

基于双面金属波导的纳米磁流体磁调制

袁文¹, 郭琴¹, 肖平平^{2*}, 桑明煌¹

(1. 江西师范大学 物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022;

2. 宜春学院, 物理科学与工程技术学院, 江西 宜春 336000)

摘要:设计了一种双面金属包覆波导,其中作为样品室的导波层厚度达到毫米量级.在波导腔体中注入浓度为0.15%的水基四氧化三铁纳米磁流体,采用波长为860 nm的红外激光束小角度(小于5°)入射到该波导金属耦合层上,以激发波导中的超高阶导模,使纳米磁流体处于光波导的振荡场中.根据超高阶导模的高灵敏特性,对磁流体施加10 mT的调制磁场,检测到纳米磁流体的磁光信号上升和下降时间为2 ms.

关键词:导波光学;双面金属波导;纳米磁流体;磁调制

中图分类号: O436.4 **文献标识码:** A

Magnetic modulation of magnetic-fluid based on the symmetrical metal-cladding optical waveguide

YUAN Wen¹, GUO Qin¹, XIAO Ping-Ping^{2*}, SANG Ming-Huang¹

(1. College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. School of Physics Science and Engineering Technology, Yichun University, Yichun 336000, China)

Abstract: A new type of symmetrical metal-cladding optical waveguide structures is proposed. The guiding layer that supports the oscillating field is submillimeter scale and serves as the sample room. The water-based Fe₃O₄ magnetic fluid with a volume fraction of 0.15% is injected into the sample room. The ultrahigh order modes are excited by a 860 nm laser beam on the structure with small incident angle (<5°). Owing to the strong concentration of the magnetic field, the sensitivity of the ultrahigh-order modes is very high. The rise and fall time of magnetic fluid is 2 ms when 10 mT magnetic field is applied.

Key words: waveguide optics; double metal-cladding optical waveguide; magnetic fluid; magnetic modulation

PACS: 42.79.Gn

引言

磁流体既具有液体的流动特性,又具有磁性的材料,尤其新型纳米磁流体的诱人特性,使得近年来在诸多的研究领域引起了广泛的关注和应用^[1-4].有关纳米磁流体光学性能在光调制、滤波以及传感等领域的研究引起了人们极大的兴趣,利用磁流体的这些独特光学特性可制成许多光电子器件^[5-7],有关磁流体的磁光特性也进行了研究,获得了秒量级的

响应时间^[8].

经过长期的光波导研究,提出了一种新型的亚毫米尺度双面金属包覆波导^[9].这种波导以玻璃片和样品为导波层,采用自由空间耦合技术激发波导中的超高阶导模,而超高阶导模具有强色散和高灵敏等一系列特点^[10].由于样品厚度可达毫米量级,因此该波导中可容纳几千个导模.双面金属包覆介质光波导的这种特殊构造,其高灵敏度特性克服了以表面等离子共振(SPR)^[11]技术为基础的传感器

收稿日期:2011-05-21,修回日期:2011-12-18

Received date: 2011-05-21, revised date: 2011-12-18

基金项目: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(2008SH05);江西省自然科学基金资助项目(2009GZ0006);江西省教育厅科技项目(GJJ12172)

Foundation item: Supported by the Research Foundation of The State Key Laboratory on Fiber Optic Local Area Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems of Shanghai JiaoTong University (2008SH05); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 2009GZ0006); Science and Technology Foundation of Jiangxi Province Education Department (GJJ12172)

作者简介:袁文(1972-),男,江西宜春人,博士,副教授,从事导波光电子器件研究, E-mail: yuanwen@jxnu.edu.cn.

通讯作者: E-mail: Xpp7967@163.com.

的缺点,SPR 技术待测样品处于共振模(表面等离子波和光导波)的消逝场区域,而双面金属包覆波导的样品层处于光波导的振荡场中,该相关技术于近年来在电光波导调制器、滤波器和传感器等领域获得了一系列的研究成果^[12-14]. 根据超高阶导模高灵敏度特性,在波导腔体中注入纳米磁流体,实验研究了调制磁场作用下,磁流体的光调制特性. 实验获得了磁流体毫秒量级的响应结果,所加磁场为 10 mT.

1 原理

双面金属波导的结构与实物照片如图 1 所示. 该双面金属波导器件的结构从上至下依次为:上层银膜、平板玻璃、样品空腔、下层银膜、平板玻璃 5 部分构成.

上层银膜是波导的耦合层,当入射激光束入射到波导耦合层时,在其波导表面反射,改变入射光角度,对波导的反射光进行探测,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,从而引起反射光能量的急剧下降,在反射率曲线中形成一个吸收峰. 图 2 是反射光的反射率随入射光角度的变化曲线,即衰减全反射谱(ATR),每一个吸收峰对应于一个导模共振模式. 从图 2 中看出,波导的 ATR 吸收峰有很灵敏的探测效率,其曲线的上升沿和下降沿都有较好的线性.

波导传感器的灵敏度可由下式表示^[15]:

$$S = \frac{n}{N} \cdot \frac{p}{P_{total}}, \quad (1)$$

式(1)中, n 为待测介质的折射率, p 为待测区域共振模的功率, N 为共振模有效折射率,而 P_{total} 为共振模总功率. 根据 SPR 传感器的特点,由于 $N > n$ 和

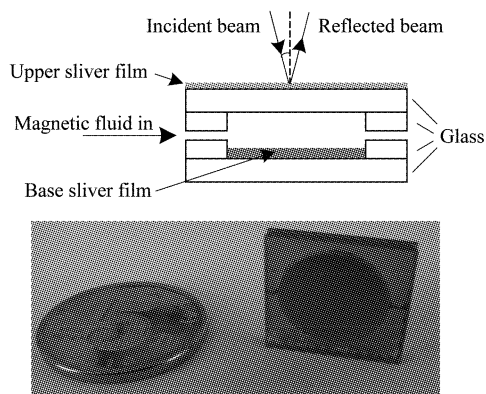


图 1 器件结构

Fig. 1 The configuration of optical waveguide

$p < P_{total}$, 因此这类传感器的灵敏度不可能超越 1 的极限值.

对于毫米量级双面金属包覆波导,由于超高阶导模的有效折射率 $N \rightarrow 0$,由式(1)可见,因子 $(n/N) \gg 1$,而因子 (p/P_{total}) 接近于 1,因此这类传感器的灵敏度原理上不受限制,灵敏度 S 可以远大于 1.

在 ATR 图谱中,选择好入射光的工作角位于 ATR 吸收峰的上升沿或者下降沿中点,例如图 2 所示的 $\theta_A = 2.576^\circ$ 处. 给磁流体波导样品施加调制磁场,磁场的作用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 θ_A 处的反射光强将发生变化,因此,可以得到调制磁场下的反射光强度的变化,通过检测反射光信号的响应时间可以得知磁流体的响应时间.

2 实验

实验波导采用 20 mm × 15 mm 的长方形 K7 光学玻璃,波导外层上、下两平板玻璃厚度为 0.5 mm,样品空腔的夹层玻璃厚度为 0.7 mm,样品空腔直径 12 mm,样品注入口径 0.6 mm. 在设计好的玻璃腔体上镀膜,必须严格控制上层银膜的厚度,该厚度直接影响到波导的耦合效率,实测上层银膜的厚度为 32 nm. 下层银膜的厚度较厚,其值大于 100 nm 时,对波导的耦合效率没有什么影响,所以该银膜的厚度不需要精确控制,实验中的镀膜厚度在 200 nm 左右.

将浓度为 0.15% 的水基 Fe_3O_4 纳米磁流体用微量进样器注入波导的空腔内. 将波导置于 $\theta/2\theta$ 转台上,以精确控制入射角的大小,图 3 是实验装置图,偏振器(Polarizer)用于获得 TE 偏振的光束,波长为 860 nm 的激光束沿 y 轴方向经两个经小孔(Aperture)整形后入射到波导上. 对波导进行角度扫描,

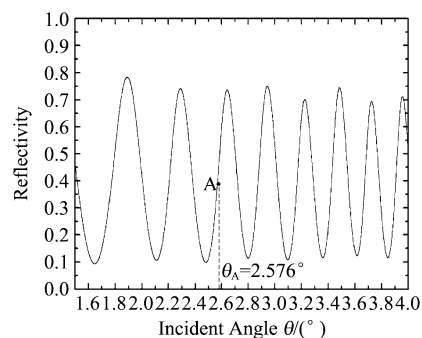


图 2 ATR 图谱

Fig. 2 ATR spectrum

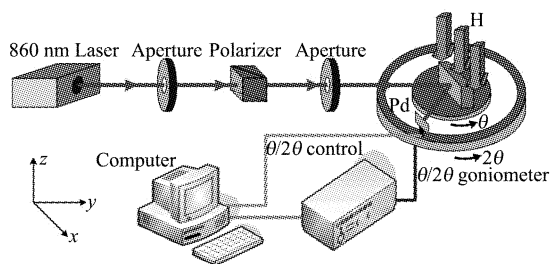


图3 实验装置图
Fig.3 Experimental equipment

由于实验中是利用超高阶导模来进行磁流体的磁光测试,所以入射光束小于 5° ,实测波导样品的 ATR 谱线如图 2 所示. 波长 860 nm 半导体激光器光功率为 20 mW. 实验中所加磁场的方向是沿 z 轴负方向, 磁场大小为 10 mT.

光路调试好之后,对反射光扫描得到图 4 中 A 区域曲线,选择 ATR 吸收峰的上升沿为工作点. 然后给波导施加调制磁场,磁场的调制周期为 21 s,即图 4 中的 B 区域曲线,从中看出加入磁场时,波导反射光变弱,撤消磁场时反射光恢复,示波器记录的波形如图 5(a) 所示,图中上部为磁场波形,下部为磁流体的响应波形. 改变磁场的调制周期,图 5(b) 所示为 20 ms 周期的调制磁场作用下的波形情况,图中上部仍为磁场波形,下部仍为磁流体的响应波形.

从图 5 中的波形可以看出,调制磁场作用下,反射光强变化是迅速的. 从图 5(b) 中刻度线可以得出:磁流体在调制磁场作用下的上升时间和下降时间为 2 ms.

当工作点选择在 ATR 吸收峰下降沿时,波导反射光强度的变化趋势与工作点选择在 ATR 吸收峰上升沿时不同. 从图 4 的 B 区域看出,工作点选

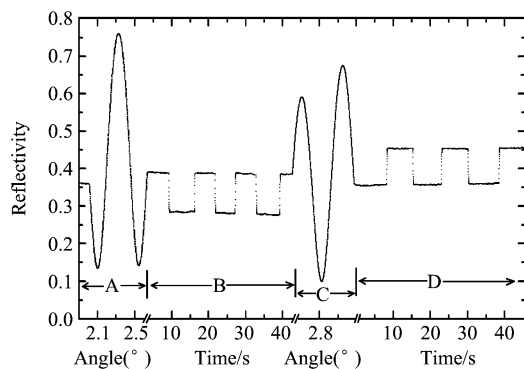


图4 实验过程
Fig.4 The process of experiment

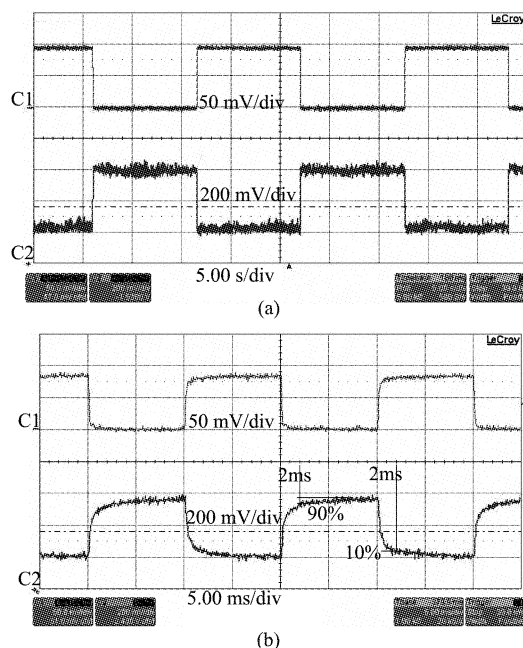


图5 不同周期磁场作用下的磁流体调制结果
Fig.5 The response of magnetic fluid modulated by magnetic field with different periods

在 ATR 吸收峰的上升沿中点,加入磁场时,波导反射光变化趋势是光强减小. 而工作点选择在 ATR 吸收峰的下沿中点,加入磁场时,波导反射光变化趋势是光强增大,即图 4 中的 D 区域曲线,示波器记录的波形如图 6 所示. 从图 6 中看出,此时磁流体的信号波形与图 5 中的(a)、(b)是反相的,产生这种现象的原因是:当磁场沿 z 轴方向作用时,使得沿磁场方向测量时磁流体折射率增大,将导致 ATR 吸收峰朝角度大的方向移动^[16],这种移动又使得选取工作点在上升沿或下降沿时光强的变化相反. 图 4 中 C 区域为角度扫描区域,目的是选择到 ATR 吸收峰的下沿.

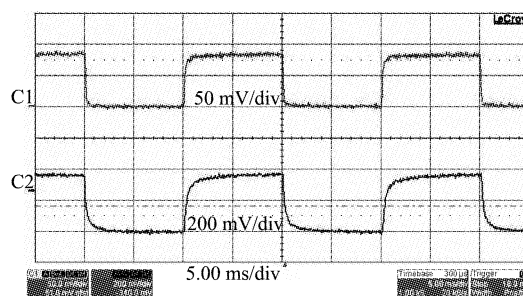


图6 工作点选在 ATR 峰下降沿的磁调制结果
Fig.6 The modulation result of magnetic fluid when operating point is set at the fall edge of ATR

3 结论

利用亚毫米尺度的双面金属波导,以小角度入射 860 nm 红外激光束激发的超高阶导模为探针,根据这种超高阶导模的高灵敏度特性,可以使得用很弱的磁场和浓度很低的磁流体来工作,并且获得大的响应信号,同时波导中的振荡场能量密度高,导致了其在调制磁场作用下光学特性的迅速变化,加快了响应速度.从实验结果来看,用低浓度、弱磁场的实验条件获得了磁流体的快速响应,其上升沿和下降沿时间达到 2 ms.选择 ATR 峰不同的工作点可以获得相位相反的反射光调制效果,这一点也不同于相关文献的报道^[6].实验中由于采用了直接耦合双面金属包覆波导结构,所以去除了一般波导耦合中的棱镜,使得波导结构更为简单,制作更为容易,而且体积小.微弱的磁场条件,可以使得产生磁场的通电螺线管大大减小尺寸,甚至可以直接粘贴在端面为 1 cm²的铁氧体上,为器件的微型化提供了可能.

REFERENCES

- [1] Butter K, Bomans P H H, Frederik P M, *et al.* Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy[J]. *Nature Mater*, 2003(2):88-91.
- [2] Safran S A. Magnetic strings and networks[J]. *Nature Mater*, 2003(2):71-72.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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):133-505.
- [6] 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):053-532.
- [7] 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.
- [8] Yang S Y, Hsiao Y T, Huang Y W, *et al.* Retarded response of the optical transmittance through a magnetic fluid film under switching-on/off external magnetic fields[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, **281**(1):48-52.
- [9] Li Honggen, Cao Zhuangqi, Lu Haifeng, *et al.* Free-space coupling of a light beam into a symmetrical metal-cladding optical waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(14):2757-9.
- [10] Haifeng Lu, Zhuangqi Cao, Honggen Li, *et al.* Study of ultrahigh-order modes in a symmetrical metal-cladding optical waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(20):4579-4581.
- [11] Green R J, Davies J, Davies M C, *et al.* Surface plasmon resonance for real time in situ analysis of protein adsorption to polymer surfaces[J]. *Biomaterials*, **18**(5): (1997):405-413.
- [12] Jiang Y, Cao Z Q, Chen G, *et al.* Low voltage electro-optical polymer light modulator using attenuated total internal reflection[J]. *Optical & Laser Technology*, 2001, **33**(9):417-420.
- [13] Jiang Y, Cao Z Q, Shen Q S, *et al.* 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.
- [14] Cao Zhuang-qi, Lu Hai-feng, Li Hong-gen, *et al.* Research of Ultrahigh Order Modes in Double Metal Cladding Optical Waveguide with Submillimeter Scale[J]. *Acta Optica Sinica*(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. *光学学报*), 2006, **26**(4):497-500.
- [15] Horvath R, Pedersen H C, Larsen N B, *et al.* Demonstration of reverse symmetry waveguide sensing in aqueous solutions[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(12):2166-2168.
- [16] Yuan Wen, Guo Qin, Sang Ming-huang, *et al.* Theoretical and Experimental Research on Voltage Sensing Based on Attenuated-Total-Reflection[J]. *Acta Optica Sinica*(袁文, 郭琴, 桑明煌, 等. 衰减全反射型电压传感器的理论和实验研究. *光学学报*), 2004, **24**(9):1199-1202.