

文章编号 :1001 - 2486(2005)03 - 0030 - 04

# 基于铽镝铁换能器的全保偏光纤磁场传感系统\*

张学亮,倪明,孟洲,胡永明

(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要** 制作了铽镝铁保偏光纤换能器,建立了全保偏马赫—曾德尔光纤干涉仪系统,采用工作点控制方法解调信号,实现了光纤磁场传感。该全保偏光纤干涉系统结构简单、抗干扰,有效解决了偏振不稳定问题。实验检测了系统对磁场幅度变化的响应特性,最小可测交流磁场信号为  $3 \times 10^{-10}$ T。

**关键词** 光纤光学;保偏光纤;磁场传感;磁致伸缩;铽镝铁

**中图分类号** TP212.1 **文献标识码** A

## All Polarization Maintaining Fiber Magnetic Field Sensing System with TbDyFe Transducer

ZHANG Xue-liang, NI Ming, MENG Zhou, HU Yong-ming

(College of Optoelectro Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** TbDyFe transducer with polarization maintaining fiber (PMF) is produced. An all polarization maintaining fiber M-Z interferometer is set up. Magnetic field sensing is realized with optical fiber by means of work point controlling method. This system has many advantages such as simple construction and anti-jamming. Especially it has solved the polarization instability. Responses of the system with the change of the DC signal and AC signal amplitude are measured. The smallest AC magnetic field  $3 \times 10^{-10}$ T is obtained in this system.

**Key words** fiber optics; polarization maintaining fiber; magnetic field sensing; magnetostriction; TbDyFe

1980年,亚里夫等人从理论上指出磁致伸缩材料被覆光纤的磁场传感器最小可检测  $10^{-16}$ T 的磁场<sup>[1]</sup>。美国海军研究室在此基础上进行了一系列研究工作,取得了一定的进展<sup>[2-4]</sup>。国内<sup>[5,6]</sup>从 20 世纪 90 年代起,就开展了一些磁致伸缩光纤磁场传感的工作,但仍处于实验室研究阶段。其中一个主要难题就是光纤系统的偏振稳定性。目前,已经实现的光纤磁场传感就是基于单模光纤耦合器构建的干涉系统进行工作的,精密的系统可达到 nT 量级的弱磁场传感<sup>[4]</sup>。但这些系统因为采用的是普通单模光纤,都面临着或多或少的偏振衰落,所以需要采取特殊的抗偏振衰落技术才能获取磁场传感信号,这增大了系统的技术难度,使信号的获取复杂。

采用全保偏光纤制作光纤磁场传感系统,可有效地解决普通单模光纤系统的偏振不稳定性问题,而且相对简化了系统结构和信号检测技术。在此基础上,用铽镝铁磁致伸缩材料制作了一个光纤磁致伸缩式换能器,建立了全保偏光纤干涉系统,并研究了保偏光纤系统的偏振特性,得到了较准确的外界磁场信号,实现了稳定的光纤磁场传感。为了对系统的性能进行综合评价,实验进行了系统对交流磁场与直流磁场的响应特性测量,证明该系统最小可测到  $3 \times 10^{-10}$ T 的交流磁场。实验发现,该铽镝铁—保偏光纤磁传感系统对交流磁场具有较好的线性响应,而对直流磁场有一定的磁滞现象,这与该材料的磁滞特性相符。

\* 收稿日期 2004 - 11 - 23  
作者简介 张学亮(1975—),男,讲师,博士生。

# 1 全保偏光纤磁场传感系统

## 1.1 片状铽镝铁材料粘贴光纤结构的磁换能器

考虑到光纤干涉仪中偏振态的稳定性能要求,采用了熊猫型保偏光纤。选择具有很大磁致伸缩系数的片状铽镝铁(TbDyFe)合金材料,该片状材料的尺寸为 $40 \times 4.5 \times 2(\text{mm}^3)$ ,制作一个履带状骨架,在上面装上该材料,将光纤绕在骨架上(共绕了17匝),再用环氧胶将经过片状材料表面的光纤在材料两端固定。这样,材料伸缩可引起约0.5m的光纤随之伸缩。其骨架结构如图1所示。

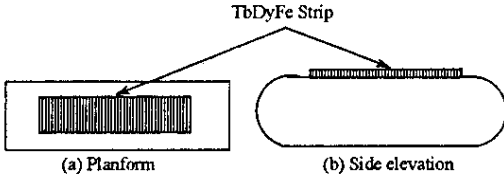


图1 片状铽镝铁材料粘贴光纤换能器结构  
Fig.1 Transducer structure with TbDyFe ribbon sticking optical fiber

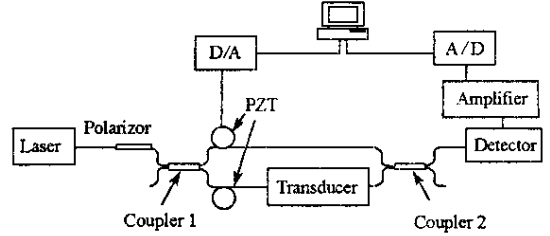


图2 保偏光纤磁场传感系统系统结构  
Fig.2 PMF magnetic field sensing system

## 1.2 保偏光纤磁场传感系统结构

稳定化DFB半导体激光器输出的光经过消光比为30dB的保偏光纤偏振器起偏后,注入到由高性能的保偏光纤耦合器构成的全保偏光纤干涉仪中,干涉仪的两臂上分别接了一个结构相同的PZT压电陶瓷相位调制器,铽镝铁保偏光纤磁换能器接在干涉仪的另一臂中,通过控制干涉仪两臂长度,使两臂长度差不大于3mm,保证干涉仪相干。这里,在一臂中多接了一个PZT相位调制器,一方面可通过它来检测系统性能,另一方面通过它使两臂结构对称,有助于减少温度等外界因素对干涉信号的干扰。干涉信号输出后,经探测器转换为电信号,再经放大处理,通过计算机进行信号处理,即可得到待测的信号。

系统中用两个螺线管分别施加交流磁场信号和直流磁场信号,该交流螺线管单位长度的匝数 $n = 1800$ 匝/m,产生的磁场强度由公式 $H = nI$ 计算;直流磁场螺线管单位电流产生的磁场大小为 $0.0075\text{T/A}$ 。磁传感单元放在螺线管内中心位置。系统结构如图2所示。

## 1.3 系统磁传感原理

马赫—曾德尔全保偏光纤干涉仪输出的光强信号为:

$$I_0 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_s \phi_n + \phi_{PZT} + \phi_0) \quad (1)$$

式中, $I_0$ 是输出的合成总光强, $I_1$ 、 $I_2$ 分别是干涉仪两臂的光强; $\phi_s$ 表示信号引起的相位变化, $\phi_n$ 表示各种干扰和噪声, $\phi_{PZT}$ 表示压电陶瓷调制器产生的相位变化, $\phi_0$ 表示初始相位。上述四项相位都指干涉仪两臂的相位差信号。

在(1)式基础上,考虑偏振以及电噪声影响的光信号经光电转换后可写成

$$V_0 = V[1 + k \cos(\phi_s + \phi_n + \phi_{PZT} + \phi_0)] + V_n \quad (2)$$

式中, $V_0$ 是输出的电压信号, $V$ 是信号幅度, $k$ 是干涉仪的可见度, $V_n$ 是电路附加噪声。

由(2)式可见, $k$ 的稳定性直接影响信号的稳定采集。干涉仪的可见度由系统偏振稳定性决定。本系统采用全保偏光纤构成,有效地保证了系统中传输光的偏振稳定,进而保证可见度接近1并在测量过程中稳定不变。

由于光纤两臂差一直受外界振动、温度变化的作用,干涉系统在自然状态下(不进行工作点控制)的输出结果会存在很多噪声,因此需要对系统进行必要的控制。本系统在干涉臂中加入了压电陶瓷相位调制器,采用相位补偿法,即通常所说的工作点控制方法<sup>[7]</sup>来消除振动等造成的对信号的影响。另外,由于系统需要检测的是频率信号,所以可通过信号滤波滤除温度等外界因素产生的慢漂干扰,由计算机

A/D 采集系统输出,再由 D/A 实时地改变压电陶瓷调制器上的电压,使  $\phi_n + \phi_{PZT} + \phi_0 = \pi/2$ , 则可获得稳定的传感信号:

$$V_0 = V(1 + k \sin \phi_s) + V_n \quad (3)$$

当待测信号存在并很小时,有  $\sin \phi_s \approx \phi_s$ 。考虑到一般的待测信号为频率信号,可进行针对待测信号频率的带通滤波,即得

$$\phi_s \approx V_0 / (V \cdot k) \quad (4)$$

由于磁致伸缩材料在磁场作用下产生的应变为

$$\varepsilon = CH^2 \quad (5)$$

式中,  $C$  为材料的磁致伸缩系数,  $H$  为作用在材料上的磁场,当在换能器上施加载波磁场  $h \cos \omega t$  时,载波磁场与待测直流磁场  $H_{DC}$  同时作用在磁致伸缩材料上后产生伸缩,传递到光纤上,引起的干涉仪两臂相位差为:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} nl\xi\eta C [ H_{DC} + h^2/2 + 2H_{DC}h \cos \omega t + (h^2/2) \cos 2\omega t ] \quad (6)$$

式中,  $\lambda$ 、 $n$ 、 $l$  分别为干涉仪工作波长、光纤折射率、铽镓铁磁致伸缩材料被覆光纤的有效作用长度,  $\xi$ 、 $\eta$  分别为磁光矫正因子和磁机耦合系数。

结合光纤干涉仪的检测特点,可以滤除相位信号中的直流成分以及高频项,仅检测其载波频率上的信号,则相位差变为:

$$\phi = KhH_{DC} \cos \omega t \quad (7)$$

其中,  $K = \frac{4\pi}{\lambda} nl\xi\eta C$ 。结合(4)式,有:

$$V_0 / V k = KhH_{DC} \cos \omega t \quad (8)$$

通过检测载波信号的振幅变化,即可得到待测直流磁场的大小。

## 2 实验与性能评价

系统以 Labview 软件为工作平台,采样率为 100kHz,采样点数为 10240。实验中检测了全保偏光纤交流磁场传感系统的输出信号,并将信号转换为频域信号,以便于实验测量的直观观察,如公式(4),  $V$  与  $k$  由系统实时测量,供计算信号大小所用。

用交流螺线管施加幅度为  $0.4524 \times 10^{-5}T$ 、频率为 800Hz 的交流磁场信号,系统检测到的响应信号经过进一步的滤波后得到信号的时域和频域图,如图 3 所示。

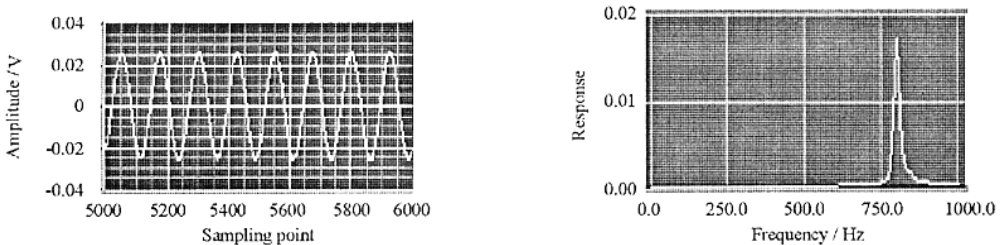


图 3 800Hz 的磁场信号响应

Fig.3 System response of the 800Hz magnetic signal

此次测量中,系统实时测量到的信号幅度为  $V_0 = 0.0255V$ 。在测量过程中,  $V = 2.01V$ ,  $k = 0.99$ 。系统输出的干涉信号可见度高达 0.99,已经接近理论值 1。这充分说明该全保偏光纤干涉系统具有非常稳定的偏振特性和相位特性,偏振衰落在该保偏光纤系统中得到了很好的抑制,相位衰落也通过工作点控制方法得到了控制。由图中信号的频谱可见,目标信号要比噪声本底高出很多。

将以上测量数据代入式(4),得到以相位表达的信号大小为 0.012815rad,相位灵敏度为 2847.8 rad/T,近似为 0.3rad/G。若系统的本底噪声为  $10^{-6}$ rad,则可得系统最小可测的磁场为  $3 \times 10^{-10}T$ 。

改变施加的 800Hz 磁场信号的幅度大小,得到系统对不同大小的交流磁场的响应结果,如图 4 所示。由图可见,系统对一定范围的交流磁场的响应具有很好的线性度。对该组数据进行线性拟合,得到它的线性度为 0.99993。

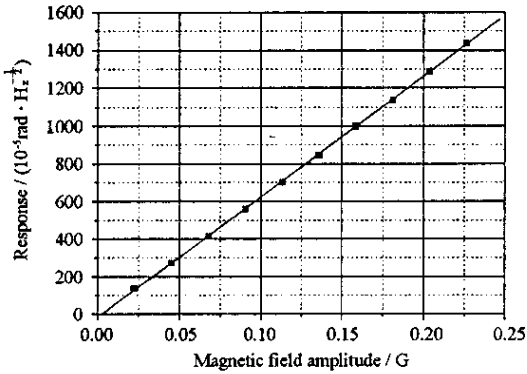


图 4 800Hz 信号的幅度变化响应图

Fig.4 Response of the system with the change of the 800Hz signal amplitude

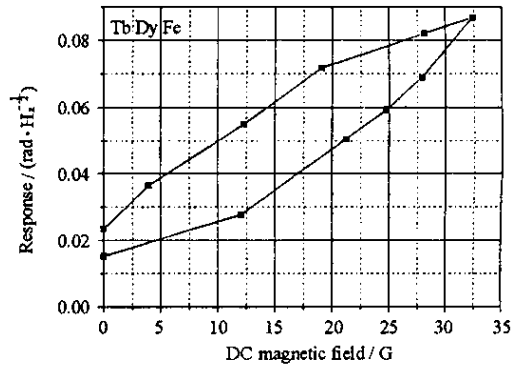


图 5 系统对逐渐变化的直流磁场的响应

Fig.5 Response of the system with the varying DC magnetic field

根据检测直流磁场的原理,以 2000Hz、幅度为 0.77G 的磁信号作为载波,测量外界施加的不同的直流磁场大小。在测量过程中,由直流螺线管施加直流磁场,同时测量系统响应,开始不断增加磁场大小,然后逐渐减小,测量结果如图 5 所示。在图中可看到磁滞现象,这符合该材料自然存在的磁滞特性。因此,该片状铽镝铁(TbDyFe)合金不适合用于测量直流磁场。

另外,磁致伸缩材料的伸缩系数也会受到一定温度的影响。考虑到温度的影响是一个慢漂的过程,所以它对单次磁场传感不会有太大影响。但是,要将该磁致伸缩材料制成的光纤磁传感系统进行长期的应用,就需要进行额外的温度补偿,才能保证系统的可靠性。

### 3 结 论

采用工作点控制方法,利用全保偏光纤的优势,建立了铽镝铁磁致伸缩材料粘贴全保偏光纤磁场传感系统。系统有效地解决了一般系统所存在的偏振不稳定性问题。该磁场传感系统测量的交流磁场幅度响应的相位灵敏度为 0.3rad/G,线性度达到 0.99993,最小可测的磁场为  $3 \times 10^{-10}$ T。系统在检测直流磁场时,虽然也得到相应的响应,但存在明显的磁滞现象,因此该材料的磁换能器不适合准确的直流磁场传感。该系统的建立充分证明了全保偏光纤系统在磁场测量上的优势,为采用保偏光纤方案进一步进行高灵敏度磁场传感研究提供了有力的实验证据,具有一定的理论价值。

### 参 考 文 献 :

- [1] Yariv A, Harry V W. Proposal for Detection of Magnetic Fields through Magnetostrictive Perturbation of Optical Fibers[J]. Opt. Lett., 1980, 5(3): 87-89.
- [2] Koo K P, Sigel G H. Characteristics of Fiber-optic Magnetic-field Sensors Employing Metallic Glasses[J]. Opt. Lett., 1982, 7(7): 334-336.
- [3] Sandeep T V. Characterization of Nonlinear Magnetostrictive Dynamics by Fiber Optic Interferometry[A]. SPIE(2039), 1993: 141-149.
- [4] Bucholtz F, Dagenais D M, Koo K P, et al. Demonstration of a Fiber Optic Array of Three-axis Magnetometers for Undersea Application[J]. IEEE Trans. on Magnetic, 1995, 31(6): 3194-3196.
- [5] 周晓军,刘永智. 光纤弱磁场传感技术进展[J]. 半导体光电, 1997, 18(1): 1-5.
- [6] 周晓军,林水生,刘文达,等. 光纤微弱磁场传感器软件解调方法[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(3): 261-263.
- [7] 倪明,张仁和,胡永明,等. 干涉型光纤水听器的闭环工作点控制和信号解调实现[J]. 应用声学, 2001, 20(6): 13-18.



