

基于飞秒激光微加工的光纤磁场传感器

戴玉堂 周广福 李 涛 杨明红 胡文彬

(武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要 提出了一种基于光纤三维微结构加工的磁场传感技术方案。利用波长为 780 nm 的飞秒激光脉冲在刻写有光纤布拉格光栅 (FBG) 的单模光纤包层上加工螺旋微结构, 并采用磁控溅射方法在其上溅射磁致伸缩膜 (TbDyFe), 制备了一种新型光纤磁场传感器探头。微结构能改善光纤轴向伸缩性, 增加薄膜沉积的表面积, 从而提高探头的磁场敏感性。建立了螺旋微结构改善传感灵敏度的理论基础, 介绍了光纤磁场传感探头的制备工艺方法与技巧, 给出了不同参数传感探头的磁场测试结果。实验结果表明, 螺距为 50 μm 时, 对应的传感探头对磁场最为敏感; 相比于无微结构的标准光纤探头, 有微结构的光纤探头理想情况下灵敏度可提高近 5 倍。

关键词 光纤光学; 磁场传感器; 飞秒激光; 光纤布拉格光栅; 磁致伸缩薄膜

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1206001

Fiber Optic Magnetic Field Sensor Based on Femtosecond Laser Micromachining

Dai Yutang Zhou Guangfu Li Tao Yang Minghong Hu Wenbin

(National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract A kind of magnetic field sensing solution is proposed based on 3-D microstructure machining of fiber. The femtosecond laser with wavelength of 780 nm is employed to ablate a spiral microstructure into cladding of fiber Bragg grating (FBG), and the magnetostrictive film (TbDyFe) is deposited in the microstructure by magnetron sputtering process to form a new fiber optic magnetic field sensor. The microstructure can improve the axial retractility of fiber and enhance the surface area of the thin film deposition in order to enhance the sensitivity of probe. The theory of enhancing sensitivity from spiral microstructure is established and the preparation methods and techniques of the fiber optic magnetic field sensor probe are described. The magnetic response results of several probes with different parameters are demonstrated. It is shown that from the experimental results, the sensing probe with pitch of 50 μm is most sensitive to magnetic field. In ideal case, the sensitivity of the probe with microstructure can be enhanced nearly five times as high as that with non-microstructured standard FBG.

Key words fiber optics; magnetic field sensor; femtosecond laser; fiber Bragg grating; magnetostrictive film

OCIS codes 060.2370; 140.7090; 230.4000

1 引 言

光纤传感具有精度高、耐腐蚀、抗电磁干扰、体积小等优势, 易于组成传感网络, 可测量应变、温度、压力、加速度、折射率等物理参量, 目前已被广泛应用于桥梁隧道、大坝油库等大型设施的安全监控^[1-2]。光纤光栅的制备目前主要基于紫外激光照射从而形成折射率的周期性改变, 并不伴随光纤材

料的去除。但随着各类新型光纤传感器的研发, 对光纤端面或侧面进行三维微结构加工的需求越来越多^[3-4]。单就石英光纤材料的激光微加工而言, 飞秒激光和深紫外激光(如 157 nm 激光)是目前技术上可行的两种激光加工光源。其中飞秒激光加工效率高, 热影响区相对较小, 应用较为普遍^[5]。利用飞秒激光微加工技术, 可在光纤上刻蚀微孔、微槽、法

收稿日期: 2013-05-31; **收到修改稿日期:** 2013-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(51175393)、湖北省自然科学基金(2011CDA055)

作者简介: 戴玉堂(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事超短激光微加工以及新型光纤传感器方面的研究。

E-mail: daiyt68@163.com(中国光学学会会员号: S042011230S)

布里-珀罗(F-P)干涉腔、马赫-曾德尔(M-Z)干涉腔等微结构^[6-9],还可制备长周期光纤光栅^[10]。

光纤磁场传感器较原始的方式是利用法拉第效应,通过光纤光栅直接测量磁场^[11],但法拉第效应非常弱且解调复杂。利用干涉效应测量磁场的传感方式较为常见,诸如F-P干涉^[12],M-Z干涉^[13]等,这些方式易受温度、光源波动的影响,存在多分复用困难等缺点。较简单的方式是将光纤光栅粘贴在磁致伸缩条块或棒材上,利用磁致伸缩应变导致的波长漂移间接测量磁场大小^[14-15]。不过粘贴型探头结构不够紧凑,于是衍生出了直接在光纤光栅包层镀制磁致伸缩膜的传感方式,难题在于光纤是由坚硬材料石英组成,过小的磁场力拉动光栅产生的波长漂移量很小,甚至无法与噪声信号区分。为此,有学者将光纤进行化学腐蚀变细后再镀膜等方法以提高镀膜光栅的磁场响应灵敏度^[16-17],但对光纤抗折强度影响较大。

本文利用飞秒激光在写有光纤布拉格光栅(FBG)的单模光纤包层上加工螺旋微结构,在其上沉积磁致伸缩膜,制备了一种新型光纤磁场传感探头。解调磁致伸缩应变带来的光栅波长漂移,来实现磁场大小的测量。从理论与实验结果分析两方面探讨了螺旋微结构对改善光纤磁场灵敏度的作用。

2 基本原理

图1为提出的新型光纤磁场传感器探头的示意图。在剥去有机涂敷层的单模光纤段内写入FBG,再利用激光微加工技术在光纤包层上制备螺旋微槽,随后在具有微槽的光纤段上镀制磁致伸缩薄膜,即形成磁场探头的主体结构。磁场的大小可由光栅中心波长的漂移间接测量。该结构相比于粘贴在磁致伸缩条块或棒材上的FBG传感方式而言显得小巧而简洁。

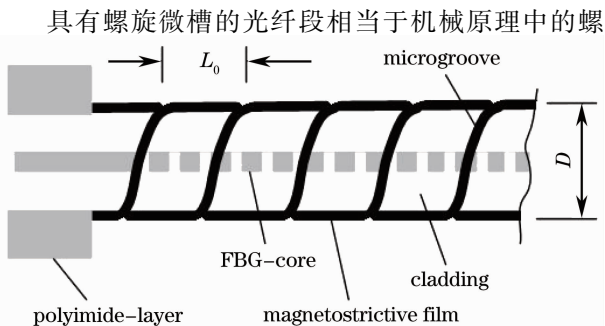


图1 新型光纤磁场传感探头示意图

Fig. 1 Schematic of the new type magnetic sensing probe

杆,可根据螺杆的力学原理近似计算其变形参量。包层外径为 D ,断面面积为 A ,在磁场作用下的光纤轴向力为 F_m 。如果没有微结构, $A = (\pi D^2)/4$;但螺旋槽是有深度(设为 h)的,断面(即危险横截面)面积必须按内径 D_0 计算,即

$$A = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot (D - 2h)^2}{4}, \quad (1)$$

显然,微槽使光纤轴向的柔度增加,从而增大拉伸应变。由磁致伸缩力引起的轴向应变可表示为

$$\epsilon = \frac{F_m}{E \cdot A} = \frac{4F_m}{E \cdot (D - 2h)^2}, \quad (2)$$

(2)式中 E 为光纤材料的弹性模量。该应变经过光栅的弹光效应导致中心波长 λ 的漂移。假定有效弹光系数为 P_e ,那么FBG波长漂移量 $\Delta\lambda$ 可表示为

$$\Delta\lambda = \frac{4}{E} \cdot \frac{F_m}{\pi \cdot (D - 2h)^2} (1 - P_e) \lambda. \quad (3)$$

将无微结构的镀膜标准光栅作为比较对象,假定其波长为 λ_s ,磁致伸缩轴向力为 F_{ms} ;在相同磁场下有微结构的光栅波长漂移量相对于无微结构的情形,其灵敏度改善倍率可表示为

$$R = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_s} = \frac{F_m}{F_{ms}} \cdot \frac{D^2}{(D - 2h)^2}, \quad (4)$$

由于微槽有两个壁面加槽底面,镀膜后所沉积的磁致伸缩材料总量比无微结构的多两个壁面的沉积量,因而在同样的磁场强度下,产生的磁致伸缩轴向力要大得多($F_m > F_{ms}$)。显然, R 远大于1。考虑到微槽底部更靠近纤芯,对纤芯的作用更直接,还有激光烧蚀过程可能造成包层内部改性等因素,实际的磁场响应灵敏度的改善倍率可能比(4)式计算的 R 值还要大。

3 光纤磁场探头制备

3.1 飞秒激光微加工系统与微结构制备

图2为本实验所使用的飞秒激光微加工系统的概略图。飞秒激光微加工系统由飞秒激光器(Cyber Laser Inc.)、光路系统、CCD监控系统和三维工作台组成。飞秒激光器的输出波长为780 nm,脉冲宽度为180 fs,平均输出功率为1.1 W,脉冲重复频率为1 kHz,最大脉冲能量为1.1 mJ,激光器输出的光束直径为6 mm。工件定位与聚焦由三轴数控工作台完成,三维工作台移动范围(XYZ)为 $\pm 100 \text{ mm} \times \pm 100 \text{ mm} \times \pm 25 \text{ mm}$,移动精度(xyz)为 $1.0 \text{ } \mu\text{m} \times 1.0 \text{ } \mu\text{m} \times 0.5 \text{ } \mu\text{m}$ 。加工过程可通过CCD成像系统实时在线监控。

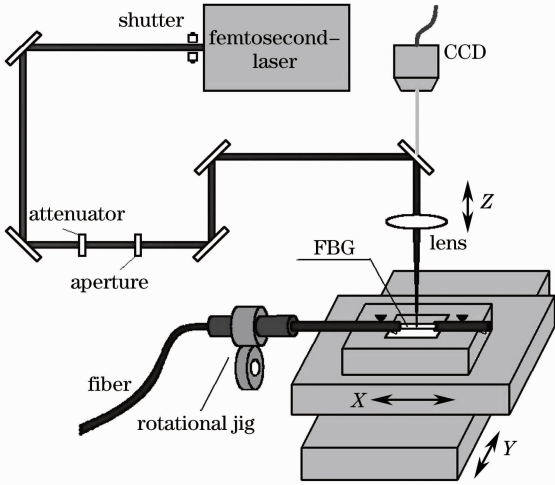


图2 飞秒激光微加工系统概略图

Fig. 2 Schematic of femtosecond laser micromachining system

在光纤包层制备螺旋微槽,可根据机械螺纹的车削原理进行加工。为此,特别设计和制作了一个光纤专用旋转夹具。光纤穿过一个包含尼龙夹套的导向铜管,再经过一个精密导向V型槽,将剥除涂覆层的FBG光纤段置于V型槽中间窗口部,也即飞秒激光束的正下方。移动Z轴,使激光束聚焦在

表1 磁控溅射工艺参数

Table 1 Magnetron sputtering parameters

Start power /W	Sputtering power /W	Vacuum /Pa	Working gas	Working pressure /Pa
80	100	1×10^{-3}	Ar	0.5

在上述工艺参数下,沉积速率大约为0.1 nm/s。为了使螺旋微结构及圆周面上大体均匀地沉积磁致伸缩材料,可分两个步骤完成镀膜,两步骤之间需要将光纤样品翻转180°。作为比较对象,在同一批次将一根无微结构标准光栅样品与有微结构样品一起进

行溅射镀膜。这样,所有镀膜样品将具有相同的膜厚。最后,完成镀膜的样品膜厚被测定为4.5 μm。图3给出了其中一个螺距为50 μm的螺旋微结构光纤镀膜后的扫描电镜(SEM)照片。

3.2 磁致伸缩薄膜制备

TbDyFe是一种理想的超磁致伸缩材料,其饱和磁致伸缩系数可达 10^{-2} 数量级,能高效地实现磁能到机械能的转换。由于TbDyFe的优良磁机耦合特性和静动态稳定性,已在声学、精密位移控制和各种传感领域获得广泛应用。本研究选用TbDyFe靶材,利用磁控溅射方法在具有螺旋微槽的光纤包层表面沉积磁致伸缩薄膜。实验中采用德国BESTEC公司生产的超高真空磁控溅射镀膜系统,该系统具有直流(DC)和射频(RF)两个溅射位。使用RF溅射位固定大小为50 mm×10 mm的TbDyFe靶材圆片,溅射工艺参数如表1所示。

行溅射镀膜。这样,所有镀膜样品将具有相同的膜厚。最后,完成镀膜的样品膜厚被测定为4.5 μm。图3给出了其中一个螺距为50 μm的螺旋微结构光纤镀膜后的扫描电镜(SEM)照片。

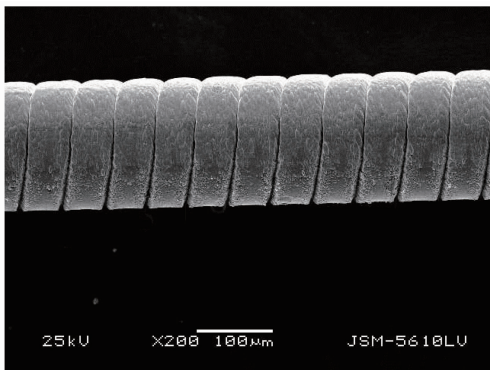


图3 镀膜后的螺旋微结构光纤

Fig. 3 SEM photograph of a coated fiber with spiral microstructure

4 磁场传感实验及讨论

磁场测试装置概略图如图4所示,即通过FBG波长解调仪(美国MOI公司制),解调在静态磁场作用下的FBG中心波长漂移量。虽然工程应用必须考虑温度补偿,但本实验不用交(直)流线圈式磁场(易产生温升)而取永磁静态磁场,在恒定室温下测试以排除温度的影响。首先利用高斯计确定离永磁铁外缘不同距离时的磁场强度,再通过调整架调整永磁铁与光栅探头的距离,从而测试不同磁场强度下的波长漂移量。

图5显示了镀膜光栅中心波长随磁场强度的变化趋势。其中图5(a)对应螺距为50 μm、槽深为14 μm的有微结构镀膜光栅,图5(b)对应无微结构标准镀膜光

栅,两者的中心波长分别为 1286.654,1283.254 nm。从图中可以看出,在磁场强度在 0~100 mT 范围内,波长漂移量与磁场强度非常符合线性关系;但磁场强度大于 100 mT 时,随着磁场的加强,波长的增加将逐渐变得平缓,可能是因为薄膜材料总量有限,磁致伸缩应变达到一定程度将会趋于饱和。推测不同的薄膜厚度,对应的线性范围会有所差异。单从图 5 中线性趋势的斜率来估算磁场响应灵敏度 S ,有微结构探头时 $S_1 \approx 6.9 \times 10^{-4}$ nm/mT,无微结构探头时 $S_2 \approx 1.41 \times 10^{-4}$ nm/mT,前者比后者灵敏度提高了 4.89 倍。螺旋微结构对于改善传感灵敏度具有非常显著的促进作用。

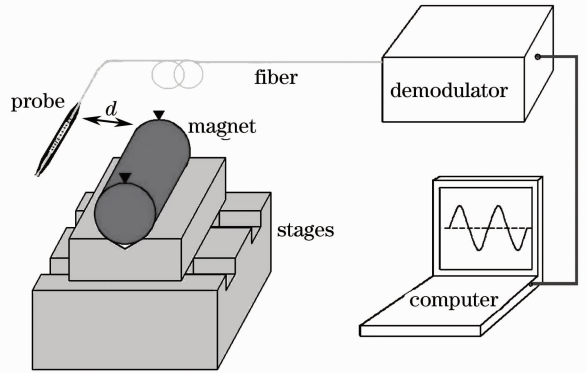


图 4 磁场测试装置概略

Fig. 4 Schematic of the magnetic field testing setup

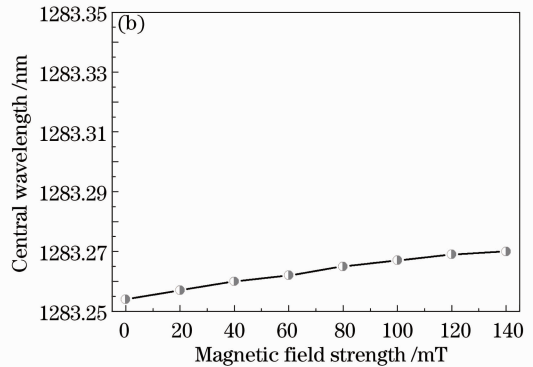
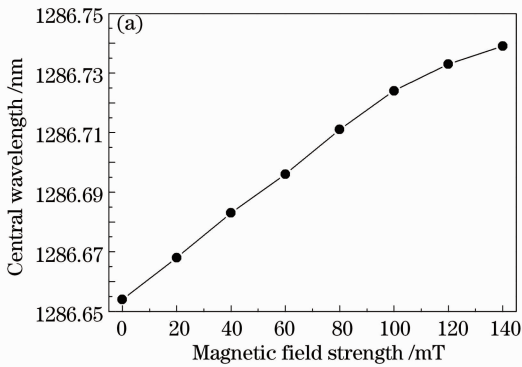


图 5 中心波长随磁场的变化。(a)有螺旋微结构探头;(b)无微结构标准光栅探头

Fig. 5 Variations of the central wavelength with magnetic field strength. (a) Probe with spiral microstructure; (b) probe with non-microstructured standard FBG

图 6 给出了三种镀膜光栅探头的波长漂移量随磁场强度的变化趋势。三种探头的螺旋槽深度基本相同($12 \pm 0.2 \mu\text{m}$),只是螺距不同(30, 50, 80 μm)。从图中可以看出,螺距为 50 μm 的探头对磁场最为敏感,其次分别是螺距为 30 μm 和 80 μm 的探头。另外,图 5 和图 6 中具有相同螺距(50 μm)但深度不同的两个探头进行比较,槽深为 14 μm 的探头要比槽深为 12 μm 的探头灵敏度高 1.28 倍,说明螺旋槽深度越大越敏感。问题在于,微槽深度加大的同时,轴向抗拉和抗折强度将减弱,更容易折断。根据经验,推荐螺旋微槽深度为 11~16 μm 为宜。

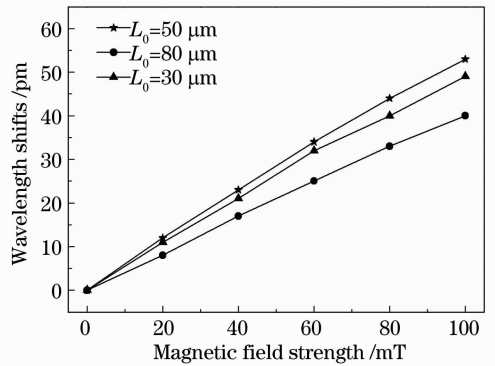


图 6 波长漂移量随磁场的变化关系

Fig. 6 Relationships between the wavelength shift and magnetic field strength

激光烧蚀加上镀膜过程会产生残余内应力,相当于给了光栅一个预拉应变,从而额外提高了磁场响应灵敏度。这些机理将在今后进一步探讨。

5 结 论

提出了一种基于光纤微结构的新型磁场传感探

从上述有微结构探头的磁场测试结果来看,它们比无微结构标准光栅探头的灵敏度改善了 2.85~4.89 倍。再从(4)式进行估算,虽然磁致伸缩轴向力的大小无法推算,但 F_m/F_{ms} 的比值不会大于 1.5,将槽深 11~16 μm 代入(4)式,理论估算的 R 值应不超过 1.7~2.2,实际探头的灵敏度改善倍率比理论估算值要大得多。推测存在其他的增敏要素,譬如飞秒激光烧蚀可能对光纤内部起到了改性的作用,或者

头方案,利用飞秒激光在单模光纤包层内加工螺旋状微槽,再在其上沉积磁致伸缩薄膜,制备出了一种新型光纤磁场传感探头样品。分析表明,在光纤包层制备微结构,使光纤轴向变柔而增加拉伸应变,还可增大薄膜沉积的表面积,起到放大应变的作用,有利于提高磁场响应灵敏度。实验结果也证实了螺旋微结构显著提升了光纤探头对磁场的响应灵敏度,相比无微结构光纤探头最大可提高近5倍。

参 考 文 献

- Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2002, 13(4): 420-430.
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子·激光*, 2002, 13(4): 420-430.
- A M Vengsarkar, W C Michie, L Jankovic, *et al.*. Fiber-optic dual-technique sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *J Lightwave Technol*, 1994, 12(1): 170-177.
- Dai Yutang, Xu Gang, Cui Jianlei. 157 nm laser micro-ablation of 3D-microstructures in optical fibers [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2010, 21(2): 192-195.
戴玉堂, 徐刚, 崔健磊. 光纤三维微结构的157 nm激光微刻蚀[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(2): 192-195.
- A Martinez, K M Zhou, I Bennion, *et al.*. In-fiber microchannel device filled with a carbon nanotube dispersion for passive mode-lock lasing [J]. *Opt Express*, 2008, 16(20): 15425-15430.
- L Qi, K Nishii, M Yasui, *et al.*. Femtosecond laser ablation of sapphire on different crystallographic facet planes by single and multiple laser pulses irradiation [J]. *Opt Lasers Eng*, 2010, 48(10): 1000-1007.
- Y Wang, D N Wang, M W Yang, *et al.*. Refractive index sensor based on a microhole in single-mode fiber created by the use of femtosecond laser micromachining [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3328-3330.
- Zhang Weigang, Liu Zhuolin, Yin Limei. Femtosecond laser micro-machined V-shaped fiber micro-cavity and its interference spectrum characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0706007.
张伟刚, 刘卓琳, 殷丽梅. 飞秒激光刻蚀V型光纤微腔及其干涉谱特性[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0706007.
- W Tao, Y K Han, H-L Tsai, *et al.*. Miniaturized fiber inline

- Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(6): 536-538.
- Y Wang, M W Yang, D N Wang, *et al.*. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining for refractive index measurement with high sensitivity [J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(3): 370-374.
 - Shujing Liu, Long Jin, Wei Jin, *et al.*. Structural long period gratings made by drilling micro-holes in photonic crystal fibers with a femtosecond infrared laser [J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 5496-5503.
 - Pen Hui, Su Yang, Li Yuquan, *et al.*. Measurement for magnetic field with fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1717-1722.
彭晖, 苏洋, 李玉权, 等. 基于光纤光栅的磁场测量新方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1717-1722.
 - Yuan Zongheng, Liu Yongzhi, Yang Yapei. Influence of line width on sensitivity of intrinsic fiber-optic Fabry-Perot magnetic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(8): 1112-1116.
袁纵横, 刘永智, 扬亚培. 光源线宽对内置式光纤法布里-珀罗磁场传感器灵敏度影响的分析[J]. *光学学报*, 2000, 20(8): 1112-1116.
 - Zhang Xueliang, Zhou Xiaojun, Hu Yongmin, *et al.*. All polarization-maintaining fiber earth magnetic field sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(11): 1515-1518.
张学亮, 周晓军, 胡永明, 等. 全保偏光纤地磁传感器[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1515-1518.
 - Liao Bangquan, Feng Dejun, Zhao Qida, *et al.*. Theoretical and experimental research on fiber Bragg grating electric current sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(9): 1092-1095.
廖帮全, 冯德军, 赵启大, 等. 光纤布拉格光栅电流传感的理论 and 实验研究[J]. *光学学报*, 2002, 22(9): 1092-1095.
 - Yi Benshun, Hu Ruimin, Zhu Zibi, *et al.*. Temperature compensation techniques for fibre Bragg gratings tuned by magnetostrictive transducers [J]. *Chinese J Lasers*, 2002, A29(12): 1085-1088.
易本顺, 胡瑞敏, 朱子碧, 等. 磁致伸缩调制型光纤 Bragg 光栅的温度补偿方法[J]. *中国激光*, 2002, A29(12): 1085-1088.
 - M H Yang, J X Dai, C M Zhou, *et al.*. Optical fiber magnetic field sensors with TbDyFe magnetostrictive thin films as sensing materials [J]. *Opt Express*, 2009, 17(23): 20777-20782.
 - G N Smith, T Allsop, K Kalli, *et al.*. Characterisation and performance of a Terfenol-D coated femtosecond laser inscribed optical fibre Bragg sensor with a laser ablated microslot for the detection of static magnetic fields [J]. *Opt Express*, 2011, 19(1): 363-370.

栏目编辑: 张 腾