

自旋极化扫描隧道显微镜的研究进展^{*}

姜宇航 连季春 肖文德 高鸿钧[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

摘要 自旋极化扫描隧道显微镜 (spin-polarized scanning tunneling microscope, SP-STM) 将扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscope, STM) 的实空间分辨率和对自旋敏感的磁成像技术结合起来, 已经成为人们研究纳米磁性物理的最有效工具之一. 文章介绍了 SP-STM 的工作原理及其在低维磁性物理领域的应用和最新进展, 如对磁性薄膜、磁性纳米岛、磁性原子及不共线结构的研究等, 并对我国在这一领域的研究现状和发展前景进行简要评述.

关键词 自旋极化扫描隧道显微镜, 自旋极化, 综述, 低维磁性

Research progress in the spin-polarized scanning tunneling microscopy

JIANG Yu-Hang LIAN Ji-Chun XIAO Wen-De GAO Hong-Jun[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Spin-polarized scanning tunneling microscopy (SP-STM) is one of the most effective tools for the study of nanomagnetic physics as it can combine real-space atomic resolution with spin imaging. In this review we introduce the principles of SP-STM and its recent applications in the field of low-dimensional magnetic physics, such as in the analysis of magnetic films, nano-islands, atoms, and nonlinear structures. The current state-of-the-art and future developments of this field in China are also discussed.

Keywords spin-polarized scanning tunneling microscopy, spin-polarized, review, low dimensional magnetism

1 引言

基于量子力学的隧穿效应, Binnig 和 Rohrer 等人于 20 世纪 80 年代发明了扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscope, STM), 首次实现了实空间的原子分辨^[1], 并进一步实现了单原子/分子的人工操控, 给表面科学、材料科学、生命科学以及微电子学等众多领域带来了一场技术革命. 随后, 人们又发展了扫描隧道谱 (scanning tunneling spectroscopy, STS)、非弹性隧道谱 (inelastic tunneling spectroscopy, IETS) 等扫描隧道显微术, 从而能够获取表面低维体系的电子结构和各种激发态的信息, 极大的拓展了 STM 的功能和用途^[2]. 在此基础上, 原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM)、磁力显微镜 (magnetic force microscopy, MFM)、扫描近场光学显微镜 (scanning near-field

optic microscopy, SNOM) 等, 也相继发展起来, 形成扫描探针显微仪器家族, 为人类探索微观世界提供了明亮的“眼睛”和精巧的“手”^[3].

与此同时, 由低维度和小尺寸引起的复杂磁结构和新奇的磁性质已成为磁学研究领域的前沿热点之一. 在对其基础物理原理和技术应用 (如高密度数据存储^[4]) 方面的不断深入研究中, 人们认识到传统的磁成像技术^[5] (如: 极化扫描电镜, scanning electron microscopy with polarization analysis, 自旋极化低能电镜, spin-polarized low energy electron microscopy) 还无法达到实空间的原子级分辨率, 也不能避免杂散场 (stray field) 对样品表面的影响, 同时又受到垂直 (out-of-plane) 方向上的磁灵敏度低的限制^[6,7]. 因此, 人们希望从 STM 的隧穿电流中分

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB929103) 资助项目
2009-08-20 收到

[†] 通讯联系人. Email: hjgao@aphy. iphy. ac. cn

离出自旋极化成分,从而将 STM 极高的实空间分辨率和磁成像技术中的高自旋灵敏度结合起来. 经过近十年的努力,德国 Wiesendanger 小组终于研发出了自旋极化扫描隧道显微镜(spin-polarized scanning tunneling microscope, SP-STM),使得人们在研究局域纳米结构的同时,可以进一步了解其自旋特性^[8-10]. 随着这一有力工具的开发,许多重要的磁学问题取得了积极的进展,推动了磁性纳米物理学的发展和应用.

本文将首先介绍 SP-STM 技术的原理及实验方法,然后通过纳米磁性物理中几个应用实例,总结 SP-STM 最新的研究进展,最后对我国在这一领域的现状和可能的发展方向作简要的论述.

2 SP-STM 原理及实验方法

2.1 工作原理

SP-STM 的工作原理是基于磁性材料费米面附近不同自旋方向的自旋电子的局域态密度的不对称性. 这种不对称性会导致在针尖与样品表面之间的隧穿电流中,同时存在非极化电流和极化电流. 通过分离技术^[11],我们就可以从极化电流中获得表面自旋电子态的信息,而非极化部分获得表面形貌态的信息. 根据 Wortmann 等人首先提出的由自旋极化产生的隧穿电流的表达式^[12],S. Heinze 将隧穿电流简化表达为^[9]:

$$I(\theta) = I_0 + I_p \cos\theta, \quad (1)$$

其中 I_0 为非自旋极化电流; I_p 为自旋极化电流,它与样品自旋极化率(P_s)和针尖的自旋极化率(P_T)的乘积有关,即 $I_p \sim P_s P_T$,而 θ 是针尖尖端磁化方向与样品表面磁化方向的相对夹角. 从(1)式我们还可以看出:当样品表面磁化方向与针尖磁化方向平行和反平行时($\theta=0^\circ$ 和 180°),自旋极化电流贡献最大,图像的亮暗对比度最大,而垂直的时候($\theta=90^\circ$),自旋极化电流为零,隧穿电流只有非极化电流;另一方面,当样品或者针尖为非磁性材料时,费米能级附近自旋向上和自旋向下的局域态密度 $n_{\uparrow(\downarrow)}$ 相等,因此自旋极化率 $P = (n_{\uparrow} - n_{\downarrow}) / (n_{\uparrow} + n_{\downarrow}) = 0$,自旋极化电流消失,方程也回归到普通 STM 隧穿电流的形式.

为进一步讨论自旋电流对总隧穿电流 $I(\theta)$ 的贡献,将隧穿电流做二级傅里叶展开,得到隧穿电流的变化量:

$$\Delta I(r_{\parallel}, z, V, \theta) = \sum_{n \neq 0} \Delta I_{G_n}(z, V, \theta) \exp(iG_{\parallel}^n r_{\parallel}) \quad (2)$$

其中, G_{\parallel}^n 为倒空间格矢. 隧穿电流 I 与针尖、样品之间的距离 z , 针尖、样品磁化方向的相对夹角 θ 和扫描偏压 V 三者都有关,而且随 G_{\parallel}^n 的增加呈指数衰减. 所以我们可以做适当近似,使得 G_{\parallel}^n 项只与最小倒格矢 $G_{\parallel}^{(1)}$ 有关,即

$$\Delta I(r_{\parallel}, z, V, \theta) \approx I_{G_{\parallel}^{(1)}}(V, \theta) \exp(iG_{\parallel}^{(1)} r_{\parallel}) \times \exp[-2z\sqrt{2m/\hbar^2 |E_F + eV| + (G_{\parallel}^{(1)}/2)^2}]. \quad (3)$$

可以看出,即使在磁化方向接近垂直(θ 接近 90°)的情况下,磁结构引起的反演对称性的降低也会增大倒格矢,使得自旋极化电流的贡献大大增加,从而有 $\Delta I \approx \Delta I_p$.

基于 SP-STM 工作原理,人们发展了三种主要的工作模式:(1)恒流模式. 它是最简单、最稳定也是最早得到纳米尺度磁结构的工作模式^[9]. 在此模式下,高度起伏可简化表达为 $\Delta z(z_0) \sim P_s P_T \cos\theta$,其中 z_0 为针尖到表面的平均距离. 但恒流模式下的自旋极化电流贡献相对较小,且容易受到表面杂质的影响,所以适合于非自旋极化电子态起伏不大的单晶表面;(2)谱模式(也称局域磁阻模式). 即通过 dI/dV 谱或 dI/dV 图像得到表面局域磁信息^[13]. 这种模式适用于态密度起伏较大的表面,但同时需要使用普通针尖扫描,以排除非极化电流的影响;(3)异磁导率模式. 即通过改变针尖磁化方向来改变磁导率,从而得到样品表面与自旋相关的信息. Kirschner 小组首先利用此种模式,并结合锁相技术,成功地将形貌像和磁结构像分离,研究了多晶 Ni 和单晶 Co(0001)的表面磁畴结构的性质以及畴壁的运动^[5]. 这种模式适用于研究电子态起伏较大的样品表面,甚至隧穿磁阻(TMR)效应,但不适用于包裹型针尖,且磁场强度不能过大.

2.2 针尖的制备

SP-STM 实验的关键步骤之一是制备出能产生自旋极化电子的磁性针尖. 好的磁性针尖应具备以下几个条件:(1)具有高的自旋极化率 P_T 以提高信噪比;(2)能将由杂散场引起的针尖与样品之间的偶极作用降至最低,因为这种作用会改变甚至破坏样品表面的磁结构;(3)针尖相对于样品表面的磁化方向应该是可控的(平行/反平行方向或者垂直方向);(4)如果针尖磁化方向可以重复性改变,就能将

形貌像和磁结构像分离^[11].

早期为了提高信噪比,减小外界环境对针尖自旋极化的影响,Wiesendanger 等人选择了惰性的 CrO₂ 针尖,但是这种针尖的尖锐度不够,而且制备方法繁琐.随着技术的不断发展,人们开始尝试在超高真空下原位制备尖锐干净的磁性材料针尖:一是直接利用 Fe^[14],Ni^[15],Co^[16],Cr^[17]等磁性材料制备.这种多晶针尖可以通过直接化学腐蚀^[17]或者电化学腐蚀加超高真空中的机械拉伸^[18]得到,并适用于上述的三种工作模式.需要指出的是,相对于铁磁针尖,反铁磁针尖中磁化方向相反的原子磁矩可以相互补偿和抵消,因此不存在明显的可以影响样品表面磁结构的杂散场.但由于较高的各向异性,这种针尖的磁化方向只能是与针尖指向平行(或反平行)的.因此,人们又发展出第二类针尖:包裹型针尖,即在非磁性针尖(如:钨针尖)外镀上 Fe^[9,13]或 Gr^[19]的磁性薄膜.这种针尖的优点在于:不同厚度的薄膜,可以导致针尖顶端磁化方向平行或垂直于样品表面,从而分别对面内磁矩或垂直磁矩敏感^[6];同时对于铁磁材料包裹型针尖,将薄膜厚度减小到与针尖样品之间距离相当或更小时,可以有效减小杂散场对表面磁结构的影响.最近,IBM 实验室又利用单原子操纵技术,在非磁性的针尖上吸附一个或几个磁性原子(如:Mn 原子)从而得到自旋极化的针尖,这种针尖的优点在于制备方法更加简单,且基本不受杂散场的影响.

3 SP-STM 的应用和进展

3.1 磁性薄膜材料

磁性薄膜因其广泛应用一直以来都是磁性材料研究的热点,如 Fe/W(110)^[20]、Fe/W(001)^[11]、Fe/Ir(111)^[21].Kubetzka 等人利用 SP-STM 首先观测到了单层 Fe 薄膜在 W(001)表面的 c(2×2)反铁磁结构^[11].从图 1 中可以看出,当外磁场反向时(从 2.5T 到 -2.5T),dI/dV 图像的明暗发生了反转.将图 1(a)和(b)的信号分别相减和相加得到的(d)和(e)图,即 Fe 薄膜的磁结构像和形貌像.通过针尖磁化方向还可以判断出薄膜的易磁化方向是垂直于表面的.他们还利用第一性原理计算解释了这一体系中 Fe-W 的杂化和自旋轨道耦合作用,证实了这种反铁磁的 c(2×2)结构是这个体系中磁结构的能量最低态.

同时 Von Bergmann 等人利用 SP-STM 对 Fe

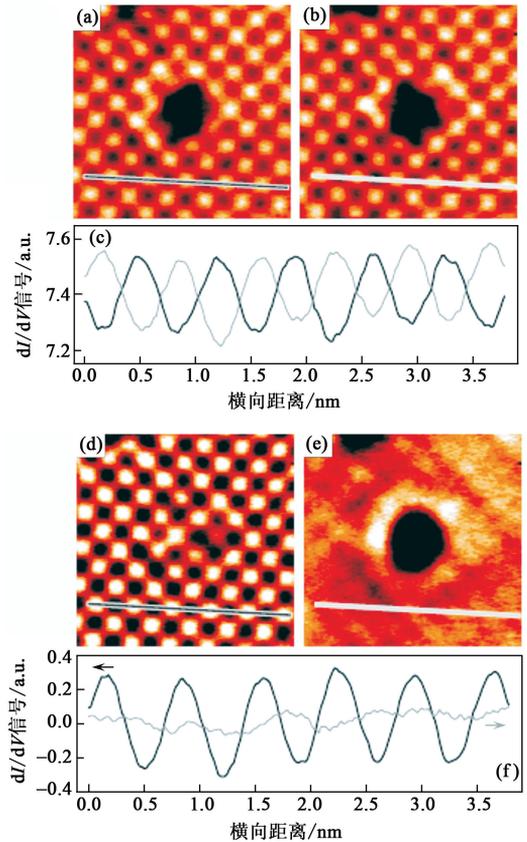


图 1 Fe 单层膜在 W(001)表面的 dI/dV 图像(4nm×4nm).外加磁场为:(a) +2.5T;(b) -2.5T(I=30 nA, V=-40 mV);将(a)和(b)的信号相减和相加分别得到(d)和(e);(c)和(f)分别为沿(a)(b)图中直线和(d)(e)图中直线得到的 dI/dV 信号

在 W(001)表面的多层膜生长及其磁性进行了系统的研究^[22].他们首先制备出单层、双层、三层、四层原子层共存的 Fe 膜,然后分别利用对面内磁矩敏感(Gd/Fe 包裹的 W 针尖)和对垂直磁矩敏感(Fe 包裹的 W 针尖)的针尖扫描样品表面.如图 2 所示,基于基底对称性的调制,薄膜表面面内的磁化方向呈四重对称性:当针尖和样品间任一磁化方向(设为 A 方向)夹角 $\alpha=0^\circ$ 时,四个磁化方向的薄膜在图像中表现为三种亮度,A 和 D 的磁化方向与针尖磁化方向平行和反平行从而分别显现为亮区和暗区,而 B 和 C 的磁化方向与针尖磁化方向垂直,因而亮度相同且介于 A、D 之间,如图 2(a)中所示;当 $\alpha=45^\circ$ 时,四个磁化方向的薄膜简并为两种亮度,A、B 相对较亮,C、D 相对较暗,如图 2(b)中所示;当 $\alpha=18.4^\circ$ 时,四个方向均可分辨且对比度最大,如图 2(c)中所示.

因此,通过对比不同原子层的明暗程度和明暗区数目,可以推断出不同原子层之间易磁化方向的夹角.实验结果表明,第四层原子层与第二三层的易磁化方向夹角为 45° .又已知第四层的易磁化方向

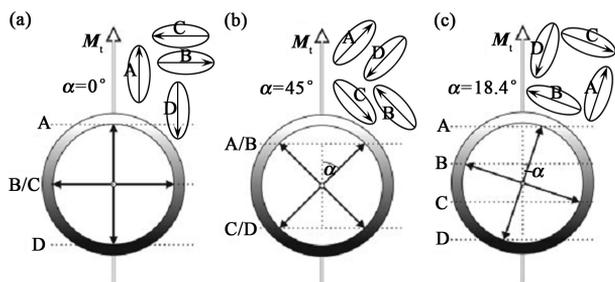


图 2 SP-STM 中 dI/dV 图像的明暗度与针尖和样品间磁化方向夹角的关系 (a) 针尖磁化方向与 A 方向夹角 $\alpha=0^\circ$; 四个磁化方向简并为三种亮度, B 和 C 方向不可区分; (b) $\alpha=45^\circ$; 四个磁化方向简并为两种亮度, A、B 相同, C、D 相同; (c) $\alpha=18.4^\circ$; 四个方向均可分辨且对比度最大

沿 $\langle 100 \rangle$ 方向, 所以可以得出, 第二和第三层的易磁化方向沿 $\langle 110 \rangle$ 方向。

3.2 磁性纳米岛

Cu(111) 表面上的 Co 纳米岛一直是一个倍受关注的体系, 因为纳米岛和基底会表现出不同的自旋极化性质^[23,24]。Pietzsch 小组利用非自旋扫描隧道谱和自旋极化扫描隧道谱研究了 Cu(111) 表面上两个原子层厚的 Co 纳米岛^[25]。在 Cu(111) 表面上, 三角型的 Co 岛有两种堆垛方式, 一种沿基底的 fcc 位置排列 (非缺陷岛或 u 岛), 另一种相当于一个堆垛层错 (缺陷岛或 f 岛), 二者取向相差 180° , 如图 3(a) 中的插图所示。图 3(a) 为非自旋极化扫描隧道谱, 可以看出两种类型的岛具有不同的占据态能量, 非缺陷岛 (绿色) 为 -0.35V , 而缺陷岛 (红色) 为 -0.28V 。当扫描偏压略高于 -0.35V 时, 非缺陷岛的隧穿电流大于缺陷岛, 因此在 dI/dV 图像中, 非缺陷岛应比缺陷岛更亮, 如图 (b) 所示; 而当扫描偏压略低于 -0.28V 时, 情况相反, 缺陷岛表现得更亮一些, 如图 (c) 所示。因此不同的偏压 (-380mV 和 -270mV) 下 dI/dV 图像就会发生明暗反转。

图 4 展示了同一体系中的自旋极化扫描隧道谱。在图 4(a) 中, 实线和虚线分别表示针尖磁化方向与样品磁化方向平行和反平行的情况。非缺陷型岛 (绿色) 的实线与虚线首先交于 -0.38V , 而缺陷型岛 (红色) 交于 -0.35V , 这就解释了为什么在图 (c) — (f) 中, 当偏压大于 -0.38V 时, 同一类型的不同磁化方向的岛的 dI/dV 图像发生明暗反转, 其他交点类似。如果定义不对称度为 $A = (a - b) / (a + b)$, 那么由 (b) 图看出: 对于结构引起的不对称度, 自旋平均与自旋极化表现为相似的变化; 而对于磁结构引起的不对称度, 磁化反转导致了整个能量范围内的强烈共振, 这可以解释 dI/dV 图像中所有

清晰的对比度 (如: -0.44V)。由于纳米岛的磁化方向平行或反平行于针尖磁化方向, 所以在一个较宽的能量范围内都存在比较清晰的对比度。此外, 研究表明, 两种类型纳米岛的磁化方向都是垂直于表面的, 还表现出了较大的饱和磁化强度、剩磁 ($M_r/M_s \sim 1$) 以及矫顽力 ($1.0\text{T} - 1.5\text{T}$)。

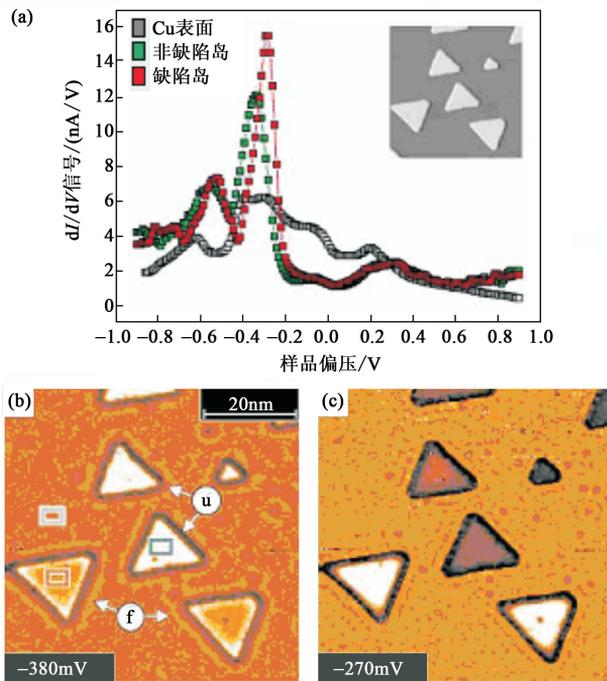


图 3 (a) 非自旋极化扫描隧道谱; (b) 和 (c) 分别为不同偏压下 ((b) 为 -380mV , (c) 为 -270mV) 的 dI/dV 图像 (“u” 为非缺陷类型岛, 而 “f” 为缺陷类型岛)

3.3 磁性单原子

吸附在表面的磁性单原子是构成磁性纳米结构的最基本单元, 因此单原子间的磁相互作用是磁性纳米结构各种新奇物理性质的基础。传统的测量手段只能得到磁结构自旋的平均信息, 而 Meier 等人利用极低温 SP-STM 研究了 Pt(111) 表面上 Co 单原子的磁学性质^[26]。实验分别在 0.3K 和 4.2K 的低温条件下进行, 以排除由热扰动引起的磁性反转的可能性。研究表明, Co 单原子的 dI/dV 特性随磁场的变化是由于磁性量子隧穿或隧穿电流引起的磁性反转导致的。他们进一步观测到 Co 单原子与台阶处的 Co 原子的长程耦合作用。图 5 是原子间交换能随单原子到单层膜边缘距离的变化。可以看出, 单纯的磁偶极子间 (黑线) 只表现为反铁磁性而且交换能很低, 所以这些吸附在表面的 Co 单原子磁矩的变化是 Co 原子之间通过 Pt 基底的间接交换作用引起的。利用 RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 理论^[27-29] 可以很好地拟合这种铁磁性的振荡式周期衰减。

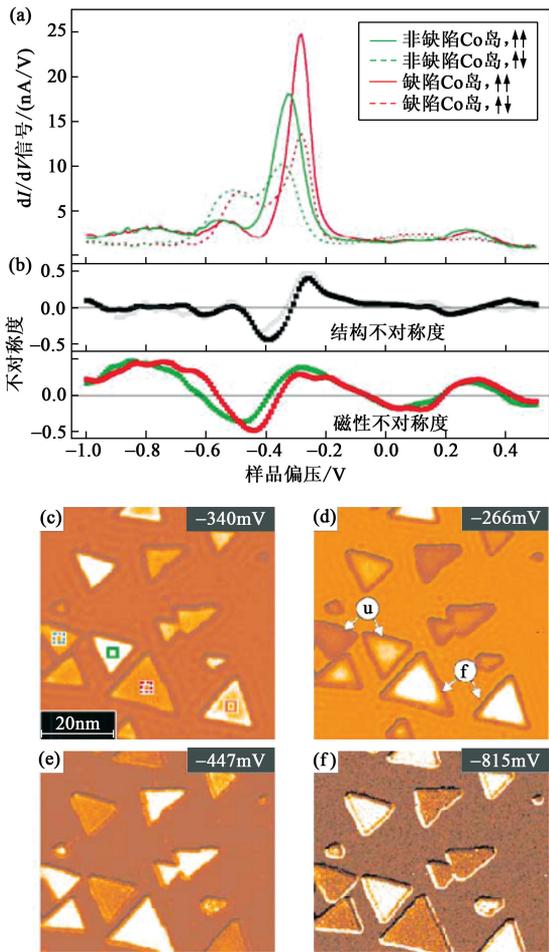


图 4 (a) 自旋极化扫描隧道谱。↑↑和↑↓分别表示针尖与样品自旋平行和反平行；(b) 表面结构引起的不对称度(上图：灰线为非自旋极化 STS, 黑线为自旋极化 STS)和磁性引起的不对称度(下图)；(c)—(f) 为不同偏压下的 dI/dV 图像

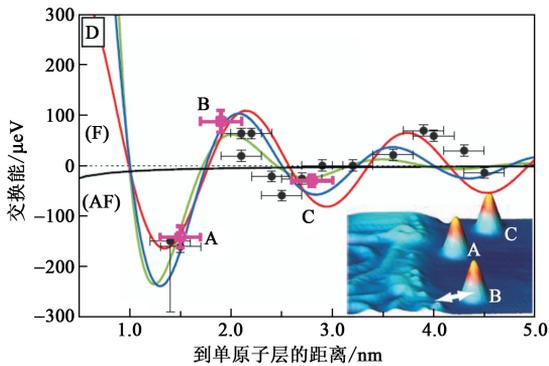


图 5 交换能随 Co 单原子到单原子层边缘距离的变化(如图中的实验点所示)；黑线为 10nm 宽的纳米带间的磁偶极相互作用；红、蓝、绿线分别是利用 RKKY 理论模拟出的 1 维、2 维、3 维体系的间接相互作用能

3.4 不共线结构

由海森伯交换模型可以得到交换能的表达式：

$$E_H = \sum_{i,j} J_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (4)$$

从(4)可以看出，磁性晶体的对称性导致交换能也具

有对称性(表现为点乘)。但当磁性材料的维度降低或尺寸减小到纳米尺度时,这种对称性就会被破坏,其结果是磁各向异性增加和产生 DM (Dzyaloshinskii-Moriya Interaction)作用能：

$$E_{ani} = \sum_i K_i \sin^2 \varphi_i, \quad (5)$$

$$E_{DM} = \sum_{i,j} \mathbf{D}_{ij} \cdot (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j), \quad (6)$$

其中 K_i 为各向异性常数, φ_i 为第 i 个点上原子磁化方向与易磁化方向的夹角, \mathbf{D}_{ij} 为 Dzyaloshinskii 矢量。从(6)式中可以看出对称性消失了(表现为叉乘),其物理结果是产生不共线的磁结构。

Bode 小组研究了单层 Mn 薄膜在 W(110) 表面的不共线结构^[30]。如图 6,在恒流模式下,Mn 单层膜表现为具有长波调制的周期结构,如图 6(b)所示。图 6(c)为三种可能的自旋结构:自旋密度波(SDW),螺线螺旋(helical spiral, h-SS)和摆线(cycloidal spiral, c-SS)。后两种螺旋型结构的特点是自旋旋转被固定在平行或垂直于传播方向的平面内。

之后,施加一个渐增的磁场(见图 7)使针尖由对面内磁矩敏感转变为对垂直磁矩敏感,结果是磁褶皱的位置移动了而长波调制没有受到影响。由于针尖的磁矩由面内旋转至垂直于平面,证实了螺线螺旋型自旋结构。通过理论计算,得到这种螺线螺旋结构的长波调制波长为 4.0nm,与实验所得的 6.0nm 接近。

当磁性纳米岛的尺度达到几百 nm 量级的时候,单畴态会消耗相对较高的杂散场能(偶极能),而多畴结构又会引入过大的磁畴壁能,由此表现为中间状态——“涡核”(Vortex Core)结构^[6]。Wachowiak 等人利用对面内磁矩敏感和对垂直磁矩敏感的两种不同针尖观测到了涡核内的磁结构,如图 8(a)中所示。

图 8(b—c)是 W(110) 表面上的 Fe 岛涡核中心区的 dI/dV 图象。从(b)图和(d)图中可以看出(由对面内磁矩敏感的针尖所得),样品面内磁矩连续的围绕在涡核中心,最亮区表示针尖磁化方向平行于样品表面磁化方向,而最暗区表示针尖磁化方向反平行于表面磁化方向;从图 8(c)和图 8(e)得到(由对垂直磁矩敏感的针尖所得),涡核中心磁矩垂直于表面。这与理论推测完全吻合。

4 展望

作为一种发展较为成熟的技术,自旋极化扫描隧道显微镜已经被国外一些研究小组应用于纳米磁

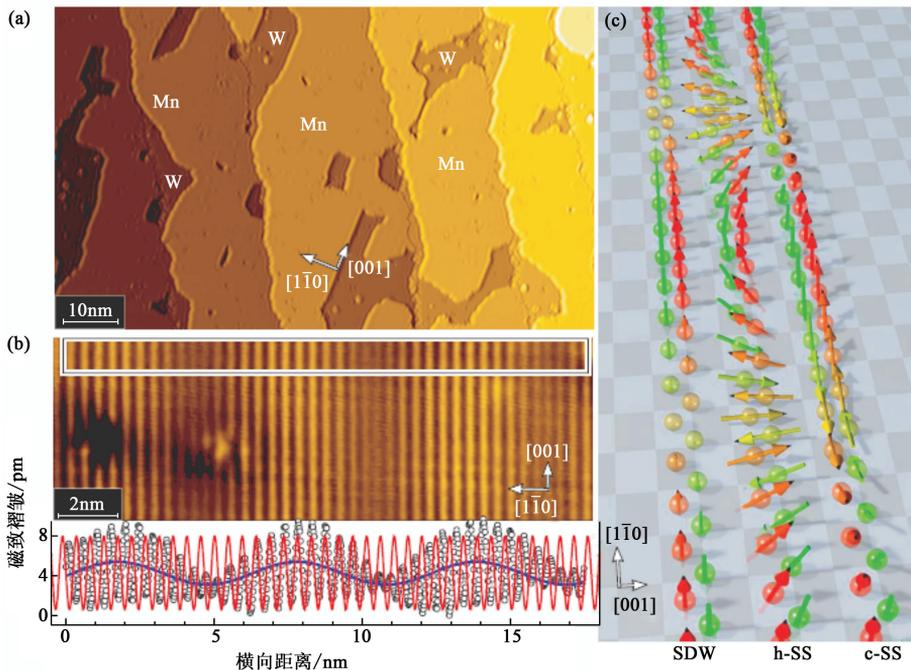


图6 单层 Mn 薄膜在 W(110) 表面的形貌像及自旋结构 (a) 0.77ML 的形貌图; (b) 恒流模式图像. 磁褶皱周期为 0.448nm, 与典型反铁磁正弦波相位相差 180° ; (c) 三种可能存在的自旋结构示意图: 自旋密度波 (SDW), 螺旋线螺旋 (helical spiral, h-SS) 和 c 摆线 (cycloidal spiral, c-SS)

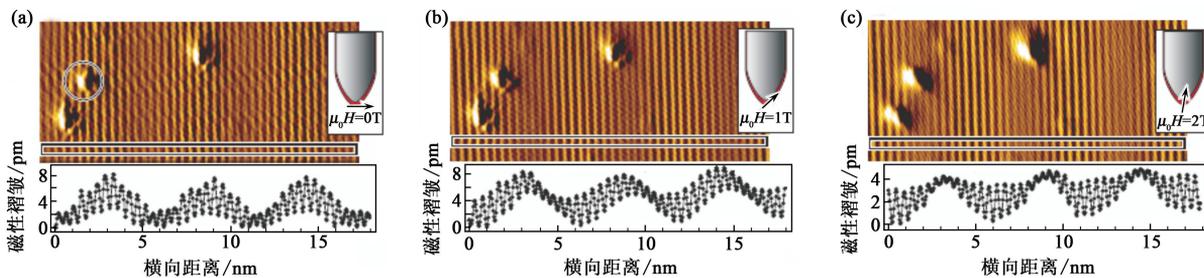


图7 单层 Mn 在 W(110) 表面的恒流模式 SP-STM 图像随外加磁场的变化 (a) 0T; (b) 1T; (c) 2T; 扫描参数: $I=2\text{nA}$, $V=30\text{mV}$

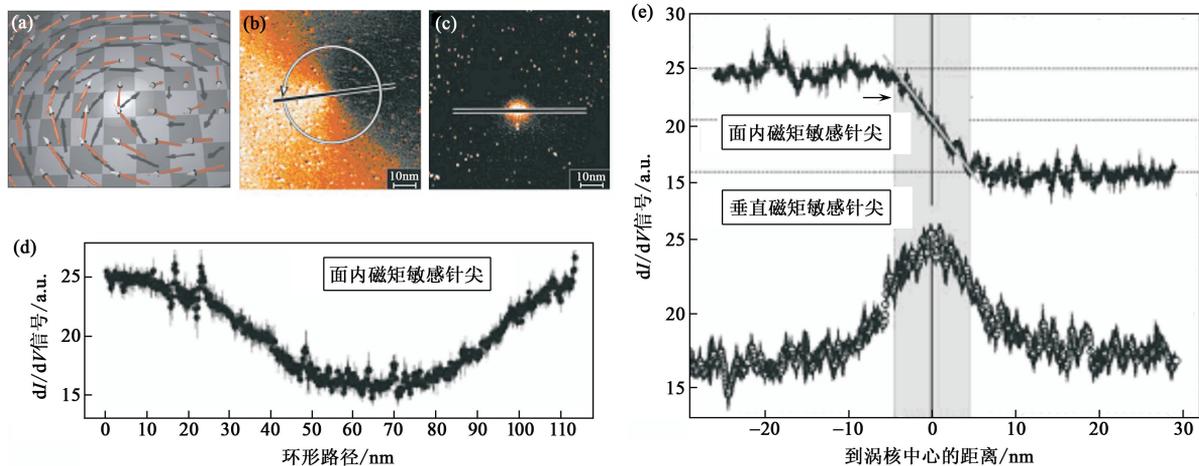


图8 (a) 涡核的示意图. 远离涡核中心的磁矩连续的围绕这中心排列(平面内), 中心的磁矩垂直于表面; (b) 和 (c) 分别为利用面内磁矩敏感针尖和垂直磁矩敏感针尖得到的磁性 dI/dV 图像; (d) 为沿 (b) 中环形箭头所示在距离涡核中心 19nm 处得到的 dI/dV 信号; (e) 为沿 (b) 和 (c) 中直线所示得到的 dI/dV 信号 (测量参数: (b) $I=0.6\text{nA}$, $V=-300\text{mV}$; (c) $I=1.0\text{nA}$, $V=-350\text{mV}$)

性物理以及相关领域的研究,极大地促进了人们对微观磁性的了解和应用.但这只是冰山一角,SP-STM 还存在很多可拓展的功能和用途有待我们进一步发展和完善.在这方面,我国的研究还是一片空白,与世界先进水平存在巨大的差距,需要我们在这方面更多的努力,希望在未来新的领域(如:利用 SP-STM 实空间信息辅助中子衍射,同时进行态密度和自旋极化的测量,极高分辨率的磁成像技术和磁隧穿器件等)和尚未解决的问题上(如:针尖杂散场的影响,反铁磁周期结构及结构的破坏,不共线结构和包裹型针尖不同敏感方向的机理等)有更大的突破和进展.

参考文献

[1] Binnig G and Rohrer H. Rev. Mod. Phys. , 1987, 59: 615
 [2] Matsui T, Kambara H, Niimi Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2005, 94: 226403
 [3] Martin Y, Wickramasinghe H K. Appl. Phys. Lett. , 1987, 50: 1455
 [4] Krause S, Bode M, Wiesendanger R *et al.* Science, 2007, 317: 1537
 [5] Wulfhekel W, Kirschner J. Appl. Phys. Lett. , 1999, 75: 13
 [6] Wachowiak A *et al.* Science, 2002, 298: 577
 [7] Blügel S, Weinert M, Dederichs P H. Phys. Rev. Lett. , 1988, 60: 1077
 [8] Wiesendanger R *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1990, 65: 247

[9] Heinze S *et al.* Science, 2000, 288: 1805
 [10] Kubetzka A, Bode M, Wiesendanger R. Appl. Phys. Lett. , 2007, 91: 012508
 [11] Kubetzka A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2005, 94: 087204
 [12] Wortmann D *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2001, 86: 4132
 [13] Bode M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998, 81: 4256
 [14] Koltun R *et al.* Appl. Phys. A, Mater. Sci. Process. , 2001, 73: 49
 [15] Cavallini M, Biscarini F. Rev. Sci. Instrum. , 2000, 71: 4457
 [16] Albonetti C *et al.* Rev. Sci. Instrum. , 2002, 73: 4254
 [17] Bassi A Li *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2007, 91: 173120
 [18] Wiesendanger R *et al.* Appl. Phys. A, 1991, 53: 353
 [19] Pietzsch O *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2000, 84: 5212
 [20] Elmers H J, Gradmann U. Appl. Phys. A, 1990, 51: 255
 [21] Bergmann K Von *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006, 96: 167203
 [22] Bergmann K Von *et al.* Microscopy Research and Technique, 2005, 66: 61
 [23] Pietzsch O *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006, 96: 237203
 [24] Yayon Y, Crommie M F *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2007, 99: 067202
 [25] Pietzsch O *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004, 92: 057202
 [26] Meier Focko *et al.* Science, 2008, 320: 82
 [27] Ruderman M A, Kittel C. Phys. Rev. , 1954, 96: 99
 [28] Kasuya T, Theor Prog. Phys. , 1956, 16: 45
 [29] Yosida K. Phys. Rev. , 1957, 106: 893
 [30] Bode M *et al.* Nature, 2007, 477: 190



• 读者和编者 •

《物理》2010 年征订启事

《物理》是中国物理学会、中国科学院物理研究所主办出版的学术期刊,1972 年创刊,致力于传播当代物理学及其交叉学科的前沿最新进展,促进物理学与相关学科的相互交叉和渗透,沟通科研与产业,推动中国物理学的发展.作为中国物理学会的会员刊物,《物理》拥有众多来自科研和教学一线的优秀作者,集科学性、前沿性和可读性为一体,特色鲜明,让读者轻松掌握当前物理学各领域的最新动态,读者遍及国内各相关院所、高等学校和企业界.

《物理》每月 12 日出版发行,邮局定价为 240 元/年.2010 年度的期刊订阅正在进行,为感谢广大读者长期以来对《物理》杂志的关爱和支持,《物理》编辑部特推出以下优惠订阅活动:

- 1、凡是中国物理学会交纳会费的会员,可享受优惠订阅价 120 元/年,或者 400 元/四年(订阅杂志的费用可以连同会费一起交到中国物理学会,也可以直接向编辑部订阅并提供相关证明);
- 2、其他非会员订户,凡向编辑部订阅《物理》杂志的,可享受优惠订阅价 180 元/年.

汇款方式:(1) 邮局汇款:100190,北京 603 信箱,《物理》编辑部收;

(2) 银行汇款:户名:中国科学院物理研究所
 帐号:30948821-250101040005699
 开户行:农行北京科院南路支行
 银行汇款时请注明“《物理》杂志”

欲了解更多详情可以登录 www.wuli.ac.cn 查询,也可来电来信咨询.

咨询电话:010-82649266,82649470(王进萍); Email: physics@iphy.ac.cn