

# 磁致伸缩材料弱磁场响应特性的实验研究

佟荣光, 赵建林<sup>†</sup>, 成振龙, 周王民

(西北工业大学 理学院 光信息科学与技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710072)

**摘要:**针对磁致伸缩材料在弱磁场传感器领域的应用需要, 采用迈克耳逊干涉原理实验测量了零应力条件下 Tb-Dy-Fe 材料和 Fe-Ga 合金的磁场响应灵敏度, 以及不同应力下 Fe-Ga 合金的磁场响应特性和温度响应特性. 实验结果表明: 在零应力, 外加磁场 16 mT 条件下, Fe-Ga 合金的磁场响应灵敏度远高于 Tb-Dy-Fe 材料, 更合适作为弱磁场传感器敏感材料; 同时, 在 1.2 MPa 预应力和 26 mT 偏置磁场下, Fe-Ga 合金材料具有较好的磁场响应灵敏度和较大的饱和磁致伸缩系数, 因而处在最佳工作状态. 所得到的材料的磁场和温度响应曲线可作为弱磁场传感器参量设计的参考依据.

**关键词:**弱磁场传感器; 磁致伸缩材料; Fe-Ga 合金; Tb-Dy-Fe 材料

**中图分类号:** O482

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)02-311-4

## 0 引言

Tb-Dy-Fe、Fe-Ga 等磁致伸缩材料的研制成功<sup>[1]</sup>, 使电磁能—机械能转换技术获得了突破性进展, 其应用也渗透到了各个方面<sup>[2-4]</sup>. 特别是近年来随着磁场传感器技术的发展, 磁致伸缩材料受到了越来越多的重视<sup>[5-7]</sup>. 作为敏感材料, 磁致伸缩材料是磁场传感器最重要的组成部分之一, 其性质直接决定传感器的性能, 因此材料的选择就成了制作传感器的关键. 传统的磁致伸缩材料, 如过渡金属、稀土金属、稀土—过渡金属间化合物及铜系金属化合物等, 要么饱和磁致伸缩系数太小, 要么居里温度太低, 无法在常温下工作, 故实用价值不高. 目前应用最广的磁致伸缩材料是 Tb-Dy-Fe 材料, 又称为超磁致伸缩材料, 主要以  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$  材料为主, 其饱和磁致伸缩系数  $\lambda_s$  可达到  $2\ 000 \times 10^{-6}$  ppm, 是目前发现在室温条件下饱和磁致伸缩系数最大的磁致伸缩材料<sup>[8-10]</sup>. Fe-Ga 合金是近年来出现的一种新型磁致伸缩材料, 一般是在铁中添加 17% 没有磁性的镓(Ga), 组成 Fe-Ga 合金, 其单晶向的饱和磁致伸缩系数达到  $400 \times 10^{-6}$  ppm<sup>[11]</sup>, 且饱和磁场低, 温度工作范围大, 在 252~353 K 均可正常工作<sup>[12]</sup>.

目前针对磁致伸缩材料的磁场响应灵敏度以及应力和温度响应特性的研究很少. 本文采用迈克耳逊干涉原理实验分析 Tb-Dy-Fe 材料和 Fe-Ga 合金的磁场响应灵敏度, 以及不同应力下 Fe-Ga 合金的磁场响应特性和温度响应特性, 为弱磁场传感器敏感材料的选择提供实验依据.

## 1 磁致伸缩效应

磁性材料在磁场的作用下, 其长度和体积会发生微小的变化, 这种现象称为磁致伸缩效应. 其中, 沿着外磁场方向尺寸的相对变化称为纵向磁致伸缩效应, 垂直于外磁场方向尺寸的相对变化称为横向磁致伸缩效应, 体积的相对变化称为体积磁致伸缩. 通常所说的磁致伸缩多指纵向磁致伸缩效应<sup>[7]</sup>.

磁致伸缩的大小通常用相对伸缩即磁致伸缩系数  $\lambda$  表征, 定义为

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

式中  $\Delta l$  表示材料的磁致伸缩量,  $l$  为材料的长度. 增大外加磁场时, 若  $\Delta l > 0$ , 称为正磁致伸缩材料,  $\lambda > 0$ ; 反之, 若  $\Delta l < 0$ , 则称为负磁致伸缩材料,  $\lambda < 0$ . 当外加磁场达到饱和磁化场时, 材料的磁致伸缩将不随外加磁场的变化而变化, 为一特定值, 用  $\lambda_s$  表示, 称为磁性材料的饱和磁致伸缩系数.

## 2 测量原理

采用迈克耳逊干涉原理测量材料的磁致伸缩系数, 实验光路如图 1. 波长为  $\lambda_0 = 632.8$  nm 的 He-Ne 激光器发出的细激光束经扩束准直后由分光棱镜 BS 分成两束, 分别照射在反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  上.  $M_1$  及其反射光束构成参考臂;  $M_2$  及其反射光束构成可自由滑动的传感臂, 由磁致伸缩材料驱动. 其中,  $M_2$  由一个底座可自由滑动的支架支撑, 支架的摩擦系数很小, 摩擦力的影响可以忽略, 并且支架可以减少振动对测量的影响. 用 CCD 接收由两束反射光束形成的等厚干涉条纹, 并由计算机进行数据处理.

<sup>†</sup>Tel: 029-88431663-801 Email: jlzha@nwpu.edu.cn  
收稿日期: 2008-02-01

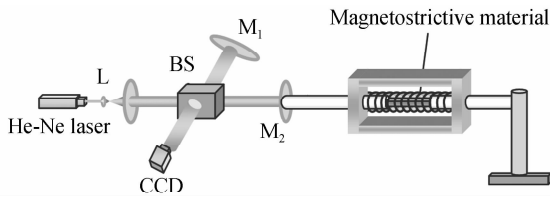


图1 测量磁致伸缩系数实验装置

Fig. 1 Experimental setup for measuring magnetostriction coefficient

测量磁致伸缩材料的磁场响应特性时,磁场由通电螺线圈产生,但单个螺线圈产生的磁场会发生空间泄漏,与光路中其它器件发生作用,影响测量结果的准确性.为此,实验设计了一种结构,用磁导率比较大的铁氧体材料在外面将线圈封装起来,使磁场在线圈和铁氧体材料中形成闭合回路.这样有效地防止了磁场的泄漏,也减小了空间磁场的影响,同时也改善了结构的导热性,减小了温度对测量结果的影响,线圈中磁场的均匀性也变得更好.

实验中,Fe-Ga合金样品的尺寸为 $50 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ ,Tb-Dy-Fe材料样品的尺寸为 $15.4 \times 10.2 \times 2 \text{ mm}^3$ ,所用线圈长20 cm,且20 circles/cm.磁场的大小用CTCC-1型特斯拉计读取.实验过程中,室温保持在 $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 零压力状态下材料的磁场响应特性

对Fe-Ga合金和Tb-Dy-Fe材料样品在零压力状态下的磁场响应特性进行了测量,即材料不受任何应力情况下,通过改变螺线圈中的电流而改变作用在材料上的磁场,观察样品的磁致伸缩系数的变化,测量结果如图2.

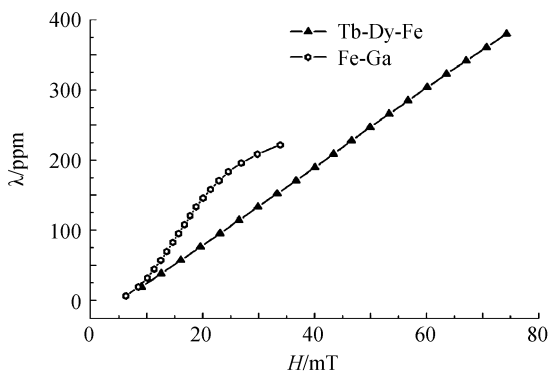


图2 零压力状态下Fe-Ga合金和Tb-Dy-Fe材料磁致伸缩系数随外加磁场的变化

Fig. 2 Relationships of magnetostriction coefficient of Fe-Ga alloy and Tb-Dy-Fe material without external stress vs. magnetic field

从图2中可以看出,Fe-Ga合金在外加磁场为40 mT时,磁致伸缩趋于饱和,此时材料的磁致伸缩系数约为230 ppm;Tb-Dy-Fe材料在外加磁场为

80 mT时,磁致伸缩仍有较好的线性,没有饱和,此时磁致伸缩系数约为400 ppm,饱和时约为1 200 ppm.这表明Tb-Dy-Fe材料的饱和磁致伸缩系数要远大于Fe-Ga合金.从这一点上说,选择Tb-Dy-Fe材料作为磁场传感器的敏感材料更合适,但选择弱磁场传感器敏感材料的关键是材料的磁场响应灵敏度,即材料的 $(\lambda-H)$ 曲线的最大斜率 $d_{33} = (d\lambda/dH)_{\max}$ .对图2的数据做微分运算,结果如图3.

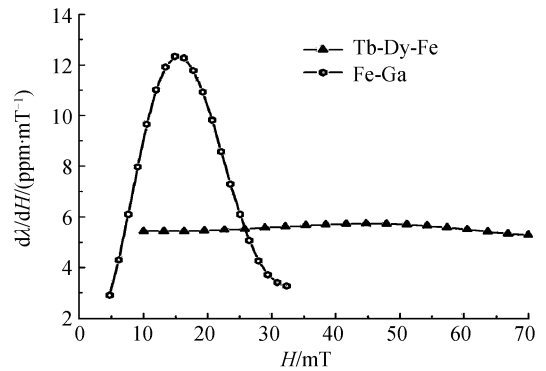


图3 零压力状态下Fe-Ga合金和Tb-Dy-Fe材料磁致伸缩系数随外加磁场变化的微分曲线

Fig. 3 Differential curve of the magnetostriction coefficient of Fe-Ga alloy and Tb-Dy-Fe material without external stress vs. magnetic field

从图3中可以看出,Fe-Ga合金的 $\lambda-H$ 曲线的最大斜率 $d_{33} = 12.33 \text{ ppm/mT}$ ,而Tb-Dy-Fe材料的 $d_{33} = 5.7312.33 \text{ ppm/mT}$ .这表明Fe-Ga合金的磁场响应灵敏度要好于Tb-Dy-Fe材料,因而更适用做弱磁场传感器敏感材料.

此外,作为弱磁场传感器的敏感材料还要有一定的磁场响应线性区.对图2和图3做进一步分析可知,外加磁场在 $0 \sim 10 \text{ mT}$ 时,Fe-Ga合金的磁致伸缩随磁场的变化不是很明显,外加磁场在 $11 \sim 20 \text{ mT}$ 时,材料的磁致伸缩随磁场的变化明显;在16 mT左右时,Fe-Ga合金的 $\lambda-H$ 曲线的斜率最大,材料对磁场最敏感,并且在此值附近,材料的磁致伸缩与外

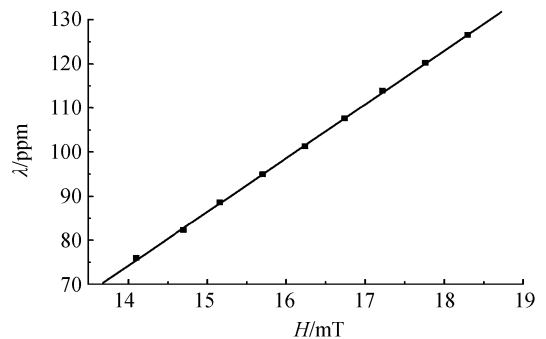


图4 零压力状态下Fe-Ga合金磁致伸缩系数随外加磁场变化曲线的线性拟合

Fig. 4 Linearity fitting of the magnetostriction coefficient curve of Fe-Ga alloy without external stress vs. magnetic field

加磁场的关系接近于线性,线性拟合结果如图 4. 随着磁场的继续增大,材料的磁致伸缩趋于饱和.

### 3.2 不同应力状态下 Fe-Ga 合金的磁场响应特性

作为弱磁场传感器的敏感材料,磁致伸缩材料还需要有一定的抗压强度,实验测量了 Fe-Ga 合金样品在不同压力下磁致伸缩系数与外加磁场的关系,结果如图 5.

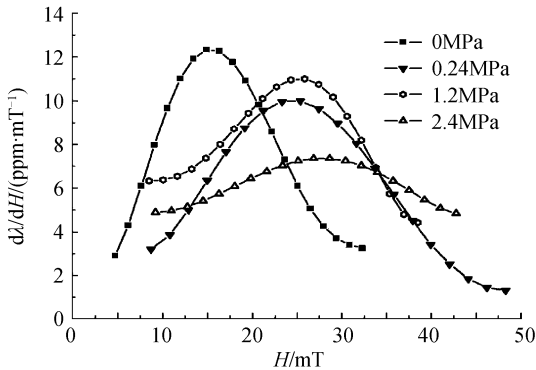


图 5 不同应力条件下 Fe-Ga 合金磁致伸缩系数随外加磁场变化微分曲线

Fig. 5 Differential curve of the magnetostriction coefficient of Fe-Ga alloy vs. magnetic field under different stresses

从图中结果可看出, Fe-Ga 合金的  $\lambda$ - $H$  曲线的最大斜率  $d_{33}$  值对应的磁场随着外加应力的增大而增高,且曲线变得更平缓,晶体的饱和磁场变大,线性区变大,材料工作范围变宽;在零压力时,材料的  $d_{33}$  值最大,随着外加应力的增大,材料的  $d_{33}$  值先减少再增大,在压力为 1.2 MPa 时出现极大值,之后又减小,即材料的大应变提高的同时,弱磁场性能有所下降. 原因是 Fe-Ga 材料的  $\lambda > 0$ , 压力使材料内部有更多的磁畴发生偏转,获得更大的磁致伸缩,但压力过大,磁畴将无法克服压力发生偏转,导致磁致伸缩减小. 对于弱磁场传感器而言,既要求有较高测量准确度,又要有较大测量范围,这就要对磁致伸缩材料施加一定的预应力和偏置磁场,如图 5, 在 1.2 MPa 的应力和 26 mT 的偏置磁场作用下, Fe-Ga 合金的  $\lambda$ - $H$  曲线的最大斜率  $d_{33}$  为 11.03 ppm/mT, 这时可认为材料处在最佳工作状态.

### 3.3 不同应力和偏置磁场条件下 Fe-Ga 合金的温度响应特性

温度对磁致伸缩材料的影响可归结为两方面,首先温度决定材料的工作范围,材料只有在其居里温度以下才能正常工作,文献[11]已经证明 Fe-Ga 合金在  $-21 \sim 80$  °C 范围都可以正常工作;另一方面温度的变化同样会引起磁致伸缩材料的伸缩变化,即材料的温度敏感性问题. 图 6 给出了 Fe-Ga 合金材料在不同应力和偏置磁场条件下的温度响应特性.

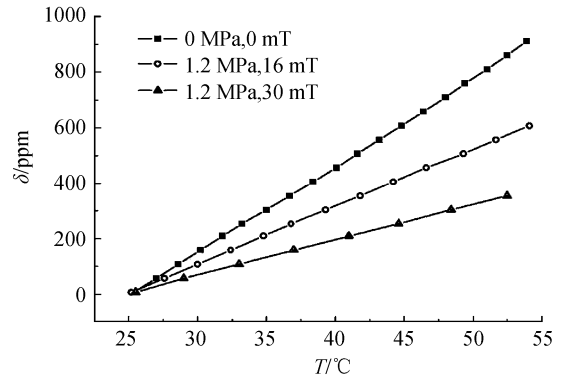


图 6 不同应力和磁场条件下 Fe-Ga 合金伸长量随温度变化曲线

Fig. 6 Elongation of Fe-Ga alloy vs. temperature under different external stresses and magnetic field

从图 6 可看出, Fe-Ga 合金在零应力和无偏置磁场条件下对温度最敏感,温度响应高达 30 ppm/°C; 1.2 MPa 应力和 16 mT 偏置磁场下,温度响应约为 21 ppm/°C; 偏置磁场在 30 mT, 即接近于饱和磁场时,材料对温度敏感度有所下降,约为 12 ppm/°C. 可见在不同应力和偏置磁场条件下,材料的温度敏感度不同. 然而可以看出,在 25 °C ~ 55 °C 范围,其温度响应基本为线性. 为了减小或避免温度的影响,可采用 3 种措施: 1) 由于温度的变化缓慢,其响应可以看成是直流场,测量交流磁场时可以在解调系统中滤掉直流成分; 2) 由于 Fe-Ga 合金只对平行其晶向的磁场敏感,垂直晶向的磁场不敏感,这样可在传感头设计时,使用两个型号相同的 Fe-Ga 合金材料正交放置,组成双探头,在解调时就可以消除温度的影响; 3) 测量并绘制出磁致伸缩材料在不同条件下的温度响应曲线,对温度响应进行标定,在解调时加以消除,本文即采用这种方法进行温度修正. 实验过程中用数字温度计实时监测磁致伸缩材料的温度变化,并根据其温度响应曲线,分段做线性近似,对实验结果进行修正,基本上消除了温度变化对磁场响应结果的影响.

## 4 结论

采用迈克耳逊干涉原理测量了 Tb-Dy-Fe 材料和 Fe-Ga 合金的磁场响应灵敏度,以及不同应力下 Fe-Ga 合金的磁场响应特性和温度响应特性,实验结果表明,在零应力条件下,外加磁场在 16 mT 左右时, Fe-Ga 合金的  $\lambda$ - $H$  曲线的斜率最大,其磁场响应灵敏度高于 Tb-Dy-Fe 材料; 外加磁场在 11 ~ 20 mT 范围时,材料的磁致伸缩与外加磁场成线性关系; Fe-Ga 合金在 1.2 MPa 的外加应力及 26 mT 外加磁场作用下,  $d_{33}$  值为 11.03 ppm/mT, 温度响应为 21 ppm/°C, 此时材料有较大的饱和磁致伸缩系数和较好的磁场

响应灵敏度. 本文的结果可作为弱磁场传感器敏感材料的选择和参量设计的参考依据.

#### 参考文献

- [1] SRISUKHUMBOWORNCHAI N, GURUSWAMY S. Large magnetostriction in directionally solidified FeGa and FeGaAl alloys[J]. *J of Appl Phys*, 2001, **90**(11):5680-5688.
- [2] BAI Xia-bing, JIANG Cheng-bao, GONG Sheng-kai. Electromechanical coupling coefficient of  $Fe_{81}Ga_{19}$  magnetostrictive alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, **43**(4):413-416.  
白夏冰, 蒋成保, 宫声凯.  $Fe_{81}Ga_{19}$  磁致伸缩合金的动态机电耦合系数[J]. *金属学报*, 2007, **43**(4):413-416.
- [3] LI Yong-sheng, ZHANG Shi-rong, YANG Hong-chuan, et al. Development of galfenol magnetostrictive materials[J]. *Chineses Journal of Rare Metals*, 2006, **30**(5):666-670.  
李勇胜, 张世荣, 杨红川, 等. Fe-Ga 合金磁致伸缩材料的研究进展[J]. *稀有金属*, 2006, **30**(5):666-670.
- [4] ZHOU Jin-fang, LI Ming-fan. On tunable of giant magnetostrictive based fiber bragg grating tuning[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1):120-123.  
周金芳, 李明范. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅调谐范围研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1):120-123.
- [5] DANDRIDGE A, TVETEN A B, SIGEL G H, et al. Optical fibre magnetic field sensor[J]. *Electron Lett*, 1980, **16**(11):408-409.
- [6] JILES D C, LO C C H. The role of new materials in the development of magnetic sensors and actuators[J]. *Sensors and Actuators*, 2003, **106**(1-3):3-7.
- [7] CARVALHO H R, BRUNO A C, BRAGA A M, et al. Remote magnetostrictive position sensors interrogated by fiber Bragg gratings[J]. *Sensors and Actuators*, 2006, **135**(1):141-145.
- [8] SUN Guang-fei, QIANG Wen-jiang. Magnetism functional materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.  
孙光飞, 强文江. 磁功能材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [9] JILES D. Introduction of magnetics and magnetic material [M]. XIAO Cun-tao, transl. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2003.  
JILES D. 磁学及磁性材料导论[M]. 肖春涛, 译. 兰州: 兰州大学出版社, 2003.
- [10] WANG Bo-wen. Giant magnetostrictive materials preparation and device design[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.  
王博文. 超磁致伸缩材料制备与器件设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [11] KELLOGG R A, FLATAU A B. Texture and grain morphology dependencies of saturation magnetostriction in rolled polycrystalline  $Fe_{83}Ga_{17}$ [J]. *J of Appl Phys*, 2003, **93**(10):8495-8497.
- [12] KELLOGG R A, FLATAU A B. Temperature and stress dependencies of the magnetic and magnetostrictive properties of  $Fe_{0.81}Ga_{0.19}$  [J]. *J of Appl Phys*, 2002, **91**(10):7821-7823.

## Weak Magnetic Field Response Characteristics of Magnetostrictive Materials

TONG Rong-guang, ZHAO Jian-lin, CHENG Zhen-long, ZHOU Wang-min

(Institute of Optical Information Science and Technology, Shaanxi Key Laboratory of

Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Received date: 2008-02-01

**Abstract:** Based on the application requirements of magnetostrictive materials in weak magnetic field sensor, the magnetic field response sensitivities of Tb-Dy-Fe material and Fe-Ga alloy were measured by using Michelson interferometry. The magnetic field and temperature responses of Fe-Ga alloy under different external stresses were also experimentally analyzed in detail. The experimental results show that when the magnetic induction is about 16 mT in the condition of no external stress, the magnetic field response sensitivity of Fe-Ga alloy is much higher than that of Tb-Dy-Fe material. For the magnetic sensors requiring high sensitivity and small measurement range, Fe-Ga alloy are more suitable as the sensitive material of the sensors. Especially, under 1.2 MPa external stress and 26 mT offset magnetic field, Fe-Ga alloy will exhibit preferable magnetic field response sensitivity and larger saturation magnetostriction coefficient, which can be considered in the optimal working state. Therefore, the measured magnetic field and temperature responses curves of those materials could be used as the parameter design references of weak magnetic field sensors.

**Key words:** Weak magnetic sensor; Magnetostrictive material; Fe-Ga alloy; Tb-Dy-Fe material

**TONG Rong-guang** was born in 1982. He received his B. S. degree in optical information science and technology from Northwestern Polytechnical University (NWPU). Now he is pursuing his M. S. degree in optical engineering at School of Science, NWPU, and his current research interests focus on fiber optical sensor.

