

# 基于双通道 M-Z 干涉仪的 FBG 光开关研究\*

闫光<sup>1,2</sup>, 何巍<sup>1,2</sup>, 杨润涛<sup>1,2</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

(1. 北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心 北京, 100192)

(2. 北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室 北京, 100192)

**摘要** 为降低电光开关的插入损耗并提高性能,提出了一种基于双通道可调谐马赫-曾德(M-Z)干涉仪制作的光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,简称 FBG)光开关,通过改变干涉仪中的可调电动光纤延迟线的延迟时间,实现滤波谱周期的可调谐。通过改变干涉仪其中一臂的延迟时间设定,该光开关能够实现对设定波长光波的开关功能。对光纤 M-Z 干涉滤波原理进行了理论分析,使用 C 波段宽带放大自发辐射光源对双通道可调 M-Z 干涉仪的性能进行了测试。结果表明,其可实现大范围及高精度的滤波调节功能。对基于双通道可调谐马赫-曾德干涉仪制作的 FBG 光开关,通过 FBG 开关性能检测系统实验,得到该光开关在波长为 1 550 nm 处的输出光谱,光开关的消光比达到 25 dB。结果表明,该光开关能够实现大范围高精度滤波功能,具有高消光比、结构简单和易于调节等优点。

**关键词** 双通道可调 M-Z 干涉仪; 光纤布拉格光栅; 光开关; 电动光纤延迟线

**中图分类号** TP212.1

## 引言

光开关作为一种具有一个或多个可选择的传输窗口,是对光传输线路或集成光路中的光信号进行相互转换或逻辑操作的器件,在光通信和光传感等领域有重要应用。光开关可以对光传输线路或集成光路中的光信号进行逻辑操作与物理转换,在光纤通信系统、光纤传感网络和光器件测量等方面有广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。光开关作为光通信网络节点的核心器件具有关键作用,例如:在波分复用传输系统中,光开关可用于波长适配、再生和时钟提取;在光时分复用系统中,光开关可用于解复用;在全光交换系统中,光开关是光交叉连接的关键器件,也是波长变换的重要器件<sup>[3]</sup>。能实现光开关功能的全光开关器件主要包括:常规的光纤布拉格光栅全开关<sup>[4-5]</sup>、常规光纤长周期光栅全开关<sup>[6]</sup>和非线性 FBG 全光开关<sup>[7-8]</sup>。基于非线性光学原理的全光开关需要高功率光来驱动开关,其功率不能低于信号光的功率,即毫瓦量级的开光功率,且受限于开光速率,限制了其应用。光纤 M-Z 干涉仪型滤波器由全光纤组成,具有较低的插入损耗、梳状和带通滤波及结构简单等

优点,在光纤通信和光纤传感中得到了广泛的研究和应用<sup>[9-10]</sup>。但是其具有消光比有限的缺点,限制了其进一步的应用。为了解决这一问题,需要研究提高 M-Z 干涉仪消光比的方法。文献[11]提出在干涉仪的一端熔接上光纤全反镜的方法,以此来大幅提高干涉仪的消光比,改善输出光谱的特性。罗华栋等<sup>[12]</sup>提出将单通道 M-Z 干涉仪的一端熔接到 FBG 来代替光纤全反镜,构成单通道 FBG 光开关,并通过仿真与实验验证了其具有良好的开光特性;但由于单通道 M-Z 消光比有限,限制了其开关性能。

笔者提出了一种基于可调节双通道 M-Z 干涉仪的 FBG 光开关,通过改变干涉仪中的可调电动光纤延迟线的延迟时间,实现滤波谱周期的可调谐。通过改变干涉仪其中一臂的延迟时间设定,该光开关能够实现设定波长光波的开关功能。

## 1 光开关组成及理论分析

双通道可调光纤 M-Z 干涉仪结构如图 1 所示。由普通单模光纤、两个 3 dB 耦合器( $C_1, C_2$ )、电动光纤延迟线、偏振控制器和光隔离器组成。干涉仪由

\* 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1212);北京市重大科技计划资助项目(Z151100003615010);北京市教育委员会科技计划资助项目(KM201611232005)

收稿日期:2016-04-10;修回日期:2016-06-01

两条干涉臂构成,通常称其中一条为参考臂,另一条为信号臂<sup>[13-16]</sup>。光场为  $E_1$  的入射光从耦合器  $C_1$  端口注入到 M-Z 干涉仪中,经  $C_1$  分光后在长度分别为  $L_1$  和  $L_2$  的光纤中传输。由于两条干涉臂的光学长度不等,两束光传输到耦合器处就形成了一定的相位差  $\Delta\varphi$ ,产生干涉并经过耦合器  $C_2$  端口输出,形成光场为  $E_3$  和  $E_4$  的干涉光。干涉光是具有规律的梳状透射谱,故又称为 M-Z 干涉仪梳状滤波器。

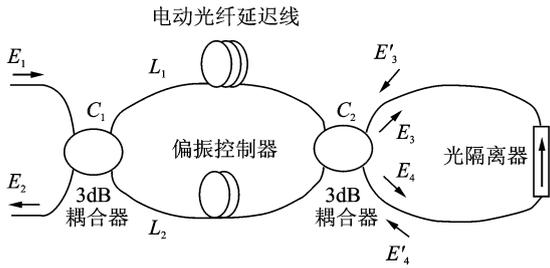


图1 双通道干涉仪结构图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-pass M-Z interferometer

若输入光场只有  $E_1$ ,经过耦合器  $C_1$  和  $C_2$  后的光场  $E_3$  和  $E_4$  可由下式获得

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\eta_1} & -j\sqrt{\eta_1} \\ -j\sqrt{\eta_1} & \sqrt{1-\eta_1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{-j\beta L_1} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-\eta_2} & -j\sqrt{\eta_2} \\ -j\sqrt{\eta_2} & \sqrt{1-\eta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为耦合器  $C_1$  和  $C_2$  的耦合比,均为 50%。

$\beta$  为传输常数,即

$$\beta = 2\pi n/\lambda \quad (2)$$

其中: $n$  为基模的有效折射率; $\lambda$  为输入光在真空中的波长。

当组成干涉仪两臂的光纤为同种材料的光纤时,得到干涉仪输出端口的传输函数为

$$T = [1 - \cos(\Delta\varphi)]/2 \quad (3)$$

其中: $\Delta\varphi = 2n\pi\Delta L/\lambda$ ,代表两条干涉臂之间的传输相位差。

M-Z 干涉仪输出透射谱中相邻两峰值波长间的波长间隔  $\Delta\lambda$  为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n\Delta L} = \frac{\lambda^2}{n|L_1 - L_2|} \quad (4)$$

其中: $\Delta L$  为 M-Z 干涉仪两条干涉臂之间的臂长差。

由式(4)可知,改变 M-Z 干涉仪两臂的长度差,可以改变其透射谱的周期,实现波长间隔的可调谐。由于光隔离器的隔离作用,只有电场  $E_4$  能够经过光隔离器从耦合器  $C_2$  的右侧端口注入,进行二次传输,相当于两个单通道 M-Z 干涉仪的级联对输入信

号进行了两次处理,使消光比得到了极大提高,构成了双通道 M-Z 干涉仪。偏振控制器用于调节干涉仪其中一臂的偏振态,使 M-Z 干涉仪获得较高的消光比并提高其稳定性。

干涉仪的两臂延迟时间  $\Delta t$  与两臂长度差  $\Delta L$  的关系为

$$\frac{C\Delta t}{n} = \Delta L \quad (5)$$

通过调整双通道干涉仪其中一臂的延迟时间  $t$ ,使干涉仪两臂间的延迟时间  $\Delta t$  改变,构成一种双通道光开关。如果 FBG 反射峰处于 M-Z 干涉仪干涉的相长位置,就会得到 FBG 的反射光;反之,如果 FBG 反射峰处于 M-Z 干涉仪干涉的相消位置,FBG 的反射光就会被抑制,这样就实现了对 FBG 峰值反射光的开关作用。

## 2 实验检测系统设计及测试分析

### 2.1 双通道可调 M-Z 干涉仪性能测试

双通道可调 M-Z 干涉仪性能测试实验系统由宽带 ASE 光源、双通道可调 M-Z 干涉仪和光谱仪组成。其中:ASE 光源带宽范围为 1 525~1 568 nm,平坦度 < 2 dB,输出功率为 13 dBm;光谱仪为横河公司的 AQ6370D 型光谱分析仪,光谱分辨率为 20 pm。如图 1 所示,放大自发辐射光源 (amplified spontaneous emission,简称 ASE) 光源接入双通道可调 M-Z 干涉仪的输入端  $E_1$ ,光谱分析仪与另一端  $E_2$  连接用以输出干涉光谱。测试中,调节光纤延迟线的延迟时间并记录其输出光谱图。图 2 为延时时间分别为 254,255,256 及 257 ps 时,干涉仪输出的光谱。随着干涉仪其中一臂的延迟时间不断增加,相当于两臂长度差不断增大,输出光谱相邻峰值波长间隔逐渐减小,由 4.2 nm 变为 2.3 nm,而干涉仪的消光比也逐渐降低,由 20 dB 降低到 13 dB,如表 1 所示。由于干涉仪使用的可调电动光纤延迟线的调节范围为 0~330 ps,最小步进间隔为 0.05 ps,因此可以实现大范围及高精度的滤波调节功能。

表 1 不同延迟时间下输出光谱的变化

Tab. 1 The change of the output spectrum under different delay time

序号	延迟时间/ ps	波长间隔/ nm	消光比/ dB
1	254	4.2	20
2	255	3.6	16
3	256	2.9	13
4	257	2.3	11

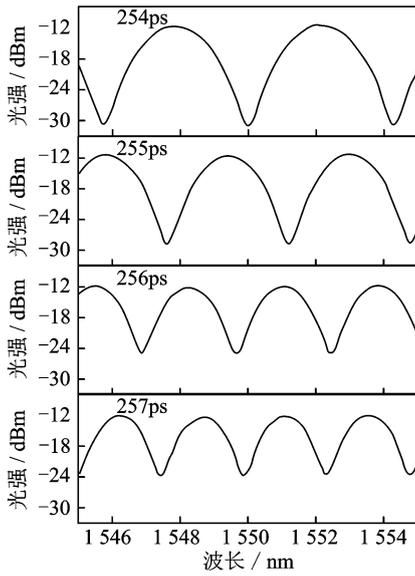


图 2 不同延迟时间的双通道可调 M-Z 干涉仪输出光谱  
Fig. 2 The output spectrum of dual-pass tunable M-Z interferometer at different delay time

### 2.2 双通道可调 M-Z 干涉仪光开关性能测试

基于双通道 M-Z 干涉仪的 FBG 光开关性能测试系统结构如图 3 所示。宽带光源的入射光经光环形器 1 端口注入,从光环形器 2 端口入射到光纤光栅,经过 FBG 选频作用后,特定波长的光被反射回到光环形器端口 2,并经由光环形器的端口 3 入射到由双通道 M-Z 干涉仪组成的 FBG 光开关。通过调整电动光纤延迟线的延迟时间,实现对 FBG 峰值反射光的开关控制。

为保证施加拉力大小的稳定性,需将 FBG 放置在等强度梁上。当等强度梁未施加拉力时,FBG 的反射峰值波长为 1 549.57 nm,如图 4 所示。当电动延迟线的延迟时间为 0 ps 时,M-Z 干涉仪没有干涉谱,FBG 开关处于打开的状态。经过 FBG 后的反射峰值波长功率为 -24.86 dBm。调节电动延迟线的延迟时间为 256 ps 时,FBG 的反射峰值波长处于 M-Z 干涉仪输出干涉谱的波谷位置,则 FBG 开关处于关闭的状态,此时的 FBG 反射峰值波长功率为 -50.18 dBm。光开关对 FBG 的反射波长抑制为 25 dB,实现了对 FBG 峰值反射光的开关控制。

通过等强度梁对 FBG 施加拉应力,使其波长漂移至 1 550.10 nm,如图 5 所示。当电动延迟线处于 0 ps 时,M-Z 干涉仪没有干涉谱,FBG 开关处于打开的状态。经过 FBG 后的反射峰值波长功率为 -25.09 dBm。调节电动延迟线的延迟时间为 256 ps 时,FBG 的反射峰值波长恰好处于 M-Z 干涉仪输出干涉谱的波谷位置,FBG 开关处于关闭的状态,此

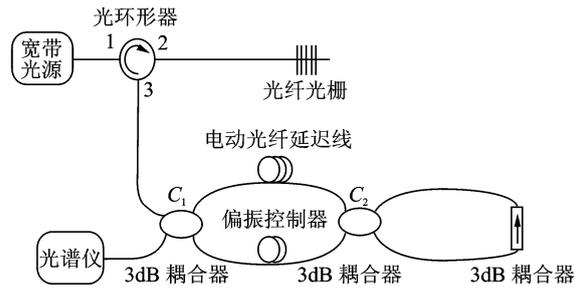


图 3 FBG 开关性能检测系统结构图  
Fig. 3 Schematic diagram of FBG switch performance testing system

时的 FBG 反射峰值波长功率为 -50.11 dBm。光开关对 FBG 的反射波长抑制为 25 dB,实现了对 FBG 峰值反射光的开关控制。

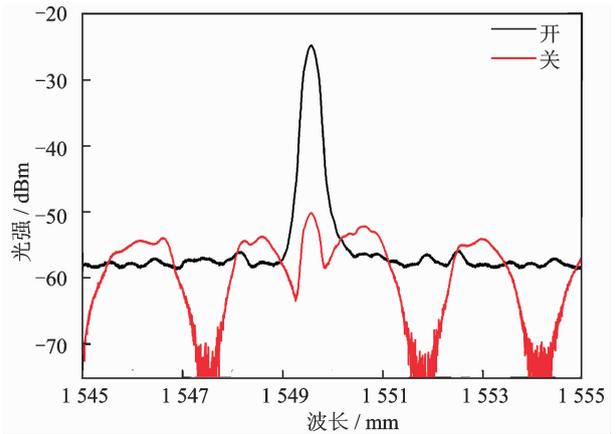


图 4 未施加拉力前 FBG 开关光谱对比图  
Fig. 4 The contrast spectral diagram of FBG switch when no tension applied

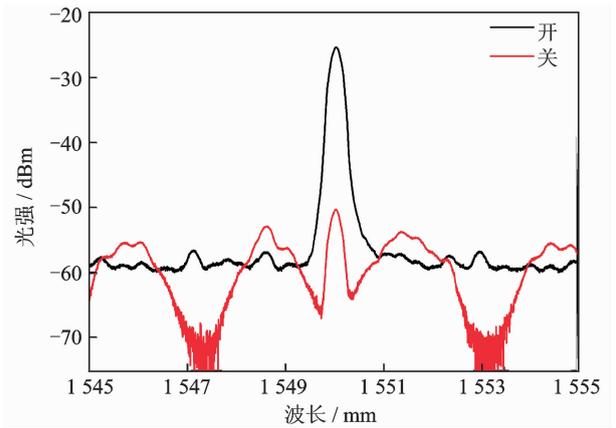


图 5 施加拉力后 FBG 开关光谱对比图  
Fig. 5 The contrast spectral diagram of FBG switch when tension applied

### 3 结束语

分析了全光纤 M-Z 干涉仪的滤波原理,设计了

基于电动光纤延迟线的双通道可调 M-Z 干涉仪 FBG 光开关,使用 C 波段宽带 ASE 光源与不同峰值波长的 FBG 对用双通道可调 M-Z 干涉仪构成的 FBG 光开关进行了性能测试。通过采集到的该光开关在波长 1 550 nm 处的输出光谱,表明该结构的双通道 M-Z 干涉仪光开关能够实现对 FBG 反射峰值波长的打开与关断控制,光开关的消光比达到 25 dB,能够实现大范围高精度滤波功能,具有高消光比、结构简单和易于调节等优点。

## 参 考 文 献

- [1] 曾田, 梁大开, 曾捷, 等. 基于光开关和图论的多主体协作光纤传感网络自修复方法研究[J]. 光学学报, 2014(12): 25-32.  
Zeng Tian, Liang Dakai, Zeng Jie, et al. Research on self-healing method of multi-agent collaboration fiber optical sensor network based on optical switch and graph theory[J]. Acta Optica Sinica, 2014(12): 25-32. (in Chinese)
- [2] Jiang Xiaogang, Chen Daru, Feng Gaofeng, et al. Suspended twin-core fiber for optical switching[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(5): 1-4.
- [3] 张海鑫, 王雷, 牛小艳, 等. 650nm 可见光波段全复合材料热光开关[J]. 中国激光, 2013(9): 147-151.  
Zhang Haixin, Wang Lei, Niu Xiaoyan, et al. 650nm visible band thermo-optic switch based on bonded organic-inorganic hybrid materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013(9): 147-151. (in Chinese)
- [4] 张兵, 徐文成, 李淳飞. 低功耗非线性光纤光栅全光开关[J]. 物理, 2011, 40(5): 326-332.  
Zhang Bing, Xu Wencheng, Li Chunfei. All-optical switches based on nonlinear fiber gratings[J]. Physics, 2011, 40(5): 326-332. (in Chinese)
- [5] Taverner D, Broderick N G, Richardson D J, et al. Nonlinear self-switching and multiple gap-soliton formation in a fiber Bragg grating[J]. Optics Letters, 1998, 23(5): 328-330.
- [6] Eggleton B J, Slusher R E, Judkins J B, et al. All-optical switching in long-period fiber gratings[J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 883-885.
- [7] Kita N, Sato S, Imai M. Nonlinear optical switching using fiber Bragg grating[J]. Technical Report of Ieice Oft, 2002, 102(269): 51-55.
- [8] Koli S C, Pandey C A, Hornyak G L, et al. Theoretical modeling of index contrast towards all-optical switching in fiber Bragg grating[J]. Journal of Crime & Justice, 2013, 38(1): 58-76.
- [9] Sun Bing, Hu Kai, Chen Daru, et al. Wavelength-spacing-tunable double-pumped multiwavelength optical parametric oscillator based on a Mach - Zehnder interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(30): 1937-1942.
- [10] Hwan K J, Won Sik K, Hyub L, et al. Double-looped Mach-Zehnder interferometer for achieving multiple ring-down interferograms[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28353-28362.
- [11] Huang Yonglin. Study on add/drop multiplexing & demultiplexing technology in WDM systems[D]. Tianjin: Nankai University, 2000.
- [12] 罗华栋, 黄勇林. 基于全光纤 M-Z 干涉仪的单通道光开关研究[J]. 激光技术, 2012, 36(4): 438-440.  
Luo Huadong, Huang Yonglin. Design of a single channel optical switch based on all-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Laser Technology, 2012, 36(4): 438-440. (in Chinese)
- [13] Zou Hui, Lou Shuqing, Su Wei, et al. A dual-pass Mach-Zehnder interferometer filter using a TCF loop mirror for double-wavelength fiber lasers[J]. Applied Physics B, 2013, 112(4): 441-452.
- [14] He Yujun, Zhu Youchan, Yin Chengqun, et al. Spontaneous Brillouin-distributed optical fiber temperature sensing system based on all-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Processing of SPIE, 2005, 56(34): 494-499.
- [15] Huang Yonglin, Li Jie, Ma Xiurong, et al. High extinction ratio Mach-Zehnder interferometer filter and implementation of single-channel optical switch[J]. Optics Communications, 2003, 222(1): 191-195.
- [16] Wang Fei, Xu Enming, Dong Jianji, et al. A tunable and switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber laser incorporating a reconfigurable dual-pass Mach-Zehnder interferometer and its application in microwave generation[J]. Optics Communications, 2011, 284(9): 2337-2340.



**第一作者简介:** 闫光, 男, 1979 年 8 月生, 博士、讲师。主要研究方向为光纤传感技术和结构健康监测等。曾发表《含口盖复合材料圆柱壳轴压屈曲性能分析》《《吉林大学学报:工学版》2015 年第 45 卷第 1 期)》等论文。

E-mail: YanGuang79@bistu.edu.cn

