

综述

范德瓦耳斯材料的原位应变工程与应用*

马泽成^{1) #} 刘增霖^{1) #} 程斌²⁾ 梁世军^{1) †} 缪峰^{1) ‡}

1) (南京大学物理学院, 南京 210093)

2) (南京理工大学物理学院, 南京 210094)

(2024 年 3 月 12 日收到; 2024 年 3 月 30 日收到修改稿)

范德瓦耳斯材料凭借独特的结构和优异的性能在应变工程领域引起了广泛的关注. 通过改变原子晶格和电子结构, 应变可以调控范德瓦耳斯材料的物理性质, 最终实现高性能的新原理电子器件. 首先总结了诱导原位应变的实验方法, 然后通过回顾范德瓦耳斯磁性、超导和拓扑材料在原位应变调控研究的最新进展, 以及应变相关的器件应用开发, 探讨该领域当前面临的挑战和未来的机遇.

关键词: 范德瓦耳斯材料, 应变工程, 原位应变, 应变传感器**PACS:** 07.10.Pz, 75.70.-i, 74.78.-w, 03.65.Vf**DOI:** 10.7498/aps.73.20240353

1 引言

范德瓦耳斯 (Van der Waals, vdW) 材料是一类新兴的材料体系, 其层内由较强的共价键或离子键连接, 而层间则通过较弱的范德瓦耳斯力相结合. 这类材料通过机械剥离的方法容易获得二维单晶^[1,2]. 与三维晶体相比, 它们在二维极限下具有卓越的力学性能, 如柔韧性和延展性^[3,4], 同时它们可以展现出块体所不具备的独特的光学、电学和磁学性质^[5-7], 因此近年来受到了广泛的关注. 如今, 在研究人员的不懈努力下, 这一材料体系的成员数量不断增加, 材料中蕴含的丰富且新奇的物理现象也不断被揭示^[8-16]. 更为重要的是, 这些多样的物性展现出对于外部因素 (如电场、磁场、掺杂和压力等) 的敏感响应能力, 使得范德瓦耳斯材料逐步成为物性探索和器件应用的重要研究平台^[17-20].

在诸多控制材料性能的手段中, 应变因其直接

作用于原子晶格, 可以显著地改变晶体对称性, 并调整材料的电子结构、电子关联效应和拓扑序^[21,22]. 应变作为一种调整材料电子特性、探索新量子态以及构建新原理器件的有效策略, 开辟了一个极富潜力的研究领域——应变工程. 近年来, 基于范德瓦耳斯材料体系的应变工程研究成果引人注目^[23-26]. 这些材料展现出优秀的应变敏感性, 即使是很小的应变也可以改变其晶格结构, 从而显著地调节其物理性能. 在光学方面, 应变可以改变范德瓦耳斯材料的声子结构和电子能带结构, 大大地提高其发光效率, 这有利于光电器件的应用^[27,28]. 在电学方面, 应变可以在材料中诱导产生压电效应和压阻效应, 使其在应变传感器和纳米发电机等柔性器件领域具有广阔的应用前景^[29]. 此前, 对于光学和电学的应变工程研究已经有较多的综述进行了总结^[21,30], 而近几年来, 随着新型范德瓦耳斯材料的陆续发现以及原位应变技术的不断发展, 磁性、超导性和拓扑性等新物性的应变工程研究也取得了许多突

* 国家自然科学基金 (批准号: 62122036, 62034004, 12322407, 61921005, 12074176)、中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDB44000000)、AIQ 基金会和南京大学优秀博士研究生创新能力提升计划 B 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: sjliang@nju.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: miao@nju.edu.cn

破性的进展. 研究表明, 应变对于范德瓦耳斯材料的磁性、超导性和拓扑性有着显著的调控作用, 这些研究极大地促进了材料物性的深入挖掘, 推动了相关物理学的快速发展, 为涵盖电荷、自旋和轨道等多自由度的量子效应的探索与应用铺平了道路^[31–35].

本文综述了基于范德瓦耳斯材料的应变工程, 包括多种新奇物性和相关应用研究的最新进展(图1). 首先, 总结了各种类型的原位面内应变施加方式, 从单轴应变到双轴应变, 从柔性衬底的弯曲形变、微纳机电系统的机械拉伸到压电衬底的电致形变. 然后, 回顾了近年来范德瓦耳斯材料中物性调控和应用开发的研究成果. 其中, 物性调控方面涵盖了磁性材料、超导体和拓扑材料等, 而应用开发部分主要介绍了应变作为关键调控手段在智能传感器和概率计算等领域的作用. 最后, 探讨了该领域的重要技术目标并展望了未来的发展前景.

2 原位应变施加方式

对于材料物性的应变调控研究, 如何诱导产生可控应变成为了应变工程研究的关键问题. 迄今为止, 已经报道过众多的方式可以获得不同类型的应变, 例如: 气泡或波纹等材料起伏引起的不可控应变^[42,43], 外延生长中晶格失配引起的非连续可调应变^[31], 利用探针压痕实现的局部面外应变^[3,4], 以及由微纳机电系统或衬底形变实现的原位连续可调应变. 其中, 原位可调应变因其能够满足对晶格常数进行连续可重复操控的需求而在范德瓦耳斯材料体系中被广泛运用. 实现原位连续可调应变的具体方式包括: 通过柔性衬底或压电衬底形变对附着在表面的材料传递面内单轴或双轴应变^[44,45], 由微纳机电系统实现对样品的拉伸或压缩应变^[46,47], 以及利用压强差使鼓泡发生面外形变从而对材料施

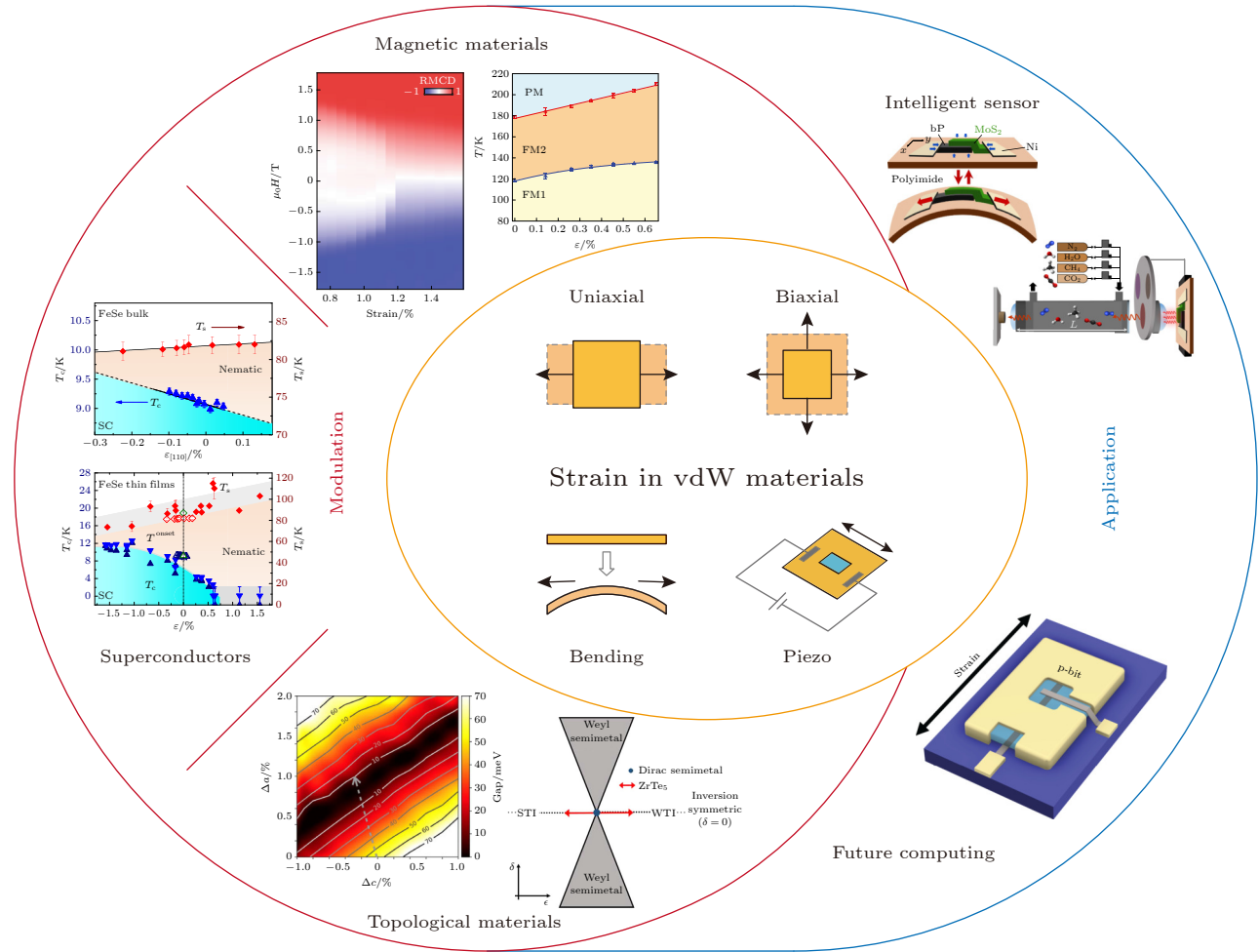


图1 范德瓦耳斯材料原位应变工程与应用研究概述^[36–41]

Fig. 1. Summary of *in-situ* strain engineering and application in vdW materials^[36–41].

加的面内应变^[48,49]. 其中, 对于衬底形变的应变施加方式, 其实现的工艺较为简单, 但该方式需要避免应变传递过程中存在的滑移问题, 这也限制了该应变策略对材料能施加的最大应变. 对于利用微纳机电系统直接操控样品的应变施加方式, 其易于实现较大的应变, 但缺乏衬底的支撑导致了该方式复杂的器件加工工艺. 通过介质压强变化引起材料中鼓泡的形变, 能够产生具有独特分布的应变梯度, 但相比而言其更难以操控, 这也导致了更为苛刻的器件制备工艺. 综上, 基于范德瓦耳斯材料中新奇物性的应变工程, 本文将重点关注若干种常见的面内应变原位施加方式. 这些应变策略既可以降低层状材料研究系统的复杂性, 其提供的拉伸或压缩应变也有利于物性调控的定量研究, 其连续性也便于观测物性变化的临界现象.

在低维范德瓦耳斯材料中施加均匀应变的最简单技术是弯曲材料所附着的柔性衬底. 研究中常用的弹性薄膜包括聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene glycol terephthalate, PET) 和聚酰亚胺 (polyimide, PI) 等. 通常, 研究人员利用基于两

点、三点或四点弯曲的应变装置来使得这些柔性薄膜发生受迫弯曲, 从而在其表面产生连续可调的单轴应变. 根据弯曲衬底中弹性薄膜的连续介质力学模型^[50], 应变大小均可以表示为 $\varepsilon = t/2R$, 其中 ε 为衬底表面产生的应变, t 为衬底的厚度, R 为衬底的曲率半径. Wang 等^[44,45] 基于三点弯曲机械装置 (图 2(a)), 在聚酰亚胺涂覆的磷青铜衬底上研究了几何形状对石墨烯应变场的影响. 他们发现衬底弯曲时, 矩形器件会产生均匀的应变场, 而梯形器件会产生垂直于应变轴的应变梯度. 此外, 他们发现器件的金属电极 (即便是边缘接触) 对于应变的产生是必不可少的. 实际上, 由于弱范德瓦耳斯相互作用, 材料容易与衬底之间发生滑移. 为了抑制界面滑移, 提高应变传递效率, 最简单的方法就是在材料两侧沉积金属, 使其作为电学器件的夹钳和电极. 除了弯曲衬底的应变施加方式, 通过微纳机电系统直接拉伸悬浮的范德瓦耳斯材料同样可以获得单轴机械应变, 其大小等于样品长度的百分比变化. Cenker 等^[40] 和 Hwangbo 等^[51] 基于三个压电驱动器开发了一套低温应变装置 (图 2(b)). 悬浮在硅片间隙上的样品在压电驱动器的配合下可

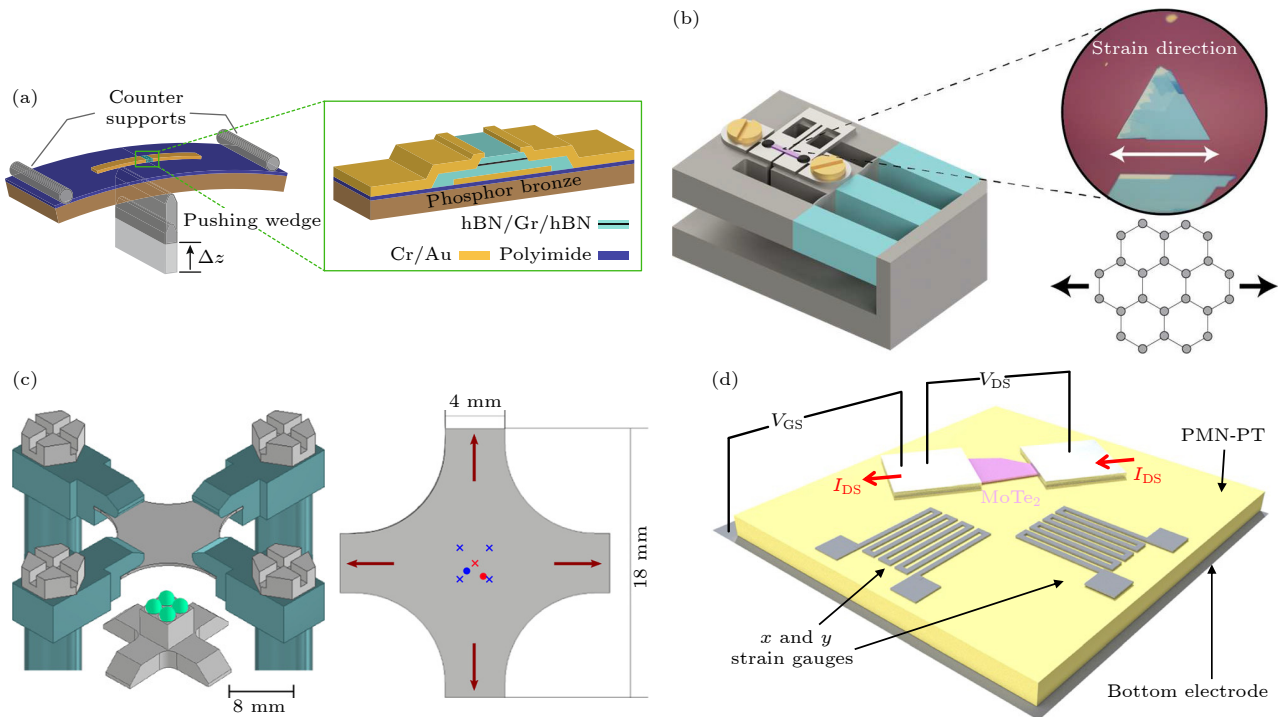


图 2 原位应变施加方式 (a) 柔性衬底弯曲诱导的单轴应变^[45]; (b) 微纳机电系统实现的单轴应变^[51]; (c) 柔性衬底弯曲导致的双轴应变^[53]; (d) 压电衬底形变导致的双轴应变^[54]

Fig. 2. Strategies for inducing *in-situ* strain: (a) Uniaxial strain induced by bending the flexible substrate^[45]; (b) uniaxial strain induced through a microelectromechanical system (MEMS)^[51]; (c) biaxial strain caused by bending the flexible substrate^[53]; (d) biaxial strain caused by the deformation of the piezoelectric substrate^[54].

以产生非常大的拉伸应变, 其实际的应变大小可以通过拉曼峰的位移来测量. 在他们的研究结果中, 对材料施加的最大应变值达到了 1.7%, 远远大于其他依赖于衬底弯曲的低温应变. Pérez Garza 等^[52]利用微型致动器在电压差下的焦耳热和热膨胀原理, 在悬浮单层石墨烯中施加了超过 10% 的可逆和非破坏性的单轴拉伸应变.

在应变工程研究中, 已经报道过许多能够产生可调节单轴应变的机械装置, 但能够诱导双轴应变的装置比较稀少. 双轴应变通常需要在应变场均匀性和最大可施加应变之间进行权衡. 较小的双轴应变可以获得均匀的应变场, 这有利于材料物性调控的均一性, 以便于通过电输运等测量方式进行研究; 而较大的双轴应变会导致非均匀的应变场, 可能会诱导出局部的非平庸电子态. Pasquier 等^[53]提出了一种小型应变装置 (图 2(c)), 该装置能够在低温、强磁场和高真空的环境下对 MoS₂ 单晶施加超过 1.1% 的均匀面内双轴应变. 实现如此均匀双轴应变的关键设计在于四点式推杆和柔性衬底的形状. 通过更换单点式推杆, 该装置还能产生高达 2.4% 的非均匀双轴应变. 为了引入原位双轴应变, 同时简化上述复杂的机械结构, 使用压电材料作为衬底是一种很好的策略. Hou 等^[54]在弛豫铁电体薄膜 Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.71}Ti_{0.29}O₃ (PMN-PT) 上直接剥离薄层 MoTe₂ 材料, 并将其制备成电学器件. 施加在 PMN-PT 上的偏置电压会导致压电衬底发生显著形变, 从而在样品中产生连续变化的面内双轴拉伸或压缩应变. 热致应变是另一种在低维范德瓦耳斯材料中产生可控大面积双轴应变的技术. 其中, 应变的大小和符号 (拉伸或压缩) 是由材料和衬底之间热膨胀系数的差异决定. Huang 等^[55]通过加热或冷却聚丙烯 (polypropylene, PP) 衬底 (25—75 °C 的温度范围), 可以在薄层黑磷中引入均匀的双轴拉伸或压缩应变 (−0.3%—0.3% 的应变范围).

3 范德瓦耳斯磁性材料的应变调控

范德瓦耳斯磁性材料, 包括 CrI₃, VSe₂ 和 Fe₃GeTe₂ 等, 具有明显的层状结构, 容易受到外部刺激的影响^[20,56,57]. 通过静电掺杂^[58–61]、垂直电场^[62]和静水压力^[63,64]等多种手段, 研究人员试图改变这类磁性材料的磁化方向, 以此寻找非磁场的低功

耗调控方式. 磁化方向的可控切换是“写入”操作的基础, 其对于自旋电子技术的开发至关重要^[65]. 除了以上调控手段, 大量的实验研究已经表明应变是一种有效的调节和研究材料磁性的方法^[66–68], 并在扩展自旋电子器件的新型功能方面起着重要的作用^[69], 例如基于应变可调易磁化轴的应变电子开关. 与传统磁性材料相比, 范德瓦耳斯磁性材料的物理参数, 包括磁各向异性性能和自旋交换耦合, 对应变引起的晶格畸变格外敏感^[70,71]. 磁各向异性能与应变的强相关会导致材料矫顽磁场的显著变化. 铁磁材料中磁序的检测与控制是当代信息技术的重要基石. 磁化翻转是磁存储器件中数据写入和储存的基础, 而磁化翻转的关键则是需要较大的矫顽磁场调节区间. Wang 等^[37]系统研究了薄层铁磁材料 Fe₃GeTe₂ 在单轴拉伸应变作用下的磁性变化 (图 3(a)). 通过霍尔电阻测量, 他们发现矫顽磁场、铁磁态到顺磁态转变的居里温度、以及单畴态和多畴态之间的转变温度, 在拉伸应变施加时均有显著的增加. 其中, 当应变增加到 0.32% 时, 矫顽磁场急剧增加了 150% 以上. 借此优势, 他们实现了应变辅助的超灵敏磁化翻转 (图 3(b)). 当拉伸应变仅仅减少 0.06%, 面外向上/下的磁化方向会切换到面外向下/上的磁化方向, 这在传统的磁性薄膜中是从未实现过的. 他们将这种应变可调的磁性归因于 Fe₃GeTe₂ 中原子晶格扩展导致的自旋轨道耦合效应的增强, 从而使得磁各向异性性能产生了明显的变化.

相较于铁磁材料, 反铁磁体具有更快的磁化翻转动力学, 以及对磁场扰动的鲁棒性, 因此反铁磁体在自旋电子学中具有巨大的优势^[72–74], 而反铁磁序的控制将是迈向器件应用的重要一步. Ni 等^[75]利用空间分辨二次谐波信号, 不仅证明单层 MnPSe₃ 中存在长程反铁磁序, 而且发现单轴应变能够以任意角度旋转与反铁磁序相关的奈尔矢量, 使其与面内的晶体轴向无关 (图 3(c)). 他们认为单轴应变下 XY 模型相变普适类的改变导致材料中产生了应变控制的伊辛序. 这项工作为应变操控二维反铁磁体的磁畴和磁序铺平了道路. 范德瓦耳斯磁性材料的机械形变会对其物理性能产生深远的影响. 即使对晶格结构中化学键的几何构造进行很小的改变, 也可以完全改变磁交换作用的大小和符号, 从而改变磁基态. 在磁有序材料中, 改变自旋间交换作用的符号可以导致反铁磁态和铁磁态之

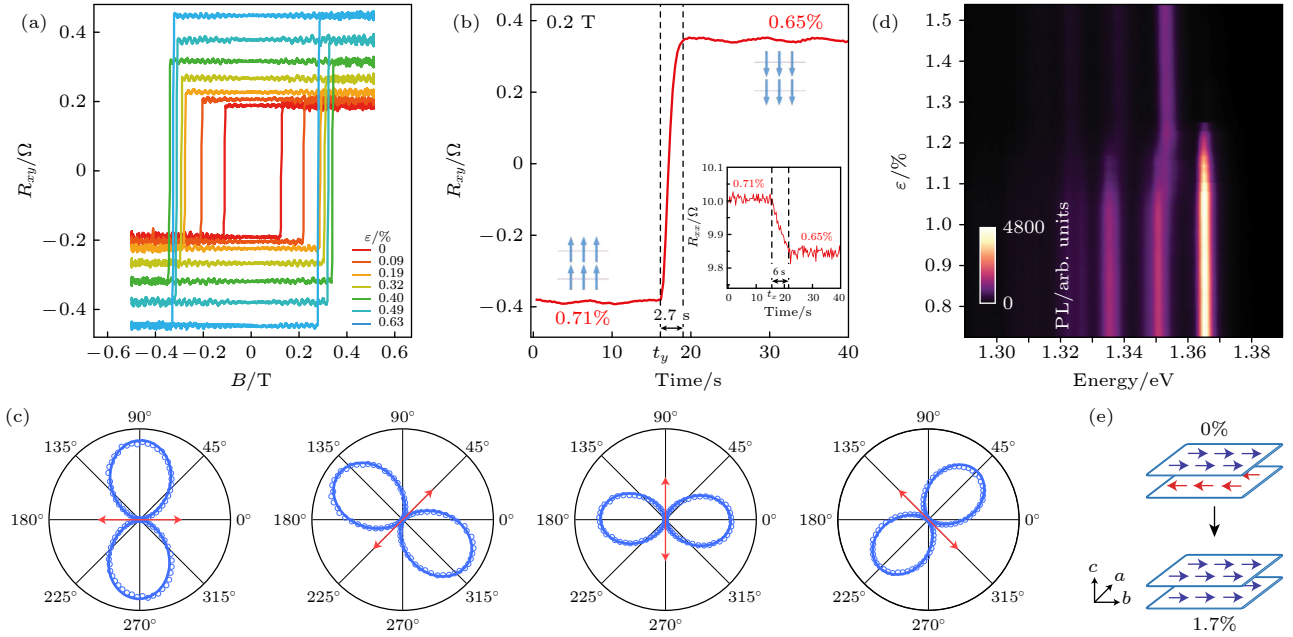


图 3 范德瓦耳斯磁性材料的应变调控 (a) 应变对 Fe_3GeTe_2 铁磁性能的调控^[37]; (b) 应变辅助的磁化翻转^[37]; (c) MnPSe_3 中奈尔矢量与应变方向的关系^[75]; (d) 应变诱导 CrSBr 从反铁磁态到铁磁态的转变^[40]; (e) 面内反铁磁态到铁磁态转变的示意图^[40]

Fig. 3. Strain-modulated magnetism in vdW materials: (a) Strain-modulated ferromagnetic properties in Fe_3GeTe_2 ^[37]; (b) strain-assisted magnetization reversal^[37]; (c) relationship between the Néel vector and different strain directions in MnPSe_3 ^[75]; (d) strain-induced antiferromagnetic-to-ferromagnetic phase transition in CrSBr ^[40]; (e) diagram of in-plane antiferromagnetic-to-ferromagnetic phase transition^[40].

间的转变, 实现新型磁阻器件^[76,77]. Cenker 等^[40]报道了层状反铁磁半导体 CrSBr 在原位单轴拉伸应变的作用下, 磁性能够被连续可逆地调节, 包括磁各向异性、层间磁交换作用和磁基态 (图 3(d) 和图 3(e)). 他们在零磁场下实现了应变诱导的反铁磁到铁磁的可逆磁相变, 并认为面内晶格常数的变化改变了层间磁交换作用, 从而导致磁交换作用的符号在临界应变处发生翻转. 此外, 他们还演示了施加面外磁场时, 应变可以导致面外自旋倾斜过程的显著变化. 他们的研究结果可以实现基于自旋、电荷和晶格三者耦合的新型二维器件, 例如应变驱动的磁阻开关, 以及无外加磁场下机械控制的磁性隧道结.

4 范德瓦耳斯超导体的应变调控

材料中具有不同对称性的物相之间的可控转变是凝聚态物理的核心议题, 可控相变在现代纳米技术中也发挥着重要的作用. 应变已被广泛地验证其调节量子材料基本性质和改变物相的能力, 例如机械应变可以通过调整晶格常数 and 对称性来控制晶体的超导相^[78]、向列相^[79]和拓扑相^[80]. FeSe 是

一种独特的铁基超导体, 其层间依靠范德瓦耳斯相互作用相连接^[38,81]. FeSe 在没有长程磁序的条件下具有电子向列相, 其转变发生在 92 K 的低温. 在相变过程中, 电子相互作用会驱使四方晶格的旋转对称性自发降低, 同时不引入平移和时间反演对称性破缺. 电子的向列性影响金属的所有费米面, 因此其涨落会对电子输运产生巨大的影响^[82]. 电子的向列性与铁基材料的高温超导现象密切相关, 其超导性具有双重对称的超导能隙、轨道选择性配对和自旋轨道耦合等向列态特点^[83,84]. 两者背后的关联和物理机制在高温超导领域一直是热点话题. FeSe 的电子向列相对外部参数高度敏感, 已经有大量的实验研究表明, 应变是调节 FeSe 电子特性和改变其非常规超导性的有力工具^[85,86]. 单轴应变的调控研究有利于解耦材料中影响超导性的不同因素, 为阐明向列性和超导性的相互作用提供重要的见解. Bartlett 等^[87]通过对 FeSe 块体施加较大的弹性单轴和双轴应变, 系统研究了电子输运的各向异性与向列性之间的关系. 他们观察到了向列相转变温度与单轴应变的线性依赖性, 并在高于向列相转变温度的条件下利用应变诱导出电阻率各向异性 (图 4(a)), 即电子结构的面内各向异性.

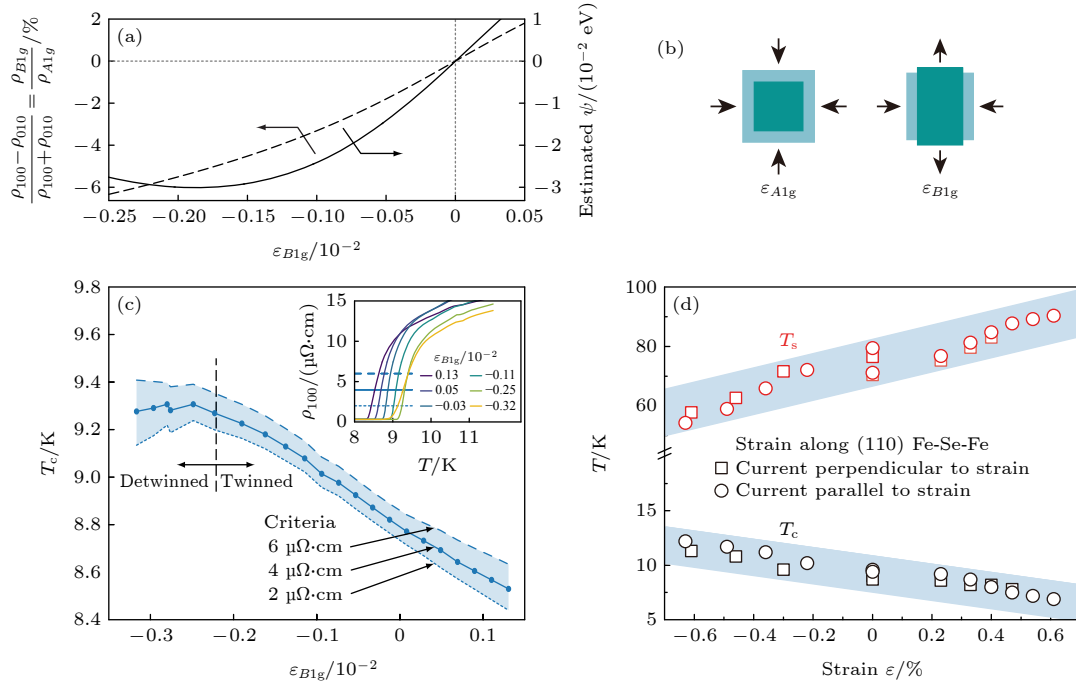


图 4 范德瓦耳斯超导体的应变调控 (a) FeSe 块体中应变诱导的电阻各向异性^[87]; (b) 不同应变类型的示意图 (ϵ_{A1g} 是非对称破缺型应变, ϵ_{B1g} 是破坏四重旋转对称性的应变)^[88]; (c) FeSe 块体中超导现象与应变的关系^[87]; (d) FeSe 薄片向列相和超导相与应变的关系^[88]

Fig. 4. Strain-modulated superconductivity in vdW materials: (a) Strain-induced nematic resistive anisotropy in FeSe bulk^[87]; (b) schematics of different strain types (ϵ_{A1g} is non-symmetry-breaking strain and ϵ_{B1g} is the strain component that breaks the four-fold rotational symmetry.)^[88]; (c) strain-dependent superconductivity in FeSe bulk^[87]; (d) strain-dependent nematic and superconducting transition in FeSe thin flake^[88].

此外, 他们发现面内双轴压缩应变增加了面内电阻率和超导临界温度, 这与 yz 轨道在电子关联中起重要作用时的结果一致. 值得注意的是, 超导临界温度随应变的变化呈二次方的关系, 说明其超导性主要受 B_{1g} 型应变 (四重旋转对称性破缺) 效应的影响 (图 4(b) 和图 4(c)). Ghini 等^[38] 利用低温磁输运的测量方法研究了单轴应变对 FeSe 单晶中向列相和超导相的影响. 他们同样发现 FeSe 的超导性在压缩应变下得到增强, 在拉伸应变下被抑制, 而电子向列相与单轴应变之间则有着完全相反的输运响应, 这反映了向列性和超导性之间可能存在的直接竞争关系.

当把范德瓦耳斯超导体 FeSe 的厚度从块状单晶减薄到双层时, 向列相转变温度和超导转变温度均会受到很大的抑制. 同时, 有研究表明少层 FeSe 中存在着二维超导性^[81]. 进一步, Cheng 等^[88] 在 FeSe 薄片上实现了大范围的应变调节, 其中拉伸应变和压缩应变均可达到 0.7% 左右. 他们系统研究了应变对材料向列相转变和超导转变的影响, 揭示了拉伸应变会减小超导转变温度并提高向列相

转变温度, 而压缩应变会增强其超导性并抑制其向列相的产生 (图 4(d)), 其中超导转变温度最高能达到 12 K. 与之前报道的 FeSe 块体研究结果的区别在于, 超导转变温度线性依赖于外加应变, 说明其超导相主要由 A_{1g} 型应变 (无对称性破缺) 效应主导. 他们认为 FeSe 薄片不存在 B_{1g} 型应变效应, 并强调了条纹型自旋涨落对超导性的作用.

5 范德瓦耳斯拓扑材料的应变调控

对电子能带结构的拓扑概念的认识从根本上改变了我们对固体材料中电子特性的理解^[89]. 贝里曲率是固体晶体、超冷原子和光子晶体中各种拓扑现象的核心^[90], 而贝里曲率偶极子被认为存在于不同凝聚态系统的量子几何现象中, 例如非线性霍尔效应的根源是动量空间中形成的贝里曲率偶极子. 现如今, 应变工程的发展为二维范德瓦耳斯材料中拓扑性质的研究提供了前所未有的机会. 有理论提出, 在过渡金属二硫化物 (transition metal dichalcogenides, TMDs) 中, 当空间对称性被应变

降低时,会产生贝里曲率偶极子^[91].因此,对具有非中心对称的二维 TMDs 的应变调控研究有助于深入理解贝里曲率偶极子和相关的谷轨道磁化行为. Son 等^[92]报道了在单层 MoS₂ 中施加单轴拉伸应变时,根据应变的大小和方向(锯齿形方向和扶手椅方向),可以产生符号相反的贝里曲率偶极子(图 5(a)–(c)).此外,他们观察到电致谷磁化的机械调控.其中,谷磁化随应变的增大而增大,可随应变方向的改变可逆地打开和关闭,并翻转符号.他们的研究结果从实验证明了应变是控制二维 TMDs 中谷自由度和贝里曲率偶极子的独特且有效的方式.

拓量子材料表现出非平庸相,并具有拓扑不变量,该拓扑不变量不受系统哈密顿量连续变化的

影响.拓量子材料由拓扑绝缘体、狄拉克半金属、外尔半金属和拓超导体组成.根据 Z_2 拓拓扑指数,具有时间反演对称性的能带绝缘体可细分为普通绝缘体、弱拓扑绝缘体和强拓扑绝缘体^[93,94].对于三维拓拓扑绝缘体,强拓拓扑绝缘体在所有表面上均表现出拓拓扑表面态,而弱拓拓扑绝缘体仅在特定表面上表现出拓拓扑表面态.拓拓扑上不同绝缘相之间的相变(即改变 Z_2 指数)需要带隙的闭合和重新打开,且中间会经历无带隙的狄拉克或外尔半金属相.因此,拓拓扑相变是具有不同拓拓扑序的状态之间的量子相变,可以通过调整晶格常数从而改变电子能带结构来实现.如今,范德瓦耳斯材料的应变工程作为一种可诱导拓拓扑相变、狄拉克态能量变化和半金属带隙调控的有效方法,已经得到了广泛的关注^[95,96].

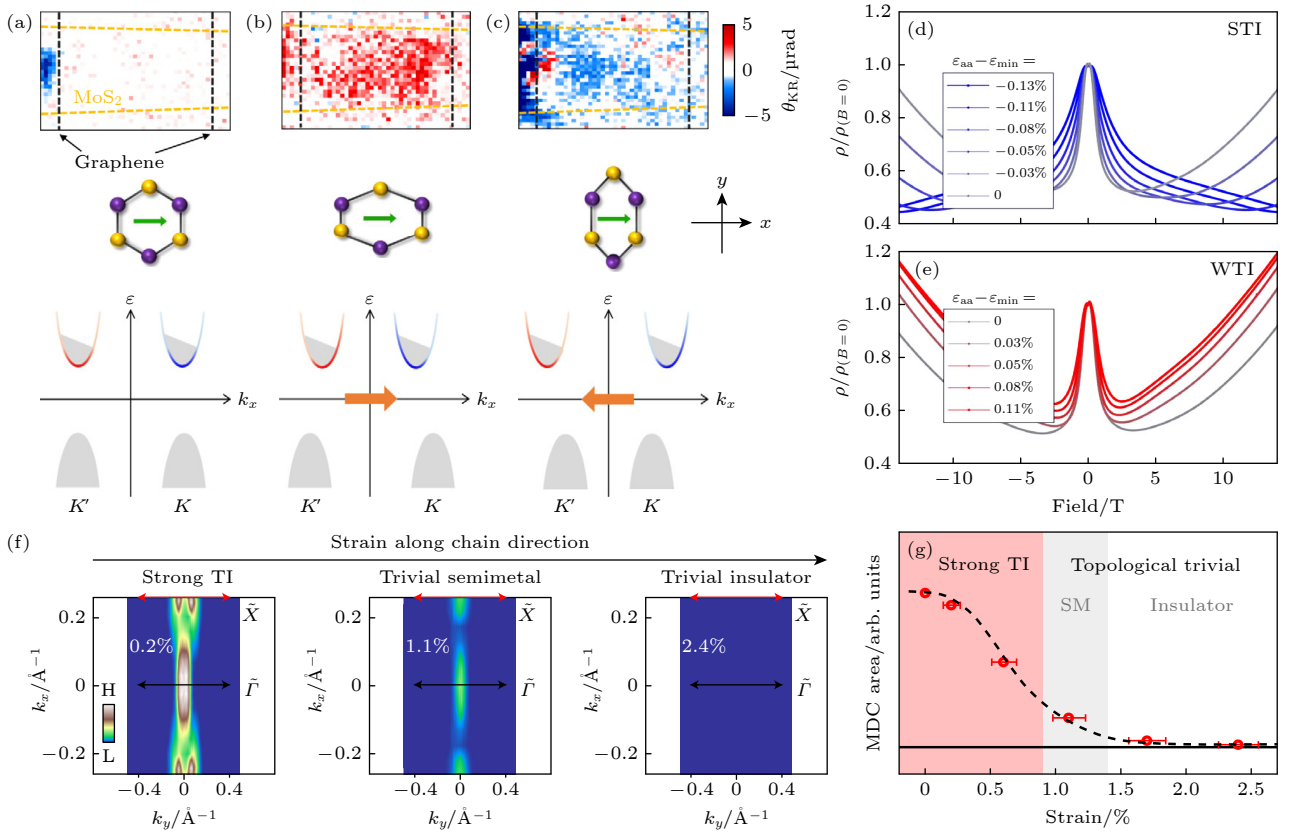


图 5 范德瓦耳斯拓拓扑材料的应变调控 (a)–(c) MoS₂ 中应变方向(依次为无应变、沿锯齿形方向应变和沿扶手椅方向应变)依赖的谷磁化和贝里曲率偶极子^[92]; (d), (e) ZrTe₅ 在负应变和正应变下的负纵向磁阻, 分别对应强拓拓扑绝缘相和弱拓拓扑绝缘相^[36], 负磁阻在临界应变处最强, 表明无带隙的狄拉克半金属相; (f) TaSe₃ 中强拓拓扑绝缘相、平庸半金属相和平庸绝缘相在角分辨光电子能谱中的费米面^[80]; (g) TaSe₃ 在不同应变下费米能级的光谱强度演变^[80]

Fig. 5. Strain-modulated topological properties in vdW materials: Valley magnetization and Berry curvature dipole of MoS₂ under zero strain (a), 0.55% strain along the zigzag direction (b) and 0.55% strain along the armchair direction (c), respectively^[92]; negative longitudinal magnetoresistance of ZrTe₅ for negative strains (d) and positive strains (e) measured relative to a critical strain, corresponding to the phases of the strong topological insulator and weak topological insulator, respectively^[36]. The negative magnetoresistance is strongest at the critical strain, where ZrTe₅ is a gapless Dirac semimetal; (f) measured Fermi surfaces of TaSe₃ in the phases of strong topological insulator, trivial semimetal and trivial insulator, respectively^[80]; (g) evolution of the spectral intensity at the Fermi level with different strain values in TaSe₃^[80].

Flötotto 等^[97]报道了 Bi_2Se_3 薄膜中狄拉克表面态的原位可逆应变调控研究, 但应变对其电子能带结构的影响相当小. 在高达 2.1% 的弹性拉伸应变下, 狄拉克点的能量仅仅改变了 35 meV. Mutch 等^[36]在 ZrTe_5 块体中观察到了应变调控拓扑相变的证据. 他们发现了手性反常导致的负纵向磁阻现象, 其表现出非单调的应变依赖性, 在临界应变处达到最大值 (图 5(d) 和图 5(e)). 这表明狄拉克带隙的符号变化, 证明应变诱导的弱拓扑绝缘体到强拓扑绝缘体的拓扑相变. Liu 等^[98]通过对 HfTe_5 进行电输运测量, 同样证明了应变驱动的两个非平庸相的拓扑相变. 他们指出, 当施加较大的应变 (4.5%) 时, 材料在强拓扑绝缘相中出现了无带隙的拓扑表面态, 其主导了低温电子输运. 利用应变调节范德瓦耳斯材料的晶格常数, 可以控制从拓扑绝缘体到普通绝缘体的相变, 从而有机会实现自旋电流的开关切换. Lin 等^[80]在实验上证实了准一维 TaSe_3 属于强拓扑绝缘体, 并利用角分辨光电子能谱对应变驱动的电子能带结构演化进行了可视化研究 (图 5(f) 和图 5(g)). 他们发现, 原位应变施加过程中材料会经历两步相变. 首先是可逆的拓扑相变——当拉伸应变达到 1.1% 时, 材料会从具有自旋极化和准一维拓扑表面态的强拓扑绝缘相转变为拓扑平庸的半金属相. 其次是金属绝缘体转变——当应变进一步增加到 2.4% 时, 材料最终会转变为平庸的能带绝缘体. 他们将体系的相变归因于拉伸应变作用下能带重叠的减少以及能带反转的消除, 最终导致带隙的完全打开.

6 应变工程的器件应用

近年来, 除了应变调控的基础物性研究备受关注之外, 对于由应变主导或辅助的器件应用研究也逐渐显现出巨大的潜力^[22]. 一方面可以利用应变调节材料晶格结构的特点, 实现对耦合外场参量的物理特性的精准操控, 从而开发出能够检测多元外场参量的智能传感器. 另一方面, 应变可以作为电子器件中常规电流操控方式的替代或补充, 为未来低功耗的神经形态计算提供新途径.

应变工程的最直接应用是构建适用于各种环境的应变传感器. 为了满足健康监测、疾病治疗和机器人仿生等实际需求, 需要研发能够在极端条件下灵活监测微小形变或振动的应变传感器, 以应用

于可穿戴或植入式电子设备、医疗假肢和电子皮肤^[99–101]. 这些应变传感器不仅需要良好的基础性能, 包括灵敏度、探测范围和响应速度等, 还要求具备优秀的生物兼容性和能够长时间低功耗运行的特性. 随着范德瓦耳斯材料的深入研究, 基于压阻和压电等效应的应变传感器相继被提出. 这些应变传感器展现出非常优异的性能, 并在生物相关的场景中得到实际应用^[102–105]. Yan 等^[106]报道的由 SnS_2 构建的基于压电效应的应变传感器就是一个很好的范例. 他们创新地将压电效应与光电效应耦合在一起, 以调整材料中载流子的迁移率和浓度, 从而大幅增强应变传感器的灵敏度, 即应变系数 (gauge factor). SnS_2 应变传感器的应变系数能达到 3933, 并且有望在更大的光功率密度照射下进一步地增大. 得益于优秀的应变灵敏度, SnS_2 应变传感器可用于实际的声音监测, 并展示出对不同频率声音的明显响应差异 (图 6(a)). 该传感器优异的环境适用性将有利于多元环境参量探测中的器件应用. 应变工程不仅可以用来构建与声音和运动等机械振动参量相关的探测器, 还可以作为调控手段使得探测器可以在多种功能间切换. Kim 等^[39]开发了一种基于黑磷的气体浓度探测器. 他们利用应变精细地调控了黑磷能带的带隙, 使原本光波长固定的光电材料变为 0.22—0.53 eV 范围可调的宽光谱材料. 因此, 基于电致发光效应构建的黑磷红外光电子器件 (light emitting diode, LED) 在应变的作用下具有连续可逆调节的工作波长, 由此构成的光电探测器能够检测出多种气体 (图 6(b) 和图 6(c)). 不同气体的敏感红外光波长不同, 而应变可以调整黑磷红外光源的发光波长来实现不同工作状态的切换, 这为可调光谱的光电应用提供了一种潜在的方法.

前文中提到, 应变对于调控材料的量子 and 拓扑性质有着得天独厚的优势. 这使得利用应变调控材料的内禀性质, 从而实现全新的计算范式以突破传统硅基半导体发展瓶颈的思路被寄予厚望^[41,107,108]. 此外, 适合于片上集成的基于压电衬底形变的应变策略的兴起也强有力地推动了这一灵感的实现, 诸如应变拓扑开关与逻辑门、应变介导的斯格明子存内计算等基础概念和原型器件逐渐涌现^[54,109–112]. 最近, Cenker 等^[41]报道了基于磁性材料 CrSBr 的应变编程概率计算. 利用应变编程的设想起源于低功耗的磁序操控方式的追寻, 这一点是传统的磁场

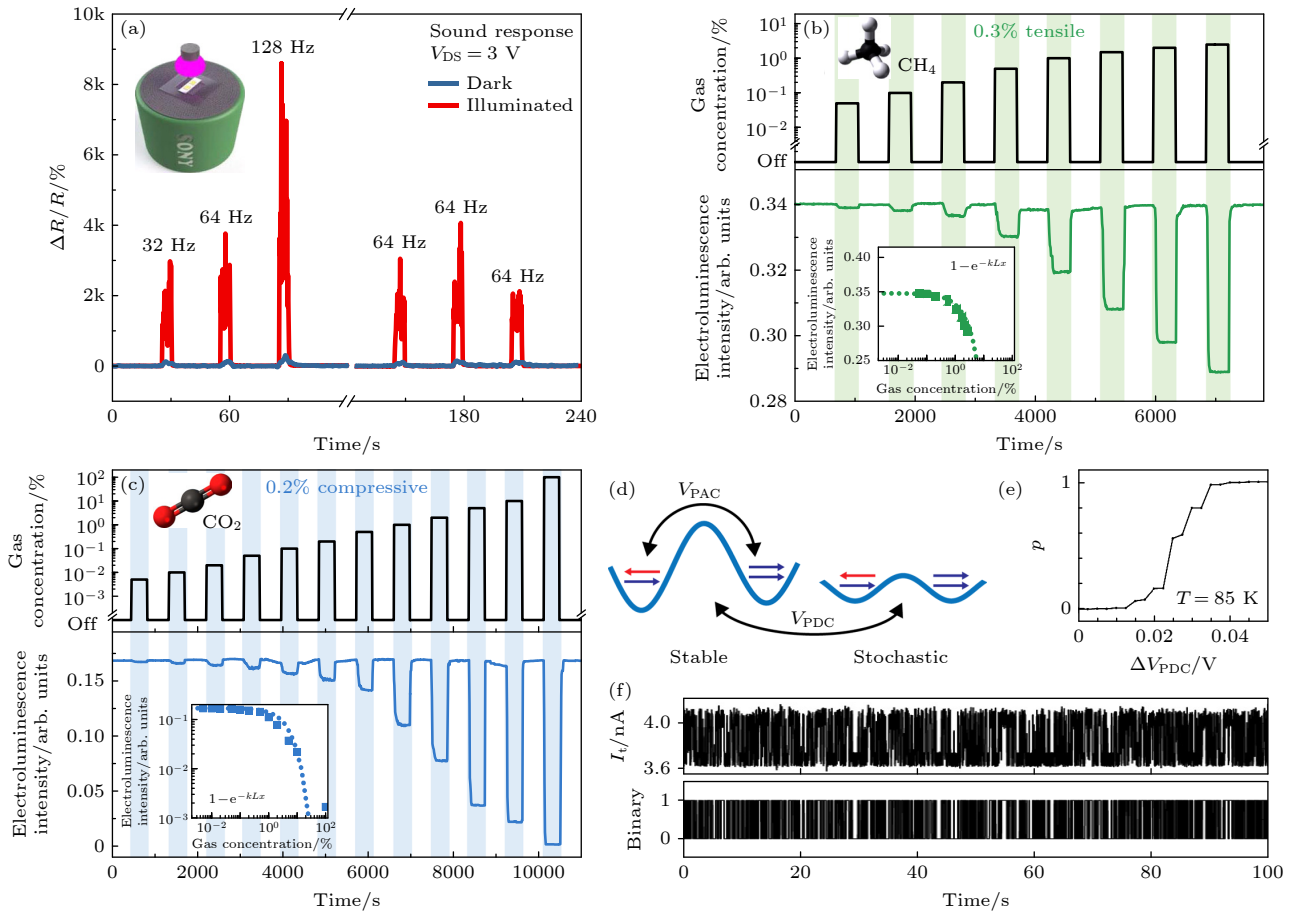


图6 应变工程的器件应用 (a) 用于监测不同频率声音的 SnS_2 应变传感器^[106]; (b) 用于探测不同 CH_4 气体浓度的黑磷LED传感器^[39]; (c) 用于探测不同 CO_2 气体浓度的黑磷LED传感器^[39]; (d) CrSBr磁性隧道结中磁序的应变调控示意图^[41]; (e) 磁序随静态压电电压的响应函数^[41], 0表示稳定的反铁磁态, 1表示稳定的铁磁态; (f) 响应函数接近0.5时, 隧穿电流(上)和转换后的二进制序列(下)随时间的变化, 表明磁性层的磁序处于反铁磁态或铁磁态的概率相等^[41]

Fig. 6. Device applications of strain engineering: (a) SnS_2 based strain sensor for detecting sound with different frequencies^[106]; sensor response characteristics of a black phosphorus LED (0.3%; tensile) at varying concentrations of CH_4 pulses (b) and a black phosphorus LED (0.2%; compressive) at varying concentrations of CO_2 pulses (c)^[39]; (d) schematic of strain tuning between magnetic domains in CrSBr magnetic tunnel junction^[41]; (e) response function of a magnetic domain as a function of static piezo voltage^[41], a value of either 0 or 1 indicates a stable domain; (f) tunneling current (top) and converted binary sequence (bottom) over time when the response function is near 0.5, indicating the equal probability between antiferromagnetic and ferromagnetic phases.

或者电流等操控方式难以跨越的障碍^[113]. 在该研究工作中, 他们通过电压操控压电衬底的形变, 从而改变施加在磁性隧道结中的面内应变, 并系统地探究不同压电电压对 CrSBr 磁序的影响 (图 6(d)). 他们发现, 施加脉冲压电电压可以产生脉冲应变, 使得磁序在层间反铁磁态与层间铁磁态之间切换; 而增大静态压电电压可以降低层间反铁磁态与层间铁磁态之间的势垒高度, 使得 CrSBr 的磁序进入不稳定的状态. 这种不稳定的状态意味着磁序可以在层间反铁磁态与层间铁磁态之间随机切换, 而处于两种磁序的概率是可调的, 其与静态压电电压的依赖关系呈 S 形 (图 6(e)). 当随机切换概率控制在 0.5 左右时, 他们根据隧穿电流的变化观察到磁

性层的磁序处于反铁磁态或铁磁态的概率相等. 这表明应变可以精准编程磁序处于反铁磁态或铁磁态的概率, 类似于随机二元神经元的特性^[114,115]. 这种特性可以构建概率计算的计算单元——概率比特 (p-bit), 实现超越传统半导体计算架构的概率计算机^[116-118]. 他们的研究结果直接推动了概率和神经形态计算的探索与发展, 为未来计算范式提供了一条可行的道路.

7 总结与展望

本文回顾了范德瓦耳斯材料应变工程的最新进展, 包括几种新研发的原位应变装置. 这些施加

面内应变的方式涵盖了柔性衬底的弯曲形变、微纳机电系统的机械拉伸或挤压, 以及压电衬底的电致形变, 而面内应变的类型则涵盖了单轴和双轴应变. 然后, 重点介绍了利用这些应变装置在范德瓦耳斯材料中进行的多种新奇物性的原位调控研究, 包括磁性、超导性和拓扑性. 最后, 列举了应变工程领域中两种典型的器件应用——智能应变传感器和应变编程的概率计算.

尽管应变工程在基础研究和器件应用上已经取得了重大的进展, 但目前仍然需要在几个方面投入更多的研究, 以推动该领域快速向前发展. 首先, 范德瓦耳斯材料与衬底之间较大的杨氏模量差异会导致剪切应变的产生, 同时较弱的界面相互作用会限制应变的有效传递. 即便制备金属电极可以一定程度地减少界面间的滑移, 但在较大应变下应变传递系统仍会失效, 这极大地限制新物性的探索和影响柔性电子器件的稳定性. 因此, 亟需深入地研究材料和衬底间的界面力学行为, 优化现有的应变施加方式以实现更大范围的应变控制, 这将有助于揭示前所未有的应变驱动的量子现象. 例如, 开发具有高杨氏模量的衬底可以显著地降低应变传递的损失^[119]. 其次, 利用聚合物封装方法可以使薄层材料与衬底之间形成保形接触, 在两者边缘形成具有更强相互作用力的化学键, 从而导致机械应变可以被有效传递, 界面滑移可以忽略不计^[120]. 第二, 已报道的部分应变装置虽然可以在极低温和强磁场的极端条件下连续地改变应变的大小, 但该机械应变是易失性的, 其应变分布也是不可控的. 通过结合压电衬底和机械应变装置来发展应变技术, 有望可以产生非易失、位置可预测、可控和可重复的应变分布, 这将极大地拓宽应变工程的研究领域, 为探索可自由操控的人工多物相结构提供了一个平台. 第三, 对于超导性和拓扑相变等许多新奇物性, 与应变耦合的微观物理机制尚不明确, 亟需加大理论和实验的研究投入, 并尝试将应变这一自由度加入到更多的物理测量当中. 例如, 将应变和透射电子显微镜相结合可以了解应变对原子晶格的直接影响, 通过进一步耦合应变对晶格结构和电子结构的影响, 挖掘出相关物性的深层机制. 第四, 应变驱动相变的能力对于开发新型电子器件具有很大的前景, 尤其是具有低对称性和多结构相的范德瓦耳斯材料. 然而, 目前这方面的研究成果仍然较少, 需要进一步探索不同范德瓦耳斯材料中应变

与物理性能的内在联系. 更多应变量子材料的研究将有助于开发下一代超快无耗散且具备安全信息处理和通信能力的电子产品.

参考文献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [2] Novoselov K S, Jiang D, Schedin F, Booth T J, Khotkevich V V, Morozov S V, Geim A K 2005 *PNAS* **102** 10451
- [3] Lee C, Wei X, Kysar J W, Hone J 2008 *Science* **321** 385
- [4] Bertolazzi S, Brivio J, Kis A 2011 *ACS Nano* **5** 9703
- [5] Geim A K 2009 *Science* **324** 1530
- [6] Castro Neto A H, Guinea F, Peres N M R, Novoselov K S, Geim A K 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 109
- [7] Ma H X, Xing Y H, Cui B Y, Han J, Wang B H, Zeng Z M 2022 *Chin. Phys. B* **31** 108502
- [8] Ye J T, Zhang Y J, Akashi R, Bahramy M S, Arita R, Iwasa Y 2012 *Science* **338** 1193
- [9] Geim A K, Grigorieva I V 2013 *Nature* **499** 419
- [10] Qian X, Liu J, Fu L, Li J 2014 *Science* **346** 1344
- [11] Chang K, Liu J, Lin H, Wang N, Zhao K, Zhang A, Jin F, Zhong Y, Hu X, Duan W, Zhang Q, Fu L, Xue Q K, Chen X, Ji S H 2016 *Science* **353** 274
- [12] Huang B, Clark G, Navarro-Moratalla E, Klein D R, Cheng R, Seyler K L, Zhong D, Schmidgall E, McGuire M A, Cobden D H, Yao W, Xiao D, Jarillo-Herrero P, Xu X 2017 *Nature* **546** 270
- [13] Gong C, Li L, Li Z, Ji H, Stern A, Xia Y, Cao T, Bao W, Wang C, Wang Y, Qiu Z Q, Cava R J, Louie S G, Xia J, Zhang X 2017 *Nature* **546** 265
- [14] Fei Z, Zhao W, Palomaki T A, Sun B, Miller M K, Zhao Z, Yan J, Xu X, Cobden D H 2018 *Nature* **560** 336
- [15] Deng Y, Yu Y, Shi M Z, Guo Z, Xu Z, Wang J, Chen X H, Zhang Y 2020 *Science* **367** 895
- [16] Wu Y F, Zhu M Y, Zhao R J, Liu X J, Zhao Y C, Wei H X, Zhang J Y, Zheng X Q, Shen J X, Huang H, Wang S G 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 048502 (in Chinese) [吴燕飞, 朱梦媛, 赵瑞杰, 刘心洁, 赵云驰, 魏红祥, 张静言, 郑新奇, 申见昕, 黄河, 王守国 2022 物理学报 **71** 048502]
- [17] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, Coleman J N, Strano M S 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 699
- [18] Butler S Z, Hollen S M, Cao L, Cui Y, Gupta J A, Gutiérrez H R, Heinz T F, Hong S S, Huang J, Ismach A F, Johnston-Halperin E, Kuno M, Plashnitsa V V, Robinson R D, Ruoff R S, Salahuddin S, Shan J, Shi L, Spencer M G, Terrones M, Windl W, Goldberger J E 2013 *ACS Nano* **7** 2898
- [19] Liu Y, Weiss N O, Duan X, Cheng H C, Huang Y, Duan X 2016 *Nat. Rev. Mater.* **1** 16042
- [20] Burch K S, Mandrus D, Park J G 2018 *Nature* **563** 47
- [21] Deng S, Sumant A V, Berry V 2018 *Nano Today* **22** 14
- [22] Miao F, Liang S J, Cheng B 2021 *npj Quantum Mater.* **6** 59
- [23] Akinwande D, Petrone N, Hone J 2014 *Nat. Commun.* **5** 5678
- [24] Dai Z, Liu L, Zhang Z 2019 *Adv. Mater.* **31** 1805417
- [25] Pandey M, Pandey C, Ahuja R, Kumar R 2023 *Nano Energy* **109** 108278
- [26] Gao R, Liu C, Fang L, Yao B, Wu W, Xiao Q, Hu S, Liu Y, Gao H, Cao S 2022 *Chin. Phys. Lett.* **39** 127301
- [27] Zhu C R, Wang G, Liu B L, Marie X, Qiao X F, Zhang X,

- Wu X X, Fan H, Tan P H, Amand T, Urbaszek B 2013 *Phys. Rev. B* **88** 121301
- [28] Sun T Y, Wu L, He X J, Jiang N, Zhou W Z, Ouyang F P 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 076301 (in Chinese) [孙婷钰, 吴量, 何贤娟, 姜楠, 周文哲, 欧阳方平 2023 物理学报 **72** 076301]
- [29] Wu W, Wang L, Li Y, Zhang F, Lin L, Niu S, Chenet D, Zhang X, Hao Y, Heinz T F, Hone J, Wang Z L 2014 *Nature* **514** 470
- [30] Yang S, Chen Y, Jiang C 2021 *InfoMat* **3** 397
- [31] Chen C, Das P, Aytan E, Zhou W, Horowitz J, Satpati B, Balandin A A, Lake R K, Wei P 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 38744
- [32] Kim J M, Haque M F, Hsieh E Y, Nahid S M, Zarin I, Jeong K Y, So J P, Park H G, Nam S 2023 *Adv. Mater.* **35** 2107362
- [33] Qi Y, Sadi M A, Hu D, Zheng M, Wu Z, Jiang Y, Chen Y P 2023 *Adv. Mater.* **35** 2205714
- [34] Ren H, Xiang G 2023 *Nanomaterials* **13** 2378
- [35] Wang G, Yang K, Ma Y, Liu L, Lu D, Zhou Y, Wu H 2023 *Chin. Phys. Lett.* **40** 077301
- [36] Mutch J, Chen W C, Went P, Qian T, Wilson I Z, Andreev A, Chen C C, Chu J H 2019 *Sci. Adv.* **5** eaav9771
- [37] Wang Y, Wang C, Liang S-J, Ma Z, Xu K, Liu X, Zhang L, Admasu A S, Cheong S-W, Wang L, Chen M, Liu Z, Cheng B, Ji W, Miao F 2020 *Adv. Mater.* **32** 2004533
- [38] Ghini M, Bristow M, Prentice J C A, Sutherland S, Sanna S, Haghighirad A A, Coldea A I 2021 *Phys. Rev. B* **103** 205139
- [39] Kim H, Uddin S Z, Lien D H, Yeh M, Azar N S, Balendhran S, Kim T, Gupta N, Rho Y, Grigoropoulos C P, Crozier K B, Javey A 2021 *Nature* **596** 232
- [40] Cenker J, Sivakumar S, Xie K, Miller A, Thijssen P, Liu Z, Dismukes A, Fonseca J, Anderson E, Zhu X, Roy X, Xiao D, Chu J H, Cao T, Xu X 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 256
- [41] Cenker J, Ovchinnikov D, Yang H, Chica D G, Zhu C, Cai J, Diederich G M, Liu Z, Zhu X, Roy X, Cao T, Daniels M W, Chu J H, Xiao D, Xu X 2023 arXiv: 2301.03759v1 [cond-mat. mes-hall]
- [42] Levy N, Burke S A, Meaker K L, Panlasigui M, Zettl A, Guinea F, Castro Neto A H, Crommie M F 2010 *Science* **329** 544
- [43] Wang Y, Yang R, Shi Z, Zhang L, Shi D, Wang E, Zhang G 2011 *ACS Nano* **5** 3645
- [44] Wang L, Zihlmann S, Baumgartner A, Overbeck J, Watanabe K, Taniguchi T, Makk P, Schönenberger C 2019 *Nano Lett.* **19** 4097
- [45] Wang L, Baumgartner A, Makk P, Zihlmann S, Varghese B S, Indolese D I, Watanabe K, Taniguchi T, Schönenberger C 2021 *Commun. Phys.* **4** 147
- [46] Goldsche M, Sonntag J, Khodkov T, Verbiest G J, Reichardt S, Neumann C, Ouaj T, Von den Driesch N, Buca D, Stampfer C 2018 *Nano Lett.* **18** 1707
- [47] Cao K, Feng S, Han Y, Gao L, Ly T H, Xu Z, Lu Y 2020 *Nat. Commun.* **11** 284
- [48] Nicholl R J T, Lavrik N V, Vlassiouk I, Srijanto B R, Bolotin K I 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 266101
- [49] Cui X, Dong W, Feng S, Wang G, Wang C, Wang S, Zhou Y, Qiu X, Liu L, Xu Z, Zhang Z 2023 *Small* **19** 2301959
- [50] Roldán R, Castellanos-Gomez A, Cappelluti E, Guinea F 2015 *J. Phys. Condens. Matter* **27** 313201
- [51] Hwangbo K, Rosenberg E, Cenker J, Jiang Q, Wen H, Xiao D, Chu J H, Xu X 2024 arXiv: 2308.08734v2 [cond-mat. str-el]
- [52] Pérez Garza H H, Kievit E W, Schneider G F, Staufer U 2014 *Nano Lett.* **14** 4107
- [53] Pasquier V, Scarfato A, Martinez-Castro J, Guipet A, Renner C 2023 *Rev. Sci. Instrum.* **94** 013905
- [54] Hou W, Azizimanesh A, Sewaket A, Peña T, Watson C, Liu M, Askari H, Wu S M 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 668
- [55] Huang S, Zhang G, Fan F, Song C, Wang F, Xing Q, Wang C, Wu H, Yan H 2019 *Nat. Commun.* **10** 2447
- [56] Ci W, Yang H, Xue W, Yang R, L B, Wang P, Li R-W, Xu X-H 2022 *Nano Res.* **15** 7597
- [57] Lin Z, Peng Y, Wu B, Wang C, Luo Z, Yang J 2022 *Chin. Phys. B* **31** 087506
- [58] Deng Y, Yu Y, Song Y, Zhang J, Wang N Z, Sun Z, Yi Y, Wu Y Z, Wu S, Zhu J, Wang J, Chen X H, Zhang Y 2018 *Nature* **563** 94
- [59] Wang Z, Zhang T, Ding M, Dong B, Li Y, Chen M, Li X, Huang J, Wang H, Zhao X, Li Y, Li D, Jia C, Sun L, Guo H, Ye Y, Sun D, Chen Y, Yang T, Zhang J, Ono S, Han Z, Zhang Z 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 554
- [60] Jiang S, Li L, Wang Z, Mak K F, Shan J 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 549
- [61] Huang B, Clark G, Klein D R, MacNeill D, Navarro-Moratalla E, Seyler K L, Wilson N, McGuire M A, Cobden D H, Xiao D, Yao W, Jarillo-Herrero P, Xu X 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 544
- [62] Jiang S, Shan J, Mak K F 2018 *Nat. Mater.* **17** 406
- [63] Song T, Fei Z, Yankowitz M, Lin Z, Jiang Q, Hwangbo K, Zhang Q, Sun B, Taniguchi T, Watanabe K, McGuire M A, Graf D, Cao T, Chu J-H, Cobden D H, Dean C R, Xiao D, Xu X 2019 *Nat. Mater.* **18** 1298
- [64] Li T, Jiang S, Sivadas N, Wang Z, Xu Y, Weber D, Goldberger J E, Watanabe K, Taniguchi T, Fennie C J, Fai Mak K, Shan J 2019 *Nat. Mater.* **18** 1303
- [65] Mak K F, Shan J, Ralph D C 2019 *Nat. Rev. Phys.* **1** 646
- [66] Sheng P, Wang B, Li R 2018 *J. Semicond.* **39** 011006
- [67] Zhong D, Seyler K L, Linpeng X, Wilson N P, Taniguchi T, Watanabe K, McGuire M A, Fu K-M C, Xiao D, Yao W, Xu X 2020 *Nat. Nanotechnol.* **15** 187
- [68] Šiškins M, Lee M, Mañas-Valero S, Coronado E, Blanter Y M, Van der Zant H S J, Steeneken P G 2020 *Nat. Commun.* **11** 2698
- [69] Bukharaev A A, Zvezdin A K, Pyatakov A P, Fetisov Y K 2018 *Phys. Usp.* **61** 1175
- [70] Zhuang H L, Kent P R C, Hennig R G 2016 *Phys. Rev. B* **93** 134407
- [71] Webster L, Yan J A 2018 *Phys. Rev. B* **98** 144411
- [72] Wadley P, Howells B, Železný J, Andrews C, Hills V, Campion R P, Novák V, Olejník K, Maccherozzi F, Dhesi S S, Martin S Y, Wagner T, Wunderlich J, Freimuth F, Mokrousov Y, Kuneš J, Chauhan J S, Grzybowski M J, Rushforth A W, Edmonds K W, Gallagher B L, Jungwirth T 2016 *Science* **351** 587
- [73] Wadley P, Reimers S, Grzybowski M J, Andrews C, Wang M, Chauhan J S, Gallagher B L, Campion R P, Edmonds K W, Dhesi S S, Maccherozzi F, Novak V, Wunderlich J, Jungwirth T 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 362
- [74] Němec P, Fiebig M, Kampfrath T, Kimel A V 2018 *Nat. Phys.* **14** 229
- [75] Ni Z, Haglund A V, Wang H, Xu B, Bernhard C, Mandrus D G, Qian X, Mele E J, Kane C L, Wu L 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 782
- [76] Song T, Cai X, Tu M W Y, Zhang X, Huang B, Wilson N P, Seyler K L, Zhu L, Taniguchi T, Watanabe K, McGuire

- M A, Cobden D H, Xiao D, Yao W, Xu X 2018 *Science* **360** 1214
- [77] Klein D R, MacNeill D, Lado J L, Soriano D, Navarro-Moratalla E, Watanabe K, Taniguchi T, Manni S, Canfield P, Fernández-Rossier J, Jarillo-Herrero P 2018 *Science* **360** 1218
- [78] Hicks C W, Brodsky D O, Yelland E A, Gibbs A S, Bruin J A N, Barber M E, Edkins S D, Nishimura K, Yonezawa S, Maeno Y, Mackenzie A P 2014 *Science* **344** 283
- [79] Chu J H, Kuo H H, Analytis J G, Fisher I R 2012 *Science* **337** 710
- [80] Lin C, Ochi M, Noguchi R, Kuroda K, Sakoda M, Nomura A, Tsubota M, Zhang P, Bareille C, Kurokawa K, Arai Y, Kawaguchi K, Tanaka H, Yaji K, Harasawa A, Hashimoto M, Lu D, Shin S, Arita R, Tanda S, Kondo T 2021 *Nat. Mater.* **20** 1093
- [81] Zhu C S, Lei B, Sun Z L, Cui J H, Shi M Z, Zhuo W Z, Luo X G, Chen X H 2021 *Phys. Rev. B* **104** 024509
- [82] Lederer S, Schattner Y, Berg E, Kivelson S A 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 097001
- [83] Sprau P O, Kostin A, Kreisel A, Böhmer A E, Taufour V, Canfield P C, Mukherjee S, Hirschfeld P J, Andersen B M, Davis J C S 2017 *Science* **357** 75
- [84] Li J, Lei B, Zhao D, Nie L P, Song D W, Zheng L X, Li S J, Kang B L, Luo X G, Wu T, Chen X H 2020 *Phys. Rev. X* **10** 011034
- [85] Phan G N, Nakayama K, Sugawara K, Sato T, Urata T, Tanabe Y, Tanigaki K, Nabeshima F, Imai Y, Maeda A, Takahashi T 2017 *Phys. Rev. B* **95** 224507
- [86] Nabeshima F, Kawai M, Ishikawa T, Shikama N, Maeda A 2018 *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** 120314
- [87] Bartlett J M, Steppke A, Hosoi S, Noad H, Park J, Timm C, Shibauchi T, Mackenzie A P, Hicks C W 2021 *Phys. Rev. X* **11** 021038
- [88] Cheng Z, Lei B, Luo X, Ying J, Wang Z, Wu T, Chen X 2021 *Chin. Phys. B* **30** 097403
- [89] Kane C L, Mele E J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 146802
- [90] Xiao D, Chang MC, Niu Q 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 1959
- [91] You J S, Fang S, Xu S Y, Kaxiras E, Low T 2018 *Phys. Rev. B* **98** 121109
- [92] Son J, Kim K H, Ahn Y H, Lee H W, Lee J 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 036806
- [93] Fu L, Kane C L 2007 *Phys. Rev. B* **76** 045302
- [94] Murakami S, Kuga S I 2008 *Phys. Rev. B* **78** 165313
- [95] Zhao C, Hu M, Qin J, Xia B, Liu C, Wang S, Guan D, Li Y, Zheng H, Liu J, Jia J 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 046801
- [96] Zhang P, Noguchi R, Kuroda K, Lin C, Kawaguchi K, Yaji K, Harasawa A, Lippmaa M, Nie S, Weng H, Kandyba V, Giampietri A, Barinov A, Li Q, Gu G D, Shin S, Kondo T 2021 *Nat. Commun.* **12** 406
- [97] Flötotto D, Bai Y, Chan Y H, Chen P, Wang X, Rossi P, Xu C Z, Zhang C, Hlevyack J A, Denlinger J D, Hong H, Chou M Y, Mittemeijer E J, Eckstein J N, Chiang T C 2018 *Nano Lett.* **18** 5628
- [98] Liu J, Zhou Y, Yopez Rodriguez S, Delmont M A, Welser R A, Ho T, Sirica N, McClure K, Vilmercati P, Ziller J W, Mannella N, Sanchez-Yamagishi J D, Pettes M T, Wu R, Jauregui L A 2024 *Nat. Commun.* **15** 332
- [99] Hammock M L, Chortos A, Tee B C K, Tok J B H, Bao Z 2013 *Adv. Mater.* **25** 5997
- [100] Chortos A, Liu J, Bao Z 2016 *Nat. Mater.* **15** 937
- [101] Ma Y, Zhang Y, Cai S, Han Z, Liu X, Wang F, Cao Y, Wang Z, Li H, Chen Y, Feng X 2020 *Adv. Mater.* **32** 1902062
- [102] Qi J, Lan Y W, Stieg A Z, Chen J H, Zhong Y L, Li L J, Chen C D, Zhang Y, Wang K L 2015 *Nat. Commun.* **6** 7430
- [103] Zhao J, Wang G, Yang R, Lu X, Cheng M, He C, Xie G, Meng J, Shi D, Zhang G 2015 *ACS Nano* **9** 1622
- [104] Feng W, Zheng W, Gao F, Chen X, Liu G, Hasan T, Cao W, Hu P 2016 *Chem. Mater.* **28** 4278
- [105] Zhang Z, Li L, Horng J, Wang N Z, Yang F, Yu Y, Zhang Y, Chen G, Watanabe K, Taniguchi T, Chen X H, Wang F, Zhang Y 2017 *Nano Lett.* **17** 6097
- [106] Yan W, Fuh H R, Lü Y, Chen K Q, Tsai T Y, Wu Y R, Shieh T H, Hung K M, Li J, Zhang D, Ó Coileáin C, Arora S K, Wang Z, Jiang Z, Chang C R, Wu H C 2021 *Nat. Commun.* **12** 2018
- [107] Grabovskij G J, Peichl T, Lisenfeld J, Weiss G, Ustinov A V 2012 *Science* **338** 232
- [108] Sun Y, Lin T, Lei N, Chen X, Kang W, Zhao Z, Wei D, Chen C, Pang S, Hu L, Yang L, Dong E, Zhao L, Liu L, Yuan Z, Ullrich A, Back C H, Zhang J, Pan D, Zhao J, Feng M, Fert A, Zhao W 2023 *Nat. Commun.* **14** 3434
- [109] Lei N, Devolder T, Agnus G, Aubert P, Daniel L, Kim J V, Zhao W, Trypiniotis T, Cowburn R P, Chappert C, Ravelosona D, Lecoeur P 2013 *Nat. Commun.* **4** 1378
- [110] D'Souza N, Biswas A, Ahmad H, Fashami M S, Al-Rashid M M, Sampath V, Bhattacharya D, Abeed M A, Atulasimha J, Bandyopadhyay S 2018 *Nanotechnology* **29** 442001
- [111] Yan H, Feng Z, Shang S, Wang X, Hu Z, Wang J, Zhu Z, Wang H, Chen Z, Hua H, Lu W, Wang J, Qin P, Guo H, Zhou X, Leng Z, Liu Z, Jiang C, Coey M, Liu Z 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 131
- [112] Gusev N S, Sadovnikov A V, Nikitov S A, Sapozhnikov M V, Udalov O G 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 157202
- [113] Žutić I, Fabian J, Das Sarma S 2004 *Rev. Mod. Phys.* **76** 323
- [114] Borders W A, Pervaiz A Z, Fukami S, Camsari K Y, Ohno H, Datta S 2019 *Nature* **573** 390
- [115] Safranski C, Kaiser J, Trouilloud P, Hashemi P, Hu G, Sun J Z 2021 *Nano Lett.* **21** 2040
- [116] Camsari K Y, Faria R, Sutton B M, Datta S 2017 *Phys. Rev. X* **7** 031014
- [117] Camsari K Y, Sutton B M, Datta S 2019 *Appl. Phys. Rev.* **6** 011305
- [118] Kaiser J, Datta S 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 150503
- [119] Liu Z, Amani M, Najmaei S, Xu Q, Zou X, Zhou W, Yu T, Qiu C, Birdwell A G, Crowne F J, Vajtai R, Yakobson B I, Xia Z, Dubey M, Ajayan P M, Lou J 2014 *Nat. Commun.* **5** 5246
- [120] Li Z, Lü Y, Ren L, Li J, Kong L, Zeng Y, Tao Q, Wu R, Ma H, Zhao B, Wang D, Dang W, Chen K, Liao L, Duan X, Duan X, Liu Y 2020 *Nat. Commun.* **11** 1151

REVIEW

***In-situ* strain engineering and applications of van der Waals materials^{*}**Ma Ze-Cheng^{1) #} Liu Zeng-Lin^{1) #} Cheng Bin²⁾Liang Shi-Jun^{1) †} Miao Feng^{1) ‡}1) (*School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)2) (*School of Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

(Received 12 March 2024; revised manuscript received 30 March 2024)

Abstract

Van der Waals (vdW) materials have attracted extensive research interest in the field of strain engineering due to their unique structure and excellent performance. By changing the atomic lattice and electronic structure, strain can modulate the novel physical properties of vdW materials and generate new quantum states, ultimately realize high-performance electronic devices based on new principles. In this paper, we first comprehensively review various experimental strategies of inducing *in-situ* strain, which include the bending deformation of flexible substrates, mechanical stretching of microelectromechanical systems and electrodeformation of piezoelectric substrates. Then, we outline the recent research progresses of *in-situ* strain-modulated magnetism, superconductivity and topological properties in vdW materials, as well as the development of strain-related device applications, such as intelligent strain sensors and strain-programmable probabilistic computing. Finally, we examine the current challenges and provide insights into potential opportunities in the field of strain engineering.

Keywords: Van der Waals materials, strain engineering, *in-situ* strain, strain sensor**PACS:** 07.10.Pz, 75.70.-i, 74.78.-w, 03.65.Vf**DOI:** [10.7498/aps.73.20240353](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240353)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62122036, 62034004, 12322407, 61921005, 12074176), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB44000000), the AIQ Foundation, and the Program B for Outstanding PhD Candidate of Nanjing University, China.

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: sjliang@nju.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: miao@nju.edu.cn



范德瓦耳斯材料的原位应变工程与应用

马泽成 刘增霖 程斌 梁世军 缪峰

In-situ strain engineering and applications of van der Waals materials

Ma Ze-Cheng Liu Zeng-Lin Cheng Bin Liang Shi-Jun Miao Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 110701 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240353

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240353>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维平面和范德瓦耳斯异质结的可控制备与光电应用

Controllable preparation and photoelectric applications of two-dimensional in-plane and van der Waals heterostructures

物理学报. 2021, 70(2): 027901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201419>

几种范德瓦耳斯铁电材料中新奇物性的研究进展

Research progress of novel properties in several van der Waals ferroelectric materials

物理学报. 2022, 71(12): 127305 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220349>

二维范德瓦耳斯材料的超导物性研究及性能调控

Two-dimensional van der Waals: Characterization and manipulation of superconductivity

物理学报. 2022, 71(18): 187401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220638>

范德瓦耳斯体系中的量子层电子学

Quantum layertronics in van der Waals systems

物理学报. 2023, 72(23): 237302 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231323>

应力调控BlueP/XTe₂ (X = Mo, W)范德瓦耳斯异质结电子结构及光学性质理论研究

Tunable electronic structure and optical properties of BlueP/XTe₂ (X = Mo, W) van der Waals heterostructures by strain

物理学报. 2021, 70(6): 067101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201728>

石墨烯/C₃N范德瓦耳斯异质结的可调电子特性和界面接触

Tunable electronic structures and interface contact in graphene/C₃N van der Waals heterostructures

物理学报. 2023, 72(14): 147302 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230318>