

具有气敏涂层的 GMF 静态磁机耦合模型及实验研究

王福吉*, 贾振元, 刘巍, 赵建国

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为实现超磁致伸缩薄膜(GMF)在微气体传感器领域的应用,需要研究其在气敏涂层条件下的磁致伸缩特性.以几何非线性弹性理论为基础,将磁致伸缩效应等效为 GMF 上体积力作用下的变形效应,建立了具有气敏涂层的悬臂梁式结构双层 GMF 低磁场下静态磁机耦合模型,解析了 GMF 悬臂梁末端的磁场与位移的数学关联.通过对双层薄膜 TbDyFe/PI/SmFe 和 TbDyFe/Cu/SmFe 进行试验,验证了磁场与位移数学关联的正确性.结果表明,曲线模型有较好的预测性,具有气敏涂层的 GMF 表现出更好的磁致伸缩效应.

关键词: 敏感涂层;薄膜;磁机耦合;超磁致伸缩效应

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A

0 引言

采用真空离子束溅射方法在非磁性基片上(通常为硅、玻璃、铜、聚酰亚胺等)制备的超磁致伸缩薄膜(GMF),是一种新型功能材料.由于自身具有良好的软磁性、较快的响应速度以及在室温和低磁场下能产生很大的磁致伸缩应变等特点,成为微型装备和微机械材料领域中应用研究的热点之一^[1].

随着 GMF 制备技术的发展,GMF 低磁场下的磁致伸缩性能得以不断提高.国外学者已成功研制了以 GMF 为驱动部件或传感部件的微型泵、微型阀、微行走机构、微型力传感器以及微型光纤传感器等微型机械电子系统^[2].国内针对 GMF 的研究主要集中在薄膜的制备工艺、磁致伸缩机理、磁致伸缩系数的测量与计算等方面^[3].为拓宽 GMF 的应用领域,本文在福州大学制备的 GMF 基础上,借鉴国内外压电陶瓷、ZnO、SnO₂ 等材料^[4]研制微型气体传感器的经验,利用甩胶技术制备具有气敏涂层的双层 GMF,建立其悬臂梁式静态特性模型,并通过实验对比甩胶前后 GMF 的磁致伸缩效应,以期为进一步研制新材料微型气体传感器奠定理论基础.

1 GMF 低磁场磁机耦合特性分析

薄膜磁致伸缩的本质是磁学能和机械能之间的相互转换,其长度的变化是磁性材料的磁性状态改变引起的.薄膜内部应力决定了沉积在非磁性材料基片上的超磁致伸缩薄膜的巨磁和软磁特性.磁化曲线和磁致伸缩曲线受薄膜内部应力的影响主要取决于磁致伸缩系数和应力的方向,且磁化曲线和磁致伸缩曲线受应力的影响明显不同.对于具有正磁致伸缩效应的薄膜来说,初始磁导率随应力的增大而增大,磁极化强度随拉应力的增大而增大,随压应力的增大而减小;对于具有负磁致伸缩效应的薄膜来说,初始磁导率随应力增大而减小,磁极化强度随拉应力的增大而减小,随压应力的增大而增大.通过测量发现在 Si 基片上沉积 TbDyFe 的薄膜内部存在约 200 MPa 的拉应力,而在 CuBe 基片上沉积同样成分 TbDyFe 的薄膜显示出相同幅值的压应力.当在平行于超磁致伸缩薄膜易磁化轴方向上施加 0.02 T 的磁场时,拉应力作用下的薄膜磁致伸缩系数约为 150×10^{-6} ;而压应力作用下的薄膜磁致伸缩系数约为 20×10^{-6} .

2 具有气敏涂层的双层 GMF 低磁场下准静态磁机耦合模型

磁机耦合模型是反映磁致伸缩过程中薄膜内各物理量之间关系的模型,是研究和建立 GMF 微传感执行器件控制模型的重要理论基础.本文将基于以上磁机耦合机理的分析,推导出具有气敏涂层的双层 GMF 低磁场下静态磁机耦合模型.

GMF 按溅射合金材料的磁致伸缩特性和结构形式,可分为单层正负 GMF、双层 GMF 以及多层 GMF.同单层 GMF 相比,双层和多层 GMF 的输出力、磁致伸缩性能更好^[5].本文选用在非磁性基片上表面镀正伸缩特性、下表面镀负伸缩特性的磁致伸缩合金材料,并通过甩胶方法将气体敏感层材料涂覆在 GMF 上表面,制备成具有气敏涂层的双层 GMF 双层膜.在自行设计的亥姆霍兹线圈产生的低磁场作用下,研究具有气敏涂层 GMF 双层膜的磁致伸缩应变与磁场之间的关联关系.以应力场的作用荷载来等效 GMF 的磁致伸缩效应,并分析具有气敏涂层的悬臂梁式 GMF 变形的几何方程形式、磁机耦合和力学平衡方程.

2.1 双层 GMF 磁致伸缩效应的荷载等效

超磁致伸缩是指磁性体在磁场作用下伸长或缩短的现象,它是磁能与机械能转换过程的一种表现.压磁方程是描述磁机耦合的基本方程.表示应变方程的第一类压磁方程为^[6]

$$\boldsymbol{\varepsilon} = S^H \boldsymbol{\sigma} + d_T \mathbf{H} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变; S 为弹性柔顺系数; $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力; d_T 为磁弹性系数; \mathbf{H} 为磁场强度.假设整个超磁致伸缩薄膜为一个系统,当只有磁致伸缩效应作用时,所产生的磁致伸缩应变为 $d_T \mathbf{H}$.为了简化磁机耦合模型,本文提出了将磁致伸缩应力等效为作用在 GMF 上的体积力的思路,这一体积力与外作用磁场的关系为

$$\mathbf{q} \doteq E d_T \mathbf{H} A / V \quad (2)$$

其中 A 为磁致伸缩应力作用面积; V 为 GMF 体积.

对于双层悬臂梁式 GMF,假设低磁场作用下的磁致伸缩力等效为沿如图 1 所示 X 方向的均匀分布荷载,即等效为单向体积力 q_2 和 q_4 .由此可以得到具有正负磁致伸缩特性的双层 GMF 的磁致伸缩力的表达式为

$$q_2 \doteq E_2 d_2 H A_2 / V_2 \quad (3)$$

$$q_4 \doteq E_4 d_4 H A_4 / V_4 \quad (4)$$

式中: E_2 、 E_4 分别为正负磁致伸缩双层薄膜的弹性模量; d_2 、 d_4 分别为薄膜的磁弹性系数; A_2 、 A_4

为磁致伸缩应力作用横截面积, V_2 、 V_4 为薄膜的体积.本文采用的 GMF 在制备过程中进行了退火的热处理过程,在此假设热处理已经消除了 GMF 内部的残余应力.

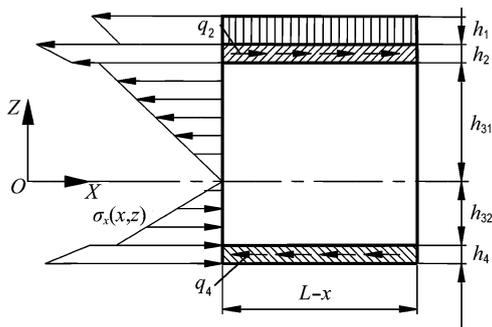


图 1 具有气敏涂层的双层 GMF 悬臂梁应力分析
Fig. 1 Stress analysis of cantilever double layer GMF with gas sensitive layer

2.2 具有气敏涂层的双层 GMF 磁致伸缩变形方程

针对具有气敏涂层的双层 GMF 悬臂梁变形前后几何形式,为了得到 GMF 悬臂梁内各点的位移变化情况,对具有气敏涂层的双层 GMF 所受的磁致伸缩力进行如下等效假设^[7]:

(1) 梁变形前垂直双层 GMF 悬臂梁轴线的横截面,在变形后仍为平面;

(2) 双层 GMF 悬臂梁横截面变形后的平面仍与变形后的 GMF 悬臂梁轴线垂直,即忽略 GMF 变形中的剪切应变.

以具有气敏涂层的双层 GMF 悬臂梁的主惯性轴为薄膜系统的单元坐标系 $O-XYZ$, XOY 和 XOZ 分别为悬臂梁的对称面.基于上述两点假设,具有气敏涂层的双层 GMF 梁内某点 (x, y, z) 的位移可表示为

$$u = u(x, z) = u_n(x) - z \frac{\partial w}{\partial x},$$

$$v = v(x) = 0, w = w(x) \quad (5)$$

其中 $u_n(x)$ 为中性轴的轴向位移.

2.3 具有气敏涂层的双层 GMF 应力应变

具有气敏涂层的双层 GMF 悬臂梁在低磁场作用下发生的磁致伸缩变形属于大挠度问题,根据传统的几何非线性理论,具有气敏涂层的双层 GMF 的磁致伸缩应变应为格林应变^[8],即

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (6)$$

根据假设(1)、(2), $v = v(x) = 0$,并略去高阶项有

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad (7)$$

所以由式(5)得

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_n(x)}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad (8)$$

由于具有气敏涂层的双层 GMF 磁致伸缩变形为小应变大挠度变形,属于发生在弹性范围内的有限变形.假设气敏涂层、GMF 以及基片都由均匀弹性各向同性材料构成,则仍可采用胡克定律来解释具有气敏涂层的双层 GMF 的磁致伸缩本构方程中应变和应力关系.克希霍夫应变和应力关系可表示为

$$\sigma_{xx} = E \epsilon_{xx} \quad (9)$$

2.4 气敏涂层 GMF 悬臂梁的平衡方程

如图 1 所示,从具有气敏涂层的双层 GMF 悬臂梁应力截面图可以看出,选择 GMF 悬臂梁中性轴为 X 轴,则非磁性基片上表面到中性轴的距离为 h_{31} ,中性轴距基片下表面的距离为 h_{32} ,基片的厚度为 h_3 ,即 $h_{31} + h_{32} = h_3$.气敏涂层的厚度为 h_1 ,正负超磁致伸缩薄膜的厚度分别为 h_2 和 h_4 .

根据力平衡原理可以得到具有气敏涂层 GMF 的平衡方程为

$$\sum \sigma_x(x, z) dz + q_i dx dz = 0 \quad (10)$$

其中 $i = 2, 4$.在 XOZ 面内积分,有

$$\left[\frac{\partial u_n(x)}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] (E_1 h_1 + E_2 h_2 + E_3 h_3 + E_4 h_4) - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} [E_1 (h_1^2 + 2h_1 h_{21} + 2h_1 h_{31}) + E_2 (h_2^2 + 2h_2 h_{31}) + E_3 (h_{31}^2 - h_{32}^2) - E_4 (h_4^2 + 2h_4 h_{32})] + q_2 (L - x) h_2 + q_4 (L - x) h_4 = 0 \quad (11)$$

由于正负磁致伸缩层产生的磁致伸缩力比较接近,为便于求解具有气敏涂层 GMF 悬臂梁的磁致伸缩作用下的挠曲线方程,假设正负 GMF 层产生的磁致伸缩力大小相等,即 $q_2 = q_4 = q$.所以,具有气敏涂层的双层 GMF 悬臂梁中性轴的轴向位移 $u_n(x)$ 相对于垂直方向的挠度很小,可忽略不计.式(11)可简化为

$$K_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + K_2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + K_3 x + K_4 = 0 \quad (12)$$

$$K_1 = -\frac{1}{2} [E_1 (h_1^2 + 2h_1 h_{21} + 2h_1 h_{31}) + E_2 (h_2^2 + 2h_2 h_{31}) + E_3 (h_{31}^2 - h_{32}^2) - E_4 (h_4^2 + 2h_4 h_{32})];$$

$$K_2 = \frac{1}{2} (E_1 h_1 + E_2 h_2 + E_3 h_3 + E_4 h_4);$$

$$K_3 = -(q_2 h_2 + q_4 h_4) = -q(h_2 + h_4);$$

$$K_4 = (q_2 h_2 + q_4 h_4)L = q(h_2 + h_4)L \quad (13)$$

K_1, K_2, K_3 和 K_4 单位分别为 $\text{Pa} \cdot \text{m}^2, \text{Pa} \cdot \text{m}, \text{N}/\text{m}^2, \text{N}/\text{m}$.由悬臂梁的夹持状态可知平衡方程的边界条件为

$$x = 0, w(0) = 0; x = L, w'(L) = 0 \quad (14)$$

求解具有气敏涂层的 GMF 挠曲线微分方程式(12),可得到相应的挠曲线表达式,并可以得到气敏涂层 GMF 悬臂梁端部位移与应变的关系:

$$d = -\frac{1}{2} \epsilon_x L_0^2 / \bar{z} \quad (15)$$

其中 L_0 为悬臂梁长度, \bar{z} 为正超磁致伸缩材料层到中性轴的距离.

3 静态实验及结果分析

为了验证所推导出的气敏涂层 GMF 的几何方程、应力应变和平衡方程,选用对某种气体有吸附作用的敏感涂层溶液和双层 GMF 作为实验对象,制备具有气敏涂层的 GMF,利用实验室已有的测试装置测量双层 GMF 磁极化曲线和悬臂梁挠曲线,并将实验数据与数学模型进行分析比较,以揭示外界参数对甩胶前后 GMF 磁致伸缩特性的影响规律.

3.1 具有气敏涂层的 GMF 及实验系统

实验采用铽镝铁-聚酰亚胺-钐铁 (TbDyFe/PI/SmFe) 和铽镝铁-铜-钐铁 (TbDyFe/Cu/SmFe) 两种不同基片的气敏涂层超磁致伸缩双层膜,两种膜的磁致伸缩层一样, TbDyFe 和 SmFe 的厚度均为 $1 \mu\text{m}$;基片 PI 和 Cu 的厚度为 $50 \mu\text{m}$;气敏涂层由浓度为 $10 \text{ mg}/\text{mL}$ 的聚赖氨酸和白蛋白溶液在 $600 \text{ r}/\text{min}$ 的甩胶机上甩胶制成,厚度为 $1.2 \mu\text{m}$.

为了测量气敏涂层 GMF 的静态磁致伸缩特性,开发了相应的实验系统,激光测位移传感器 (MTI 仪器公司) 测量具有气敏涂层的 GMF 悬臂梁端部位移曲线数据,亥姆霍兹线圈用于为 GMF 磁致伸缩效应产生相对均匀的驱动磁场.

3.2 实验设计与结果分析

(1) 模型的验证

基片的弹性模量 $E_{\text{TbDyFe}}, E_{\text{SmFe}}, E_{\text{PI}}, E_{\text{Cu}}$ [9] 分别为 $50, 140, 4, 130 \text{ GPa}$,气敏涂层的弹性模量为 52 MPa .图 2 和 3 给出了不同基片的气敏 GMF 磁致伸缩滞回实验数据与所提出的理论模型曲线的比较结果,由此可见,理论模型可很好地预测低磁场作用下具有气敏涂层的 TbDyFe/PI/SmFe 和 TbDyFe/Cu/SmFe 薄膜的磁致伸缩值.此外,刚度相对较小的 TbDyFe/PI/SmFe 薄膜产生的应变明显高于刚度相对较大的 TbDyFe/Cu/

SmFe 薄膜的应变.

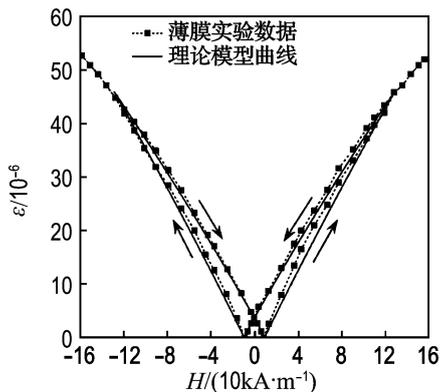


图 2 悬臂梁式 TbDyFe/PI/SmFe 薄膜滞回曲线与理论比较

Fig. 2 Hysteresis loops and theory curve of cantilever TbDyFe/PI/SmFe film

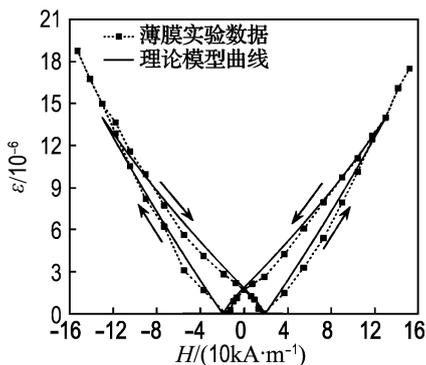
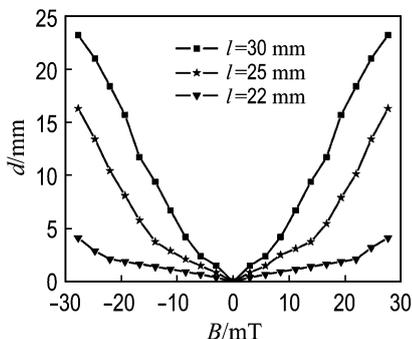


图 3 悬臂梁式 TbDyFe/Cu/SmFe 薄膜滞回曲线与理论比较

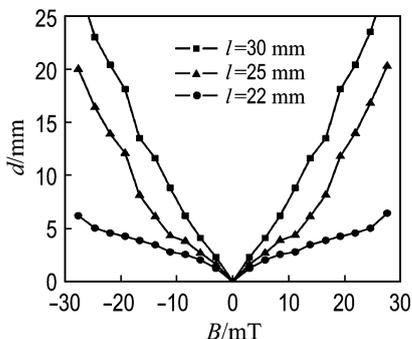
Fig. 3 Hysteresis loops and theory curve of cantilever TbDyFe/Cu/SmFe film

(2)GMF 磁致伸缩与磁场驱动电压及 GMF 尺寸参数的关系

图 4(a)和(b)分别为甩胶前和甩胶后长度为 30 mm、宽度为 3 mm 的铜基片 GMF 悬臂梁末端偏移量与线圈驱动电压的关系. 由图可以看出,线



(a) 甩胶前

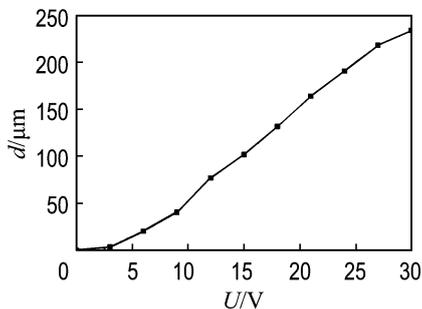


(b) 甩胶后

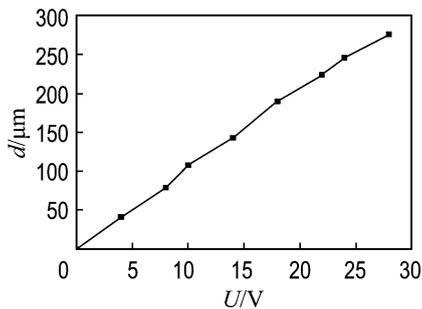
图 5 不同悬臂长度下悬臂梁式 GMF 的磁致伸缩

Fig. 5 Magnetostriction of GMF in the different cantilever length situations

圈驱动电压对 GMF 磁致伸缩的影响关系是, GMF 的磁致伸缩末端偏移量与驱动电压成一定的线性关系,但由于磁滞影响在低磁场段线性度差,在薄膜器件设计过程中尽可能使薄膜避免磁滞的电压工作区域,将线性度较好的中间电压段设计为薄膜器件的驱动电压段,这样有利于简化器件的驱动方式. 甩胶后的 GMF 磁致伸缩效应明显比甩胶前的线性度好,悬臂梁末端偏移量大.



(a) 甩胶前



(b) 甩胶后

图 4 GMF 悬臂梁的末端偏移量与线圈驱动电压关系

Fig. 4 Relation between driven voltage and displacement of GMF cantilever beam

比较甩胶气敏涂层前后的 3 mm 宽铜基片薄膜在低磁场作用下悬臂长度对磁致伸缩的影响(如图 5(a)和(b)所示)可以看出,薄膜悬臂长度

越长其磁致伸缩越大,磁致伸缩的磁滞现象随着薄膜悬臂长度的增加而减小.比较有无气敏涂层的两种薄膜,明显可以看出有气敏涂层的GMF的磁致伸缩量大,主要是由于在GMF表面镀有敏感层,其静止质量增加,振动效果明显.而且,甩胶后的气敏GMF在低磁场下的磁滞现象明显减少.由此可见,甩胶后的具有气敏涂层的GMF在应用于传感器的设计中有更好的灵敏性.

4 结 论

(1)将正磁致伸缩效应层上涂覆气敏涂层的双层GMF作为研究对象,建立了其悬臂梁式低磁场下静态磁机耦合模型,实验结果表明所提出的模型不需复杂的计算和繁多的参数便可较好地预测具有气敏涂层的GMF低磁场下的磁致伸缩回线.研究结果将为GMF微传感执行器件的原理、结构等方面的设计、计算提供重要理论基础.

(2)气敏GMF的磁致伸缩效应不仅与磁致伸缩靶材的成分、制备过程的环境条件以及热处理方法有关,还与磁场驱动电压成一定的线性关系,悬臂梁式薄膜磁致伸缩应变随着悬臂长度的增大而增加.

(3)甩胶气敏涂层前后GMF磁致伸缩效应的实验对比表明,具有气敏涂层的GMF表现出更好的低磁滞性和灵敏性,为GMF微型气体传感器件进一步的研究提供了有利条件.

参 考 文 献:

- [1] BODY C, REYNE G, MEUNIER G, *et al.* Application of magnetostrictive thin films for microdevices [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 1997, **33**(2): 2163-2166
- [2] QUANDT E, LUDWIG A, MENCIK J, *et al.* Giant magnetostrictive thin film materials and applications [J]. **Journal of Alloys and Compounds**, 1997, **258**(1-2): 126-132
- [3] 周白杨, 邓光华, 林庆彬. 试片取向与IBS沉积TbDy-Fe膜应力及磁伸性能[J]. **真空科学与技术学报**, 2005, **25**(4): 268-270
- [4] 焦 正, 张耀华. 多层薄膜气敏材料研究概况[J]. **功能材料**, 1998, **29**(5): 458-461
- [5] 万 红, 李再轲, 邱 铁, 等. TbDyFe超磁致伸缩薄膜的低场磁敏特性[J]. **中国有色金属学报**, 2004, **14**(1): 37-41
- [6] DU TRÉMOLET DE LACHEISSERIE É. **Magnetostriction: Theory and Applications of Magneto-elasticity** [M]. Florida: CRC Press, 1993: 53-55
- [7] 李卓球, 董文堂. **非线性弹性理论基础** [M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [8] 刘正兴, 孙 雁, 王国庆. **计算固体力学** [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000
- [9] 王福吉. 正负超磁致伸缩复合薄膜静态特性及控制关键技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2005

A static magnetomechanical coupling model and its experimental study of giant magnetostrictive thin film with gas sensitive layer

WANG Fu-ji*, JIA Zhen-yuan, LIU Wei, ZHAO Jian-guo

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Study on the magnetostrictive characteristics of giant magnetostrictive thin film (GMF) with gas sensitive layer is prerequisite to implement its application to micro-gas sensor field. Based on the nonlinear elastic theory and the assumption that the magnetostrictive effect is equivalent to the effect of body force loaded on GMF, a low magnetic field static magnetomechanical coupling model of cantilever double layer GMF with gas sensitive layer is established and mathematics relationship between magnetic field and displacement of cantilever GMF is resolved. The correctness of mathematics relationship between magnetic field and displacement is validated by experiments on TbDyFe/PI/SmFe and TbDyFe/Cu/SmFe of double layer GMF with gas sensitive layer. Experimental results indicate that the deflection curve model has better predictability and the GMF with gas sensitive layer exhibits larger magnetostrictive strains.

Key words: sensitive layer; thin film; magnetomechanical coupling; giant magnetostrictive effect