

高Q值超低功耗谐振式磁传感器

黄子军¹, 卞雷祥¹, 李辉¹, 彭伟民¹, 文玉梅², 李平²

(1. 南京理工大学 机械工程学院 南京 210094; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院
上海 200240)

摘要: 针对现有谐振式磁传感器原理不能同时实现高品质因数(Q值)和低功耗的缺点, 利用双端固定石英音叉谐振器与铁镓磁致伸缩合金片复合, 设计了一种隔离磁机阻尼的高Q值、数字频率输出的超低功耗谐振式磁传感器。利用音叉谐振器结构的解耦特性, 设计应力耦合传递结构, 隔离了磁致伸缩材料磁机阻尼, 从而保证复合传感器Q值与音叉谐振器Q值相当。在磁场作用下, 磁致伸缩力传递到音叉谐振器, 由于音叉力敏感特性, 实现磁-力-频率转换。制备了铁镓合金/石英音叉谐振器复合敏感结构, 测试表明: 在低气压封装条件下的品质因数约为16764, 门振荡电路功耗约为124.8 μ W, 在线性区灵敏度为3.05Hz/Oe, 分辨率为6mOe。

关键词: 谐振式磁传感器; 石英音叉谐振器; 磁致伸缩材料; 高品质因数

A Resonant Magnetic Field Sensor with High Quality Factor and Low Power Consumption

Huang Zijun¹, Bian Leixiang¹, Li Hui¹, Peng Weimin¹, Wen Yumei², Li Ping^{2,1}

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094; 2.

School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: To overcome the shortcoming of the principles the current resonant magnetic sensors which are unable to achieve both high quality factor (Q-factor) and low power consumption, a low-power resonant magnetic sensor with high Q-factor and digital frequency output is designed by combining the double-ended quartz crystal tuning fork (DETF) resonator with magnetostrictive FeGa plate. Using the decoupling characteristic of the structure of DETF resonator, the stress coupling structure is designed to isolate the magnetomechanical damping of the magnetostrictive material. Thus, the Q-factor of the composite sensor is almost equal to that of the DETF resonator. The magnetostrictive force occurring under magnetic field induces a longitudinal force in the DETF. The magnetic-force-frequency conversion is achieved due to the force sensitive characteristic of the DETF. A low pressure packaged sensors based on the composite structure of

FeGa alloy and DETF resonator is fabricated. The test results show that the Q-factor and power consumption of the sensor are about 16764 and $124.8\mu\text{W}$, respectively. In the linear region, the sensitivity and resolution are 3.05Hz/Oe and 6mOe , respectively.

Keywords: resonant magnetic sensor; double-ended quartz crystal tuning fork (DETF); magnetostrictive material; high quality factor

谐振式MEMS磁传感器具有体积小、重量轻、功耗低、成本低、分辨率高、输出数字频率信号, 抗干扰能力强等优点, 是磁传感技术研究的一个重要分支和热点^{[1]-[2]}。然而, 现有主流谐振式磁传感器的设计方法, 不能同时实现高Q值和低功耗, 具体说明如下: a) 硅基谐振式MEMS磁传感器的主流方案是在硅衬底上加工谐振结构, 利用磁场-载流结构相互作用产生的洛伦兹力作为执行力, 影响谐振结构的谐振状态, 并利用压阻^[3]、电容^[4]、光学^[5]等方法读出振动信号并解调外部磁场值。在频率输出模式下, 探测极限达到 217nT ^[6]; 在幅度调制模式下的噪声水平低至几 $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[3]。然而, 利用洛伦兹力效应需要预先施加较大的载流值, 存在发热、高功耗等问题。b) 由于磁致伸缩薄膜的 ΔE 效应, 磁致伸缩/压电复合磁电谐振器的谐振频率随外部磁场非线性变化, 该特性可用于磁探测。然而, 磁致伸缩/压电层间接触、应变耦合, 磁致伸缩材料高磁机阻尼限制了复合磁电谐振器的Q值, 例如, $\text{SiO}_2/\text{Pt}/\text{AlN}/\text{FeCoSiB}$ 复合MEMS悬臂梁谐振器的Q值低于1000^{[7]-[8]}, $\text{AlN}/(\text{FeGaB}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 多层NEMS (nano-electromechanical system) 谐振器的Q值735^[9], 数字频率输出方式下, 相位噪声较大。因此, 一般仅在幅相调制模式下解调磁信号, 磁噪声水平在百 $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($140\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}} @20\text{Hz}$ ^{[7]-[8]}, $300\text{pT}@DC$ ^[9])。

本文利用音叉谐振器结构的解耦特性, 设计应力耦合结构替代应变耦合方式, 隔离了磁致伸缩材料磁机阻尼, 从而保证复合传感器Q值与音叉谐振器Q值相当。制备了石英音叉谐振器与铁镓合金复合的谐振MEMS磁传感器, 在磁场作用下, 磁致伸缩力高效传递到音叉谐振器, 由于音叉力敏感特性, 实现磁-频率转换, 同时具有高Q值、低功耗和高灵敏度特点。

1 谐振式磁传感器原理与结构

1.1 传感器的原理及设计

谐振式磁传感器结构如图1所示, 由一片铁镓合金, 一个双端固定石英音叉(double-ended quartz crystal tuning fork, DETF)谐振器及两个石英垫片复合构成。DETF谐振器的两个固定端分别使用石英垫片垫起, 并通过环氧树脂胶粘剂粘接在铁镓合金片的两端。在沿长度方向的磁场作用下, 铁镓合金由于磁致伸缩效应产生磁致伸缩应力, 通过石英垫片传递到音叉两端, 从而使音叉谐振器纵向受力, 导致音叉的谐振频率发生改变。设计门振荡电路激励DETF

谐振器产生谐振并输出方波信号。通过频率计测量输出信号的频率，解算出待测磁场大小。

铁镓合金片的尺寸为 $10.6\text{mm} \times 1.4\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ，石英垫片的尺寸为 $1.8\text{mm} \times 1.4\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 。DETF谐振器为轴对称结构，其具体尺寸如表1所示。DETF谐振器工作在如图2所示的反相弯曲振动模态，即音叉两根梁的振动方向相反、振形对称时，其在基部（两根梁的耦合区域）产生的弯矩和剪切力相互抵消，可极大地降低双梁音叉在固定端的能量耦合损耗，从而使复合传感器具有高Q值。从图2可以看出，在该模式下DETF谐振器结构固定端应力为零（解耦区域），垫片传递力的结构实际为应力耦合结构，隔离了磁致伸缩材料磁机阻尼，从而保证复合传感器Q值与DETF谐振器Q值相当。此外，图2所示的仿真结果显示DETF谐振器的谐振频率为35.418kHz。由于在仿真过程中忽略了音叉谐振器表面电极和制作过程中的尺寸误差，该频率值与实际值可能存在一定差异。

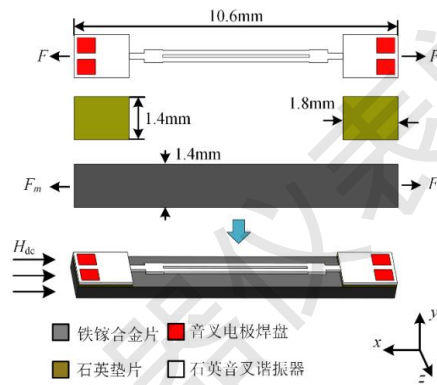


图1 谐振式磁传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the resonant magnetic sensor

表1 DETF 谐振器尺寸

Table 1 The detail dimensions of the DETF resonator

参数	数值
梁长 l	4.8mm
梁宽 b	0.1mm
梁厚 h	0.146mm
DETF谐振器总长	10.6mm
DETF谐振器厚度	0.1mm
两端固定区域尺寸	$1.8\text{mm} \times 1.4\text{mm}$

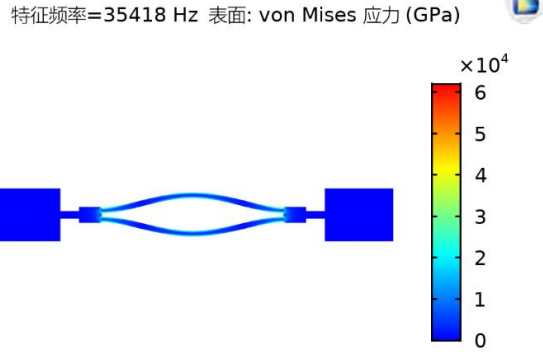


图 2 DETF 谐振器的反相弯曲振动模式

Fig. 2 The anti-phase flexural mode of the DETF resonator

参考图 2，对于基频弯曲振动模式下的 DETF 谐振器，振梁的零应力点分别位于 $0.224l$ 和 $0.776l$ 处 (l 为振梁长度)，零应力点两侧的应力方向相反 (拉伸或压缩)。为了激发出音叉的面内反相弯曲振动模式，采用传统的四电极方法^{[10]-[11]}设计了音叉振梁的涂布电极，如图 3 所示。梁的长度、宽度和厚度方向分别沿着石英晶体的机械轴 (Y 轴)、电轴 (X 轴) 以及光轴 (Z 轴) 设计，对应的，正负电极在梁长度的 0.224 和 0.776 倍位置处发生调换。

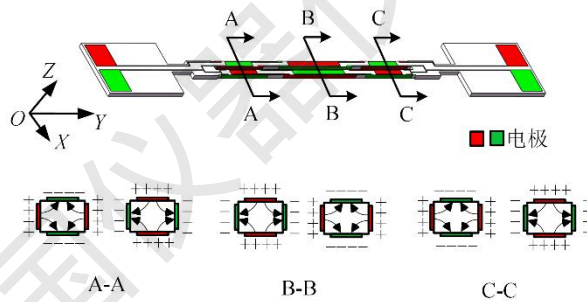


图 3 音叉振梁电极涂布示意图

Fig. 3 Electrode patterns of the DETF resonator

1.2 理论分析与仿真

对于一个弯曲振动的梁，其谐振频率 f_r 与其纵向受力的大小有关。梁的谐振频率 f_r 与梁沿长度方向受力 F 之间的函数关系为^[12]

$$f_r = f_0 \sqrt{1 + \gamma_n F \frac{l^2}{E_b h^3 b}} \quad (1)$$

其中

$$f_0 = \frac{\alpha_n^2}{4\sqrt{3}\pi} \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E_b}{\rho}} \quad (2)$$

在式(1)和(2)中, E_b 和 ρ 分别为梁材料的杨氏模量和密度; l , h 和 b 分别为梁的长度, 厚度和宽度; f_0 为梁在长度方向受力为零的情况下的谐振频率; 在基频振动模态下, 常数 α_0 和 γ_0 分别为 4.730 和 0.295。

在沿长度方向受力 F 作用的情况下, 梁谐振频率的偏移率为

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_r - f_0}{f_0} = \sqrt{1 + \gamma_n F \frac{l^2}{E_b h^3 b}} - 1 \quad (3)$$

磁致伸缩材料在静态或者频率远小于其纵向振动谐振频率的动态磁场作用下, 磁致伸缩应变近似为均匀分布^[12], 磁致伸缩力为

$$F_m = A_m S_m E_m \quad (4)$$

在式(4)中, E_m 和 S_m 分别为在磁场 H 下磁致伸缩材料的弹性模量和应变, A_m 为磁致伸缩材料的截面积。

由于环氧树脂胶粘剂形成的粘胶层的弹性模量远小于 DETF 谐振器、石英垫片以及磁致伸缩材料的弹性模量, 所以在力传递的过程中, 粘胶层不可避免的发生剪切形变; 此外, 由于磁传感器结构的非对称性, 在磁致伸缩应力作用下传感器也会产生弯矩。这导致磁致伸缩材料输出的力 F_m 在传递至 DETF 谐振器的过程中存在损失。假设传递效率为 β ($0 < \beta < 1$), 则实际作用在音叉上的纵向力 F 为

$$F = \beta F_m \quad (5)$$

由于磁致伸缩材料与 DETF 谐振器按照图 1 所示的“并联”方式连接, DETF 谐振器产生的应变被磁致伸缩层所限制, 只能小于或等于磁致伸缩层产生的应变, 所以传递效率存在一个极限值, 即

$$\beta = \frac{AE_b \varepsilon_b}{A_m S_m E_m} \leq \frac{AE_b}{A_m E_m} \quad (6)$$

其中, ε_b 为 DETF 谐振器的应变, $A = 2hb$ 为音叉双梁的截面积。

将铁镓合金和石英晶体的弹性模量 $E_m = 107\text{GPa}$, $E_b = 86\text{GPa}$ 代入式(6), 可以计算出传递效率 $\beta \leq 3.35\%$ 。

采用 COMSOL 多物理场仿真软件对谐振式磁传感器的三维结构进行仿真。将铁镓片下表面中心位置处 $1.4\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 的区域设置为固定约束, 模拟敏感单元的中间固定条件。分别在石英垫片与 DETF 谐振器固定端和铁镓合金片接触的面设置阻尼层来模拟由环氧树脂胶粘剂形成的粘胶层。设置阻尼层的杨氏模量为 3GPa , 泊松比为 0.38。在仿真过程中用到的铁镓合金参数如表 2 所示。

表 2 仿真中使用的铁镓合金参数

Table 2 Parameters of the Fe-Ga alloy used in the simulation

参数	数值
饱和磁致伸缩系数 λ_s	280 ppm
密度	7972 kg/m ³
弹性模量 E_m	107 GPa
泊松比	0.37
电导率 σ	1.23×10^{-7} S/m
饱和磁化强度 M_s	1.45×10^6 A/m
初始磁化率 χ_m	150

如图 4 所示为谐振式磁传感器敏感单元在外加磁场下的变形仿真图,此时沿铁镓合金片长度的背景磁场强度为 500Oe。从图中可以看出,在外加磁场的作用下,铁镓合金片由于磁致伸缩效应沿长度方向伸长,并使粘接到铁镓合金片上的 DETF 谐振器受到纵向拉伸作用。此外,由于结构在厚度方向上的非对称性,传感器敏感单元受到弯矩作用并产生了弯曲变形。仿真结果显示在 500Oe 的磁场下,铁镓合金片沿长度方向的伸长量为 1.939 μ m,对应的应变为 182.9ppm; DETF 谐振器沿长度方向的伸长量为 1.329 μ m,对应的应变为 125.4ppm。根据式(6),计算出传递效率 β 为 2.29%,这个值要小于理论计算的传递效率极限值 3.35%。进一步的,根据式(3)~(5),计算出 DETF 谐振器谐振频率的偏移率为 1.98%。

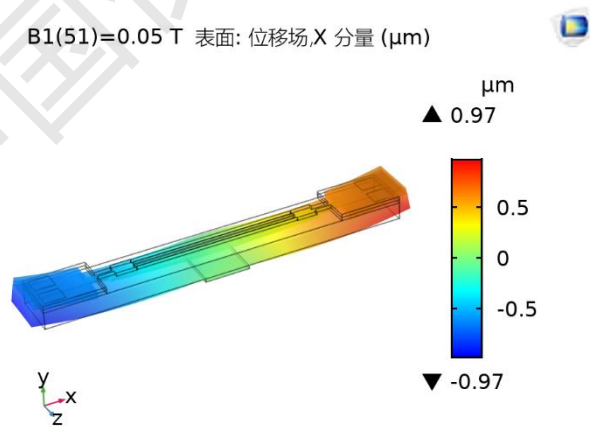


图 4 谐振式磁传感器敏感单元在外加磁场下的变形仿真

Fig. 4 Displacement of the structure under the action of external dc magnetic field

2 传感器制备及测试

2.1 传感器的制备

采用光刻、湿法蚀刻等工艺在 Z 切石英基片上制作 DETF 谐振器，制作过程与文献 [10][11] 中类似，得到的 DETF 谐振器如图 5(a) 所示。将定向凝固制备的铁镓合金块体切割，得到铁镓合金片的尺寸为 $10.6\text{mm} \times 1.4\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 。采用激光切割方法从 Z 切石英片上切割得到石英垫片，厚度为 0.1mm ，长宽分别为 1.8mm 和 1.4mm 。对各组成部件清洗、烘干后，采用环氧树脂胶粘接在一起，得到复合敏感单元结构如图 5(b) 所示。采用二次封焊结合高温高真空除气的封装技术，将敏感单元结构封装到近无磁的 304 不锈钢制备的壳体内进行测试。封装后的磁传感器如图 5(c) 所示。

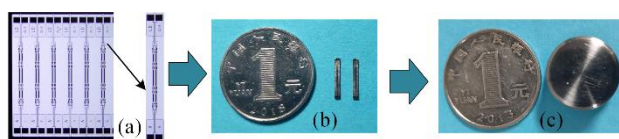
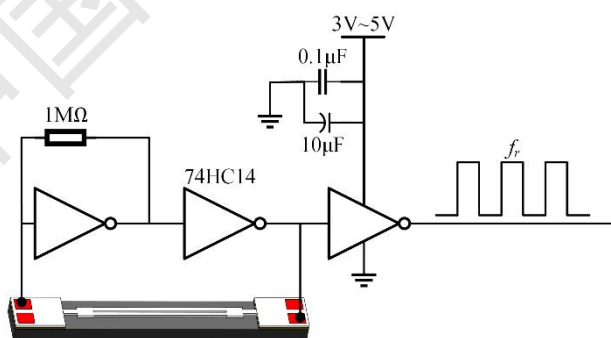


图 5 DETF 谐振器阵列及单元(a)、传感器敏感单元(b)及封装后的磁传感器(c)照片

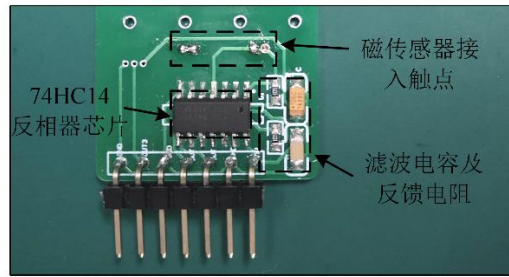
Fig. 5 Photograph of the DETF array and unit(a), sensing units (b), and packaged magnetic sensor(c)

采用 74HC14 系列 CMOS 反相器和典型门振荡电路，激励 DETF 谐振器振荡产生谐振并输出稳定的方波信号。所用门振荡电路原理及实物照片如图 6 所示。门振荡电路由放大器和反馈网络组成。在反相器的两端并联了一个 $1\text{M}\Omega$ 的反馈电阻，使反相器工作在线性区，并作为一个放大器工作；DETF 谐振器在门振荡电路中与反相器并联，充当反馈网络，并起到选频的作用。当放大器和反馈网络的闭环增益大于等于 1 且总相移为 0 或 $2\pi(360^\circ)$ 的整数倍时，门振荡电路趋于稳定，并输出一个稳定的方波信号，方波信号的频率取决于 DETF 谐振器的谐振频率。



(a) 门振荡电路原理图

(a) Schematic diagram of gate oscillator circuit



(b) 门振荡电路照片

(b) Photograph of gate oscillator circuit

图 6 门振荡电路

Fig. 6 Gate oscillator circuit

2.2 实验测试系统

如图 7 所示为谐振式磁传感器的测试系统，主要包括电磁铁（可产生磁场 0-1T），高斯计，程控直流电流源（0-10A，60V），高精度频率计和直流电压源等仪器。磁传感器居中放置在电磁铁的两个磁极面的中间，且磁传感器敏感单元的长度方向与电磁铁的磁极面垂直。使用程控电流源给电磁铁供电产生所需的偏置磁场，并用高斯计测量电磁铁产生磁场的大小。利用频率计测量磁传感器通过门振荡电路输出的谐振频率变化。整个系统使用上位机实现自动控制测量，即使用 LabVIEW 软件编写 vi 程序实现高斯计测量值读取，程控电流源输出电流的大小控制、频率计频率测量值记录。

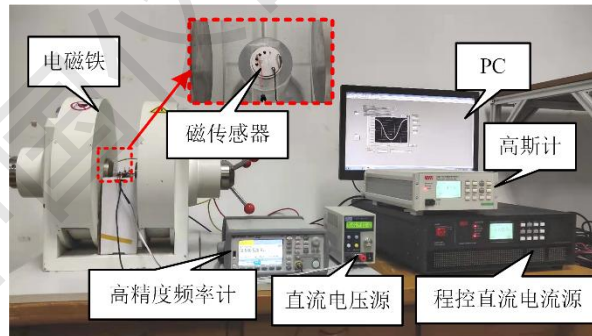


图 7 谐振式磁传感器实验测试系统

Fig. 7 The experimental setup of resonant magnetic sensor

3 结果及讨论

如图 8 所示为真空封装磁传感器在零偏置磁场下的阻抗/相位-频率特性曲线。从图中可以看出，零磁场作用时，传感器的初始谐振频率为 36.774kHz，这个值要大于有限元仿真得到的音叉谐振频率值 35.418kHz，这是因为仿真过程中忽略了音叉的表面电极和制作过程中的尺寸误差。

根据测得的阻抗曲线，参考文献[13]的方法，计算得到此谐振式磁传感器在真空环境下的 Q 值。如图 9 所示，为传感器在不同直流偏置磁场下的 Q 值变化曲线。从图中可以看出传感器的 Q 值在 14661 至 18645 之间波动，平均值为 16764。Q 值的波动可能是由于使用扫频方法测量传感器的阻抗特性曲线造成的，因为扫频阻抗特性曲线的数据点是有限的，在计算 Q 值时必须对数据进行插值处理。

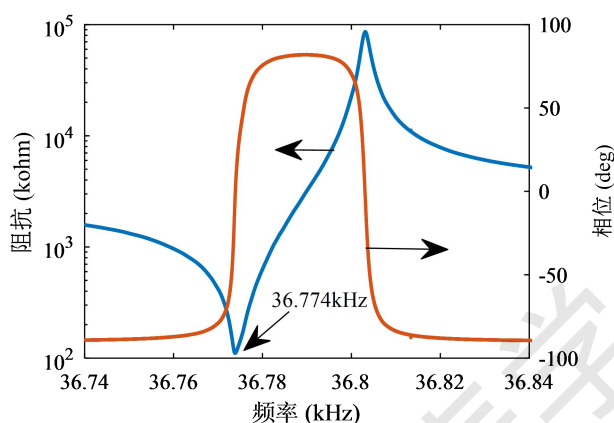


图 8 零偏置磁场时磁传感器的阻抗-频率特性曲线

Fig. 8 Magnitude response of the resonant magnetic sensor without dc bias field

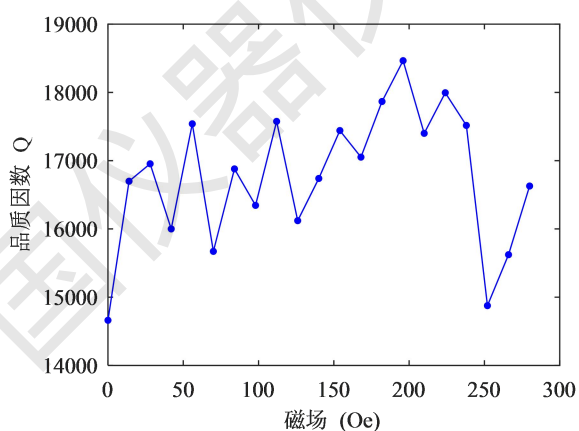


图 9 谐振式磁传感器的 Q 值随 磁场变化曲线

Fig. 9 Q-factor of the sensor as a function of dc magnetic field

如图 10 所示为使用示波器观察到的门振荡电路输出方波信号的波形。此外，还使用数字万用表(Fluke 17B)测试了门振荡电路接入真空封装磁传感器与非真空封装磁传感器时的功耗，测试结果显示，接入真空封装磁传感器时的功耗为 124.8 μ W (3V, 41.6 μ A)；而接入非真空封装磁传感器时的功耗为 207.9 μ W (3V, 69.3 μ A)。这说明真空封装减小了 DETF 谐振器振荡所需的能量损耗，降低了传感器的功耗。

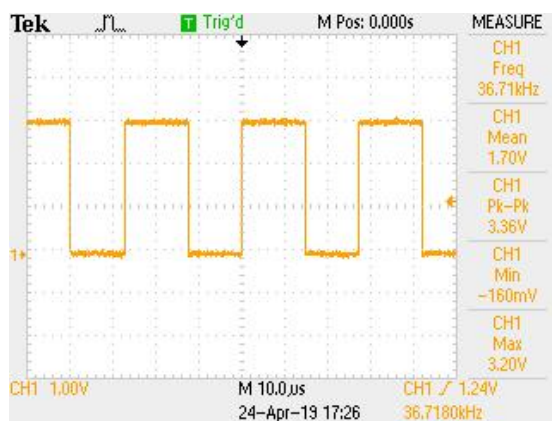


图 10 门振荡电路输出方波信号波形

Fig. 10 Digital frequency signal displayed on the oscilloscope

测试了传感器谐振频率随偏置磁场变化情况，测试结果如图 11 所示。在 0~500Oe 的直流偏置磁场范围内，传感器输出的谐振频率变化了约 641.2Hz，对应的谐振频率偏移率为 1.75%，这个结果小于仿真结果 1.98%。这两者之间的差异可能是由于仿真参数与实际制备器件所用各部件的参数之间存在误差所致。

磁致伸缩材料在低磁场和高磁场区域具有较强的非线性，使用时需要施加优化的偏置磁场使其工作在线性区。直观的，从图 11 可以看出需要施加大约 165Oe 的偏置磁场，才能使谐振式磁传感器工作在最优线性区。对传感器线性区的线性拟合曲线表明传感器的灵敏度约为 3.05Hz/Oe，线性区最大滞后约为 5Hz。

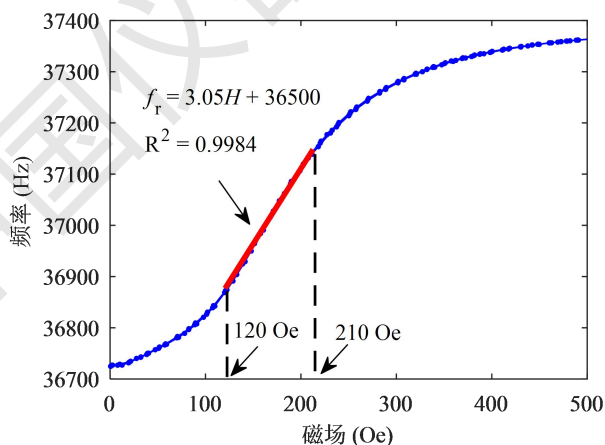


图 11 传感器谐振频率随偏置磁场变化曲线

Fig. 11 Resonant frequency of the sensor as a function of dc magnetic field

将两块尺寸为 10mm×5mm×2mm，沿厚度方向磁化的钕铁硼永磁体分别放置在磁传感器单元的两端，给磁传感器提供直流偏置磁场，并测试了磁传感器对阶梯变化直流磁场的响应，结果如图 12 所示。从图中可以看出，传感器能够分辨出阶梯变化为 6mOe 的直流磁场。

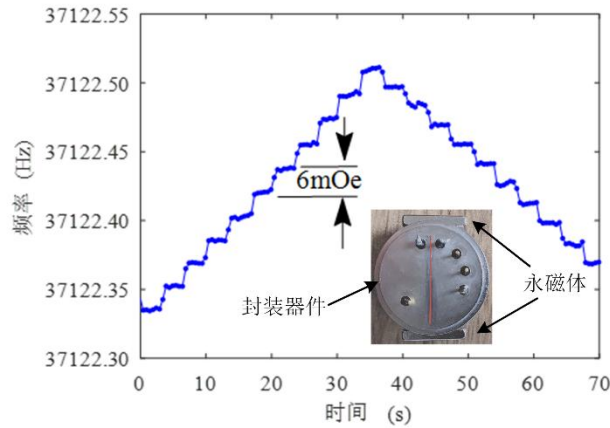


图 12 谐振式磁传感器对阶梯变化直流磁场的响应

Fig. 12 Response of the sensor to small step changes of dc magnetic field

4 结论

将双端固定石英音叉谐振器与铁镓合金以“并联结构”的方式复合，设计了一种谐振式磁传感器。磁致伸缩材料在磁场作用下产生的磁致伸缩应力传递到双端固定石英音叉谐振器的纵向，从而使音叉谐振器的谐振频率发生偏移。制备真空封装的传感器样件进行了实验测试，结果表明该谐振式磁传感器具有高灵敏度（ 3.05Hz/Oe ）、高 Q 值（16764）、高分辨率（ 6mOe ）、低功耗（ $124.8\mu\text{W}$ ）等优点，为磁场测量提供了一种新的解决方案。

参考文献：

- [1] Lenz J, Edelstein S. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3):631-649.
- [2] Herrera-May, Agustín L, Aguilera-Cortés, Luz A, García-Ramírez, Pedro J, et al. Resonant Magnetic Field Sensors Based on MEMS Technology[J]. Sensors, 2009, 9(10):7785-7813
- [3] Kumar V, Ramezany A, Mahdavi M, et al. Amplitude modulated Lorentz force MEMS magnetometer with picotesla sensitivity[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2016, 26(10):105021.
- [4] Zhang W, Lee E. A Horseshoe Micromachined Resonant Magnetic Field Sensor with High Quality Factor[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(10):1310-1312.
- [5] Park B, Li M, Liyanage S, et al. Lorentz force based resonant MEMS magnetic-field sensor with optical readout[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2016, 241.
- [6] Bahreyni B, Shafai C. A Resonant Micromachined Magnetic Field Sensor[J]. IEEE Sensors

Journal, 2007, 7(9):1326-1334.

- [7] Jahns R, Zabel S, Marauska S, et al. Microelectromechanical magnetic field sensor based on ΔE effect[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(5):052414.
- [8] Zabel S, Kirchhof C, Yarar E, et al. Phase modulated magnetoelectric delta-E effect sensor for sub-nano tesla magnetic fields[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(15):152402.
- [9] Nan T, Hui Y, Rinaldi M, et al. Self-Biased 215MHz Magnetoelectric NEMS Resonator for Ultra-Sensitive DC Magnetic Field Detection[J]. Scientific Reports, 2013, 3:1985.
- [10] Cheng R, Zhao Y, Li C. Feasibility study of a pressure sensor based on double-ended tuning fork quartz resonator[C]// IEEE International Conference on Nano/micro Engineered and Molecular Systems. IEEE, 2014:354-357
- [11] Danel J S, Delapierre G. Quartz: a material for microdevices[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 1999, 1(4):187.
- [12] Fukuzawa K, Ando T, Shibamoto M, et al. Monolithically fabricated double-ended tuning-fork-based force sensor[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(9):094901.
- [13] Bian L, Wen Y, Li P. Composite Magnetoelectric Transducer of Terfenol-D and Pb(Zr,Ti)O Plates Bonded on an Elastic Substrate[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(1):45-50.