

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312253

# FeGa 膜/AT 切石英晶片双面复合蝶形 谐振磁场传感器\*

杨晓朋,文玉梅,陈冬雨,李 平

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

**摘要:**蝶形磁致伸缩膜由于磁汇聚,其中心区域的磁致伸缩应变增强,但是和矩形 AT 切石英晶片复合时,磁膜耦合至矩形晶片电极区的应变会向周围无磁膜区域扩散,降低应变对晶片厚度剪切振动的作用,降低磁场传感器灵敏度。提出 AT 切石英晶片和 FeGa 膜形状一样的蝶形谐振磁场传感器,蝶形晶片可以将蝶形磁膜增强的晶片应变汇聚至晶片电极区,以提高传感器灵敏度。仿真结果预测,在 23.8~118.9 Oe 的磁场范围内,蝶形结构的灵敏度为蝶形磁膜/矩形晶片结构的 3.73 倍。通过微机械加工,制作了蝶形器件,对实际器件测试的结果表明,在 76.4~117 Oe 的线性区间内,蝶形传感器的灵敏度可达 -29.08 Hz/Oe。

**关键词:** 谐振磁场传感器; AT 切石英; FeGa 膜; 蝶形结构

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

## Butterfly-shaped FeGa film/AT-cut quartz wafer double-sided composite resonant magnetic field sensor

Yang Xiaopeng, Wen Yumei, Chen Dongyu, Li Ping

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

**Abstract:** Due to magnetic convergence, the magnetostrictive strain in the central region of a butterfly-shaped magnetostrictive film is enhanced. However, when the butterfly-shaped magnetostrictive films are combined with the rectangular AT-cut quartz wafer, the strain in the electrode region of the rectangular wafer spreads out to the surrounding non-magnetic film region and thus reduces the effect of the strain on the thickness-shear vibration of the wafer and consequently reduces the sensitivity of magnetic field sensor. In this paper, a butterfly-shaped resonant magnetic field sensor with the same shape of AT-cut quartz wafer as the FeGa films sandwiching the wafer is proposed. The butterfly-shaped sandwiched composite can concentrate the strain enhanced by the butterfly-shaped film into the electrode region of the wafer to improve the sensor sensitivity. The simulation results predict that the sensitivity of the butterfly-shaped structure is 3.73 times that of the butterfly-shaped magnetic film/rectangular wafer structure. By MEMS fabrication, we developed the butterfly-shaped sensor, and the characterization of the actual device shows that the sensitivity can reach -29.08 Hz/Oe in the linear range of 76.4~117 Oe.

**Keywords:** resonant magnetic field sensor; AT-cut quartz crystal; FeGa film; butterfly-shaped structure

## 0 引 言

磁场传感器被广泛应用于无损检测<sup>[1-2]</sup>、磁存储<sup>[3]</sup>、电流监测<sup>[4]</sup>、航空航天<sup>[5]</sup>、生物医学<sup>[6]</sup>等领域。采用微机电系统(microelectromechanical systems, MEMS)技术的谐振磁场传感器具备 Q 值高、微型化、数字信号输出等优

势<sup>[7]</sup>。谐振磁场传感器的磁敏感材料将感知的外界磁场以力<sup>[8-10]</sup>、应变<sup>[11-13]</sup>等形式传递给谐振器,实现谐振器的谐振参数变化,通过检测振动信号实现磁场测量。AT 切石英因其 Q 值高、零温度系数、其厚度剪切振动对力学边界条件变化敏感而被广泛用作谐振器。通过在石英晶片表面复合磁致伸缩材料形成磁电复合结构,磁致伸缩材料在磁场作用下产生的应力应变通过层间耦合传递至

收稿日期:2023-12-07 Received Date: 2023-12-07

\* 基金项目:国家自然科学基金(62220106010)项目资助

石英晶片,改变石英晶片的振动边界条件,引起石英谐振频率偏移,从而实现磁场传感。

文献[14]在双端音叉(double-ended tuning fork, DETF)双面复合 FeGa(铁镓合金)薄板。FeGa 薄板受到的磁致伸缩力通过机械耦合拉伸 DETF 两端改变其谐振系数。由于磁性材料采用块体,且磁层与 DETF 两端通过含玻璃胶的石英晶片粘接耦合,不仅降低了应力传递效率,传感器的灵敏度仅为 3.5 Hz/Oe,而且粘接耦合不利于传感器微加工制作,增加了传感器加工难度。此外,传感器灵敏度依赖 FeGa 和 DETF 的体积比,文献中二者的体积比已超过 2:1,进一步提高 FeGa 板的体积会降低传感器 Q 值。

文献[15]采用 Metglas ( $\text{Fe}_{85}\text{B}_5\text{Si}_{10}$ )膜/石英晶片单面复合的矩形谐振磁场传感结构,利用 Metglas 膜的磁致伸缩应变使石英晶片弯曲,引起石英晶片频移。磁膜/晶片厚度比为 3:190 时,该传感器灵敏度为 11 Hz/Oe。文献[16]将磁膜/晶片厚度比优化为 1:15,但受限于矩形传感结构,晶片电极区应变仍较低,灵敏度仅达到 88.3 Hz/Oe。通过提高磁膜/晶片厚度比虽然可以提高灵敏度,但是石英晶片的载荷增大会降低传感器 Q 值。

文献[17]利用单面复合的 FeGa 薄膜两端磁化后受到的磁场作用力使晶片上层受到拉伸的同时下层受到压缩,从而改变石英晶片谐振频率。由于磁场作用力微弱,且晶片上下层应变相反,削弱了整体的平均应变,导致该传感器灵敏度仅为 0.2 Hz/Oe。

文献[18]采用 1  $\mu\text{m}$  厚的蝶形 FeGa 膜与 200  $\mu\text{m}$  厚的矩形石英晶片双面复合的磁场传感结构。蝶形磁膜磁化时梯形端面上的磁荷可以在磁膜中心区域产生附加场,削弱退磁场,提高磁膜应变,进而提高晶片电极区应变。与单面复合相比,双面复合磁膜可以进一步提高晶片应变,提高传感器灵敏度,灵敏度达 -0.82 Hz/Oe。采用矩形石英晶片时,晶片电极区应变会向周围无磁膜区域传递,会削弱晶片电极区应变,降低应变对厚度剪切振动的影响,降低传感器灵敏度。

针对上述问题,本文提出 AT 切石英晶片和磁致伸缩膜形状一样的双面复合蝶形磁场传感器。蝶形晶片的收束形状具有应变汇聚效果,可以将蝶形磁膜传递至晶片的磁致应变全部汇聚至中间矩形区域,增强电极区应变和谐振频率偏移,提高传感器灵敏度。

## 1 传感原理

提出的蝶形磁场传感结构如图 1 所示。该传感结构采用三明治结构,蝶形晶片上下表面复合相同磁膜。圆形电极位于结构中心,电极引线分别从左右两侧引出,电极对应的晶片区域称为晶片电极区。 $x_1$  方向为晶片厚度

剪切振动方向,即为传感结构的磁敏感方向; $x_2$  方向为厚度方向;坐标原点位于传感结构的几何中心。

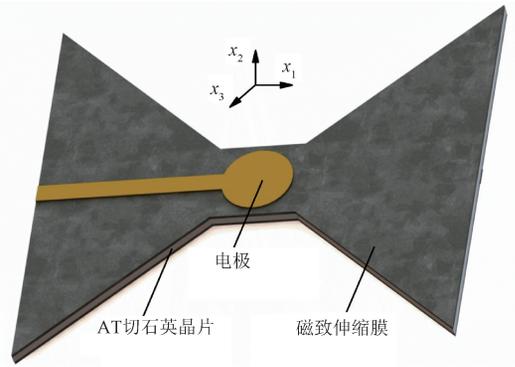


图 1 传感结构示意图

Fig. 1 The sensing structure

### 1.1 磁场传感机理

当沿厚度方向的有效二阶弹性系数,即有效厚度剪切弹性系数  $C_{66}^0$  沿厚度方向为常值时,AT 切石英晶片厚度剪切振动的运动方程为:

$$C_{66}^0 \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x_2^2} = \rho_q \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: $\rho_q$  为 AT 切石英晶片的密度, $\mathbf{u}$  为  $x_1$  方向的剪切位移, $x_2$  为厚度方向坐标, $t$  为时间。为简化书写,本文方程中的各张量下标均采用单下标形式。

利用石英晶片波速  $v = \sqrt{C_{66}^0/\rho_q} = \lambda f_0$  ( $\lambda$  为波长),以及上下表面之间形成驻波的条件  $h_q = \lambda/2$ , 可以获得 AT 切石英晶片厚度剪切振动的基础谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2h_q} \sqrt{\frac{C_{66}^0}{\rho_q}} \quad (2)$$

式中: $h_q$  为石英晶片的厚度。

由于石英晶片具有非线性应力应变关系<sup>[19]</sup>,在三阶弹性系数  $C_{ijk}$  ( $i, j, k = 1, 2, \dots, 6$ ) 的作用下,有效二阶弹性系数  $C_{ij}^0$ , 包括有效厚度剪切弹性系数  $C_{66}^0$ , 会随着应变  $S_k$  的改变而改变,表达式为:

$$C_{ij}^0 = C_{ij} + 0.5 \sum_{k=1}^6 C_{ijk} S_k \quad (3)$$

式中: $C_{ij}$ 、 $C_{ijk}$  分别为石英晶片的二阶、三阶弹性系数。联合式(2)、(3)可得,当 AT 切石英晶片厚度剪切振动时,在应变  $S_k$  作用下,与无应变状态相比晶片的谐振频率偏移为:

$$\Delta f = \frac{1}{2h_q} \left( \sqrt{\frac{C_{66} + 0.5 \sum_{k=1}^6 C_{66k} S_k}{\rho_q}} - \sqrt{\frac{C_{66}^0}{\rho_q}} \right) \quad (4)$$

由于应变  $S_k$  远小于 1,因此式(4)可以变为:

$$\Delta f \approx \frac{\sum_{k=1}^6 C_{66k} S_k}{8h_q \sqrt{\rho_q C_{66}^0}} \quad (5)$$

可以看出,AT切石英晶片的谐振频率偏移是各应变分量 $S_k$ 共同作用引起的。在晶片厚度一定时,提高AT切石英晶片的应变 $S_k$ 可以提高石英晶片的谐振频率偏移。

AT切石英晶片的 $C_{665}$ 、 $C_{666}$ 为零,因此应变 $S_5$ 、 $S_6$ 对谐振频率偏移无贡献。 $C_{661}$ 数值的最大,当各应变 $S_k$ 的数值相同时,应变 $S_1$ 对谐振频率偏移的贡献最大。仅考虑应变 $S_1$ 时,式(5)可以变为:

$$\Delta f \approx \frac{C_{661}S_1}{8h_q\sqrt{\rho_q C_{66}}} \quad (6)$$

当AT切石英晶片的 $x_1$ 轴与磁场方向相同时,磁膜的主应变为应变 $S_1$ ,此时耦合至晶片的主应变也为应变 $S_1$ ,引起的谐振频率偏移最大。

如果不考虑重力,晶片上下表面的磁膜同时作用,不会使晶片弯曲,晶片的有效厚度剪切弹性系数 $C_{66}^0$ 沿厚度方向为常值。然而传感器在受到沿厚度方向的重力分量下,晶片弯曲使应变沿厚度方向不为常值,随厚度坐标 $x_2$ 变化,导致晶片有效厚度剪切弹性系数 $C_{66}^0$ 沿厚度方向不为常值。根据式(3),在应变 $S_k(x_2)$ 作用下,有效厚度剪切弹性系数 $C_{66}^0(x_2)$ 为:

$$C_{66}^0(x_2) = C_{66} + 0.5 \sum_{k=1}^6 C_{66k} S_k(x_2) \quad (7)$$

当有效厚度剪切弹性系数 $C_{66}^0$ 沿厚度方向不为常值时,二阶线性偏微分方程式(1)不能准确描述AT切石英晶片的厚度剪切振动,应写为:

$$\frac{\partial \left( C_{66}^0(x_2) \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x_2} \right)}{\partial x_2} = \rho_q \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (8)$$

因此晶片应变沿厚度方向不为常值时,晶片的实际谐振频率会与式(2)计算结果不同,存在一定偏差;且晶片应变沿厚度的变化越大,实际的谐振频率与式(2)的计算结果偏差越大。进而使实际的谐振频率偏移与式(4)的计算结果存在一定偏差。

## 1.2 蝶形晶片磁致伸缩应变

为验证提出的蝶形传感结构能够提高晶片电极区应变,利用多物理场仿真软件COMSOL Multiphysics对磁致伸缩膜磁化产生的磁致伸缩应变引起的AT切石英晶片应变进行有限元仿真。

常用的磁致伸缩材料主要有Metglas、NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、Terfenol-D、FeGa等。Metglas<sup>[20]</sup>磁化率高,易磁化饱和,但是磁致伸缩系数太小,仅为 $27 \times 10^{-6}$ 。NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>[21]</sup>具有良好的机械性能且易磁化,但是磁致伸缩系数太小,仅为 $40 \times 10^{-6}$ 。Terfenol-D<sup>[22]</sup>的磁致伸缩系数最大,高达 $1400 \times 10^{-6}$ ,但是其延展性差,易脆裂,导致机电耦合系数低。本文选用的FeGa合金<sup>[23-24]</sup>具有磁致伸缩系数较大,可达 $350 \times 10^{-6}$ 、矫顽力低、居里温度高(675℃)、机械

性能良好的优点。

根据江阴市天盛光电高科有限公司生产的商用 $12.4 \text{ mm} \times 11.4 \text{ mm} \times 200 \text{ }\mu\text{m}$ 矩形晶片确定仿真尺寸。两种传感结构均采用蝶形磁膜,蝶形磁膜和蝶形晶片的整体长宽为 $12.4 \text{ mm} \times 11.4 \text{ mm}$ ,中间矩形长宽为 $2.4 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$ ,矩形晶片长宽为 $12.4 \text{ mm} \times 11.4 \text{ mm}$ 。两种结构的晶片厚度均为 $200 \text{ }\mu\text{m}$ ,磁膜厚度均为 $1 \text{ }\mu\text{m}$ ,电极尺寸均为 $\Phi 2 \text{ mm} \times 0.3 \text{ }\mu\text{m}$ 。AT切石英晶片、电极和FeGa薄膜的材料参数与文献[18]一致。利用亥姆霍兹线圈为传感结构提供沿 $x_1$ 方向的均匀静态直流磁场。

### 1) 晶片应变汇聚

为分析蝶形晶片对电极区应变的汇聚作用,通过在蝶形晶片和矩形晶片右侧端面施加均匀拉力在晶片内部产生应变,模拟磁膜的磁致伸缩应变通过层间耦合引起的晶片应变,晶片应变大小与在右侧端面施加的拉力值正相关。图2为在右侧端面施加50 mN的均匀拉力时,晶片应变 $S_1$ 分布。可以看出,蝶形晶片应变显著高于矩形晶片。矩形晶片电极区平均应变 $\bar{S}_1$ 约为 $0.209 \times 10^{-6}$ ,蝶形晶片电极区平均应变 $\bar{S}_1$ 约为 $0.921 \times 10^{-6}$ ,比蝶形晶片提高约340.7%。结果表明,蝶形晶片的收束形状实现了晶片应变汇聚,可以显著提高晶片电极区的平均应变 $\bar{S}_1$ 。

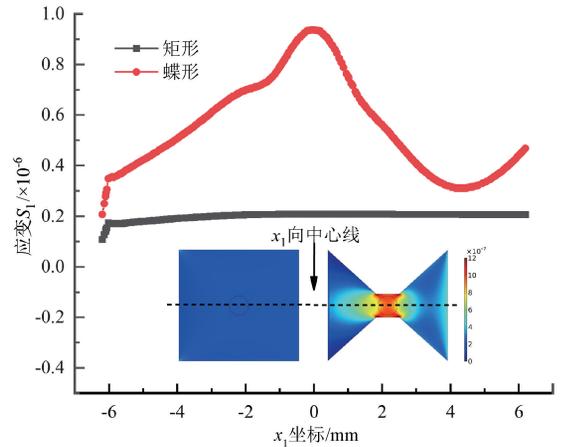


图2  $x_1$ 向中心线上应变 $S_1$ 分布

Fig. 2 The strain  $S_1$  distribution on the  $x_1$  center line

仿真在50 Oe磁场,磁膜和晶片双面复合时,蝶形结构和蝶形磁膜/矩形晶片结构中晶片内部应变 $S_1$ 分布,结果如图3所示。可以看出,两种结构的晶片 $x_1$ 向中心线上应变 $S_1$ 均呈拱形分布。蝶形磁膜/矩形晶片结构的晶片电极区平均应变 $\bar{S}_1$ 约为 $0.243 \times 10^{-6}$ ,蝶形结构的晶片电极区平均应变 $\bar{S}_1$ 约为 $0.726 \times 10^{-6}$ ,比蝶形磁膜/矩形晶片结构提高约198.8%。结果表明,在50 Oe磁场下,与蝶形磁膜/矩形晶片结构相比,蝶形结构在晶片的

应变汇聚作用下,可以提高晶片电极区平均应变  $\bar{S}_1$ , 提高传感器的谐振频率偏移。

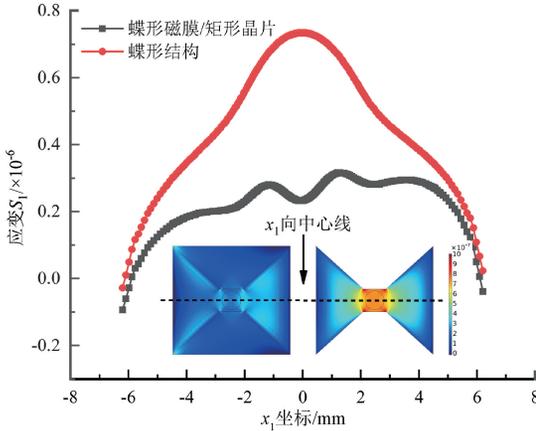


图3 两种结构的  $x_1$  向中心线上应变  $S_1$  分布  
Fig. 3 The strain  $S_1$  distribution on the  $x_1$  center line of two structures

当晶片应变沿厚度方向为常值时,晶片电极区应变  $S_1$  可以采用平均应变  $\bar{S}_1$  表示,则由式(6)可得,磁场传感器的灵敏度  $S_H$  为:

$$S_H = \frac{d\Delta f}{dH} = \frac{C_{661}}{8h_q \sqrt{\rho_q C_{66}}} \frac{d\bar{S}_1}{dH} \quad (9)$$

传感器的灵敏度与晶片电极区平均应变  $\bar{S}_1$  随磁场变化的斜率正相关,因此对不同结构的晶片电极区平均应变  $\bar{S}_1$  随外加磁场变化进行有限元仿真,结果如图4所示。可以看出,在0~350 Oe的磁场范围内,与蝶形磁膜/矩形晶片结构相比,蝶形结构能有效提高晶片电极区平均应变  $\bar{S}_1$ ,从而增大谐振频率偏移。两种传感结构的晶片电极区平均应变  $\bar{S}_1$  均随磁场非线性变化,随着磁场的增大,磁膜逐渐饱和和磁化,斜率逐渐减小。在23.8~118.9 Oe的磁场范围内,晶片电极区平均应变  $\bar{S}_1$  随磁场迅速变化且线性度较好,对该区间内晶片电极区平均应变  $\bar{S}_1$  随磁场变化线性拟合,结果如图4插图所示。在选定的线性区间内,蝶形磁膜/矩形晶片结构的晶片电极区平均应变  $\bar{S}_1$  随磁场变化的斜率为  $0.0063 \times 10^{-6}/\text{Oe}$ ;蝶形结构的晶片电极区平均应变  $\bar{S}_1$  随磁场变化的斜率为  $0.0235 \times 10^{-6}/\text{Oe}$ 。将仿真结果代入式(9)中计算可得,在选定的线性区间内,蝶形磁膜/矩形晶片结构的灵敏度为  $-0.09 \text{ Hz/Oe}$ ;蝶形结构的灵敏度为  $-0.34 \text{ Hz/Oe}$ ,为蝶形磁膜/矩形晶片结构灵敏度的3.73倍。结果表明,在23.8~118.9 Oe的线性区间内,与蝶形磁膜/矩形晶片结构相比,蝶形结构可以显著提高传感器的灵敏度。

## 2) 晶片厚度方向应变分布

为分析重力引起的弯曲对晶片应变沿厚度方向分布的影响,仿真不同结构的传感器在50 Oe磁场下,无重

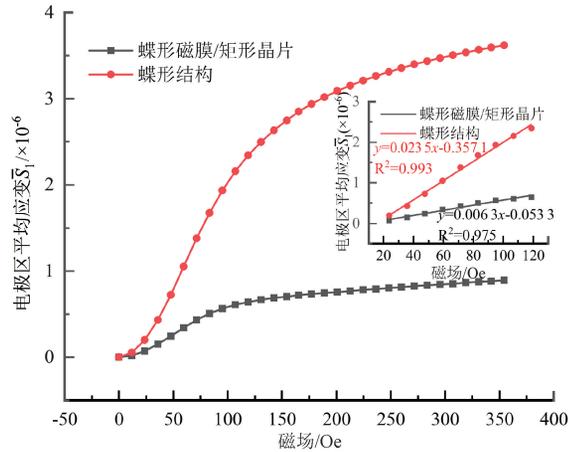


图4 平均应变  $\bar{S}_1$  随磁场变化曲线

Fig. 4 The average strain  $\bar{S}_1$  as a function of the magnetic field

力、重力沿晶片厚度  $x_2$  向(水平放置)和重力沿晶片宽度  $x_3$  向(垂直放置)时,晶片  $x_2$  向中心线上应变  $S_1$  沿厚度方向分布,结果如图5所示。结果表明,在无重力下,晶片上下表面的磁膜同时作用,传感器结构不发生弯曲,因此晶片应变  $S_1$  沿厚度方向为常值;当传感器水平放置,重力沿晶片  $x_2$  向时,晶片向厚度  $x_2$  向弯曲,使晶片应变  $S_1$  沿厚度  $x_2$  向不为常值,随厚度坐标  $x_2$  变化;当传感器垂直放置,重力沿晶片  $x_3$  向时,晶片向宽度  $x_3$  向弯曲,但是不会影响晶片应变  $S_1$  沿厚度  $x_2$  向的分布,晶片应变  $S_1$  沿厚度  $x_2$  向仍为常值。因此传感器不考虑重力或垂直放置时,沿厚度  $x_2$  向的有效二阶弹性系数为常值,AT切石英晶片的厚度剪切振动可以被二阶线性偏微分方程式(1)准确描述,实际谐振频率应与式(2)计算结果一致;当传感器水平放置时,沿厚度  $x_2$  向的有效二阶弹性系数不为常值,实际谐振频率与式(2)计算结果之间存在一定偏差。

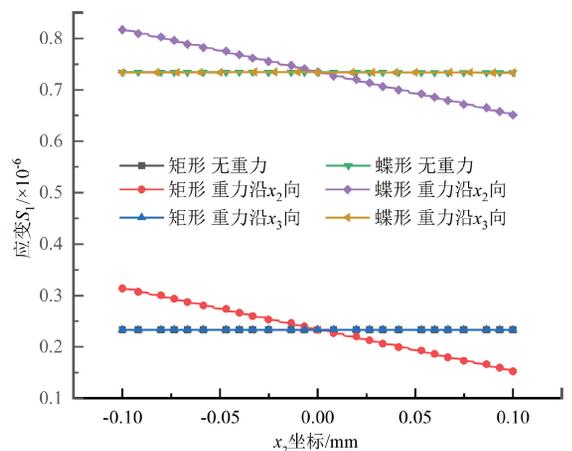


图5  $x_2$  向中心线上应变  $S_1$  分布

Fig. 5 The strain  $S_1$  distribution on the  $x_2$  center line

仿真不同结构在沿厚度  $x_2$  向的重力下,晶片  $x_2$  向中心线应变  $S_1$  随厚度的变化率  $a(H)$  随磁场的变化,结果如图6所示。可以看出,在0~350 Oe区间内,蝶形结构的  $a(H)$  高于蝶形磁膜/矩形晶片结构。在23.8~118.9 Oe区间内,  $a(H)$  随磁场迅速变化且线性度较好,对该区间内  $a(H)$  随磁场变化线性拟合,结果如图6插图所示。在线性区间内,蝶形磁膜/矩形晶片结构的  $a(H)$  随磁场变化的斜率为  $0.000\ 198 \times 10^{-6}/\text{mm}/\text{Oe}$ ;蝶形结构的  $a(H)$  随磁场变化的斜率为  $0.000\ 798 \times 10^{-6}/\text{mm}/\text{Oe}$ ,为蝶形磁膜/矩形晶片结构的4.03倍。结果表明,在沿厚度  $x_2$  向的重力下,蝶形结构弯曲在晶片电极区产生的挠度集中可以显著提高晶片  $a(H)$  随磁场的变化,因此与蝶形磁膜/矩形晶片传感器相比,蝶形传感器的实际灵敏度与式(9)的计算结果偏差更大。

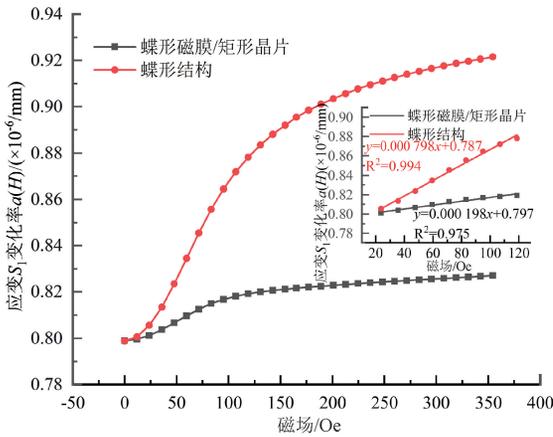


图6 在沿厚度  $x_2$  向的重力下,  $a(H)$  随磁场变化曲线  
Fig. 6 The changes of  $a(H)$  as a function of the magnetic field under gravity along the  $x_2$

## 2 传感器制备与实验装置

为验证蝶形结构能够提高磁膜/AT切石英晶片复合的磁场传感器灵敏度,采用微机械加工,制备了传感器实物器件。传感器尺寸与仿真尺寸一致。采用飞秒激光将200  $\mu\text{m}$ 厚的矩形晶片切割为蝶形晶片,并采用磁控溅射工艺在蝶形晶片表面溅射薄膜和电极。

传感器静态性能测试的实验装置如图7所示。传感器通过弹簧探针双端夹持固定在电路板上并放置在亥姆霍兹线圈中心。电流源F2030给亥姆霍兹线圈提供直流电,在线圈中心产生沿石英晶片  $x_1$  轴方向的均匀静态磁场,通过调节线圈中电流强度实现磁场强度调控。高斯计用于监测传感器周围磁场强度。阻抗分析仪WK6500B用于测量传感器的导纳特性。电脑可以通过上位机软件程控电流源和阻抗分析仪,方便测试。

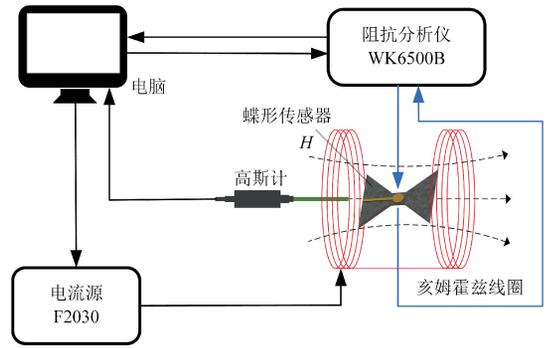


图7 传感器静态性能测试实验装置  
Fig. 7 Experiment platform of the sensor static performance

## 3 测试结果与讨论

### 3.1 磁膜磁性能表征

磁控溅射磁膜时,真空度、氩气流量、靶极距等因素会对磁膜磁性能产生影响,因此首先对溅射的FeGa磁膜进行磁性能表征,FeGa膜的磁化曲线如图8所示,图8插图作为传感器实物图。可以看出,其矫顽力  $H_c$  为14.2 Oe,饱和磁化强度  $M_s$  为1.444 T。结果表明,溅射的FeGa膜具有良好的磁性能,能快速响应磁场变化。

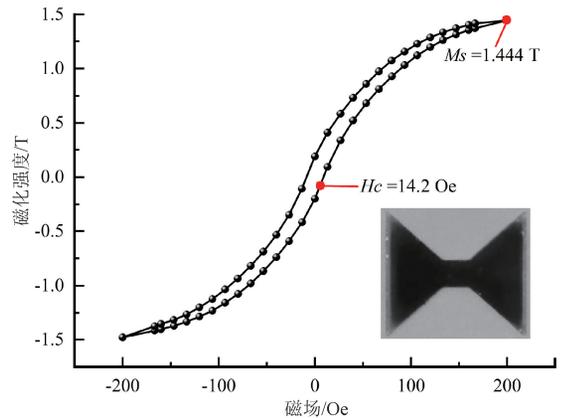


图8 FeGa磁化曲线  
Fig. 8 The magnetization curve of the FeGa

### 3.2 传感器静态性能测试

图9为无外加磁场时,水平放置的蝶形传感器的导纳特性曲线。传感器串联谐振频率为8.962 2 MHz,高于有限元仿真结果8.051 5 MHz,这是因为抛光后的AT切石英晶片的实际厚度低于200  $\mu\text{m}$ ,且磁膜和电极溅射过程中会产生薄膜固有应力<sup>[23]</sup>。传感器的Q值为474,低于有限元仿真结果5 926,这是由于石英表面负载磁膜改变了晶片振动边界条件降低其Q值,且受到加工工艺的限制,实际加工的蝶形晶片为非对称蝶形,磁控溅射沉积的磁膜表面不平整度都会导致Q值的降低。

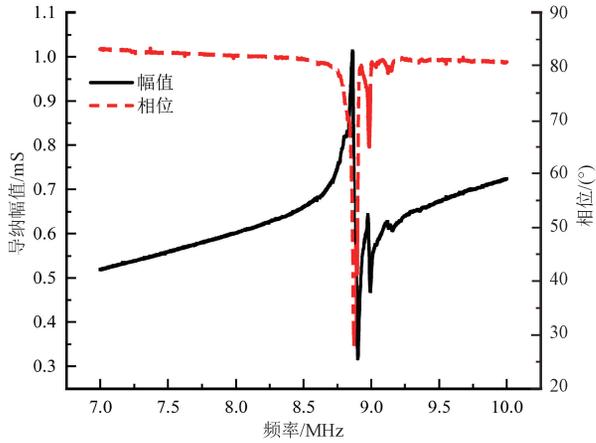


图9 无磁场时,水平放置的蝶形传感器导纳特性曲线  
Fig. 9 Admittance characteristic curves of horizontally placed butterfly-shaped sensor without magnetic field

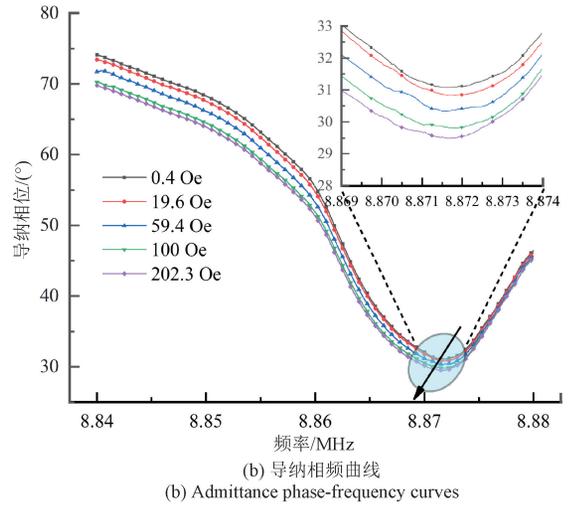
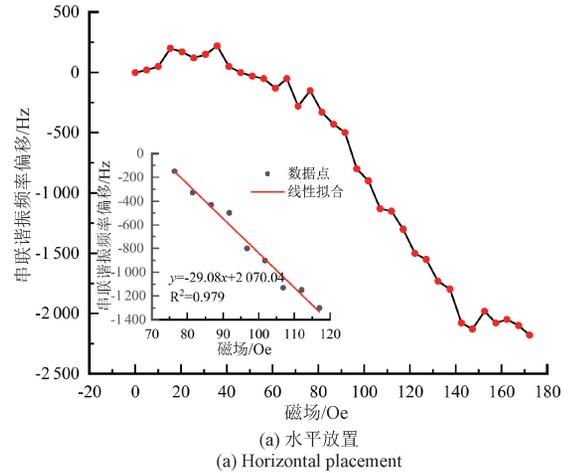


图10 传感器导纳特性曲线

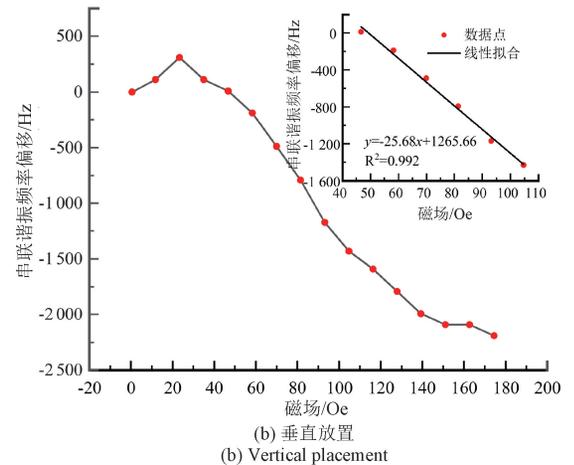
Fig. 10 Admittance characteristic curves

图10(a)和(b)分别为不同磁场下,水平放置的传感器导纳幅频曲线和相频曲线的变化情况。可以看出,随着磁场的增大,幅频曲线和相频曲线均逐渐左移,传感器的谐振频率逐渐减小,这是因为随着外加磁场的增大,FeGa薄膜在外加磁场作用下产生的磁致伸缩应变增大,通过层间耦合传递至晶片电极区的应变增大,使传感器的谐振频率偏移增大。该结果表明,设计的磁膜/AT切石英晶片双面复合的蝶形传感器对磁场敏感,可以实现磁场测量。

图11(a)和(b)分别为传感器水平放置和垂直放置时,蝶形传感器的串联谐振频率偏移随磁场变化曲线及选定的工作区间内的线性拟合结果。可以看出传感器串联谐振频率偏移随磁场先增大后减小,这是由于FeGa膜的磁致伸缩应变随磁场非线性变化。当传感器水平放置时,在76.4~117 Oe范围内,FeGa膜的磁致伸缩应变随磁场的增大而迅速增大,谐振频率偏移随磁场变化速率



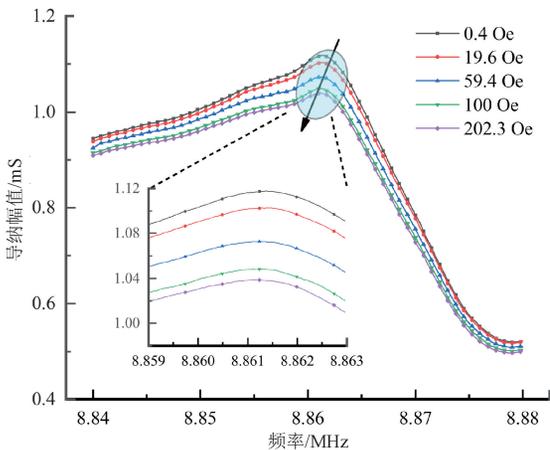
(a) 水平放置  
(a) Horizontal placement



(b) 垂直放置  
(b) Vertical placement

图11 串联谐振频率偏移曲线

Fig. 11 Series resonance frequency shift curves



(a) 导纳幅频曲线  
(a) Admittance amplitude-frequency curves

最大且线性度较好,因此选择该区间为传感器的工作区间,对76.4~117 Oe范围内谐振频率偏移随磁场变化线性拟合,结果如图11(a)插图所示,线性拟合表达式为 $\Delta f = -29.08H + 1965.71$  (决定系数  $R^2 = 0.979$ ),传感器的灵敏度可达 $-29.08 \text{ Hz/Oe}$ 。如图11(b)所示,当传感器垂直放置时,在选定的46.6~104.7 Oe工作区间内,线性拟合结果为: $\Delta f = -25.68H + 1265.66$  (决定系数  $R^2 = 0.992$ ),传感器的灵敏度为 $-25.68 \text{ Hz/Oe}$ 。实验结果表明,当传感器水平放置和垂直放置时,传感器的灵敏度存在一定偏差,可以归结为不同方向上的重力使晶片应变 $S_1$ 沿厚度 $x_2$ 向分布不同引起的。

当传感器水平放置或垂直放置时,传感器的实测灵敏度均远高于仿真预测的 $-0.34 \text{ Hz/Oe}$ 。根据文献[15],利用式(9)计算可得其提出的磁场传感器预测灵敏度仅为 $0.19 \text{ Hz/Oe}$ ,而实测灵敏度为 $11 \text{ Hz/Oe}$ ,为预测灵敏度的56.9倍;此外,文献[18]提出的磁场传感器预测灵敏度仅为 $-0.09 \text{ Hz/Oe}$ ,而实测灵敏度为 $-0.82 \text{ Hz/Oe}$ ,为预测灵敏度的9.1倍,均远高于仿真预测结果。结合本文提出的蝶形传感器实测灵敏度高于预测灵敏度,我们认为石英晶片的非线性应力应变关系引起晶片谐振频率偏移无法准确描述磁膜通过层间耦合使晶片应变而引起的谐振频率偏移。

根据文献[18],在磁致伸缩材料和磁膜厚度不变时,降低晶片厚度可以提高磁膜/AT切石英晶片复合谐振磁场传感器灵敏度,因此若仅将晶片厚度减小至文献[16]的 $7.5 \mu\text{m}$ ,本文提出的蝶形传感器灵敏度可达 $-20679 \text{ Hz/Oe}$ ,若与文献[16]一致,采用更高压磁系数的Metglas材料,可以进一步提高灵敏度,远高于文献[16]报道的 $88.3 \text{ Hz/Oe}$ ,远超已报道的磁致伸缩膜/石英晶片复合磁场传感器的性能。

## 4 结 论

本文利用石英晶片的非线性应力应变关系,提出AT切石英晶片和FeGa膜形状一样的双面复合蝶形磁场传感结构。蝶形晶片可以将蝶形磁膜增强的磁致应变向晶片电极区汇聚,提高电极区应变,从而提高传感器灵敏度。仿真分析预测,在23.8~118.9 Oe的磁场范围内,蝶形结构的灵敏度为蝶形磁膜/矩形晶片结构的3.73倍。采用微机械加工工艺,制备了传感器件,实验结果表明,在76.4~117 Oe的线性工作区间内,蝶形传感器的灵敏度可达 $-29.08 \text{ Hz/Oe}$ 。此外,可通过

对优化蝶形结构的整体长宽比、中间矩形长宽比、梯形/矩形过渡夹角、提高磁膜厚度、降低晶片厚度等进一步提高传感器灵敏度。

## 参考文献

- [1] 闫梁,万本例,胡斌,等. 基于双轴TMR电磁传感器的裂纹检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9):106-114.  
YAN L, WAN B L, HU B, et al. Research on crack detection method based on double axis TMR electromagnetic sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9):106-114.
- [2] 殷晓康,杨丽强,王伟,等. 外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10):239-250.  
YIN X K, YANG L Q, WANG W, et al. Encircling rotating field eddy current non-destructive evaluation system with concentrated excitation windings [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10):239-250.
- [3] 张静言,窦鹏伟,赵云驰,等. 霍尔天平材料的多场调控[J]. 物理学报, 2021, 70(4):7-27.  
ZHANG J Y, DU P W, ZHAO Y CH, et al. Multi-field manipulation in Hall balance[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(4):7-27.
- [4] 鲁文帅,尤睿,周扬,等. 基于单片TMR磁传感器的非侵入电流监测微系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6):1-9.  
LU W SH, YOU R, ZHOU Y, et al. Non-invasive current monitoring microsystem based on a single TMR sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6):1-9.
- [5] 王言章,石佳晴,时洪宇. 航空ZTEM磁传感器调理电路低噪声优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9):187-194.  
WANG Y ZH, SHI J Q, SHI H Y. Low noise optimization design of conditioning circuit for ZTEM airborne magnetic sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9):187-194.
- [6] WU K, TONINI D, LIANG S. Giant magnetoresistance biosensors in biomedical applications [J]. ACS Applied

- Materials & Interfaces, 2022(8), 14(8):9945-9969.
- [ 7 ] HERRERY-MAY A L, AGUILERA-CORTÉS L A, GARCÍA-RAMÍREZ P J, et al. Resonant magnetic field sensors based on MEMS technology[J]. Sensors, 2009, 9(10):7785-7813.
- [ 8 ] 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, 241:12-18.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] ZHANG W, LEE J 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.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] LI M, MATYUSHOV A, DONG C, et al. Ultra-sensitive MEMS magnetoelectric sensor for picotesla DC magnetic field detection [ J ]. Applied Physics Letters, 2017, 110(14):143510.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] HATİPOĞLU G, TADIGADAPA S. Experimental studies in magnetically induced transverse force-frequency effect in thin quartz microresonators [ J ]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(3):034508.
- [ 16 ] HATİPOĞLU G, TADIGADAPA S. Micromachined magnetoflexoelastic resonator based magnetometer [ J ]. Applied Physics Letters, 2015, 107(19):192406.
- [ 17 ] 张家泰, 文玉梅, 鲍祥祥, 等. 表面溅射 FeGa 薄膜的 AT 切型石英谐振磁场传感器 [ J ]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3):42-49.
- ZHANG J T, WEN Y M, BAO X X, et al. AT-cut quartz resonant magnetic field sensor with surface sputtered FeGa film [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3):42-49.
- [ 18 ] 鲍祥祥, 文玉梅, 陈冬雨, 等. 变截面 FeGa 膜/AT 切石英晶片复合谐振磁场传感器 [ J ]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12):56-64.
- BAO X X, WEN Y M, CHEN D Y, et al. Variable cross-section FeGa film/AT-cut quartz wafer composite resonant magnetic field sensor [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12):56-64.
- [ 19 ] YONG Y K, 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.
- [ 20 ] FREEMAN E, HARPER J, GOEL N, et al. Improving the magnetoelectric performance of Metglas/PZT laminates by annealing in a magnetic field [ J ]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(8):085038.
- [ 21 ] SOWMYA N S, SRINIVAS A, SARAVANAN P, et al. Effect of magnetic field annealing on the magneto-elastic properties of nanocrystalline NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [ J ]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 436:31-34.
- [ 22 ] ZHAI J, XING Z, DONG S, et al. Magnetoelastic laminate composites: an overview [ J ]. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91(2):351-358.
- [ 23 ] PALACHEVA V V, MDADI A, EMEIS F, et al. Phase transitions as a tool for tailoring magnetostriction in intrinsic Fe-Ga composites [ J ]. Acta Materialia, 2017, 130:229-239.
- [ 24 ] UENO T, SUMMERS E, WUN-FOGLE M, et al. Micro-magnetostrictive vibrator using iron-gallium alloy [ J ]. Sensors and Actuators A Physical, 2008, 148(1):280-284.

## 作者简介



**杨晓朋**, 2020 年于上海交通大学获得学士学位, 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: yangxiaopeng@sjtu.edu.cn

**Yang Xiaopeng** received his B. Sc. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2020. He is currently an M. Sc. candidate at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include 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

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 interests include signal acquisition and processing, sensors and instrumentation, and energy-harvesting.



**陈冬雨**, 2020 年于郑州轻工业大学获得硕士学位, 现为上海交通大学博士研究生, 主要研究方向为磁传感器, 磁标记生物分子检测。

E-mail: chendongyu1993@sjtu.edu.cn

**Chen Dongyu** received his M. Sc. degree from Zhengzhou University of Light Industry in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests includes magnetic field sensing and magnetic labeled biomolecular detection