

均尺寸为 20\AA 的金属镁的 χ 与温度的依赖关系^[190]. 其 $\Delta/k \sim 250\text{K}$. 在 $T \lesssim 25\text{K}$ 时, χ 剧烈下降而趋于零, 与偶电子数超微粒的量子尺寸效应的预期一致. 图 40.8 示出平均尺寸为 10nm 的铜微粒的核磁共振信号^[191], 下图为吸收曲线. 上图为微分曲线, 可以看到块状样品及微粒样品的差别. 图 40.9 为尺寸分别为 2.5nm (\circ), 4nm (\bullet), 10nm (\triangle) 和 11nm (\square) 的 4 个铜微粒样品的奈特位移与温度的关系^[191]. 纵坐标为相对于块状样品的约化奈特位移. 奈特位移随温度下降而减小为量子尺寸效应的表现. 0K 时的残余奈特位移与铜的较大的轨道-自旋偶合对自由电子量子尺寸效应的修正有关.

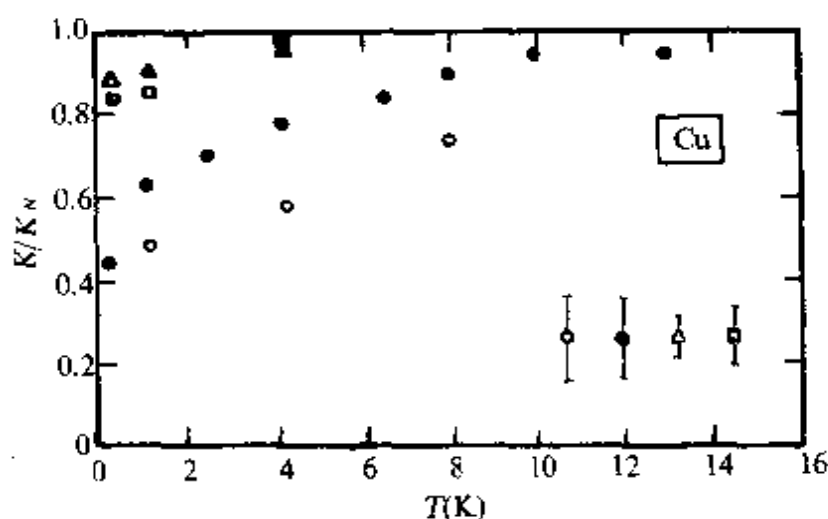


图 40.9 不同尺寸的铜微粒的奈特位移与温度的关系.

(c) 超细微粒的表面效应 微粒的表面积与体积的比例随其尺寸减小而增大, 逐渐显示出表面效应的影响.

本征的表面效应来自表面层原子环境, 即近邻数的变化和原子排列对称性不同于内部. 前者引起表面层原子间相互作用的变异, 从而导致原子平均磁矩, 交换作用及分子场的变异. 故表面层应有其特殊的磁化强度、居里点和饱和磁化强度对温度的依赖性. 表面层原子排列的对称破缺导致表面磁各向异性. 与这些性能联系, 还有表面磁矩的静态和动态钉扎. 本征的表面磁性在超微粒及超薄膜中均有表现. 将在下节超薄膜和多层膜中讨论.

微细粒子的另一种表面效应来自表面成分变异及吸附, 可称

为非本征表面磁性,也十分重要.例如在惰性气体中生成的超细微粒的表面常具有稳定的氧化层.其饱和磁化强度的温度依赖性不同于块材料,低温下与 $T^{\frac{3}{2}}$ 偏离^[192].超细微粒的化学吸附会引起微粒表面磁各向异性及总的磁各向异性的变化.表 40.2 列出用穆斯保尔谱的测量求出的铁、钴、镍微粒的有效磁各向异性常数 K_e 的数值^[193]. H_2 的吸附使镍的 K_e 减小,而 H_2 及 CO 的吸附均使钴和铁的 K_e 增大.值得注意的是,微粒的 K_e 显著地高于宏观晶体的数值.其原因是宏观晶体值只包括磁晶各向异性,对立方晶体,当 $K_1 > 0$ 时 $K_e = \frac{K_1}{4}$,当 $K_1 < 0$ 时, $K_e = \frac{K_1}{12}$.而微粒的 K_e 可能还包含了颗粒非球形的形状各向异性,微粒与基质间相互作用引起的应力各向异性以及微粒的表面磁各向异性.正是后者对化学吸附非常灵敏.用穆斯保尔谱学研究微粒磁性有可能区别表面磁性及内部磁性.图 40.10 示出嵌入硅土的平均直径为 6.3nm 的 α -Fe 微粒在 78K 和 $12.4(10^6/4\pi)\text{A/m}$ 磁场下的穆斯堡尔谱^[193],对谱的分析与拟合指出,该谱包括了具有增强磁矩的“表面”和约为正常磁矩的“内部”六线谱以及少量未被还原的 Fe^{3+} 离子的双线谱三个成份,示于图中的分立图.

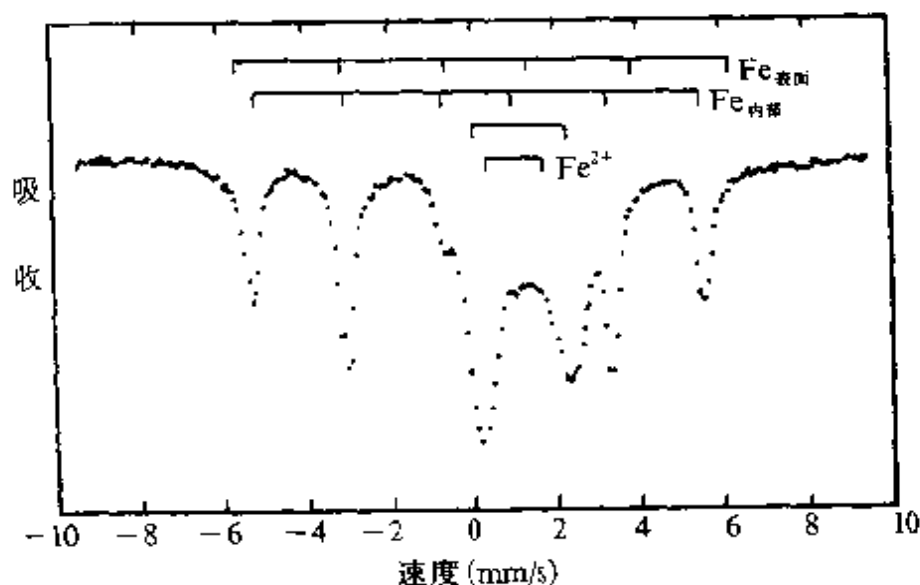


图 40.10 α -Fe 颗粒在 78K, $12.4(10^6/4\pi)\text{A/m}$ 下的穆斯堡尔谱.

表 40.2 铁、钴、镍超细微粒的磁各向异性

	颗粒 尺寸(nm)	磁各向异性能常数			
		细颗粒, $K(\text{J/m}^3)$			宏观晶体
		真空中	吸附 H_2	吸附 CO	$K_s(\text{J/m}^3)$
Fe	6.3	$0.8 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^5$	$1.3 \cdot 10^5$	$0.1 \cdot 10^5$
Co	7.2	$0.35 \cdot 10^5$	$0.7 \cdot 10^5$	$0.5 \cdot 10^5$	$0.08 \cdot 10^5$
Ni	4.0	$0.6 \cdot 10^5$	$0.3 \cdot 10^5$		$0.006 \cdot 10^5$

注:细颗粒数据的精度主要由体积的精度(约 $\pm 25\%$)所决定.然而,对给定的样品在不同表面条件下各向异性能比值的误差是较小的(约 $\pm 10\%$).

§ 40.2 磁性薄膜与多层膜磁性

磁性金属薄膜因其在超高密度磁记录介质、磁光记录介质、薄膜磁头及传感器等方面的应用而成为一类新的磁性材料.当膜厚足够薄时,薄膜趋于二维系统,且表面及界面效应逐渐显示其影响.厚度仅几个单原子层的超薄膜成为一个专门的研究领域.人工设计制作的层厚为原子尺度的多层膜或人工超晶格可以具有与大块材料不同的性能,其中包含了丰富的物理问题,并成为寻求新性能和新材料的重要方向.磁性薄膜及多层膜中的主要物理问题有,维度效应,表面与界面磁矩异常,表面磁各向异性,磁层间交换耦合,巨磁电阻效应,磁光效应以及磁畴及畴壁的特殊结构等.近几年来层间耦合和巨磁电阻方面突破性的进展特别引人注目.

(a)磁性的维度效应 大块材料的饱和磁化强度与温度的关系满足 $T^{3/2}$ 律.都灵^[194]和马森^[195]预言,二维系统中 M_s 与 T 呈线性关系.在实验上已相当普遍地发现,磁层厚度减到纳米量级时多层膜的磁化强度与温度的关系逐渐过渡到线性 $M_s = M_0(1 - cT)$.图 40.11 示出的是 Ni/Ag 多层膜的约化磁化强度与温度的关系^[196].图 40.12 为 Ag 层保持 2nm 时居里温度 T_c 对 Ni 层厚度的依赖性.当 d_{Ni} 大于 4nm 时, T_c 与大块材料的数值接近.超薄膜中 M_s - T 变陡, T_c 降低,为二维效应的重要表现.在多层膜中,当非磁

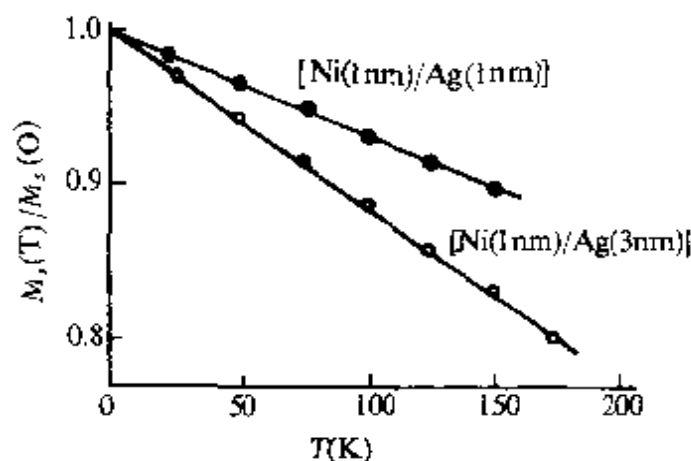


图 40.11 Ni/Ag 多层膜约化磁化强度与温度的关系.

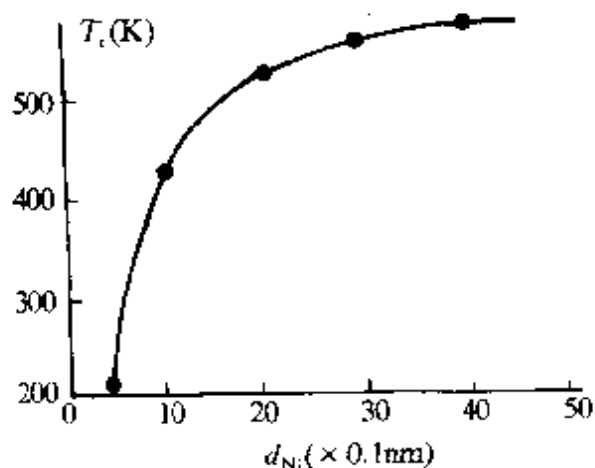


图 40.12 Ni/Ag 的 T_c 与 d_{Ni} 的关系.

金属层厚度减小至约 3nm 以下时,非磁层中的传导电子可以使两侧磁层发生层间交换耦合,使二维效应减弱,图 40.13 示出的是保持铁层厚不变,为 3 个原子层厚,银层厚度为 4, 8, 12 和 17 个原子层厚 (ML) 时,Fe/Ag 多层膜中 Fe 的超精细场 H_{hf} 与温度的关系^[197]. 当银层厚 $x=17ML$ 时, $H_{hf}-T$ 基

本为线性,铁层表现出二维效应. 但当 x 较小时, M_s-T 渐失去线性,可理解为层间耦合使二维效应减弱所致.

(b)表面与界面磁性^[198] 薄膜的表面或界面处的晶格或成分突然终止引起若干特殊性能,如表面或界面磁矩增强、下降或出现死层和表面或界面磁各向异性及其它磁性异常.

(1)表面及界面磁矩异常^[198] 过渡族原子构成金属时,由于原子间相互作用形成相互重叠的能带,平均原子磁矩小于孤立原子磁矩. 在铁磁体干净表面或与惰性衬底相接的界面,由于原子间相互作用减弱,其原子磁矩常大于大块金属内部原子磁矩,即为磁矩增强. 而在与非铁磁过渡金属相接的界面,由于两金属原子间相互

作用,使铁磁性及磁矩减小,甚至出现反铁磁转变.近十年来,对此问题有不少理论及实验研究.弗里曼小组用较精确的全势线性组合平面波方法(FLAPW)进行了系统的理论研究.表 40.3 列出不同结构和不同取向的 Fe,Co,Ni,Cr 和 Gd 的表面原子磁矩和内部原子磁矩的计算值.表面磁矩增强是普遍的,bccFe 及 fccFe 的增强可高达 30—40%,且随晶面不同而异.金属钆的磁矩主要来自 4f 电子,由于 4f 电子的局域性,表面及内部磁矩差别不大.表中给出传导电子(5d 和 6s)被交换极化的表面增强数据.较精确的理论计算还发现,镍的表面层原子磁矩呈振荡型变化.最表层 Ni(111)的磁矩为 0.63,次表层为 0.64,然后向内部原子磁矩 0.58 μ_B 收敛.对于干净表面原子磁矩的实验测量十分困难,原子吸附往往会降低表面磁矩,如 H,S 的吸附及 Ag,Al 的覆盖均可降低表面磁矩.但表面层磁矩的测量在技术上也颇困难.

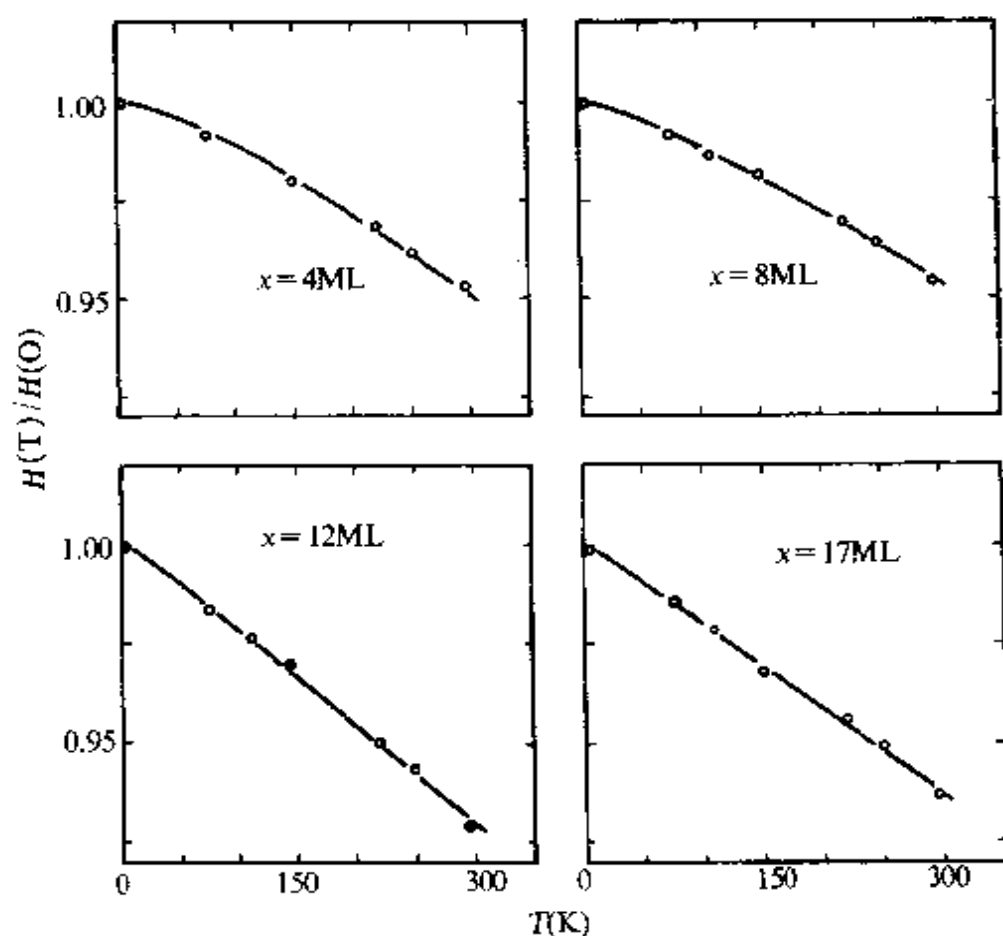


图 40.13 Fe(3ML)/Ag(x)多层膜的 H_{sf} -T 关系.

表 40.3 一些金属表面及内部原子磁矩的理论值 (μ_B)^[198]

系 统	表 面	中 心	增 强 %
bcc Fe(001)	2.96	2.27	30
bcc Fe(110)	2.65	2.22	19
bcc Fe(111)	2.70	2.30	17
fcc Fe(001)	2.85	1.99	43
hcp Co(0001)	1.76	1.64	7
fcc Co(001)	1.86	1.65	13
bcc Co(001)	1.95	1.76	11
bcc Co(110)	1.82	1.76	3
fcc Ni(001)	0.68	0.56	23
fcc Ni(110)	0.63	0.56	13
fcc Ni(111)	0.63	0.58	9
bcc Cr(001)	2.49	0.59	322
Gd(0001)传导电子磁矩	0.58	0.46	26

大块铬的基态为沿[001]方向的非公度自旋密度波的反铁磁体. 可以想像在(001)面上可能为铁磁性自旋结构. 这种表面铁磁性已为实验证实, 甚至在奈耳温度 312K 之上, 高达 $780 \pm 50\text{K}$ 时, 仍存在^[195]. 理论计算指出, 表面磁矩增强达 300% 之上.

顺磁过渡金属的表面有无可能出现磁有序是一个吸引人的问题. 首先应该考虑强顺磁金属钯. 它在顺磁过渡金属中具有最高的磁化率, 理论指出具有 6% 的晶格膨胀的 Pd 可发生铁磁转变并有 $0.3\mu_B$ 的原子磁矩. 但 Pd(001) 及 Pd(111) 表面的费米面能态密度比中心层的还低约 20%, 故根据斯托纳判据, 表面铁磁性似不可能出现. 金属钒的磁化率仅次于钯, 其表面是否出现铁磁性, 理论计算不一. 有出现铁磁性的报道^[203].

单原子层的超薄膜中的原子具有比表面原子更少的配位数, 故磁矩应有更大的增强. 但实际的超薄膜必需附着在衬底上, 称为

覆盖层. 覆盖层与衬底界面上的相互作用对超薄膜磁性可有很大的影响. 同时对衬底也有影响. 贵金属或陶瓷衬底称为惰性衬底. 其费米面几乎无电子态, 因而覆盖层与衬底间的相互作用小, 在惰性衬底上的超薄膜的磁矩多有增强, 若衬底为过渡金属, 强烈的覆盖层与衬底间的相互作用使磁矩增强大受影响. 表 40.4 列出若干单原子层的磁性和磁矩的理论计算结果. 表中“单原子层”指不考虑与衬底间电子态的相互作用时的情况, 只是其晶格常数取采用与衬底匹配的数值, 以与“覆盖层”比较. 与大块材料和表面磁矩比较, 单原子层超薄膜的原子磁矩有较大的增强, 且对晶格常数不敏感. 不论是晶格收缩〔如 Fe/Cu(001)〕或膨胀〔如 Fe/MgO 或 Fe/W(001)〕, 铁的原子磁矩均有较大增强, 在“覆盖层”一栏中, 考虑了与衬底电子态的相互作用, 磁矩有不同程度的下降, 惰性衬底中铜的影响大于金、银及氧化镁的影响. 当衬底为过渡金属时, 电子态的杂化引起磁性和原子磁矩较大的变化. 例如 Fe/W(110)覆盖层的磁矩大大降低. 但夹层膜 Ag/Fe/W(110)中 Fe 的磁矩比块状值增强 14%, 而 Fe/W(001)变为反铁磁性, 且磁矩大大降低. 以强顺磁体 Pd 为衬底时, Fe, Co, Ni 只有微弱的磁矩增强, V, Cr, Mn 则均呈现反铁磁性. 值得注意的是, 以贵金属 Ag 为衬底时, 覆盖层 V, Ti, Rh, Ru 均呈现反铁磁或铁磁性. 而以 Ru 为衬底的 Fe 超薄膜 Fe/Ru(0001)为反铁磁体. 实验发现, Fe(111)_n/Ru(0001)超薄层及 Fe_n/Ru_m超晶格系统中的“磁死层”厚度分别为 $n \sim 2$ 及 4, n 为单原子层数^[201, 202]. 此外, 铁磁层与非铁磁金属在界面上的相互作用可在非铁磁层中引起自旋极化. 对 Pd, 在界面处的 Pd 原子磁矩为 $0.3-0.4\mu_B/\text{At}$. 在次界面的 Pd 原子仍可有 $0.2\mu_B$. 在实际的超薄膜及多层膜中, 二维效应、界面电子态的杂化及合金化引起的磁矩异常及非铁磁层的自旋极化混在一起. 用实验方法将各种贡献分开是颇为困难的, 穆斯保尔谱及核磁共振的超精细场分析是比较有力的手段^[203, 204].

(2) 表面和界面磁各向异性. 奈耳指出, 表面或界面处近邻数减少和对称性降低可引起表面磁晶各向异性, 显然, 表面和界面法

表 40.4 一些单原子层超薄膜的磁性与磁矩^[196]

系 统	单 原 子 层		覆 盖 层	
	状 态	磁矩(μ_B)	状 态	磁矩(μ_B)
Fe/Ag(001)	FM	3.20—3.4	FM	2.96—3.01
Fe/Au(001)	FM	—	FM	2.97
Fe/Mgo(001)	FM	3.10	FM	3.07
Fe/Cu(001)	FM	3.20	FM	2.69—2.85
Co/Cu(001)	FM	—	FM	1.79
Co/Cu(111)	FM	—	FM	1.63
Co/Ag(001)	FM	2.20	FM	2.03
Ni/Cu(001)	FM	—	FM	0.39
Ni/Ag(001)	FM	1.02	FM	0.57—0.65
Ni/Cu(111)	FM	—	FM	0.34
Mn/Ag(001)	AFM	4.32	AFM	4.11
Cr/Ag(001)	AFM	4.09	AFM	3.57
Cr/Au(001)	AFM	3.84	AFM	3.48
V/Ag(001)	FM	2.87	AFM	2.08
Ti/Ag(001)	FM	1.72	FM	0.34
Pd/Ag(001)	FM	0.40	PM	0.00
Rh/Au(001)	FM	1.56	FM	1.09
Rh/Ag(001)	FM	1.45	FM	0.95
Ru/Ag(001)	FM	2.12	FM	1.57
Fe/Pd(001)	FM	—	FM	3.19
Co/Pd(001)	FM	—	FM	2.12
Co/Pd(111)	FM	1.87	FM	1.88
Co/Pt(111)	FM	1.89	FM	1.84
Ni/Pd(001)	FM	—	FM	0.89
V/Pd(001)	FM	—	AFM	1.39
Cr/Pd(001)	AFM	—	AFM	3.46
Mn/Pd(001)	AFM	—	AFM	4.05
Ti/Pd(001)	FM	—	PM	0.00
Fe/W(110)	FM	2.98	FM	2.18
Fe/W(001)	FM	3.10	AFM	0.93
Fe/Ru(0001)	FM	2.90	AFM	2.23

线为一个对称轴. 因此单位面积的表面或界面磁各向异性能可表为

$$E_s = K_s \sin^2 \theta. \quad (40.10)$$

在 c g s 单位中 K_s 的单位为 erg/cm^2 . θ 为 M_s 与界面法线的夹角. $K_s > 0$ 时, 易磁化方向沿法线, 称为垂直磁各向异性. $K_s < 0$ 时, 易磁化方向在平面中. 薄膜还有一个来源于界面的磁各向异性, 即层间应力引起的磁各向异性. 其能密度可近似地表为

$$E_\sigma = K_\sigma \sin^2 \theta, \quad (40.11)$$

$K_\sigma = -\frac{3}{2}\lambda\sigma$. $K_\sigma >$ 或 < 0 决定于磁致伸缩系数 λ 及应力 σ 的符号, σ 来源于层间晶格失配及工艺过程中由于相邻两种金属层的热膨胀系数不同引起的热应力. 在超薄膜和多层膜中还有两种磁各向异性. 其一为与退磁场能相关的形状各向异性, 近似地有

$$E_M = -2\pi M_s^2 \sin^2 \theta. \quad (40.12)$$

最后是大块材料磁晶各向异性在薄膜中表现, 近似地为

$$E_K = K_u \sin^2 \theta. \quad (40.13)$$

因此, 总的磁各向异性能可有

$$\begin{aligned} E_A &= [2K_s/t + (K_u - 2\pi M_s^2)] \sin^2 \theta \\ &= K_{\text{eff}} \sin^2 \theta. \end{aligned} \quad (40.14)$$

薄膜的有效各向异性常数 $K_{\text{eff}} = 2K_s/t + K_u - 2\pi M_s^2$, 其中 $K_u = K_u + K_\sigma$. $K_{\text{eff}} > 0$ 或 $K_{\text{eff}} < 0$, 这要依赖于其中各种贡献的竞争. 当 $K_{\text{eff}} > 0$ 时, 易磁化方向垂直于膜面. 这种垂直磁化的性能是薄膜用作磁光记录或垂直磁记录的必要条件. 因此, 颇受重视. 在厚单层膜中, $2K_s/t$ 常可略去, $K_{\text{eff}} > 0$ 常求助于大的正值的 K_u . 在多层膜中, 若有足够大的正的 K_s , 当铁磁层厚度 t 足够小时可得到正的 K_{eff} . 根据公式(40.14), 使 $K_{\text{eff}} > 0$ 的铁磁层临界厚度 t_c 为

$$t_c = \frac{2K_s}{2\pi M_s^2 - K_u}. \quad (40.15)$$

图 40.14 及图 40.15 分别示出 Co/Au, Co/Cu 和 Co/Pt 多层膜的 λK_{eff} 及 $t_{c0} K_{\text{eff}}$ 与 t_{c0} 的实验关系. 当 t_{c0} 约大于 1nm 时, 数据近似为直

线,从其斜率及截距可求出 K_v 和 K_s 的数值,图 40.14 中的 λ 为多层膜的双层膜厚, $\lambda = t_{\text{Co}} + t_{\text{NM}}$. 当 t_{Co} 小于 1nm 时,数据渐偏离直线,出现 λK_{eff} 的极大然后随 $t_{\text{Co}} \rightarrow 0$ 而趋于零. 这可理解为由于 t_{Co} 很小时,多层膜逐渐失去明确的界面,甚至失去晶态转变为非晶的成份调制膜所致. 实验发现,退火对 Co/Au 多层膜各向异性有一定影响. 低温退火使 K_s 增高. 这可能是因为界面更加清晰所致. 表 40.5 列出一些多层膜的界面磁各向异性常数 K_s 的实验结果.

对金属超薄膜和多层膜中表面和界面磁各向异性的理论解释还不成熟,原则上, K_s 来源于轨道-自旋耦合对金属中磁性电子能量的微扰. 因而 K_s 依赖于界面金属成份和晶格对称性以及界面状态,如粗糙度和合金化等. 表 40.6 列出弗里曼小组对几种单原子层及覆盖层超薄膜的 K_s 的数值计算的结果. 其数值与实际观察值相符不理想,只能作定性参考,其各向异性能对 M_s 方向角 θ 的依赖关系服从 $\sin^2\theta$ 规律.

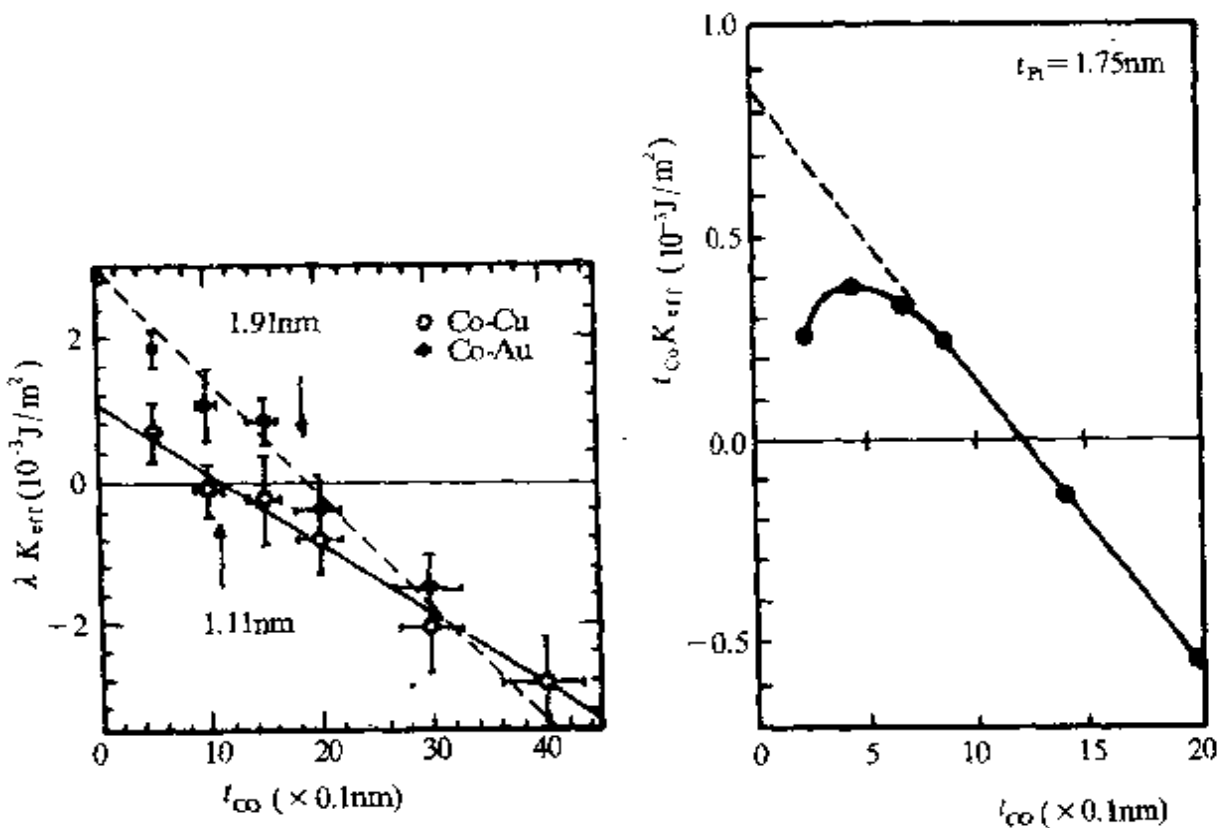


图 40.14 含 Co 多层膜的磁各向异性. 图 40.15 Co/Pt 多层膜的磁各向异性.

表 40.5 一些多层膜的界面各向异性 K_s 的数值^[205]

系 统	制备方法 ^a	$T(K)^b$	$K_s(\times 10^{-3} J/m^2)$
Mo-Ni(111)	S	30	-0.54
Cu-Ni(111)	S	4.2	-0.12
Cu-Ni(100)	S	4.2	-0.23
Pd-Co(111)	S	300	+0.16
Pd-Ce(111)	V	300	+0.26
Pd-Ce(111)	V	300	+0.55
Au-Co(001)	S	300	+0.1-0.5
Au-Co(001)	MBE	300	+1.3
Pt-Co(001)	V	300	+0.42
Cu-Co(f. c. c.)	MBE	300	+0.55
Nd-Fe	S	300	+0.18
Dy-Fe	S	300	+2.5
Dy-Co	S	300	+0.4-0.8
Tb-Co	S	300	>0
Er-Fe	S	300	~0
Gd-Fe	S	300	~0
Gd-Co	S	300	~0

a: S 代表溅射; V 代表蒸发; MBE 代表分子束外延; b 代表测量温度.

表 40.6 对 Fe 及 Co 系统磁各向异性能的数值(meV)^[198]

系 统	Fe(ml)	Fe/Ag(001)	Fe/Au(001)	Fe/Pd(001)
K_r	-0.03- -0.04	0.06	0.57	0.35
系 统	Co(ml)(正方)	Co/Cu(001)	Co(ml)(六角)	Co/Pt(111)
K_r	-0.03	0.05	-0.65	0.45

(c) 多层膜中层间交换作用 多层膜中层间交换作用的研究始于 60 年代, 对多层膜系列 Fe/NM/Fe(NM=Cu, Ag, Pd, Cr 等) 的磁滞回线的研究证明, 磁性层间存在铁磁性交换作用^[206]. 近几年有较大的进展, 1986 年, 在多层膜夹层膜中发现了铁磁层间的反铁磁耦合^[207]. 格伦堡用布里渊散射进行了颇为系统的工作^[207]. 图 40.16 示出卡本等^[208]用自旋极化低能衍射技术(SPLEED)在

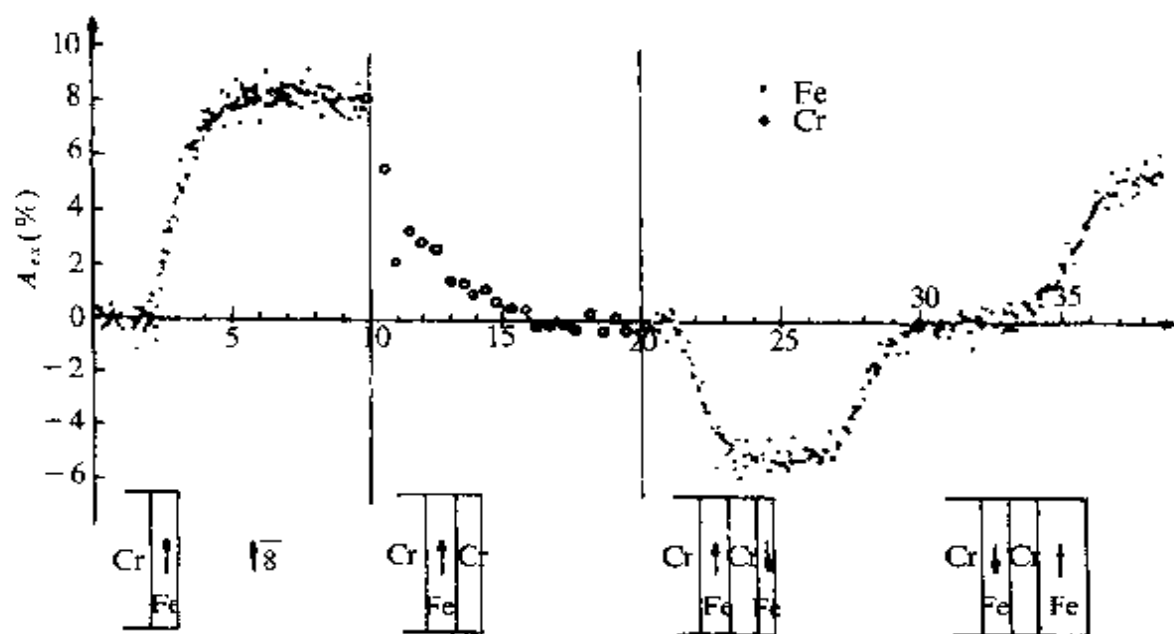


图 40.16 Fe/Cr/Fe 三层膜中自旋极化的原位观察。

外延生长 Fe/Cr/Fe 三层膜过程中直接观察到的自旋极化的分布结果,图中纵坐标为正比于自旋极化的参数 A_{ex} ,由表面对极化电子束散射强度 I_{\uparrow} 和 I_{\downarrow} 之差确定,即

$$A_{ex} = \frac{I_{\uparrow} - I_{\downarrow}}{I_{\uparrow} + I_{\downarrow}} \quad (40.16)$$

此实验的结果是,铁层厚度大于 2ml 后出现自发磁化,在外延的 Cr 层中极化逐渐减小,在约 10ml 的 Cr 层上外延 Fe 层时极化向负值变化,直接证明了反铁磁耦合.约在同一时期,在 Gd/Y 超晶格中发现被非铁磁 Y 层隔开的 Gd 层随 Y 层厚度变化而交替出现铁磁和反铁磁耦合.这种振荡型的层间耦合先后被表面磁光克尔效应(SMOKE)和中子衍射所证实^[209].以后几年的研究发现,这种振荡型的耦合十分普遍地存在于金属磁性多层膜中,几乎所有顺磁性的过渡金属,抗磁性的贵金属铜、银、金,以及简单金属铝,在多层膜中均可传播交换作用达几个纳米的距离,反铁磁金属铬和锰在奈耳点以上或以下均可使两侧的铁磁层发生交换耦合.许多新的实验事实的出现吸引人们对金属中的交换作用进行深入研究.此外,处于反铁磁耦合的多层膜具有比大块铁磁材料或单层

铁磁薄膜大几十倍的磁电阻—巨磁电阻效应. 它将有可能使有广泛应用的磁电阻传感器及超高密度磁记录读出磁头的灵敏度得以提高, 多层膜中的层间耦合和巨磁电阻成为近几年学术界和工业界热门的研究与开发课题.

当层间耦合为铁磁性时, 多层膜的磁化曲线决定于磁层中磁畴调整, 其饱和场 H_s 决定于磁层中的磁各向异性, 若铁磁层的磁各向异性不强, 则沿薄膜平面的磁化曲线陡峻, H_s 低, 当出现反铁磁耦合时, 磁化曲线决定于需要克服的反铁磁耦合能 J_{AB} . 随着 J_{AB} 的增强, 磁化曲线变斜, H_s 升高. 图 40.17 示出反铁磁耦合增强时, Fe(001)/Cr(001) 超晶格磁化曲线的变化^[210]. 图 40.18 示出相应的磁电阻曲线. 当反铁磁耦合增强时, 饱和磁电阻 $\frac{\Delta R}{R}$ 与饱和场 H_s 均增大, 图 40.19 示出几种多层膜的 H_s 与非铁磁层厚度的振荡关系^[211]. H_s 的峰相应于反铁磁耦合, H_s 的谷相应于铁磁耦合. 简单的计算可以得到, 反铁磁耦合强度 J_{AB} 与 H_s 的最大值成正比, $J_{AB} = \frac{H_s M_s d_{FM}}{2\alpha}$.

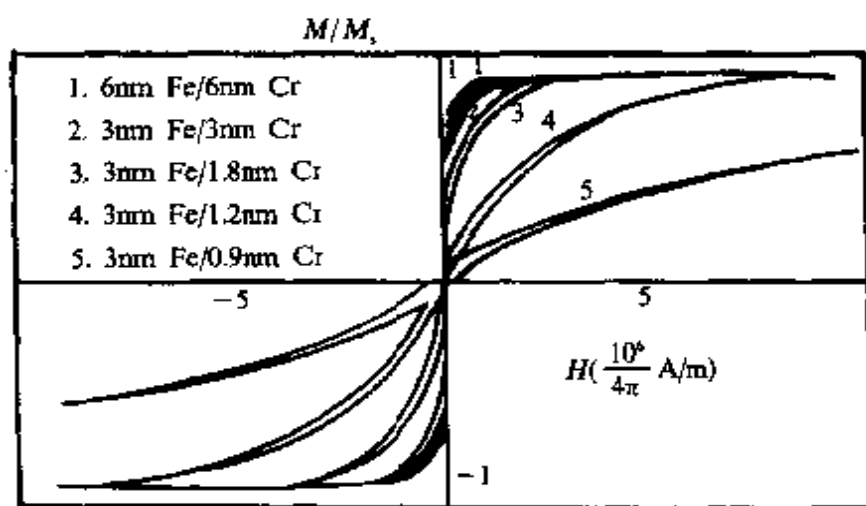


图 40.17 不同结构 Fe/Cr 超晶格的磁化线.

式中 d_{FM} 为铁磁层厚度, α 为一因子, 对多层膜 $\alpha=2$, 对夹层膜 $\alpha=1$. 图 40.20 为 $\text{Ni}_{20}\text{Co}_{80}/\text{Ru}$ 多层膜的 J_{AB} 与 d_{Ru} 的实验关系^[212]. 该图包括了铁磁耦合和反铁磁耦合的 J_{AB} . 其中反铁磁耦合强度

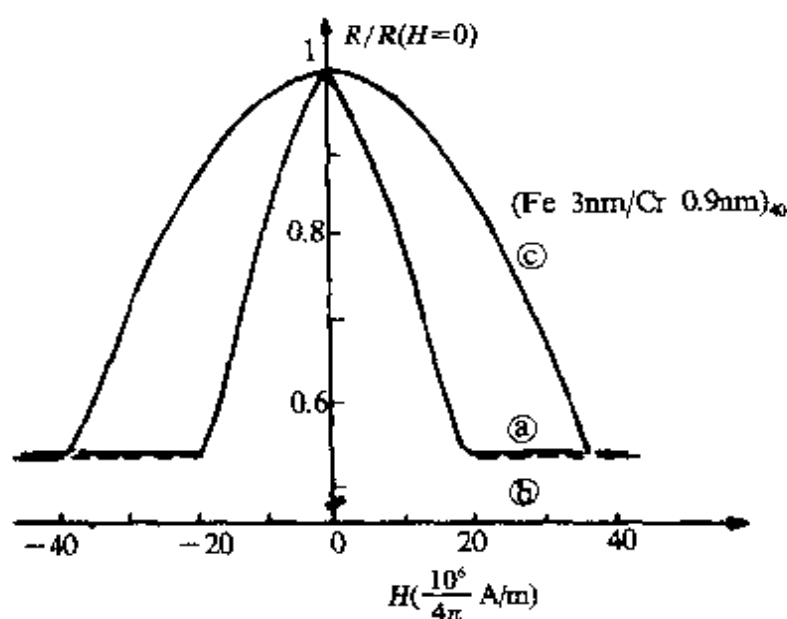


图 40.18 Fe/Cr 超晶格的磁电阻曲线。

($J_{AB} < 0$) 由多层膜处于反铁磁耦合时的 H_c 确定. 铁磁耦合强度 ($J_{AB} > 0$) 从多层膜 H_c 曲线 (如图 40.19) 无法确定. 该文作者专门设计了一种用层膜以测出与铁磁耦合强度相应的 H_c 值. J_{AB} 与

作用距离的衰减振荡和 RKKY 交换作用颇为相似. 只是多数多层膜的 $J_{AB}-d_{FM}$ 的振荡波长约为 1—2nm, 而 RKKY 交换作用理论预期的振荡波长为费米波长 λ_F 的一半, 即为一个原子间距的量级, 约 0.2nm. 与多数实验中观察到的长周期振荡不同. 表 40.7 列出

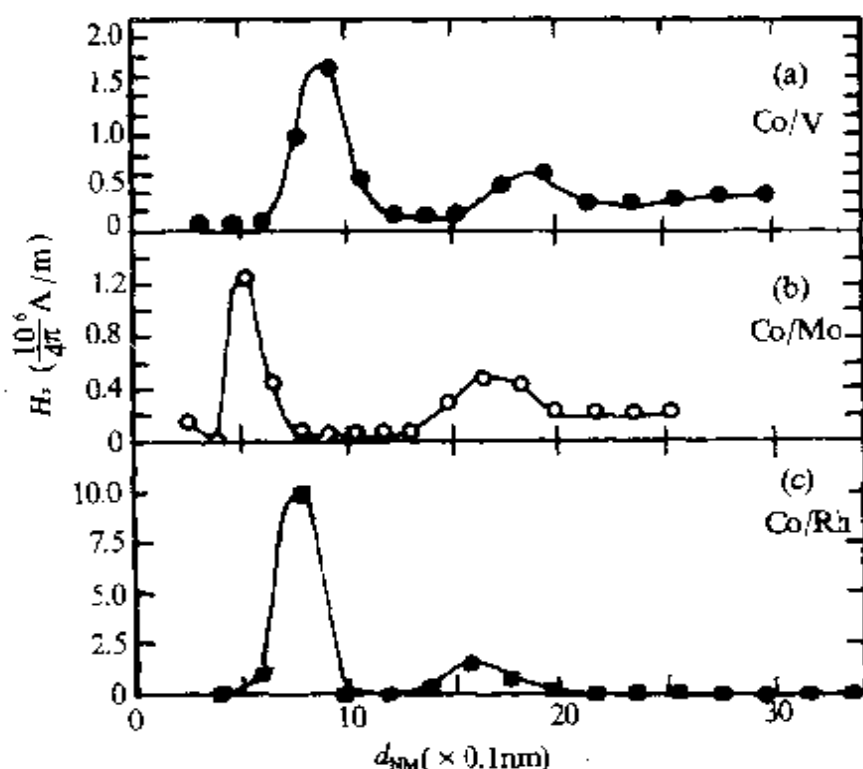


图 40.19 几种多层膜的 H_c 与非磁层厚度的关系。

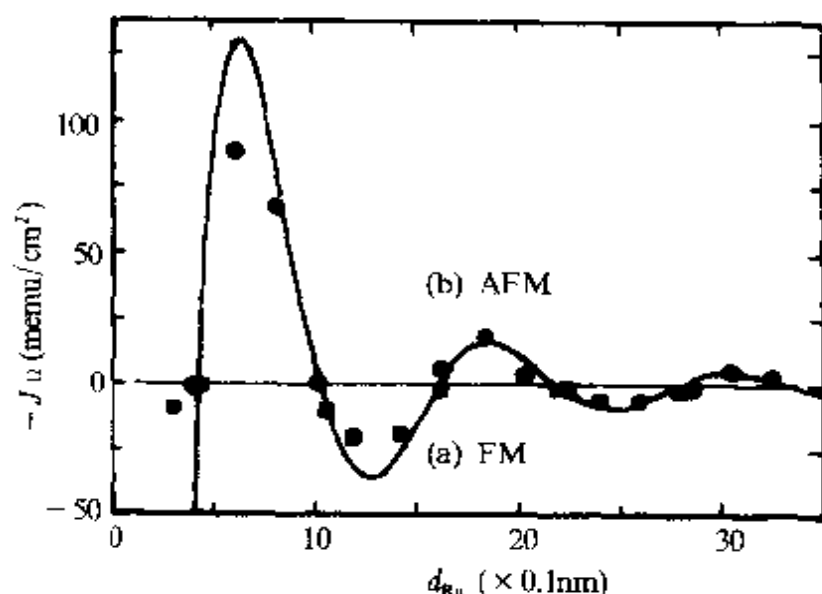


图 40.20 $\text{Ni}_{20}\text{Co}_{80}/\text{Ru}$ 多层膜的 J_{AB} 曲线.

1991 年帕金(Parkin)给出的溅射 Co/NM 多层膜层间耦合的主要数据^[211]. 非铁磁层的金属 NM 共 11 个, 包括 $3d$, $4d$ 和 $5d$ 过渡金属和 $3d$ 满带的 Cu . 该表按周期表的次序排列. 表中 A_1 为第一个反铁磁耦合峰的 NM 厚度 (0.1nm), ΔA_1 (0.1nm) 为第一峰的宽度, P (0.1nm) 为振荡周期, J_1 为第一峰相应的反铁磁耦合强度 (erg/cm^2 或 mJ/m^2). 表中还给出了常见的晶体结构. 可以看出, 11 种多层膜均具有长周期振荡. 其 P 值均约为 (1nm), 而 Co/Cr 多层膜的周期近 2nm . 此长周期并不灵敏地依赖于元素种类和晶体结构, 但耦合强度 J_1 和 A_1 的数值则随元素而异. J_1 的数值按 $5d$, $4d$, $3d$ 的次序增强, 在同一族中按原子序数递增, 近似为指数关系. 层间耦合强度随间隔层厚度增大而迅速衰减. 有些多层膜 (如 Co/Nb 等), J_1 值很小, 其第二个反铁磁峰未能观察到, 故表中未给出 P 值, 但从第一峰的宽度 ΔA_1 可以估计出其 P 值亦约为 1nm 左右. 表中未给出数据的一些元素 (如 Mn , Ag , Au 等), 在后来的实验中被观察到在多层膜中亦可产生反铁磁耦合及振荡现象.

进一步的研究发现, 除上述长周期振荡外在一些用分子束外

表 40.7 一些含 Co 多层膜层间耦合的数据

Ti	V		Cr		Mn	Fe	Co	Ni	Cu		元素
	9	3	7	7					8	3	
无耦合	0.1	9	.24	18	反铁磁	铁磁	铁磁	铁磁	0.3	10	A_1 ΔA_1 (0.1nm)(0.1nm) J_1 P mJ / m ² (0.1nm)
Zr	Nb		Mo		Tc	Ru	Rh	Pd	Ag		fcc bcc hcp 复立方
无耦合	9.5	2.5	5.2	3					铁磁耦合		
	.02	*	.12	11	3	3	7.9	3	5	11	1.6
Hf	Ta		W		Re	Os	Ir	Pt	Au		复立方
无耦合	7	2	5.5	3					4.2	3.5	
	.01	*	.03	*	.41	10					

延技术制备的高质量的多层结构中存在着较短周期的层间耦合振荡现象,其周期约 2—3 个原子层.振荡周期还依赖于晶体结构及取向.而且在一种多层结构中曾观察到两种长、短周期的振荡.为仔细研究层间耦合,这几年发展了生长含有尖劈形非铁磁层的(铁磁/非铁磁/铁磁)夹层结构的分子束外延技术.图 40.21 示出的是 Fe/Cr/Fe 夹层膜的示意图^[213].这种结构的优点是可以在一个样品中同一铁磁层上对厚度连续变化的非铁磁间隔层引起的层间耦合的变化进行高分辨的观察.图中尖劈长度为 0.4—0.9mm,而厚度变化一共为 5—20nm.当使用自旋极化分析扫描电镜(SEMPA)时,观察的位置分辨率为 40nm,相应的厚度分辨已达到原子尺度.利用 SEMPA 技术作表面磁化分布的检测,不仅分辨率高,而且可以同时给出表面形貌像及表面磁化矢量的二至三个分量的像.图 40.22 示出 Fe(晶须)/Au/Fe 夹层膜的 Fe 膜表面上用 SEMPA 观察到的磁化矢量的两个分量 M_x 和 M_y 随尖劈状 Au 间隔层厚度不同的变化^[214].图中 M_y 为膜面内沿尖劈长度方向的磁化分量.黑白相间的图形相应于 M_y 改变 180°,与下面 Fe 晶须中磁化方向呈平行及反平行,即铁磁/反铁磁耦合交替出现.经分析,

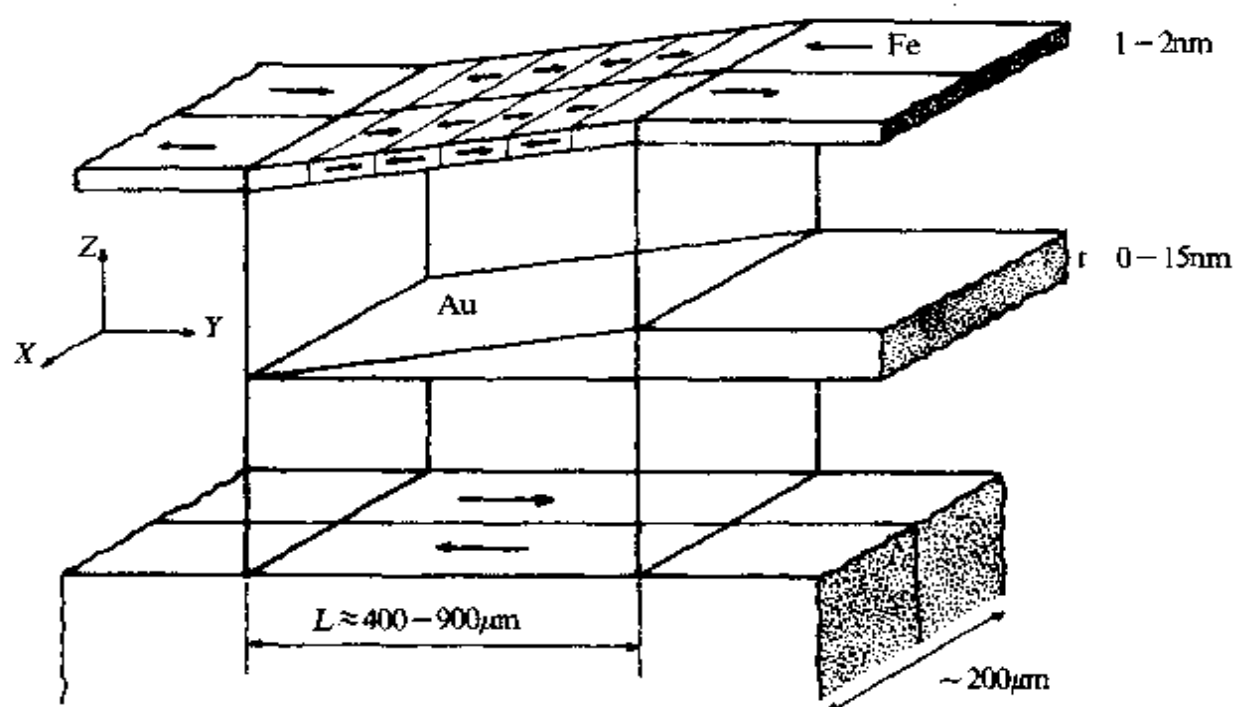


图 40.21 含尖劈间隔层的夹层结构.

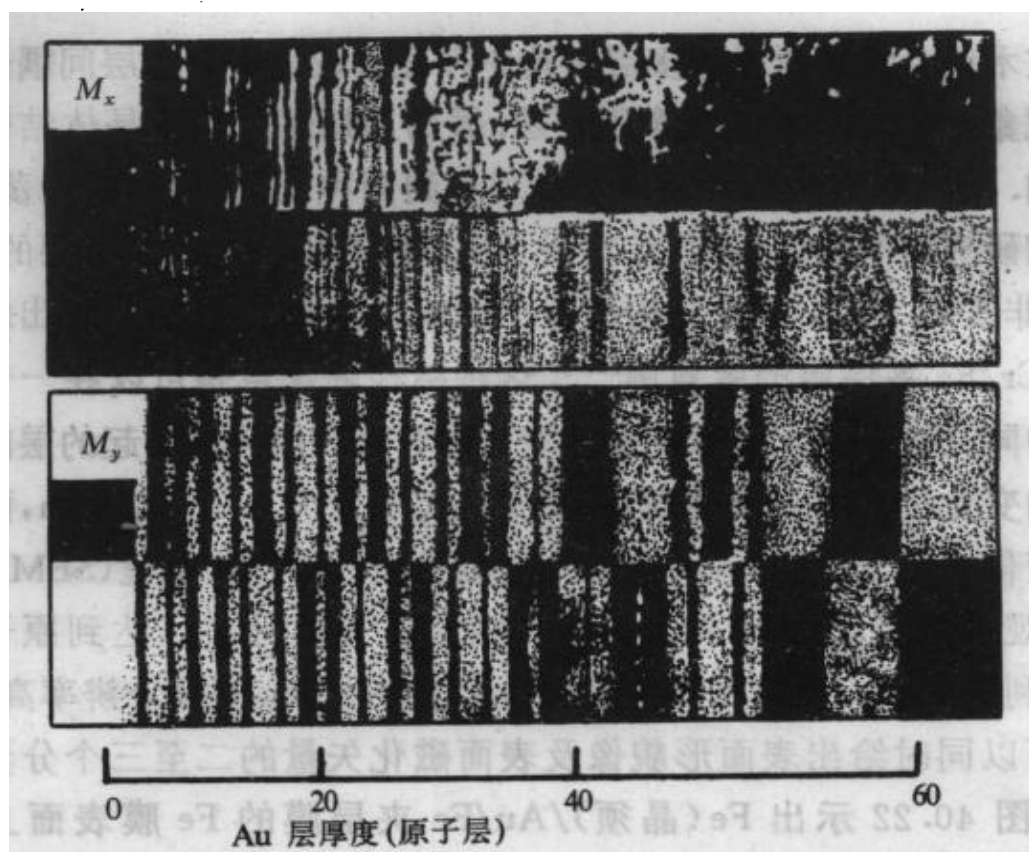


图 40.22 Fe/Au/Fe 夹层膜上的 SEMPA 图像.

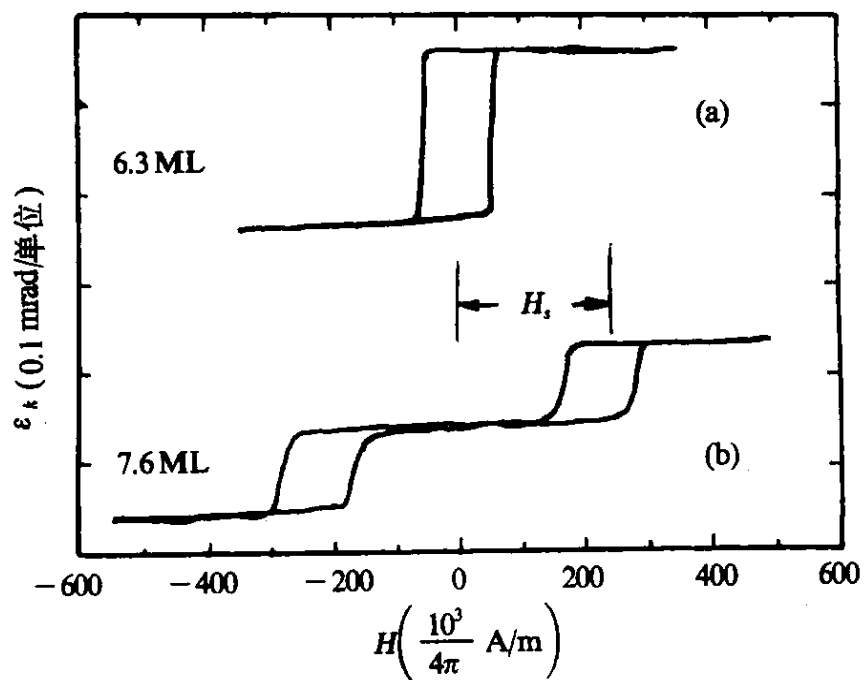


图 40.23 Fe/Mo/Fe 夹层膜的磁滞回线.

M_y 的变化反映出的层间交换耦合的变化相当于两个不同周期的振荡的叠加. 长周期 $P_1 = 8.6 \pm 0.03 \text{ nm}$, 短周期 $P_2 = 0.248 \pm$

0.005nm. 观察层间耦合的另一个原位实验技术为表面磁光克尔效应(SMOKE). 利用克尔旋转角或椭圆率与磁化强度及方向的关系, 在磁场作用下 SMOKE 信号可给出夹层膜的磁滞回线. 图 40.23 示出用 SMOKE 在 Fe/Mo/Fe 尖劈夹层膜上观察到的磁滞回线^[215]. 图 40.23(a) 示出铁磁耦合时面内磁滞回线, 图 40.23(b) 示出反铁磁耦合时的回线. 后者在低场区的平台的克尔信号几乎为零, 说明上、

下两层 Fe 膜磁化方向为反平行排列. 当 H 达到 H_c 时, 磁场足以克服反铁磁耦合, 上下两 Fe 层的磁化相互平行, 因而得到与图 40.23

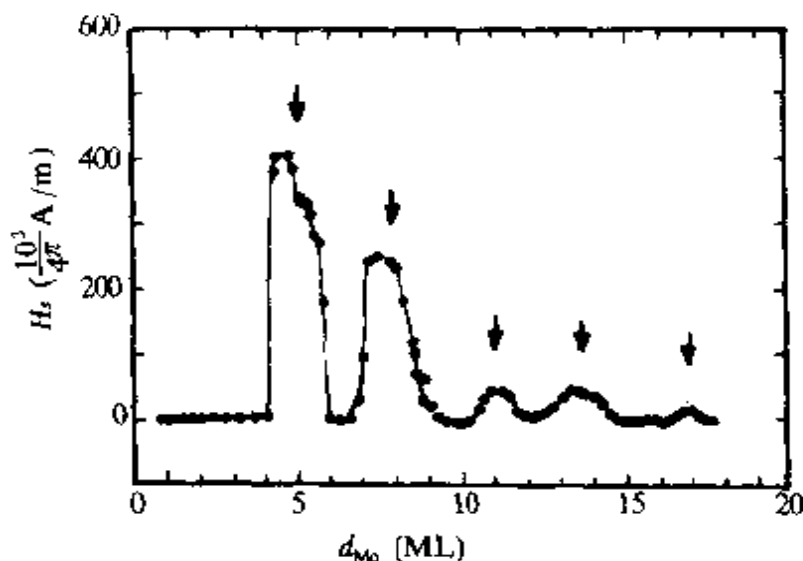


图 40.24 Fe/Mo/Fe 夹层膜 H_c - d_{Mo} 的关系

(a) 不同的反

铁磁耦合磁滞回线. 图 40.24 示出当光束沿尖劈长度方向移动时得到的 H_c 与 Mo 层厚度的关系曲线. Mo 层厚度 d_{Mo} 以单原子层 (Mo) 为单位. 令 H_c 为恰足以克服反铁磁耦合的磁场, 即 $J \sim M_s H_c d_{Fe}$, 该图描述出反铁磁/铁磁耦合的振荡. 周期约 3ML 或 0.47nm. 用溅射法制备的 Co 或 Fe 与 Mo 组成的多层膜的振荡周期则约为 1.1nm. 此外在外延生长的含 Mn, Al, Ag 的夹层膜中均观察到类似的短周期层间耦合振荡的现象.

上述导致相邻铁磁层磁化矢量呈平行或反平行排列的层间交换耦合称为双线型交换耦合, 其耦合能量表式可写为海森伯交换能的形式,

$$E_L = -J_{AB} \cos \theta, \quad (40.17)$$

θ 为相邻两铁磁层磁化矢量的交角. 铁磁及反铁磁耦合相应于 J_{AB}

>0 或 $J_{AB} < 0$. 在一些实验中, 还发现可导致相邻铁磁层的磁化矢量呈 90° 排列的双二次型交换作用^[216]. 其能量表式为非海森伯的形式,

$$E_Q = J_Q \cos^2 \theta, \quad (40.18)$$

J_Q 常为正值, 故 $\theta = 90^\circ$ 时, E_Q 最低, 在图 40.22 中 M_z 的出现即为在 Fe/Au/Fe 夹层膜中双二次型层间交换耦合的表现. J_Q 亦随 Au 层厚度变化而振荡.

金属多层结构中层间交换耦合的新的实验事实引起了对多层结构中的电子结构及相互作用的理论研究及更深入的实验研究.

层间耦合何以有振荡现象? 何以有长周期及多重周期? 且振荡周期还依赖于晶体结构和取向? 已有几种理论给出解释. 将 RKKY 理论推广到多层膜中是其中重要的一个. 大块材料中的 RKKY 理论已在 § 37.1(c) 中论及. 金属中的局域磁矩与传导电子的交换作用使传导电子自旋极化, 并使局域磁矩间发生间接交换作用. 传导电子的自旋极化和局域磁矩间的交换作用均随距离作衰减振荡. 如式 (37.26) 至式 (37.29) 及图 37.7 所示. 将此原理推广到多层膜中, 考虑到两个相邻的铁磁层中的磁性原子自旋均与其间隔层中的传导电子作用, 并使传导电子自旋极化, 从而使相邻铁磁层发生层间交换耦合, 将两铁磁层中所有磁性原子的 RKKY 耦合效应相加, 即可得到多层膜中的层间耦合.

若 i, j 为处于非铁磁层两侧的两个相邻铁磁层 F_1 及 F_2 中任意两个原子, 自旋分别为 S_i 及 S_j , 它们之间的 RKKY 交换作用可按式 (37.26) 写为如下形式

$$\mathcal{H} = -2J_{ij}(R_{ij})S_i \cdot S_j, \quad (40.19)$$

$$J_{ij} = AF(2k_F R_{ij}), \quad (40.20)$$

A 为依赖于局域自旋与传导磁层中传导电子的交换积分 J_{jm} 等量的常数. $F(2k_F R_{ij})$ 为表征间接交换耦合常数 $J_{ij}(R_{ij})$ 随距离 R_{ij} 作衰减振荡的行为的函数

$$F(x) = \frac{x \cos x - \sin x}{x^4}. \quad (40.21)$$

当 $x \rightarrow \infty$ 时, 远距离近似下, 有

$$F(x) \approx \frac{\cos x}{x^3}. \quad (40.22)$$

振荡周期 $\lambda = \pi/k_F = \frac{1}{2}\lambda_F$, 且按 R_{ij}^{-3} 衰减. 为讨论多层膜中的层间耦合, 要考虑到铁磁层(如 F_1)中任意原子的自旋受到另一铁磁层 F_2 中所有自旋的交换作用, 因而应对所有 ij 对求和, 单位面积的交换耦合能可写为

$$E_{12} = -J_{12} \cos \theta_{12}, \quad (40.23)$$

θ_{12} 为 F_1 及 F_2 中磁化强度的夹角. 层间耦合常数 J_{12} 为

$$J_{12} \approx S^2 \sum_{j \in F_2} J(R_{0j}), \quad (40.24)$$

式中 0 表示作为原点的 F_1 中的一个原子位置. 假设铁磁层中的自旋分布为连续的. 将上式中求和用积分代替, 得到准一维的 RKKY 交换常数. 层间耦合常数与层间距离的关系为

$$J_{12} \approx \frac{1}{z^2} \sin(2K_F z), \quad (40.25)$$

这是一个单一短周期的衰减振荡关系. 其周期仍为 $\lambda = \lambda_F/2$, 对于面心立方的铜, 在自由电子近似下 $\lambda = 0.231\text{nm}$. J_{12} 按 z^{-2} 衰减. 若干实验的衰减行为与 z^{-2} 近似相符, 但周期则与许多实验不符. 例如, 面心立方的 Co/Cu(111) 多层膜的实验周期约为 1.2—1.5nm. Co/Cu(100) 的周期约为 0.5—0.7nm, 它们有长短之分但均远大于 0.231nm. 实验周期常远大于 RKKY 理论的数值的原因首先在于非铁磁层厚度不可能连续变化而是以单原子层尺度间断地变化. 因此, 实验上观察到的不同厚度下的层间耦合乃是对式 (40.25) 表示的连续变化曲线以单原子层为单位间断地取样的结果^[217]. 图 40.25 中示出的连续曲线为式 (40.25) 代表的 RKKY 耦合常数与层厚的依赖关系 $J(L)$. 横坐标以层厚 L 与其单原子层尺度 d 的比值为单位, 圆点代表当层厚为 Nd 时, J 的观察值, N 为整数. 由于 $\lambda \neq d$, 观察到的等效周期 Δ 大于 λ . 其原理有似于游标尺. 该图相应于一价金属(如 Cu)fcc[100]方向, 不难算出其 λ/d

$= 1.28$. 其等效周期 $\Lambda = 4.58 \times d$, 对 Cu, $d_{100} = 0.180\text{nm}$, $\Lambda = 0.873\text{nm}$. Λ, λ 和 d 的关系服从下式:

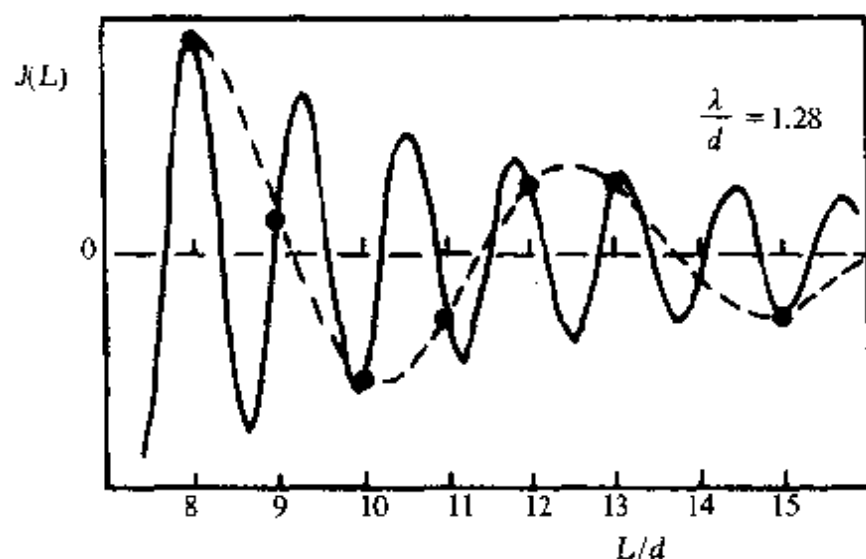


图 40.25 长周期振荡原理示意图.

$$\Lambda = \frac{1}{|1/\lambda - n/d|}, \quad (40.26)$$

式中 n 为非负整数, 以使 $\Lambda \geq 2d$, 上式亦可定性解释 Λ 依赖于晶体方向. 在自由电子近似下, λ 为各向同性的, d 与晶向有关.

对 Cu, $d_{111} = 0.208\text{nm}$. $\lambda/d = 1.11$, $\Lambda = 10.26$, $d = 2.13\text{nm}$, 但此数值偏大. 更严格的理论计算发现, 观察到的层间耦合周期与铁磁层中自旋分布的分立性相关. 后者还解释了多周期现象. 根据已知金属费米面的结构得到的 RKKY 理论计算的周期与实验相符得相当好. 列于表 40.8 中^[218].

表 40.8 振荡周期的理论值和实验值

非磁层	理论周期	系 统	实验周期
Cu(111)	$\Lambda = 4.5ML_s$ (ML_s : 单原子层)	Co/Cu/Co	$\Lambda \approx 6ML_s$
		Co/Cu/Co	$\Lambda \approx 5ML_s$
		Fe/Cu/Fe	$\Lambda \approx 6ML_s$
Cu(001)	$\Lambda_1 = 2.6ML_s$ $\Lambda_2 = 5.9ML_s$	Co/Cu/Co	$\Lambda \approx 6ML_s$
		Fe/Cu/Fe	$\Lambda \approx 7.5ML_s$
		Co/Cu/Co	$\Lambda_1 \approx 2.6ML_s$ $\Lambda_2 \approx 8ML_s$
Au(001)	$\Lambda_1 = 2.6ML_s$ $\Lambda_2 = 8.6ML_s$	Fe/Au/Fe	$\Lambda_1 \approx 2ML_s$
			$\Lambda_2 \approx 7 \sim 8ML_s$

虽然 RKKY 理论对振荡周期给出与实验基本相符的结果,但却未能给出层间交换耦合的相位、强度及其随厚度的变化等重要性能.实验证明,这两个性能随材料变化较大.例如,溅射的 Co/Cu 与 Fe/Cu 超晶格的层间耦合的振荡相差 180° .在表 40.6 中列出的反铁磁耦合第一峰的强度,各元素间相差很大.为从理论上对位相和强度的规律和原理给予阐明,需要对铁磁层中磁矩与非铁磁层中传导电子的相互作用做深入研究,在最初的 RKKY 理论中对此问题并未进行详细的探讨.在文献[100]中把式(37.27)中的 J_{jm} 唯象地看作一个接触作用.这个问题在夫里德耳及安德森关于合金中的局域矩理论中作了进一步的研究.在磁性合金中的局域能级与基体金属中的传导电子的杂化,或 $s-d$ 混合,出现了所谓虚束缚态^[107]. $s-d$ 混合理论已推广到多层膜中并提供了对层间耦合的振荡周期、相位及强度的解释^[218].

新近,用光电子能谱及反光电子能谱,特别是具有自旋极化分辨的能谱仪对铁磁金属衬底上的非铁磁超薄膜能谱的研究证明了限制在铁磁衬底与空气间的非磁性薄膜的厚度达纳米量级时,随着厚度的减小出现了量子阱状态及量子尺寸效应.由于沿膜面垂直方向晶格周期性的破坏,电子态呈现了分立的能谱^[219].图 40.26 示出大块 Ag(100)(实线)和 11 个原子层厚的薄膜中(圆点)的电子态的计算谱,分别为连续和分立谱,而且发现这些量子阱态受相邻铁磁层的作用而发生交换劈裂及自旋极化.图 40.27 示出 fcc Co 衬底上不同厚度的 Cu 覆盖层中的自旋极化,随厚度呈振荡型^[220].量子阱态及其能谱以及能密态度均为非铁磁厚度的函数,且呈周期型变化.与德哈斯范阿尔芬效应相似.当具有量子阱态的

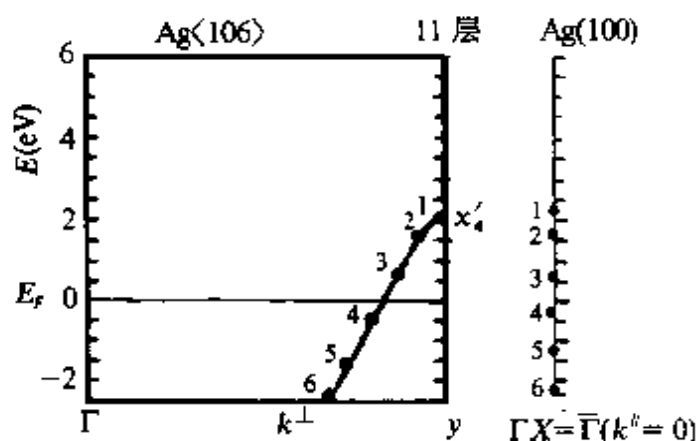


图 40.26 块状及薄膜 Ag 中的能态.

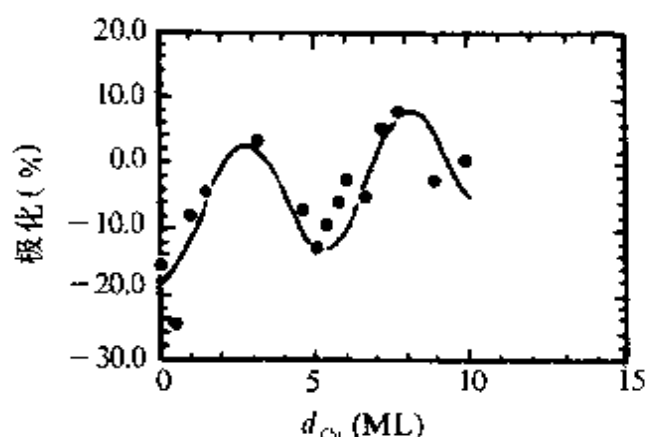


图 40.27 Cu/Co 结构中费米面附近自旋极化.

非铁磁层作为相邻铁磁层层间耦合的媒介时,导致了层间耦合的振荡行为.

层间耦合的一个重要方面为多层膜中非铁磁层中传导电子的自旋极化.这方面曾有不少理论研究,对 Cr^[221], Pd^[222] 及贵金属^[223]

均得到若干有趣的结果.实验工作多数在双层膜或覆盖层中进行.多层膜中的非磁层在其内部且自旋极化的数值不大,实验观察难度较大,用中子衍射^[224],X 射线双二色性^[225]及核磁共振^[102]方法直接进行实验研究以取得多层膜中非铁层极化及其空间分布的信息的工作正在开始,并引起人们重视.

(d)巨磁电阻效应^[226] 在外磁场作用下物质的电阻发生变化,称为磁电阻效应.洛伦兹力引起的正常磁电阻为普遍现象,值不大,且 $\rho_{\parallel} > \rho_{\perp}$. Cu 的磁电阻在 30T 的磁场下约 40%. 铁磁金属及合金具有各向异性磁电阻.在磁场作用下,电阻率依赖于磁场相对于电流的取向.通常用二者平行和垂直时的电阻表征, $\rho_{\parallel} \neq \rho_{\perp}$. 零场电阻为材料中各磁畴电阻率的平均值.与磁化过程相应,铁磁体在磁场作用下的电阻率具有饱和现象.当磁场从零增加到饱和值 H_s 时,电阻率 ρ_{\parallel} 和 ρ_{\perp} 变化到各自的饱和值,常以磁场作用下电阻率的相对变化表征磁电阻, $MR = \frac{\rho(H) - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$. 通常,在平行及垂直方向的磁电阻的相对变化符号相反,图 40.28 示出 Ni 丝的磁电阻曲线,垂直方向的饱和场比平行方向高是由于退磁场的各向异性,不同方向的磁电阻可用与磁致伸缩相似的角度依赖关系描述,为角度的偶函数.铁磁金属的饱和磁电阻的数值约 1% 至 5%. 多数材料 $\left[\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right]_{\parallel}$ 为正值, $\left[\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right]_{\perp}$ 为负,亦有例外.一些多层膜等材料的巨磁电阻具有数值大,常为负值和各向同性等特点.各向

异性磁电阻及巨磁电阻可用于制作磁场传感器,最重要用途为高密度磁记录技术中的读出头,普通的感应式读出磁头的信号正比于耦合磁通量的变化率 $\frac{d\phi}{dt}$,而磁电阻读出头只依赖于磁场强度,与变化率无关.巨磁电阻器件具有更高的灵敏度.此外,在随机存储器上的应用亦在探索之中.

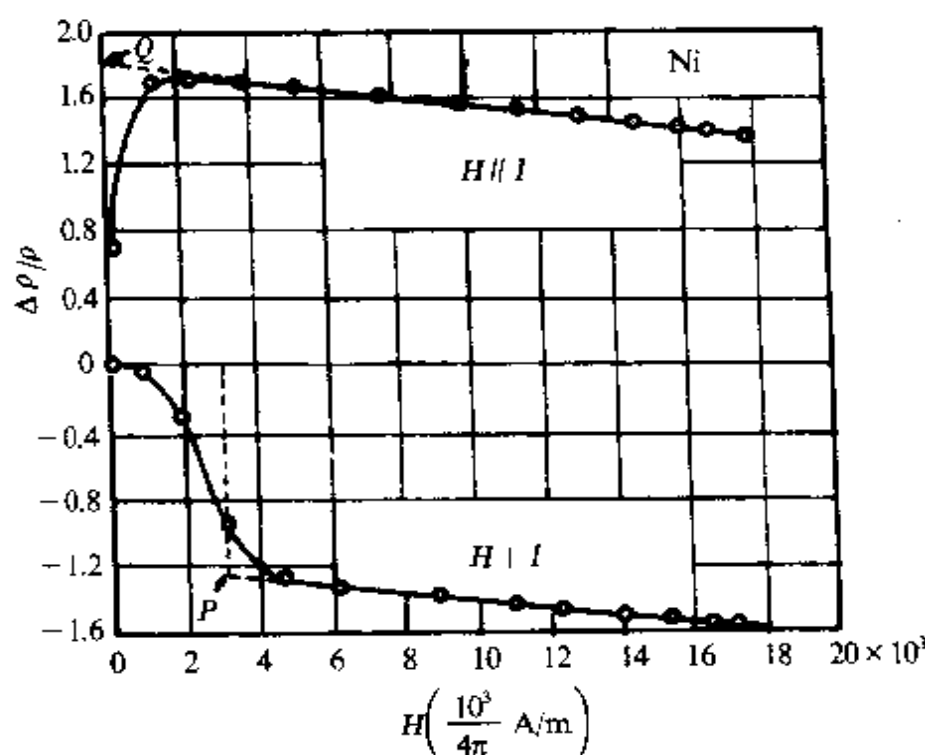


图 40.28 Ni 的磁电阻曲线.

在多层膜中,当层间呈反铁磁耦合时出现了巨大的磁电阻效应.与多层膜中的铁磁层本身的磁电阻相比,可达几十倍以至上百倍.称为巨磁电阻(GMR),且为负值,图 40.18 示出 Fe/Cr 超晶格的磁电阻曲线,其中 a, b 曲线为磁场沿多层膜平面而与电流平行或垂直的情况, c 为与平面垂直.由于退磁场效应,曲线 c 具有较高的饱和磁场,当 $H=0$ 时,由于层间耦合,各 Fe 层的磁矩为反平行,这时电阻最大.饱和后电阻最小,且几乎不随磁场变化.当层间耦合使 Fe 层磁矩平行排列时,磁电阻很小.在许多系统中,多层膜的层间耦合随非铁磁层厚度变化而作周期性变化时,磁电阻亦出现周期性的振荡.图 40.29 示出 Co/Cu 多层膜的磁电阻的振荡变

化的实验结果.大量实验证明,巨磁电阻出现的条件不在于多层膜中的反铁磁耦合,而在于相邻铁磁层的反平行排列,或更加一般地说,相邻铁磁层的非平行排列.当相邻铁磁层的磁化反平行排列时电阻最大,平行排列时,不论处于退磁状态的多畴结构或磁饱和的单畴态,电阻最低.而反平行排列的成因可以是反铁磁的层间耦合,或特殊设计的多层结构中的界面交换钉扎^[227],亦可以是由于相邻铁磁层具有不同的矫顽力^[228].很有趣的是,将此观点进一步推广,在不均匀的 Cu-Co 等合金膜中也观察到巨磁电阻效应^[229]. Cu 与 Co 几乎不互溶.利用气相快淬法(如溅射法),可得到亚稳态固溶体.适当退火即可获得由于相分离导致的不均匀合金.当成分合适时,这种不均合金的结构为超顺磁或单畴态的 Co 微粒分散于非铁磁基体中.退磁状态下,Co 微粒的磁化不平行同样导致巨磁电阻现象.近几年又发现 La-Ca-Mn-O 等氧化物,具有超巨磁电阻(CMR),其磁电阻比可高达 $10^6\%$ 以上^[230,231].

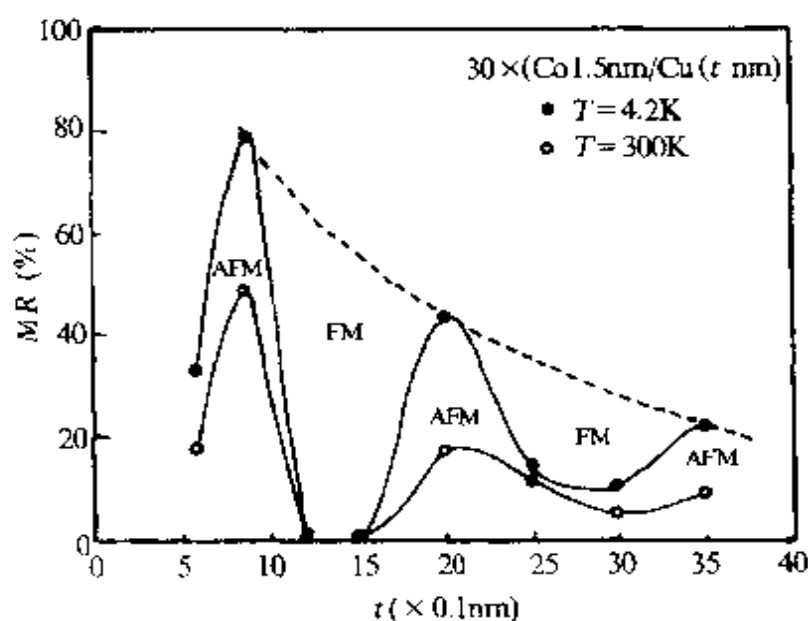


图 40.29 Co/Cu 多层膜磁电阻的振荡行为.

传统的金属导电理论基于电子电荷转移及电子经受的散射,与电子自旋无关.不同自旋电子的导电性能没有区别.自旋相关散射的双电流导电模型是最早为解释铁磁金属的电导提出的^[233],发

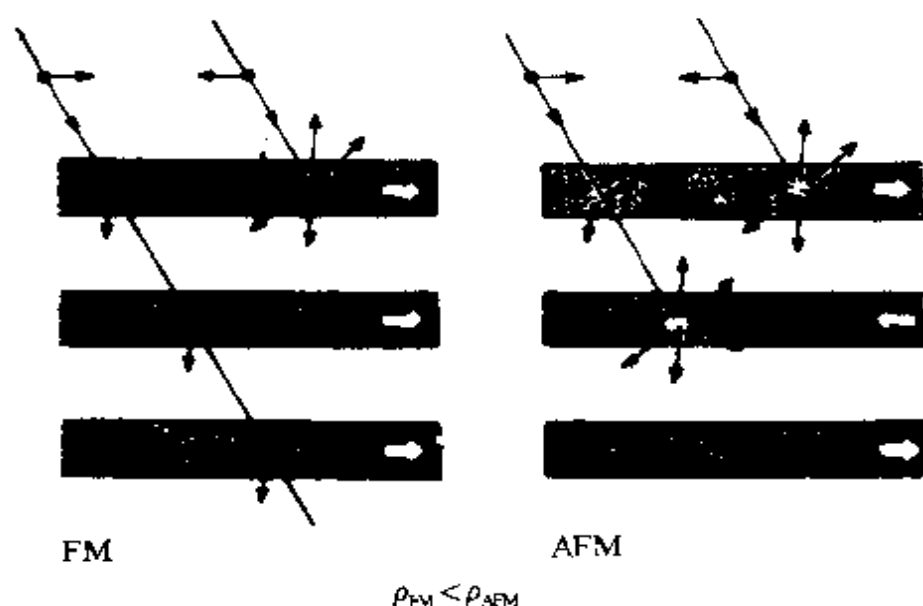


图 40.30 巨磁电阻机制示意图

现 GMR 以来得到很大发展。铁磁金属的 AMR, 金属多层结构和金属颗粒膜的 GMR 的解释均基于此理论框架。此外, 铁磁隧道结的 GMR 以及一些钙钛矿氧化物如 $\text{La}_x\text{Ca}_{1-x}\text{MnO}_3$ 的特巨磁电阻 (CMR) 的理论均属于自旋相关导电, 但具体机制各异, 与自旋相关散射不同^[231]。

金属中传导电子的非磁散射多不使电子自旋发生反转, 在温度远低于 T_0 时铁磁金属中电子自旋反转的几率很小, 因此传导电子的自旋弛豫时间 t_s 或其扩散长度 l_s 远比动量弛豫时间 τ 或其平均自由程 λ 长。例如, 室温下 Au 的自旋扩散长度约为 $1.5\mu\text{m}$, 4.2K 下 Al 的 l_s 长达 $10^3\mu\text{m}$ ^[232], 而导体的平均自由程约 10^1 — 10^2nm 。因而可以将导电分解为自旋向上 $\sigma\uparrow$, 及向下的 $\sigma\downarrow$, 两个几乎相互独立的电子导电通道, 相互并联, 各自的电阻分别为 $\rho\uparrow$ 及 $\rho\downarrow$, 取低温极限, 总电阻为

$$\rho_L = \rho\uparrow \rho\downarrow / (\rho\uparrow + \rho\downarrow) \quad (40.27)$$

正常金属的 $\rho\uparrow = \rho\downarrow$, $\rho_L = \rho\uparrow / 2 = \rho\downarrow / 2$, 双电流模型是不必要的, 没有自旋相关散射, ρ 来自于与自旋无关的散射。

在 T_0 以下, 铁磁金属的自发磁化导致了自旋相关散射, 使 ρ

$\uparrow \neq \rho_{\downarrow}$, 其自旋向上 \uparrow 定义为与总磁化强度平行, 即为多数带电子, \downarrow 指少数带电子, ρ_{\uparrow} 及 ρ_{\downarrow} 为自旋相关电阻率, 其中电阻率低的通道起着短路作用, 使总电阻 ρ_L 在 T_0 以下时陡降。

当温度上升时, 必须考虑铁磁体中传导电子与磁振子散射使其自旋反转的“自旋混合”效应, 其过程为消灭一个磁振子而使自旋 \uparrow (或 \downarrow) 的电子散射到自旋相反的状态, 从而使低电阻的短路效应减小, 使总电阻率随温度而上升, 其表达式修正为。

$$\rho_T = [\rho_{\downarrow}\rho_{\downarrow} + \rho_{\downarrow}\uparrow(\rho_{\downarrow} + \rho_{\uparrow})] / [\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow} + 4\rho_{\downarrow}\uparrow], \quad (40.28)$$

其中 $\rho_{\uparrow}\downarrow$ 为自旋混合项, 与电子-磁振子散射相关因而依赖于温度。根据式(40.28), 考虑到 ρ_{\uparrow} , ρ_{\downarrow} 及 $\rho_{\uparrow}\downarrow$ 的温度依赖性可以解释铁磁金属与合金的电阻率与温度的关系。反之, 根据 ρ_T - T 的实验数据可以确定自旋相关散射的电阻率 ρ_{\uparrow} 及 ρ_{\downarrow} 。高温下, 当 $\rho_{\uparrow}\rho_{\downarrow} \gg \rho_{\uparrow}, \rho_{\downarrow}$ 时, 自旋混合破坏了双通道的短路效应, 式(40.28)趋于

$$\rho_{TH} = (\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow}) / 4. \quad (40.29)$$

过渡铁磁金属和合金中的 s 带和 d 带电子均参与导电, 并有几种电子散射过程, 如杂质、缺陷、表面、界面、声子和磁振子等。上述关系式中的自旋相关电阻率 $\rho_{\uparrow} \neq \rho_{\downarrow}$ 来源于能带中电子的浓度 n 、有效质量 m^* 、散射的弛豫时间 τ 、与其相关的平均自由程 λ 以及费米面能态密度 $N(E_F)$ 等均因自旋态 σ 不同而异, 自旋相关电阻率可表示为

$$\rho_{\sigma} = m_{\sigma}^* / n_{\sigma} e^2 \tau_{\sigma}, \quad (40.30)$$

σ 表示自旋态 \uparrow 或 \downarrow , 对于某一种自旋散射势, 其矩阵元为 V

$$\tau_{\sigma}^{-1} \sim 1/\lambda \sim |V_{\sigma}|^2 N_{\sigma}(E_F) \quad (40.31)$$

自旋相关散射的来源可分为两类, 其一为内禀或本征性来源, 铁磁金属电子能带的交换劈裂引起的自旋相关的 n_{σ} , m_{σ}^* , 以及 $N_{\sigma}(E_F)$ 均属之, 其中 $N_{\sigma}(E_F)$ 尤为重要, 它正比于电子散射的终态, s 带为宽带, d 带为窄带, 其中 d 带的交换劈裂是自发磁化的主要来源, 并使 $N_{\uparrow}(E_F)$ 与 $N_{\downarrow}(E_F)$ 有很大差别, 是引起自旋相关

散射的主要来源. 由于 d 带很窄, 具有大的有效质量, 而 s 带则相反, 故通常假设导电主要是 s 电子的贡献. 以 Co 与 Ni 为例, 大的交换劈裂使 $d \uparrow$ 带完全处于费米面之下, 故 $N \uparrow(E_F)$ 仅来自 s 电子, 而 $d \downarrow$ 带与费米面相交, $N \downarrow(E_F)$ 来自 $s \downarrow + d \downarrow$ 带的总和. 显然, $N \uparrow(E_F) < N \downarrow(E_F)$, 故 Co 及 Ni 基合金具有 $\rho \uparrow < \rho \downarrow$ 的倾向. 实验证明, 在一些 Ni 及 Co 基合金中 $\alpha = \rho \downarrow / \rho \uparrow > 10$. Fe 的交换劈裂未能使 $d \uparrow$ 完全处于费米面之下, 故 Fe 基合金中自旋相关电阻的不对称倾向常低于 Co, Ni. 另一类自旋相关散射的来源是非本征的, 这就是某种杂质或缺陷的自旋相关势 V_s . 例如铁磁金属中的杂质 Cr, 当 Cr 杂质溶于 Ni 时, Cr 的磁矩与基质 Ni 的磁化方向相反, 呈反铁磁耦合, 故自旋向上, 与 Ni 的磁化同向的传导电子受到 Cr 杂质较大的排斥与散射; 而自旋向下的电子则相反, 与上述 Ni, Co 的本征性能不同, $\alpha = \rho \downarrow / \rho \uparrow < 1$. 因此, Fe, Co, Ni 中溶有不同的杂质金属元素时, 杂质散射的自旋相关剩余电阻的不对称因子 $\alpha = \rho_{0, \downarrow} / \rho_{0, \uparrow}$ 可以大于或小于 1, 如表 40.8 所列.

表 40.8 一些稀释合金杂质电阻的 α 值^[234]

	Fe	Co	Ni	Cu	Au	Al	Mn	Cr	V	Mo	W	Ru
Fe		3.7	7			8.6	0.17	0.17	0.12	0.21	0.24	0.38
Co	12						0.8	0.3	1	0.7	0.84	0.22
Ni	11	13		3.7	5.9	1.7	6.3	0.2	0.45	3.28	0.4	0.15

对金属多层膜巨磁电阻的理论解释亦多建立在自旋相关散射的双电流模型的基础上^[235]. 一般多层膜中各层厚度约为一到几纳米, 远小于电子自旋扩散长度, 因而可以采用双电流模型. 多层膜磁电阻的测试方法有两种: CIP, 即电流沿膜面, CPP, 电流与膜面垂直. 通常多采用 CIP. 但电子的运动是混乱的, 可穿越若干层, 并经受层内及界面的散射, 总电阻为电子经过各层的各个等效电阻的总和. 一般情况下, 这此等效电阻的相加是复杂的, 但有两个极端在情况较为简单. 其一为当平均自由程 λ 远大于各层厚度, 在高

磁场或铁磁耦合作用下,如图 40.30 中 F ,各磁层 M_i 相平行,两种自旋电子通道的电阻率可用下式表示:

$$\rho_{\uparrow} = (\rho_F \uparrow t_F + \rho_N t_N) / (t_F + t_N),$$

$$\rho_{\downarrow} = (\rho_F \downarrow t_F + \rho_N t_N) / (t_F + t_N),$$

式中 ρ_F 为铁磁层的自旋相关电阻率, ρ_N 为非磁层的与自旋无关的电阻率。 t_F 及 t_N 为铁磁层及非磁层的厚度。为简单计,上式中未考虑界面散射的等效电阻。由于 $\rho_{F\uparrow} \neq \rho_{F\downarrow}$,故多层膜的 $\rho_{\uparrow} \neq \rho_{\downarrow}$,多层膜的总电阻率可用公式(40.27)来表示:

$$\rho_F = \rho_{\downarrow} \rho_{\uparrow} / (\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow}) \quad (40.27)$$

其中低电阻通道起了短路作用,使饱和态或铁磁态下的多层膜处于低电阻状态。

当多层膜中磁层的 M_i 呈反平行排列时,若自旋 \downarrow 的电子在 M_i 向下的磁层中为低电阻态,则当跨越到相邻的 M_i 向上的磁层中时会变为高阻状态。与此相似,自旋 \uparrow 的电子从 M_i 向下的磁层跨越到 M_i 向上的磁层中时,其电阻从高阻态变为低阻态。这种情况类似于铁磁金属中高温下自旋混合的情况。两自旋电子通道的电阻相同,均为高阻及低阻态的平均值:

$$\overline{\rho_{\uparrow}} = \overline{\rho_{\downarrow}} = \frac{\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow}}{2}$$

总电阻为两者并联,与公式(40.29)相同:

$$\rho_{AF} = \frac{\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow}}{4} \quad (40.32)$$

与(40.27)式相比,处于高电阻状态。于是多层膜的磁电阻比 MR 为:

$$\begin{aligned} \text{MR} &= \frac{\rho_{AF} - \rho_F}{\rho_{AF}} = \frac{(\rho_{\uparrow} - \rho_{\downarrow})^2}{(\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow})^2} \\ &= \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \right)^2 \end{aligned} \quad (40.33)$$

可见,不论 $\alpha > 1$ 或 $\alpha < 1$,按传统的定义,磁电阻均为负值。且 MR 可达很大的数值,这就是巨磁电阻的两大特征。进一步的运算可有:

$$\text{MR} = \frac{\left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2}{4 \left\{ \frac{1}{\alpha} + \frac{t_N}{t_F} \frac{1}{\alpha_{\downarrow}} \right\} \left[1 + \frac{t_N}{t_F} \frac{1}{\alpha_{\downarrow}} \right]} \quad (40.34)$$

式中 $\alpha_{\downarrow} = \rho_F / \rho_N$ 。上式说明磁电阻比不仅依赖于不对称散射因子 α , 而且还依赖于各层的厚度。但 MR 与 t_F 及 t_N 的关系没有如此简单, 当厚度 t 改变时, 与平均自由程的比值也变化, 故需要更严格的电子输运理论^[236]。

第十四编 参考文献

- [1] A. H. Morrish, *The Physical Principles of Magnetism*, John Wiley & Sons Inc(1965).
- [2] 宋德生、李国栋, 电磁学发展史, 广西人民出版社(1987).
- [3] P. Curie, *Ann. de Chim. et Phys.* (7)5, 289(1895).
- [4] P. Langevin, *J. de Phys.* ,4, 687(1905).
- [5] P. Weiss, *J. Phys.* ,6, 661(1907).
- [6] W. Heisenberg, *Z. Phys.* ,49, 619(1928).
- [7] J. H. Van Vleck, *The Theory of Electric and Magnetic Susceptibilities*, Oxford Univ. Press(1932).
- [8] С. В. Вонсовский и Я. С. Шур, Ферромагнетизм, гостехиздат (1948); С. В. Вонсовский, Сокращенное Учение О Магнетизме, Москва(1953).
- [9] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism* D. Van Nostrand Co. Inc. (1951); IEEE Press (1993).
- [10] Т. Г. Лещин, Физические Свойства Металлов и Сплавов, Машииз, Москва(1956).
- [11] W. R. Myer, *Rev. Mod. Phys.* ,24, 15(1952).
- [12] Ya. G. Dorfman, *Diamagnetism and The Chemical Bond*, Fizmatgiz, Moscow(1961).
- [13] P. W. Selwood, *Magnetochemistry*, Oxford Univ. Press(1932); (1956).
- [14] W. E. Henry, *Phys. Rev.* ,88, 559(1952).
- [15] D. H. Martin, *Magnetism in Solids*, London Iliffe Book Ltd. (1967).
- [16] W. G. Penny, G. J. Kynch, *Proc. Roy. Soc. (London)* ,A170, 112(1939).
- [17] J. H. Van Vleck, *J. Chem. Phys.* ,3, 807(1935).
- [18] C. 基泰尔, 杨顺华等译, 固体物理导论, 科学出版社(1979).
- [19] F. Seitz, *The Mod. Theory of Solids*, McGraw-Hill Book Co. (1940).
- [20] L. D. Landau, *Z. Phys.* ,64, 629(1930).
- [21] S. V. Vonsovskii, *Magnetism*, John Wiley & Sons(1971).
- [22] 戴道生、钱昆明, 铁磁学(上册), 科学出版社(1987).
- [23] A. H. Wilson, *The Theory of Metals*, Cambridge University Press(1936).
- [24] W. J. de Haas, P. W. Van Alphen, *Comm. Kamerlingh. Onne Lab. Univ. Leiden* 208d, 212a, (1930); 220d(1933).
- [25] D. Shoenberg, *Progress in Low Temperature Physics*, 1, Interscience Publishers, New York(1957).
- [26] W. Pauli, *Z. Physik*, 41, 81(1927).
- [27] R. T. Schmacher, C. P. Slichter, *Phys. Rev.* , 101, 58(1956); R. T. Schmacher, W.

- E. Vehse, *J. Phys. Chem. Sol.*, **24**, 297 (1963).
- [28] J. S. Denbigh, W. M. Lomer, *Proc. Phys. Soc.*, **82**, 156 (1963).
- [29] J. Kuo, et al., *Phys. Rev.*, **B35**, 7295 (1987). 见 [207], [211].
- [30] M. N. Baibich et al., *phys. Rev. Lett.*, **61**, 2472 (1988). S. S. P. Parkin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **64**, 2364 (1991).
- [31] H. R. Zhai, *J. Mag. Mag. Mat.*, **115**, 20 (1992).
- [32] Я. Г. Дорфман, Магнитные Свойства и Строение Вещества, Москва (1955).
- [33] N. F. Mott, *Proc. Phys. Soc.*, **47**, 571 (1945).
- [34] E. P. Wohlfarth, *Proc. Leeds Phil. Soc.*, **5**, 89 (1949).
- [35] D. H. Parkinson, *Reports on Progress in Phys.*, London, **21**, 226 (1958).
- [36] B. Svensson, *Ann. der Phys.*, **18**, 299 (1933).
- [37] J. Friedel et al., *J. Appl. Phys.*, **32**, 325s (1961).
- [38] E. W. Pugh, et al., *Phys. Rev.*, **105**, 814 (1957).
- [39] R. M. Bozorth, et al., *Phys. Rev.*, **122**, 1157 (1961).
- [40] K. J. Suran, *J. Mag. Mag. Mat.*, **7**, 351 (1978).
- [41] J. Croat et al., *J. Appl. Phys.*, **55**, 2078 (1984); S. Sagawa, et al., *J. Appl. Phys.*, **55**, 2083 (1984).
- [42] J. M. D. Coey et al., *J. Mag. Mag. Mat.*, **87**, L251 (1990); Y. C. Yang et al., *Proc. 11th IWREMA, Pittsburgh*, **2**, 190 (1990).
- [43] C. G. Shull et al., *Rev. Mod. Phys.*, **25**, 100 (1953).
- [44] A. Arrott, *Magnetism*, ed. by G. T. Rado and H. Suhl, **I B**, 296, Academic Press, New York (1966).
- [45] F. Heusler, *Verhand. deut. Physik. Ges.*, **5**, 219 (1903).
- [46] H. H. Porter, *Phil. Mag.*, **12**(7), 255 (1931).
- [47] P. G. Van Engen, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 202 (1983).
- [48] B. T. Matthias, et al., *Phys. Rev.*, **109**, 604 (1958).
- [49] B. T. Matthias, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **7**, 7 (1961).
- [50] L. Creveling, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **18**, 851 (1967).
- [51] J. G. Booth, *Ferromagnetic Materials*, **4**, ed. by E. P. Wohlfarth and K. H. J. Buschow, North-Holland, 211 (1988).
- [52] E. P. Wohlfarth, *Ferromagnetic Materials*, **1**, ed. by E. P. Wohlfarth North-Holland, 1 (1980).
- [53] P. R. Weiss, *Phys. Rev.*, **74**, 1493 (1948).
- [54] 近角聡信, 強磁体の物理, 裳华房 (1984).
- [55] R. J. Moon, et al., *J. Appl. Phys.*, **35**, 10415 (1964).
- [56] H. E. Nigh, et al., *Phys. Rev.*, **132**, 1092 (1963).

- [57] E. C. Stoner, *Proc. Roy. Soc.*, **A154**, 656 (1936).
- [58] N. F. Mott, *Proc. Phys. Soc.*, **47**, 571 (1935).
- [59] J. C. Slater, *Phys. Rev.*, **49**, 537 (1935).
- [60] V. L. Moruzzi, J. F. Janak, A. R. Williams, *Calculated Electronic Properties of Metals*, Pergamon Press (1978).
- [61] C. G. Shull et al., *J. Phys. Soc. Japan*, **17B1** (1962); R. M. Moon, *Phys. Rev.*, **136**, A195 (1964); H. A. Mook, *Phys. Rev.*, **148**, 495 (1966).
- [62] E. C. Stoner, *J. Physique*, **12**, 377 (1951).
- [63] M. Shimizu, *Physica*, **B91**, 14 (1977).
- [64] P. R. Rhodes, E. P. Wohlfarth, *Proc. Roy. Soc.*, **273**, 247 (1963); E. P. Wohlfarth, *J. Mag. Mag. Mat.*, **7**, 113 (1978).
- [65] C. Zener, *Phys. Rev.*, **81**, 440 (1951).
- [66] С. Э. Вонсовский и К. Власов *ЖЭТФ*, **25**, 327 (1953).
- [67] J. Friedel, *Canad. J. Phys.*, **34**, 1190 (1956).
- [68] P. W. Anderson, *Phys. Rev.*, **124**, 41 (1961).
- [69] K. R. A. Ziebeck, D. J. Brown, *J. Phys.*, **F10**, 2015 (1980); **11**, L127 (1981).
- [70] C. Herring, *Magnetism*, W. ed, G. T. Rado and H. Suhl (Academic Press, 1966).
- [71] T. Moryia, *Spin Fluctuations in Itinerant-Electron Magnetism*, Springer-Verlag (1985); 守谷亨, *物理学进展*, **4**(2), 255 (1984).
- [72] Y. Ishikawa et al., *Phys. Rev.*, **B16**, 4956 (1977).
- [73] H. Bizette, *J. de Phys.*, **12**, 1575 (1953).
- [74] C. J. Kriesman, T. R. McGuire, *Phys. Rev.*, **98**, 936 (1955); Lingelbach, *Z. Phys. Chem.*, **14**, 1 (1958).
- [75] J. W. Stout et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **64**, 1535 (1942); R. W. Millar, *J. Am. Chem. Soc.*, **50**, 1875 (1928).
- [76] M. Foëx, *Compt. rend.*, **227**, 193 (1948).
- [77] G. K. White, S. B. Woods, *Can. J. Phys.*, **33**, 58 (1955); **35**, 346 (1957).
- [78] I. S. Jacobs, *J. Appl. Phys.*, **32**, 618 (1961).
- [79] H. Labhart, *Zs. Angew. Math. Phys.*, **4**, 1 (1953).
- [80] L. Néel, *Ann. de Phys.*, **17**, 61 (1932); **5**, 232 (1936).
- [81] C. G. Shull, M. K. Wilkinson, *Rev. Mod. Phys.*, **25**, 100 (1953).
- [82] T. Yamada et al., *J. Phys. Soc. Japan*, **28**, 615 (1970).
- [83] J. L. Fry, Y. Z. Zhao (赵玉芝) et al., *Phys. Rev.*, **B36**, 1, 868 (1987).
- [84] L. Corliss et al., *Phys. Rev. Lett.*, **3**, 211 (1959).
- [85] A. B. Lidiard, *Proc. Roy. Soc.*, **A224**, 161 (1954).
- [86] A. W. Overhauser, *Phys. Rev. Lett.*, **4**, 462 (1960); *Phys. Rev.*, **128**, 1437 (1962).

- [87] E. Fawcett, *Rev. Mod. Phys.*, **60**, 209 (1988); 赵玉芝, F. C. Khanna, 科学通报, **3**, 185 (1991); A. Schreyer et al., *Phys. Rev.*, **B52**, 16066 (1995).
- [88] T. A. Kaplan, *Phys. Rev.*, **119**, 1460 (1960); 蒲富恪等, 物理学报, **3**, 175 (1962).
- [89] L. Néel, *Ann. de Phys.*, **3**, 137 (1948).
- [90] J. Kondo, *Prog. Theor. Phys.*, **32**, (1), 32 (1964).
- [91] R. A. Levy, R. Hasegawa, *Amorphous Magnetism II*, Plenum Press, N. Y. (1977).
- [92] P. A. Beck, *Met. Trans.*, **2**, 2015 (1971).
- [93] W. Heitler, F. London, *Z. Phys.*, **44**, 455 (1927).
- [94] R. Stuart et al., *Phys. Rev.*, **120**, 353 (1960); A. J. Freeman et al., *Phys. Rev.*, **124**, 1439 (1961).
- [95] H. Bethe, *Handbuch der Physik*, **24/2**, 595 (1933).
- [96] J. C. Slater, *Phys. Rev.*, **36**, 57 (1930).
- [97] H. A. Kramers, *Physica*, **1**, 182 (1934).
- [98] P. W. Anderson, *Phys. Rev.*, **80**, 922 (1950).
- [99] C. Zener, *Phys. Rev.*, **82**, 403 (1951).
- [100] M. A. Ruderman, C. Kittel, *Phys. Rev.*, **96**, 99 (1954); T. Kasuya, *Prog. Theor. Phys. (Kyoto)*, **16**, 45 (1956); K. Yosida, *Phys. Rev.*, **106**, 893 (1957).
- [101] D. V. Lang et al., *Phys. Rev. Lett.*, **29**, 12, 776 (1972); J. B. Boyce, C. P. Slichter, *Phys. Rev. Lett.*, **32** (2), 61 (1974).
- [102] Q. Y. Jin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **72**, 768 (1994).
- [103] 李正中, 固体理论, 高等教育出版社 (1985).
- [104] J. Hubbard, *Proc. Roy. Soc.*, **A276**, 238 (1963); **A277**, 237; **A281**, 401 (1964); **A285**, 542 (1965); **A296**, 82 (1966).
- [105] W. Kohn, L. J. Sham, *Phys. Rev.*, **104**, A1133 (1965); O. Gunnarson, B. I. Lundqvist, *Phys. Rev.*, **B13**, 4274 (1976).
- [106] P. Bruno et al., *Phys. Rev.*, **67**, 1602 (1991); *Phys. Rev.*, **B46**, 261 (1992).
- [107] P. W. Anderson, *Phys. Rev.*, **124**, 41 (1961).
- [108] J. C. Slater, *J. Appl. Phys.*, **8**, 385 (1937); L. Pauling, *Phys. Rev.*, **54**, 899 (1938).
- [109] J. Crangle, G. C. Hallam, *Proc. Roy. Soc.*, **A272**, 119 (1963).
- [110] J. Friedel, *J. Phys. et Rad*, **19**, 573 (1958); **23**, 692 (1962).
- [111] M. F. Collins et al., *Proc. Phys. Soc.*, **82**, 633 (1963); *Phil. Mag.*, **8**, 401 (1963).
- [112] K. H. J. Buschow, *Ferromagnetic Material* **1**, ed. by E. P. Wohlfarth, North-Holland, 297 (1980).
- [113] K. H. J. Buschow, *Ferromagnetic Material*, **4**, ed. by E. P. Wohlfarth and K. H. J. Buschow, North-Holland, 3 (1988); L. J. Strnat, *ibid.*, 131, (1988).
- [114] Y. C. Yang et al., *J. Appl. Phys.*, **70**, 6001 (1991); 中国科学 B2, 113 (1991). B. G.

- Shen et al., *Solid State Comm.*, **83**(10), 753(1992).
- [115] J. M. D. Coey, Hong Sun, *J. Mag. Mag. Mat.*, **87**, L251(1990).
- [116] F. J. Dyson, *Phys. Rev.*, **102**, 1217, 1230(1956).
- [117] C. Herring, C. Kittel, *Phys. Rev.*, **81**, 869(1951); T. Izuyama et al., *J. Phys. Soc. Jap.*, **18**, 1025(1963).
- [118] F. Keffer, et al., *Am. J. Phys.*, **21**, 250(1953).
- [119] H. Kaplan, *Phys. Rev.*, **86**, 121(1952).
- [120] B. Cooper et al., *Phys. Rev.*, **127**, 57(1962).
- [121] N. Akulov, *Z. Phys.*, **100**, 197(1936); C. Zener, *Phys. Rev.*, **96**, 1335(1954); H. B. Callen, E. Callen, *J. Phys. Chem. Solids*, **27**, 1271(1996).
- [122] 翟宏如, 杨桂林, 徐游, 物理学进展, **3**, (3), 269(1983); M. T. Hutchings, *Solid State Phys.*, ed. by F. Seitz and D. Turnbull, **16**, 227(1964).
- [123] J. H. Van Vleck, *Phys. Rev.*, **52**, 1178(1937).
- [124] 森信郎, 鹤饲武, 固体物理(日), **9**, 578(1974).
- [125] W. P. Mason, *Phys. Rev.*, **96**, 302(1954).
- [126] L. Néel, *Comp. Rend.*, **237**, 1613(1953); S. Taniguchi et al., *Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ.*, **46**, 330(1954).
- [127] J. C. Slonczewski, *Phys. Rev.*, **110**, 1341(1958).
- [128] W. H. Meiklejohn, C. P. Benn, *Phys. Rev.*, **102**, 1413(1956); J. S. Kouvel, *J. Phys. Chem. Solids*, **16**, 152(1960); *J. Appl. Phys.*, **30**, 313S(1959).
- [129] R. M. Bozorth, D. M. Chapin, *J. Appl. Phys.*, **13**, 320(1942).
- [130] W. F. Brown, Jr., *J. Appl. Phys.*, **30**, 62S(1959).
- [131] F. Bloch, *Zs. Phys.*, **74**, 295(1932).
- [132] L. Néel, *C. R.*, **241**, 533(1955).
- [133] B. A. Lilley, *Phil. Mag.*, **41**, 792(1950).
- [134] D. J. Craik, R. S. Tebble, *Ferromagnetism and Ferromagnetic Domains*, North-Holland(1965).
- [135] C. Kittel, *Rev. Mod. Phys.*, **21**, 541, (1949).
- [136] W. F. Brown, *Magnetic Principles in Ferromagnetism*, North-Holland Publ. Co., Amsterdam(1962).
- [137] A. Aharoni, S. Shtrikman, *Phys. Rev.*, **109**, 1522(1958).
- [138] 李伯威, 蒲富恪, 物理学报, **30**, 1637(1981); 蒲富恪, 李伯威, 科学通报 **26**(3), 208(1981).
- [139] R. Carey, E. D. Isaac, *Magnetic Domains and the Techniques for their Observation*, Academic Press, London, (1966).
- [140] G. Asti, S. Rinaldi, *J. Appl. Phys.*, **45**, 3600(1974).

- [141] G. Asti et al. , Proc. Intern. Conf. RE and Applications, Beijing(1985).
- [142] W. F. Brown, *Phys. Rev.* **58**, 736(1940); **60**, 139(1941).
- [143] B. B. Ларченко, Изв. АН. СССР, Сер. **21**, 1825(1957).
- [144] L. Neel, *J. Phys. Rad.* , **9**, 184, 193(1948).
- [145] C. Kittel, J. K. Galt, Solid State Physics, **3**, 437 Acad. Press Inc. (1956).
- [146] 鍾文定, 铁磁学, 科学出版社(1987).
- [147] I. S. Jacob, C. P. Bean, *Phys. Rev.* , **100**, 1060(1955).
- [148] H. Kronmüller, Supermagnets, Hard magnetic Materials, Klumer Acad. Publisher, 461(1991).
- [149] L. Neel, *J. Phys. Rad*, **62**, 250(1956).
- [150] R. Becker, *Phys. Zs.* , **33**, 905(1932).
- [151] R. Becker, W. Doring, Ferromagnetismus, Verlag Von Julius pringer, Berlin(1939).
- [152] M. Kersten, Grundlagen einer Theorie der Ferromagn. Hysterese und Koerzitivkraft, Leipzig(1943); *Zs. f. Phys.* , **124**, 507(1948).
- [153] L. Neel, *Cah. Phys.* , **25**, 21(1944); *Physica*, **15**, 225(1949).
- [154] J. G. Goodenough, *Phys. Rev.* , **95**, 917(1954).
- [155] H. Trauble, Magnetism and Metallurgy, **2**, ed. by Ami E. Berkowitz, E. Kneller, Aead. Press, New York and London, 621. (1969).
- [156] G. Rieder, *Abhandl. Braunschweig Wiss. Ges.* , **11**, 20(1959).
- [157] A. J. Kurtzig, J. R. Patel, *Phys. Lett.* , **33A**, 123(1970).
- [158] H. Kronmüller, *AIP Conf. Proc.* , **10**, 1006(1973).
- [159] H. R. Hilzinger, *Appl. Phys.* , **12**, 253(1977).
- [160] R. Friedberg, D. I. Paul, *Phys. Rev. Lett.* , **34**, 1234(1975); D. I. Paul, *J. Appl. Phys.* , **53**, 1649, 2362(1982).
- [161] H. Kronmüller, *J. Mag. Mag. Mat.* , **7**, 341(1978).
- [162] T. Egami, *Phys. Status Solidi*; **19(a)**, 747(1973); **20(1)**, 157(1973).
- [163] L. Neel, *Cahiers de Phys.* , **25**, 21(1944).
- [164] H. J. Williams, M. Goertz, *J. Appl. Phys.* , **23**, 316(1952).
- [165] L. F. Bates, D. H. Martin, *Proc. Phys. Soc.* , **B69**, 145(1956).
- [166] J. G. Goodenough, *Phys. Rev.* , **95**, 917(1954).
- [167] H. Kronmüller, H. R. Hilzinger, *J. Mag. Mag. Mat.* , **2**, 3(1976). H. Kronmüller, Proc. I Intern. Symp. on Mag. Anisotropy and Coercivity in Re-TM Alloys, San Diego(1978).
- [168] F. E. Luborsky et al. , *J. Appl. Phys.* , **28**, S344(1957).
- [169] L. Neel, *Compt. Rend*, **228**, 664(1949).
- [170] J. J. Becker, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Petrol. Engrs.* , **209**, 59(1957).

- [171] C. P. Bean et al., *J. Appl. Phys.*, **30**, 1208 (1959).
- [172] S. Mørup, et al., *J. de Phys.*, **37**(6), 297 (1976).
- [173] L. Neel, *J. Phys. Soc. Japan*, **17 Suppl. B-1**, 672 (1962).
- [174] H. Toppe, S. Mørup, Proc. Int. Conf. Mossb. Spectroscopy, Krakow Poland, 321 (1975).
- [175] R. C. Nininger, D. Schroeen, *J. Phys. Chem. Solids*, **39**, 137 (1978).
- [176] P. C. E. Stamp, et al., *Intern. J. of Mod. Phys.*, **B6**, 1355 (1992).
- [177] A. Defranzo et al., *J. Appl. Phys.*, **63**, 4234 (1988).
- [178] E. M. Chudnovsky et al., *Phys. Rev.*, **B37**, 9455 (1988).
- [179] P. C. E. Stamp et al., *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 2802 (1991).
- [180] D. Stanffer, *Solid State Comm.*, **18**, 533 (1976).
- [181] D. D. Awschalom et al., *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 783 (1990).
- [182] J. Tejada et al., *J. Mag. Mag. Mat.*, **118**, 65 (1993); L. I. Balcells et al., *J. Mag. Mag. Mat.*, **109**, L-159 (1992).
- [183] W. D. Zhong et al., Proc. Int. Symp. Phys. Mag. Mat., 30 (1992).
- [184] P. Gaunt, *J. Appl. Phys.*, **59**, 4129 (1986); *Phil. Mag.*, **48**, 261 (1983).
- [185] M. Vehara et al., *Phys. Lett.*, **114A**, 23 (1986).
- [186] B. Barbara et al., *Phys. Lett.*, **A145**, 205 (1990).
- [187] P. C. E. Stamp, *Nature*, **359**, 365 (1992).
- [188] W. P. Halperin, *Rev. Mod. Phys.*, **158**, 533 (1986).
- [189] R. Kubo, *J. Phys. Soc. Japan*, **17**, 975 (1962); R. Kubo et al., *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **14**, 49 (1984).
- [190] K. Kimura et al., *Surf. Sci.*, **156**, 883 (1985).
- [191] P. Yee, W. D. Knight, *Phys. Rev.*, **B11**, 3261 (1975).
- [192] Z. Q. Qiu et al., *J. Appl. Phys.*, **61**, 3314 (1987).
- [193] S. Mørup, *Progress in Physics (Chinese)*, **6**, 1 (1986).
- [194] W. Doring, *Z. Naturf. (a)*, **16**, 1146 (1961).
- [195] J. Mathon, *Phys. Rev.*, **B24**, 6588 (1981).
- [196] C. B. Peng, et al., *J. Appl. Phys.*, **71**, 5157 (1992).
- [197] C. J. Gutierrez, *Phys. Rev.*, **B44**, 2190 (1991).
- [198] A. J. Freeman et al., *J. Mag. Mag. Mat.*, **100**, 497 (1991).
- [199] P. E. Ferguson, *J. Appl. Phys.*, **49**, 2203 (1978).
- [200] L. E. Klebanoff et al., *Phys. Rev.*, **B33**, 5301 (1986).
- [201] C. Rau et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 2311 (1986).
- [202] C. Liu et al., *Phys. Rev.*, **B41**, 553 (1990).
- [203] M. Mauer et al., *Europhys. Lett.*, **9**, 803 (1989).

- [204] 见[102]
- [205] D. J. Sellmyer, et al., *Mat. Sci. and Eng.*, **B6**, 137(1990).
- [206] J. C. Bruyere, et al., *J. Appl. Phys.*, **36**, 844(1965).
- [207] P. Grunberg, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 2442(1986).
- [208] C. Carbone et al., *Phys. Rev.*, **B36**, 2433(1987).
- [209] C. F. Majkrzak, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 2700(1986).
- [210] F. Nguyen van Dau, et al., *J. Phys. (Paris)*, **49**, C8-1633(1988).
- [211] S. S. P. Parkin, *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 3598(1991).
- [212] S. S. P. Parkin, et al., *Phys. Rev.*, **B44**, 7131(1991).
- [213] J. Unguris et al., *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 140(1991).
- [214] J. Unguris et al., 38th Annu. Conf. on Mag. and Mag. Mat., EP06(1993).
- [215] Z. Q. Qiu et al., *Phys. Rev. Lett.*, **68**(9), 1398(1992).
- [216] C. L. Gutierrez et al., *J. Mag. Mag. Mat.*, **116**, L305(1995).
- [217] R. Coehoorn, *Phys. Rev.*, **B44**, 9331(1991).
- [218] P. Bruno, *J. Mag. Mag. Mat.*, **116**, L13(1992); *Phys. Rev.*, **B65**, 411(1955).
- [219] J. E. Ortega et al., *J. Appl. Phys.*, **73**, 5771(1993); *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 844(1992).
- [220] C. Carbone et al., *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 2805(1993).
- [221] Zhu-Pei Shi et al., *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 3768(1992).
- [222] D. Stoeffper et al., *Phys. Rev.*, **B49**, 299,(1994).
- [223] J. L. Perez Diaz, et al., *J. Appl. Phys.*, **75**, 6470,(1994).
- [224] J. A. Borchers, et al., *J. Appl. Phys.*, **75**, 6498(1994).
- [225] J. F. Bobo, et al., *J. Mag. Mag. Mat.*, **126**, 251(1994).
- [226] 翟宏如等, 物理学进展, **17**(2), 159(1997).
- [227] B. Dieny, et al., *Phys. Rev.*, **B43**, 1297(1991).
- [228] C. Dupas, et al., *J. Appl. Phys.*, **68**, 5680(1990).
- [229] A. E. Berkowitz, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 3745(1992); John Q. Xiao, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 3749(1992).
- [230] R. Von Helmholt et al., *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 2331(1993).
- [231] G. C. Xiong, D. S. Dai, *Aspects of Modern Magnetism*, World Scientific, 164(1996).
- [232] N. F. Mott, *Adv. Phys.*, **13**, 325(1964).
- [233] J. M. D. Coey, *Aspects of Modern Magnetism*, World Scientific, 2(1996).
- [234] I. A. Campbell, A. Fert, *Ferromagnetic Materials*, **3**, 747, North Holland Pub. Co. (1982).
- [235] J. Mathon, *Contemporary Physics*, **32**, 143(1991); D. M. Edwards et al., *IEEE*

MAG. ,**27**,3548(1991).

- [236] R. E. Camley, J. Barnas, *Phys. Rev. Lett.* ,**63**,644(1989). S. F. Zhang, P. M. Levy,
Mat. Res. Soc. Proc. ,**231**,225(1992).

人名索引

三画至五画

山藤馨(Yamafuji, K.) 2
巴丁(Bardeen, J.) 1
孔兹勒(Kunzler, J. E.) 2
戈特尔特(Gortler, C. J.) 2
比恩(Been, C. P.) 2
弗罗列希(Fröhlich, H.) 24
田中昭二(Tanaka, S.) 162
马森(Mathon, J.) 589
贝特(Bethe, H. A.) 416
贝茨(Bates, L. F.) 570
外斯(Weiss, P.) 302, 354
希索夫斯基(Хисовский, С. В.) 384
布洛赫(Bloch, F.) 424, 495, 506
布朗(Brown, W. F.) 513
弗里德耳(Friedel, J.) 385, 609
弗里曼(Freeman, A. J.) 591
安德生(Anderson, P. W.) 385, 417, 609
卡伦(Callen, H. B.; Callen, E.) 465
卡本(Cabone, C.) 597
古德以诺夫(Goodenough, J. G.) 571

六画至八画

迈斯纳(Meissner, W.) 1
伦敦(London, F.; London, H.) 2
安德森(Anderson, P. W.) 2
廷汉姆(Tinkham, M.)
朱经武(Chu, C. W.) 162
库伯(Cooper, L. N.) 1
苏伯尼柯夫(Shubnikov, L. V.) 1

劳伦斯(Lawrence, W. E.) 214
阿布里考索夫(Abrikosov, A. A.) 1
麦克米兰(McMillan, W. L.) 160
凯贝尔(Campbell, A. M.) 77
欧欣菲尔德(Ochsenfeld, R.) 1
郎道(Landau, L. D.) 1
金兹堡(Ginzburg, V. L.) 1
金(Kim, Y. B.) 117
拉伯希(Labusch, R.) 2
拉金(Larkin, A. I.) 157
乌耳法斯(Wohlfarth, E. P.) 384
守谷亨(Moriya, T.) 386
狄拉克(Dirac, P. A. M.) 412
芳田(Yosida, K.) 420
克喇末(Kramers, H. A.) 416
阿库洛夫(Акулов, Н.) 464
阿哈罗尼(Aharoni, A.) 513
李德尔(Rieder, G.) 554
法拉第(Faraday, M.) 302
居里(Curie, P.) 302
范弗莱克(Van Vleck, J. H.) 302, 473
泡利(Pauli, W.) 338
泡林(Pauling, L.) 433
奈耳(Neel, L.) 391, 495, 548, 570
帕金(Parkin, S. S. P.) 601

九画以上

前田(Maeda, H.) 164
柏诺兹(Bednörtz, J. G.) 162
施瑞弗(Schrieffer, J. R.) 1
翁纳斯(Onnes, H. K.) 1
高尔柯夫(Gorkov, L. P.) 27

埃斯曼(Essmann, U.) 68	莫特(Mott, N. F.) 368, 613
特劳伯尔(Trauble, H.) 68	都灵(Doring, W.) 546, 589, 619
唐纳奇(Doniach, S.) 214	莫洛普(Mørup, S.) 581
奥夫钦尼柯夫(Ovchinnikov, Yu. N.) 157	格伦堡(Grunberg, P.) 597
缪勒(Müller, K. A.) 161	基特耳(Kittel, C.) 420
赵志贤(Zhao, Z. X.) 163	斯托纳(Stoner, C.) 368
费米(Fermi, E.) 338	斯莱特(Slater, J. C.) 368, 416
茹德曼(Ruderman, M. A.) 422	曾讷(Zener, C.) 385, 415
海森伯(Heisenberg, W.) 302, 410	蒲富格 513
海林(Herring, C.) 450	赫巴德(Hubbard, J.) 429
朗之万(Langevin, P.) 302, 319, 473	戴生(Dyson, F. J.) 449
朗道(Landau, L. D.) 334	糟谷(Kasuya, T.) 420

内容索引

一画至三画

二流体理论 24, 26
上临界场 38, 213, 228—231, 239
下临界场 54, 224, 227

四画至五画

中间态 64, 65
比恩模型 116—129
迈斯纳态 10, 54, 55, 84, 264
巨磁通蠕动 236, 254
分子场 302, 354, 363, 370, 392, 402
反铁磁性 305, 386
贝特-斯莱特关系 410
方向有序 484
不可逆磁化 522, 533
反磁化过程 532
内应力理论 546
双二次交换作用 606
布洛赫畴壁 495
布洛赫线 506
可逆磁化 523, 527
巨磁电阻 610

六画至七画

全磁通 36
自旋子 164
点涡旋 216—218
合作钉扎 157, 263
芯钉扎力 143
磁钉扎力 114, 145

弹性钉扎力 146
弹性不稳定性 2
原子磁矩 308, 363, 377
回旋效应 332
传导电子磁性 332
过渡族金属磁性 345
巡游电子铁磁性 367
巡游电子交换作用 372, 424
交换劈裂 369
交换作用, 交换能 372, 410, 459, 597
交换各向异性 488
各向异性交换作用 473
自旋玻璃 407
自旋波 444
自旋突转 389
自旋磁矩 309, 378
自旋相关导电 613
轨道磁矩 309, 378
成核场 540, 570
初始磁化率 547, 550
多层膜层间耦合 597
抗磁性 305, 319, 332
位错与磁化 553
宏观量子隧道效应 581

八画至九画

表面能 32
非理想 I 类超导体 1, 87
空穴子 164
饼涡旋 216—218, 262
临界磁场 2, 10—16, 94
临界电流 81—87, 94, 101—113

临界态 2,116—140

临界温度 4—10,94

界面能 32—33

居里定律 302,359

居里-外斯定律 302,330,352,393

居里点,居里温度 362,374,382,406,
415,431

居里常数 323,332,361

范弗莱克顺磁性 318

拉莫旋进 319,332

罗索-桑德耦合 310

罗德-乌耳法斯图 384

亚铁磁性 305,386,403

泡利顺磁性 338

饱和磁化强度 360,363,431

表面磁性 587,590,593

单畴 512

单原子层磁性 592

奈耳点,奈耳温度 392

奈耳畴壁 495,504

固体缺陷 545

参杂理论 548

软磁材料 455

转动磁化 525,533

非均匀转动 536

金属中 RKKY 交换作用 420

九画

顺磁性 305,322,338

顺行磁化 529

洪德法则 312

临界指数 443

临界场 524,543,561

退磁场 490

十画至十一画

热力学临界场 14,211

夏夫累相 39

理想的 I 类超导体 1,87

混合态 36,55,56,94

弹性钉扎力 146—147

弹性不稳定性 2,153—156

铁磁性 305,352,367

混磁性 407

矫顽力 533,565

低维效应 588

朗道抗磁性 334

朗德因子 311,378

能态密度 338,370

氢分子 410

十二画至十三画

硬超导体 1,2,88,93

斯達得 165,285

稀极限 156,157

集体蠕动 260

磁通融化 239—264

磁通玻璃 254—264

模量效应 146

晶体电场效应 325,469

斯托诺判据 371

斯托诺激发 450

斯莱特-泡林曲线 433

稀土磁性 365,400

硬磁材料 456

畴壁 493,566

畴壁位移 521

超交换作用 417

超细微粒 577

趋近饱和律 529
量子尺寸效应 584
量子阱 609
剩磁 533, 542
慈石 302
简单金属磁性 343
感生各向异性 483

十四画

磁畴 302, 493, 507
磁场 305, 489
磁化强度 305, 323, 340, 359, 393
磁化率 305, 318, 334, 340, 389, 393, 520
磁振子 447
磁化曲线 454
磁滞回线 454
磁晶各向异性 461
磁致伸缩 474
磁弹性能 481

磁化过程 518
磁泡畴 506

十五画至十七画

德哈斯-范阿耳芬效应 332
螺旋磁结构 400, 402

希腊字母

α 相 100, 101, 108
 ϵ 相 98—100
 ω 相 108

拉丁字母

ABB 模型 161
BCS 理论 1, 23—25
GL 理论 1, 26—35
GL 参数 1
n 型高温超导 165
P 型超导体 165
SQUID 165