

# 磁性多层膜的穆斯堡尔谱研究\*<sup>■</sup>

黄志高

(福建师范大学物理系 福州 350007)

摘 要 评述了磁性多层膜中磁层、界面和非磁层的结构及磁性的穆斯堡尔谱研究的新进展,并展望了今后的研究方向.

关 键 词 穆斯堡尔谱 磁性多层膜 磁性

分 类 号 O481

## 1 引言

自从 1986 年在 Fe/Cr/Fe 三明治中发现反铁磁性耦合及 1988 年在 Fe/Cr 多层膜中发现巨磁阻(GMR)效应以来<sup>[1, 2]</sup>, Parkin 等<sup>[3]</sup>和 Okuno 等<sup>[4]</sup>相继在许多种类的多层膜和超晶格中观察到了反铁磁耦合和 GMR 效应,并发现了磁性耦合常数不仅随非磁性层厚度变化而且随磁性层厚度作周期性的衰减振荡.为了解释这些行为,人们提出了不同的模型,Fert 等<sup>[5]</sup>对此作了很好的评论.磁层间的交换耦合和 GMR 效应都起因于磁层/非磁层(M/NM)的界面散射所引起的自旋极化电子穿越非磁层并在磁性薄膜间的传播.所以交换耦合和 GMR 效应理论的焦点问题是界面的粗糙度引起的电子自旋相关散射.从经典的角度看,界面粗糙度引入了界面的反射和透射系数;从量子角度看,它引入了自旋相关散射势.Idzerda 等<sup>[6]</sup>根据 XY 模型直观地表示了三明治结构的 GMR 与外加磁场和  $\alpha$  的关系为:  $GMR(H) = G \sin^2 \alpha$ , 这里  $G$  表示 GMR 系数,  $\alpha$  表示两个磁层中磁化强度的相对夹角.从这一关系式中可以看到, GMR 与磁层中的磁化强度的取向有密切的关系.所以,从实验上研究 M/NM 界面、M 层的结构与磁性及 NM 层的自旋极化,对进一步探讨 GMR 的机理有重要的意义.

由于超精细参数(超精细场、电四极矩和同质异能移位)对结构、配位、价态等非常灵敏,所以穆斯堡尔谱在研究固体材料的电子结构、晶体结构、磁性、相变和缺陷等方面提供了很有效的办法.在磁性多层膜中,人们已经开展了多种类型的多层膜的穆斯堡尔谱研究,典型的有: 3d 金属/3d 金属(3d 金属为 V, Cr, Fe, Co, Ni 和 Cu 等); 3d 金属/4d 或 5d 金属(Zr, Mo, Rh, Ag, Ir, Pt 和 Au 等); 3d 金属/4f 稀土金属(Tb, Eu 和 Nd 等)<sup>[7~22]</sup>. 一般采用了透射穆斯堡尔谱(TMS)和内转换电子穆斯堡尔谱(CEMS)技术,以及 <sup>57</sup>Fe、<sup>119</sup>Sn、<sup>197</sup>Au 和 <sup>151</sup>Eu 等核素进行测量和研究.本文评述了利用穆斯堡尔谱研究磁性多层膜的 M、NM 层及其界面的结构及磁性的新进展.

## 2 磁性多层膜的穆斯堡尔谱研究

### 2.1 不同 M、NM 层厚度的 TMS 或 CEMS

制备不同的 M、NM 厚度的  $[M/NM]_n$  多层膜,并测量它们的 TMS 或 CEMS,经过计算机拟合可以确定出其中所包含的各磁相谱的磁性、面积比及其对应的来源(来源于界面, M 层或 NM 层).通过分析各子谱的磁特性和面积百分比随 M、NM 层厚度的变化关系,从而研究界面、M 层、NM 层的结构和磁性质<sup>[7~12]</sup>.

■ 收稿日期: 1998 - 03 - 12, 改稿日期: 1998 - 06 - 15.

\* 福建省自然科学基金(项目号 MD95)资助.

图 1(a)~(d)分别给出了溅射的 Tb/Fe 多层膜( $d_{Tb}=2\sim 19\text{ \AA}$ ,  $d_{Fe}=2\sim 33\text{ \AA}$ )的几个

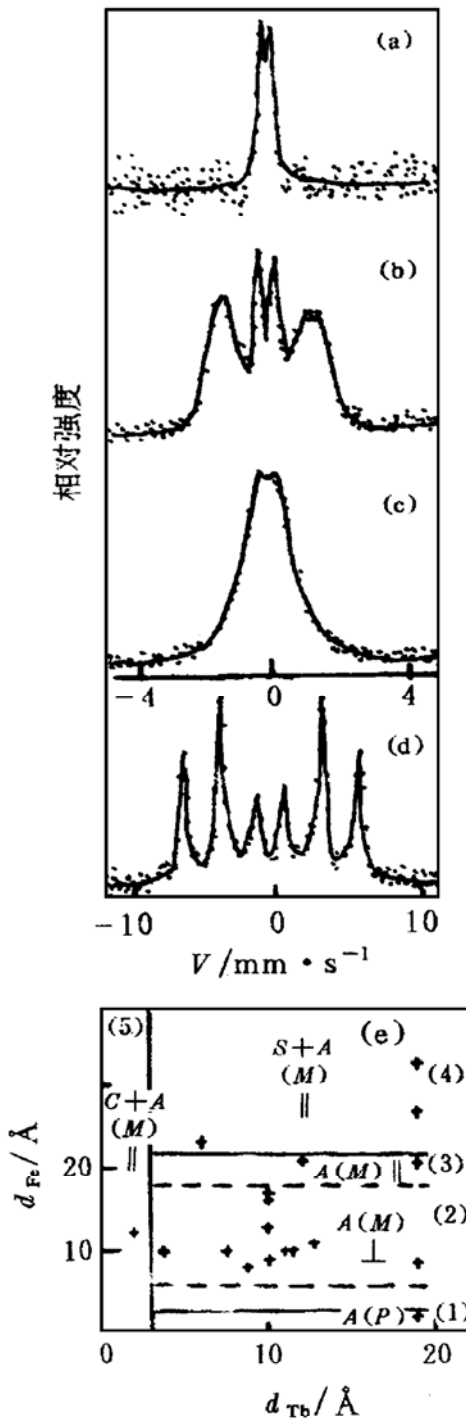


图 1 Tb/Fe 多层膜几个典型的 CEMS 和磁相图

(a)  $d_{Fe}=2.2\text{ \AA}$ ,  $d_{Tb}=19.0\text{ \AA}$ ; (b)  $d_{Fe}=12.8\text{ \AA}$ ,  $d_{Tb}=10.0\text{ \AA}$ ; (c)  $d_{Fe}=21\text{ \AA}$ ,  $d_{Tb}=10.0\text{ \AA}$ ; (d)  $d_{Fe}=33.0\text{ \AA}$ ,  $d_{Tb}=19.0\text{ \AA}$ ; (e) ( $d_{Tb}$ ,  $d_{Fe}$ )的磁相图. C 代表晶态, A 代表非晶态, M 代表磁性的, m 代表弱磁的, P 代表顺磁; || 代表平面各向异性, ⊥ 代表垂直各向异性.

典型膜的 CEMS, 图 1(e)给出了该系列多层膜的结构和磁性( $d_{Tb}$ ,  $d_{Fe}$ )的磁相图<sup>[8]</sup>. 从图中可以看到, 随着  $d_{Tb}$ 、 $d_{Fe}$  的变化, 存在 5 个磁性区: (1)区,  $d_{Tb} > 3.5\text{ \AA}$ ,  $d_{Fe} \leq 3\text{ \AA}$ , CEMS 为顺磁谱, 同质异能移位  $\delta = -0.12\text{ mm/s}$ , 接近于非晶相, 故该区为非晶顺磁区; (2)区,  $d_{Tb} \geq 3.5\text{ \AA}$ ,  $5\text{ \AA} \leq d_{Fe} \leq 18\text{ \AA}$ , CEMS 为典型的非晶态铁磁谱, 其  $\bar{H}_{hf}$  为 15 T,  $\delta = -0.08\text{ mm/s}$ , 具有垂直磁各向异性, 故该区为非晶铁磁区; (3)区,  $d_{Tb} \geq 3.5\text{ \AA}$ ,  $18\text{ \AA} \leq d_{Fe} \leq 22\text{ \AA}$ , CEMS 为弱的非晶态铁磁谱, 其  $\bar{H}_{hf} = 6.0\text{ T}$ ,  $\delta = -0.20\text{ mm/s}$ , 具有平面磁各向异性; (4)区( $d_{Tb} \geq 3.5\text{ \AA}$ ,  $d_{Fe} \geq 23\text{ \AA}$ )和(5)区( $d_{Tb} \leq 3.5\text{ \AA}$ ), CEMS 为强的铁磁谱, 其中包含两种谱线, 之一为晶态的铁磁谱, 其  $\bar{H}_{hf} \approx 33\text{ T}$ ,  $\delta = 0\text{ mm/s}$ , 平面磁各向异性, 约占总谱面积的 65%; 之二为非晶态的铁磁谱, 其  $\bar{H}_{hf} \approx 16\text{ T}$ , 具有平面磁各向异性. 从上面的总结, 并结合 Richomme 等<sup>[13]</sup>和 Cherifi 等<sup>[14]</sup>的研究工作, 可以对上述的结果讨论如下: (1)当  $d_{Tb} \geq 3.5\text{ \AA}$  (约一个原子层的厚度),  $d_{Fe}$  越小, Fe、Tb 在界面处扩散得越严重, 那么便形成了多 Tb 配位的非晶态 Fe-Tb 合金, 故当  $d_{Fe} \leq 3\text{ \AA}$  时产生了非晶态顺磁体; 当  $3.5\text{ \AA} \leq d_{Fe} \leq 18\text{ \AA}$ , Fe 原子的 Tb 配位数减少, 但 Fe-Tb 的磁性耦合仍占主导地位, 并且由于 Tb 磁性原子有强的磁各向异性, 故形成了具有垂直磁各向异性较强的非晶态铁磁体; 当  $d_{Fe} \geq 18\text{ \AA}$  时, (3)区磁特性与(2)区相比有明显的差别, 这可能是因为  $d_{Fe}$  比参与界面混合的 Fe 层厚度的两倍还大, 故在铁层中出现了纯的非晶态 Fe; 在(4)和(5)区, 随着  $d_{Fe}$  的进一步增加或  $d_{Tb}$  的减少, Tb 原子的影响进一步减小, 这时在 Fe 层中心生长出了类似块状的 bcc-Fe 的晶态铁磁体, 而在边界处产生了低 Tb 的非晶态 Fe-Tb 合金磁谱.

Dufour 等<sup>[12]</sup>进行了 Fe/Si 多层膜两个系列(A 系列:  $d_{Si} = 35\text{ \AA}$ ,  $d_{Fe} = 10\sim 37\text{ \AA}$ ; B 系列:  $d_{Fe} = 25\text{ \AA}$ ,  $d_{Si} = 10\sim 37\text{ \AA}$ )的穆斯堡尔

谱研究. 结果表明, Si 层都是非晶态的, 约有 9 Å 厚的 Si 层参与每个 Fe/Si 界面的混合; 当  $d_{\text{Fe}} < 18 \text{ \AA}$  时, 形成了 a-Fe/a-Fe(a 表示非晶态); 当  $d_{\text{Fe}} > 23 \text{ \AA}$  时, 形成了  $\alpha$ -Fe/a-Si 结构; 当  $18 \text{ \AA} < d_{\text{Fe}} < 23 \text{ \AA}$  时, 形成了  $[\alpha\text{-Fe} + \text{a-FeSi}]/\text{a-Si}$  结构. 图 2 给出了 4.2 K 下 Fe/Si 多层膜典型的穆斯堡尔谱 ( $d_{\text{Si}} = 35 \text{ \AA}$ ,  $d_{\text{Fe}} = 10 \sim 37 \text{ \AA}$ ). 从两种系列多层膜在 4.2 K 和 300 K 下的穆斯堡尔谱可以得到: (1) 尖锐的六线谱 ( $\bar{H}_{\text{hf}} = 33 \text{ T}$ ) 对应于铁层中心处的 bcc-Fe, 每个 Fe 原子周围有 8 个 Fe 原子;

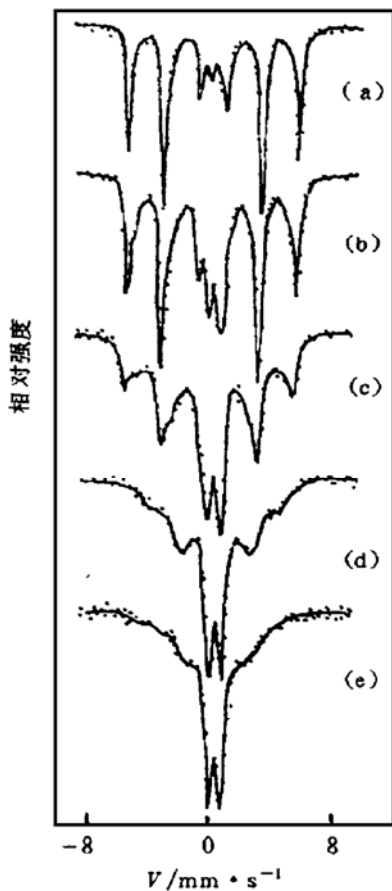


图 2 4.2 K 下 Fe/Si 多层膜 ( $d_{\text{Si}} = 35 \text{ \AA}$ ) 的穆斯堡尔谱

(a)  $d_{\text{Fe}} = 37 \text{ \AA}$ , (b)  $d_{\text{Fe}} = 22.5 \text{ \AA}$ , (c)  $d_{\text{Fe}} = 17.5 \text{ \AA}$ , (d)  $d_{\text{Fe}} = 15 \text{ \AA}$ , (e)  $d_{\text{Fe}} = 10 \text{ \AA}$ .

(2) 第二个尖锐的六线谱 ( $\bar{H}_{\text{hf}} = 29 \text{ T}$ ) 对应于靠近界面处的晶态 bcc-Fe(Si), 每个 Fe 原子周围有 7 个 Fe 原子和 1 个 Si 原子; (3) 谱中心处的双峰谱随 Fe 层厚度的增加而减少, 其对应于界面处富 Si 的非晶态 Fe-Si 合金; (4)

一个展宽的非晶态铁磁谱出现于小  $d_{\text{Fe}}$  的多层膜中, 它应当对应于 Fe/Si 界面的严重扩散, 使所有的铁层非晶化.

采用这种方法研究界面、磁层的磁特性的工作还有许多, 如 Fe/V、Fe/Mg、Fe/Ag<sup>[7]</sup>、Fe/Pt<sup>[9]</sup>、Fe/Ni<sup>[10]</sup> 和 Fe/Cu<sup>[11]</sup> 等.

## 2.2 探针式的穆斯堡尔谱研究

制备 0.5~2 单层的核素 (如 <sup>57</sup>Fe、<sup>119</sup>Sn) 薄层作为探测源置于 NM 层中的不同位置 (顶层、中心层和底层), 通过测量其相应的穆斯堡尔谱而获得界面、非磁层的结构和磁信息. Keavney 等<sup>[15]</sup> 以 <sup>57</sup>Fe 核素为探测源研究了  $[\text{<sup>56</sup>Fe}_9(100)/\text{Ag}_{40}(100)]_{25}$  多层膜的穆斯堡尔谱, 得到了 3 种情况 (<sup>57</sup>Fe 处于顶层、中心层和底层) 和不同温度下超精细参数有大的差别, 并证明了 Fe-on-Ag, Ag-on-Fe 两种界面是不一样的. Richomme 等<sup>[13]</sup> 利用同样的方法研究了  $[\text{<sup>56</sup>Fe}/\text{Tb}]$  多层膜, 得到了同样的结果. 下面主要介绍 Shinjo 小组<sup>[16]</sup> 利用 <sup>119</sup>Sn 核素为探测源研究 Co/Au 和 Co/Cu 的工作. 他们设计了 3 类的 Co/Au 多层膜 [其中 A 类:  $\text{Co}(20 \text{ \AA})/\text{Au}(x \text{ \AA})/\text{Sn}(1.5 \text{ \AA})/\text{Au}(x \text{ \AA})$ ; B 类:  $\text{Co}(20 \text{ \AA})/\text{Au}(x \text{ \AA})/\text{Sn}(1.5 \text{ \AA})/\text{Au}(40 - y \text{ \AA})$ ; C 类:  $\text{Co}(20 \text{ \AA})/\text{Au}(x \text{ \AA})/\text{Sn}(1.5 \text{ \AA})/\text{Au}(20 - y \text{ \AA})$ ], 并测量了这 3 类多层膜的 <sup>119</sup>Sn 的 TMS 谱. 对 <sup>119</sup>Sn 穆斯堡尔谱而言, 处于非磁环境下的 Sn 原子的穆斯堡尔谱是单峰的, 而处于磁环境下的 Sn 的穆斯堡尔谱是六线谱. 实验结果表明, 当  $x > 10 \text{ \AA}$  时, 测到的 TMS 是单峰谱, 意味这时 Sn 原子没有受到磁场的影响; 当  $x < 10 \text{ \AA}$  时, <sup>119</sup>Sn 的 TMS 为六线谱, 有非常大的超精细场 (约为 10.0 T), 这意味在离 Co 层 10 Å 之内的 Au 层中发生了传导电子的自旋极化, 导致了在 Sn 原子内超精细场的产生. 但是, B 和 C 类多层膜的研究结果却表明, Sn 的超精细场并不是简单地依赖于 Sn 离 Co/Au 界面的距离, 它还决定于 Au 层的厚度, 如对 Au 层厚为 40 Å 的 B 类样品, 即使 Sn 层离界

面  $5 \text{ \AA}$ , 还没有明显的磁分裂. 同样的结果也在 Co/Cu 多层膜中观察到<sup>[16]</sup>. 从实验上直接观察到 Co/Au、Co/Cu 多层膜中 Au 的传导电子的自旋极化, 对于探讨该类多层膜中出现的层间交换耦合和 GMR 效应的机制很有意义.

### 2.3 衬底温度和退火处理对多层膜的穆斯堡尔谱影响

通过改变磁性多层膜的衬底温度( $T_s$ )和退火温度( $T_a$ ), 测量其相应的穆斯堡尔谱, 从中可得到各种磁相的特征及面积比随  $T_s$  和  $T_a$  的变化关系, 从而可得到界面及磁层的结构和磁性质. Cherifi 等<sup>[14]</sup>详细地研究了  $T_s$  对 Tb( $17 \text{ \AA}$ )/Fe( $33 \text{ \AA}$ ) 多层膜的穆斯堡尔谱和磁各向异性的影响, 结果表明  $T_s = 90 \text{ K}$  和  $420 \text{ K}$  两种情况下的穆斯堡尔谱有大的差别, 除了起源于 Fe 薄膜中心的 bcc-Fe 的六线谱类似外, 起源于界面的非晶磁谱差别很大, 这表明衬底温度对界面有重要的影响.

在材料的研究和应用中, 退火处理是一种常见的方法. 自然, 退火处理对磁性多层膜的磁性和结构的影响也令人感兴趣. 人们已经对 Fe/Ni、Fe/Cu 和 Fe/Zr 等多层膜因退火而引起的界面扩散效应进行了穆斯堡尔谱研究<sup>[10, 17, 18]</sup>. 这里主要介绍 Kiauka 等<sup>[18]</sup>关于 Fe/Zr 多层膜的退火处理影响的研究. 他们测量了  $[80 \text{ \AA} \text{ Fe}/103 \text{ \AA} \text{ Zr } 12 \text{ 对}]$  多层膜的制备态及在  $660 \text{ K}$  下不同时间等温处理后的室温 CEMS. 制备态的 CEMS 为一典型的  $\alpha$ -Fe 的晶态谱并伴有一个非常弱的非晶的顺磁谱. 当退火后, 除了  $\alpha$ -Fe 晶态谱外, 还出现了明显的顺磁谱, 这表明在界面处退火状态下 Fe 和 Zr 原子间的固态反应产生了非晶态 Fe-Zr 合金. 从  $\alpha$ -Fe、非晶态 Fe-Zr 谱线的相对强度定义一个在界面处 Fe 层转变为非晶态 Fe-Zr 合金的厚度  $d_s$ . 从文献<sup>[18]</sup>中的结果可以看到: 制备态下  $d_s$  约为  $2 \text{ \AA}$ , 而在  $660 \text{ K}$  退火 1 小时后,  $d_s$  急增至  $10 \text{ \AA}$ ; 退火时间继续增加时,  $d_s$  变化缓慢达到饱和值

$17 \text{ \AA}$ . 另外, 从  $d_s$  随退火温度的变化关系中可以看到, 在  $450 \sim 765 \text{ K}$  范围内,  $d_s$  随退火温度的增加而增加; 在  $720 \text{ K}$  时, 达到饱和值  $20 \text{ \AA}$  左右.

### 2.4 磁性薄膜中磁矩分布的穆斯堡尔谱研究

磁性多层膜中磁性层的磁矩取向分布是一个重要的参数, 它对于理解这些材料所表现出来的反铁磁性耦合和巨磁阻效应的机制很有意义. Cherifi 等<sup>[8, 14, 19]</sup>从穆斯堡尔谱的各峰的面积比 ( $3 : A : 1 : 1 : A : 3$ ) 关系得到了磁层中磁性原子的磁矩  $M$  与  $\gamma$  射线间的平均夹角为  $\langle \psi \rangle$ , 其中

$$\langle \cos^2 \psi \rangle = (4 - A)/(4 + A). \quad (1)$$

若薄膜垂直于  $\gamma$  射线, 则可从  $\langle \psi \rangle$  中得到  $M$  与薄膜平面的夹角. 文献<sup>[8]</sup>从  $\langle \psi \rangle$  值出发讨论

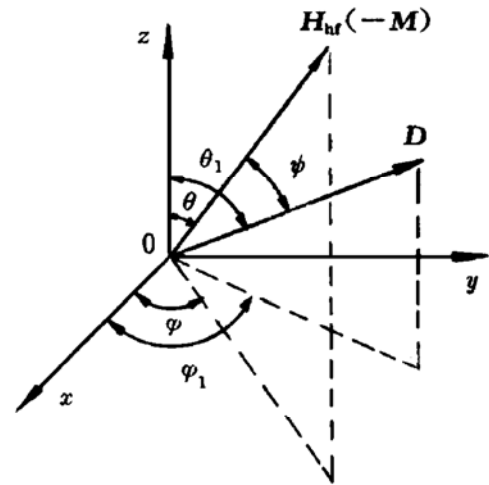


图 3 超精细场  $H_{\text{hf}}(-M)$  及  $\gamma$  射线方向的极坐标表示

了 Fe/Tb 多层膜的平面和垂直各向异性, 文献<sup>[14]</sup>详细地讨论了 Fe/Tb 多层膜的  $\langle \psi \rangle$  随  $T_s$  和样品温度的变化关系, 文献<sup>[19]</sup>研究了 Fe/Tb 多层膜的磁各向异性及外加磁场对磁结构的影响. 但是, 从(1)式得到的  $\langle \psi \rangle$  仅是平均的磁矩取向的信息, 所确定的  $M$  方向可以定位在一个圆锥面上的任一方向, 无法确定具体的方位. 最近, 笔者在研究非晶态磁性薄膜合金的磁矩分布和磁各向异性时提出了方位择优度  $P_0(D)$  和磁矩分布函数  $P(\theta, \varphi)$

的描述方法<sup>[20]</sup>, 对于更精确地得到磁性多层膜的磁结构有意义.

为了描述薄膜的磁结构的取向, 引入了方位择优度

$$P_0(\mathbf{D}) = \int P(\theta, \varphi) \cos^2 \psi d\Omega, \quad (2)$$

式中  $P(\theta, \varphi)$  表示磁矩空间分布几率. 按图 3 所示可以得到

$$\cos \psi = \cos(\mathbf{D} \cdot \mathbf{H}_{\text{hf}}) = \alpha_i \beta_i. \quad (3)$$

(3) 式中  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  分别表示  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{H}_{\text{hf}}$  的方向余弦. 把(3)代入(2)得到

$$\begin{aligned} P_0(\mathbf{D}) &= (4 - A)/(4 + A) \\ &= \sum_i P_i \beta_i^2 + 2D_x \beta_2 \beta_3 + \\ &\quad 2D_y \beta_3 \beta_1 + 2D_z \beta_1 \beta_2, \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} P_i = \int P(\theta, \varphi) \alpha_i^2 d\Omega \\ \quad (0 \leq P_i \leq 1) \\ D_i = \int P(\theta, \varphi) \alpha_j \alpha_k d\Omega \\ \quad (-0.5 \leq D_i \leq 0.5) \end{cases}, \quad (5)$$

式中,  $P_i (i=x, y, z)$  表示主轴上的择优度,  $D_i$  描述磁矩方向偏离主对称轴的统计平均状态, 且有

$$P_x + P_y + P_z = 1. \quad (6)$$

根据(5)和(6)式, 选择 5 种不同方位  $\mathbf{D}$ , 并测量其相应的角度因子  $A$  就可得到  $P_i$  和  $D_i$ . 若  $\mathbf{M}$  沿主轴高度对称 ( $D_i=0$ ), 则只选择两种不同方位  $\mathbf{D}$  并测量相应的  $A$  即可得到  $P_i$ .

设磁矩角分布函数为

$$\begin{aligned} P(\theta, \varphi) &= a_0 + a_1 \cos^2 \theta + a_2 \sin^2 \theta \cos 2\varphi + \\ &\quad a_3 \sin 2\theta \sin \varphi + a_4 \sin 2\theta \cos \varphi + \\ &\quad a_5 \sin^2 \theta \sin 2\varphi, \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $a_0 \sim a_2$  为对称参数,  $a_3 \sim a_5$  为偏离对

称参数. 把(7)代入(5)可得

$$\begin{cases} P_x = 4.18a_0 + 0.84a_1 + 1.68a_2 \\ P_y = 4.18a_0 + 0.84a_1 - 1.68a_2 \\ P_z = 4.18a_0 + 2.51a_1 \end{cases} \quad \text{和} \quad \begin{cases} D_x = 1.68a_3 \\ D_y = 1.68a_4 \\ D_z = 1.68a_5 \end{cases}. \quad (8)$$

若已知  $P_i$  和  $D_i (i=x, y, z)$ , 则从(8)式可以得到  $a_0 \sim a_5$ , 从而可以得到磁矩的空间分布函数, 文献[20]给出了 a-Fe-Co-Zr 合金薄膜的磁矩分布函数. 采用  $P(\theta, \varphi)$  描述薄膜的磁矩分布比  $\langle \psi \rangle$  可得到更多的信息.

### 2.5 <sup>197</sup>Au、<sup>119</sup>Sn 及 <sup>151</sup>Eu 的穆斯堡尔谱

Au/M ( $M = \text{Fe, Co, Ni}$ ) 是一类人们十分感兴趣的多层膜, 因为这类材料的磁层间耦合强度强烈地依赖于非磁夹层的厚度变化. 磁耦合的机制与非磁层的性质密切相关. 我们已在 2.2 节中介绍了利用 <sup>119</sup>Sn 为探测源研究 Au 层的电子状态, 证明了 Au 中传导电子的自旋极化. 文献[21]直接测量了 <sup>197</sup>Au 的 TMS, 图 4 给出了 Au(10 Å)/M ( $M$  为 Fe, Co, Ni) 多层膜的 <sup>197</sup>Au 的 TMS. 从图中看到, 纯 Au 的 TMS 为一窄的单峰谱, 其  $\delta$  为零. Au/M ( $M$  为 Fe, Co, Ni) 多层膜的 TMS 类似, 它们由两部分组成: 一部分是具有零  $\delta$  的窄的单峰, 它来源于 Au 层中心部分的 Au 原子, 其类似于块状的 Au 原子; 另一部分是具有正的  $\delta$  值的 3 个磁分量谱(双峰谱或宽的单峰谱), 这些谱起源于受到磁层强烈扰动的靠近界面的 Au 原子. 因为在 Fe/Au 中<sup>57</sup>Fe 尖锐的 TMS 六线谱已证实了 Fe/Au 界面不发生严重的扩散, 故排除了大百分比的磁分量谱由 Fe-Au 合金引起的可能性, 而这些磁分量谱应该是 Au/M 多层膜中 Au 层的传导电子的自旋极化所致.

文献[22]采用 <sup>57</sup>Fe 和 <sup>151</sup>Eu 研究了 Fe/Eu

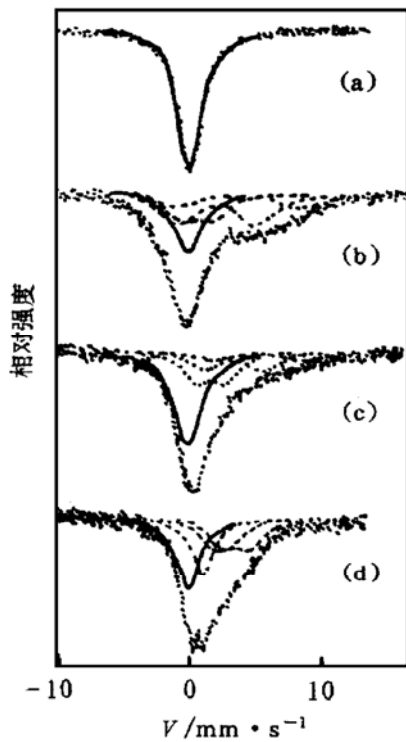


图 4 Au/M 多层膜的<sup>197</sup>Au 的 TMS  
(a) 纯 Au; (b) Au(10 Å)/Fe(8 Å), 11 K;  
(c) Au(10 Å)/Co(20 Å), 11 K; (d)  
Au(10 Å)/Ni(20 Å), 16 K.

和 V/Eu 多层膜, <sup>57</sup>Fe 的穆斯堡尔谱表明了 Fe/Eu 界面的扩散是不严重的, 存在尖锐的界面. <sup>151</sup>Eu 的 TMS 中有两部分: 一部分是来自内层 Eu 的具有大超精细场的 TMS; 另一部分是来自界面的具有小的超精细场的 TMS, 这种在界面处超精细场的减小是由于在 Eu 中传导电子的自旋极化. Eu 核处的超精细场起因于核心极化、原子核本身的 4f 电子引起的传导电子的极化以及近邻原子引起的传导电子的极化. 对于磁性 Eu 合金, 上述

第二、三项因磁性影响带来的变化而导致 Eu 核处超精细场的减小.

### 3 结束语

采用 TMS 或 CEMS 研究多层膜的磁层、界面和非磁层是一种很有有效的办法, 已经取得了许多有意义的结果. 但是, 笔者认为下列问题还有待进一步研究: (1) 对于具有磁性耦合周期振荡及 GMR 效应的多层膜, 磁性耦合、GMR 与界面层存在有密切的关系, 虽有不少工作定性地观察了这种关系, 但定量的比较还很少见. 所以, 有必要通过穆斯堡尔谱、磁矩、Kerr 效应及 GMR 的综合研究, 更定量地建立界面特征(扩散层厚度、磁性和粗糙度等)与磁性耦合、GMR 的关系; (2) 在已有利用多种穆斯堡尔谱的核素及其它实验手段研究非磁层的传导电子自旋极化工作中, 尚未建立起自旋极化的强弱与磁性耦合及 GMR 的关系, 进一步地建立起这种关系将是有意义的工作; (3) M/NM/M 三明治中, 左右两个磁层内的磁矩取向分布对于理解层间的磁性耦合、GMR 效应的机制很有帮助, 但目前还很少见到准确测量磁层中磁矩取向的报导. 故进一步采用穆斯堡尔谱和深度选择内转换电子穆斯堡尔谱分别得到 M<sub>1</sub>/NM/M<sub>2</sub> 三明治中 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 的各自取向, 将成为人们感兴趣的课题; (4) 在利用穆斯堡尔谱研究不同的制备技术对磁层、界面、非磁层的影响的工作, 还有许多问题有待探讨.

### 参 考 文 献

- 1 Grunberg P, Schreiber R, Pang Y *et al.* Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers across Cr Interlayer. *Phys Rev Lett*, 1986, 57: 2 442 ~ 2 445
- 2 Baibich M N, Broto J M, Fert A *et al.* Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. *Phys Rev Lett*, 1988, 61: 2 472 ~ 2 475
- 3 Parkin S S P, More N, Roche K P. Oscillations in Exchange Coupling and Magnetoresistance in Metallic Superlattice Structure Co/Ru, Co/Cr and Fe/Cr. *Phys Rev Lett*, 1990, 64: 2 304 ~ 2 307
- 4 Okuno S N, Inomata K. Two Oscillatory Behaviors as Functions of Ferromagnetic Layer Thickness in Fe/Cr (100) Multilayers. *Phys Rev Lett*, 1994, 72: 1 553 ~ 1 556
- 5 Fert A, Grunberg P, Barthelemy A *et al.* Layered

- Magnetic Structures: Interlayer Exchange Coupling and Giant Magnetoresistance. *J Magn Magn Mater*, 1995, 140~144: 1~8
- 6 Idzerda Y U, Chen C T, Cheng S F *et al.* Multidomain and Incomplete Alignment Effect in GMR Trilayers. *J Appl Phys*, 1994, 76: 6 525~6 527
  - 7 马如章, 徐英庭. 穆斯堡尔谱学, 北京: 科学出版社, 1996, 307~311, 391~395
  - 8 Fnidiki A, Richomme F, Teillet J *et al.* Tb/Fe Multilayers: A Study by Conversion Electron Mossbauer Spectrometry and Polar Kerr Effect. *J Magn Magn Mater*, 1993, 121: 520~523
  - 9 Fnidiki A, Douheret J S, Teillet J *et al.* Mossbauer Study of Fe/Pt Multilayers. *J Magn Magn Mater*, 1996, 156: 41~42
  - 10 Ramamurthy B A, Piramanayagam S N, Nigam A K *et al.* Mossbauer Study of Interface Mixing in Fe/Ni Multilayers. *J Magn Magn Mater*, 1995, 140~144: 555~556
  - 11 Roig A, Zhang X X, Zuberek R *et al.* Magnetic Properties of Fe/Cu Multilayers. *J Magn Magn Mater*, 1995, 140~144: 559~560
  - 12 Dufour C, Bruson A, Marchal G *et al.* Structure and Magnetic Profiles in Fe/Si Multilayers. *J Magn Magn Mater*, 1991, 93: 545~551
  - 13 Richomme F, Schole B, Brand R A *et al.* Modulated Structure and Magnetic Properties of UHV Deposited Fe/Tb Multilayers. *J Magn Magn Mater*, 1996, 156: 195~196
  - 14 Cherifi K, Dufour C, Picuch M *et al.* Interface and Magnetic Anisotropy in Tb/Fe Multilayers. *J Magn Magn Mater*, 1991, 93: 609~615
  - 15 Keavney D J, Wiczorek M D, Storm D F *et al.* Effects of Interfacial Roughness on Site-probed Multilayers of Fe(100)/Ag(100). *J Magn Magn Mater*, 1993, 121: 49~52
  - 16 Emote T, Hosoi N, Shinjo T. Spin Penetration in Au Layers:  $^{119}\text{Sn}$  Mossbauer Study of Co/Au Multilayers. *J Magn Magn Mater*, 1996, 156: 47~48; Shinjo T, Emotot, Kawawake Y *et al.* Mossbauer Study of Cu/Co and Au/Co Multilayers using  $^{119}\text{Sn}$ . *J Magn Magn Mater*, 1995, 140~144: 619~620
  - 17 Macedo W A A, Keune W, Ellerbrock E D. Magnetic Properties of Ultrathin Epitaxial fcc-Fe(001) Films on Cu(001) and  $\text{Cu}_3\text{Au}(001)$ . *J Magn Magn Mater*, 1991, 93: 552~556
  - 18 Kiauka W, Keune W, Shinjo T *et al.* Mossbauer Investigation of the Magnetic Properties of Amorphous FeZr-Interface Layers Formed By Solid State Reaction. *J Magn Magn Mater*, 1991, 93: 494~498
  - 19 Schole B, Brand R A, Keune W *et al.* Magnetic Properties of Fe/Tb Multilayered Films Studied by Mossbauer Spectroscopy. *J Magn Magn Mater*, 1991, 93: 499~502
  - 20 Huang Zhigao. Mossbauer Study of Magnetic Properties and Structure of Amorphous Fe-(Co, Cr)-Zr Alloys. *Jpn J Appl Phys*, 1998, 37: 102~108
  - 21 Kobayashi Y, Nasu S, Emoto T, Shinjo T.  $^{197}\text{Au}$  Mossbauer Study of Au/M(M=Fe, Co, Ni) Multilayers. *J Magn Magn Mater*, 1996, 156: 45~46
  - 22 Mibu K, Passamani E C, Elmassalami M *et al.* Mossbauer and Magnetization Studies of Fe/Eu and V/Eu Multilayers. *J Magn Magn Mater*, 1995, 140~144: 623~624

## Mössbauer Study of Magnetic Multilayers

Huang Zhigao

(Physical Department, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

**Abstract** A new progress in Mössbauer study on the magnetic structure and magnetic properties of the magnetic layer, interface layer and nonmagnetic layer in the magnetic multilayers is reviewed. Further research trend is also discussed.

**Key words** Mössbauer spectrum magnetic multilayer magnetism

**Classifying number** O481