doi: 10. 11933 / j. issn. 1007-9289. 20220331004

Cu / Co 多层膜表面粗糙度及织构演化机制^{*}

李 玮1 王炫力2

(1. 内蒙古科技大学分析测试中心 包头 014010;

2. 内蒙古科技大学材料与冶金学院 包头 014010)

摘要: 薄膜材料中的微观结构和织构特征对其性能有重要的影响作用,但目前薄膜中微观结构和织构的关系尚未清楚。 以 Cu / Co 多层膜为对象,研究薄膜中的表面粗糙度和织构。采用磁控溅射法在单晶 Si 基底上制备 Cu / Co 多层膜, 通过扫描电子显微镜和原子力显微镜对多层膜的表面粗糙度进行逐层表征,结合薄膜外延生长模型分析薄膜表面自由 能的层间差异对薄膜生长模式和表面粗糙度的影响。结果表明,在 Si 基底上沉积的 Cu 薄膜呈岛状模式生长,表面粗 糙度较小;继续在 Cu 薄膜上沉积的 Co 薄膜亦呈岛状模式生长,表面粗糙度增加;最后在 Co 薄膜上沉积的 Cu 薄膜, 趋向于层状模式生长,表面粗糙度下降。此外,利用 XRD 与 EBSD 分析 Cu / Co 多层膜的织构演变行为,发现在 Cu 和 Co 层交替沉积的过程中,织构类型由{111}变为{0001}再变为{111},织构强度逐渐变弱。分析表明,薄膜的织构强 度与其表面粗糙度存在一定关系,Cu 薄膜中{111}织构强度越高,薄膜的表面粗糙度越小。通过明确 Cu / Co 薄膜生长 过程中的织构演化规律以及织构与微观结构的相互作用,可为薄膜制备技术和性能调控的研究提供一定启示及参考 意义。

关键词: 多层膜; 磁性薄膜; 表面粗糙度; 织构; 取向关系 中图分类号: TB383

Evolution of Surface Roughness and Texture in Cu / Co Multilayers

LI Wei¹ WANG Xuanli²

 Instrumental Analysis Center, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
 School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology,

Baotou 014010, China)

Abstract: The giant magnetoresistance (GMR) effect refers to the phenomenon in which the resistivity of a magnetic material changes significantly in the presence of an external magnetic field compared with when there is no external magnetic field. Thus, when the GMR film is applied to an external magnetic field, there is a large variation in resistance. In light of this special property, the GMR film can be applied as a sensor, high-density magnetic recording read-head, giant magnetoresistance random access memory, magnetic spin transistors, and other electronic components. In recent years, the structures and properties of GMR multilayers have been extensively studied. In multitudinous GMR multilayer systems, Cu / Co multilayers have attracted significant attention owing to their good thermal stability and high magnetoresistance change rate. Previous studies have shown that the reduction in the interface roughness of Cu / Co multilayers increased the electron spin correlation scattering at the interface, which could enhance the GMR effect. The microstructure and texture of the multilayers also affect the oscillating exchange coupling and electron spin correlation scattering between the magnetic layers of the GMR films. However, the relationships between the thin film preparation and the

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Inner Mongolia (2018BS05017) and Innovation Foundation of Inner Mongolia University of Science and Technology (2019QDL-B10). 20220331 收到初稿, 20221009 收到修改稿

^{*} 内蒙古自然科学基金(2018BS05017)和内蒙古科技大学创新基金(2019QDL-B10)资助项目。

formation and evolution of the texture, as well as the change in microstructure, have yet to be thoroughly and systematically studied. The microstructure and texture of thin-film materials significantly influence their properties, but the relationship between them remains unclear. In this paper, the surface roughness and texture of Cu / Co multilayers were studied in detail. First, Cu / Co multilayers were prepared on single-crystal Si substrates by magnetron sputtering. The purity of the sputtering target was<99.9%. The substrate was a single-crystal (001) Si; the system background vacuum during sputtering was better than 0.10 mPa; the working pressure was controlled at 0.5 Pa; and the sputtering gas was high-purity argon. During the sputtering process, the power was set at 250 W and the layer thickness was controlled at 100 nm. Based on the above parameters, Cu (100 nm), Cu (100 nm) / Co (100 nm), and Cu (100 nm) / Co (100 nm) / Cu (100 nm) films were prepared. Second, the surface roughness of the multilayer films was characterized by scanning electron microscopy and atomic force microscopy. Combined with the film epitaxial growth model, the effects of the difference between the layer surface energies on the film growth mode and surface roughness were analyzed. By calculating the surface energy in different crystal plane of the Co / Cu film, it was found that surface energy minimization was the main driving force of {111} preferred orientation. The Cu layer deposited on the Si substrate was grown in the island mode with a low surface roughness. The Co layer deposited on the Cu layer was also grown in the island mode with increased surface roughness. The Cu layer deposited on the Co layer tended to grow in the layered mode with reduced surface roughness. The texture evolution of the Cu / Co multilayers was analyzed by X-ray diffraction and electron backscattering diffraction. It was found that during the deposition process, the texture types changed from {111} to {0001}, and then to {111}, and the texture strength gradually weakened. In Cu / Co multilayers, a relationship exists between the texture and surface roughness: the higher the {111} texture strength in the Cu film, the lower the surface roughness of the multilayers. Clarifying the texture evolution during the growth of Cu / Co films and establishing the interaction between the texture and microstructure provides insight and serves as a reference for film preparation and performance control.

Keywords: multilayers; magnetic film; surface roughness; texture; orientation relationship

0 前言

巨磁电阻效应(Giant magnetoresistance, GMR)发现于具有反铁磁性耦合的铁磁性薄膜材 料,这种效应的核心是在外磁场发生改变的情况 下,载流子在铁磁性薄膜中传导时受到不同强度 的自旋相关散射,从而导致薄膜的电阻值发生显 著变化^[1-2]。1994 年 IBM 公司利用具有 GMR 效 应的多层金属膜制成硬磁盘磁头,大大提高了磁 记录密度,掀起了巨磁电阻材料与器件的研究热 潮^[3]。在众多巨磁电阻薄膜体系中,Cu/Co 多层 膜以其良好的热稳定性和较大的磁电阻变化率而 受到广泛关注。

JIANG 等^[4]采用平动喷射电化学沉积系统在硅 衬底上制备了 Cu/Co 多层膜,其巨磁阻率高达 50.38%,且 GMR 效应随多层膜周期数的增加而增 加,当周期数超过 120 时,巨磁电阻率减小。 CIUPINA 等^[5]使用热离子真空电弧放电法合成了 Cu/Co/Cu/Fe 系列薄膜,并且利用磁光克尔效 应研究这些薄膜的磁性,获得最大磁电阻值为 31 % 的多层膜。截至目前,普遍认同 Cu/Co 多层膜界 面粗糙度的降低会增加界面上电子自旋相关散射, 使得 GMR 效应增强,同时,多层膜的微观结构、 择优取向均会对 GMR 薄膜磁层间的振荡交换耦合 和电子自旋相关散射产生影响^[6-9]。目前,关于薄膜 织构与其表面粗糙度的研究仍鲜有报道,国内对此 方面的研究还不深入。因此,如何有效地控制 Cu/Co 多层膜的界面粗糙度、研究薄膜沉积过程中 的织构演变规律,对提高 GMR 效应具有十分重要 的意义。

本文采用磁控溅射法在单晶 Si 基底上依次沉 积出 Cu 层、Co 层、Cu 层薄膜,形成单层膜厚度 均为 100 nm 的 Cu / Co / Cu 多层膜。通过扫描电 子显微镜和原子力显微镜对多层膜的表面粗糙度 进行逐层表征,应用背散射电子衍射技术和透射 电子显微镜对多层膜的织构演变行为进行研究, 结合薄膜外延生长模型和边-边匹配模型分析薄 膜表面自由能的层间差异和取向差异对表面粗糙 度的影响,为获得高 GMR 效应的 Cu / Co 多层膜 奠定基础,进一步推动薄膜材料与器件的研究与 发展。

1 试验准备

1.1 样品制备

采用磁控溅射镀膜仪制备 Cu / Co / Cu 多层膜, 溅射靶材为 Cu 靶和 Co 靶, 靶材纯度优于 99.9%, 基片为单晶 (001) Si 基底, 溅射时系统本底真空优 于 0.1 MPa, 工作气压为 0.5 Pa, 溅射气体为 Ar, 溅射功率为 250 W, 单层膜厚度均为 100 nm, 分别 制备了 Cu (100 nm)、Cu (100 nm) / Co (100 nm)、 Cu (100 nm) / Co (100 nm) / Cu (100 nm) 三种 结构的薄膜。

1.2 结构表征

利用配有能谱分析仪(EDS)的 Zeiss ULTRATM 55 扫描电子显微镜(SEM)观察薄膜表面的二维形 貌并分析元素种类;使用 Veeco Multimode 8 原子力 显微镜(AFM)观察薄膜表面的三维形貌,并通过 NanoScope Analysis 软件计算其表面粗糙度;利用电 子背散射衍射(EBSD)表征薄膜表面晶粒之间的取 向关系,通过 Chanel 5 软件对 EBSD 数据进行计算, 定量表征薄膜内的织构强度;采用 Tecnai G2 F20 透 射电子显微镜(TEM)对薄膜的截面进行选区电子 衍射(SAED),得到选区电子衍射谱,进行取向关系的标定。

2 结果与讨论

2.1 Cu / Co 多层膜表面形貌的变化规律

图 1 为通过场发射扫描电镜得到的 Cu、 Cu / Co、Cu / Co / Cu 薄膜的二维表面形貌图和 EDS 能谱图。从能谱成分图中可以看出,三种薄膜的表 面成分均为相应薄膜的顶层物质,未出现任何杂质 元素,说明薄膜的沉积效果良好。从二维表面形貌 图中可以看出,在 Si 基底上沉积的 Cu 薄膜,其表 面由尺寸均匀的团簇状颗粒组成,同时存在少数异 常长大的颗粒;在 Cu 薄膜上继续沉积的 Co 薄膜, 其表面并没有出现明显的团簇状颗粒,但是存在一 些沟渠;最后在 Co 薄膜上又沉积的 Cu 薄膜,其表 面依然为团簇状颗粒,颗粒尺寸有所增加且分布均 匀,没有出现异常长大的颗粒。可见,在多层膜制 备的过程中,随着沉积层数的增加以及每一层沉积 元素的不同,薄膜的二维形貌特征发生明显改变, 由此可以推测,其三维形貌特征也会有一定的 变化。





图 2 是通过原子力显微镜得到的 Cu、Cu/Co、 Cu/Co/Cu 薄膜的三维表面形貌图和表面起伏曲 线。从图中可以看出,随着多层膜沉积层数的增加, 薄膜表面的颗粒尺寸逐渐增大,表面起伏程度呈现先 变大后变小的趋势。为了进一步量化薄膜表面形貌的 演化过程,通过 NanoScope Analysis 软件对 AFM 图 像进行处理,采用表面振幅参数表征平面偏差垂直方向的特性^[10],计算出三种薄膜的均方根表面粗糙度分别为 $R_q(Cu)\approx 1.05$ nm、 $R_q(Cu/Co)\approx 1.64$ nm、 $R_q(Cu/Co/Cu)\approx 1.55$ nm。以上数据结果表明,沉积在 Si 基底上的 Cu 薄膜表面粗糙度最小;在 Cu 薄膜上再沉积一层 Co 薄膜,表面粗糙度增大;而在 Co

薄膜上继续沉积一层Cu薄膜,表面粗糙度有所降低,

这与薄膜表面起伏曲线呈现出来的趋势相一致。



Fig. 2 AFM images and surface curve of the films

薄膜表面粗糙度的大小与其生长模式相关,而 薄膜的生长模式又与其形核过程有着直接的关 系^[11-13]。在大多数相变过程中,特别是薄膜沉积从 气相到固相时,一般是非自发形核的过程,如图 3 所示,下面讨论薄膜的非自发形核过程对薄膜表面 粗糙度的影响^[14]。在薄膜沉积过程中,当沉积原子 到达基底时,一部分沉积原子会从基底反弹出去, 而另一部分沉积原子会在基底上进行扩散、聚集、 团聚长大,当形成的团簇尺寸超过临界核心半径时, 核为稳定状态,在三维方向上开始长大,最终形成 薄膜。





Fig. 3 Schematic diagram of non spontaneous nucleation process of atoms on the substrate surface

从图 3 中可以看到,气相沉积原子与薄膜之间 的界面能(γ_{vf})、气相沉积原子与基底之间的界面能 (γ_{sv})及薄膜与基底之间的界面能(γ_{fs}),三者之间的 相互作用关系会使薄膜与基底之间存在一定的角 度,即润湿角(θ),当核稳定存在时,各界面须满足 如下关系式:

$$\gamma_{\rm sv} = \gamma_{\rm fs} + \gamma_{\rm vf} \cos\theta \tag{1}$$

对于异质生长的薄膜而言,如果 A 物质的表面 自由能比 B 物质大,将 A 沉积于 B 表面上时,则有 $\gamma_{sv} < \gamma_{fs} + \gamma_{vf}$,由式(1)可知, $\theta > 0$,薄膜趋向于 以岛状模式生长形成颗粒状结构,薄膜表面起伏较 明显,表面粗糙度较大;反之,将 B 沉积于 A 表面 上时,则有 $\gamma_{sv} \approx \gamma_{fs} + \gamma_{vf}$,由式(1)可知, $\theta \approx 0$, 说明 B 将会浸润 A 表面,薄膜趋向于层状模式生长, 表面粗糙度较小。可见,薄膜与基底表面自由能的 差异会导致润湿角的变化,从而影响薄膜的生长模 式,使薄膜表面出现不同程度的结构起伏,因此, 影响薄膜表面粗糙度的根本因素在于材料本身的表 面自由能。

通过文献[15-17]得到 Si、Cu 和 Co 的不同晶面 的表面自由能,见表 1,Si 的表面能最小、Cu 次之、 Co 最大。根据上述分析可以推断出,Cu 沉积在 Si 基底上时趋向于岛状模式生长,Cu 薄膜的表面粗糙 度较大;在 Cu 薄膜上再沉积一层 Co 薄膜,其浸润 性更差,更加趋向于岛状模式生长,Cu/Co 薄膜的 表面粗糙度也更大;而在 Co 薄膜上继续沉积一层 Cu 薄膜,由于 Cu 的表面自由能比 Co 的表面自由 能低,薄膜趋向于层状模式长大,会出现薄膜表面 粗糙度降低的趋势,这与图 2 中 Cu、Cu/Co、 Cu/Co/Cu 薄膜 AFM 图和表面起伏曲线的结果相 一致。此外,从表 1 中还可以看出,材料本身的表 面自由能具有晶体学各向异性,即当薄膜沿着不同 $(J \cdot m^{-2})$

取向的晶面生长时,薄膜表面所具有的表面自由 能不同,这可能也会对薄膜的表面粗糙度产生一 定影响。因此,须要对这三种薄膜的表面晶体学 信息进行深入分析,进一步研究在多层膜的沉积 过程中,表面自由能对薄膜表面粗糙度的作用 规律。

表 1 Si、Cu、Co不同晶面的表面自由能

 Table 1
 Surface energy of Si, Cu, Co with different plane

	{111}	{110}	{100}	{0001}	{10-10}
Si	1.23	1.43	1.36		
Cu	1.952	2.237	2.116		
Со				2.775	3.035

2.2 Cu / Co 多层膜织构特征分析

利用 EBSD 表征 Cu、Cu / Co、Cu / Co / Cu 薄 膜表面的晶体学信息,研究薄膜表面晶粒之间的取 向关系、晶界类型、晶粒大小,在此基础上,分析 多层膜沉积过程中层与层之间的相互作用,以及对 薄膜表面粗糙度的影响机制。图 4a~4c 分别是三种 薄膜样品中晶粒的取向分布图,可以观察到平行于

薄膜表面的晶粒取向分布情况。其中,黑色代表晶 粒的{111}面平行于薄膜表面,白色代表{100}面平 行于薄膜表面,灰色代表{110}面平行于薄膜表面。 图 4a 为 Cu 薄膜的取向分布图,图中晶粒的颜色几 乎全部为黑色,说明薄膜中绝大部分的晶粒以{111} 面平行于薄膜表面的方向生长,此时薄膜表面具有 强的{111}织构;图 4b 是在 Cu 薄膜上继续沉积的 Co薄膜取向分布图,由于 Co 的晶体结构为密排六 方,图中晶粒取向主要以白色{0001}晶面平行于薄 膜表面为主,但也存在其他取向的晶粒,此时薄膜 表面是以{0001}织构为主;图 4c 是 Cu / Co / Cu 多 层膜中最上层 Cu 薄膜的取向分布图, 与图 4a 相比, 此时薄膜内{111}取向的晶粒大幅减少,开始出现不 同取向的晶粒,薄膜中{111}织构的强度明显降低。 由此可见, Cu / Co / Cu 多层膜沉积过程中每一层 薄膜内的织构类型和强度均发生了显著变化。在 Si 基底上沉积的 Cu 薄膜具有极强的{111}织构, 在此基础上沉积的 Co 薄膜具有{0001}织构,但 织构强度开始下降。最后,在 Cu/Co 薄膜上沉 积一层 Cu 薄膜,其薄膜内{111}织构的强度进一 步降低。



图 4 不同层薄膜晶粒取向分布图

Fig. 4 Grain orientation distribution of different layers

为了进一步明确多层膜沉积过程中每一层薄膜 内织构类型的演变规律,定量表征薄膜内的织构强 度,下面通过 Chanel 5 软件对 EBSD 数据进行计算, 得到 Cu、Cu/Co、Cu/Co/Cu 薄膜的极图数据, 如图 5 所示。图 5a 是 Cu 薄膜极图,可以看出, Cu 薄膜的织构类型是{111}纤维织构,织构的密度 水平可达到 10;图 5b 是 Cu/Co 薄膜极图,其织 构类型是{0001}纤维织构,织构的密度水平为 6; 图 5c 是 Cu/Co/Cu 薄膜极图,从图中可以看出该 薄膜存在很弱的{111}纤维织构,织构的密度水平仅 为 3。对上述极图数据进行分析,可以得到 Cu/Co/Cu 薄膜内的织构演变行为:在 Cu 和 Co 交替沉积的过程中,单晶 Si 基底促进 Cu 薄膜形成 强{111}纤维织构,当在其上方沉积一层 Co 薄膜时, 这种强烈的{111}纤维织构诱导 Co 薄膜沿着其能量 最低方向形成{0001}纤维织构,但是织构强度有所 降低。最后,在 Cu/Co 薄膜上沉积的 Cu 薄膜出现 很弱的{111}纤维织构。由此可以推测,Cu 层和 Co 层之间可能存在一定的位向关系,在多层膜交替沉 积过程中存在织构强度的继承现象。









(b) Cu / Co





(c) Cu / Co / Cu

图 5 不同层的极图

Fig. 5 Pole figure of different layers

2.3 Cu 层与 Co 层的取向关系预测

为了验证 Cu 与 Co 之间可能存在的位向关系, 本文利用边-边匹配模型^[18]对其进行分析预测,得到 两相之间密排方向上原子的错配度及面间距的错配 度,如表 2、3 所示。

```
表 2 Cu 与 Co 之间的原子间距错配度(%)
```

```
        Table 2
        Mismatch of atomic distance between Cu and Co(%)
```

	<100> _{Cu}	<110> _{Cu}	<112> _{Cu}	<111> _{Cu}	
<11 2 0> _{Co}	30.7	2.1	43.5	60	

表3 Cu与Co之间的晶面间距错配度(%)

 Table 3
 Mismatch of plane spacing between Cu and Co(%)

	$\{0001\}_{Co}$	$\{10\overline{1}1\}_{Co}$	$\{10\overline{1}0\}_{Co}$
$\{111\}_{Cu}$	2.7	3.8	8.4
$\{200\}_{Cu}$	12.3	19.9	5.7
$\{220\}_{Cu}$	58.8	69.6	49.7

根据匹配晶向必须位于匹配晶面的规则,若一 个匹配晶向对的两个晶向分别位于一个匹配晶面对 个晶面上,即满足以下条件: [u₁, v₁, w₁] || [u₂, v₂, w₂]; (h₁, k₁, l₁) || (h₂, k₂, l₂) h₁u₁+k₁v₁+l₁w₁=0; h₂u₂+k₂v₂+l₂w₂=0 经过计算得到可以满足规则的所有位向关系如 下(Cu与Co之间):

> $[1\overline{10}]_{Cu} || [11\overline{20}]_{Co}, \{111\}_{Cu} || \{0001\}_{Co}$ $[011]_{Cu} || [11\overline{20}]_{Co}, \{200\}_{Cu} || \{1\overline{100}\}_{Co}$

计算结果证实了Cu层和Co层之间会存在Cu{111} 面平行于 Co{0001}面、Cu{200}面平行于 Co{1 100} 面,这是由两种材料的晶体结构及晶格常数所决定的。 因此,当 Cu 薄膜具有强的{111}纤维织构时,在 Cu 上沉积的 Co 薄膜会出现{0001}纤维织构。 为了进一步证实 Cu{111}面与 Co{0001}面的平 行关系,采用透射电子显微镜对 Cu/Co 薄膜的截 面进行选区电子衍射表征,如图 6 所示。图 6b 为 Cu 层和 Co 层的电子衍射图像,可以看出 Cu 层的 (111)衍射斑与 Co 层的(0001)衍射斑基本重合, 说明 Cu 薄膜的{111}晶面与 Co 薄膜的{0001}晶面 平行。综合以上试验与计算结果得出:在 Cu/Co 多层膜沉积的过程中,Co 薄膜中晶粒的{0001}面会 沿着 Cu 薄膜晶粒的{111}面生长,因此当 Cu 薄膜 出现{111}纤维织构时,也会诱导 Co 薄膜出现{0001} 纤维织构。



(a) Cu / Cocross-section image

(b) Cu / Co interface electron diffraction

图 6 Cu / Co 薄膜的截面形貌与电子衍射图

Fig. 6 Cross section image and selected area electron diffraction(SAED) of Cu / Co multilayer:

综上所述, Cu / Co / Cu 多层膜在逐层沉积过程 中,由于Cu和Co之间存在一定的取向关系,并在 沉积过程中存在一定的织构继承现象,因此,底层 Cu 薄膜具有强的{111}织构时,诱导其上层的 Co 薄膜出现{0001}织构,但是 Co 层薄膜中{0001}织构 的强度较弱,进一步降低了其上层 Cu 薄膜内的{111} 纤维织构。从薄膜的整体结构来说,其薄膜内的晶 粒生长方向依次为{111}--{0001}--{111}。根据 Cu/Co/Cu 多层膜整体的织构分布特征可知, Co 层织构的强度是控制 Cu / Co 多层膜织构的关键。 另外,结合表1中列出的表面自由能数值可知,相 比于 Cu 的其他晶面, {111}晶面具有最低的表面能, 所以当 Cu 薄膜呈{111}纤维织构时,其润湿角 θ 小 于薄膜存在其他方向织构时的润湿角,因此,当Cu 薄膜具有{111}纤维织构时最有可能以层状模式生 长,这对薄膜表面粗糙度的降低具有一定促进作用。 可见,薄膜表面粗糙度的变化与织构的演变行为存

在一定关系, Cu 薄膜中{111}织构强度越高, 薄膜 的表面粗糙度越小,这与图 2 中 AFM 得到的 Cu 薄 膜和 Cu/Co/Cu 薄膜均方根表面粗糙度变化相 一致。

3 结论

磁控溅射制备的 Cu / Co 多层膜为研究对象, 以材料的表面自由能为切入点,对薄膜表面粗糙度 及织构的演化规律进行分析,得到以下结论:

(1)在 Cu / Co / Cu 多层膜依次沉积的过程中发 现薄膜的表面粗糙度演化规律为: Cu 在 Si 基底上 沉积时,薄膜呈岛状模式生长,表面粗糙度较小; 继续在 Cu 薄膜上沉积的 Co 薄膜亦呈岛状模式生 长,表面粗糙度增加;最后在 Co 薄膜上沉积的 Cu 薄膜,趋向于层状模式生长,表面粗糙度下降。

(2) 通过 XRD 与 AFM 技术证明了薄膜表面粗

糙度的变化与织构的演变行为存在一定关系, Cu/Co多层膜中Cu层{111}织构强度越高,薄膜的 表面粗糙度越小。

参考文献

- GRUNBERG P, SCHREIBER R, PANG Y, et al. Layered magnetic structures: Evidence for antiferromagnetic coupling of Fe layers across Cr interlayers[J]. Physical Review Letters, 1987, 61(8): 3750-3752.
- [2] BAIBICH M N, BROTO J M, FERT A F, et al. Giant magnetoresistance of (001)Fe / (001)Cr magnetic superlattices[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(21): 2472-2475.
- [3] CHAPPERT C, FERT A, DAU F V. The emergence of spin electronics in data storage[J]. Nature Materials, 2007, 6(11): 813-823.
- [4] JIANG W, SHEN L. Roughness, hardness and giant magneto resistance of Cu / Co multilayers prepared by jet electrochemical deposition[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13(10): 9669-9680.
- [5] CIUPINA V, PRIOTEASA I, ILIE D, et al. Synthesis and characterization of Copper / Cobalt / Copper / Iron nano structurated films with magnetoresistive properties[J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1815(1): 040001.
- [6] HECKER M, THOMAS J, TIETJEN D, et al. Thermally induced modification of GMR in Co/Cu multilayers: correlation among structural, transport, and magnetic properties[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2003, 36(5): 564.
- [7] PANDYA D K, GUPTA P, KASHYAP S C, et al. Electrodeposition and characterization of Cu / Co multilayers: Effect of individual Co and Cu layers on GMR magnitude and behavior[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2009, 321(8): 974-978.
- [8] LEVY P M, OUNADJELA K, ZHANG S, et al. Theory of magnetic superlattices: Interlayer exchange coupling and magnetoresistance of transition metal structures[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 67(9): 5914-5919.
- [9] GONG H, LITVINOV D, KLEMMER T J, et al. Seed

layer effects on the magnetoresistive properties of NiFe films[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 2963-2965.

- [10] MAKSOUND T, GADELMAWLA E S, KOURA M M, et al. Roughness parameters[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123: 133-145.
- [11] MINVIELLE T J, WHITE R L, WILSON R J. Surface roughness in Cu(100) / [Co / Cu]n systems grown by ion-beam sputtering[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(8): 5116-5118.
- [12] MESCHEDE A, KREBS H U. Minimization of interface roughness in laser deposited Fe / MgO multilayers[J]. Applied Physics A, 2011, 102(1): 137-140.
- [13] 杨奇彪, 卞若男, 王杰, 等. 飞秒激光制备梯度润湿性 单晶硅表面[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 175-180.
 YANG Qibiao, BIAN Ruonan, WANG Jie, et al. Gradient wettability of monocrystalline silicon surface prepared by femtosecond Laser[J]. China Surafce Engineering, 2021, 34(6): 175-180. (in Chinese)
- [14] OHRING M. Materials science of thin films[M].Pittsburgh: Academic Press, 2002.
- [15] VITOS L, RUBAN A V, SKRIVER H L, et al. The surface energy of metals [J]. Surface Science, 1998, 411(1-2): 186-202
- [16] KIEF M T, EGELHOFF W F. Growth and structure of Fe and Co thin films on Cu(111), Cu(100), and Cu(110): A comprehensive study of metastable film growth[J]. Physical Review B, 1993, 47(16): 10785-10814.
- [17] EAGLESHAM D J, WHITE A, Fe LDMAN L C, et al. Equilibrium shape of Si[J]. Physical Review Letters, 1993, 70(11): 1643-1646.
- [18] KELLY P M, ZHANG M X. Edge-to-edge matching—The fundamentals[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(3): 833-839.

作者简介:李玮,男,1988 年出生,博士,讲师,硕士研究生导师。 主要研究方向为材料各向异性与薄膜材料。 E-mail:liwei_imust@126.com 王炫力(通信作者),女,1989 年出生,博士,讲师,硕士研究生导师。 主要研究方向为薄膜材料制备及应用技术。

E-mail: wangxuanli917@163.com