第 47 卷 第 5 期 1998 年 5 月
1000-3290/98/47(5)/0765-13

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.47, No.5, May, 1998

NiFe/Mo 多层膜界面的电子显微学研究*

高义华 张 泽†
(中国科学院北京电子显微镜实验室与凝聚态物理中心,北京 100080)
阎明朗 赖武彦
(中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室,北京 100080)
(1997 年 12 月 15 日收到)

用高分辨电子显微学方法研究了 $Ni_{80}Fe_{20}$/Mo 磁性多层膜,结果表明:(1)多层膜的结晶状态,随 Mo 非磁性层厚度而变化.当 Mo 层厚度为 0.7 nm 时,多层膜基本为非晶;当 Mo 层厚度大于 1.6 nm 时,Mo 层和 NiFe 层内分别结晶为体心立方和面心立方多晶,层内晶粒尺寸为 2—6 nm.(2)在 Mo 层厚度为 1.6 和 2.1 nm 的多层膜中,NiFe 层和 Mo 层之间存在两种取向关系:$(110)_{Mo}$//$(111)_{NiFe}$, $[\bar{1}11]_{Mo}$//$[1\bar{1}0]_{NiFe}$和$(110)_{Mo}$//$(111)_{NiFe}$, $[001]_{Mo}$//$[1\bar{1}0]_{NiFe}$.(3)NiFe 层和 Mo 层之间有较清晰的界面.界面附近 3—4 个原子层范围内,NiFe 和 Mo 的面间距分别相对块状晶体沿生长方向膨胀和压缩.讨论了界面附近面间距的变化,并根据该多层膜显微结构特征,讨论了此系统未显示巨磁电阻效应的原因.

PACC: 6116D; 7570

1 引 言

自从在 Fe/Cr 三层膜[1]及超晶格[2]中发现磁层间的反铁磁(AFM)性耦合和巨磁电阻(GMR)效应以来,多种铁磁性金属/非磁性金属组成的磁性多层膜系统成了研究的热点.结果表明,磁性金属多层膜中磁层间通过自旋极化电子形成耦合,其强度是非磁性层厚度的振荡函数,其行为类似著名的 RKKY 交换作用.此类多层膜出现巨磁电阻效应的主要物理机制之一是自旋极化的传导电子在磁性/非磁性层界面上的散射.磁层间耦合和 GMR 是金属多层膜中两个相关的重要问题,而磁层-非磁层的结构及其界面的微结构是揭示上述两个问题物理机制的基础.

在众多磁性金属多层膜中,美国 Argonne 实验室以金属 Mo 为非磁性层的工作,十分引人注意.Brubaker 等[3]首先用磁光 Kerr 效应方法证实 Fe/Mo 多层膜中磁层间耦合强度存在振荡.接着,Qiu 等人[4,5]指出,其振荡周期分为长(约为 1.1 nm)、短(0.4—0.6 nm)两种.Yan 等人[6]首次观察到了 Fe/Mo 多层膜中的 GMR 效应,磁电阻值随 Mo 层厚度变化而振荡.他们随后对 NiFe/Mo 多层膜的研究表明[7],随 Mo 层厚度变化,从 AFM 性耦合到铁磁(FM)性耦合的转变振荡行为十分典型,并且磁层间耦合振荡的周期为

* 中国科学院基金和国家自然科学基金资助的课题.
† 通讯联系人.

1.1—1.2 nm, 但是 AFM 性耦合的 NiFe/Mo 多层膜(Mo 层厚度 $t_{Mo}=0.7, 1.6$ nm)完全不显示 GMR 效应. 考虑到 NiFe 和 Mo 原子半径、晶格常数和晶格对称性的差异(面心立方 NiFe, $a=0.355$ nm, 体心立方 Mo, $a=0.315$ nm), Luo 等人通过 X 射线衍射和模型模拟[8], 提出了在 NiFe 层和 Mo 层界面附近形成一个 NiFe 与 Mo 原子的互混过渡区, 过渡区的厚度约为三个原子层. 该过渡区的存在, 可能影响此多层膜的电子输运性能. 考虑到计算机模拟所涉及的可调性参数多, 这种界面结构模拟结果需要原子层次的直接观察验证. 本文采用高分辨电子显微镜对 NiFe/Mo 多层膜进行了系统的电子衍射和截面样品的高分辨像观察, 表征了其显微结构和界面微结构特征, 并据此讨论了 GMR 效应未出现的原因.

2 实验方法

$Fe_{10nm}[NiFe_{1.4nm}/Mo_{x nm}]_{30}$ 磁性多层膜($x=0.7, 1.6, 2.1$)是用磁控溅射法在(001)Si 基底上制备得到. 其中 Fe 缓冲层的厚度为 10 nm. NiFe 靶源是含 80% Ni, 20% Fe 的坡莫合金. NiFe 层的溅射时间为 6s, 厚度为 1.4 nm. Mo 层的设计溅射速率为 0.12 nm/s, 改变溅射时间, 可得到不同厚度的 Mo 层. 透射电子显微镜的平面顶视电子显微镜样品, 通过对 Si 基底的机械减薄和氩离子减薄而得到. 透射电子显微镜的截面样品, 采用常规制样方法得到. 在所有样品的离子减薄过程中, 采用液氮冷却. 电子显微镜观察是在 JEOL-2010 电子显微镜上完成, 加速电压为 200 kV, 点分辨率为 0.194 nm. 在多层膜截面样品的形貌、电子衍射和高分辨观察中, 多层膜截面样品均保持为“edge-on”, 即入射电子束平行于多层膜的表面. 在平面顶视电子衍射中, 入射电子束垂直于多层膜的表面. 用图像的数字化测量方法[9]测量了磁性/非磁性层界面附近点阵面间距的变化. 测量采用 Digital Micrograph 计算机软件. 生长方向上点阵间距的测量范围包括 NiFe/Mo 界面区域和 Mo/NiFe界面区域, 界面上的测量范围包括 15—20 个原子间距.

3 实验结果

电子显微形貌像表明, 这些样品均为多层结构. 图 1 示出 Mo 层厚度为 0.7 nm 的多层膜样品的电子显微形貌像. 它包括 Si 基底、Fe 缓冲层和多层膜区域三部分. 在多层膜区域, 白色衬度的层为 NiFe 层, 黑色衬度的层为 Mo 层.

3.1 电子衍射

图 2 示出 Mo 层厚度为 0.7 nm 的平面电子衍射(a), (b)和截面电子衍射(c). 图 2(a)的选区只包含多层膜区域, 它显示了两个非晶环, 由此揭示此多层膜具有非晶态结构特征. 图 2(b)为包括 Fe 缓冲层和多层膜的复合电子衍射图. 图中标出了 4 个多晶环, 它们来自于体心立方 Fe 缓冲层的 110, 002, 112, 220 衍射. 标有“A”和“B”的非晶环来自于多层膜区的衍射. 图 2(c)为只包含多层膜区域的截面电子衍射图, 它显示一个标有“A”的非晶环和标有“T”, “M”的衍射. 非晶环表明多层膜样品内原子排列基本无序. “M”是由于周

期性多层结构衍射造成,对应周期为 2.1 nm. 标有“T”的衍射,表明薄膜内某些区域可能存在微晶,这将在后面的高分辨分析中讨论.

图 3 示出 Mo 层厚度为 1.6 和 2.1 nm 的多层膜的电子衍射. 图 3(a),(d)为相应平面样品电子衍射,选区仅包括多层膜部分. 图中多晶衍射环分别可用体心立方 Mo 和面心立方 NiFe 标出. 应该指出的是,衍射图中 NiFe 的低指数 111, 002, 113 多晶衍射没有出现. 这可用面心立方 NiFe 的(111)面择优生长的影响来解释. 在此平面样品取向下,只能出现高指数 220, 224, 440, 448…衍射,其中 220_{NiFe}($d=0.126$ nm)与 112_{Mo}几乎重叠($d=0.129$ nm),而 224_{NiFe}($d=0.072$ nm), 440($d=0.064$ nm), 448($d=0.036$ nm)等高

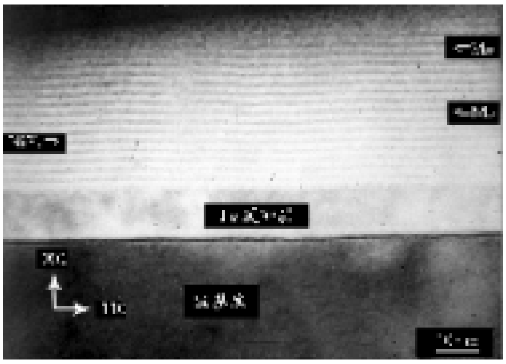


图 1　Mo 层厚度为 0.7nm 样品的电子衍射衬度形貌图　多层膜部分中,白色衬度的层为 NiFe,黑色衬度的层为 Mo 层

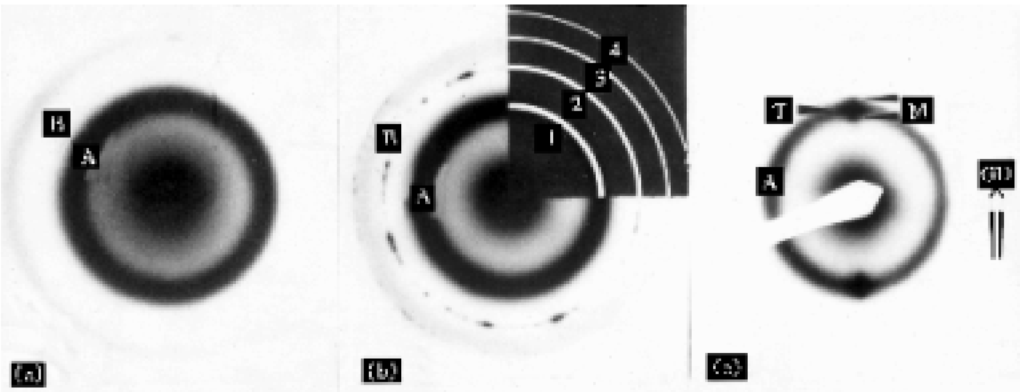


图 2　Mo 层厚度为 0.7 nm 多层膜样品的平面电子衍射图(a),(b)和截面电子衍射图(c)　(a)为选区仅为多层膜部分,标有“A”,“B”的晕环表明多层膜为非晶结构;(b)为选区包含 Fe 缓冲层和多层膜部分,标有数字 1,2,3 和 4 的多晶环为多晶体心立方 Fe 的 110,002,112,220 衍射,标有“A”,“B”的晕环表明多层膜为非晶结构;(c)为选区仅为多层膜部分,标有“M”的衍射,对应正空间多层膜周期 2.1 nm.

指数衍射强度太弱,未显示出来. 图 3(b),(c)和(e),(f)分别为两种多层膜的截面电子衍射图,选区仅包含多层膜部分. 图 3(b),(e)中,标有“T”的衍射是面心立方 NiFe 的最密排面$(111)_{NiFe}$和体心立方 Mo 的最密排面$(110)_{Mo}$衍射的干涉. 衍射“T”强度很强,表明多层膜存在择优取向生长,优先生长方式为$(110)_{Mo}$∥$(111)_{NiFe}$∥Si 表面(Si 表面的方向由图 3(b)中“GD”标出). 除了衍射“T”,“M”以外,其他一些衍射点太弱. 延长曝光时间,得到了复合电子衍射(见图 3(c),(f)). 此复合电子衍射谱包含体心立方结构 Mo 的[$\bar{1}$11],[001]带轴和面心立方结构 NiFe[1$\bar{1}$0]带轴的三套衍射谱. 这三套衍射谱分别如图 4(a)—(c)所示. 其中标有“T_1”的衍射,可标为体心立方结构 Mo 的 101 和 01$\bar{1}$ 衍射,标有“T_2”的衍射,可标为体心立方结构 Mo 的 1$\bar{1}$0 和 $\bar{1}$10 衍射. 标有“R_1”,“R_4”的衍射,可分别标为面心立

方 NiFe 的 $11\bar{1}$ 和 002 衍射. 而标有“R_3”,“R_2”的衍射,与标有“R_1”,“R_4”的衍射有孪晶取向关系,孪晶面为$(111)_{NiFe}$面,值得注意的是,图 3(c)和(f)两复合电子衍射谱中,实际的衍射呈弧状分布,它来自于晶面的不平整.

图 3(c)和(f)表明,在 Mo 层厚度为 1.6 和 2.1 nm 的多层膜样品中,面心立方 NiFe

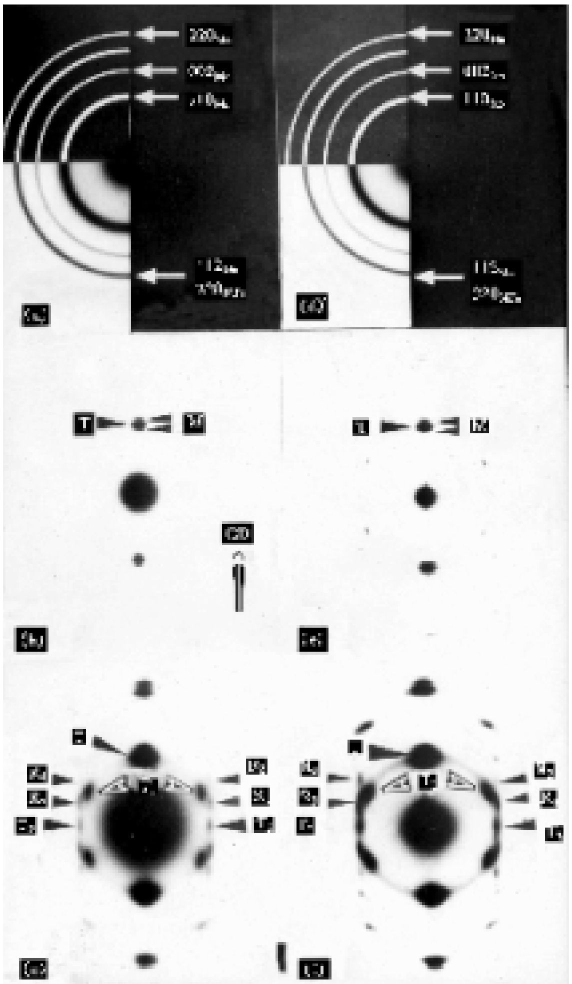


图 3 Mo 层厚度为 1.6 和 2.1 nm 多层膜样品的平面电子衍射图(a),(d)和截面电子衍射图(b),(c),(e),(f) 选区仅为多层膜部分.(b),(e)中标有“T”的衍射所对应的面间距分别为 0.21 和 0.22 nm,而标有“M”的衍射,来自周期分别为 3.0 和 3.5 nm 多层膜磁性/非磁性周期所致;(c),(f)为$[\bar{1}11]_{Mo}$,$[001]_{Mo}$和$[1\bar{1}0]_{NiFe}$及其孪晶的合成电子衍射.

和体心立方Mo之间有取向关系:

$$S_1 \quad (110)_{Mo} /\!/ (111)_{NiFe}, \quad [\bar{1}11]_{Mo} /\!/ [1\bar{1}0]_{NiFe},$$

$$S_2 \quad (110)_{Mo} /\!/ (111)_{NiFe}, \quad [001]_{Mo} /\!/ [1\bar{1}0]_{NiFe}.$$

从以上电子衍射结果可知,Mo 层的厚度影响多层膜的结构.当 Mo 层的厚度为 0.7 nm 时,多层膜为非晶.Mo 层的厚度为 1.6 和 2.1 nm 时,磁性 NiFe 层为面心立方多晶结构,非磁性 Mo 层为体心立方多晶,且以 $(110)_{Mo} /\!/ (111)_{NiFe} /\!/$ Si 表面的方式择优取向生长,NiFe 与 Mo 层有如上取向关系.

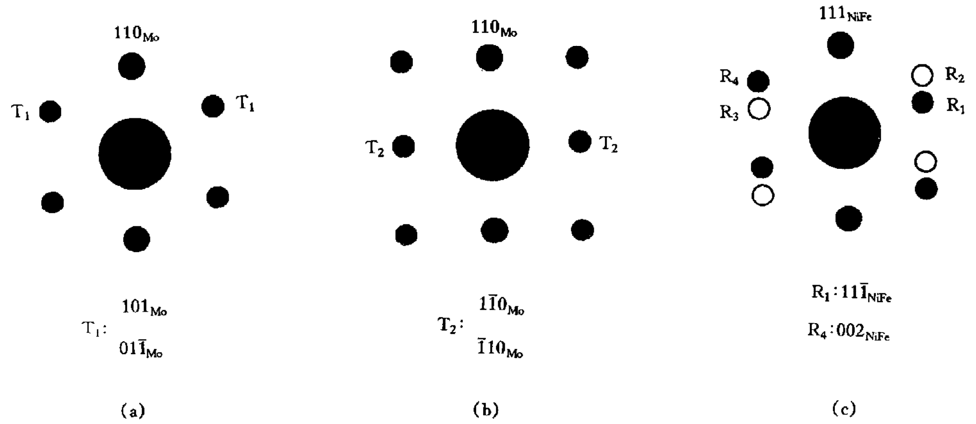


图 4　对应图 3(c),(f)合成电子衍射谱示意图　(a)为体心立方 Mo 的$[\bar{1}11]_{Mo}$衍射;(b)为$[001]_{Mo}$带轴衍射;(c)为面心立方 NiFe 的$[1\bar{1}0]_{NiFe}$带轴衍射.三者叠加可得图 3(c)或(f)

3.2　多层膜截面的高分辨观察

图 5 示出 Mo 层厚度为 0.7 nm 的磁性多层膜样品的高分辨像.图中除黑框区域显示面间距约为 0.21 nm 的晶格条纹外,大部分区域均为非晶.根据 Mo 原子对电子有较大的散射因子,并且改变欠焦量时诸层的明暗衬度不反转,确定较暗衬度层为Mo层,较亮衬度层为 NiFe 层.由图 5 可见,NiFe 层和 Mo 层之间没有明晰的界面.

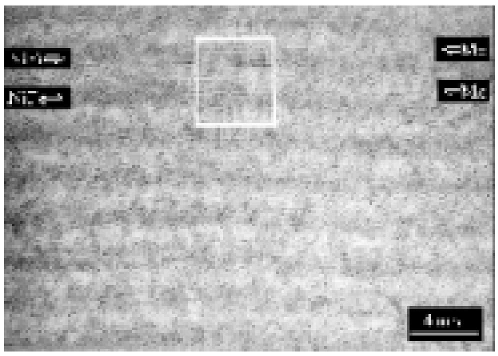


图 5　Mo 层厚度为 0.7 nm 样品的高分辨像

图 6(a)示出 Mo 层厚度为 1.6 nm 的磁性多层膜截面样品的高分辨低倍像.较暗衬度层为 Mo 层,较亮衬度层为 NiFe 层.箭头"GD"标出了多层膜的生长方向.将标有"N"的区域放大,得到图 6(b).NiFe 和 Mo 晶粒之间的区别可根据晶面间距和夹角关系确定.为了便于说明,图中三个区域分别标有"A","B"和"C",其晶面间取向关系分别如图 7(a)—(c)所示.在区域 A 中,面心立方 NiFe 的$[1\bar{1}0]_{NiFe}$平行于体心立方 Mo 的$[\bar{1}11]_{Mo}$.在标有"I"的界面处 NiFe 一侧,可见两个用箭头标示出的失配位错,它是由于 NiFe 和 Mo 之间点阵失配而引起.从

这张高分辨像中可看出,NiFe 和 Mo 晶粒之间有取向关系:

$$S_1 \qquad (110)_{Mo} /\!/ (111)_{NiFe}, \quad [\bar{1}11]_{Mo} /\!/ [1\bar{1}0]_{NiFe}.$$

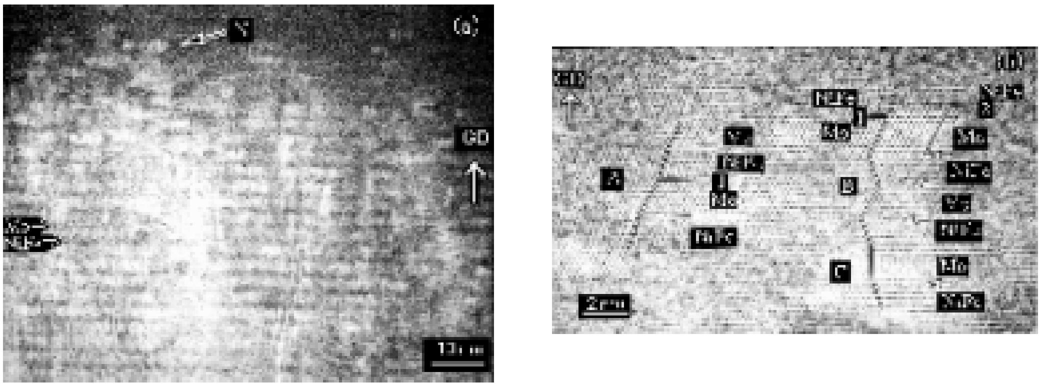


图 6 (a)为 Mo 层厚度为 1.6 nm 样品的低倍高分辨像,较暗衬度的层为 Mo 层,较亮衬度的层为 NiFe 层.箭头 GD 标出了多层膜的生长方向.(b)为在(a)中标有"N"的区域的高倍高分辨像.A,B,C 标识的三个区域显示不同取向关系

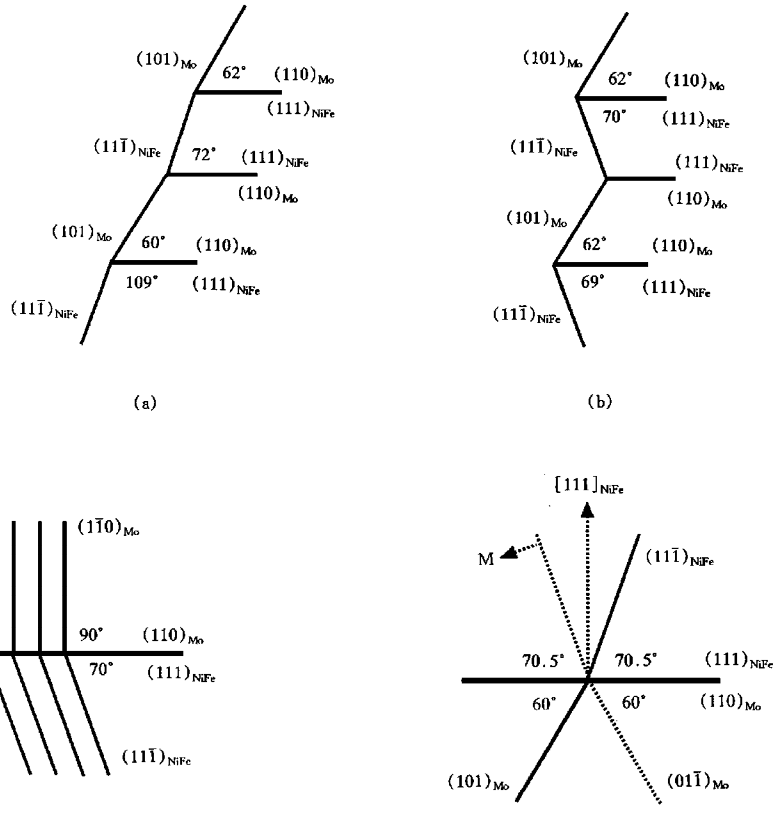


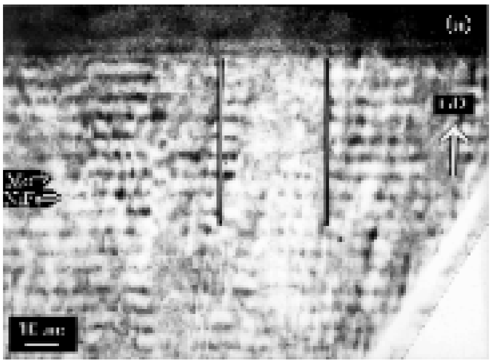
图 7 图 6 所示晶面关系示意图 (a),(b),(c)分别对应图 6 中 A,B,C 区;(d)说明孪晶关系

在区域 B, $[1\bar{1}0]_{NiFe}$平行于$[\bar{1}11]_{Mo}$. 界面由水平箭头指出. 在此区域的 NiFe 和 Mo 晶粒之间也有 S_1 取向关系. 但是, 有趣的是, 区域 A 内 NiFe 晶粒的$(11\bar{1})_{NiFe}$面和区域 B 内 NiFe 晶粒的$(11\bar{1})_{NiFe}$面并非平行, 而是有一以$[111]_{NiFe}$为孪晶轴的孪晶取向关系, 如图 7(d)中$(11\bar{1})_{NiFe}$和晶面"M"所示. 这种取向关系将会得到类似图 4(c)的孪晶电子衍射谱. 在标有"C"的区域, NiFe 和 Mo 之间有取向关系：

$$S_2 \qquad (110)_{Mo} /\!/ (111)_{NiFe}, \quad [001]_{Mo} /\!/ [1\bar{1}0]_{NiFe}.$$

以上区域 NiFe 层和 Mo 层之间界面清晰且近乎完整. 然而, 有些区域的 NiFe 和 Mo 界面有台阶, 如图 6(b)右上角区域所示. 此处 NiFe 和 Mo 晶粒的界面"1","2"不在同一个水平面上, 而是相隔两个原子面, 即它们的界面之间有两个原子面的台阶.

图 8(a)示出 Mo 层厚度为 2.1 nm 的多层膜的低倍高分辨像. 将此低倍像的两条黑线之间区域放大, 得到图 8(b). 图中用字母 A, B, C, D 和 E 标出了 5 个区域. 这些区域中, NiFe 和 Mo 晶粒的宽度也为 2—6 nm, 它们的界面分别由水平线或水平箭头标出, 晶面间关系分别如图 9(a)—(e)所示.



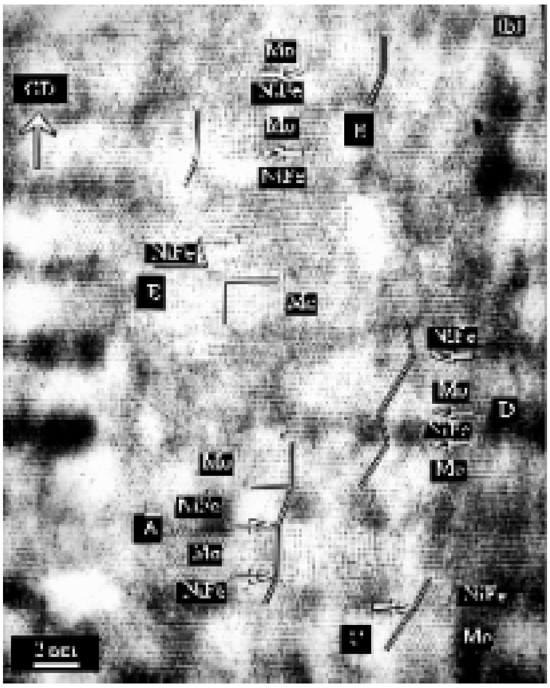


图 8　(a)为 Mo 层厚度为 2.1 nm 的多层膜的低倍高分辨像；(b)为低倍像的两条黑线之间区域的高倍高分辨像, 显示界面结构和取向关系

在区域 A 和 B, $[1\bar{1}0]_{NiFe} /\!/ [001]_{Mo}$, 两者具有 S_2 取向关系. 在区域 C 和 D, $[1\bar{1}0]_{NiFe} /\!/ [\bar{1}11]_{Mo}$, 两者具有 S_1 取向关系. 这些区域的磁性/非磁性层界面清晰且完整. 但是, 在某些区域的界面附近, 晶格点阵的扭曲显得比较明显, 如区域 E 内的 NiFe 和 Mo 晶粒之间的界面区域.

从以上高分辨观察可知, 在 Mo 层厚度为 0.7 nm 的多层膜中, 非晶的 NiFe 和 Mo 层

之间有粗糙的界面. 在 Mo 层厚度为 1.6 和 2.1 nm 的多层膜中, 磁性/非磁性层之间存在清晰的界面, 其间具有 S_1, S_2 两种取向关系.

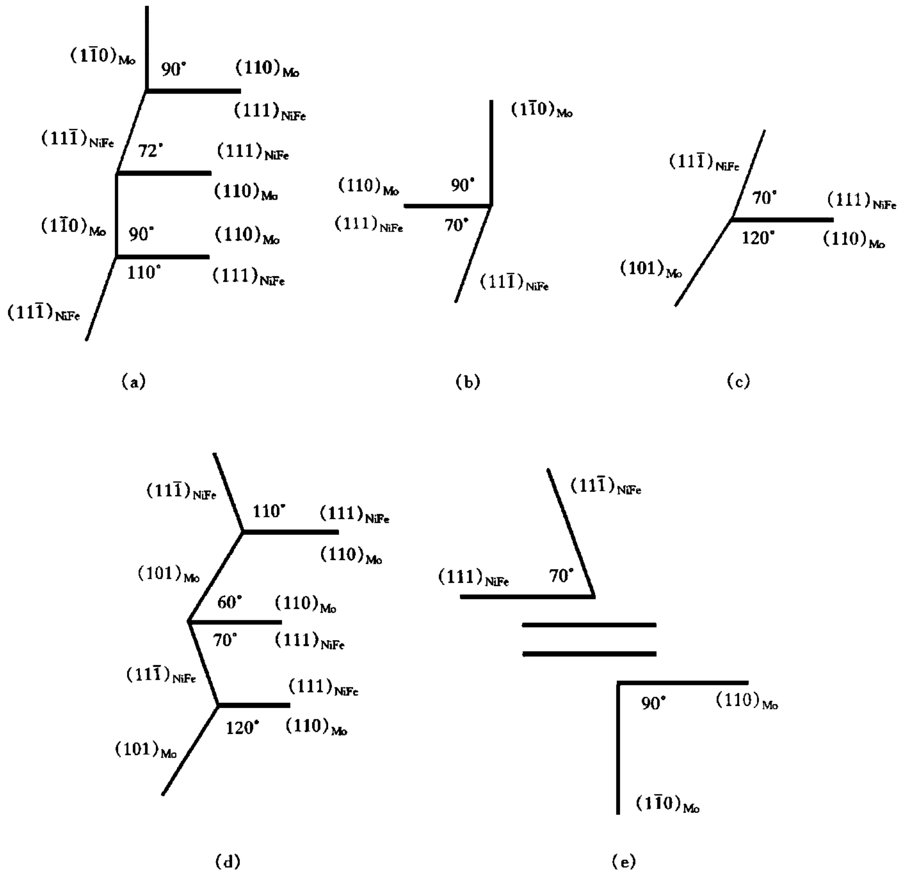


图 9　图 8(b)中区域 A, B, C, D 和 E 的晶面关系示意图

3.3　点阵失配

如以上电子衍射和高分辨结果所示, Mo 层厚度为 1.6 和 2.1 nm 的多层膜中, 面心立方 NiFe 和体心立方 Mo 之间有 S_1, S_2 两种取向. 若用坐标可以分别表述为如图 10(a)和(b)所示的取向关系:

S_1　　$[110]_{Mo}/\!/[111]_{NiFe}$,　$[1\bar{1}2]_{Mo}/\!/[11\bar{2}]_{NiFe}$,　$[\bar{1}11]_{Mo}/\!/[1\bar{1}0]_{NiFe}$,

S_2　　$[110]_{Mo}/\!/[111]_{NiFe}$,　$[1\bar{1}0]_{Mo}/\!/[11\bar{2}]_{NiFe}$,　$[001]_{Mo}/\!/[1\bar{1}0]_{NiFe}$.

在 S_1, S_2 两种取向关系中, 生长平面内 NiFe 层原子的排列方式均如图 10(c)所示, Mo 层原子的排列方式分别如图 10(d)和(e)所示.

按体材料晶格常数计算, 在 S_1 取向关系中, NiFe 层和 Mo 层的界面上, 沿$[11\bar{2}]_{NiFe}$方向, 晶格点阵大小比例为 1:1.18, 所以图 6(b)区域 A 的界面"I"上, 5 个 Mo 的$(101)_{Mo}$晶面与 6 个 NiFe 的$(11\bar{1})_{NiFe}$晶面匹配, 引入一个 NiFe 的失配位错. 沿$[1\bar{1}0]_{NiFe}$的观察方向

上,NiFe 和 Mo 层的点阵的失配度为 8.4%.

在 S_2 取向关系中,NiFe 和 Mo 层的界面上,沿$[11\bar{2}]_{NiFe}$方向,晶格点阵的失配度仅为 2.4%.因为这种失配小,NiFe 和 Mo 层的点阵在界面上几乎匹配.这种匹配可以在图 6(b)区域 C 的界面和图 8(b)区域 A 的界面上观察到.在沿$[1\bar{1}0]_{NiFe}$,即电子束观察方向上,NiFe 的点阵和 Mo 的点阵的失配应为 24.9%.

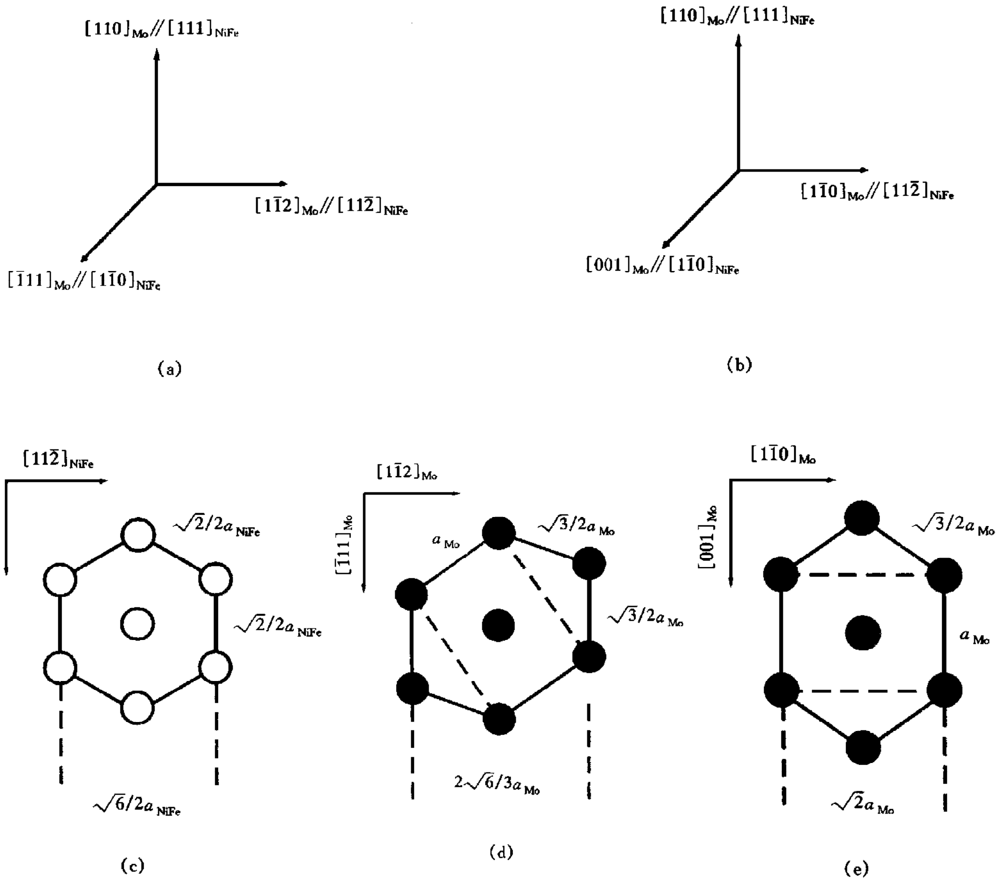
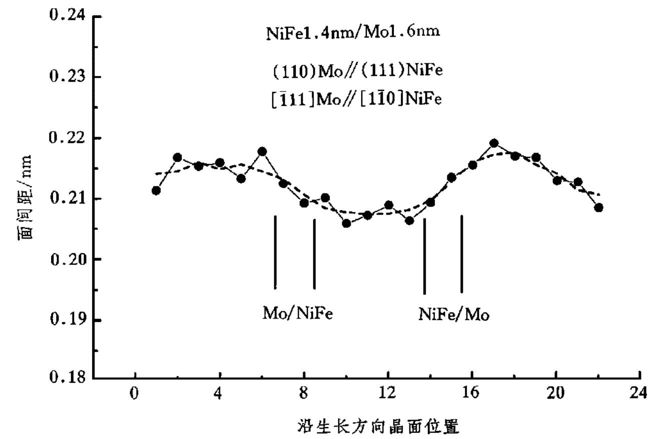


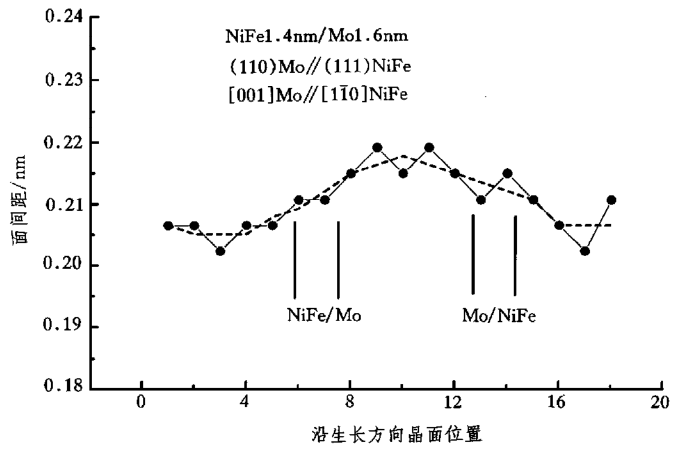
图 10　S_1(a)和 S_2(b)取向关系坐标示意图和在两种取向关系中,生长平面内 NiFe 原子的排列方式示意图(c),以及 Mo 层原子的排列方式示意图(d),(e)

3.4　界面附近面间距沿生长方向的变化

对 Mo 层厚度为 1.6 和 2.1 nm 的多层膜,在 NiFe/Mo 界面处沿生长方向上的面间距变化进行测量统计,测量结果分别如图 11(a),(b)和图 12(a),(b)所示.从这些图可以发现一个共同规律:NiFe/Mo 和 Mo/NiFe 界面附近 3—4 个原子面区域内,原子面间距存在逐渐变化的趋势.与相应的体材料相比(面心立方 NiFe, $d_{111}=0.205$ nm;体心立方 Mo, $d_{110}=0.222$ nm),界面区域 NiFe 的晶面间距膨胀,Mo 的晶面间距压缩.



(a) 具有 S_1 取向关系的 NiFe/Mo 和 Mo/NiFe 界面处的面间距



(b) 具有 S_2 取向关系的 NiFe/Mo 和 Mo/NiFe 界面处的面间距

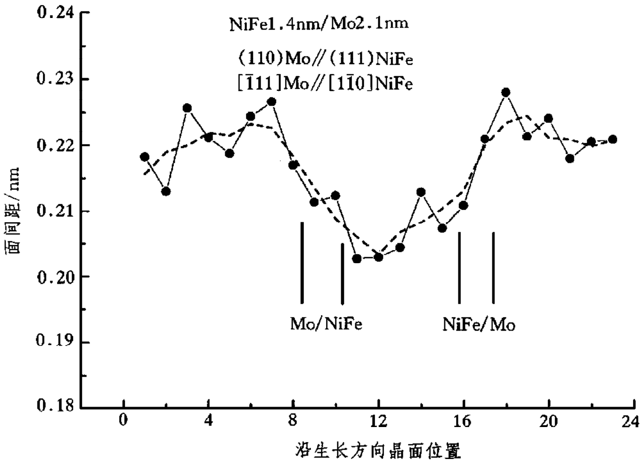
图 11 Mo 层厚度为 1.6 nm 的多层膜中,具有清晰界面的 NiFe 层和 Mo 层界面处沿生长方向上的面间距变化
● 为测量值;---为光滑值

4 讨 论

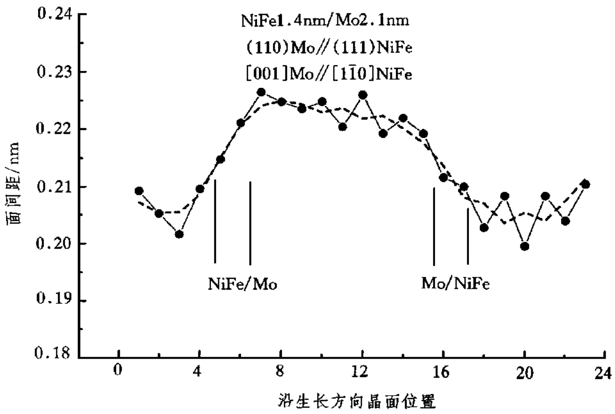
4.1 界面附近面间距沿生长方向的变化

如上所述,在 Mo 层厚度为 1.6 和 2.1 nm 的多层膜中的那些界面清晰的区域,界面附近 3—4 个原子面区域内,面间距存在逐渐变化的趋势. NiFe 的面间距沿生长方向膨胀,Mo 的面间距压缩. 以下讨论这种面间距变化的原因.

首先,从生长平面上的点阵失配来考虑. 在两种取向关系中,沿所有方向上,NiFe 的晶格都小于 Mo 的晶格. 在界面上为达到 NiFe 层和 Mo 层的共格生长,生长平面内 NiFe



(a) 具有 S_1 取向关系的 NiFe/Mo 和 Mo/NiFe 界面处的面间距



(b) 具有 S_2 取向关系的 NiFe/Mo 和 Mo/NiFe 界面处的面间距

图 12　Mo 层厚度为 2.1 nm 的多层膜中,具有清晰界面的 NiFe 层和 Mo 层界面处沿生长方向上的面间距变化
图注同图 11

的晶格应该膨胀,Mo 的晶格应该压缩.按 Poisson 原理[9],某个方向上晶格膨胀(压缩),那么相应垂直方向上的晶格会压缩(膨胀).据此,界面处生长方向上 NiFe 的晶格应该压缩,Mo 的晶格应该膨胀.但是,实际上两种多层膜两种取向的界面处,生长方向上 NiFe 的晶格膨胀,Mo 的晶格压缩变小.可见,还不能用 Poisson 原理来简单解释这种生长方向上的面间距变化.

其次,从界面处的原子互溶可以考虑这种生长方向上面间距的变化.从 Ni-Fe-Mo 三元合金相图可知[10],一定量的 Mo 原子可以溶于 NiFe 中,同时,我们也不能排除有极少量的 NiFe 原子溶于界面附近 Mo 层的可能性.所以这种面间距的过渡变化也可能是界面处少量原子的互溶造成的.

这种清晰界面区域面间距的变化，还可能来自于界面上原子的键能的改变[11]，或者界面区域一种原子对另外一种元素晶格的 Kanzaki 力的作用[12]. 这将会在多层膜中，沿生长方向上产生一个弹性位移场，从而使多层膜沿生长方向上的面间距（与体材料相比）发生改变. 而在界面区域，这种变化最为显著[11,13]，所以在 NiFe/Mo 多层膜界面区域，NiFe 的面间距膨胀，Mo 的面间距压缩.

这种界面处面间距的变化特征，Au/Ni 多层膜中也存在[9]. 在界面区域，Au 层的原子面间距沿生长方向上压缩，Ni 层的原子面间距膨胀. 虽然 NiFe/Mo 系统中 NiFe 与 Mo 的生长关系并不同于 Au/Ni 系统中的 Au, Ni 的外延，但是，两种多层膜系统却具有共同特征，即沿生长方向上，具有较小面间距的层膨胀，具有较大面间距的层压缩. 这种界面区域附近沿生长方向上面间距变化规律的普遍性有待深入研究.

应该指出，在 NiFe/Mo 多层膜中，界面区域沿生长方向上面间距的压缩和伸长将对多层膜的电子能带结构[14]、电、磁性质有极大的影响[11]. GMR 效应在此多层膜系统中未出现，有可能与这种界面的面间距变化有关.

4.2 微结构和磁性质的关系

NiFe/Mo 多层膜具有较好的 FM 性耦合到 AFM 性耦合的振荡特性. 但是，在 AFM 性耦合的 NiFe/Mo 多层膜（Mo 层厚度为 $t_{Mo}=0.7$ 和 1.6 nm）中，则未出现 GMR 效应，基于 NiFe/Mo 多层膜微结构和界面微结构特征，讨论如下：

在 Mo 层厚度为 0.7 nm 的多层膜中，存在大量的非晶. 根据普遍结论可知[15]，这种非晶对电子的散射非常强烈，使得电子（包括自旋朝上、自旋朝下）的平均自由程很小，不满足电子平均自由程与层厚的关系条件 $\lambda \gg d$[16]，所以这种多层膜不出现 GMR 效应.

在 Mo 层厚度为 1.6 nm 的多层膜中，NiFe 和 Mo 晶粒的宽度仅为几个纳米. 参考 Co/Cu 多层膜中晶粒尺寸对 GMR 效应的影响[17]，可以认为，这种 NiFe/Mo 多层膜中小颗粒会限制传导电子在 NiFe 层内的平均自由程，降低 NiFe 层内的自旋相关散射的非对称度. 同时，在 NiFe/Mo 多层膜的界面区域，可能有极少量的 Mo 原子溶解在 NiFe 层中而形成厚度为几个原子层的 Ni-Fe-Mo 合金层. 这种含少量 Mo 原子的合金有很高的电阻率，导致 NiFe/Mo 多层膜具有大的电阻，降低传导电子的平均自由程和界面上自旋相关散射的非对称度. 基于以上的原因，此多层膜中不出现 GMR 效应.

5 结 论

利用高分辨电子显微学方法，研究了 $Ni_{80}Fe_{20}$/Mo 磁性多层膜的显微结构和界面结构特征：(1) 多层膜的结晶状态，随 Mo 非磁性层厚度而变化. 当 Mo 层厚度为 0.7 nm 时，多层膜基本为非晶；当 Mo 层厚度大于 1.6 nm 时，Mo 和 NiFe 分别结晶为体心立方和面心立方多晶. 层内晶粒尺寸为 2—6 nm. (2) 在 Mo 层厚度为 1.6 和 2.1 nm 的多层膜中，体心立方 Mo 层和面心立方 NiFe 层存在择优取向生长，Mo 层和 NiFe 层之间的晶粒存在两种取向关系：$(110)_{Mo} /\!/ (111)_{NiFe}$，$[\bar{1}11]_{Mo} /\!/ [1\bar{1}0]_{NiFe}$ 和 $(110)_{Mo} /\!/ (111)_{NiFe}$，$[001]_{Mo} /\!/ [1\bar{1}0]_{NiFe}$. (3) NiFe 和 Mo 层之间有较清晰的界面. 界面附近 3—4 个原子层范

围内,NiFe 和 Mo 层的面间距逐渐变化并沿生长方向分别膨胀和压缩(相对块状晶体).界面处面间距的变化可能源于界面处原子混合和(或)键能的改变.如上结构特征可能导致 NiFe/Mo 系统未显示 GMR 效应.

感谢面间距测量工作中孙海平的大力帮助和有益的讨论.

[1] P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Pang, M. B. Brodsky, H. Sowers, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 2442.
[2] M. N. Baibich *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 2472.
[3] M. E. Brubaker, J. E. Mattson, C. H. Sowers, S. D. Bader, *Appl. Phys. Lett.*, **58**(1991), 2306.
[4] Z. Q. Qiu, J. Pearson, A. Berger, S. D. Bader, *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992), 1398.
[5] Z. Q. Qiu, J. Pearson, S. D. Bader, *J. Appl. Phys.*, **73**(1993), 5765.
[6] M. L. Yan, W. Y. Lai, Y. Z. Wang, S. X. Li, C. T. Yu, *J. Appl. Phys.*, **77**(1995), 1816.
[7] M. L. Yan, W. Y. Lai, G. M. Luo, Z. H. Mai, *J. Phys.: Condens. Matter*, **8**(1996), L711.
[8] G. M. Luo, M. L. Yan, Z. H. Mai, W. Y. Lai, Y. T. Wang, *Phys. Rev.*, **B56**(1997), 3290.
[9] A. F. Jankowski, *J. Appl. Phys.*, **71**(1992), 1782.
[10] ASM Handbook, Ternary Alloy Phase Diagrams, Vol. **3**(Materials Park, Ohio: ASM International, C1992), p. 54.
[11] A. Jankowski, T. Tsakalakos, *Materials Science and Engineering*, **B6**(1990), 87.
[12] H. Kanzaki, *J. Phys. Chem. Solids*, **2**(1957), 24.
[13] T. Tsakalakos, A. G. Khachaturyan, *Materials Science and Engineering*, **B6**(1990), 123.
[14] C. S. Baxter, W. M. Stobbs, *Nature*, **322**(1986), 814.
[15] B. Y. Jin, J. B. Ketterson, *Advances in Physics*, **38**(1989), 189.
[16] R. L. White, *IEEE Transactions on Magnetics*, **28**(1992), 2482.
[17] A. R. Modak, D. J. Smith, S. S. P. Parkin, *Phys. Rev.*, **B50**(1989), 4232.

HREM STUDY OF THE INTERFACIAL STRUCTURE OF NiFe/Mo MAGNETIC MULTILAYERS

GAO YI-HUA ZHANG ZE
(*Beijing Laboratory of Electron Microscopy and Center for Condensed Matter Physics, Academia Sinica, Beijing* 100080)
YAN MING-LANG LAI WU-YAN
(*State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing* 100080)
(Received 15 December 1997)

ABSTRACT

The $[(Ni_{80}Fe_{20})_{1.4nm}/Mo_{xnm}]_{30}$ magnetic multilayers($x=0.7, 1.6, 2.1$) have been investigated by selected area electron diffraction and high resolution electron microscopy (HREM). It is revealed that: (a) The structure of the NiFe/Mo multilayer changes with the increase of the thickness of Mo spacer-layer. The NiFe and Mo layers are mainly amorphous as the Mo spacer is 0.7 nm in thickness, and crystallized into polycrystalline fcc NiFe and bcc Mo layers as the Mo spacer is thicker than 1.6 nm. (b) For the multilayers with Mo spacer of 1.6 nm and 2.1 nm in thickness, there are two types of orientation relationship between the fcc NiFe and bcc Mo: $(110)_{Mo}//(111)_{NiFe}$, $[\bar{1}11]_{Mo}//[1\bar{1}0]_{NiFe}$ and $(110)_{Mo}//(111)_{NiFe}$, $[001]_{Mo}//[1\bar{1}0]_{NiFe}$. (c) The NiFe /Mo interfaces are sharp in case (b) but the lattice spacing varies near the interface region as the lattice spacing of NiFe expands and that of Mo contracts with respect to their bulk counterparts. The variation of lattice spacing near the interfacial region has been discussed and the absence of giant magneto-resistance has been interpreted by the structural characteristics of the multilayers.

PACC: 6116D; 7570