

滑移铁电：理论、实验及潜在应用*

杨柳^{1,†} 吴梦昊^{2,††}

(1 三峡大学物理系 湖北省弱磁探测工程技术研究中心 宜昌 443002)

(2 华中科技大学物理学院 武汉 430074)

2024-09-30收到

† email: yangliu1@ctgu.edu.cn

†† email: wmh1987@hust.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20241102

CSTR: 32040.14.wl20241102

Sliding ferroelectricity: theory, experiment, and potential applications

YANG Liu^{1,†} WU Meng-Hao^{2,††}

(1 Department of Physics, Hubei Engineering Research Center of Weak Magnetic-field Detection, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

(2 School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要 近年来，二维铁电受到了广泛关注，尤其是滑移铁电理论指出，大多数二维材料都可以通过层间堆叠产生垂直极化，并在电场下通过层间滑移翻转，这种独特的铁电机理已在多种范德瓦耳斯体系中得到了实验的广泛验证。文章综述了近期滑移铁电的理论和实验进展及其潜在应用：其独特的滑移机制使翻转势垒空前降低同时又保证了热稳定性，还可使信息写入高速低耗且抗疲劳；滑移铁电性与二维材料磁、光、超导、谷电子、拓扑性质、声子手性等丰富物性的耦合使它们可以被非易失性电控，相关的莫尔铁电、金属铁电、非线性霍尔效应等也极大丰富了铁电物理，为探索新奇物理现象和开发新型电子器件提供了广阔平台。目前已实现了滑移铁电单晶的大规模生长，基于滑移铁电的晶体管、神经形态忆阻器、光电子等器件的优越性能也得到验证，未经优化的翻转速度和抗疲劳性已能和目前成熟的铁电器件最优性能相比拟，未来前景可期。

关键词 二维材料，滑移/莫尔铁电，高速低耗，抗疲劳

Abstract In recent years, two-dimensional (2D) ferroelectrics have stimulated remarkable interest. Notably, the recently proposed concept of sliding ferroelectricity suggests that for most 2D materials, vertical polarization can be induced through interlayer stacking in their bilayers and multilayers, which are switchable upon interlayer sliding driven by a vertical electric field. Such sliding ferroelectricity has been extensively verified experimentally in a series of van der Waals systems. This paper will provide a concise review of the latest theoretical and experimental developments in sliding ferroelectrics, as well as their potential applications. The unique sliding mechanism significantly reduces the switching barrier while ensuring thermal stability, and also enables high-speed, low energy cost, and fatigue-resistant data writing, all of which have been confirmed experimentally. The coupling of sliding ferroelectricity with intrinsic physical properties of 2D monolayers (magnetism, excitonics, superconductivity, valleytronics, nontrivial topology, phonon chirality, etc.), allows for non-volatile electrical control of those properties. The related physics, like Moiré ferroelectricity, metallic ferroelectricity, and the ferroelectric nonlinear anomalous Hall effect, have greatly enriched ferroelectric physics, providing a broad platform for exploring novel physical phenomena and developing new

electronic devices. Currently, large-scale growth of sliding ferroelectric single crystals has been achieved experimentally. The superior performance of transistors, neuromorphic memristors, optoelectronics, and other devices based on sliding ferroelectrics has been verified. The unoptimized flipping speed and fatigue resistance are already comparable to the best performance of prevalent ferroelectric devices, indicating a promising future.

Keywords two-dimensional materials, sliding/Moiré ferroelectricity, high speed and low power-consumption, fatigue-resistant

1 引言

铁电材料具有极化双稳态且可被外电场翻转,在非易失性存储、传感、非线性光学器件等领域中应用广泛^[1-3]。然而传统铁电材料在尺寸减小至纳米量级时,由于退极化场增强、表面重构等因素影响,极化剧减甚至完全消失^[4, 5],各种界面问题也严重制约了铁电材料在高集成度电子器件中的广泛应用。原子级厚度的二维材料拥有干净的范德瓦耳斯界面,迄今为止已实验合成了一系列二维铁电体系^[6, 7],如SnTe^[8]、In₂Se₃^[9-11]、CuInP₂S₆^[12]等。然而,大多数常见的二维材料,如

MoS₂、h-BN、石墨烯等由于晶格高度对称,在单层下不具备铁电性。我们在2017年提出了滑动铁电机理,指出通过双层或多层的特定堆叠可以打破单层结构下的对称性,产生一种通过层间滑移翻转的垂直铁电性^[13, 14]。近年来这一预测得到了广泛实验证实,如在BN^[15-18]、InSe^[19-22]、过渡金属硫属化合物TMDs(MoS₂^[23-30]、WSe₂^[31, 32]、WTe₂^[33-36]、MoTe₂^[37]、ReS₂^[38]、ReSe₂^[39])等二维体系,甚至在纳米管^[40]和有机晶体^[41]等体系中都观测到滑动铁电性的存在。

滑动铁电兼具极低翻转势垒和较高居里温度,可使信息写入高速低耗且抗疲劳,这些都被实验证实。此外还能与二维材料的各种丰富物性相结合,衍生出一系列新奇的物理特性。在本文中,我们将系统介绍滑动铁电性的基本原理、实验验证、理论和实验的最新进展以及器件方面的应用,探讨它的潜力和挑战,并对未来研究方向进行展望。

2 滑动铁电的机制及理论进展

2.1 滑动/莫尔铁电机理

以BN双层为例,反平行堆叠的构型维持了中心对称性,不具备极性,而平行时可以形成AB堆叠(图1(a)左)或BA堆叠(图1(a)右),二者在能量上是简并的。其中,在AB堆叠下,上层的氮原子正对下层硼原子,而上层的硼原子则对准下层的六元环中心。在BA堆叠中,情况则完全逆转。在这两种堆叠下,体系的对称性被打破,导致层间的电荷重新分布,在垂直方向产生电

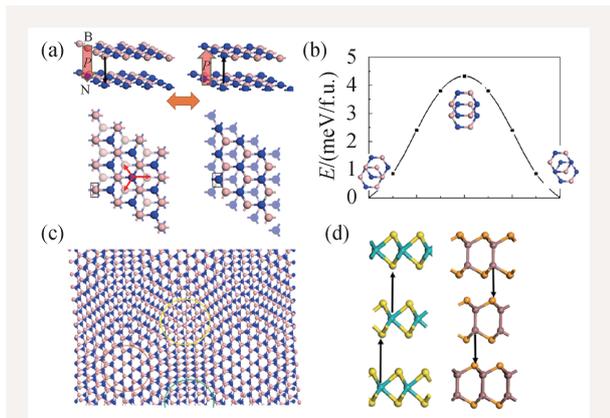


图1 滑动/莫尔铁电的理论模型 (a)双层BN铁电态的原子结构示意图(左:AB堆叠;右:BA堆叠),其中黑色箭头从硼原子指向其他层中最近的氮原子,箭头P标注了极化方向,红色箭头代表三个等价的滑移路径;(b)层间滑移翻转极化的滑移路径和势垒;(c)转角双层BN莫尔超晶格中的铁电畴;(d)MoS₂(左)和InSe(右)体相(R3m)中的铁电性^[13]

* 国家自然科学基金(批准号:22073034)资助项目

极化，第一性原理计算得到的极化值为 2.08 pC/m ($0.68 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$)。AB与BA堆叠极化方向相反，二者之间可以通过层间滑移一个B-N键长的距离相互转化，即在外加电场的作用下，驱动层间滑移完成极化的翻转，这也是滑移铁电性中“滑移”二字的由来。由于层间是范德瓦耳斯相互作用，翻转势垒普遍较低，利用Nudged elastic band (NEB)方法计算预测的双层BN的滑移势垒仅为几个毫电子伏(图1(b))，比传统铁电材料低近2个数量级。除了控制特定的高对称堆叠形成这类单畴极性态之外，在层间引入小转角或微小的晶格失配还可以产生周期性的铁电畴分布(图1(c))，形成莫尔铁电。这类滑移铁电性可以推广至一系列范德瓦耳斯多层甚至体相结构中，如 MoS_2 、 InSe 、 GaSe 、 WTe_2 ^[14]等(图1(d))。

2.2 近期理论研究进展

2023年，徐长松和向红军团队通过群论分析^[42]指出：基于单层材料的对称性，可以推断出在任意平移操作和特定旋转条件下的双层体系是否存在铁电性。像石墨烯和磷烯等高对称单质双层体系在任何层间滑移矢量的作用下都会保持中心反演对称性，不应产生铁电性。鉴于实验在h-BN覆盖的双层石墨烯探测到了铁电信号^[43, 44]，我们提出了跨层滑移铁电模型，认为该铁电来源于跨层堆叠构型的不对称^[45]。该理论同样适用于纯多层石墨烯体系：当层数大于3时，在特定堆叠下也会出现跨层滑移铁电性^[46]，目前已经被实验证实^[47]。此外董帅团队还预测滑移铁电也可以存在于准一维链间(图2(a))^[48]，之后还有零维分子半滑移铁电的设计^[49]。滑移铁电体系中的电极化通常较弱，但也不乏增强层间极化的预测^[50-52]，比如王前团队预测 $\text{PdSe}_2/\text{PtSe}_2$ 范德瓦耳斯异质结

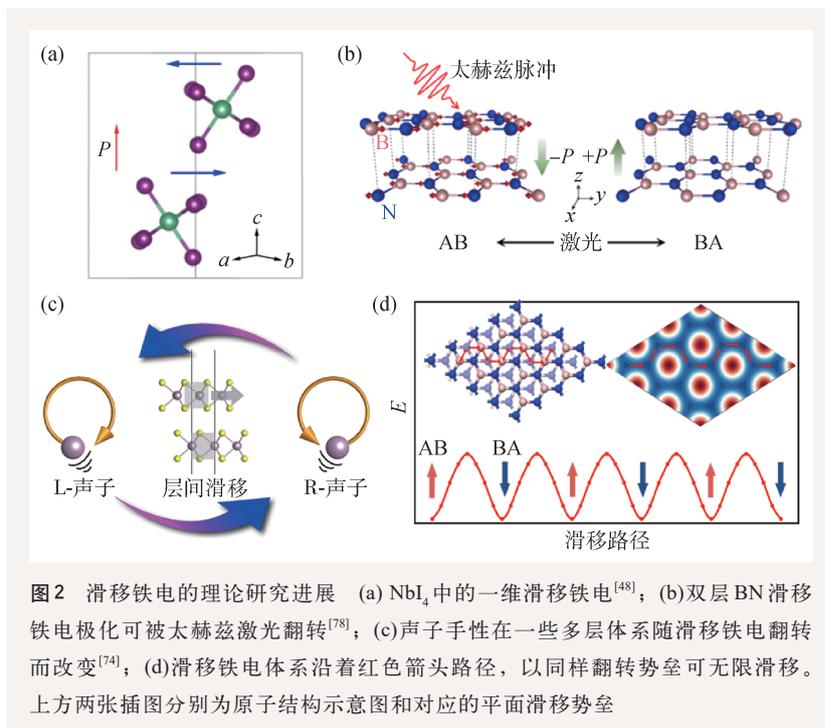


图2 滑移铁电的理论研究进展 (a) NbI_4 中的一维滑移铁电^[48]；(b)双层BN滑移铁电极化可被太赫兹激光翻转^[78]；(c)声子手性在一些多层体系随滑移铁电翻转而改变^[74]；(d)滑移铁电体系沿着红色箭头路径，以同样翻转势垒可无限滑移。上方两张插图分别为原子结构示意图和对应的平面滑移势垒

为具有面内极化的滑移铁电体系，极化值高达 $17.11 \times 10^{-10} \text{ C/m}$ ^[53]。

除了体系拓展，该滑移机制本身也得到了理论计算的深入研究。我们在2018年提出，虽然滑移铁电势垒极低，但由于二维材料面内刚性强从而使得电偶极子同向，无序态的高能量代价保证了其热力学稳定性^[14]。Ping Tang等在连续平均场近似下建立了滑移铁电的热动力学模型，并以双层BN和 WTe_2 为例，进一步理论上证实了滑移铁电的普遍高居里温度特性来源于单层的面内刚度^[54]。M. Marmolejo-Tejada等认为，不同于传统铁电体对于顺电相的定义，滑移铁电的顺电相只能归因于具有相反本征极化的铁电相的时间域平均值^[55]。钟志诚团队利用基于深度学习力场的分子动力学研究了滑移铁电的畴壁及其动力学性质，揭示了其畴壁的低移动临界电场和高移动速度的特性^[56]。

二维材料物性丰富，它们与滑移铁电的耦合(如磁—电^[57-60]、谷—电^[61-63]、光—电^[64])是近期理论研究的重要方向。此外，滑移铁电涉及的非线性光学^[65-67]、非线性霍尔效应^[68, 69]、层霍尔效应^[70, 71]、铁电金属^[72, 73]、声子手性与声子霍尔效应^[74]、自旋劈裂^[75, 76]、负压电性^[77]等也极大丰富了铁电物理。例如，黄华卿、段文辉团队预测了

ZrTe₃薄层中滑移铁电和非线性霍尔效应的耦合^[69]；得益于滑移铁电超低势垒，杨玉荣、吴迪团队^[78]和孟胜团队^[79]最近都预测了双层BN滑移铁电极化可被太赫兹激光超快翻转(图2(b))；吴维康、张力发团队预测滑移铁电在一些多层体系可以翻转声子手性(图2(c))^[74]；褚维斌、龚新高团队通过激发态动力学分析发现滑移铁电翻转过程中伴随的超快界面电荷转移过程，并指出通过滑移可以实现光激发态载流子分布的精确调制^[80]；杨长红、程振祥团队还预测在SnS₂/MnPS₃/SnS₂异质结中，滑移诱导的铁电相变可以改变MnPS₃的PT(空间反演和时间反演相结合)对称性，进而实现从反铁磁性到交错磁性相变^[81]；龙闰、方维海团队还预测滑移铁电可用于调控载流子寿命^[82]。此外莫尔铁电畴同样可以调控物性，比如

姚望团队和Vladimir I Fal'ko团队都从理论上在WX₂/MoX₂(X = S, Se)转角体系中揭示了周期性莫尔铁电网格捕获电子、空穴和激子的机制^[83]。值得一提的是滑移铁电属于非传统的长离子位移铁电^[84]，有可能不遵守诺伊曼定理^[85, 86]，比如前文提及的4层石墨烯同时拥有面内3重旋转对称性和面内铁电性^[46]，理论上滑移铁电体系沿着图2(d)中的路径，以同样翻转势垒甚至可无限滑移下去。

3 滑移铁电实验进展

3.1 实验验证

2018年，Zaiyao Fei等人设计了图3(a)中的器件结构^[33]：将单层石墨烯置于双层WTe₂之上，并通过测量极化翻转导致的石墨烯电导变化成功地获得了回线特征曲线，这一特性一直维持到350 K才消失，实验测量估算的极化值(20 K下约为0.16 pC/m)与理论计算的极化值(0.38 pC/m)^[87]数值上接近。而后Pankaj Sharma等人也在块体WTe₂测到了铁电性和金属性共存的特征^[34]。张翔团队不仅在WTe₂中测到了电极化的信号，还提供了层间滑移翻转电极化的证据^[36]：如果极化通过层间滑移的方式翻转，奇数层的情况下会经过一个中心反演对称的中间态1T'相(非极性单斜相)(图3(b))，而偶数层不经过这个中间态；3层二次谐波(SHG)强度先急剧减小后增大，而4层SHG强度变化较小(图3(c))。拉曼光谱测量得到的(图3(d))层内声子简正模式(165 cm⁻¹和215 cm⁻¹)的强度不随极化翻转发生变化，层间剪切变形的声子模式(9 cm⁻¹)会在到达相变临界点时迅速减弱。这些实验结果都显示铁电相变时发生了相

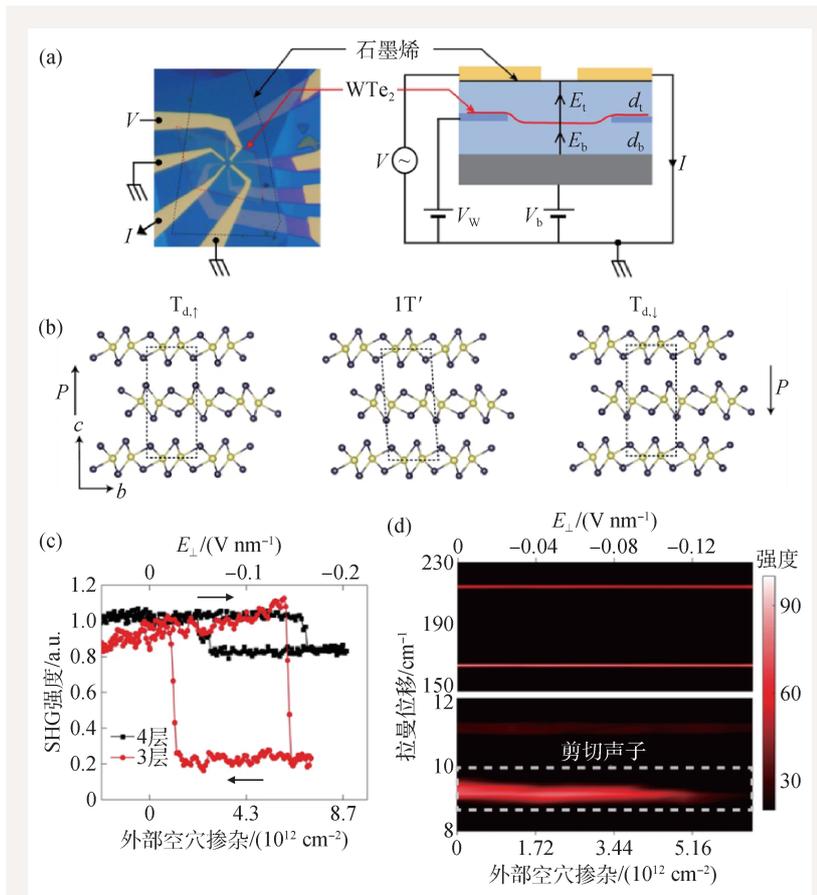


图3 WTe₂中滑移铁电性的实验验证 (a)双层WTe₂中铁电性实验测量器件示意图^[33]；(b)铁电相和单斜相WTe₂的结构侧视图；(c)三层和四层堆叠的WTe₂随垂直偏压变化的SHG信号(这里是双栅器件，通过垂直偏压可以实现一定浓度的空穴掺杂，两者是对应的)；(d)五层WTe₂随垂直偏压变化的拉曼谱信号^[36]

对的层间滑移，揭示了 T_d - WTe_2 (极性正交相)滑移铁电性本质。2021年，de la Barrera 等人利用双栅极介观装置的电容感测技术，直接测定了双层 WTe_2 在金属状态下的自发极化^[35]。此外，与 WTe_2 具有相似的晶体结构的 $MoTe_2$ 、 ReS_2 以及 $ReSe_2$ 中的滑移铁电性也陆续被实验观测到^[37-39]。

2021年，另一典型的滑移铁电体系双层 BN 也被实验所证实：麻省理工学院的 P. Jarrilo-Herrero 团队通过图 4(a), (b) 中的运输器件探测双层 BN 中垂直极化对石墨烯电阻的影响，从而间接地探测极化状态^[15]，根据载流子浓度变化估算的极化值 (2.25 pC/m) 与理论值 (2.08 pC/m)^[13] 十分吻合；Moshe Shalom 团队用侧带开尔文探针模式原子力显微镜测量了双层 BN 样品中不同堆叠构型表面区域

的电势变化 (图 4(c), (d))^[16]，用加偏压的探针实现了极化翻转。上述 WTe_2 和 BN 分别属于金属和绝缘体，而半导体性的 TMDs 同质双层^[24, 28, 88, 89] 甚至是异质双层中^[25] 的滑移铁电性随后也被实验所证实。它们都是高迁移率半导体，且带隙容易调控，有望在这类体系中结合铁电存储实现存算一体的计算架构。另外上述部分实验还在扭角双层 BN、 MoS_2 等体系中观察到了具有特定极性的莫尔铁电畴的交错排列现象^[15, 16, 23, 24]，比如诺贝尔奖得主 A. K. Geim 团队通过探测表面电势的变化来可视化转角 BN 双层上的铁电畴分布^[90]。齐瑞娟、段纯刚团队在 γ - $InSe$ 中同时测到了面内和面外极化^[19]，并采用原子级别原位球差电镜技术首次从原子尺度上观测到其层间的定向滑移，以及该层间滑移所引起的极化翻转过程^[20]。张毅和董帅团队还在有机-无机杂化体系 (15-crown-5)- Cd_3Cl_6 (CCC) 分子晶体中观测到了滑移铁电，并直接测到了电滞回线^[41]。

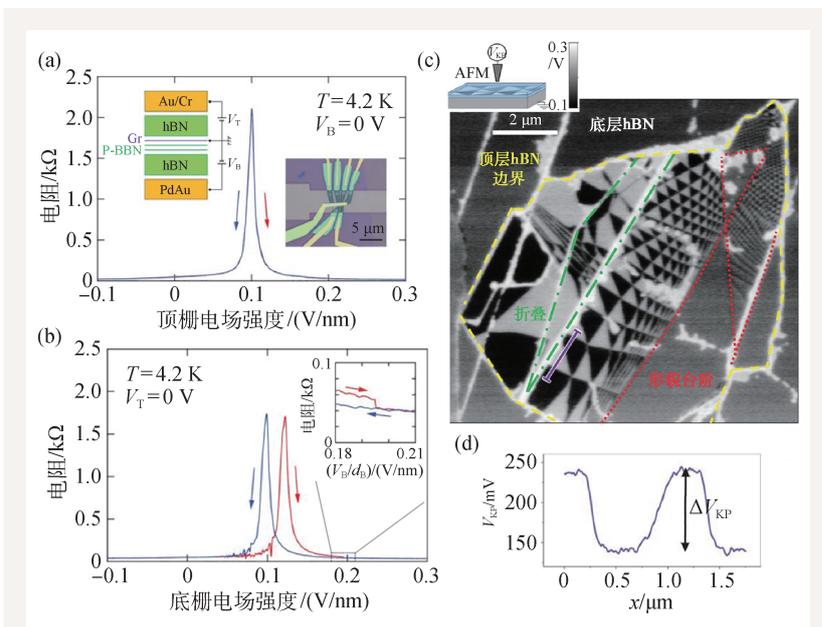


图 4 BN 中滑移铁电性的实验验证 (a) 双层 h-BN 器件示意图以及 (b) 石墨烯电阻随顶栅和底栅电压变化曲线。其中，(a) 中左侧小图为器件结构，右侧小图为器件的光学显微成像，(b) 中右侧小图放大显示了 0.2 V/nm 附近的数据 (红/蓝色曲线代表电压正 (反) 向扫描数据^[15])；(c) AFM 测量小转角下转角 h-BN 样品的局域电势变化和畴结构，左上角小图展示了具体扫描设置；(d) 沿 (c) 图中紫色线段测量的表面电势变化^[16]

3.2 滑移铁电体系的直接薄膜生长

滑移铁电的特性与堆叠方式密切相关，而目前的实验操作往往依赖于精细的微纳技术来剥离和重新组合这些二维材料。这一过程不仅技术要求高，而且难以实现大面积样品的制备，严重限制了滑移铁电体系的广泛应用。因此研发出能够精确控制薄膜生长的合成技术，以实现大面积、均匀一致的薄膜制备，对于推动滑移铁电大规模应用具有重要的意义。近期已经有不少研究通过特殊的生长衬底设计和精确控制的外延生长方法，成功制备了高质量的滑移铁电薄膜。例如，白雪冬、刘开辉等团队通过斜边外延技术成功制造出厘米尺寸单晶 3R-BN (菱方相)，并验证了其高居里温度以及高稳定性的滑移铁电性^[91]，还通过“晶格传质—界面外延”材料制备策略，首次实现了层数及堆叠结构可控的 3R-TMDs 单晶的通用制备^[92]；王学文、刘政团队通过化学气相沉积 (CVD) 生长了双层 3R- MoS_2 并成功观测到滑移铁电性^[93]。

4 相关物理与潜在应用

我们在2021年关于滑移铁电的展望中提出^[14]，独特滑移机制导致的低翻转势垒和高稳定性，有望应用于高速低耗数据的读写，并可以避免传统铁电材料因缺陷在极化反复翻转中聚集于电极导致的疲劳效应，此外还能利用二维铁电易于高密度集成的特性。而对于二维材料丰富的本征物理特性，如磁性、激子、非平庸拓扑、谷电子、超导等，它们与滑移/莫尔铁电都可能产生耦合(图5)，使它们得以非易失性电控，为开发新型器件提供了广阔探索空间。

4.1 多种物性耦合调控

目前滑移铁电体系中预测最多的磁—电耦合^[57–59]和谷—电耦合^[61–63]仍有待实验验证，而滑移铁电对激子和拓扑性质的调控已在一些报道中得以真正实现。例如Jie Shan和Kin Fai Mak团队通过双层WTe₂滑移铁电实现了拓扑能带、摩尔势

和非线性反常霍尔效应的调控(图5(b), (c))^[94]；Swarup Deb等人则直接观测到滑移铁电翻转对激子信号的显著影响^[95]。

值得一提的是，铁电材料被认为与金属性相斥，因为金属中的自由电子能够很好地屏蔽由于长程有序偶极矩引起的内建场。然而对于滑移铁电体系，铁电极化来源于层间电荷转移，电偶极矩主要分布于范德瓦耳斯层间，与层内自由电子解耦合，通过特定堆叠序列，大多数二维金属层都有可能被赋予可翻转的极化特性^[46, 72, 87]。那些在传统绝缘体铁电材料中难以共存或很少共存的独特性质，如等离子体效应、超导性、铁磁性等，有机会在二维体系与滑移铁电性耦合产生。例如Daniel A. Rhodes团队发现在MoTe₂的薄层中，可以实现超导性与滑移铁电性的共存，且铁电性和超导性之间是紧密耦合的，并可通过铁电翻转来实现超导的开关(图5(d))^[37]。

4.2 高速低耗及抗疲劳数据存储

滑移机制的超低翻转势垒有望使得数据写入速度空前提升，而由于其通过水平层间滑移翻转

垂直极化，还可能免于传统铁电材料的疲劳效应。铁电材料的疲劳失效通常被认为是由带电荷的缺陷在极化反复翻转中迁移并聚集于钉扎畴界和边界电极处，进而影响极化翻转。而滑移铁电通过层间滑移实现极化翻转所需电场较小，其层状结构也使得缺陷难以跨越层间进行移动。

2023年，台湾师范大学蓝彦文团队利用外延生长的3R-MoS₂作为铁电晶体管(FeFET)中的沟道材料，实现了基于滑移铁电的非易失性存储器件(图6(a))^[96]。得益于滑移铁电的低势垒特

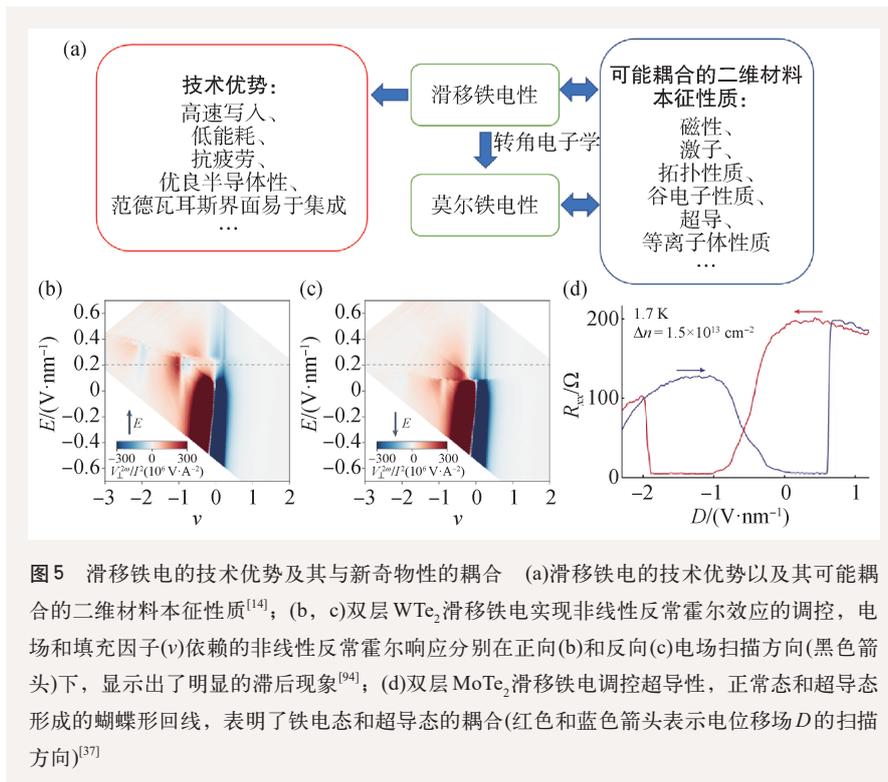


图5 滑移铁电的技术优势及其与新奇物性的耦合 (a)滑移铁电的技术优势以及其可能耦合的二维材料本征性质^[14]；(b), (c)双层WTe₂滑移铁电实现非线性反常霍尔效应的调控，电场和填充因子(ν)依赖的非线性反常霍尔响应分别在正向(b)和反向(c)电场扫描方向(黑色箭头)下，显示出了明显的滞后现象^[94]；(d)双层MoTe₂滑移铁电调控超导性，正常态和超导态形成的蝴蝶形回线，表明了铁电态和超导态的耦合(红色和蓝色箭头表示电位移场 D 的扫描方向)^[37]

性，铁电翻转的矫顽场仅为 0.036 V/nm，远低于一些常见的铁电薄层(0.1—1 V/nm)^[97, 98]，开关比高达 10^6 (图 6(b))。且数据信号展现出极高的稳定性，在经历了 10^4 次的循环测试之后未观察到明显的性能退化现象。2024 年，电子科技大学刘富才团队通过化学气相输送法制备了双层 MoS₂ 铁电器件，揭示了其优异的抗疲劳性能^[30]。如图 6(c)，(d) 所示，在百万次循环电场翻转极化以后，铁电极化并未发生衰减。几乎同时，Yasuda 等人研究了另一种滑移铁电材料——双层 BN 的器件疲劳行为^[18]。他们发现，在极化反复翻转 10^{11} 次后器件的疲劳衰减非常微小，翻转速度能够达到纳秒量级，这些已能和目前成熟的铁电器件最优性能相比拟，且是在器件结构未经优化的情况下达到的，还有很大的提升空间。

4.3 多极化态、梯度极化累积和翻转

滑移铁电性的极化源自层间范德瓦耳斯界面间电荷转移产生的电偶极矩，电极化主要分布于层间区域。随着层数的增加，体系包含的范德瓦耳斯界面也随之增加。由于层间弱范德瓦耳斯作用的特性，不同界面之间近乎是解耦的，随着层数增加可能会出现能量上简并或准简并的多极化态，最大极化值也会逐渐累积。

2022 年，Moshe Shalom 团队对 WSe₂ 和 MoS₂ 多层体系进行了表面电势测量^[27]。随着层数增加，表面电势表现出均匀间隔、几乎解耦的台阶式增长(图 7(a)，(b))。由于这种极化层间局域的特点，极化对自由载流子的引入不太敏感，即使载流子的浓度高达 10^{13} cm^{-2} ，层间极化依然显著。这一特性允许在不牺牲铁电性能的前提下，通过调整载流子浓度来精确调控材料的面内导电性。他们

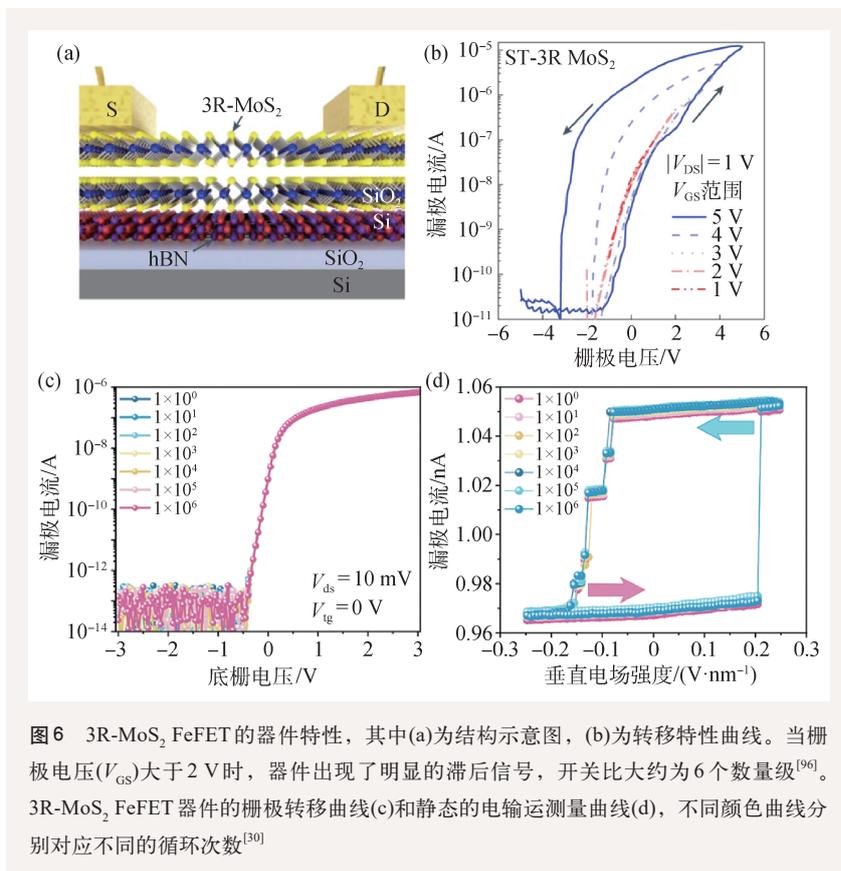


图 6 3R-MoS₂ FeFET 的器件特性，其中(a)为结构示意图，(b)为转移特性曲线。当栅极电压(V_{GS})大于 2 V 时，器件出现了明显的滞后信号，开关比大约为 6 个数量级^[96]。3R-MoS₂ FeFET 器件的栅极转移曲线(c)和静态的电输运测量曲线(d)，不同颜色曲线分别对应不同的循环次数^[30]

进一步发现，极化并不会无限累积，而是随着层数的增加逐渐趋于饱和(图 7(c))^[99]。2022 年，刘富才团队等通过机械剥离得到不同层厚的 3R-MoS₂，并构筑了一系列双栅极场效应晶体管器件来研究其滑移铁电翻转的动力学过程^[26]，测出了很高的铁电相变温度(高于 650 K)，并对载流子浓度变化具有良好的鲁棒性。他们发现在多层情况下(大于两层)会出现很多反常极化态(图 7(d))，每翻转一层就会产生一个中间态，历经一个小时后仍能稳定。上海科技大学薛加民等人在三层的 h-BN 中也观测到了这种多阻态和逐层翻转的特性^[100]。

滑移铁电独有的多极化态特性在多态存储、忆阻器和神经形态计算等领域具有巨大的应用前景和潜力。2024 年，郑守君等人基于平行堆叠的 h-BN 隧穿器件设计了一种滑移忆阻器，它在界面极化的作用下表现出可调的忆阻行为^[101]。河北大学闫小兵等人也基于 ReSe₂ 的滑移铁电性设计实现了多功能忆阻器，器件表现出记忆电容和忆阻器的可重构行为以及可见光感知、逻辑“或”计

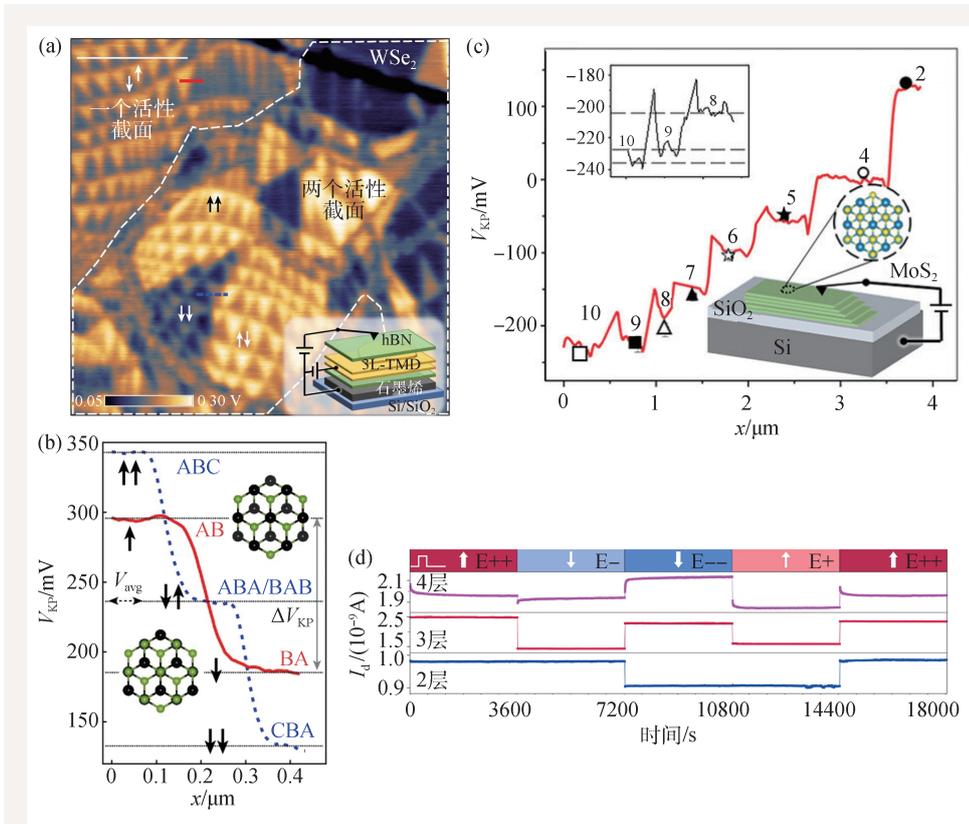


图7 随层数变化, 滑移铁电极化的累积和饱和现象 (a)开尔文探针力显微镜测量的 WSe_2 表面电势(右下角小图展示了器件结构); (b)两层(红线)和三层(蓝线)表面电势沿着图(a)中红色和蓝色短线区域的变化曲线^[27]; (c) MoS_2 中表面电势随层数的变化, 左上角小图对8—10层处进行了局部放大显示, 右下角小图展示了扫描设置^[99]; (d)在脉冲电场作用下, 不同层厚的3R- MoS_2 FET中的起始态(E++)、中间态(E-和E+)和终态(E--)的稳定性^[26]

算、长/短期突触可塑性等多种功能^[102], 基于该器件构建了神经网络, 成功对手写数字图片进行了识别, 准确率可达97.04%。中国科学院物理研究所张广宇团队基于3R- MoS_2 搭建的二维滑移铁电半导体器件, 在室温下不仅表现出高开关比、非易失性存储特性, 且在弯曲超过 10^3 次后仍能保持性能。此外, 他们还基于该柔性滑移铁电突触展示了模拟特定赫布形式的可塑性, 如长期增强和抑制, 并构建了五层卷积神经网络, 实现了高达97.81%的手写数字集(MNIST)识别的准确率^[103]。

4.4 光电子器件

传统的铁电材料通常属于绝缘体, 较大的带隙限制了它们在光电子器件中的应用。而滑移

铁电机制广泛适用于范德瓦耳斯层状体系, 涵盖范围从绝缘体(BN)到高迁移率半导体(TMDs)甚至是金属(WTe_2), 为基于铁电材料的光电子器件提供了丰富的候选材料。Ziliang Ye团队利用3R- MoS_2 的层间极化及其诱导的退极化场, 构建了一种高效率的石墨烯— MoS_2 光伏器件^[104]。器件在室温条件下展现出高达16%的外部量子效率, 这一性能显著优于目前已知的体光伏器件所达到的最高效率, 其提升幅度达到了一个数量级。随后他们进一步利用

MoS_2 双层在低温下实现了10%的外部量子效率并观察到了皮秒级别的光电流响应, 这表明该设备的内在带宽达到了约100 GHz的高水平^[105]。郭耀团队还在交叉堆叠的 WS_2 纳米管中观测到了范德瓦耳斯界面滑移产生的自发电极化转换, 首次为零维体系中证实了滑移铁电机制^[40, 106]。此外, 他们发现其具有可编程且非易失的光伏特性, 因此是一种天然、理想的光伏随机存取存储器, 并制备了16像素的这种存储器阵列, 实现了硬件层面的神经网络算法, 成功演示了基于监督学习和强化学习两种算法的图像识别功能^[106]。

5 结语与展望

过去一年里滑移铁电研究进展备受瞩目, 尤其在实验方面, 不但验证了其高速低耗和抗疲劳

等优势,一些应用瓶颈问题也得到了解决,比如大规模的单晶生长。滑移铁电体系中的极化来源于不对称的范德瓦耳斯层间电荷转移,强度通常较弱,一些预测极化较高的体系仍未被实验证实,但并不妨碍一些极化较弱的半导体滑移铁电晶体管实现高达 10^6 的开关比^[22, 96]。正如今年发表在*Science*的一篇报道所言^[18],虽然BN和MoS₂体系的滑移铁电三年前才被实验证实,现在这类器件

的诸多方面已接近目前成熟铁电器件的最优性能,且是在器件结构未经优化的情况下达到的,未来还有很大提升空间。此外滑移铁电性与二维材料磁、谷、光、超导等丰富物性的耦合,相关的莫尔铁电、金属铁电、非线性霍尔效应等,都极大丰富了铁电物理内涵,其本身一些非传统性质(如相变、畴壁运动、多重滑移方式等)也仍有未明之处,值得未来研究继续探索。

参考文献

- [1] Dawber M, Rabe K M, Scott J F. *Rev. Mod. Phys.*, 2005, 77: 1083
- [2] Scott J F. *Science*, 2007, 315: 954
- [3] Wei X K, Domingo N, Sun Y *et al.* *Adv. Energy Mater.*, 2022, 12: 2201199
- [4] Fong D D, Stephenson G B, Streiffer S K *et al.* *Science*, 2004, 304: 1650
- [5] Junquera J, Ghosez P. *Nature*, 2003, 422: 506
- [6] Wang C, You L, Cobden D *et al.* *Nat. Mater.*, 2023, 22: 542
- [7] Wu M. *ACS Nano*, 2021, 15: 9229
- [8] Chang K, Liu J, Lin H *et al.* *Science*, 2016, 353: 274
- [9] Xue F, Hu W, Lee K C *et al.* *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28: 1803738
- [10] Zhou Y, Wu D, Zhu Y *et al.* *Nano Lett.*, 2017, 17: 5508
- [11] Cui C, Hu W J, Yan X *et al.* *Nano Lett.*, 2018, 18: 1253
- [12] Liu F, You L, Seyler K L *et al.* *Nat. Commun.*, 2016, 7: 1
- [13] Li L, Wu M. *ACS Nano*, 2017, 11: 6382
- [14] Wu M, Li J. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2021, 118: e2115703118
- [15] Yasuda K, Wang X, Watanabe K *et al.* *Science*, 2021, 372: 1458
- [16] Vizner Stern M, Waschitz Y, Cao W *et al.* *Science*, 2021, 372: 1462
- [17] Lv M, Sun X, Chen Y *et al.* *Adv. Mater.*, 2022, 34: 2203990
- [18] Yasuda K, Zalys-Geller E, Wang X *et al.* *Science*, 2024, 385: 53
- [19] Sui F, Jin M, Zhang Y *et al.* *Nat. Commun.*, 2023, 14: 36
- [20] Sui F, Li H, Qi R *et al.* *Nat. Commun.*, 2024, 15: 3799
- [21] Wang Y, Zeng Z, Tian Z *et al.* *Adv. Mater.*, 2024, 36: 2410696
- [22] Bian R, Cao G, Pan E *et al.* *Nano Lett.*, 2023, 23: 4595
- [23] Weston A, Castanon E G, Enaldiev V *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17: 390
- [24] Wang X, Yasuda K, Zhang Y *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17: 367
- [25] Rogée L, Wang L, Zhang Y *et al.* *Science*, 2022, 376: 973
- [26] Meng P, Wu Y, Bian R *et al.* *Nat. Commun.*, 2022, 13: 7696
- [27] Deb S, Cao W, Raab N *et al.* *Nature*, 2022, 612: 465
- [28] Liu Y, Liu S, Li B *et al.* *Nano Lett.*, 2022, 22: 1265
- [29] Yang D, Liang J, Wu J *et al.* *Nat. Commun.*, 2024, 15: 1389
- [30] Bian R, He R, Pan E *et al.* *Science*, 2024, 385: 57
- [31] Ko K H Y, Yuk A, Engelke R *et al.* *Nat. Mater.*, 2023, 22: 992
- [32] Zhang S, Liu Y, Sun Z *et al.* *Nat. Commun.*, 2023, 14: 6200
- [33] Fei Z, Zhao W, Palomaki T A *et al.* *Nature*, 2018, 560: 336
- [34] Sharma P, Xiang F X, Shao D F *et al.* *Sci. Adv.*, 2019, 5: eaax5080
- [35] de la Barrera S C, Cao Q, Gao Y *et al.* *Nat. Commun.*, 2021, 12: 5298
- [36] Xiao J, Wang Y, Wang H *et al.* *Nat. Phys.*, 2020, 16: 1028
- [37] Jindal A, Saha A, Li Z *et al.* *Nature*, 2023, 613: 48
- [38] Wan Y, Hu T, Mao X *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2022, 128: 067601
- [39] Li F, Fu J, Xue M *et al.* *Front. Phys.*, 2023, 18: 53305
- [40] Niu Y, Li L, Qi Z *et al.* *Nat. Commun.*, 2023, 14: 5578
- [41] Miao L P, Ding N, Wang N *et al.* *Nat. Mater.*, 2022, 21: 1158
- [42] Ji J, Yu G, Xu C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2023, 130: 146801
- [43] Zheng Z, Ma Q, Bi Z *et al.* *Nature*, 2020, 588: 71
- [44] Niu R, Li Z, Han X *et al.* *Nat. Commun.*, 2022, 13: 6241
- [45] Yang L, Wu M. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33: 2301105
- [46] Yang L, Ding S, Gao J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2023, 131: 096801
- [47] Atri S S, Cao W, Alon B *et al.* *Adv. Phys. Res.*, 2024, 3: 2300095
- [48] Ding N, Ye H, Dong S. *Phys. Rev. B*, 2024, 110: 024115
- [49] Zhong T, Zhang H, Wu M. *Research*, 7: 0428
- [50] Zhang C, Zhang Z, Wu Z *et al.* *J. Phys. Chem. Lett.*, 2024, 15: 8049
- [51] Wang Z, Gui Z, Huang L. *Phys. Rev. B*, 2023, 107: 035426
- [52] Xu J, Yang Z, Liu W *et al.* *J. Phys.: Condens. Matter*, 2024, 36: 205505
- [53] Hou C, Shen Y, Wang Q *et al.* *ACS Nano*, 2024, 18: 16923
- [54] Tang P, Bauer G E W. *Phys. Rev. Lett.*, 2023, 130: 176801
- [55] Marmolejo-Tejada J M, Roll J E, Poudel S P *et al.* *Nano Lett.*, 2022, 22: 7984
- [56] He R, Zhang B, Wang H *et al.* *Acta Mater.*, 2024, 262: 119416
- [57] Liu X, Pyatakov A P, Ren W. *Phys. Rev. Lett.*, 2020, 125: 247601
- [58] Liu K, Ma X, Xu S *et al.* *npj Comput. Mater.*, 2023, 9: 16
- [59] Yu S, Xu Y, Dai Y *et al.* *Phys. Rev. B*, 2024, 109: L100402
- [60] Li H, Zhu W. *Nano Lett.*, 2023, 23: 10651
- [61] Wu Y, Tong J, Deng L *et al.* *Nano Lett.*, 2023, 23: 6226
- [62] Ma J, Luo X, Zheng Y. *npj Comput. Mater.*, 2024, 10: 102
- [63] Zhang T, Xu X, Huang B *et al.* *npj Comput. Mater.*, 2022, 8: 64
- [64] Zhong T, Ren Y, Zhang Z *et al.* *J. Mater. Chem. A*, 2021, 9: 19659
- [65] Xiao R C, Gao Y, Jiang H *et al.* *npj Comput. Mater.*, 2022, 8: 138
- [66] Zhang C, Guo P, Zhou J. *Nano Lett.*, 2022, 22: 9297

- [67] Zhou J. *npj 2D Mater. Appl.*, 2022, 6: 15
 [68] Wang H, Qian X. *npj Comput. Mater.*, 2019, 5: 119
 [69] Wang E, Zeng H, Duan W *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2024, 132: 266802
 [70] Feng Y, Dai Y, Huang B *et al.* *Nano Lett.*, 2023, 23: 5367
 [71] Peng R, Zhang T, He Z *et al.* *Phys. Rev. B*, 2023, 107: 085411
 [72] Sheng H, Fang Z, Wang Z. *Phys. Rev. B*, 2023, 108: 104109
 [73] Zhang J, Dai Y, Zhang T. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124: 252906
 [74] Chen H, Wang Q, Feng X *et al.* *Nano Lett.*, 2023, 23: 11266
 [75] Chen X, Ding X, Gou G *et al.* *Nano Lett.*, 2024, 24: 3089
 [76] Jafari H, Barts E, Przybysz P *et al.* *Phys. Rev. Mater.*, 2024, 8: 024005
 [77] Ding N, Chen J, Gui C *et al.* *Phys. Rev. Mater.*, 2021, 5: 084405
 [78] Wang J, Li X, Ma X *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2024, 133: 126801
 [79] Yang Q, Meng S. *Phys. Rev. Lett.*, 2024, 133: 136902
 [80] Tao Z G, Deng S, Prezhdo O V *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2024, 146: 24016
 [81] Sun W, Wang W, Yang C *et al.* *Nano Lett.*, 2024, 24: 11179
 [82] Zhu Y, Long R, Fang W H. *Nano Lett.*, 2023, 23: 10074
 [83] Enaldiev V V, Ferreira F, Magorrian S J *et al.* *2D Mater.*, 2021, 8: 025030
 [84] Zhong T T, Gao Y, Ren Y *et al.* *WIREs Comput. Mol. Sci.*, 2023, 13: e1682
 [85] Ji J, Yu G, Xu C *et al.* *Nat. Commun.*, 2024, 15: 135
 [86] Sheng Y, Wu M, Liu J M. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, n/a: 2404665
 [87] Yang Q, Wu M, Li J. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2018, 9: 7160
 [88] Liang J, Yang D, Wu J *et al.* *Phys. Rev. X*, 2022, 12: 041005
 [89] van Winkle M, Dowlatshahi N, Khaloo N *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2024, 19: 751
 [90] Woods C R, Ares P, Nevison-Andrews H *et al.* *Nat. Commun.*, 2021, 12: 347
 [91] Wang L, Qi J, Wei W *et al.* *Nature*, 2024, 629: 74
 [92] Qin B, Ma C, Guo Q *et al.* *Science*, 2024, 385: 99
 [93] Jiang H, Li L, Wu Y *et al.* *Adv. Mater.*, 2024, 36: 2400670
 [94] Kang K, Zhao W, Zeng Y *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2023, 18: 861
 [95] Deb S, Krause J, Faria Junior P E *et al.* *Nat. Commun.*, 2024, 15: 7595
 [96] Yang T H, Liang B W, Hu H C *et al.* *Nat. Electron.*, 2024, 7: 29
 [97] Peng Y, Han G, Xiao W *et al.* *Nanoscale Res. Lett.*, 2019, 14: 115
 [98] Park J Y, Yang K, Lee D H *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2020, 128: 240907
 [99] Cao W, Deb S, Stern M V *et al.* *Adv. Mater.*, 2024, 36: 2400750
 [100] Lv M, Wang J, Tian M *et al.* *Nat. Commun.*, 2024, 15: 295
 [101] Du S, Yang W, Gao H *et al.* *Adv. Mater.*, 2024, 36: 2404177
 [102] Wang H, Yang J, Wang Z *et al.* *Appl. Phys. Rev.*, 2024, 11: 011402
 [103] Li X, Qin B, Wang Y *et al.* 2024, arXiv:2401.16150v1
 [104] Yang D, Wu J, Zhou B T *et al.* *Nat. Photonics*, 2022, 16: 469
 [105] Wu J, Yang D, Liang J *et al.* *Sci. Adv.*, 2022, 8: eade3759
 [106] Sun Y, Xu S, Xu Z *et al.* *Nat. Commun.*, 2022, 13: 5391



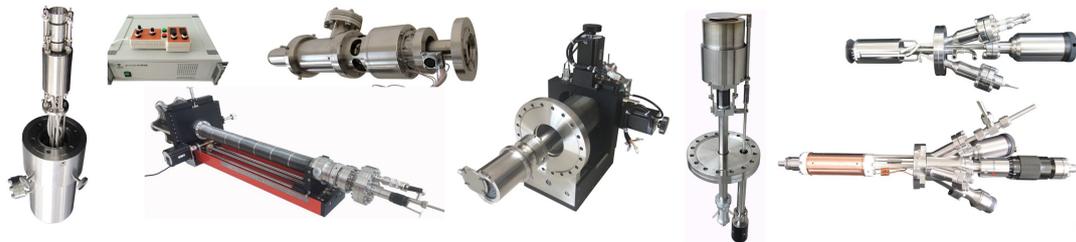
大连齐维科技发展有限公司

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>

表面处理和薄膜生长产品: 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。

