

# 磁共振法研究 $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$ 纳米晶薄带的磁各向异性

侯碧辉<sup>1)†</sup> 刘凤艳<sup>1)</sup> 郭慧群<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (北京工业大学应用数理学院, 北京 100022) <sup>2)</sup> (中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室, 北京 100080)

(2002 年 12 月 23 日收到, 2003 年 1 月 20 日收到修改稿)

铁磁共振 (FMR) 实验研究  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  ( $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ) 合金薄带的各向异性. 易轴在薄带的横向方向, 同等宽度样品的各向异性常数  $K'$  随 Co 掺杂量的增加而减小,  $K'$  值在  $4.67 \times 10^{-5} \text{ J/m}^3$  ( $x = 0.0$ ) 到  $2.54 \times 10^{-5} \text{ J/m}^3$  ( $x = 0.8$ ) 之间. 由于磁化率的虚部  $\chi''(H)$  随磁场强度  $H$  非线性变化, 在低场 (0—12 mT) 有一个与 FMR 信号强度相当的低场非共振信号. 特别是对  $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  合金薄带的磁化, 在可逆磁化 (0—2.0 mT) 和趋近饱和磁化 (9.0—12 mT) 区域,  $d\chi''/dH = 0$ ; 不可逆畴壁移动过程中, 交流磁化率虚部  $\chi''(H)$  与磁场强度的  $n$  次方即  $H^n$  ( $n \geq 3$ ) 有关, 在磁畴转动过程中  $\chi''(H)$  正比于  $H^2$  (瑞利区),  $d\chi''/dH$  为常数, 而且发现, 有不可逆畴壁移动-磁畴转动三段交替变化的过程, 此过程对应三种磁畴的消失过程.

关键词: 铁磁共振, 各向异性常数, 低场非共振信号, 磁化过程

PACC: 7630, 7560, 7570K

## 1. 引 言

在对  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  ( $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ) 系列纳米微晶合金薄带的静态磁性及磁电阻特性较为全面研究的基础上<sup>[1]</sup>, 我们用电子自旋共振 (ESR) 谱仪对样品的动态磁特性进行了研究. 由于交流磁化率的虚部  $\chi''$  随磁场强度  $H$  非线性变化, 在低场 (0.02 T 以下) 样品的非共振信号与电子自旋的一致共振 (即铁磁共振, FMR) 信号强度相当. 薄带样品的 FMR 谱是各向异性的. 本文就  $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  合金薄带样品的低场非共振信号进行研究, 并对  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  系列合金薄带的各向异性 FMR 谱进行分析, 计算各向异性常数  $K$ .

顺磁状态是磁矩无序的情况. 在顺磁材料中磁性离子的电子自旋之间没有交换耦合作用, 磁化率  $\chi$  是一个数值较小的常数 (大约为  $10^{-4}$ — $10^{-6}$ ), 也就是说磁化强度  $M$  和磁场强度  $H$  是线性关系,  $\chi =$

$M/H$ . 在外磁场  $H$  不太大的情况下,  $\chi$  与磁场  $H$  无关. 归一化磁共振实验测量的是微波交变磁化率  $\chi = \chi' + i\chi''$  的虚部  $\chi''$  随外磁场  $H$  变化的谱线; ESR 谱仪测量的是  $\chi'$  的一次微分  $d\chi''/dH$  随外磁场  $H$  变化的  $d\chi''/dH$  谱线. 顺磁材料的  $\chi'$  是一个常数, 在没有共振峰时,  $d\chi''/dH = 0$ , 因而在此情况下, 顺磁共振谱线中共振峰的线宽很窄. 顺磁样品的磁化过程是可逆的, 在磁场强度  $H$  退为零时磁化强度  $M$  也为零.  $M$ - $H$  关系与磁化历史无关.

铁磁材料中磁性离子的电子自旋之间有交换耦合作用, 磁化率  $\chi$  不仅比顺磁材料大得多 (大约为  $1$ — $10^4$ ), 而且不是一个常数, 也就是说, 磁化率  $\chi$  与磁场强度  $H$  有关. 对 FMR 谱, 不仅其信号强度比顺磁样品的 ESR 谱强得多, 而且还有一些与材料的铁磁性相关的现象值得注意<sup>[2,3]</sup>. 铁磁样品的磁化过程是不可逆的,  $M$ - $H$  关系与磁化历史有关.  $M$ - $H$  曲线呈现磁滞回线<sup>[4,5]</sup>. 特别是在低场, 磁化率  $\chi(H)$  随磁场强度  $H$  变化很大,  $\chi''$  不是一个常数<sup>[6]</sup>.

由于样品制备中机械应力的作用, 许多铁磁薄

<sup>†</sup>houbh@bjut.edu.cn

带的易磁化轴是在沿薄带长度的方向,而经 650℃ 热处理的非晶合金薄带  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  系列,观察样品的磁畴可以明显地看到占主导的是沿薄带宽度方向的条形磁畴<sup>[7]</sup>,即样品的易磁化轴是沿薄带宽度的方向.样品的厚度约 17 μm,晶格常数为 0.2830—0.2862 nm,由于样品是由非晶基质经热处理晶化而成,所以有相当多的空位.样品的密度减小,约为 4.9 g/cm<sup>3</sup>.其平均晶粒尺寸相差较大,磁性和磁电阻特性也随 Co 掺杂量的增加有明显不同,但都是软磁性的,矫顽力  $H_c$  小于 31 A/m.关于五个样品的一些实验研究结果见表 1<sup>[1]</sup>.

表 1 样品  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  的一些实验研究结果

$x$	平均粒径 /nm	比饱和磁化强度 $\sigma_s$ (A·m/kg)	矫顽力 $H_c$ (A/m)	晶格常数 /nm
0.0	10.70	159	1.92	0.2862
0.2	7.80	177.6	22.2	0.2858
0.4	7.25	147.5	19.4	0.2853
0.6	6.8	164.4	25.6	0.2845
0.8	6.4	115.6	30.38	0.2830

## 2. 实 验

利用熔旋法在氩气气氛保护下制备了系列铁磁样品  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  快淬非晶薄带,铜辊转速约为 40 m/s,然后在 10<sup>-3</sup> Pa 的真空条件下在 650℃ 对非晶薄带进行 20 min 热处理,选取样品的坐标  $x$  在薄带长度的方向(纵向), $y$  在薄带宽度的方向(横向), $z$  在垂直薄带平面的方向.球坐标中外磁场  $H$  与样品的取向关系为 (a)  $H$  在  $z$  方向  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $H$  在  $x$  方向  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  (c)  $H$  在  $y$  方向  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ .

通常用于磁共振测量的 ESR 谱仪的磁铁的磁场强度  $H$  只能有强弱变化,不能向负磁场方向反向,而且最小磁场不为零,大约有 0.002 至 0.004 T 的剩余磁场.我们对通用的 ESR 谱仪的磁铁的磁场扫描系统进行改进,使磁场扫描能从 -0.004 T 开始,这样可以观测到磁场零点的情况和有剩余磁化强度时的情况<sup>[8]</sup>.

实验是在室温条件下进行的,ESR 谱的频率为 9.76 GHz.再加上 ESR 测量中有交变的微波,起到对样品退磁化的作用,样品的 ESR 谱几乎是可重

复的.

## 3. 结果和分析

### 3.1. 五个样品的 FMR 实验结果

进行 FMR 实验的五个样品的尺寸和按样品尺寸比例计算设定的退磁因子  $N$  见表 2.

表 2 五个样品的 FMR 实验的样品尺寸和设定的退磁因子  $N$

$x$	$D/\text{mm}$	$W/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$N_z$	$N_y$	$N_x$
0.0	0.017	1.1	3.6	0.98022	0.01515	0.00463
0.2	0.017	0.9	2.2	0.97407	0.01840	0.00753
0.4	0.016	0.8	3.8	0.97636	0.01453	0.00411
0.6	0.021	1.4	3.0	0.97847	0.01463	0.00685
0.8	0.017	1.0	3.0	0.97783	0.01662	0.00554

FMR 实验表明薄带有明显的各向异性,薄带的横向是易轴的方向,这与磁畴观察的结果是一致的<sup>[7]</sup>.外磁场  $H$  与样品取向关系的各向异性 ESR 谱,明显反映出这一点,共振磁场  $H_z > H_x > H_y$ .由 FMR 实验可求得五个样品各向异性常数  $K$ .

以  $(\theta, \varphi)$  标志磁化矢量  $M_s$  在样品中的方位,并设定恒定磁场  $H$  的位置为  $(\theta_B, \varphi_B)$ .  $f$  为微波频率  $\omega = 2\pi f$ ,  $\gamma$  为旋磁比,  $E$  为样品单位体积的自由能.

$$E = E_B + E_d + E_k, \quad (1)$$

其中  $E_B$  为样品在外磁场中的能量,  $E_d$  为退磁场能,  $E_k$  为各向异性能,分别表示如下:

$$E_B = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{B} = -MB[\sin\theta_B \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_B) + \cos\theta \cos\theta_B], \quad (2)$$

$$E_d = -\frac{1}{2} \mathbf{M} \cdot \mathbf{B} = -\frac{1}{2} \mu_0 \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_d \\ = \frac{1}{2} \mu_0 M^2 (N_x \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + N_y \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + N_z \cos^2 \theta), \quad (3)$$

$$E_k = k \cos^2 \alpha = k \sin^2 \theta \sin^2 \varphi, \quad (4)$$

$\alpha$  为  $\mathbf{M}$  与易轴(在  $y$  方向)的夹角.特别注意到,在  $\theta_B = 90^\circ$ ,  $\varphi_B = 90^\circ$  (外加磁场在易轴方向上)时,  $\mathbf{M}$  的方位角也是  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ .  $K$  为各向异性常数,样品是纳米多晶,各向异性主要源于制备时的应力因素<sup>[17]</sup>.由平衡条件

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial \varphi} = 0, \quad (5)$$

并利用试探方程式

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = [B_i + (N_k - N_i)\mu_0 M] \times [B_j + (N_j - N_i)\mu_0 M] \quad (i, j, k = x, y, z) \quad (6)$$

得到旋磁比  $\gamma$  ,从而通过共振方程式<sup>[9]</sup>

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M_s^2 \sin^2 \theta} \left[ \frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} - \left( \frac{\partial^2 E}{\partial \theta \partial \phi} \right)^2 \right] \quad (7)$$

解出各向异性常数  $K$  .对于每一个点  $(\theta_B, \varphi_B, B)$  ,对应于上面的(5)(6)(7)三个方程,可以取方程联立,解出  $M$  的方位角  $(\theta, \varphi)$  .当外加磁场在易轴方向上时,起作用的是  $N_y$  ,而  $N_x$  和  $N_z$  都为零.利用前面设定的  $N_x, N_y, N_z$  可以解出各向异性常数  $K$  .为了便于比较,用样品宽度  $W$  除  $K$  ,得到  $K'$  .表3为解出的各向异性常数.

表3 由FMR实验求得的五个样品各向异性常数  $K_w$  及与样品宽度  $W$  的比值  $K'(W \times 10^3)$

$x$	$W/\text{mm}$	$K/(10^{-5} \text{J/m}^3)$	$K'(W \times 10^3) (10^{-5} \text{J/m}^4)$
0.0	1.1	5.14	4.67
0.2	0.9	3.99	4.43
0.4	0.8	3.39	4.24
0.6	1.4	3.76	2.68
0.8	1.0	2.54	2.54

从表3可以看出各向异性常数  $K$  随着  $x$  的增加而减小,即在合金中的  $\text{Co}$  含量增高,各向异性常数减小,只有  $x = 0.6$  的样品有异常,因为它是最宽的,而  $K' = K/W$  就明显地是单调地随着  $x$  的增加而减小.

### 3.2. 样品 $(x = 0.0)$ 的低场信号分析

当外加磁场在易轴方向上  $(\theta_B = 90^\circ, \varphi_B = 90^\circ)$  时,五个样品都有两个信号峰,低场的峰是非共振信号,较高磁场的峰是FMR信号,图1是在零至0.6 T 磁场范围,样品  $(x = 0.0)$  的ESR谱.低场的峰信号随  $\varphi_B$  角的减小变化不大,FMR信号随  $\varphi_B$  角的减小向高场移动.当加在样品  $(x = 0.0)$  上的磁场在易轴方向上时,低场的峰信号出现三个平台.图2是-4 mT至40 mT 磁场范围样品的非共振信号ESR谱,即图1中的低场峰信号.

把图2的低场峰信号分为四部分,也就是磁化过程的四个区域:

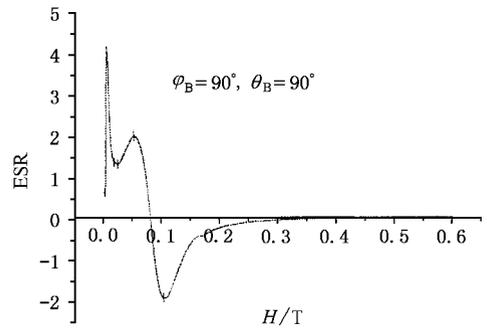


图1 零至0.6 T 磁场范围  $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  样品的ESR谱

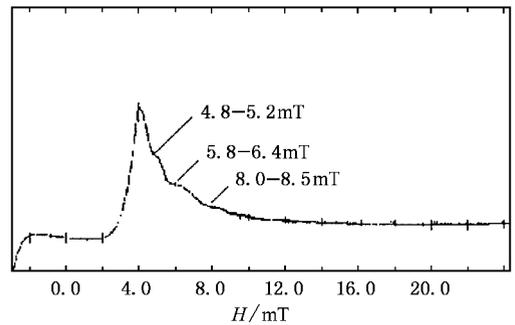


图2 -4 mT至20 mT 磁场范围  $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  样品的非共振信号ESR谱

1.起始磁化区域 外磁场很小(从零至2.0 mT),是可逆磁化过程,这个区域又称为可逆磁化区域,微观上是可逆畴壁位移区域.注意到通用的ESR谱仪测量的是  $\chi'$  的一次微分  $d\chi''/dH$  随外磁场  $H$  的变化,在这个区域  $d\chi''/dH = 0$  ,即交流磁化强度  $M$  随外磁场  $H$  的变化是线性的.

2.陡峻区域 外磁场为2.0 mT至4.2 mT 较弱磁场范围.当磁场变化很小时,磁化强度  $M$  或磁感应强度  $H$  的变化十分显著且急剧地增加,  $d\chi''/dH$  单调增加,是不可逆磁化过程,微观上是不可逆畴壁位移区域.通常会出现巴克豪森跳跃(Barkhausen jumps)地急剧变化过程<sup>[4]</sup>,但在我们的样品中没有测到相应的信号.因为在发生巴克豪森跳跃的磁场点  $\chi''-H$  是不连续函数,就会出现  $d\chi''/dH-H$  不连续变化的奇点,ESR谱线会有两个以上很尖锐的  $d\chi''/dH-H$  峰<sup>[6,10,11]</sup>.这个区域也叫最大磁导率区域,磁化率  $\chi$  很大并达到最大值  $(\chi_{\max})$ .ESR谱实验不能得到  $\chi_{\max}$  的数值,但可以得出达到  $\chi_{\max}$  时的磁场  $H_m$ ,该样品  $(x = 0.0)$  的  $H_m$  为4.2 mT.

3.中等磁场范围内(大约4.2—9.0 mT),微观上

是不可逆畴壁位移及磁畴磁矩转动的区域。通常在铁磁学中认为是瑞利(Rayleigh)区域,根据实验规律,瑞利近似描述磁化曲线规律的经验公式为

$$M = aH + bH^2 \quad (8)$$

如果是这样,由于在瑞利区域(8)式中没有比  $H^2$  更高次的项,而 ESR 谱所观测的是  $d\chi''/dH$  随  $H$  的变化,即  $d\chi''/dH$  为一常数  $b$ ,测到的应当是一条水平线。从图 2 看出,磁场在 4.2—9.0 mT 范围,只有三小段是  $d\chi''/dH$  为水平线的区域,分别为(a)磁场在 4.8—5.2 mT,为了便于比较,假设常数相对值  $b_1 = 1.0$ , (b) 磁场在 5.8—6.4 mT,常数相对值  $b_2 = 0.85$ , (c) 磁场在 8.0—8.5 mT,常数相对值  $b_3 = 0.60$ 。被它们隔开的其余区域,  $d\chi''/dH$  不是常数,即在其余区域(8)式中应当有比  $H^2$  更高次的项,此区域应当与不可逆畴壁位移对应,这样,就可以从 ESR 谱中把微观上不可逆畴壁位移和磁畴磁矩转动的区域区分开来,不可逆畴壁位移对应  $d\chi''/dH$  不是常数的区域,磁畴磁矩转动对应  $d\chi''/dH$  是常数的区域。而且可以认为在每段水平线的高场端:5.2 mT, 6.4 mT, 8.5 mT,分别是对应着某一种磁畴消失的磁场值。

4. 趋近饱和磁化区域 在强磁场(9.0 mT 以上)作用下,磁化强度  $M$  随磁场  $H$  变化比较缓慢,磁化曲线变化比较平缓,最后,  $M$  随  $H$  变化而逐渐趋于技术磁化饱和。磁化达到饱和需要较强的磁场,而所获得的磁化强度  $M$  增加量很小,磁化率  $\chi''$  很小,

几乎是常数,对应  $d\chi''/dH = 0$  或  $\chi''(H) = a \neq 0$ 。

## 4. 结 论

从以上对  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  ( $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ )合金薄带的实验和 FMR 及 ESR 谱的分析可以得出:

$(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  ( $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ )合金薄带的各向异性常数  $K$  随  $x$  的增加而减小,即在合金中 Co 的含量增高,各向异性常数减小。实验中只有  $x = 0.6$ ,宽度  $D = 1.4$  mm 的样品有异常,因为它是最宽的,如果令各向异性常数除以其带宽,即  $K' = K/D$ ,则  $K'$  就是单调的随着  $x$  的增加而减小的。

对  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  ( $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ )合金薄带的 ESR 谱的分析可以得出,  $\text{Fe}_{84}\text{Zr}_{3.5}\text{Nb}_{3.5}\text{B}_8\text{Cu}_1$  合金薄带中包含三种磁畴,谱图中的每一个平台,即  $\chi''(H)$  与  $H^2$  成正比关系的部分,都对应一种磁畴磁矩的转动,而且可以认为在每段水平线的高场端:5.2 mT, 6.4 mT, 8.5 mT,是对应着某一种磁畴消失的磁场值,而其他各段,即  $\chi''(H)$  与  $H^n$  ( $n \geq 3$ )有关的各部分则对应不可逆畴壁位移。

随着直流磁场  $H$  的增强,从不可逆畴壁移动逐渐转化到磁畴转动以至消失,这是微观的磁畴变化的宏观表现。

[1] He J, Guo H Q, Shen B G et al 1999 *Acta Phys. Sin.* (Overseas Edition) **8** 208

[2] Hou B H, Li Z W, Chen Y T 2000 *Chinese J. Magn. Reson.* **17** 83 (in Chinese) 侯碧辉、李志伟、陈裕涛 2000 波谱学杂志 **17** 83

[3] Hou B H, Shen B G et al 1995 *J. Mag. Mag. Materials.* **140** - **144** 327

[4] Chen C W 1977 *Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials* (North-Holland Publishing Company) p63, 62, 68

[5] Zhong W D 1987 *Ferromagnetism* (volume 2) (Beijing: Science Press) p181, 187 (in Chinese) 钟文定 1987 铁磁学(中册) [北京: 科学出版社] 第 181, 187 页

[6] Liao S B 1988 *Ferromagnetism* (volume 3) (Beijing: Science Press)

p89, 171 (in Chinese) 廖绍彬 1988 铁磁学(下册) [北京: 科学出版社] 第 89, 171 页

[7] Guo H Q, Kronmueller H et al 2000 *Phys. Rev. B* **62** 5760

[8] Hou B H, Xu Y X, Yi S et al 1997 *Chinese J. Magn. Reson.* **14** 63 (in Chinese) 侯碧辉、睢云霞、易 俗等 1997 波谱学杂志 **14** 163

[9] Maksymowicz L J, Maksymowicz A Z and Jankowski H 1988 *J. Magn. Magn. Mater.* **73** 11

[10] Seavey M H and Tannenwald P E 1958 *J. Appl. Phys. Suppl.* **30** 2278

[11] Qian K M, Dai D S et al 1987 *Acta Phys. Sin.* **32** 1557 (in Chinese) 钱昆明、戴道生等 1987 物理学报 **32** 1557

# Study on the magnetic anisotropy of the (Fe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>)<sub>84</sub>Zr<sub>3.5</sub>Nb<sub>3.5</sub>B<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> nano-crystallite ribbon with the method of magnetic resonance

Hou Bi-Hui<sup>1)</sup> Liu Feng-Yan<sup>1)</sup> Guo Hui-Qun<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> College of Mathematics and Physics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

<sup>2)</sup> Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

(Received 23 December 2002; revised manuscript received 20 January 2003)

## Abstract

We have carried out an experimental study based upon the ferromagnetic resonance (FMR) on the anisotropy of alloy ribbons of (Fe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>)<sub>84</sub>Zr<sub>3.5</sub>Nb<sub>3.5</sub>B<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> ( $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ). The easy axes of the samples are in the lateral direction of the ribbons, while the single-axis anisotropy constant  $K'$  of the samples having the same width decreases as the amount of Co increases. The value of  $K'$  lies between  $4.67 \times 10^{-5} \text{ J/m}^4$  ( $x = 0.0$ ) and  $2.54 \times 10^{-5} \text{ J/m}^4$  ( $x = 0.8$ ). Since the imaginary part  $\chi''$  of the alternating current magnetic susceptibility changes nonlinearly with the magnetic field  $H$ , there is a low field (0—12 mT) non-resonance signal having a comparable strength with that of the ferromagnetic resonance signal. It is found through the study on the magnetic process of the alloy ribbon of Fe<sub>84</sub>Zr<sub>3.5</sub>Nb<sub>3.5</sub>B<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> that  $d\chi''/dH = 0$  in the regions of the reversible (0—12 mT) and saturated (9.0 mT—12 mT) magnetization that  $\chi''(H)$  is related to the  $n$ -th power of  $H$ , i.e.,  $H^n$  ( $n \geq 3$ ) when the domain wall motion is nonreversible; and  $\chi''$  is related to  $H^2$  during the domain rotation (Rayleigh region,  $\frac{d\chi''}{dH}$  is a constant). Specifically, it is found that the  $\chi''(H)$  proportional to  $H^2$  and that proportional to  $H^n$  ( $n \geq 3$ ) appear alternatively in three sections, corresponding to the disappearance of different domains.

**Keywords**: ferromagnetic resonance, anisotropy constant, low field non-resonance signal, magnetic process

**PACC**: 7630, 7560, 7570K