

软硬磁界面应变造成的畴壁钉扎

郭子政

(内蒙古自治区功能材料物理与化学重点实验室, 内蒙古师范大学 物理与电子信息学院,
内蒙古师范大学 功能材料设计与计算研究中心, 内蒙古呼和浩特 010022)

摘要: 基于平衡时总能量极小的条件, 通过近似求解畴壁的欧拉方程, 研究了软硬磁界面应变造成的 180° 畴壁钉扎的可能性以及畴壁在两种材料中的分布情况。解析推导出畴壁在两种材料中分布的近似表达式并数值研究了各种参数改变对此分布的影响。结果表明, 在多数情况下畴壁将主要分布在界面处软磁区域一边。衬底材料对畴壁在界面的分布有很大影响。

关键词: 软硬磁界面; 应变; 畴壁钉扎

中图分类号: Q482.51

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2010)05-0012-03

Domain Wall Pinning Caused by Strain at the Interface of Soft and Hard Magnetic Media

GUO Zi-zheng

Inner Mongolia Key Laboratory for Physics and Chemistry of Functional Materials, College of Physics and Electronic Information, Research Center for Design and Computing of Functional Materials, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

Abstract: By approximately solving the Euler equation of the domain wall based on minimum total energy under the equilibrium conditions, we studied the pinning possibility and the distribution of the 180° domain wall caused by strain at the soft and hard magnetic interface. Analytic expressions for the domain wall distribution in the two materials were obtained and the effects of some physical parameters on the distributions were analyzed numerically. The results showed that in most cases, domain walls mainly distribute in the soft regional side of the interface. Substrate materials have a significant impact on the interfacial domain wall distribution.

Key words: interface of soft and hard magnetic media; strain; domain wall pinning

1 引言

人们已经很好地研究了缺陷导致的铁磁材料的畴壁钉扎问题^[1]。但界面处畴壁钉扎问题似乎没有很好解决。赵国平等^[2]给出了硬磁、软磁多层膜体系成核场的解析公式, 但没有考虑界面效应。Mukherjee 等^[3]研究了交换耦合复合介质中畴壁的传播, 给出了传播场的大小。多层纳米线结构中的纳米线多为软硬磁复合结构, 软硬磁界面处为畴壁形成一个势垒, 这样在外场作用下, 软磁相

中会首先成核, 即在软磁相中形成畴壁。当磁场强度超过畴壁传播场后软磁相中的磁畴可以进入硬磁相, 实现畴壁的传播。但畴壁在界面处的状态没有很好描述。实际上多层膜结构中两种材料的界面也是一种缺陷。在界面处, 两种材料除结构和取向不同之外, 往往化学成分也不相同。由于晶格失配, 界面处还会产生应变。区别于其他晶体缺陷如位错和空位等, 这种缺陷, 从它在物质中分布的几何特征来看, 是二维的。显然, 由于这种缺陷的存在, 在铁磁性材料中会出现磁畴壁等。多层膜结构中应变的影响一直是人们十分关注的课题。Lin 等人的研究^[4]表明垂直方向晶格常数改变使交换耦合作用增强。关于这一现象的

收稿日期: 2010-03-19 修回日期: 2010-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10765003)

作者通信: E-mail: phzzguo@126.com

解释,可能只有从第一原理计算出发。Vaz 和 Bland 发现应变会造成一阶各向异性常数和二阶各向异性常数相反趋势的改变,从而抵消应变的影响^[5],目前界面应变导致的畴壁钉扎及其性质还鲜有报道。

另一方面,我们已经知道,半导体 p-n 结中,由于邻近效应,界面处会形成空间电荷区,从而造成电势分布。软硬磁结构的多层系统也可以看成是一种磁异质结。不管是交换耦合还是交换偏置,都是磁邻近效应的结果。过去,磁邻近效应研究只局限在磁和超导界面。目前人们已经认识到像半导体异质结、超导中的邻近效应、磁邻近效应都有其共性的东西。磁邻近效应目前引起了很多研究者的注意,报道了许多试验和理论工作,包括第一性原理计算^[6]。另外,还有利用电子全息方法研究半导体 p-n 结、铁电和铁磁畴壁的势场分布的工作^[7]。但是否能从磁邻近效应的角度理解交换耦合还没有明确的答案。

对于半导体 p-n 结,我们可以求出空间电荷区在 p 区和 n 区的分布。类似地,我们希望知道软硬磁界面处畴壁在两种材料中的分布。本文基于平衡时总能量极小的条件,通过近似求解畴壁的欧拉方程,研究了软硬磁界面应变造成的 180° 畴壁钉扎的可能性以及畴壁在两种材料中的分布情况。我们将推导畴壁在两种材料中分布的近似解析表达式并研究各种参数对此分布的影响。

2 软硬磁耦合体系的模型和畴壁钉扎条件

我们讨论图 1 的模型。1、3 是软硬两种铁磁材料,交换能常数和磁各向异性常数分别为 A_1 、 K_1 和 A_3 、 K_3 , 2 区是界面钉扎的 180° 畴壁,交换能常数和磁各向异性常数为 A_2 、 K_2 。 t_1 、 t_3 是畴壁在两种材料中的分布宽度。图 1 的模型可以是双层膜系统,这时 1 区和 3 区是薄膜的上下层。假设此多层膜系统可用一维模型描写,图 1 横向是垂直膜面方向,也即 z 方向。另外假设 1 区紧靠衬底。图 1 的模型也可以是双层的纳米线。目前利用多层纳米线结构制作的交换耦合复合介质或者交换弹性复合介质被认为是解决磁记录三难问题的重要出路之一^[8-10]。

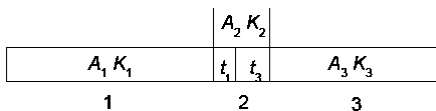


图 1 软硬磁耦合系统示意图

根据势垒叠加原理,即畴壁势垒是由构成畴壁的每个原子层的势垒的贡献叠加而成,矫顽力由克服每个原子层势垒的外场叠加而成^[11]。如果在材料参数为 A (交换能常数)、 K (各向异性常数)、 M_s (饱和磁化强度)的材料中存在 n 个原子层的缺陷,并设每个原子层的厚度为 d ,交换能常数和磁各向异性常数分别为 $A^{(i)}$ 和 $K^{(i)}$,则矫顽力

$$H_c = \frac{1}{3\sqrt{3}} \frac{2K}{\mu_0 M_s} \frac{\pi d}{\delta_B} \sum_{i=1}^n \left(\frac{A}{A^{(i)}} - \frac{K^{(i)}}{K} \right),$$

其中 $\delta_B = \pi\sqrt{A/K}$ 。类似地,对于本文的模型,矫顽力可近似写成

$$H_c = H'_c + H''_c = \frac{2K_1}{\mu_0 M_s} \frac{t_1}{\delta_{01}} \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(\frac{A_1}{A_2} - \frac{K_2}{K_1} \right) + \frac{2K_3}{\mu_0 M_s} \frac{t_3}{\delta_{03}} \frac{1}{3\sqrt{3}} \left(\frac{A_3}{A_2} - \frac{K_2}{K_3} \right) \quad (1)$$

其中 $\delta_{01} = \sqrt{A_1/K_1}$, $\delta_{03} = \sqrt{A_3/K_3}$, 我们已经假设各层中的饱和磁化强度不变,都为 M_s 。一般地,畴壁能和畴壁宽度的推导都利用平衡时总能量极小的条件,求解畴壁的欧拉方程^[1]。仿照文献[1]的推导,分布在图 1 的界面两边的畴壁宽度近似为

$$t_1 = \int_{-t_1}^0 dz \approx \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{\mu_0 M_s H}{K_1} \frac{\delta_{01}}{\frac{A_1}{A_2} - \frac{K_2}{K_1}} \quad (2)$$

$$t_3 = \int_0^{t_3} dz \approx \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{\mu_0 M_s H}{K_3} \frac{\delta_{03}}{\frac{A_3}{A_2} - \frac{K_2}{K_3}} \quad (3)$$

(2)、(3) 式中 H 为外场。当 $A_1 = A_3, K_1 = K_3$ 时,由 (1) 式得到的矫顽力 H_c 以及由 (2)、(3) 式得到的畴壁宽度 $t = t_1 + t_3$ 与文献[1]给出的面缺陷的矫顽力和畴壁宽度公式完全一致。

由 (2)、(3) 式得

$$t_1/t_3 = \frac{K_3}{K_1} \frac{\delta_{01}}{\delta_{03}} \frac{\frac{A_3}{A_2} - \frac{K_2}{K_3}}{\frac{A_1}{A_2} - \frac{K_2}{K_1}} \quad (4)$$

畴壁能够钉扎在界面处的条件是: $K_2 < K_1$ 或 $K_2 < K_3$, 即在界面处形成一个更“软”的区域,或者说在畴壁传播方向上存在一个势垒。下面分析这种可能性。

表面(界面)中的磁各向异性常数,文献^[12,13]中通常写成 $K = K_0 + 2K_s/t$, 其中 K_0 表示体材料的各向异性常数,而 K_s 表示表面(或界面)各

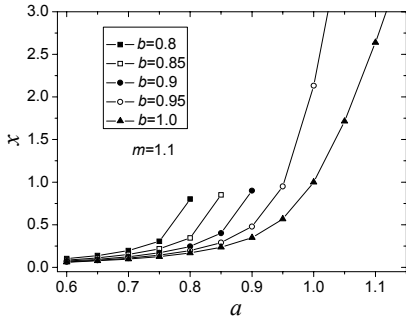


图2 不同晶格失配情况下 x 随 a 的变化

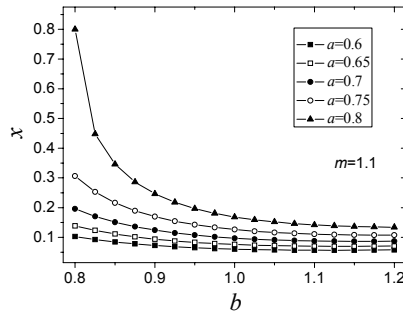


图3 a 取不同值时 x 随晶格失配 b 的变化

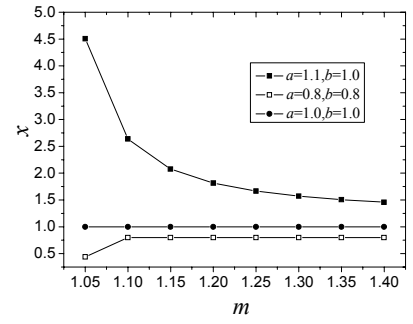


图4 不同材料参数下 x 随 m 的变化

向异性常数。只有 K_s 为负的材料才能满足钉扎条件。表面（界面）中的磁各向异性常数的另一种表述为^[1,9]

$$K(z) = K_0 - \frac{\Delta K}{\text{ch}^2 z / z_0}$$

其中 $\Delta K = K_0 - K'$ ，而 K' 是表面(或界面，即产生畸变的区域)中各向异性常数， z_0 为各向异性常数变化的厚度。此表达式也可写成

$$K(z) = K' + \Delta K [1 - e^{-(z/z_0)^2}] \quad (5)$$

将 (5) 式线性化得到

$$K(z) \approx K' + \Delta K (z/z_0)^2 \quad (6)$$

在这种模型中已假设界面处的各向异性常数小于体各向异性常数，因此钉扎条件自动满足。

3 畴壁分布

讨论最简单的立方晶系的情况。在没有应变时，垂直方向的晶格常数与平面的晶格常数相同，设为 $s_i (i=1,2,3)$ 。因为 $A \propto 1/s$ ，所以

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{s_3}{s_1}, \frac{A_3}{A_2} = \frac{s_2}{s_3}, \frac{A_1}{A_2} = \frac{s_2}{s_1} \quad (7)$$

假设薄膜较薄，则出现应变后，薄膜的平面晶格常数近似等于衬底的晶格常数 s_s 。这时 2 区中靠近 1 和 3 部分的垂直方向的晶格常数可利用等面积法则^[14]算得为 $s_2' = s_1^2 / s_s$ ， $s_2'' = s_3^2 / s_s$ 。计算中我们取其平均值作为 2 区应变后的垂直方向的晶格常数，即

$$s_2 = \frac{s_2' + s_2''}{2} = \frac{s_1^2 + s_3^2}{2s_s} \quad (8)$$

根据 (6) 式，取界面两边的各向异性常数为 $K_2'(z) = K_2 + (K_1 - K_2)(z/t_1)^2$ ， $K_2''(z) = K_2 + (K_3 - K_2)(z/t_3)^2$ ，则畴壁区域上平均各向异性常数为

$$K_2 = \frac{\int_{-t_1}^0 K_2'(z) dz + \int_0^{t_3} K_2''(z) dz}{t_1 + t_3} = \frac{K_1 t_1 + K_3 t_3}{t_1 + t_3} \quad (9)$$

$$\text{令 } x = \frac{t_1}{t_3}, a = \frac{K_3}{K_1}, b = \frac{s_3}{s_1}, c = \frac{s_2}{s_3}, d = \frac{s_2}{s_1}, m = \frac{s_1}{s_s}, \text{ 则有}$$

$$\begin{aligned} \frac{s_3}{s_s} &= \frac{s_1}{s_s} \frac{s_3}{s_1} = mb, c = \frac{s_2}{s_3} = \frac{1}{2} m(1+b^2), d = \frac{s_2}{s_1} \\ &= \frac{1}{2} mb(1+1/b^2) \end{aligned} \quad (10)$$

将 (8)、(9)、(10) 式代入 (4) 式，得

$$x = \frac{\frac{x}{x+1} + 1}{a^{\frac{3}{2}} b^{\frac{1}{2}} \frac{d - \frac{a}{1+x}}{c - \frac{x+a}{1+x}}} \quad (11)$$

再令

$$p = c - 1, q = c - a + \sqrt{ab}(1 - da), t = a\sqrt{ab}(1 - d) \quad (12)$$

则 (11) 式变成

$$px^2 + qx + t = 0 \quad (13)$$

其解

$$x_1 = \frac{-q + \sqrt{q^2 - 4pt}}{2p}, x_2 = \frac{-q - \sqrt{q^2 - 4pt}}{2p} \quad (14)$$

$m < 1.0$ 时只有 x_2 有解； $m \geq 1.0$ 时 x_1 和 x_2 均有解。

图 2 是 $m=1.1$ 时 x 随 a 变化的情况。这里 a 是两种材料各向异性常数的比值，而 m 是材料 1 与衬底晶格常数之比。 $m \geq 1$ 意味着材料 1 的晶格常数大于衬底的晶格常数，所以材料 1 在垂直方向处于张应变状态。而当 b 接近 1 时材料 3 也处于张应变状态。图 2 表明，随着 a 的增大， x 也增大，畴壁在硬磁区域的分布越来越少，即越来越集中在软磁区域。 $b=1, a=1$ 时 $x=1$ ，即畴壁对称分布在界面处。这与当 $A_1=A_3, K_1=K_3$ 时公式 (4) 得到的结果相同。

(下转 23 页)

with magnetoplumbite structure [A]. Ferromagnetic Materials (Vol 3) Edited by E P Wolfarth [C]. North-holland Publishing Company, 1982. 335-392.

- [4] Goto K, Ito M, Saakwrai T. Studies on magnetic domain of small particles of barium ferrite by colloid-SEM method [J]. Jpn J Appl Phys, 1980, 19(4): 1339-1346.
- [5] Kools F, Morel A, Grössinger R, et al. La-Co substituted ferrite magnets, a new class of high-grade ceramic magnets; intrinsic and microstructure aspects [J]. J Magn Magn Mater, 2002, 242-245: 1270-1276.
- [6] Taguchi H, Hirata F, Takeishi T, et al. High performance ferrite magnet [A]. Proc of ICF-6[C]. Tokyo and Kyoto, Japan, 1992. 1118-1121.
- [7] Taguchi H, Takeishi T, Suwa K. A study on high performance ferrite magnets [J]. J Jpn Soc Powder and Powder Metallurgy, 1997, 44: 3-10.
- [8] Hibst H. Hexagonal ferrites from melts and aqueous solutions, magnetic recording materials [J]. Angew Chem

Int Ed Engl, 1982, 21: 270-282.

- [9] Sakai H, Hanawa K, Aoyagi K. Preparation and magnetic properties of barium ferrite fine particles by coprecipitation sat-catalysis method [J]. IEEE Trans Magn, 1992, 28(6): 3355-3362.
- [10] Wallace J B, King H W, Payzant E A. Magnetic field induced feature during KCl flux synthesis of strontium hexaferrite [J]. J Magn Magn Mater, 1993, 124: 9-14.
- [11] Kin Si-dong, Kin Jung-sik. Magnetic Properties of Sr-ferrites synthesized in molten (NaCl+KCl) flux [J]. J Magn Magn Mater, 2006, 307(2): 295-300.
- [12] Wang Z Q, Meng W M, Yu J, et al. The structure and magnetic properties of $Sr_{1-x}La_xCo_xFe_{2n-x}O_{19}$ fine particles prepared by chemical coprecipitation [A]. Proc of ICF-10 [C]. Chengdu, 2008, 96-99.

作者简介: 李富瑞(1983-), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事磁性材料方面的研究。

(上接 14 页)

图 3 是 $m=1.1$ 时 x 随 b 变化的情况。这个变化主要发生在 $b<1$ 处, 当 $b>1$ 时畴壁在界面两边的分布基本不变, 而且主要分布在磁性更软的一面。随着 a 的增大, x 也增大, 与图 2 的结论相同。

图 4 是不同材料参数下 x 随 m 的变化趋势。 x 随 m 的变化趋势视 a 、 b 取值不同而不同, 情况相当复杂。当 $a=b=1$ 时 $c=d=m$, 得 $x=1$ 。即 x 与 m 的变化无关。这正是图中中间的直线。图 4 的上下两条曲线中 x 随 m 的变化趋势相反, 可能原因如下: 上面的曲线中软磁材料在左边 (材料 1), 由于势垒的存在, 在应力增加的情况下, 软磁区域中的畴壁被压缩。下面曲线中左边 (材料 1) 是硬磁材料。在应力增加的情况下, 硬磁区域中的畴壁不易被压缩, 但势垒被降低, 相当于 1 区畴壁展宽。

图 4 的结果说明衬底材料对畴壁在界面的分布有很大影响。这种趋势应该与材料的应变类型没有关系, 因为上述三种情形中两种材料均可处于张应变状态。对此趋势的深入理解需要进一步的研究。

4 结语

本文研究了软硬磁界面应变造成的畴壁钉扎的可能性以及畴壁在两种材料中的分布情况。通过近似求解畴壁的欧拉方程, 我们得到了畴壁在两种材料中分布的近似解析表达式并对各种参数改变时此分布的变化趋势进行了数值分析。结果表明, 在多数情况下畴壁将主要分布在界面处软磁区域一边。衬底材料对畴壁在界面的分布有很大影响。

参考文献:

- [1] 钟文定. 技术磁学(上)[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

- [2] 赵国平, 鲜承伟, 杨春, 等. 硬、软磁多层膜体系成核的解析分析[J]. 中国科学(G辑), 2009, 39(12): 1728-1735.
- [3] Mukherjee S, Berger L. Switching of composite media by wall propagation [J]. J Appl Phys, 2006, 99: 08Q909.
- [4] Lin W C, Wang B Y, Chen T Y, et al. Enhanced exchange bias coupling in Fe/Fe_xMn_{1-x} bilayer by reducing vertical lattice constants [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90: 52502.
- [5] Vaz C A F, Bland J A C. Strain-induced magnetic anisotropy in Cu/Co/Ni/Cu/Si(100) epitaxial structures [J]. Phys Rev B, 2000, 64: 3098.
- [6] Liu D P, Hu Y B, Guo H, et al. Magnetic proximity effect at the molecular scale: First-principles calculation [J]. Phys Rev B, 2008, 78: 193307.
- [7] 田焕芳, 李建奇. 电子全息及其在材料科学中的一些应用[J]. 科学通报, 2006, 51 (14): 1617.
- [8] 郭子政. 交换耦合复合介质及研究进展[J]. 信息记录材料, 2010, 11(2)(待发表).
- [9] Wang J P, Shen W K, Bai J M. Exchange coupled composite media for perpendicular magnetic recording [J]. IEEE Trans Magn, 2005, 41(10): 3181.
- [10] Wang J P, Shen W K, Bai J M, et al. Composite media (dynamic tilted media) for magnetic recording [J]. Appl Phys Lett, 2005, 86: 142504.
- [11] 荣传兵, 张宏伟, 张健, 等. 纳米晶永磁中面缺陷对畴壁钉扎机理的研究[J]. 物理学报, 2003, 52(3): 708-712.
- [12] Engel B N, England C D, Van Leeuwen R A, et al. Engle Effective anisotropy times Co thickness versus cobalt thickness for [Co/Pt] multilayers [J]. Phys Rev Lett, 1990, 67:1910.
- [13] 王鼎盛. 界面(表面)磁各向异性理论[J]. 自然科学进展, 1994, 4(5): 556-562.
- [14] 郭子政. 应变超晶格的声子色散和拉曼频移[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2001.

作者简介: 郭子政(1963-), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 目前主要从事凝聚态理论和计算物理研究。