DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107459

表面溅射 FeGa 薄膜的 AT 切型石英谐振磁场传感器*

张家泰,文玉梅,鲍祥祥,李 平,王 遥
(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘 要:针对谐振传感器 Q 值低导致输出信号噪声水平高、传感分辨率低的问题,提出 FeGa 薄膜与 AT 切型石英晶片复合的高品质因数谐振磁场传感器。AT 切型石英晶片受到交流电压激励以厚度剪切模态振动,FeGa 薄膜在磁场中磁化而受到磁场作用力并通过层间耦合传递到石英晶片,由于石英晶片具有力频特性,其谐振频率因此会发生改变。此外,石英晶体低内损耗、高 Q 值的特性使得传感器具有很高的品质因数,可以实现稳定、低噪声的传感输出。实验结果显示:该谐振磁场传感灵敏度为 0.2 Hz/Oe,品质因数达到 46 000 以上,功耗低于 8 μW,最大测量磁场可达 1 200 Oe,具有较宽的磁场测量范围。该谐振磁场传感器在高信噪比输出信号、低功耗等方面均具有明显优势,且结构简单、易于加工。

关键词: 谐振磁场传感器;AT 切型石英晶体;FeGa 薄膜;高品质因数
中图分类号: TN384 TH73 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

AT-cut quartz resonant magnetic field sensor with surface sputtered FeGa film

Zhang Jiatai, Wen Yumei, Bao Xiangxiang, Li Ping, Wang Yao
(*School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: Aiming at the problem of low quality factor of the resonant sensor, which will cause high output signal noise and low sensing resolution, a high-quality-factor resonant magnetic field sensor with FeGa film and AT-cut quartz crystal composites is proposed. When excited with ac voltage, the AT-cut quartz wafer will vibrate in thickness-shear mode. The FeGa film is magnetized in the magnetic field, then the film is subjected to the force of the magnetic field, which is transferred to the quartz wafer through interlayer coupling. Due to the force-frequency characteristics of the quartz wafer, its resonant frequency will change. In addition, the proposed sensor has a particularly high quality factor because of the low internal loss and high Q value of the quartz wafer, the stable and low noise sensing output is achieved. Experiment results show that the sensitivity of the resonant magnetic field sensor reaches 0.2 Hz/Oe, its quality factor reaches above 46 000 and the power consumption is lower than 8 μW. In addition, the sensor has a wide magnetic field measurement range, and the maximum measured magnetic field reaches 1 200 Oe. The proposed resonant magnetic field sensor has obvious advantages of high signal-to-noise output signal and low power consumption, also has simple structure, and can be fabricated easily.

Keywords: resonant magnetic field sensor; AT-cut quartz crystal; FeGa film; high quality factor

0 引 言

磁场传感器在磁储存[1]、导航[2-4]、生物医学[5]、地质探察[6-7]等领域有着广泛的应用。其中谐振磁场传感器可以直接输出数字信号、抗干扰能力强,具有很好的实用性。谐振磁场传感器由磁敏感单元、振动单元组成,被测磁场作用在磁场敏感单元,转化为力、位移或其它要素加载到振动单元,引起谐振频率变化。

根据磁敏感单元作用不同,可将常见的谐振磁场传感器分为 3 种类型。第 1 种类型利用通电导体在磁场中受到的安培力引起振动单元谐振频率改变[8-10]。Sunier 等[11]在悬臂梁表面加工出环绕导线并通入电流,利用通电产生的安培力引起悬臂梁谐振频率变化,

收稿日期:2021-01-30 Received Date: 2021-01-30
*基金项目:国家自然科学基金(61527813)项目资助

设计出 Q 值 600、功耗 5 mW 的谐振传感器。Zhang 等[12]使用通入相反电流的两根导体棒连接振动单元两侧,制作出 Q 值过万的磁场传感器,但其灵敏度仅有几十 Hz/(mA·T)。Li 等[13]在此基础上增加一级杠杆装置来放大安培力,使灵敏度提高到 146.5 Hz/(mA·T),但 Q 值降低至 540。该类传感器需要持续提供 mA 级电流驱动进行传感,功耗较大;灵敏度不高且与通入电流大小相关,减小电流降低功耗会降低灵敏度;器件结构复杂,加工难度大。

第 2 种类型是利用磁致伸缩材料的 ΔE 效应,磁场改变磁致伸缩材料的杨氏模量,导致整个振动结构的等效杨氏模量改变,引起传感器谐振频率偏移[14-20]。ΔE 效应谐振磁场传感器一般为磁电层叠复合结构,文献[16-19]采用微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术加工器件,灵敏度可达到几甚至几十 Hz/nT,但其保持高灵敏度的测量区间仅有几十 Oe 甚至不到 1 Oe;其次,谐振频率高达几十兆、上百兆赫兹,Q 值普遍低于 2 000,输出信号的信噪比低,实际上并不能达到很高的分辨率。

第 3 种类型是利用磁致伸缩应变作用到振动单元改变谐振频率[21-22]。文献[22]采用双层 FeGa 合金板与石英双端音叉(double-ended tuning fork,DETF)的三明治结构,利用正磁致伸缩效应拉伸 DEFT 改变其谐振频率。其设计的器件 Q 值为 3 318,功耗 243 μW。正磁致伸缩需拉伸整个 DETF 引起谐振频率变化,导致灵敏度高度依赖磁致伸缩材料与 DETF 的体积比。目前磁致伸缩材料体积 DEFT 体积比已在 2 倍以上,灵敏度也仅达到 3.5 Hz/Oe,进一步增大磁层体积将不可避免地导致 Q 值下降与功耗提升。

针对谐振磁场传感器 Q 值低会导致输出信号噪声水平高、传感分辨率低的问题,本文提出一种利用石英晶片受力频移及高 Q 值特性制作的高 Q 值谐振磁场传感器。利用工作在厚度剪切模态 AT 切型石英晶片作为振动单元,在其表面溅射铁镓合金($Fe_{83}Ga_{17}$,以下简称 FeGa)薄膜形成磁电层合结构,薄膜磁化后受到外磁场的作用力,通过层间耦合传递到振动单元引起谐振频率的偏移,实现对磁场的传感。

1　传感原理

石英晶体因高品质因数、优异的时间稳定性而被广泛用于制作谐振器件。利用 AT 切型石英晶片设计的传感器结构如图 1 所示。

对于工作在厚度剪切模态的 AT 切型石英晶片,当厚度尺寸远小于径向尺寸时,其基础谐振频率时 f_0 可表示为:

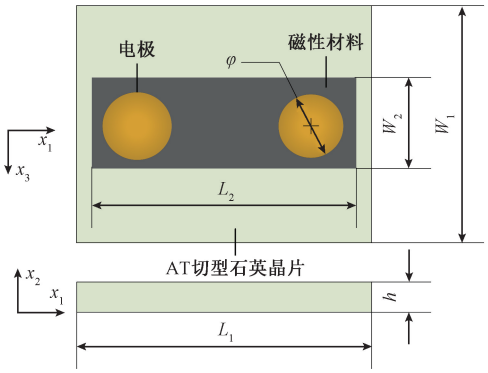


图 1　传感器结构

Fig. 1　The sensor structure

$$f_0 = \frac{1}{2h}\sqrt{\frac{c_{66}^{eff}}{\rho}} \tag{1}$$

式中:h、ρ 和 c_{66}^{eff} 分别为 AT 切型石英晶片的厚度、密度和有效剪切刚度系数。且石英晶片具有力频特性,即受力时晶片的谐振频率会发生偏移。20 世纪 70 年代,Lee 等[23-24]利用悬臂梁模型分析 AT 切型石英工作在厚度剪切模态时频率偏移与端部所受外力引起应变的关系,得出结论:石英晶片力频特性来源于应力、应变的非线性,且频率偏移与晶片的应变及二阶、三阶弹性系数有关。

当 AT 切型石英晶片具有一定的初始静态应变 S_{mn} 并在电场 E_k 激励下压电振动,产生的动态应力 t_{ij} 和应变 s_{kl} 的关系为[25-26]:

$$t_{ij} = \left(c_{ijkl} + \sum_{m=1}^{3}\sum_{n=1}^{3} c_{ijklmn}S_{mn}\right)s_{kl} - e_{kij}E_k \tag{2}$$

式中:c_{ijkl}、c_{ijklmn} 和 e_{kij} 分别为 AT 切型石英晶片的二阶、三阶弹性系数和压电系数。压电振动的应力、应变方程不仅需要考虑二阶弹性系数 c_{ijkl},也要考虑更高阶弹性系数 c_{ijklmn} 及当前的静态应变 S_{mn}。

为方便书写,此后方程各物理量均采用缩略下标形式。考虑应力、应变的非线性关系对晶片厚度剪切运动进行分析,则第二类压电方程可写为:

$$t_6 = \left(c_{66} + \sum_{r=1}^{6} c_{66r}S_r\right)s_6 - e_{26}E_2 \tag{3}$$

$$D_2 = e_{26}s_6 + \varepsilon_{22}E_2 \tag{4}$$

式中:D_2、ε_{22} 为 AT 切型石英晶片电位移与介电常数。由于 $\partial D_2/\partial x_2 = 0$,联合式(3)、(4)及弹性体动力学方程,可得 x_1 方向剪切运动方程为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho}\left(c_{66}^0 + \sum_{r=1}^{6} c_{66r}S_r\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} \tag{5}$$

式中:u 为 x_1 方向的位移;t 为时间;$c_{66}^0 = c_{66} + e_{26}^2/\varepsilon_{22}$。对式(5)求解得到:

$$u = \left[a_1\cos\left(\frac{\omega}{b}x_2\right) + a_2\sin\left(\frac{\omega}{b}x_2\right)\right]e^{j\omega t} \tag{6}$$

其中,ω 为振动频率;a_1、a_2 为微分方程求解的待定

系数，系数 $b=\sqrt{\left(c_{66}^{0}+\sum_{r=1}^{6}c_{66r}S_r\right)/\rho}$。

应力边界条件为 0 时，可得到晶片基础谐振频率如式(1)所示，则有效剪切刚度系数 c_{66}^{eff} 的表达式为：

$$c_{66}^{eff}=c_{66}^{0}+\sum_{r=1}^{6}c_{66r}S_r \tag{7}$$

由于弹性系数为常量，所以有效刚度系数的改变来源于 S_r 的变化。根据文献[25]，AT 切石英晶片测量数据见表 1，应变 S_1 对有效剪切刚度系数影响最大。若不同位置静应变 S_r 不同，将导致谐振频率不一致的情况发生，则晶片谐振频率将由整个振动区域综合平均得到。

表 1 AT 切型石英晶体三阶弹性系数 c_{66r} 数值表

Table 1 Third-order elastic coefficient c_{66r} data table of AT-cut quartz crystal

r	1	2	3	4	5	6
c_{66r}/GPa	−203.2	22.6	−26.9	82.4	0	0

联合式(1)与(7)可以计算，静态应变为 S_r 时，相对于零静态应变状态产生的谐振频率偏移 Δf 为：

$$\Delta f=\frac{1}{2h\sqrt{\rho}}\left(\sqrt{c_{66}^{0}+\sum_{r=1}^{6}c_{66r}S_r}-\sqrt{c_{66}^{0}}\right) \tag{8}$$

因应变 S_r 远小于 1，$\sum_{r=1}^{6}c_{66r}S_r\ll c_{66}$，故得到：

$$\Delta f\approx\frac{\sum_{r=1}^{6}c_{66r}S_r}{4h\sqrt{\rho c_{66}^{0}}} \tag{9}$$

对于给定的晶片，其厚度与密度固定不变，当受力变化时，静态应变的改变导致其有效刚度系数 c_{66}^{eff} 发生改变，晶片谐振频率亦发生改变，且应变 S_r 越大谐振频率变化越明显。故可通过磁性薄膜所受磁场作用力传递到石英晶片改变其静态应变以引起谐振频率变化，实现对磁场的传感，此时可忽略表面磁性薄膜对晶片压电常数、介电常数的影响。

FeGa 薄膜所受磁场作用力 $\boldsymbol{F}$ 可计算为：

$$\boldsymbol{F}=q_m\boldsymbol{H}_{out} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{H}_{out}$ 为外施磁场强度；q_m 为薄膜磁化产生的等效磁荷。而空间闭合曲面 $\boldsymbol{S}$ 内包围的等效磁荷可表示为：

$$q_m=-\mu_0\oint_s\boldsymbol{M}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{11}$$

其中，$\boldsymbol{M}$ 为磁化强度；μ_0 为真空磁导率。

传感器在 FeGa 薄膜达到饱和磁化前，$\boldsymbol{M}$ 大小及方向随磁场变化较为复杂，难以定量分析。当磁性薄膜饱和后，磁化强度维持不变，忽略边缘效应及不均匀分布的影响，薄膜内等效磁荷保持恒值并均匀分布在 x_1 方向两侧端面。于是磁场施加的力也作用在此两端面，大小与磁场强度成正比，方向与所在端面外法向量一致。薄膜磁化曲线测量结果如图 2 所示，其饱和磁化强度 M_S 约 1.44×10^4 Gs，矫顽力 H_c 约 10.94 Oe。虽然一些硬磁材料可以提供更高的 M_S，但饱和时所需磁场强度很高，很难达到饱和磁化。而软磁材料易饱和磁化，且仍可提供较高的 M_S，故选用工艺成熟且易于加工的 FeGa 软磁材料溅射薄膜，以验证传感器原理的可行性。

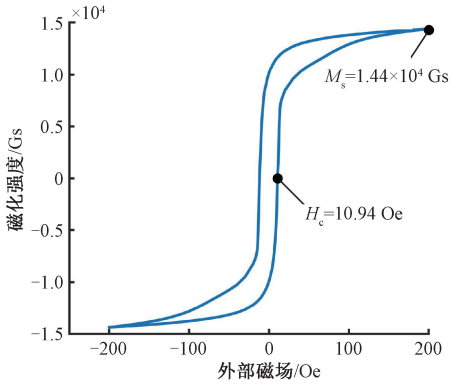


图 2 FeGa 薄膜磁滞回线

Fig. 2 The hysteresis loop of the FeGa film

利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件，对薄膜受到磁场作用力后引起的晶体应变进行仿真。模型参数如下：晶片采用软件材料库中的 IEEE 1978 标准石英；电极采用材料库中标准铜，圆心位于横向中轴线、距离纵向中轴线 3.1 mm；磁性薄膜泊松比为 0.45，杨氏模量为 60 GPa，密度 7 870 kg/m^3，位于晶片上表面正中央；固定区域位于晶片下表面的长边中部，各材料具体尺寸见表 2。受到加工工艺及材料特性的约束，沉积薄膜过厚将导致黏附性变差、甚至脱落，限制层间应变的传递，通常薄膜厚度不超过几 μm，故仿真中磁性薄膜厚度设为 1 μm。各层材料之间设置为理想结合、无传递损耗，薄膜 x_1 方向两端面施加方向相反的拉力以模拟磁场作用力。

表 2 仿真尺寸参数

Table 2 Dimension parameters in the simulation

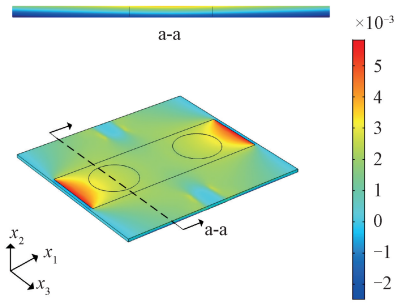
参数名称	数值/mm
L_1	12.4
L_2	12
W_1	11.4
W_2	4
h	0.27
φ	3
电极厚度	3×10^{-4}
FeGa 薄膜厚度	1×10^{-3}

计算饱和磁化后 FeGa 薄膜端面磁荷时，式(11)的有效积分面即为该端面，再结合式(10)可以得到受力大

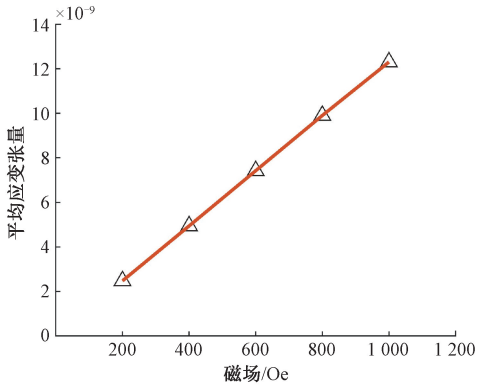
小 F 为:

$$F=\mu_0 M_S S_T H_{out} \tag{12}$$

式中:S_T 为该端面面积;H_{out} 为磁场强度大小。经过计算,薄膜磁化饱和后磁场每增大 1 Oe,端面受力约增加 4.51×10^{-7} N。图 3(a)展示了 200 Oe 磁场时,薄膜饱和后受力引起晶片正应变 S_1 的分布情况,可见距离端面越近应变越明显。剖面图 a-a 展示了晶片厚度方向上的 S_1 分布,晶片下层应变为负值意味着出现了收缩的情况,这是由于上表面薄膜端部受力产生力矩的作用,晶片两侧向下弯曲,导致上层受到拉伸的同时下层受到挤压。图 3(b)为受到不同强度磁场作用力,晶片振动区域上表面平均应变 $\overline{S_1}$ 的变化情况,该图表明应变随着外力增大而增大,且近似呈线性关系。晶片谐振频率是由整个振动区域的谐振综合得到,下层晶片应变出现负值的情况,使得谐振频率偏移与上层相反,这将削弱整体谐振频率偏移。所以可通过在晶片上、下表面均溅射磁性薄膜的方法,使下层晶片同样产生拉伸正应变,以解决该问题并增强谐振频率的偏移。



(a) 晶片应变S_1分布(Hout=200 Oe)
(a) Distribution of the quartz crystal strain S_1(Hout=200 Oe)



(b) 不同磁场下振动区域上表面平均应变 $(\overline{S_1})$
(b) The average strain $(\overline{S_1})$ on the upper surface of the vibration area under different magnetic fields

图 3　外加磁场诱导下的 FeGa 薄膜与石英晶体层间应变仿真

Fig. 3　Interlayer strain simulation of the FeGa film and quartz wafer under the induction from external magnetic fields

在层合结构中,磁性薄膜体积相对于振动单元整体来说比例很小,对 Q 值影响较小,因此若通过合适的夹持,使传感器延续石英晶片高 Q 值的特性,则可实现品质因数的改善。

谐振传感器的热噪声电压可利用 Nyquist 噪声公式计算,其均方噪声电压 v_n^2 为:

$$v_n^2=4k_BTRB \tag{13}$$

式中:k_B 为玻尔兹曼常数,T 为开尔文温度,R、B 分别为谐振传感器的等效电阻与带宽。对于谐振传感器而言,其带宽与 Q 值、中心谐振频率 f_0 的关系可表示为 $Q=f_0/B$,则式(13)可改写作:

$$v_n^2=4k_BTR\frac{f_0}{Q} \tag{14}$$

由式(14)可以看出,噪声电压与 Q 值呈反比,当其他参数恒定时,提升 Q 值可显著降低传感器的电压噪声,减小输出噪声水平,提高输出信噪比。而由噪声电压引起中心谐振频率波动 δf 为[27]:

$$\delta f=\left(\frac{k_BTBN}{2P_0}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{\alpha f_0}{Q} \tag{15}$$

式中:P_0 为谐振器的功率,N 为电路的噪声系数,α 为由谐振电路决定的系数,与晶体调制系数、耦合系数等因素有关。根据式(15)可知,Q 值越高噪声电压引起的频率波动越小。所以,对于谐振传感器而言,提高 Q 值不仅可以降低器件本身的噪声电压,还可以进一步减小由噪声电压对谐振频率造成的扰动,减小频率噪声,提升谐振传感器的测量分辨率。

2　传感器制作与实验设置

传感器设计与加工流程如图 4 所示,AT 切型石英晶片表面材料均采用磁控溅射工艺加工,步骤依次为:(Ⅰ)溅射 FeGa 薄膜,(Ⅱ)溅射氮化硅(Si_3N_4)隔离层,(Ⅲ)溅射金属 Ti 黏附层,(Ⅳ)溅射金属 Cu 电极。

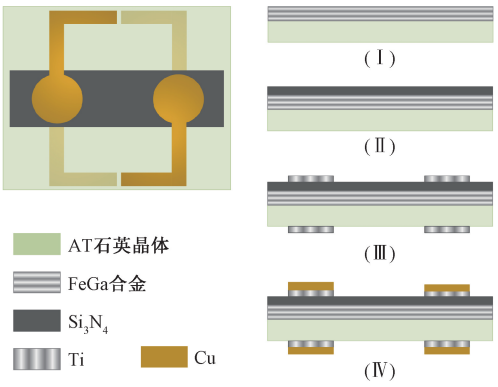


图 4　溅射流程

Fig. 4　Sputtering process

加工的样片如图 5 所示,磁性材料长度方向与石英晶体 x_1 方向(对应晶轴 X 轴)即厚度剪切方向一致。晶片固定在支架上通过引线引出电极,固定点如小圆点所示,位于晶片非溅射磁性材料侧,远离电极区域。根据能陷理论,晶体振动主要集中在电极区域,外界夹持远远离振动区域能减小对晶振边界条件的影响,以维持晶片的高 Q 值。

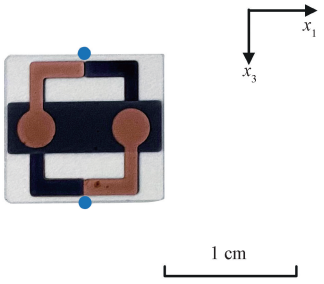


图 5 传感器实物图

Fig. 5 The photograph of the sensor

实验装置如图 6 所示,传感器被固定在铝制电磁屏蔽盒中,使用 Weyne Kerr 公司生产的 WK 6500B 阻抗分析仪测量其阻抗谱,从而获得幅值、相位、谐振频率和 Q 值等信息。静态磁场由放置在导轨上的一对高强度钕铁硼(NdFeB)永磁铁提供,可通过调节磁铁间距调整外施磁场强度,其可提供最大磁场为 1 300 Oe,不同距离磁铁产生的磁场强度通过高斯计进行标定。所有实验均在室温、常压下进行,施加磁场平行 x_1 轴。 由于薄膜磁化产生的端面磁荷极性总与所靠近的磁铁极性相反而被吸引,即使调换外界磁场方向,端面受到的磁场作用力仍然表现为拉力,对传感器测量没有影响。故实验测量时只需磁场平行薄膜长边,而不需担心左右方向问题。

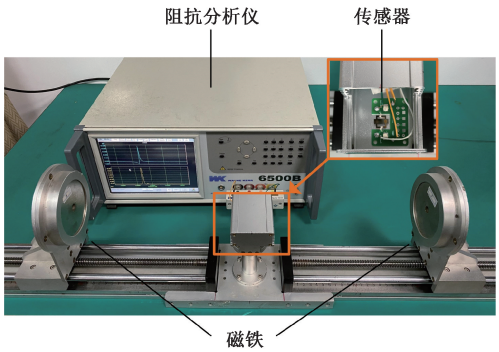


图 6 传感器实验平台

Fig. 6 Experiment platform of the sensor

3 测试结果与讨论

图 7 展示了无外加待测磁场时传感器的阻抗特性曲线。其基础谐振频率为 8.908 382 MHz,Q 值为 46 258,相比通过式(1)计算的谐振频率 8.207 5 MHz 误差约 0.7 MHz。这是因为计算时 AT 石英晶片厚度为 200 μm,但实际加工中为满足表面粗糙度要求,抛光后晶体厚度会有所降低,导致器件的谐振频率偏高,且表面溅射材料也会对谐振频率有一定的影响。该测量结果也验证了此固定方式能充分利用石英晶体高 Q 值的特性从而获得高品质因数谐振器。

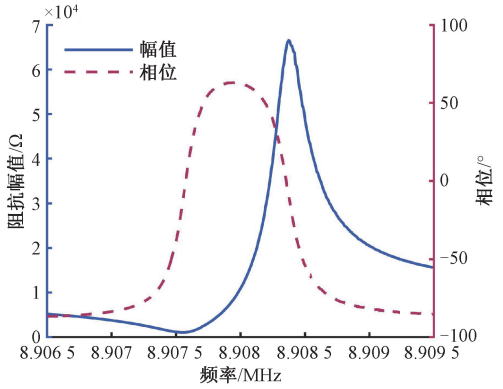


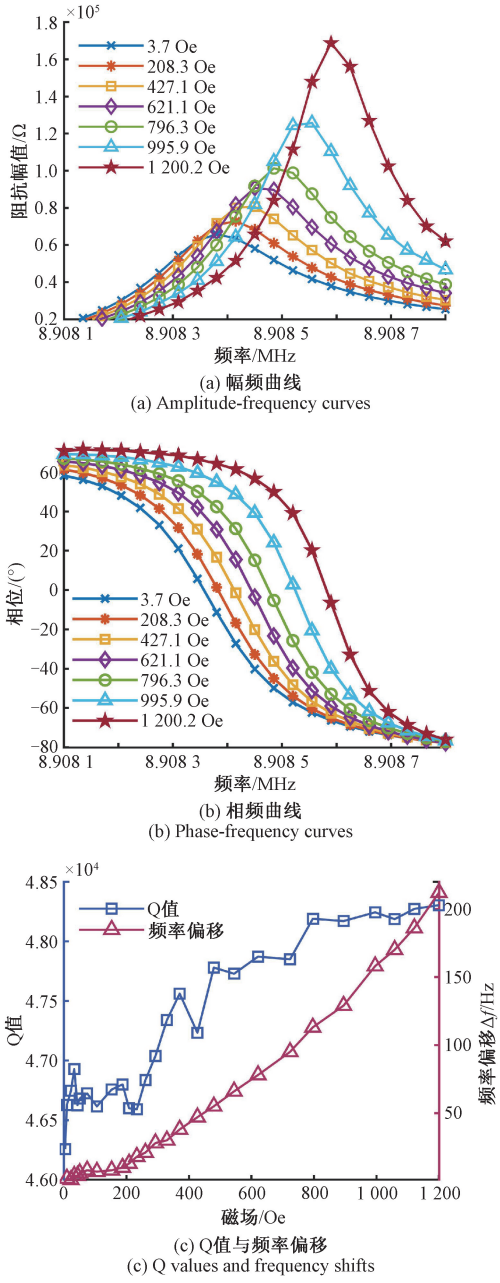
图 7 无外加待测磁场传感器阻抗特性曲线

Fig. 7 Impedance characteristic curves of the sensor without external magnetic field to be measured

图 8(a)和(b)展示了传感器在不同磁场下谐振器幅频、相频曲线变化情况。伴随磁场的增大,谐振磁场传感器的并联谐振频率逐渐右移。图 8 (c)展示了随磁场增大,传感器并联谐振频率偏移 Δf 及 Q 值的变化情况。磁场低于 200 Oe 时,磁性材料未饱和磁化,磁化强度较低,平均灵敏度不足 0.10 Hz/Oe,此时其 Q 值在(4.65~4.70)×10⁴ 区间;磁场达到 200 Oe 时,频率偏移 Δf 开始进入线性变化区间,并持续到最大测量磁场 1 200 Oe 处,整体有效测量区间高达 1 000 Oe,在该区间内传感器平均灵敏度达到 0.20 Hz/Oe。另外,由于磁性薄膜磁化由未饱和到饱和的状态转变,传感器 Q 值在 200~400 Oe 磁场区间时出现了较大的变动,但随着磁场的增大最终稳定在 4.83×10⁴ 附近。为避免未饱和磁化的影响,可增加偏置磁场使 FeGa 薄膜处于饱和磁化状态,避开低灵敏度区间。综上,AT 切型石英晶片的应用确实能够显著提升传感器 Q 值,并且设计的固定点远离振动区域,减轻晶片夹持方式对 Q 值的影响,进一步保证传感器的高品质因数。此外,还可通过晶片双面溅射 FeGa 薄膜的方式增强频率偏移效果以提高传感灵敏度。

图 9 为传感器在不同外加待测磁场下、工作在并联谐振时的功耗情况。功耗的测量方式如下:调整外加待测磁场强度,采用峰-峰值 1 V 的电压驱动,调节激励频率使其与该磁场下晶体并联谐振频率一致,测量得到此

时传感器两端电压有效值、通过电流有效值,进而计算出传感器的实际功耗。根据测量结果,传感器功耗随外磁场增大应呈下降趋势,在 3.7 Oe 磁场时取得最大功耗 P_{max} 为 7.60 μW,1 200.3 Oe 时得到最小功耗 P_{min} 为 2.96 μW,即在工作状态下功耗不足 8 μW。传感器的低功耗特性使其更适用于一些低能耗需求的测量场景,如应用于无源无线传感网络等。



(a) 幅频曲线
(a) Amplitude-frequency curves

(b) 相频曲线
(b) Phase-frequency curves

(c) Q值与频率偏移
(c) Q values and frequency shifts

图 8　传感器阻抗特性曲线、Q 值与频率偏移

Fig. 8　Impedance characteristic curves, Q values and frequency shifts of the sensor

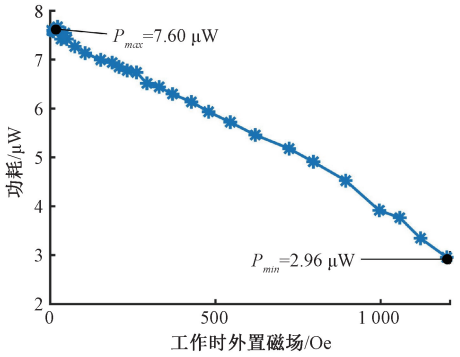


图 9　传感器功耗曲线

Fig. 9　Power consumption curve of the sensor

4　结　　论

本文利用 AT 切石英晶片和 FeGa 薄膜层合结构制作出一种谐振式静态磁场传感器。传感器利用 FeGa 薄膜磁化后受到的磁场作用力引起频率偏移而非磁致伸缩效应,因此具有更宽的磁场测量范围,达到 1 000 Oe。该磁场传感器 Q 值在(4.6~4.85)×10^4 之间,有效磁场测量范围内平均灵敏度为 0.2 Hz/Oe,功耗低于 8 μW。低内损耗、高 Q 值 AT 切型石英晶片的使用,使传感器具有很高的品质因数,有利于降低噪声水平、提高输出信噪比、提升传感分辨率,同时也将功耗维持在较低水平,使其适用于一些低能耗需求的磁场测量场景。此外,可进一步通过调整固定方式、增大磁性薄膜厚度或双面溅射磁性薄膜的方式提升传感器灵敏度。

参考文献

[1] 盛宇, 张楠, 王开友, 等. 自旋轨道矩调控的垂直磁各向异性四态存储器结构[J]. 物理学报, 2018, 67(11):201-206.
SHENG Y, ZHANG N, WANG K Y, et al. Demonstration of four-state memory structure with perpendicular magnetic anisotropy by spin-orbit torque[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(11):201-206.

[2] 王勇军, 李智, 李翔. 小型无人飞行器机动过程中航姿互补滤波算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(7):141-150.
WANG Y J, LI ZH, LI X. Research on the algorithm of attitude complementary filtering during small UAV maneuver[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7):141-150.

[3] 王勇军, 李智, 李翔. 无人机磁惯导系统中航向校正的双内积算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9):90-97.

WANG Y J, LI ZH, LI X. Dual inner product algorithm for heading calibration in magneto-inertial navigation system of UAV [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9):90-97.

[4] 刘铁凡, 肖文栋, 吴健康, 等. 基于牛顿迭代和椭球拟合的磁力和惯性传感器校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8):142-149.
LIU Y F, XIAO W D, WU J K, et al. Calibration method of magnetic and inertial sensors based on Newton iteration and ellipsoid fitting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8):142-149.

[5] ADACHI Y, OYAMA D, TERAZONO Y, et al. Calibration of room temperature magnetic sensor array for biomagnetic measurement [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7):1-6.

[6] 朱凯光, 杨建文. 基于磁电阻率法和频率域电磁法的地下水污染动态监测仿真[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12):2470-2474.
ZHU K G, YANG J W. Time-lapse simulation of contaminant groundwater monitoring using magnetometric resistivity and frequency domain electromagnetic methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12):2470-2474.

[7] LENZ J, EDELSTEIN A S. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631-649.

[8] BAHREYNI B, SHAFAI C. A Resonant micromachined magnetic field sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(9):1326-1334.

[9] HERRERA-MAY A L, LARA-CASTRO M, LÓPEZ-HUERTA F, et al. A MEMS-based magnetic field sensor with simple resonant structure and linear electrical response[J]. Microelectronic Engineering, 2015, 142: 12-21.

[10] PARK B, LI M, et al. Lorentz force based resonant MEMS magnetic-field sensor with optical readout [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 241:12-18.

[11] SUNIER R, LI Y, KIRSTEIN K U, et al. Resonant magnetic field sensor with frequency output [C]. 18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2005:339-342.

[12] ZHANG W, LEE E Y. Frequency-based magnetic field sensing using Lorentz force axial strain modulation in a double-ended tuning fork[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 211:145-152.

[13] LI M, NITZAN S, HORSLEY D A. Frequency-modulated lorentz force magnetometer with enhanced sensitivity via mechanical amplification [J]. IEEE Electron Device Letters, 2015, 36(1):62-64.

[14] OSIANDER R, ECELBERGER S A, GIVENS R B, et al. A microelectromechanical-based magnetostrictive magnetometer [J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(19):2930-2931.

[15] GOJDKA B, JAHNS R, MEURISCH K, et al. Fully integrable magnetic field sensor based on delta-E effect[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(22): 223502.

[16] HUI Y, NAN T X, SUN N X, et al. MEMS resonant magnetic field sensor based on an AlN/FeGaB bilayer nano-plate resonator[C]. 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2013:721-724.

[17] HUI Y, NAN T, SUN N X, et al. High resolution magnetometer based on a high frequency magnetoelectric MEMS-CMOS oscillator [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(1): 134-143.

[18] 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.

[19] 刘力, 刘国, 刘婉, 等. 基于磁致伸缩多层膜的磁声表面波传感器[J]. 压电与声光, 2019, 041(3):335-339,343.
LIU L, LIU G, LIU W, et al. Magnetic surface acoustic wave sensor based on magnetostrictive multilayered films[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(3):335-339,343.

[20] KIM H J, WANG S, XU C, et al. Piezoelectric/magnetostrictive MEMS resonant sensor array for in-plane multi-axis magnetic field detection[C]. 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2017:109-112.

[21] BIAN L, WEN Y, LI P, et al. Magnetostrictive stress induced frequency shift in resonator for magnetic field sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 247:453-458.

[22] BIAN L, WEN Y, WU Y, et al. A resonant magnetic field sensor with high quality factor based on quartz crystal resonator and magnetostrictive stress coupling[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(6):2585-2591.

[23] LEE P C Y, WANG Y S, MARKENSCOFF X. High-frequency vibrations of crystal plates under initial stresses[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1975, 57(1):95-105.

[24] LEE P C Y, WANG Y S, MARKENSCOFF X. Nonlinear effects of initial bending on the vibrations of crystal plates[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 59(1):90-96.

[25] MIHIR S P. Nonlinear behavior in quartz resonators and its stability [D]. New Jersey: Rutgers, The State University of New Jersey, 2008.

[26] YONG Y, CHEN J. Effects of initial nonlinear strains and nonlinear elastic constants in force-frequency and acceleration sensitivity of quartz resonators [C]. 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), 2016:1-2.

[27] POUND R V. Electronic frequency stabilization of microwave oscillators [J]. Review of Scientific Instruments, 1946, 17(11):490-505.

作者简介

张家泰,2018 年于山东大学获得学士学位,现为上海交通大学硕士研究生,主要研究方向为磁场传感器与仪器。

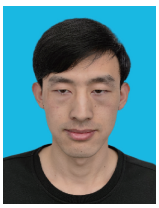
E-mail:jiatai. zhang@ sjtu. edu. cn

Zhang Jiatai received his B. Sc. degree from Shandong University in 2018. He is currently an M. Sc. candidate at Shanghai Jiao Tong University. His main research interest includes magnetic field sensor and instrumentation.

文玉梅(通信作者),1984 年于北京航空航天大学电子工程系获得学士学位,1987 年于中国运载火箭技术研究院获得硕士学位,1997 年于重庆大学获得博士学位。现为上海交通大学电子信息与电气工程学院教授,博士生导师。主要研究方向为信息获取与处理、传感器与仪器、能量采集。

E-mail:yumei. wen@ sjtu. edu. cn

Wen Yumei (Corresponding author) received her B. Sc. degree in Department of Electrical Engineering, Beihang University in 1984, received her M. Sc. degree in 1987 from China Academy of Launch Vehicle Technology, received her Ph. D. degree in 1997 from Chongqing University. Now, she is a professor in School of Electronic Information and Electrical Engineering at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interest includes signal acquisition and processing, sensors and instrumentation, and energy-harvesting.



鲍祥祥,2019 年于中国科学技术大学获得学士学位,现为上海交通大学硕士研究生,主要研究方向为磁场传感与仪器。

E-mail:bxx2019@ sjtu. edu. cn

Bao Xiangxiang received his B. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 2019. He is currently an M. Sc. candidate at Shanghai Jiao Tong University. His main research interest includes magnetic field sensing and instrumentation.