

磁性超晶格的研究

赵见高 马小丁¹⁾ 杨林原

(中国科学院物理研究所)

科学的新发展常常以技术的进步为先导。正是由于薄膜技术的高度发展,人们可以逐个原子层地制备薄膜和控制薄膜的生长,从而激发科学家们去研究人造超晶格的结构。所谓超晶格是指几种不同材料按一定厚度作周期性交替生长的多层薄膜结构。

一、历史概况

超晶格的研究首先是从半导体材料开始的(譬如 GaAs/AlAs)。近年来对非晶态半导体也作过超晶格研究,如 1983 年美国 EXXON 公司的 B. Abeles 和 T. Tiedje^[1] 介绍的非晶 a-Si:H/a-SiN_x:H 等。近年来人们对金属超晶格进行了研究^[2]。过去,人们也曾无意识地研究过金属多层膜问题,如早期从 X 射线角度研究过轻元素碳和重元素钨相间的多层膜。1969 年,为了研究 Spinodal 亚稳分解过程, Hilliard 也曾制备过多层膜。1978 年, Thaler 用铁磁共振方法研究了多层膜 Ni/Cu 的磁性。然而在这些工作中,由于两种元素在界面处存在扩散,组分随厚度的变化是呈正弦形而不是呈方波形,因此这些膜被称为组分调制结构,而不称为超晶格。他们的研究目的也正是利用这种组分调制特性。1980 年,美国阿贡实验室 I. K. Schuller 从超晶格的角度研究了 Nb/Cu 多层膜系统^[3],随之愈来愈多的科学家投入这一工作,并取得了若干有意义的结果。他们从物性的角度出发研究过超晶格的超导电性、磁性、弹性等,从材料的角度出发研究过磁性元素/非磁性元素超晶格(如 Fe/Cu, Ni/Cu, Co/Cr, Fe/V, Fe/Ta, Fe/Mo 等),非晶态金属/非金属

超晶格[如 Fe(C)/Si, Fe(B)/Si, Fe(Si)/Si 等]以及稀土金属超晶格(Gd/Y, Dy/Y, Gd/Fe)等。但关于金属超晶格的理论研究近期才有少量报道。例如, M. Schneider 等从分子动力学角度模拟了薄膜生长过程与生长速率和底板温度的关系^[4],美国依利诺大学的 Kochler 用赝势法计算了 Au/Al 超晶格的能带^[5],我国蔡建华等人也在紧束缚近似下计算了超晶格的电子结构、声子结构及磁性等问题^[6]。

早期超晶格概念必须具有尖锐的界面和长程的共格结构。但随着研究的发展,已将超晶格的概念扩展了,只要在垂直膜面方向上具有周期性的金属多层膜系统都称为金属超晶格。

二、金属超晶格的特性

目前,对金属超晶格的研究已在诸如超导电性、磁性和弹性等方面取得很多有益的结果。这里着重介绍一下在磁性方面得到的结果。

1. 结构性质对磁性的影响

金属超晶格每一层薄膜常常是按一定择优取向生长的,例如体心立方结构的金属是以(110)面生长的,而面心立方结构的金属是以(111)面生长的。然而若适当控制制备条件也可改变其择优取向,甚至还会改变其结构类型。例如,选择体心立方的 Cr 为第一层,将六角对称的 Co 沉积于其上,对 Cr(0.5nm)/Co(2nm)可获得自然界里得不到的体心立方的 Co^[7]。又如在 Cu(fcc)/Fe(bcc) 超晶格结构中,最初两层铁原子是按面心立方结构排列的^[8]。显然,人

1) 山东大学物理系研究生。

们会对 bcc 的 Co 或 fcc 的 Fe 具有什么样的磁性感兴趣。实验表明,体心立方与六角结构的钴的磁矩值差别不大。

超晶格中两类元素的界面层的原子排列状况对磁性也有较大影响。在界面层中,由于两类原子的相互扩散,使得磁性原子的近邻数目小于某一特定值,这时磁性原子不再呈现铁磁性。这就是所谓的“死层”,其厚度因扩散情况不同而不同,它使得整个超晶格薄膜的磁性下降。

2. 磁矩与磁交换作用

由于磁性超晶格可以通过调节各层的厚度而改变晶格常数,从而可以观察许多有趣的现象,研究许多基本的问题。

当磁性层厚度小于一个原子层时,实际上获得的是磁性细粒子的孤岛,这种状态的磁性可以认为是准零维状态的磁性。随着磁性层的加厚,磁性原子开始具有铁磁性并表现出二维磁性的特征,即磁化强度与温度呈线性关系 ($M_s \propto T, M_r \rightarrow 0$)。磁性层厚度达到一定值时,才出现通常的三维磁性特征 ($M_s \propto T^{3/2}, M_r \neq 0$)。图 1 为 Cu_m/Ni_n 超晶格磁化强度与温度关系^[9]。从图 1 可看出,当 Ni 为三个原子层时才有可能出现二维特征,并且非磁性层必须足够厚 ($m = 6$),否则就不呈现二维特性 ($m = 3$)。当 $m < 6$ 时,两个磁性层之间存在耦合作用,这时就破坏了二维特性。

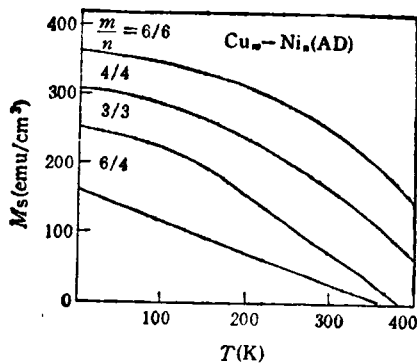


图 1 Cu/Ni 超晶格磁化强度 M_s 与温度 T 的关系曲线 (m, n 分别为 Cu 或 Ni 的原子层数, AD 为制备态)

对这种磁性层之间的耦合也曾作过仔细研

物理

究。通常各磁性层都呈现磁矩平行的铁磁耦合,图 2 给出了 Ni/Mo 超晶格中居里温度 T_c 与磁性层厚度的关系^[10],这里的居里温度是交换耦合的反映。利用光散射得到的磁激发谱也证明了磁性层之间磁子的集体行为,即除了存在磁偶极相互作用外,还有交换耦合作用存在,但这种交换作用的原因难以确定,是非磁性层中的孔洞导致磁性原子的直接接触,还是磁性原子在非磁性层中的扩散达到了渗流极限,或是由于非磁性层厚度小于交换长度而导致两边磁性原子的直接交换,当然还有可能是通过非磁性层的导电电子而产生的 RKKY 交换作用。然而 Grünberg 等^[11]在仔细制备的近单晶 Fe/Cr 样品中,竟发现 Fe 层间有反铁磁耦合。这一结果只能用 RKKY 作用来解释了。因此,可以认为 RKKY 交换作用至少是起着重要的作用。

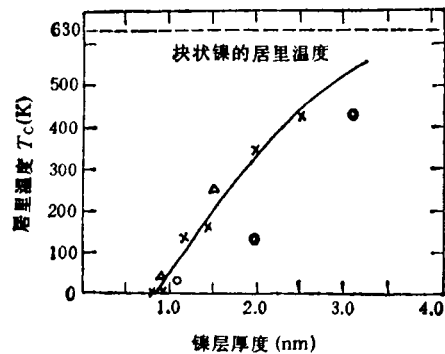


图 2 Ni/Mo 超晶格的居里温度 T_c 与 Ni 层厚度的关系

理论和实验都表明当磁性层适当薄时,会有表面磁矩的增强,有时又会出现超顺磁性。有意思的是,对超晶格的底层是磁性层还是非磁性层,有时会得到完全不同的结果。

在生长高度完整的稀土 Y/Dy 超晶格中^[12],稀土单晶所特有的螺旋磁结构仍然存在,自旋的螺旋性转角并不因非磁性层 Y 的隔断而破坏,而是通过 Y 层导带电子自旋密度波在 Y 层中传播,可以在若干层 Dy 中保持自旋的长程螺旋序。测量表明,这种长程磁有序可超过 150 个原子层。理论计算也表明,在某些条件

下,这种 RKKY 作用的范围很长,即使经过 18 层 Y 原子后交换场仍然可达 1.5KG。实验还表明,Dy 原子层间转角的傅里叶变换量有时是非公度的。这些磁结构的研究结果从学术上讲是很有意思的。

另外,对 GdCo (3.5nm)/Co(3.2nm) 超晶格的研究表明,相邻两层间的磁矩会出现强烈耦合,但方向相反,呈宏观亚铁磁体,具有类似亚铁磁体的抵消点,并且抵消点温度随各层的厚度变化。

3. 磁各向异性

如果说目前对磁性超晶格的研究尚有些应用背景的话,那就是期望它出现垂直膜面的各向异性。过去磁泡材料的外延单晶薄膜的应用就是利用这点,稍后发展出的非晶态溅射薄膜的应用也同样利用这点。当人们研究磁性超晶格时,很自然地会想到利用精确控制各层厚度的方法来研究垂直各向异性的原因。至今的不少工作都表明,当磁性层厚度降低到一定程度时就出现了垂直膜面的各向异性。例如,Fe/Ta 超晶格就是如此,可以认为这与界面上垂直方向的 Fe-Ta 原子对有关。当膜厚减薄时,界面上形成的 Fe-Ta 原子对数目 N_p 相对于总原子对数目 N_t 的比例增加,对应各向异性常数 K_u 增加,而同时磁化强度 M_s 却随膜的减薄而下降,因此会满足 $K_u > 2\pi M_s^2$ 的条件,即产生垂直膜面各向异性的条件^[13]。其变化关系见图 3。

当然还有其它的模型解释垂直膜面的各向异性。例如对 Fe/Mg 超晶格的 Mössbauer 谱研究表明,随着磁性层厚度从 1.5nm 开始减薄,谱线强度比逐渐从 3:4:1:1:4:3 过渡到 3:0:1:1:0:3,即各向异性从膜面转向垂直方向^[14]。但有人认为这是表面各向异性的作用。还有人认为,垂直膜面各向异性的产生是由于在超晶格界面层附近磁性原子具有非晶结构。为此他们制备了 Fe/SiO₂ 超晶格,得到了较高的垂直膜面的各向异性。至于垂直各向异性的起源目前还没有定论,但人们至少已发现垂直各向异性常数 K_u 是与磁性层的厚度倒数成正比的。

事实上,美国已研究出一种基本满足应用

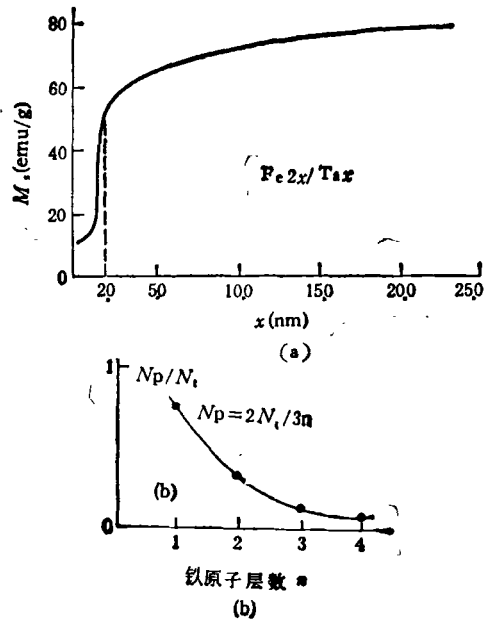


图 3
(a) Fe/Ta 超晶格磁化强度 M_s 与铁层厚度的关系; (b) N_p/N_t 与铁原子层数 n 的关系

要求的材料——Pd/Co 超晶格^[15],当钴层厚度小于 0.8nm 时,就满足 $K_u > 2\pi M_s^2$ 的要求,且 $M_s \sim 500G$, $H_c \sim 550Oe$ 。因此,可以预计,随着研究的深入,金属超晶格一定会在垂直记录、磁光可擦写存贮或磁泡存贮器件等方面获得应用。

- [1] B. Abeles, T. Tiedje, *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 2003.
- [2] *Modulated Structures-1979*, J. M. Cowley, J. B. Cohen, M. B. Salamon and B. J. Wuensch, eds., American Institute of Physics, New York, (1979); 王迅, *物理*, 16—10(1987), 597; 郑国光, *物理*, 16—11(1987), 651.
- [3] I. K. Schuller, *Phys. Rev. Lett.*, **44**(1980), 1597.
- [4] M. Schneider et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 604.
- [5] J. S. Kochler, *Phys. Rev.*, **B23**(1981), 1753.
- [6] 马红儒, 蔡建华, *低温物理学报*, **8**(1986), 177.
- [7] R. Walmsley et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-19**(1983), 1992.
- [8] H. M. Van Noort et al., *J. Magn. Magn. Mat.*, **51**(1985), 273.
- [9] N. K. Flevaris et al., *J. Appl. Phys.*, **53**(1982), 2439.
- [10] M. R. Khan et al., *Thin Solid Films*, **122**(1984), 183.
- [11] P. Grünberg et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 2442.
- [12] J. J. Rhyne and R. W. Erwin, *J. Appl. Phys.*, **61**(1987), 4043.
- [13] Z. S. Shan et al., *J. Appl. Phys.*, **61**(1987), 4320.
- [14] K. Kawaguchi et al., *J. Phys. Soc. Jap.*, **55**(1986), 2375.
- [15] P. F. Garcia et al., *Appl. Phys. Lett.*, **47**(1985), 178.