

# 电沉积制备磁性纳米线的研究进展\*

孔祥存<sup>1</sup> 吴玉程<sup>1,3,†</sup> 杨友文<sup>1</sup> 解挺<sup>2</sup> 叶敏<sup>1</sup> 李广海<sup>3</sup> 张立德<sup>3</sup>

(1 合肥工业大学 材料科学与工程学院 合肥 230009)

(2 合肥工业大学 机械与汽车工程学院 合肥 230009)

(3 中国科学院固体物理研究所 材料物理重点实验室 合肥 230031)

**摘要** 多孔阳极氧化铝为模板制备纳米结构材料具有独特的优越性,颇受人们的关注,近年来获得了深入的研究.文章介绍了用电化学沉积方法制备一维磁性纳米线的最新研究进展,阐述了各种结构磁性纳米线,包括单质、合金、多层、超晶格磁性纳米线的研究现状,展望了磁性纳米线的研究方向和在高密度垂直磁记录与巨磁电阻等方面的应用前景.

**关键词** 磁性纳米线,电沉积,研究进展

## Magnetic nanowire fabrication by electrochemical deposition

KONG Xiang-Cun<sup>1</sup> WU Yu-Cheng<sup>1,3,†</sup> YANG You-Wen<sup>1</sup> XIE Ting<sup>2</sup> YE Min<sup>1</sup>  
LI Guang-Hai<sup>3</sup> ZHANG Li-De<sup>3</sup>

(1 School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(2 School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(3 Key Laboratory of Material Physics, Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract** Alumina template – synthesized nanostructure materials have unique properties which are very attractive and have been under intensive research in recent years. We describe the latest developments in the preparation of one – dimensional magnetic nanowire arrays by electrodeposition. Many kinds of array structures, such as elemental, alloy, multilayer and superlattice nanowires, are reviewed. Future research directions of super – high density magnetic recording and potential applications of the giant magnetic resistance of magnetic nanowires are also discussed.

**Keywords** magnetic nanowires, electrodeposition, research development

## 1 引言

纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围或由它们作为基本单元构成的材料.正是由于纳米材料特殊的尺寸与结构所带来的小尺寸效应、表面效应和量子隧道效应等,从而使其具有特殊的光学、电学、磁学及力学性能,正成为物理学、化学、电子学、材料科学以及生物学等很多领域广泛研究的对象.作为纳米材料家族一员的磁性纳米材料,

尤其是一维磁性纳米材料具有高度的磁各向异性以及易磁化方向一般与纳米线轴向平行的特性,在外磁场垂直于膜面磁化时,磁滞回线具有较高的矩形比,表现出比多维纳米材料更优越的特性,因而备受关注<sup>[1,2]</sup>.探索并开展具有不同组分与结构的磁

\* 合肥工业大学中青年创新群体基金(批准号:103-037016)、国家自然科学基金(批准号:10847115)资助项目

2008-12-02 收到初稿 2008-12-17 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: ycwu2004@126.com

性纳米线的制备与物性研究也是当前纳米科技领域的热点之一。

## 2 电沉积方法及其在一维磁性纳米线制备中的应用

一维磁性纳米线的制备方法多种多样,大致可分为化学法、物理法和综合法。其中化学法中的模板合成法是发展较早、应用较广的一种方法<sup>[3-6]</sup>。以氧化铝模板为基体材料,结合电化学沉积方法,是近年来最为常用的一种磁性纳米线阵列的制备方法<sup>[7]</sup>。该方法可通过控制电沉积时间控制金属的沉积量,因而可对纳米线的纵横比进行精确控制。电沉积获得磁性纳米线有序阵列的方法按驱动金属离子的方式不同又可以分为交流电沉积、直流电沉积、脉冲电沉积等。这几种方法都是通过溶液中的金属阳离子在作为阴极的模板纳米孔洞内得到电子被还原而沉积下来,并在模板空隙的导向作用下,沿孔隙底部向外生长。对于交流电沉积,在铝阳极氧化形成有序纳米孔后,不需要将模板与铝基体分离,对致密的氧化铝膜减薄后,通过控制电流、电压、频率、时间等参数,可合成各种磁性纳米线有序阵列。该方法操作工艺简单、可行,其缺点是只能在孔中组装单一的金属或合金。而用直流或者脉冲电沉积的方法制备磁性纳米线阵列时,一般是将氧化铝模板从铝基体上剥离、通孔,然后通过溅射或真空镀膜等方法先在模板的背面涂上一层金属薄膜作为电沉积的阴极,通过控制电压、电流、温度和时间等条件来制备磁性纳米线,而后移去模板即得相应的纳米线。该方法操作工序比较复杂,但由于基体导电性好,容易吸引金属离子进入孔中,因而可以在孔洞中组装多种形式的纳米材料,如磁性纳米结<sup>[8]</sup>、多层磁性纳米线<sup>[9]</sup>等。

## 3 不同结构磁性纳米线的制备

随着电子信息科学与技术的发展,使得人们追求越来越高的存储密度和越来越小的存储单元,作为信息的载体——磁记录介质的存储面密度有待于提高。由于磁性纳米线阵列在高密度垂直磁记录领域和研制新型存储器方面有着诱人的应用前景,最近几年有关磁性纳米线阵列这方面的研究日趋活跃。

### 3.1 单质磁性纳米线

电化学沉积单质磁性纳米线主要是利用 Fe, Co, Ni 等磁性金属离子在阴极的氧化铝模板的孔洞里发生还原反应,形成金属单质,进而形成纳米线。通过这种方法可以制备大量的 Fe, Co, Ni 等磁性金属纳米线<sup>[10-15]</sup>。目前对单质磁性纳米线研究的重点主要集中在对纳米线晶体结构和形貌的控制以及对纳米线生长机理的探讨上,进而实现对纳米线性能的调控。早在 1991 年, Mawlawi 等<sup>[16]</sup>采用交流电沉积在氧化铝模板中合成了直径为 22 nm 的多晶铁纳米线阵列。研究表明,纳米线矫顽力达到了 2220 Oe, 矩形比为 0.90, 且易磁化轴沿着纳米线长轴方向, 具有较高的垂直磁各向异性, 这将在高密度有序磁存储方面具有诱人的应用前景。2000 年, Zeng 等<sup>[17]</sup>采用交流电沉积方法在阳极氧化铝膜内制备得到钴纳米线阵列, 其磁学性能取决于纳米线的直径与长度, 矫顽力随着纳米线直径的减小和长度的增加而增加。于冬亮、潘谷平等小组分别采用直流电沉积的方法制备出高度有序的钴、镍纳米线阵列<sup>[18, 19]</sup>, 其直径分别为 35 nm 和 10 nm。他们在对其磁学性能研究中, 都发现纳米线阵列较块体材料具有更高的矫顽力和矩形比, 其中矫顽力分别为  $1.478 \times 10^5$  A/m 和 8310 Oe ( $1 \text{ Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$ ), 镍纳米线阵列的矩形比高达 0.91。钴、镍等磁性纳米线所表现出的较高的矫顽力说明了其特殊的磁畴特性, 这也使得开发出新的高密度垂直磁记录材料成为可能。Shi 等<sup>[20]</sup>用直流和交流电沉积制备了直径分别为 60 nm 和 30 nm 的镍纳米线, 并对其磁学与光学性能进行了研究。研究发现, 直流电沉积的最佳电压为 4 V, 交流沉积为 10 V, 镍纳米线从 60 nm 的 [200] 择优取向转变为 30 nm 的 [110] 择优取向; 磁学性能研究表明, 当外加磁场平行于纳米线轴向时, 直径为 60 nm 和 30 nm 的镍纳米线的矫顽力分别为 197 Oe 和 404 Oe, 矩形比分别为 0.21 和 0.3。Oh 等<sup>[21]</sup>用直流电沉积制得了长径比分别为 1:1.4:1 和 34:1 的纳米点、纳米棒和纳米线, 研究发现, 当外加磁场平行于纳米线时, 在 5 K 条件下, 它们的矫顽力分别为 200, 630 和 730 Oe, 说明了纳米结构的磁学性能决定于形状各向异性和长径比。Cho 等<sup>[22]</sup>用直流电沉积制备出钴纳米线, 并研究了 AAO 孔径、电流密度、PH 值、退火和沉积时外加磁场对纳米线阵列的结构和磁学性能的影响。结果表明, 小的孔径使样品有更好的结晶, 低的电流密度样品的磁学性能得到改善, 随着 PH 值增大, 纳米线由面心立方结构转变为密排六方结构, 易磁化方向也由沿着长轴方向转变为沿垂直

于轴线方向,退火证明纳米线具有良好的热稳定性;沉积时外加磁场能尽管没有改变易轴和难轴的方向,但会影响离子传输和化学势以及纳米晶的生长习性.图1为中国科学技术大学的Jin等<sup>[23]</sup>用直流电沉积的方法制备出的大规模规整的镍纳米线阵列的SEM照片.多种表征方法表明,制得的纳米线为单晶结构,磁学性能测试表明,在外加磁场平行于纳米线时的矫顽力比垂直于纳米线时大很多.

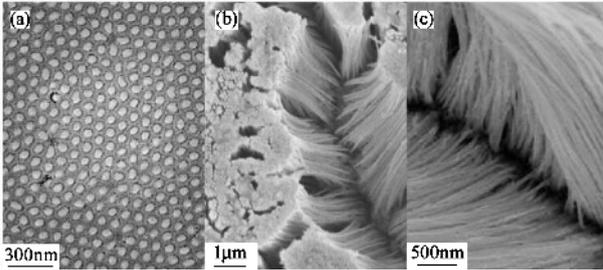


图1 镍纳米线阵列的SEM照片<sup>[23]</sup>

### 3.2 合金磁性纳米线

合金磁性纳米线是指具有两种及两种以上金属组分的纳米线.根据组分的不同又可分为磁性-磁性金属合金纳米线<sup>[24-33]</sup>和铁磁-非磁性合金纳米线<sup>[34-38]</sup>.相对于单质磁性纳米线阵列来说,由于合金磁性纳米线的组分控制比较难,所以,制备具有一定化学配比的合金磁性纳米线一直是研究重点.Liu<sup>[39,40]</sup>通过改变电沉积溶液中铁离子和镍离子的比例,实现了对Fe-Ni合金纳米线的组分进行控制,得到一系列 $Fe_{1-x}Ni_x$ 合金,并且发现,当镍的含量为 $x < 0.35$ ,  $0.35 < x < 0.5$ ,  $x > 0.5$ 时,合金纳米线的结构分别为体心、体心和面心混合相、面心结构,这不同于块体和粒子体系的情况.磁滞回线研究发现,当外加磁场平行于纳米线,且镍的含量为 $x < 0.5$ 和 $x > 0.7$ 时,矫顽力随着 $x$ 增大线性减小,而在 $0.5 < x < 0.7$ 范围内,矫顽力随 $x$ 线性增加.Fodor等<sup>[41]</sup>通过调节金属铁的组分制备出 $Co_{1-x}Fe_x$ 合金纳米线,发现当铁的含量在 $0 < x < 0.1$ 的范围时,合金纳米线从六角结构向面心结构转变,而当铁的含量为 $x = 0.15$ 时,合金纳米线为面心结构.在磁学性能方面,当外加磁场平行于纳米线轴向时,随着铁含量的增加,矫顽力先增加后减小,在铁的含量 $x = 0.55$ 时,合金纳米线的矫顽力达到最大值.Funda等<sup>[42]</sup>研究了沉积时间和溶液PH值对NiFe纳米线制备的影响,沉积时保持其他条件如离子浓度、沉积电压和溶液温度不变,结果表明,在PH值为2.0和

2.6时,随着沉积时间的延长,样品中Ni/Fe元素的比值会增大,PH=2.6比PH=2条件下制得的样品具有更好的软磁性能.样品的磁学性能可以通过优化沉积时间和溶液的PH值来改善.姜国伟小组<sup>[43]</sup>用电化学沉积的方法也成功地合成了Fe-Co-Ni三组分有序纳米线阵列,将样品在惰性气氛中不同温度下退火,随着退火温度增加,其纵向矫顽力有一个极值,而对应的横向矫顽力没有类似的变化,这一现象与纳米线阵列体系在退火过程中微结构的变化有关.

除磁性金属之间的合金纳米线之外,磁性金属与非磁性金属之间的合金纳米线的制备也备受关注.Blythe等<sup>[44]</sup>制得了直径为20 nm的多晶Co-Cu合金纳米线,利用振动样品磁强计对样品进行磁性研究,结果表明,常温下,其磁性不明显,磁滞回线基本上是一条倾斜的回线,在低温(5K)时,有微弱的磁性,但是矩形比和矫顽力均比较小,且取向性不明显.力虎林等<sup>[45]</sup>在室温下成功制备出一维非晶态Co/Pt合金纳米线,并对退火处理前后样品的矫顽力和剩磁比进行了研究(图2),结果表明,非晶态Co/Pt合金纳米线表现出明显的垂直磁各向异性,而退火处理使样品结晶化为面心立方的多晶结构,其优秀的磁学性质随着样品的结晶化而消失.

### 3.3 多层磁性纳米线

多层磁性纳米线是以两种和两种以上的元素交替出现而形成的具有特殊结构及性能的纳米线结构.1994年,Pirau<sup>[46]</sup>小组采用单浴法制备出了Co/Cu多层纳米线,每层的厚度为10 nm.磁学性能测量表明,室温下这种多层纳米线的磁电阻变化率为15%,虽然这个数值相对还比较小,但却为这种人工组装的纳米结构的发展奠定了基础.近年来,多层磁性纳米线的研究重点主要集中在如何有效地控制它们的组分及每种组分的厚度,进而实现对其性能的调控<sup>[47-50]</sup>.Liu等<sup>[51]</sup>通过改变Cu和Ni的沉积时间来实现对它们厚度的控制.沉积中保持Cu的沉积时间为30s不变,Ni的沉积时间分别为5s、10s和20s,得到Cu层的厚度为50nm而Ni层的厚度从125nm变化到400nm的一组纳米线,并发现它们的磁学性质有较大的差别,如图3所示.姚素薇等<sup>[52]</sup>利用双槽直流电沉积技术制得调制波长(即两子层厚度之和)分别为200 nm和50nm的Co/Cu多层纳米线,并指出:Co/Cu多层纳米线具有磁各向异性,且调制波长为50 nm的多层纳米线的磁电阻变化率

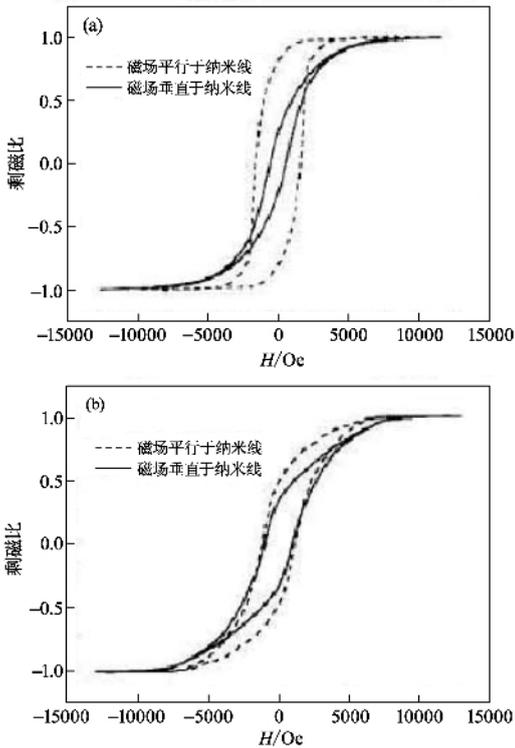


图2 Co/Pt合金纳米线的磁滞回线 (a)沉积后样品 (b)样品在700℃、99.999% Ar气氛下退火20min<sup>[45]</sup>

高达-75% ,而调制波长为200 nm的多层线未产生明显的GMR效应.兰州大学的Su等<sup>[53]</sup>用双脉冲电沉积的方法制备出类似竹节结构的CoPt/Pt多层纳米线(图4),而且每段的长度可以容易地通过改变脉冲宽度以及强度来调整.通过对其磁学性能研究发现,当外加磁场垂直于纳米线轴向的时候,样品具有比同直径的Co纳米线更大的矫顽力和矩形比,这可以归因于在沉积Co的过程中形成了杂乱的CoPt面心结构.

#### 4 一维磁性纳米线的研究及应用前景

磁性纳米线作为准一维纳米材料的一个重要组成部分,目前的研究热点主要集中在以下几个方面:一是发展磁性纳米线制备技术,要在大规模制备磁性纳米线的过程中做到结构、组分、尺寸和取向可控,并探索其生长机理;二是要进行磁性纳米线性能的系统测量和性能可控的研究,从而实现表征微结构与性能关联中的一一对应关系;三是要以磁性纳米线为基础,组装成纳米器件.

##### 4.1 磁性纳米线的可控制备与生长机理研究

###### 4.1.1 磁性纳米线的可控制备

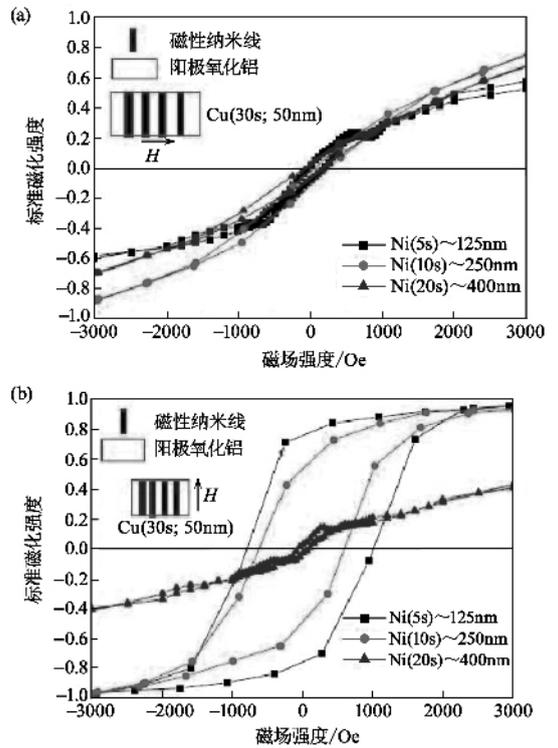


图3 35 nm Cu/Ni多层纳米线的磁滞回线 (a)外加磁场垂直于纳米线 (b)外加磁场平行于纳米线<sup>[51]</sup>

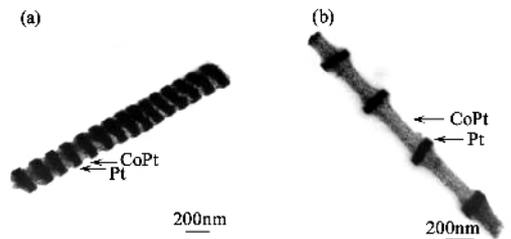


图4 CoPt/Pt纳米线的TEM照片 (a)Pt层厚度为20 nm的单根CoPt/Pt纳米线 (b)CoPt层厚度为300 nm的单根CoPt/Pt纳米线<sup>[53]</sup>

随着纳米器件研究的不断深入,人们对纳米线的制备提出了更高的要求,逐步从最初纳米线结构和生长方向无规律的制备向可控的制备转变.在电沉积制备磁性纳米线研究中,模板孔径、沉积电压、温度、沉积液PH值等是影响纳米线结构与生长方向的主要因素.Li等<sup>[13]</sup>通过调节电沉积液的PH值,实现了对钴纳米线晶体结构的控制,当PH值比较小的时候,钴纳米线呈现面心结构;当PH比较大的时候,呈现六角结构.通过调节PH值,可以得到不同的晶体结构,纳米线阵列磁学性质也就随之发生改变,这为进一步的应用打下基础.又如对于Co-Fe合金纳米线,Fodor等<sup>[36]</sup>通过改变铁的含量,

使得合金纳米线的晶体结构由六角向面心转变. Hu 等<sup>[54]</sup>通过改变电解液的 PH 值,实现了面心结构的铁纳米线的生长方向由[110]向[100]转变. Henry 等<sup>[55]</sup>研究发现,随着直径的变化,六角结构的钴纳米线的生长结构也会发生变化,而 Chaure 等人<sup>[56]</sup>则利用在电沉积过程中加一定的磁场来实现对六角结构的钴纳米线生长方向的控制. 探索磁性纳米线的可控生长的制备方法是当前纳米材料研究领域的一个极其重要的方向. 同时由于纳米材料特殊的结构,使得对于磁性纳米线生长方向的控制显得尤为重要. 对生长方向控制的研究将使人们能够更深入地了解纳米线的磁学性质. 对于磁性合金和超晶格纳米线而言,从组分无法控制到通过改变沉积参数实现对几种组分的比例进行控制合成,合金纳米线的制备有了很大的进步. 覃东欢等<sup>[57]</sup>采用交流电沉积法在 AAO 模板中成功地制备了高度有序的 Co-Ni 合金纳米线阵列结构,且能通过改变溶液中  $\text{Co}^{2+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$  的浓度比和控制沉积电压,来实现对 Co-Ni 合金纳米线阵列组分的控制,还能在一定的范围内调节合金膜的矩形比和矫顽力,最终得到高矫顽力、高矩形比的  $\text{Co}_{44}\text{Ni}_{56}$  合金纳米线阵列膜.

#### 4.1.2 磁性纳米线的生长机理

金属离子被还原到阴极上后以什么样的形式进行生长,晶体结构和生长方式之间有什么关系等生长机理的研究也是目前磁性纳米线的一个重要的研究方向和亟待解决的问题. 目前,关于金属离子在 AAO 模板上沉积的电化学机理有两种理论<sup>[58]</sup>:一是由沃默提出的直接转移理论,认为离子在电极表面附近液层中徘徊,找到它的生长点,即拐角、缺口、孔隙等,然后越过双电层放电,直接进入空隙等生长点,结合成为晶体;其二是由 Brandes 等提出的表面扩散理论,认为金属离子越过双电层,在电极上任意一点获得电子,并保持一种吸附状态,形成“吸附原子”或“吸附离子”,吸附原子经表面扩散,达到生长点开始生长. Dou 等<sup>[59]</sup>通过对 Bi/BiSb 超晶格纳米线的研究,提出了倾斜平面生长机制和曲面生长机制,并指出电沉积纳米线的生长是动力学和热力学相互竞争的结果,认为当生长过程完全受动力学制约时将得到无定形的纳米线,相反当主要受热力学控制时将会是完全的平面生长过程. 只有对这个竞争有了很好的认识才能准确地控制纳米线的生长与性能.

#### 4.2 磁性纳米线物性研究

众所周知,纳米材料的性能在很大程度上取决于它们的尺寸和形状. 在磁性纳米线的研究过程中,人们同样注意到了这一点. 磁性纳米线的磁学测量结果表明,形状各向异性在磁翻转过程中起重要的作用. 磁性纳米线较大的纵横比使得磁筹方向倾向于沿着纳米线的轴向. 因此,一般在外加磁场平行于纳米线轴向的时候,矫顽力要大于外加磁场垂直于纳米线的轴向时的矫顽力<sup>[13,14]</sup>. 最近一些小组开始关注纳米线的直径对磁学性质的影响. Niech 等<sup>[60]</sup>和 Vázquez 等<sup>[61]</sup>对于不同直径的镍纳米线的磁学性质进行了分析讨论,结果发现,随着直径的增大,纳米线的矫顽力和剩磁率都将减小,减小的原因主要是纳米线的直径变化和纳米线之间的相互作用. 但这些通过测量大量的磁性纳米线而得到的性能是整个样品的平均值,并不能真正反映单根磁性纳米线的性质. 因此测量单根磁性纳米线的性能,从而实现对纳米线性质的微观调控也是目前纳米线物性研究的一个前沿领域和重要方向. Rheem 等<sup>[62]</sup>研究了直径约为 200nm 的单根 CoNi 纳米线的电子和磁传输性能,对 10—300K 之间纳米线的磁滞电阻和各向异性磁滞电阻进行研究,结果表明,随着温度升高,磁滞电阻率下降.

随着纳米材料研究的不断深入,磁性纳米线物性的研究也有了新的发展,纳米线的磁光特性就是目前研究的一个新的方向<sup>[63]</sup>. Melle 等人<sup>[64]</sup>有关镍纳米线阵列的磁光特性的研究表明,由于镍纳米线的六角形的几何形状,样品对于入射光的不同偏振方向有不同的反应,这导致它的光学和磁光性能都有很大的各向异性. 纳米线的磁光特性比相应的块体有很大的提高,使这种体系具有良好的磁光应用前景.

#### 4.3 磁性纳米器件的研究

纳米科技的最终目的是以原子、分子为起点,去制造具有特殊功能的产品. 因此,纳米器件的研制和应用水平是进入纳米时代的重要标志. 虽然科学家们在磁性纳米线的物性研究方面做了很多工作,而且对一些纳米线的物性做了调控,但是在很多方面还要进一步研究,并且与今后的器件制作的要求还有一些差距,目前仍面临着很大的挑战.

磁性纳米线阵列能满足以下 3 个条件 (1) 具有较大的垂直方向磁晶各向异性,且饱和磁化强度要大 (2) 磁化反转机制为旋转磁化型 (3) 晶粒结构为厚度方向生长的微粒子柱状结构. 因此,它符合

作为高分辨率的垂直磁记录介质的要求,可望成为一类很有前途的高密度垂直磁记录介质,如用于制作各种磁卡、磁带、磁盘等<sup>[65 66]</sup>。科学家采用纳米压印平板印刷术制备的纳米阵列结构磁盘,克服了一般磁存储元件超顺磁性的限制,这种量子棒阵列使得磁盘的尺寸缩小了1000倍,磁存储密度大大提高<sup>[67]</sup>。磁记录材料在多孔阳极氧化膜的孔洞中析出Fe、Co、Ni等磁性金属单质以及它们与其他金属的合金后,可转换成磁性氧化膜,应用到高密度垂直磁性记录介质方面,显示出良好的磁形状各向异性,这种方法已在美国IBM公司得到应用。2006年,硬盘生产商希捷和西部数据公司采用垂直磁记录技术大批量生产下一代大容量硬盘。2007年,东芝公司宣布,开发了能提高1.5倍HDD记录密度的技术,使用DTR(discrete track recording)技术,成功地实现了在1.8英寸HDD单面上具有120Gb的容量。

利用磁性纳米线的巨磁电阻效应,发挥其灵敏度高、体积小、响应快以及非接触等特点,探索其在高密度读出磁头、存储器、传感器、探测器、无接触磁控元件、自旋晶体管等方面的应用是磁性纳米器件研究的又一热点。到目前为止,巨磁阻技术已经成为全世界几乎所有电脑、数码相机、MP3播放器的标准技术。1994年,IBM公司研制成功了巨磁阻效应的读出磁头,将磁盘记录密度提高了17倍。1995年,IBM公司宣布制成每平方英寸3Gb硬盘面密度所用的读出头,创下了当年的世界记录。2008年,据美国WD公司报道,采用TMR磁读头技术研制的新一代硬盘读出磁头,已经把存储密度提高到580 Gbit/inch<sup>2</sup>以上,GMR和TMR磁读头已占领磁头市场的90%—95%。2007年,全球最大的硬盘厂商希捷科技宣布其第四代DB35系列硬盘现已达到1000 Gb容量。正是依靠巨磁阻材料,才使得存储密度在1997至2004每年增加100%。近年来,纳米线垂直磁化膜与巨磁阻之间的关系已成为材料科学领域中的一个热门课题,多层纳米线巨磁阻效应的应用是今后的一个发展趋势。

## 5 结束语

目前,国内外学者和企业已对磁性纳米线阵列进行了大量的研究,对包括电沉积方法在内的各种结构磁性纳米线的制备工艺又进行了比较多的探讨。但对于磁性纳米线的生长机理以及器件化方面还有待进行更深入的研究。因此目前对于电沉积制

备磁性纳米线研究的重点应该是准确地控制纳米线的结构及生长取向,使其能根据性能的需要方便地进行调控。此外,还要致力于磁性纳米线的器件化、产业化研究,使磁性纳米线的优异性能得到充分利用,达到应用的目的。目前的各种应用成果使我们对将来更大规模的应用充满了信心。

## 参考文献

- [ 1 ] Yin A J, Li J, Jian W *et al.* Appl. Phys. Lett., 2001, 79 :1039
- [ 2 ] Ji G B, Chen W, Tang S L *et al.* Solid State Communications, 2004, 130 :541
- [ 3 ] Possin G E. Physica, 1971, 55 :339
- [ 4 ] Hideki M, Kenji F. Science, 1995, 268 :1466
- [ 5 ] Whitnet T M, Jiang J S, Seanson P C *et al.* Science, 1993, 261 :1316
- [ 6 ] Shen C M, Zhang X G, Li H L. Materials Science and Engineering 2001, 19(2) :89
- [ 7 ] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 10( Zhang L D, Mu J M. Nanomaterial and Nanostructure. Beijing: Science Press, 2001. 10( in Chinese ))]
- [ 8 ] Peng Y, Cullis T, Möbus G *et al.* Nanotechnology, 2007, 18 :485704
- [ 9 ] Tang X T, Wang G C, Shima M. J. Magn. Magn. Mater., 2007, 309 :188
- [ 10 ] Lin S W, Chang S C, Liu R S *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 2004, 282 :28
- [ 11 ] Wu C G, Lin H L, Shau N L. J. Solide State Electrochem., 2006, 10 :198
- [ 12 ] Li F, Wang T, Ren L *et al.* J. Phys. Condens. Matter, 2004, 16 :8053
- [ 13 ] Zhang X Y, Wen G H, Chan Y F *et al.* Appl. Phys. Lett., 2003, 83 :3341
- [ 14 ] Napolskii K S, Eliseev A A, Yesin N V *et al.* Physica E, 2007, 37 :178
- [ 15 ] Hu H N, Chen H Y, Yu S Y *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 2005, 295 :257
- [ 16 ] Aimawlawi D, Coombs N, Moskovits M. J. Appl. Phys., 1991, 70 :4421
- [ 17 ] Zeng H, Zheng M, Skomski R *et al.* J. Appl. Phys., 2000, 87 :4718
- [ 18 ] 于冬亮, 杨绍光, 朱浩. 南京化工大学学报, 2000, 22(6) :69 [ Yu D L, Yang S G, Zhu H. Journal of Nanjing University of Chemical Technology 2000, 22(6) :69 ( in Chinese )]
- [ 19 ] 潘谷平, 薛宽宏, 孙冬梅等. 化学物理学报, 1999, 12(6) :677 [ Pan G P, Xue K H, Sun D M *et al.* Chinese Journal of Chemical Physics, 1999, 12(6) :677 ( in Chinese )]
- [ 20 ] Shi J B, Chen Y C, Lee C W *et al.* Mater. Lett., 2008, 62 :15
- [ 21 ] Oh S L, Kim Y R, Malkinski L *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 2007, 310 :e827
- [ 22 ] Cho J U, Wu J H, Min J H *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 2006, 303 :281

- [ 23 ] Jin C G , Liu W F , Jia C *et al.* Journal of Crystal Growth , 2003 , 258 :337
- [ 24 ] Zhang X Y , Xu L H , Dai J Y *et al.* Physica B , 2004 , 353 :187
- [ 25 ] Zhu H , Yang S G , Ni G *et al.* J. Phys. : Condens. Matter , 2001 , 13 :1727
- [ 26 ] Rheem Y , Yoo B Y , Koo B K *et al.* J. Phys. D : Appl. Phys. , 2007 , 40 :7267
- [ 27 ] Fu J L , Yan Z J , Xu Y *et al.* Journal of Physics and Chemistry of Solids , 2007 , 68 :2221
- [ 28 ] Chen W , Tang S , Lu M *et al.* J. Phys. : Condens. Matter. , 2003 , 15 :4623
- [ 29 ] Saedi A , Ghorbani M. Mater. Chem. Phys. , 2005 , 91 :417
- [ 30 ] Khan H R , Petrikowski K. J. Magn. Magn. Mater. , 2000 , 215 :526
- [ 31 ] Sharifa R , Shamaila S , Ma M *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2008 , 320 :1512
- [ 32 ] Giro F , Bedner K , Dhum C *et al.* Microsyst Technol. 2008 , 14 :1111
- [ 33 ] Xu J X , Xu Y. J. Mater. Sci. , 2008 , 43 :4163
- [ 34 ] Liu Q , Wang J , Yan Z *et al.* Phys. Rev. B , 2005 , 72 :144412
- [ 35 ] Wang J B , Liu Q F , Xue D S *et al.* J. Phys. D : Appl. Phys. , 2001 , 34 :3442
- [ 36 ] Forder P S , Tsoi G M , Wenger L E. J. Appl. Phys. , 2002 , 91 :8186
- [ 37 ] Funda E A , Harun K , Selcuk A *et al.* Journal of Alloys and Compounds , 2009 , 469 :458
- [ 38 ] 姜国伟 , 姚连增 , 晋传贵等. 物理化学学报 , 2003 , 19( 7 ) :597 [ Jiang G W , Yao L Z , Jin C G *et al.* Acta Phys. - Chim. Sin. , 2003 , 19( 7 ) :597 ( in Chinese ) ]
- [ 39 ] Fei X L , Tang S L , Wang R L *et al.* Solid State Communications , 2007 , 141 :25
- [ 40 ] Wang R L , Tang S L , Nie B *et al.* Solid State Communications , 2007 , 142 :639
- [ 41 ] Lim S K , Jeong G H , Park I S *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2007 , 310 :841
- [ 42 ] Guo D L , Fan L X , Sang J P *et al.* Nanotechnology , 2007 , 18 :405304
- [ 43 ] Shamaila S , Sharif R , Riaz S *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2008 , 320 :1803
- [ 44 ] Blythe H J , Fedosyuk V M , Kasyutich O I *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2000 , 208 :251
- [ 45 ] 李华 , 徐彩玲 , 赵光宇等. 物理化学学报 , 2005 , 21 :641 [ Li H , Xu C L , Zhao G Y , *et al.* Acta Phys. -Chim. Sin. , 2005 , 21 :641 ( in Chinese ) ]
- [ 46 ] Piraux L , George J M , Despres J F *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1994 , 65 :2484
- [ 47 ] Cho J U , Liu Q X , Min J H *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2006 , 304 :213
- [ 48 ] Zhang W , Li W , Zhang L *et al.* Acta Phys. - Chim. Sin. , 2006 , 22 :977
- [ 49 ] Robinson A , Schwarzacher W. J. Appl. Phys. , 2003 , 93 :7250
- [ 50 ] Kaneko Y , Sakakibara H , Hashimoto S. J. Mater. Sci. , 2008 , 43 :3931
- [ 51 ] Liu R S , Chang S C , Hu S F *et al.* Phys. Stat. Sol. ( c ) , 2006 , 3 :1339
- [ 52 ] 姚素薇 , 宋振兴 , 王宏智. 物理化学学报 , 2007 , 23 :1306 [ Yao S W , Song Z X , Wang H Z. Acta Phys. -Chim. Sin. , 2007 , 23 :1306 ( in Chinese ) ]
- [ 53 ] Su Y K , Qin D H , Zhang H L *et al.* Chem. Phys. Lett. , 2004 , 388 :406
- [ 54 ] Hu H N , Chen H Y , Chen J L *et al.* Physica B , 2005 , 368 :100
- [ 55 ] Henry Y , Ounadjela K , Piraux L *et al.* Eur. Phys. J. B , 2001 , 20 :35
- [ 56 ] Chaure N B , Stamenov P , Rhen F M F *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2005 , 290—291 :1210
- [ 57 ] 覃东欢 , 彭勇 , 王成伟等. 物理学报 , 2001 , 50( 1 ) :144 [ Tan D H , Peng Y , Wang C W *et al.* Acta Phys. , 2001 , 50( 1 ) :144 ( in Chinese ) ]
- [ 58 ] 王刚 , 阎康平 , 周川等. 电子元件与材料 , 2002 , 21( 5 ) :27 [ Wang G , Yan K P , Zhou C *et al.* Electronic Components & Materials , 2002 , 21( 5 ) :27 ( in Chinese ) ]
- [ 59 ] Dou X C , Li G H , Lei H C. Nano Lett. , 2008 , 8 :1286
- [ 60 ] Nielsch K , Wehrspohn R B , Barthel J *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2001 , 79 :1360
- [ 61 ] Vázquez M , R. Pirota K , Hernández-Vélez M *et al.* J. Appl. Phys. , 2004 , 95 :6642
- [ 62 ] Rheem Y , Yoo B Y , Beyermann W P *et al.* Nanotechnology , 2007 , 18 :125204
- [ 63 ] Peng Y , Shen T H , Ashworth B *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2003 , 83 :362
- [ 64 ] Melle S , Menéndez J L , Armelles G *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2003 , 83 :4547
- [ 65 ] Atsunori T , Jiro Y , Shushi U. [ P ]. JP :11031619 A2 , 1999 - 2 - 2
- [ 66 ] Atsunori T , Jiro Y , Tatsuo F. [ P ]. JP :10283618 A2 , 1998 - 10 - 23
- [ 67 ] Chou S Y , Krauss P R , Zhang W *et al.* J. Vac. Sci. Technol. B , 1997 , 15( 6 ) :2897