

# 多铁性纳米点结构及微纳器件应用\*

高兴森<sup>1,†</sup> 曾敏<sup>1</sup> 刘俊明<sup>2</sup>

(1 华南师范大学先进材料研究所及量子调控工程与材料广东省重点实验室 广州 510006)

(2 南京大学固体微结构国家实验室 南京 210093)

2014-03-11收到

† email: xingsengao@scnu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20140404

## Multiferroic nanodot structures and their applications in micro/nano devices

GAO Xing-Sen<sup>1,†</sup> ZENG Min<sup>1</sup> LIU Jun-Ming<sup>2</sup>

(1 Institute for Advanced Materials and Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

(2 National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**摘要** 在当前电子技术微型化和高度集成化的趋势下,多铁性纳米材料的研究正逐渐成为一个重要主题。这方面的研究还处在起步阶段,在材料的制备工艺和表征手段方面还面临诸多挑战。文章简要介绍了多铁性纳米点的制备工艺(包括离子刻蚀、自组构、多孔氧化铝模板方法等)和以多功能扫描探针为代表的表征手段,还介绍了纳米点带来的新颖的物理现象及其在微纳器件应用等方面的研究进展。

**关键词** 多铁性材料,磁电耦合,纳米点结构,扫描探针

**Abstract** With the ever increasing development of miniaturization and integration technologies in the microelectronics industry, nanoscale multiferroics have attracted more and more attentions. However, there are still several challenges hinder their applications, especially in nanoscale fabrication and characterization methods. We present a brief overview on the current progress in multiferroic nanodots, covering nano-patterning (including self-assembly, focused ion beam lithography, and anodic aluminium oxide template mask assisted deposition), nanoscale characterization techniques (in particular multifunctional scanning probe microscopy), novel physical properties involved in nanodots, as well as related multiferroic nano/micro-device applications.

**Keywords** multiferroics, magnetoelectric effect, nanodot, scanning probe microscopy

## 1 引言

回顾过去十年,多铁性物理经历了飞速发展,已成为凝聚态物理的一个重要分支。人们通过对多铁性材料中多重铁性序参量(如铁电、铁

磁、铁弹序)共存、竞争、耦合行为的深入细致探索,不断挖掘出各种新颖的物理机制,让人赞叹不已。这些成果,有可能应用于开发全新概念的量子信息器件,如多铁磁感应探头、非易失性多铁逻辑器件、高速高密度的电读磁写随机存储或硬盘器等。在这方面一旦突破,将有望为信息产业带来革命性的影响。多铁性物理研究的盛况在之前的刘俊明、南策文、段纯刚等人的综述文章中已充分体现<sup>[1-4]</sup>。在当前电子技术微型化和集成

\* 国家自然科学基金(批准号: 51031004, 51272078)、广东省自然科学基金(批准号: S2011040003205)资助项目; 教育部长江学者创新团队项目(批准号: IRT1243)

化大潮下, 单个器件的尺度已经小到几十纳米, 而纳米尺度的多铁特性也因此显得越发重要。另一方面, 纳米尺度的多铁性材料蕴涵着尺寸效应和界面效应等, 也给多铁效应带来新的调控自由度<sup>[5, 6]</sup>。因此, 多铁性纳米材料研究负有基础研究和器件应用的双重使命。

早在多年前, 人们已经开始广泛探索各种多铁纳米结构, 然而针对多铁性材料在集成电路中的应用, 则更需注重它能在导电衬底上形成微电子器件的纳米点结构, 以实现其磁电功能。但大多数多铁性材料为坚硬的氧化物, 难以用半导体工艺中常用的光刻技术进行刻蚀, 在纳米制备技术方面还面临巨大挑战。而另外一个挑战, 则是如何在纳米尺度将其所蕴含的新颖物理特性揭示出来。本文将针对以上两大挑战, 简要概述基于纳米点的多铁性材料结构研究的新进展, 并探讨其在器件化应用上的潜力。

## 2 多铁氧化物纳米制备

多铁性纳米结构制备的难点在于多铁氧化物薄膜难以刻蚀。虽然半导体工业光刻技术鼻尖牙利, 但也啃不动皮实的多铁性氧化物薄膜, 不易获得小尺度高质量的纳米点阵列。目前对于这类

氧化物主要采用更为锋利的离子束刻蚀工艺<sup>[7]</sup>。利用聚焦离子束(FIB), 可按照预先设计的图案对薄膜进行图形化刻蚀, 较为方便地直接制备出单个器件(见图 1(a))<sup>[8]</sup>。然而该方法产出率较低, 通常只适宜小面积的刻蚀, 难以在大面积高密度的集成器件中应用。而较为方便地做出大面积纳米点的方法是自组构方法, 即预先用化学法或物理沉积法制备均匀薄膜, 然后在高温下分裂结晶, 便可形成纳米岛结构(图 1(b))<sup>[9]</sup>。最近我们还发现, 通过简单脉冲激光沉积工艺, 在合适生长条件下, 可以通过相分离, 自组构成导电氧化铋电极的  $\text{BiFeO}_3$ (BFO) 纳米电容结构<sup>[10]</sup>。这种方法较简便且成本低廉, 所制纳米点可小到十几纳米尺度。然而其大小不均且有序度较低, 也难以达到器件化应用的要求。

最近, 人们采用多孔氧化铝(AAO)模板辅助脉冲激光沉积法(PLD)成功地制备了较大面积的 BFO 阵列(图 1(c))<sup>[11]</sup>。主要方法是, 首先用电化学方法腐蚀, 得到约 300 nm 厚的超薄 AAO, 然后把 AAO 覆盖在带导电薄膜的单晶衬底上, 接着用脉冲激光沉积镀膜让其所带来的多铁性物质透过 AAO 上的纳米微孔到达衬底, 最后去除 AAO, 便可获得较为有序的纳米点阵列。如果把这种模板法和压印技术相结合, 还可制备出长程有序的纳米点阵列。这在高密度多铁性器件

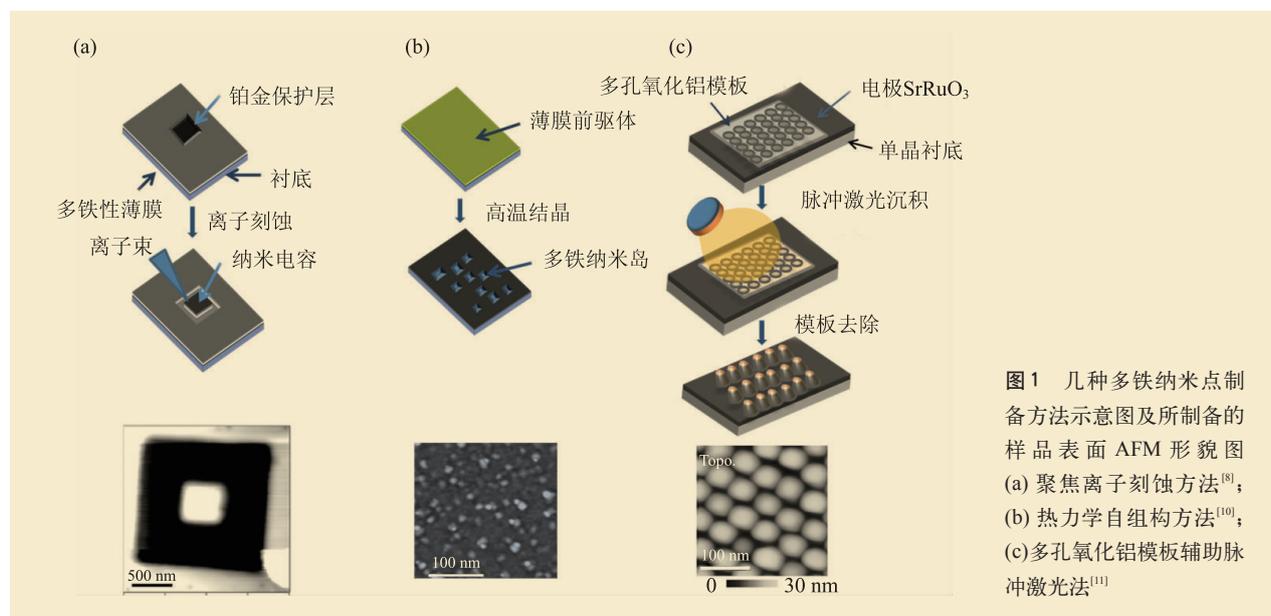


图1 几种多铁纳米点制备方法示意图及所制备的样品表面 AFM 形貌图 (a) 聚焦离子刻蚀方法<sup>[8]</sup>; (b) 热力学自组构方法<sup>[10]</sup>; (c) 多孔氧化铝模板辅助脉冲激光法<sup>[11]</sup>

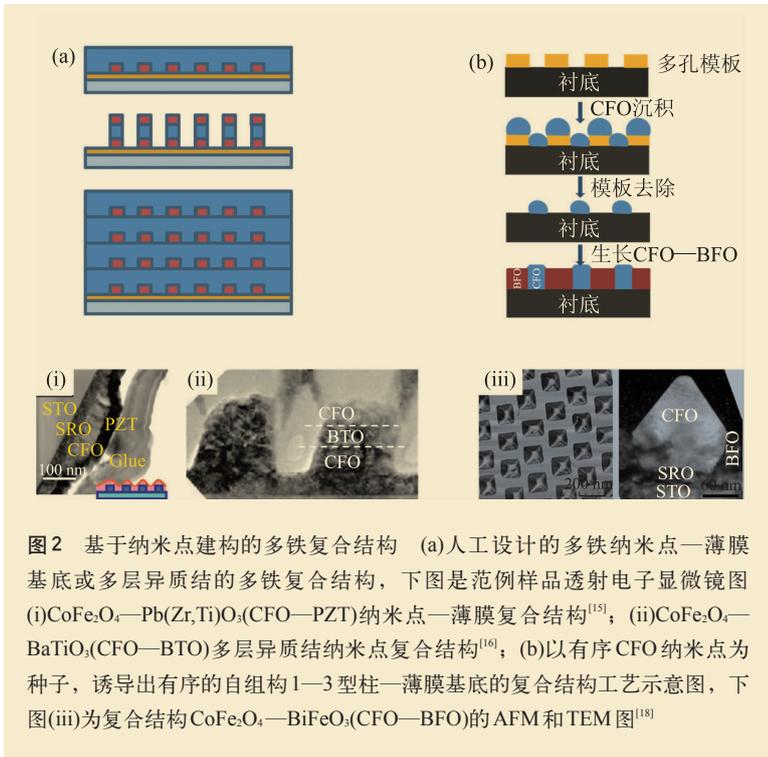


图2 基于纳米点建构的多铁复合结构 (a)人工设计的多铁纳米点—薄膜基底或多层异质结的多铁复合结构, 下图是范例样品透射电子显微镜图 (i)CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>—Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>(CFO—PZT)纳米点—薄膜复合结构<sup>[15]</sup>; (ii)CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>—BaTiO<sub>3</sub>(CFO—BTO)多层异质结纳米点复合结构<sup>[16]</sup>; (b)以有序CFO纳米点为种子, 诱导出有序的自组构1—3型柱—薄膜基底的复合结构示意图, 下图(iii)为复合结构CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>—BiFeO<sub>3</sub>(CFO—BFO)的AFM和TEM图<sup>[18]</sup>

研制中有一定应用价值。此外, 还有蘸水笔直写技术(dip-pen nanolithography)和原子力探针辅助直写方法等。然而该方法跟FIB一样, 较适用于单点制备而不适用于大规模集成<sup>[12, 13]</sup>。人们还在探索新的方法, 如模板-离子刻法/光刻法与离子刻蚀相容的方法等<sup>[14]</sup>, 希望能开发出可大面积制备有序度好的和高品质的纳米点阵列的制备技术。

在上述纳米点阵列制备技术的基础上, 还可以设计出纳米点复合多铁性材料, 实现室温下的多铁性。如我们用AAO模板法和脉冲激光镀膜成功地制备了铁电—铁磁Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub>—CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(PZT—CFO)纳米点—薄膜复合构造, 以及多层铁电—铁磁BaTiO<sub>3</sub>—CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(BTO—CFO)纳米点复合构造(图2(a))<sup>[15, 16]</sup>。此类方法便于制备出成分和结构分布可控的纳米结构, 适合于人工材料的设计。此外, 还可用自组构技术制作复合多铁结构, 如铁电/铁磁的纳米柱—薄膜构造的结构(著名的1—3型结构)<sup>[17]</sup>, 但通常纳米柱分布较为无序。最近Alexe和Comes等人分别以AAO模板和电子刻蚀法制备出的有序CFO纳米点阵列为种

子, 诱导出有序的CFO纳米柱复合多铁结构(见图2(b))<sup>[18, 19]</sup>, 并获得良好性能。这说明自组构技术在多铁复合材料器件的研制中也有一定应用前景。

### 3 微纳尺度表征及物理特性

纳米多铁性材料研究的另一关键性难点是纳米尺度磁电性能表征。过去很长时间, 纳米尺度的多铁性蒙着一层神秘的面纱。近年来, 借助于扫描探针等精巧的微区探测手段, 我们得以窥探纳米尺度多铁性的芳容。目前日趋成熟的扫描探针技术, 其核心思想是利用原子力扫描探针作为可移动的微小电极或微探针, 来实现微区物理性能测量(图3(a))。

多功能扫描探针显微镜带有压电力显微镜(PFM)、磁力显微镜(MFM)、导电显微镜(CAFM)等功能模块, 可在扫描微区表面形貌的同时, 探测其压电畴、磁畴和电导分布等特征。还可把探针固定在某个纳米点, 测试该点的压电力回线和电导曲线等。为了获得磁电耦合特征, 还可在施加外磁场(外电场)的同时, 探测电畴(磁畴)的变化。如在CFO/PZT的同轴电缆结构的纳米线中(图3(c)), 用压电显微镜观察到压电畴被外磁场所改变<sup>[20]</sup>。最近Geng等人利用交流电场的激励, 用磁力显微镜模式成功测量出磁电畴, 为更为广泛的磁电探测开辟一条道路(图3(b), (d))<sup>[21]</sup>。除此之外, 还可用磁光科尔效应(MOKE)、光电子显微镜(PEEM)、透射电镜(TEM), 及霍尔效应等方法更精确探测微区磁性能<sup>[22—25]</sup>。

运用以上这些精巧技术, 可以揭示出多铁纳米点各种新奇特性。Hong等人用AAO模板辅助激光沉积法制备了有序BFO纳米点阵列, 观察到纳米点上的压电畴<sup>[11]</sup>, 同时用CAFM发现它具有很好的阻变特征, 为建构高密度非破坏性的随机存储打下基础(见图4)。最近, 张金星和Ramesh

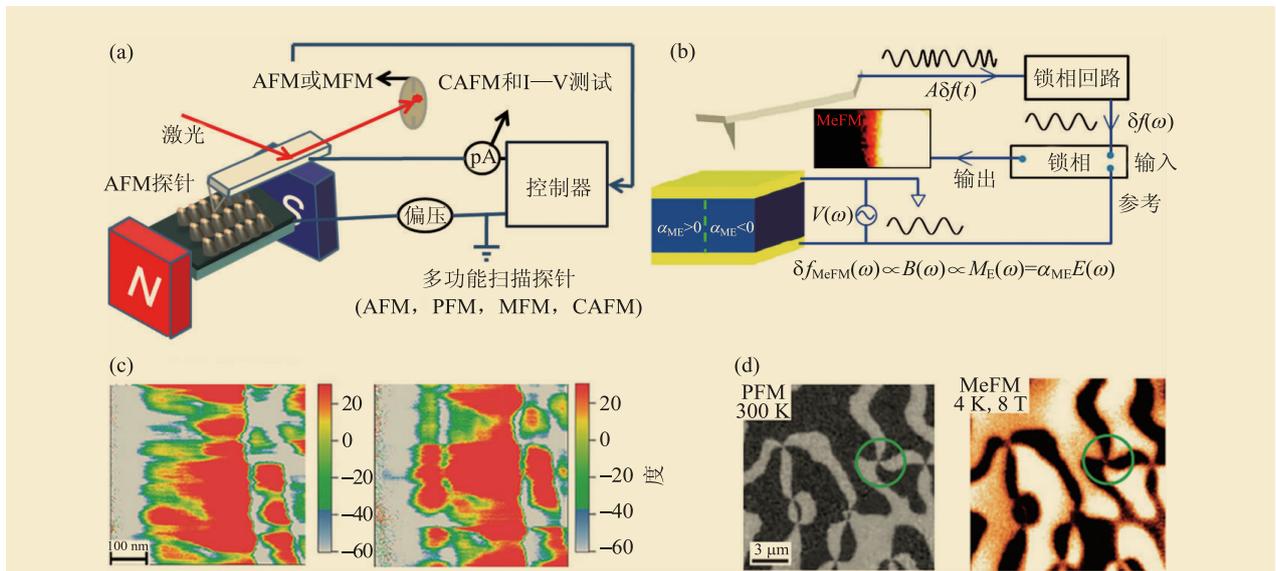


图3 多功能扫描探针示意图及所测的微区物理性能像 (a)多功能原子力显微镜原理图,包括原子力显微镜(AFM)、压电显微镜(PFM)、磁力显微镜(MFM)、导电显微镜(CAFM);(b)可扫描磁电畴的磁电力显微镜(MeFM)示意图,其原理是测量在交流电场激发下的磁力显微镜图;(c)CFO/PZT多铁同轴电缆结构的压电相图在施加2000 Oe磁场前后的变化<sup>[20]</sup>;(d)单相多铁单晶六方相的ErMnO<sub>3</sub>拓扑结构压电畴及其所对应的磁电畴<sup>[21]</sup>

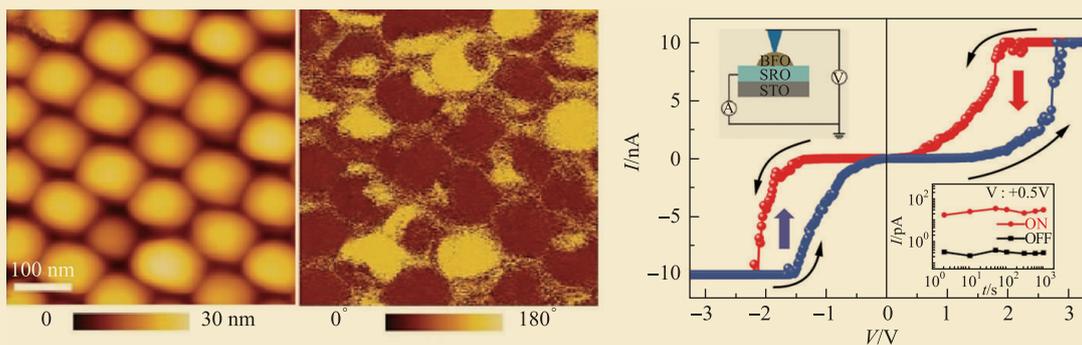


图4 多孔氧化铝模板法制备的BFO纳米点阵列 (a)表面形貌;(b)压电相位响应微区图;(c)导电显微镜的定点 $I-V$ 关系测试结果,从中可反映出阻变特性(引自文献[11])

等人把铝酸镧(LAO)衬底上的BFO薄膜用FIB刻成纳米岛后,发现所受到的衬底对BFO的挟持应力得以释放<sup>[22]</sup>,使压电特性能显著提高(图5)。在纳米点中,电场还可诱导BFO发生菱面体—四方相的转变,导致较大形变。此外,分立的BFO纳米岛还可有效减少周边电畴的挟持作用,使由施加电场驱动的铁弹性反转更稳定,不像在薄膜中的纳米畴那样容易被弛豫到非铁弹性状态<sup>[26]</sup>。因为铁弹性和非铁弹性两种铁电状态分别对应不同的反铁磁畴,这使电场调控铁弹畴或反磁畴变得更高效,从而为进一步进行稳定的磁电耦合调控奠定基础。

关于纳米多铁材料的磁电耦合现象,更多是在复合多铁材料中观察到,而其中界面耦合起着重要作用。如在自组构铁磁纳米柱—铁电薄膜基底(如CFO—BTO或CFO—BFO)体系中,利用扫描探针的针尖在微区施加电场,可导致部分磁柱的磁化方向改变<sup>[27]</sup>。这主要是靠界面应力应变传递来实现的,表明纳米结构中界面作用相当大。但是这种纳米畴的反转是无规和不可控的。而较为可控的磁畴变化则可通过界面传递的反铁磁—铁磁交换偏置耦合实现。朱英豪和Ramesh等人在具有反铁磁铁电性的BFO薄膜上生长出磁性CoFe纳米点(见图6),然后通过电场导致的极化

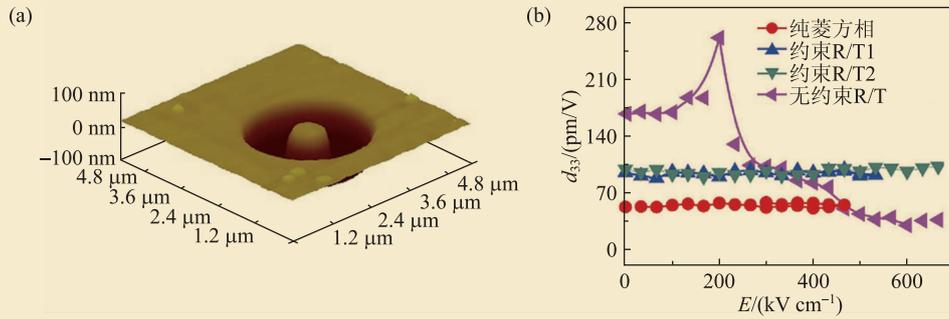


图5 聚焦离子刻蚀法制备的在 LaSrMnO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub> 衬底上的 BFO 纳米点, 因纳米点受衬底的挟持应力随着直径的减小而减小, 带来显著的压电增强效应 (a) AFM 表面形貌; (b) 压电性随电压的变化曲线跟挟持应力关系, 应力释放使其压电性显著提升(其中无约束 R/T: 是 1 μm 直径下挟持应力完全释放状态的四方/菱方混合态; 约束 R/T1 和约束 R/T2: 是更大直径的纳米点, 即挟持应力部分保持状态的四方/菱方混合态; 纯菱方相: 在薄膜状态挟持应力最大状态下的菱方相, 其压电性最弱) (引自文献[22])

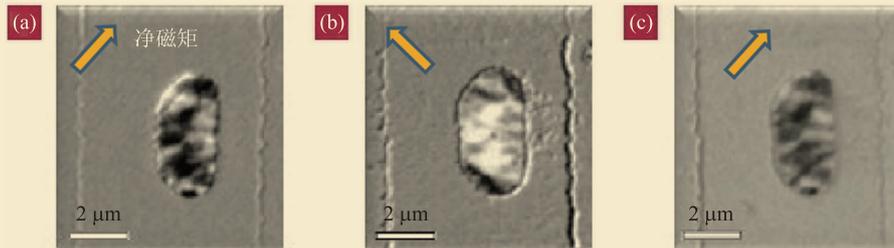


图6 电场对 BFO 表面 Co<sub>0.9</sub>Fe<sub>0.1</sub> 磁性纳米点微磁畴的调控, 所得到的 X 射线磁圆二色谱—光电子显微镜(XMCD—PEEM)微磁畴像 (a) 初始状态; (b) 加电场后; (c) 施加反向电场回到初始态。因为 BFO 为铁电反铁磁体, 其反铁磁畴受电场的影响, 进而可通过反铁磁—铁磁的交换偏置场影响其表面纳米点的铁磁态(引自文献[23])

改变来影响 BFO 的反铁磁畴, 进而通过界面交换偏置场传递到 CoFe 纳米点, 成功地改变了纳米点的磁畴态(见图 6)<sup>[23]</sup>。这种变化较为可控。如果用一种磁畴态存储一种数据, 那么两种不同的微磁畴可代表“0”或“1”两种数据。利用霍尔效应或磁电阻等方法读出这些磁畴态, 可建构电写磁读器件。

当前, 电控磁性是多铁性研究的走向多铁存储等应用的关键。而在薄膜和异质结构中, 这种调控作用较弱, 且难以驾驭。如果用纳米磁体, 则由于纳米微畴结构容易受形状和材质的影响, 使我们可以剪裁设计不同的纳米畴, 实现更加可控的磁畴变化。此外, 由于尺寸效应, 纳米点还可增强电控磁性的能力或提高相变温度。如在一些场效应结构的稀磁半导体异质结中, 通过电荷注入, 产生内禀的轨道—自旋耦合, 可实现电控磁性, 但通常工作温度较低<sup>[25]</sup>。最近发现, 利用

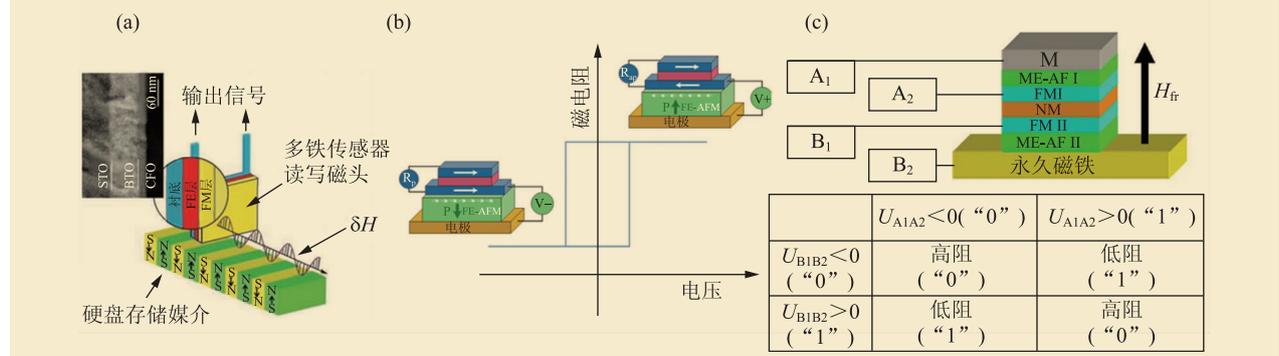
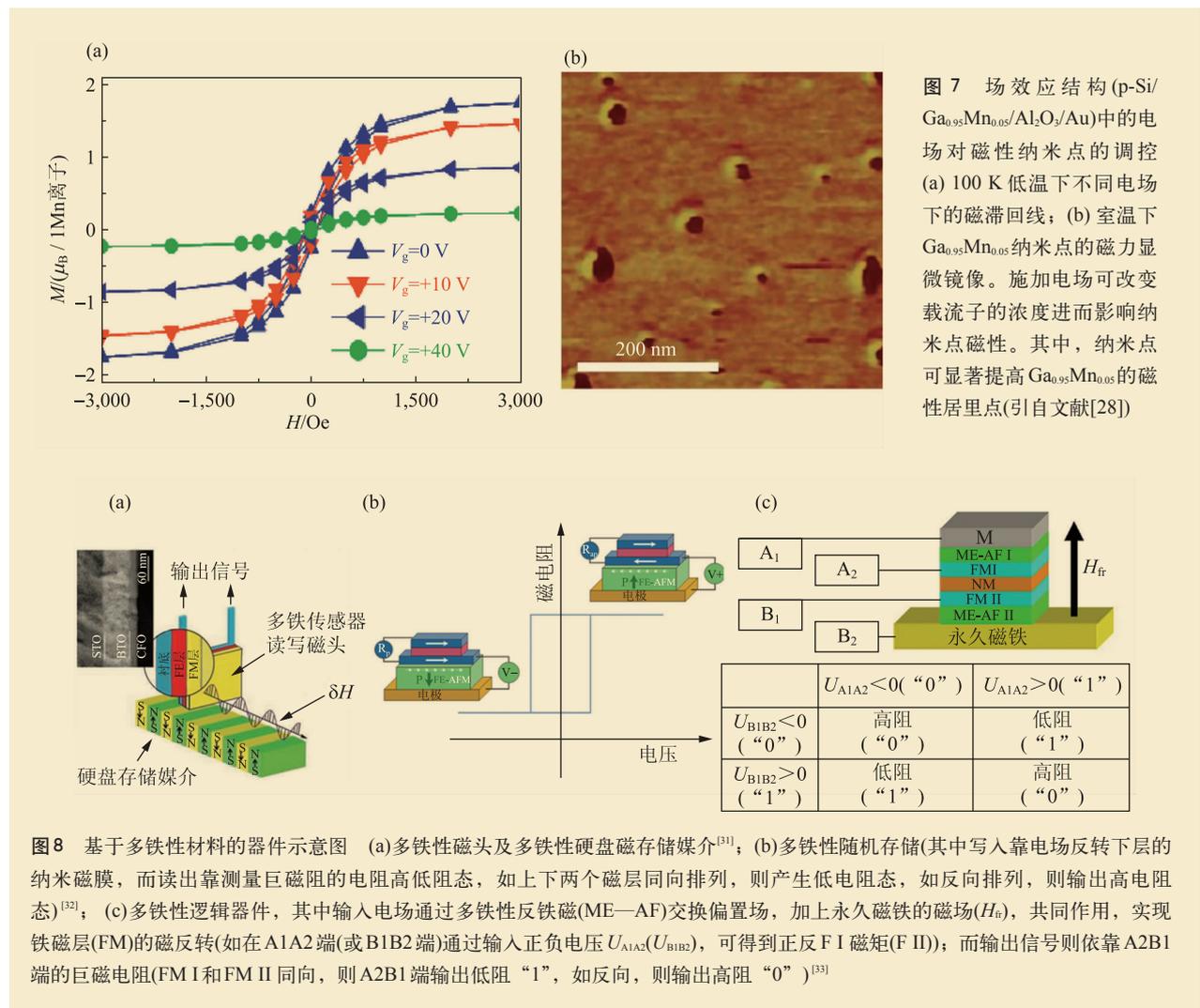
纳米点结构的稀磁半导体 Mn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>, 可有效提高工作温度, 使其磁性相变温度提高到室温以上, 并在 100 K 时便可观察到明显的电场对磁性的调控(见图 7)<sup>[28]</sup>。通常在电控磁性中, 电场虽可破坏空间反演对称, 但却很难破坏时间反演对称, 从而导致磁反转, 更多情况下是影响磁各向异性。而纳米磁畴对各向异性较为敏感, 使我们可通过对微磁畴结构进行剪裁<sup>[29, 30]</sup>, 进而达到电场调控的最大化。

#### 4 多铁纳米器件及展望

多铁性材料的应用, 一方面是因为其本身的磁有序或电有序, 可以不依靠耦合特性而单独作为存储器件或其他电学器件, 如 BFO 优异的铁电性使其在铁电存储或压电传感器方面有重要应用价值。另一方面, 磁电耦合带来新的应用, 如纳

米磁感应器、低能耗的逻辑电路、高密度电写磁读随机存储或硬盘等，这些分别在段纯刚和南策文的综述文章中有系统介绍<sup>[3, 4]</sup>。由于目前器件高度集成化，单元器件尺度已可小到几十纳米，纳米特性及纳米制备手段显得非常重要。而多铁性纳米点的尺寸效应和界面效应带来的新现象也是建构多铁性器件的重要考虑。在器件化应用中，由于磁场对电压的影响(正磁电效应)，我们可以制备纳米级的磁场传感器，如新型的磁头等(见图8(a))。可以通过微雕技术做成几十纳米的磁头，实现对高密度磁性数据(如硬盘数据)的读写<sup>[3, 31]</sup>。而利用电场对磁性的调控，可以设计多铁性随机存储，或实现电场辅助反转的硬盘材料技术(见图8(b))<sup>[4, 32]</sup>。此外，还可做成可存储的逻辑器件，能在进行逻辑运算的同时，实现存储功能，这将

使其掉电后还能保持所存储信息，大大减低运算能耗(见图8(c))<sup>[33]</sup>。其中最受关注的是随机存储应用，如做成纵横电极架构(见图9(a))，每个节点都带有一个由多铁性材料做成的存储单元，这样通过对纵横两个电极地址的选取，可以随机快速访问这个节点。而每个节点上的器件，我们可以用电写磁读纳米结构，或者用电写电读的结构，这 will 比现有的磁读磁写的器件(如MRAM)有更高的存储密度和更低的能耗。此外，在这类用作存储或处理的微器件中，还可以引入光的作用，如构建磁电光多铁性器件。最近，Guo和王峻岭等人在BFO薄膜中发现其具有光伏效应，且所产生的光伏电压或光电流与其电极化直接相关<sup>[34]</sup>。这样，利用光照产生不同的光电压或光电流，便可读出所写的不同极化方向的数据，可用于构建电写光读



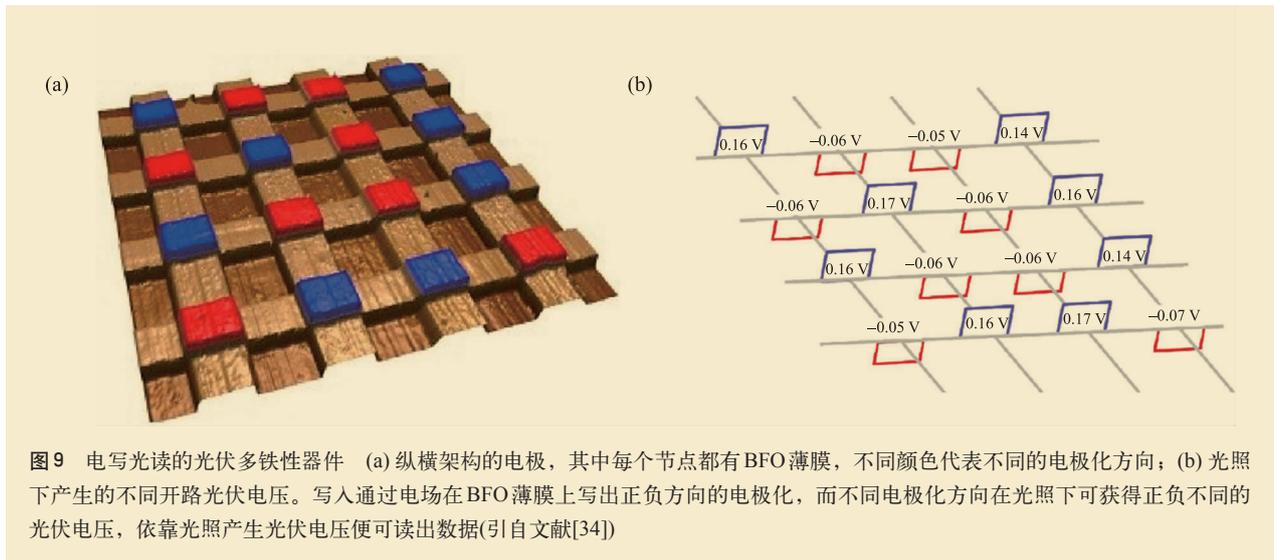


图9 电写光读的光伏多铁性器件 (a)纵横架构的电极,其中每个节点都有BFO薄膜,不同颜色代表不同的电极化方向;(b)光照下产生的不同开路光伏电压。写入通过电场在BFO薄膜上写出正负方向的电极化,而不同电极化方向在光照下可获得正负不同的光伏电压,依靠光照产生光伏电压便可读出数据(引自文献[34])

的存储器(见图9)。朱英豪等在复合结构的纳米柱—薄膜复合体系中,也发现了利用光照可驱动部分纳米柱磁极化反转<sup>[35]</sup>。这说明光不仅可用于读出,也可写入。光可以跟电—磁协同作用,有希望带来光—电—磁复合性能及更广泛的应用。此外,纳米多铁还可用于制作其他新型器件,如可电场调制的微波滤波器等<sup>[36]</sup>,这里就不一一介绍。

随着多铁性器件逐渐走向小型化和高度集成化,多铁性纳米结构会引起越来越多的关注。目前,纳米多铁性器件的研究还在起步阶段,存在诸多机遇和挑战。在以下几个方面尚待进一步探索:(1)新纳米制备工艺的探索,这是制备和设计纳米多铁性材料和器件的基础。目前我们制备手段可达到100 nm级别,还需探索更小尺寸的高质

量纳米点制备工艺;(2)纳米多铁性材料和器件探测新手段的发明,如在扫描探针系统中,可集成电、磁、光、拉曼、变温度,霍尔效应等赋予其真正多功能化,实现更准确多维度综合测试;(3)新物理的挖掘,如通过对纳米磁畴结构的剪裁实现更好的电场调控,光电—磁光对纳米电磁畴协同作用等;(4)新器件的设计,随着更多性能的挖掘,新器件设想也将涌现。如建构磁电光耦合器件,以实现数据光存储和读写,及电磁光一体化的信息传递和存储等。

致谢 感谢田国同学在作图上的帮助和有益讨论。

## 参考文献

- [1] Wang K F, Liu J M, Ren Z F. *Adv. Phys.*, 2009, 58:321
- [2] 刘俊明, 南策文. *物理*, 2014, 43:88
- [3] 段纯刚. *物理学进展*, 2009, 3:215
- [4] Ma J, Hu J, Li Z *et al.* *Adv. Mater.*, 2011, 23:1062
- [5] Huang F Z, Wang Z J, Lu X M *et al.* *Scientific Reports*, 2013, 3:2907
- [6] Gao F, Chen X Y, Yin K B *et al.* *Adv. Mater.*, 2007, 19:2889
- [7] Han H, Kim Y, Alexe M *et al.* *Adv. Mater.*, 2011, 23:4599
- [8] Morelli A, Johann F, Schammelt N *et al.* *Nanotechnology*, 2011, 22:265303
- [9] Zhu X H. *Recent Pat. on Nanotechnol.*, 2009, 3:42
- [10] Miao Q, Zeng M, Zhang Z *et al.* *Appl. Phys. Lett.* (in press)
- [11] Hong S, Choi T, Jeon J H *et al.* *Adv. Mater.*, 2013, 25(16): 2339
- [12] Sun T, Pan Z X, Dravid V P *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89: 163117
- [13] Son J Y, Song H. *Ceramics International*, 2014, 40:199
- [14] Morelli A, Johann F, Schammelt N *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2013, 113:154101
- [15] Gao X S, Rodriguez B J, Liu L *et al.* *ACS Nano*, 2010, 4:1099
- [16] Lu X L, Kim Y, Goetze S *et al.* *Nano Lett.*, 2011, 11:3202
- [17] Zheng H, Wang J, Lofland S E *et al.* *Science*, 2004, 303:661

- [18] Stratulat S M, Lu X, Morelli A *et al.* Nano Lett., 2013, 13: 3884
- [19] Comes R, Liu H X, Khokhlov M *et al.* Nano Lett., 2012, 12: 2367
- [20] Xie S H, Ma F, Liu Y *et al.* Nanoscale, 2011, 3:3152
- [21] Geng Y N, Das H, Aleksander L *et al.* Nature Mater., 2014, 13:163
- [22] Zhang J, Ke X, Gou G *et al.* Nat. Commun., 2013, 4:2768
- [23] Chu Y H, Matin L W, Holcomb M B *et al.* Nat. Mater., 2008, 7:478
- [24] Huang Z, Stolichnov I, Bernand-Mantel A *et al.* Appl. Phys. Lett., 2013, 103:222902
- [25] Ohno H, Chiba D, Matsukura F *et al.* Nature, 2000, 408:944
- [26] Baek S H, Jang H W, Folkman C M *et al.* Nat. Mater., 2010, 9:309
- [27] Zavaliche F, Zheng H, Mohaddes-Ardabili L *et al.* Nano Lett., 2005, 5 (9):1793
- [28] Xiu F, Wang Y, Kim J *et al.* Nat. Mater., 2010, 9:337
- [29] Gao X S, Liu L, Birajdar B *et al.* Adv. Funct. Mater., 2009, 19:3450
- [30] Buzzi M, Chopdekar R V *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 027204
- [31] Zhang Y, Li Z, Deng C Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2008, 92: 152510
- [32] Bibes M, Barthélémy A. Nat. Mater., 2008, 7:425
- [33] Chen X, Hochstrat A, Borisov P *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 89:202508
- [34] Guo R, You L, Zhou Y *et al.* Nat. Commun., 2013, 4:1990
- [35] Liu H J, Chen L Y, He Q *et al.* ACS Nano, 2012, 6:6952
- [36] Liu M, Obi, Lou J *et al.* Adv. Funct. Mater., 2009, 19:1826

#### 读者和编者

## 订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》  
——<物理>四十年集萃

2012年《物理》创刊40周年，为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅两年（2014—2015年）《物理》杂志的订户，将免费获得《岁月留痕—<物理>四十年集萃》一本（该书收录了从1972年到2012年在《物理》各个栏目发表的四十篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏）。

欢迎各位读者订阅《物理》（银行汇款请注明“《物理》编辑部”）  
（编辑部直接订阅优惠价180元/年）

咨询电话：(010)82649266；82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

#### 订阅方式

##### (1) 邮局汇款

地址：  
100190，北京603信箱  
《物理》编辑部收

##### (2) 银行汇款

开户行：  
农行北京科院南路支行  
户名：  
中国科学院物理研究所  
帐号：  
11250101040005699



## 《物理》有奖征集封面素材

均有稿酬及全年《物理》杂志相送。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649470；82649029

期待您的参与！

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。封面素材要求图片清晰，色泽饱满，具有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。被选用的封面素材提供者，

《物理》编辑部