

悬臂梁结构 Sm-Fe GMFs 的磁致伸缩及幅频特性

周白杨, 雷德辉

(福州大学 材料科学与工程学院, 福州 350108)

摘要: 采用离子束溅射沉积(IBSD)法在聚酰亚胺衬底上沉积不同厚度 Sm-Fe GMFs; 采用磁致伸缩测量仪测试制备态和不同温度真空退火后薄膜悬臂梁结构自由端偏转量; 利用赫姆霍兹系统测量制备态和真空退火后薄膜的幅频特性。结果表明: 在低频(0~100 Hz)范围内, 检测到悬臂梁结构 Sm-Fe GMFs 共振现象, 薄膜经过 200 °C 真空退火后, 其低场磁敏性明显提高, 在 74.1 Hz 的频率下发生共振, 其振幅可达到 300 μm, 比制备态时提高了约 3 倍; 制备的 Sm-Fe GMFs 显示出优异的幅频特性, 振动与驱动电流的响应曲线表现出很好的跟随性。

关键词: Sm-Fe GMFs; 悬臂梁结构; 低场磁敏性; 频率; 振幅

中图分类号: TB34、TB123

文献标志码: A

Magnetostriction and amplitude-frequency characteristics of cantilever beam structure Sm-Fe GMFs

ZHOU Bai-yang, LEI De-hui

(College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Sm-Fe GMFs with different thickness were fabricated by ion beam sputtering deposition (IBSD) on polyimide substrate. The deflection of cantilever beam end and the amplitude-frequency characteristic for the as-deposited film and the films after vacuum annealing treatment at different temperatures were investigated by magnetostrictive measuring instruments. The results show that the resonant phenomenon for cantilever beam structure of Sm-Fe GMFs films are discovered at low frequencies range(0–100 Hz). The magnetic sensitivity in low magnetic field is improved obviously after vacuum annealing treatment at 200 °C, the resonance frequency of the film is 74.1 Hz, and the value of the amplitude can reach 300 μm, about 3 times higher than that of the as-deposited film. Sm-Fe GMFs show excellent low frequency characteristic, and the curve of resonance behaves consistent with the driving current curve.

Key words: Sm-Fe GMFs; cantilever beam structure; low field magnetic sensitivity; frequency; amplitude

超磁致伸缩薄膜(GMFs)是近几年发展起来的一种新型的功能材料,由于其能量密度高,响应频率快,非接触式驱动及易微型化、集成化等优点,使其在微传感器、微执行器等领域具有广阔的应用前景^[1-6]。HONDA 等^[7-8]利用双面超磁致伸缩复合膜设计一个微行走机械,在外加磁场为 39 789 A/m,激励频率为 70 Hz 时,其向前行走的速度能达到 65 mm/s; OKAZAKI 等^[9]检测 FePd-Al-Ni 和 FeGa-Al-Ni 薄膜的

振动特性,20 mm 长的薄膜在 50 mT 的交流磁场下最大振幅可达到 1.4 mm;刘巍^[10]和张永顺等^[11]分析其制备的正负超磁致伸缩双面膜在低磁场下的振动特性,研制一种微型泳动机器人;庄辉虎^[12]对 Sm-Fe 系薄膜进行了不同温度真空退火处理研究,其结果表明,合适温度的真空退火可以提高其磁致伸缩性能,特别是低场(0~100 mT)下的磁敏性。迄今为止,国内外主要针对制备态 GMFs(主要是具有正磁伸性的 Tb(Dy)-Fe

系薄膜)的特性进行分析,而对于具有最大负磁伸性的 Sm-Fe 系薄膜及成膜后合适的后处理技术对其磁伸性能(尤其是其低场磁敏性)及其动态幅频特性的影响尚未见系统的研究报道。为更好设计开发低频驱动超磁致伸缩薄膜型微器件,研究 Sm-Fe GMFs 在外加磁场作用下的磁致伸缩及幅频特性具有重要的意义。

本文作者利用 IBSD 法在聚酰亚胺(R_a 1 nm)衬底上溅射沉积不同厚度 Sm-Fe GMFs,采用 DWS 型超精密振动-位移测量仪测量悬臂梁结构 Sm-Fe GMFs 自由端偏转量;利用赫姆霍兹系统组成的实验测试装置对制备态和不同温度真空退火后 Sm-Fe GMFs 的在低场、低频(0~100 mT、0~100 Hz)下的动态幅频特性进行测试分析。

1 实验

1.1 Sm-Fe GMFs 的制备

采用 IBSD 法在聚酰亚胺衬底(20 mm × 5 mm × 80 μm)上制备 Sm-Fe GMFs。图 1 为离子束溅射沉积 Sm-Fe GMFs 的示意图。溅射靶材为真空熔铸 Sm-Fe 合金靶,溅射气体为高纯氩气(99.999%),溅射工艺参数如下:背底真空不大于 2.0×10^{-5} Pa,工作气压 $2 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-2}$ Pa,放电电压 50~100 V,束流电压 800~1500 V,加速电压 250~350 V,束流电流 10~30 mA。

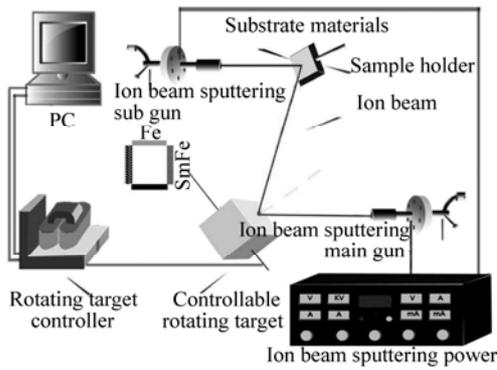


图 1 离子束溅射沉积 Sm-Fe GMFs 示意图
Fig.1 Schematic diagram for deposition of Sm-Fe GMFs by ion beam sputtering

1.2 Sm-Fe GMFs 的真空退火

采用 IMS500 型超高真空离子束镀膜设备的内置加热炉对 Sm-Fe GMFs 样品进行真空退火,背底真空为 2.0×10^{-4} Pa。真空退火温度为 150 和 200 。升温速度 0.2 /s,保温 30 min,降温速度为 0.1 /s。

1.3 Sm-Fe GMFs 特性测试

采用 XL30-ESEM-TNP 型环境扫描电镜观察 Sm-Fe GMFs 表面形貌;借助 EPM8100 型电子探针显微分析仪对 Sm-Fe GMFs 进行成分分析;利用 DWS 型超精密振动-位移测量仪测量悬臂梁结构 Sm-Fe GMFs 自由端在外加磁场作用下的偏转量(悬臂梁长为 16 mm),如图 2 所示。

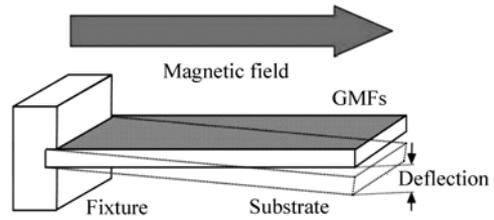


图 2 悬臂梁结构 Sm-Fe GMFs 受磁场作用发生偏转示意图
Fig.2 Schematic diagram for deflection of Sm-Fe GMFs cantilever beam in magnetic field

利用赫姆霍兹系统组成的实验装置测量 Sm-Fe GMFs 的幅频特性,实验装置如图 3 所示,主要包括 BP4610 超磁致伸缩双极性电源一台、赫姆霍兹驱动线圈、LTC 025-2 型 MicrotrakII“高速”激光位移量测系统一套及数字式荧光示波器等(动态幅频特性的峰值由示波器显示,按校准结果,端点振动峰峰值(μm)为示波器示值 × 1/4)。

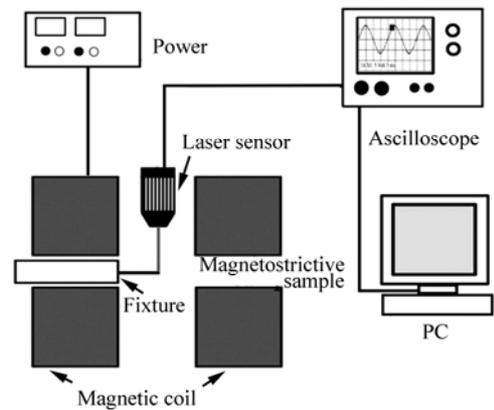


图 3 Sm-Fe GMFs 幅频特性测试示意图
Fig.3 Schematic diagram of vibration characteristic measuring for Sm-Fe GMFs

2 结果与讨论

2.1 Sm-Fe GMFs 的成分和形貌观察

图 4 所示为 IBSD 法溅射沉积 Sm-Fe GMFs 的表

面形貌。从图 4 中可以看出, 采用拟定的 IBSD 工艺可获得膜面光滑平整, 膜层组织致密, 成分均匀且与衬底结合紧密^[13](膜-衬底结合强度定性实验)的 Sm-Fe GMFs。经测定, 制备的薄膜试样厚度为 0.45~0.70 μm ; 实验所用 Sm-Fe GMFs 试样成分为 SmFe_{20} 。

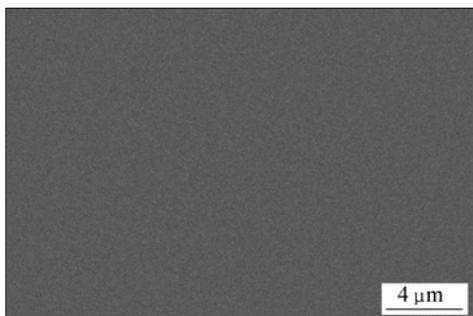


图 4 Sm-Fe GMFs 样品的表面形貌
Fig.4 Surface morphology of Sm-Fe GMFs

2.2 制备态 Sm-Fe GMFs 磁致伸缩及幅频特性

图 5 所示为不同膜厚 Sm-Fe GMFs 悬臂梁自由端的偏转量随外加磁场强度变化而变化的曲线。从图 5 中可以看出, 不同膜厚的 Sm-Fe GMFs 在 300~400 kA/m 的外加磁场作用下磁偏转量均达到饱和。这是因为外加磁场由小到大的变化过程中, 磁性薄膜内的磁畴边界发生移动; 畴内的磁矩会发生旋转, 且各个磁畴在外磁场方向上发生磁致伸缩形变; 当磁性薄膜内的磁畴基本与外磁场方向平行时, 薄膜将不再伸长, 即可达到饱和磁致伸缩状态。同时从图 5 中可知, 薄膜的饱和磁偏转量随膜厚的增加逐渐增大, 0.70 μm 厚 Sm-Fe GMFs 在外加磁场作用下最大偏转量达到 107.6 μm 。

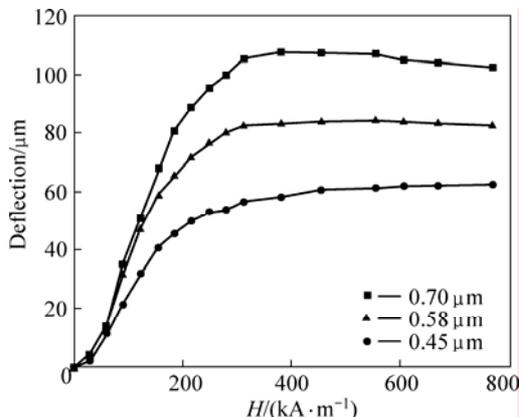


图 5 制备态不同膜厚的 Sm-Fe GMFs 的 $D-H$ 曲线
Fig.5 $D-H$ curves of as-deposited Sm-Fe GMFs with different thicknesses

悬臂梁结构在激励磁场作用下为简谐振动^[14]。振幅、频率与相位是谐振动的 3 个特征, 固有频率是系统一种振动特性, 仅仅取决于系统的惯性(薄膜本身的尺寸和质量)和弹性。GMFs 的低频特性是设计开发超磁致伸缩薄膜型微执行器和微传感器器件关键性能参数之一, 且在共振频率的情况下, 薄膜悬臂梁自由端幅频特性与器件设计的要求密切相关。图 6 所示为磁感应强度约为 6 mT 的磁场作用下, 制备态不同膜厚 Sm-Fe GMFs 振幅—频率曲线。

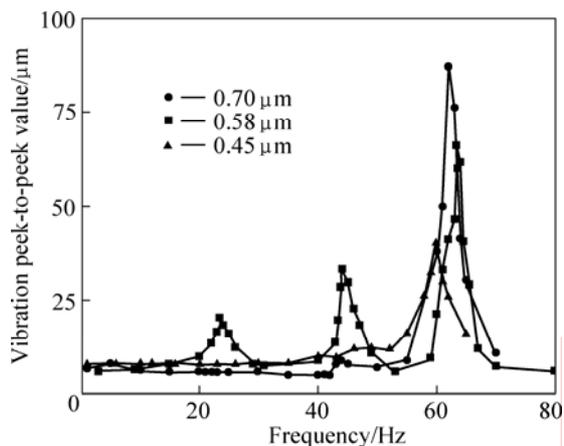


图 6 制备态不同膜厚 Sm-Fe GMFs 振幅—频率曲线
Fig.6 Amplitude—frequency curves of as-deposited Sm-Fe GMFs with different thicknesses

通过分析 Sm-Fe GMFs 幅频特性曲线可知, Sm-Fe GMFs 表现出明显的超谐波共振特征。实验过程采用共振幅值法(即最大峰峰值对应的频率)作为 Sm-Fe GMFs 相应的共振频率。从图 6 中可以看出, 所制备的不同膜厚 Sm-Fe GMFs 的共振频率范围为 60~64 Hz, 且在共振频率下, Sm-Fe GMFs 的振幅随薄膜厚度的增加逐渐增大, 当膜厚为 0.70 μm 时, 其共振时振幅值达 87 μm 。由此可见, 在设计薄膜型器件时可以依据要求制备与衬底厚度匹配且膜厚合适的 Sm-Fe GMFs, 以满足其驱动能力的需求。

2.3 退火态 Sm-Fe GMFs 磁致伸缩及幅频特性

图 7 所示为膜厚为 0.70 μm 的 Sm-Fe GMF 制备态和经过 150 和 200 $^{\circ}\text{C}$ 真空退火后悬臂梁自由端的偏转量随外加磁场强度的变化曲线。从图 7 可看出, 随退火温度的逐渐升高, Sm-Fe GMF 的饱和磁偏转量逐渐降低, 经过 150 $^{\circ}\text{C}$ 真空退火后, Sm-Fe GMF 的低场磁敏性并未改善, 而经过 200 $^{\circ}\text{C}$ 真空退火后, Sm-Fe GMF 低场磁敏性能得到明显地提高。这是因为当退火温度较低时, 薄膜内原子没有足够的能量进行大量的扩散

重排；随着退火温度的升高，薄膜内原子获得较高的能量、进行了较充分的扩散，原子重新排列、膜内缺陷减少，且内应力得到一定的释放^[15]，故导致 Sm-Fe GMF 在低场下的磁敏性得到提高。同时，随退火温度的升高，薄膜原子排列的有序化程度不断提高，膜的结构弛豫趋于充分，微结构各向异性减小，膜面内趋于各向同性，在一定程度上降低了其饱和磁偏转量。

图 8 所示为磁感应强度约为 6 mT 的磁场作用下，膜厚为 0.70 μm 的 Sm-Fe GMF 制备态和经过 150 和 200 °C 真空退火后的振幅—频率曲线。从图 8 可知，制备态 Sm-Fe GMF 成膜后经低温真空退火处理，其一阶共振频率在小范围内随退火温度的升高而增大 (60 ~ 74 Hz)；而其在低频率下发生共振时的振幅则随低温退火温度的升高而明显增大，经过 200 °C 真空退火后，其振幅值从制备态的 87 μm 提高到 300 μm，比

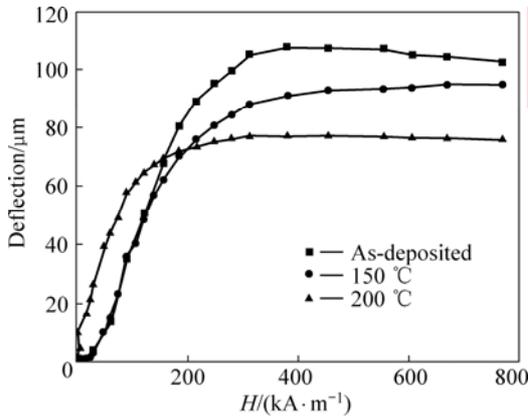


图 7 制备态和不同温度退火态 Sm-Fe GMFs 的 $D-H$ 曲线
Fig.7 $\delta-H$ curves of as-deposited and annealed Sm-Fe GMFs at different temperatures

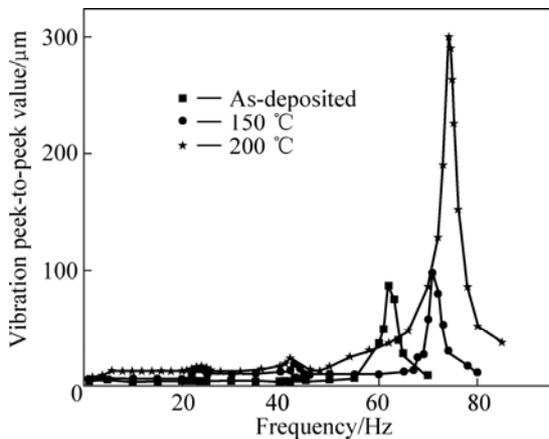


图 8 制备态、150 和 200 °C 退火态 Sm-Fe GMFs 振幅—频率曲线
Fig.8 Amplitude—frequency curves of as-deposited and annealed Sm-Fe GMFs at 150 and 200 °C

制备态时提高了约 3 倍,这主要是与薄膜的内应力及组织结构发生的变化有关^[13]。这表明在特定的驱动电源频率范围内，通过对成膜后的 Sm-Fe GMFs 进行合适温度的真空退火处理，可使得悬臂梁结构薄膜获得较大的振幅，从而改善或调整其驱动能力。

工程上主要应用 GMFs 的动态响应特性。图 9 所示分别为别赫姆霍兹系统输入直流电流 $I_0=0.5$ A 和交流电流 $I_{ac}=1$ A 时，膜厚为 0.70 μm 的悬臂梁结构 Sm-Fe GMF 制备态及经 200 °C 真空退火后，发生一阶共振时，其驱动电流与振动响应随时间变化的响应曲线。

从图 9 中可看出，制备态与成膜后经低温真空退火处理后的 Sm-Fe GMFs 在一阶共振频率下悬臂梁自由端均随驱动信号作同频率振动，且振动波形的波峰波谷排列整齐，说明悬臂梁结构 Sm-Fe GMFs 的反应速度快，输出重复性好；振动与输入电流的响应曲线具有很好的跟随性。同时从图 9 所示的振动响应数据可知，振动波形和驱动电流的波形存在一定相位差(制备态约为 105°，退火态约为 88°)。分析认为，由于驱动线圈为阻感性，流入线圈的电流要滞后于线圈电压一定相位差，同时由于 GMFs 具有磁滞现象，其输出

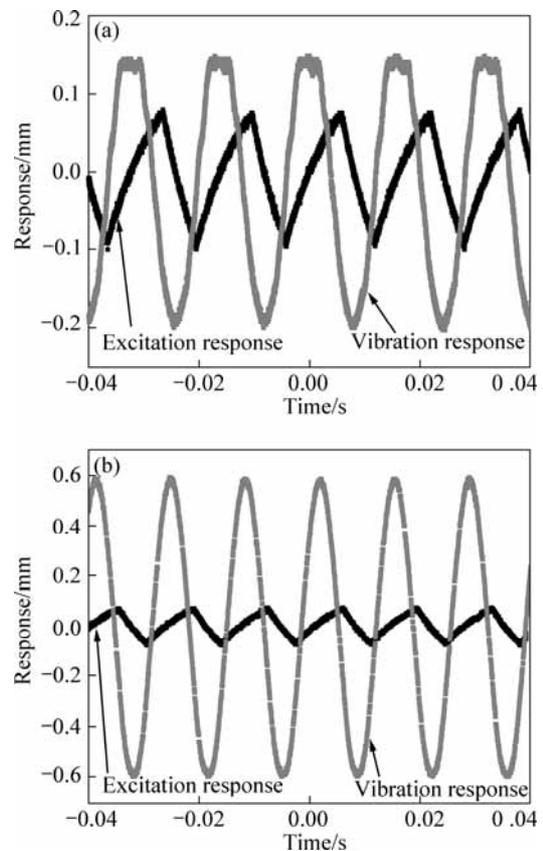


图 9 驱动电流与振动响应随时间变化的响应曲线
Fig.9 Response of driving current and resonance characteristic to time: (a) As-deposited; (b) Annealing at 200 °C

应变滞后于驱动磁场一定相位差,因此,两者综合导致 Sm-Fe GMFs 悬臂梁自由端输出的应变与输入的驱动电流间始终保持着一定的相位差。

3 结论

1) 采用真空熔铸合金靶材和 IBSD 技术可获得膜面平整光滑,膜层组织致密,膜厚均匀且与衬底结合紧密的膜层成份为 SmFe_2 的 Sm-Fe GMFs; 经合适温度的真空退火处理后,可以明显提高 Sm-Fe GMFs 低磁场(0~100 mT)的磁敏性。

2) 在低频(0~100Hz)范围内检测到制备态和经过一定温度真空退火后 Sm-Fe GMFs 的一阶共振频率为 62 ~ 74 Hz。

3) 制备态 Sm-Fe GMFs 在一阶共振频率(63.1 Hz)下的振幅值为 87 μm 经过 200 的真空退火后 Sm-Fe GMFs 在一阶共振频率(74.1 Hz)下的振幅值可达 300 μm 。

4) Sm-Fe GMFs 在一阶共振频率下反应速度快、输出重复性好,振动与驱动电流的响应曲线表现出很好的跟随性。

致谢

感谢大连理工大学机械学院王福吉副教授和李秀研究生在样品动态测试过程中给予的帮助。

REFERENCES

- [1] QUANDT E, LUDWIG A. Magnetostrictive actuation in Microsystems[J]. Sensors and Actuators, 2000, 81(1/3): 275-280.
- [2] LIM S H, KIM H J, NA S M, SUH S J. Application-related properties of giant magnetostrictive thin films[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 239: 546-550.
- [3] KIM Y K, KIM Y Y. A novel Terfenol-D transducer for guided-wave inspection of a rotating shaft [J]. Sensors and Actuators A, 2007, 133(2): 447-456.
- [4] 王伟, 宓一鸣, 钱士强, 周细应. 超磁致伸缩 TbFe/FeAl 多层膜的研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(4): 56-59.
WANG Wei, MI Yi-ming, QIAN Shi-qiang, ZHOU Xi-ying. Giant magnetostrictive TbFe/FeAl multilayer thin film[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(4): 56-59.
- [5] 谢海涛, 斯永敏, 杨德明, 刘希从. 超磁致伸缩薄膜材料及其应用[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(s1): 266-270.
XIE Hai-tao, SI Yong-min, YANG De-ming, LIU Xi-cong. Giant

- magnetostrictive thin film and its application[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metal, 2000, 10(s1): 266-270.
- [6] MEYDAN T, KATRANAS G S, OVARI TA, BORZA F. A novel phase modulation-based system using bi-layer thin film displacement sensors[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 310(2): e986-e988.
- [7] HONDA T, ARAI K L, YAMAGUCHI M. Fabrication of magnetostrictive actuators using rare-earth(Tb, Sm)-Fe thin (invited) [J]. Journal Applied Physics, 1994, 76(10): 6994-6999.
- [8] HONDA T. Basic properties of magnetostrictive actuators using Tb-Fe and Sm-Fe thin films[J]. IEICE Trans Electron, 1997, E80-C(2): 232-237.
- [9] OKAZAKI T, OKANISI N, MIURA Y, MICHIGAMI M, FURUYA Y, TAKEUCHI I, WUTTIG M. Bimorph-type magnetostrictive actuator/sensor thin films[C]// FURUYA Y, SU J, TAKEUCHI I, VARADAN V K, ULICNY J. Materials Research Society Symposium Proceedings. Boston, USA: MRS, 2006: 87-92.
- [10] 刘巍. 超磁致伸缩薄膜的磁机械耦合特性及其在泳动机器人中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 108-116.
LIU Wei. Magnetomechanical coupling characteristic of giant magnetostrictive thin film and its application in swimming robot[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005: 108-116.
- [11] 张永顺, 李海亮, 刘巍, 贾振元. 超磁致伸缩薄膜尾鳍机器人的仿生游动机理[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 37-42.
ZHANG Yong-shun, LI Hai-liang, LIU Wei, JIA Zhen-yuan. Biomimetic swimming principle of a micro robot fish using giant magnetostrictive thin film as caudal fin[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 37-42.
- [12] 庄辉虎. Sm-Fe 系单层、多层交换耦合 GMFs 磁性能与磁敏性研究[D]. 福州: 福州大学, 2007: 52-53.
ZHUANG Hui-hu. The magnetic properties and low magnetic field sensitivity of the SmFe tape GMFs[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2007: 52-53.
- [13] ZHOU Bai-yang, LUO Han-bin. Microstructure and magnetostriction of Sm-Fe GMFs[C]// Proceedings of the 9th Vacuum Metallurgy and Surface Engineering Conference (VM&SE 2009). Shenyang: Electronics Industry Press, 2009: 277-281.
- [14] 方同, 薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998:37-38.
FANG Tong, XUE Pu. Vibration Theory and Application[M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 1998: 37-38.
- [15] 毛宏英. 稀土超磁致伸缩复合膜的低场磁敏性研究[D]. 福州: 福州大学, 2008: 28-30.
MAO Hong-ying. Study on magnetostrictive sensitivity of rare-earth giant magnetostrictive composite film at low magnetic field[D]. FuZhou: Fuzhou University, 2008: 28-30.

(编辑 何学锋)