

非晶 CoFeNiNbSiB 合金的巨磁阻抗效应

张 榕 许裕生

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

(1999 年 6 月 10 日收到; 1999 年 7 月 19 日收到修改稿)

研究了非晶 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_4\text{Nb}_1\text{Si}_{12.5}\text{B}_8$ 合金薄带的巨磁阻抗效应. 实验表明, 在一定频率范围内提高测试频率, 磁阻抗效应有明显提高; 适当温度的退火也有助于磁阻抗效应的提高. 制备态非晶合金样品在频率为 5 MHz 下达 120% 左右, 经过退火处理的非晶样品 5 MHz 下的效应可达 400% 左右.

PACC: 7550K; 7530V

1 引 言

巨磁阻抗效应(giant magneto-impedance, 缩写为 GMI), 是指材料的交流阻抗随外加磁场的变化而发生显著变化的现象^[1]. 因为巨磁阻抗效应在室温下和较低磁场下(一般为 10^2 — 10^3 A/m 的量级)就可观测到, 而且效应显著、响应快、灵敏度高、无磁滞, 有希望用于制作微型高灵敏度磁传感器, 所以引起科技界的关注^[2,3].

一定频率下外加磁场引起的阻抗变化百分比量度磁阻抗效应的大小, 可定义为

$$\text{MI}(Z) = \{[Z(H) - Z(H_s)]/Z(H_s)\} \times 100\%, \quad (1)$$

其中 $Z(H_s)$ 为磁饱和时的阻抗值. 效应的磁场灵敏度定义为

$$S_Z = \text{MI}(Z)_{\max}/\Delta H_Z, \quad (2)$$

其中 $\text{MI}(Z)_{\max}$ 是效应的最大值, ΔH_Z 是 $\text{MI}(Z)$ - H 曲线的峰宽 FWHM 的二分之一. 磁场灵敏度的大小反映了磁场强度增大一个单位引起的效应变化.

为了分析材料的磁阻抗效应中电阻和电抗的贡献, 一般把一定频率下, 磁场引起的电阻或电抗变化与磁饱和时的电阻值 $R(H_s)$ 之比定义为 $\text{MI}(R)$ 和 $\text{MI}(X)$. 这是因为磁饱和后, 材料的电阻 $R(H_s)$ 比较稳定, 接近于样品的直流电阻, 而在某些情况下样品的电抗 $X(H_s)$ 接近于零^[4,5].

2 实 验

单辊急冷法制备的非晶 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_4\text{Nb}_1\text{Si}_{12.5}\text{B}_8$ 合金带, 带厚度为 $30 \pm 5 \mu\text{m}$. 非晶合金带沿带轴方向切成长度约为 20 mm, 宽度为 2.5 mm 的细条样品, 一组作为非晶制备态样品装上阻抗分析仪的样品架进行测量, 其他各组样品经热处理后再作测量.

在 Rigaku 公司 D/Max 3C 型 X 射线衍射仪上分析了样品的结构. 在 Perkin Elmer 公

司热重(TG)仪上测量了部分样品的居里温度 T_C , 用 Riken 公司的振动样品磁强计(VSM)测量了部分样品的磁性质.

用 HP-4192A LF 型阻抗分析仪测量样品的阻抗, 测量电流的频率分别为 100, 500, 1000 和 5000 kHz, 输出电流 I_{rms} 固定为 5 mA, 电流沿样品的带轴方向. 外加磁场 H_{ex} 由螺线管提供, 中心均匀区的磁场强度可达 26.3×10^3 A/m. 外加磁场的方向平行于样品的带轴方向, 即测量电流方向时, 样品阻抗随磁场的变化称为纵向磁阻抗效应, 记为 LMI; 外加磁场的方向在样品带平面内垂直于带轴方向, 即垂直于测量电流的方向时, 样品阻抗随磁场的变化称为横向磁阻抗效应, 记为 TMI.

3 实验结果及讨论

非晶 $Co_{70}Fe_{4.5}Ni_4Nb_1Si_{12.5}B_8$ 合金带制备态的直流电阻率为 $132 \mu\Omega \cdot cm$. 热处理温度分别为 200, 300 和 360 $^{\circ}C$. X 射线衍射分析表明, 经过热处理的样品仍然为非晶态, 而没有发生结晶.

图 1(a) 所示为非晶 $Co_{70}Fe_{4.5}Ni_4Nb_1Si_{12.5}B_8$ 合金制备态样品在 100, 500, 1000 和 5000 kHz 频率下所测得的阻抗随纵向外加磁场的变化(LMI); 图 1(b) 所示为该样品在上述四个测量频率下所测得的阻抗随横向外加磁场的变化(TMI).

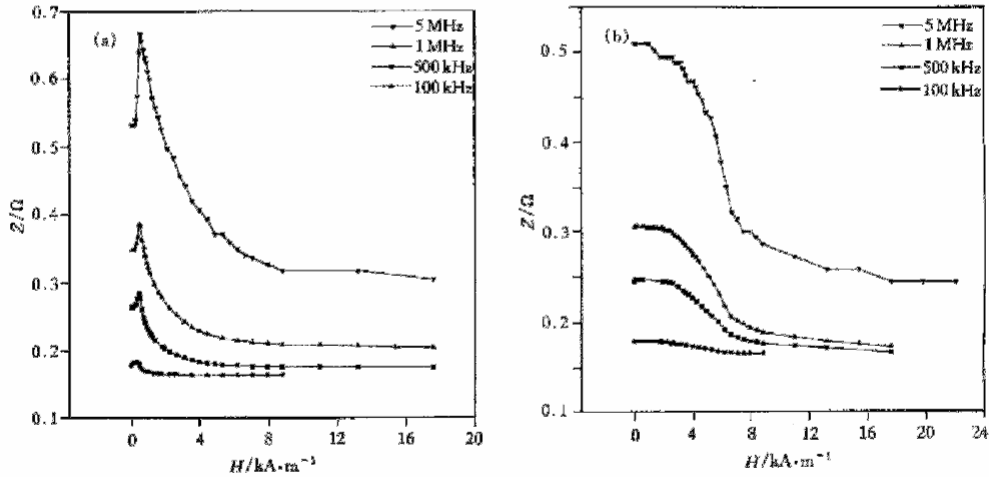


图 1 非晶 $Co_{70}Fe_{4.5}Ni_4Nb_1Si_{12.5}B_8$ 合金制备态样品在不同频率下阻抗 Z 随磁场 H 的变化 (a) 为纵向磁阻抗(LMI)的变化, (b) 为横向磁阻抗(TMI)的变化

在外磁场 $H_{ex}=0$ 时, 样品的阻抗随测量频率的上升而增加. 外加磁场时, 样品的阻抗发生变化. LMI 和 TMI 的变化规律不同. 对 LMI 而言, 外加磁场在带轴方向, 磁场从零开始增大, 阻抗是上升的; 磁场增大到 10^2 A/m 量级时出现阻抗的一个峰值; 外加磁场继续增大时, 阻抗先是很快下降, 然后缓慢下降, 外加磁场足够大时出现饱和现象, 阻抗的下降十分缓慢, 几乎不变. 但是对 TMI 而言, 外加磁场在带平面内与带轴及电流方向垂直的

方向,磁场从零开始增大时,样品的阻抗几乎不变,曲线出现一个平台,当外加磁场超过一个阈值后,样品的阻抗随磁场的增大而单调下降.在磁场足够大时,出现饱和现象.TMI效应的磁场灵敏度比LMI效应要小.TMI效应的这一阈值行为,与样品横向尺度小而产生的退磁场有关^[5,6].可以发现两者在磁场强度的某个区间内的变化都非常陡.对制备态非晶样品在LMI上升段磁场引起的阻抗变化具有正的斜率,最大可达 $20\% (\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$;在下降段磁场变化引起的斜率可达 $4.2\% (\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$.在TMI的下降段磁场引起的阻抗变化的斜率也可达 $3\% (\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$.所不同的是,LMI效应在较小磁场强度区间内十分灵敏,而TMI效应在超过阈值后的一个区间内灵敏.LMI和TMI随外加磁场变化的不同特点表明合金材料中存在着横向磁各向异性.

非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_4\text{Nb}_1\text{Si}_{12.5}\text{B}_8$ 合金经过 200, 300 和 360 °C 热处理后仍然是非晶态结构,但在热处理时可以发生不同程度的结构弛豫.在急冷制备过程中产生的内应力与材料的磁致伸缩相互作用的结果,产生了非晶态合金中的局域磁各向异性和磁畴结构.低温热处理时,部分消除了合金材料的内部应力,因此也改变了非晶态合金的磁各向异性和磁畴结构,影响有效磁导率,进而影响材料的阻抗.实验证明,适当的退火处理可以使非晶 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_4\text{Nb}_1\text{Si}_{12.5}\text{B}_8$ 合金的磁阻抗效应有明显的提高.图 2 (a) 所示为非晶 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_4\text{Nb}_1\text{Si}_{12.5}\text{B}_8$ 合金经 360 °C 退火后样品在 100, 500, 1000 和 5000 kHz 频率下所测得的阻抗随纵向外加磁场的变化(LMI);图 1(b)所示为该样品在上述 4 个测量频率下所测得的阻抗随横向外加磁场的变化(TMI).

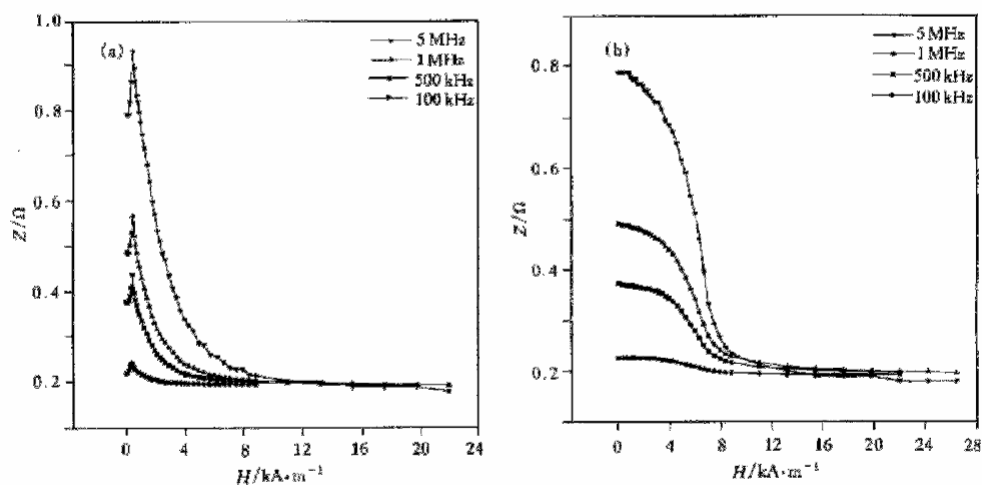


图 2 非晶 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_4\text{Nb}_1\text{Si}_{12.5}\text{B}_8$ 合金经 360 °C 退火后样品在不同频率下阻抗 Z 随磁场 H 的变化 (a)为纵向磁阻抗(LMI)的变化, (b)为横向磁阻抗(TMI)的变化

表 1 和表 2 中分别列出了制备态、200 °C 退火、300 °C 退火和 360 °C 退火的四个样品在 5 MHz 下的纵向磁阻抗(LMI)效应和横向磁阻抗(TMI)效应的最大值和相应的磁场灵敏度,包括电阻 R 和感抗 X 在磁场中的效应.

表 1 $f = 5 \text{ MHz}$ 下各样品的纵向磁阻抗(LMI)效应和磁场灵敏度

样品	制备态	200 °C 退火	300 °C 退火	360 °C 退火
$MI(Z)_{\max}/\%$	119.4	149.0	186.5	417.5
$S_Z/(\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$	4.93	7.97	3.25	22.30
$MI(R)_{\max}/\%$	207.1	128.0	144.4	350.0
$S_R/(\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$	15.70	6.84	4.69	21.20
$MI(X)_{\max}/\%$	178.6	108.0	141.7	255.6
$S_X/(\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$	6.77	4.46	2.80	8.30

由表 1 可见,非晶制备态样品经 360 °C 退火处理,在 5 MHz 下 $MI(Z)$ 的最大值可从 120% 左右提高到 400% 以上. 磁场灵敏度也从 $5\% (\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$ 左右提高到 $20\% (\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$ 以上. 退火处理部分消除了急冷过程中引入的内应力,改善了磁导率,但仍存在一小的横向磁各向异性,这是该退火样品显示大的 LMI 效应的关键. 比较阻抗 Z 中电阻 R 和感抗 X 在磁场作用下的变化,电阻 R 的变化率和磁场灵敏度都相对大些. 由表 2 可见,虽然 TMI 效应比 LMI 小一些,但其效应的最大值还是与 LMI 的相应值有同等量级.

表 2 $f = 5 \text{ MHz}$ 下各样品的横向磁阻抗(TMI)效应和磁场灵敏度

样品	制备态	200 °C 退火	300 °C 退火	360 °C 退火
$MI(Z)_{\max}/\%$	83.1	138.0	147.3	345.2
$S_Z/(\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$	0.88	1.74	1.24	2.31
$MI(R)_{\max}/\%$	73.7	109.1	116.7	288.9
$S_R/(\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$	0.78	1.24	1.47	1.93
$MI(X)_{\max}/\%$	57.9	104.6	116.7	216.7
$S_X/(\text{kA}/4\pi\text{m})^{-1}$	0.57	1.19	0.98	1.30

我们还在实验中观测了其他的 Co 基合金和 Fe 基合金的磁阻抗效应,但都不如 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_4\text{Nb}_1\text{Si}_{12.5}\text{B}_8$ 合金的效应大. 可能适当的 Ni 和 Nb 含量对合金的结构和磁性能产生了好的综合效果.

4 结 论

1) 实验观察到非晶 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_4\text{Nb}_1\text{Si}_{12.5}\text{B}_8$ 合金的巨磁阻抗效应. 该非晶合金带制备态的效应在 5 MHz 下可达到 120% 左右,经过适当热处理可达 400% 以上.

2) 材料的磁阻抗不仅与合金成分和结构有关,也与测试频率和外加磁场的方向有关. 提高频率可以观察到较大的效应. 横向磁阻抗(TMI)效应与纵向磁阻抗(LMI)效应的最大值相近,但曲线存在一个平台,磁场超过阈值才可观察到阻抗的明显变化.

- [1] K. Mohri *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **28**(1992), 3150.
- [2] L. V. Panina *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **76**(1994), 6198.
- [3] M. Knobel *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter*, **7**(1995), L115.

- [4] R. L. Sommer, C. L. Chien, *Phys. Rev.*, **B53**(1996), R5982.
[5] R. S. Beach, A. E. Berkowitz, *J. Appl. Phys.*, **76**(1994), 6209.
[6] R. L. Sommer, C. L. Chien, *Appl. Phys. Lett.*, **67**(1995), 3346.

GIANT MAGNETO-IMPEDANCE EFFECT IN AMORPHOUS CoFeNiNbSiB ALLOY RIBBON

ZHANG RONG XU YU-SHENG

(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 10 June 1999; revised manuscript received 19 July 1999)

ABSTRACT

The giant magneto-impedance (GMI) effects in amorphous $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_4\text{Nb}_1\text{Si}_{12.5}\text{B}_8$ alloy ribbon have been observed. It is shown that the GMI effects increase with driving current frequency and an appropriate annealing can enhance the effect. A large MI ratio of about 120% in the as-cast sample and a ratio of about 400% in a suitably annealed sample have been measured at 5 MHz.

PACC: 7550K; 7530V