

文章编号 1004-924X(2013)04-0884-05

基于内壁芯光纤的调制器件

赵恩铭, 郑 瑶, 刘岩鑫, 苑立波, 佟成国, 杨兴华*
(哈尔滨工程大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:提出一种基于中空内壁悬挂芯光纤构造而成的光纤集成调制器。该光纤具有孔道结构, 纤芯悬挂于孔道内壁。合成了含有超顺磁性 Fe_3O_4 纳米颗粒的磁流体, 通过将空心光纤与多模光纤熔融连接, 将磁流体封装在空心光纤内部, 作为悬挂纤芯的包层。磁流体通过倏逝场对光产生吸收作用, 由外磁场控制吸收强度, 实现对纤芯的光调制。波长为 632.8 nm 的光经过拉锥耦合点耦合进入、传出调制元件。实验结果表明, 在不同磁场强度下, 仅仅 $2.0 \times 10^{-2} \mu\text{L}$ 的磁流体就可以对系统光衰减产生明显影响。当磁场强度为 38 914 A/m 时, 饱和调制深度为 43%; 系统的响应时间低于 120 ms。该系统还可用于光开关, 光纤滤波器和磁传感器等。

关键词:内壁纤芯; 光纤调制器; 磁场; 磁流体

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20132104.0884

Modulator device based on optical fiber with core on inner wall

ZHAO En-ming, ZHENG Yao, LIU Yan-xin, YUAN Li-bo,
TONG Cheng-guo, YANG Xing-hua*

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: yang_xh@hrbeu.edu.cn

Abstract: A fiber integrated modulator is proposed based on a new kind of optical fiber with a fiber core on the inner wall. This optical fiber has a pore structure and its core is suspended on the inner wall of the pore. The magnetic fluid containing super paramagnetic Fe_3O_4 nanoparticles is synthesized, then it is encapsulated in the hollow optical fiber through molten connecting with a multimode optical fiber and used as the cladding of the fiber core. By an evanescent field, the magnetic fluid generates absorption effect on the light and its intensity is controlled by an external magnetic field, so that the light modulation is implemented. Moreover, the light at a wavelength of 632.8 nm is coupled in and out of the modulating element by tapering the coupling point. The experimental results show that only $2.0 \times 10^{-2} \mu\text{L}$ of the magnetic fluid in the system can significantly impact the optical attenuation under different magnetic field strengths. When the magnetic field strength is 38 914 A/m, the saturation modulation depth is 43%, and the system response time is below 120 ms. The system can also be used in light switches, optical fiber filters and magnetic sensors.

Key words: fiber core on inner wall; optical fiber modulator; magnetic field; magnetic fluid

收稿日期: 2012-10-17; 修订日期: 2012-11-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61007053); 国家教育部博士点基金资助项目(No. 20092304120022); 中央高校基础科研业务费专项资金资助项目

1 引言

光调制器件是光电、激光以及通讯等系统中的重要器件^[1-6]。它具有光强易调制、插入损耗低等优点,在光纤激光系统、波分复用系统、Sagnac 干涉系统、Mach-Zehnder 干涉系统以及光电系统等领域有着广泛的应用^[7-9]。该器件的工作不仅可以通过物理控制光路的通断实现,还可以通过在光路中嵌入液晶、二巯基胍钌配合物、金属氧化物等物质来实现^[10-12]。目前,光调制器件的种类较多,集成化是该器件的一个发展趋势,这有利于缩小器件体积,提高器件的稳定性,如纤维集成器件,它可以实现光纤内调制,并控制光纤内的光传播。这种集成化的光纤调制器件已广泛应用于光通讯及光纤传感等领域^[13-14]。

本文基于新型中空内壁悬挂芯光纤构造提出了一种新型的光纤集成调制器件。该器件在空心的光纤结构内部填充顺磁性磁流体,磁流体通过倏逝场对光产生吸收作用,吸收强度由外磁场控制,从而实现了纤芯的光调制。

2 内壁悬挂芯光纤结构

光调制器的基本结构是一个长度为 5 cm 的中空悬挂芯光纤,见图 1。该光纤由本课题组设计和拉制,它呈管状结构,悬挂芯的折射率高于环形包层的折射率。光纤外径为 125 μm,内径为 72 μm,纤芯直径为 12 μm。

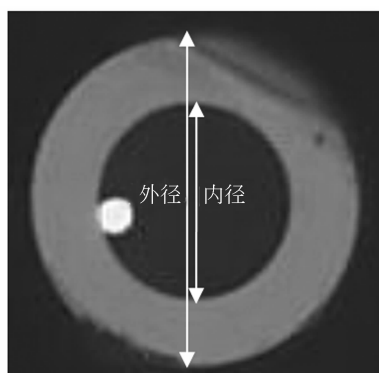


图 1 悬挂芯空心光纤截面图

Fig. 1 Cross-section of hollow optical fiber with suspended core

3 顺磁性磁流体的制备及表征

实验准备 FeCl₃ · 6H₂O (0.8 mol, 125 mL) 和 FeCl₂ · 4H₂O (0.4 mol, 125 mL), 并将两种溶液注入到容积为 500 mL 装有机械搅拌器的三颈瓶中。加入铁的盐溶液后,在 85 °C 的剧烈搅拌下立即加入 20 mL NH₃ · H₂O (28 %),直到溶液的 pH 值达到 9.0。2 h 后出现黑色胶状物质^[15],再加入 1 mL 油酸搅拌 1 h。整个反应过程在氮气保护下进行。

图 2 是 Fe₃O₄ 的透射电镜 (Transmission Electron Microscopy, TEM) 照片。由图可见, Fe₃O₄ 纳米颗粒接近球形,粒径分布比较均一,平均粒径约为 12 nm,与图 3 的 X-射线衍射 (X-ray Diffraction, XRD) 结果一致。虽然粒子具有较大

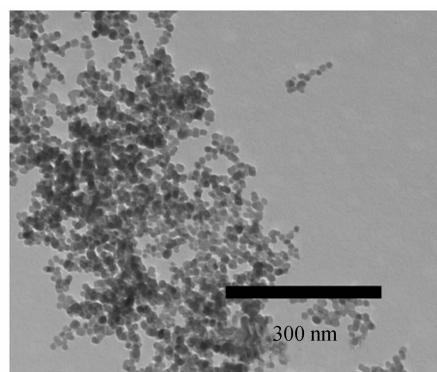


图 2 磁流体纳米粒子透射电镜照片

Fig. 2 Photo of magnetic fluid with transmission electron microscopy

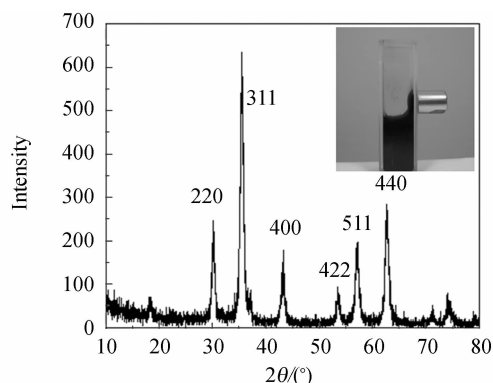


图 3 磁流体的 X 射线粉末衍射强度 (插图:磁流体的强顺磁性示意图)

Fig. 3 X-ray diffraction intensity of magnetic fluid (insert diagram: strong paramagnetic of magnetic fluid)

的比表面积和较高的表面能,但由于表面覆盖油酸分子,在该尺寸下它们并不聚合。 Fe_3O_4 粒子直径小,分散性良好,与纤芯的接触良好。此外,(220)、(311)、(400)、(422)、(511)和(440)峰值表明,磁性颗粒为纯 Fe_3O_4 逆立方尖晶石相(JCPDS 卡 85-1436 号)。纯纳米粒子表现出对磁场良好的响应。如图 3 中插图所示,磁流体和钕铁硼磁体之间的强磁力表明该产物具有超顺磁性。

4 基于悬挂芯空心光纤的光调制器

4.1 测试光路搭建

光纤集成调制器的实验装置如图 4 所示。从氦氖激光器发出的波长为 632.8 nm 的光耦合到多模光纤中。采用熔融拉锥技术将光从多模光纤中耦合进悬挂芯中空光纤中。在耦合之前,向中空光纤中充入微量的磁流体(约 $2.0 \times 10^{-2} \mu\text{L}$)。使磁流体液柱的长度约为 5 mm,并位于空心光纤的中间,以避免在熔融拉锥过程中耦合点处的磁流体发生汽化。将含磁流体的光纤部分置于电磁铁产生的磁场中,电磁铁与磁流体之间的距离约为 3 mm。使用光纤光谱仪检测输出光强度,并对光强度进行单波长跟踪测量。

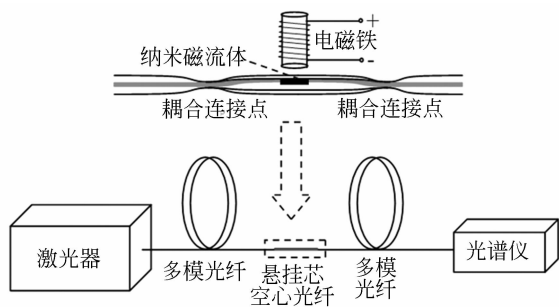


图 4 测试装置示意图

Fig. 4 Sketch of experimental equipment

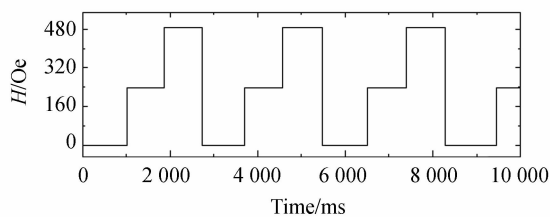
4.2 光纤调制器的性能测试

当施加外界磁场时,通过调制光纤的光强度会受到明显影响。图 5 显示了该调制器在不同磁场下的调制特性。

图 5(b)中,传输损耗定义为:

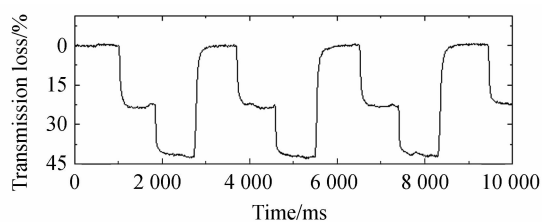
$$\left[(I_0 - I_H) / I_0 \right] \times 100\%,$$

其中: I_0 和 I_H 分别对应图 5(a)中磁场强度为 0 和 H 时的输出光强。当磁场增强时,纤芯中的光强明显降低,调制器的调制深度(或传输损耗)增



(a) 磁场强度的变化

(a) Changes of magnetic field strengths



(b) 光路系统光强度变化

(b) Changes of optical intensities through optical path system

图 5 不同磁场强度下悬挂空心光纤的调制特性
Fig. 5 Modulation properties of hollow optical fiber with suspended core at different magnetic field strengths

加。当磁场强度为 1 949 A/m 时,传输损耗为 24%;当磁场强度提高到 38 914 A/m 时,传输损耗达到了 43%(为饱和调制深度)。此外,从曲线可知,传输损耗对磁场的响应是可逆的,且重复性良好。

实验中产生的光传输损耗是由施加磁场时光在倏逝场的作用下产生衰减引起的。在光纤的空心结构中,纤芯的包覆层为磁流体,如图 6 所示。磁流体的折射率取决于其浓度以及磁场强度,相同浓度下,磁流体的折射率取决于自身的分散程度。当外加磁场时,磁流体中的单畴颗粒(超顺磁性 Fe_3O_4 纳米颗粒)会团簇成链,从而增大倏逝场中磁流体的折射率,使它接近纤芯折射率。因此,衰减效率与磁流体中 Fe_3O_4 纳米颗粒的团簇程度有关。

响应和恢复时间如图 6 所示。由图可见,在施加磁场时,调制器可以在 100 ms 内达到 90% 响应;而在关闭磁场时,可以在 120 ms 内获得完全恢复。同时, Fe_3O_4 纳米颗粒的移动速度应取决于磁流体的浓度、黏度以及磁场强度。通过优化这些参数,其响应特性将被进一步提高。

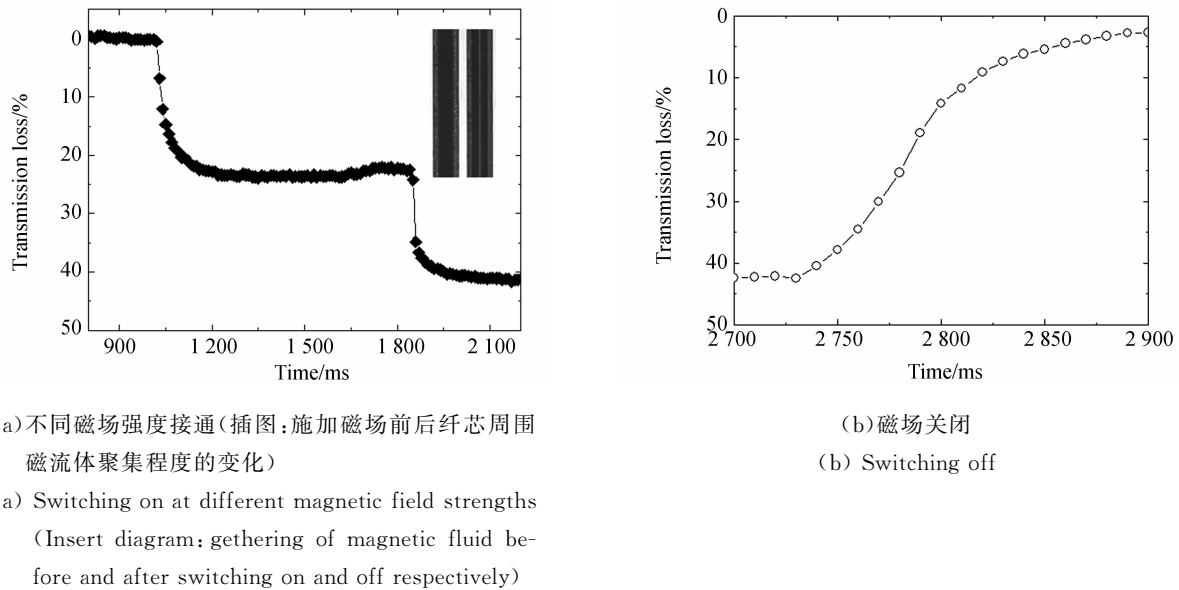


图6 光纤调制器的动态响应时间

Fig. 6 Dynamic response of hollow optical fiber based modulator

5 结论

本文设计了一种基于新型悬挂芯空心光纤的光纤调制器。该器件含有超顺磁性 Fe_3O_4 纳米

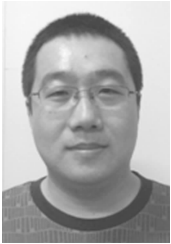
颗粒的磁流体,可以在外部磁场作用下显著影响纤芯中 632.8 nm 光的传输损耗。当磁场强度为 38 914 A/m 时,饱和调制深度可以达到 43%,系统的响应时间低于 120 ms。该系统还可用于光开关,光纤滤波器和磁传感器等领域。

参考文献:

- [1] 姜宝光,穆全全,曹召良,等. 液晶空间光调制器对真人眼畸变变前的校正[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2651-2656.
JIANG B G, MU Q Q, CAO ZH L, *et al.*. Correction of aberration in eyes by liquid crystal spatial light modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2651-2656. (in Chinese)
- [2] 吴亚雷,吴有金,朱龙洋,等. PZT 薄膜驱动的全光纤相位调制器数学模型[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2):230-236.
WU Y L, WU Y J, ZHU L Y, *et al.*. Mathematical model of all-fiber phase modulators with lead zirconatetitanate coating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):230-236. (in Chinese)
- [3] PENG Z, CHI CH CH. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4:491-498.
- [4] 赵勇,董俊良,陈菁菁,等. 磁流体的光学特性及其在光电信息传感领域中的应用 [J]. 光电工程, 2009, 36:126-131.
ZHAO Y, DONG J L, CHEN J J, *et al.*. Optical properties of the magnetic fluid and its application in optical information technology and sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36: 126-131. (in Chinese)
- [5] CHIEH J J, YANG S Y, HORNG H E. Magnetic-fluid optical-fiber modulators via magnetic modulation [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(13): 133505.
- [6] PENG Z, CHI CH CH. High extinction ratio magneto-optical fiber modulator based on nanoparticle magnetic fluids [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4:1140-1146.
- [7] TARASENKO O, MARGULIS W. Electro-optical fiber modulation in a Sagnac interferometer [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1356-1358.
- [8] STARODUMOV A N, ZENTENO L A, ARZATE N, *et al.*. Nonlinear-optical modulator for high-power fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 1997, 22

- (5): 286-288.
- [9] RAJABVAND M, BEHNIA F. In-fiber wavelength-selective modulation of WDM channels with performance analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(1): 141-147.
- [10] MORENO I, DAVIS J A, HERNANDEZ T M, *et al.*. Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 364-376.
- [11] QI Y H, DESJARDINS P, MENG X S, *et al.*. Electrochromic ruthenium complex materials for optical attenuation[J]. *Optical Materials*, 2003, 21(1-3):255-263.
- [12] TWU R C, HONG H Y, LEE H H, *et al.*. An optical homodyne technique to measure photorefractive-induced phase drifts in lithium niobate phase modulators[J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 4366-4374.
- [13] PENG F, YANG J, LI X L, *et al.*. In-fiber integrated accelerometer [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2056-2058.
- [14] YANG X H, LI L, YUAN L B, *et al.*. Submicrometer organic silica gel fiber for oxygen sensing [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4656-4658.
- [15] DONG B, CUI Y M, YANG H, *et al.*. The preparation and magnetic properties of $Gd_xBiY_{2-y}Fe_5O_{12}$ nanoparticles [J]. *Materials Letters*, 2006, 60(17-18): 2094-2097.

作者简介:



赵恩铭(1977—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,讲师,2000年、2005年于黑龙江大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤制备及传感方面的研究。E-mail: zhaoenming@hrbeu.edu.cn



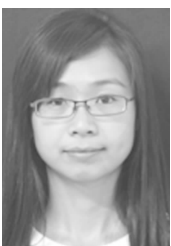
苑立波(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要从事光纤传感器及纤维光学等领域的研究。E-mail: yuanlibo@hrbeu.edu.cn



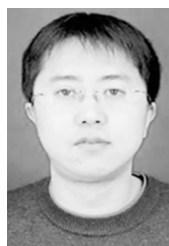
郑瑶(1989—),男,河北唐山人,硕士研究生,2011年于哈尔滨工程大学获得学士学位,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhengyao@hrbeu.edu.cn



佟成国(1973—),男,黑龙江海伦人,2011年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,现在从事光纤传感方面的研究。E-mail: tongchengguo@hrbeu.edu.cn



刘岩鑫(1987—),女,黑龙江鸡西人,硕士研究生,2011年于哈尔滨工程大学获得学士学位,现在从事光纤传感方面的研究。E-mail: lyx4920@hotmail.com



杨兴华(1979—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,2002年、2005年于东北师范大学分别获得学士、硕士学位,2008年于中科院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要研究方向为光纤传感、光学材料和微纳材料。E-mail: yangxh@hrbeu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)