

# 利用光纤马赫曾德尔干涉仪实现的光学双稳性研究

朱晓亮<sup>1</sup> 张晓东<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310018

<sup>2</sup>杭州科技职业技术学院机电工程学院, 浙江 杭州 311402

**摘要** 以光纤马赫曾德尔干涉仪作为光强度调制器件,通过光纤耦合器构造光电反馈回路搭建了一种新型电光混合型光学双稳装置。对光学双稳原理进行了研究分析,用图解法形象地解释了双稳工作原理,并且通过在实验中改变该器件的输入光强实现了光学双稳态,得到的光学双稳现象显著,双稳工作状态稳定。该器件有诸多重要应用,如工作在稳态区域时可用做光纤激光功率稳定器,工作在开关区域时可用作光开关、光路由器。

**关键词** 光纤光学; 光学双稳态; 光纤马赫曾德尔干涉仪; 光纤激光器; 光开关; 光纤传感

**中图分类号** TN253    **文献标志码** A    **doi:** 10.3788/LOP51.080601

## Study on Optical Bistability Using Fiber Mach-Zehnder Interferometer

Zhu Xiaoliang<sup>1</sup> Zhang Xiaodong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China*

<sup>2</sup>*College of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou Polytechnic, Hangzhou, Zhejiang 311402, China*

**Abstract** A new hybrid optical bistability device which comprises a fiber Mach-Zehnder interferometer and two fiber couplers is proposed. In the device, the fiber Mach-Zehnder interferometer is used as light intensity modulator and the fiber couplers are used to construct on optoelectronic feedback loop. The theory of bistability has been analyzed and illustrated. At last, the optical bistability is fulfilled by changing the input optical power in the experiment. The device can be used as a fiber laser power stabilizer when it works at the stable status and as an optical switch or optical router when it works at the switching status.

**Key words** fiber optics; optical bistability; fiber Mach-Zehnder interferometer; fiber laser; optical switch; fiber sensor

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370

## 1 引言

由于光学双稳态器件能直接处理光信号,并具有带宽大(大于 10<sup>13</sup> Hz)、开关时间短(小于 1 ps)、可并行处理信号等优点,所以在高速光纤通信、光存储、快速光开关、光信息处理以及光学计算机等技术中,有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>。此外,近年来各种光学双稳态器件的材料和结构不断发展,也使光学双稳态器件做为一种以光控光的器件更接近实际应用并有力地推动了光学计算、光通信、集成光学、光学信息处理和光电子材料技术的发展。

光纤具有体积小、重量轻、纤细柔软、易于布置等特点,自问世之日起迅速受到人们的关注<sup>[5-9]</sup>。光纤器件可以应用于光纤数字式传感技术,这将大大提高并改善光纤传感精细度与灵敏度,并且对外界环境变化、外界干扰可实行实时监测。利用马赫曾德尔干涉仪(MZI)实现频域光学双稳性具有重要的意义:当器件工作在稳态区域时可用做光纤激光功率稳定器;当工作在开关区域时也可以用做光开关、光路由器;这在工业开发、工业生产、建筑、医学、环境、国防等领域有着巨大的应用价值。

收稿日期: 2013-11-02; 收到修改稿日期: 2014-02-10; 网络出版日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61307005)、浙江省教育厅基金(Y201223669)

作者简介: 朱晓亮(1981—),女,博士,讲师,主要从事光纤通信、集成光学等方面的研究。

E-mail: zhuxiaoliang@mail.zjgsu.edu.cn

## 2 工作原理

光学双稳态通常是指光学系统在一定的输入范围内对给定的输入存在两种可相互转换的稳定输出光强状态,其输入输出光强关系曲线类似于磁滞回线。在某一时刻,光学双稳态系统究竟处于两个稳定态中的哪一个,这与系统的前一时刻所处的状态有关。要实现频域光学双稳态系统同时具有非线性调制机制和反馈机制,一般要求光源是可调谐的,即当非线性调制曲线和反馈直线均在频域上时(即曲线横轴为频域或波长),利用可调谐光源实现同一波长对应两个稳定而有区别的输出状态<sup>[10]</sup>。

如图1所示,曲线表示非线性调制曲线,直线表示其反馈机制。输入光强  $I_{in}$  由小增大时,反馈直线由 1→2→3 变化时,按光强尽可能取连续变化的原理,透过光强由  $a \rightarrow b \rightarrow d \rightarrow e$ 。当  $I_{in}$  由较高值逐渐减小时,透过光强由  $e \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow a$ ,从而形成一个完整的磁滞回线型的特征工作曲线,如图2所示。由图2可见,一个  $I_{in}$  只对应两个稳定的输出,即高透状态和低透状态输出,而究竟处于哪种状态的稳定输出,则取决于入射光强变化的历史情况,这表明双稳态装置可呈现出记忆元件的特点。此外,从曲线上可以看出,透射光相对于入射光具有迟滞性和突变性,因而形成两种稳定状态,所以迟滞性和突变性是光学双稳态的器件两个主要特征。

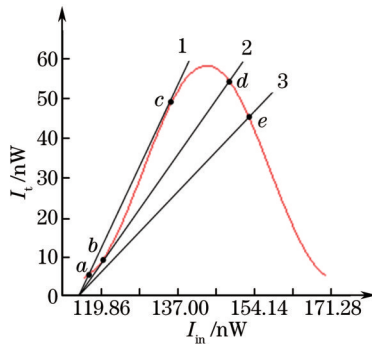


图1 改变  $I_{in}$  实现光学双稳态的原理图

Fig.1 Theoretical diagram of optical bistability with  $I_{in}$  changed

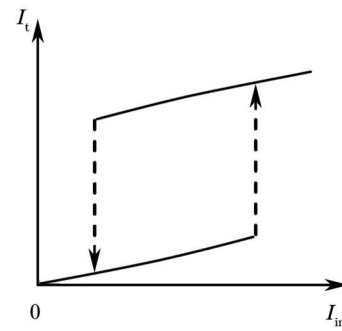


图2 光学双稳态特性曲线

Fig.2 Optical bistability curve

## 3 实验研究

本文提出了一种利用MZI实现的新型电光混合频域光学双稳装置,利用放大自发射(ASE)光源和光扫描光纤法珀腔(FFP)在ASE光源1525~1565 nm的40 nm带宽范围内得到了频域可连续调变的光输出,利用MZI作为光学双稳系统的非线性调制器,当频域可连续调变的光入射到MZI后得到关于MZI透射率的调制曲线,从其透射光中取样,将得到的光强信号转换为电压信号作为反馈电压加到FFP上,实现反馈机制。

实验装置如图3所示,其中ISO为光隔离器;PZT为FFP内的压电陶瓷,用以调节FFP; $V_B$ 为PZT的偏置电压,用于调整FFP中心波长的初始位置与激光波长相匹配,实验中 $V_B=9.183$  V; $V_F$ 为反馈电压;MZI的臂长差 $\Delta L=0.504$  mm;C1为50:50光纤耦合器;C2为80:20光纤耦合器;D为光电探测器;A为电子放大器;P为光功率计,用于监测输出光功率;OSA为光纤光谱仪,用于监测输出光谱。

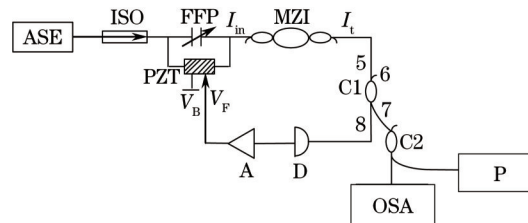


图3 利用光纤马赫曾德干涉仪实现光学双稳态实验原理图

Fig.3 Experimental schematic diagram of realization of optical bistability using fiber MZI

ASE光源输出的宽带光扫描FFP后,变为窄带光。输出窄带光中心波长位置与FFP中PZT的控制电压  $V$  有关,当  $V$  变化时输出窄带光的中心波长位置发生相应移动,在1525~1565 nm的40 nm带宽范围内输出的光频率可连续调变。输出窄带光中心波长位置与  $V$  的关系如图4所示,输出窄带光中心波长  $\lambda$  与  $V$  的关

系式可由其关系曲线图5得出。

$$\lambda = 1508.4 + 6.9956 V . \quad (1)$$

通过(1)式可以计算得出PZT驱动电压  $V$  改变 1 mV时,输入MZI的窄带光中心波长变化为  $6.9956 \times 10^{-3}$  nm。

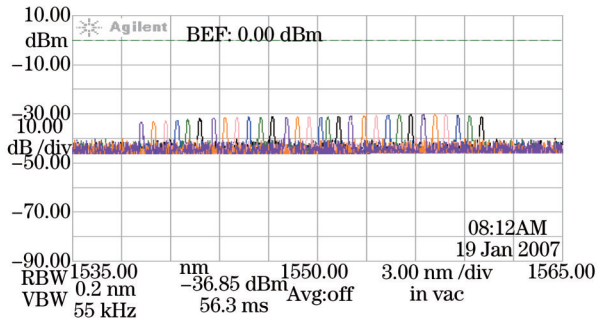


图4 FFP驱动电压  $V$  与其输出中心波长位置关系图  
Fig.4 Relationship between the drive voltage  $V$  and the position of central output wavelength

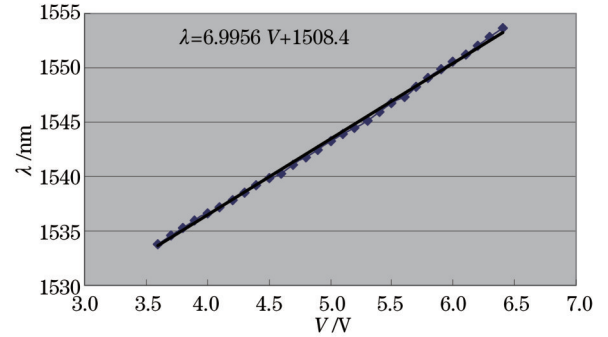


图5 FFP中PZT驱动电压  $V$  与FFP输出窄带波中心波长  $\lambda$  的关系  
Fig.5 Relationship between the drive voltage  $V$  of PZT and the central wavelength  $\lambda$  of FFP

非线性调制机制由MZI的非线性透射率完成,  $I_{in}$  为MZI的输入光强,则MZI的输出光强可表亦为

$$\frac{I_t}{I_{in}} = \frac{1}{2} \alpha (1 + M \cos \Delta \phi), \quad (2)$$

式中  $\Delta \phi = (2\pi n_{MZI} \Delta L) / \lambda$  为MZI两臂的相位差,  $n_{MZI}$  为MZI折射率,  $\lambda = 1550$  nm;  $\alpha$  为与插入损耗相关的常数;干涉仪的可见度  $M = 2\sqrt{I_{max} I_{min}} / (I_{max} + I_{min})$ 。

MZI透射率  $T$  满足

$$T(V) = \frac{I_t}{I_{in}} = \frac{1}{\eta K_1 G I_{in}} (V_F - V_B), \quad (3)$$

式中  $\eta$ ,  $K_1$ ,  $G$  分别为光电探测器的转换效率、耦合器  $C_1$  的耦合比、放大器的增益。实验中当固定FFP的偏置电压  $V_B = 9.183$  V、 $G = 3000$  时,改变输入光强  $I_{in}$  实现双稳输出的实验结果如图6所示。

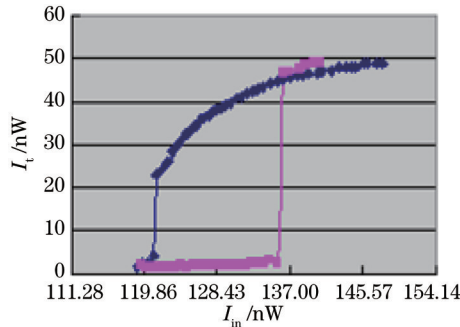


图6 改变  $I_{in}$  所得实验曲线  
Fig.6 Experimental graph with  $I_{in}$  changed

## 4 结 论

用图解法对光学双稳态实现原理进行了详细说明,并利用光纤马赫曾德尔干涉仪作为光强度调制器件,通过光纤耦合器构造光电反馈回路成功实现了光学双稳运转。该器件工作在稳态区域时可用作光纤激光功率稳定器;工作在开关区域时可用作光开关、光路由器。由于MZI输出光谱是连续的周期函数,故采用此方法扫描多个连续的周期曲线可实现多个连续的光学双稳态串联,具有多个光学双稳态连续分布的特点。光学双稳器件在激光器及光传感领域有重要的应用价值。

## 参考文献

- 1 Junqing Li, Li Li, Jiaqun Zhao, *et al.*. Ultrafast, low power, and highly stable all-optical switch in MZI with two-arm-sharing nonlinear ring resonator[J]. *Opt Commun*, 2005, 256(4): 319-325.
- 2 Junqiang Sun, Jian Wang. Simulation of optical NOT gate switching by sum-frequency generation in LiNbO<sub>3</sub> waveguides [J]. *Opt Commun*, 2006, 267(1): 187-192.
- 3 Rui Tong, Hui Wu, Bo Li, *et al.*. Reverse saturable absorption and optical limiting performance of fullerene functionalized polycarbonates in femtosecond time scale[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2005, 366(1-4): 192-199.
- 4 Mark O Liu, Chia-Hon Tai, Andrew The Hu, *et al.*. Reverse saturable absorption of lanthanide bisphthalocyanines and their application for optical switches[J]. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2004, 689(12): 2138-2143.
- 5 Ma Lingfang, Liu Min, Li Dan, *et al.*. A kind of hollow dual-core photonic crystal fiber with zero inter-modal dispersion [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0805006.  
马玲芳, 刘敏, 李丹, 等. 零模间色散双空芯光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0805006.
- 6 Chen Yixin, Zhao Chunliu, Liu Xing, *et al.*. Research and development of optical fiber sensors based on photonic crystal fiber loop mirrors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010005.  
陈益新, 赵春柳, 刘星, 等. 基于光子晶体光纤环境的光纤传感器的研究及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010005.
- 7 Zhu Xiaoliang, Zhang Xiaodong. Side-polished coupling for a single-mode fiber and a novel capillary optical fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0605006.  
朱晓亮, 张晓东. 单模光纤与新型毛细管光纤的侧抛耦合[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0605006.
- 8 Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong, *et al.*. Hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0628001.  
赵华新, 蒋永翔, 罗天穹, 等. 基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0628001.
- 9 Chen Xiaodong. Characteristics of all-fiber gas Raman light source based on hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0505003.  
陈晓东. 基于氢气填充空芯光子晶体光纤的全光纤型气体拉曼光源特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0505003.
- 10 P W Smith, J P Hermann W J Tomlinson, *et al.*. Optical bistability at a nonlinear interface [J]. *Phys Lett*, 1979, 35(11): 846-848.