

# NiFeCoP/BeCu 复合结构丝的巨磁阻抗效应 和磁化频率特性\*

辛宏梁 袁望治† 程金科 林 宏 阮建中 赵振杰

(华东师范大学物理系, 上海 200062)

(2006 年 10 月 16 日收到, 2006 年 12 月 15 日收到修改稿)

用化学镀的方法制备了 NiFeCoP/CuBe 复合结构丝, 研究了其巨磁阻抗特性. 结果表明复合结构丝在较低频率的驱动电流下就有明显的磁阻抗效应, 当驱动电流频率在 20kHz 时的磁阻抗效应为 40%, 最大磁阻抗效应出现的频率在 180kHz, 为 97%. 利用复数磁导率和等效电路探讨了该复合丝铁磁层磁化过程的频率特性, 复合结构丝的特征弛豫频率在 1MHz 左右. 外加直流磁场抑制畴壁移动, 在等效电路中抵消部分并联电路相关.

关键词: 巨磁阻抗效应, 磁导率, 弛豫频率, 等效电路

PACC: 7550B, 7550R, 7560, 7590

## 1. 引 言

巨磁阻抗效应(GMI)自从被发现以来, 由于其技术应用的广阔前景引起了人们的极大兴趣<sup>[1-3]</sup>. GMI 效应指软磁材料的交流阻抗随外加直流磁场变化而发生显著变化的效应, 这一现象最初在 Co 基软磁非晶丝和条带中被发现<sup>[4]</sup>. 接着在 Fe 基纳米微晶材料<sup>[5]</sup>中也发现磁阻抗效应. 人们开始时研究单一材料结构体系, 如丝、薄带、膜的磁阻抗效应, 后发展到复合结构体系, 如由导电层、铁磁层和导电层构成的三明治结构薄膜<sup>[6,7]</sup>. 对于丝的研究也从非晶单质丝发展到异质的复合结构丝, 如在铜丝外电化学镀 NiFe, CoNiFe, CoP 镀层等<sup>[8-12]</sup>. 有研究利用复数磁导率的形式研究磁阻抗对磁化过程的依赖性, 其结果可以用钉扎畴壁的膨胀、畴壁的移动及磁畴转动等来解释<sup>[13-18]</sup>. 利用等效电路的方法, 可估计出磁矩转动和畴壁位移分别对磁导率的贡献<sup>[16]</sup>. 本工作由化学镀的方法制备了复合结构丝, 考察其磁阻抗效应, 推导出复合丝结构材料阻抗与磁导率的关系, 以阻抗作为工具, 结合等效电路等研究复合结构丝在低、中频时的磁化频率特性.

## 2. 实 验

复合结构丝的制备采用化学镀的方法在铜丝外镀一层铁磁材料. 铜丝为常用的 BeCu 丝, 直径 100  $\mu\text{m}$ , 铁磁层为 NiFeCoP 镀层. 化学镀液的主要成分为  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{NH}_4$ )<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 等, 镀液的 pH 值为 10—10.2 之间. 镀前经过一定敏化、活化工序的前处理, 每道工序之间都用去离子水多次冲洗, 最后在镀液中恒温 90℃ 施镀, 镀层的厚度为 5  $\mu\text{m}$  左右. 用 HP4294A 精密阻抗分析仪测量复合丝样品的电阻、感抗、阻抗, 丝的长度为截取 5 cm 长, 驱动电流为 10 mA, 频率为 10 kHz—10 MHz. 实验中的直流外磁场由 Helmholtz 线圈提供, 磁场范围为 0—4800  $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ , 沿样品的长轴方向, 并和地磁场垂直.

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 样品的磁阻抗效应

图 1 为不同频率下的磁阻抗曲线, 磁阻抗表达式为

\* 国家自然科学基金(批准号:20575022), 上海市科委科技基金(批准号:0652nm036)及上海市科学技术委员会启明星基金(批准号:04QMX1422)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: wzyuan@phy.ecnu.edu.cn

$$MI = \frac{Z(H_{DC}) - Z(H_{DC} = 4800 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1})}{Z(H_{DC} = 4800 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1})} \times 100\% \quad (1)$$

由图 1 可见外加直流磁场较小时样品的阻抗随外场的变化不大,随着直流磁场的增大样品的阻抗出现一明显的降低过程.图 1 表明本工作的 NiFeCoP/BeCu 复合结构丝在较低的交流频率下就出现了明显的磁阻抗效应,在 20kHz 时磁阻抗变化率为 40%,频率为 70kHz 时的磁阻抗变化率达到了 90%.

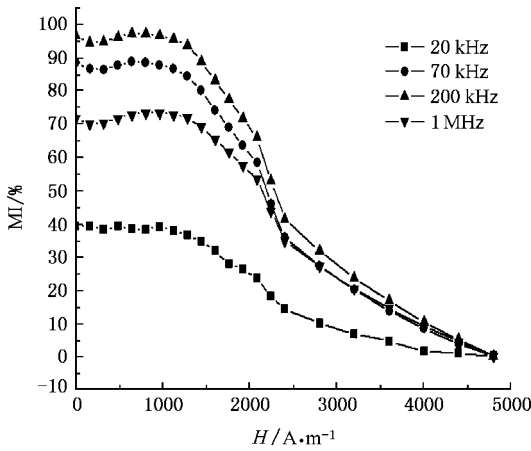


图 1 不同频率下的磁阻抗曲线

磁阻抗变化的频率特性如图 2 所示,阻抗变化率最大值的表达式为

$$(MI)_{\max} = \frac{Z_{\max}(H_{DC}) - Z(H_{DC} = 4800 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1})}{Z(H_{DC} = 4800 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1})} \times 100\% \quad (2)$$

由图 2 可见样品的磁阻抗变化率在低频下较小,随着频率的增加而升高.当达到一定频率时阻抗

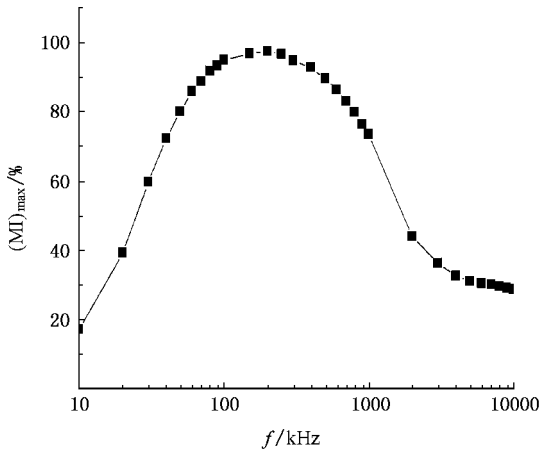


图 2 最大磁阻抗变化的频率特性曲线

变化率达到较大值,出现一峰值.大于这一频率时阻抗变化率又随着频率的增加而降低.阻抗变化率最大的频率出现在 180 kHz,为 97%.

### 3.2. 样品的磁导率与阻抗的关系

为了描述复合丝结构材料的磁化过程,把阻抗形式描述的数据转换为以磁导率形式描述的数据.以磁导率形式表示的数据可以更好的与磁化过程相联系.

若 Cu 芯的直径为  $2a$ ,在 Cu 芯外镀一层电导率远远小于 Cu 的铁磁材料,总直径为  $2b$ ,丝的长度  $l$  远大于其半径.退磁场可以忽略.沿铜芯长度方向通一正弦交变驱动电流.由于内层 Cu 芯材料的电导率远远大于外层的铁磁材料的电导率,当驱动电流频率不很高时可认为电流主要流过 Cu 芯.铁磁材料的复数磁导率为  $\mu$ ,表达形式为  $\mu = \mu' - j\mu''$ ,式中  $\mu'$  为磁导率实部, $\mu''$  为磁导率虚部, $j$  为虚部单位  $j = \sqrt{-1}$ .根据磁性层在单位时间内的平均能量密度损耗公式、储能公式可以求解磁性材料的磁导率与其引起的阻抗的关系<sup>[8,19-21]</sup>.

铜芯中通一交变电流  $I = I_m \cos(\omega t)$ ,此电流产生的交变磁场为  $H = H_m \cos(\omega t)$ ,根据安培环路定理可得磁场与电流的关系.交变磁场中磁性层在单位时间内的平均能量密度损耗和平均储能密度分别为

$$p_{\text{耗能}} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} = \frac{1}{2} \omega \mu_0 \mu'' H_m^2$$

$$w_{\text{储能}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} dt = \frac{1}{4} \mu_0 \mu' H_m^2 \quad (3)$$

分别对  $p_{\text{耗能}}$ 、 $w_{\text{储能}}$  作空间积分得

$$W_{\text{耗能}} = \int p_{\text{耗能}} dV$$

$$= \int_a^b \frac{1}{2} \omega \mu_0 \mu'' H_m^2 2\pi l r dr$$

$$= \int_a^b \frac{1}{2} \omega \mu_0 \mu'' \left( \frac{I_{\text{有效}}}{2\pi r} \right)^2 2\pi l r dr$$

$$= \frac{\mu_0 \mu'' \omega I_{\text{有效}}^2}{4\pi} l \ln \frac{b}{a} \quad (4)$$

$$W_{\text{储能}} = \int w_{\text{储能}} dV$$

$$= \int_a^b \frac{1}{4} \mu_0 \mu' H_m^2 2\pi l r dr$$

$$= \int_a^b \frac{1}{4} \mu_0 \mu' \left( \frac{I_{\text{有效}}}{2\pi r} \right)^2 2\pi l r dr$$

$$= \frac{\mu_0 \mu' I_{\text{有效}}^2}{8\pi} \ln \frac{b}{a}, \quad (5)$$

式中  $I_{\text{有效}}$  为流经铜芯的有效电流,  $\omega$  为角频率  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为交流电流频率. 分别将  $W_{\text{储能}}$ ,  $W_{\text{耗能}}$  等效为电阻损耗和电感储能可得

$$\begin{aligned} W_{\text{耗能}} &= Z' I_{\text{有效}}^2, \\ W_{\text{储能}} &= \frac{1}{2} L I_{\text{有效}}^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{Z''}{\omega} I_{\text{有效}}^2. \end{aligned} \quad (6)$$

这样我们就得到了由磁性层材料引起的阻抗 ( $Z_M = Z' + jZ''$ ) 与磁导率 ( $\mu = \mu' - j\mu''$ ) 的关系

$$\begin{aligned} Z' &= \frac{\mu_0 \mu' \omega}{4\pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right) = G \omega \mu', \\ Z'' &= \frac{\mu_0 \mu' \omega}{4\pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right) = G \omega \mu'', \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $G$  为与材料形状有关的形状因子. 若铜阻抗为  $Z_{\text{Cu}}$ , 则样品的总阻抗为  $Z_T = Z_M + Z_{\text{Cu}}$ , 所以用阻抗数据来表达磁导率可以写为

$$\mu = \mu' - j\mu'' = \left( \frac{1}{j\omega G} \right) (Z_T - Z_{\text{Cu}}). \quad (8)$$

当驱动电流频率很高时, 趋肤效应变的明显, 流经铁磁层电流增大 (5) (6) 式的推导需作适当修正. 对于本工作的频率范围可直接用 (8) 式, 根据测量所得的阻抗数据转换为与磁化过程直接相关的磁导率数据, 然后对磁导率数据进行分析.

### 3.3. 磁导率的频率特征与等效电路

图 3 为没外加直流磁场和外加直流磁场为  $4800 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  时磁导率的实部随驱动电流频率的变化曲线. 图 4 为磁导率的虚部随频率的变化曲线. 图中  $x$  轴为频率,  $y$  轴为磁导率实部和虚部的相对大小.

从图 3 中可以看出在较低频率且无外加直流磁场的情况下, 磁导率的实部保持较高值, 出现一平台, 对频率的依赖关系较小, 这一频率持续至  $200 \text{ kHz}$  左右, 当频率继续增大时,  $\mu'$  出现一降低的弛豫过程. 加直流磁场后的磁导率实部的频率特性与未加磁场类似, 但弛豫频率略有增加. 外加直流磁场后磁导率的实部在较低频率下明显变小, 当频率高于  $1 \text{ MHz}$  时下降减缓. 图 4 显示了磁导率的虚部随频率的变化曲线, 没有加直流磁场时, 随驱动电流频率增加磁导率虚部先增后减, 在  $1 \text{ MHz}$  时出现一个峰值. 外加直流磁场使此峰值降低且向高频移动. 外加直流磁场后当驱动频率大于  $20 \text{ kHz}$  时磁导率虚部

值明显减小.

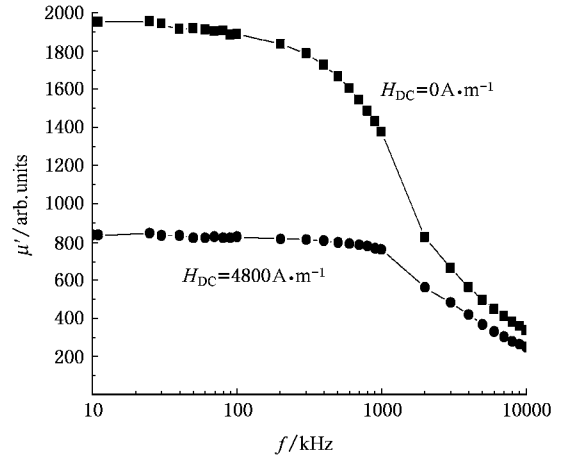


图 3  $\mu'$  随频率的变化关系

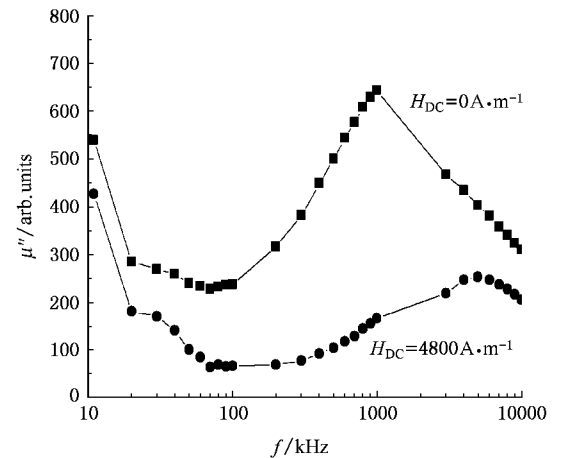


图 4  $\mu''$  随频率的变化关系

以磁导率的实部为  $x$  轴, 以磁导率的虚部为  $y$  轴可得未加直流磁场及加直流磁场后磁导率在不同频率下虚部随实部变化的 Cole-Cole 图(阻抗谱图) 如图 5 所示.

为了分析外加直流磁场的作用按照如下公式提取出外加直流磁场对材料磁导率的影响:

$$\begin{aligned} \Delta\mu' &= \mu'(H_{\text{DC}} = 0) - \mu'(H_{\text{DC}} = 4800 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}), \\ \Delta\mu'' &= \mu''(H_{\text{DC}} = 0) - \mu''(H_{\text{DC}} = 4800 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}). \end{aligned} \quad (9)$$

加直流磁场后磁导率的实部变化和虚部变化随频率的变化关系如图 6 所示, 插图是相应的 Cole-Cole 图. 由 Cole-Cole 图(阻抗谱图)的特性可知, 当体系的阻抗谱为一平行于纵轴的直线时, 其等效电路为一  $RL$  串联电路; 当体系的阻抗谱图为一半圆形时

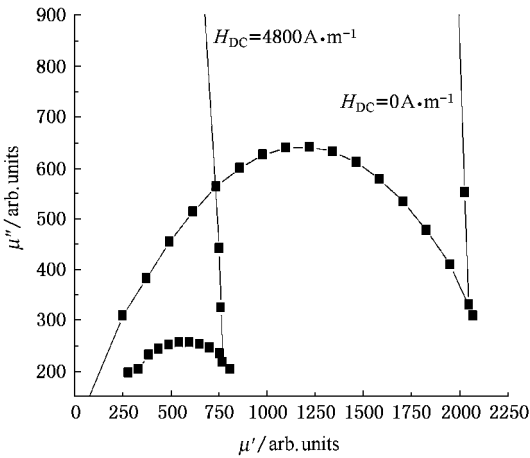


图5 Cole-Cole 图

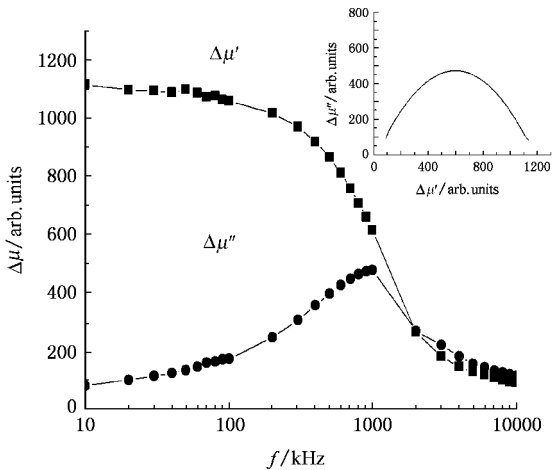


图6 直流磁场对磁导率的影响随频率的变化(插图为 Cole-Cole 图)

其等效电路为一  $RL$  并联电路。从图 5 以及磁导率与阻抗的关系可以看出:复合丝结构材料的这一变化特性可以用等效电路的模型来描述。在没有直流磁场时,等效电路可以用一个  $RL$  串联电路再串联一个  $RL$  并联电路来表示;在直流磁场作用下的等效电路也可以用一个  $RL$  串联电路再串联一个  $RL$  并联电路来表示,相比于没有直流磁场时的情况半圆形变小了,而平行于纵轴的直线形向左移动。根据图 6 以及插图所示图形和磁导率与阻抗的关系以及串联与并联等效电路的阻抗谱特性可知外加直流磁场对磁导率的影响随频率的变化,在等效电路中减少了一个并联的等效电路,即  $\Delta\mu'$  有一弛豫过程, $\Delta\mu''$  出现一峰值及由其形成半圆形的 Cole-Cole 图。

由等效电路分析磁化过程时,串联部分电阻与

转动阻尼有关,电感与转动磁导率有关,而并联部分电阻与畴壁移动阻尼有关,电感与移动磁导率有关。铁磁质磁化时畴壁移动与并联等效电路相关联而转动磁化与串联等效电路相关联<sup>[16,17]</sup>。本工作中在没有外加直流磁场时,铁磁层的磁化由畴壁移动和磁畴转动共同作用,等效电路以一个串联  $RL$  电路再串联一个  $RL$  并联电路构成。由于外加直流磁场抑制了畴壁移动,使得外加直流磁场的等效电路中减少了一个  $RL$  并联回路。

### 3.4. 关于磁化过程

磁性材料在交变磁场下发生磁化,畴壁运动的方程可用经典公式

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + ax = 2\mu_0 M_s H(t)$$

来表示,式中  $m$  表示畴壁的有效质量, $\beta$  表示阻尼系数, $a$  表示弹性力恢复系数, $x$  表示畴壁位移的距离, $m \frac{d^2 x}{dt^2}$  项代表畴壁所受惯性力的作用, $\beta \frac{dx}{dt}$  项代表畴壁运动所受的阻尼力, $ax$  代表使畴壁回到平衡位置的恢复力。

阻尼系数  $\beta$  可用公式  $\beta = \frac{8\mu_0^2 M_s^2}{9\rho}$  来表示,从这个公式可以看出阻尼系数  $\beta$  反比于材料的电阻率  $\rho$ 。而对于铁磁金属材料而言,具有较小的电阻率,因而阻尼系数  $\beta$  值较大。当  $\beta$  值很大时,畴壁的有效质量  $m$  非常小,因此畴壁运动方程可简化为

$$\beta \frac{dx}{dt} + ax = 2\mu_0 M_s H(t),$$

当所受磁场  $H(t) = H_0 \exp(j\omega t)$  时,求解方程可得  $\omega_x = a/\beta$ ,式中  $\omega_x$  为特征弛豫频率。当频率达到特征弛豫频率时  $\mu'$  随频率的上升而减小的趋势最快而  $\mu''$  出现极大值<sup>[22]</sup>。因此可以由图 3 和图 4 所示图形得到本工作的复合结构丝的特征弛豫频率  $\omega_x$  为 1 MHz 左右。

在没有直流磁场的情况下,当频率较低时,交流磁化过程以畴壁膨胀为主。在此过程中,畴壁被钉扎在缺陷处,如晶粒边界、非磁性夹杂物、结构缺陷、材料的表面、铁磁层和铜芯导电层的交界处以及其他缺陷等。在图 3 中表现为较低频率下  $\mu'$  出现的平台。随着频率的增加,畴壁膨胀引起的变化不能满足激励场变化的要求时,畴壁开始移动。同时畴壁移动要受到阻尼的作用,在图 3、图 4 中表现为随着频率的增加, $\mu'$  开始降低而  $\mu''$  开始上升达到一峰值后

开始下降.随着频率的继续增加,畴壁运动已不能达到交流激励场变化的要求时磁畴开始转动,畴壁由被钉扎中的膨胀运动到畴壁移动,最后磁化过程就转变为以旋转过程为主了.在转动过程中, $\mu'$ 和 $\mu''$ 都为较小值.由图3和图4可知对于本实验采用的复合结构丝,在频率低于200 kHz时材料磁化主要是畴壁运动,当交流激励场频率大于7 MHz时,磁化过程转为以转动过程为主.

当频率低于弛豫频率时,转动磁化过程的影响小于畴壁运动过程,交流磁化过程以畴壁运动为主.频率较低时畴壁被钉扎,磁化过程主要为畴壁的膨胀过程.外加的直流磁场抑制畴壁运动,所以在此阶段外加直流磁场使磁导率的实部出现较大降低,如图3和图5所示.随着交流激励场频率的增加,钉扎中的畴壁膨胀不能跟上交流激励场的变化,畴壁开始移动,频率继续增加到畴壁移动也不能满足交流激励场的变化的需要时,磁化过程就以转动过程为主了.由于直流磁场对畴壁有抑制作用而对转动过程影响较小,所以直流磁场对低频下的磁导率变化影响较大而对较高频率下磁导率变化影响较小.根据前面所述,磁化过程可以用等效电路来描述,畴壁运动与 $RL$ 并联电路相关联,而转动过程与 $RL$ 串联电路相关联.根据图6及其插图所示直流磁场抵消一个并联电路,具有抑制畴壁运动的作用.

当铁磁材料处于一种磁化状态时,材料中的粒子存在一定的分布状态,这些粒子分布状态可能是离子、电子、空穴或其他微小杂质以及磁化磁畴的分布状态.当通一交变电流产生交变磁场后,铁磁材料在交变磁场作用下发生磁化,磁化状态发生改变,材料中的粒子分布也要发生变化以满足能量极小原理,这一过程是在磁化势能的作用下通过扩散过程来实现的.根据扩散理论,粒子扩散的途径有体内扩散、界面扩散和自由表面扩散.材料内粒子分布从一种平衡状态变化到另一种平衡状态所需要的时间称为弛豫时间.弛豫时间可以表示为 $\tau = \tau_{\infty} e^{Q/k_B T}$ 其中 $Q$ 为激活能, $k_B$ 为玻耳兹曼常数, $T$ 为温度, $\tau_{\infty}$ 为 $T$ 趋向于无穷大的弛豫时间.与单质材料相比,本工作复合结构丝的化学镀铁磁膜中铁磁层和铜芯渗透界

面及表面占了一定的比例,磁化时扩散途径增加,因此激活能减小,缩短了弛豫时间,弛豫时间的缩短使得弛豫频率增大.单质丝弛豫频率出现在100 kHz左右<sup>[17]</sup>,本工作的复合丝材料的特征弛豫频率在1 MHz左右.

### 3.5. 磁化与磁阻抗效应的频率特性

根据图6所示直流磁场对磁导率的影响随频率的变化曲线可以看出:在频率较低时(频率小于200 kHz时),由直流磁场引起的磁导率实部变化 $\Delta\mu'$ 很大,且随频率变化不大,而此时由直流磁场引起的磁导率虚部变化 $\Delta\mu''$ 随着频率的增加而呈上升趋势,此时磁阻抗效应也呈增加趋势,这与阻抗与磁导率的关系(7)式相符合.当频率大于200 kHz时,由于涡流阻尼作用,使得磁化过程中的畴壁运动受到抑制,直流磁场对畴壁运动的抑制作用也减弱, $\Delta\mu'$ 值开始降低,而 $\Delta\mu''$ 先增后减.当 $\Delta\mu'$ 降低的效应大于 $\Delta\mu''$ 上升的效应时,由直流磁场引起的磁导率变化呈降低趋势,因此磁阻抗效应开始降低.所以磁阻抗效应在较低驱动电流频率下随着频率的增大而升高,在180 kHz时磁阻抗效应达到最大值,然后随着频率的继续增大而降低,在1 MHz时下降的速率最大.

## 4. 结 论

用化学镀的方法在铜丝外镀NiFeCoP铁磁材料薄膜复合结构丝.这种复合结构丝出现磁阻抗效应的频率较低.当驱动电流频率为20 kHz时的磁阻抗效应为40%,频率为180 kHz时的磁阻抗效应就达到97%.

根据磁导率的频率特性,用等效电路模型描述相关现象,可用 $RL$ 并联电路来描述畴壁移动磁化,而用 $RL$ 串联电路描述转动磁化.外加直流磁场抑制畴壁移动,抵消了部分并联电路,磁导率减小,在交流磁化过程中,NiFeCoP复合结构丝的磁导率特征弛豫频率为1 MHz左右.复合结构丝的磁化特性与磁阻抗特性密切相关.

- [ 1 ] Mohri K , Panina L V , Uchiyama T , Bushida K , Noda M 1995 *IEEE Trans . Magn .* **31** 1266
- [ 2 ] Valenzuela R , Vázquez M , Hernando A 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 6549
- [ 3 ] Kanno T , Mohri K , Yagi T , Uchiyama T , Shen L P 1997 *IEEE Trans . Magn .* **33** 3358
- [ 4 ] Mohri K , Kohsawa T , Kawashima K , Yoshida H , Panina L V , 1992 *IEEE Trans . Magn .* **28** 3150
- [ 5 ] Yang X L , Yang J X , Chen G , Shen G T , Hu B Y , Jiang K Y 1997 *J. Magn. Magn. Mater.* **175** 285
- [ 6 ] Xiao S Q , Liu Y H , Yan S S , Dai L L , Zhang L , Mei L M 2000 *Phys. Rev. B* **61** 5734
- [ 7 ] Morikawa T , Nishibe Y , Yamadera H , Nonomura Y , Takeuchi M , Sakata J , Taga Y 1996 *IEEE Trans . Magn .* **32** 4965
- [ 8 ] Yuan W Z , Wang X Z , Zhao Z J , Ruan J Z , Li X D , Yang X L 2004 *Chinese Science Bulletin* **49** 1002
- [ 9 ] Beach R S , Smith N , Platt C L , Jeffers F , Berkowitz A E 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 2753
- [ 10 ] Kuryandanskaya G V , Barandiaran J M , Munoz J L , Gutiérrez J , Vázquez M , Garcia D , Vas'kovskiy V O 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 4822
- [ 11 ] Sinnecker J P , Garcia J M , Asenjo A , Vazquez M , Garcia-Arribas A 2000 *J. Mater. Res.* **15** 751
- [ 12 ] Wang X Z , Yuan W Z , Li X D , Ruan J Z , Zhao Z J , Yang J X , Yang X L , Sun Z *IEEE Trans . Magn .* 2005 **41** 3150
- [ 13 ] Garcia K L , Valenzuela R 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 5257
- [ 14 ] Betancourt I , Valenzuela R 2003 *J. Non-Crystalline Solids* **329** 155
- [ 15 ] Valenzuela R 2004 *J. Alloy and Co-compounds* **369** 40
- [ 16 ] Valenzuela R 2002 *J. Magn. Magn. Mater.* **249** 300
- [ 17 ] Garcia K L , Valenzuela R 2001 *J. Non-Crystalline Solids* **287** 313
- [ 18 ] He J , Guo H Q , Shen B G , He K Y , Liu Y H , Hu J F 1999 *Chinese Physics* **8** 212
- [ 19 ] Liu J T , Zhou Y S , Wang A L , Jiang H W , Zheng W 2003 *Acta Phys. Sin.* **51** 2859 ( in Chinese ) [ 刘江涛、周云松、王艾玲、姜宏伟、郑 鹞 2003 物理学报 **51** 2859 ]
- [ 20 ] Liao S B 1992 *Ferromagnetics* ( Beijing : Science Press ) p3 ( in Chinese ) [ 廖绍彬 1992 铁磁学(北京 科学出版社)第 3 页 ]
- [ 21 ] Wang A L , Liu J T , Zhou Y S , Jiang H W , Zheng W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 905 ( in Chinese ) [ 王艾玲、刘江涛、周云松、姜宏伟、郑 鹞 2004 物理学报 **53** 905 ]
- [ 22 ] Wan D F , Ma X L 1994 *Magnetic Physics* ( Chengdou : Electronics Science and Technology University Press ) p451 ( in Chinese ) [ 宛德福、马兴隆 1994 磁性物理学(成都 :电子科技大学出版社)第 451 页 ]

## The giant magneto-impedance effect and frequency dependence of magnetization processes in NiFeCoP/BeCu composite wire<sup>\*</sup>

Xin Hong-Liang Yuan Wang-Zhi Cheng Jin-Ke Lin Hong Ruan Jian-Zhong Zhao Zhen-Jie

( Department of Physics , East China Normal University , Shanghai 200062 , China )

( Received 16 October 2006 ; revised manuscript received 15 December 2006 )

### Abstract

The NiFeCoP/CuBe composite wire is produced by electroless-deposition. The composite wire shows distinct magnetoimpedance effect at low frequency. The maximal GMI ratio is 40% at 20kHz and about 97% at 180kHz. The frequency dependence of magnetization in NiFeCoP composite wire is analyzed in terms of equivalent circuits and complex permeability. The relaxation frequency of the composite wire is about 1MHz. The displacement of domain wall can be damped by the DC applied field. So the effect of the DC applied field is to eliminate the parallel RL circuit.

**Keywords :** GMI , permeability , relaxation frequency , equivalent circuit

**PACC :** 7550B , 7550R , 7560 , 7590

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 20575022 ) and the Shanghai Committee of Science and Technology , China ( Grant No. 0652nm036 ) and the Shanghai " Post-Qi-Ming-Xing Plan " for Young Scientists , China ( Grant No. 04QMX1422 ).