

铁电薄膜的多外场调控*

王玥 陈明凤 韩浩杰 马静[†]

(清华大学材料学院 新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室 北京 100084)

2023-01-03收到

[†] email: ma-jing@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230204

Multi-field modulation of ferroelectric films

WANG Yue CHEN Ming-Feng HAN Hao-Jie MA Jing[†]

(State Key Laboratory of New Ceramics and Fine Processing, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要 铁电薄膜在非易失随机存储器、压电器件、热释电器件和电光器件中有着广泛的应用。由于极化—晶格—电荷自由度的强烈耦合，铁电薄膜的特性不仅可以被电场调控，也可以被多种其他外场调控。文章分别阐述了电场、力场和光场对铁电薄膜极化和导电特性的调控作用及物理机制，并展示了电驱动、机械驱动和光驱动等新型铁电器件的应用潜力。多种外场的调控作用可以突破传统电场调控在电路接入和击穿、漏电等失效行为方面的限制，为铁电器件的设计提供新思路。

关键词 多场调控, 铁电薄膜, 铁电器件

Abstract Ferroelectric thin films have been widely used in non-volatile random-access memories, piezoelectric devices, pyroelectric devices and electro-optical devices. Due to the strong coupling among polarization, lattice and charge degrees of freedom, the properties of ferroelectric thin films can be tuned not only by an electric field, but also by multiple external fields. In this paper, the electrical, mechanical and optical modulations of the properties of ferroelectric thin films (i.e., polarization and conductivity) are discussed, as well as the physical mechanisms and their potential applications. The multi-field modulated ferroelectric films can overcome the limitations of traditional electric field driven devices, and provide new ideas for the design of multi-field driven ferroelectric devices.

Keywords multi-field modulation, ferroelectric films, ferroelectric devices

1 引言

自1920年首次在罗息盐中观察到铁电现象至今，铁电材料经过了百余年的发展，被广泛应用于在非易失随机存储器、传感器、驱动器、热释电器件和电光器件中^[1]。近年来，先进的气相沉积技术实现了高质量外延铁电薄膜的制备^[2]，薄

膜体系中具有更加丰富可调的物理性能，且出于器件小型化的追求，铁电薄膜逐渐成为研究热点。近期发展的先进微观表征技术如原子力显微镜^[3]、透射电子显微镜^[4]等，在微纳尺度上实现了对铁电材料的表征和局部调控，为探索铁电薄膜的特性以及其对外场响应的物理机制奠定了坚实的基础。

在居里温度以下，铁电材料中偶极子的相互作用形成了双势阱自由能曲线，稳定了对称性破缺的结构^[5]。例如对于ABO₃型钙钛矿材料BaTiO₃

* 国家自然科学基金(批准号: 51922055, 52027817)、国家重点研发计划(批准号: 2022YFB3807604)资助项目

(BTO), $Ti3d-O2p$ 轨道杂化稳定了铁电相, 自发极化来源于 Ti^{4+} 偏离氧八面体中心的运动。由于电场与偶极子的相互作用, 电场可以有力地调控薄膜的特性, 例如极化翻转、相转变、铁电畴结构等。另外, 氧化物铁电薄膜中往往存在大量的带电缺陷, 例如金属离子空位和氧空位等。基于静电相互作用, 电场可以调控铁电薄膜中带电缺陷的浓度和分布, 也由此可以调控铁电薄膜内部和界面处的能带结构, 从而改变导电/阻变性能^[6]。但是电场这种调控手段也有诸多限制, 例如对电路接入的需求(需要有顶/底电极且电路闭合)以及电场翻转极化时的失效行为(电击穿、漏电等)。随着研究的不断深入, 其他外场(例如力场、光场等)对铁电薄膜的调控作用逐渐显露(图1), 并激发了机械驱动或光驱动新型铁电器件的相关研究。

铁电薄膜中存在电极化序参量—电荷—晶格自由度之间的强耦合。力场作用于晶格, 改变力学边界条件, 可以通过机电耦合效应调控铁电薄膜的性质^[7]; 光场通过光电效应或铁电光伏效应可以改变薄膜中载流子的浓度, 作用于电荷自由度, 从而发挥其调控作用^[8]。此外, 借助铁电材料中其他自由度的特殊耦合作用, 其他外场也可以产生有效的调控, 例如多铁材料中基于自旋—轨道耦合的磁电效应^[9, 10]、太赫兹场下晶格共振和离子位移对铁电极化的超快调控^[11]等。不仅如此, 这些外场彼此之间也存在着复杂的耦合关系, 多场联动调控有望实现铁电薄膜更奇特的性能。

2 外场调控薄膜铁电特性

2.1 电场调控

铁电材料的自发极化随外电场的变化规律可由电滞回线描述。当电场超过矫顽场后, 极化矢量开始被翻转至平行于电场的方向。根据翻转动力学^[12], 电场下铁电畴的翻转为形核—长大过程, 可以被由畴合并过程控制的 Kolmogorov—Avrami—Ishibashi (KAI)模型^[13], 或者由形核过程控制的形核限制翻转模型(nucleation—limited—switching, NLS)^[14]描述。近年来, 人们在铁电薄

膜中观察到了一些新奇的物理特性, 例如畴壁导电性和极性拓扑结构, 研究其电学调控不仅有利于揭示这些新奇现象的物理本质, 也为理解其他外场的调控作用奠定物理基础, 而且可以启发纳米电子器件, 特别是高密度非易失存随机储器的设计思路。

2.1.1 电场调控畴壁导电性

铁电畴壁是不同极化方向铁电畴之间的二维界面, 在钙钛矿体系中根据畴壁两侧相邻铁电畴极化方向的夹角可将畴壁划分为 71° 、 109° 、 180° 和 90° 畴壁, 根据畴壁处是否聚集束缚电荷又将其划分为中性畴壁与荷电畴壁^[15]。由于极化/晶格的不连续性, 畴壁表现出不同于体相的性质, 例如在绝缘的铁电和多铁氧化物的畴壁中观察到了增强的电子导电性。这种畴壁导电性与畴壁的类型有关, 例如, Seidel 等人^[16]的实验发现了 $BiFeO_3$ (BFO)薄膜的中性 109° 和 180° 畴壁具有室温电子导电性, 其源自于极化不连续引起的静电势梯度, 以及较小的能带带隙提高了局部载流子浓度。另外, 实验和理论研究也证明荷电畴壁处大量聚集的缺陷或氧空位也可以调整局部的缺陷能级, 增强畴壁的电子导电性^[17]。

但在常规铁电体中, 导电畴壁位置随机且很难自发形成, 因此人们希望实现人为控制铁电畴

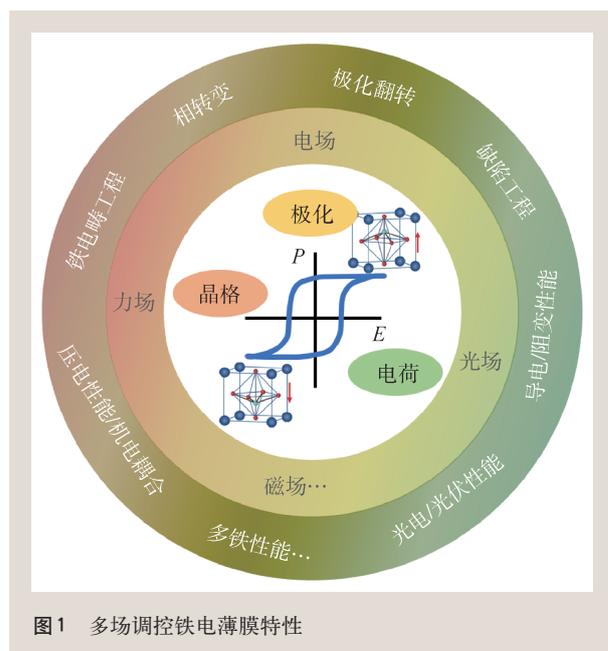


图1 多场调控铁电薄膜特性

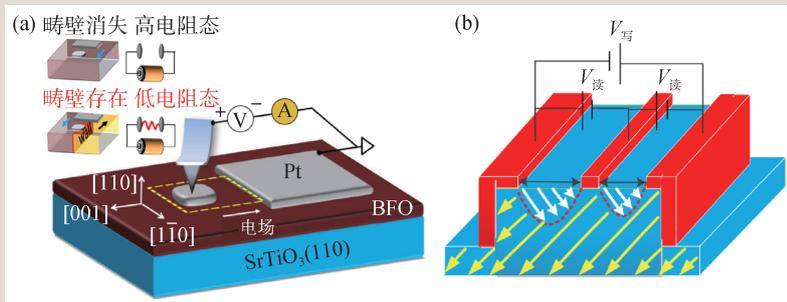


图2 基于畴壁的非易失随机存储器原型 (a)两端器件^[19]; (b)三端器件^[20]

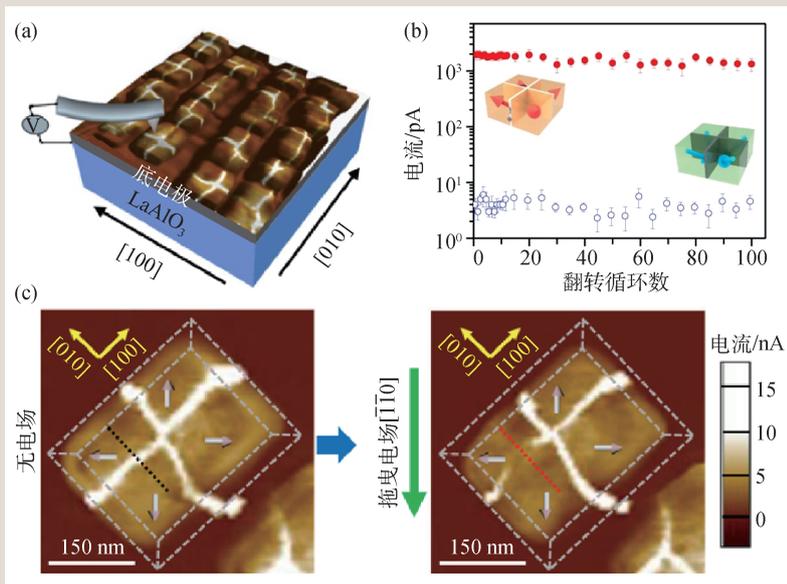


图3 电场调控纳米岛的极化拓扑结构及畴壁导电性 (a)以纳米岛为分立单元的存储器原型示意图^[22]; (b)纳米岛荷电畴壁高低阻态循环100次后保持稳定。插图为中心发散(红色)和中心汇聚(蓝色)两种铁电畴结构的示意图,分别对应着低阻态(红色实心圆圈)和高阻态(蓝色空心圆圈)^[22]; (c)拖曳电场控制BFO纳米岛上导电畴壁的通断^[23]。红色虚线位置处显示导电畴壁已被拖曳场擦除

壁的类型和位置。其中,基于扫描探针显微镜技术的电场调控可以在纳米尺度内精确地写入、擦除和移动特定类型的铁电畴壁,从而成为研究热点。荷电畴壁由于能量较高,在自然条件下很难稳定,Croassous等人^[18]利用导电探针扫描时形成的拖曳场控制BFO薄膜的面内极化,从而控制了“头对头”和“尾对尾”荷电畴壁的形成。并且,在屏蔽电荷和底电极载流子类型的匹配作用下,实现了“头对头”荷电畴壁处增强的金属性导电。利用铁电畴壁新奇的电学性能和电场可调性,基于畴壁的低维纳米电子器件相继被提出。特别是铁电畴壁的尺度仅为几纳米,出于器件小型化的

考虑,基于畴壁的非易失随机存储器有望大大提高存储密度。如图2(a)所示,Sharma等人^[19]结合面内电极和扫描探针技术设计了两端的非易失畴壁随机存储器原型,存储单元尺寸小于100 nm,通过探针写入和擦除导电畴壁实现了开关比高达 10^3 的两阻态。另外,Jiang等人^[20]利用面内电极设计了三端畴壁存储器,在两电极间施加读取电压时部分翻转的铁电畴形成了导电畴壁,实现了非破坏性的读取,具有优异的可重复性(图2(b))。

2.1.2 电场调控极化拓扑结构

铁电薄膜中存在新奇的极化拓扑结构,例如涡旋畴、中心型畴、斯格明子畴等^[21],因为奇特的物理性质和在纳米电子器件中的潜在应用而受到了广泛的关注。由于铁电中晶格—极化的强烈耦合,极化拓扑结构中偏移对称性允许方向的极化旋转会显著提高自由能,所以需要特定的电学/力学边界条件以及形状限制去稳定这种特殊的畴结构。其中,利用铁电纳米结构的尺寸效应和

形状效应可以稳定极化拓扑结构,Ma等人^[22]通过物理气相沉积生长了自组装BFO纳米岛,具有“头对头”中心汇聚的四瓣铁电畴结构,电场可以使极化发生 180° 翻转至“尾对尾”中心发散的“尾对尾”中心发散的“尾对尾”四瓣畴结构,并始终保持拓扑数为1,体现了拓扑保护性。拓扑畴结构的翻转改变了十字荷电畴壁的载流子类型,使导电性提升了三个数量级。并且由于纳米岛的形状限域效应,畴壁位置稳定,基于此设计了以纳米岛为分立存储单元的器件原型,具有良好的循环稳定性(图3(a), (b))。随后,Wang等人^[23]利用导电探针的拖曳场灵活控制了纳米岛上畴壁的形态,使畴壁在荷电畴壁和中性畴

壁之间切换,形成了导电畴壁的开/关态(图3(c)),并由此设计了可编程全电场控制的逻辑门和逻辑电路器件原型。此外,局部的强电场也可以造成纳米岛上四瓣畴中每一瓣的单独180°翻转,可以改变拓扑数形成新的拓扑极化结构例如反涡旋畴,以每一瓣为分立存储单元的垂直结构器件有望进一步提高存储密度^[24]。

2.2 力场调控

铁电薄膜中的极化、晶格、电荷存在强烈的耦合作用,力学边界条件作用于晶格,由此作用于极化和电荷,从而影响铁电特性。力场会在铁电薄膜中触发多种复杂的机电耦合效应^[7],例如压电效应(应变与极化的正比关系)和挠曲电效应(应变梯度与极化的正比关系)等。由于应变梯度与空间尺度成反比,微纳尺度的薄膜系统可以具有极大的局部应变梯度(10^5-10^9 m^{-1})^[25],由此产生不可忽略的挠曲电效应。因此,在微观尺度下,力场在铁电畴工程和缺陷工程中的作用十分明显,为铁电薄膜的无电场调控提供了可能。

2.2.1 力场调控极化翻转

力场可以实现铁电薄膜在无电压时的极化翻转,在自由表面和具有顶电极的铁电薄膜上均可写入纳米铁电畴图案,并且可以避免电场翻转极化时的副效应(例如电荷注入、漏电流和电击穿等),因而展示了巨大的优势。基于压电效应,单轴机械压力可以驱动多轴铁电体中的非180°铁弹翻转(面外极化到面内极化)。例如在 c/a 和 a_1/a_2 畴结构共存的 PbTiO_3 薄膜中,由于周期性条纹畴结构之间能量势垒较低,探针压力可以造成非局域、大面积的协同性铁弹翻转,伴随着大的形貌和压电性能变化^[26]。但压电效应不能驱动180°铁电翻转。

Gruverman等人^[27]在超薄铁电BTO薄膜中首次实现了原子力探针压力驱动的180°极化翻转(图4(a)),并将机理归结于挠曲电效应,即探针压力产生的应变梯度打破了局部的晶格对称性,并产生了等效的电场(挠曲电场),实现了极化矢量从向上到向下的翻转。Park等人^[28]利用探针产生的挠曲电场的拖尾效应,通过控制扫描方向可以在BFO薄膜中确定性地实现71°铁弹翻转或180°铁电翻转(图4(b))。但是挠曲电场无法在较厚的铁电薄膜中实现力致极化翻转,相场模拟验证在 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ (PZT)薄膜中,随着薄膜厚度增加至25 nm,挠曲电场迅速衰减至几乎为零^[7]。Li等人^[29]依据新的翻转机制,在厚约100 nm的PZT薄膜中,通过纳米尺度铁弹畴的介导作用成功实现了由上到下的180°铁电翻转(图4(c))。然而,由于探针所产生的应变和应变梯度为单向的,力只能实现极化的单向翻转,即实现面外到面内的翻转,或从向上到向下的翻转。可逆的极化翻转循环仍依赖于电场,即“力写电擦”。Liu等人^[30]通过相场模拟,发现在表面电荷屏蔽较差的薄膜中,在

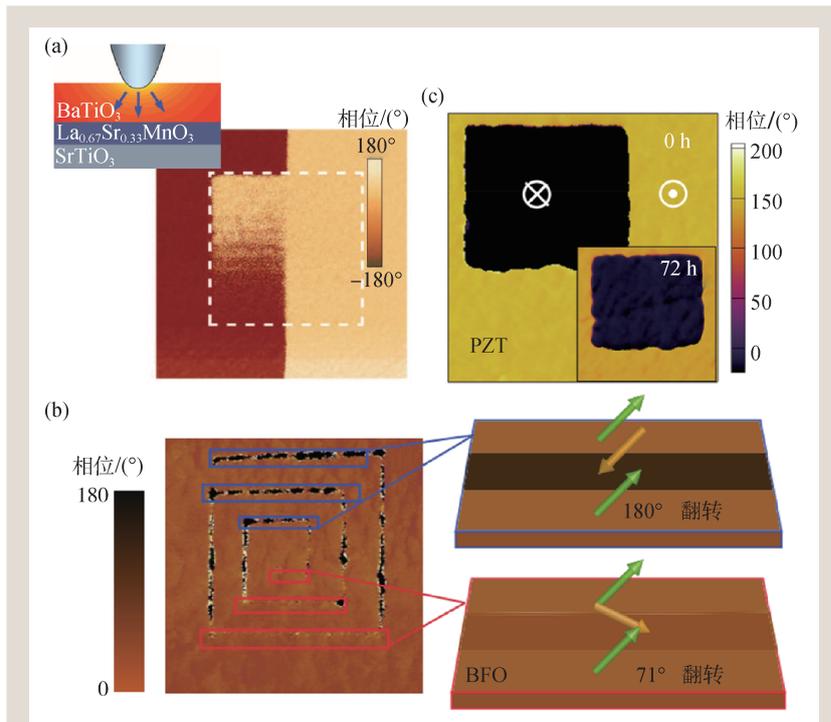


图4 力场翻转铁电极化 (a) BTO薄膜中的180°铁电翻转^[27]; (b) BFO薄膜中的71°铁弹翻转或180°铁电翻转^[28]; (c) 100 nm的PZT薄膜中的180°铁电翻转^[29], 图中⊙表示面外极化方向向上, ⊗表示面外极化方向向下

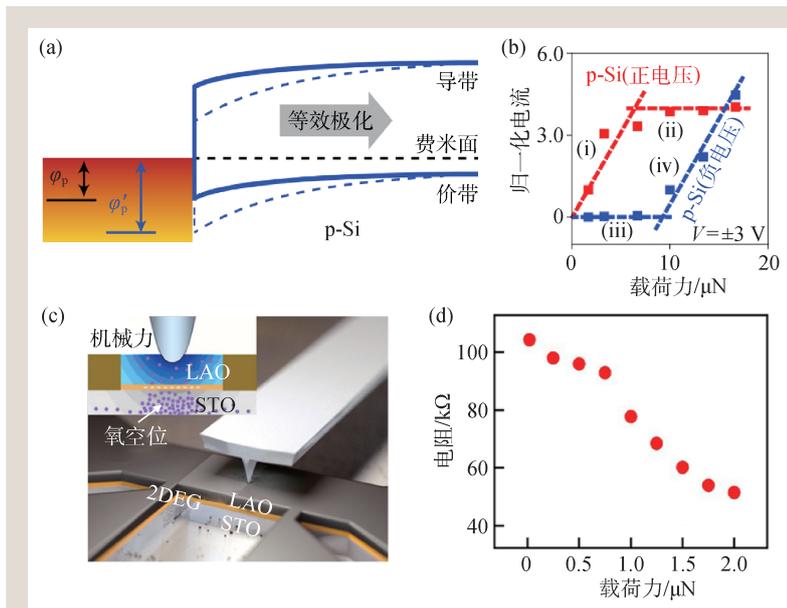


图5 力场调控导电特性 (a)探针压力改变p型Si (p-Si)一电极界面肖特基势垒的示意图,由 ϕ_p' 降低至 ϕ_p ^[36]; (b)探针压力提高p-Si导电性。随着压力的增大,正电压和负电压产生的电流发生不对称的增大(正电压(i)→(ii),负电压(iii)→(iv))^[36]; (c)探针压力驱动LAO/STO异质结中氧空位重新分布的示意图^[40]; (d)探针压力降低LAO/STO高阻态的界面电阻^[40]

力场和退化极化的驱动下,极化向下的单畴态可以翻转到极化向上的多畴态,再配合挠曲电效应,在一定屏蔽条件和力场范围内可以实现力致极化的双向翻转,我们在实验中实现了这一现象^[31]。

2.2.2 力场调控导电特性

除对铁电薄膜极化的调控作用外,力场与电荷的相互作用可以控制薄膜表面电荷和内部带电缺陷(例如氧空位)的重新分布^[7, 32-34],进而改变薄膜本身以及铁电薄膜一电极界面(半导体一金属界面)的能带结构,实现力场对于铁电二极管、铁电隧道结和铁电场效应晶体管等存储器件导电特性的调控。

首先考虑力场对于薄膜一电极界面处能带结构的调控。根据压电电子学^[35],铁电薄膜所受应力改变时在表面产生的电势差(压电势)可以有效改变铁电薄膜一电极界面肖特基势垒的高度,从而调节界面处载流子的输运过程。应变的大小和正负(拉伸/压缩)可以控制压电势的极性,进而控制导电行为。受到压电电子学启发,Wang等人^[36]在半导体Si中推广了挠曲电电子学,探针施加的应力梯度在Si中诱导了向下的极化,使界面处排

斥电子、吸引空穴,导致能带向上弯曲,对应着p型Si一电极界面处肖特基势垒的降低,从而大大提高了导电性,如图5(a),(b)所示。其中应变一电导对应的应变系数大于2650,远高于传统的压电/铁电纳米传感器。此外, Das等人^[37]在探针/SrTiO₃(STO)/SrRuO₃(SRO)的隧道结构中发现,STO薄膜中挠曲电场诱导的极化可以改变隧穿势垒,大大增强了隧穿导电行为。基于挠曲电效应对界面处势垒高度和宽度的控制,Zhang等人^[38]系统地研究了探针压力对BFO薄膜极化翻转时位移电流的调控行为,发现探针压力增大一个数量级对应着位移电流2—3个数量级的提高,有利于铁电存储器的小型化。

许多铁电氧化物薄膜中普遍存在

在氧空位这种带电缺陷。实验和相场模拟发现,探针压力产生的挠曲电场会驱动带正电的氧空位向远离薄膜表面的位置移动^[32]。另外,氧空位通常会引起钙钛矿晶胞体积的膨胀,探针引起的压缩应变会使氧空位向远离探针一表面接触点的方向移动(Vegard效应)^[39]。带正电的氧空位在薄膜中会产生局部电荷和弹性应变,通过静电效应和Vegard效应与铁电极化耦合。因此理解力场一氧空位一铁电薄膜电子输运行为之间的联系非常重要。Sharma等人^[40]研究了力场驱动氧空位移动对LaAlO₃(LAO)/STO界面处二维电子气(2DEG)导电特性的影响。如图5(c),(d)所示,薄膜表面的氧空位和界面处的电子在非铁电性的LAO薄膜中稳定存在得到了类似铁电的极化矢量,随着外加压力的逐渐增大,挠曲电场和Vegard效应将氧空位排斥到了LAO/STO界面处,提高了界面的电子密度,从而可以降低电阻率。

2.3 光场调控

光作为一种交变电磁波直接作用于铁电材料

时, 其电场分量可以诱导电极化, 但由于光的频率非常高, 只有电子极化可以跟上电场变化, 并不能对偶极子形成调控, 因此光场难以直接调控铁电极化^[41]。但是, 光场与铁电材料有丰富的相互作用, 例如电光效应、光电导效应、铁电光伏效应、光致伸缩效应等, 因此光场可以间接地调控铁电性能^[8]。

2.3.1 光场调控极化翻转

由于光场无法直接翻转铁电极化, Li 等人^[42]借助二维窄带隙半导体的光电导效应, 在 MoS₂/BTO/SRO 中巧妙地实现了光驱动极化从上到下的翻转。实验装置如图 6(a)所示, 在暗态时, MoS₂提供的负屏蔽电荷可以在具有向下内建电场的 BTO 薄膜中稳定出现向上的极化态。在 MoS₂吸收光照之后, 层内激子转变为层间激子, 造成了 MoS₂/BTO 界面处正电荷的堆积, 在退极化场和内建电场的双重作用之下, 铁电 BTO 薄膜的极化从向上翻转到向下(图 6(b))。随后, 借助光控 MoS₂/铁电薄膜极化翻转的效应, Du 等人^[43]设计了由光电晶体管构成的神经形态视觉传感器, 显著提高了数据识别速度。除通过光场改变铁电薄膜的电学边界条件外, 高功率光辐照的热效应还可以造成铁电薄膜晶格的局部膨胀, 改变力学边界条件来实现对相结构和极化方向的调控。在 BFO 薄膜中, 局部晶格吸收光辐照后会受热膨胀, 和周围未膨胀晶格之间形成应力梯度, 导致的面内挠曲电场不仅促进了具有压缩应力的四方相向着应力释放的菱方—四方混合相的转变, 而且伴随着极化方向的 45°转动。通过调整激光的扫描路径, 可以精确地控制不同畴结构的写入和擦除^[44]。由于光场只能通过间接作用翻转铁电极化, 因此往往需要依赖于特殊的材料体系, 且极化翻转的路径受限, 很难实

现光场调控下的可逆极化翻转。

2.3.2 光场调控导电行为

光作用于铁电薄膜可以引发铁电光伏效应^[45], 即光生载流子被铁电极化产生的内建电场分离至不同方向而产生电位差。不同于传统半导体, 铁电材料中可以产生远超带隙宽度的开路电压, 也被称为反常光伏效应。很多研究探索反常光伏效应的机制, 认为这与铁电薄膜中的微观结构增大了内建电场有关, 例如垂直畴壁的电场分量、肖特基结处的内建电场和退极化场等。但是相较于传统半导体, 铁电材料的带隙较大, 因此光电流较小、光转化效率低(单位时间出射的光子数与注入到器件中载流子数的比值小于 10⁻⁴), 很难应用在实际光伏器件中。Alexe 等人^[46]发现, 在 BFO 单晶中通过探针针尖这种点接触的微观光伏测量方法, 可以有效地收集探针下方的光激发载流子, 从而提高光电流密度, 将外量子效率(单位时间内发出的光子数与注入到有源层的载流子数的比值)提高近 7 个数量级。因此, 远大于带隙

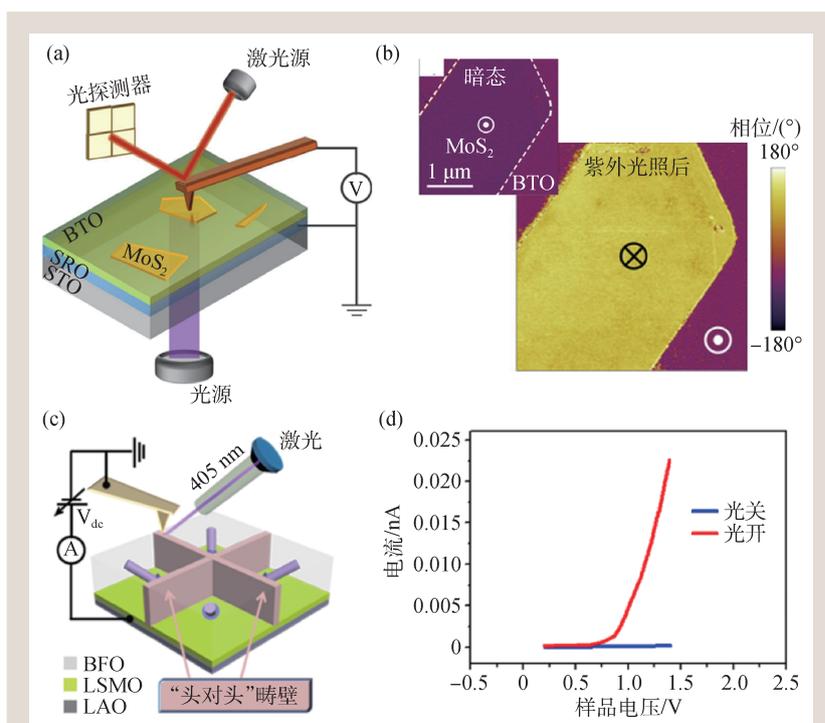


图 6 光场调控铁电特性 (a) MoS₂/BTO/SRO 中光场翻转铁电极化实验示意图^[42]; (b)光照前后极化翻转, 极化由面向上(紫色)翻转至面向下(黄色)^[42]; (c)加光测试 BFO 纳米岛“头对头”电荷畴壁导电性实验示意图^[48]; (d) BFO 纳米岛“头对头”电荷畴壁明态(红线)/暗态(蓝线)开关比^[48]

的开路电压和增强的外量子效率大大提高了铁电材料在光伏和光催化领域的应用。

另外,当铁电材料吸收能量大于带隙的光后可以产生光电导效应^[47],提高载流子的浓度。但是由于铁电材料的电阻较大,载流子在其中的迁移受限,很难得到大的光响应率和明/暗态开关比。Wang等人^[48]利用BFO纳米岛中的荷电畴壁为高导电通路(图6(c)),光照条件下产生的电子空穴对经探针/BFO界面处肖特基结内建电场的分离,极大提高了畴壁处亮态载流子浓度,实现了高达 $1.15 \times 10^4\%$ 的开关比(图6(d))。总而言之,在铁电薄膜中光场可以直接作用于电荷,可以对铁电薄膜的电子输运性能产生巨大的调控作用,不仅有望用于光探测、光传感等,而且可以用于存储器中将光作为额外的调控维度实现多阻态的调节^[49]。

2.4 其他外场及多场联动调控

考虑到铁电材料中可能存在的其他序参量耦合,铁电性能还可以被其他外场调控。例如对于多铁材料,特别是第II类多铁材料,其铁电性由特定的非公线自旋结构下的自旋—轨道耦合与自旋—晶格耦合诱发,表现出巨大的磁场控制铁电行为,为单相多铁材料的研究打开新思路^[9]。

不仅如此,这些外场的调控作用之间还存在复杂的耦合关系,多场联动调控不仅增加了调控

的维度,而且可以在铁电薄膜中诱导出更奇特的性能。例如,Guo等人^[50]在自支撑的BFO薄膜中,通过宏观挠曲电效应和光伏效应实现了对光电流的连续调控。自支撑的BFO薄膜不同程度的弯曲可以连续且大范围地改变其中挠曲电场的强度,因此改变了BFO薄膜内部的能带结构,连续地调控出了多态光电流和光电导。力场—光场对铁电薄膜导电性能的联动调控建立起应变梯度和光伏效应的联系,不仅实现了机械增强的光伏效应,而且可以实现应力梯度状态的光读取,有望应用于光伏器件或者力传感器。

3 总结

研究多种外场对铁电薄膜的调控作用不仅可以更深刻地揭示铁电材料中多种自由度耦合的物理机制,也打破了常规铁电器件需要电场调控的使用场景限制,为新型铁电器件的应用提供新思路。对于电场这种本征的调控手段,电场—极化相互作用的物理机制已经经历了深入的探索,因此当前研究重点集中于对新奇性能的调控(例如畴壁导电和极化拓扑结构)。虽然力场、光场等调控手段在铁电薄膜的特性调控上展示出了巨大的优势,但调控的基础物理机制还有待明确。另外,多场联动调控可以结合各种外场的调控优势,其机制也更为复杂,因此需要进一步研究探索。

参考文献

- [1] Martin L W, Rappe A M. *Nat. Rev. Mater.*, 2016, 2: 16087
- [2] Martin L W, Chu Y H, Ramesh R. *Mater. Sci. Eng. R-Rep.*, 2010, 68: 89
- [3] Gruverman A, Alexe M, Meier D. *Nat. Commun.*, 2019, 10: 1661
- [4] Li L, Xie L, Pan X. *Rep. Prog. Phys.*, 2019, 82: 126502
- [5] Setter N, Damjanovic D, Eng L *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2006, 100: 051606
- [6] Wang Z J, Bai Y. *Small*, 2019, 15: 1805088
- [7] Cao Y, Morozovska A, Kalinin S V. *Phys. Rev. B*, 2017, 96: 184109
- [8] Guo J, Chen W, Chen H *et al.* *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9: 2002146
- [9] Dong S, Liu J M, Cheong S W *et al.* *Adv. Phys.*, 2015, 64: 519
- [10] Mundy J A, Schaab J, Kumagai Y *et al.* *Nat. Mater.*, 2017, 16: 622
- [11] Chen F, Zhu Y, Liu S *et al.* *Phys. Rev. B*, 2016, 94: 180104(R)
- [12] Scott J F. *Ferroelectrics*, 2016, 503: 117
- [13] Hashimoto S, Orihara H, Ishibashi Y. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1994, 63: 1601
- [14] Tagantsev A K, Stolichnov I, Setter N *et al.* *Phys. Rev. B*, 2002, 66: 214109
- [15] Nataf G F, Guennou M, Gregg J M *et al.* *Nat. Rev. Phys.*, 2020, 2: 634
- [16] Seidel J, Martin L W, He Q *et al.* *Nat. Mater.*, 2009, 8: 229
- [17] Campanini M, Gradauskaite E, Trassin M *et al.* *Nanoscale*, 2020, 12: 9186
- [18] Crassous A, Sluka T, Tagantsev A K *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2015, 10: 614
- [19] Sharma P, Zhang Q, Sando D *et al.* *Sci. Adv.*, 2017, 3: e1700512

- [20] Jiang J, Bai Z L, Chen Z H *et al.* Nat. Mater., 2017, 17: 49
- [21] Chen S, Yuan S, Hou Z *et al.* Adv. Mater., 2021, 33: 2000857
- [22] Ma J, Ma J, Zhang Q *et al.* Nat. Nanotechnol., 2018, 13: 947
- [23] Wang J, Ma J, Huang H *et al.* Nat. Commun., 2022, 13: 3255
- [24] Chen M, Ma J, Peng R C *et al.* Acta. Mater., 2019, 175: 324
- [25] Cai S, Lun Y, Ji D *et al.* Nat. Commun., 2022, 13: 5116
- [26] Lu X, Chen Z, Cao Y *et al.* Nat. Commun., 2019, 10: 3951
- [27] Lu H, Bark C W, Esque de los Ojos D *et al.* Science, 2012, 336: 59
- [28] Park S M, Wang B, Das S *et al.* Nat. Nanotechnol., 2018, 13: 366
- [29] Li Q, Wang B, He Q *et al.* Nano. Lett., 2021, 21: 445
- [30] Liu J, Chen W, Wu M *et al.* Npj. Comput. Mater., 2022, 8: 137
- [31] Wang Y, Guo C, Chen M *et al.* Mechanically driven reversible polarization switching in imprinted BiFeO₃ thin films. submitted
- [32] Das S, Wang B, Cao Y *et al.* Nat. Commun., 2017, 8: 615
- [33] Kim Y, Kelly S J, Morozovska A *et al.* Nano. Lett., 2013, 13: 4068
- [34] Tong S, Park W I, Choi Y Y *et al.* Phys. Rev. A, 2015, 3: 014003
- [35] Hu W, Zhang C, Wang Z L. Nanotechnology, 2019, 30: 042001
- [36] Wang L, Liu S, Feng X *et al.* Nat. Nanotechnol., 2020, 15: 661
- [37] Das S, Wang B, Paudel T R *et al.* Nat. Commun., 2019, 10: 537
- [38] Zhang F Y, Fan H, Han B *et al.* ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, 13: 26180
- [39] Denton A R, Ashcroft N W. Phys. Rev. A, 1991, 43: 3161
- [40] Sharma P, Ryu S, Burton J D *et al.* Nano. Lett., 2015, 15: 3547
- [41] Veithen M, Gonze X, Ghosez P. Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 187401
- [42] Li T, Lipatov A, Lu H *et al.* Nat. Commun., 2018, 9: 3344
- [43] Du J, Xie D, Zhang Q *et al.* Nano Energy, 2021, 89: 106439
- [44] Liou Y D, Chiu Y Y, Hart R T *et al.* Nat. Mater., 2019, 18: 580
- [45] Cai T Y, Ju S. Acta. Phys. Sin., 2018, 67: 157801
- [46] Alexe M, Hesse D. Nat. Commun., 2011, 2: 256
- [47] Fridkin V M, Grekov A A, Ionov P V *et al.* Ferroelectrics, 1974, 8: 433
- [48] Wang J, Ma J, Yang Y *et al.* ACS Appl. Electron. Mater., 2019, 1: 862
- [49] Zhao R, Wang J, Ma J *et al.* Ceram. Int., 2019, 45: 19550
- [50] Guo R, You L, Lin W *et al.* Nat. Commun., 2020, 11: 2571



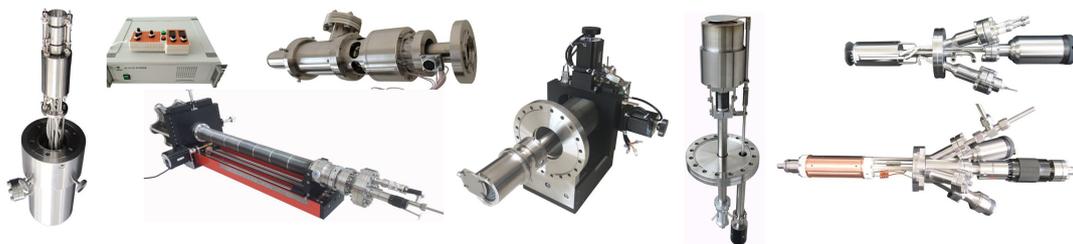
大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理 and 薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

