

文章编号:1000-5641(2008)05-0090-08

## 电流退火 CuBe/绝缘层/NiCoP 复合结构丝的磁化特性和巨磁阻抗效应

程金科<sup>1,2</sup>, 潘海林<sup>1</sup>, 何家康<sup>1</sup>, 袁望治<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学 物理系, 上海 200062; 2. 贵州大学 化学工程学院, 贵阳 550003)

**摘要:** 用化学镀的方法制备了 CuBe/绝缘层/NiCoP 复合结构丝, 用 2 A 直流电流退火 2 min. 研究了退火对样品巨磁阻抗效应的影响, 发现退火大幅度提高了样品的巨磁阻抗效应, 最大磁阻抗比率  $\Delta Z/Z$  由制备态时的 42.3% 提高到 693.1%, 增加了 15.4 倍. 利用复数磁导率和等效电路研究了样品的磁化特性, 并对电流退火增强复合结构丝巨磁阻抗效应的机理作了分析. 电流退火消除内应力且改变样品的磁结构, 使得退火样品的  $\Delta\mu'$  和  $\Delta\mu''$  远大于制备态样品, 增强了样品的巨磁阻抗效应.

**关键词:** 磁化特性; 巨磁阻抗; NiCoP; 化学镀; 绝缘层

**中图分类号:** O482.54; TM271+.2 **文献标识码:** A

### Magnetization property and magneto-impedance of dc Joule annealed CuBe/insulator/NiCoP composite wire

CHENG Jin-ke<sup>1,2</sup>, PAN Hai-lin<sup>1</sup>, HE Jia-kang<sup>1</sup>, YUAN Wang-zhi<sup>1</sup>

(1. Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. College of Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

**Abstract:** CuBe/insulator/NiCoP composite wire was produced by electroless-deposition and annealed using Joule annealing method with a dc current of 2 A for 2 min, in which the influence of current annealing on giant magneto-impedance (GMI) effect was investigated. The results showed that the GMI effect in the composite wire can be greatly enhanced by dc Joule annealing. The GMI ratio increases from 42.3% of as-deposited sample to 693.1%, about 15.4 times. The property of magnetization and the enhancement mechanism of GMI effect were analyzed in terms of complex permeability and equivalent circuit. Because the dc Joule annealing can release the internal stress and change the magnetic structure of specimen,  $\Delta\mu'$  and  $\Delta\mu''$  of annealed composite wire is much greater than that of as-deposited, resulting in the enhancement of GMI effect.

**Key words:** magnetization; magnetoimpedance; NiCoP; electroless-deposition; insulator

收稿日期:2008-03

基金项目:国家自然科学基金(20575022);上海市科委基金(0652nm036)

第一作者:程金科,男,博士生. E-mail:jkcheng99@yahoo.com.cn.

通讯作者:袁望治,男,教授,研究方向为磁性材料与薄膜物理. E-mail:wzyuan@phy.ecnu.edu.cn.

## 0 引 言

由于巨磁阻抗效应(GMI)具有高灵敏度、响应快和非接触性等特点,不仅在理论上探讨GMI的起因和特点非常有意义,而且在研制高灵敏度传感器等方面也有广阔的前景,因此受到很大的关注<sup>[1,2]</sup>. GMI效应也可作为一种工具去研究软磁材料的内在和外在的磁特性<sup>[1]</sup>. Beach<sup>[3]</sup>和 Shen<sup>[4]</sup>等用GMI效应研究了难于用传统磁技术测量的标量圆周磁导率. Valenzuela小组利用复数磁导率和等效电路研究了CoFeBSi匀质丝的磁化过程和磁化特性<sup>[5,6]</sup>. 化学镀是一种湿法制备NiCoP合金的工艺,具有镀层厚度均匀、结晶细致和耐腐蚀性好等优点,且由于化学镀可在非导体基底上施镀,因此可形成带绝缘层的铁磁层/绝缘层/导电层/绝缘层/铁磁层多层复合丝结构<sup>[7,8]</sup>. 据报道电流退火能提高样品的巨磁阻抗效应<sup>[9-11]</sup>,其机理主要是电流退火时的热效应消除了制备过程中产生的内应力,减弱样品内应力对磁畴壁的钉扎作用,使得畴壁移动和磁矩转动变得容易. 本工作采用化学镀方法制备了镀NiCoP膜的绝缘层包裹CuBe复合结构丝,用2 A直流电流焦耳热退火2 min. 研究了电流退火对复合结构丝巨磁阻抗效应的影响,发现退火后最大磁阻抗比率由42.3%提高到693.1%,用有效磁导率和等效电路分析了样品的磁畴结构和磁化特性,对电流退火增强样品巨磁阻抗效应的机理作了分析.

## 1 实 验

在直径为90  $\mu\text{m}$ 带聚酯绝缘层的CuBe丝上化学镀NiCoP膜. 化学镀液的主要成分为 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等,镀液的pH值在8~10之间. 为了避免破坏绝缘层和影响后续产品的性能,同时也为了增加对胶体钯的吸附以增加聚酯绝缘层表面的活性点,采用自己配制的具有双亲结构的特殊溶液对样品进行处理,化学镀工艺过程为酸洗、碱洗、特殊溶液处理、敏化和活化等,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  $^\circ\text{C}$ 施镀,施镀时间为3 h. 在氮气保护下用2 A电流退火2 min,以释放应力和改善复合丝的磁性能. 用HP4294A精密阻抗分析仪测量丝状样品的阻抗,电流只通过复合丝的CuBe芯,丝的长度截取为5 cm,通过丝的驱动电流频率为10 kHz~100 MHz,电流强度为10 mA. 实验中直流外磁场 $H_{\text{cx}}$ 由Helmholtz线圈提供,磁场范围为0~4 800 A/m,沿样品的长轴方向,并和地磁场垂直. 磁阻抗 $Z$ 的比率定义为

$$\Delta Z/Z(\%) = \frac{Z(H_{\text{cx}}) - Z(H_{\text{cx}} = 0)}{Z(H_{\text{cx}} = 0)} \times 100\%. \quad (1)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁导率与阻抗的转换关系

图1为复合结构丝的几何结构示意图. 设CuBe芯直径为 $2a_0$ , CuBe芯+聚酯绝缘层的总直径为 $2a$ , CuBe芯+聚酯绝缘层+铁磁层的总直径为 $2b$ . 当驱动电流通过复合结构丝, 交变磁场为 $H = H_m \cos(\omega t)$ 时, 铁磁层在单位时间内的平均能量密度损耗为 $W_{\text{耗能}} = \frac{1}{T} \int_0^T H dB = \frac{1}{2} \omega \mu_0 \mu'' H_m^2$ , 平均储能密度为 $W_{\text{储能}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} H \cdot B dt = \frac{1}{4} \mu_0 \mu' H_m^2$ <sup>[12]</sup>. 分别对

$W_{\text{耗能}}$  和  $W_{\text{储能}}$  作空间积分得<sup>[13]</sup>

$$\begin{aligned} W_{\text{耗能}} &= \frac{1}{4\pi} \omega \mu_0 \mu'' I_{\text{有效}}^2 l \ln \frac{b}{a}, \\ W_{\text{储能}} &= \frac{1}{8\pi} \mu_0 \mu' I_{\text{有效}}^2 l \ln \frac{b}{a}, \end{aligned} \quad (2)$$

将  $W_{\text{耗能}}$  和  $W_{\text{储能}}$  分别等效为电阻损耗和电感储能,得

$$\begin{aligned} W_{\text{耗能}} &= RI_{\text{有效}}^2 = Z' I_{\text{有效}}^2, \\ W_{\text{储能}} &= \frac{1}{2} LI_{\text{有效}}^2 = \frac{1}{2} \frac{Z''}{\omega} I_{\text{有效}}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

这样就得到了由磁性层材料引起的阻抗 ( $Z_M = Z' + jZ''$ ) 与磁导率 ( $u = u' - ju''$ ) 的关系:

$$\begin{aligned} Z' &= \frac{1}{4\pi} \omega \mu_0 \mu'' l \ln \frac{b}{a} = G \omega u'', \\ Z'' &= \frac{1}{4\pi} \omega \mu_0 \mu' l \ln \frac{b}{a} = G \omega u'. \end{aligned} \quad (4)$$

若 Cu 芯的阻抗为  $Z_{\text{Cu}}$ , 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

$$u = u' - ju'' = \left( \frac{1}{j\omega G} \right) (Z_T - Z_{\text{Cu}}). \quad (5)$$

由实验测量得到化学镀带绝缘层复合结构丝的总阻抗  $Z_T$  和纯 Cu 芯的阻抗  $Z_{\text{Cu}}$ , 利用公式(5)可将样品的阻抗转化为与磁化过程紧密相关的有效磁导率, 分析磁化特性, 探讨巨磁阻抗效应的物理机理.

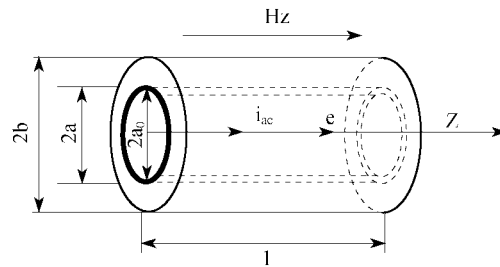


图 1 复合丝几何结构示意图

Fig. 1 Geometry model of the composite wire with insulator layer

## 2.2 磁化过程和磁化特性

图 2 为零磁场、各向异性场  $H_k$  和最大磁场 (4 800 A/m) 下复合结构丝的磁导率实部  $\mu'$  随频率的变化曲线, 其中 (a) 为制备态样品, (b) 为退火样品. 由图 2(a) 可见, 对于制备态样品, 未加直流磁场且频率  $f = 10 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$  时  $\mu'$  保持一平台, 当  $f > 1 \text{ MHz}$  时  $\mu'$  出现一降低的弛豫过程. 此时驱动电流产生环向磁场, 频率较低时磁化过程以畴壁膨胀和畴壁移动为主, 频率较高时以磁矩转动为主, 表明样品存在一定的纵向磁结构<sup>[2]</sup>. 加轴向外磁场  $H_{\text{ex}}$  后,  $\mu'$  平台高度随  $H_{\text{ex}}$  增加先增后减, 在  $H_{\text{ex}} = 400 \text{ A/m}$  时达最大值, 表明制备态样品也存在一定的环向磁结构<sup>[2]</sup>, 制备态样品同时具有纵向和环向的混合磁结构, 各向异性场  $H_k = 400 \text{ A/m}$ . 由图 2(b) 可见, 对于退火后样品, 未加直流磁场时  $\mu'$  一直保持一平台, 不随频率发生

变化,说明退火后样品具有良好的环向各向异性<sup>[2]</sup>. 驱动电流所产生的交变磁场在环向,退火后样品具有良好的环向各向异性,各向异性场也在环向,导致未加外磁场时退火样品的  $\mu'$  不随驱动电流频率而发生改变. 加轴向外磁场  $H_{ex}$  后,  $\mu'$  随外磁场的增加先增后减,当  $H_{ex} < 2\ 800\text{ A/m}$  时  $\mu'$  随  $H_{ex}$  增加而增大,当  $H_{ex} > 2\ 800\text{ A/m}$  时,  $\mu'$  随  $H_{ex}$  的增加而减小,  $H_{ex} = 2\ 800\text{ A/m}$  时  $\mu'$  达最大值,表明样品具有环向磁结构<sup>[2]</sup>,各向异性场  $H_k = 2\ 800\text{ A/m}$ . 由加与未加外磁场时  $\mu'$  的变化可知,退火后样品具有很好的环向磁结构.

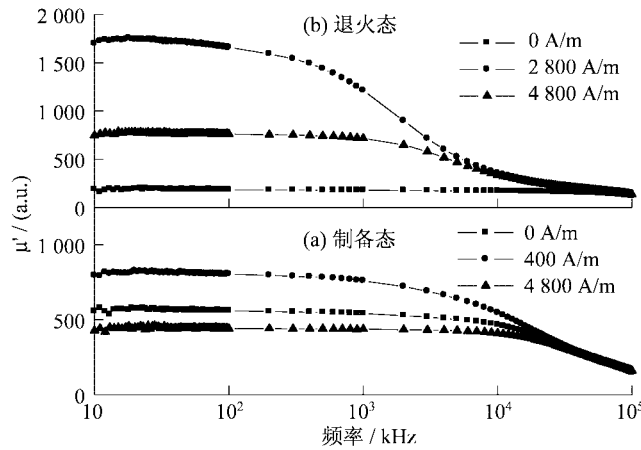


图 2 磁导率实部随频率的变化关系

Fig. 2 Frequency dependence of the real component of effective permeability

比较图 2(a)和(b),加外磁场时退火后样品  $\mu'$  曲线的平台高度明显增大,随外磁场的变化大幅度提高,  $\mu'$  的最大变化量由制备态时的 44.7% 增加到 789.5%. 当对制备态样品通以直流电流退火处理时,在产生焦耳热的同时产生圆周磁场. 退火的热效应消除了制备过程中产生的内应力,减弱样品内应力对磁畴壁的钉扎作用,使得畴壁移动和磁矩转动变得容易;磁效应生成了环向磁各向异性,把制备态时的环向和纵向混合磁结构转变为单一的环向磁结构,在  $H_{ex} < H_k$  时增加了磁矩转动对磁导率的贡献. 因此,提高了复合结构丝对外磁场反应的灵敏度,使得加外磁场后  $\mu'$  大幅度提高.

图 3 为零磁场、各向异性场  $H_k$  和最大磁场(4 800 A/m)下复合结构丝的磁导率虚部  $\mu''$  随频率的变化曲线,其中(a)为制备态样品,(b)为退火样品. 由图可见,  $\mu''$  随频率的增加先减小后增大,然后又减小,出现峰值,峰值所对应频率在  $H_{ex} < H_k$  时向低频方向移动,在  $H_{ex} > H_k$  时向高频方向移动. 在低频时,外磁场对  $\mu''$  的影响不明显;在中频时,随着频率的增加外磁场对  $\mu''$  的影响也在增加,当  $H_{ex} < H_k$  时  $\mu''$  随  $H_{ex}$  增加而增大,当  $H_{ex} > H_k$  时  $\mu''$  随  $H_{ex}$  的增加而减小,  $H_{ex} = H_k$  时  $\mu''$  达最大值;在高频时,外磁场对  $\mu''$  的影响又变为不明显. 比较图 3(a)和(b)可见,退火后样品  $\mu''$  随外磁场变化的幅度远大于制备态样品,电流退火也提高了  $\mu''$  响应外磁场的灵敏度.

为了进一步分析外加直流磁场  $H_{ex}$  后磁导率变化情况,取

$$\Delta\mu'(H_{ex}) = |\mu'(H_{ex}) - \mu'(0\text{ A/m})|, \quad \Delta\mu''(H_{ex}) = |\mu''(H_{ex}) - \mu''(0\text{ A/m})|. \quad (6)$$

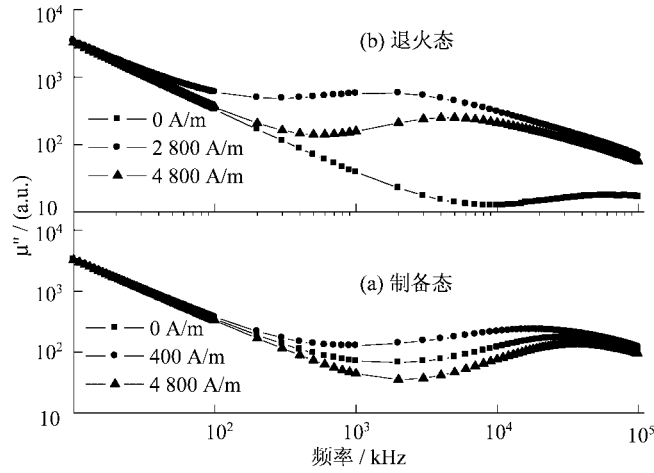
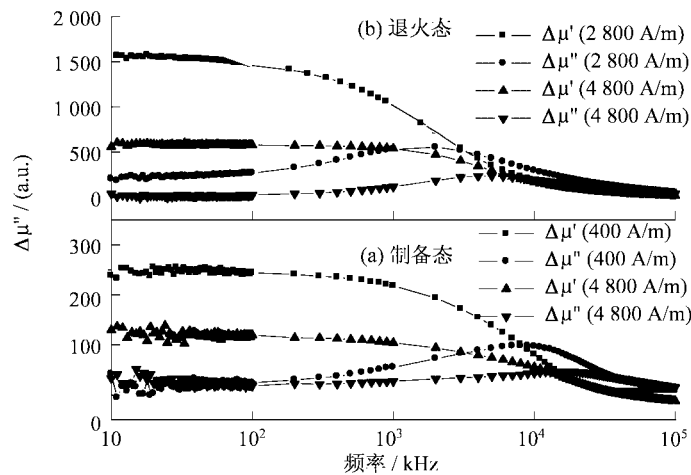


图3 磁导率虚部随频率的变化关系

Fig. 3 Frequency dependence of the imaginary component of effective permeability

加外磁场后磁导率的变化如图4所示,图中 $\Delta\mu'$ (2 800 A/m)和 $\Delta\mu''$ (2 800 A/m)分别表示外磁场 $H_{ex} = 2\ 800$  A/m时由式(6)计算所得的 $\Delta\mu'$ 和 $\Delta\mu''$ ,其余曲线含义类似.由图4可见,低频时 $\Delta\mu'$ 保持一平台,随频率的增加发生一个弛豫过程; $\Delta\mu''$ 随频率增加先增大后减小,有一个峰.外加直流磁场 $H_{ex}$ 后 $\Delta\mu'$ 先增大后减小, $\Delta\mu''$ 随 $H_{ex}$ 的变化不如 $\Delta\mu'$ 明显.比较图4(a)和(b),对于制备态样品, $\Delta\mu'$ 的最大值约为250(a.u.), $\Delta\mu''$ 的最大值约为98(a.u.);退火后, $\Delta\mu'$ 和 $\Delta\mu''$ 都大幅度提高, $\Delta\mu'$ 的最大值约为1 550(a.u.), $\Delta\mu''$ 的最大值约为550(a.u.),说明退火后样品的磁导率受外磁场影响较大,提高了随 $H_{ex}$ 变化的幅度.

图4  $\Delta\mu$  随频率的变化关系Fig. 4 Frequency dependence of  $\Delta\mu$ 

以退火后样品磁导率实部 $\mu'$ 为横坐标,磁导率虚部 $\mu''$ 为纵坐标得到 $\mu'-\mu''$ 曲线,即Cole-Cole曲线,如图5所示,利用等效电路进一步研究磁化过程.由图5可见,在 $H_{ex} = 0$  A/m时曲线只包含一段钉形曲线, $H_{ex} = 2\ 800$  A/m和4 800 A/m时曲线包含一段钉形曲线和一段

圆弧;当  $H_{ex} < 2800 \text{ A/m}$  时圆弧的半径  $r$  随  $H_{ex}$  增加而增大,  $H_{ex} = 2800 \text{ A/m}$  时  $r$  达最大值,当  $H_{ex} > 2800 \text{ A/m}$  时  $r$  随  $H_{ex}$  的增加而减小. 对交流阻抗谱进行解析时,常用的方法就是利用等效电路对谱图进行模拟,特定的阻抗谱图对应特定的等效电路<sup>[14]</sup>. 由 Cole-Cole 曲线的等效电路特性可知<sup>[15]</sup>,钉形曲线等效为 RL 串联电路;半圆形曲线等效为 RL 并联电路. 可以假设,当  $H_{ex} = 0 \text{ A/m}$  时等效为  $R_s L_s$  串联电路,  $H_{ex} \neq 0 \text{ A/m}$  时等效为  $R_s L_s$  串联和  $R_p L_p$  并联的组合电路. 当  $H_{ex} < 2800 \text{ A/m}$  时,外加直流磁场后样品在磁化过程中磁矩转动加强,磁导率增大,增加等效电路中的  $R_p L_p$  并联部分;当  $H_{ex} > 2800 \text{ A/m}$  时,外加直流磁场后样品的磁矩转动减弱,磁导率减小,抑制等效电路中的  $R_p L_p$  并联部分.

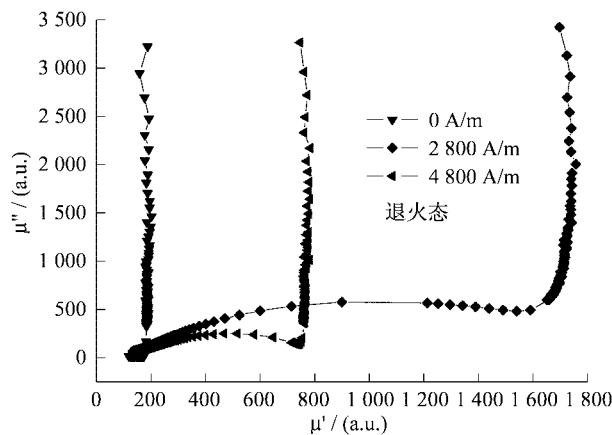


图 5 不同外磁场下退火后样品磁导率的 Cole-Cole 曲线

Fig. 5 Cole-Cole plot of effective permeability for annealed wires at different magnetic fields

### 2.3 巨磁阻抗效应

图 6 为复合结构丝的磁阻抗比率随频率的变化曲线. 由图可见,制备态样品的磁阻抗比率  $\Delta Z/Z$  随频率  $f$  增加先增大后减小,在  $f = 100 \text{ kHz} \sim 4 \text{ MHz}$  范围内变化不大,  $f = 400 \text{ kHz}$  时达最大值 42.3%;退火后样品的磁阻抗比率  $\Delta Z/Z$  也是随频率  $f$  增加先增大后减小,但随频率  $f$  的变化比制备态更明显,在  $f = 500 \text{ kHz}$  时达最大值. 焦耳热退火大幅度提高了样品的巨磁阻抗效应,最大磁阻抗比率  $\Delta Z/Z$  由制备态时的 42.3% 提高到 693.1%,增加了 15.4 倍;退火后样品在低频时就具有良好的巨磁阻抗效应,  $f = 50 \text{ kHz}$  时  $\Delta Z/Z = 187.5\%$ . GMI 效应来源于铁磁材料磁导率随外加磁场的变化. 由图 4(b),低频时  $\Delta\mu'$  保持一平台,  $\Delta\mu''$  在缓慢增加,此时虽然  $\Delta\mu'$  较大,但由于  $\Delta\mu''$  较小,所以磁阻抗比率  $\Delta Z/Z$  不高;随频率的增加  $\Delta\mu'$  开始减小,发生一个弛豫过程,但由于  $\Delta\mu''$  在增加且  $\Delta\mu''$  增加的效应大于  $\Delta\mu'$  减小的效应,导致  $\Delta Z/Z$  仍然在增加;在  $f = 500 \text{ kHz}$  时  $\Delta\mu'$  和  $\Delta\mu''$  均有较大值,此时  $\Delta Z/Z$  达最大值;  $f > 500 \text{ kHz}$  时  $\Delta\mu''$  增加的效应小于  $\Delta\mu'$  减小的效应,使得  $\Delta Z/Z$  开始随频率的增加而降低. 电流退火后,一方面消除了制备过程中产生的内应力,使得畴壁移动和磁矩转动变得容易;另一方面,样品磁畴结构由制备态时环向和纵向的混合磁结构转变为单一的环向磁结构,外加直流磁场  $H_{ex}$  后提高了样品磁导率对  $H_{ex}$  的灵敏度,退火样品的  $\Delta\mu'$  和  $\Delta\mu''$  远大于制备态的,从而使得退火后样品的阻抗变化量提高.

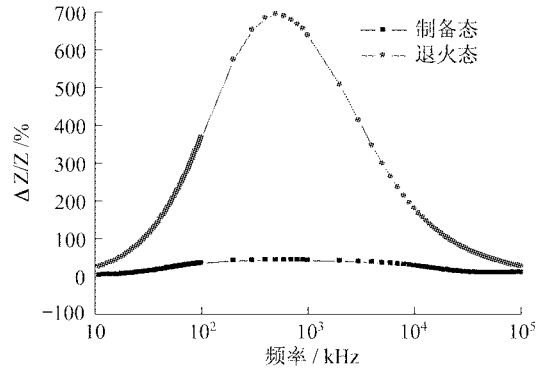


图6 磁阻抗比率随频率的变化

Fig. 6 Frequency dependence of the maximal MI ratio

图7为不同驱动电流频率下磁阻抗比率 $\Delta Z/Z$ 随外磁场 $H_{ex}$ 的变化.由图7可见, $\Delta Z/Z$ 随 $H_{ex}$ 先增加后减小,存在明显峰值,在 $f = 500$  kHz和 $H_{ex} = 2800$  A/m时磁阻抗比率 $\Delta Z/Z$ 达最大值693.1%.由图5,外磁场 $H_{ex} < 2800$  A/m时 Cole-Cole 曲线的半径随 $H_{ex}$ 增加而增加,增加了并联部分,外加直流磁场后样品在磁化过程中磁矩转动加强,磁导率增大,使得磁阻抗比率 $\Delta Z/Z$ 随 $H_{ex}$ 增加而增大; $H_{ex} = 2800$  A/m时 Cole-Cole 曲线的半径达最大值,磁矩转动对磁导率的贡献也达最大值,此时磁阻抗效应达最大值; $H_{ex} > 2800$  A/m后 Cole-Cole 曲线的半径随 $H_{ex}$ 增加而减小,减少并联部分,磁矩转动减弱,磁导率减小,从而引起 $\Delta Z/Z$ 随 $H_{ex}$ 增加而减低,出现一明显峰值.

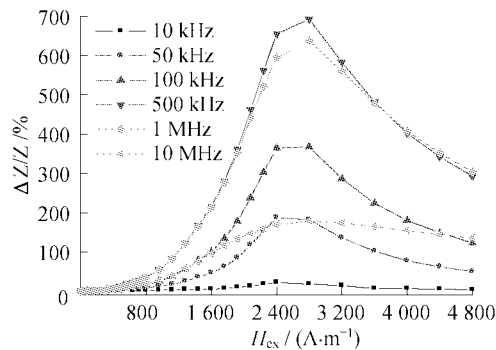


图7 不同频率下磁阻抗比率随外磁场的变化

Fig. 7 Field dependence of the MI ratio at different frequencies

### 3 结 论

用化学镀的方法制备了 CuBe/绝缘层/NiCoP 复合结构丝,用 2 A 电流焦耳热退火 2 min. 研究了退火对样品巨磁阻抗效应的影响,发现退火后样品最大磁阻抗比率 $\Delta Z/Z$ 由制备态时的42.3%提高到693.1%,增加了15.4倍.退火后样品在低频时就具有良好的巨磁阻抗效应, $f = 50$  kHz时磁阻抗比率 $\Delta Z/Z = 187.5\%$ .利用复数磁导率和等效电路研究了样品的磁化特性,并对焦耳热退火增强复合结构丝巨磁阻抗效应的机理作了分析.退火消除了内应力并使样品磁畴结构由制备态时环向和纵向的混合磁结构转变为单一的环向磁结构,导

致  $\Delta\mu'$  和  $\Delta\mu''$  远大于制备态,从而大幅度提高样品的巨磁阻抗效应.

### [参 考 文 献]

- [1] KNOBEL M, PIROTA K R. Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress[J]. *J Magn Magn Mater*, 2002, 242-254: 33-40.
- [2] PANINA L V, MOHRI K, UCHIYAMA T, et al. Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films[J]. *IEEE Tran Magn*, 1995, 31: 1249-1260.
- [3] BEACH R S, BERKOWITZ A E. Sensitive field-and frequency-dependent impedance spectra of amorphous Fe-CoSiB wire and ribbon[J]. *J Appl Phys*, 1994, 76: 6209-6213.
- [4] SHEN L P, MOHRI K, UCHIYAMA T, et al. Sensitive acceleration sensor using amorphous wire SI element combined with CMOS IC multivibrator for environmental sensing[J]. *IEEE Trans Magn*, 2000, 36: 3667-3669.
- [5] VALENZUELA R. Giant magnetoimpedance and inductance spectroscopy[J]. *J Alloy and Compounds*, 2004, 369: 40-42.
- [6] VALENZUELA R. The analysis of magnetoimpedance by equivalent circuits[J]. *J Magn Magn Mater*, 2002, 249: 300-304.
- [7] 袁望治, 王新征, 赵振杰, 等. 镀 NiFeB 膜的绝缘层包裹 BeCu 丝的巨磁阻抗效应和低频磁电阻效应[J]. *科学通报*, 2004, 49: 528-531.
- [8] WANG X Z, YUAN W Z, ZHAO Z J, et al. Giant magnetoimpedance effect in CuBe/NiFeB and CuBe/insulator/NiFeB electroless-deposited composite wires[J]. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41: 113-115.
- [9] LI X P, ZHAO Z J, CHUA C, et al. Enhancement of giant magnetoimpedance effect of electroplated NiFe/Cu composite wires by dc Joule annealing[J]. *J Appl Phys*, 2003, 94: 7626-7630.
- [10] ZHOU X Z, TU G H, KUNKEL H, et al. Effect of Joule-heating annealing conditions on giant magnetoimpedance of Co-rich amorphous ribbons[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 125: 387-392.
- [11] HERNANDO B, PRIDA V M, SANCHEZ M L, et al. Magnetoimpedance effect in Co-rich metallic glasses[J]. *J Magn Magn Mater*, 2003, 258-259: 183-188.
- [12] 廖绍彬. 铁磁学(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 3-4.
- [13] CHENG J K, ZHAO Z J, LIN H, et al. Evolution of magnetic permeability and magneto-impedance effect in composite wires with insulator layer[J]. *J Magn Magn Mater*, 2008, 320: 994-998.
- [14] 崔晓莉. 等效电路中元件参数数值对交流阻抗谱的影响[J]. *河北师范大学学报*, 2002, 26(4): 376-380.
- [15] VALENZUELA R, KNOBEL M, VAZQUEZ M, et al. An alternative approach to giant magnetoimpedance phenomena in amorphous ferromagnetic wires[J]. *J Appl Phys*, 1995, 78: 5189-5191.