

文章编号 1004-924X(2011)11-2618-05

基于亚毫米尺度波导研究磁流体的窄带滤波特性

袁文*, 桑明煌, 郭琴, 况庆强

(江西师范大学 物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)

摘要: 利用一种样品空间层达亚毫米尺度的双面金属波导, 将磁流体注入波导样品空间层作为导波层来研究磁流体的窄带滤波特性。首先将波长为 1 550 nm 的激光入射到波导表面, 选择合适的入射光导模共振角, 激发波导中的超高阶导模, 使磁流体处于光波导的振荡场中; 然后, 应用超高阶导模的高灵敏度特点, 将磁场施加在波导上改变磁流体的折射率, 使波导耦合效率发生变化, 通过接收波导反射光, 得到波导的窄带滤波特性。实验中测试的入射光波长调谐在 1 549. 440~1 549. 585 nm, 窄带滤波带宽为 0. 06 nm。当波长为 1 549. 516 nm, 所加磁场为 0~51. 9 kA/m 时, 获得反射光的变化达到 11. 9 dB。实验结果表明, 该方法获得的滤波特性具有带宽窄、灵敏度高的特点。

关键词: 导波光学; 双面金属波导; 磁流体; 窄带滤波

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi: 10. 3788/OPE. 20111911. 2618

Research on narrow band filter of magnetic fluid based on optical waveguide with submillimeter scale

YUAN Wen*, SANG Ming-huang, GUO Qin, KUANG Qing-qiang

(College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University,
Nanchang 330022, China)

* Corresponding author, E-mail: yuanwen@jxnu.edu.cn

Abstract: A type of ultrathick double metal cladding optical waveguide with a submillimeter scale was used to investigate the narrow bandwidth filter of magnetic fluid, in which the magnetic fluid were injected into the sample as a guided layer. While the 1 550 nm laser beam was incident on the waveguide with resonance angle, ultrahigh order modes would be excited; the magnetic fluid was in the oscillating field. Then based on ultrahigh order modes, the refractive index of magnetic fluid was changed owing to the strong concentration of the magnetic field. The characteristics of narrow bandwidth filter were obtained by detecting the reflected beam on waveguide. In the experiment, the wavelength of the incidence beam was to be form 1 549. 440 nm to 1 549. 585 nm, and the bandwidth filter to be 0. 06 nm. Obtained results show that the change of reflected beam is 11. 9 dB when the magnetic field changed from 0 to 51. 9 kA/m in the wavelength of 1 549. 516 nm. Experimental results indicate that the optical filter has narrow waveband and higher sensitivity.

收稿日期: 2011-05-23; 修订日期: 2011-07-08.

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(No. 2009GZW0006); 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放项目(No. 2008SH05); 江西师范大学科研项目(2011)

Key words: waveguide optics; double metal-cladding optical waveguide; magnetic fluid; narrow band-width filtering

1 引 言

平面光波导是导波光学中的基础元件,利用棱镜或者光栅耦合波导的技术已经相当成熟,并且已获得了很多成果,在电光调制、光衰减器、折射率测量等方面具有非常实际的应用价值^[1]。但棱镜耦合波导体积大、不易加工的缺点,为此发展了基于自由空间耦合的亚毫米尺度双面金属包覆波导^[2],这种双面金属包覆波导具有体积小、结构简单,其超高阶导模具有强色散和高灵敏等特点^[3],相关的实验研究已获得了良好的结果^[4-6],利用平面波导窄带滤波得到的通带半宽度可小于 0.12 nm ^[7]。

新型磁流体的优良特性,使其近年来在诸多的研究领域引起了人们的广泛关注和极大的研究兴趣^[8-10]。人们开展了有关磁流体光学性能在光调制、滤波以及传感等领域的应用研究,并利用磁流体的独特光学特性制成了许多光电子器件^[11-13]。同时也开展了基于磁流体的磁控折射率变化,有关其窄带滤波的研究^[14]。但却未有进一步深入磁流体处于光波导振荡场中的研究,有关磁流体作为光波导材料的研究也没有广泛开展。本文就是以亚毫米尺度的双面金属包覆波导为基础,将磁流体样品作为波导层来进行实验研究。在波导结构中施加磁场作用,磁流体在磁场作用下折射率改变,从而使波导光学参数获得变化,波导的耦合效率发生转变,反映在反射光的强度上发生改变。由于波导中的超高阶导模的高灵敏度特性^[3],使得这种波导对激光波长变化的感应十分灵敏,因此可通过改变磁场获得激光波长的滤波效果,经实验测试获得了良好的窄带滤波结果。

2 原 理

平面光波导的结构如图 1 所示。该平面光波导的结构从上至下依次为:上层平板玻璃、上层银膜、样品空腔、下层银膜、下层平板玻璃五部分构成。光从空气中入射波导,空气的介电系数为 ϵ_0 ,

上层平板玻璃介电系数为 ϵ_1 ,上层银膜的介电系数为 ϵ_2 ,磁流体样品的介电系数为 ϵ_3 ,下层银膜的介电系数与上层银膜相同,下层平板玻璃的介电系数与上层平板玻璃相同。而且下层银膜的厚度很大($>100 \text{ nm}$),所以下层平板玻璃在此对导波光没有影响。由于波导层的厚度达亚毫米量级,由上层银膜、导波层磁流体以及下层银膜构成亚毫米尺度双面金属波导^[2]。

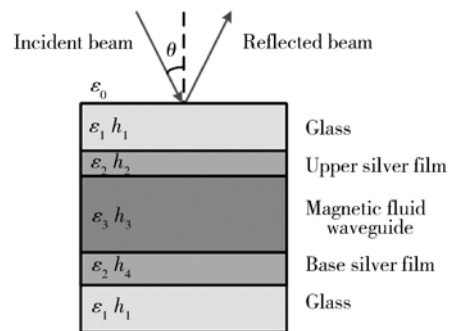


图 1 平板波导结构

Fig. 1 Configuration of waveguide

这种特殊构造的平板波导,采用了直接耦合方法,上层银膜是波导的耦合层,入射激光束入射到上层银膜时,选择合适的人射光角度,当入射光的角度满足波导的导模共振角度时,入射光的能量耦合到导波层中,这就导致反射光能量的急剧下降,在反射率曲线中形成一个衰减全反射吸收峰(ATR)。

根据亚毫米尺度双面金属波导的特性^[6],导模有效折射率的相对与波长的变化为:

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta \lambda} = \frac{\sqrt{\epsilon_3 - n_{\text{eff}}^2}}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{m}{2h_3} \quad (1)$$

对于式(1),亚毫米尺度的波导 m 值很大(在 1 000 以上),所以 $n_{\text{eff}} \rightarrow 0$,即波导有效折射率相对于波长的变化极为灵敏。在 ATR 图谱中,通过选择入射光的工作角,给波导样品施加磁场,使得磁流体折射率发生变化,从而使导模的耦合效率发生变化,也就造成 ATR 谱线在角度方向上发生移动,在原来工作角处的反射光强将发生变化,因此,可以得到磁场下波导的滤波效应^[6]。

3 实 验

实验波导腔体由三层光学玻璃构成,其中上下 2 块厚度相同,均为 0.5 mm,中间夹层厚度为 0.7 mm,并且中间挖出圆孔,留出空间以注入磁流体样品。镀膜时,先在上下平板玻璃镀银膜,此时必须精确控制上层银膜的厚度,因为该厚度直接影响到波导的耦合效率^[15]。经镀膜实验测试,该层银膜的厚度为 35 nm 比较合适,入射光耦合到波导中达到最佳值。下层玻璃镀厚银膜,其值大于 100 nm 时,对波导的耦合效率没有影响,所以该银膜的厚度可以不需要精确控制,实验中此银膜厚度约为 150 nm。将镀好膜的玻璃与夹层玻璃合在一起,构成玻璃腔体结构,其中镀有银的一面粘合在腔体里面,与腔体中的磁流体构成亚毫米尺度的双面金属波导结构。制作好的波导如图 2 所示,其尺寸为 20 mm×15 mm。

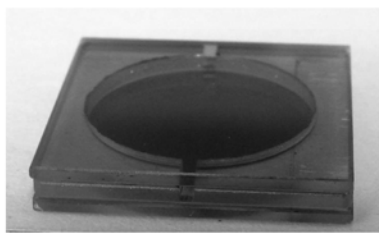


图 2 波导器件照片

Fig. 2 Picture of waveguide

将制作好的波导样品进行角度扫描,得到入射光为 1 550 nm 时的 ATR 谱。图 3 是该实验样品的 ATR 曲线,该曲线反映的就是波导反射光与

入射光角度的变化曲线,每一个 ATR 吸收峰对应于一个导模共振模式。从图 3 中看出,角度在 1.5~3.5°有 7 个导模峰,这种亚毫米尺度波导的 ATR 吸收峰有很高的探测效率^[6]。

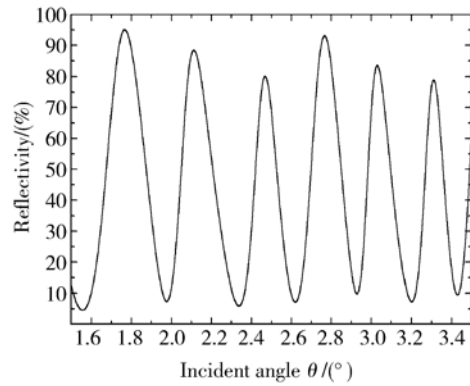


图 3 实验衰减全反射谱

Fig. 3 Attenuated total reflection spectrum in laboratory

实验测试滤波效应的装置如图 4 所示。其中波长为 1 550 nm 的 DBF 激光器波长可调谐范围是:1 549. 352~1 550. 117 nm,光功率为 10 mW。激光由光纤输出至耦合器分束 5%至光谱仪检测其波长的变化,95%经自聚焦透镜输出空间光,再经偏振器获得 TM 偏振光入射到波导表面。电磁铁线圈串联用于产生平行与实验台面的磁场 H,磁场的大小调节范围是 0~51.9 kA/m。波导片夹在两块电磁铁中间,并放置于 $\theta/2\theta$ 转台 ($\theta/2\theta$ goniometer)上,通过计算机精确控制入射光角度的大小。光电探测器用于探测波导反射光的强度,其结果送计算机处理。

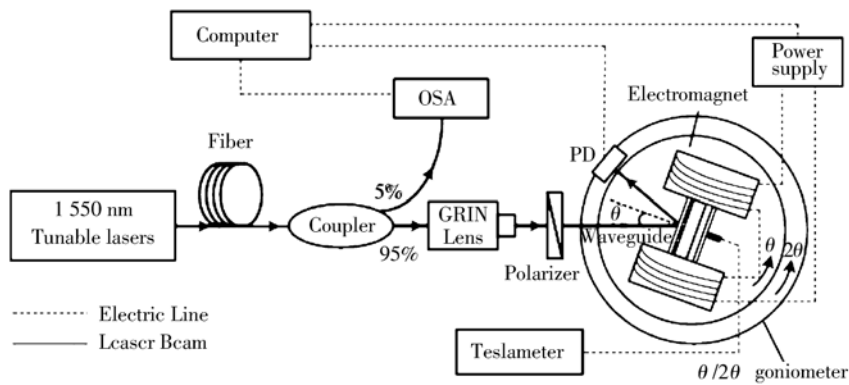


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental equipment

光路调试好之后,将浓度为 0.65% 的纳米水基 Fe₃O₄ 磁流体,注入制作好的波导腔体中。首先,不加磁场对波导进行角度扫描,由于实验中利用超高阶导模来进行磁流体的滤波测试,所以入射光束 < 3°。选取如图 3 中的实测波导样品 ATR 谱线工作角为 2.2°,此时让 $\theta/2\theta$ 转台停下,调谐 1550 nm 的 DBF 激光器波长,使其波长调谐在 1549.440~1549.585 nm 变化,得到波长与反射率的关系如图 5 所示的曲线 A。再增加磁场至 8.9 kA/m,继续重复上面的激光波长调谐范围,得到波长与反射率的关系曲线 B。如此逐渐增加磁场的值,分别为 18.4,27.9,39.6 和 51.9 kA/m,依次得到曲线 C、D、E 和 F,如图 5 所示。

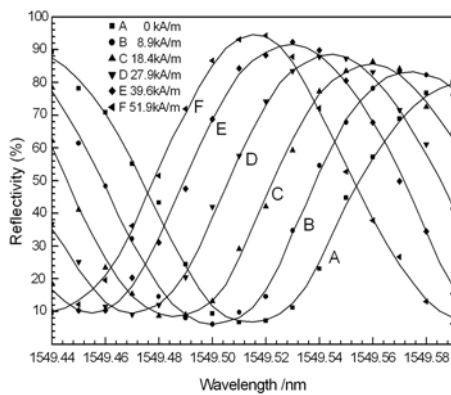


图 5 不同磁场作用下的磁流体滤波结果

Fig. 5 Result of optical filters by magnetic fluid with different magnetics

从图 5 中的磁流体滤波效果可以看出,对于波长为 1549.516 nm 的激光,在未加磁场时,反射率为 6%;当所加磁场达到约 51.9 kA/m 时,反射率达到 94%,与未加磁场作用时比较,实验测得的光强变化值为 11.9 dB,滤波半宽度为 0.06 nm。

图 6 测试的是在磁场作用下,比较波长 1549.440 nm 和 1549.516 nm 的滤波效果。从

图 6 中看出,未加磁场时波导对波长为 1549.440 nm 有比较高的反射率,其值达到 87%;而此时对波长为 1549.516 nm 的反射率只有 6%。但当磁场为 51.9 kA/m 时,情况相反,此时对波长 1549.516 nm 的光有 94% 的反射率,而波长 1549.440 nm 的光只有 9% 的反射率。

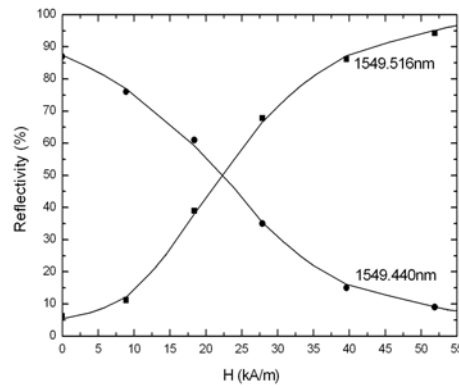


图 6 不同波长时的滤波效果

Fig. 6 Effect of optical filters with different wavelengths

4 结 论

本文利用亚毫米尺度平面波导技术,将磁流体注入波导中作为导波层来研究磁流体的光学特性。由于这种波导厚度达到亚毫米量级,采用小角度入射激光可产生密度很高的波导中超高阶导模。这些超高阶模对光源波长、波导厚度和折射率特别敏感。根据这种特性,利用磁场改变磁流体折射,实验测试了其滤波特性,获得了窄带的滤波效果。实验测试的滤波宽度为 0.06 nm,获得反射光的变化达到 11.9 dB。该波导具有结构简单、尺寸小、制备方便的优点。

参考文献:

[1] 曹庄琪. 导波光学[M]. 北京:科学出版社, 2007: 96-103.
CAO ZH Q. *Waveguide Optical*[M]. Beijing: Science Press, 2007:96-103(in Chinese).
[2] LI H G, CAO ZH Q, LU H F, *et al.*. Free-space coupling of a light beam into a symmetrical metal-

cladding optical waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2003,83 (14): 2757-2759.
[3] LU H F, CAO ZH Q, LI H G, *et al.*. Study of ultrahigh-order modes in a symmetrical metal-cladding optical waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004,85(20):4579-4581.
[4] CAO Z Q, CHEN G. Low voltage electro-optical polymer light modulator using attenuated total internal reflection[J]. *Optical & Laser Technology*,

- 2001, 33(9):417-420.
- [5] CAO Z Q, SHEN Q S. Improved attenuated-total-reflection technique for measuring the electro-optic coefficients of nonlinear optical polymers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, 17(5):805-808.
- [6] 曹庄琪, 陆海峰, 李红根, 等. 亚毫米尺度双面金属波导的超高阶模及其滤波特性研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(4):497-500.
CAO ZH Q, LU H F, LI H G, *et al.*. Research of ultrahigh order modes in double metal cladding optical waveguide with submillimeter scale[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(4):497-500. (in Chinese)
- [7] 李小奇, 孙德贵. 平面波导窄带干涉滤波方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4):467-472
LI X Q, SUN D G. Investigation on interference filter within planar waveguides[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 467-472. (in Chinese)
- [8] YAMAGUCHI H, ZHANG X R, HIGASHI S, *et al.*. Study on power generation using electro-conductive polymer and its mixture with magnetic fluid [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320 (7):1406-1411.
- [9] NEUBERGER T, SCHOPF B, HOFMANN H, *et al.*. Superparamagnetic nanoparticles for biomedical applications: possibilities and limitations of a new drug delivery system[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, 293(3): 483-496.
- [10] 王鸿云, 高春甫, 阙君武, 等. 磁场作用下磁流变液的挤压与拉伸特性[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):850-856.
WANG H Y, GAO CH P, KAN J W, *et al.*. Compressive and tensile characteristics of magnetorheological fluid under magnetic fields[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 850-856. (in Chinese)
- [11] CHIEH J J, YANG S Y, HORNG H E, *et al.*. Magnetic-fluid optical-fiber modulator via magnetic modulation[J]. *Appl Phys Lett.*, 2007, 90 (13): 133505-1-3.
- [12] PU S L, CHEN X F, DI Z Y, *et al.*. Relaxation property of the magnetic-fluid-based fiber-optic evanescent field modulator [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, 101(5):053532-1-5.
- [13] CHEN J F, CHEN X F, PU S L, *et al.*. Realization of optical limiting with a magnetic fluid film [J]. *Opt. Commun.*, 2007, 276 (2):268-271.
- [14] 胡涛, 赵勇, 吕志伟, 等. 光纤磁流体 F-P 电磁场传感器[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10):2445-2449.
HU T, ZHAO Y, LU ZH W, *et al.*. Fiber optic electromagnetic sensor based on magnetic fluid[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2445-2449. (in Chinese)
- [15] 袁文, 聂义友, 桑明煌, 等. 双面金属波导参数对 ATR 吸收峰的影响分析[J]. *江西师范大学学报*, 2006, 30(5):409-412.
YUAN W, NIE Y Y, SANG M H, *et al.*. The influence of ATR absorption peak upon double metal waveguide parameter [J]. *Journal of Jiangxi Normal University*, 2006, 30 (5): 409-412. (in Chinese)

作者简介:



袁文(1972—),男,江西宜春人,博士,副教授,1995年、2003年于江西师范大学分别获学士、硕士学位,2011年于上海交通大学获博士学位,主要从事导光电子器件等方面的研究。E-mail: yuanwen@jxnu.edu.cn



郭琴(1972—),女,江西丰城人,博士,教授,1995年、1998年于江西师范大学分别获学士、硕士学位,2008年于上海交通大学获博士学位,主要从事波导量子光学等方面的研究。E-mail: guoqin91@163.com



桑明煌(1965—),男,江西德安人,硕士,副教授,1986年于江西师范大学获学士学位,1993年于上海交通大学获硕士学位,主要从事光纤通信及导波光学的研究。E-mail: sangqqli@yahoo.com.cn



况庆强(1974—),男,江西高安人,硕士,副教授,1998年、2005年于江西师范大学分别获学士学位、硕士学位,主要从事光纤通信、光纤激光器及光纤传感技术的研究。E-mail: kqq1209@163.com