

Co基金属纤维不对称巨磁阻抗效应

张树玲 陈炜晔 张勇

Asymmetric giant magnetoimpedance of Co-rich melt-extraction microwires

Zhang Shu-Ling Chen Wei-Ye Zhang Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 167501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.167501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于时域有限差分法的各向异性铁氧体圆柱电磁散射分析

Finite-difference time domain method for the analysis of radar scattering characteristic of metal target coated with anisotropic ferrite

物理学报.2014, 63(13): 137501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.137501>

Heusler 合金 Mn_2NiGe 马氏体相变的带 Jahn-Teller 效应研究

A band Jahn-Teller effect in the martensitic phase transition of the Heusler alloy Mn_2NiGe

物理学报.2012, 61(20): 207503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.207503>

包覆型纳米纤维吸收剂的电磁性能研究

Research on the electromagnetic properties of nano-fiber coating absorbent

物理学报.2012, 61(19): 197501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.197501>

镍锰铁氧体纳米线阵列的制备与表征

Preparation and characterization of nickel manganese ferrite

物理学报.2012, 61(9): 097502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.097502>

反铁磁耦合硬磁-软磁-硬磁三层膜体系的不可逆交换弹性反磁化过程

Irreversible exchange-spring processes of antiferromagnetically exchange coupled hard-soft-hard trilayer structures

物理学报.2011, 60(10): 107503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.107503>

Co基金属纤维不对称巨磁阻抗效应*

张树玲^{1)2)†} 陈炜晔³⁾ 张勇⁴⁾

1)(宁夏大学机械工程学院, 银川 750021)

2)(太原科技大学材料科学与工程学院, 太原 030024)

3)(北方民族大学材料科学与工程学院, 银川 750021)

4)(北京科技大学, 新金属材料国家重点实验, 北京 100083)

(2015年3月1日收到; 2015年4月16日收到修改稿)

以直径 32 μm 的熔体抽拉 Co 基非晶金属纤维为研究对象, 分析了该纤维不同激励条件下的巨磁阻抗 (giant magneto impedance, GMI) 效应. 实验结果表明: 这类纤维的 GMI 效应具有不对称性特点, 即 AGMI (asymmetric GMI) 效应. 同时, 发现 AGMI 效应随激励条件不同而变化, 随交流频率或者激励幅值升高而逐渐增强; 当存在一定偏置电压时, AGMI 效应大幅增强. 通过研究纤维的磁化过程, 分析了 Co 基金属纤维的 AGMI 效应. 由于 Co 基熔体抽拉纤维具有螺旋各向异性以及磁滞的存在使得 GMI 效应具有不对称性, 频率升高或者激励电流幅值增加有利于壳层畴环向磁化, AGMI 增强. 当在纤维两端施加偏置电压时, 偏置电流诱发环向磁场增强了环向磁化, AGMI 效应提高; 偏置电压较低时磁场响应灵敏度提高, 同时磁化翻转向高场移动, 阻抗线性变化对应的直流磁场区间增大. 这一方面拓宽了 GMI 传感器工作区间及灵敏度, 另一方面不利于获得更大的磁场响应灵敏度. 10 MHz (5 mA) 激励时, 施加 1 V 强度的偏置电压后, 对应的磁场灵敏度从 616 V/T 提高至 5687 V/T; 偏置电压为 2 V 时, 灵敏度降低到 4525 V/T. 因此, 可以通过适当提高环向磁场的方法获得大的磁场响应灵敏度及阻抗变化线性区域.

关键词: 磁化过程, 巨磁阻抗效应, Co 基纤维

PACS: 75.60.Jk, 75.50.Cc, 75.30.Gw

DOI: 10.7498/aps.64.167501

1 引言

1992年, 日本的 Mohri 等^[1] 首先报道了 Co 基金属纤维的阻抗随外加磁场而敏感变化的现象, 并定义为巨磁阻抗 (giant magneto impedance, GMI) 效应. 随着这一现象的报道, 各种基于 GMI 效应的传感器开发迅速发展起来, 并在现代信息、控制系统、导航系统中具有巨大的应用潜能^[2-6]. GMI 传感器主要是利用 GMI 效应曲线的线性区实现非接触测量. 然而, GMI 效应是非线性的, 而且关于零磁场近乎对称^[7], 这使得零磁场附近的灵敏度较低、弱磁检测能力也有限. 为了获得高灵敏

度的 GMI 传感器, 人们尝试了多种提高 GMI 性能的方法, 如 Fang 等^[8] 利用焦耳电流退火有效地提高了 FeCo 基薄带的 GMI 效应和磁场响应灵敏度; Zhang 等^[9] 通过快速热处理提高了 Fe 基薄带的 GMI 效应; 王文静等^[10] 通过在材料制备过程中施加稳恒磁场有效提高了 Fe 基薄膜材料的 GMI 效应. 对于金属纤维材料来说, 获得不对称 AGMI (asymmetric GMI) 效应成为提高线性度和灵敏度的有效手段^[11], 利用 AGMI 效应的不对称性可以实现 GMI 传感器在零磁场附近的高线性度和灵敏度. 研究表明, Fe 基和 Co 基非晶态纤维具有特殊的“芯-壳”型磁畴结构, 磁化过程具有明显的巴克豪森效应^[12-15], 因此, 这类纤维的磁化翻转过程

* 山西省自然科学基金 (批准号: 2014021018-4)、新金属材料国家重点实验室开放课题 (批准号: 2013-Z06)、宁夏大学科学研究基金 (批准号: ZR1411) 和宁夏大学博士科研启动基金 (批准号: BQD2014019) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: slzhang1229@163.com

与GMI效应密切相关^[16,17]. 目前, 获得AGMI效应的方法主要有两种, 一种是通过施加偏置磁场, 另一种是通过磁性介质间的交换耦合作用^[18,19]. 然而, 磁化翻转与AGMI效应之间的关系目前尚不明确. 本文选择具有螺旋各向异性的Co基金属纤维为研究对象, 分析这类纤维材料的磁化翻转与GMI效应之间的关系, 通过施加偏置电压, 分析偏置磁场作用下的磁化过程和AGMI效应, 研究提高AGMI效应灵敏度的有效方法.

2 实验方法

实验采用加拿大Mxt公司生产的Co基熔体抽拉金属纤维, 直径32 μm, 长度75 cm. 剪切成长度为2.5 cm的短纤维接入电路板, 并放入螺线管中央磁场均匀区域, 最大外加直流磁场强度为±32 Oe. 在0.1—10 MHz范围内调节交流频率, 激励幅值为1—7 mA. 同时, 在样品两端逐渐施加偏置直流电压 V_b , 偏置电压产生电流与纤维中交流*i*电流方向一致时为正电压, 反之为负电压, 分别测试不同激励条件下的磁阻抗*Z*, 电路如图1所示.

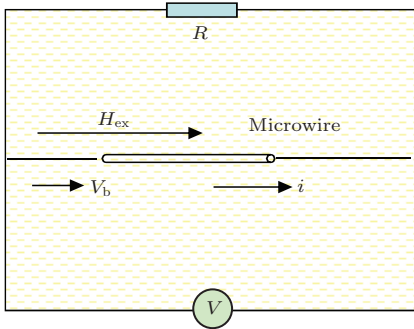


图1 (网刊彩色) 阻抗测试电路简图

Fig. 1. (color online) Impedance test circuit.

为了方便比较不同激励条件下的AGMI效应, 定义 ΔZ_{pp} 用来衡量AGMI效应的不对称程度:

$$\Delta Z_{pp} = \frac{Z_{p1} - Z_{p2}}{Z_{p1}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, Z_{p1} 和 Z_{p2} 为正负磁场作用下的最大阻抗值, 如图2所示. 标定 Z_{p1} 和 Z_{p2} 对应的外加磁场强度分别为 H_{P1} 和 H_{P2} , 并定义两阻抗峰值间距:

$$\Delta H = H_{P1} - H_{P2}. \quad (2)$$

GMI效应的敏感程度决定于阻抗对磁场的变化率, 即磁场响应灵敏度, 不同激励条件影响阻抗的磁场

的变化率, 为消除激励电流幅值的影响, 灵敏度定义为^[20]

$$S = i_{ac} \times \frac{\partial Z}{\partial H_{ex}} (\text{V/T}). \quad (3)$$

采用振动样品磁强计VSM7407测试了Co基纤维的磁滞回线, 最大磁场为1000 Oe, 样品长度为3 mm.

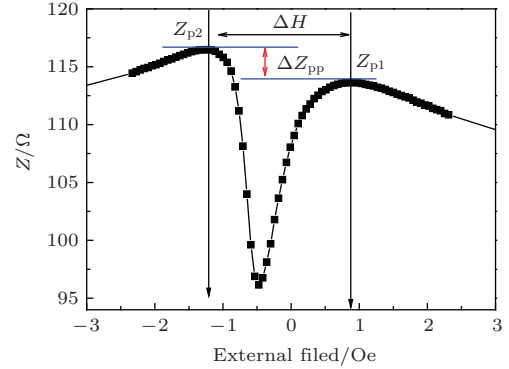


图2 (网刊彩色) 阻抗峰值及对应各符号定义图

Fig. 2. (color online) Labeled graph of impedance peaks and some corresponding symbols.

3 实验结果与讨论

纤维磁滞回线显示, 这类熔体抽拉Co基金属纤维具有优异的软磁性能, 饱和磁感应强度达到0.8 T, 矫顽力约为0.3 Oe, 如图3所示. 低频下GMI效应为单峰, 频率升高, GMI曲线逐渐表现为双峰, 5 MHz时 $\Delta Z_{pp} = 1.77\%$, 频率升高到10 MHz时, 不对称性特征变化不明显, ΔZ_{pp} 为1.72%, 如图4(a)所示.

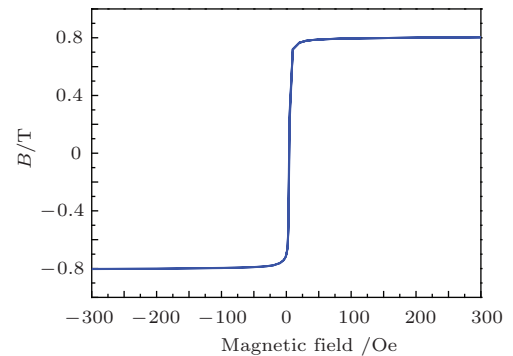


图3 Co基熔体抽拉金属纤维磁滞回线

Fig. 3. Hysteresis loop of Co-rich melt-extracted microwire.

另外, 外加磁场变化不同, 对应的AGMI特征改变, 如图4(b)所示. 当磁场从正的最大值32 Oe逐渐向零点靠近, 阻抗值逐渐增加, 在-0.125 Oe

时达到最大值 94.4 Ω ; 磁场继续降低, 阻抗值逐渐减小, 在 -0.30 Oe 时阻抗值为 92.0 Ω ; 磁场继续降低, 阻抗值开始升高, 在 -0.54 Oe 时, 达到了新的峰值 92.8 Ω , 此时 ΔZ_{pp} 为 1.69%, 定义为 +AGMI. 当直流磁场从 -32 Oe 逐渐向 +32 Oe 变化时, 磁阻抗值逐渐增加, 在 -0.24 Oe 时达到第一个峰值 92.5 Ω , 磁场强度继续减小, 阻抗值有所降低, 在零磁场时阻抗值 92.1 Ω , 在 0.22 Oe 时再次达到峰值 92.5 Ω . 对应的 $\Delta H = 0.46$ Oe, ΔZ_{pp} 为 -1.15%, 定义为 -AGMI.

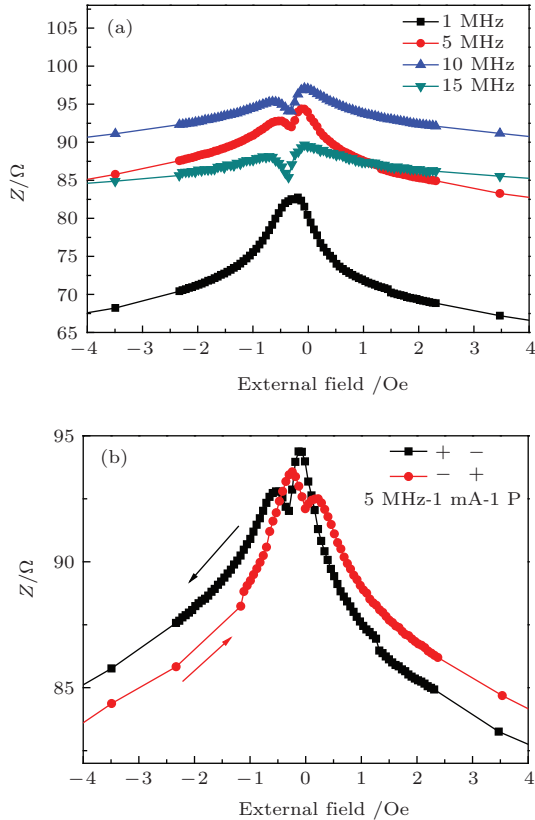


图 4 (网刊彩色) 不同激励条件下的阻抗变化 (a) 交流频率不同; (b) 外加磁场变化方向不同
Fig. 4. (color online) Impedance curves under different driving conditions: (a) with different frequencies; (b) with different evolution external magnetic field.

可见, 外加磁场从正的最大值逐渐变化到负的最大值时, 最大阻抗值出现在正的磁场位置, ΔZ_{pp} 为正值表现为 +AGMI 效应; 而当磁场从负的最大值逐渐变化到正的最大值时, 最大阻抗值出现在负的磁场位置, ΔZ_{pp} 为负值, 表现为 -AGMI 特征. 而且, 对应不同磁场变化方向, 磁阻抗峰值 Z_{p1} 和 Z_{p2} 以及对应的 H_{P1} 和 H_{P2} 完全改变. +AGMI 效应时, 最大灵敏度为 89.1 V/T; 表现为 -AGMI 效应时, 由于 ΔH 变大, 阻抗对磁场的变化率降低, 最大灵敏度降低为 16.4 V/T. 这表明, 此类 Co 基纤

维具有螺旋各向异性^[7], 磁场变化方向不同时, 磁化过程不重合, 这一特征使得弱磁场方向和大小的同时检测成为可能. 同时也表明这类 Co 基纤维的 AGMI 特征与外加磁场的变化方向相关, 以下 GMI 效应分析主要基于磁场从 +32 Oe 到 -32 Oe 变化过程的分析.

1 MHz 时, ΔZ_{pp} 为 1.46%, 对应的 $\Delta H = 0.14$ Oe, 最大灵敏度为 579.9 V/T, 如图 5(a) 所示. 当施加正的 1 V 偏置电压时, 磁阻抗最大值 $Z_{p1} = 91.6 \Omega$ 和 $Z_{p2} = 80.55 \Omega$, ΔZ_{pp} 达到 12.06%, 表现出更强的 +AGMI 特征, 对应的 ΔH 拓宽为 0.65 Oe, 最大灵敏度达到 2301 V/T. 当施加 -1 V 偏置电压时, 对应的 AGMI 特征改变, $Z_{p1} = 85.2 \Omega$, $Z_{p2} = 93.98 \Omega$, ΔZ_{pp} 为 -10.31%, 对应的 ΔH 为 0.65 Oe, 最大灵敏度为 2274.9 V/T. 很明显, 偏置电压作用下的 AGMI 特征增强, 灵敏度大幅度提高, 但是, 不管施加的偏置磁场方向如何, 只要偏置电压强度不变, ΔH 没有明显变化.

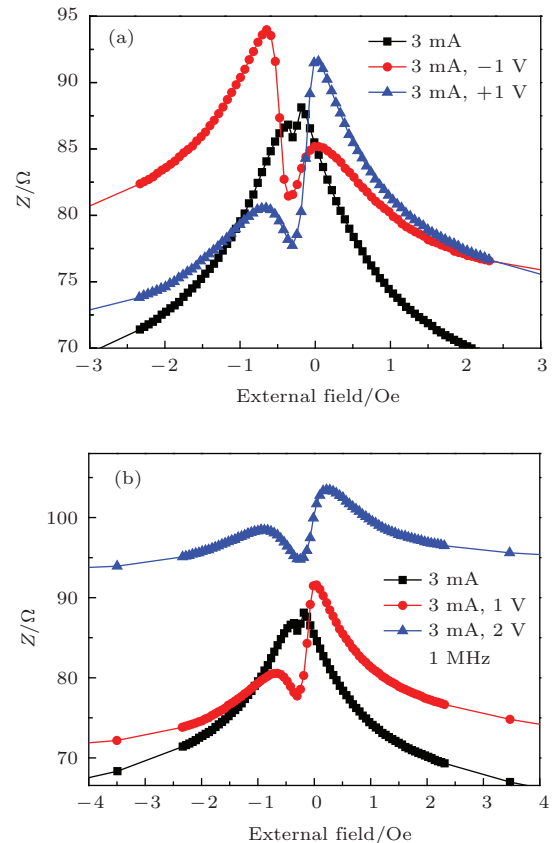


图 5 (网刊彩色) 不同偏置电压下的磁阻抗特征 (a) 正负 1 V 偏置电压; (b) 1 V 和 2 V 偏置电压
Fig. 5. (color online) Impedance curves under bias voltages: (a) ± 1 V; (b) 1 V and 2 V.

继续增加偏置电压到 2 V, 对应的 Z_{p1} 和 Z_{p2} 分别为 103.5 和 98.4 Ω , ΔZ_{pp} 为 4.83%, AGMI 特

征相对于偏置电压 1 V 时有所降低, 如图 5 所示; 阻抗值有所提高, 对应的 ΔH 变宽, 达到 1.11 Oe, 这也导致了阻抗变化率的降低, 最大灵敏度降低为 1112.5 V/T. 可见, 继续提高偏置电压, AGMI 不对称性相对减弱, 而且 ΔH 增大导致阻抗变化率和灵敏度的降低.

这类纤维 AGMI 特征的变化与其磁化过程相关, 偏置电压作用下的偏置电流激励产生偏置环向磁场. 由于偏置电压方向固定, 其产生的环向磁场具有特定的方向, 1 V 偏置电压作用下的最小偏置电流为 10.5 mA, 大于交流激励电流 3 mA, 所以偏置电压作用下的环向磁化主要由偏置电流引起. 研究表明, 这类纤维具有“芯-壳”型磁畴结构^[7], 壳层具有环向各向异性的螺旋状磁畴结构, 偏置环向磁场增加壳层中同方向或者方向相近的螺旋磁畴的环向磁化, 弱化了反向磁畴的环向磁化. 因此, 正的偏置电压作用下, 偏置环向磁场与交流环向磁场一致, 有利于同向壳层畴的磁化, 外加磁场从正的最大值到负的最大值变化的过程中, 正磁场部分的阻抗效应进一步强化, 阻抗值增加, 而负磁场处的阻抗值相对减小, 导致 AGMI 效应进一步加强; 而施加负的偏置电压时, 增强了正偏置电压弱化的那部分磁畴的环向磁化, 在外加磁场为负时阻抗值进一步增强, 同时弱化了正磁场处的阻抗值. 因此, 当偏置电压方向相反时, 分别获得正负 AGMI 效应.

直流磁场从负的最大值逐渐到正的最大值的变化过程中, 随磁场强度逐渐减小, 纤维壳层畴逐渐从外场方向向易轴方向偏转, 直流磁场为零时, 壳层畴转向易轴方向, 随着磁场强度继续向正磁场方向改变, 此时, 壳层畴和芯部畴没有发生翻转, 当磁场强度为 H_{sw} , 芯部畴和壳层畴发生近 180° 翻转, 即发生巴克豪森跳跃, 如图 6 (a) 所示, 当外加磁场从正的最大值逐渐向负的最大值变化时, 壳层螺旋畴逐渐磁化, 在磁场强度为 $-H_{sw}$ 左右时发生反转, 形成巴克豪森跳跃.

当存在偏置电压作用时, 环向磁场强度增强, 相同外加磁场强度时, 壳层畴更容易偏向易轴方向, 更易环向磁化, 随外加磁场的变化, 具有更大的环向磁导率, 因而偏置电压作用下的阻抗值改变, 而且随直流磁场减小, 壳层畴偏转速度变缓, 需要更大的外加磁场强度才能发生翻转, 在 $H_{sw} + \Delta h$ 处壳层和芯部畴发生翻转, 如图 6 (b) 所示, 形成巴克豪森跳跃. 由于偏置电压作用增强了环向磁场, 磁化翻转延迟, 对应的阻抗峰值向更大的外加磁场偏移. 而且, 由于磁化的延迟, 磁化翻转发生时, 对应的壳层环向畴与易轴方向的夹角更小, 即翻转前后的磁导率变化更大, 这导致施加偏置电压情况下, 翻转后获得更大的环向磁导率. 同时, 激励电流幅值增加, 环向磁场强度增强亦有利于环向磁化; 交流频率升高, 趋肤效应增强, 也有利于壳层畴的环向磁化.

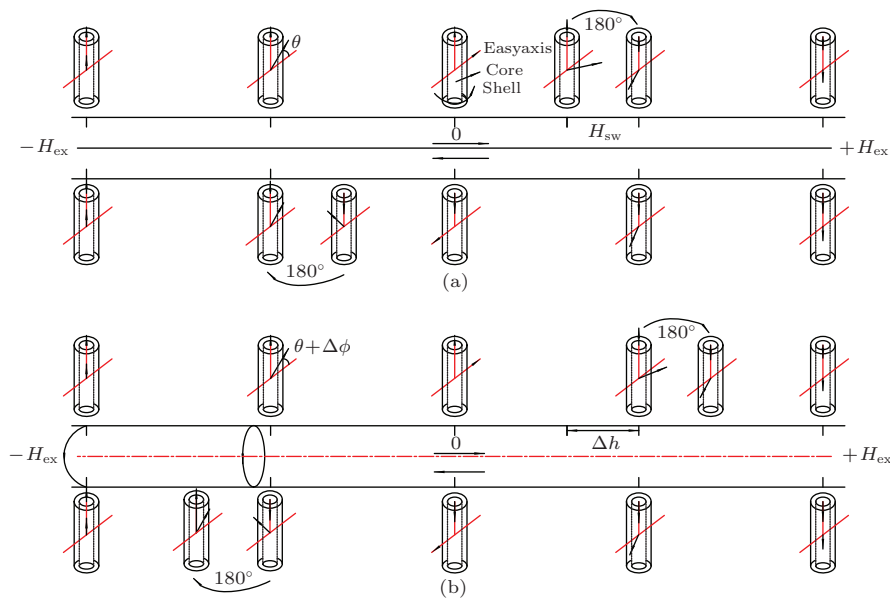


图 6 (网刊彩色) Co 基纤维不同直流磁场作用下的磁化过程 (a) 无偏置电压; (b) 有偏置电压

Fig. 6. (color online) Magnetization process of Co-rich microwire at external magnetic field: (a) without bias voltage; (b) with bias voltage.

若偏置磁场过大, 由于磁化翻转对应磁场也进一步增加, 一方面磁导率变化相对减小, 因而不利于获得大的GMI效应; 另一方面, ΔH 变宽, 磁场响应灵敏度也会降低. 但是, 由于环向磁导率的增加, 趋肤效应增强, 从而阻抗值有所增加, 表现为GMI效应和灵敏度降低. 如图7所示, 10 MHz时, 当激励电流频率为5 mA时, 最大磁场灵敏度为616 V/T; 施加1 V偏置电压后, 灵敏度升高到5687 V/T; 继续升高偏置电压到2 V时, 灵敏度降低为4525 V/T. 而且发现激励电流的增加与偏置电压增强有类似的效果, 例如10 MHz时偏置电压为1 V时, 当激励电流幅值从1 mA上升到5 mA时, 磁场相应灵敏度从839 V/T升高到5687 V/T, 但是继续升高幅值到7 mA, 灵敏度下降到2589 V/T. 因为, 激励电流幅值增加, 其产生的环向磁场增强, 对磁化过程的影响具有类似偏置电压的作用. 因此, 随外加偏置电压或者激励电流幅值升高, 这类纤维在直流磁场作用下的环向磁化过程改变并导致磁阻抗特征的变化.

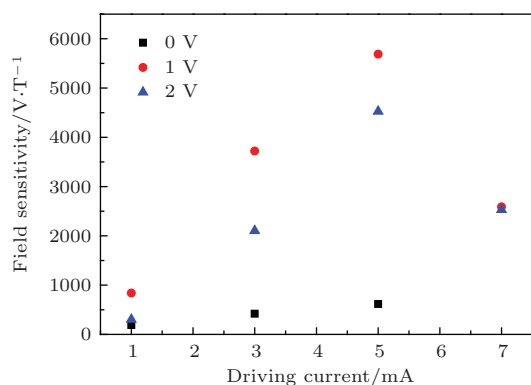


图7 (网刊彩色) 不同条件下Co基纤维的磁场响应灵敏度
Fig. 7. (color online) Field sensitivity of Co-rich micro-wire under different driving conditions.

4 结 论

通过对不同激励条件下的Co基熔体抽拉金属纤维GMI效应研究, 发现GMI效应随直流磁场变化具有不对称性特点, 即AGMI效应. 随激励电流频率或交流幅值升高, AGMI效应增强. 纤维两端施加偏置电压作用后, 磁场响应灵敏度(S)大幅提高, 同时阻抗线性变化区间变宽. 分析表明这类Co基金属纤维的螺旋各向异性导致了AGMI效应. 随激励电流幅值或者偏置电压增加, 电流感生的环向磁场增强, 有利于纤维壳层畴环向磁化, 相同直流电流作用下具有更大的环向磁导率, GMI效应提高; 同时, 偏置电压作用强化了特定方向的壳层畴,

这使得AGMI效应增强, 由于磁化翻转对应的直流磁场强度增大, 增加了线性阻抗变化区间, 但这也并不利于阻抗变化率的提高. 这一结果拓宽了AGMI弱磁传感器工作区间和灵敏度. 后期研究中将重点分析偏置电压作用下的噪音及灵敏度相互作用, 讨论这一AGMI效应的应用问题.

感谢加拿大蒙特利尔大学Yelon教授和Menard教授在阻抗测试中给予的帮助和支持.

参考文献

- [1] Mohri K, Kohzawa T, Kawashima K, Yoshida H, Panina L V 1992 *IEEE Trans. Magn.* **28** 3150
- [2] Zhukov A, Ipatov M, Churyukanova M, Kaloshkin S, Zhukova V 2014 *J. Alloys Compd.* **586** 5279
- [3] Melo L G C, Menard D, Yelon A, Ding L, Saez S, Dolabdjian C 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 033903
- [4] Han B, Zhang T, Zhang K, Yao B, Yue X L, Huang D Y, Ren H, Tang X Y 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 605
- [5] Antonov A S, Buznikov N A, Granovsky A B 2014 *Tech. Phys. Lett.* **40** 267
- [6] Victor Manuel G C, Hector G M 2015 *J. Magn. Magn. Mater.* **378** 485
- [7] Gomez-Polo C, Vazquez M 1993 *J. Appl. Phys.* **62** 108
- [8] Fang Y Z, Xu Q M, Zheng J J, Wu F M, Ye H Q, Si J X, Zheng J L, Fan X Z, Yang X H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 037501
- [9] Zhang Y, Dong J, Feng E X, Luo C Q, Liu Q F, Wang J B 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 037501
- [10] Wang W J, Yuan H M, Li J, Ji C J, Dai Y Y, Xiao S Q 2013 *Sci. Chin: Phys. Mech. Astron.* **43** 852 (in Chinese) [王文静, 袁慧敏, 李娟, 姬长建, 代由勇, 萧淑琴 2013 中国科学: 物理学 力学 天文学 **43** 852]
- [11] Panina L V 2002 *J. Magn. Magn. Mater.* **249** 278
- [12] Usov N A, Gudoshnikov S A 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 243902
- [13] Chizhik A, Stupakiewicz A, Zhukov A, Maziewski A, Gonzalez J 2014 *Physica B* **435** 125
- [14] Chizhik A, Garcia C, Zhukov A, Gonzalez J, Dominguez L, Blanco J M 2006 *Physica B* **384** 5
- [15] Gawronski P, Chizhik A, Blanco J M, Gonzalez J E 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 365
- [16] Ipatov M, Zhukova V, Gonzalez J, Zhukov A 2012 *J. Magn. Magn. Mater.* **324** 4078
- [17] Zhukov A, Talaat A, Ipatov M, Blanco J M, Zhukova V 2014 *J. Alloys Compd.* **615** 610
- [18] Duque J G S, Araujo A E P D, Knobel M 2006 *J. Magn. Magn. Mater.* **299** 419
- [19] Taysioglu A A, Peksoz A, Derebasi N 2013 *Sens. Lett.* **11** 119
- [20] Dufay B, Saez S, Dolabdjian C, Yelon A, Menard D 2012 *J. Magn. Magn. Mater.* **324** 2091

Asymmetric giant magnetoimpedance of Co-rich melt-extraction microwires*

Zhang Shu-Ling^{1)2)†} Chen Wei-Ye³⁾ Zhang Yong⁴⁾

1) (School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

2) (School of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

3) (School of Material Science and Engineering, Beifang Nationalities University, Yinchuan 750021, China)

4) (State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

(Received 1 March 2015; revised manuscript received 16 April 2015)

Abstract

The giant magnetoimpedance(GMI) effect of Co-rich microwires makes an opportunity to design sensitive GMI weak magnetic meter sensor. Optimization of magnetic meters needs to improve the GMI response, especially the field sensitivity of microwires. In this study, Co-rich amorphous microwires each with an average diameter of 32 μm are prepared by melt-extracted technique and their GMI characteristics are investigated at frequencies ranging from 0.1 to 10 MHz with and without bias direct voltage applied. Experimental results indicate that the GMI effect of these wires has asymmetric features with the increases of frequency and driving current. It is found that the intrinsic asymmetric GMI (AGMI) response results from the helical anisotropy and magnetization hysteresis of the Co-rich microwires. Furthermore, it is found that there is a pronounced improvement in AGMI response when a bias voltage is applied. In theory, the factor which induces an increase in circular magnetic field causes successive changes in magnetization reversal of the quickly quenched Co-rich microwires with multiple domains and helical anisotropy. As a consequence, the circular magnetization process is enhanced, leading to higher circular permeability and stronger GMI response. Meanwhile, a bias voltage inducing the given circular magnetic field reinforces the magnetization process in a certain direction, which intensifies the asymmetric characteristic of GMI response. For example, the asymmetric ratio between two impedance peaks rises from 1.46% to 12.06% at 1MHz and 3 mA after applying a 1 V bias voltage. Simultaneously, the circular field inclines the magnetization off the axial direction which makes the axially induced magnetization reversal more difficult and occur at a higher switching field. This effect broadens the linear impedance zone; however, it reduces the slope of the impedance with the external field and the field sensitivity increasing to some extent. The balance between these two sides proves that AGMI response is related to the magnetization reversal process which is sensitive to the circular magnetic field. Experimental results indicate that the field sensitivity rises from 616 to 5687 V/T with the impedance linear zone broadening from 0.65 to 1.16 when a 1 V bias voltage is applied, while it decreases to 4525 V/T when the bias voltage further increases to 2 V at 10 MHz and 5 mA. This reveals that the GMI effect of these amorphous Co-rich microwires with high field sensitivity can be optimized by applying proper bias voltage.

Keywords: magnetization process, giant magneto impedance effect, Co-rich microwire

PACS: 75.60.Jk, 75.50.Cc, 75.30.Gw

DOI: 10.7498/aps.64.167501

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shanxi, China (Grant No. 2014021018-4), the State Key Laboratory of Advanced Metals and Materials, China (Grant No. 2013-Z06), the Natural Science Funds, Ningxia University, China (Grant No. ZR1411), and the Research Starting Funds for Imported Talents, Ningxia University, China(Grant No. BQD2014019).

† Corresponding author. E-mail: slzhang1229@163.com