

文章编号 1004-924X(2013)09-2294-09

微型光纤磁传感器的设计与制作

龙 亮^{1,2}, 钟少龙¹, 徐 静¹, 吴亚明^{1*}

(1. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室
微系统技术重点实验室, 上海 200050;
2. 中国科学院大学, 微系统与信息技术学院, 上海 200050)

摘要:提出了一种基于微机电系统(MEMS)扭镜结构的光纤磁场传感器,并利用对角度变化非常敏感的双光纤准直器对扭镜的扭转角度进行了检测。该 MEMS 光纤磁传感器由 MEMS 扭镜结构、磁性敏感薄膜和双光纤准直器组成。文中分析了器件的磁敏感原理和光纤检测原理,介绍了器件综合设计方法,并给出了器件的结构参数。利用 MEMS 加工技术成功制作出了 MEMS 光纤磁传感器样品,最终得到的磁传感器的尺寸为 3.7 mm×2.7 mm×0.5 mm。对磁传感器进行了实验测试,得到的输出实验值与理论值吻合。测试结果表明,该磁传感器的光纤检测灵敏度可达到 0.65 dB/mT,最小可分辨磁场可达 167 nT。将 MEMS 敏感结构与光纤检测相结合,该传感器兼备了两者的优点,结构紧凑、制作工艺简单、工作时无需电流激励。

关键词: 光纤传感器;磁传感器;微机电系统;光纤检测;磁性薄膜

中图分类号: TN253; TM936.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2294

Design and fabrication of micro fiber-optic magnetic sensor

LONG Liang^{1,2}, ZHONG Shao-long¹, XU jing¹, WU Ya-ming^{1*}

(1. *State Key Laboratory of Transducer Technology, Science and Technology on Microsystem Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 20050, China;*
2. *School of Microsystem and Information Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

** Corresponding author, E-mail: yamingwu@mail.sim.ac.cn*

Abstract: A Micro-electro-mechanical System(MEMS) fiber-optic magnetic sensor based on a MEMS torsional mirror was proposed and a dual-fiber collimator was used for measuring the tiny angle of torsional mirror. The MEMS fiber-optic magnetic sensor is consists of a MEMS torsional mirror, a magnetic film and a dual fiber collimator. The mechanisms of magnetic sensing and optical detection of the device were described, and the design and optimization of the device were discussed. A prototype for the MEMS magnetic sensor with a volume of 3.7 mm×2.7 mm×0.5 mm was fabricated successfully by MEMS technologies. The measured output values of the magnetic sensor are consistent with theoretical values. Experimental results indicate that the sensitivity of the magnetic sensor is 0.65 dB/mT.

收稿日期:2013-04-12;修订日期:2013-05-06.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资金资助项目(No. 2012YQ250002)

mT. and its minimum resolution magnetic field is 167 nT. The MEMS fiber-optic magnetic sensor combines fiber-optic measurement and compact MEMS structure, and it has advantages of compact construct and simple fabrication processes. Moreover, it can operate without current excitation.

Key words: optical fiber sensor; magnetic sensor; Micro-electro-mechanical System(MEMS); optical fiber detection; magnetic film

1 引言

磁传感器是用于测量磁场强度的一类传感器,在诸多领域有着广泛的应用,例如磁导航、电流测量、医疗、铁磁性物质检测、探矿等^[1-3]。霍尔磁传感器、磁阻传感器和磁通门是目前广泛用于磁场检测的磁传感器^[4-6]。霍尔磁传感器、磁阻传感器都需要电流激励,因此功耗较高;磁通门不仅功耗高,而且体积大、成本高。这些因素在一定程度上限制了它们的使用范围。

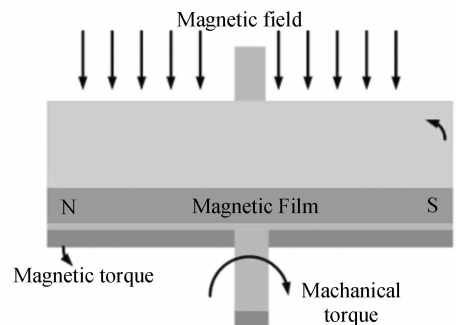
近年来,采用微机电系统(MEMS)技术实现高灵敏度磁场传感器的微型化、低功耗和低成本成为磁传感器的发展趋势,引起了人们极大的兴趣,也得到了广泛开展^[7-12]。MEMS磁传感器包括敏感结构和信号检测两部分,信号检测方式会对MEMS传感器的设计、结构、检测电路和性能产生重要影响。MEMS磁传感器通常采用电信号检测方式,如压阻、电容、隧道电流检测等。但电信号检测的MEMS磁传感器在电源受限或存在强电磁干扰场合的使用将受到限制。文献[8]中采用压阻检测方式研制的MEMS磁传感器的磁场分辨率为80 nT,功耗为2.05 mW。光纤信号检测技术利用光纤及光纤器件特性形成了一类重要传感器——光纤传感器,这类传感器在存在强电磁干扰(如电力系统测量)、长距离传输(光纤遥测,如反潜告警)、测量现场电源严重受限等情况下具有很大的优势。随着光纤、光纤器件技术的成熟和价格的大幅度下降,近年来开展了较多的研究工作,也获得了广泛的应用^[13-15]。将光纤信号检测技术与MEMS敏感结构相结合将具备两种技术各自的优点,如文献[12]中的光检测的磁传感器在工作时探头就没有电功耗,不过其结构较为复杂。

本文提出了一种新型的MEMS光纤磁传感器。制作该传感器时,首先采用MEMS工艺将磁

性材料蒸发沉积到MEMS扭镜上,刻蚀形成单轴扭转MEMS磁敏感结构。这样在垂直于磁性薄膜的均匀磁场的作用下,MEMS扭镜上的磁性薄膜受到磁扭矩作用,会转动一个与磁场强弱对应的角度。MEMS单轴扭转结构对力矩非常敏感,因此MEMS磁敏感结构对产生磁力矩的外磁场非常敏感。利用双光纤准直器对角度变化非常敏感的特性对扭转角度进行检测,即可获得磁场的大小。对MEMS光纤磁传感器结构设计时无须考虑信号检测电路(如压阻器件、电容、电信号引线等)的设计,简化了工艺。该MEMS磁传感器可应用于物联网的传感节点、车辆检测等场合。

2 MEMS光纤磁传感器工作原理

提出的MEMS光纤磁传感器由双端固支MEMS扭镜、磁性薄膜和双光纤准直器构成,器件结构如图1所示。MEMS光纤磁传感器工作原理是:磁性薄膜受到与其磁矩方向正交的外磁场作用时将产生磁扭矩;在该磁扭矩作用下,MEMS扭镜产生扭转运动,与硅弹性扭转梁弹性扭转力矩平衡,MEMS扭镜的扭转角度与外磁场对应;通过双光纤准直器与微镜面形成的反射光路,可以探测由于扭转所产生的光强耦合损耗,通过耦合损耗即可获得待测磁场信息。



(a) 正面图

(a) front view

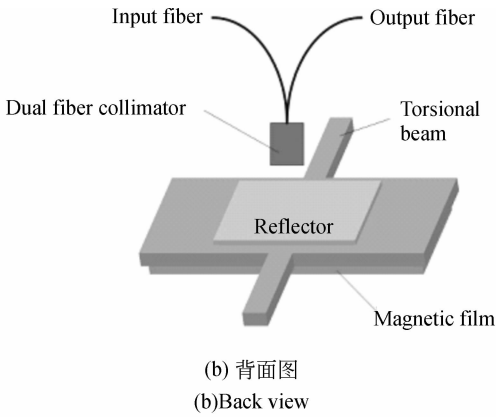


图 1 MEMS 光纤磁传感器结构示意图

Fig. 1 Diagram of MEMS fiber-optic magnetic sensor

2.1 磁性薄膜与外磁场作用产生磁力矩

为方便理论分析,可将矩形的磁性薄膜等效为面积相同的圆形磁性薄膜,磁性薄膜等效后的

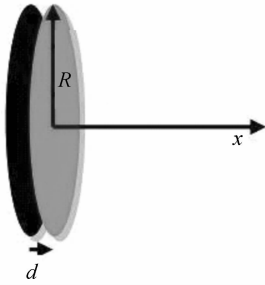


图 2 磁极等效图

Fig. 2 Equivalent diagram of magnetic poles

磁化方向不变,如图 2 所示。圆形面半径为 R ,磁性薄膜两磁极(N 极和 S 极)之间的距离为 d ,磁矩为 m 。采用磁荷法对磁性薄膜进行分析,假设磁性薄膜两极表面的磁荷密度分别为 σ_m 和 $-\sigma_m$,则磁性圆盘轴线上距离圆心 x 处的磁场强度为^[16]:

$$H =$$

$$\frac{\sigma_m}{2\mu_0} \left[\frac{x+d/2}{\sqrt{R^2+(x+d/2)^2}} - \frac{x-d/2}{\sqrt{R^2+(x-d/2)^2}} \right], \quad (1)$$

其中: H 为磁场强度; $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ A/m,为真空磁导率。由 $B_r=\mu_0 H$ 可得到磁性薄膜两极表面的剩磁为:

$$B_r \left(x = \pm \frac{d}{2} \right) = \frac{\sigma_m}{2} \cdot \frac{d}{\sqrt{R^2+d^2}}. \quad (2)$$

由式(2)可得到磁性薄膜两极表面磁荷密度为:

$$\sigma_m = 2B_r \cdot \frac{\sqrt{R^2+d^2}}{d}, \quad (3)$$

且系统磁矩可以表示为 $m = \sigma_m \pi R^2 d \cdot \frac{1}{\mu_0}$ 。

外磁场与磁膜产生的磁力矩 L_{mag} 的表达式为 $L_{\text{mag}} = m \times B$,其中 m 为磁膜磁矩, B 为外场的磁感应强度。假设 m 与 B 垂直,代入 σ_m 的表达式,得到磁性薄膜所受磁力矩大小为:

$$L_{\text{mag}} = \frac{\sigma_m \pi R^2 d \cdot B}{\mu_0} = \frac{\sqrt{R^2+d^2}}{d} \cdot \frac{\pi R^2 d}{\mu_0} \cdot 2B_r \cdot B = \frac{2\pi}{\mu_0} \cdot R^2 \sqrt{R^2+d^2} \cdot B_r B. \quad (4)$$

2.2 MEMS 机械结构扭转

磁性薄膜沉积在 MEMS 扭镜上,其与外磁场作用产生的磁扭矩将引起扭转梁扭转,扭转梁将产生一个恢复力矩,此力矩可以表示为^[17]:

$$L_{\text{mech}} = k_\varphi \cdot \varphi, \quad (5)$$

其中: φ 为扭转梁的扭转角度, k_φ 为扭转梁的扭转刚度系数。

对于梁长 l 、梁宽 b 、厚度为 h 的 MEMS 弹性扭转梁,当 $h > b$ 时,扭转刚度系数 $k_\varphi = \frac{2k_1 G b^3 h}{l}$,

其中: $k_1 = \frac{1}{3} \left(1 - 0.63 \frac{b}{h} \right)$,对于硅材料剪切模量 $G = 6.5 \times 10^{10}$ Pa。

当外磁场产生的磁扭矩与扭转梁的弹性力矩平衡时,即 $L_{\text{mech}} = L_{\text{mag}}$,得到 MEMS 扭镜在外磁场 B 中的扭转角度 φ 为:

$$\varphi = \frac{L_{\text{mag}}}{k_\varphi} = \frac{2\pi}{\mu_0} \cdot R^2 \sqrt{R^2+d^2} \cdot B_r B \cdot \frac{1}{k_\varphi}. \quad (6)$$

将 k_φ 、 k_1 表达式代入,可得扭转角度 φ 与外磁场 B 的关系为:

$$\varphi = \frac{3\pi \cdot R^2 \sqrt{R^2+d^2} \cdot B_r l}{\mu_0 \cdot \left(1 - 0.63 \frac{b}{h} \right) \cdot G b^3 h} B. \quad (7)$$

2.3 扭转角度引起光强损耗

MEMS 扭镜的扭转角度可用双光纤准直器检测。在外磁场作用下扭镜发生扭转,扭转角度与外磁场成正比,双光纤准直器的入射与出射光纤的耦合损耗随扭转角度的增大而增大,通过检测双光纤准直器两光纤的耦合损耗可得到外磁场的大小。根据模场耦合理论,两束高斯光束之间的耦合损耗,取决于二者的光场叠加比率,耦合损

耗可表示为^[18]:

$$I_L = -10 \cdot \lg \left[\frac{\left| \iint \varphi_1 \varphi_2^* ds \right|^2}{\iint |\varphi_1|^2 ds \iint |\varphi_2|^2 ds} \right], \quad (8)$$

其中: φ_1 和 φ_2 分别为入射光和反射光的光强分布。

3 MEMS 光纤磁传感器的设计

3.1 结构参数设计

MEMS 光纤磁传感器的主要结构参数包括弹性扭转梁的长、宽、高,磁性薄膜的长、宽、高及磁特性和放大自发辐射(ASE)光源的参数。在对这些参数进行选取时,主要考虑以下几个方面:(1)MEMS 扭镜扭转所导致的扭转梁应力不能过大;(2)扭转梁扭转刚度系数要尽量小,同时要满足器件检测带宽和抗震的要求;(3)系统扭转模态应为 MEMS 扭镜的主要运动模态;(4)磁性薄膜的剩磁强度要尽可能的强;(5)检

测光源功率尽量稳定;(6)满足现有 MEMS 工艺条件的限制。

根据式(7),MEMS 光纤磁传感器的角度灵敏度与以下几个因素有关:扭转梁长度 l ,扭转梁宽度 b ,扭转梁厚度 h 和磁性薄膜面积。其中扭转梁的宽度 b 对 MEMS 光纤磁传感器的灵敏度影响最大(与灵敏度成 3 次方反比关系)。所以在满足工艺限制的条件下应使梁宽尽量窄。磁性薄膜的面积越大,其灵敏度越高,但是磁性薄膜过大则会占用过多的芯片面积。梁的厚度 h 和梁的长度 l 与灵敏度成一次方的关系,增加梁长和减少梁厚都可以增加 MEMS 光纤磁传感器的灵敏度,但是梁过长或过薄,都会造成 MEMS 光纤磁传感器的谐振频率过低。

综合考虑以上 MEMS 光纤磁传感器各参数之间的制衡关系,且充分考虑器件的安全及工艺的易实现性,可以得到如表 1 所示的器件结构参数。进一步对器件参数进行灵敏度优化设计,如减小梁宽 b ,其灵敏度还将大幅提高。

表 1 MEMS 磁场传感器结构参数

Tab.1 Structure parameters of MEMS magnetic sensor

扭转梁宽 $b/\mu\text{m}$	扭转梁厚 $h/\mu\text{m}$	扭转梁长 $l/\mu\text{m}$	磁膜体积 长 \times 宽 \times 高/ μm^3	磁膜剩磁 B_r/T	光源波长 λ/nm	芯片尺寸 V/mm^3
5	25	400	500 $\mu\text{m} \times$ 500 $\mu\text{m} \times$ 0.4 μm	0.1	1 550	3.7 mm \times 2.7 mm \times 0.5 mm

3.2 工作点的选择

对于双光纤准直器,可以忽略输入光纤与输出光纤的轴向失配和径向失配,根据式(8),并取光源波长 $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$,光束束腰半径为 $200\ \mu\text{m}$,得到双光纤准直器入射和出射光纤的光强耦合损耗与 MEMS 扭镜的扭转角 φ 的关系为^[19]:

$$I_L = -10 \cdot \lg[\exp(2k \cdot \varphi)^2/10^8], \quad (9)$$

其中: $k=2 \cdot \pi/\lambda$ 为波数。

根据式(9)得出双光纤准直器耦合损耗 I_L 与 MEMS 扭镜偏转角度 φ 的关系如图 3 所示。

图 3 中设定了一个工作点。工作点是指 MEMS 扭镜相对于双光纤准直器的初始位置有个预偏角 φ_0 ,而不在零偏转角。如果把工作点设置在零偏角处,此时耦合损耗最低,无论 MEMS 扭镜怎么扭转,耦合损耗总是增加的,无法判断 φ 的方

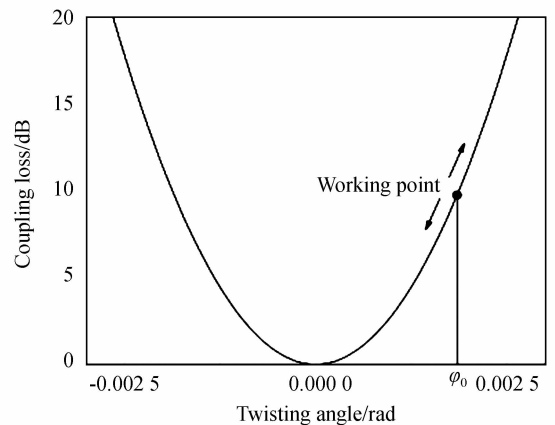


图 3 双光纤准直器耦合损耗 I_L 与 MEMS 扭镜偏转角度 φ 的关系

Fig.3 Relationship of coupling loss for dual fiber collimator and twisting angle for MEMS torsional mirror

向。设置合适的工作点后,当外磁场引起 φ 变化,可由耦合损耗变化方向确定外磁场方向。当外磁场方向使偏转角 φ 从 φ_0 有增加,那么耦合损耗增加;反之,耦合损耗减小。为了使 MEMS 光纤磁传感器的输出具有良好的线性度,工作点一般选择在双光纤准直器耦合效率随 MEMS 扭镜扭转角度近似线性变化的地方,同时工作点的耦合效率也不能太低。本文中,工作点选择在耦合损耗为 10 dB 附近。

4 实验制作

MEMS 光纤磁传感器由 SOI 硅片和 Pyrex 7740 玻璃键合而成,与双光纤准直器封装在一起。SOI 硅片用于实现 MEMS 扭镜结构,玻璃片支撑微机械结构。MEMS 光纤磁传感器的工艺流程如图 4 所示,具体工艺步骤如下:

(1)通过热氧化,在(100)取向的 n 型 SOI 硅片上生长厚度为 200 nm 的 SiO_2 。选用的 SOI 硅片顶层硅厚度为 30 μm ,埋层 SiO_2 厚度为 2 μm ,衬底硅厚度为 380 μm 。

(2)腐蚀形成 MEMS 扭镜的运动空间。通过光刻,选择性地去除上一步中在顶层硅上生长的 SiO_2 。将硅片去除光刻胶后放入 40 $^\circ\text{C}$ 、浓度为 40% 的 KOH 溶液中腐蚀 1 h 后形成 MEMS 扭镜的运动空间,腐蚀深度约为 5 μm 。

(3)光刻显影后,在顶层硅上通过电子束蒸发沉积厚度为 400 nm 的 NiFeCo 合金薄膜,并通过 Lift-off 工艺图形化。

(4)将 SOI 硅片与玻璃片进行对准,采用阳极键合工艺进行硅-玻璃键合,键合面为 SOI 硅片顶层硅与玻璃片的任意一面。

(5)将键合片在 50 $^\circ\text{C}$ 、浓度为 40% 的 KOH 溶液中腐蚀约 38 h,去除 SOI 硅片的衬底硅,用 HF 腐蚀去除埋层 SiO_2 。

(6)在硅薄膜上通过磁控溅射沉积厚度为 400 nm 的金薄膜。光刻后,在金腐蚀液中腐蚀去掉多余的金得到反射镜面。

(7)用光刻胶作掩模,深反应离子刻蚀(ICP-DRIE)刻蚀键合片上的硅薄膜,进行 MEMS 扭转结构释放,再去光刻胶,完成敏感结构的制作。

最终得到的 MEMS 光纤磁传感器如图 5 所示,磁性薄膜制作在 MEMS 扭镜的背面,所以图 5 中未显示出。最终得到的 MEMS 磁传感器的芯片

尺寸为 3.7 mm \times 2.7 mm \times 0.5 mm。

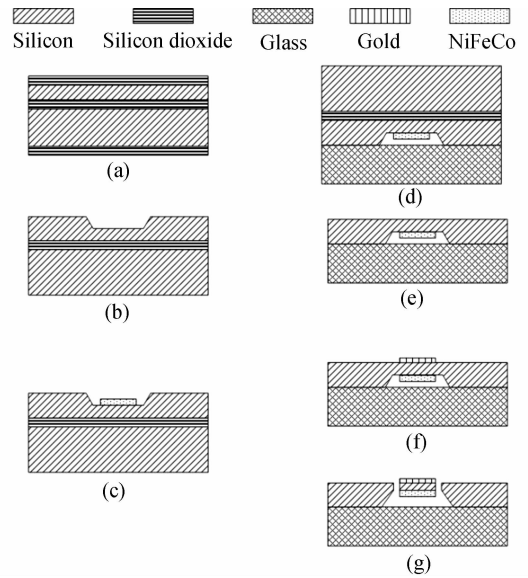


图 4 MEMS 光纤磁传感器制作工艺流程图

Fig. 4 Fabrication process steps of MEMS fiber-optic magnetic sensor

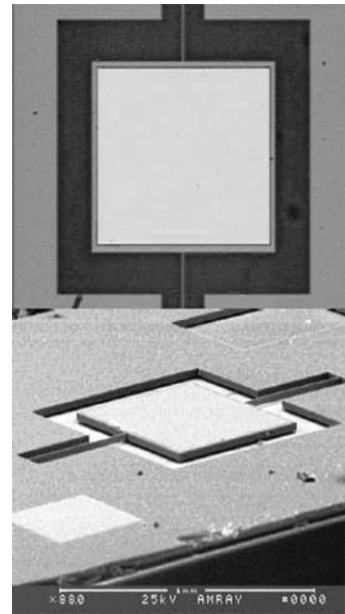


图 5 完成器件的显微镜照片和 SEM 照片

Fig. 5 Microscope picture and SEM micrograph of fabricated magnetic sensor chip

5 测试与结果分析

5.1 磁性薄膜性能测试

电子束蒸发制作的 NiFeCo 合金磁性薄膜的

厚度为 400 nm,其组分比如图 6 所示。NiFeCo 是一种软磁材料,常用来制作硬盘的读写头^[20]。图 4 中步骤(3)完成 NiFeCo 磁性薄膜的沉积和图形化后测试其剩磁强度及其随温度的变化的测试,测试结果分别如图 7、8 所示。MEMS 磁传感器的灵敏度与磁性薄膜的剩磁成正比,同时需要磁性薄膜有足够强的矫顽力以保证其在地磁场(约 50 μT)中不被退磁或改变磁化方向。从测量结果可知 NiFeCo 磁性薄膜剩磁大约为 0.1 T,矫顽力大约为 10 000 μT 。图 7 所示的磁性薄膜磁滞回线为薄膜平面内磁化的磁滞回线,垂直薄膜方向磁化的磁性薄膜在测试时未发现明显的磁滞现象,表明 NiFeCo 磁性薄膜的易磁化轴平行于薄膜表面。从图 8 中可看出磁性薄膜的剩磁将会随着温度的升高而降低。由式(7)可知,磁性薄膜剩磁 B_r 降低将会导致 MEMS 光纤磁传感器的灵敏度下降,甚至在高于某一温度后,磁性薄膜的磁性会完全消失,

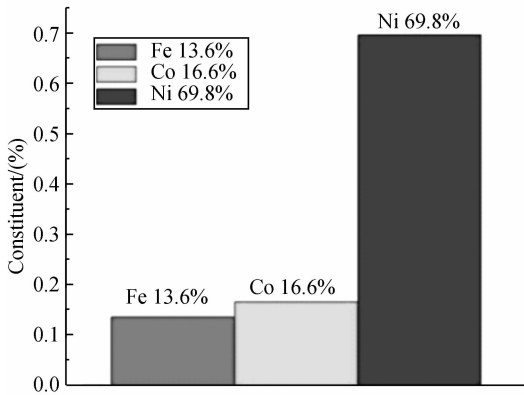


图 6 NiFeCo 磁性薄膜的化学组分

Fig. 6 Chemical constituents of NiFeCo magnetic film

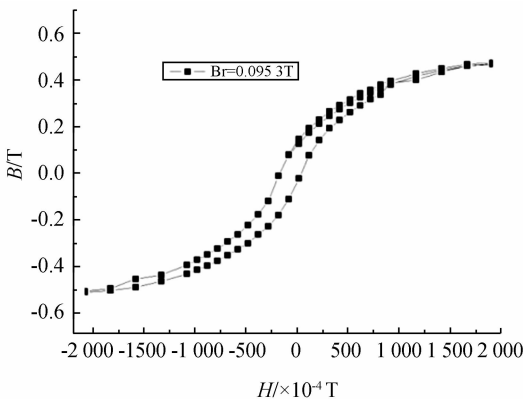


图 7 NiFeCo 磁性薄膜的磁滞回线

Fig. 7 Hysteresis loop of NiFeCo magnetic film

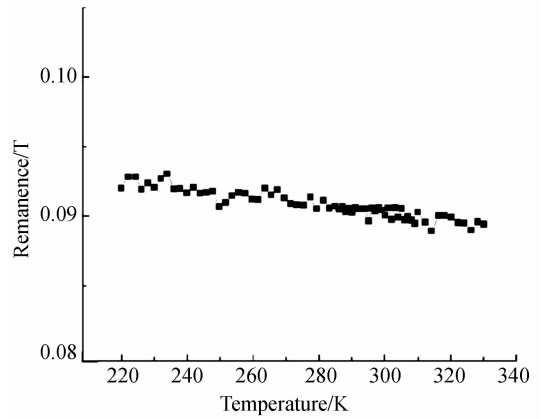


图 8 NiFeCo 磁性薄膜剩磁随温度的变化

Fig. 8 Remanence of NiFeCo magnetic film changed with temperature

从而造成 MEMS 光纤磁传感器失效,这一温度为铁磁性材料的居里温度。磁性薄膜剩磁降低甚至磁性消失的原因是随着温度的升高,磁性薄膜中的原子振动加剧,提供了磁畴转向的能量。在达到居里温度点以后,磁性薄膜中原本整齐排列的磁畴将变得杂乱,使得磁性薄膜磁性消失。所以,磁性薄膜在磁化后,除遇到强磁场或受到高温外,磁性薄膜能够保持其磁性。

5.2 器件输出性能测试

MEMS 光纤磁传感器的测试在室温和无磁屏蔽环境下进行。测试系统如图 9 所示,整个系统由 MEMS 光纤磁传感器、双光纤准直器、商用 ASE 光源和光功率计组成。ASE 光源输出的光经过 MEMS 光纤磁传感器后被光功率计接收。当改变外磁场大小的时候,光功率计的读数会发生变化。使用电流源驱动亥姆霍兹线圈产生静态磁场,电流

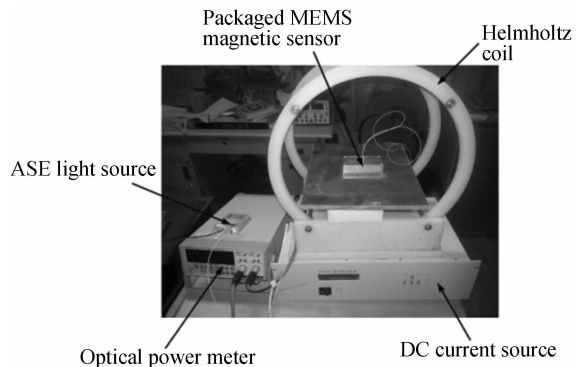


图 9 MEMS 光纤磁传感器测试系统图

Fig. 9 Schematic diagram of test for fiber-optic magnetic sensor

源调节亥姆霍兹线圈中的电流得到不同大小的磁场。首先利用商用磁通门对磁场源定标,记录电流源输出电流与亥姆霍兹线圈产生磁场的关系;然后将 MEMS 磁传感器置于亥姆霍兹线圈中,亥姆霍兹线圈的磁场方向垂直于磁性薄膜表面,根据定标记录调整电流源输出。每个静态磁场值会对应一个光功率计的损耗,得到磁场-耦合损耗的曲线并和理论曲线对比,如图 10 所示。

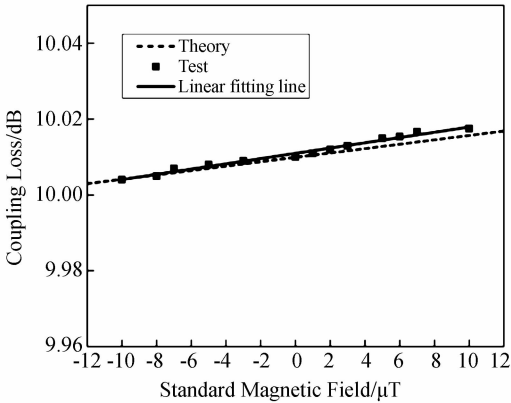


图 10 MEMS 光纤磁传感器输出特性

Fig. 10 Output characteristics of MEMS fiber-optic magnetic sensor

在图 10 中, MEMS 光纤磁传感器的理论输出曲线是将式(7)代入式(9)中得到的。亥姆霍兹线圈产生的磁场为 $-10 \sim 10 \mu\text{T}$, 由测试点拟合出外磁场变化与双光纤准直器耦合损耗之间的关系曲线, 由直线斜率可得到 MEMS 光纤磁传感器的灵敏度为 0.65 dB/mT 。测试使用的 ASE 光源输出功率为 1 mW , 根据图 10 可知, 在外磁场由 $-10 \mu\text{T}$ 变化到 $10 \mu\text{T}$ 的过程中, 出射光纤的光功率变化了 1.2 nW 。测试所用的光功率计为 Advantest Q8221, 其可测试的最小光功率变化为 10 pW , 可以推算出 MEMS 光纤磁传感器能够分辨的最小磁场为 167 nT 。

从图 10 可看出, MEMS 磁传感器输出的实验值与理论值很接近, 但是实测灵敏度要高于理论灵

敏度。这是由于 NiFeCo 磁性薄膜的性能测试是在硅-玻璃键合前, 所以硅-玻璃键合时的温度 ($300 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右) 会使磁性薄膜的性能产生些许变化。同时, MEMS 工艺误差使实际的 MEMS 磁传感器的结构参数与设计值之间的差别也是造成实验值与理论值存在差异的原因。因为磁性薄膜的剩磁会随着温度的变化而发生一些改变, 所以在实际使用前需对 MEMS 光纤磁传感器定标。定标的方法为记录标准磁场下 MEMS 光纤磁传感器的输出曲线, 将检测未知磁场得到的输出值与定标曲线进行对比可以得到未知磁场的大小。

6 结 论

设计和制作了一种基于 MEMS 磁扭镜结构和光纤检测的 MEMS 磁场传感器, 其磁性薄膜磁化后可保持磁性, 工作时无需再对传感器施加电流激励, 探头功耗为 0。由于光纤检测具有长距离传输的特点, 可以远程控制 MEMS 光纤磁场传感器, 在检测现场电源受限情况下具有应用前景。从理论上分析了 MEMS 磁传感器的敏感原理、光纤检测原理。综合考虑传感器工作点、灵敏度、磁分辨率、传感器的力学特性、磁性薄膜的特性和制作工艺难度等因素, 对 MEMS 光纤磁传感器进行了设计。采用 MEMS 加工技术制作了基于 NiFeCo 合金磁性薄膜的 MEMS 光纤磁传感器, 最终得到的 MEMS 光纤磁传感器尺寸为 $3.7 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。测试结果表明传感器的光纤检测灵敏度可达到 0.65 dB/mT , 传感器最小可分辨的磁场可以到达 167 nT , 并存在很大的优化空间。该 MEMS 光纤磁传感器结构简凑、工艺简单, 无需要电流激励。测试中采用 ASE 光源和光功率计, 系统体积比较庞大, 如果采用 LED 光源和光电转换电路, 可将整个系统集成在一块 PCB 板上, 得到小体积的磁传感器系统, 可应用于物联网的传感节点、车辆检测等场合。

参考文献:

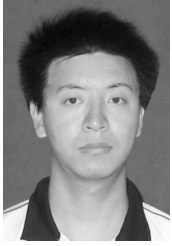
[1] GUILLERMO V Q, MANUEL R L, ALFONSO C R, et al.. Design of a low-consumption fluxgate transducer for high-current measurement applica-

tions [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2011, 11 (2): 280-287.

[2] 郑小林, 李金, 侯文生, 等. 应用磁传感器阵列定位跟踪消化道诊疗胶囊[J]. *光学精密工程*, 2009, 17 (3): 576-582.

- ZENG X L, LI J, HOU W SH, *et al.*. Localizing and tracking of medical capsule in human by magnetic sensor array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):576-582. (in Chinese)
- [3] VYHNANEK J, JANOSEK M, RIPKA P. AMR gradiometer for mine detection [J]. *Sensors and Actuators A*, 2012,186:100-104.
- [4] RIPKA P. Advances in fluxgate sensors [J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, 106:8-14.
- [5] HAUSER H, HOCHREITER J, STANGL G, *et al.*. Anisotropic magnetoresistance effect field sensors [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, 215-216:788-791.
- [6] PAUN M AI, SALLESE J M, KAYAL M. Offset and drift analysis of the hall effect sensor. The geometrical parameters influence [J]. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2012, 7(3): 883-891.
- [7] LI M, ROUF V T, THOMPSON M J, *et al.*. Three-axis lorentz-force magnetic sensor for electronic compass applications [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21 (4): 1002-1010.
- [8] TAPIA J A, HERRERA-MAY A L, GARCIA-RAMIREZ P J, *et al.*. Sensing magnetic flux density of artificial neurons with a MEMS device [J]. *Biomedical Microdevices*, 2011, 13(2): 303-313.
- [9] CHEN J, QIN M, HUANG Q A. Detecting magnetic field direction by a micro beam operating in different vibration modes [J]. *Chinese Physics B*, 2011,20(9): 097101-1-9.
- [10] DU G T, CHEN X D. MEMS magnetometer based on magnetorheological elastomer [J]. *Measurement*,2012, 45(1): 54-58.
- [11] DILELLA D, WHITMAN L J, COLTON R J, *et al.*. A micromachined magnetic-field sensor based on an electron tunneling displacement transducer [J]. *Sensors and Actuators A*, 2000, 86(1-2):8-20.
- [12] VASQUEZ D J, JUDY J W. Optically-interrogated zero-power MEMS magnetometer [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, 16(2): 336-343.
- [13] 张旭革,高岑,王峰,等. 应力传感光缆的应力传递特性 [J]. 光学精密工程, 2011, 19 (12): 2891-2899.
- ZHANG X P, GAO C, WANG F, *et al.*. Stress transfer performance of strain sensing cable [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2891-2899. (in Chinese)
- [14] 林巧,陈柳华,李书,等. 基于光纤-镜面干涉腔的光纤加速度计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1179-1184.
- LIN Q, CHEN L H, LI S, *et al.*. Fiber optic accelerometer based on fiber-mirror interference cavity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1179-1184. (in Chinese)
- [15] 王宏亮,宋娟,冯德全,等. 应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3):545-551.
- WANG H L, SONG J, FENG D Q, *et al.*. High temperature-pressure FBG sensor applied to special environments [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 545-551. (in Chinese)
- [16] 胡友秋,程福臻,刘之景. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,1994.
- HU Q Y, CHENG F ZH, LIU ZH J. *Electromagnetics* [M]. Beijing: High Education Press, 1994. (in Chinese)
- [17] BAO M H. *Analysis and Design Principles of MEMS Devices* [M]. Elsevier, 2005.
- [18] GILSDORF R W, PALAIS J C. Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lenses [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(16):3440-3445.
- [19] YUAN S F, RIZA N A. General formula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lenses [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15):3214-3222.
- [20] NIARCHOS D. Magnetic MEMS: key issues and some applications [J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, 109:166-173.

作者简介:



龙 亮(1987—),男,贵州黔西人,博士研究生,2008 年于华东师范大学获得学士学位,主要从事基于 MEMS 技术的磁传感器方面的研究。E-mail: longliangsimit@mail. sim. ac. cn



钟少龙(1974—),男,山西五寨人,高级工程师,1997 年于南京理工大学获得学士学位,主要从事光纤 MEMS 传感技术方面的研究。E-mail: shaolong-zhong@mail. sim. ac. cn



徐 静(1977—),女,四川江油人,博士,副研究员,1998 年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2001 年于武汉大学获得硕士学位,2004 年于浙江大学获得博士学位,主要从事 MEMS 光通信器件与光纤传感器方面的研究。E-mail: xujing@mail. sim. ac. cn



吴亚明(1966—),男,湖北孝感人,研究员,博士生导师,1986 年、1989 年于华中科技大学分别获得学士、硕士学位,1993 年于中科院上海光学精密机械研究所获博士学位,主要从事光学 MEMS 技术、光通信器件、光电传感、集成光学等方面的研究。E-mail: yamingwu@mail. sim. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)