

20997-1000

Co-Fe-Ni-Nb-Si-B 非晶软磁合金薄带巨磁阻抗效应*

吴厚政 刘宜华 张林 萧淑琴 代由勇

(山东大学物理系, 济南 250100)

摘要 研究了 Co-Fe-Ni-Nb-Si-B 非晶软磁合金薄带的磁性和巨磁阻抗 (GMI) 效应。样品在 350 °C 下退火 60 min 后获得了最佳的软磁特性, 并表现出优良的 GMI 效应。在 1.4 MHz 的交变电流频率下, 获得了最大的 GMI 效应, 磁阻抗比 $\Delta Z/Z_S = (Z_0 - Z_S)/Z_S$ 最高可达 192%。在低频下得到了显著的巨磁电感应效应, 在 100 kHz 下, 磁电感比达到 769%。在高频下, 材料表现出优良的巨磁电阻效应, 在 13 MHz 下, 磁电阻比达到 383%。

关键词 巨磁阻抗效应, 非晶态软磁合金薄带, 趋肤效应

中图分类号 TM271, O482.52 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2000)09-0997-04

TM271.2

GIANT MAGNETOIMPEDANCE EFFECT OF AMORPHOUS Co-Fe-Ni-Nb-Si-B SOFT MAGNETIC RIBBONS

0482.52

WU Houzheng, LIU Yihua, ZHANG Lin, XIAO Shuqin, DAI Youyong
Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100
Correspondent: WU Houzheng, Tel: (0531)8567032, Fax: (0531)8567031
Manuscript received 2000-02-14, in revised form 2000-05-22

ABSTRACT The magnetic properties and giant magnetoimpedance (GMI) effects of amorphous Co-Fe-Ni-Nb-Si-B soft magnetic ribbons were studied. The samples annealed at 350 °C for 60 min have the best soft magnetic properties, and show the superior GMI effects. The maximum GMI effect has been obtained at a frequency of 1.4 MHz. The maximum magnetoimpedance ratio, $\Delta Z/Z_S = (Z_0 - Z_S)/Z_S$, is 192%. An excellent magnetoinductive effect has been obtained at low frequencies. The magnetoinductive ratio as large as 769% is obtained at 100 kHz. At high frequencies, the ribbon show very good magnetoresistance effect. The magnetoresistance ratio at 13 MHz is 383%.

KEY WORDS giant magnetoimpedance effect, amorphous soft magnetic ribbon, skin effect

巨磁阻抗 (GMI) 效应是软磁合金材料的交流阻抗随外加直流磁场变化而变化的特性, 产生 GMI 效应的主要原因是高频电流的趋肤效应。1992 年日本名古屋大学 Mohri 等首先在 Co 基软磁非晶细丝中发现并报道了这一现象^[1]。最初对这一效应研究最多的是具有零或负磁致伸缩系数的钴基非晶态软磁合金细丝, 近年来对 GMI 效应的研究已经扩大到非晶和纳米晶软磁合金薄带^[2-4]和薄膜^[2,5-7]。由于 GMI 效应具有灵敏度高、无磁滞, 响应快和稳定性好等特点, 因而具有很大的应用潜力。利用巨磁阻抗效应已经制成许多有价值的磁传感元件^[8]。由于这些优良特性, 有关 GMI 效应的研究和报道很多, 日益被人们所重视。Co-Fe-Ni-Nb-Si-B 非晶薄带是一种

优良的软磁合金材料^[9], 但至今没有有关该材料 GMI 效应的报道。为此, 本工作对它进行了系统研究。

1 实验方法

实验所用的 Co-Fe-Ni-Nb-Si-B 非晶薄带是用单辊快淬法制成的, 厚度约为 25 μm , 成分为 $(\text{Co}_{0.85}\text{Fe}_{0.05}\text{Ni}_{0.075}\text{Nb}_{0.015})_{0.75}\text{Si}_{0.1}\text{B}_{0.15}$ 。用振动样品磁强计测量材料的磁特性。样品的饱和磁化强度 M_s 与温度 T 的关系是在高温炉中测量的。高温炉保持为 1 Pa 的真空度, 以防样品氧化。测量中升温速率为 11 K/min, 测量磁场为 50 mT, 该磁场足以使样品磁化饱和。样品的有效磁导率及阻抗特性使用 HP4192A 阻抗分析仪测量。阻抗测量的频率范围为 100 Hz 到 13 MHz, 交变电流幅值保持恒定, 为 10 mA, 电流方向沿样品长方向。测量时采用四端法连接样品, 通过四条引线将样品接于阻抗分析仪上。有效磁导率及阻抗测量中所用的样品尺寸为 2 mm 宽, 20 mm 长。外加磁场由一个直径为 30 cm 的 Helmholtz 线圈提供, 它可产生一个从 -7—7 mT 的直流磁场。磁场

* 国家自然科学基金资助项目 59981004 和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 9704225

收到初稿日期: 2000-02-14, 收到修改稿日期: 2000-05-22

作者简介: 吴厚政, 男, 1967 年生, 硕士生

方向与电流方向在样品平面内平行(纵向磁化)或垂直(横向磁化)。Helmholtz 线圈是按如下方式放置的,即由它产生的磁场与地磁场垂直,以减小地磁场的影响。样品在 1.5×10^{-3} Pa 的真空中在不同的温度下进行退火处理,以提高材料的软磁特性。所有测量都是在室温下进行的。样品的结构由 X 射线衍射测定。

2 实验结果与讨论

用振动样品磁强计测量了溅态样品的饱和磁化强度 M_s 与温度 T 的关系,如图 1 所示。从 M_s-T 曲线可以看到 Co-Fe-Ni-Nb-Si-B 非晶薄带的 Curie 温度大约为 324 °C。在曲线上存在两个相变点 T_1 和 T_2 。 T_1 为非晶材料的晶化温度,约为 524 °C, T_2 为晶态下的相变温度,约为 569 °C。在 T_2 下,薄带由低饱和磁化强度的晶态相转变为具有较高饱和磁化强度的第二晶态相。溅态材料的饱和磁化强度约为 38.5 kA/m。

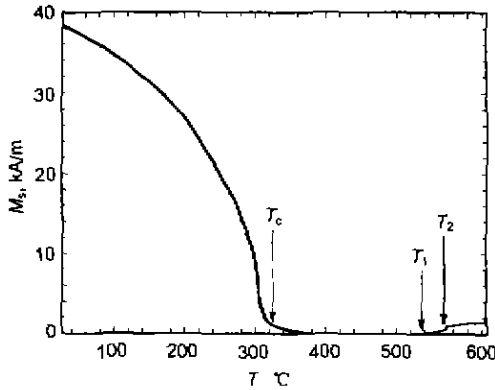


图 1 Co-Fe-Ni-Nb-Si-B 非晶薄带样品的饱和磁化强度 M_s 与温度 T 的关系

Fig.1 Dependence of saturation magnetization M_s on the temperature T for Co-Fe-Ni-Nb-Si-B amorphous magnetic ribbon

为消除样品在快淬制备过程中产生的内应力,改善样品的软磁特性,对材料在不同的温度下进行了不同时间的退火热处理。方法如下:淬态样品在不同温度下退火 20 min,从中选出最佳退火温度,然后在最佳温度下做不同时间的退火热处理,从中选出最佳退火时间。图 2 给出薄带样品在 350 °C 下经不同时间的退火热处理后所测得的纵向磁阻抗谱。磁阻抗比定义为 $\Delta Z/Z_s = (Z_0 - Z_s)/Z_s$,其中 Z_0 和 Z_s 分别是磁场为零和饱和值时材料的阻抗。用 $\mu_0 H = 7$ mT 作为阻抗的饱和磁场。从图中可以看到,样品在 350 °C 下经 60 min 退火热处理后获得了最大的磁阻抗效应,说明该退火方案可以使样品充分完成非晶态下的结构弛豫过程,使样品在制备过程中产生的内应力得以充分释放,使材料软磁性能得以提高,从而使 GMI 效应达到最大。X 光衍射实验表明,这时样品为非晶态结构。以下讨论的均为该退火条件下材料的 GMI 效应。

图 3 为经最佳退火条件处理后样品有效磁导率 μ_e 与频率 f 的关系,在无外加磁场时,在低频范围内 μ_e 随频率增加而迅速减小,这是因为当频率增高时,涡流损耗增加,使材料的磁导率下降,而在外加磁场为 7 mT 时, μ_e 在整个频率范围内几乎为一个很小的常数。由图 3 可见,外加磁场可以明显影响材料的有效磁导率,这是产生 GMI 效应的主要原因。外加磁场通过改变材料的磁导率而改变交变电流的趋肤深度,由此产生了 GMI 效应。

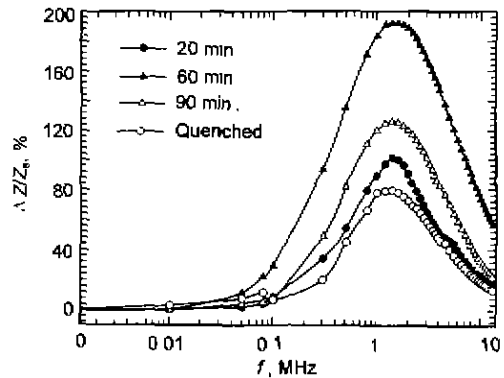


图 2 在 350 °C 下经不同退火时间处理后样品的 $\Delta Z/Z_s$ 与频率的关系

Fig.2 Dependences of $\Delta Z/Z_s$ on the frequency f for the samples annealed at 350 °C for different times

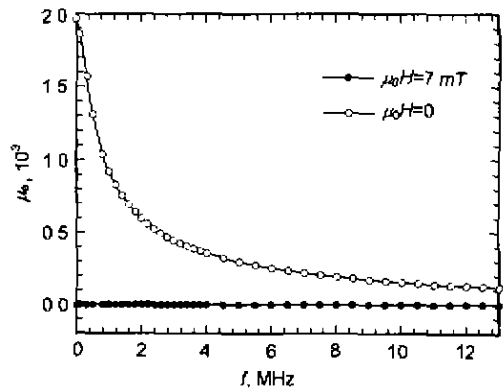


图 3 在零场和 7 mT 磁场下,样品有效磁导率与频率的关系

Fig.3 Frequency dependences of the effective permeability for a sample in the fields of 0(circles) and 7mT(dots)

结合图 3 对图 2 做进一步讨论。从图 2 可以看到,磁阻抗谱存在如下特点:第一,磁阻抗存在一个临界频率 f^* ,在这个频率下,样品开始表现出明显的磁阻抗特性,这时存在关系: $a/\delta_m = 1^{[10]}$,其中 a 是样品的厚度, $\delta_m = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f^* \mu_e \mu_0}}$ 是样品在 f^* 下的趋肤深度, ρ 是样品的电阻率, μ_0 是真空磁导率。当频率高于 f^* 时,趋肤效应开始发挥作用。从图中可以看出,对我们所研究的这种材料,临界频率 f^* 约为 100 kHz,当 f 超过 f^* 时, $\Delta Z/Z_s$ 随频率的升高开始增加。第二,磁阻抗谱存在一

一个特征频率 f_m , 当 $f = f_m$ 时, $\Delta Z/Z_S$ 达到最大值. 对本工作所使用的样品, $f_m = 1.4$ MHz, 对不同退火条件的样品, f_m 基本一样. 对经最佳退火条件处理过的样品, 在 f_m 下 $\Delta Z/Z_S$ 达到 192%. 当频率超过 f_m 时, $\Delta Z/Z_S$ 值就会逐渐降低. 特征频率的出现可以分析如下: 当频率升高时, 趋肤效应增强, 这有利于磁阻抗效应, 但另一方面, 频率升高会使有效磁导率下降, 这使有效磁导率受外磁场的影响减小. 这又不利于磁阻抗效应, 两个因素竞争的结果形成了特征频率 f_m . 第三, 当频率足够高时, 磁阻抗比下降到很小的值, 可以想到, 一定存在一个截止频率 f_c , 当 $f \geq f_c$ 时, 磁阻抗效应消失. 这是因为, 当频率足够高时, 有效磁导率将降到很小的值. 这时, 磁场引起磁导率的变化可以忽略, 这在图 3 中已经反映出来, 这种情况下磁场对趋肤效应的影响可以忽略, 使磁阻抗效应消失. 由于使用的频率不够高, 所以从图 2 中还确定不出截止频率的具体值, 但对淬态样品和经 20 和 90 min 退火的样品, 13 MHz 的频率已经接近它们的截止频率了. 对最佳退火条件下得到的样品, 由于具有较高的磁导率, 因而, 具有更高的截止频率.

样品的阻抗 $Z(f, H) = R(f, H) + iX(f, H)$ 与电流的频率和外加磁场的值有密切关系. 图 4 为在纵向磁场下退火样品的电阻 R 、电感 X 和阻抗 Z 与频率 f 的关系. 在横向磁场情况下, 与纵向磁场有类似的结果, 这里不再给出. 由图 4 可以看出: 在零磁场下, 电阻 R 、电感 X 和阻抗 Z 的曲线都具有负曲率. 在磁场为 7 mT 情况下, 均近似呈线性关系. 这与 Fe-Co-Si-B 非晶丝^[11] 及 Fe-Cu-Nb-Si-B 纳米晶带^[4] 中所得到的结果相似, 其电阻和电感曲线的曲率在较低频率时 (相对趋肤效应) 就可变为负值. 由图还可以看出, 样品的阻抗在较低频率下, 主要由电阻决定, 呈电阻性. 而随频率的增加, 感抗上升比电阻快得多, 使感抗对阻抗起主要作用. 这也是 GMI 效应的一般特点. 图 5 为纵向磁场下非晶薄带的磁阻抗比与频率的关系, 其中: $\Delta R = R_0 - R_S$, $\Delta X = X_0 - X_S$, $\Delta Z = Z_0 - Z_S$ (R_0, X_0, Z_0 和 R_S, X_S, Z_S 分别为 0 和 7 mT 磁场下的值). 由图可以看出, $\Delta R/R_S$ 随频率的增加而增加, 而 $\Delta X/X_S$ 则随频率的上升而下降. 在频率约为 1.4 MHz 时, 两曲线与 $\Delta Z/Z_S$ 同交于一点. 巨磁阻抗比在此交点的值达到最大, 为 192%.

图 6 为薄带样品在几个典型交变电流频率下的阻抗比 $\Delta Z/Z_S$ 随纵向 (图 6a) 和横向 (图 6b) 磁场的变化图. 图 7 为 $\Delta X/X_S$ 和 $\Delta R/R_S$ 随纵向磁场的变化图. 图中只给出外磁场为正时的结果, 外磁场为负时与正磁场结果相似, 曲线呈对称分布, 这是 GMI 效应的一般特点. 从图 6a 和图 7 中可以看出, 纵向磁阻抗比在 0.2 mT 的磁场下出现一个小的峰值, 这是样品受各向异性场影响产生的. 这表明样品沿横向有一个 0.2 mT 的各向异性分

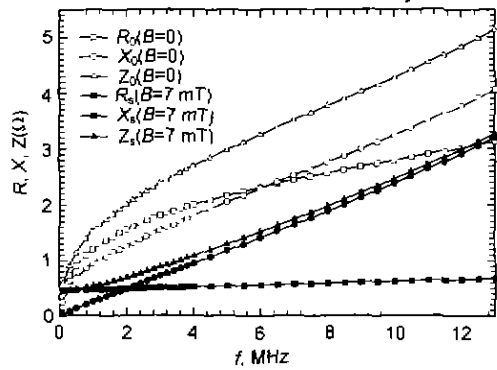


图 4 样品的 R, X, Z 与频率 f 的关系

Fig. 4 Frequency dependences of R, X and Z of the sample

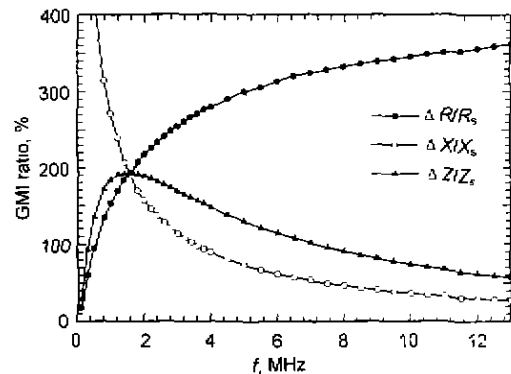


图 5 样品的 $\Delta R/R_S, \Delta X/X_S$ 和 $\Delta Z/Z_S$ 与频率 f 的关系

Fig. 5 Frequency dependences of $\Delta R/R_S, \Delta X/X_S$ and $\Delta Z/Z_S$ of the sample

量, 这是由残余的应力感生各向异性产生的. 说明零磁场退火并没有彻底消除应力各向异性的影响. 当磁场大于 0.2 mT 后, 磁阻抗比迅速下降; 当磁场达到 7 mT 时, GMI 效应趋于饱和. 从图 6b 中可以看出, 横向磁阻抗比在 1.5 mT 的磁场下出现一个大而宽的峰值, 而且, 当磁场大于 1.5 mT 后, 磁阻抗比下降较缓慢, 磁场达到 7 mT 时, GMI 效应仍明显未达到饱和 (100 kHz 的低频除外). 这种磁阻抗特性主要是由于横向退磁场的影响. 从图 7 可以看出, 磁电感和磁电阻效应有着明显的频率特性, 这在图 5 中已经看到了. 低频下对 GMI 起作用的主要是磁电感效应, 在 100 kHz 下, 磁电感项的变化率高达 769%, 而且随磁场增加, 磁电感比曲线下降迅速, 表现出很高的磁场灵敏度. 而 100 kHz 下的磁电阻比几乎无变化. 随着频率上升, 由于涡流损耗增加, 磁导率下降, 使电感项的变化迅速减小. 随着趋肤效应的明显提高, 电阻项的变化开始增加, 到 13 MHz 时磁电阻项的变化率达到 383%, 而磁电感比却降到了很小的值. 所以, 在高频时, 磁电阻项对 GMI 效应起着主要作用. 从

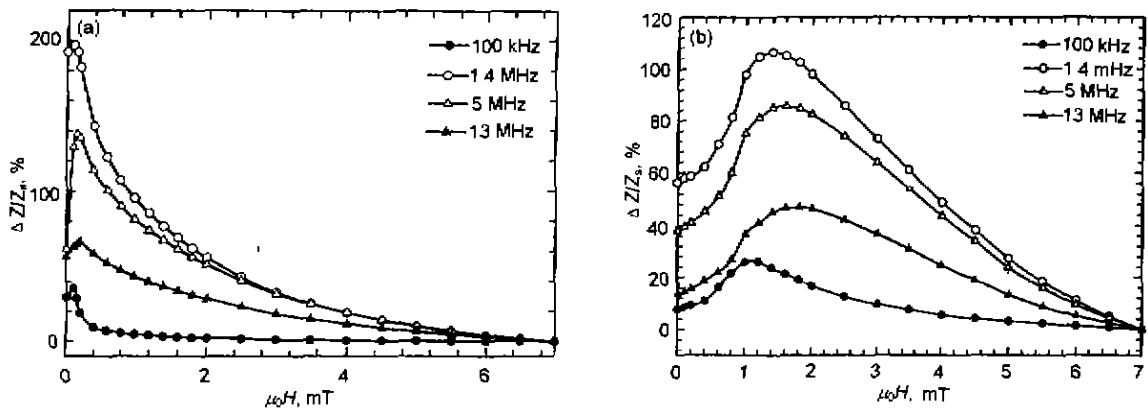


图6 样品的磁阻抗比 $\Delta Z/Z_S$ 与纵向和横向磁场的关系

Fig.6 Dependences of magnetoimpedance, $\Delta Z/Z_S$, of the sample on the longitudinal (a) and transverse (b) magnetic fields

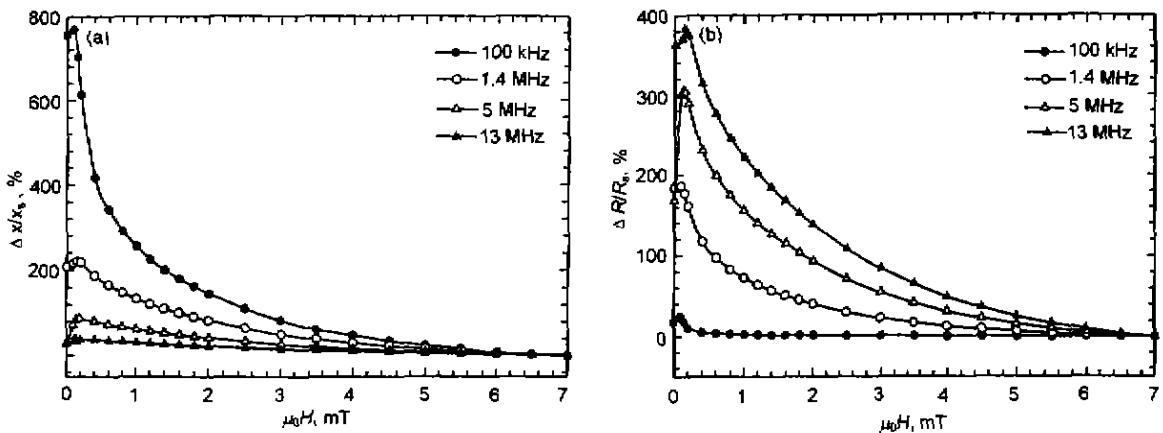


图7 样品的磁电感比 $\Delta X/X_S$ 和磁电阻比 $\Delta R/R_S$ 与纵向磁场的关系

Fig.7 Dependences of magnetoinductive ratio, $\Delta X/X_S$, (a) and magnetoresistant ratio, $\Delta R/R_S$, (b) of the sample on the longitudinal magnetic field

图5中可以看出,磁电阻项的变化率在13 MHz时虽然上升已趋缓慢,但仍有上升趋势,且随着频率的继续增加,磁电阻比还将进一步增大,但这已超出了本工作频率测试范围。

3 结论

软磁合金 Co-Fe-Ni-Nb-Si-B 薄带在 350 °C 下经 60 min 的退火热处理后获得了优良的巨磁阻抗效应。这是由于材料具有优良的软磁特性,外加磁场通过改变材料的有效磁导率而改变交变电流的趋肤深度,由此产生了 GMI 效应。低频下对 GMI 起作用的主要是磁电感效应,在 100 kHz 下,磁电感项的变化率高达 769%。在高频时,磁电阻项对 GMI 效应起着主要作用,在 13 MHz 时磁电阻项的变化率达到 383%。在 1.4 MHz 的频率下磁阻抗比达到最大值 192%。研究结果表明,Co-Fe-Ni-Nb-Si-B 非晶薄带是一种很好的巨磁阻抗材料。

参考文献

- [1] Mohri K, Kohzawa T, Kawashima K, Yoshida H, Panina L V. *IEEE Trans Magn*, 1992; 28: 3150
- [2] Panina L V, Mohri K, Uchiyama T, Noda M, Bushida K. *IEEE Trans Magn*, 1995; 31: 1249
- [3] Sommer R L, Chien C L. *J Appl Phys*, 1996; 79: 5139
- [4] Chen C, Luan K Z, Liu Y H, Mei L M, Guo H Q, Shen B G, Zhao J G. *Phys Rev*, 1996; 54B: 6092
- [5] Sommer R L, Chien C L. *Appl Phys Lett*, 1995; 67: 3346
- [6] Liu Y H, Chen C, Zhang L, Yan S S, Mei L M. *J Phys D Appl Phys*, 1996; 29: 2943
- [7] Xiao S Q, Liu Y H, Zhang L, Chen C, Lou J X, Zhou S X, Liu G D. *J Phys: Condensed Matter*, 1998; 10: 3651
- [8] Mohri K, Panina L V, Uchiyama T, Bushida K, Noda M. *IEEE Trans Magn*, 1995; 31: 1266
- [9] Inomata K, Hasegawa M, Shimamuki S. *Jpn J Appl Phys*, 1979; 18: 937
- [10] Grossinger R, Turtell R S. *IEEE Trans Magn*, 1994; 30: 455
- [11] Beach R S, Berkowitz A E. *J Appl Phys*, 1994; 76: 6209