

交流电流对铁基纳米晶丝巨磁阻抗效应形貌的影响*

李印峰[†] 封素芹 王建勇

(邢台学院物理系, 邢台 054001)

(2010年4月7日收到; 2010年6月24日收到修改稿)

本文研究了交流电流的大小($I = 0.2\text{--}20\text{ mA}$)和频率($f = 1\text{--}1\text{ MHz}$)对具有横向畴结构的铁基纳米晶丝的巨磁阻抗效应形貌的影响. 实验结果表明, 样品的巨磁阻抗效应呈双峰特征, 随着频率的增大, 双峰的位置 $H = \pm H_m$ 向高场移动; 但随着电流的增大, 双峰的位置逐渐向中心($H = 0$)收缩, 甚至变成单峰位形. 理论上一般认为, 双峰的位置与横向各向异性场 H_k 相对应, 即 $H_m = H_k$. 然而, 我们发现这一结果只在交流电流很小的情况下才成立. 从转动磁化过程中能量极小的原理出发, 给出了双峰的位置为 $H_m = H_k \cos^3 \theta$, θ 为饱和磁化强度与丝轴的夹角. 根据这一关系, 定性地解释了实验结果.

关键词: 巨磁阻抗效应, 交流电流, 铁基纳米晶丝

PACS: 73.63.Bd, 75.30.Gw, 75.50.Kj

1. 引言

自从上个世纪 90 年代在钴基软磁丝中观测到巨磁阻抗(GMI)效应以来, 人们对这一效应的研究一直有很高的兴趣^[1-4]. 一方面是由于实际应用的价值, 基于 GMI 效应的原理制作而成的各种探测元件可广泛地应用于几乎所有的工程和工业部门, 如高密度磁记录, 航海, 军事, 目标识别, 防盗系统, 无损检测, 磁标签, 地磁测量, 空间研究以及人体的生物磁测量等等; 另一方面, 由于 GMI 效应极其敏感地依赖于材料本身的各种参数(如尺寸, 形状, 各向异性的分布等)和测量的条件(如激发电流的大小和频率, 外加应力和扭矩, 环境温度和测量时间等), 所以这一效应也是研究材料的内部结构以及磁化过程的一个有力工具^[4].

对于软磁丝状合金的 GMI 效应从理论^[5-7]和实验^[8-13]两方面都已进行了大量的研究. 就 GMI 效应的形貌而言, 一般来说, 具有纵向畴结构(丝的轴向为易轴)的样品, 其环向磁化为磁畴转动占主导地位的过程, GMI 效应的极大值位于 $H = H_m = 0$, 即呈现出单峰位形. 而对于具有横向畴结构(丝的轴向为难轴)的样品, 其环向磁化由畴壁的移动和

磁畴的转动组成, GMI 效应的极大值位于 $H = \pm H_m \neq 0$, 即呈现出双峰位形. 理论上认为, 双峰的位置与样品的横向各向异性场 H_k 相对应, 即 $H_m = H_k$. Chen 等的理论^[5]考虑了转动过程中转矩的平衡, 在一定程度上定性地解释了双峰的位置随激发电流的增大而向中心收缩的实验结果. 该理论的结果还被用来解释双峰随频率的升高向两侧展开(或者说向高场移动)的实验现象^[13]. 而 Vázquez 等^[8]将双峰随频率的变化归结为横向各向异性随频率增大的结果, 但并没有进一步说明改变的原因.

本工作研究了由应力退火得到的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 纳米晶合金丝 GMI 效应的形貌随激发电流的大小和频率的变化. 我们发现, 现有的理论模型不能对实验结果作出合理的解释, 因此提出了新的理论观点, 据此对实验观察到的现象作出了较好的解释.

2. 实验

采用旋转水冷却方法制备了 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 非晶态合金丝, 丝的直径为 $2r_0 = 0.14\text{ mm}$. 将一段 15 cm 长的淬态非晶丝在 135 MPa 的外加应力作用下, 经 750 mA 直流电流退火 15 s . 由磁通法测量

* 河北省教育厅科技计划项目(批准号: Z2009143)资助的课题.

[†] E-mail: yinfengli2001@yahoo.com

其纵向磁滞回线^[14]并确定出应力感生各向异性常数为 $K_u = -1.8 \text{ kJ/m}^3$, 相应的各向异性场的大小为 $H_k = 3.2 \text{ kA/m}$. 因此样品为具有横向畴结构的非晶和纳米晶合金.

测量磁阻抗效应的系统主要由一台频谱分析仪 (HP3589A) 和产生直流偏场的亥姆霍兹 (Helmholtz) 线圈组成. 采用四端法, 将样品中部 8 cm 长的一段用 Ag 焊接在测量电路中. 阻抗由测量样品两端的电压与流过样品的电流之比而得. 激发环向磁场的交变电流的大小为 $I_{ac} = 0.2\text{--}20 \text{ mA}$ (有效值), 测量频率为 $f = 1 \text{ kHz--}1 \text{ MHz}$. 最大直流偏场为 $H_{max} = \pm 11.2 \text{ kA/m}$. 整个测量系统由一台微机控制.

定义 GMI 效应为阻抗对纵向磁场的相对变化

$$\frac{\Delta Z}{Z} = 100 \times \frac{Z(H) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})}. \quad (1)$$

3. 结 果

3.1. 电流大小的影响

在频率 $f = 10 \text{ kHz}$ 和 1 MHz 下分别测量了巨磁阻抗效应随激发电流 I_{ac} 的变化 (如图 1 所示). 可以看出, 在频率 $f = 1 \text{ MHz}$ 时, 随电流的增大, 双峰的位置 ($H = \pm H_m$) 向中心收缩, 但始终呈双峰结构; 在 $f = 10 \text{ kHz}$ 的低频下, 随 I_{ac} 的增大, 双峰逐渐收缩并转变成单峰结构. GMI 的峰值场 H_m 随交变电流 I_{ac} 的变化示于图 2, 可见峰值场 H_m 则随 I_{ac} 的增大而减小.

3.2. 频率大小的影响

在电流 $I_{ac} = 1 \text{ mA}$ 和 10 mA 下分别测量了 GMI 效应随频率大小的变化关系, 结果如图 3 所示. 对于 $I_{ac} = 1 \text{ mA}$ 的情况, 始终为双峰的特征, 随频率的增大, 双峰的位置 ($H = \pm H_m$) 向高场移动. 对于 $I_{ac} = 10 \text{ mA}$ 的情况, GMI 效应由低频时的单峰逐渐展开成高频区的双峰特征, 且随频率的增大, 双峰的位置向高场移动. 图 4 给出了 GMI 峰值场 H_m 随频率 f 的变化.

4. 讨 论

正如前面指出的, 具有横向磁畴的合金丝样品

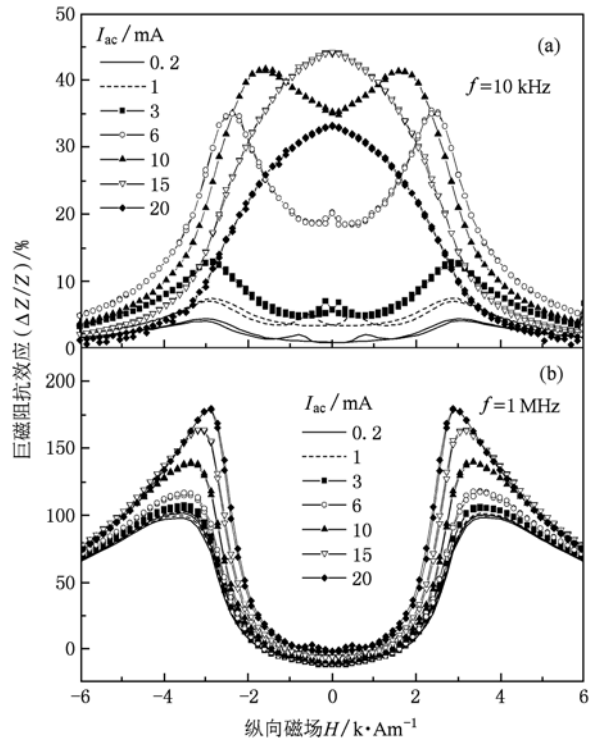


图 1 巨磁阻抗效应随激发电流 I_{ac} 的变化

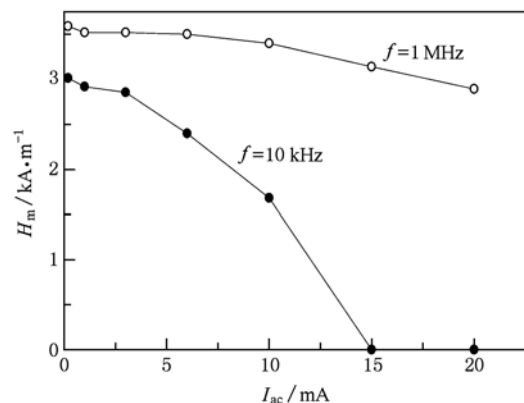


图 2 GMI 的峰值场 H_m 随交变电流 I_{ac} 的变化

的环向磁化是由壁移和转动过程组成的, 当外加纵向直流磁场在低场下 ($H < H_k$) 逐渐增大时, 主要是壁移贡献的环向磁导率也增大; 而在高场下 ($H > H_k$) 随着 H 的增大, 主要由转动过程决定的环向磁化率逐渐减小. 因此, GMI 效应的形貌是由壁移和转动两个过程互相竞争的结果. 大体上来讲, GMI 效应的峰值 ($H = \pm H_m$) 位于样品的横向各向异性场 H_k 附近. 假如 $H_m = H_k$ 成立, 由图 2 知 H_m 随 I_{ac} 的增大而减小, 则同样有 H_k 也减小, 这显然是不对的. 另外, 从图 4 可以看出, H_m 随 f 的减小而减小, 这一

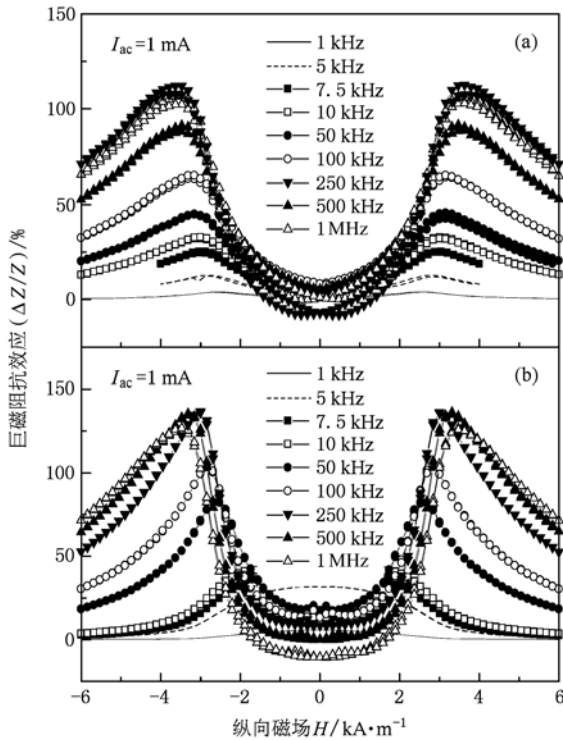


图3 巨磁阻抗效应随频率 f 的变化

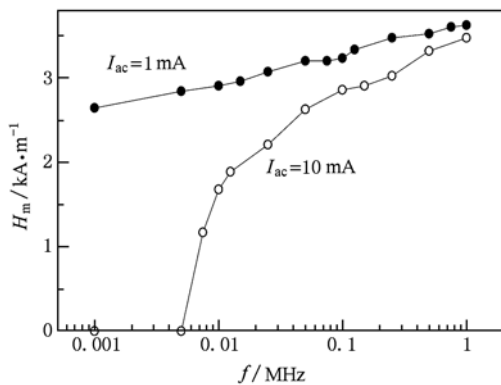


图4 GMI 峰值场 H_m 随频率 f 的变化

变化趋势并不存在什么问题,问题是当 $f < 10$ kHz 时, H_m 开始越来越远小于 $H_k = 3.2$ kA/m. 所以说,通常认为双峰的位置与横向各向异性场相对应,显然是不合理的.

我们再来看 Chen 等的理论^[5]对于双峰随激发电流的增大而向内收缩的解释. 设各向异性能 $E_k = K_u \cos^2 \alpha$, α 为饱和磁化强度 M_s 与丝的横截面的夹角,静磁能为 $E_m = \mu_0 M_s H (1 - \cos \alpha)$. 若 α_m 为环向交流场 H_ϕ 使 M_s 在平衡位置摆动的角幅度,则各向异性能和静磁能相应的平均转矩分别为 $T_k =$

$-K_u(1 - \cos 2\alpha_m)/2\alpha_m$ 和 $T_m = \mu_0 M_s H (1 - \cos \alpha_m)/\alpha_m$, 在平衡位置上应有 $T_k + T_m = 0$, 由此得到 GMI 峰值场的大小为

$$H_m = \frac{K_u}{2\mu_0 M_s} \frac{1 - \cos 2\alpha_m}{1 - \cos \alpha_m} = H_k \frac{1 - \cos 2\alpha_m}{1 - \cos \alpha_m}. \quad (2)$$

随着 I_{ac} 的增大,即环向场增大, α_m 从 0 到 $\pi/2$, 导致 H_m 从 H_k 减小到 $H_k/2$.

对于我们研究的样品,按照这一模型,峰值场 H_m 随激发电流的增大而减小的最小值是 $H_k/2 = 1.6$ kA/m, 从图 2 可以看到,对于 $f = 1$ MHz 的高频情况或许正确,但对于 $f = 10$ kHz 的低频情况显然不对.

下面我们仍然考虑饱和磁化强度 M_s 在平衡位置附近的转动磁化过程. 设 θ 为 M_s 与丝轴的夹角, M_s 在丝的横截面内的投影与丝的径向的夹角为 β . 则总的能量密度为

$$E = K_u \cos^2 \theta - \mu_0 M_s H \cos \theta - \mu_0 M_\phi H_\phi, \quad (3)$$

这里 $M_\phi = M_s \sin \theta \sin \beta$. 将上式分别对 θ 和 β 求微商,由能量极小的条件可以得到 $\theta = \beta = 0$ 或 $\beta = \pi/2$ 且

$$H_\phi = H \tan \theta - H_k \sin \theta, \quad (4)$$

所以环向磁导率为

$$\mu_\phi = \mu_0 \frac{dM_\phi}{dH_\phi} = \frac{\mu_0 M_s}{\frac{H}{\cos^3 \theta} - H_k}. \quad (5)$$

可见,环向磁导率的极大值,也就是 GMI 效应的峰值对应的纵向磁场为

$$H = H_m = H_k \cos^3 \theta. \quad (6)$$

利用(6)式就能较好地解释峰值场 H_m 随激发电流的增大而减小,甚至双峰收缩而形成单峰位形,因为 θ 随 I_{ac} 的增大可从 0 到 $\pi/2$.

另外,若 $H_\phi \approx 0$, 则由(4)式和(6)式得到 $\theta = 0$, 即

$$H_m = H_k. \quad (7)$$

说明只有当环向场很弱时,峰值场与横向各向异性场才相等.

现在我们来解释激发电流大小的影响. 对于 $f = 10$ kHz 的低频情况,环向磁化过程中壁移对环向磁导率的贡献在 $H < H_k$ 的低场区表现相当明显,且随着激发电流的增大而增大,直到 $I_{ac} = 15$ mA 时达到极大然后逐渐减小. 因此,GMI 效应的幅度呈现出与此一致的变化. 由此可推知, $I_{ac} = 15$ mA 相应的环向磁场应为环向磁化的矫顽力场. 而在 $H > H_k$ 的高场区由转动过程决定的双峰的位置将随着 I_{ac} 的

增大而逐渐向中心收缩,直至双峰在中心合而为一.在 $f = 1$ MHz的高频情况下,壁移的贡献在 $H \ll H_k$ 的区域非常小,只当 H 趋近于 H_k 时,随着 I_{ac} 的增大而增大,因此GMI效应的幅度增大.同样,在 $H > H_k$ 的高场区由转动过程决定的双峰的位置将随着 I_{ac} 的增大而逐渐向中心收缩,但在本实验测量的电流幅度范围内GMI效应一直呈双峰位形.

关于峰值场随频率的变化关系可作如下解释.对于 180° 畴壁有 $\delta \propto \sqrt{A/K_u}$, A 为铁磁交换常数.由于在交流磁化过程中,畴壁的厚度 δ 随频率的升高而减小^[15],也可以认为 f 的升高使得各向异性增

大.由(6)式知,峰值场 H_m 将随频率的升高而增大.

5. 结 论

通过对具有横向畴结构的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 纳米晶合金丝GMI效应的形貌随激发电流的大小和频率的变化研究.我们发现,理论上通常认为的峰值场对应于横向各向异性场只有在激发电流很小的情况下才成立.从转动磁化过程中能量极小得到的结果为 $H_m = H_k \cos^3 \theta$,据此定性地解释了实验结果.

- [1] Bao B H, Ren N F, Wang G Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2519 (in Chinese) [鲍丙豪、任乃飞、王国余 2008 物理学报 **57** 2519]
- [2] Coisson M, Tiberto P, Vinai F, Tyagi P V, Modak S S, Kane S N 2008 *J. Magn Magn Mater.* **320** 510
- [3] Ahmet Peksoz, Yunus Kaya, Asli Ayten Taysioglu, Naim Derebasi, Gokay Kaynak 2010 *Sensors and Actuators A* **159** 69
- [4] Phan M H, Peng H X 2008 *Prog. Mater. Sci.* **53** 323
- [5] Chen D X, Munoz J L, Hernando A, Vazquez M 1998 *Phys. Rev. B* **57** 10699
- [6] Vulfovich P J, Panina L V 2000 *Sensors and Actuators* **81** 111
- [7] Makhnovskiy D P, Panina L V, Mapps D J 2001 *Phys. Rev. B* **63** 144424
- [8] Vázquez Manuel 2001 *J. Magn Magn Mater.* **226-230** 693
- [9] Knobel M, Pirola K R 2002 *J. Magn Magn Mater.* **242-245** 33
- [10] Wei Han, Deren Li, Zhichao Lu, Shaoxion Zhou, Honghao Zhang 2002 *J. Magn. Magn. Mater.* **239** 567
- [11] Xin H L, Yuan W Z, Cheng J K, Lin H, Ruan J Z, Zhao Z J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4152 (in Chinese) [辛宏梁、袁望治、程金科、林宏、阮建中、赵振杰 2007 物理学报 **56** 4152]
- [12] Pang H Li G, Wang Z J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7194 (in Chinese) [庞浩、李根、王赞基 2008 物理学报 **57** 7194]
- [13] Zhang S L, Sun J F, Xing D W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2068 (in Chinese) [张树玲、孙剑飞、邢大伟 2010 物理学报 **59** 2068]
- [14] Li Y F, Yin S Z, Vazquez M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3391 (in Chinese) [李印峰、尹世忠、Vazquez M 2005 物理学报 **54** 3391]
- [15] Cullity B D 1972 *Introduction to magnetic materials* (Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company) p505

Influence of AC current on the profile of GMI effect in Fe-based nanocrystalline wire*

Li Yin-Feng[†] Feng Su-Qin Wang Jian-Yong

(Department of Physics, Xingtai University, Xingtai 054001, China)

(Received 7 April 2010; revised manuscript received 24 June 2010)

Abstract

The influence of AC current (with amplitude of $I_{ac} = 0.2\text{--}20$ mA and frequency of $f = 1$ kHz—1 MHz) upon the profile of giant magnetoimpedance (GMI) effect of a Fe-based nanocrystalline wire with transverse domain structure have been investigated. The experiment indicates that the GMI effect of the sample exhibits a two-peak feature. With the increasing of f , the peak field H_m increases, while H_m decreases even to $H = 0$ when I_{ac} increases. According to the current theoretical models, the peak field H_m should correspond to the transverse anisotropy field H_k , $H_m = H_k$. However, we found that this conclusion is correct only for the case of very small AC current. So a relationship $H_m = H_k \cos^3 \theta$, where θ is the angle between saturation magnetisation and the axis of wire, has been deduced by minimizing the energy in the process of magnetisation rotation. The experiments can be explained by this result.

Keywords: giant magnetoimpedance effect, AC current, Fe-based nanocrystalline wire

PACS: 73.63.Bd, 75.30.Gw, 75.50.Kj

* Project supported by the Scientific Research Plan of Education Bureau of Hebei Province (Grant No. Z2009143).

[†] E-mail: yinfengli2001@yahoo.com