

The Longitudinally Driven Asymmetric Giant Magneto-Impedance Effect in Fe-Based Alloy

Guang Yang, Xingwei He, Xiaozhen Fan, Chukai Zhou, Jing Zhao, Hongzhou Wang, Fei Xiao, Yunzhang Fang*

College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua

Email: fyz@zjnu.cn

Received: Nov. 18th, 2013; revised: Dec. 23rd, 2013; accepted: Jan. 8th, 2014

Copyright © 2014 Guang Yang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Guang Yang et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: We have investigated the giant magneto-impedance effect of $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy ribbons which were annealed by DC current. It was found that the maximum GMI ratio was 1810.43% after 10-min annealing current of 0.72 A. However, the GMI effect began to show asymmetric phenomenon around zero magnetic field after 10-min annealing current of 0.74 A in terms of its own existence bias field. XRD spectrum analysis indicated that the $\text{B}_6\text{-Fe}_{23}$ hard magnetic phase precipitated should be responsible for the asymmetric giant magneto-impedance effect.

Keywords: Current Annealing; GMI Effect; Asymmetry

铁基合金的纵向驱动非对称巨磁阻抗效应

杨 光, 何兴伟, 范晓珍, 周初凯, 赵 静, 王红洲, 肖 飞, 方允樟*

浙江师范大学数理与信息工程学院, 金华

Email: fyz@zjnu.cn

收稿日期: 2013 年 11 月 18 日; 修回日期: 2013 年 12 月 23 日; 录用日期: 2014 年 1 月 8 日

摘 要: 研究了直流电流退火的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 合金薄带的巨磁阻抗效应, 实验发现, 经 0.72 A 电流退火 10 min 后, 样品巨磁阻抗比有最大值 1810.4%。经 0.74 A 电流退火 10 min 后, 样品由于自身存在偏置场, 其巨磁阻抗效应开始出现零磁场的非对称现象, 结合 XRD 图谱分析表明, 样品非对称巨磁阻抗效应的产生与 $\text{B}_6\text{-Fe}_{23}$ 硬磁相的析出有关。

关键词: 电流退火; 巨磁阻抗效应; 非对称性

1. 引言

1992 年, 日本名古屋大学的 Mohri 等^[1]在非晶磁性材料中首先发现材料的交流磁阻抗随外加磁场而变化的现象, 这种现象非常灵敏, 非晶丝的灵敏度达 12%~120%/Oe^[2]因此将此现象称为巨磁阻抗(giant magneto-impedance, 简称 GMI)效应。由于该效应在室温下对低外磁场具有高灵敏的响应等优点, 在新型

*通讯作者。

磁敏传感器及磁记录头等技术领域有广泛的应用前景, 从而受到各国科学工作者的广泛关注。至今, 在有关钴基非晶丝、薄带、铁基非晶丝、薄带和薄膜中都发现有 GMI 效应。

利用巨磁阻抗效应的非对称特性可以满足巨磁阻抗传感器在微弱磁场附近的高线性度和灵敏度, 引起了科学工作者的广泛研究^[3-9]。其中, 韩国学者 Kim 等^[10]报道了 CoFeNiBSi 非晶带在纵向弱磁场作用下,

空气中 380℃退火发现了非对称特性, 他们把这种现象称为 GMI 阀(GMI value)效应并将其原因归结于样品表面的晶化层与内部非晶层的交换耦合作用。类似的结果在潮湿环境下经电流退火后的 CoFeSiB 非晶丝中也有发现^[11]。然而以往对于非对称巨磁阻抗(AGMI)效应的研究以横向驱动模式为主, 对于纵向驱动模式^[12]下的 AGMI 研究却鲜有报道, 所以本文采用纵向驱动模式(longitudinal driven giant magneto-impedance, 简称 LDGMI)来研究经大电流退火的 FeCuNbSiB 样品的 GMI 效应, 获得了跨零磁场、线性区间大、线性度高的非对称巨磁阻抗效应, 这对相应磁敏传感器的设计研发具有重要意义。

2. 实验

采用单棍快淬法制备 Fe 基非晶薄带(宽度为 0.50 mm, 厚度为 25 μm), 截取 10 cm 长非晶带固定在镀有电极的夹具两端, 在空气中分别经不同电流退火 10 min 后制得样品。用 HP4294A 型阻抗分析仪测量各样品的纵向驱动巨磁阻抗, 测量时, 将长度为 15 mm 样品放置于用漆包线密绕而成的螺线管内, 组成一个等效元件, 如图 1 所示^[13](该螺线管直径为 0.57 mm, 长度为 12 mm, 选用直径 0.10 mm 的漆包线密绕 100 匝制成)。将放有样品的螺线管置于 Helmholtz 线圈中心, 保证直流外磁场的方向与螺线管纵向平行, 且与地磁场垂直。阻抗分析仪的驱动电流是 10 mA, 对样品产生一个交流纵向驱动场。巨磁阻抗比定义为

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{Z(H_{\text{ex}}) - Z(H_{\text{max}})}{Z(H_{\text{max}})} \times 100\%$$

式中 $Z(H_{\text{ex}})$ 和 $Z(H_{\text{max}})$ 分别是在任意磁场和最大磁场下测得的阻抗值。用 X 射线衍射仪对热处理后的样品进行晶体结构分析, 选择合适的衍射峰用 Scherrer 公式计算晶粒的平均大小。

3. 结果与讨论

图 2、图 3 均是 Fe 基非晶薄带在空气中经不同电流自由退火 10 min 后的巨磁阻抗比曲线。在 310 kHz 频率下, 退火电流为 0.72 A 时, 样品阻抗比有最大值 1810.4%, 晶粒尺寸为 10.56 nm 且阻抗曲线关于零磁场对称。GMI 的基本特性不但是非线性的, 而且阻抗随磁场的变化在零磁场呈现对称, 所以由其制成的巨

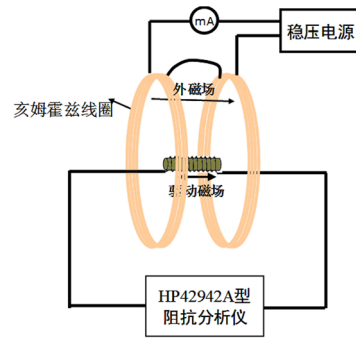


Figure 1. Schematic illustration of GMI measuring method under the longitudinal driven

图 1. 纵向驱动巨磁阻抗效应测量系统示意图

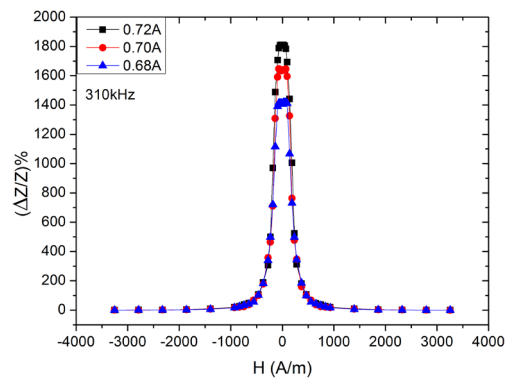


Figure 2. GMI ratio profiles for annealed samples at different current

图 2. 不同电流退火样品的巨磁阻抗曲线

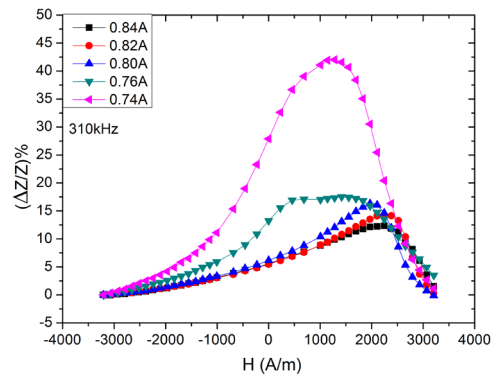


Figure 3. Asymmetric GMI ratio profiles for annealed samples at different current

图 3. 不同电流退火样品的非对称巨磁阻抗曲线

磁阻抗传感器在零磁场附近不敏感, 灵敏度较低。当退火电流增加到 0.74 A 时, 虽然样品阻抗比降低到 42.0%, 阻抗的半高宽变大, 软磁性能变差, 但阻抗曲线开始出现零磁场非对称现象, 并且随着退火电流的逐渐变大, 样品阻抗比曲线的峰值逐渐减小、峰位有向正磁场方向移动趋势并且曲线线性区间跨

过了零磁场。非对称巨磁阻抗效应(AGMI)由于能改善 GMI 效应在零磁场附近的特性,这样就提高阻抗曲线的线性度从而获得较高的灵敏度。图 4 中,从阻抗比、偏置场与退火电流关系上看,随着退火电流的逐渐增加,样品阻抗比的变化由最大值迅速降低后再逐渐减小,而样品退火后产生的偏置场由 0 A/m 经 1282 A/m、1419 A/m、1969 A/m 逐渐增大至 2243 A/m。

图 5、图 6 是经 0.80 A、0.82 A、0.84 A 电流退火后及再用 100 Oe 磁场分别磁化 1 min 后测得的阻抗比曲线,磁化场方向与样品纵向平行且与直流磁场正方向相反。从图中可以看到,经 0.82 A、0.84 A 电流退火后的样品在磁化场作用后,其阻抗比均有小幅度提高并且经磁场磁化后样品的偏置场效果均有增强,分别增大到 2518 A/m、2656 A/m、3068 A/m。

图 7、图 8 均是经不同电流退火后样品的 XRD 衍射图谱,分析发现,经 0.72 A 电流退火后样品已晶化,但没有 B_6Fe_{23} 相出现,而经 0.74 A 及以上电流退火样品均有 B_6Fe_{23} 相析出, B_6Fe_{23} 相是硬磁相,会在样品中产生有效的单向各向异性场,其效果等效于偏置场,由于样品中等效偏置场的存在,巨磁阻抗效应才会出现零磁场的非对称现象。对比阻抗比变化曲线发现,经 0.72 A 电流退火后样品内应力的释放较为充分,阻抗比有最大值、曲线关于零磁场对称并且晶粒尺寸最小,样品有效各向异性也最小。其他电流下退火样品的阻抗比迅速降低且曲线不再关于零磁场对称,阻抗曲线的峰位也随着退火电流的小幅度增加而向磁场正方向移动,说明样品中的等效偏置场随着退火电流的增大而变强。而在纵向磁化场的作用下,这种单向各向异性会相应增强,从而增大偏置场的作用效果。结合表 1 发现,样品晶化后的晶粒尺寸也随退火电流的增大而长大,大晶粒晶界和 B_6Fe_{23} 硬磁相的析出对畴壁移动和磁矩转动起阻碍作用,导致样品软磁性能的恶化,阻抗比的降低自是必然。

4. 结论

1) FeCuNbSiB 合金薄带经 0.74 A 及以上直流电流退火处理后,样品中由于 B_6Fe_{23} 相的析出而产生类似偏置场效果的各向异性场,使样品开始出现非对称的巨磁阻抗特性,并且零磁场附近阻抗曲线线性区

大、线性度较好。

2) 样品出现非对称的巨磁阻抗特性后,随着退火电流的增大,样品结晶层内晶粒平均尺寸逐渐变大,阻抗值逐渐变小、样品的等效偏置场效果逐渐加强,并且经纵向磁化场磁化后,样品等效偏置场作用效果更明显。

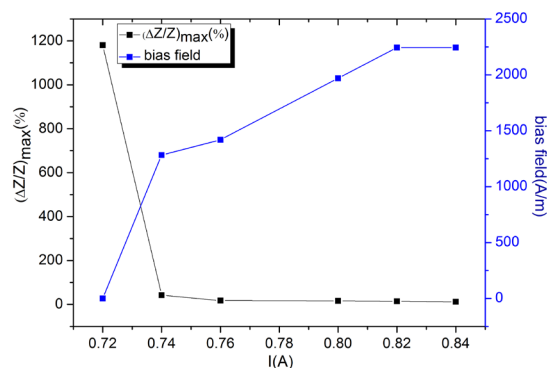


Figure 4. (Asymmetric) GMI ratio profiles and bias field with the annealing current (frequency: 310 kHz)

图 4. (非对称)巨磁阻抗比、偏置场与退火电流关系(频率: 310 kHz)

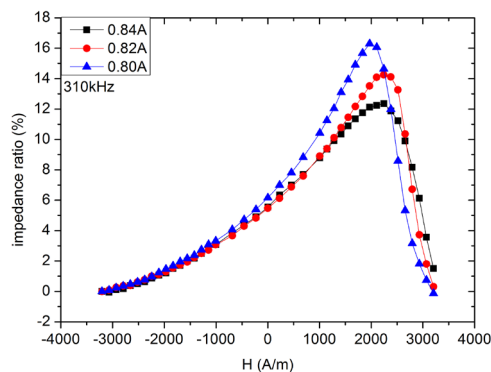


Figure 5. Asymmetric GMI ratio profiles for various annealing current

图 5. 不同电流退火样品的非对称巨磁阻抗曲线

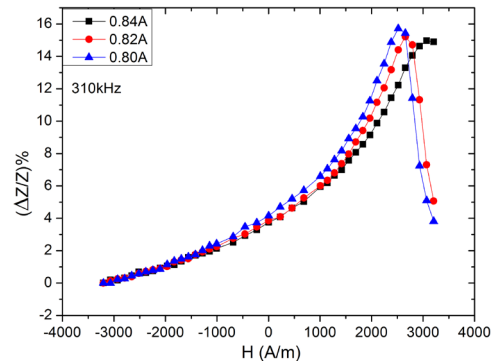


Figure 6. Asymmetric GMI ratio profiles measured after 100 Oe magnetic field for various annealing current

图 6. 不同电流退火样品经 100 Oe 磁场磁化后的非对称巨磁阻抗曲线

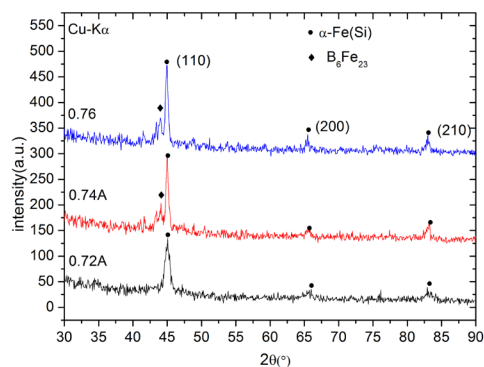


Figure 7. XRD curve for annealed samples at different current
图 7. 不同电流退火样品的 XRD 曲线

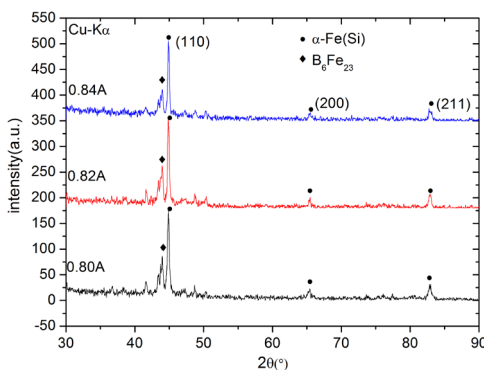


Figure 8. XRD curve for annealed samples at different current
图 8. 不同电流退火样品的 XRD 曲线

Table 1. Variation of grain size for annealed samples at different current
表 1. 不同电流退火后样品晶粒尺寸的变化

I(A)	0.72 A	0.74 A	0.76 A	0.80 A	0.82 A	0.84 A
D(nm)	10.56	17.71	21.69	29.11	29.82	34.27

致谢

感谢浙江省重点科技创新团队，编号：2011R50012-11，浙江省重点实验室编号：2013E10022 以及

国家自然科学基金项目(11079029 和 61274099)，973子项目(2012CB825705)的支持。

参考文献 (References)

[1] Mohri, K., Kawashima, K., Kohzawa, T., et al. (1992) Magneto-inductive effect in amorphous wires. *IEEE Transactions on Magnetics*, **28**, 3150-3152.

[2] Kitohri, T., Mohri, K. and Uchiyama, T. (1995) Asymmetrical magneto-impedance effect in twisted amorphous wires for sensitive magnetic sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, **31**, 3137-3139.

[3] Kim, C.G., Jang, J., Kim, D.Y. and Yoon, S.S. (1999) Analysis of asymmetric giant magneto impedance in field-annealed Co-based amorphous ribbon. *Journal of Applied Physics*, **75**, 2114-2116.

[4] Takayama, A., Umehara, T., Yuguchi, A., et al. (1999) Integrated thin film magneto-impedance sensor head using plating process. *IEEE Transactions on Magnetics*, **35**, 3643-3645.

[5] Makhnovskiy, D.P., Panina, L.V. and Mapps, D.J. (2000) Asymmetrical magnetoimpedance in as-cast CoFeSiB amorphous wires due to ac bias. *Journal of Applied Physics*, **77**, 121.

[6] Blanco, J.M., Zhukov, A., Chen, A.P., et al. (2001) Asymmetric torsion giant impedance in nearly-zero magnetostrictive amorphous wires with induced helical anisotropy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **34**, 31-34.

[7] Ueno, K., Hiramoto, H., Mohri, K., et al. (2000) Sensitive asymmetrical MI effect in crossed anisotropy sputtered films. *IEEE Transactions on Magnetics*, **36**, 3448-3450.

[8] Chen, D.X., Pascual, L. and Hernando, A. (2000) Comment on Analysis of asymmetric giant magnetoimpedance in field-annealed Co-based amorphous ribbon. *Applied Physics Letters*, **77**, 1727.

[9] Takezawa, M. and Yamasaki, J. (2002) Antiferromagnetic coupled high-frequency carrier-type magnetic field sensor using Ni-Fe/Fe-Mn multilayer. *IEEE Transactions on Magnetics*, **38**, 3150-3152.

[10] Kim, C.G., Jang, K.J., Kim, H.C., et al. (1999) Asymmetric giant magnetoimpedance in field-annealed Co-based amorphous ribbon. *Journal of Applied Physics*, **85**, 5447.

[11] Song, S.H., Yu, S.C., Kim, C.G., et al. (2000) Asymmetric giant magnetoimpedance in annealed amorphous (CoFe) SiB wire under the circumferential field. *Journal of Applied Physics*, **87**, 5226.

[12] 杨介信, 杨燮龙, 陈国, 等 (1998) 一种新型的纵向驱动巨磁阻抗效应. *科学通报*, **10**, 1051-1053.

[13] 施方也, 黄翩翩, 林根金 (2006) 驱动方式对玻璃包裹铁基纳米晶丝巨磁阻抗效应的影响. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, **3**, 287-192.