

# 高灵敏度光纤弱磁传感器

程玉琪 邹 昆

(东南大学电子工程系, 南京 210018)

## 提 要

本文报道了一种磁场检测灵敏度为  $10^{-5}$  Oe 量级的光纤弱磁传感器。文中提供了传感头与检测系统的设计理论和方法。

关键词: 光纤传感器, 磁场检测。

## 一、引 言

微弱磁场测量在生物、医学、国防、地质等领域有着十分重要的意义。光纤传感技术特别是干涉型光纤传感器应用于弱磁检测, 以其高灵敏度和实际应用性, 展示了弱磁场测量的新前景。从 1980 年 Yariv 等<sup>[1]</sup>人提出基于磁致伸缩效应的光纤弱磁传感器的基本思想后, 国际上研究一直很活跃, 每年都有大量的报道<sup>[2~4]</sup>。衡量光纤弱磁传感器的最重要指标是磁场检测灵敏度, 灵敏度的提高关键在于传感头的优化设计和应用高相位灵敏度的干涉仪系统。本文从这两点出发, 通过深入的理论分析, 根据所得结果建立的光纤弱磁传感器系统, 其灵敏度达到了  $9 \times 10^{-5}$  Oe。

## 二、基本 原 理

在光纤马赫-曾特尔(Mach-Zehnder)干涉仪信号臂的一段光纤上装置一段磁致伸缩材料, 构成传感头, 将它置于外磁场  $H$  中时, 材料的磁致伸缩将导致光纤中的光相位变化, 从而在干涉仪的两臂产生相位差, 通过合理的相位检测, 提取相位差变化, 就易实现对外加磁场的检测。传感器的灵敏度取决于传感头的灵敏度及干涉仪的相位检测灵敏度。

### 1. 传感头

考虑一段有一致磁轴定向的金属玻璃带, 其长度为  $L$ , 磁致伸缩响应  $(\Delta L/L)$ , 符合相干旋转模型<sup>[5]</sup>, 其磁伸应变  $\epsilon$  为

$$\epsilon = (3\lambda_s/2) [(H/H_A)^2 - (1/3)], \quad (1)$$

式中  $\lambda_s$  为磁化方向的磁伸系数,  $H_A$  为材料的各向异性场。当存在外磁场  $H$  时, 应变  $(\Delta L/L)$  为<sup>[6]</sup>

$$\left. \begin{aligned} (\Delta L/L) &= CH^2, \\ C &= (3/2)(\lambda_s/H_A^2). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

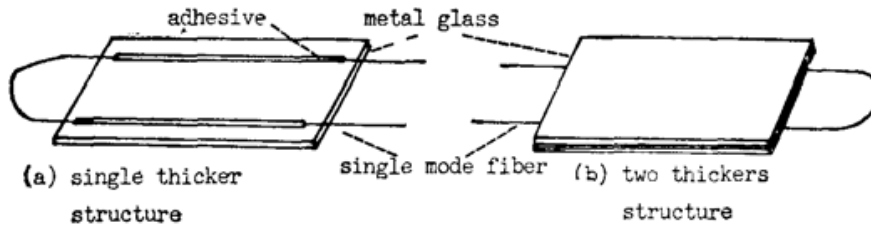


Fig 1. Metal-Glass transducer

结构如图 1 的传感头，裸光纤用环氧树脂均粘在单层金属玻璃带上(或两层金属玻璃带中间)，光纤与金属玻璃的轴线平行。由于金属玻璃带的横向尺寸远大于纤芯与胶层的尺寸，其体积模量也远大于光纤，从而可将模型合理简化为金属玻璃涂覆在一段含有胶护套的裸光纤，如图 2 所示。依弹性理论<sup>[7]</sup>，经过理论推导与计算，可得外磁场  $H$  所致的光纤中的相位变化  $\Delta\Phi_H$  为

$$\Delta\Phi_H = nk_0LMCH^2, \tag{3}$$

由(3)式知，相位灵敏度正比于相互作用长度  $L$ ，磁敏材料系数  $C$ ，调制系数  $M = M(E^{(1)}\sigma^{(1)}d_1)$ 。在选定了磁致伸缩材料后，能控制的量只有胶层厚度  $d_1$  与胶层的杨氏模量  $E^{(1)}$ 。由数值计算得到  $d_1$ 、 $E^{(1)}$  对  $M$  的影响，结果如图 3 所示。

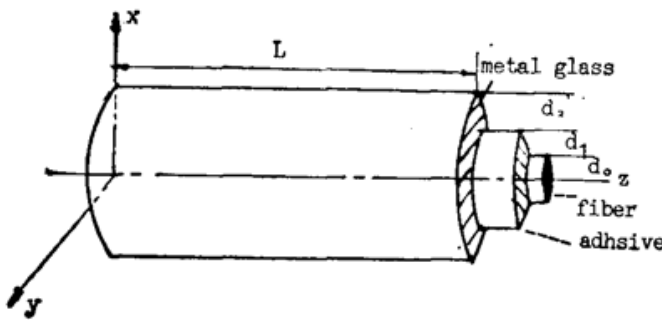


Fig 2. Model of stripline transducer

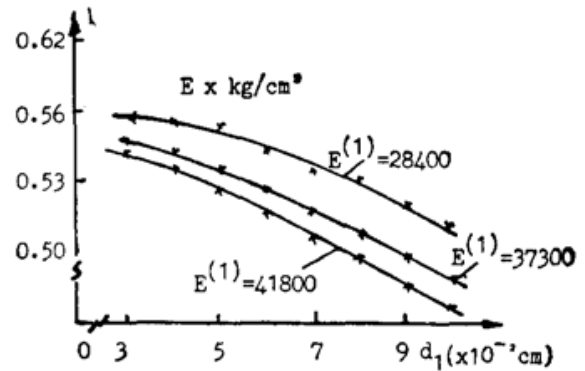


Fig 3.  $M$  changes as thickness and Young's modulus of adhesive

## 2. 检测系统

在光纤马赫-曾特尔干涉仪的各种相位检测方案中，交流相位跟踪检测能获得较高的相位灵敏度，系统也较复杂。其抗衰落原理是利用输出信号反馈控制参考臂的输出光相位，使干涉光的输出相位差保持在对待测信号的最敏感处，消除由于温度起伏，环境振动等因素引起的缓变相位起伏如图 4 所示。通过理论分析，可得检测系统的电压输出为

$$V_i(t) = C_s J_1(\Phi_m) J_1(\Phi_s) \sin \omega_s t, \tag{4}$$

式中  $C_s$  为与干涉条纹可见度等有关的比例系数， $\Phi_m$  为本振相位， $\Phi_s$  为信号相位。

含有交直流分量的弱磁场信号  $H$  可写为

$$H = H_{dc} + H_{ac} \sin \omega_s t, \tag{5}$$

式中  $H_{dc}$  为直流磁场幅度， $H_{ac}$  为交流磁场幅度，交流场角频率为  $\omega_s$ 。将(5)式代入(3)式经整理得

$$\Phi_{k_s}(t) = 2nk_0CMH_{dc}H_{ac} \sin \omega_s t, \tag{6}$$

将(6)式中的  $2nk_0CMH_{dc}H_{ac}$  取代(4)式中的  $\Phi_s$  项，可得到反映磁场强度的电压输出信号  $V_{k_s}(t)$

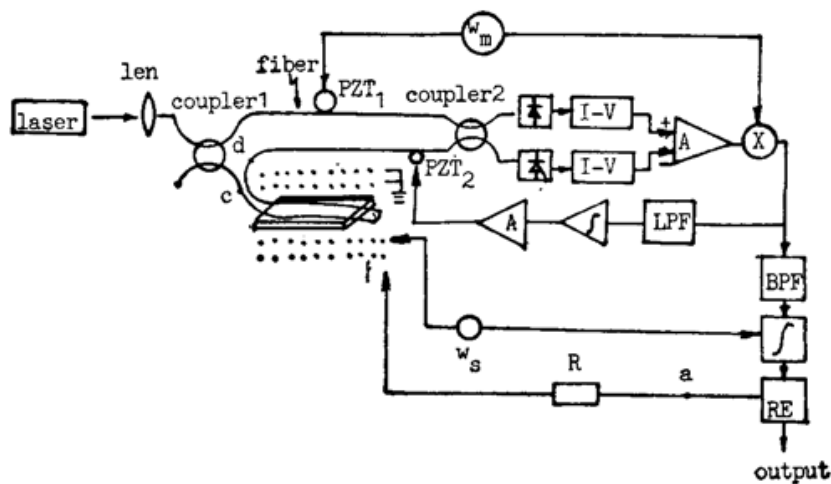


Fig 4. The scheme of weak magnetic field optical fiber sensor with high sensitivity RE=rectification A=amplifier

$$V_{ks}(t) = C_s J_1(\Phi_m) J_1(2nk_0 MCH_{dc}H_{ac}) \sin \omega_s t, \quad (7)$$

由(7)式可知,当确定  $H_{dc}$  时可测定  $H_{ac}$ , 由  $H_{dc}$  与  $H_{ac}$  相关,通过测量  $H_{ac}$  可实现对  $H_{dc}$  的测量。

### 3. 磁成零技术

磁非晶态合金材料具有磁滞特性<sup>[5]</sup>,在开环工作状态下(图5(a)),传感器对外界磁场的响应不是线性的,如将开环输出电压加到一反馈线路上,形成一直流场,抵消磁滞效应的影响,传感器的响应将趋于线性。此时传感器工作在闭环状态(图5(b))。这种磁成零技术使开环工作状态的传感器转化为工作在闭环状态,此时的传感器具有较好的工作稳定性。

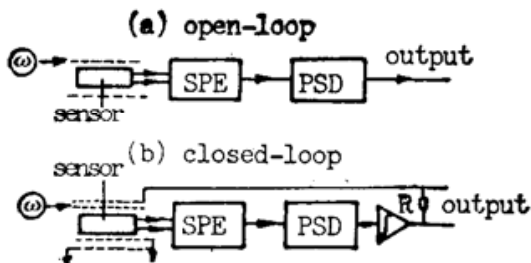


Fig 5. Two modes of operation for the fiber magnetostrictive magnetic sensor: Open-loop and closed-loop using dc feedback nulling. SPE=signal processing electronics, PSD=phase sensitive detector, R=feedback resistor

## 三、实验装置

光纤弱磁传感器示意图如图4所示。光源采用单模、光频稳定性好的 He-Ne 气体激光器,输出功率为 2mW, 波长  $\lambda=632.8\text{nm}$ , 激光束经显微物镜耦合入光纤马赫-曾特尔干涉仪系统,干涉仪两臂各有一 PZT 压电调相器,分别用于产生  $\omega_m$  的高频载波信号( $\omega_m \gg \omega_s$ )及进行相位补偿。在信号臂上制成传感头如图1所示,并将其置于长直螺线管中,螺线管线圈电流由精密电流表监测, c、d 端各用一插入损耗小于 0.4dB 的微型槽耦合,可以方便地换接不同结构的传感器。

定向耦合器输出的两束光,用两只一致比较好的 PIN 管探测,输出信号经差分放大进入乘法器混频,混频后的信号:一路经低通滤波及积分放大接到 PZT<sub>2</sub> 进行相位补偿;另一路经带通滤波器,同步积分器,整流后输出的直流电压信号由反馈回路加到偏置线圈上,进行磁补偿,消除金属玻璃带的磁滞影响,即采用了磁成零技术。电压值同时由数字电压表读出。

## 四、实验结果

单层结构传感头, 在开环状态下, 分别设定偏置场  $H_{dc}=0, 0.1304\text{Oe}, 0.311\text{Oe}$  测交变场  $H_{ac}$ 。结果示于图 6 中三条实线所示, 偏置场  $H_{dc}=0.311\text{Oe}$  时, 最小可检测  $5 \times 10^{-4}\text{Oe}$  的交变场。偏置场大小对  $H_{ac}$  的检测灵敏度有较大影响。此时的输出值不是直线。设定  $H_{dc}=0.311\text{Oe}$ , 在闭环( $\alpha$  点接上)状态下, 输出为图 6 中的虚线所示, 线性较好。

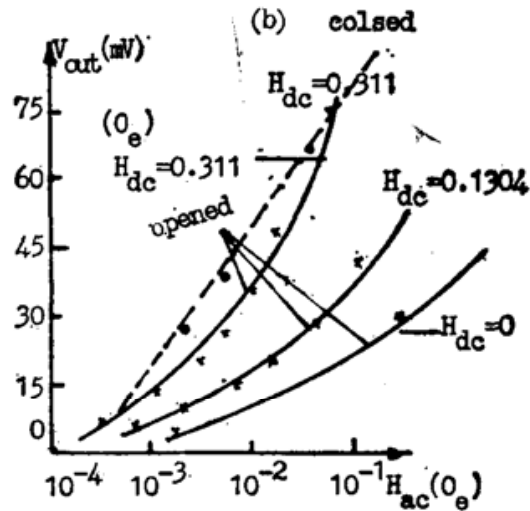


Fig 6 Hac Output of sensor with single thicker structure transducer

图 7 是测量得到的  $H_{ac}$  输出与  $H_{ac}$  变化的关系曲线,  $H_{ac}$  的测量应在  $-0.1\text{Oe} \sim 0.2\text{Oe}$  间进行, 即在饱和限制区内, 此间  $H_{ac}$  输出与  $H_{ac}$  的变化基本呈线性关系。曲线偏离零点是地磁场的影响。  $H_{ac}$  的检测灵敏度为  $2 \times 10^{-3}\text{Oe}$

双层结构传感头, 最佳偏置  $H_{dc}$  在  $0.676\text{Oe}$  处, 在闭环工作状态下,  $H_{ac}$  的测量结果示于图 8, 最小可检测磁场为  $9 \times 10^{-5}\text{Oe}$ 。

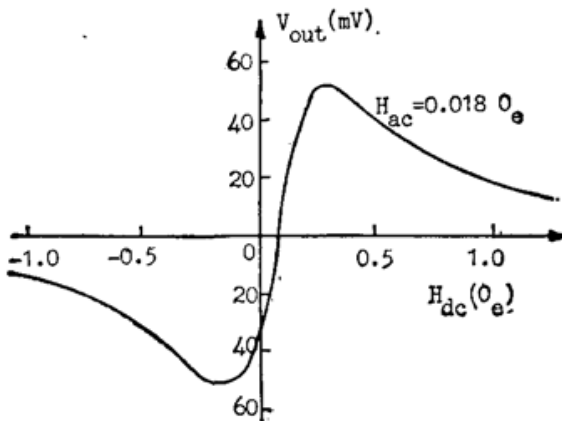


Fig 7. Measurement of D. C. magnetic field

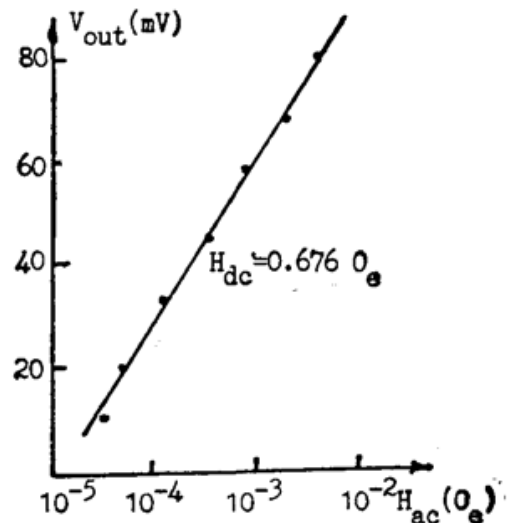


Fig 8. Measurement of A.C. magnetic field with two thickers structure trasducer

## 参 考 文 献

- [2] A. D. Kersey, D. A. Jackson *et al.*; *J. Lightwave Tech.*, 1985, *LT-3*, No. 4, 836~840.
- [3] D. M. Dagenais, F. Bucholtz *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**, No. 16, 1474~1476.
- [4] D. M. Dagenais *et al.*; *J. Lightwave Tech.*, 1989, **LT-7**, No. 6, 881~887
- [5] J. D. Livingston; *Phys. Stat. Sol.*, 1982, **A70**, 591~596.
- [6] K. P. Koo, F. Bucholtz *et al.*; *IEEE Trans. Mag.*, **MAG-22**, 1986, No. 3 (May), 141~144.
- [7] 王龙甫;《弹性理论》, (科学出版社, 北京, 19)。
- [8] Zou Kun, Cheng Yuqi; *Proceeding of SPIE*, Vol.1572,1991,1572~37.

## High sensitive optical fiber weak magnetic sensor

CHEN YUQI AND ZOU KUN

(Dept. of Electronic Eng. Southeast University, Nanjing 210018)

(Received 10 December 1990; revised 28 January 1991)

### Abstract

An optical fiber weak magnetic sensor with sensitivity of  $10^{-5}$  Oe. is reported. The device uses metal-glass as magnetostrictive material and an Alternating Current Phase Tracking (PTAC) homodyne system for phase detecting in optical fiber M-Z interferometer. Nulling technique eliminates any problems arising from the magnetic hysteresis effects of the magnetostrictive material which affect its magnetometer output. The theory and design method of the transducer and the phase detecting system are analyzed in detail.

**Key words:** optical fiber sensor, magnetic field measure.