

# 一种磁性薄膜/石英音叉复合磁传感器研究\*

曾婕, 文玉梅, 李平, 栗建中, 张小花

重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 (400044)

**摘要:** 针对磁电层合式磁传感器 $Q$ 值低的问题, 提出一种磁性薄膜与石英音叉复合的磁传感器结构, 通过检测音叉谐振频率变化量或 $Q$ 值变化量, 达到检测静磁场的目的。采用有限元方法对磁性薄膜的位置进行了设计和仿真, 发现薄膜复合于音叉侧臂顶部有最灵敏的磁场探测能力, 并进行了实验验证。实验结果表明: 敏感结构在零偏置磁场时 $Q$ 值为2000左右, 在静磁场作用下, 谐振频率最大灵敏度为9.233Hz/mT,  $Q$ 值最大灵敏度为119.471/mT; 谐振频率分辨率为0.1Hz, 石英音叉谐振频率稳定度为20ppm时, 该结构磁传感器对磁场的分辨率为 $10^{-5}$ T;  $Q$ 值分辨率为1, 石英音叉 $Q$ 值稳定度为20ppm时, 该结构磁传感器对磁场的分辨率为 $10^{-6}$ T, 高于测量谐振频率。即, 测量 $Q$ 值变化量来检测磁场的方式更优。

**关键词:** 磁性薄膜; 石英音叉; 有限元分析; 谐振频率;  $Q$ 值

**中图分类号:** TP212.13 **文献标识码:** A

## 0 引言

磁传感器是电子测量领域及发展高水平控制系统的关键器件之一, 其应用领域包括电机控制、工业机器人、医疗电子、自动化等。常用的磁传感器包括磁通门、霍尔元件、巨磁电阻元件、磁电谐振元件等。磁电谐振式磁传感器是近年来磁传感器领域的热点内容。2004年, 文献[1]采用环形超磁致伸缩材料Terfenol-D和压电材料PZT, 对Terfenol-D/PZT/Terfenol-D“三明治”结构复合磁传感器进行了研究, 分辨率达 $10^{-9}$ T, 该磁传感器不能用于静磁场的探测。2005年, 文献[2-3]研究了磁致伸缩材料和石英/LiNbO<sub>3</sub>构成的复合磁传感器, 灵敏度达60Hz/Oe, 用于地磁场的测量。2007年, 文献[4-5]曾提出将块体压电材料和磁致伸缩材料复合到类似超声变幅杆的弹性基底上, 构成一种三相磁电复合结构, 利用弹性基底的聚能和谐振作用, 以提高磁电式传感器的灵敏度, 但存在 $Q$ 值低的问题, 设计一种具有更高 $Q$ 值的磁传感器成为必然。

石英音叉体积小, 尺寸为mm量级, 在真空中的 $Q$ 值高达几万, 在空气中也能达到8000左右, 正是它的这个特性, 保证了结构有很高的灵敏度, 而且可以做得更加简单紧凑, 易于实现微型化。石英音叉在原子力显微镜和磁力显微镜领域已得到很好的利用<sup>[6-7]</sup>, 但在磁传感器领域却未见有文献报道。

本文提出将磁性薄膜复合于石英音叉上, 构成一种音叉式复合磁传感器, 用于直流磁场的检测。当磁性薄膜材料和石英音叉切型与尺寸一定时, 薄膜的复合位置是影响磁传感器性能的主要因素, 采用有限元分析方法对薄膜的复合位置进行了分析, 找出对磁场最敏感的复合位置, 并进行了实验研究。

## 1 磁传感器原理

石英音叉是压电体, 根据逆压电效应, 在石英音叉的电极上施加一个电压, 将引起音叉的形变, 当此电压为频率恰好等于音叉共振频率的一个交流电压时, 音叉的形变将具有最大值, 即, 发生谐振。磁性薄膜在磁场的作用下, 将受到磁场力的作用, 磁性薄膜与石英音叉复合后, 由于薄膜与音叉是粘贴在一起的, 故, 薄膜受到的磁场力作用将传递到音叉上, 从

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.50830202, 60774055, 10776039); 国家高技术研究发展计划资助项目(863计划)(No.2006AA04Z337, No.2007AA12Z132)

而作为音叉谐振的负载。音叉为 DT 切型，结构如图 1 所示。

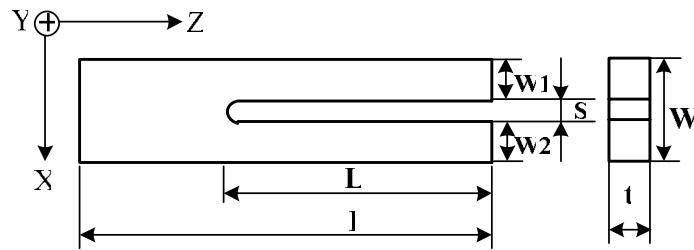


图 1 石英音叉图示

Fig 1 Graphics of quartz tuning fork

作为一种高 Q 值的振动器件，石英音叉的振动可以用下面的运动方程描述<sup>[8]</sup>:

$$m_e \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + F_D + kx = F \exp(i\omega t)$$

(1)

式 (1) 中， $F$  为驱动力振幅， $m_e=0.2427 \rho(Ltw)$  为有效质量， $\rho$  为密度， $L$ 、 $t$  和  $w$  分别为音叉指的长、宽和厚， $F_D = m_e \gamma \partial x / \partial t$  为施加在悬臂上的所有粘弹性力总和， $k=EwT^3/4L^3$  为一臂的静态弹性常数， $E$  为石英音叉的弹性模量。式 (1) 的解为：

$$x = \frac{F/m_e}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \exp(i\omega t)$$

(2)

即，振幅是以  $\omega_0$  为中心频率的共振曲线形式，如图 2 所示。

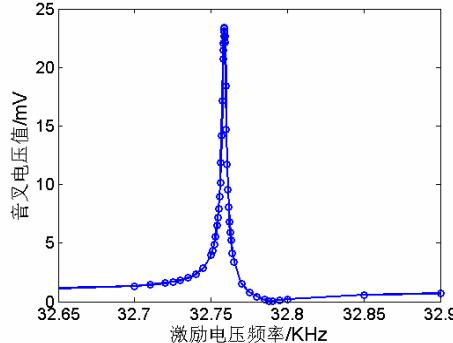


图 2 石英音叉幅度频率曲线

Fig 2 Frequency sweep in amplitude of quartz tuning fork

粘贴上磁性薄膜的音叉叉指在电压的激励下沿着 X 轴周期性振动，但沿着 Z 方向，由于在基底处固定，因此沿 Z 方向的振动为零。假设薄膜的位置距音叉基底的距离为  $z=L$ 。若有一个沿着 X 方向的力  $F$  施加在  $z=L$  处，叉指将相应的沿着 X 方向弯曲。叉指的长轴弯曲的半径  $R(z)$  在  $z$  点为：

$$1/R(z) = M(z)/(EI)$$

(3)

$M(z)$  为弯曲动量， $I = \int x^2 dx dz$  为音叉一叉指的转动惯量，由于音叉叉指的横截面积为均匀的长方形  $WT$ ，因此转动惯量为  $I=WT^3/12$ 。对于小的弯曲振幅，有  $1/R \approx \partial^2 u / \partial z^2$ ，这里  $u(z)$  为叉指长度沿 Z 轴的变化。可以导出：

$$\partial^2 u / \partial z^2 = M(z)/(EI)$$

(4)

考虑静态形变，弯曲动量由  $F$  决定，其值为  $M(z)=F(L-z)$ 。这样，静态形变  $u(z)$  为：

$$U(z) = [2z^2(3L-z)/(EWT^3)]F$$

(5)

即又指振动的振幅与力  $F$  有关。

音叉指振动的动力学方程为：

$$\partial^2 M / \partial z^2 + \rho WT / (EI)(\partial^2 u / \partial t^2) = 0$$

(6)

可得到音叉的基频公式为：

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 1.0150(T / L^2)(E / \rho)^{1/2}$$

(7)

音叉的品质因数  $Q$  为：

$$Q = f_0 / \Delta f$$

(8)

其中  $\Delta f$  为半高宽。

从而，音叉谐振频率与  $Q$  值都与音叉振动所受到的外力有关，即，与磁场有关。故，通过检测音叉谐振频率的变化量或  $Q$  值的变化量即可达到检测磁场的目的。

## 2 磁传感器结构设计有限元分析

由上述理论分析可知，将磁性薄膜与石英音叉复合后，在磁场力的作用下，音叉的谐振频率和  $Q$  值将会发生变化，从而可以通过检测音叉谐振频率的变化量或  $Q$  值的变化量来检测磁场。由于薄膜在音叉上的复合位置不同，将得到结构对磁场的灵敏度不一样，需要寻找薄膜的最佳粘贴位置，以使结构对磁场具有最敏感的探测能力。采用有限元软件 ANSYS10.0 对薄膜的复合位置进行分析。

### 2.1 建模

音叉指尺寸  $3.75\text{mm} \times 0.6\text{mm} \times 0.365\text{mm}$ ，基座长度  $2.25\text{mm}$ ，叉指间距  $0.3\text{mm}$ 。选用耦合场单元 Solid5 建立石英音叉有限元模型，该单元是专用于压电分析的单元之一，具有三维热场、电场、压电场和结构场的分析能力，并能在各场之间实现耦合。石英音叉的自由度为三个方向的位移自由度和电压自由度。石英音叉的两个叉指上分别附有电极，对音叉进行有限元建模时，关键问题就是对电极的处理。仿真建模时，对电极做简化处理：有电极的节点是等电位的，将覆盖相同电极的表面上节点的电压自由度进行耦合，以此来模拟电极。建模时只考虑叉指上的电极，音叉基底上的电极不考虑。将代表负电极的节点电压自由度设置为 0，将代表正电极的节点电压自由度进行耦合，编号都为 1，表示石英音叉的所有正电极是连在一起的。石英音叉的固定方式为底端固定，故建模时，将石英音叉底面的 X、Y、Z 三个方向的位移自由度约束为 0，起固定作用。根据文献<sup>[9]</sup>对原始坐标的石英参数按 DT 切型进行转换，得到仿真时所用的石英参数如表 1 所示。

表 1 仿真中所使用的石英参数  
Tab 1 Parameter of quartz tuning fork

弹性系数 ( $\times 10^9 \text{N/m}^2$ )	压电应力常数 (C/m <sup>2</sup> )	相对电导率	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
$c_{11}=86.7400$	$c_{12}=-7.3328$		
$c_{13}=26.2328$	$c_{14}=-6.7198$		
$c_{22}=127.1261$	$c_{23}=1.6060$	$e_{11}=-0.1710$	$\epsilon_{11}=4.520$
$c_{24}=8.7274$	$c_{33}=87.4206$	$e_{13}=0.0866$	$\epsilon_{22}=4.6193$
$c_{34}=-14.3206$	$c_{44}=47.6358$	$e_{25}=0.0982$	$\epsilon_{33}=4.5806$
$c_{55}=64.1032$	$c_{56}=-13.0946$	$e_{35}=0.1257$	$e_{26}=0.0453$
$c_{66}=33.7165$		$e_{36}=0.0579$	

## 2.2 确定音叉振动模态

对裸片石英音叉进行模态分析，得到底端固定时音叉的前四阶振动模态如图 3 所示。各阶模态下的谐振频率分别为 9.721 KHz、18.928 KHz、26.986 KHz 和 31.771 KHz。根据本文音叉所配置的电极，音叉的振动模态为图 3 中的第四阶振动模态，即为弯曲振动模态。在该模态下，石英音叉两叉指沿 X 方向运动，且两叉指的运动方向相反，形成所谓的“Y”字型的镜像运动方式。

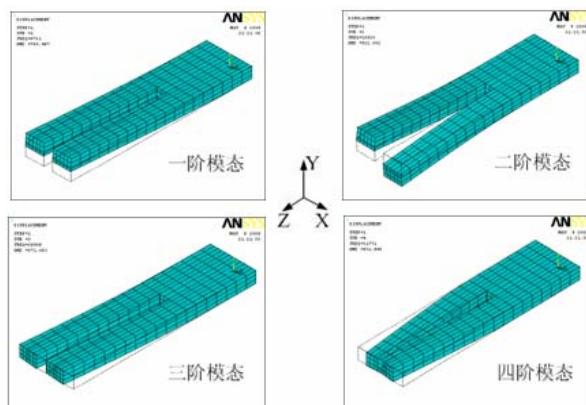


图 3 石英音叉振动模态  
Fig 3 Modal of quartz tuning fork

## 2.3 音叉侧臂应变及位移分布

图 4 为弯曲振动模态下音叉侧臂从音叉底部 (Z 轴坐标为 0mm) 到叉指顶点 (Z 轴坐标为 6mm) 的相对应变 (总应变 S 及 X、Y、Z 三个方向的应变 SX、SY、SZ) 分布和相对位移 (总位移 D 及 X、Y、Z 三个方向的位移 DX、DY、DZ) 分布图。由图 4(a) 可知，弯曲振动模态下，音叉侧臂应变在叉指底部出现峰值，从叉指底部往音叉固定端或叉指顶部走时，应变均呈减小趋势。由图 4(b) 可知，在此振动模式下，音叉的振动主要集中在叉指 X 轴方向的运动，音叉基部基本上不会运动，即音叉能量主要集中在叉指上，而能量基本上不会向音叉基底传递，即，音叉具有很高的 Q 值。从图 4 中，还可以预测：磁性薄膜敏感复合位置，可能在应力最大的音叉叉指侧臂底部，也可能在位移最大的音叉叉指侧臂顶部。

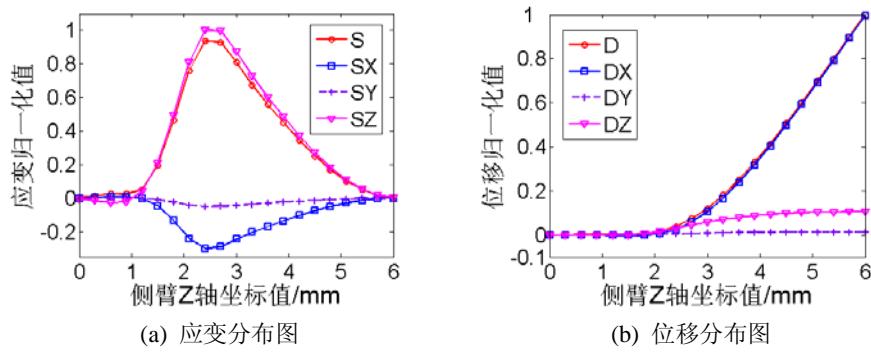


图 4 石英音叉侧臂应变及位移分布图  
Fig 4 Strain and displacement distribute on side arm of quartz tuning fork

## 2.4 薄膜敏感复合位置分析

针对磁性薄膜位置不同，结构的灵敏度不同，采用直接在音叉上加力的方法模拟其受到的由外部磁场所引起的力作用，进行有预应力的谐响应分析，石英的阻尼系数取为 0.0001。得到图 5 所示的磁性薄膜复合位置与谐振频率变化量的归一化关系曲线。其中，横坐标从 1 到 10 为音叉侧臂从顶部到底部的 10 个等间距位置。 $+X$ 、 $+Y$  和  $+Z$  为侧臂同一位置的加力方向。从图 5 可以看出，随着力从音叉侧臂顶部到底部的移动，谐振频率变化量呈减小趋势，故在音叉侧臂顶部受力时磁传感器将具有更高的灵敏度。即，薄膜材料的复合位置应在石英音叉叉指的上部，而不应复合在石英音叉的底座部分。结合图 4 可知，复合的灵敏位置并不在石英音叉侧臂应变最大的位置，而在侧臂的位移最大处。

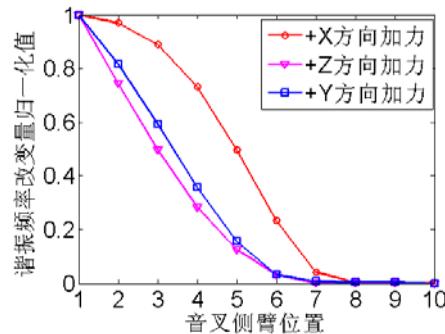


图 5 谐振频率改变量归一化值与施力位置的关系  
Fig 5 Relative between force position and normalize value of the change of resonant frequency

## 3 实验及结果分析

### 3.1 有限元结果实验验证

实验采用的磁性薄膜材料为非晶态软磁薄膜——铁硅硼，薄膜形状为楔形，厚度  $30 \mu m$ ，长度 2mm，最大宽度 1mm。用 502 胶将薄膜分别粘贴于音叉指侧臂顶部和底部（由于石英音叉是非常敏感的器件，在粘贴时，胶的用量要尽量少，薄膜的尺寸也不能太大，以免粘贴上薄膜后，音叉停振），构成两种音叉式复合磁传感器结构，如图 6 所示。

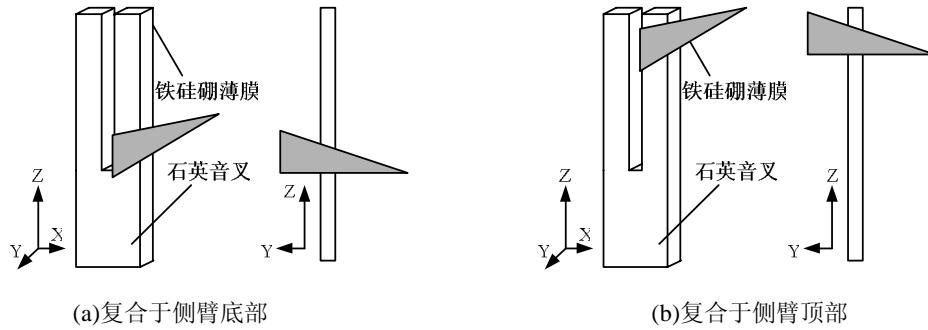


图 6 磁性薄膜/石英音叉复合结构  
Fig 6 Structure of magnetic-film/tuning fork

将复合结构置于 MS4630B 网络分析仪的专门用于石英音叉测试的夹具上进行测量，该夹具需外加 12V 的直流稳压电源，以便正常工作。音叉两侧使用一对环形超强钕铁硼(NdFeB)来施加静态磁场，磁场方向与图 6 中的 Y 轴平行，即沿薄膜的长度方向。采用 MS4630B 网络分析仪的内部激励信号对石英音叉进行激励起振，对称调节两环形磁铁距离以改变静磁场大小，磁场强度由高斯计进行测量。实验系统原理图，如图 7 所示。

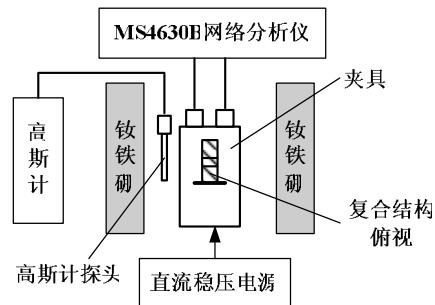


图 7 实验系统原理图  
Fig 7 Schematic diagram of experiment system

对图 6 所示的结构进行实验测试，经计算得到两种结构的谐振频率变化量和  $Q$  值变化量与静磁场的关系，如图 8 所示。由图可知，将磁性薄膜粘贴于音叉侧臂顶部时谐振频率的变化量和  $Q$  值的变化量都远高于在侧臂底部，即将薄膜复合于音叉侧臂顶部较优，与仿真结果一致。

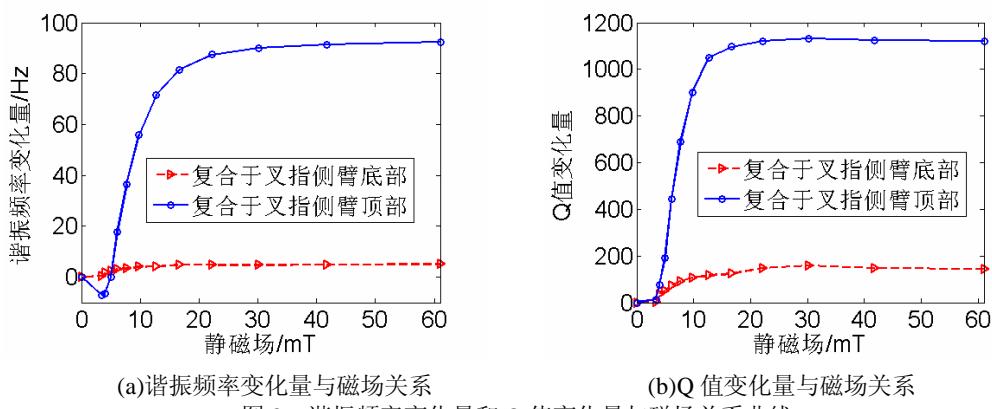


图 8 谐振频率变化量和  $Q$  值变化量与磁场关系曲线  
Fig 8 Relative curve of resonant frequency change and  $Q$  value change to magnetic field

### 3.2 敏感结构实验分析

对薄膜复合于音叉侧臂顶部的敏感结构（即图 6(b)所示的结构）做进一步分析。结构的谐振频率和  $Q$  值与静磁场的关系如图 9 所示。无磁场时结构的谐振频率和  $Q$  值分别为

32.0630KHz 和 1761；磁场作用下，谐振频率和  $Q$  值均呈上升变化。由图 9(b) 得到该结构具有高  $Q$  值的特点。

进一步分析图 8 中复合于叉指侧臂顶部的数据得到：磁场强度从 0 增加到 15mT，谐振频率变化量和  $Q$  值变化量都随着磁场的增大而线性增加，磁传感器的谐振频率灵敏度为 9.233Hz/mT， $Q$  值灵敏度为 119.471/mT；当磁场高于 15mT 后，两者的变化量基本上饱和。这与实验中所用的磁性材料——铁硅硼薄膜有关。铁硅硼的磁弹系数不是常数，在磁场作用下，铁硅硼被磁化使其磁弹系数随着磁场的增大而变大，当磁场达到一定值时，磁弹系数达到饱和。

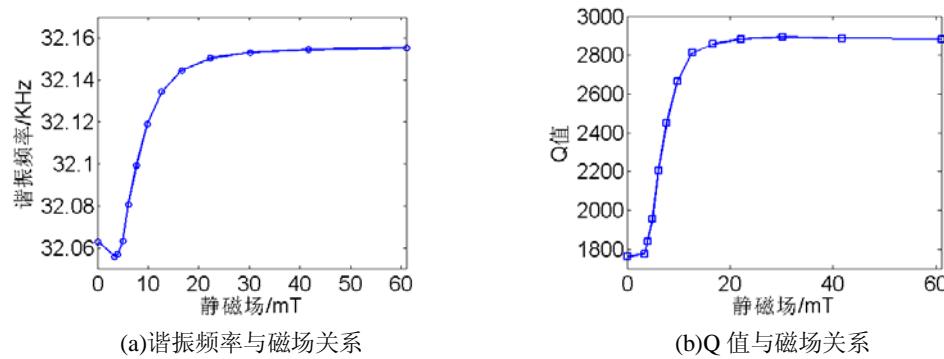


图 9 谐振频率和  $Q$  值与磁场关系曲线

Fig 9 Relative curve of resonant frequency and  $Q$  value to magnetic field

实验时，选用的网络分析仪测量石英音叉谐振频率的分辨率为 0.1Hz， $Q$  值分辨率为 1；音叉的频率稳定度为 20ppm， $Q$  值稳定度为 20ppm。从图 8 可知，当磁场强度为 0-15mT 时，磁场对频率的灵敏度为 9.233Hz/mT，对  $Q$  值的灵敏度为 119.471/mT，可以换算得到测量谐振频率和  $Q$  值时的复合磁传感器磁场分辨率分别为  $10^{-5}$ T 和  $10^{-6}$ T。测量  $Q$  值变化量对磁场的分辨率高于测量谐振频率变化量。

#### 4 结束语

本文提出一种磁性薄膜与石英音叉复合的磁传感器结构，在磁场作用下，磁性薄膜受到磁场力的作用，将应力应变传递至石英音叉，从而作为音叉谐振时的负载。通过测量其谐振频率的变化或  $Q$  值变化量即可达到检测磁场的目的。利用有限元分析软件，对薄膜的粘贴位置进行了设计和仿真，得到灵敏度最高的薄膜粘贴部位在音叉侧臂顶部，与实验符合。与谐振式磁电层合结构磁传感器相比，该磁传感器结构具有高  $Q$  值特点。磁场强度为 0 到 15mT 时，该磁传感器结构的静态灵敏度最高，测量谐振频率变化和  $Q$  值变化分别为 9.233Hz/mT 和 119.471/mT。测量谐振频率时，当谐振频率分辨率为 0.1Hz，石英音叉谐振频率稳定度为 20ppm 时，该结构磁传感器对磁场的分辨率为  $10^{-5}$ T；测量  $Q$  值时，当  $Q$  值分辨率为 1，石英音叉  $Q$  值稳定度为 20ppm 时，该结构磁传感器对磁场的分辨率为  $10^{-6}$ T，高于测量谐振频率。即，测量  $Q$  值变化量来检测磁场的方式更优。该磁传感器的设计对磁传感器的高  $Q$  值化和小体积化提供了新思路。

## 参考文献

- [1] Dong Shuxiang, Li Jiefang, and Viehland D. Vortex magnetic field sensor based on ring-type magnetoelectric Laminate[J]. Appl. Phys. Lett, 2004, 85 (12): 2307-2309.
- [2] Nobuyuki Yoshizawa, and Yutaka Shimada, Magnetic field sensing by a piezoelectric magnetostrictive resonator [J], IEEE Trans. on Magn., 2005, 41(11): 4359-4361.
- [3] Yoshizawa N, Shimada Y, Magnetic field sensing by a piezoelectric/ magnetostrictive resonator[C], Magnetics conference , INTERMAG Asia 2005: 411-412.
- [4] Li Ping, Wen Yumei, and Bian Leixiang. Enhanced magnetoelectric effects in composite of piezoelectric ceramics, rare-earth iron alloys, and ultrasonic horn[J]. Appl. Phys. Lett, 2007, 90, 022503.
- [5] 程磊, 文玉梅, 李平等. 采用弹性基底的磁电复合结构有限元分析[J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1357-1361.
- [6] Rozhok S., and Chandrasekhar V. Application of commercially available cantilevers in tuning fork Scanning Probe Microscopy (SPM) studies[J]. Solid State Communications, 2002, 121: 683-686.
- [7] Kageshima Masami, Jensenius Henrique, Dienwiebel Martin, et. al. Noncontact atomic force microscopy in liquid environment with quartz tuning fork and carbon nanotube probe[J]. Applied Surface Science, 2002, 188: 440-444.
- [8] Khaled Karrai, Robert D. Grober. Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes[J]. Appl. Phys. Lett, 1995, 66(14): 1842-1844.
- [9] 秦自楷. 压电石英晶体. 国防工业出版社[M]. 1980: 68-112, 279-280.

## Research on a magnetic sensor based on magnetic-film/tuning fork\*

ZENG Jie, WEN Yu-mei, LI Ping, LI Jian-zhong, ZHANG Xiao-hua

Key Lab of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry of China,  
College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing (400044)

### Abstract

A tuning fork magnetic sensor structure is designed by using one chip magnetic-film compound with quartz tuning fork to settle the problem of low  $Q$  value in magnetic-electric lamination magnetic sensor. The static magnetic field is detected through measuring the change of resonant frequency or  $Q$  value. The compound position of film is designed using the Finite Element Analysis. The most sensitive compound position is the top of the tuning fork side arm is got, and the experiment proof is proceed. Experiment result indicates that the  $Q$  value is about 2000 at zero bias magnetic filed, the high sensitivity of resonant frequency and  $Q$  value in static magnetic field can reach 9.233Hz/mT and 119.471/mT, respective. The resolution of the magnetic field can reach  $10^{-5}$  Tesla when the resolution of frequency detection is 0.1Hz and the frequency stability of tuning fork is 20ppm. The resolution of the magnetic field can reach  $10^{-6}$  Tesla when the resolution of  $Q$  value detection is 1 and the  $Q$  value stability of tuning fork is 20ppm. The measured  $Q$  value is better than measured frequency.

**Key words** magnetic-film, quartz tuning fork, finite element analysis, resonant frequency,  $Q$  value