

## D02.多铁性材料

分会主席：董帅、殷月伟、马静、张金星、刘俊明

### D02-01

#### 六角铁氧体多铁性材料新体系探索

陈湘明, 刘娟, 孙土来, 刘小强, 田鹤, 高庭庭

浙江大学

与六角稀土锰酸盐类似, 六角稀土铁氧体  $h\text{-RFeO}_3$  的铁电性起源于其结构基元- $\text{FeO}_5$  双金字塔的畸变, 而这种畸变必然导致 Fe-O-Fe 超交换作用的变化, 最终导致本征的电控磁性。同时, 稀土铁氧体的磁转变温度一般高于稀土锰酸盐, 因而有望成为诱人的室温多铁性新体系。然而, 稀土铁氧体的室温稳定结构为正交钙钛矿结构,  $h\text{-RFeO}_3$  通常为亚稳定相。本工作通过 In 部分置换  $\text{LuFeO}_3$  中的 Lu、引入化学压, 从而在宽成分范围内获得了稳定的  $h\text{-Lu}_{1-x}\text{In}_x\text{FeO}_3$  固溶体陶瓷。自  $x=0.4$  起可获得六角单相结构,  $x=0.4\sim 0.6$  的范围内为  $P63\text{cm}$  结构,  $x=0.75$  时转变为  $P6_3/\text{mmc}$  结构。随着 In 置换量增加, 从  $P6_3/\text{mmc}$  到  $P63\text{cm}$  的相变点  $T_C$  从  $>1000\text{K}$  单调降低至室温以下。虽因其电导率过高, 未能测得饱和的电滞回线。根据 X 射线衍射数据可计算离子偏离中心对称结构的位移, 从而计算出  $(\text{Lu}_{1-x}\text{In}_x)\text{FeO}_3$  对应于  $x=0.4, 0.5$  与  $0.6$  的自发极化值: 1.98, 2.94 与  $1.93\text{mC}/\text{cm}^2$ 。通过球差校正电子显微镜直接观察到了其铁电离子位移与“幸运花瓣”铁电畴结构。该材料为反铁磁体, 表现出明显的室温弱铁磁性, 而随着温度进一步下降会转变成铁磁体。室温铁电与弱铁磁性的确定, 显示出  $h\text{-}(\text{Lu}_{1-x}\text{In}_x)\text{FeO}_3$  作为室温多铁性材料新体系的巨大潜力。

### D02-02

#### Stacking Fault in Polar Magnet $\text{Zn}_2\text{FeNbO}_6$

李满荣<sup>1</sup>, 韩艺丰<sup>1</sup>, 吴枚霞<sup>1</sup>, David Walker<sup>2</sup>, Martha Greenblatt<sup>3</sup>

1.中山大学化学学院

2.Lamont Doherty Earth Observatory, Columbia University, 61 Route 9W, PO Box 1000 Palisades, New York 10964 United States

3.Department of Chemistry and Chemical Biology, Rutgers, the State University of New Jersey, 610 Taylor Road, Piscataway, New Jersey 08854, United States

The coexistence of spontaneous polarization ( $P_S$ ) and magnetic ordering in polar magnet makes it promising for multiferroic and magnetoelectric applications in spintronics. A good example is the  $\text{LiNbO}_3$ -type  $\text{Zn}_2\text{FeTaO}_6$ , which demonstrates  $P_S$  of  $\sim 51 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  and antiferromagnetic ordering below  $\sim 25\text{K}$ . A weak switchable component is also observed around  $2\text{K}$ . Here we present the study on the parent polar magnet  $\text{Zn}_2\text{FeNbO}_6$ . Attempts to make  $\text{Zn}_2\text{FeNbO}_6$  at similar high-pressure condition were successful but original crystal structure analysis was frustrated. Although synchrotron X-ray diffraction techniques clearly indicate isostructural  $\text{LiNbO}_3$ -type symmetry of  $\text{Zn}_2\text{FeNbO}_6$ , routine Rietveld refinements never converge to an acceptable fitting. Detailed electron diffraction and crystallographic simulation revealed stacking fault in the honeycomb layers in  $ab$ -plane, which well explained the diffraction data using updated structural model. Given the similar ionic size and electron configuration between  $\text{Nb}^{5+}$  and  $\text{Ta}^{5+}$ , the reason that the stacking fault is absent in  $\text{Zn}_2\text{FeTaO}_6$  but appears in  $\text{Zn}_2\text{FeNbO}_6$  is unclear and thus needs further investigation.

### D02-03

#### $\text{DyCrO}_4$ 高压相大线性磁电耦合效应及场诱导的铁磁铁电

龙有文

中国科学院物理研究所

$\text{DyCrO}_4$  是一种罕见的具有  $\text{Cr}^{5+}$  电荷态的化合物, 常压下结晶为锆石型晶体结构 (空间群  $\text{I4}_1/\text{amd}$ )。该相对外加压力非常敏感, 高压下会发生一级不可逆结构相变, 转变成白钨矿型晶体结构 (空间群  $\text{I4}_1/\text{a}$ )。经过一定压力与温度处理, 我们得到了白钨矿型  $\text{DyCrO}_4$  高压相, 并通过不同温度与磁场下磁化率、磁化强度、比热、介电常数、热释电、中子衍射等系列测试, 详细研究了材料的磁电性能。白钨矿型  $\text{DyCrO}_4$  具有共线非极化反铁磁基态, 在  $\pm 3\text{T}$  磁场范围内, 展示了线性磁电耦合与逆磁电耦合效应, 并且线性磁电耦合系数高达  $50\text{ps}/\text{m}$ 。较高的磁场 ( $> 3\text{T}$ ) 可诱导磁结构相变, 使原有共线性反铁磁发生倾斜, 一方面导致强的铁磁净磁矩 ( $7\mu_B/\text{f.u.}$ ), 另一方面新的磁结构可打破空间反演对称性, 从而诱导电极化。因此,  $\text{DyCrO}_4$  是一个少有的兼具大线性磁电效应以及铁磁-铁电耦合的多功能材料体系。

## D02-04

### 几种激发态电荷输运有机体的多铁性研究

袁国亮

南京理工大学

多铁材料是指同时具备两种或者两种以上铁性特征,并且其间具备一定的耦合的材料。经典意义上的多铁效应是指铁电、铁磁/反铁磁、铁弹性和铁涡性之间的作用关系。目前来说,多铁材料可以大致分为无机多铁和有机多铁两类,随着人们对多铁性的深入了解,越来越多不同类型的有机多铁材料被合成出来。激发态电荷输运有机体的电荷输运网络是由一个提供电子的分子(给体 donor, D)和一个接受电子的分子(受体 acceptor, A)有序排列后构成的。 $D^+A^-$ 长程有序排列,其激发态(激子)具有较长寿命和 $\pm 1/2$ 自旋,这是产生室温铁电性和铁磁性的根本原因。激发态容易受外场刺激,因此光照、磁场、电场、应力等能够很好地调控这类材料的铁电极化、磁矩和相应的磁电耦合系数。激发态电荷输运有机体不仅大大丰富了室温多铁材料体系,而且可以为开发新型多功能电子器件提供材料基础和技术储备。

## D02-05

### 多铁异质结构磁性和电输运的电场调控

赵永刚

清华大学

近年来,铁磁/铁电多铁异质结构由于其优异的磁电耦合效应及电场对磁性显著的调控而成为多铁研究领域的重要方向,相关研究不仅有助于认识铁磁、铁电体系间的耦合,而且对多铁材料的应用具有重要的意义。我们通过磁控溅射方法在铁电衬底  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.7}Ti_{0.3}O_3$  上生长了高质量的磁性薄膜、具有交换偏置的体系及磁隧道结,并系统研究了电场对其磁性和电输运的调控规律及相关机制,这些研究丰富了对铁磁/铁电多铁异质结构的磁电耦合及调控的认识,揭示了铁磁/铁电多铁异质结构的应用潜力。

## D02-06

### Magnetoelectric nanocomposite for soft technology

朱英豪

台湾交通大学

The proliferation of flexible and stretchable electronics has led to substantial advancements in principles, material combinations, and technologies. The integration of magnetoelectric systems in the soft electronics is inevitable by the virtue of their extensive applications. Recently, two dimensional (2D) layered materials have emerged as potential candidates due to their excellent flexibility and atomic scale thickness scalability in addition to their interesting physics. This paper presents a new perspective on development of magnetoelectric nanocomposites through materials engineering on a pliant mica with excellent mechanical, thermal and chemical stabilities. The unique features of 2D muscovite mica and the power of van der Waals epitaxy are expected to contribute significantly to the emerging transparent soft technology research applications.

## D02-07

### BiFeO<sub>3</sub>/LSMO 异质结中电磁耦合的界面调控

易迪<sup>1,3</sup>, 于浦<sup>2,3</sup>, Ramamoorthy Ramesh<sup>3</sup>

1. 斯坦福大学应用物理系

2. 清华大学物理系

3. 加州大学伯克利分校材料系

通过电场来调控磁性为降低存储和逻辑器件的耗能提供了有效可行的途径。在多铁性材料 BiFeO<sub>3</sub> (BFO)和铁磁氧化物 La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> (LSMO)组成的氧化物异质结中,通过电场来调控磁化强度和交换偏置(exchange bias)耦合已经得到了证实。进一步优化电磁耦合性能的目标主要集中在两个方面:如何提高交换偏置耦合的强度以及如何提高阻断温度(blocking temperature)。在 BFO/LSMO 异质结中,电场对磁性的调控通过 BFO 和 LSMO 的界面来实现。修改界面的原子结构为优化电耦合性能提供了有效的途径。受益于氧化物外延制备技术的发展,我们利用激光分子束外延成功制备了具有不同界面原子结构的 BFO/LSMO 异质结。在这两种异质结中,通过翻转 BFO 的铁电极化,我们均实现了电场对磁化强度和交换

偏置的可逆调控。更有趣的是，两种具有不同界面原子结构的异质结表现出了不同的调控性能，包括交换偏置强度和阻断温度。通过研究界面原子结构和电控磁特性的关系，我们提出了可能的物理机制。在 BFO/LSMO 异质结中，电磁耦合主要通过调控界面电子浓度来实现。电子浓度不仅被 BFO 的铁电极化所调控，同时也被界面原子结构的极化不连续性（polar discontinuity）所影响。两者共同作用导致了新颖的调控特性。我们的研究表明在氧化物异质结中，精确设计界面原子结构对提高电磁耦合性能具有十分重要的意义，也为进一步优化性能提供了新的思路。

## D02-08

### 铁电隧穿互补阻变开关的制备与性能研究

温峥

青岛大学

Crossbar 无源阵列采用两终端型阻变器件作为存储节点，具有结构简单、集成度高、功耗低、读/写速度快等优点，作为一种超高密度存储集成方式而备受业界关注。然而，数据访问时，串扰电流（Sneak Current）会从字线和位线上非选址的处于低阻态（LRS）的存储单元流过，并叠加在选址单元的读出信号上，这减小了“0”、“1”二进制存储态的读出窗口，严重时甚至导致数据访问失败。2010 年，Linn 等提出互补阻变开关（Complementary Resistive Switch, CRS）来抑制串扰电流（*Nat. Mater.* 2010, 9, 403-406）。CRS 器件由两个导电细丝型阻变单元反串联构成，利用两个单元互补的“低阻态+高阻态（HRS）”和“高阻态+低阻态”存储状态来代表“0”和“1”。Crossbar 阵列的存储节点不论处于哪种状态均具有接近 HRS 态的电阻值，从而成功抑制了串扰电流。然而，导电细丝型阻变结构 HRS 态的电流-电压曲线一般表现出对称的输运特性，这使得采用低于阻态切换阈值电压的非破坏性读出方式不能够区分互补的“LRS+HRS”和“HRS+LRS”。因此，CRS 结构不得不采用高于阻变阈值的读出电压，通过翻转存储单元的阻态来区分互补存储状态，从而实现数据读出。这种破坏性读出限制了 CRS 结构的广泛应用和发展。

注意到金属/超薄铁电体/半导体（MFS）铁电隧道结不仅具有高的电阻开关比，并且界面的 Schottky 势垒使其 HRS 态表现出显著的非对称整流特性（*Nat. Commun.* 2017, 8, 15217）。因此，我们提出反串联两个 MFS 型 Pt/BaTiO<sub>3</sub>/Nb:SrTiO<sub>3</sub> 隧道结来实现具有非破坏性读出的新型互补阻变开关器件（*ACS Appl. Mater. Interfaces* 2018, 10, 6024-6030）。MFS 型 CRS 器件的“LRS+HRS”和“HRS+LRS”互补存储态的电流-电压曲线表现出相反的整流方向，其整流比可达  $10^3$ ，采用远小于阻变阈值的读电压即可非破坏性读出数据。并且，互补存储态均具有高电阻值，在  $2 \times 2$  的 CRS 阵列中观测到对串扰电流高达  $\sim 10^2$  倍的抑制比例，这使无源 Crossbar 存储集成度提高了两个数量级。并且，本工作提出的 CRS 结构能够方便的扩展到其他具有整流特性的阻型存储器件中。

## D02-09

### 多层 MoS<sub>2</sub> 金字塔的铁磁性研究

张璋

华南师范大学华南先进光电子研究院

由于二维材料独特的结构与物理性质，二维材料在最近几年吸引了大量的研究和关注。MoS<sub>2</sub> 作为一种直接带隙的无机二维半导体，其结构稳定，带隙可调，其光电，催化等性质得到了大量的研究，但关于其磁性的研究却相对较少。近来，有理论研究表明 MoS<sub>2</sub> 有本征铁磁性，但由于其磁性很弱，不容易测量，因此很少有实验数据支持。在本工作中，我们通过化学气相沉积制备了拥有大量 zigzag 边界的层状 MoS<sub>2</sub> 金字塔结构，这种 MoS<sub>2</sub> 金字塔结构表现出很强的铁磁性。磁性测量表明相比于单层 MoS<sub>2</sub> 片，MoS<sub>2</sub> 金字塔即使在室温下也表现出明显的铁磁性。我们通过 TEM, VSM, MFM 等测量和表征手段证实 MoS<sub>2</sub> 金字塔的铁磁性主要来自于其层状金字塔结构中的大量 zigzag 边界。此外，我们利用 MFM 首次在 MoS<sub>2</sub> 金字塔中观测到了清晰的剩磁磁矩翻转图像。这个工作为 MoS<sub>2</sub> 的 zigzag 边界铁磁性提供了合理的证据，也为 MoS<sub>2</sub> 在磁性自旋器件的应用方面提供了一定的实验依据。

## D02-10

### 磁性复杂氧化物界面的多铁性质

郭杭闻

复旦大学

多铁性材料一直是凝聚态物理领域一个极为重要的分支并且拥有着巨大的应用前景。随着材料合成以及表征技术的发展，

如何实现物质界面的新多铁量子态已经成为了多铁材料领域的一个重要发展方向。其中，磁性复杂氧化物在该领域具有非常重要的地位。其独特的多自由度共存及耦合为实现多铁量子材料提供了丰富的可能。在本次报告中，我将介绍如何利用复杂氧化物界面来实现全新的多铁量子态。我们利用脉冲激光外延 (Pulsed Laser Deposition) 制备了高质量的超晶格以及多层薄膜。利用扫描透射电子显微镜(scanning transmission electron microscopy)独特的原子分辨能力，我们能够在原子尺度观测界面的结构变化和电子性质。结合物性表征以及理论计算，我们发现了由界面引导的多铁性质的共存以及耦合。在铁磁氧化物 LaSrMnO<sub>3</sub>/铁电氧化物 BaTiO<sub>3</sub> 超晶格薄膜中，利用维度调控以及界面耦合，我们在非极化结构的 LaSrMnO<sub>3</sub> 中实现了极化性与铁磁性的共存；在铁磁氧化物 SrRuO<sub>3</sub>/铁电氧化物 BaTiO<sub>3</sub> 的多层膜结构中，我们利用界面耦合首次在实验上实现了铁磁，金属，结构极化态的三种独特物性共存及耦合，为界面多铁材料的多自由度调控提供了新的机遇和方向。在此报告的最后，我将为如何实现多铁材料的低维尺度调控提供一些新的思路和建议。

## D02-11

### Unique Properties of 2D Ferroelectric CuInP<sub>2</sub>S<sub>6</sub>

王峻岭

新加坡南洋理工大学

Ferroelectricity in perovskite oxides, such as PbTiO<sub>3</sub> and BiFeO<sub>3</sub>, has been studied extensively. However, epitaxial growth of high-quality oxide films requires the careful selection of substrates and high temperature. In addition, dangling bonds and defects drastically deteriorate the electronic coupling between ferroelectric and graphene-like 2D materials. The groundbreaking work on graphene has triggered an intense search for other 2D materials with intriguing physical properties. However, ferroelectricity has been scarcely explored in 2D materials. I will discuss our recent study on a 2D ferroelectric that can be cleaved into single/multiple layers, CuInP<sub>2</sub>S<sub>6</sub>. It has a T<sub>c</sub> of ~320 K. Switchable polarization is observed in thin CuInP<sub>2</sub>S<sub>6</sub> of ~4 nm, while piezoelectricity is demonstrated in flakes only two layers thick. Unique behaviors associated with the reduced dimensionality, such as negative piezoelectric response, will be discussed. More importantly, CuInP<sub>2</sub>S<sub>6</sub> can serve as the parent compound, from which we can produce other 2D materials with unique functional properties, even multiferroicity

## D02-12

### 氢键铁电/多铁体系研究

吴梦昊<sup>1</sup>, 陆成亮<sup>1</sup>, 傅华华<sup>1</sup>, 董帅<sup>2</sup>, 刘俊明<sup>3</sup>

1. 华中科技大学

2. 东南大学

3. 南京大学

氢键具有饱和性和方向性，使得氢键体系可能因此产生铁电性质。我们将在报告中介绍本组近几年来关于氢键铁电/多铁体系的一系列第一性原理设计，包括羟化二维材料，功能化有机纳米线，碳氮有机物，羟基氧化物等。它们都具有可观的极化和高于室温的居里温度，有些还同时具有磁性和多铁耦合。其中一些金属羟基氧化物和氧化物之间的可逆转化已被实验证实，其良好的晶格匹配使外延生长成为可能。由金属羟基氧化物和一些常见的金属氧化物(例如 TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> 和 CrO<sub>2</sub>)组成的异质结可以构造各种功能器件，如铁电场效应晶体管和铁电隧道结。

## D02-13

### 电流驱动下的反铁磁磁矩翻转：从类场扭矩到抗阻尼扭矩

宋成<sup>1</sup>, 陈贤哲<sup>1</sup>, R. Zarzuela<sup>2</sup>, 张佳<sup>3</sup>, Y. Tserkovnyak<sup>2</sup>, 潘峰<sup>1</sup>

1. 清华大学

2. UCLA

3. 华中科技大学

信息技术的进步要求存储器件朝高密度、低功耗和高速度方向发展。反铁磁材料相比铁磁，由于其没有铁磁残余场、对磁场扰动不敏感和本征频率高等诸多优势，在高密度存储领域有广阔的应用前景。实现反铁磁磁矩的有效操控和电学探测成为实现反铁磁磁存储技术信息写入与读出的关键。发现重金属中产生的自旋流可以驱动相邻的具有双轴各项异性的反铁磁磁矩翻转。利用 NiO 薄膜在 SrTiO<sub>3</sub> 基片上生长时引入压应力，制备了具有面内双易轴的反铁磁 NiO 薄膜。通过 Pt/NiO 体系的自旋轨道转矩效应实现 NiO 反铁磁磁矩在面内双易轴之间翻转，发现 Pt/NiO 界面的自旋霍尔磁电阻效应可以指示磁矩翻转

的过程和状态。揭示了抗阻尼扭矩是 NiO 磁矩翻转至平行于电流方向的核心要素。突破了电流翻转反铁磁局限在极个别具有亚晶格反转对称性破缺的反铁磁体系 (CuMnAs 和 Mn<sub>2</sub>Au) 的瓶颈, 将电流翻转反铁磁磁矩拓展到具有面内双轴各向异性的反铁磁体系, 大大拓宽了电控反铁磁器件的材料选择范围。

#### D02-14

##### 多铁性异质结构的自旋输运行为

苗君, 姜勇, 孟康康, 吴勇, 徐晓光, 陈吉堃

北京科技大学

多铁性与自旋电子学的交叉学科研究, 衍生出众多新异的物理效应 (自旋、电荷与轨道)。我们构建了线性磁电 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/重金属异质结, 首次发现 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/W 体系的自旋霍尔磁电阻效应 (SMR), 有利于外电场对界面 SMR 的调控; 观察到 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ta 体系 SMR 在 250K 附近出现变号, 可能来源于 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体态与表面态的不同磁有序。研究 Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>/MgO/(La,Sr)MnO<sub>3</sub> 异质结巨磁电耦合效应, 发现铁电场作用界面 Mn-Ti 键, 来源于层间载流子而非应力或界面轨道重构。<sup>[3]</sup> 研究 BiFeO<sub>3</sub>/Co<sub>2</sub>FeAl<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub> 异质结的磁矩与交换偏置场, 发现高应力 T 相 BiFeO<sub>3</sub> 增强 C 型反铁磁有序形成周期振荡; 研究 Mn<sub>1.5</sub>Ga/Ta 和 Mn<sub>1.5</sub>Ga/Pt 体系的反常霍尔磁电阻(AHE)效应, 利用标度率区分 Mn<sub>1.5</sub>Ga/Cu 异质结的贡献来源。通过应力非易失性调制 BiFeO<sub>3</sub>/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> 的层间交换偏置; 构筑多铁(Ba,La)FeO<sub>3</sub>/介电(Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> 异质结, 有效抑制异质结的氧空位; 研究了双钙钛矿 BiFeMnO<sub>3</sub> 薄膜的磁电双弛豫特征, 及(Ba,Sr)(Zr,Ti)O<sub>3</sub>:Co 多铁薄膜的电导规律。

#### D02-15

##### 多铁性异质结 FePt/PMN-PT 奇异霍尔效应的电场调控

杨远俊<sup>1</sup>, 姚迎学<sup>1</sup>, 罗震林<sup>2</sup>, 高琛<sup>2</sup>, 李晓光<sup>2</sup>, 肖钢<sup>3</sup>, 罗林保<sup>1</sup>

1.合肥工业大学

2.中国科学技术大学

3.布朗大学

选择优异性能的室温铁磁相和铁电相可以设计强磁电耦合效应的室温复合多铁性异质结。该报告的研究工作选择具有强奇异霍尔效应且室温铁磁性的 Fe<sub>0.4</sub>Pt<sub>0.6</sub> (FePt) 和高压电活性的铁电体 Pb(Mg<sub>2/3</sub>Nb<sub>1/3</sub>)<sub>0.67</sub>Ti<sub>0.33</sub>O<sub>3</sub> (PMN-PT) 构成多铁性异质结, 我们利用脉冲式电场序列极化铁电相 PMN-PT, 同时测量 FePt 薄膜的霍尔电阻率, 发现在该模式电场下, 霍尔电阻率—电场曲线形状是迴线型的, 与常规的蝴蝶型应变—电场曲线不同, 同时, 霍尔电阻率在电场作用下变化了 23.9%, 进一步, 我们用幅度为±5.5 kV/cm 组成的周期性脉冲电场序列极化铁电相 PMN-PT, 发现霍尔电阻率随电场同步变化, 这些研究结果表明: 奇异霍尔效应受到电场的非挥发性调控, 而且霍尔电阻率在脉冲电场下可重复的、非挥发性的翻转, 因而, 霍尔效应的高低电阻态可以用来信息存储。该异质结的应变和磁性测量结果表明: PMN-PT 在脉冲电场作用下产生的剩余应变传递到 FePt 薄膜中, 通过逆磁致伸缩效应改变了磁性状态, 进而实现了 FePt 薄膜霍尔效应的电场调控。该研究提出的电控磁性方案简单且磁电耦合效应显著, 对设计和开发出新型高密度、低功耗、快速和非挥发性磁电存储器件有重要意义。

关键字: 奇异霍尔效应; 电场调控磁性; 非挥发性; 应变; 多铁性异质结

#### D02-16

##### 双激励机制磁电能量回收应用

董蜀湘, 储昭强, 高翔宇, 吴金根

北京大学

自主无线传感器网络 (WSN: wireless-sensor networks) 是目前实现物联网技术 (IoT: Internet of Things) 一个关键环节。其中在一些特殊环境下成功部署无线传感器网络的基础则是解决能源供应—自供电问题。为了替代传统的电池或省去电力布线, 回收环境中废弃的能源, 比如太阳能、风能、工业废热、磁场能以及振动能量, 被认为是长效节能, 绿色环保的未来技术与发展方向。相比于传统的单一模式的能量回收器件, 发展多激励机制的能量回收 (Multi-stimulus EH) 可以有效增加能量回收器的能量来源和增加功率密度, 从而做到真正自供能、自驱动。本文中, 我们总结和介绍了近十年来振动-磁场双激励机制的磁电能量回收方面的研究进展, 包括磁电能量回收方面的关键能源材料, 振动与磁场双模式能量回收器件的力-磁-电耦合理论、双机理研究思路和设计方法, 以及主要应用等。最后我们将进一步讨论双机理乃至多机理环境能量回收方面的未来发展方向和建议。

## D02-17

### 基于磁电复合和压电电子学耦合的磁调控晶体管

翟俊宜

中科院北京纳米能源与系统研究所

在室温下实现磁场对半导体运输的调制对当前微电子学的发展具有重要意义。半导体自旋电子学作为一个连接磁学和半导体特性的桥梁，在过去几年一直是科研人员的研究热点。然而自旋基的电子器件往往需要极端条件，如低温或强磁场，这严重限制了它在常规条件下的应用。实际上单相材料中很难实现磁场和半导体的有效耦合，一种变通的解决方式就是设计复合材料器件。基于此想法，我们将磁致伸缩材料（Terfenol-D）、铁电材料（PMNPT）和二维半导体材料（单层 MoS<sub>2</sub>）等材料层层堆垛复合，开发出了新颖的多场耦合的磁致压电势晶体管。其中磁致伸缩材料 Terfenol-D 在磁场作用下产生拉伸应变，该应变可以界面应力转移传递给 PMNPT。PMNPT 属于压电材料，受到外加应力或者应变时其表面的极化电荷数量会发生变化。单层 MoS<sub>2</sub> 是二维半导体材料，原子层薄的厚度使其内部载流子浓度容易受到外部静电栅压或电荷的调控。所以 PMNPT 表面极化电荷数量的改变会相应地调制 MoS<sub>2</sub> 内部载流子浓度，进而影响 MoS<sub>2</sub> 载流子输运。考虑到 PMNPT 的两种不同极化方式，实验结果表明，PMNPT 上极化时，当外部磁场从 0 逐渐增加到 33 mT 时，MoS<sub>2</sub> 晶体管的输出电流从 9.56 逐渐减小到 2.9  $\mu\text{A}$ ，呈现单调递减趋势；而 PMNPT 下极化时，当外部磁场从 0 逐渐增加到 42 mT 时，MoS<sub>2</sub> 晶体管的输出电流从 1.41 逐渐增加到 4.93  $\mu\text{A}$ ，呈现出单调递增趋势。两种相反的变化趋势表明复合材料器件中 MoS<sub>2</sub> 输出电流的变化是由磁场感应的压电势造成的。该磁致压电势晶体管耦合了磁性、压电性和半导体特性。通过设计复合材料器件，我们实现了室温下磁场对半导体内载流子输运的有效调制。

## D02-18

### 磁电复合材料在磁场传感、信息记录及微波通讯方面的应用

王志广<sup>1</sup>，刘明<sup>1</sup>，孙年祥<sup>2</sup>，Dwight Viehland<sup>3</sup>

1. 西安交通大学

2. 美国东北大学

3. 弗吉尼亚理工

多铁性材料由于电有序及磁有序的相互调控，展示了巨大的应用前景。由于室温单相多铁性材料很难同时展现出强的铁磁性及铁电性，我们的研究集中于铁磁性与铁电性分相存在的复合磁电材料。铁磁材料磁性主要来源于电子自旋，由于铁磁畴结构的存在展现出磁致伸缩、磁电阻等效应。铁电/压电材料中由于电荷非中心对称结构，展现出自发极化及铁电畴，并且伴随着应力与积累电荷的相互转化。我们研究了磁电耦合效应的三个应用方向：磁场传感器，磁信息记录，及可调射频微波器件。叠层磁电复合材料中，磁场变化引起材料的形变及杨氏模量的变化。形变能传递到压电材料中可以实现积累电荷的变化，从而产生电信号的输出，实现了磁信号的电信号检出。杨氏模量的变化可以改变压电谐振片的谐振频率及导纳。从而实现磁场信号经由力学信号到电信号的检出。有效的磁电耦合效应实现了 pT 级别低频磁信号的探测。纳米复合磁电材料中，通过应力传递的电场对磁翻转的调控，可以避免大电流的产生，从而实现低功耗、高集成度的磁信息记录。最后，磁电复合材料可以实现电场对铁磁相微波特性的调节。电场可调微波滤波器、移相器、环形器、以及磁电天线都已经实现。新的调节机制有望极大的减小器件尺寸及功耗，为下一代微波通讯设备的研究提供了新的思路。

## D02-19

### 基于磁电耦合效应的基本电路元件和非易失性存储器

尚大山，申见昕，孙阳

中国科学院物理研究所

信息技术的高速发展需要开发高性能存储器与之相适应，而寻找材料中新的物理状态作为信息存储媒介是开发新型存储器件的物理基础。具有磁电耦合效应的多铁性材料为信息存储提供了更多的自由度，其磁电耦合系数作为磁电耦合材料中的重要参量，体现了材料磁化和电极化的综合性能，具备非易失存储的物理状态特征。本文介绍了一种基于磁电耦合效应的基本电路元件——忆耦器的提出，以及以磁电耦合系数为存储状态的非易失性存储器件的工作原理。忆耦器的多态非易失性存储不仅可以使忆耦器实现逻辑运算功能，而且可以模拟神经突触的可塑性。利用忆耦器的这些特点，可以将存储和计算在同一忆耦器中实现，有望开发具有非冯·诺依曼结构的神经形态计算系统。这些研究结果，进一步证明了忆耦器理论模型的正确性，为忆耦器在真实电路中的应用提供了可能，同时，也从基本电路元件的角度重新看待研究已久的磁电耦合效应，为磁电耦合效应的应用开辟了新的途径。

## D02-20

### 利用 Pt/YIG 界面的临近磁效应实现电场调控 YIG 磁性能的研究

周子尧, 刘明

西安交通大学

钇铁石榴石 (YIG) 作为目前最热门的自旋电子学研究材料之一, 吸引着越来越多人的目光。众多研究者们都希望能实现利用电场对这种材料的磁性能实现调控。但是, 由于 YIG 本身只有微弱的磁致伸缩系数, 并且晶体结构复杂, 很难和压电衬底形成良好的外延关系, 所以目前还没有基于多铁结构的 YIG 磁性能乃至与磁性能相关的众多性能的大电场调控工作的报道。另外, 电场可调微波材料的研究的一个迫切的需求是在保证大的电场调控量的同时还能获得窄的工作线宽, YIG 作为理想的微波材料之一, 所以迫切的需要找到一种新的方法来实现其磁性能的电场调控。

临近磁效应 (MPE) 是一种广泛的存在于 YIG 和重金属如 Pt, Ta, W 之间的相互耦合效应, 其独特的现象引起了研究者们广泛的关注。Sun 等人发现 YIG 和 Pt 间的 MPE 效应可以在临近二者界面处的 Pt 原子中引起局域的原子磁化现象, 并且能引起 YIG 铁磁共振位置的变化, 即可以理解为 MPE 可以对 YIG 的磁性能产生影响。而离子液体调控物质的物理性能, 尽管目前其原理众说纷纭, 但不能否认其较大的调节能力。特别是有报道, 离子液体通过外加电压, 可以在 Pt 薄膜中引起局域的磁化现象, 但是这些研究通常都是在极低温度下进行。所以, 在室温下的 YIG/Pt 界面能否对外加的电场产生响应成为一个很有趣的问题, 但是据我们所知, 目前还没有人对这方面进行过报道。

基于以上出发, 我们首先成功构建了 YIG/Pt/离子液体异质结构, 采用电子顺磁共振波谱仪 (ESR) 和震动样品磁强计探究了外加电场对这种异质结磁性能的影响。实验发现, 通过仅仅外加 4.5 V 的电场, 我们就在室温下的 YIG 中获得了 123 Oe 的调控量, 并且在 -115 °C 调控量达到了 690 Oe。模拟结果表明, 外加电场对于调控 Pt 的费米面, 以及 Pt<sup>5+</sup>中未配对的 d 轨道电子的存在共同导致了实验中获得的大的调控量。我们对 YIG 乃至自旋电子学器件研究电场调控工作提供了一个新的思路。

## D02-21

### 多铁自旋阀中的电场调控自旋极化

殷月伟

中国科学技术大学

多铁自旋阀通过不同的器件结构设计引入铁磁和铁电序, 实现了一个自旋电子学器件 (磁自旋阀) 和铁电功能的有机结合。因此, 人们可以利用多铁自旋阀中 “铁磁/铁电” 界面处可观的磁电耦合效应, 实现 (铁) 电对磁矩和自旋状态的有效调控。通过在 0.7Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-0.3PbTiO<sub>3</sub> (PMN-PT) 单晶衬底上制备具有不同 Cu 中间层厚度的 Co/Cu/Ni 自旋阀, 我们发现在具有合适的界面耦合特性的自旋阀中, 调控 PMN-PT 的面内铁电极化可以转动 Co 自由层的磁矩而保持 Ni 钉扎层的磁矩不动。我们认为这个效应源自不同铁电极化状态所带来的不同应力状态对 Co 和 Ni 磁各向异性的调控。利用应力诱导的电控磁致电阻 (MR) 效应变化, 我们还可以通过 MR 效应的测试对电控磁矩转动进行电读取。而基于对应力状态 (铁电畴翻转过程) 的连续调控, 我们能够获得具有不同 MR 效应的各种非易失应力中间状态, 从而实现连续的电控磁性。另外, 我们还在使用 C<sub>5</sub>H<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (croconic acid) 有机铁电体为中间层, La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> 和 Co 铁磁金属为电极层的多铁自旋阀中观测到了电场对自旋极化的调控。我们发现, 不但 MR 效应的大小, 甚至 MR 效应的符号都可以被铁电极化所翻转。这可能与铁电调控的能带结构或界面 Co 的氧化还原反应等有关。

## D02-22

### 室温多铁性异质结 BaTiO<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的制备及其电控磁畴翻转

钟高阔<sup>1,2</sup>, 安峰<sup>2</sup>, 谢淑红<sup>2</sup>, 朱英豪<sup>3</sup>, 李江宇<sup>1,4</sup>

1. 中国科学院深圳先进技术研究院

2. 湘潭大学

3. 台湾国立交通大学

4. 美国华盛顿大学

复合多铁性材料的电场调控磁化耦合不仅蕴含着丰富的物理内涵, 也在高密度微型低功耗存储器等器件中有极大的应用前景。现阶段多铁性复合异质结中的电控磁耦合现象大都通过力传递或界面磁电耦合机制实现, 这些机制通常是利用电场控制磁化强度而不是控制磁化取向, 基于离子运动耦合机制有望实现对材料成分和结构的调控, 进实现磁化取向的调控。在此,

我们利用模板法辅助的脉冲激光沉积制备了具有  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  圆柱体阵列的  $\text{BaTiO}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$  多铁异质结。结构和形貌分析结果显示  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{BaTiO}_3$  分别沿[100]和[001]择优取向生长，且两相之间具有清晰的界面。宏观和微观磁性测试确认了  $\text{BaTiO}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$  异质结的室温磁性，也证明  $\text{BaTiO}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$  异质结中  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的磁畴可以被外加磁场翻转。利用  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  圆柱体做顶电极测试了  $\text{BaTiO}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$  异质结的宏观和微观铁电翻转性能，实验结果不仅证明了  $\text{BaTiO}_3$  薄膜良好的铁电性能，也证明利用模板法制备的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  可以在电性能测试中用做顶电极。基于原子力显微镜技术，结合 PFM 模块和 MFM 模块对  $\text{BaTiO}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$  异质结的电场翻转磁畴现象进行了系统研究，结果证明电写入可以实现对  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁畴的控制，我们认为这种磁畴的控制是基于  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  中氧空位离子运动来实现的，且这种控制基于  $\text{BaTiO}_3$  的极化翻转。结合电写入和施加外磁场，成功实现了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁畴的四种状态存储原型，具有稳定性、可逆性、非易失性和可重复性等优点。

## D02-23

### 室温多铁性异质结 CTO/SFO 的铁电性和磁电耦合

高庭庭，陈湘明

浙江大学

$\text{SmFeO}_3$  (SFO)作为一种非常具有研究前景的单相多铁性材料，块体中具有倾角自旋诱导的铁电性以及薄膜中被发现具有低温多铁性。本文通过在 SFO 薄膜上沉积一层低电导率的先兆性铁电体  $\text{CaTiO}_3$  (CTO) 电荷阻挡层来提高异质结的耐击穿电场，改善了薄膜的铁电性及相关的物理性能。通过脉冲激光沉积 (PLD) 生长了高度 c 取向的外延异质薄膜，并对其介电、铁电、磁性进行了系统的研究。CTO 电荷阻挡层显著降低了异质结的电导率，获得了较强的室温铁电性。通过 PFM 研究了薄膜的铁电畴结构，观测到了具有  $180^\circ$  畴壁的纳米尺度铁电畴。在铁电相变居里温度(TC)以及自旋重取向温度(TSR)附近发生了介电异常，表明薄膜具有强的磁介电耦合。并获得了较大的室温线性磁电耦合系数，表明该异质结可以实现室温多铁性。

## D02-24

### 多铁性纳米结构的电磁性能研究

黄凤珍，徐行煜，吕笑梅，朱劲松

南京大学物理学院

随着尺寸的减小，材料的宏观性能及微观畴结构会发生很大的变化，即尺寸效应。在器件小型化和多功能化的要求下，多铁性材料的尺寸效应引起了研究工作者的普遍关注。本工作主要关注了  $\text{BiFeO}_3$  和  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  纳米结构中的特殊尺寸效应。一方面，制备并详细研究了  $\text{BiFeO}_3$  纳米颗粒的尺寸效应，发现小尺寸  $\text{BiFeO}_3$  纳米颗粒表现天然的核壳结构和有趣的磁交换偏置现象。通过对比研究，认为颗粒表面自旋结构以及他们之间的相互作用对核壳结构的界面耦合效应有重要影响，并进一步导致了交换偏置效应随温度和颗粒尺寸的有趣变化。另一方面，制备并研究了片状和棒状纳米结构的  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  材料的电磁性能。与块体陶瓷相比，纳米结构中的结构畸变引起了磁晶各向异性的增强，使材料在保持饱和和磁化强度不变的情况下，显著提高其矫顽场。同时，结构畸变引起了三角双锥和八面体磁亚晶格中的  $\text{Fe}^{3+}$  离子相对于中心位置的较大偏移，产生局域偶极子，施加磁场时 Fe 离子的自旋重新取向影响局域偶极子间的相互作用进而产生了磁介电效应， $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  纳米棒的室温磁介电耦合系数可达-13%。

## D02-25

### 层状磁电复合薄膜材料中的晶格应变效应和界面电荷效应

郑仁奎<sup>1,2</sup>，晏建民<sup>1</sup>，徐萌<sup>1</sup>，徐志学<sup>1</sup>

1.中国科学院上海硅酸盐研究所

2.南昌大学

在层状磁电复合材料中，功能薄膜/铁电单晶异质结因其制备简单、结构设计和材料选择灵活以及电场调控方便和有效，最近十余年吸引了越来越多的研究人员的兴趣。其中以具有优异铁电和压电性能的 $(1-x)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$  (PMN-PT) 单晶作为衬底，构建功能薄膜/PMN-PT 异质结已成为国内外多铁性复合薄膜材料研究领域的重要方向之一。迄今为止，研究人员已构建了锰氧化物/PMN-PT、铁氧体/PMN-PT、铁磁金属/PMN-PT、稀磁半导体/PMN-PT、发光材料/PMN-PT、二维材料/PMN-PT、多层薄膜/PMN-PT、超导薄膜/PMN-PT 等多种类型的异质结，在理论研究和实验方面都取得了丰富的研究成果。本报告结合本课题组和文献报道的实验结果，对基于 PMN-PT 压电单晶的磁电复合薄膜材料的研究进展进行了简要总结，特别是将该类异质结中基于晶格应变效应和界面电荷效应的两类异质结进行比较，发现载流子浓度的大小对耦合机制有重要影响。

## D02-26

### Complex Strain Evolution of Polar and Magnetic Order and Control of Spin Orientation in Multiferroic BiFeO<sub>3</sub> Thin Films

陈祖煌<sup>1,2</sup>

1. 哈尔滨工业大学深圳校区

2. 加州大学伯克利分校

BiFeO<sub>3</sub>, which exhibits strong coupling between ferroelectric and antiferromagnetic order, has attracted significant attention due to its room-temperature multiferroism and potential for magnetoelectric effects. To achieve such functionality, it is critical to be able to control the antiferromagnetic spin structure in BiFeO<sub>3</sub>. Despite this critical need and sustained interest in this topic, there are few studies on the strain evolution of the antiferromagnetic structure in BiFeO<sub>3</sub> thin films. Here, X-ray linear dichroism and first-principles calculations will reveal that epitaxial strain can be used to continuously tune the antiferromagnetic spin-axis orientation in BiFeO<sub>3</sub> films across a wide angular space and thus control the magnetic anisotropy of an exchange-coupled ferromagnetic layer. We highlight an unexpected deviation of the classical perpendicular relationship between the antiferromagnetic axis and the polarization vector. First-principles calculations suggest that the magnetic anisotropy is tunable with strain by leveraging the interplay between Dzyaloshinsky-Moriya interactions and single-ion-anisotropy.

## D02-27

### 超薄复合磁电薄膜 LSMO/PMNPT 中的应变与电荷调制竞争关系

黄浩亮<sup>1</sup>, 陈泽志<sup>1</sup>, 冯策<sup>2</sup>, 杨远俊<sup>3</sup>, 王建林<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 胡思侠<sup>4</sup>, 翟晓芳<sup>1</sup>, 彭冉冉<sup>1</sup>, 傅正平<sup>1</sup>, 赵永刚<sup>1</sup>, 陆亚林<sup>1</sup>

1. 中国科学技术大学

2. 清华大学

3. 合肥工业大学

4. 南方科技大学

复合多铁性异质结界面上磁电耦合效应的微观机制如电荷调制、应变效应、交换耦合、轨道重构相互纠缠，对磁电耦合的作用可能是增强，也可能是抑制，为有效地调控磁电耦合效应带来了极大的困难。为了有效地增强磁电耦合效应，进而开发新一代量子信息存储器件等多功能器件，需要区分这些界面微观机制，并有针对性地针对不同机制进行调控。人们发现，不同机制在界面上起作用的特征厚度不同，电荷调制和轨道重构通常在几纳米的范围内起作用，而交换耦合作用依赖于界面交换偏置场和磁性层的静磁交换长度，通常在 1-10 nm 范围左右，至于应变则认为始终贯穿整个薄膜，能达毫米量级。因此，通过减小薄膜厚度，可以凸显界面上的效应，有望实现对上述几种机制的辨别。这里，我们在 (001) 取向的 0.7Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-0.3PbTiO<sub>3</sub> (PMNPT) 压电衬底上制备了不同厚度的 La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> (LSMO) 超薄薄膜，通过改变 LSMO 薄膜的厚度，测量其电阻及磁矩随外电场的变化规律，研究 LSMO/PMNPT 界面上应变与电荷调制之间的竞争关系。在厚的 LSMO 薄膜中，电阻 (R-E 曲线) 和磁矩 (M-E 曲线) 随外电场的变化呈现出蝴蝶型曲线，表明应变作用对磁电耦合效应的主导作用。而随着 LSMO 厚度的减小，R-E 曲线和 M-E 曲线不再是蝴蝶型的，表明膜厚更薄时电荷调制效应对磁电耦合的作用将占据主导地位。另外，通过对 M-E 曲线的分解可以看到，应变与电荷调制的作用并不是线性叠加的。而准原位电场下 Mn L 边的 X 射线吸收结果表明，应变主要影响 Mn 3d x<sub>2</sub>-y<sub>2</sub> 轨道上的电子，而电荷调制将主要对 Mn 3d 3z<sub>2</sub>-r<sub>2</sub> 轨道上的电子产生影响。

## D02-28

### 空间电荷效应在 Ba<sub>0.85</sub>Ca<sub>0.15</sub>Zr<sub>0.1</sub>Ti<sub>0.9</sub>O<sub>3</sub>/La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> 异质结介电和磁介电性能中的作用

郭蜀晋, 陈长乐

西北工业大学

用磁控溅射技术在 LaAlO<sub>3</sub> (111) 基片上生长了 Ba<sub>0.85</sub>Ca<sub>0.15</sub>Zr<sub>0.1</sub>Ti<sub>0.9</sub>O<sub>3</sub>/La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> (BCZT/LSMO) 异质结，测试了其随频率、温度以及磁场变化的介电性质。在 120 K 的介电常数温谱图与磁介电变化率温谱图同时观察到异常点，对应于 BCZT 的斜方相 (R) 到正交相 (O) 的相变。Arrhenius 公式得到弛豫过程的激活能为 2 meV。磁介电温度图谱中观察到最大值高达 20%，反应了明显的磁电耦合。介电弛豫现象以及磁介电效应被归因于空间电荷作用，在 BCZT/LSMO 界面形成的空间电荷层是由于 BCZT 与 LSMO 层的晶格错配引起的，在外磁场作用下 LSMO 磁致伸缩将引起的空间电荷重分配，导致介电常数增大。磁介电效应随温度升高减小主要是由于 BCZT 相变引起的晶格错配度变化造成的。

## D02-29

### Ruddlesden-Popper 结构 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 基陶瓷的一级杂化非本征铁电相变

刘小强, 鲁涓涓, 陈湘明

浙江大学材料学院

自发极化是本征铁电体的主序参量,而非本征铁电体中的自发极化不再是主序参量,它一般是由非极性的主序参量诱导而出的,如弹性不稳定等。最近提出的杂化非本征铁电性则是由两个氧八面体的旋转和倾侧耦合(如钙钛矿中的  $a$ - $a$ - $c0$  和  $a0a0c+$ )而诱导出的。杂化非本征铁电体具有内禀的电控磁特性,因而有望在其中获得具有强磁电耦合的多铁性材料。

目前,在  $n=2$  的 Ruddlesden-Popper 结构的  $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$  基以及  $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$  基单晶,陶瓷和薄膜中均测得了室温电滞回线,证明了其铁电性的存在。而其具体的铁电相变行为则仍然是未知的。本工作研究了  $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$  基的铁电相变行文,通过铁电、介电、DSC、拉曼和 TEM 等多种手段确认了其一级杂化非本征铁电特性。

## D02-30

### 铁酸铋陶瓷的铁电与应变性能研究

吴家刚

四川大学

利用传统固相法制备了组分改性的铁酸铋陶瓷材料。烧结温度的优化可以在纯的铁酸铋陶瓷中获得饱和的电滞回线,其剩余极化值  $P_r$  可达  $13\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 。此外,陶瓷中大量的缺陷引起了 P-E 和 S-E 曲线的不对称。但这种不对称性可以通过施加高电场、高频率、高温来逐步减弱。在频率为 1 Hz,测试温度  $100^\circ\text{C}$  的条件下,双轴应变的  $\text{Speak-peak}$  值为 0.1%。为了进一步提高铁酸铋陶瓷的应变性能,我们利用  $\text{Bi}(\text{Mg},\text{Nb})\text{O}_3$  改性 BFO-BTO 陶瓷制备了具有非遍历态特性的弛豫铁电体,并研究了不同温度下的应变性能。结果表明,测试温度的提升可以极大诱导铁酸铋单/双轴应变响应的增强。在测试温度为  $200^\circ\text{C}$ ,测试电场为  $4\text{ kV}/\text{mm}$  时获得了大的应变值( $S=0.32\%$ ,  $d_{33}^*=800\text{ pm}/\text{V}$ )以及较低的应变滞后( $H=5\%$ )。高温下大的应变响应可能来源于热激发畴更容易地翻转,电场诱导弛豫到铁电的相转变以及本征的晶格应变。我们相信同时具有大的应变值和低的应变滞后的无铅铁酸铋材料将有利于高温下的驱动器应用。

## D02-31

### $\text{AgNbO}_3$ 无铅反铁电陶瓷及其储能性能

李敬锋

清华大学

储能材料与器件是近年来功能材料领域的研究热点,其中具有高储能密度和高可靠性的电介质储能材料在高能脉冲功率技术等领域有着几乎不可替代的应用,其中具有双电滞回线特征的反铁电材料因其高储能密度一直备受关注,但过去的研究集中在铅基钙钛矿体系。本课题组长期从事无铅铁电电压电陶瓷研究,在铌酸钾钠无铅钙钛矿体系中取得进展。我们关注到同属于铌酸盐钙钛矿体系的铌酸银( $\text{AgNbO}_3$ )具有反铁电性,近期开展了  $\text{AgNbO}_3$  基无铅陶瓷储能特性研究。我们的最新研究发现 Ta 掺杂可以调控  $\text{AgNbO}_3$  的相变,显著提升介电击穿强度和反铁电性,大幅提高储能密度。本报告将详细介绍  $\text{AgNbO}_3$  基无铅陶瓷的制备技术、掺杂改性与相变调控等方面的研究进展

## D02-32

### Nd 置换 $\text{BiFeO}_3$ 多铁性陶瓷的结构演变以及铁电、磁性能

陈静, 高庭庭, 陈湘明

浙江大学

第一类多铁材料  $\text{BiFeO}_3$  因其高漏导和特殊的空间自旋调制螺旋结构限制了其应用。A 位置换稀土离子有望解决上述问题,并可通过控制结构和磁结构来提高多铁性能。选择离子半径相近的  $\text{Nd}^{3+}$ ,通过标准固相烧结法制备  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{FeO}_3$  ( $0.05 \leq x \leq 0.28$ ) 陶瓷,研究其结构演变、多铁性能变化以及两者之间。综合 XRD 与 DSC 数据,系统建立了  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{FeO}_3$  体系相图。随着 Nd 含量的增加,体系发生了  $\text{R}3\text{c-Pna}21\text{-Pbnm}$  的连续相变,并在特殊成分  $x=0.12-0.14$ 、 $x=0.22-0.24$  处分别形成了  $\text{R}3\text{c/Pna}21$  和  $\text{Pna}21/\text{Pbnm}$  两种类型的 MPB。铁电性能在  $\text{R}3\text{c/Pna}21$  相界达到峰值,这可能与场致相变有关。随着 Nd 含量增加,室温剩余磁化强度先增加后减少,在  $\text{Pna}21/\text{Pbnm}$  相界达到最大值,表明磁结构由反铁磁向弱铁磁的转变。

## D02-33

### Ca<sub>3</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 的铁电与光学性质研究

刘美凤<sup>1</sup>, 王煜<sup>1</sup>, 张杨<sup>2</sup>, 王秀章<sup>1</sup>, 董帅<sup>2</sup>, 刘俊明<sup>13</sup>

1. 湖北师范大学

2. 东南大学

3. 南京大学

理论实验表明, 在层状钙钛矿 A<sub>3</sub>M<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 中会展现出了非常规的铁电性。遗憾的是, 这种铁电性仅局限于非磁性的 Ti 与 Sn 化合物中, 在磁性化合物 Ca<sub>3</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 并有直接观测到铁电回线。本报告系统研究了层状钙钛矿氧化物 Ca<sub>3</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 的结构、铁电、磁电耦合性能以及光学性质。结果表明氧八面体的转动和倾斜会诱发铁电极化和磁电耦合效应。在实验上指出了 Ca<sub>3</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 在温度 240K 附近发生了顺电到铁电转变, 并且对其低温的铁电性与磁电耦合进行了研究。与此同时, 还具有良好的光学性质。

## D02-34

### 功能氧化物的离子调控

于浦

清华大学物理系

如何实现功能材料的高效能人工设计和调控是当前材料科学发展的核心问题之一。引力和掺杂的引入, 通过调制材料内部的电荷、自旋、轨道以及晶格自由度之间的耦合关联作用, 有效的改变了材料的功能属性, 从而衍生出一系列丰富多彩的量子物性, 如: 高温超导, 庞磁阻, 多铁以及压电效应等。而值得指出的是这些调控手段通常需要高温、高压、高真空等大型设备的辅助, 而同时材料相图上的每一个化学组分均需要一个单独的样品而实现; 从而使得对于材料尤其是一些对于应力和化学掺杂十分敏感的材料体系的研究变得十分困难。而与此同时随着科技的发展, 人们对于各种具有新奇量子物性的材料的需求越来越多, 从而促使我们去寻找更为有效更为便捷的材料调控方式。本报告将首先介绍通过电场调控双离子迁移而诱导材料电、磁、光等多功能新效应的研究思路。通过电场控制离子的嵌入和析出实现了材料的多态相变。实验上通过控制电压的正负实现了对于材料中正负离子氢离子和氧离子的双离子调控, 并进而设计和实现了一系列新型功能特性和器件应用, 如磁电耦合现象, 金属绝缘体相变以及超导增强等。我们还可以进一步将该思路拓展, 利用具有很好氧离子迁移率的材料 (SrCoO<sub>2.5</sub>) 如与金属磁性材料 (Co) 形成异质外延, 通过我们首次通过利用电压控制氧离子在 SrCoO<sub>2.5</sub> 内部的快速迁徙, 对于界面处的 Co-O 间的 p-d 杂化进行调控, 从而实现了氧离子型栅极对金属钴磁性的快速调制。该磁电耦合效应还伴随着非易失性的双极性电阻转变效应, 意味着可以在该简单模型单元上实现同时具有阻变存储和磁电耦合效应的多功能器件。我们期望离子调控的引入能够更大的丰富功能材料的调控手段, 从而涌现出一系列新型物性和功能特性。

## D02-35

### Ionic liquid gel gating control of magnetism for flexible spintronics

刘明

西安交通大学

One of the central challenges in realizing magnetoelectric (ME) devices lies in finding a deterministic way to modulate magnetism in integrated circuits with a circuit-operation voltage. Ionic liquid (IL) gating on magnetic thin films with abundant electronic, chemical and magnetic interactions at the interface has become an emerging technology for controlling magnetism in a fast, compact and energy-efficient way. Compared with conventional strain effect dominated piezo/ferroelectric layer multiferroics, IL gating method has advantages like small gating voltage ( $V_g < 5$  V), easy-to-integration and compatibility with varied substrates such as Si, flexible substrates etc. In additional, unlike the oxide structures require a high temperature to overcome the oxidation energy barrier, the IL gel gating control process can be operated at room temperature, suitable for applications in room temperature environment. Here, we will summarize our recent progresses of IL gating control of magnetism in varied magnetic heterostructures.

## D02-36

### 铁谷性的多种起源和相关奇特物性

段纯刚

华东师范大学极化材料与器件教育部重点实验室

近年来以研究固体布洛赫电子的谷自由度为核心的谷电子学正在蓬勃发展。要将谷作为量子自由度加以应用的关键在于打破谷间的简并性，即实现谷的极化。类似于自发电荷极化（铁电性）和自发自旋极化（铁磁性），谷极化也存在自发极化，对应的铁性可被称为铁谷性（ferrovalley），具备铁谷性的材料就是铁谷体。在 TMDC 体系中，单层的 2H 相  $\text{VSe}_2$  就是一类新型的铁谷体，理论预测其铁谷性能够在室温下得以保持。它的铁谷性源自于自旋轨道耦合效应以及内禀交换作用的并存，这使得这类铁谷体中蕴含着一系列新奇的物理现象，如圆偏振光旋性依赖的光学带隙、反常谷霍尔效应等，并可以依此为基础构造电读磁写，甚至电读电写非易失性信息记录器件。随着对谷极化性质研究的深入，谷极化被发现是一个很普遍的现象。在低维正交晶系二维铁电单层  $\text{GeSe}$  中，铁电性的引入打破了谷间的四重反演对称性，从而产生自发谷极化，诱导出铁谷态。传统观点中，谷自由度被视为一种赝自旋。而在这类体系中，谷中所对应的贝利曲率为零，因而与赝自旋无关。如果通过外加电场手段翻转铁电极化的方向，那么就可以进一步调控谷极化的状态。不同于六角晶格中的谷选择圆偏二色性，在铁谷态时可以观察到线偏振光相关的光学带隙。通过电场的手段调控和探测谷极化，将是谷电子学研究的新方向。

#### D02-37

##### 光栅结构锰氧化物超晶格的光磁电调控

裴环宇，张云婕，郭蜀晋，任丽霞，闫虹，陈长乐，金克新，罗炳成

西北工业大学

锰氧化物磁性材料的光磁电效应已得到广泛的研究，但如何获得可观的以及可调控的光磁电效应仍然是当前面临的巨大挑战。为此，我们设计了一种基于锰氧化物的三色超晶格，其三种组成成分分别为  $\text{Pr}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{MnO}_3$ ， $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$  和  $\text{La}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{MnO}_3$ ，这种三色超晶格同时满足空间和时间反转对称破缺。借助于光栅结构，我们采用布拉格衍射法研究了超晶格样品的近红外光磁电效应。我们发现，无论是衍射光还是反射光，其  $n = \pm 1$  级衍射光强度的相对变化都对样品的磁化以及极化强度具有很强的依赖性。此外，衍射光强度的相对变化随着超晶格周期的增加而增大，随着光栅周期的增加而减小，表明超晶格内的界面对观测到的增强光磁电效应起着至关重要的作用。对于周期为 (3, 15) 的三色超晶格，其衍射光强度的相对变化最大值达到 8.27%。我们的实验结果为设计下一代基于锰氧化物的光磁电器件提供了一种有效方法。

#### D02-38

##### 共掺杂 $\text{TiO}_2$ 的巨介电机理探究及储能应用

魏贤华<sup>1</sup>，杨超<sup>1</sup>，郝建华<sup>2</sup>

1.西南科技大学

2.香港理工大学

巨介电材料在微电子器件及高密度储能应用方面的巨大潜力，使得其成为电介质研究领域的热点之一。Hu 等人在  $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$  陶瓷获得了优异的巨介电性能：巨介电常数 ( $\epsilon > 10^4$ ) 和低介电损耗 ( $\tan \delta = 0.05$ ) 及其稳定的频率和温度特性，并指出其机制为电子钉扎缺陷偶极子效应 (Nature Mater. 2013, 12: 821.)。然而，目前关于其巨介电机理还存在争议，多数研究工作集中在三价离子与 Nb 共掺的体系研究。首先，我们在二价离子 Zn 或 Mg 与 Nb 共掺  $\text{TiO}_2$  均获得了优异的巨介电性能，特别在 Mg、Nb 共掺的样品中，损耗低至 0.83% 而介电常数为  $3.87 \times 10^4$ ；此外在共掺杂的金红石、锐钛矿及非晶相  $\text{TiO}_2$  中均发现巨介电现象，支持了电子钉扎缺陷偶极子机制；首次将 Zr 掺入到该体系并保持良好的介电性能，突破了前人施主受主共掺的模式；在 (Mn, Nb) 共掺  $\text{TiO}_2$  中发现巨介电的消失及其通过  $\text{N}_2$  气氛退火将其恢复，并深入讨论了晶界作用的机制；在 (Er, Nb) 共掺  $\text{TiO}_2$  中发现适量的第二相有助于介电性能的改善。由于该类巨介电材料小的介电场强而使得其应用也受所限，因而我们将 (Er, Nb) 共掺  $\text{TiO}_2$  进行了表面改性并与聚合物介电材料 P(VDF-TrFE) 进行复合，同时获得了高的介电常数 (300)、低的损耗 (0.04) 和高的介电场强 (82 MV/m)，因而有望用于储能器件。

#### D02-39

##### 铁酸铋纳米结构中极化拓扑畴及其电导状态调控

高兴森

华南师范大学

一维铁电极化拓扑畴(如涡旋畴)蕴含丰富的新奇物性，还有望用于建构新型拓扑畴存储器件。当前，较稳定的拓扑畴已在不同材料体系中被陆续发现，而拓扑畴外场调控则成为其应用化所面临的关键挑战。为此，本工作采用零维纳米点阵列来调控拓扑畴结构，并用高分辨压电显微镜对拓扑畴进行细致观测和调控。研究发现，在高质量  $\text{BiFeO}_3$  纳米点阵列中观测到大量中心性拓扑畴，并通过相场模拟揭示出这种中心型拓扑畴形成新机制。通过针尖施加外场，成功实施了对单个拓扑畴的

调控，实现了心中型拓扑畴的往复反转，展示了“0”与“1”拓扑态的擦写操作。此外在高质量外延 BFO 纳米岛中，也观察到涡旋-反涡旋等新奇拓扑畴，并发现不同拓扑畴具独特的畴壁电流状态。进一步研究发现，通过施加电场、光照、加热，都可部分驱动拓扑畴及其畴壁电导状态的变化。该工作为进一步实施拓扑畴的多场调控打下基础。

#### D02-40

##### 多铁性材料畴结构的多维 RSM—X 射线衍射：从一维走向三维

高琛，罗震林

中国科学技术大学

晶体结构、畴结构是理解掌握材料多铁性的重要手段。随着 X 射线衍射从一维、二维走向三维，能够在倒空间更加深入全面地展现材料的晶体结构、畴结构、应变、物相演化等。本文将从衍射的基本概念出发，阐述 X 射线衍射技术从一维、二维迈向三维的技术原理，并结合课题组多年的研究工作，如 BiFeO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub>(001)外延膜的晶体和畴结构、PbTiO<sub>3</sub> 外延膜的畴结构随薄膜-衬底晶格失配度的变化、PMN-xPT 物相随组分的连续演化(x =0.30-0.37)、SrTiO<sub>3</sub>/PbTiO<sub>3</sub> 超晶格薄膜中铁螺旋的有序排布等，揭示高维度衍射所能带来的丰富结构微结构信息。

#### D02-41

##### 相场理论模拟多铁材料多场耦合与微观结构

黄厚兵<sup>1</sup>，张金星<sup>2</sup>，南策文<sup>3</sup>，陈龙庆<sup>4</sup>

1.北京理工大学

2.北京师范大学

3.清华大学

4.宾夕法尼亚州立大学

电/磁卡效应是在铁电/磁材料中因外电/磁场的改变从而导致极/磁化状态发生变化而产生的绝热温度或等温熵的变化，被认为是可以应用于高效率制冷材料。我们建立了 NiCoMnIn/BaSrTiO<sub>3</sub> 多铁性薄膜磁电卡效应耦合的相场模型，电场能够通过“铁磁/铁电”的界面应力传输间接调控 NiCoMnIn 的磁性相变行为，模拟了外加场（电场、磁场、应力）对于磁电卡效应的影响。电场通过调控铁电薄膜 BaSrTiO<sub>3</sub> 的电极化强度方向，来改变输出的应变。应变通过界面传输，影响铁磁薄膜 NiCoMnIn 的反铁磁到铁磁性相变行为，产生熵变为 12J/(Kg K)。

铁电光伏效应由于退极化场可以高效分离光生载流子，可具有高光电转化效率而逐渐进入人们的视野。以 BiFeO<sub>3</sub> (BFO) 为代表的多铁性晶体的带隙宽度在 2.2 eV~2.8 eV 之间，属于半导体型铁电体；实验中制备了 BFO 薄膜，用原子力显微镜探针来调控 BFO 薄膜的能带宽度，利用探针收集载流子，造成局域退极化场屏蔽效应，从而产生能带调控效应，大大提高了光伏效率。我们通过相场和第一性原理计算了探针下应变分布和能带宽度，有效地解释了应变调控能带机制。

#### D02-42

##### 基于对称性分析的多铁性六角铁氧体磁电耦合行为研究

柴一晟

重庆大学

Multiferroic Z-type hexaferrites Ba<sub>0.52</sub>Sr<sub>2.48</sub>Co<sub>2</sub>Fe<sub>24</sub>O<sub>41</sub> have been reported to show giant electric field control of magnetization and small magnetic field control of drastic change of polarization, i.e., giant magnetoelectric (ME) effects up to room temperature. Here, we report the investigation of angle dependent ME effects in this compound. When the in-plane H is rotated clockwise by 360 degrees, in-plane P vector is rotated counterclockwise by 720 degrees. A symmetry-based analysis reveals that the faster and opposite rotation of P vector in the Z-type hexaferrite is associated with the existence of a mirror plane perpendicular to c-axis. Moreover, such a peculiar crystal symmetry also results in p-d hybridization dominated microscopic origins for the spin-driven ME behaviours. This work demonstrates the importance of the crystal symmetry in the determination of ME properties in the hexaferrites and provides a fundamental framework for understanding and applying the giant ME properties in various ferrites with hexagonal crystal structure.

#### D02-43

##### 反铁磁 Sr<sub>2</sub>IrO<sub>4</sub> 薄膜中的各向异性磁电阻效应

陆成亮

华中科技大学物理学院

反铁磁自旋电子学是近些年兴起的一个领域，其中的自旋输运核心是反铁磁体。这一新兴领域的发展给磁存储带来了新的物理和契机。一般来讲，反铁磁体中的各向异性磁电阻主要与自旋轨道耦合所决定的磁晶各向异性相关联。当前，这方面的研究还停留在实现和发现反铁磁各向异性磁电阻效应这一层面。 $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  具有强自旋轨道耦合引起的  $J_{\text{eff}}=1/2$  反铁磁绝缘态。我们通过详细的各向异性磁电阻表征，揭示了  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  薄膜中存在可控的各向异性磁电阻效应。结合第一性原理计算，我们认为其中自旋指向变化带来的能隙不同起到了关键作用。并且，这一效应也可被衬底应力调控。我们的研究结果表明铱氧化物中的  $J_{\text{eff}}=1/2$  态可能对反铁磁自旋电子学有重要意义。

#### D02-44

##### 有机铁电人工突触

田博博

华东师范大学

忆阻器的电阻可以随着外场的刺激进行连续调控，从而可以被用来模拟生物突触的权重可塑性，被当作人工突触器件用于模仿脑神经网络的工作方式。目前，忆阻器较差的性能参数依旧是基于硬件的神经网络的构建的重要挑战。本文报道了一种基于铁电极化调控阻变的新型忆阻器。以有机铁电聚合物为栅介质层，二硫化钨为沟道的晶体管结构的单一器件可以实现生物突触的长程增强和长程抑制、脉冲时间依赖可塑性和脉冲频率依赖可塑性等功能的模拟。器件可以承受  $10^9$  的突触操作，并且单一突触操作的能耗仅约 1PJ。这种新型的有机铁电人工突触与硅工艺兼容，为实现大规模的类神经网络提供了新途径。

#### D02-45

##### 基于 Mott 绝缘体/铁电异质结的无机二端突触器件

钟妮，向平华，田博博，段纯刚

华东师范大学

为了构建高效的神经形态系统和“类脑芯片”，从底层出发研究和开发新的材料与器件，以最少的电子器件实现人脑的重要组成单位-神经元和突触功能的模拟具有重大的意义。近年来，研究者已经陆续开展了基于相变和导电桥机制的多种阻变器件在突触功能上的模拟。然后它们都存在着均匀性和可控性差的问题，为此构造基于纯电子机制的无机突触器件是今后发展的一大方向。铁电薄膜是一种具有非挥发性自发极化的功能材料，其铁电极化可以在外加电场的调控下进行方向上的反转。通过控制外加电场的振幅和时间，可以精确获得铁电极反转过程中的连续变化状态，铁电极化的这种随着外场调控的连续变化与生物突触的连接权重的连续变化非常类似，如果将铁电极化可塑性与生物突触可塑性一一对应起来，则可以实现新型的人工铁电突触器件。在本工作中，我们报道了基于 Mott 绝缘体/铁电体的无机二端器件的突触功能的模拟。我们利用激光脉冲沉积技术(PLD)，在(001)取向的  $\text{SrTiO}_3$ (STO)衬底上制备出了高质量的  $\text{SmNiO}_3$  /  $\text{BaTiO}_3$ (SNO/BTO)外延薄膜。我们利用压电原子力显微镜(PFM)，实现了对 BTO 薄膜的畴翻转，表明 BTO 薄膜具有良好的铁电特性。在该结构中实现了突触的 LTP, LTD 及 STDP 等多种特性。

## 墙展

#### D02-P01

##### $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ 纳米颗粒的红外光谱特性

黄晓桦，林洪沂，程再军

厦门理工学院

现有的诸多研究表明，具有稳定电荷有序态的掺杂钙钛矿锰氧化物块材，当其尺度减为纳米尺寸时，电荷有序态逐渐被熔化，反铁磁有序背景下出现了具有铁磁性质的团簇玻璃态。究其起源，尚不明确。本实验采用红外光谱探测锰氧化物纳米颗粒的晶格结构信息，研究该体系晶格结构变化与电荷有序稳定性之间的联系。本实验采用溶胶-凝胶法制备前驱物，在不同的烧结温度下，获得了粒径分别为 40 nm、100 nm、1000 nm 的  $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$  纳米颗粒，在温度为 6-290 K、波数为 40-4000  $\text{cm}^{-1}$  的范围内测量了样品的红外吸收光谱。结果显示：1) 粒径为 40 nm 和 100 nm 的样品在 420  $\text{cm}^{-1}$  (对应弯曲模式) 和 600  $\text{cm}^{-1}$  (对应伸缩模式) 附近皆出现了明显的吸收带，1000 nm 样品的吸收带仅出现在 600  $\text{cm}^{-1}$  附近；2) 随着温度降低，

两个吸收带逐渐往高波数移动；3) 光密度在  $800\text{ cm}^{-1}$  附近拐点的尖锐程度随着粒径尺寸减小而变得平缓；4) 对所有样品，积分范围为  $400\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$  的有效载流子数目随着温度降低急剧下降；5) 对  $40\text{ nm}$  的样品，在  $1457\text{ cm}^{-1}$  处出现了明显的吸收峰，其由来并不清楚。光密度曲线拐点逐渐平缓的结果表明，随着颗粒尺寸减小，晶格畸变逐渐增大，可能增强了样品中载流子的局域化程度；随着温度升高，样品的载流子局域化程度越来越高。这表明纳米颗粒体系中存在着晶格畸变和局域化电子间的相互作用，这种局域化作用可能使 eg 电子在有限范围内跳跃，导致团簇玻璃态内短程铁磁关联的形成。

## D02-P02

### Strain Engineering Based on Flexible Ferroelectric $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ Thin Film

陈浩, 刘影, 祁亚军, 章天金

湖北大学

High quality  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$  thin film was fabricated by pulsed laser deposition on flexible mica substrates. The XRD results show that The PZT film with (001) preferred orientation was grown on Pt/Mica substrate. Different strain gradient of the film can be obtained by bending the substrate with the applied stress. The macroscopic electrical properties measurement showed that it had excellent ferroelectric properties. At different bending radii, its ferroelectric properties remain basically unchanged. It is likely to the strain gradient is too small to cause changes. What is more noteworthy is that, under the same bending curvature, the electrical hysteresis loops and C-V curves of the different lateral capacitances of the PZT film show obvious differences. Raman analysis and finite element simulations have differences in strain along the in-plane direction, and the contribution of the flexural electric effect caused by the strain gradient in the local area results in the difference in ferroelectric properties of PZT.

## D02-P03

### 新型铁谷体单层 $\text{FeCl}_2$ 的第一性原理研究

胡鹤, 段纯刚

华东师范大学

类似于电荷以及自旋自由度，以谷自由度为核心的谷电子学蓬勃发展。寻找具有自发极化的铁谷体成为本领域的研究热点。本文通过第一性原理计算，在类石墨烯的六角蜂巢结构体系中，证实了 2H 相的  $\text{FeCl}_2$  单层就是一类新型的铁谷体。计算表明，具有动力学稳定的 2H 相  $\text{FeCl}_2$  单层存在本征铁磁性以及垂直磁晶各向异性，这都为谷极化的实现提供了不可或缺的条件。利用群论的方法分析了光学跃迁定则得到了与能谷锁定的圆偏振光相关光学带隙，同时在轻微掺杂铁谷体  $\text{FeCl}_2$  中由于两能谷里曲率反号导致反常谷霍尔效应的出现。声子谱计算表明，轻微应力的引入并不会影响  $\text{FeCl}_2$  的稳定性，能谷劈裂会随应力的不同而发生改变。

## D02-P04

### $\text{GdMn}_2\text{O}_5$ 中高温极化电场对多铁性行为的非常规调控

李翔<sup>1,2</sup>, 郑书翰<sup>2</sup>, 刘美凤<sup>1</sup>, 林林<sup>2</sup>, 颜志波<sup>2</sup>, 刘俊明<sup>2,3</sup>, S. -W. Cheong<sup>4</sup>

1.湖北师范大学

2.南京大学

3.华南师范大学

4.罗格斯大学

在第 II 类单相多铁(磁致多铁)中实现近室温多铁性及电控磁性/多铁性，是多铁性功能最重要的潜在应用，也因此一直是一项具有挑战性的课题。特定共线自旋系统中的对称交换伸缩效应能够破坏空间反演对称，基于此机制，人们在典型体系  $\text{RMn}_2\text{O}_5$  中发现了较大的铁电极化以及较强的磁电耦合。然而，过往的研究工作展示了很多相互“矛盾”的结果，该体系的多铁性物理仍未被有效昭示，特别是高温区的物理现象缺乏关注。本工作集中关注  $\text{GdMn}_2\text{O}_5$  中热力学相变、磁性和多铁性等对温度与电场的响应，研究高温区极化电场调控多铁性行为。通过细致的实验表征，发现不同的高温电场预极化状态能显著影响体系的多铁性行为，这种影响不仅是定量差别，更是定性不同。我们初步认为这是由于体系内部存在着两种共存的低温极化分量：一种是与  $\text{Mn}^{3+}\text{-Mn}^{4+}\text{-Mn}^{3+}$  交换伸缩相关联的极化分量，它受高温极化态调控；另一种是与  $\text{Gd}^{3+}\text{-Mn}^{4+}\text{-Gd}^{3+}$  交换伸缩相关联的极化分量，它不受高温极化态的影响。本工作有助于更好地理解第 II 类多铁性体系  $\text{RMn}_2\text{O}_5$  中的微观物理，为实现电控磁性/多铁性的潜在应用价值奠定基础。

## D02-P05

### 各向异性的 Skyrmion 在梯度场下的驱动行为

陈军

东南大学物理学院

手征磁体中的拓扑磁结构 skyrmions 近年来备受关注。我们讨论了应力的作用下导致的相互作用各向异性会显著影响手征磁体中螺旋序和 skyrmion 晶体相的稳定磁场和温度, 模拟结果与 MnSi 体系的相关实验报道较好吻合, 从而揭示了应力效应的微观物理机制。

此外, 实验报道在 FeGe 体系中发现了由应力导致的扭曲 skyrmion。我们运用蒙特卡罗模拟和 Landau-Lifshitz-Gilbert 方程模拟的方法, 研究了梯度磁场驱动扭曲 skyrmion 的动力学行为。结果表明, 扭曲 skyrmion 在外加梯度磁场下驱动行为也表现出明显的各向异性, 存在驱动速度极大、极小的驱动方向。同时, 我们也研究了 skyrmion 的各向异性对于多个 skyrmions 之间相互作用的影响, 发现扭曲 skyrmions 在梯度磁场驱动下的相互振动频率同样会发生显著的变化, 表明了 skyrmions 之间相互作用会受到其扭曲度的影响。

## D02-P06

### 纳米孔洞铁电材料电滞回线的相场方法模拟

谢成敏, 赵赫, 吴平平

厦门工学院

多孔铁电体具有特殊的性能和应用前景。实验结果表明, 纳米孔的半径与纳米孔的间隙对铁电畴结构和铁电体的电学性能有很大的影响。在本研究中我们发展了一个孔洞相场模型来预测多孔铁电体的电畴结构及其在电场作用下的电畴结构演化, 并给出了多孔铁电体的电滞回线。研究分析了孔洞的半径以及孔洞的间隙对材料的铁电性能与压电性能的影响。模拟的电学性质与实验结果吻合较好。模拟结果表明, 可以通过控制造孔剂的尺寸和材料的孔隙率来调节电滞回线的形状与相关的电学特性以满足实际需求。

## D02-P07

### 基于 BiMnO<sub>3</sub> 的多铁人工突触的理论研究

袁野, 田博博, 段纯刚

华东师范大学极化材料与器件教育部重点实验室

钙钛矿结构 BiMnO<sub>3</sub> 作为同时具有铁电性与铁磁性的多铁材料, 在人工神经网络方面, 可以作为一种潜在的人工突触材料, 从而设计出新型多铁人工突触器件。本文使用第一性原理计算的方法, 分别研究了四方相 BiMnO<sub>3</sub> 在 xy 面内施加 1.8% 与 4% 应力条件下的铁电情况, 以及 Mn 原子磁矩随着铁电极化强度变化的曲线。结果表明, 在四方相多铁 BiMnO<sub>3</sub> 中, Mn 原子磁矩会随着极化强度的增强而增大, 表示其铁磁性可以在一定程度上由其铁电极化来进行调控, 并且应力越大, 其磁矩变化范围就越大。这一结果使得多铁 BiMnO<sub>3</sub> 在人工突触器件设计方面拥有潜在的应用价值。其多铁性使得它在作为人工突触器件材料中, 具有更多可调控的自由度, 从而可以用于模拟多突触连接。这可以为将来构造类脑芯片打下一定的理论基础。

## D02-P08

### 三金红石 LiFe<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 的电荷有序铁电性及其磁电耦合效应

林玲芳, 梁艳平, 董帅

东南大学

LiFe<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 是一种具有三金红石结构的半导体, 并且其 Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> 离子形成天然的电荷有序态。我们通过第一性原理(DFT) 计算以及蒙特卡罗模拟(MC)计算方法, 系统地研究了该材料的磁性, 电子结构, 相变以及电荷有序等物理性质。首先, 通过 DFT 计算, 我们得到了与中子实验一致的反铁磁基态。并且, 通过 MC 数值模拟, 我们得到其反铁磁转变温度约为 104K。通过计算分析, 我们预言 LiFe<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 是一种新型的电荷有序多铁材料。其次, 我们提出了一种新的磁电耦合效应机制, 并在该材料中实现了电控磁的翻转。相比于我们早期的工作<sup>1</sup>, 我们的首次在非人工异质结单相 LiFe<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 材料中实现了具有本征的强磁电耦合效应, 为后续实验提供了重要参考意义, 也为搜寻新型电荷有序磁电耦合材料开辟了新的途径。

## D02-P09

### Fe 掺杂 KNN-基陶瓷的室温多铁性及磁电耦合特性研究

周敏, 阎朔, 吕笑梅, 黄凤珍, 朱劲松  
南京大学物理学院

铌酸钾钠 (KNN) 由于其拥有替代铅基压电陶瓷的巨大潜力, 近期被广泛研究。KNN-基陶瓷在的多型相转变 (PPT) 时两相共存, 可极化方向增多, 铁电压电性得到明显提高。此外, 磁性离子氧化物 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$  等) 相关的组分微调是制备高密度 KNN 基陶瓷的常见手法, 在优化 KNN 基陶瓷材料电学性能的同时, 是否能够诱导其产生室温多铁性和磁电耦合, 是值得期待的。研究发现钙钛矿结构的  $(\text{K}_{0.48}\text{Na}_{0.52})_{0.95}\text{Li}_{0.05}(\text{Nb}_{0.95}\text{Sb}_{0.05})_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  ( $0.010 \leq x \leq 0.035$ , KNLNSF) 陶瓷, 当  $x \leq 0.030$  的样品能够形成单相的钙钛矿结构, 并且在保留有较好的室温铁电性的基础上, 同时具有弱的室温铁磁性, 以及室温磁介电 (MD) 效应。XPS 和氧处理测试表明, 磁性主要来源于同价态  $\text{Fe}^{2+}$  离子通过  $-\text{Fe}-\text{O}-\text{Nb}/\text{Sb}-\text{O}-\text{Fe}-$  路径形成铁磁 (FM) 超交换相互作用。当介电温谱中三方-正交结构相变 (R-O) 逐渐清晰 ( $x \geq 0.020$ ) 以及出现正交-四方相变 (O-T,  $x \geq 0.010$ ) 的温度处, 都伴随着 ZFC  $M-T$  曲线出现异常, 归因为结构转变引起的自旋相互作用改变。同时, 样品在整个测量温区 (10–310 K) 都具有磁介电效应, 且在结构转变附近更为显著, 特别是 R-O 相变附近呈现明显峰值, 其中  $x = 0.03$  样品在 122 K, 0.9 T 磁场下 MD 值高达 16%。这可能由于外磁场下 Fe 离子自旋相互作用发生变化进而改变局域极化, 结构转变时两相共存以及磁性异常都可能对 MD 峰产生贡献。该工作表明 KNLNSF 样品中存在较强的自旋-晶格耦合, 利用该类材料的多型性相转变 (PPT) 可望大幅提高材料性能, 为进一步制备具有室温强磁电耦合效应的多铁性材料提供新的可能性。  
关键字: 铌酸钾钠, 多铁性, 磁介电效应

## D02-P10

### 多铁复合纳米纤维的力学性能研究

朱庆丰<sup>1</sup>, 谢淑红<sup>1</sup>, 李江宇<sup>2</sup>

1. 湘潭大学材料科学与工程学院
2. 中国科学院深圳先进技术研究院

多铁复合纳米纤维具有多重有序及磁电耦合效应, 同时还具有高比表面积, 较大的长径比, 且不易受到基体约束等优点, 在多功能电子器件领域具有潜在的应用前景。多铁纳米纤维的力学性能对器件的应用至关重要。本文采用静电纺丝法制备了一系列不同摩尔比的  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$  (PZT-CFO) 多铁复合纳米纤维, 并利用纳米压痕法定量地测量了单相及复合纳米纤维的硬度和弹性模量。然而, 由于纳米压痕测试法具有破坏性, 且在模量成像方面比较耗时且分辨率较低。基于此, 本文采用了另外一种方法——基于 AFM 的接触共振法对纤维的力学性能进行表征。利用接触共振法我们不仅在单点处测量了纳米纤维的弹性模量, 而且对单根纤维和纤维局部区域的模量进行了高分辨率的成像。通过对比, 我们发现利用接触共振法测量得到的实验结果和纳米压痕得到的结果一致, 证明了接触共振法在表征纳米材料的力学性能方面的有效性及可靠性。

## D02-P11

### $\text{BiFeO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$ 多铁复合纳米纤维的制备和力学性能表征

安峰, 钟高阔, 朱庆丰, 谢淑红  
湘潭大学材料科学与工程学院

多铁纳米纤维的优良力学性能在多功能器件中具有巨大的潜在应用价值。本文结合溶胶-凝胶和静电纺丝方法, 成功制备出不同摩尔比的  $\text{BiFeO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$  (BFO-CFO) 多铁复合纳米纤维, 利用纳米压痕和基于原子力显微镜的振幅-频率 (AM-FM) 调制技术对其进行力学性能表征。AM-FM 结果表明, BFO-CFO 纳米纤维的弹性模量随 CFO 比例的增加而增大, 与纳米压痕所得结果相一致。测试结果证明 AM-FM 是无损检测样品力学性能的强有力方法, 所得 BFO-CFO 纳米纤维的力学性能测试结果对于多功能纳米器件的应用具有重要意义。

## D02-P12

### $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$ 的磁电性与光学性质研究

王煜<sup>1</sup>, 刘美风<sup>1</sup>, 王秀章<sup>1</sup>, 李必文<sup>1</sup>, 董帅<sup>2</sup>, 刘俊明<sup>3</sup>

1. 湖北师范大学
2. 东南大学
3. 南京大学

具有 Ruddlesden-Popper 层状钙钛矿结构的材料近几年被预测可能有杂化非本征铁电性以来逐渐受到关注。我们通过固

相反反应法制备了  $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$  陶瓷样品，系统研究了陶瓷样品的晶体结构、磁性、铁电性、磁电性能以及光学性能。我们采用了 XRD 对其物相进行表征，通过介电常数和结构特性发现了在陶瓷中有较为明显的弛豫现象，利用热释电流和 PUND 法研究了铁电性。与此同时，可以通过电场来调控磁性，实现磁电耦合。另外，通过紫外-可见-近红外漫反射光谱和 DFT 计算中表明： $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$  具有很强的光学吸收，在铁电光伏方面具有一定的应用。

关键字： $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$ ；磁电耦合；光吸收

#### D02-P13

##### CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米柱阵列的制备及其室温磁性

钟高阔<sup>1,2</sup>，安峰<sup>1</sup>，谢淑红<sup>1</sup>，李江宇<sup>3</sup>

1.湘潭大学

2.中国科学院深圳先进研究院

3.华盛顿大学

界面在多铁异质结的磁电耦合效应中扮演着无可取代的角色，而 1-3 柱状形式复合的多铁性材料会具有更多的两相界面，并且基底的约束也仅限于横向尺寸，降低了残余应变和位错缺陷产生的概率，有机会实现强的磁电耦合效应。利用  $\text{BiFeO}_3$  薄膜在高温下分解为  $\text{Fe}_x\text{O}$  岛和  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  两种成分，我们基于脉冲激光沉积结合双靶材快速切换，将分解得到的  $\text{Fe}_x\text{O}$  与  $\text{Co}_2\text{O}_3$  反应，制备出  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  纳米柱阵列。X 射线衍射、扫描电镜和 X 射线光电子能谱测试结果表明纳米柱沿[001]外延生长，且每个  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  纳米柱具有形貌、大小及方向上的一致性。振动样品磁强计和 MFM 测试结果也从宏观上证实制备的  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  纳米柱具有良好的室温磁性，可用做多铁异质结构的模板。

#### D02-P14

##### 采用放电等离子体烧结技术制备 Zr/Nb 掺杂的 BiFeO<sub>3</sub> 陶瓷及其多铁性研究

王挺，宋申华\*

哈尔滨工业大学（深圳）

以五水硝酸铌、九水硝酸铁、铌酸铵草酸盐水合物、硝酸氧锆水合物和酒石酸为原料，采用溶胶凝胶法制备纯相铁酸铋和 5 mol% 的 Nb/Zr 掺杂的粉末，然后采用放电等离子体烧结技术在 700 °C 保压 5 min 制备出陶瓷，经 650 °C 氧气气氛退火 4 h 后，对样品的物相、微观结构、介电、铁电和磁学性能进行表征。X 射线衍射分析表明所制备的陶瓷均为纯相菱形立方结构，属于 R3c 空间群。对于 Nb 掺杂的试样，其 (104)和(110)所对应的特征峰转变为单峰，而 Zr 掺杂试样未观察到此种现象，表明高价 Nb 元素掺杂对于晶体结构的影响大于 Zr 掺杂。Zr/Nb 掺杂均能使样品的晶粒尺寸降低，达到 0.5 - 1 μm。Zr 掺杂对于介电常数几乎没有影响，而 Nb 掺杂却显著增强材料的介电性能。Zr/Nb 掺杂导致陶瓷的室温介电损耗降低为 10<sup>-1</sup> 以下。Zr/Nb 掺杂使得陶瓷的漏电流密度降低了两个数量级。所测得的陶瓷样品的电滞回线并未饱和，其最大极化强度和剩余极化强度分别为 4.18 and 0.43 μC/cm<sup>2</sup>。陶瓷的磁学性能随着 Zr/Nb 掺杂而增强。

#### D02-P15

##### X 型六角铁氧体 Sr<sub>2</sub>Co<sub>2</sub>Fe<sub>28</sub>O<sub>46</sub> 的单晶样品制备及磁介电性能研究

吴枚霞<sup>1</sup>，刘仲武<sup>2</sup>，高兴森<sup>3</sup>，李满荣<sup>1</sup>

1 中山大学

2 华南理工大学

3 华南师范大学

本文采用光学浮区熔融法制备了 X 型六角铁氧体  $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{28}\text{O}_{46}$  ( $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{X}$ )单晶样品，其中浮区熔融炉采用激光作为加热光源。单晶样品是在 8.9-9.2 bar 的氧气压下生长。实验可获得大概 5 cm 长度的晶锭。晶锭可沿着生长方向解理出晶面，XRD 表明解理的晶面为 (001) 面。XRD 和拉曼光谱结果都表明，所制备单晶样品为 X 型的六角铁氧体样品。从样品磁化率与温度关系曲线可知，样品的自旋重定向温度大概为 335 K。对样品的磁介电性能研究表明，样品在接近自旋重定向温度，大概在 320 K 时出现介电峰，此介电峰不随测试频率的变化而变化，表明是样品本征的介电行为。而加磁场测试时，此介电峰会向高温方向移动。以上结果表明六角铁氧体  $\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{28}\text{O}_{46}$  样品存在磁性与电性能的耦合。

#### D02-P16

##### 含缺陷的相变前驱材料中的热弹平衡及其超响应研究

饶伟锋<sup>1</sup>, 徐野川<sup>1</sup>, Armen G. Khachaturyan<sup>2,3</sup>, John W. Morris<sup>3</sup>

1.南京信息工程大学

2.Rutgers University

3.University of California.

预马氏体等相变前驱材料往往具有独特的响应特性。这些特性通常被解释为是由于特殊的原子结构等本征属性导致的。我们从非本征的角度考虑,通过理论与模拟的方法研究能够产生高度应力集中的位错和共格沉淀等缺陷对相变前驱材料性能的影响。研究发现,这些缺陷产生的应力集中能够在某些局域诱发位移型转变,产生纳米尺度的子相“胚胎”,并且这些子相胚胎和预转变母相之间形成一种新型的热弹平衡。这种热弹平衡能够在外场的作用下进行调整,使得子相胚胎生长或者收缩。这是一个可逆并且没有或者窄滞后的响应过程,其在应力或者磁场的作用下产生的效应对应的就是超弹性或者超磁致伸缩(铁弹或铁磁);在电场的作用下表现为铁电材料的弥散相变行为。在改变温度场的情况下,子相胚胎的生长或收缩的效应是和通常的热效应是相反的,因此,这种新的热弹平衡也能部分地解释因瓦和艾林瓦效应。

## 仅发表论文

### D02-PO-01

#### 缺铁对 Sr-W 六角铁氧体磁、电性能的影响

杨孟孟<sup>1</sup>, 王松伟<sup>1,2</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>, 赵中康<sup>1</sup>, 姚蓉<sup>1</sup>, 白洋<sup>1</sup>, 邵焯平<sup>1</sup>, 高熠斌<sup>1</sup>

1.桂林电子科技大学

2.桂林电子科技大学广西信息材料重点实验室

本文采用溶胶-凝胶自蔓延燃烧合成工艺制备了缺铁六角铁氧体  $\text{SrCo}_2\text{Fe}_{16-x}\text{O}_{27.6}$  (Sr-W, 其中  $x = 0.1, 0.4, 0.6, 0.8$ ) 多晶样品,利用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜、综合物性测量系统及精密分析阻抗仪分别对 Sr-W 的结构,磁性和介电性能随缺铁量的变化关系进行了深入研究。研究表明,所有样品的 XRD 谱线都与空间群 P63/mm 的六角形结构吻合表明适量的缺铁不会改变 Sr-W 的结构;样品平均晶粒约为  $1\sim 5\ \mu\text{m}$ ;此外,随着缺铁量的逐渐增加,样品饱和磁化强度和矫顽力逐渐升高,介电性能和损耗也随着适量的缺铁配方有规律性变化。

### D02-PO-02

#### YbCrO<sub>3</sub> 的介电、磁介电特性研究

白洋<sup>1</sup>, 王松伟<sup>1,2</sup>, 赵中康<sup>1</sup>, 邵焯平<sup>1</sup>, 姚蓉<sup>1</sup>, 杨孟孟<sup>1</sup>, 高熠斌<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>

1.桂林电子科技大学

2.桂林电子科技大学广西信息材料重点实验室

本文研究了 YbCrO<sub>3</sub> 多晶样品的介电、磁介电特性。利用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜对其进行了结构及形貌性能表征,联合精密分析阻抗仪及综合物性测量系统研究了样品的介电及磁介电性能。研究表明,多晶 YbCrO<sub>3</sub> 样品属于畸变的钙钛矿结构,空间群为 *pbnm*,晶粒尺寸为  $1\sim 3\ \mu\text{m}$ ,片状固体样品内部存在着不均匀的缺陷。介电温度上的介电峰归因于 Maxwell-Wagner 效应,介电常数对磁场的依赖关系源于磁场诱导的电阻变化。

关键字:介电弛豫; Maxwell-Wagner 效应; 磁介电效应

### D02-PO-03

#### Fe 替换 Mn 对 Mn<sub>12</sub>Tb 化合物的结构和磁性能的影响

熊家才<sup>1</sup>, 马垒<sup>1</sup>, 周鑫<sup>1</sup>, 郭永斌<sup>1</sup>, 王岛<sup>1</sup>, 杜阿华<sup>1</sup>

1.桂林电子科技大学

2.广西信息材料重点实验室

利用真空氩弧熔炼的方法制备了  $(\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x)_{12}\text{Tb}$  ( $x=0.0-1.0$ ) 系列样品,在  $700^\circ\text{C}$  下退火 14 天,利用 X 射线衍射仪(XRD),综合物性测量系统(PPMS),振动样品磁强计(VSM)等测试方法研究了 Fe 替换 Mn 对 Mn<sub>12</sub>Tb 的晶体结构及磁相关性能的影响。研究表明,Fe 可以在晶格中完全替代 Mn 的位置,  $(\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x)_{12}\text{Tb}$  系列化合物一直保持为 ThMn<sub>12</sub> 型晶体结构,空间群为 *I4/mmm*。随着 Fe 含量由 0.0 增加到 1.0 的过程中,  $(\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x)_{12}\text{Tb}$  化合物的晶格常数 *a*、*b* 和晶胞体积 *V* 保持逐渐减小

的趋势；有趣的是，在  $x$  增加到 0.6 之前，晶格常数  $c$  是逐渐增加的，并在  $x=0.6$  时达到最大值，表明 Fe 的增加可以拉长  $c$  轴方向的晶面间距，产生更加明显的面心四方结构；之后随着 Fe 含量的继续增加， $c$  值开始减小；磁性能测试结果表明， $Mn_{12}Tb$  化合物在室温下为反铁磁性，磁化强度仅为  $2.37 \text{ Am}^2/\text{kg}$ ，随着 Fe 原子的掺杂，该系列化合物在  $x=0.1-0.6$  范围内保持反铁磁性不变，当  $x \geq 0.7$  时，该化合物逐渐显示出铁磁性特征，磁化强度快速增加，可达到  $\sim 100 \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。该系列化合物在逆磁热效应、磁性传感器等方面具有潜在的研究价值。

#### D02-PO-04

##### Co 掺杂对 $Fe_2B$ 化合物结构与磁性能的影响

董培林<sup>1</sup>，马垒<sup>1,2</sup>，周鑫<sup>1</sup>，王岛<sup>1</sup>，郭永斌<sup>1</sup>，卢世翻<sup>1</sup>

1. 桂林电子科技大学

2. 广西信息材料重点实验室

采用真空电弧熔炼法制备了  $(Fe_{1-x}Co_x)_2B$  ( $x=0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ ) 系列化合物，在  $800^\circ\text{C}$  下退火 7 天，然后在冰水中淬火。利用 X 射线衍射仪 (XRD)、差热分析仪 (DTA)、振动样品磁强计 (VSM) 分别研究该系列化合物的晶体结构、磁相转变温度及其磁性能。研究表明， $(Fe_{1-x}Co_x)_2B$  系列化合物具有  $CuAl_2$  型晶体结构且空间群为  $I4/mcm$ ，Fe 和 Co 元素可以完全取代，随着 Co 掺杂量的增大，晶胞参数  $a$ 、 $c$  及晶胞体积  $V$  逐渐减小， $V$  的收缩比例为 3.4%；通过测试磁矩对温度的曲线可确定磁相转变温度，结果表明随着 Co 的增加居里温度呈下降趋势， $Fe_2B$  居里温度为 1017 K，当 Co 的替代量为 1.0 时， $Co_2B$  居里温度降为 450 K；当  $x=0.0$  时， $Fe_2B$  化合物显示了较高的磁化强度值，达到  $173 \text{ Am}^2/\text{kg}$ ，随着 Co 掺杂量增加磁化强度呈现逐渐降低的趋势，当  $x=0.5$  时磁化强度约为  $122 \text{ Am}^2/\text{kg}$ ，当  $x=0.9$  时磁化强度为  $67 \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。结果显示，该化合物的居里温度和磁化强度分别可以在 1017K-450K、 $173 \text{ Am}^2/\text{kg}$ - $67 \text{ Am}^2/\text{kg}$  大范围内自由调控，这对改善化合物的性能、提高其应用价值具有较大的参考价值。

#### D02-PO-05

##### 掺银提高多晶 $La_{0.67}(Ca_{0.24}Sr_{0.09})MnO_3$ 陶瓷的室温 MR 和 TCR

孙涛，刘阳，吉福泉，刘翔\*

昆明理工大学

通过溶胶-凝胶法制备多晶  $La_{0.67}(Ca_{0.24}Sr_{0.09})MnO_3$ :mol%Ag<sub>x</sub> (LCSMO:Ag<sub>x</sub>,  $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  和  $0.5$ ) 陶瓷。研究了银掺杂对其微结构、电/磁输运性质、电阻温度系数 (TCR) 和磁阻 (MR) 的影响。X 射线衍射 (XRD) 显示所有样品都以  $Pnma$  空间群的正交结构结晶。随着掺银含量增加，主衍射峰 (121) 向低角度偏移，这是因为较大离子半径的  $Ag^+$  取代 A 位离子 ( $Ca^{2+}$  或  $Sr^{2+}$ )。这反过来又引起了晶格的轻微膨胀并改善了  $Mn^{4+}$  离子浓度。同时，晶粒尺寸逐渐增大，晶界 (GBs) 减小，电阻率降低，室温下的金属-绝缘体转变温度 ( $T_{MI}$ ) 几乎保持不变。另一方面，随着银掺杂量的不断增加，TCR 和 MR 值先增加后减小。在银掺杂量为 0.2 时达到最大值，分别为  $12.5\%K^{-1}$  和 45.0%。这些发现表明 LCSMO 材料应用在室温下的光电 (非制冷测辐射热计或红外探测器) 或磁性器件 (非制冷磁传感器) 可能有很大前景。