

高矫顽力的 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列的制备及磁性研究*

刘晓旭^{1)2)†} 赵兴涛²⁾ 张颖¹⁾ 朱岩¹⁾ 吴光恒³⁾

1) (河北科技师范学院理化学院, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学电气学院亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

3) (中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

(2011年8月29日收到; 2011年12月26日收到修改稿)

利用直流电化学沉积法, 在多孔阳极氧化铝模板中首次制备出了具有 [220] 取向的单晶面心立方结构的 CoCu 固溶体合金纳米线阵列, 其 Co 含量高达 70%. 透射电子显微镜显示纳米线均匀连续, 具有较高的长径比, 约为 300. 磁性测量表明所制备的 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线具有超高的矫顽力 $H_{c//} = 2438 \text{ Oe}$ ($1 \text{ Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$) 和较高的矩形比 $S_{//} = 0.76$, 远高于以往报道的 CoCu 合金纳米线的磁性, 分析表明磁性好的主要原因是由于较高 Co 含量和高形状各向异性. 通过磁性测量和模型计算, 得到 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列在反磁化过程中遵从对称扇型转动的球链模型, 并从结构的角度的分析了 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列的反磁化行为.

关键词: CoCu 合金纳米线, 电化学沉积, 磁性, 反磁化机理

PACS: 75.50.-y, 75.75.+a

1 引言

一维磁性纳米材料在超高密度磁储存、磁光储存以及高频磁介质等领域有着十分重要的科学意义和应用价值, 是近年来研究的热点 [1-10]. 最简单、有效的制备一维磁性纳米线的方法是利用电化学沉积方法在氧化铝模板 (AAO) 中沉积磁性纳米线 [1,2]. 在以往的研究中, 一维磁性纳米线阵列的组成主要是一元或多元磁性金属, 铁磁-非铁磁元素合金系统的纳米线最近才引起人们的广泛关注 [3-10].

在铁磁-非铁磁材料的研究中, 有很多关于 Co-Cu 纳米线的报道, 但大多数报道集中在 CoCu 多层膜的磁电阻性质上 [3-7], 关于 CoCu 合金纳米线阵列的报道很少. 这主要是由于 Co-Cu 在一般情况下很难形成合金, 虽有文献报道利用非平衡的电化学沉积方法可制备出 CoCu 合金纳米线, 但合金中 Co 含量较少 (一般在 5%~

50%左右) 且纳米线磁性较弱 (矫顽力一般在几百 Oe ($1 \text{ Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$) 左右, 矩形比一般小于 50%) [8-10], 为了满足磁存储材料的要求, 提高 CoCu 合金纳米线的磁性是十分必要的.

本文利用直流电化学沉积方法, 通过调节沉积参数控制纳米线的生长, 制备出具有面心立方结构 (fcc) 的单晶 CoCu 合金纳米线阵列, 其中 Co 含量高达 70%, 磁性测量表明它具有超高的矫顽力 $H_{c//} = 2438 \text{ Oe}$ 和较高的矩形比 $S_{//} = 0.76$, 远高于以往报道的 CoCu 合金纳米线的磁性. 利用 X 射线衍射仪、透射电子显微镜以及超导量子干涉磁强计、振动样品磁强计等仪器测量并分析了纳米线的结构和磁性, 并进一步对由此结构决定的纳米线的反磁化机理进行了研究.

2 样品制备与性能测量

利用电化学沉积的方法在 AAO 模板中制备一维 CoCu 合金纳米线. AAO 模板是在 0.3 mol/L 的

* 国家自然科学基金 (批准号: 50971130) 资助的课题.

† E-mail: liuxiaoxu_abc@yahoo.cn

草酸溶液中, 在 40 V, 5 °C 的条件下采用二次氧化法制备的^[11]. AAO 模板的孔径约为 50 nm, 深度约为 15—20 μm . 在进行电化学沉积前, 首先在模板的一侧溅上一层约 300 nm 厚的 Cu 膜作为电化学沉积的工作电极.

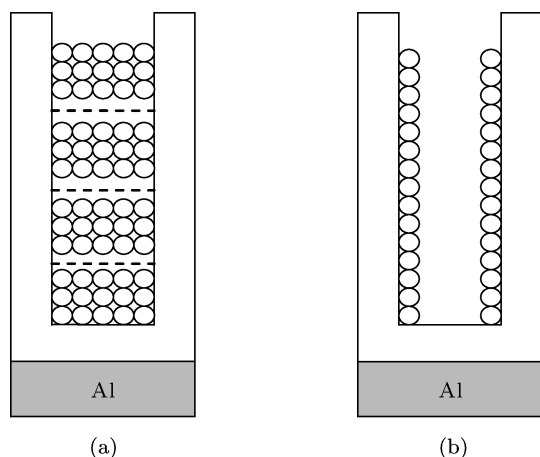


图 1 在 AAO 模板中沉积纳米线的生长机制示意图 (a) 较低电流密度; (b) 较高电流密度

从 Co-Cu 二元结构相图可以看出, 一般 500°C 以下 Co-Cu 是不形成合金的^[12]. 因此很难利用一般的平衡过程得到 CoCu 合金, 然而利用非平衡的电化学沉积方法可以得到亚稳态的 CoCu 固溶体合金^[8-10]. 由于 Co 与 Cu 的沉积电位相差比较大, 在同一沉积电压下 Cu^{2+} 的沉积速率会远远大于 Co^{2+} 的沉积速率, 因此一般情况下下得到的 CoCu 合金中 Co 含量均很少, 为了增加合金中 Co 的成分, 我们选择沉积电解液为 0.08 M CoSO_4 + 0.008 M CuSO_4 + 0.5 M H_3BO_3 的富钴溶液, 并在溶液中加入一定量的络合剂 (Na_2EDTA) 来降低 Cu^{2+} 离子的沉积速率. 在电化学沉积过程中纳米线的生长过程决定了其结构特点, 纳米线的成核机理和生长机理主要与溶液的 pH 值和电化学沉积电压相关. Cu 一般形成 fcc 结构, 而 Co 即可形成六角密排 (hcp) 结构又可形成 fcc 结构, 为了使两者形成固溶体合金结构, 选取易形成 fcc 结构的沉积条件是十分必要的. 实验表明, 当沉积溶液的 pH 值较低时, Co 易形成 fcc 结构, 因此实验中选取较低的 pH 值 2.0. 根据 Cao 等人报道的结果^[13,14], 不同的沉积电流密度导致纳米线的生长机理也不同. 如图 1(a) 所示, 较小的电流密度使得纳米线从孔槽底部向上逐层沉积生长, 而较大的电流密度则使得纳米线从孔壁到中心, 由外向内逐层沉积生长, 如图 1(b) 所示. 比较两种

生长机理, 后者易生长成管状结构同时引入较多缺陷在其中^[15], 因此为了获得致密完整结构的 CoCu 合金纳米线, 较小的沉积电流密度是十分必要的. 减小沉积电流密度可通过降低沉积电压来实现, 沉积过程中采用较小的沉积电压 -1.0 V.

综上所述, 实验中采用沉积电解液为 0.08 M CoSO_4 + 0.008 M CuSO_4 + 0.5 M H_3BO_3 + 0.01 M Na_2EDTA (络合剂) 的混合溶液, 调节沉积溶液的 pH 值为 2.0, 利用 DJS-292A 型电位仪选取沉积电压为 -1.0 V, 在 AAO 模板中进行直流电化学沉积, 制备出 CoCu 合金纳米线阵列.

利用扫描电镜的 X 射线能谱 (EDS) 测定所制备纳米线的化学组分, 利用 X-射线粉晶衍射仪 (XRD) 和透射电子显微镜 (TEM) 表征纳米线的结构和形貌, 最后利用超导量子干涉磁强计 (Quantum Design, MPMS-5s) 测量纳米线在室温下的磁性, 利用振动样品磁强计 (VSM) 测量样品的矫顽力随纳米线与磁场角度变化的规律.

3 分析与讨论

通过 EDS 测定本样品中的钴铜含量比为 70 : 30, 具有较高的磁性 Co 含量. 图 2 给出了在模板中生长的 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 纳米线阵列的 XRD 测量结果. 从图中可以看出: $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 纳米线仅在 75.16° 处有一个衍射峰, 根据峰位计算出晶格常数为 $a = 3.569 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$), 大于 fcc Co 的晶格参数 ($a = 3.544 \text{ \AA}$), 但是比 fcc Cu 的晶格参数小 ($a = 3.615 \text{ \AA}$), 这说明 Co 和 Cu 形成 fcc 结构的固溶体合金相, fcc Co 晶格结构中一部分 Co 原子被较大的 Cu 原子取代, 从而使得晶格参数处于两种原子的立方结构的晶格参数之间. 根据以往报道的结果^[9], 该衍射峰为 fcc CoCu 固溶体合金的 [220] 衍射峰, 由于只出现 [220] 衍射峰, 另外两个表示 fcc 结构的衍射峰均没有出现, 表明所制备的 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列具有很好的择优生长取向, 为单晶结构. 由于 X 射线衍射所给的信息为垂直膜面方向的结构信息, 表明纳米线在沿线方向上具有 [220] 取向结构, 该取向结构的单晶 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线属首次报道.

图 3 给出 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线在不同放大率下的 TEM 照片及其选区电子衍射照片. 从图 3 中可以看出纳米线均匀连续, 长度约为 15 μm , 直径基本一致, 约为 50 nm, 与 AAO 模板的孔径一致,

由图可知利用 AAO 模板法制备纳米线具有很好的可控性和一致性, 所制备的纳米线具有很高的长径比约为 300. 图 3(b) 的插图选区电子衍射图谱 (SAED), 其衍射斑点对应于面心立方结构的 [001] 晶带轴, 纳米线的生长沿 [220] 方向, 大量单根纳米线的 SAED 图都具有相同的特点, 出现单一类型的衍射斑点, 因此可以确定 CoCu 合金纳米线为面心立方的单晶结构, 这与 XRD 的衍射结果一致. XRD 和 TEM 测量结果均表明采用上述沉积方法制备所得的 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 纳米线形成 fcc 相的固溶体合金结构, 通过控制溶液的沉积电流密度和离子的沉积速率使沉积环境稳定, 致使纳米线均匀连续, 具有较高的长径比和 Co

含量且形成致密完整的单晶结构, 达到我们预期的结果.

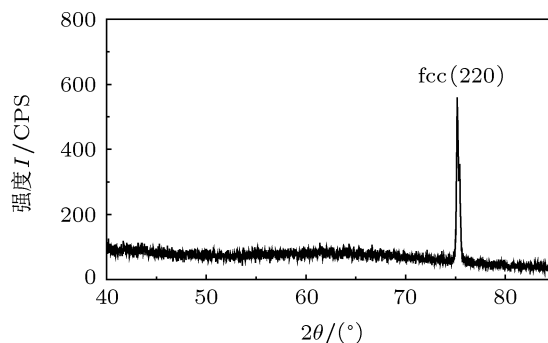


图 2 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列的 XRD 图谱

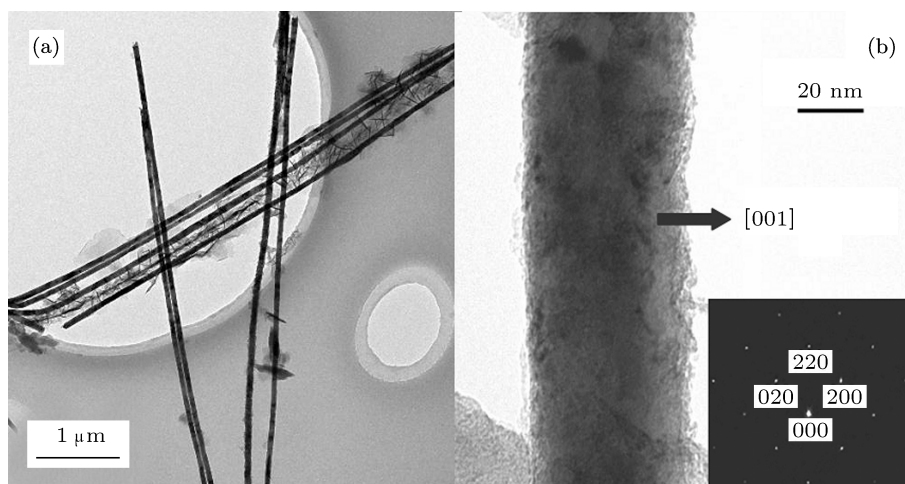


图 3 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线的 TEM 照片 (a) 低倍率; (b) 高倍率及其选区电子衍射 (插图)

为了研究 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列的磁性, 利用 SQUID 磁强计在室温 300 K 下测量了 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列在不同 θ 下的磁滞回线 (θ 是外磁场方向与纳米线阵列的长轴方向之间的夹角), 如图 4 所示. 从图中可以看出, 当外磁场 H 平行于纳米线阵列的长轴方向时 ($\theta = 0^\circ$), $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线具有超高的矫顽力 $H_{c//} = 2438$ Oe 和较高的矩形比 $S_{//} = 0.76$, 是目前报道过的 CoCu 合金纳米线中磁性最高的 [8-10,16,17]. 当外磁场方向垂直于纳米线阵列的长轴方向时 ($\theta = 90^\circ$), 纳米线阵列的矫顽力和矩形比都明显减小, 分别降为 $H_{c\perp} = 319$ Oe 和 $S_{\perp} = 0.07$, 并且在沿线方向上的饱和场 $H_{k//}$ 远小于垂直线方向的饱和场 $H_{k\perp}$, 这表明纳米线的长轴方向是 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列的易磁化方向, 由此可以看出形状各向异性在纳米线磁各向异性中起主导作用. 纳米线阵列的磁各向异性一般是由

磁晶各向异性、形状各向异性及线间偶极相互作用共同作用的结果. 由于 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 纳米线阵列形成 fcc CoCu 固溶体合金结构, 此种合金结构的磁晶各向异性能量密度 ($K_1 \sim 6 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^3$) 与纳米线阵列的形状各向异性能量密度 ($\pi M_s^2 \sim 0.60 \text{ J/cm}^3$, M_s 为 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金薄膜的饱和磁化强度) 相比低约一个数量级 [18], 磁晶各向异性远小于形状各向异性. 此外, 由于纳米线的直径和线间距的比例较小, 因此线间偶极相互作用较弱. 综上所述, 形状各向异性是纳米线磁各向异性的主要起源, 由于所制备的 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列中磁性 Co 含量较一般 CoCu 合金纳米线阵列高, 且具有较高的长径比 (约为 300), 从而具有较高的形状各向异性, 表现出高于以往报道的 CoCu 合金纳米线阵列的矫顽力和矩形比.

此外, CoCu 纳米线沉积中受非磁性 Cu 元素及沉积条件的影响, 使其形成单一的 fcc 结构合金纳

米线, 而 Co 与其他磁性元素 (如 Fe, Ni) 较难形成此种单一结构的合金, 因此 CoCu 合金纳米线阵列的磁性较相同条件下的 Co 与其他磁性元素如 (Fe, Ni) 所形成的合金纳米线的磁性高 [19,20].

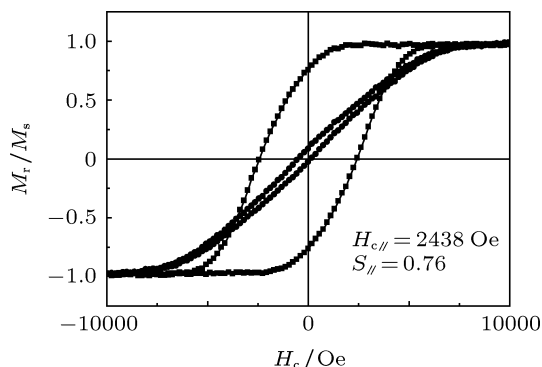


图4 Co₇₀Cu₃₀ 纳米线阵列分别沿平行 (—■—) 和垂直 (---●---) 于纳米线长轴方向的磁滞回线

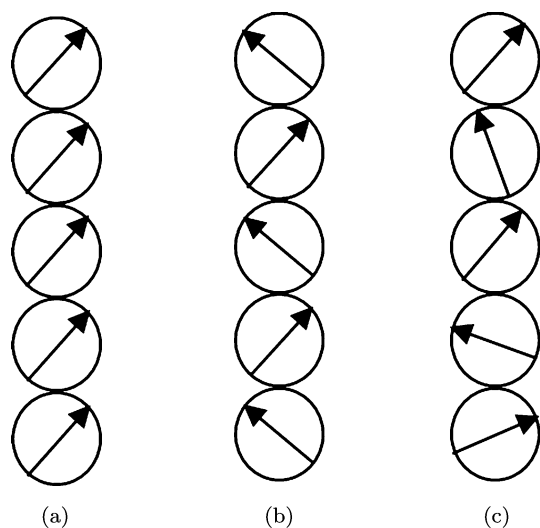


图5 球链模型的几种情况示意图 (a) 均匀转动模型; (b) 对称扇型转动; (c) 非对称扇型转动

纳米线磁性的特点取决于反磁化过程中所遵循的磁化机理. 为了表征磁性纳米线的反磁化机理, 从微分方程出发, 建立了一系列的磁化反转模型 [21-24], 其中球链模型被认为是解释磁性纳米线反磁化机理的最有效的磁化反转模型 [22]. 所谓球链模型就是将单根纳米线看成排成一条链的球型单畴粒子, 相邻的球形粒子之间为点接触, 不存在交换相互作用, 只存在静磁相互作用, 由于颗粒间不存在交换相互作用, 在静磁相互作用下使得各球单畴的磁矩趋向于沿轴向排列. 根据颗粒间相互作用的强弱, 球链模型的磁化反转机理又可以分成三种情况: 当颗粒之间相互作用较强时, 颗粒与颗粒

的磁矩在反磁化时遵从均匀转动, 如图 5(a) 所示; 当颗粒之间相互作用较弱时, 磁矩遵从非对称扇型转动, 如图 5(c) 所示; 当颗粒之间相互作用处于中等强度时, 磁矩遵从对称扇型转动, 如图 5(b) 所示.

以上三种磁化反转机理的不同, 表现在矫顽力 H_c 与外场和线方向之间夹角 θ 的关系曲线上, 矫顽力 H_c 随 θ 的变化规律是判别磁化反转机制的重要方法 [23]. 为了确定 Co₇₀Cu₃₀ 合金纳米线阵列的反磁化行为, 实验中采用 VSM 在室温下对该纳米线阵列在不同 θ 下的磁滞回线进行了测量. 图 6 为 Co₇₀Cu₃₀ 合金纳米线阵列的矫顽力 H_c 随外场和线方向之间夹角 θ 的变化规律. 由图可以看出, 当 θ 从 0° 到 50° 变化时, 矫顽力 H_c 略有增加, 当 $\theta > 50^\circ$ 时矫顽力迅速降低, 与外场方向有很大的依赖关系, 总的变化趋势与非均匀转动的球链模型非常一致 [22].

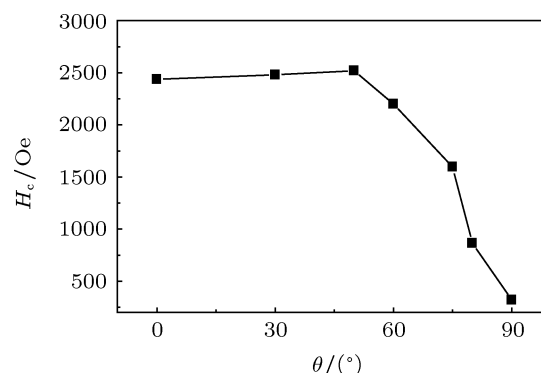


图6 Co₇₀Cu₃₀ 纳米线阵列的矫顽力 H_c 随外场和线方向之间的夹角 θ 的变化规律

根据非均匀转动的对称扇型球链模型, 给出 Co₇₀Cu₃₀ 合金纳米线阵列矫顽力值 [22] 为:

$$H_c = \left(\frac{\mu}{a^3}\right) (6K_n - 4L_n) = \frac{\pi M_s}{6} (6K_n - 4L_n), \quad (1)$$

其中, n 是单根纳米线中所含有球型颗粒的数目. L_n 和 K_n 的值分别由下列公式给出:

$$L_n = \sum_{j=1}^{\frac{n-1}{2} < j \leq \frac{n+1}{2}} \frac{n - (2j - 1)}{n(2j - 1)^3}, \quad (2)$$

$$M_n = \sum_{j=1}^{\frac{n-2}{2} < j \leq \frac{n}{2}} \frac{n - 2j}{n(2j)^3}, \quad (3)$$

$$K_n = L_n + M_n. \quad (4)$$

L_n 是按相隔为 0, 2, 4, ... 个球的磁矩求和, M_n 是按相隔为 1, 3, 5, ... 个球的磁矩求和.

$M_s = 1300 \text{ emu/cc}$ 为 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金薄膜的饱和磁化强度. 当小球的个数大于 10 个时, L_n 和 M_n 收敛很快, 由于所制备的纳米线长径比较高, n 值较大, 因此直接取 $n = \infty$ 计算矫顽力的值. 根据对称扇型转动的球链模型公式 (1), 计算出 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列沿纳米线长轴方向的矫顽力为 $H_{c//} = 2580 \text{ Oe}$, 与实验值 ($H_{c//} = 2438 \text{ Oe}$) 基本符合, 其微小误差可能是由于 CoCu 合金纳米线与计算所采用的 CoCu 合金薄膜的饱和磁化强度略有不同引起的. 另外根据对称扇型转动的球链模型, 计算出在垂直纳米线的方向上的矫顽力为 $H_{c\perp} = 0 \text{ Oe}$, 然而实验中发现在垂直纳米线的方向上存在一定大小的矫顽力 ($H_{c\perp} = 319 \text{ Oe}$), 这应该来源于磁晶各向异性. 对于非均匀转动的非对称扇型模型目前并没有很好的解法, 但根据它与对称扇型的矫顽力之间的标度关系可知, 由该模型计算出的矫顽力远小于对称扇型转动模型计算的结果, 与实验值相差较远, 因此可以排除反磁化机理为非对称扇型转动的可能. 综上所述, $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列的反磁化机理与非均匀转动的对称扇型球链模型十分符合.

$\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列的反磁化行为是由该样品的形貌和结构决定的. 由 TEM 和 XRD 图可知, $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线的直径大约为 50 nm, 接近于 CoCu 合金纳米线的单磁畴尺寸, 且纳米线均匀连续具有很高的长径比, 因此单根纳米线可看成是排成一条链的球型单磁畴粒子. 纳米线具有较高的形状各向异性, 颗粒间主要以静磁相互作用为主,

这使得所有单磁畴的排列趋于一致, 均沿纳米线轴向, 纳米线阵列的反磁化行为主要以单磁畴颗粒的均匀与非均匀转动为主. 非磁性 Cu 的加入减弱了颗粒间的磁偶极子的相互作用, 导致颗粒与颗粒的磁矩在反磁化时遵从非均匀的对称扇型转动.

4 结论

综上所述, 本文利用直流电化学沉积法通过调节适当的沉积参数在多孔阳极氧化铝模板中制备出了 CoCu 固溶体合金纳米线阵列, 其中 Co 含量高达 70%. XRD 和 TEM 测量表明沉积所得的 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列均匀连续, 具有较高的长径比约为 300, 为 fcc 单晶结构并在沿线方向具有 [220] 择优取向, 该取向结构为首次制备成功. 磁性测量表明该纳米线阵列具有超高的矫顽力 $H_{c//} = 2438 \text{ Oe}$ 和较高的矩形比 $S_{//} = 0.76$, 远超过以往报道过的 CoCu 合金纳米线阵列的磁性, 这主要源于该合金纳米线阵列含有较一般 CoCu 合金纳米线阵列高的磁性 Co 成分以及具有较高的形状各向异性. 通过磁性测量和模型计算可知 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 合金纳米线阵列在反磁化过程中遵从对称扇型转动的球链模型, 这种反磁化行为取决于该样品的形貌和结构特点. 总之, 利用直流电化学沉积法制备出具有超高磁性的 $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ 固溶体合金纳米线阵列, 满足其作为磁存储材料的要求, 这对以后铁磁-非铁磁材料的研究有重要的参考价值.

- [1] Qin D H, Cao L, Sun Q Y 2002 *Chem. Phys. Lett.* **358** 484
- [2] Thum-Albrecht T, Schotter J, Kastle G A, Emlay N, Shibauchi T, Krusin-Elbaum L, Guarini K, Black C T, Tuominen M T, Bussell T P 2000 *Science* **290** 2126
- [3] De Groot H A M, Kopinga K, De Jonge W J M, Panissod P, Schille J P, Den Broeder F J A 1991 *Phys. Rev. B* **44** 9100
- [4] Piraux L, George M, Despres J F, Leroy C, Ferain E, Legras R, Ounadjela K, Fert A 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 192484
- [5] Blondel A, Meier J P, Doudin B, Ansermet J P 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 233019
- [6] Thomson T, Riedel P C, Morawe C, Zabel H 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **156** 89
- [7] Cho J U, Min J H, Ko S P, Soh J Y, Kim Y K, Wu J H, Choi S H 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08C909
- [8] Blythe H J, Fedosyuk V M, Kasyutich O I, Schwarzacher W 2000 *J. Magn. Magn. Mater.* **208** 2518
- [9] Wang Y W, Zhang L D, Meng G W, Peng X S, Jin Y X, Zhang J 2001 *J. Phys. Chem. B* **106** 2502
- [10] Xue S H, Cao C B, Ji F Q 2005 *Mater. Lett.* **59** 3173
- [11] Chen L J, Li Y X, Chen G F, Liu H Y, Liu X X, Wu G H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5516 (in Chinese) [陈丽婕, 李养贤, 陈贵峰, 刘何燕, 刘晓旭, 吴光恒 2006 物理学报 **55** 5516]
- [12] Fan X, Mashimo T, Huang X S 2004 *Phys. Rev. B* **69** 094432
- [13] Cao H Q, Wang L D, Wu U Q, Wang G Z, Zhang L, Liu X W 2006 *Chem. Phys. Chem.* **7** 1500
- [14] Wang P P, Gao L M, Qiu Z Y, Song X P, Wang L Q, Yang S, Murakami R 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 064304
- [15] Liu X X, Wang H Y, Liu B H, Zhu W, Feng L, Wu G H, Zhao J L, Li Y X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2079 (in Chinese) [刘晓旭, 王鸿雁, 刘宝海, 朱伟, 冯琳, 吴光恒, 赵建玲, 李养贤 2010 物理学报 **59** 2079]
- [16] Wang T, Li F S, Wang Y, Song L J 2006 *Phys. Stat. Sol. (a)* **203** 2426
- [17] Yang Z H, Li Z W, Liu L, Kong L B 2011 *J. Magn. Magn. Mater.* **323** 2674
- [18] Childress J R, Chien C L 1991 *Phys. Rev. B* **43** 8089

- [19] Qin D H, Wang C W, Sun Q Y, Li H L 2002 *Appl. Phys. A* **74** 761
[20] Qin D H, Peng Y, Cao L, Li H L 2003 *Chem. Phys. L* **374** 661
[21] Frei E H, Shtrikman S, Treves D 1957 *Phys. Rev.* **106** 446
[22] Jacobs I S, Bean C P 1955 *Phys. Rev.* **100** 1060
[23] Han G C, Zong B Y, Luo P 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9202
[24] Gao J H, Zhan Q F, He W, Sun D L, Cheng Z H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 232506

Fabrication and magnetic properties of $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ alloy nanowire arrays with high coercivity*

Liu Xiao-Xu^{1)2)†} Zhao Xing-Tao²⁾ Zhang Ying¹⁾
Zhu Yan¹⁾ Wu Guang-Heng³⁾

1) (College of Physics and Chemistry, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China)

2) (State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Electrical Engineering College of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

3) (Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 29 August 2011; revised manuscript received 26 December 2011)

Abstract

CoCu solid solution alloy nanowire arrays which exhibit the face-centered cubic structure with strong [220] orientation along the nanowire axes are fabricated for first time in the anodic aluminum oxide template by electrodeposition. The proportion of Co ingredient in CoCu alloy nanowire arrays is up to 70%. Transmission electron microscopy reveals that the nanowire arrays are uniform and continuous and have a large aspect ratio of about 300. The magnetic hysteresis loop demonstrates that the $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ alloy nanowire arrays have a large coercivity of about 2438 Oe and relatively large squareness of about 0.76 parallel to nanowire arrays which greatly exceeds the value previously reported. Good magnetic properties are achieved due mainly to the larger proportion of Co ingredient than that in the normal CoCu alloy nanowire arrays and the large shape anisotropy. The results of magnetic measurement and the calculations from formula demonstrate that the symmetric fanning mechanism of sphere chains model could be employed to explain the magnetization reversal process which is related to the structure of the $\text{Co}_{70}\text{Cu}_{30}$ nanowire arrays.

Keywords: CoCu alloy nanowire arrays, electrodeposition, magnetic properties, magnetization reversal mechanism

PACS: 75.50.-y, 75.75.+a

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50971130).

† E-mail: liuxiaoxu_abc@yahoo.cn