.110603

Novel Optical Add-Drop Multiplexer Based on Mach-Zehnder Interferometer and Fiber Grating

Liu Mingsheng^{1,2} Zheng Wenhua¹ Yang Kang³ Li Guoyu³ Li Yan³

¹College of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China

²College of Information Engineering, Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang, Hebei 050000, China

³College of Information Engineering, Handan University, Handan, Hebei 056000, China

Abstract A novel optical add-drop multiplexer (OADM) based on the Mach-Zehnder (M-Z) interferometer and the fiber Bragg grating (FBG) is proposed. The OADM consists of a M-Z interferometer, two optical circulators and three FBGs. The FBG between two circulators acts as an optical switch. The OADM can add/drop one of the input multi-channels or pass the channels directly by adjusting the relative wavelength of the FBG. The channel isolation of the OADM is more than 23 dB, and the same frequency crosstalk is below -40 dB. The system can not only just download a specific wavelength, but also adjust the wavelengths of upper and lower carriers. The novel OADM has many advantages such as simple structure, low cost, good flexibility. It can be used in practical wavelength division multiplexing (WDM) system.

Key words optical communications; optical add-drop multiplexer; Mach-Zehnder interferometer; optical switch

OCIS codes 060.4510; 060.1810; 230.1150

1 引言

光分插复用器(OADM)作为光波分复用(WDM)光通信网络的关键器件之一,一直是国内外的研究热点,其功能是从传输光路的众多波长信道中有针对地上下载某一个或某一批波长信道,同时不影响其他波长信道的业务传输。目前已有多种 OADM 的结构方案,如基于分波/合波器与波长交换单元相结合的波长复用型 OADM,但光开关时延较大,温度稳定性差,器件串扰水平高^[1-4],且体积偏大;基于声光可调滤波器的

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-06-12; 网络出版日期: 2015-09-24

基金项目: 国家 863 计划(2013AA011303)

作者简介: 刘明生(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光网络安全技术和光网器件等方面的研究。

E-mail: liums601001@sina.com

OADM,虽然调谐速度快,调谐范围大,但实现难度大,串扰大,对偏振敏感^[5-6];基于法布里-珀罗(F-P)腔的OADM,波长可连续调谐,但受温度影响大,性能不易控制^[7];基于光纤光栅(FBG)和Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪^[8-11]型OADM和基于光纤光栅^[12-13]和环形器^[14]型OADM技术成熟,集成度高,插入损耗较小^[15],但也都存在一些缺陷:不能满足信号的直通功能,不可重构^[16],不能上下载任意不同波长的光信号,灵活性不强。本文提出了一种基于M-Z干涉仪和光纤光栅的新型结构光分插复用器。

2 OADM结构和原理

实验装置如图1所示,它是由M-Z干涉仪、环形器a和环形器b、3个FBG和1个隔离器构成。在平衡的M-Z干涉仪上下2个干涉臂上写入FBG1、FBG2,FBG1和FBG2具有可调谐性,目的是为了下载不同波长的光信号。图中FBG3也是波长可调的光纤光栅,用来对下载信号的直通或下载选择。OADM光路有4个端口:输入端(①)、输出端(②)、下载端(drop)、上载端(add)。工作过程:先调节FBG1和FBG2使中心波长一致,都为 λ_0 ,进入M-Z干涉仪中波长为 λ_0 的光信号将被FBG1和FBG2反射,从端口②下载后进入环形器a。调节FBG3的中心波长,若为 λ_0 ,则波长为 λ_0 的光信号在drop端被下载;若FBG3中心波长不为 λ_0 ,通过FBG3,经过隔离器,由环形器b的3端口进入干涉仪的③端口与其他透过的光信号一起耦合从④端口输出,从而实现信号的直通功能。

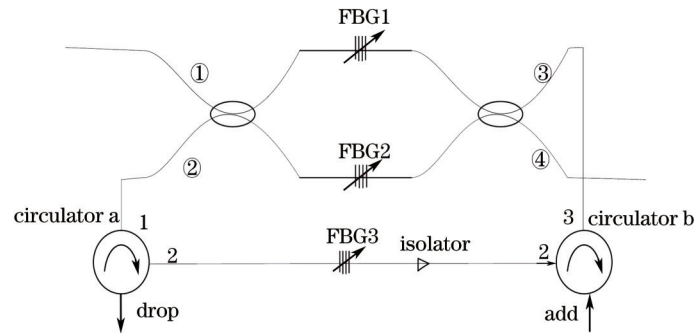


图1 光分插复用器结构图

Fig.1 Structure of OADM

新型结构OADM不仅能够实现特定波长光信号的上下载、直通功能,而且通过调谐FBG1、FBG2、FBG3的各自中心波长可实现多波长的下载需求。同时改变所有FBG的中心波长,可以上下载不同的光信号通道;当FBG1、FBG2、FBG3的中心波长都不一致,通过控制各自的中心波长大小,可以实现对下载波长的可调谐。

FBG反射波长为

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

式中, Λ 为FBG的栅格周期(即光栅间距); n_{eff} 为纤芯有效折射率。FBG受到拉力后,光栅间距将发生变化,从而FBG的布拉格波长也随之发生变化。将FBG3粘在压电陶瓷片(PZT)上,通过压电陶瓷调谐FBG3,改变电压大小,控制中心波长 λ_B 的漂移。在室温为25℃的条件下,FBG中心波长变化与加载电压 U 的关系为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = nd_{31}(1-p_e)U/d, \quad (2)$$

式中, n 为压电陶瓷片的数量; d_{31} 为横向压电应变常数; d 为电极间厚度; p_e 为光纤的有效弹光系数。

3 实验结果分析

实验中,光纤光栅FBG1(FBG1与FBG2相同)的中心波长为1547.536 nm,透射深度为15 dB,反射谱3 dB带宽为0.4 nm,反射率高于97%,FBG1和FBG2的反射率越高,边模抑制比越大,OADM的隔离度就越高,同频串扰也就越小。光纤光栅FBG3的中心波长为1547.542 nm,透射深度为23 dB,反射谱3 dB带宽为0.4 nm,反射率高于99%。固定FBG1和FBG2的中心波长,将光纤光栅FBG3进行微调,在中心波长1547.536 nm调谐范围可达1.6 nm,FBG3起到了光开关的作用。

经入射端(①)输入OADM中的光信号为宽带光源经过梳状滤波器后的输出光,梳状滤波器的频率间隔为0.8 nm。影响光分插复用器性能关键的2个参数:隔离度、同频串扰。为了提高结构新型OADM的性

能,控制干涉仪两臂的臂长 ΔL ,保持一致,减小环境温度等其他因素的干扰,将搭好的 OADM 实验器件封装在一个盒子中,固定在光学平台上,搭建起来的实验装置图如图 2 所示。

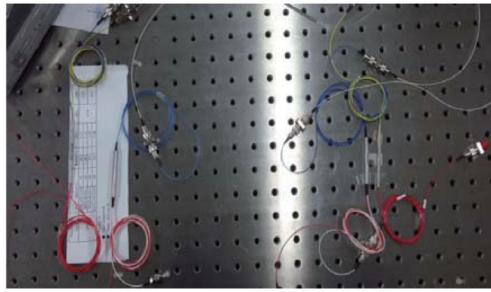


图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup

光谱仪 AQ6370C 显示 OADM 的输出端、下载端及上载端的光谱图,逐渐增大压电陶瓷的电压微量改变陶瓷片的形变,控制 FBG3 中心波长的漂移。在 0~192 V 电压范围内,压电陶瓷可实现对 FBG3 中心波长为 1.6 nm 范围的调谐。测得波长漂移与电压的关系曲线如图 3 所示,OADM 初始输入端输入光谱图如图 4 所示。

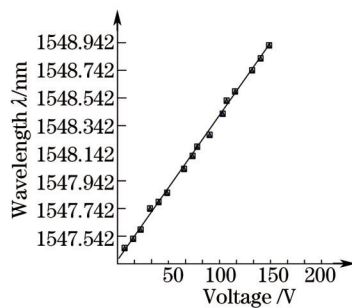


图 3 波长漂移和电压之间的关系

Fig.3 Relationship between the wavelength displacement and the electric voltage

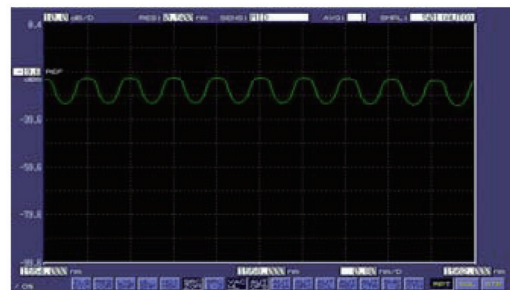


图 4 OADM 输入谱

Fig.4 OADM input spectrum

FBG3 中心波长的漂移控制实现 OADM 下载或直通功能,逐渐增大压电陶瓷的电压,可以清楚地看到 OADM 下载端下载光谱的衰减,从而实现了波长为 1547.536 nm 光信号下载的开关或直通状态。经过多次实验,得出新型结构 OADM 隔离度与 FBG3 中心波长漂移的关系如图 5 所示。

由图 5 可知,随着压电陶瓷电压逐渐增大,FBG3 中心波长向长波长方向漂移,OADM 的通道隔离度逐渐增大,且中心波长与隔离度呈线性关系。图中给出了拟合曲线,拟合度高达 97%。当 FBG3 的中心波长增大到 1549.8 nm,OADM 的通道隔离度达到最大值 23 dB。继续增大 FBG3 的中心波长漂移量,OADM 隔离度不再改变。

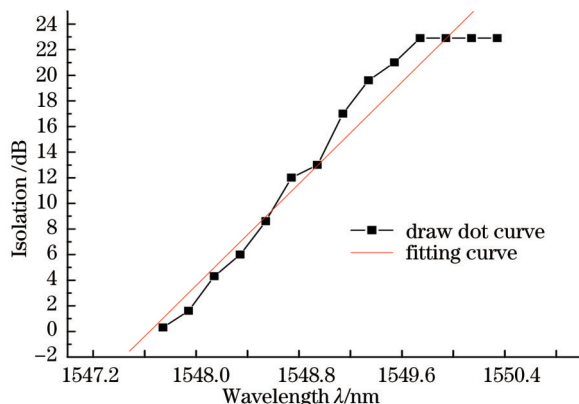


图 5 波长漂移与隔离度关系

Fig.5 Relationship between the wavelength displacement and the isolation

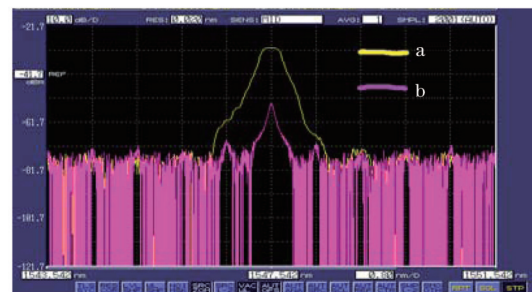


图 6 OADM 下载端的光谱

Fig.6 OADM Spectrum of drop port

图6是在光谱仪上观测到的 OADM 下载端最大和最小的输出光谱,图中曲线 a 为 FBG1 和 FBG3 的中心波长相同,曲线 b 为 FBG1 和 FBG3 中心波长不同的情况。当 FBG3 的中心波长与 FBG1 和 FBG2 的中心波长一致时,可得最大下载光谱,不一致时可得最小下载光谱,类似光开关的开关 2 种状态。图 6 中 a 曲线处于压电陶瓷未加电压,FBG3 自然状态下,中心波长为 1547.542 nm 的光信号被完全下载,逐渐增大压电陶瓷的电压值至 192 V 时可得到图中 b 曲线,相当于开关处于关闭状态,此时可得 OADM 的最大隔离度可达 23 dB。对于 23 dB 的通道隔离度足以满足新型 OADM 在实际光纤通信中的应用。

OADM 下载端得到最大、最小下载谱后,其相应输出端的光谱图如图 7 所示。对比输入谱由图 4 可知,该新型结构直通光信号的插入损耗(以下简称插损)测量值为 5.98 dB,当 FBG3 与 FBG1、FBG2 中心波长一致时,OADM 输出谱如图 7(a)所示,此时 OADM 开始进行光信号的上下载,测得下载插损为 7.81 dB,上载插损为 6.05 dB;当 FBG3 与 FBG1、FBG2 中心波长不一致时;OADM 输出谱如图 7(b)所示,此时 OADM 实现光信号的直通功能,没有光信号的上下载,测得信号光峰值波长处的透射插损为 6.44 dB。由各种插损参数可知,该结构新型 OADM 满足对波长可选择上下载的功能要求。

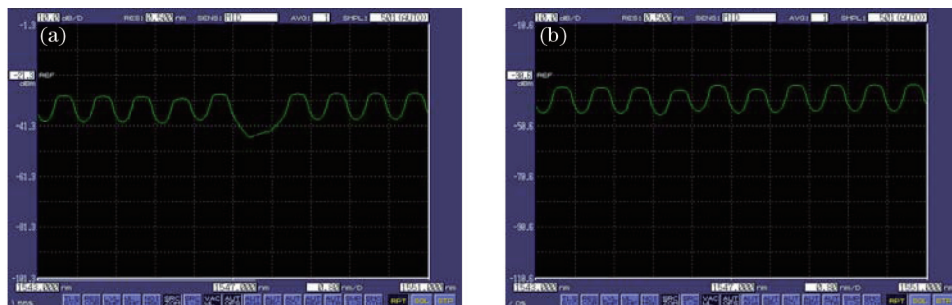


图 7 OADM 输出端的光谱。(a) FBG1 和 FBG3 中心波长相同;(b) FBG1 和 FBG3 中心波长不同

Fig.7 OADM Spectra of output end. (a) Same central wavelength between FBG1 and FBG3;

(b) different central wavelengths between FBG1 and FBG3

影响 OADM 性能的另一个重要参数是同频串扰。由于实际应用的 FBG 反射率达不到 100%,光纤器件本身具有固有损耗,引起了系统功率恶化。为了减小串扰对 OADM 性能的影响,必须把此结构新型 OADM 的同频串扰降低到合适范围内,如图 8 所示。

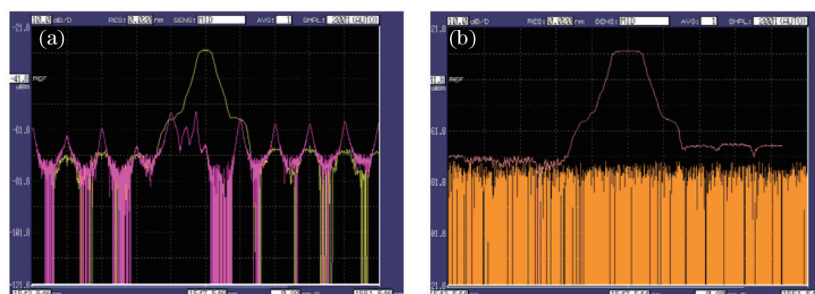


图 8 下载通道输出谱。(a) 未加隔离器;(b) 加隔离器

Fig.8 Output spectra of the dropped channel in OADM. (a) Without isolator; (b) with isolator

由图 8(a)所示,较上面的曲线是中心波长为 1547.542 nm 光信号的下载谱,下面的曲线是上载通道泄露到下载通道的光信号,可以看出 OADM 下载端的同频串扰为 -24.3 dB。这是由于实验中所用 FBG 的反射率不到 100%造成的。为了降低同频串扰,如图 8(b)所示,在 OADM 中 FBG3 的右侧增加 1 个隔离器,此时同频串扰为 -41 dB,相比未加隔离器的 OADM 同频串扰水平减小了 16.7 dB,实验结果表明在 OADM 中添加 1 个隔离器对同频串扰具有很强的抑制作用。

串扰会使系统功率衰减,同频串扰可产生最大恶化功率^[17]为

$$P = -10 \lg(1 - 4\sqrt{\varepsilon}), \quad (3)$$

式中 $\varepsilon = (1 - R)/R$ 。其中 R 为 FBG 峰值反射率,两者关系如图 9 所示。

图 9 中横坐标代表 FBG3 的透射率,透射率越低,反射率越高,FBG3 的反射率越高,相应的功率恶化就小,反之就变大。在光栅透射率相同的情况下,增加 1 个隔离器能有效地抑制由同频串扰引起的功率恶化,

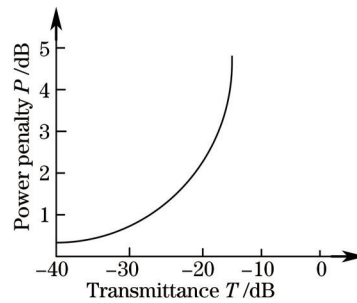


图9 光分插复用器中的功率损耗

Fig.9 Power penalty in OADM

与实验结果一致。

以上所做 OADM 的实验只针对特定波长进行了具体分析,该新型结构还可以用于从多路中选出某 1 个频道的调谐。同时调谐 FBG1、FBG2、FBG3,使 FBG1、FBG2 的中心波长发生漂移(FBG1 和 FBG2 的中心波长保持一致),然后调谐 FBG3 对准 FBG1 和 FBG2 的中心波长,此时可以实现对下载波长的可调谐,下载端可下载不同频道的光信号,如图 10 所示。

由图 10 可知,通过同时调谐 FBG1、FBG2、FBG3 的中心波长,该 OADM 实现了对中心波长为 1548.356 nm 光信号的下载。如果初始调谐 FBG1 和 FBG2 的中心波长不一致,使其频率间隔为 0.8 nm,再逐渐调谐 FBG3 的中心波长与其一一对应,该器件还可以实现对每个光纤光栅的中心波长分别下载。

初始调谐 FBG1 的中心波长为 1547.540 nm,FBG2 的中心波长为 1548.340 nm,在环形器 a 的输入端口 1 测得光谱图如图 11 所示。逐渐调谐 FBG3 的中心波长向长波长方向漂移,当 FBG3 的中心波长为 1547.540 nm 时,OADM 的下载端输出谱如图 12(a)所示,由图可知,波长为 1547.540 nm 的光信号被下载,而波长为 1548.340 nm 的光信号未被下载;继续调谐 FBG3 的中心波长,当为 1547.940 nm 时,OADM 的下载谱如图 12(b)所示,此时 FBG3 的中心波长介于 FBG1 和 FBG2 的中心波长之间,由于 FBG3 的反射谱带宽略大于 0.8 dB,因此,波长分别为 1547.540 nm,1548.340 nm 的 2 个光信号全被下载;继续增大 FBG3 中心波长的漂移,波长为 1547.540 nm 的光信号通过该 OADM 不再被下载,当 FBG3 的中心波长为 1548.140 nm 时,波长为

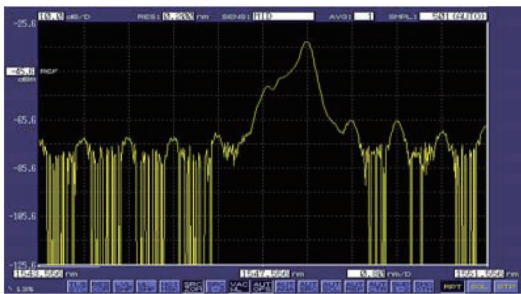


图 10 OADM 下载端的光谱

Fig.10 OADM Spectrum of drop port



图 11 环形器 a1 端口的输入谱

Fig.11 Input spectrum of circulator port a1

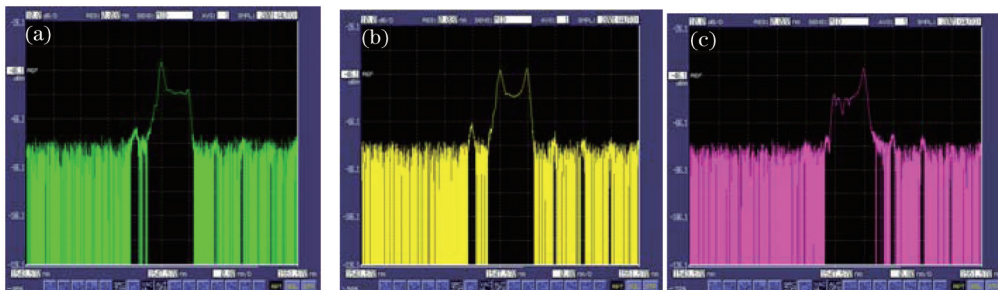


图 12 OADM 下载端的输出谱。(a) FBG3、FBG1 中心波长一致;(b) FBG3 中心波长介于 FBG1 和 FBG2 之间;
(c) FBG3、FBG2 中心波长一致

Fig.12 OADM Spectra of drop port. (a) Same central wavelength between FBG3 and FBG1; (b) central wavelength of FBG3 lies between FBG1 and FBG2; (c) same central wavelength between FBG3 and FBG2

1548.340 nm 的光信号开始被下载,当 FBG3 的中心波长漂移到 1548.340 nm 时, OADM 下载端得到最大下载谱如图 12(c) 所示,此时,波长 1548.340 nm 的光信号被完全下载。由此可见,该 OADM 不仅能够针对特定波长光信号进行上下载或直通,还可以实现对上下载波长的可调谐。

4 结 论

提出了一种新型的基于 M-Z 干涉仪和 FBG 可调谐的 OADM,实验证明该新型结构插入损耗低、可调谐范围大、串扰水平低、通道隔离度高、灵活性强。通过控制 FBG1、FBG2、FBG3 的中心波长的漂移实现了可调谐的光信号上下路,对非上下载光信号能够实现直通功能。该器件的指标完全符合在光纤通信波分复用系统应用要求,具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Yuta Goebuchi, Tonoyuki Kato, Yasuo Kokutun. Multiwave length and multiple hitless wavelength-selective switch using series-coupled microring resonators[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(9): 670-675.
- 2 M J Kim, H K Kim, H M Leeet, *et al.*. Low-cost optical add drop multiplexer module using a 2×2 port optical device[J]. Opt Eng, 2003, 42(9): 2488-2492.
- 3 Zhou Bin, Zhang Yang'an, Huang Yongqing, *et al.*. Research on and implementation of WSS-based ROADM[J]. Study on Optical Communications, 2008, 34(1): 11-13.
周 斌, 张阳安, 黄永清, 等. 基于波长选择开关的 ROADM 实现研究[J]. 光通信研究, 2008, 34(1): 11-13.
- 4 Dai Jing, Zhang Minming, He Yan, *et al.*. Research on AWG-based large-scale optical switching systems[J]. Study on Optical Communications, 2013, 39(5): 1-3.
戴 竞, 张敏明, 何 岩, 等. 基于阵列波导光栅的大规模光交换系统研究[J]. 光通信研究, 2013, 39(5): 1-3.
- 5 Cui Jianmin, Feng Lihui, Sun Yunan, *et al.*. Performance analysis of integrated acousto-optic tunable filter applied for the OADM[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(12): 1430-1433.
崔建民, 冯立辉, 孙雨南, 等. 用于 OADM 的集成声光可调谐滤波器的性能分析[J]. 光子学报, 2003, 32(12): 1430-1433.
- 6 T A Birks, P S JRussell, D O Culverhouse. The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers[J]. J Lightwave Technol, 1996, 14(11): 2519-2539.
- 7 Zhang Peng, Lei Xiaohua, Zhu Yong, *et al.*. A study on the cross-correlating demodulation of frequency division multiplexed optical fiber Fabry-Perot sensors[C]. SPIE, 2004, 11: 190-196.
- 8 Yonglin Huang, Jie Li, Guiyun Kai, *et al.*. High extinction ratio multiplexer/demultiplexer with a Mach-Zehnder interferometer and a fiber loop mirror[J]. Chin Opt Lett, 2003, 1(2): 63-64.
- 9 Yonglin Huang, Xingfa Dong, Jie Li, *et al.*. Analysis and testing of a novel OADM based on FBG and Mach-Zehnder interferometer[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 45(2): 153-158.
- 10 Ji Yushen, Fu Guangwei, Fu Xinghu, *et al.*. Sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on the fused tapered photonic crystal fiber sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006005.
纪玉申, 付广伟, 付兴虎, 等. 熔融拉锥型光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪传感特性[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1006005.
- 11 Bi Weihong, Shen Yuan, Liu Qiang, *et al.*. Refractive index sensing characteristics of a Mach-Zehnder interferometer based on directly photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505008.
毕卫红, 申 远, 刘 强, 等. 直接熔融塌陷光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪的折射率传感特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505008.
- 12 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Li Shujuan, *et al.*. Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706009.
宋志强, 祁海峰, 李淑娟, 等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706009.
- 13 Zhang Kaiyu, Zhao Hong, Zhang Weichao, *et al.*. Fiber Bragg grating electrostatic voltage sensor based on uniform strain beam[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0306003.
张开玉, 赵 洪, 张伟超, 等. 基于等应变梁的光纤光栅静电电压传感器[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0306003.
- 14 Liu Zhiming, Chen Kunfeng, Gao Yesheng, *et al.*. A narrow-line-width multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on arrayed-waveguide grating and optical circulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s102005.
刘志明, 陈坤峰, 高业胜, 等. 基于阵列波导光栅与光环形器的多波长窄线宽掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(s1):

s102005.

- 15 Yang Huayong, Jiang Nuan, Zhang Xueliang, *et al.*. Characteristics of three types of OADM[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 329-334.
杨华勇, 姜 暖, 张学亮, 等. 三种结构的光分插复用器特性比对研究[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 329-334.
- 16 Shigeru Nakamura, Shigeyuki Yanagimachi, Hitoshi Takeshita, *et al.*. Compact and low-loss 8×8 silicon photonic switch module for transponder aggregators in CDC-ROADM application[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2015: M2B.6.
- 17 Goldstein E L, Eskildsen L, Elrefaie A F. Performance implications of component crosstalk in transparent lightwave networks[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1994, 6(5): 657-660.

栏目编辑: 王晓球