

十周年专栏

## 电控磁效应的研究进展

宋 成, 李 凡, 顾有地, 张瑞琪, 周效枫, 潘 峰

(清华大学材料学院, 北京 100084)

**摘 要:** 电控磁效应是利用电场调控材料磁学特性进而实现数据存储的一类物理效应, 具有丰富的物理内涵和广阔的应用前景, 因而受到越来越多研究者的关注。文章重点阐述了载流子调控、应力调控、轨道重构和电化学调控等主要电控磁机制的最新研究进展, 包括电场作用下超薄铁磁金属中载流子浓度和电子结构的变化对磁性调控的核心作用、铁电/铁磁双层结构中中铁电层晶格变化诱导应力对铁磁层磁学行为的影响、氧化物异质结界面过渡金属元素 3d 轨道间的电荷转移和轨道重构对磁性调控的规律、以离子液体或具有高氧离子迁移的氧化物为栅极的体系中氧化还原反应对磁性调控的途径。文章还概述了电控磁效应在磁隧道结和纯电场作用下 180° 磁化翻转等方面的应用情况, 以及在推动低功耗自旋电子学器件发展方面所扮演的角色; 讨论了电控磁效应与反铁磁自旋电子学结合所开展的最新研究工作。

**关键词:** 电控磁效应; 自旋电子学; 电控轨道效应; 磁电耦合; 离子液体

**中图分类号:** TP333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)08-0563-12

## Recent Advances on Electrical Control of Magnetism

SONG Cheng, LI Fan, GU Youdi, ZHANG Ruiqi, ZHOU Xiaofeng, PAN Feng

(School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Electrical control of magnetism (ECM) is defined as a method to modulate magnetism intrinsically by electrical means, providing an alternative avenue for data storage. ECM is attracting increasing interest and exciting significant research activity due to its profound physics and enormous potential for applications. This review article aims to provide a comprehensive review of recent progress in ECM, including materials, device configuration, magnetoelectric performance, and development trend. We summarize the recent understanding of the mechanisms responsible for the observed ECM behavior, including carrier density modulation, strain control, orbital reconstruction and electrochemical effect. That is, carrier density modulation and electronic structure variation are mainly responsible for the ECM in the ultrathin thin ferromagnetic metals; in ferroelectric/ferromagnetic bilayers the strain introduced by the piezoelectric behavior of the ferroelectric layer accounts for the magnetoelectric coupling; the charge transfer and orbital reconstruction between 3d transition-metal ions affect the ferromagnetic behaviors at the oxide interface; the oxygen ions motion provides an avenue for the ECM in the system with high oxygen mobility or ionic liquid gating. Furthermore, we describe the potential applications of ECM in magnetic tunnel junctions and 180° magnetization switching with pure electric field effect, and the role of ECM on the spintronics with low power consumption. Finally, we discuss the recent progress of the works combining ECM and antiferromagnetic spintronics.

**Key words:** electrical control of magnetism; spintronics; electrical control of orbital; magnetoelectric coupling; ionic liquid

### 1 前 言

磁化翻转和磁性调控是磁性材料在信息工业中应用的基础。通常来说, 磁性材料制备完成后, 其磁学性能

就很难发生本质的改变。虽然在外磁场作用下可实现磁化的翻转, 但是磁性材料的本身特性并不发生改变, 而且磁场操作下的高能耗问题限制着技术的进一步发展。另一方面, 电流驱动的磁化翻转, 作为一类新的磁存储手段, 同样面临着能耗高的问题, 例如在当前相对成熟的基于自旋转移力矩的磁随机存储器中, 磁化翻转的临界驱动电流密度仍居高不下,  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> 的量级距离产业应用还有一定距离。因此发展能耗更低的磁存储技术成为当前信息技术发展的核心需求之一。电控磁效应利用外界电场对材料磁学特性进行调控, 进而实现数据的存

收稿日期: 2018-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51571128)

第一作者: 宋 成, 男, 1982 年生, 副教授

通讯作者: 潘 峰, 男, 1963 年生, 教授, Email:  
panf@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.08.01

储。电场调控技术与半导体集成电路具有良好的兼容性,而且调控过程中,磁性的改变不需要外磁场,电场作用过程所需的电流很小,有望大幅降低器件功耗,进而推动高速度、低能耗和非易失性的存储器的发展<sup>[1,2]</sup>。

2000 年,日本东北大学 Ohno 研究组最先在稀磁半导体(In, Mn)As 中观察到电控磁现象,并将其归因于电场对与稀磁半导体磁性密切相关的载流子浓度的调控<sup>[3]</sup>。随后,电控磁效应的材料体系拓展到了诸多磁性金属,在 FePt、FePd、Fe 和 Co/Pt 等体系实现了电场对矫顽力、居里温度、饱和磁化强度和磁各向异性等磁学性能的有效调控<sup>[4-6]</sup>。考虑到磁性金属层的电子对外界电场的静电屏蔽作用,磁性金属层的厚度一般非常小,仅为数个原子层的量级,以提高界面处的原子份额。为了便于观测电控磁效应,通过界面匹配使磁性层具有垂直磁各向异性(如 Co/Pt 异质结),进而可利用不同门电压下反常霍尔效应的变化来表征电场调控下磁性的变化<sup>[6]</sup>。磁性金属体系电控磁效应研究发现电场下磁性金属表面态(电子结构)的变化是金属体系磁性转变的主要原因,不同于稀磁半导体中电场对载流子浓度的调控,可将二者分别归为界面效应与体效应<sup>[4-6]</sup>。在磁性金属体系电控磁研究开展的同时,电场对氧化物磁性的调控作用也有广泛的报道<sup>[7]</sup>。此外,从某种程度上来说,传统的铁电/铁磁双层膜体系的逆磁电耦合效应也可以归为电控磁效应的范畴<sup>[7,8]</sup>,为近期电控磁研究的开展提供了丰富的实验基础与经验。

随着电控磁效应研究的开展与深入,研究者已提出多种器件实现类型,其中主要的是类场效应晶体管和磁隧道结两类<sup>[1,2]</sup>。相应地,在机制认知方面,新的电控磁机制不断被提出,在普遍承认的应力机制、载流子调控机制和交换偏置机制的基础上,近年来陆续提出轨道调控和电化学机制两类新的机制,丰富了电场调控材料磁性的手段<sup>[1]</sup>。众多机制之间并非完全独立,在一些电控磁体系中,存在多种机制共同作用的情况。因此,深刻认识电控磁机制是提升电控磁效应并推动器件设计与实际应用的重要一环。考虑到各类调控机制的近期进展情况,本文将重点讨论载流子调控机制、应力机制、轨道调控和电化学机制在电控磁效应中扮演的重要角色。由于电控磁效应研究的核心目标是实现低功耗的磁性存储<sup>[1,2]</sup>,因此,电控磁的研究不仅仅局限于对电场下磁性变化的研究,还需要探索在磁隧道结和类场效应晶体管器件中实现电场辅助或者纯电场下磁化翻转的实际器件应用<sup>[9-11]</sup>。为此,本文也将重点评述电控磁效应在应用方面的研究进展。必须指出的是,由于电控磁效应是当前国际上磁学研究的热点之一,成果丰硕,因此,本

综述很难对各项研究成果进行逐一评点。

## 2 载流子调控机制及电控磁在磁隧道结中的应用

众所周知,载流子浓度与材料的磁性紧密相关,因此调控载流子浓度可以有效调控磁性。本节将介绍超薄铁磁金属中电场作用下载流子浓度和电子结构变化引起的磁性相关行为的变化,并重点介绍最近几年在相关应用方面的进展。对于普通的块体金属材料,由于自由电子浓度高导致的静电屏蔽效应,电场作用将被限制在表层几个原子层厚度的范围内,因而对整个材料的性能影响甚微。而对于超薄铁磁金属而言,电场下表面磁性和磁晶各向异性的改变十分显著,使电场对磁性的有效调控成为可能。Chiba 等<sup>[6]</sup>首先在室温下观测了电场对超薄 Co/Pt 的居里温度的调控,其中,为了提供足够大的电场,采用了 Pt/Co/氧化物绝缘层/金属电极的场效应晶体管器件构型。随着电场调控手段的丰富,在氧化物绝缘层和门电极之间施加离子液体成为获得大电场的另一有效手段,由于离子液体和氧化物界面处在电压下会形成超薄的双电层,因而可以在较小的门电压下获得较大的电场。利用离子液体施加大电场,研究者在 Co/Ni 体系中同样实现了电场对居里温度的调控<sup>[12]</sup>。在这两种手段调控磁性的过程中,均观测到正电场下居里温度升高,而负电场下居里温度降低。这一变化可归因于铁磁金属的居里温度与其磁晶各向异性密切关联,即电场下屏蔽电荷密度的变化会导致费米能级附近的能带结构发生改变,因而材料的磁晶各向异性变化,居里温度随之改变<sup>[13]</sup>。

为了开发电控磁效应在低功耗磁存储中的潜在应用价值,磁性金属体系电场作用下的磁化翻转研究受到研究者广泛关注,而磁隧道结的高质量制备为相关研究提供了良好的器件基础。在无其他因素影响时(例如电流诱导的自旋转移力矩效应),电场翻转磁矩可通过磁矩进动完成。如前所述,电场下界面的磁各向异性改变,使易磁化轴发生变化,进而导致磁矩进动,如图 1a 所示。利用这样一种电压脉冲作用下磁矩的一致进动,最早在 Fe/MgO/FeCo 隧道结中实现了磁化的一致翻转,并且通过控制电压脉冲的脉宽大小可实现磁矩在不同易轴之间的切换,进而使隧道结产生稳定可逆的高低阻态转化<sup>[14]</sup>。由于充放电过程的能量  $E_c$  仅由隧道结的电容和两端的电压决定,即  $E_c = CV^2/2$ ,而翻转过程导致的能量耗散主要源于焦耳热  $E_j = (E_c t_{MgO})^2 t/R$ ,其中  $t_{MgO}$ 、 $t$  和  $R$  分别为 MgO 隧穿层厚度、翻转时间和结电阻,因此采用较大的结电阻有利于能耗的降低。2016 年,Ohno<sup>[15]</sup>和王

康隆<sup>[16]</sup>研究小组分别独立地在较大的结电阻下实现了能量耗散的降低, 写入能量仅为 6 fJ/bit, 达到了与 CMOS 工艺兼容的水平。

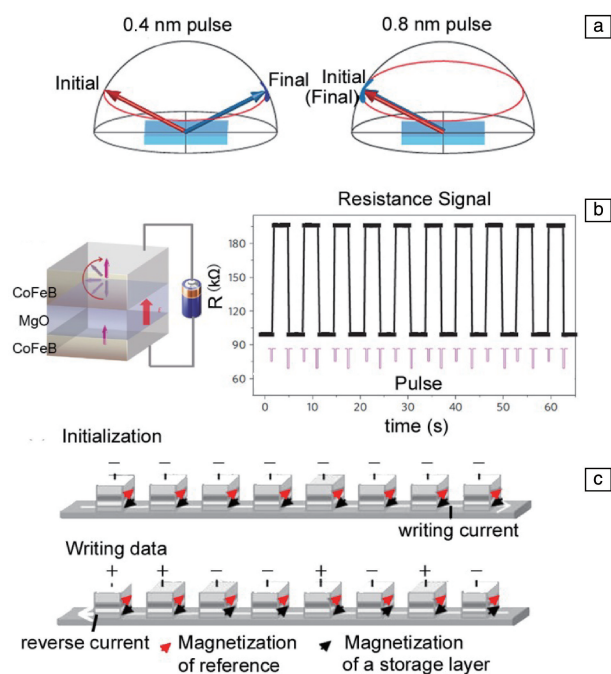


图1 不同脉宽电压脉冲对磁矩进动终止状态的调控<sup>[14]</sup>(a), CoFeB/MgO/CoFeB 隧道结电场辅助的基于自旋转移力矩的磁化翻转<sup>[9]</sup>(b), 电场辅助的基于自旋轨道力矩的字节数据写入过程<sup>[17]</sup>(c)

Fig. 1 Control of the final state of magnetization precession via voltage pulses with different width<sup>[14]</sup>(a), electric field-assisted magnetization switching based on spin transfer torque<sup>[9]</sup>(b), writing process of one byte data via electric field-assisted magnetization switching based on spin orbit torque<sup>[17]</sup>(c)

然而, 上述电场翻转磁矩的方案在实际应用中仍然面临很大挑战。由于磁化翻转依赖于磁矩进动机制, 这种翻转是单极型的, 即  $0 \rightarrow 1$  和  $1 \rightarrow 0$  的翻转过程可由同一电压脉冲导致, 为了实现特定的磁化翻转, 对脉宽要求十分苛刻。因此, 在探究纯电场实现磁性金属磁化翻转的同时, 研究者开始关注自旋转移力矩和自旋轨道力矩这两类相对成熟的电流驱动的磁化翻转技术, 探索基于电场降低临界翻转电流密度的低能耗存储技术, 以发挥电场在降低功耗方面的优势。例如, 利用电场对磁晶各向异性的调控, 即电场对矫顽力的调控, 研究者实现了电场辅助下电流驱动的磁化翻转。2012年, Wang等<sup>[9]</sup>在垂直磁各向异性 CoFeB/MgO/CoFeB 隧道结中实现了电场辅助的基于自旋转移力矩效应的磁化翻转。施加偏压时, 由于上下两层 CoFeB 所受电场的方向反号, 因此二者矫顽场的变化相反。施加负偏压时, 上层 CoFeB

矫顽力减小, 下层增大; 正偏压反之。因此通过外加合适的磁场( $H_{\text{bias}} = 4378 \text{ A/m}$ , 垂直膜面方向)和单一极性的交替电压脉冲( $-0.9 \text{ V}$  和  $-1.5 \text{ V}$ ), 体系实现了平行态与反平行态之间的切换(图 1b)。通过电场的辅助, 利用自旋转移力矩效应翻转磁矩的临界电流密度仅为  $10^4 \text{ A/cm}^2$ , 比通常的  $10^6 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$  小了 2~3 个数量级, 大大降低了磁化翻转过程的能耗。

与此同时, 基于自旋轨道力矩的电流驱动磁化翻转也是近年来的一大研究热点, 与自旋转移力矩相比, 该机制下所需的电流密度可能更小, 且在应用于磁随机存储器时具有数据写入与读出互不干扰的优势。因此, 电场调控自旋轨道力矩效应的相关工作也得以开展。例如, 日本东芝公司在电场调控磁各向异性与自旋轨道力矩效应翻转磁矩的结合方面取得了重要进展<sup>[17]</sup>。图 1c 展示了基于自旋轨道力矩的电场辅助磁化翻转在一个字节单元的写入过程, 其中一个字节由 8 个隧道结构成, 每个隧道结对应于一个比特。每个比特都可分别通过施加偏压来改变电流翻转的势垒: 负偏压减小势垒, 电流可实现信息的写入; 正偏压增大势垒, 阻碍电流下的信息写入。写入过程需要两个电流脉冲来完成: 初始状态下, 每一隧道结都被施加负偏压, 使其处于可以被电流翻转的状态, 某一流向的电流将所有比特写为“1”; 接下来, 改变电流流向, 并根据信息写入需求设定不同比特的偏压方向, 负偏压的比特被写为“0”, 正偏压的比特保持“1”, 由此实现了利用自旋轨道力矩效应写入数据的过程。在读出数据时, 所有比特都被施加正偏压, 以此避免误写的干扰。在这一构型中, 数据的写入发生在负偏压下, 势垒较小, 所需的电流密度可以减小一半; 而且在两个电流脉冲下, 一次可完成八个比特的同时写入, 每个比特所需电荷量仅为单一比特写入的四分之一, 因此总的能耗有望降低为初始的八分之一。与此同时, Suzuki 等<sup>[18]</sup>近期在 Fe/MgO/V 隧道结中观测到 Fe/MgO 界面上电压诱导的力矩效应, 通过调节 MgO 的厚度, 获得的转矩最大可到  $2.8 \times 10^{-5} \text{ J/(V} \cdot \text{m}^2)$ , 为基于电场调控的低功耗磁化翻转的探索提供了新的视角。

总的来说, 对于铁磁金属体系, 通过电场对载流子和电子结构的调控, 可以实现对磁晶各向异性的调控, 宏观上引起矫顽力和居里温度等的变化。基于磁晶各向异性改变所引起的磁化易轴的改变, 可以实现磁矩进动机制下的电场驱动的磁化翻转。基于电场下矫顽力的变化, 电场可以与电流共同作用, 显著减小自旋转移力矩效应和自旋轨道力矩效应翻转磁矩的临界电流密度。电场已在低功耗磁存储方面展现出潜在的研究价值, 而对于进一步降低能耗、探寻一种更加简单易行、与半导体



工艺兼容的纯电场驱动的磁化翻转技术, 仍存在很大研究空间。

### 3 应力机制及电控磁在纯电场翻转中的应用

在现代信息存储技术发展的过程中, 无磁场下的磁化翻转一直是一个热门的研究领域, 对推动器件小型化具有重要研究价值, 其中, 电场驱动的磁化翻转尤其受到关注。然而, 在翻转过程中如何克服无磁场或无自旋转移力矩下  $90^\circ$  磁化翻转的限制, 成为电场驱动磁化翻转所面临的巨大挑战。近年来, 通过研究者的不懈努力, 若干研究工作相继报道了基于应力机制等手段的纯电场下的磁化翻转, 推动了无磁场下的磁化翻转研究的进展。

多铁材料作为一类集磁电性能于一身的典型材料, 为利用电场调控磁化提供了有效途径。考虑到器件的室温应用, 单相多铁材料  $\text{BiFeO}_3$  因其室温下的磁电耦合特性备受关注。 $\text{BiFeO}_3$  中的弱铁磁性可归因于 DM (Dzyaloshinskii-Moriya) 相互作用下反铁磁磁矩排列时的倾斜<sup>[19, 20]</sup>, 这意味着其磁化方向取决于 DM 矢量的方向。考虑到热力学基态的对称性, 基于 DM 矢量的直接的  $180^\circ$  翻转是无法实现的<sup>[21]</sup>。然而近期研究表明, 通过两步翻转过程, 可实现电场驱动下 DM 矢量的  $180^\circ$  翻转, 如图 2a<sup>[10]</sup>。在以  $\text{DyScO}_3$  基片为边界条件的低能翻转路径计算中发现,  $\text{BiFeO}_3$  铁电极化  $180^\circ$  翻转的过程中 Bi 离子的位移可分为连续两步的翻转, 对应于面内的  $71^\circ$  翻转和面外的  $109^\circ$  翻转。有意思的是, Bi 离子位移发生改变的同时伴随着氧八面体旋转的旋转轴的改变, 进而导致

了 DM 矢量的翻转和最终磁化的  $180^\circ$  翻转。考虑到  $\text{BiFeO}_3$  室温多铁性在电场驱动下  $180^\circ$  磁化翻转方面的潜在应用价值, 基于  $\text{BiFeO}_3$  多铁体系的电场调控磁性的相关研究在多铁材料领域持续吸引着研究者的兴趣<sup>[22, 23]</sup>。

在利用多铁材料自身磁电耦合特性的同时, 多铁或铁电与铁磁构成的磁电耦合异质结也成为探索电场驱动磁化翻转的核心体系之一。一方面, 基于多铁材料与铁磁层之间的磁电耦合, 磁化的电场翻转在  $\text{BiFeO}_3$  与铁磁材料的异质结中得以实现。例如, 在  $\text{BiFeO}_3/\text{CoFe}$  的多铁异质结中, 利用电场下  $\text{BiFeO}_3$  倾斜磁矩的翻转, 可实现 CoFe 磁化的直接的可逆的  $180^\circ$  翻转<sup>[24]</sup>, 而在  $\text{BiFeO}_3/\text{Co}$  的异质结中观测到在单步电极化翻转过程中 Co 的面内磁矩的  $90^\circ$  转动<sup>[25]</sup>。另一方面, 利用铁电薄膜与基片在电极化过程中产生的应力变化, 可有效地改变材料的易磁化轴, 为材料在无磁场下的磁化转动与翻转提供了可能。研究发现, PMN-PT(001) 基片在电极化过程中的应力变化会导致 CoFeB 易磁化轴发生可逆的非易失性的  $90^\circ$  转动, 进而在  $400 \text{ A/m}$  的小磁场辅助下可实现电场驱动下的  $180^\circ$  可逆磁化翻转。而在 PMN-PT(011)/CoFeB/ $\text{AlO}_x$ /CoFeB 异质结中, 利用该取向基片在面内方向压电系数的反号特性, 电极化过程中薄膜在不同方向上会分别受到基片的压应力和拉应力的作用, 因而基于逆磁致伸缩效应, 可有效改变薄膜的易磁化轴, 使 CoFeB 的磁化在原有基础上发生转动, 并由隧道磁电阻值的变化读出<sup>[26]</sup>。随后, 在 CoFeB/IrMn 异质结中, 在 PMN-PT(011) 基片引入的单轴磁各向异性的基础上, 利用铁磁、

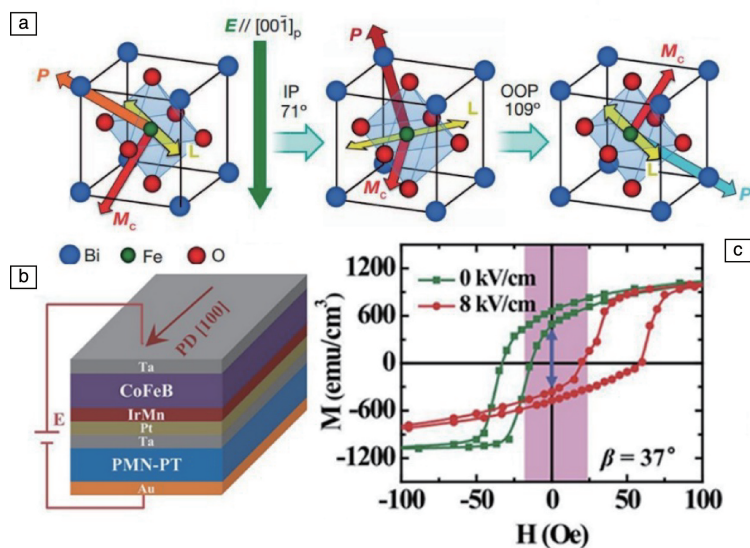


图 2  $\text{BiFeO}_3$  体系基于磁电耦合的磁化翻转的示意图<sup>[10]</sup> (a), 基于应力调控的磁化翻转的结构示意图 (b) 与不同电场条件下的磁滞回线 (c)<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Illustration of magnetization switching in  $\text{BiFeO}_3$  via magnetoelectric coupling<sup>[10]</sup> (a), sketch of magnetization switching via strain manipulation (b) and hysteresis loops under different electric fields (c)<sup>[11]</sup>



反铁磁之间的交换耦合引入额外的单向磁各向异性, 可使体系的交换偏置展现出丰富的角度依赖性, 进而通过对角度的筛选, 在特定角度下实现了零磁场下电场驱动的磁化翻转, 如图 2b 和 2c<sup>[11]</sup>。

应力可以改变磁性层的易磁化轴, 为电场驱动下的磁化翻转提供了有效途径, 而根据理论预测, 通过器件设计引入形状磁各向异性, 也可实现电场驱动下的 180° 磁化翻转。例如, 基于 100 nm 以下尺寸的花型或方形的纳米磁体所展现的四次对称性, 通过各向异性应力与形状各向异性之间角度的微小差异, 可以引入微小的能量势垒, 使磁化在电场的作用下在不同的易轴之间切换, 进而通过一系列连续的 90° 翻转实现可逆的 180° 磁化翻转, 如图 3a 和 3b 所示<sup>[27, 28]</sup>。

磁性层间耦合现象一直在自旋电子学的相关研究中扮演着重要角色, 根据理论预测, 基于对界面自旋电子反射系数的控制或者对多层膜体系电荷和磁化的调控, 有望利用外加电场来改变磁性多层膜的层间耦合状态, 进而有效实现电场驱动下的磁化翻转<sup>[29, 30]</sup>, 这无疑将为低能耗磁化翻转的实现提供新的选择。近期研究表明, 在 CoFeB/GdO<sub>x</sub>/CoFeB 的垂直磁化隧道结中, 利用体系中界面磁性、隧穿层氧空位的可迁移性和 GdO<sub>x</sub> 层中大的磁近邻致磁化效应的协同作用, 在实验上成功实现了电压对磁性层间耦合的直接调控, 在电压的作用下, 隧道结磁性层层间耦合的符号和幅度发生显著变化, 为基于电场对磁性层间耦合调控的低功耗磁化翻转的相关研究开辟了新的道路 (图 3c)<sup>[31]</sup>。

在探索电场驱动下磁化翻转的过程中, 研究者也在不断探寻新的材料体系。例如, 近年来, 研究者在对 BiFeO<sub>3</sub> 块体和薄膜的研究过程中, 开始关注于 (111) 取向的外延 BiFeO<sub>3</sub> 薄膜: 一方面, 实验上发现 BiFeO<sub>3</sub> (111) 薄膜中存在与晶体学单斜孪晶结构发生磁弹耦合的亚微米级反铁磁畴, 为基于电极化过程应力调控机制的磁化翻转提供了新的可能<sup>[32]</sup>; 另一方面, 基于非共振 X 射线磁散射技术, 研究者观测到 BiFeO<sub>3</sub> (111) 薄膜中磁极性 (摆线旋转方向) 在电场下的翻转, 为电场调控磁结构的探索开辟了新的道路<sup>[33]</sup>。与此同时, 混合非常规铁电材料的出现, 为室温磁电耦合的研究提供了新的材料体系, 随着研究的开展, 该体系中电场操控下的磁化翻转也受到研究者关注。近期的理论计算结果表明, 通过特定的五态翻转过程, 可实现磁化的完全翻转, 尽管过程仍然很复杂, 但为电场驱动下的磁化翻转指出了新的探索方向<sup>[34]</sup>。此外, 在反铁磁自旋电子学迅猛发展的趋势下, 基于反铁磁基材料的电场驱动磁化翻转也成为一個有趣的研究方向, 例如, 基于 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反铁磁外延薄膜中因

晶格失配而产生的亚铁磁序, 研究者提出利用磁电耦合机制可实现电压脉冲对反铁磁序的可逆循环调控, 推动了纯反铁磁基磁电随机存储器的发展<sup>[35]</sup>。

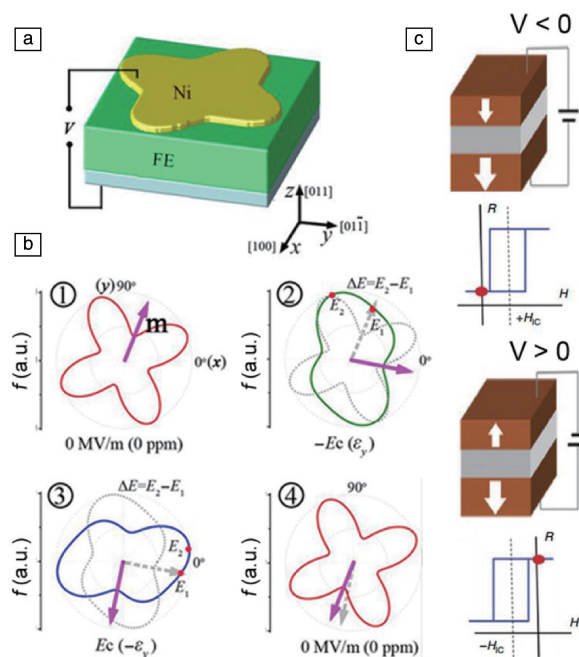


图3 基于形状各向异性的磁化翻转的结构示意图 (a) 与翻转过程 (b)<sup>[28]</sup>, 基于磁性层间耦合的磁化翻转示意图 (c)<sup>[31]</sup>

Fig. 3 Sketch (a) and process (b) of magnetization switching based on shape anisotropy<sup>[28]</sup>, illustration of magnetization switching based on interlayer coupling (c)<sup>[31]</sup>

## 4 基于轨道重构的电控磁效应

基于晶格 (应力)、电荷 (载流子) 和自旋 (交换偏置) 的电控磁机制是传统的且大家比较熟知的几类调控机制。然而从物理对称性上讲, 在强关联体系的 4 个自由度 (晶格、电荷、自旋、轨道) 的大家庭中, 基于轨道的电控磁效应的相关机制一直缺失, 未被人关注。“轨道”是指固体中电子云的形状, 属于量子力学中波函数的概念范畴。电子通过库仑力与原子核结合时波函数会存在不同的形状, 即具有不同的轨道态。考虑到原子间的电荷转移和磁各向异性与轨道占据状态之间紧密的联系, 轨道占据状态在调控电子结构和磁性等方面具有潜在的应用价值<sup>[36]</sup>。例如, 在异质氧化物界面和氧化物/金属界面, 邻近的金属原子或阳离子之间基于氧离子的电荷转移和轨道杂化/重构会诱导界面形成共价键, 进而产生众多奇异的电子结构和有趣的物理现象<sup>[37]</sup>。尤其对于铁电材料与其他材料的耦合界面, 铁电材料中特征的极化翻转伴随着带电离子的位移, 而界面处离子距离在电场下的变化有望用于操纵界面处的轨道重构, 为实现基于轨道重

构的电控磁提供了一个潜在探索方向。

在超薄铁磁金属与铁电氧化物异质结中伴随着轨道变化的电控磁手段曾被理论提出。Duan 等理论上提出<sup>[38]</sup>, 在 Fe/BaTiO<sub>3</sub>(BTO) 异质结中 Fe 的磁矩倾向于与 Ti 的磁矩反平行排列。随着铁电极化状态的改变, Ti 移向或远离氧八面体的中心, 会导致在 Fe 和 Ti 界面处, 通过 O-2p 轨道形成的 3d 轨道杂化/重构程度随着 Fe-Ti 距离的变化而变化, 进而可以通过 BTO 铁电极化的翻转来调节轨道相关的磁性。然而由于铁磁金属的轨道占据状态难以直接表征, 在实验上限制了这方面的深入发展。

随着薄膜制备和表征技术的发展, 高质量的铁磁/铁电异质结为基于轨道重构的电控磁研究提供了一个理想的平台, 而同步辐射光源的软 X 射线线二色谱技术 (XLD) 为过渡金属氧化物及其异质结中  $t_{2g}$ 、 $e_g$  轨道不同轨道占据状态的表征提供了一类极其敏感的探测手段<sup>[37, 39]</sup>。2015 年, 清华大学研究人员基于该探测手段成功地实验上实现了 La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub>(LSMO)/BTO 铁磁/铁电界面基于轨道重构的电控磁效应<sup>[40]</sup>。在 LSMO/BTO

异质结构中, 当 BTO 铁电极化向上和向下时, 高角度环形暗场模式下拍摄的扫描透射电子显微镜图像中可直接观察到 Ti 离子分别远离和移向 LSMO<sup>[41]</sup>。相应地, 由于界面 Ti-Mn 距离的变化, 界面处的面外方向的轨道杂化分别受到抑制和增强, 进而伴随着 Mn 的面内  $x^2-y^2$  轨道占据的增强和减弱, 如图 4a 所示<sup>[40]</sup>。利用 LSMO 轨道占据状态的改变, BTO 的铁电极化能显著地调控 LSMO 的居里温度和导电性, 如图 4b 所示。与此同时, 异质结面内磁电阻 (pMR) 的测试发现, BTO 极化向上时 pMR 比极化向下时显著增大, 为极化向上状态下面内轨道的占据增多的观点提供了有力支持, 如图 4c 所示。借助于 X 射线线二色谱对轨道占据状态的表征 (如图 4d), 直接观测到铁电极化从极化向上到极化向下变化时, 优先的轨道占据状态由  $x^2-y^2$  变为  $3z^2-r^2$ , 为基于轨道重构的电控磁机制提供了直接的实验证据<sup>[7]</sup>。在此基础上, 利用界面处 Ti-O-Mn 共价键在通过铁电极化过程中的形成和断开, 实验上构建出一类分子尺度的轨道开关, 可用于操纵块体薄膜磁电性能的调控<sup>[41]</sup>。

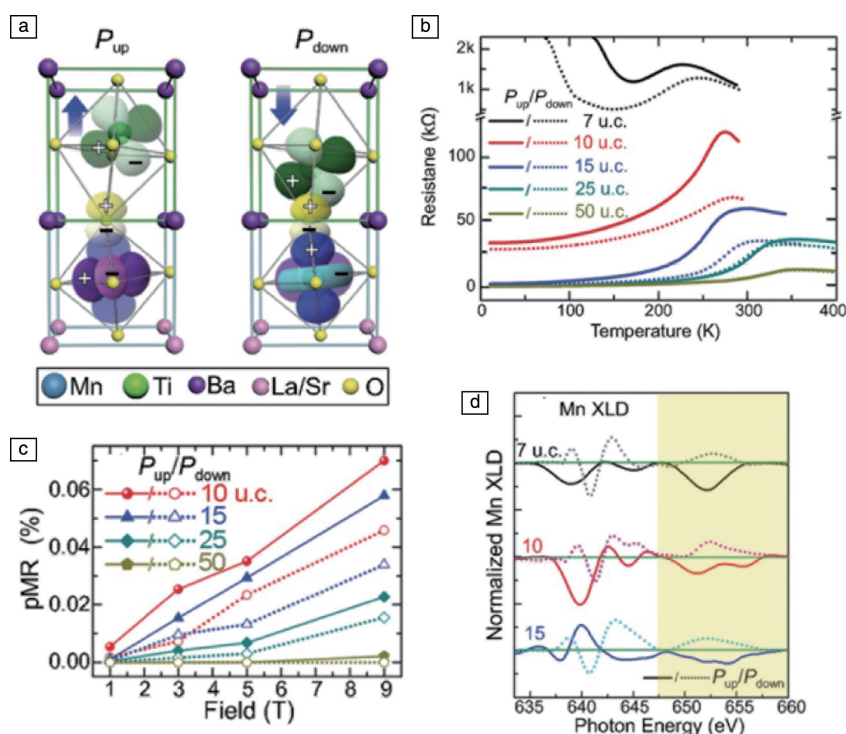


图 4 基于轨道重构的电控磁效应: BTO 铁电极化向上和向下时在 BTO/LSMO 界面发生轨道重构以及形成共价键的示意图 (a); 不同铁电极化状态下 LSMO 厚度相关的电阻-温度曲线 (b); 不同铁电极化状态引起的不同磁场强度下 LSMO 厚度相关的面内磁电阻 (c); 不同厚度 LSMO 薄膜在不同铁电极化状态下 Mn 边的软 X 射线线二色谱 (d)<sup>[40]</sup>

Fig. 4 Electric-field control of magnetism based on interfacial orbital reconstruction; sketch for the interfacial orbital reconstruction and covalent bond formation at BTO/LSMO interface under polarization up ( $P_{up}$ ) and down ( $P_{down}$ ) states of BTO layer (a); temperature dependent resistance curves for different LSMO thicknesses under  $P_{up}$  and  $P_{down}$  states (b); pMR values as a function of magnetic field for LSMO of different thicknesses under  $P_{up}$  and  $P_{down}$  states (c); Mn-XLD for heterostructures with different LSMO thicknesses and polarization states (d)<sup>[40]</sup>

几乎同时, Preziosi 等<sup>[42]</sup>在  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3/\text{PbZr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_3$  的铁磁/铁电异质结体系中报道了电控轨道和电控磁矩的相关结果。他们利用软 X 射线二色谱和磁圆二色谱分别证明了电场作用下 Mn 的 3d 轨道各向异性 and 磁矩的非易失调控。Mn  $L_{2,3}$  边的软 X 射线吸收谱表明, 铁电极化翻转改变了载流子浓度, 进而导致了 Mn 3d 态  $t_{2g}$  和  $e_g$  轨道的分裂以及自旋磁矩的变化。虽然以上两个工作中采用了相反层序的异质结构, 但其中对磁学性能(如居里温度、磁电阻等)的电学调控都与轨道占据状态密切相关<sup>[40, 42]</sup>。此外, 磁性的变化还与铁电极化翻转过程引起的  $\text{MnO}_6$  八面体的极化扭转相关, 相关计算工作为此提供了理论支持<sup>[43, 44]</sup>。

需要指出的是, 相比于之前提出的 3 种传统的调控机制, 这种新型的基于轨道重构的电控磁或磁电耦合机制的理论和实验研究都还处在起步的阶段, 实验的相关报道仍局限于锰氧化物体系, 预计这种类型的机制未来会在更多的体系中被观察到。例如, 2017 年, Liu 等<sup>[45]</sup>基于第一性原理计算, 研究了双钙钛矿  $\text{Sr}_2\text{CoMoO}_6$  (SCMO)/BTO 异质结在 BTO 不同极化状态下的磁电性能。计算表明通过改变 BTO 的铁电极化状态, SCMO 从反铁磁半导体转变为半金属。特别地, BTO 极化方向的改变不仅调控了界面磁性, 还改变了 Co-3d 的轨道占据状态。这种新颖的多重磁电耦合为新型自旋电子学器件和微电子器件的设计提供了诸多可能性。

## 5 基于电化学反应的电控磁效应

近年来, 随着凝聚态物理和自旋电子学的不断深入发展, 电控磁效应因其在高密度、低能耗存储方面的优势受到研究人员的极大关注, 如何获得更大的电场调控效应成为这一领域面临的一大问题。而离子液体和具有高氧离子迁移能力材料( $\text{GdO}_x$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$  增强  $\text{ZrO}_2$ 、掺杂的  $\text{LaGaO}_{3-x}$  和  $\text{SrCoO}_{2.5}$ ) 等新型栅极材料的出现为解决这一问题提供了途径。伴随着新的调控手段的出现, 基于电化学反应或者说离子(氧离子/氢离子)迁移的电控磁机制被提出, 为离子液体双电层器件等新型器件中体材料薄膜电场调控的非易失性提供了合理的解释<sup>[46, 47]</sup>。

以 LSMO 双电层器件为例, 离子液体中的阴阳离子在正(负)栅极电压的作用下分离并向相反的电极移动, 并在离子液体和 LSMO 界面形成具有相反配对电荷的双电层, 如图 5a 和 5b 所示。由于配对电荷的距离非常小, 双电层的电场非常高, 会导致离子液体和 LSMO 中的氧离子(氧空位)相互迁移, 进而实现对 LSMO 薄膜磁学性能的调控<sup>[41, 46, 47]</sup>。同时, 由于离子液体调控效果基于氧离子(氧空位)的迁移, 因此其电场作用具有非易失性, 为电学调控的非原位测试实验提供了极大的便利。例如, 2015 年 Cui 等利用离子液体的电场调控非原位地观测到电场下轨道占据状态的变化, 进而实现了对 LSMO 磁各向异性的非易失性调控, 如图 5c 和 5d 所示<sup>[46]</sup>。离子液

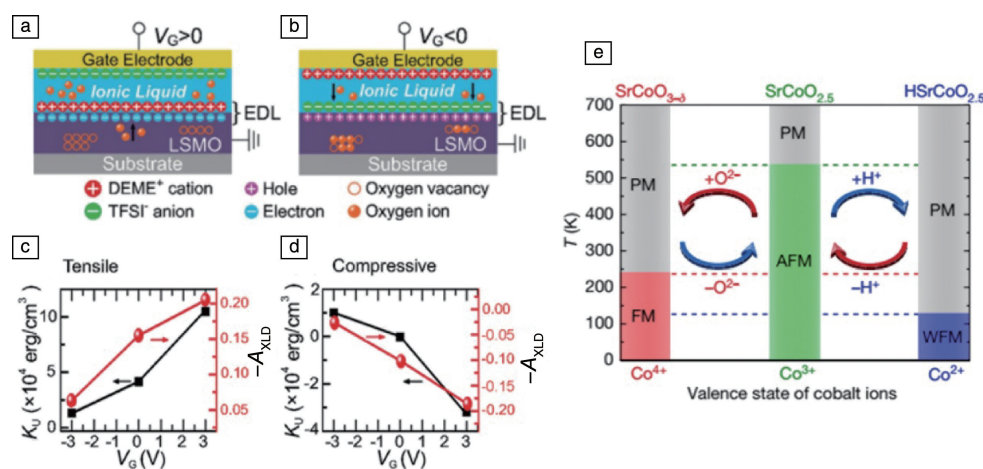


图 5 在单层薄膜中基于离子迁移的电控磁效应: 在正栅极电压(a)和负栅极电压(b)下以 LSMO 为沟道材料的双电层器件结构示意图<sup>[46]</sup>; LSMO 薄膜在拉应力(c)和压应力(d)情况下有效磁各向异性常数和负的 X 射线二色谱积分面积对离子液体栅极电压的依赖性<sup>[46]</sup>; 在  $\text{SrCoO}_{2.5}$  薄膜中基于氧和氢双离子迁移的电控三态相转变(e)<sup>[48]</sup>

Fig. 5 Voltage control of magnetism based on ions migration in single-layer films: schematic diagram of an electric double layer device with LSMO as the channel material under positive gate voltage (a) and negative gate voltage (b)<sup>[46]</sup>; dependences of effective anisotropy constant [ $K_U$  (left axis)] and negative X-ray linear dichroism integral area [ $-A_{XLD}$  (right axis)] on gate voltages for the case of tensile strain (c) and compressive strain (d)<sup>[46]</sup>; electric-field control of tri-state phase transformation with the migration of oxygen and hydrogen ions in  $\text{SrCoO}_{2.5}$  films(e)<sup>[48]</sup>



体电场作用下轨道占据状态调控的非易失, 印证了其氧离子迁移的调控机制, 而非简单的载流子浓度调控<sup>[41, 46]</sup>。需要说明的是, 离子液体双电层器件中, 静电掺杂和氧离子迁移机制并非完全对立的, 二者往往共存于同一体系中, 其相对强弱取决于电压的大小。例如, 在基于  $\text{La}_{0.74}\text{Sr}_{0.26}\text{MnO}_3$  的磁电超级电容器的性能调控<sup>[49, 50]</sup>、 $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-\delta}$  的磁性调控<sup>[51]</sup>、金属 Co 薄膜界面磁性态的调控<sup>[52]</sup>、人工反铁磁  $\text{FeCoB}/\text{Ru}/\text{FeCoB}$  和  $(\text{Pt}/\text{Co})_2/\text{Ru}/(\text{Co}/\text{Pt})_2$  多层膜 RKKY 作用的调控<sup>[53]</sup> 等研究中, 均观测到两种机制的共存。

目前基于离子迁移的电控磁效应的研究主要集中于单个离子的演化和控制上(例如, 氧、氢或锂离子)。2017 年, Yu 研究组<sup>[48]</sup> 首先从实验上实现了基于双离子(氧和氢)迁移的可逆非易失性电控三态相转变, 如图 5e 所示。作为模型材料, 钙钛矿结构的反铁磁  $\text{SrCoO}_{2.5}$  具有良好的有序氧空位通道和混合价态的磁性钴离子, 为结构相转变和磁性相转变的控制提供了有利的条件<sup>[48, 54, 55]</sup>。在离子液体调控材料性能的研究中发现, 在负电压下离子液体中的氧离子发生迁移并进入薄膜, 形成具有钙钛矿结构的铁磁金属相  $\text{SrCoO}_{3-\delta}(\text{SCO})$ , 而正电压下氢离子发生迁移并进入薄膜, 形成具有新结构的弱磁绝缘相  $\text{HSrCoO}_{2.5}$ 。在相转变发生的过程中, 还伴随着丰富的电致变色和磁电效应, 为探索具有丰富功能与应用的多态相变的电场控制开辟了途径<sup>[48]</sup>。

此外, 在一些具有高氧离子迁移能力的氧化物材料和铁磁金属组成的异质结中, 也报道了基于电化学机制的电控磁效应。例如, 在  $\text{Co}/\text{GdO}_x$ <sup>[56, 57]</sup> 异质结构中,  $\text{GdO}_x$  是氧离子迁移的良好导体, 在外加电场作用下氧离子靠近或远离邻近的 Co 层, 诱导界面 Co 发生氧化还原反应, 进而导致界面 Co 层的氧化状态和磁性发生变化。有意思的是, 近期研究发现, 在  $\text{Co}/\text{SrCoO}_{2.5}$  异质结构中, 电场作用下的氧离子迁移和演化仅发生在  $\text{SrCoO}_{2.5}$  层中, 界面上并无氧化还原反应的发生, 意味着氧化物  $\text{SrCoO}_{2.5}$  仅作为氧离子调控的栅极材料, 电场作用下界面氧离子化学计量比的变化调控了界面附近 Co 原子之间的磁相互作用, 进而获得了可控的磁电耦合效应<sup>[58]</sup>。

如前所述, 在很多单层氧化物薄膜器件中, 利用电场调控氧空位进而改变氧化物结构与性能的相关探索已广泛开展。然而, 在大量实际或潜在应用中(如固体氧化物燃料电池、阻变存储器和多铁隧道结), 氧化物双层或多层膜结构发挥着更为核心的作用, 因此相应的氧离子调控具有极大的研究价值。由于氧离子(氧空位)复杂的层间传输行为, 目前研究者对于电场下氧化物多层膜结构中性能的变化一直没有清晰的认识。2017 年, 清华大学团队成员在双层磁性薄膜中基于氧离子迁移的离子液体电控磁做了新的尝试, 薄膜器件结构如图 6a 所示。作为典型系统,  $\text{SrCoO}_{3-x}(\text{SCO})$  和  $\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{MnO}_{3-y}(\text{LSMO})$  不仅具有与氧化状态相关的丰富的相结构, 且对于结构

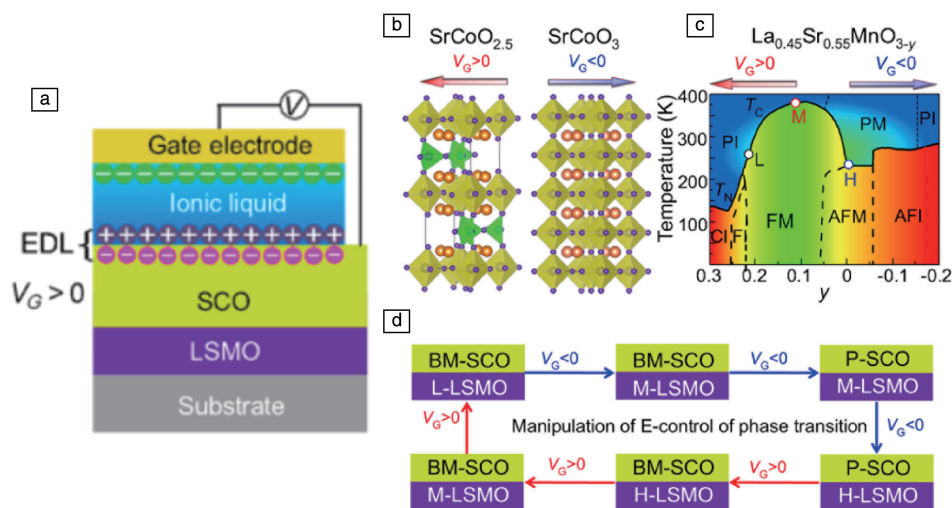


图 6 在 LSMO/SCO 异质结中基于氧离子(氧空位)迁移的电控磁效应: 用于离子液体电场调控 ( $V_G > 0$ ) 的双层膜器件截面示意图(a);  $\text{SrCoO}_{2.5}$  和  $\text{SrCoO}_3$  的晶体结构与门电压相关性(b);  $\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{MnO}_{3-y}$  的电子相图随  $y$  变化, 箭头表示栅极电压对 SCO 和 LSMO 相变的影响(c); 离子液体电场控制的 SCO/LSMO 异质结中的磁性相转变循环(d)<sup>[55]</sup>

Fig. 6 Electric-field control of magnetism based on oxygen ion (oxygen vacancy) migration in LSMO/SCO heterojunctions; schematic cross section view along the thin-film device for ionic liquid gating ( $V_G > 0$ ) (a); crystal structures of  $\text{SrCoO}_{2.5}$  and  $\text{SrCoO}_3$  and dependence on gate voltage(b); electronic phase diagram of  $\text{La}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{MnO}_{3-y}$  with varying  $y$  (c), the arrows indicate the effect of gate voltage on the phase transition of SCO and LSMO; sketch for the reversible manipulation of electrical control of the phase transition in SCO/LSMO heterostructures (d)<sup>[55]</sup>

缺陷化学和电子/离子导电性已有深入完善的理解,如图6b和6c所示<sup>[46, 48, 54, 55]</sup>。在此基础上,结合X射线吸收谱技术对轨道占据状态的表征,实验上观测到离子液体电场调控下SCO/LSMO异质结中的结构相和磁性相转变的可逆循环,如图6d所示。从实验和理论上证明了电场导致的氧空位形成与湮灭在不同氧化物层中具有优先选择性,其优先顺序由材料不同的氧空位形成能和吉布斯自由能共同决定<sup>[55]</sup>。这一结果不但实现了氧化物双层膜中磁性相变的可逆电场调控,而且为电场作用下氧化物异质结中氧空位的形成与湮灭提供了新的认识,从薄膜器件结构上来说,将促进未来基于离子迁移的电控磁效应在复杂的双层膜和多层膜体系中应用的相关器件探索。

## 6 电控反铁磁

前文已介绍了大量铁磁材料体系开展的电控磁研究。相比于铁磁材料,反铁磁材料对外界扰动有很强的抵抗力,不会产生剩磁场,并且磁矩相互作用的本征频率远远高于铁磁材料,具有超快的动力学特性,有利于器件存储密度和信息处理速度的提高。因此,近年来反铁磁材料的相关研究吸引了大家的广泛关注<sup>[59]</sup>。然而,反铁磁磁矩的探测与调控面临着很大的困难,成为了反铁磁自旋电子学发展的瓶颈。不同于电流翻转反铁磁磁矩的工作<sup>[60, 61]</sup>,电场调控反铁磁磁矩能极大地降低器件的功耗,通过研究电控反铁磁,实现电场对反铁磁磁矩的调控,将大力推动高密度、高速度与低功耗自旋电子学器件的发展。

电控反铁磁有间接和直接两种手段。将电场施加于铁电材料来调控其应变,进而利用应变的变化对以FeRh为代表的具有应变相关磁性相转变特性的材料进行调控,是电场调控反铁磁磁矩的一类重要的间接调控手段。FeRh的反铁磁-铁磁相转变温度在350 K附近,因此FeRh在室温呈现反铁磁性。由于在FeRh反铁磁-铁磁相转变过程中,存在1%的晶格变化,因此基于应变机制可实现电场对反铁磁的调控<sup>[62-66]</sup>。通过构造FeRh/BaTiO<sub>3</sub>异质结,电场下铁电BaTiO<sub>3</sub>的应力变化可有效调控相邻FeRh的反铁磁/铁磁相转变温度,因而通过几伏的电压可使FeRh在反铁磁有序和铁磁有序之间转变,而随着电场的撤除,FeRh又恢复其初始的反铁磁序<sup>[67]</sup>。这种通过电场诱导FeRh的磁性相转变来调控其磁矩的方法对探索低功耗磁存储技术具有重要意义<sup>[68]</sup>。此外,在类似的FeRh/PMN-PT异质结中电控FeRh磁性相转变还会产生电致电阻效应<sup>[65]</sup>。电场下PMN-PT极化方向的改变使FeRh的面内应变状态发生变化,进而改变了FeRh的晶格,使FeRh发生磁性相转变,由于FeRh的反铁磁相和

铁磁相电阻率存在较大差异,因此观测到较大的电致电阻效应。而在薄膜生长状况更好的FeRh/BTO体系中,在2 kV/cm的电场下实现了对FeRh铁磁-反铁磁相转变的调控,获得了高达22%的电致电阻变化<sup>[69]</sup>。同时,根据对应力调控反铁磁的理论计算,Barra等提出,利用电场下产生的应力变化可诱导反铁磁产生磁弹各向异性,有望提供足够的转矩使反铁磁畴发生90°翻转,对80 nm大小的反铁磁纳米片的模拟计算表明,反铁磁翻转频率可接近太赫兹,且能耗低至450 aJ<sup>[70]</sup>。

除了使用电场引起的基片应变来调控反铁磁磁矩外,电场也可以直接用于调控反铁磁磁矩。初期人们用电场来调控多铁薄膜的反铁磁性,例如,兼具铁电性和反铁磁性的磁电耦合材料BiFeO<sub>3</sub>体系<sup>[71]</sup>。铁电极化方向可受到电场作用而发生翻转<sup>[72]</sup>,而不同铁电极化状态与不同的反铁磁畴状态相互耦合,因此可以通过外加电场的变化来控制反铁磁磁矩的翻转<sup>[73, 74]</sup>,该调控过程可以在室温下进行,因此具有广阔的发展前景。通过压电力显微镜和光电发射电子显微镜观测,并结合第一性原理计算,发现了室温下多铁性BiFeO<sub>3</sub>薄膜中电控反铁磁畴的关键在于BiFeO<sub>3</sub>薄膜中铁电性和反铁磁性之间的耦合,以及其潜在的铁弹性畴结构<sup>[75]</sup>。除了BiFeO<sub>3</sub>之外,在Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与Co/Pd多层膜构建的异质结中,根据电场下交换偏置的变化观测到电场下反铁磁磁畴状态的翻转,在室温下实现了磁化翻转和可逆等温磁电转换<sup>[76, 77]</sup>。目前已经设计出Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基的纯反铁磁磁电随机存储器,这对于磁电反铁磁研究的发展具有深远意义<sup>[35]</sup>。

相比于以上材料体系,对IrMn、FeMn等反铁磁金属材料来说,上述电控磁机制就不再适用了。反铁磁金属材料没有铁电或磁电性质,无法直接进行调控。同时,由于金属表面电荷的屏蔽作用,电场对反铁磁金属的调控深度限制在表面原子级别尺度的范围内,与反铁磁形成稳定畴结构所需的一定厚度存在明显的矛盾,限制了电场调控反铁磁相关工作的开展。然而,在传统的自旋电子学中,对反铁磁金属材料的研究是不可或缺的,因此,直接用电场来调控金属反铁磁性虽极富挑战却又至关重要,而离子液体作为门电极产生的大电场为解决反铁磁金属电场调控中的深度问题提供了有效的解决途径。当把离子液体滴到受电压调控的器件表面,由于电荷的聚集会形成原子层级别厚的双电层,在通道表面积累电子载流子,与传统的固体栅极相比,表现出非常高的电场效应和更深的穿透距离<sup>[47, 78, 79]</sup>。例如,采用离子液体作为门电极可用于调控反铁磁金属的交换弹簧(图7),进而利用交换弹簧调控反铁磁材料的磁矩,该方法已成功应用于[Co/Pt]/IrMn体系<sup>[78]</sup>。在该体系中,反铁磁

IrMn 通过与 Co/Pt 的交换耦合作用形成了交换弹簧结构,而这种磁结构可以受电场的调控,并像弹簧对力的传递作用一样将电场的调控传递到 IrMn 和 Co/Pt 的界面,因此通过向离子液体施加不同的门电压可实现对反铁磁的电场调控。负向门电压可以用于增强 [Co/Pt]/IrMn 体系的负向交换偏置,而正向的门电压具有相反的效果,由此,通过改变门电压的大小调控了对 IrMn 的自旋结构和交换弹簧结构的稳定性。这一调控效果可归因于,门电压的改变将对薄膜进行电子的注入或抽取,相应地 IrMn 中电荷载流子发生变化,最终改变 IrMn 的电子结构和 Mn 的磁矩,实现了对 IrMn 磁各向异性和交换偏置的调控。因为电场调控效果依赖于交换弹簧的传递作用,因此,在 IrMn 的交换弹簧长度范围内(6 nm),作用于交换耦合场的电场效应具有较好的调控作用,而随着反铁磁 IrMn 厚度的增长,电控交换偏置效果显著减弱。此外,在反铁磁 FeMn 的交换弹簧长度范围内(15 nm)也发现了类似的电场调控效果<sup>[80]</sup>。由此,通过离子液体对反铁磁金属进行电学控制,提供了一种基于交换弹簧结构的新颖的电场操纵反铁磁磁矩方法<sup>[2]</sup>。

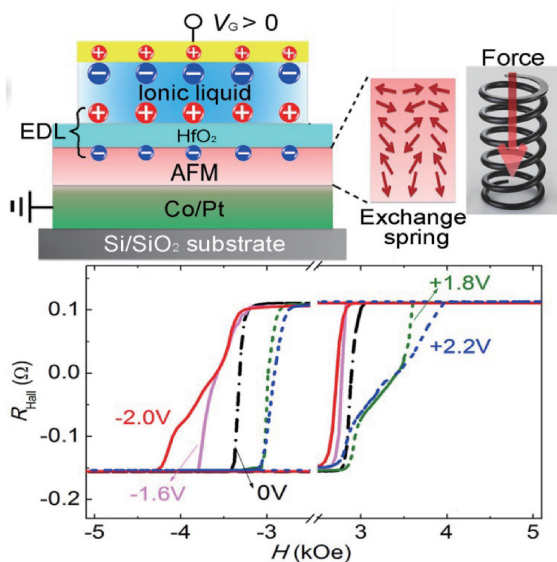


图 7 IrMn 交换弹簧结构自旋排列和对离子液体施加正电压后电荷分布示意图(a),不同门电压下[Co/Pt]/IrMn 结构的反常霍尔曲线(b)<sup>[78]</sup>

Fig. 7 Spin arrangement of IrMn exchange spring structure and charge distribution diagram after positive voltage applied to ionic liquid (a), anomalous Hall curves of [Co/Pt]/IrMn structure at different gate voltages (b)<sup>[78]</sup>

## 7 结 语

本文总结了电控磁效应近几年的主要研究进展。机

制方面,重点阐述了载流子调控机制、应力机制、轨道重构和电化学机制等 4 类电控磁机制的发展。进而讨论了基于电控磁效应的铁磁隧道结和纯电场翻转下的磁化翻转。最后,简单综述了电控磁效应在反铁磁材料中的研究现状。作为未来高密度和低功耗磁存储的重要候选技术,电控磁效应的研究还在不断的深入,还有很多的机制和现象值得进一步挖掘,主要包括:① 在更多实用的体系中实现(室温)纯电场作用下的磁化翻转;② 提高电控磁各向异性的效率;③ 利用电控磁效应实现更低功耗的数据读写;④ 将电控磁效应推广到更多的体系中,包括斯格明子、层间耦合、界面自旋轨道相互作用和反铁磁自旋器件等;⑤ 基于电控磁效应的神经形态模拟。

## 参考文献 References

- [1] Matsukura F, Tokura Y, Ohno H. *Nature Nanotechnology*[J], 2015, 10(3): 209.
- [2] Song C, Cui B, Li F, et al. *Progress in Materials Science*[J], 2017, 87: 33-82.
- [3] Ohno H, Chiba D, Matsukura F, et al. *Nature*[J], 2000, 408 (6815): 944.
- [4] Weisheit M, Fähler S, Marty A, et al. *Science*[J], 2007, 315(5810): 349-351.
- [5] Maruyama T, Shiota Y, Nozaki T, et al. *Nature Nanotechnology*[J], 2009, 4(3): 158.
- [6] Chiba D, Fukami S, Shimamura K, et al. *Nature Materials*[J], 2011, 10(11): 853.
- [7] Song C, Cui B, Peng J, et al. *Chinese Physics B*[J], 2016, 25 (6): 067502.
- [8] Ma J, Hu J, Li Z, et al. *Advanced Materials*[J], 2011, 23(9): 1062-1087.
- [9] Wang W, Li M, Hageman S, et al. *Nature Materials*[J], 2012, 11 (1): 64.
- [10] Heron J, Bosse J, He Q, et al. *Nature*[J], 2014, 516(7531): 370.
- [11] Chen A, Zhao Y, Li P, et al. *Advanced Materials*[J], 2016, 28(2): 363-369.
- [12] Yan Y, Zhou X, Li F, et al. *Applied Physics Letters*[J], 2015, 107 (12): 122407.
- [13] Oba M, Nakamura K, Akiyama T, et al. *Physical Review Letters*[J], 2015, 114(10): 107202.
- [14] Shiota Y, Nozaki T, Bonell F, et al. *Nature Materials*[J], 2012, 11 (1): 39.
- [15] Kanai S, Yamanouchi M, Ikeda S, et al. *Applied Physics Letters*[J], 2012, 101(12): 122403.
- [16] Grezes C, Ebrahimi F, Alzate J, et al. *Applied Physics Letters*[J], 2016, 108(1): 012403.
- [17] Yoda H, Shimomura N, Ohsawa Y, et al. Voltage-Control Spintronics Memory (VoCSM) Having Potentials of Ultra-Low Energy-Consumption and High-Density[C]// *Proceedings of Electron Devices Meeting 2016*



- (*IEDM* 2016).
- [18] Miwa S, Fujimoto J, Risius P, *et al.* *Physical Review X*[J], 2017, 7(3): 031018.
- [19] Cheong S-W, Mostovoy M. *Nature Materials*[J], 2007, 6(1): 13.
- [20] Sergienko I A, Dagotto E. *Physical Review B* [J], 2006, 73(9): 094434.
- [21] Ederer C, Fennie C J. *Journal of Physics: Condensed Matter*[J], 2008, 20(43): 434219.
- [22] Fiebig M, Lottermoser T, Meier D, *et al.* *Nature Reviews Materials* [J], 2016, 1(8): 16046.
- [23] Wu J, Fan Z, Xiao D, *et al.* *Progress in Materials Science*[J], 2016, 84: 335–402.
- [24] Zhou Z, Trassin M, Gao Y, *et al.* *Nature Communications*[J], 2015, 6: 6082.
- [25] Saenrang W, Davidson B, Maccheronzi F, *et al.* *Nature Communications*[J], 2017, 8(1): 1583.
- [26] Li P, Chen A, Li D, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2014, 26(25): 4320–4325.
- [27] Peng R, Wang J, Hu J, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2015, 106(14): 142901.
- [28] Wang J, Hu J, Ma J, *et al.* *Scientific Reports*[J], 2014, 4: 7507.
- [29] Fechner M, Zahn P, Ostanin S, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 2012, 108(19): 197206.
- [30] You C, Bader S. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 1999, 195(2): 488–500.
- [31] Newhouse-Illige T, Liu Y, Xu M, *et al.* *Nature Communications*[J], 2017, 8: 15232.
- [32] Price N W, Johnson R, Saenrang W, *et al.* *Physical Review Letters* [J], 2016, 117(17): 177601.
- [33] Price N W, Johnson R, Saenrang W, *et al.* *Physical Review Applied* [J], 2017, 8(1): 014033.
- [34] Xu B, Wang D, Zhao H J, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2015, 25(24): 3626–3633.
- [35] Kosub T, Kopte M, Hühne R, *et al.* *Nature Communications*[J], 2017, 8: 13985.
- [36] Tokura Y, Nagaosa N. *Science*[J], 2000, 288(5465): 462–468.
- [37] Chakhalian J, Freeland J, Habermeier H-U, *et al.* *Science*[J], 2007, 318(5853): 1114–1117.
- [38] Duan C, Jaswal S S, Tsymbal E Y. *Physical Review Letters*[J], 2006, 97(4): 047201.
- [39] Benckiser E, Haverkort M W, Brück S, *et al.* *Nature Materials*[J], 2011, 10(3): 189.
- [40] Cui B, Song C, Mao H, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2015, 27(42): 6651–6656.
- [41] Cui B, Song C, Mao H, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2016, 26(5): 753–759.
- [42] Preziosi D, Alexe M, Hesse D, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 2015, 115(15): 157401.
- [43] Yang Y, Íñiguez J, Mao A, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 2014, 112(5): 057202.
- [44] Chen H, Qiao Q, Marshall M S, *et al.* *Nano Letters*[J], 2014, 14(9): 4965–4970.
- [45] Liu C, Wan W, Gong S, *et al.* *Scientific Reports* [J], 2017, 7(1): 3856.
- [46] Cui B, Song C, Gehring G A, *et al.* *Advanced Functional Materials* [J], 2015, 25(6): 864–870.
- [47] Cui B, Song C, Wang G, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2014, 24(46): 7233–7240.
- [48] Lu N, Zhang P, Zhang Q, *et al.* *Nature*[J], 2017, 546(7656): 124.
- [49] Molinari A, Leufke P M, Reitz C, *et al.* *Nature Communications*[J], 2017, 8: 15339.
- [50] Molinari A, Hahn H, Kruk R. *Advanced Materials*[J], 2018, 30(1).
- [51] Walter J, Wang H, Luo B, *et al.* *ACS Nano*[J], 2016, 10(8): 7799–7810.
- [52] Zhao S, Zhou Z, Peng B, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2017, 29(17): 1606478.
- [53] Yang Q, Wang L, Zhou Z, *et al.* *Nature Communications*[J], 2018, 9(1): 991.
- [54] Gu Y, Song C, Zhang H, *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2018, 454: 228–236.
- [55] Cui B, Song C, Li F, *et al.* *Physical Review Applied*[J], 2017, 8(4): 044007.
- [56] Bi C, Liu Y, Newhouse-Illige T, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 2014, 113(26): 267202.
- [57] Bauer U, Yao L, Tan A J, *et al.* *Nature Materials*[J], 2015, 14(2): 174.
- [58] Li H, Lu N, Zhang Q, *et al.* *Nature Communications*[J], 2017, 8(1): 2156.
- [59] Jungwirth T, Marti X, Wadley P, *et al.* *Nature Nanotechnology*[J], 2016, 11(3): 231.
- [60] Wadley P, Howells B, Železný J, *et al.* *Science* [J], 2016, 351(6273): 587–590.
- [61] Bodnar S Y, Šmejkal L, Turek I, *et al.* *Nature Communications*[J], 2018, 9(1): 348.
- [62] Gray A, Cooke D, Krüger P, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 2012, 108(25): 257208.
- [63] Mankovsky S, Polesya S, Chadova K, *et al.* *Physical Review B*[J], 2017, 95(15): 155139.
- [64] Chen X, Feng J, Wang Z, *et al.* *Nature Communications*[J], 2017, 8(1): 449.
- [65] Lee Y, Liu Z, Heron J, *et al.* *Nature Communications*[J], 2015, 6: 5959.
- [66] Bordel C, Juraszek J, Cooke D W, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 2012, 109(11): 117201.
- [67] Cherifi R, Ivanovskaya V, Phillips L, *et al.* *Nature Materials*[J], 2014, 13(4): 345.
- [68] Valencia S, Crassous A, Bocher L, *et al.* *Nature Materials*[J], 2011, 10(10): 753.

- [69] Liu Z, Li L, Gai Z, *et al.* *Physical Review Letters* [J], 2016, 116 (9): 097203.
- [70] Barra A, Domann J, Kim K W, *et al.* *Physical Review Applied* [J], 2018, 9(3): 034017.
- [71] Sando D, Barthélemy A, Bibes M. *Journal of Physics: Condensed Matter* [J], 2014, 26(47): 473201.
- [72] Eerenstein W, Mathur N, Scott J F. *Nature* [J], 2006, 442 (7104): 759.
- [73] Fina I, Fàbrega L, Martí X, *et al.* *Physical Review Letters* [J], 2011, 107(25): 257601.
- [74] Fina I, Skumryev V, O'Flynn D, *et al.* *Physical Review B* [J], 2013, 88(10): 100403.
- [75] Zhao T, Scholl A, Zavaliche F, *et al.* *Nature Materials* [J], 2006, 5 (10): 823.
- [76] He X, Wang Y, Wu N, *et al.* *Nature Materials* [J], 2010, 9(7): 579.
- [77] Echtenkamp W, Street M, Mahmood A, *et al.* *Physical Review Applied* [J], 2017, 7(3): 034015.
- [78] Wang Y, Zhou X, Song C, *et al.* *Advanced Materials* [J], 2015, 27 (20): 3196–3201.
- [79] Yamada Y, Ueno K, Fukumura T, *et al.* *Science* [J], 2011, 332 (6033): 1065–1067.
- [80] Zhang P, Yin G, Wang Y, *et al.* *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* [J], 2016, 59(8): 687511.

(编辑 惠 琼)



特约撰稿人 潘 峰

潘 峰: 男, 1963 年生, 清华大学教授、博士生导师, 国家“万人计划”科技创新领军人才, 国家杰出青年科学基金获得者, 国家创新人才推进计划重点领域创新团队负责人, 全国优秀科技工作者。中国材料研究学会、中国真空学会、中国晶体学会常务理事。长期从事薄膜材料结构与性能调控技术、声表面波材料与器件、阻变存储材料与器件、磁性材料与自旋电子学等方面研究工

作。承担和完成国家重点研发计划、“973”、“863”、国家科技支撑计划、国家自然科学基金重点项目等科研项目与课题 30 余项, 获得国家自然科学奖二等奖、国家技术发明奖二等奖和国家科技进步奖二等奖等 4 项国家级和 9 项省部级科研成果奖励。在 *Nature Communications*, *Materials Science and Engineering R*, *Progress in Materials Science*, *Advanced Materials*, *Physical Review Letter* 等刊物发表 SCI 论文 300 余篇。主编《声表面波材料与器件》和《阻变存储器材料与器件》专著两部, 编写《X 射线衍射技术》教材一本。授权国家发明专利 30 件, 国际专利 2 件。