

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108547

变截面 FeGa 膜/AT 切石英晶片复合谐振磁场传感器*

鲍祥祥, 文玉梅, 陈冬雨, 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:提出用变截面 FeGa 磁致伸缩膜与 AT 切石英晶片双面复合的磁场传感结构,变截面形状降低了磁膜汇聚区域的退磁因子,进而将磁致伸缩应变汇聚到晶片的电极区域。同时双面复合结构避免了晶片沿厚度方向的应变方向发生改变,两者结合提高了谐振传感器的磁场灵敏度。推导的灵敏度公式表明,灵敏度与复合结构确定的应变传递系数、磁膜材料的压磁系数以及磁膜厚度均成正比,与晶片厚度的平方成反比。在厚度为 200 μm 的 AT 切石英晶片表面双面沉积 1 μm 厚的变截面 FeGa 膜制备传感器样品,测试结果表明:传感器 Q 值为 5 489,线性区间的灵敏度达到 -0.82 Hz/Oe ,据此,当晶片厚度降低至 7.5 μm 时,传感器灵敏度将达到 -583 Hz/Oe ,并且可通过采用更高压磁系数的材料进一步提高。

关键词: 谐振磁场传感器;磁致伸缩膜;AT 切石英;压磁压电复合

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

Variable cross-section FeGa film/AT-cut quartz wafer composite resonant magnetic field sensor

Bao Xiangxiang, Wen Yumei, Chen Dongyu, Li Ping, Wang Yao

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

Abstract: A double-sided magnetic sensing composite structure is proposed using FeGa magnetostrictive films with variable cross-section on the top and the bottom of the AT-cut quartz wafer. The variable cross-section shape is utilized to reduce the demagnetization factor of the convergent area of the magnetic films, further increasing the strain in the electrode area. Meanwhile, the change in the strain direction along the wafer thickness direction can be avoided by adopting the double-sided composite structure. Therefore, the sensitivity of the resonant magnetic field sensor can be improved effectively by combining above two methods. The derived equations show that the sensitivity is positively correlated to the strain transfer coefficient determined by the composite structure, the piezomagnetic coefficient of the magnetostrictive material, and the thickness of the magnetic film, while inversely proportional to the square of the quartz wafer thickness. The sensor samples are fabricated by sputter deposition, with 1 μm thick variable cross-section FeGa films on the top and the bottom surface of the 200 μm thick AT-cut quartz wafer. Experimental results show that the Q value and sensitivity of the sensor are 5 489 and -0.82 Hz/Oe , respectively. Therefore, when the thickness of the quartz wafer is reduced to 7.5 μm , the sensitivity of the sensor can reach upwards to -583 Hz/Oe . In addition, the sensitivity of the sensor can be further increased by using a higher piezomagnetic coefficient magnetostrictive material.

Keywords: resonant magnetic field sensor; magnetostrictive film; AT-cut quartz crystal; piezomagnetic/piezoelectric composite

0 引言

磁场传感器是基础物理传感器,在磁存储^[1]、导航系统^[2]、无损检测^[3]和生物医疗^[4]等领域都有广泛应用。相比非谐振式磁场传感器,工作在谐振状态的谐振式磁

场传感器具有信噪比高、抗干扰能力强、功耗低的优点^[5]。谐振式磁场传感器由磁敏感单元和谐振单元两部分构成,磁敏感单元通过洛伦兹力、磁性材料的磁场作用力、 ΔE 效应或磁致伸缩效应,感受到外加磁场的作用,并通过结构耦合以力、应变、位移等形式传递到谐振单元中,引起谐振单元的力学参数变化。不过,洛伦兹力型谐

收稿日期:2021-09-09 Received Date: 2021-09-09

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFA0716501)资助

谐振磁场传感器受原理限制,其灵敏度与激励电流直接相关,灵敏度的提高将会导致功耗增加,并且需要压阻^[6]、电容^[7]或光学^[8]等传感方法来测量谐振器的振动位移,导致器件结构复杂。相比之下,利用磁致伸缩层的 ΔE 效应来引起整个谐振结构等效杨氏模量改变的谐振磁场传感器^[9-11]采用压电压磁层合结构,直接通过压电层来实现对谐振器的激励和检测,可以得到高达几 kHz/Oe^[12-13]的灵敏度,但传感器品质因数(Q 值)通常只有几百^[14-16],导致输出信号的信噪比低,降低了传感分辨率。

采用高 Q 值石英谐振器件的谐振磁场传感器^[17-20]可以达到很高的 Q 值。文献[17]中提出双层 FeGa 层与石英双端音叉(double-ended tuning fork, DETF)复合的三明治结构,通过 FeGa 块体层拉动 DETF 的两端将磁致伸缩应力传递到 DETF 中,传感器 Q 值达到 3 318,但灵敏度依赖 FeGa 与 DETF 的体积比,目前体积比已在 2 倍以上(折算厚度比 2:1),灵敏度仅达到 3.5 Hz/Oe,更重要的是,该传感器采用的磁致伸缩材料是块体而不是薄膜,无法实现磁场传感器的微加工制作。采用薄膜沉积等微加工工艺制备的磁膜/AT 切石英晶片复合谐振磁场传感器通过磁膜与石英晶片表面的面间耦合将磁致应变传递到石英晶片中,增强了层间耦合,而且采用厚度剪切石英谐振器可以达到更高的 Q 值。文献[18]中利用 FeGa 膜在磁场中磁化后受到的磁场作用力而非磁致伸缩效应,传感器 Q 值高达 46 000,但由于磁场作用力比较微弱而且仅作用在磁膜的端部,导致灵敏度较低,仅为 0.2 Hz/Oe,而且该传感器在 FeGa 膜磁化饱和后才能达到线性区间,这样就需要添加 200 Oe 以上的偏置磁场。文献[19]在厚度为 19 μm 的 AT 切石英晶片表面溅射了 300 nm 厚的 Metglas 膜,通过 Metglas 膜的磁致伸缩应变引起石英晶片弯曲变形,在 6.1 Oe 偏置磁场下,传感器灵敏度达到 11 Hz/Oe,对应磁场传感区间的大小仅 1 Oe 左右。增大磁膜与石英晶片的厚度比可以提高磁致应变的传递效率,进而提高传感器灵敏度,文献[20]中进一步将石英晶片厚度刻蚀至 7.5 μm ,表面沉积了 500 nm 的 Metglas 膜,传感器 Q 值为 8 250,磁膜/石英晶片厚度比达到 1:15,但灵敏度仅提升至 88.3 Hz/Oe,仍在较低的量级。文献[18-20]中所报道的磁膜/石英晶片复合谐振磁场传感器中均采用矩形磁膜与石英晶片单面复合的传感结构。单面复合会导致石英晶片中厚度方向上的应变方向发生改变,使得上、下层晶片中应变的作用效果相互抵消,进而削弱了整体谐振频率偏移。此外,根据能陷振动理论,石英晶片的电极区为石英谐振器的有效振动区域,但采用矩形磁膜时难以将磁致伸缩应变汇聚在石英晶片的电极区。因此,对于磁致伸缩膜/石英晶片复合型谐振磁场传感器而言,通过改进复合方式和磁膜形状来提高电极区的平均应变进而提高传感器灵敏度具有较强的可行性。

针对上述问题,本文提出对称变截面磁致伸缩膜与 AT 切石英晶片双面复合的传感结构。通过采用低内损耗的厚度剪切石英谐振器,传感器可以达到很高的 Q 值和较低的功耗,而磁膜/石英晶片复合结构不仅可以增强层间耦合而且便于微型化加工。此外,双面复合对称变截面磁膜的复合结构不仅通过双面复合避免石英晶片中厚度方向的应变方向发生改变,还通过采用对称变截面形状降低磁膜汇聚区域的退磁因子,减弱退磁场的影响,提高汇聚区域的磁化强度,进而将磁致伸缩应变汇聚到石英晶片的电极区域,两者联合增强电极区的平均应变,从而增大谐振频率偏移,提高传感器灵敏度。

1 传感原理

图 1 为提出的对称变截面磁致伸缩膜与 AT 切石英晶片双面复合的传感结构示意图,图内坐标系为 AT 切石英晶片的晶轴坐标系, x_1 方向为谐振器厚度剪切振动质点位移方向,工作时 x_1 方向与外加磁场方向平行。在晶片上下表面分别复合了相同的对称变截面磁膜,磁膜呈领结形,由两等腰梯形和中间正方形组成,磁膜的中间区域放置了圆形电极,上下电极的引线分别沿 x_1 正向和反向引出。下电极的引出端为固定区域,传感器的下表面四周添加 x_2 方向的位移限制。上下圆形电极所夹的晶片区域称为电极区,为石英谐振器的有效振动区域,其他晶片区域为非电极区。

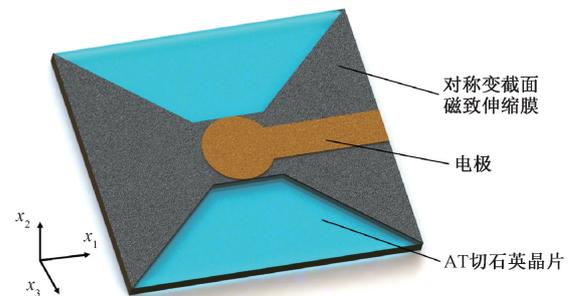


图 1 对称变截面磁致伸缩膜与 AT 切石英晶片双面复合的传感结构示意图

Fig. 1 Symmetric variable cross-section magnetostrictive film/AT-cut quartz wafer double-sided composite sensing structure

1.1 静态应变引起谐振频率偏移

厚度剪切石英谐振器在受到外加作用力等因素引起的应变作用时,谐振频率会产生偏移,这种应变敏感特性是由石英晶体的非线性弹性即非线性应力-应变关系引起。当 AT 切石英晶片具有一定静态应变 S_{mn} ,在此基础上发生小振幅振动且动态应变 $s_{it} \ll S_{mn}$ 时,动态应力 t_{ij}

和应变 s_{kl} 的关系为 ($i, j, k, l, m, n = 1, 2, 3$):

$$t_{ij} = (C_{ijkl} + \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 C_{ijklmn} S_{mn}) s_{kl} \quad (1)$$

式中: C_{ijkl} 、 C_{ijklmn} 分别为 AT 切石英的二阶、三阶弹性系数。受静态应变 S_{mn} 的影响, 动态应力 t_{ij} 与应变 s_{kl} 间的弹性模量为 $C_{ijkl} + \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 C_{ijklmn} S_{mn}$, 随静态应变变化。

为便于书写, 后续张量的下标采用单下标形式。AT 切石英晶片中发生厚度剪切振动时, 将产生厚度剪切应力 t_6 和应变 S_6 。由式(1)可知, 当晶片中具有静态应变 $S_r (r=1, 2, \dots, 6)$ 时, 将会引起厚度剪切弹性模量的变化,

此时有效厚度剪切模量为 $C_{66}^* = C_{66} + \sum_{r=1}^6 C_{66r} S_r$, 其中 C_{66r}

为影响厚度剪切方向的三阶弹性系数, $\sum_{r=1}^6 C_{66r} S_r$ 为相比无应变状态时静态应变 S_r 对有效厚度剪切模量的影响。根据文献[18], 静态应变 S_r 作用下 AT 切石英晶片厚度剪切谐振频率偏移为:

$$\Delta f \approx \frac{\sum_{r=1}^6 C_{66r} S_r}{4h_q \sqrt{\rho_q C_{66}}} \quad (2)$$

式中: h_q 、 ρ_q 分别为 AT 切石英晶片的厚度和密度。式(2)表明, 电极区内各个静态应变分量 S_r 的综合作用下引起谐振频率偏移。

AT 切石英三阶弹性系数的数值见表 1, 其中 C_{661} 、 C_{662} 、 C_{663} 和 C_{664} 不为 0, 表明应变 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 能够引起有效厚度剪切模量的改变, 其中 C_{661} 数值最大, 在应变数值相同时, 应变 S_1 对有效厚度剪切模量影响最大, 因而本文选择将 AT 切石英晶片的 x_1 晶轴置于外部磁场方向, 使得磁致伸缩膜中产生 x_1 方向的拉伸应变, 此时传递到 AT 切石英晶片中的磁致应变将主要为 S_1 应变。

表 1 AT 切石英三阶弹性系数数值表

Table 1 Third-order elastic coefficient of AT-cut

quartz crystal						GPa
三阶弹性系数	C_{661}	C_{662}	C_{663}	C_{664}	C_{665}	C_{666}
数值	-203.2	22.6	-26.9	82.4	0	0

1.2 磁致伸缩应变仿真

磁致伸缩材料的动态磁致伸缩性能用压磁系数 d_{33} 描述, 定义为磁致伸缩系数 λ 随磁场强度 H 的变化, 即有 $d_{33} = d\lambda/dH$ 。文中选择 FeGa 合金制作磁致伸缩膜, FeGa 合金为软磁材料, 矫顽力较低, 能够迅速响应外磁场的变化。图 2 为 FeGa 薄膜的磁化曲线, 其矫顽力 H_c 为 15.8 Oe, 饱和磁化强度 M_s 为 1.445 T。此外, FeGa 合金还具有优异的磁致伸缩性能, 饱和磁致伸缩系数可达到 10^{-4} 。

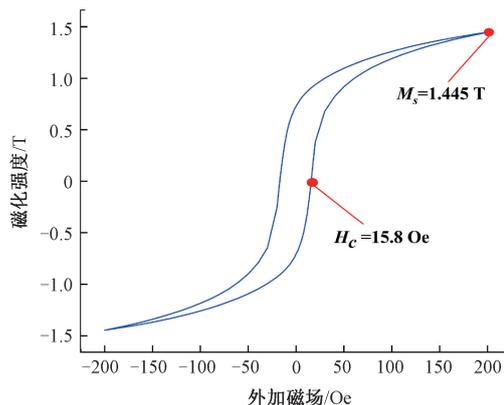


图 2 FeGa 薄膜的磁化曲线

Fig. 2 The magnetization curve of the FeGa film

利用有限元分析软件 COMSOL 对所提出的传感结构进行仿真分析。晶片采用软件材料库中的 IEEE1978 标准石英; 电极采用材料库中标准铜, FeGa 合金的材料参数见表 2。石英晶片尺寸为 $12.4 \text{ mm} \times 11.4 \text{ mm} \times 200 \text{ }\mu\text{m}$, 对称变截面磁膜整体长宽与晶片相同, 中间正方形为 $2.4 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$, 矩形磁膜为 $12.4 \text{ mm} \times 11.4 \text{ mm}$, 两种磁膜厚度均为 $1 \text{ }\mu\text{m}$, 电极尺寸为 $\Phi 2 \text{ mm} \times 0.3 \text{ }\mu\text{m}$ 。采用亥姆霍兹线圈提供 x_1 方向的静态直流磁场。

表 2 仿真中使用的铁合金参数

Table 2 Parameters of the FeGa alloy used in the simulation

材料参数	描述	数值
E/GPa	杨氏模量	107
ν	泊松比	0.37
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	密度	7 972
$\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	电导率	12.3×10^6
ϵ	相对介电常数	1
λ_s	饱和磁致伸缩系数	380×10^{-6}
M_s/T	饱和磁化强度	1.445

首先, 为分析对称变截面形状对磁膜退磁场的影响以及磁致伸缩应变的汇聚作用, 对 50 Oe 静态磁场中对称变截面磁膜和矩形磁膜中磁化强度和 S_1 应变分布进行仿真, 结果如图 3、4 所示。图 3(a) 为对称变截面和矩形磁膜中的退磁场示意图。在外加磁场 H 的作用下, 两种磁膜的两端以及变截面梯形的两腰上均产生磁极, 磁膜内部产生退磁场 H_d 。磁膜沿 x_1 方向磁化时, 可视为沿长轴方向磁化的扁椭球体, 与矩形磁膜相比, 对称变截面磁膜的中间汇聚区域较窄, 因而退磁因子降低, 更容易磁化。图 3(b) 为静态磁场下两种磁膜磁化强度对比。由于退磁场的影响, 两种磁膜中的磁化强度均呈拱形分布,

对称变截面磁膜中间区域的磁化强度达到矩形磁膜的 1.3 倍左右。

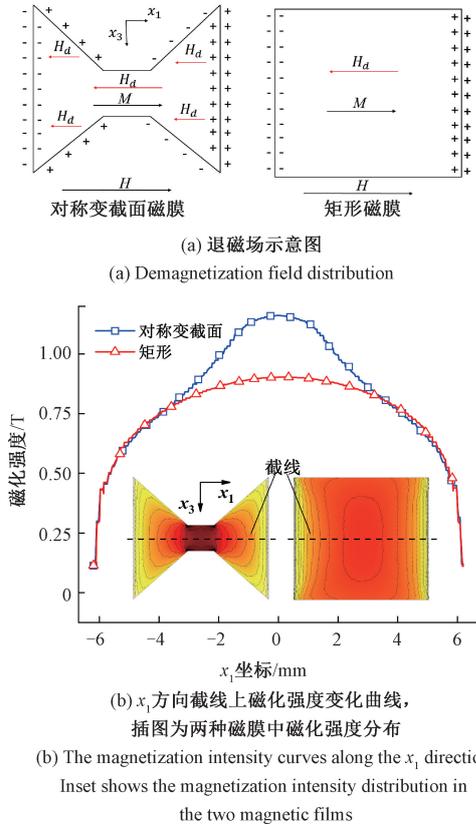


图 3 两种磁膜中退磁场和磁化强度分布

Fig. 3 Distribution of demagnetization field and magnetization intensity in the two magnetic films

图 4(a) 为外加磁场中对称变截面磁膜和矩形磁膜中磁致伸缩应变分布, 相比于矩形磁膜, 对称变截面磁膜能够对应变产生汇聚作用。图 4(b) 为静态磁场下两种磁膜 x_1 方向截线上的 S_1 应变对比。与图 3(b) 中磁化强度分布类似, x_1 方向上两种磁膜中的 S_1 应变也均呈拱形分布, 对称变截面磁膜中间汇聚区域的应变高于矩形磁膜。结果表明, 50 Oe 外加磁场下, 对称变截面磁膜中间汇聚区域的 S_1 应变为矩形磁膜的 1.6 倍左右, 对称变截面形状能够有效汇聚磁致伸缩应变。

施加 50 Oe 静态磁场, 分别对与每种磁膜双面复合的石英晶片中 S_1 应变分布进行仿真分析, 结果如图 5 所示。可以看到, 复合矩形磁膜时晶片表面 S_1 应变呈拱形分布。复合对称变截面磁膜时, 晶片表面 S_1 应变呈现向中间区域汇聚的趋势, 但电极区应变相对附近区域出现较大衰减。仿真计算可得, 复合矩形磁膜时电极区的平均应变为 0.22×10^{-6} , 复合对称变截面磁膜时为 0.24×10^{-6} , 为复合矩形磁膜的 1.1 倍, 该比值小于不与石英晶片复合时两种磁膜中间区域 S_1 应变的比值, 这是由于复合对称变截

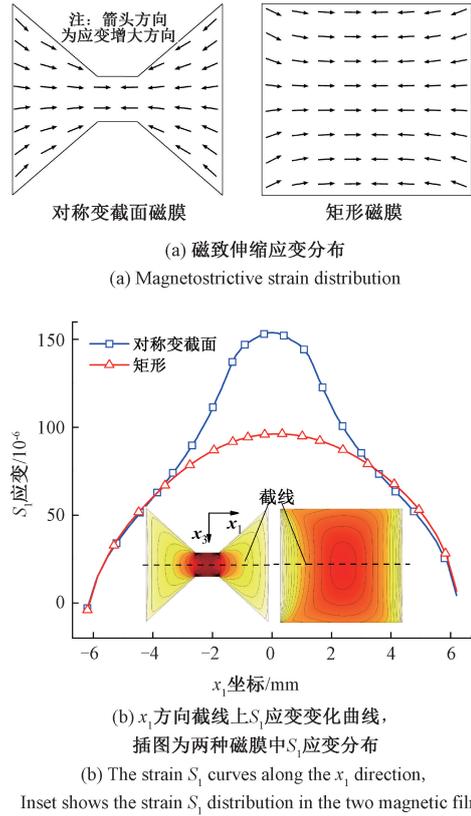


图 4 两种磁膜中应变分布对比

Fig. 4 Comparison of the strain distribution in the two magnetic films

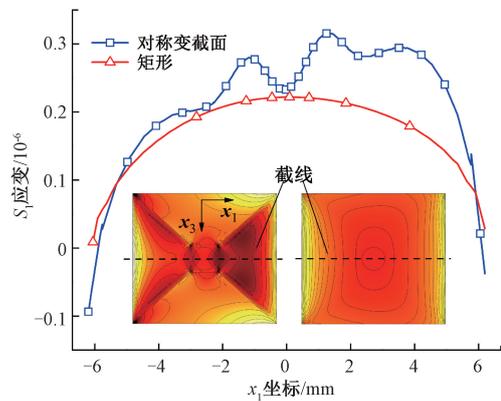


图 5 分别与两种磁膜复合的石英晶片上表面 x_1 方向截线上 S_1 应变变化曲线, 插图为复合两种磁膜时石英晶片上表面 S_1 应变分布

Fig. 5 The strain S_1 curves along the x_1 direction on the upper surface of the quartz wafer. Inset shows the strain S_1 distribution on the upper surface of the quartz wafer

面磁膜时应变从磁膜覆盖的晶片区域向无磁膜的晶片区域传递以及局部区域应变集中减弱了应变汇聚效果所导

致,因此通过分割或直接切除表面无磁膜的晶片区域以及设计变截面形状,可以进一步提升电极区的平均应变。此外,由于固定区域位于晶片左侧,因而变截面磁膜覆盖的右边晶片区域应变整体上高于左边。

为分析双面复合对电极区平均应变的提升作用,添加 50 Oe 静态磁场,分别对单面和双面复合对称变截面磁膜的石英晶片厚度方向上 S_1 应变分布进行仿真,结果如图 6 所示。可以看到,单面复合磁膜时晶片上表面的 S_1 应变值更大,但由于上下层晶片中应变方向不同,导致电极区的平均应变较小,仅为 0.106×10^{-6} ; 双面复合时晶片厚度方向上的 S_1 应变分布比较均匀,应变方向不发生改变,电极区的平均应变提升至单面复合时的 2.3 倍,结果表明双面复合磁膜可以有效提升电极区的平均应变。

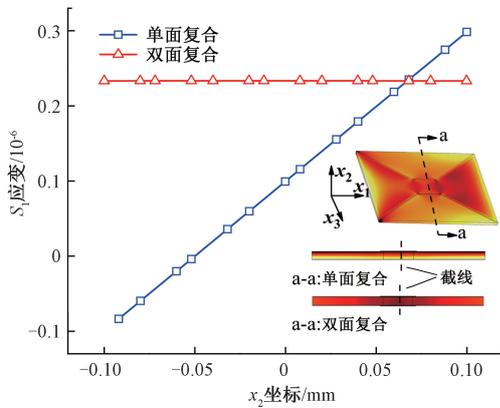


图 6 两种复合方式下石英晶片厚度方向截线上 S_1 应变曲线,插图为 a-a 截面上 S_1 应变分布对比
Fig. 6 The strain S_1 curves on the thickness direction of the quartz wafer under the two composite methods. Inset shows the comparison of the strain S_1 distribution on the a-a section

1.3 灵敏度分析

图 1 所示的复合结构中磁膜沿 x_1 方向磁化并产生磁致伸缩应变,传递到晶片中主要为 S_1 应变,因而谐振频率的偏移主要由电极区的平均应变 \bar{S}_1 引起。为分析电极区平均应变 \bar{S}_1 随外加磁场 H 的变化情况,使磁场从 0~300 Oe 范围内变化,仿真结果如图 7 所示。可以看到,由于磁膜材料的磁致伸缩系数 λ 随磁场非线性变化,电极区平均应变 \bar{S}_1 也随磁场非线性变化,插图表明, \bar{S}_1 与 λ 近似成正比关系。

为表征磁膜与晶片间的应变传递关系,定义电极区平均应变 \bar{S}_1 与磁致伸缩系数 λ 的比值为应变传递系数 K_t ,则有 $K_t = \bar{S}_1 / \lambda$ 。上文中的仿真结果表明,复合对称变截面磁膜时的应变传递系数为复合矩形磁膜的 1.1 倍,双面复合时的应变传递系数是单面复合的 2.3 倍,因而双面

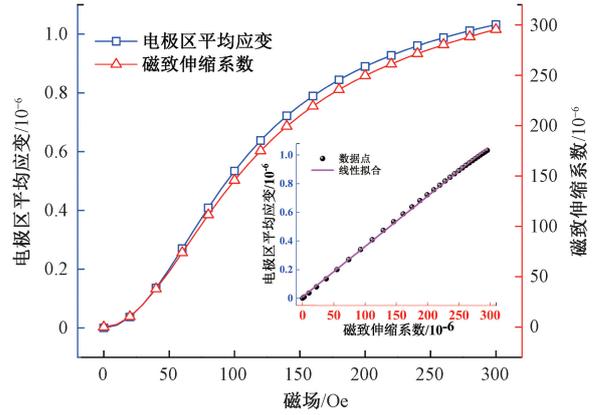


图 7 电极区平均应变 \bar{S}_1 与磁致伸缩系数 λ 随磁场变化曲线,插图为 \bar{S}_1 随 λ 变化情况及线性拟合曲线

Fig. 7 The average strain \bar{S}_1 in the electrode area and the magnetostriction coefficient λ as a function of the magnetic field. Inset shows the variation of \bar{S}_1 with λ and the linear fitting curve

复合对称变截面磁膜的结构可以有效提高应变传递系数。

为分析应变传递系数 K_t 与磁膜和晶片厚度比 h_f/h_q 的关系,固定 $h_f = 1 \mu\text{m}$, h_q 分别取 200、100、50、30、20、10 μm 进行仿真分析,结果如图 8 所示。可见,在 $1/200 \sim 1/10$ 的厚度比范围内, K_t 与 h_f/h_q 成正比关系,存在系数 β 使得 $K_t = \beta h_f/h_q$ 。系数 β 与磁膜材料和石英的力学参数、各层的形状与几何尺寸、以及复合方式有关。

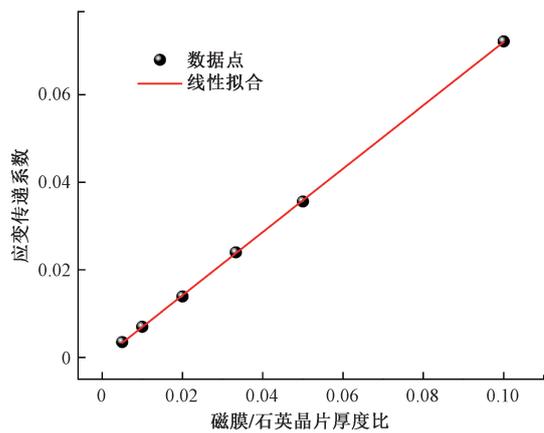


图 8 应变传递系数随厚度比变化曲线
Fig. 8 Strain transfer coefficient as a function of thickness ratio

根据式(2),在电极区平均应变 \bar{S}_1 作用下的传感器谐振频率偏移为:

$$\Delta f \approx \frac{C_{661} \bar{S}_1}{4h_q \sqrt{\rho_q C_{66}}} = \frac{C_{661} K_t \lambda}{4h_q \sqrt{\rho_q C_{66}}} \quad (3)$$

则磁场灵敏度为:

$$S_H = \frac{d\Delta f}{dH} \approx \frac{C_{661}K_t}{4h_q\sqrt{\rho_q}C_{66}} \frac{d\lambda}{dH} = \frac{C_{661}\beta h_f d_{33}}{4h_q^2\sqrt{\rho_q}C_{66}} \quad (4)$$

式(4)表明,传感器灵敏度与应变传递系数 K_t 、磁膜厚度 h_f 以及磁致伸缩材料的压磁系数 d_{33} 成正比,与石英晶片厚度的平方 h_q^2 成反比。式(4)中 AT 切石英的材料参数 C_{661} 、 C_{66} 、 ρ_q 为常数,因而要提升传感器灵敏度,有以下途径:1)通过改进复合结构提高系数 β ;2)减小石英厚度 h_q ;3)增大磁膜厚度 h_f ;4)选择压磁系数 d_{33} 较大的磁致伸缩材料。在磁膜与晶片的厚度以及磁膜材料的压磁系数确定时,采用对称变截面磁膜与晶片双面复合的结构可以提高系数 β ,进而提高应变传递系数 K_t ,从而提高传感器灵敏度。

2 传感器制作与实验装置

采用磁控溅射工艺进行传感器的加工。图 9 为磁控溅射加工流程图,步骤为:1)在 AT 切石英晶片上表面溅射 $1\ \mu\text{m}$ 厚的对称变截面 FeGa 合金膜,为避免磁膜在空气中氧化以及与电极直接接触,在 FeGa 合金薄膜表面溅射 $300\ \text{nm}$ 厚的氮化硅(Si_3N_4)作为隔离层;2)在晶片下表面重复步骤 1);3)为增强电极的稳定性,先在晶片上方氮化硅隔离层表面溅射 $30\ \text{nm}$ 厚的金属钛(Ti)作为黏附层,而后溅射 $300\ \text{nm}$ 厚的 Cu 电极;4)在晶片下方氮化硅隔离层表面重复步骤 3)。

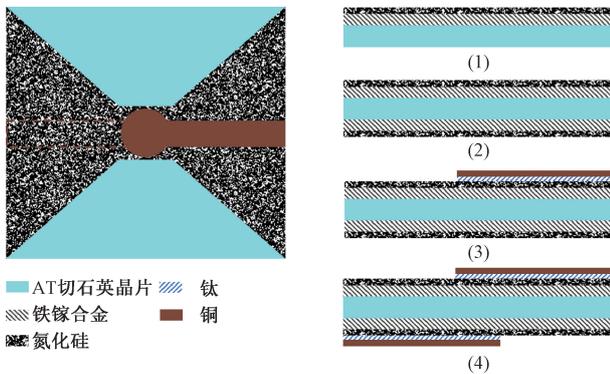


图 9 磁控溅射加工流程
Fig. 9 Sputtering process

实验测试装置如图 10 所示,传感器固定在电路板上并放置在铝制电磁屏蔽盒中,采用一对圆形高强度钕铁硼(NdFeB)永磁铁提供静态磁场,通过导轨来调节磁极与传感器的间距,进而调控外加磁场强度,并采用高斯计进行标定。测试时将传感器置于导轨中央,AT 切石英晶片的 x_1 轴与外磁场方向平行,使用 WK6500B 阻抗分析仪测量传感器的导纳特性。

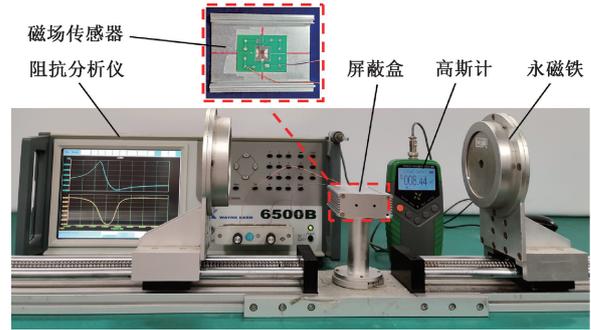
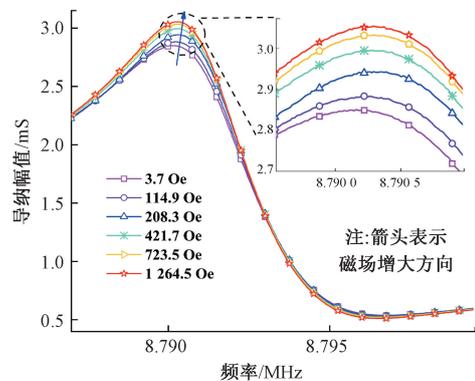


图 10 实验测试装置
Fig. 10 Experimental setup

3 测试结果与讨论

利用阻抗分析仪测得传感器的 Q 值为 5 489,无外部磁场时串联谐振频率为 $8.7923\ \text{MHz}$,该频率值高于有限元仿真得到的 $8.0579\ \text{MHz}$,这一方面是由于采用的 AT 切石英晶片在经过抛光处理后的实际厚度小于标称的 $200\ \mu\text{m}$,另一方面是由于仿真中忽略了磁膜和电极制作中的厚度尺寸误差,在实际磁控溅射加工时,溅射后的材料层表面并不完全平整,溅射层的整体厚度小于各层厚度的叠加。

图 11 为不同外加磁场下传感器导纳特性曲线的变化情况,图 11(a)、(b)分别展示了传感器导纳幅值-频率曲线及相位-频率曲线在随磁场增大时的变化趋势。从图 11(a)可以看到,当磁场由 $3.7\ \text{Oe}$ 逐渐增大至 $1\ 264.5\ \text{Oe}$ 时,磁致伸缩应变增大导致磁膜内部的损耗减小,导纳幅值的峰值逐渐增大。从图 11(b)可以看到,相位-频率曲线中零相位下方的曲线随磁场增大而下移,串联谐振频率与并联谐振频率间的距离增大,从而串联谐振频率减小,并联谐振频率增大。由于并联谐振频率的测量容易受到测试电路中杂散电容以及其他外部因素的干扰,因而选择串联谐振频率来对传感器性能进行表征。



(a) 幅值-频率曲线
(a) Amplitude-frequency curves

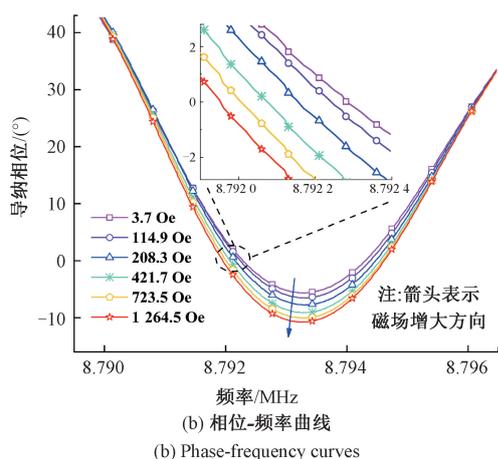


图 11 不同外加磁场下的导纳特性曲线

Fig. 11 Admittance characteristic curves under different external magnetic fields

图 12 显示了串联谐振频率偏移随磁场变化曲线。由于 FeGa 合金的磁致伸缩应变随磁场的变化是非线性的,因而谐振频率偏移随磁场变化也呈现非线性。磁场低于 37.6 Oe 时,磁膜的磁化程度较低,磁致伸缩应变较小,传感器的谐振频率偏移不明显。随着磁场继续增大,磁膜中应变迅速增大,谐振频率出现明显偏移;当磁场增大至 292.7 Oe 后,谐振频率偏移随磁场变化的变化速率开始减缓。在 0~1264.5 Oe 的磁场范围内传感器谐振频率变化-278.4 Hz。在 139.3~292.7 Oe 磁场区间内,谐振频率偏移随磁场变化的变化速率最大,且呈线性关系,因而选择该磁场区间作为传感器的工作区间,该区间的大小达到 153.4 Oe,远大于文献[19-20]中所报道的测量区间大小。

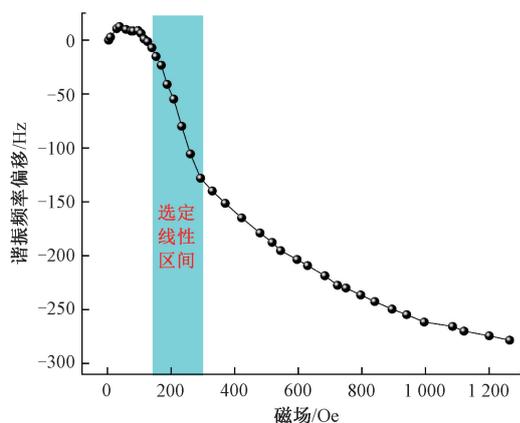


图 12 谐振频率偏移随磁场变化曲线

Fig. 12 Resonant frequency shift as a function of the external magnetic field

图 13 为 139.3~292.7 Oe 磁场区间内谐振频率偏移随磁场的变化及线性拟合,线性拟合表达式为 $\Delta f = -0.82H + 111.02$ (相关系数 $R^2 = 0.994$),结果表明,传感器的最高磁场灵敏度不仅达到 -0.82 Hz/Oe,而且在选定磁场区间内具有良好的线性度。

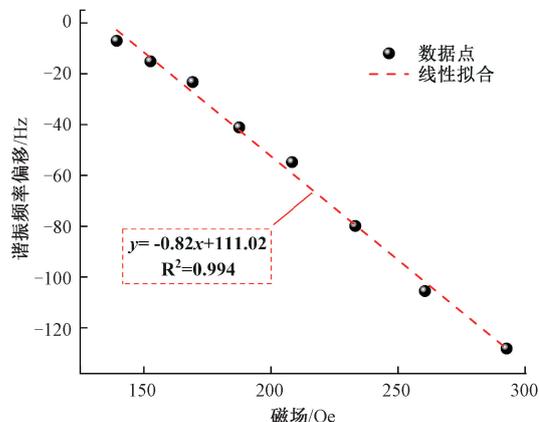


图 13 139.3~292.7 Oe 磁场范围内频率偏移

Fig. 13 Frequency shift within 139.3~292.7 Oe magnetic field range

表 3 对比了所提出的传感器与相关文献中石英谐振磁场传感器的性能,进一步说明了本文所提出的方法对传感器灵敏度有较大的提升。复合结构改进使得传感器灵敏度达到了文献[18]中 4 倍。根据式(4)进行理论推算,在晶片厚度与文献[20]相同为 $7.5 \mu\text{m}$ 时,本文所提出的复合结构的灵敏度将达到 -583 Hz/Oe,高于文献[20]中所报道的 88.3 Hz/Oe,若采用压磁系数更大的 Metglas 材料,灵敏度可提升至 -5 kHz/Oe 以上。而且在

表 3 相关石英谐振磁场传感器比较

Table 3 Comparison of quartz resonant magnetic field sensors

文献	[18]	[19]	[20]	本文	
				实测	理论预测
传感原理	磁场作用力	磁致伸缩	磁致伸缩	磁致伸缩	磁致伸缩
磁膜形状	矩形	矩形	矩形	变截面	变截面
复合方式	单面	单面	单面	双面	双面
磁膜材料	FeGa	Metglas	Metglas	FeGa	FeGa
最大压磁系数 ^[21] /(10^{-6} /Oe)	-	3.5	3.5	0.35	0.35
石英厚度/ μm	200	19	7.5	200	7.5
磁膜厚度/ μm	1	0.3	0.5	1(单面)	1(单面)
灵敏度/(Hz/Oe)	0.2	11	88.3	-0.82	-583

相同的磁膜/石英晶片厚度比下,所提出的复合结构极大提高了磁膜与晶片间应变传递系数,达到文献[20]中单面复合磁膜结构的 16.5 倍。此外,由于磁致伸缩应变从磁膜覆盖的晶片区域向两侧无磁膜的晶片区域传递,减弱了应变汇聚效果,因而通过分割或直接切除表面无磁膜的晶片区域可以进一步提高应变传递系数,进而提升电极区的平均应变,更大程度上提高传感器灵敏度。

4 结 论

本文提出对称变截面磁致伸缩膜与 AT 切石英晶片双面复合的谐振磁场传感结构,在厚度为 200 μm 的 AT 切石英晶片表面双面沉积 1 μm 厚的变截面 FeGa 膜制备了传感器样品,其 Q 值达到 5 489,在 139.3~292.7 Oe 的磁场区间内,灵敏度达到 -0.82 Hz/Oe,相比现有技术,所制备的传感器在提升灵敏度基础上,扩大了磁场测量范围。最终结果表明双面复合对称变截面磁膜的传感结构可以有效提升磁膜与石英晶片间的应变传递系数,在提升磁致伸缩膜/石英晶片复合型谐振磁场传感器灵敏度方面表现出很大优势,为制备高 Q 值、高灵敏度的微型磁场传感器提供了一种可行的方法。

参考文献

- [1] LENZ J, EDELSTEIN A S. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631-649.
- [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] 张娜,彭磊,吴瑶,等.高分辨率 TMR 传感器阵列磁场成像涡流检测探头[J].仪器仪表学报,2020,41(7):45-53.
ZHANG N, PENG L, WU Y, et al. ECT probe based on magnetic field imaging with a high resolution TMR sensor array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 45-53.
- [4] 王开瑞,张永德,刘云辉.基于惯性导航与电磁导航融合的靶器官运动跟踪方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(11):177-187.
WANG K R, ZHANG Y D, LIU Y H. Research on target organ motion tracking method based on the fusion of inertial navigation and electromagnetic navigation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 177-187.
- [5] HERRERA-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.
- [6] 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.
- [7] PARK S, ALGHAMDI M, KHATER M, et al. A tunable MEMS magnetic sensor [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(1): 255-263.
- [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] 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.
- [10] JAHNS R, ZABEL S, MARAUSKA S, et al. Microelectromechanical magnetic field sensor based on ΔE effect[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(5): 052414.
- [11] HUI Y, NAN T, SUN N X, et al. High resolution magnetometer based on a high frequency magnetolectric MEMS-CMOS oscillator [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(1): 134-143.
- [12] HUI Y, NAN T, 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.
- [13] LI M, MATYUSHOV A, DONG C, et al. Ultra-sensitive NEMS magnetolectric sensor for picotesla DC magnetic field detection [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(14): 143510.
- [14] ZABEL S, KIRCHHOF C, YARAR E, et al. Phase modulated magnetolectric delta-E effect sensor for sub-nano tesla magnetic fields[J]. Applied Physics Letters,

- 2015, 107(15): 152402.
- [15] NAN T, HUI Y, RINALDI M, et al. Self-biased 215 MHz magnetoelectric NEMS resonator for ultra-sensitive DC magnetic field detection [J]. Scientific Reports, 2013, 3(1):1985.
- [16] ZABEL S, REERMANN J, FICHTNER S, et al. Multimode delta-E effect magnetic field sensors with adapted electrodes [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(22): 222401.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] HATIPOGLU 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.
- [20] HATIPOGLU G, TADIGADAPA S. Micromachined magnetoflexoelastic resonator based magnetometer [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(19): 192406.
- [21] LI F. Magneto-electric flexural gate transistor with nanotesla sensitivity [D]. Pennsylvania: Philadelphia, The Pennsylvania State University, 2012.

作者简介



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 a master student at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include magnetic field sensing and instrumentation.



文玉梅(通信作者), 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) is a professor in the 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 include magnetic field sensing and magnetic labeled biomolecular detection.