

电流退火对铁基薄带巨磁阻抗效应的影响*

何 峻¹⁾²⁾ 郭慧群¹⁾ 程利智²⁾ 沈保根¹⁾ 何开元²⁾

1)(中国科学院物理研究所与凝聚态物理中心磁学国家重点实验室,北京 100080)

2)(东北大学材料科学与工程系,沈阳 110006)

刘宜华

(山东大学物理系,济南 250100)

(1999 年 6 月 10 日收到;1999 年 8 月 26 日收到修改稿)

研究了电流退火工艺对铁基非晶合金 $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_8\text{Nb}_{3.5}\text{B}_{3.5}\text{Cu}_1$ 薄带巨磁阻抗效应的影响. 实验结果表明,该铁基合金的巨磁阻抗 $\Delta Z/Z$ 随退火电流的增加而增强,当电流为 820 mA 时, $\Delta Z/Z$ 达到最大值 62%,阻抗变化灵敏度可达约 $0.23\% (\text{A/m})^{-1}$. 结合此合金在电流退火前后电性能和软磁性能的演变,讨论了材料的巨磁阻抗效应借助趋肤效应与交流频率和外加纵向磁场的关系.

PACC: 7550B; 7540G

1 引 言

自 Baibich 等^[1]于 1988 年发现巨磁电阻 (giant magnetoresistance, 简称 GMR) 效应以来,各国的学者对 GMR 效应的研究与日俱增. 随着研究的深入,人们发现尽管 GMR 效应有诱人的发展前景,但 GMR 效应通常是在低温和外加强磁场下得到的,这些苛刻条件对实际应用很不利. 1992—1995 年, Mohri 等^[2-4]在实验中发现非晶态软磁丝 ($\text{Fe}_{0.06}\text{Co}_{0.94}$)_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ 在常温下通以交变电流时,在较低外加磁场下就可得到很强的电压振幅变化,当电流频率较高时,感应涡电流引起的趋肤效应导致材料中总电压或阻抗随外加磁场明显变化,这种变化被称为巨磁阻抗 (giant magneto-impedance, 简称 GMI) 效应. 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. 为了探索引发 GMI 效应的物理机制,各国学者都进行了不同程度的研究^[5-7],一般认为,具有优异软磁特性的材料是获得 GMI 效应的前提,而适当的横向感生各向异性也是获得高 GMI 效应的有效条件. 对于钴基丝材,许多学者^[8,9]采用电流退火方法,在不削减其软磁特性的前提下使材料获得环向或横向感生各向异性,经测量获得了理想的 GMI 效应. 对于铁基非晶材料采用这样的退火方式进行研究还鲜有报道, Takemura 等^[10]曾用电流退火处理 $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ 非晶丝,使其晶化并感生出环向各向异性,其 GMI 响应可达到 30%—40%. 本文采用电流退火方法对 $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_8\text{Nb}_{3.5}\text{B}_{3.5}\text{Cu}_1$ 非晶薄带进行晶化处理,探索在焦耳热处理条件下铁基薄带的 GMI 效应.

* 国家自然科学基金(批准号:59671011, 59525101)资助的课题.

2 实验方法

非晶 $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_8\text{Nb}_{3.5}\text{B}_{3.5}\text{Cu}_1$ 薄带采用单辊熔体快淬方法制成, 样品宽约 0.8 mm, 厚约 28 μm . 将薄带剪成长为 4 cm 的条段后, 在通氩气保护条件下, 样品于特制容器内在 690—910 mA 直流电流下退火 10 min, 然后自然冷却至室温. 用 UJ-26 型低电势直流电位差计测试淬态和退火样品的电阻率, 有效磁导率和 GMI 效应的测量是在 HP4192A 阻抗分析仪上进行的. 实验中外加磁场 ($0 \pm 5600 \text{ A/m}$) 由直径为 30 cm 的赫姆霍兹线圈提供, 振幅为 10 mA 的交变电流沿薄带的纵向通过, 薄带纵向沿外加磁场方向. 所有测量均在室温下进行.

3 结果及讨论

图 1 为非晶薄带 $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_8\text{Nb}_{3.5}\text{B}_{3.5}\text{Cu}_1$ 的电阻率随退火电流值 I_a 增高的变化曲线. 图 1 中 ρ_0 为非晶态样品的电阻率. 在材料的非晶晶化过程中, 由于淬火应力的消除及晶化颗粒的聚集长大, 使金属内电子散射逐渐减少而导致电阻的下降. 从图 1 的曲线可以看出, 样品在退火电流小于 600 mA 时, 电阻率变化很小, 说明 600 mA 电流产生的焦耳热仍未使非晶薄带 $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_8\text{Nb}_{3.5}\text{B}_{3.5}\text{Cu}_1$ 初晶晶化. 当电流超过 600 mA 后, 电阻率明显下降, 说明晶化已经开始. 伴随着纳米晶化, 样品软磁性能将得到改善, 图 2 所示是各样品的有

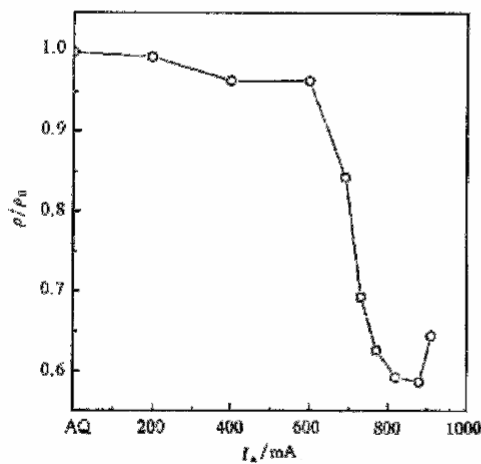


图 1 $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_8\text{Nb}_{3.5}\text{B}_{3.5}\text{Cu}_1$ 薄带的折合电阻率值随直流退火电流 I_a 的变化曲线

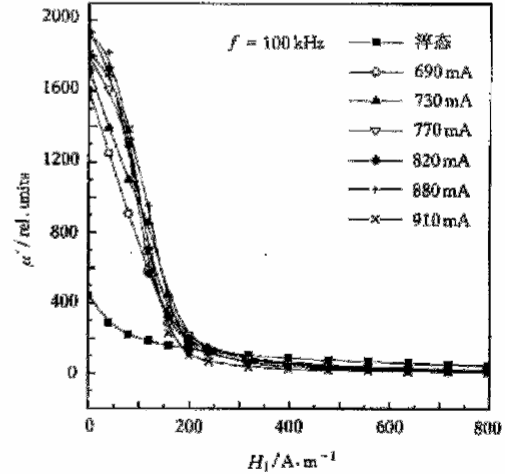


图 2 淬态和电流退火样品的有效磁导率随纵向外加磁场 H_1 的变化曲线

效磁导率 μ' 随纵向外加磁场 H_1 的变化. 从图 2 可以看到, 淬态样品的有效磁导率 μ' 值很小, 外加磁场为零时仅为 443. 随着退火电流增大, μ' 急剧变大, 在 I_a 约为 820 mA 时达到最大值 1932. 当沿纵向稍加外磁场, 所有电流退火样品的 μ' 急剧下降, 约在 200 A/m 时

已接近饱和. 值得注意的是, μ' 随外加磁场的最大变化率 $(d(\mu')/d(H_1))_{\max}$ 随退火电流的增大而变大(见表 1).

表 1 $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_8\text{Nb}_{3.5}\text{B}_{3.5}\text{Cu}_1$ 薄带的有效磁导率和阻抗在不同退火电流 I_a 下随外场 H_1 的最大变化灵敏度

I_a/mA	淬态	690	730	770	820	880	910
$\left[\frac{d\mu'}{dH_1}\right]_{\max}/(\text{m/A})^{-1}$	3.87	8.85	8.51	12.04	14.56	12.62	14.46
$\left[\frac{d(\Delta Z/Z)}{dH_1}\right]_{\max}/\%(\text{m/A})^{-1}$	0.007	0.03	0.13	0.13	0.23	0.22	0.09

图 3 显示的是淬态及各电流退火样品的 GMI 响应, 其中(b)和(c)图分别是阻抗的电阻和电抗部分变化率曲线, 最大外加磁场 H_{\max} 约为 5600 A/m. 可以看出, 淬态样品的 GMI 值 $\Delta Z/Z = [Z(H) - Z(H_{\max})]/Z(H_{\max})$ 最大不到 10%, 退火电流的提高使 $\Delta Z/Z$ 响应加强, 至 820 mA 时达到最大(62%), 进一步提高电流后阻抗变化率略有下降. 比较后可以发现, 阻抗的电阻部分变化率 $\Delta R/R(H_{\max})$ 随退火电流 I_a 的变化趋势与 $\Delta Z/Z$ 的相仿, 说明在高频电流下磁阻抗响应中电阻分量的变化越来越重要. 对图 3(a)中的各曲线进行微分, 我们可以得到阻抗变化的灵敏度值, 其最大值列于表 1.

我们知道, 当薄带纵向通以交变电流 $I = I_0 \exp(-j\omega t)$ 时, 感应交变磁场 $H_0 \exp(j\omega t)$ 会在薄带内部产生涡电流以阻止样品内的磁通变化, 造成样品内磁场分布不均而引起趋肤效应, 即离样品表面愈近, 电流密度愈大. 当软磁材料被用作磁性传感器件时, 正是利用趋肤效应随外加磁场的变化引发阻抗的灵敏响应而工作的, 趋肤深度表达式

$$\delta_m = [2\rho/(\omega\mu_0\mu'_i)]^{0.5}, \quad (1)$$

其中 δ_m 是趋肤深度, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, μ'_i 为横向有效磁导率. 而薄带的阻抗表达式为

$$Z = [(1-j)\rho L]/(2d\delta_m), \quad (2)$$

其中 L 和 d 分别代表试样的长度和宽度. 显然, 趋肤深度愈小, 阻抗值愈大. 在固定电流频率下, 具有较小的电阻率和高磁导率的磁性材料有望获得强的 GMI 效应. 从图 1 和图 2 可以看出, 当退火电流大于 700 mA 时, 因薄带

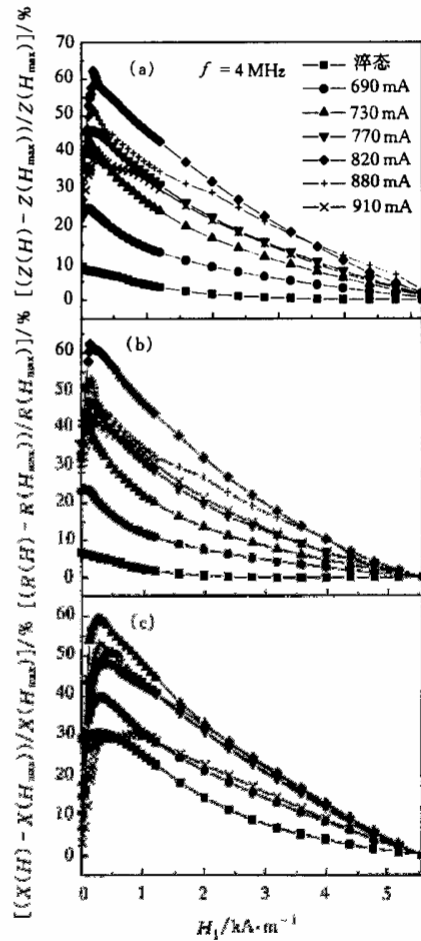


图 3 淬态和电流退火样品的 GMI 响应 (a), (b), (c)分别为阻抗及阻抗的电阻和电抗部分随纵向外加磁场 H_1 的变化率曲线

有望获得强的 GMI 效应. 从图 1 和图 2 可以看出, 当退火电流大于 700 mA 时, 因薄带

的初晶晶化造成电阻率明显下降,有效磁导率明显上升,稍加外场即可使磁导率下降,且响应灵敏(见表1).这是样品产生 GMI 效应的主要原因.尽管在退火电流大于 880 mA 时 $(d(\mu')/d(H_1))_{\max}$ 值仍很大,但由于高电流退火情况下,初晶晶化样品的二次晶化会造成磁导率的下降和电阻率的提高,使 GMI 值和其变化灵敏度有所下降,我们的实验结果与

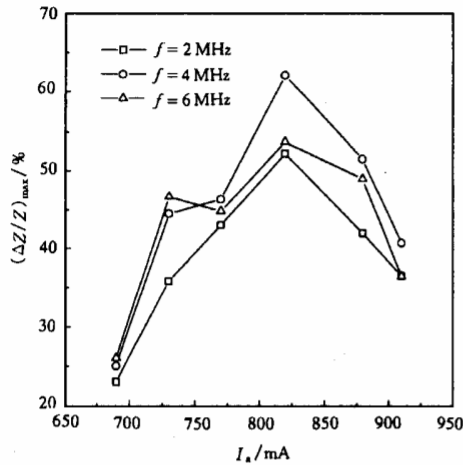


图4 不同交流频率下最大 GMI 值随直流退火电流 I_a 的变化曲线

这种理论解释相符.从图3中还可观察到,电流退火样品阻抗变化有一峰值,说明电流退火后样品感生出横向各向异性.尽管与我们以往的工作^[11]相比,电流退火薄带的阻抗响应较为逊色,但能在室温和低场下得到可观的 GMI 效应仍是很有意义的.

图4是电流频率分别为 2, 4, 6 MHz 时最大 GMI 值随退火电流的变化曲线.从图4可以看出,在频率为 4 MHz 时样品可以获得最强的 GMI 响应,频率过高或过低都不利于 GMI 响应的提高.我们认为,过高频率下涡电流引起的阻尼力会抑制横向畴壁位移和磁矩转动,使样品软磁性能下降,而低频下趋肤效应又不明显,两者都会使趋肤深度 δ_m 变大,使阻抗响应变小.

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Pan, F. Petroff, *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 2472.
- [2] K. Mohri, T. Kohzawa, K. Kawashima, Y. Yoshida, L. V. Panina, *IEEE Trans. Magn.*, **28**(1992), 3150.
- [3] K. Mohri, K. Kawashima, T. Kohzawa, Y. Yoshida, *IEEE Trans. Magn.*, **29**(1993), 1245.
- [4] K. Mohri, K. Bushida, M. Noda, H. Yoshida, L. V. Panina, T. Uchiyama, *IEEE Trans. Magn.*, **31**(1995), 2455.
- [5] L. V. Panina, K. Mohri, T. Uchiyama, M. Noda, *IEEE Trans. Magn.*, **31**(1995), 1249.
- [6] R. L. Sommer, C. L. Chien, *Phys. Rev.*, **B53**(1996), 5982.
- [7] D. X. Chen, J. L. Munoz, A. Hernando, M. Vazquez, *Phys. Rev.*, **B57**(1998), 10699.
- [8] F. B. Humphrey, J. L. Costa-Kramer, *J. Appl. Phys.*, **76**(1994), 6204.
- [9] J. L. Costa-Kramer, K. V. Rao, *IEEE Trans. Magn.*, **31**(1995), 1261.
- [10] Y. Takemura, H. Tokuda, K. Komatsu, S. Masuda, T. Yamada, K. Kakuno, K. Saito, *IEEE Trans. Magn.*, **32**(1996), 4947.
- [11] J. He, H. Q. Guo, B. G. Shen, K. Y. He, J. F. Hu, *J. Phys.: Condens. Matter.*, **11**(1999), 4251.

THE GIANT MAGNETO-IMPEDANCE EFFECT OF CURRENT-ANNEALED Fe-BASED RIBBONS*

HE JUN^{a)b)} GUO HUI-QUN^{a)} CHENG LI-ZHI^{b)} SHEN BAO-GEN^{a)}

HE KAI-YUAN^{b)}

a) (*State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics and Center for Condensed Matter Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

b) (*Department of Material Sciences and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006*)

LIU YI-HUA

(*Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100*)

(Received 10 June 1999; revised manuscript received 26 August 1999)

ABSTRACT

The influence of current annealing process on the giant magneto-impedance (GMI) effect of $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_8\text{Nb}_{3.5}\text{B}_{3.5}\text{Cu}_1$ ribbons was studied. The obtained results showed that with increasing annealing current, the GMI ratio $\Delta Z/Z$ ($\Delta Z/Z = (Z(H) - Z(H_{\max}))/Z(H_{\max})$) is enhanced. The maximal GMI ratio of about 62% is obtained for the sample annealed at 820 mA for 10 min, while the sensitivity can reach a value up to about $0.23\% (\text{A/m})^{-1}$. In combination with the evolution of electrical and soft magnetic properties, the dependence of the GMI effect on the frequency and applied longitudinal field has been discussed by means of skin effect.

PACC: 7550B; 7540G

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 59671011, 59525101).