

分会场五：纳米表征分会

水系二次锌锰电池正负极原位显微研究

袁一斐*

温州大学

水系二次锌锰电池在储能领域有较大应用前景。隧道结构 MnO_2 被广泛用于与金属锌负极组成水系电池体系。然而，关于此正极材料的储能及失效机理，依然有较大分歧；锌负极也存在锌枝晶沉积等问题。本报告展示了如何运用原子分辨电子显微技术、液态原位电镜/光镜并结合理论计算，从微观探究 MnO_2 正极储能机理，揭示晶格在储能过程中的各向异性缩胀和容量衰减机制；揭示晶体表面结构、微量缺陷结构对容量衰减行为的影响。同时围绕锌金属负极电化学沉积行为的原位光学显微表征，对传统的2D原位模式进行改进，发展了3D立体原位成像技术，可全方位展现锌金属沉积及其枝晶演化的实时行为，并指导了相关锌负极界面调控策略的设计和实验。本报告展示了如何深化针对水系电池可逆充放电微观机制的理解，为更好地设计材料和优化储能性能提供了理论指导。

关键词 水系电池，锰基正极，锌金属，储能机制，原位电镜

氧化铝晶界结构的电子显微学研究

魏家科*

中国科学院大连化学物理研究所

氧化铝 (α -Al₂O₃) 是一种重要的功能氧化物, 广泛应用为高温结构陶瓷、催化材料和抗氧化涂层等领域。多晶氧化铝的晶界结构在很大程度上决定了其物理、化学和力学性能。例如, 晶界影响其多晶氧化铝的O/Al离子的扩散行为和高温蠕变性能。扫描透射电子显微镜 (STEM) 和电子能量损失谱 (EELS) 具有原子级成像和谱学探测能力, 已成为研究材料表界面结构的关键技术。本研究采用双晶的制备方法, 可控构筑了多种常见的氧化铝双晶结构, 利用球差校正STEM和EELS, 系统解析了氧化铝晶界的原子结构和电子能带结构[1], 发现氧化铝晶界的电子带隙相比于体相普遍降低, 结构上起源于晶界处Al和O离子的配位数减小。此外, 我们还在原子尺度研究了氧化铝晶界移动的原子过程[2-4], 发现随着晶界结构的不同, 晶界迁移可以通过晶界结构相变或界面位错移动两种方式进行。

关键词 氧化铝; 电子显微学; 电子能量损失谱; 晶界结构

超薄铁电薄膜中的拓扑畴构筑

耿皖荣*、朱银莲、马秀良

松山湖材料实验室

拓扑态作为凝聚态物质科学前沿，其手性特征与拓扑保护特性在超高密度存储与量子传输领域具有革命性应用前景。铁电体系中已发现全闭合、涡旋、斯格明子等多种极性拓扑态，但纳米级畴有序化分布与拓扑电荷可调组态构筑等关键问题亟待突破，这对实现高密度多态存储至关重要。

本研究在LaAlO₃衬底上外延生长-4.36%压应变的BiFeO₃超薄薄膜。像差校正透射电镜结合定量分析发现：二维调制结构伴随周期性电场/应变分布，稳定了铁电斯格明子晶体，该晶体在倒空间呈现双波矢($2q$)超衍射峰，定义为双波矢拓扑有序态。同时，研究发现一维调制结构稳定的涡旋管阵列，称为单波矢($1q$)拓扑有序态。结构分析表明，斯格明子晶体源于两个垂直 $1q$ 态的应变-电荷协同耦合。相场模拟证实电学Dzyaloshinskii-Moriya相互作用对拓扑有序态形成起决定性作用，验证了铁电/铁磁体系拓扑有序态形成机制的普适性。该发现证明铁电拓扑有序态的周期与对称性可调控，为探索各向同性/异性多重波矢拓扑态奠定基础^[1]。

此外，通过薄膜设计与边界条件调控，在BiFeO₃薄膜中成功诱导多阶极性径向涡旋。压电力显微镜和像差校正透射电子显微镜实验表明二阶径向涡旋具有“甜甜圈”状面外极化与四象限面内极化，实现净拓扑电荷 $Q=0$ 。纳米结构尺寸调控可稳定一阶至三阶径向涡旋，实现拓扑电荷多态切换。压电力显微镜证实施加局部电场可实现拓扑畴和拓扑电荷数的多途径调控。该成果为构筑复杂拓扑组态及设计新型多态铁电存储器提供了新路径^[2]。

关键词铁电薄膜；像差校正透射电子显微镜；压电力显微镜；拓扑畴

合金元素作用下的位错-溶质非弹性交互作用与材料强塑性

余倩*

浙江大学

位错核心与其他晶体缺陷结构间的非弹性交互作用是材料强塑性改变的重要因素。然而由于位错核心结构复杂，畸变严重，我们对这部分作用一直缺乏系统的科学认知。我们通过多尺度、原位的透射电子显微镜表征，并结合三维显微结构断层成像和计算机模拟等，揭示了复杂合金中存在纳米尺度成分涨落的现象，可促进材料强塑性同步提升[1]，并构建了基于成分涨落的新的位错强化模型[2]；发现微合金元素于位错核偏聚可加剧溶质-位错核非弹性交互作用，造成显著位错强化，并提出机械扩散强化、交滑移强化两种新的固溶强化模型；首次在固态相变中揭示了基于元素特殊扩散行为的非经典形核相变机理[3]，可制造新奇表界面结构，调控位错行为，显著提高材料强塑性[4, 5]

关键词位错；非弹性相互作用；合金化；电子显微学

二维半导体器件中激子共振下的超快非线性光谱

林楷强*

厦门大学

光与物质的强相互作用可以为新型光电器件和量子技术的开发带来契机，如无反转的光学增益、激光冷却和光量子信息处理等。过渡金属二硫族化合物因其激子特性已成为研究强的光与物质相互作用的新兴平台，近期，我们在单层[1]和双层[2]过渡金属二硫族化合物中观察到了激子量子干涉行为，并发现其主要来源于材料中动量空间K点周围的激子三能级系统[3]。通过构筑单层或双层WSe₂三极管器件，我们可以实现该激子三能级系统的有效调控[4]，从而控制激子量子干涉行为[5]。我们发展时间分辨的和频光谱（SFG）与四波混频（FWM）来探测单层WSe₂中激子量子干涉的动力学过程[6]。双光子共振泵浦可以获得高能激子的布居，再由非共振脉冲触发四波混频辐射过程。在激子共振下，非线性光谱的强度随两束脉冲的时间延迟可以帮助理解激子量子干涉过程中的拉比（Rabi）振荡，为了解相干激子的动力学提供了启示。该时间分辨非线性光谱方法将为凝聚态化学体系提供新的研究手段。

[1]K. -Q. Lin et al., Nat. Phys. 2019, 15, 242–246.

[2]K. -Q. Lin et al., Nat. Commun., 2021, 12, 1553.

[3]K. -Q. Lin et al., Nat. Commun., 2021, 12, 5500.

[4]K. -Q. Lin et al., Nat. Nanotechnol., 2024, 19, 196.

[5]K. -Q. Lin et al., Nature Commun., 2022, 13, 6980

[6]J. Bauer et al, Nat. Photon., 2022, 16, 777–783.

关键词非线性光谱；二维半导体；激子；和频；四波混频；

纳米界面原子三维重构成像

周继寒*

北京大学

精准探测界面原子的三维结构对能源催化、界面制造和界面功能材料具有重要意义。界面原子的三维位置决定了物质的原子结构、电子结构和声子结构，进而影响材料的性质和应用。过去几年中，报告人开发并利用原子分辨三维重构技术对晶体晶界、核壳界面多种金属界面以及一系列金属-非金属界面在原子水平上进行了精准探测。这些结果将对未来研究界面上各种难题，例如半导体界面结构、催化剂界面构效、原子扩散和边界迁移等有所启发。

关键词 三维重构，电子显微学，原子结构，界面

深度学习助力未校正扫描透射电子显微镜实现亚埃分辨率成像

邱赞霖¹、孟媛¹、李俊贤¹、洪燕辉²、李宁¹、韩小藏¹、梁聿¹、郑咏妮¹、柯国霖²、张林峰^{2,3}、鄂维南^{3,4,5}、赵晓续^{*1}、
张锦^{1,6,7}

1. 北京大学材料科学与工程学院

2. 深势科技

3. 北京科学智能研究院

4. 北京大学国际机器学习研究中心

5. 北京大学数学科学学院

6. 北京大学化学与分子工程学院

7. 北京大学新材料学院

长期以来，亚埃级分辨率的实现仅限于配备精密像差校正系统的扫描透射电子显微镜（Aberration-Corrected Scanning Transmission Electron Microscopy, AC-STEM）。近年来，反卷积和电子叠层成像等计算超分辨率技术的发展，使未校正STEM无需复杂像差校正器即可实现亚埃分辨率。然而，这些方法对样品厚度有严格要求，尚未广泛应用。本研究提出了SARDiffuse——一种深度学习扩散模型，旨在提升未校正STEM图像的空间分辨率并降低噪声水平。使用真实AC-STEM数据训练后的SARDiffuse能够恢复STEM图像的高频信息，使未校正显微镜达到亚埃分辨率。我们在硅（Si）、钛酸锶（STO）和氮化镓（GaN）等代表性材料上验证了模型的有效性，实现了空间分辨率的显著提升（ $<1\text{\AA}$ ）。详细统计分析表明，SARDiffuse能够可靠保留原子位置，是高精度材料表征的有力工具。此外，该模型能有效抑制球差引起的伪影，在伪影校正方面优于现有方法，同时能够很好保留图像背景信息（如厚度变化或碳污染分布）。本研究凸显了深度学习在未校正电子显微镜中实现亚埃分辨率成像的潜力，为常规单晶成像提供了比AC-STEM更经济的替代方案。

关键词 透射电子显微镜；人工智能；超分辨率成像；去噪扩散概率模型

镍基单晶高温合金中 σ 相直线传播的起源

赵玉萍*

浙江大学

拓扑紧密堆积（TCP）相虽然本身坚硬，但在各种合金中通常被认为是有害的。在镍基单晶超级合金（Ni-SXs）中，TCP相对材料机械性能的主要不利影响来自于它们的直线传播，破坏了原有的 γ/γ' 双相结构，并导致TCP相在外加应力下发生裂解。了解TCP相在复杂相结构中直线传播的具体原因，对于减轻或逆转其对材料性能的不利影响至关重要，但这一挑战仍然难以克服。本研究通过在第四代镍基单晶超级合金中采用超高空间和能量分辨率透射电子显微镜（TEM）表征，并结合原位扫描透射电子显微镜（STEM）加热实验来解决这一难题。我们的研究揭示了 σ 相在高温下形成之前的孕育期，在原子扩散的驱动下，基体发生了显著的相分离过程。值得注意的是，在预先存在的 γ 相中出现了尺度为数十纳米的 γ' 相域，反之亦然。这种现象重构了原有的 γ/γ' 双相结构，形成了精细的双相结构。细化后的结构有效地减少了形成 σ 相所需的合金元素扩散距离。

关键词 镍基单晶高温合金；原位TEM加热；拓扑密堆相；分相结构；生长机制

多主元合金中大量间隙固溶引发的内应变调控及位错行为演化

宋雅婧、余倩*

浙江大学

晶格中的内应变及其分布在调控位错行为中起着关键作用，进而影响材料的力学性能。间隙固溶强化作为传统强化手段之一，间隙元素的有限固溶及室温条件下的低扩散率，常导致局部应力集中进而限制了材料的塑性变形能力。本研究通过积分差分相位衬度成像、原位透射电子显微镜表征以及计算模拟的协同应用，我们揭示了氧间隙原子在NiCoCrO多主元合金中的占位行为及其对位错行为的影响机制。研究发现，大量氧原子的间隙固溶在晶体中形成了高密度、强局域的位错运动钉扎点，而氧原子在孪晶界的偏聚也能够改变孪晶与位错之间的相互作用关系。值得注意的是，氧间隙原子在NiCoCrO合金的畸变晶格中表现出优异的扩散性和可移动性，能够在不同的八面体和四面体间隙位置之间迁移，甚至在室温下亦可实现。这一特性有助于释放由位错缠结引起的严重应力集中，并在其他位置建立新的强局域钉扎点，从而赋予材料高强度与优异的变形能力。

关键词位错；间隙固溶；内应变；原位TEM拉伸；多主元合金

二维异质界面上的声子辅助能量传递

徐伟高*

南京大学

除了静态原子排布外，界面原子的运动状态是决定异质结构材料物理化学性质的基石。本报告将探讨两种独特的声子辅助界面传能模式，包括低频声子介导的力学耦合型界面传能和声子辅助电荷转移型界面传能。拉曼散射作为非弹性散射过程，本质上是光子与分子/晶格原子间的能量交换。通过将等离激元光腔与层状材料中的类机械振子相结合，我们首次提出一种新型力学拉曼光谱（mechano-Ramanspectroscopy, MRS）技术。层状材料中的原子层集体运动承载着机械、热学和光电特性的关键信息，但由于电子-声子耦合较弱，传统拉曼技术往往难以直接检测。基于其传播特性和机械耦合效应，我们实现了低至 4cm^{-1} 的类机械振子直接测量，并通过定量分析揭示了机械振动与局域光场之间的能量传递机制。在第二部分中，我们将通过二维异质结界面设计与调控，通过一系列实验探讨基于声子辅助电荷转移实现固体材料光学冷却的可行性。这些发现或将为功能结构与器件的自下而上组装开辟新途径。

关键词 二维材料；界面相互作用；力学拉曼光谱；固体光学冷却

敏感二维量子材料与有机材料的无损结构表征与构效关系研究

林君浩*

南方科技大学

由于二维材料的极限厚度，大部分新型二维材料，如铁电性，铁磁性或超导性单层材料在大气环境下会迅速劣化，不耐高能电子束辐照，无法表征其缺陷的精细结构。在这个报告中，我将报道我们课题组在克服二维材料水氧敏感性的一些设备创新尝试，以及利用互联真空转移与扫描透射电镜（STEM）定量衬度分析技术表征水氧敏感二维材料的晶格原子结构与缺陷，并研究其对物性的影响，如敏感单层MoTe₂/WTe₂本征缺陷及其可能的拓扑性质等。此外，引入低温冷冻电镜技术，我们在克服水氧敏感的基础上也成功克服二维材料与一系列有机无机复合材料、全有机材料体系不耐电子辐照的问题。

关键词 低维量子材料，透射电镜表征

二维材料的拉曼光谱学表征

童廉明*

PekingUniversity, China

拉曼光谱具有高效、无损、指纹识别等特点，被广泛应用于物质的结构与性质表征。然而，拉曼光谱用于纳米材料的高通量快速表征，仍然面临光谱解析复杂、散射机制不清晰等挑战。报告人长期从事纳米材料的拉曼光谱学研究，本报告将介绍在二维材料拉曼散射的机理、技术和应用等方面的研究进展，包括：（1）发现了二维材料中的手性拉曼散射效应，提出了量子干涉模型，揭示了手性电荷密度波材料的手性相变过程；（2）基于量子干涉模型，发展了螺旋度分辨拉曼光谱表征新技术，建立了二维材料电声耦合的半定量谱学表征方法；（3）利用螺旋度分辨光谱技术，实现了碳纳米管手性信息的获取和石墨烯三维空间取向的定量表征，发展了机器学习赋能的二维材料堆垛快速表征方法。

关键词 二维材料，拉曼光谱，偏振

实空间下材料的构效关系

谷林*

清华大学

材料的结构-性能（构效）关系是材料功能设计与性能调控的核心科学问题。传统倒空间研究方法基于材料的周期性，而实空间方法聚焦原子与电子的局域排布与动态演化，对结构缺陷、界面扰动等非理想因素具有独特敏感性。本课题组长期致力于实空间方法学创新，围绕储能、催化及功能氧化物等体系，在方法学获取局域对称性（如开发球差校正ABF成像技术、EELS电荷分布分析）、局域新奇对称性探索（如构筑氮掺杂非晶碳调控电子功能、揭示 ZrO_2 局域应变对铁电稳定性的作用）以及电子局域结构与物性关联（如定量表征 Li_xCoO_2 轨道演化、调控Mn3d轨道抑制姜-泰勒畸变）三方面取得重要突破。未来研究将围绕自旋自由度，结合晶格畸变、电荷迁移与轨道占据等多自由度的协同调控，依托无磁场原子分辨电子显微镜平台，系统解析自旋与晶格、电荷、轨道的耦合机制。结合电子显微学、谱学技术与机器学习方法，识别关键序参量（如畸变强度、自旋极化率等），建立跨材料体系的实空间构效图谱，实现“结构-物性-功能”一体化设计。本课题组的研究将为新型功能材料的理性设计提供理论与技术支撑，推动材料科学从“观测-解释”向“识别-调控”的范式转变。

关键词实空间；自旋

冷冻电镜观察锂电池材料与界面

王雪峰*、翁素婷、方遒、王兆翔、陈立泉

中国科学院物理研究所

冷冻电镜（cryo-EM）技术已逐渐是电池领域研究的必备工具。冷冻或低温不仅可以有效地缓解高能电子束对样品造成的辐照损伤，而且可以大幅度地降低样品的反应活性，提高样品的稳定性。冷冻电镜可以为辐照敏感材料提供纳米、甚至是原子尺度的微观结构信息。本报告将重点介绍冷冻电镜在分析锂离子电池失效机制的相关应用和成果，包括冷冻聚焦离子束-扫描电子显微镜（cryo-FIB-SEM）和冷冻透射电子显微镜（cryo-TEM），以便进一步了解冷冻电镜在解析电池工作机理和指导材料结构设计等方面所发挥的优势和作用。报告人将重点介绍冷冻电镜在硅负极界面演变与恶化和全固态电池中固-固界面等方面的应用与成果。冷冻电镜技术的发展将有助于解析电池材料与界面结构，了解电池运行和失效机制，从而促进高比能和高安全性电池的发展。

关键词 冷冻电镜；锂离子电池；电极-电解液界面；固态电池

基于生成式模型的范德华界面原子级结构自动解析

黄文强、王珊珊*

国防科技大学

揭示原子结构对于建立材料微观构型与宏观性能之间的关系具有重要意义。然而，我们仍然缺乏一种快速、准确和可靠的方法来自动解析原子分辨率显微镜中的复杂图案。在这里，我们提出了一种Trident策略增强的解耦表示学习方法（生成模型），该方法利用少量未标记的实验图像和大量低成本的模拟图像来生成大量与实验条件非常相似的带标注的模拟数据，同时实现了高质量和大容量的训练数据集。然后通过残差神经网络训练结构推理模型，该模型可以直接推断具有不同层数（双层和三层）的各种材料（例如MoS₂，WS₂，ReS₂，ReSe₂和1T'-MoTe₂）的范德华界面上多样化和复杂堆叠模式的层间滑移和旋转，具有皮米级精度，并且对缺陷，成像质量和表面污染具有鲁棒性。该框架还可以识别模式转换接口，量化细微的基元变化，并区分在频域中难以区分的莫尔模式。我们方法的高通量处理能力有助于发现一种新的vdW外延，其中各种热力学有利的滑移堆叠可以共存，证明了机器学习对新知识出现的贡献。

关键词 扫描透射电子显微镜 范德华界面层间堆叠 生成式模型 自动化解析

机器学习辅助发现 $\text{MoS}_x\text{Te}_{2-x}$ 电催化剂中高效析氢的活性中心

薛申奥^{1,2}、罗政²、李奥林⁴、冯明⁵、李守恒²、周坤²、许可乐²、王怀民²、张锦³、欧阳方平^{1,4}、王珊珊^{*2,3}

1. 中南大学

2. 国防科技大学

3. 北京大学深圳研究生院

4. 新疆大学

5. 同济大学

扫描透射电子显微镜（STEM）虽能以原子分辨率直接观测催化剂的微观结构，但在解析蕴含丰富结构信息的显微图像时，仍缺乏快速精准识别活性位点的方法。本研究采用基于Zernike特征提取与UMAP降维的无监督学习方法，实现了二维 $\text{MoS}_x\text{Te}_{2-x}$ 合金微观结构在特征空间的可解释聚类，并系统揭示了不同合成条件下原子微观结构的差异，进而发现了一种新型反位吸附缺陷（Te原子吸附在Mo位点顶部）。结合理论计算与电化学实验，我们对发现的缺陷进行了闭环验证，证实了其在电催化析氢反应中具有显著增强的本征活性。本成果展示了人工智能与人类专家协同加速催化材料突破性研发的有效路径。

关键词机器学习；缺陷工程；二维催化剂；析氢；扫描透射电子显微镜

纳米晶体的原子级制造和原位表征

王荣明*

北京科技大学

实现原子尺度精确制造是构建未来信息和能源功能器件的基础，在一定特征尺度深刻理解纳米晶的成核生长及结构演化过程是实现原子尺度精确制造的基石，发展原位、动态、高时空分辨的纳米材料表征新方法与技术，实现反应/服役条件下纳米材料结构及表面原子的精确表征是突破原子尺度精确制造难题的关键。

基于环境气氛球差校正透射电镜，以过渡金属异质结构为主要研究对象，原位研究了其表面结构、界面原子构型及其在外场作用下的结构演化[1-4]；原位观察了Au纳米颗粒在各向异性二维半导体ReS₂表面的迁移和聚合行为，发现由于界面各向异性相互作用导致Au颗粒的取向迁移[5]；发现了固相环境下Pt纳米晶经由非晶团簇生长到临界尺寸~2.0 nm后晶化的生长规律、以及Pt纳米晶内部的应变分布和结构演化规律[6-8]；发现金属Pt与MoS₂载体之间的强相互作用调控了异质结构界面的电子态，促进了Pt-MoS₂异质结构的电催化析氢性能[9]；基于纯相 α -Fe₅C₂活性相的生成过程原位表征，发现“纯相碳化铁”催化体系可实现高碳效合成气直接制线性 α -烯烃[10]。

[1] Zhao, H. F., Wang, R. M. *and co-authors, *Adv. Mater.*, 35 (2023) 2206911.

[2] Wang, R. M., *Nature Catalysis*, 3 (2020) 333.

[3] Ye, H. Y., Zhang, Z. H., Wang, R. M. *, *Small*, 19 (2023) 2303872.

[4] Dai, J., Wang, R. M. *and co-authors, *Angew. Chem. Inter. Ed.*, 63 (2024) e202409673.

[5] Cao, Y. D., Wang, R. M. *and co-authors, *Nano Lett.* 23 (2023) 1211

[6] Ye, H. Y., Wang, R. M. *and co-authors, *Small Methods* 6 (2022) 2200171.

[7] Zhu, Y. C, Wang, R. M. *and co-authors, *Small Methods* 8 (2024) 2400179

[8] Zhu, Y. C and Wang, R. M. *, *Nano Today* 59 (2024) 102533

[9] Shan, A. X., Wang, R. M. *and co-authors, *Nano Energy* 94 (2022) 106913.

[10] P. Wang, R. M. Wang and co-authors, *Nature* 635 (2024) 102.

关键词 原位电镜、纳米晶、成核生长、结构演化

Direct thermal resistance measurement of a single rip location in graphite

白天琦¹、冼乐德²、任文才³、刘忠范⁴、高鹏^{*1}

1. 北京大学

2. 钱塘研究院

3. 中科院金属所

4. 北京石墨烯研究院

Lattice defects in crystalline materials play a critical role in tuning thermal transport, with their properties being highly sensitive to atomic structure. However, characterizing such structure-property relationships is hampered by the challenges in directly measuring thermal properties at the single-defect level. Here, we use in-situ electron energy loss spectroscopy in scanning transmission electron microscopy (STEM-EELS) to characterize rip location boundaries (RBs)—unique kink-like topological defects in reduced graphene oxide (rGO) films—revealing their atomic-scale lattice dynamic features and quantifying local thermal resistance. We find that the interlayer alternating strain field within ~5 nm of RBs broadens the phonon bands of out-of-plane and transverse acoustic modes, leading to enhanced phonon scattering and thereby a ~three- to five-fold increase in local thermal resistance relative to defect-free regions. The obtained typical thermal resistance of rip locations ranges from 4.69×10^{-11} to 8.06×10^{-11} m² KW⁻¹, exhibiting monotonic dependence on bending angles. These findings establish a quantitative link among rip location atomic configurations, phonon features and thermal resistance, providing critical guidelines for defect thermal engineering in rGO films. The in-situ characterization paradigm also paves the way for probing single defect thermal properties at the atomic scale.

关键词 rip location; thermal resistance;

原位电镜纳米表征与结构调控研究

白雪冬*

中国科学院物理研究所

Xuedong Bai is a professor at Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences. He got his Ph.D. degree in materials physics from Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences in 1999. Then he spent two years at Georgia Institute of Technology (USA) as a postdoctor, and one year at National Institute of Materials Science (Japan) as a research scientist. He also spent half of one year at State University of New York at Buffalo and Harvard University as a visiting scholar. His research interests are focused on in-situ TEM technique and its applications on materials science. He has published more than 250 papers in peer-reviewed international journals, including Science/Nature and sister Journals/JACS/Nanoletters/PRL/Adv. Mater., and the citation times are more than 16000. He obtained Chinese Outstanding Young Scientist Fund in 2007, the 1st place of Beijing Science and Technology Award in 2008, and the 2nd place of National Science and Technology Award in 2011, etc.. Now he is director of Electron Microscopy Association of Chinese Academy of Sciences.

电子显微镜是打开微观世界的一把钥匙，在物质科学研究中发挥越来越重要的作用。我们基于扫描探针技术，发展原位透射电子显微学方法和技术，自主研制了一系列原位电镜测量仪器，开展结构与物态调控和表界面生长动力学研究，实时成像动态物理/化学现象的原子过程，实现了原子分辨下结构-性质关系测量与调控，通过外场（光、电、力、超快激光、低温）和表面模板等方式调控功能氧化物和低维材料的结构与物态。本报告将介绍原位电镜技术及其在材料微结构测量与调控中的应用，以及近些年来在氧扩散动力学[1]、极性拓扑结构调控[2, 3]、以及表界面成核生长动力学[4-6]研究的进展。

参考文献

[1] L. Zhu *et al.*, Visualizing Anisotropic Oxygen Diffusion in Ceria under Activated Conditions, *Phys. Rev. Lett.*, **2020**, **124**, 056002.

[2] P. Chen *et al.*, Atomic imaging of mechanically induced topological transition of ferroelectric vortices, *Nature Commun.*, **2020**, **11**, 1840.

[3] X. M. Li *et al.*, Atomic-scale observation of electrical and mechanical manipulation of topological polar flux closure, *PV AS*, **2020**, **117**, 18954.

[4] L. F. Wang *et al.*, *Microscopic Kinetics Pathway of Salt Crystallization in Graphene Nanocapillaries*,

Phys. Rev. Lett. **2021**, **126**, 136001.

[5] X. D. Huang *et al.*, Tracking cubic ice at molecular resolution, *Nature* **2023**, **617**, 86.

[6] L. Wang *et al.*, Bevel-edge epitaxy of ferroelectric rhombohedral boron nitride single crystal, *Nature* **2024**, **629**, 74.

关键词 纳米表征；原位电镜方法；时空分辨；仪器研制；原子可视化

微纳尺度硅力学特性及调控机制研究

王悦存*

西安交通大学

集成电子器件的柔性化、结构功能一体化发展对半导体这一关键材料的机械可靠性与可变形性提出了越来越高的要求。然而，以集成电路基础材料—硅为代表的多数无机半导体，由于强共价键特性导致的室温脆性，易引发无预警的力学失效，尤其是在拉应力作用下，甚至造成器件的整体报废。为突破这一限制硅材料拓展应用的关键瓶颈，围绕“如何克服强共价键键阻力—开动变形载体—抑制低应力脆断”这一关键科学问题，以“强塑结合”的调控机制为突破，采用原位电镜与定量纳米力学测试相结合的手段，实现了微纳尺度单晶硅在近理论强度下的大塑性变形。本次报告内容主要围绕以下两方面展开：1)揭示小尺度硅中反常的“拉比压更强”特性；2)通过可控离子辐照、热氧化、冷等离子体处理，发明了一种“柔韧包硬脆”一体结构，消除表面损伤、抑制硅脆性开裂的同时显著提升硅的强度。

[1]WangY, DingJ, FanZ, et al. Tension - compression asymmetry in amorphous silicon[J]. Nat. Mater., 2021, 20(10):1371.

[2]WangY, LiangB, XuS, et al. Tunable anelasticity in amorphous Si nanowires[J]. Nano Lett., 2019, 20(1):449.

[3]XuW, YuJ, DingJ, et al. Uniting Ultrahigh Plasticity with Near - Theoretical Strength in Submicron - Scale Si via Surface Healing[J]. Adv. Funct. Mater., 2024, 34(44):2404694.

[4]WangL, ZhangY, WangX, et al. Tunable Electrical Resistivity in Single-Phase VO₂ Nanowires Induced by Oxygen Vacancies under Electron Beam Irradiation[J]. Nano Lett., 2025, 25(20):8227.

关键词微纳尺度硅；拉压不对称性；原位电镜；参考文献

人工智能辅助球差电镜原位STEM系统

邵瑞文*、董伟康、华泽

北京理工大学

现代电子显微镜通常能达到原子级的分辨率，并能够以皮米的精度观察原子的复杂排列，对于材料科学、纳米技术和固体物理等领域的研究至关重要。然而原子级扫描透射成像（STEM）成像速度慢，提高成像速度导致信噪比和成像质量急剧降低，不适合进行高空间/时间分辨动态观察，因此原位动态的高空间/时间分辨表征方法仍然是领域内重大基础科学和技术难题。例如，离子迁移作为一种关键性的微观过程，在类脑计算、能源存储、生物传感器以及生物电子学等多个应用领域中得到广泛应用。这些器件中的晶体材料在工作条件下经历多个离子迁移循环，极易形成缺陷甚至非晶相。然而，由于界面处的非平衡性和隐蔽特性，直接以原子精度探测界面上的离子迁移仍然是一个尚未解决的难题。

我们利用原位微纳操作系统、球差校正电镜、以及自主开发的基于深度学习的STEM图像增强器AtomEnhancer，实现了晶界离子迁移的原子层次动态观察。通过直接的原子尺度观察，揭示了晶体-非晶界面处钾离子迁移和微观结构演化的原子动力学。独特实验设计使我们能够直接观察原子级的离子迁移过程，揭示了此前未曾报道的机制。研究表明，界面处存在额外的活性位点，这些位点有助于更多钾离子和电子的容纳。在钾离子提取后发生了恢复，并在界面处出现意外的手性变化。将人工智能技术整合至原位原子分辨率透射电子显微镜实验中，展现出卓越的研究潜力。这一整合不仅为界面动力学相关的基础材料科学问题提供了新的探索视角，也为实验数据与理论模拟之间的协同分析开辟了创新路径。



关键词原位；STEM；深度学习；球差电镜；界面

报告人简介：

北京理工大学医学技术学院副教授。中国微米纳米技术学会微纳机器人分会理事，中国电镜学会常务理事专家工作组成员，MRL杂志青年编委。长期从事先进电子显微学、微纳操作系统、微纳器件失效机制等领域的研究。

离子输运动力学的原位电镜研究

杨振中*、屈可、段纯刚

华东师范大学

杨振中，华东师范大学研究员、紫江青年学者，博士生导师，上海市海外引进高层次人才。长期从事原子尺度下离子输运与物性调控研究，在新材料设计和新物性探索方面取得系列成果。共发表SCI论文130余篇，其中影响因子>10的文章70余篇，他引12000余次，H因子为61。以第一/通讯作者（含共同）在Nat.Comm., Sci.Adv.等期刊上发表论文20余篇。

离子调控是产生新物态和新物性的一种重要手段。氧化物中离子的迁移类似于神经突触中神经递质的扩散过程，是用于模拟神经形态器件的理想选择。虽然传统离子液体已能实现对氧化物忆阻器的可逆阻变调控，但该手段的可控性及离子作用下的阻变微观机制仍不清楚。结合多维度高分辨解析技术，可以在原子尺度探究离子输运动力学及忆阻材料结构物性演化微观规律，这对于从原理出发设计并实现低功耗、高能效的神经形态器件具有重要意义。本报告通过本征离子（ O^{2-} ）内部迁移及外来功能离子（ H^+ 、 Li^+ 等）可控嵌入对氧化物中的离子迁移动力学及结构物性演变展开多维度高分辨解析。旨在从晶格层面掌握决定氧化物忆阻器可靠性和疲劳寿命的关键结构因素，实现器件性能优化和高效设计。

关键词离子调控；原位电镜；功能氧化物

硫化物全固态锂电池界面研究

唐永福^{1, 2*}, 黄建宇¹

¹亚稳材料全国重点实验室, 清洁纳米能源中心, 燕山大学, 秦皇岛, 066004

²亚稳材料全国重点实验室, 环境与化学工程学院, 燕山大学, 秦皇岛, 066004

*Email: tangyongfu@ysu.edu.cn

近年来, 随着电动汽车及无人机等移动设备对电池能量密度要求越来越高, 目前广泛应用的液态电解质锂离子电池面临着越来越严峻的安全风险。相比而言, 全固态锂电池可有效避免液态电解液易燃易爆的安全风险。同时, 固态电解质对锂枝晶的抑制作用使得金属锂负极的应用成为可能, 极大提升电池的能量密度。相比其他全固态锂电池, 基于硫化物电解质的全固态锂电池由于电解质的高离子电导率和良好加工性能, 成为最具产业化应用前景的全固态锂电池。然而, 全固态锂电池依然面临制造成本高、技术路线不明晰及界面力-电-热-化学不稳定等问题, 影响了全固态锂电池的产业化应用。因此, 揭示硫化物全固态电池正负极界面失效机制及提出界面稳定化策略对于其产业化应用具有重要意义。

为此, 我们构建了力-电-热-化学多场耦合的原位电镜及冷冻制样-转移-表征一体化冷冻电镜平台^[1-4], 一方面, 原位测试了In、Al、Si等合金负极的充放电机理及失效特性, 提出了合金负极性能优化策略^[5-7]。同时采用冷冻电镜及原位扫描电镜技术研究了金属锂与硫化物电解质界面的化学、电化学及热失效机制^[2, 8], 为高性能硫化物全固态锂电池的应用提供理论参考。

关键词: 全固态锂电池; 原位电镜; 冷冻电镜; 硫化物电解质

参考文献

- [1] L. Zhang[#], T. Yang[#], Y. Tang^{*}, S. Zhang^{*}, T. Zhu^{*}, J. Huang^{*}, et al. *Nat. Nanotech.* **2020**, 15, 94-98.
- [2] J. Zhao[#], Chao Zhao[#], Y. Tang^{*}, L. Zhang^{*}, F. Ding^{*}, J. Huang^{*}, *Nano Lett.* **2022**, 22, 411-418.
- [3] B. Guo[#], Z. Wang[#], J. Chen[#], L. Zhang^{*}, Y. Tang^{*}, J. Huang^{*}, et al. *ACS Nano* **2022**, 16, 17414-17423.
- [4] J. Yan[#], D. Zhu[#], H. Ye[#], J. Huang^{*}, Y. Tang^{*}, et al. *ACS Energy Lett.* **2022**, 7, 3855-3863.
- [5] Z. Wang[#], J. Zhao[#], Y. Tang^{*}, L. Zhu^{*}, L. Zhang^{*}, et al. *eScience* **2022**, 2, 100087.
- [6] M. Li[#], D. Xue[#], Z. Rong[#], Y. Tang^{*}, S. Zhang^{*}, J. Huang^{*}, et al. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, 34, 2415696.
- [7] L. Zhang[#], X. Zhang[#], Yongfu Tang^{*}, Jianyu Huang^{*}, et al. *ACS Energy Lett.* **2025**, 10, 898-906.
- [8] Jitong Yan[#], Jingming Yao[#], Jun Zhao[#], Jianyu Huang^{*}, Yongfu Tang^{*}, *Adv. Funct. Mater.* **2025**, 35, 2421918.

报告人/墙报展示人简介:

燕山大学教授，博士生导师，国家高层次青年人才。近年来，主持国家自然科学基金、教育部霍英东基金会、河北省杰青等科研项目20余项，获得河北省自然科学奖、河北省“青年拔尖人才”、河北省“三三三”人才等荣誉；以第一/通讯作者在Nat. Nanotechnol., Angew. Chem. Int. Ed., Adv. Mater., Energy Environ. Sci.等高水平期刊发表论文120余篇；论文他引6000余次，h因子为44；申请国家发明专利20余项，已授权10余项。



敏感二维量子材料与有机材料的无损结构表征与构效关系研究

王刚¹, 林君浩^{1, 2, *}

¹南方科技大学物理系, 深圳, 518055

²粤港澳大湾区量子科学中心, 深圳, 518045

*linjh@sustech.edu.cn

摘要正文: 由于二维材料的极限厚度, 大部分新型二维材料, 如铁电性, 铁磁性或超导性单层材料在大气环境下会迅速劣化, 不耐高能电子束辐照, 无法表征其缺陷的精细结构。本报告将介绍我们课题组在克服二维材料水氧敏感性方面的一些设备创新尝试, 我们搭建了一套大型氛围控制互联系统。该系统实现了水氧敏感二维材料从生长、转移、高精度结构解析到器件制备与测量的全流程惰性氛围保护。我们利用该系统在直接观测二维敏感单层材料晶格原子结构与缺陷方面取得了一些初步成果, 例如少层卤族铁磁反铁磁材料的直接CVD制备与无损表征。此外, 通过引入低温冷冻电镜技术, 我们在解决水氧敏感性的基础上, 进一步克服了材料不耐电子辐照的瓶颈。利用超低剂量冷冻透射成像, 揭示了二维全有机钙钛矿中的有机官能团结构; 基于相位衬度分析, 揭示了二维量子材料1T-TaS₂的三维电荷密度波堆叠构型。

关键词: 二维材料; 水氧敏感; 互联转移; 低剂量冷冻电镜

参考文献

- [1] S. L. Jiang[†], G. Wang[†], H. B. Deng[†], General Synthesis of 2D Magnetic Transition Metal Dihalides via Trihalide Reduction, *ACS Nano*, **2023**, *17*, 363.
- [2] H. Choi[†], J. Lin[†], G. Wang[†], Molecularly thin, two-dimensional all-organic perovskites, *Science*, **2024**, *384*, 60.
- [3] G. Wang, X. Yu, E. Zhao, Atomic visualization of the 3D charge density wave stacking in 1T-TaS₂ by cryogenic transmission electron microscopy, *Nano Letters*, **2023**, *23*, 4318.

Intrinsic structural characterization and structure-property relationships of sensitive 2D quantum materials and organic materials

Gang Wang¹, Junhao Lin^{1,2,*}

¹ Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

² Quantum Science Center of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Shenzhen 518045, China

*linjh@sustech.edu.cn

The extreme thinness of two-dimensional (2D) materials confers unique properties (e.g., ferroelectricity, ferromagnetism, superconductivity), but also renders them highly susceptible to degradation in ambient air and intolerant to high-energy electron beams. This significantly hinders the characterization of their defect fine structures. This report presents our group's innovative approach to overcome the air/moisture sensitivity of 2D materials: the development of a large-scale interconnected atmosphere control system. This system provides end-to-end inert atmosphere protection for air-sensitive 2D materials throughout their entire experimental lifecycle – from growth and transfer, through high-precision structural analysis, to device fabrication and measurement. Using this system, we achieved direct, non-destructive characterization of atomic lattice structures and defects in sensitive 2D monolayers, as demonstrated by the direct CVD synthesis and characterization of few-layer halide-based ferro-/antiferromagnetic materials. Furthermore, by integrating cryogenic transmission electron microscopy (cryo-TEM), we simultaneously addressed the electron irradiation sensitivity alongside air sensitivity. Ultralow-dose cryo-TEM imaging resolved the organic functional group structure in a 2D all-organic perovskite, while phase-contrast analysis elucidated the three-dimensional (3D) charge density wave (CDW) stacking configuration in the 2D quantum material 1T-TaS₂.

Key Words: Two-dimensional materials; Air sensitivity; Interconnected systems; Low-dose cryo-TEM

References

- [1] S. L. Jiang[†], G. Wang[†], H. B. Deng[†], General Synthesis of 2D Magnetic Transition Metal Dihalides via Trihalide Reduction, *ACS Nano*, **2023**, *17*, 363.
- [2] H. Choi[†], J. Lin[†], G. Wang[†], Molecularly thin, two-dimensional all-organic perovskites, *Science*, **2024**, *384*, 60.
- [3] G. Wang, X. Yu, E. Zhao, Atomic visualization of the 3D charge density wave stacking in 1T-TaS₂ by cryogenic transmission electron microscopy, *Nano Letters*, **2023**, *23*, 4318.

报告人/墙报展示人简介:

林君浩，南方科技大学物理系副系主任，教授。博士毕业于美国范德比尔特大学（Vanderbilt University）物理系，后赴日本任JSPS特聘研究员，2018年加入南方科技大学物理系任准聘副教授，2024年5月晋升为长聘正教授。主要研究兴趣为透射电子显微学新技术与新方法的发展，以及新型低维量子材料的微观量子物态的精确测量及缺陷对宏观量子物性的影响。近5年来，在Nature，Science等高影响期刊发表150余篇文章，总引用次数超过15000多次，H因子54。入选《麻省理工科技评论》“35岁以下科技创新35人”2021中国区榜单，2022年获广东省青年五四奖章提名奖，2024年入选爱思唯尔中国高被引学者（物理）。



钙钛矿分解机理及表界面研究

陈树林^{1*}

¹湖南大学半导体学院（集成电路学院），湖南长沙，410000

*Email: chenslin@hnu.edu.cn

摘要正文：

卤化物钙钛矿因其优异的光电性能受到广泛关注，入选工信部和国资委评出的首批前沿材料之一。钙钛矿材料的光电性质和稳定性与其原子结构、缺陷和表界面息息相关。我们通过发展低剂量成像，克服卤化物钙钛矿电子束敏感性难题，在原子尺度揭示了卤化物钙钛矿的分解机理、探究了影响分解的主要因素，提出了抑制分解的有效策略。进一步聚焦于钙钛矿材料的表界面缺陷，揭示了反位缺陷、层错、晶界处的结构畸变和晶格应变、并阐明了缺陷对光电性能和稳定性的影响机制。此外，借助原位透射电镜技术，在原子尺度揭示了钙钛矿材料本体、表面、异质界面处的离子迁移行为以及由此诱发的结构相变和分解机理。这些研究为设计稳定高效的钙钛矿光电子器件奠定理论基础。

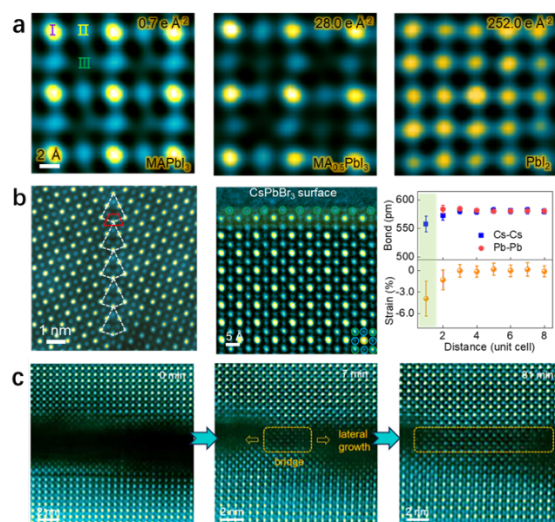


Fig. 1 Study on the decomposition mechanism and surface, interface of halide perovskites

关键词：低剂量成像；原位电镜；表界面；钙钛矿

参考文献

- [1] Yaonan Xiong, Chao Ma*, Shulin Chen*, et al. Atomic-scale insights into flexoelectricity and the enhanced photovoltaic effect at the grain boundary in halide perovskites, *Nano Lett.*, **2025**, **25**, 9734-9740.
- [2] Jiawei Chen[#], Shulin Chen[#], Dongxin Ma*, et al. Molecule-induced ripening control in perovskite quantum dots for efficient and stable light-emitting diodes, *Sci. Adv.*, **2025**, **11**, eads7159.
- [3] Shulin Chen^{*,#}, Yu-Ning Wu[#], et al. Atomic-scale insights into surface instability in halide perovskites, *Nano Lett.*, **2024**, **24**, 15363-15370.
- [4] Shulin Chen[#], Osman Bakr*, et al. Atomic-scale polarization and strain at the surface of lead halide perovskite nanocrystals, *Nano Lett.*, **2023**, **23**, 6002-6009.
- [5] Shulin Chen, Peng Gao*, et al. Atomic- scale imaging of CH₃NH₃PbI₃ structure and its decomposition pathway, *Nat. Commun.*, **2021**, **12**, 5516.

报告人/墙报展示人简介:

陈树林，湖南大学副教授、博士生导师、湖南省优青。2015年本科毕业于哈尔滨工业大学，2020年博士毕业于哈尔滨工业大学和北京大学、2021-2023年分别于北京大学、阿普杜拉国王科技大学从事博士后研究。曾荣获第五届中国硅酸盐学会优秀博士毕业论文提名奖、中国真空学会优秀博士学位论文。目前从事低剂量成像技术研究，以及其在光电器件纳米尺度工作机理和失效机制中的应用。主持国自然青年、湖南省优秀青年项目各1项，作为子课题负责人承担国家重点研发计划青年科学家项目。在Science、Nat. Commun.、Sci. Adv.等期刊发表论文110余篇，引用8200余次，H-index为48。



层状材料铁电机理与极化操控研究

郑强¹

¹国家纳米科学中心，北京市海淀区中关村北一条11号，100190

*Email: zhengq@nanoctr.cn

摘要正文：

近年来，范德华层状材料中陆续发现铁电性，为开发高密度、低功耗存算一体芯片提供了关键候选材料。然而，目前对二维铁电性的起源、极化机制以及外场调控下的铁电极化翻转动力学过程尚缺乏深入和清晰的理解，严重限制了范德华铁电材料的性能调控和应用。

本研究利用球差校正扫描透射电子显微学方法，深入研究了InSe的自发极化机理；结合原位电学操控手段，对不同电场下InSe的原子尺度结构进行了精准定量表征与分析，确定了范德华层内滑移是InSe二维铁电性产生的根本原因，并阐明了层内滑移方向变化诱导极化翻转的微观机制。本研究揭示了范德华层内滑移导致的铁电极化是二维铁电性的另一种重要起源，与其他范德华层状材料中层间滑移导致的铁电机理存在显著差异。这一发现对于深入理解二维铁电机理、极化翻转动力学的实空间可视化表征以及二维铁电性调控具有指导意义。

关键词：层状材料；极化操控；原位电镜

参考文献

- [1] H. Gao, et.al., Picometer-Level In Situ Manipulation of Ferroelectric Polarization in Van der Waals layered InSe, *Advanced Materials*, **2024**, **36**, 2404628.
- [2] J. Liao, et al., Van der Waals Ferroelectric Semiconductor Field Effect Transistor for In-Memory Computing, *ACS Nano*, **2023**, **17**, 6095.

报告人/墙报展示人简介:

郑强，研究员，博士生导师，中心学术委员会委员。2006年毕业于南京大学，获学士学位，2012年毕业于中国科学院上海硅酸盐研究所，获博士学位。2013年至2020年先后在德国马普固体化学物理所和美国橡树岭国家实验室从事博士后研究。2020年加入国家纳米科学中心，任课题组长。长期致力于定量球差校正电镜技术开发以及功能晶体材料和陶瓷材料原子尺度构效关系研究。先后主持国家自然科学基金面上项目（2项）和北京市面上项目，作为骨干参与科技部重点研发计划项目、中国科学院稳定支持青年团队等项目。目前担任中国硅酸盐学会微纳技术分会理事、中国电子显微镜学会物理与材料科学专业委员会委员以及青年学者专家委员会委员、中国晶体学会陶瓷专业委员会委员。在Nature Nanotechnology (1)、Science Advances (1)、Nature Communications (4)、Physical Review Letters (2)、Advanced Materials/Advanced Functional Materials (14)、Nano Letters /ACS Nano (10)等期刊发表论文80余篇。



多孔材料局域结构及主客体相互作用原子尺度结构研究

陈晓^{1,*}, 魏飞¹

¹清华大学, 北京, 100084

*Email: chenx123@tsinghua.edu.cn

摘要正文：中文，五号宋体，单倍行距。英文字符用五号，Times New Roman字体。

多孔材料由于其特殊的孔道结构成为了催化、分离、医药等多个领域不可替代的原材料，分子筛作为典型的多孔材料在石油化工、煤化工裂解、异构化、芳构化及烷基化等反应中同样发挥着不可替代的作用。因此从分子层面甚至是原子层面理解和探索这些化学反应过程中的分子进出机制以及客体分子与主体骨架间的作用行为对于理解和认识这些工业化背后的微观行为尤为关键，尤其是工况服役状态下的催化剂的本征行为至关重要。该报告将以分子筛催化剂为研究对象，尤其是对工业化中应用最为广泛的ZSM-5进行了系统的研究。首先研究了在超低电子剂量的条件下研究分子筛亚纳米尺度局域结构解析和原位观察限域分子动态行为的方法，在常温甚至是高温的条件下“冷冻”分子，观测了单分子进出孔道的行为，研究限域小分子动态行为和主客体相互作用以及这类折形分子筛中单个芳烃分子的转动行为、加入氢键力作用后定量化了分子在孔道中的作用方式，在原位观测分子进出孔道的基础上解决了60年来困扰科研人员分子筛筛分比孔道稍大点的分子的微观机制。在不断对分子筛有深入理解的过程中希望能够为十万亿产值的工业化过程提供新的见解。关键词：2—5个关键词，五号宋体。

参考文献

[1] Boyuan Shen, Xiao Chen*, Fei Wei*, et al. A Single Molecule van der Waals Compass. *Nature*.

592, 541, 2021.

[2] Hao Xiong ,Xiao Chen*, Fei Wei*, et al. In situ imaging of the sorption-induced sub-cell topologic

flexibility of a rigid zeolite framework. *Science*. 376(6592):491-496.2022.

报告人/墙报展示人简介:

陈晓，清华大学化工系副研究员，其研究方向主要是发展多孔材料低剂量原子尺度成像方法，致力于分子筛中单分子成像以及主客体相互作用的直接观测，以期从分子层面甚至是原子层面理解和探索这些化学反应过程中的分子进出机制以及客体分子与主体骨架间的作用行为。目前已发表文章60余篇，其中（共同）第一作者/通讯作者12篇，包括 Nature（3篇）、Science（1篇）、Nat. Commun.（4篇）等。其中“A single molecule van der waals compass”（Nature. 592, 541(2021)）的工作入选 2021 年度“中国高等学校十大科技进展”，获得第三届中国分子筛新秀奖、2022 年度中国化学会青年化学奖，入选2022年度中国区“35岁以下科技创新35人”榜单，承担基金委优秀青年科学基金项目、面上项目、青年基金项目、科技部重点研究子课题等项目。



Topological antiskyrmion dynamics and lattice modulation

Licong Peng (彭丽聪)*, Yanglong Hou

北京大学材料科学与工程学院, 北京, 100871

*Email: peng@pku.edu.cn

摘要正文:

Topological antiskyrmions, stabilized by anisotropic Dzyaloshinskii – Moriya interactions in noncentrosymmetric magnetic crystals, exhibit unique spin configurations and dynamical behaviors that distinguish them from conventional skyrmions. Their quadrupolar spin textures, layered Bloch-point structures, and anisotropic responses to external stimuli offer a rich platform for exploring nontrivial topological phenomena in real space.

In this report, I will first introduce the manipulation of individual antiskyrmions in S_4 -symmetric noncentrosymmetric magnets under nanosecond pulsed currents at room temperature. We demonstrate high-mobility, directional motion guided by magnetic stripe domains, with velocities enhanced when current is applied perpendicular to the stripe orientation. I will then present micromagnetic simulation results showing that the coordinated dynamics of quadrupolar Bloch points in 3D antiskyrmions drive a reversible transition between square and triangular lattice phases. This transition is governed by a competition between surface repulsion and interlayer attraction, enabling tunable lattice modulation. Our findings provide direct insights into the dynamic topology and lattice reconstruction of 3D magnetic solitons.

关键词: Magnetic skyrmion, L-TEM

参考文献

- [1] L. C. Peng* et al. Nat. Nanotech. 15, 181-186 (2020)
- [2] K. Karube#, L.C. Peng# et al., Nat. Mater. 20, 335–340(2021)
- [3] Y. Guang, L.C. Peng et al. Nat. Commun. 15:7701 (2024)
- [4] L. C. Peng* et al. Nano Today 62, 102698 (2025).
- [5] S.R. Lu, Y.L. Hou*, L. C. Peng* et al. under review (2025)

金属材料强韧化的界面调控

郑士建*

河北工业大学，天津市北辰区西平道5340号，300401

*Email: Email: sjzheng@hebut.edu.cn

摘要正文：

纳米晶金属材料强度高，但热稳定性差，同时面临大规模制备的难题。通过界面调控作用制备纳米多层复合金属材料是同时实现提高材料综合性能和大规模制备的重要途径。本研究首先通过叠轧制法制备了单层10纳米的块体多层Cu-Nb复合板材。高分辨透射电子显微学研究发现，在经过如此大的塑性变形后绝大多数Cu-Nb界面形成了具有确定取向关系、原子级规则有序的稳定界面。本研究还将设计了具有原子尺度特征的界面非晶，并揭示了界面非晶对纳米层状金属材料强塑性提升的调控机制。

针对层状金属材料各向异性强、塑性不足的问题，提出三维界面提升材料强塑性的研究思路，设计制备了TiZr基纳米尺度晶体-非晶三维双联通结构，获得屈服强度1.80 GPa、抗拉强度2.30 GPa、均匀延伸率7.0%的晶体-非晶复合材料，实现了钛基非晶复合材料强塑性的突破，为开发高强塑性金属材料提供了理论模型。

在模型材料研究基础上，我们研究了工程合金近使役条件下的材料塑性变形行为，阐明了全片层Ti-6Al-4V合金原子尺度 α/β 界面对其高损伤容限的贡献。研究表明 α/β 界面具有特定的取向关系以及原子尺度半共格特征，其既可以诱发位错形核，又可以阻碍部分位错滑移，产生应力集中，诱发孪晶变形；同时， β 相既在一定程度上阻碍孪晶扩展，提高材料强度，又允许孪晶通过，提高材料应变，从而全片层Ti-6Al-4V合金具有高损伤容限。

Interface Engineering for Strengthening-Toughening Metallic Materials

Shijian Zheng*

School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401

*Email: Email: sjzheng@hebut.edu.cn

Abstract:

Nanocrystalline metallic materials exhibit high strength but poor thermal stability, along with challenges in large-scale fabrication. Interface engineering of nano-laminated composite metals provides a critical pathway to simultaneously enhance comprehensive properties and achieve scalable production. In this study, bulk multilayered Cu-Nb sheets with individual layer thickness of 10 nm were fabricated via accumulative roll bonding. High-resolution transmission electron microscopy revealed that most Cu-Nb interfaces developed atomically ordered and crystallographically stable configurations after severe plastic deformation. Furthermore, amorphous interlayers with atomic-scale features were designed, elucidating their regulatory mechanism in strengthening-ductility synergy of nanolaminated metals.

To address the strong anisotropy and limited ductility of laminated metals, a 3D interfacial architecture was proposed to enhance strength-ductility combinations. A TiZr-based nanoscale crystalline-amorphous dual-network structure was fabricated, achieving a yield strength of 1.80 GPa, tensile strength of 2.30 GPa, and uniform elongation of 7.0%. This breakthrough in Ti-based amorphous composites establishes a theoretical model for developing high-performance metallic materials.

Building on model materials, we investigated the plastic deformation behavior of engineering alloys under near-service conditions. The damage tolerance of fully lamellar Ti-6Al-4V alloys was attributed to atomic-scale α/β interfaces with specific orientation relationships and semi-coherent characteristics. These interfaces simultaneously nucleate dislocations and impede their glide, inducing stress concentration and twin formation. The β phase restricts twin propagation (enhancing strength) while permitting twin transmission (improving strain), collectively contributing to superior damage tolerance.

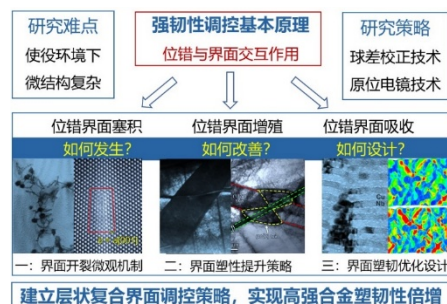


Fig. 1 Research methodology on dislocation-interface interactions

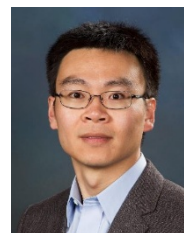
关键词: 界面; 位错; 孪晶; 强韧化

参考文献

- [1] Kaisheng Ming; et al, Enhancing strength and ductility via crystalline-amorphous nanoarchitectures in TiZr-based alloys, Science Advances, 2022, 8: eabm2884
- [2] Hualong Ge; et al, A new refractory Ni₇Nb₂ phase identified in Laves eutectic regions by TEM study, Acta Materialia, 2021, 214: 116985
- [3] Xiaodong Zheng; et al, {10-12} twinning induced by the interaction between {11-21} twin and β phase in $\alpha+\beta$ Ti alloys, Acta Materialia, 2022, 231: 117900
- [4] Hualong Ge; et al, Dislocation climbing dominated decomposition and fracture of carbides in a Ni-based superalloy, Acta Materialia, 2023, 246: 118669
- [5] Huhu Su; et al, Atomic-resolution studies on reactions of slip dislocations with {10-11} twin boundaries and local plastic relaxation in a Mg alloy, Acta Materialia, 2024, 277: 120210

报告人简介：

郑士建，河北工业大学材料科学与工程学院院长，教育部重点实验室主任，河北工业大学先进材料测试与分析中心主任，入选中科院“百人计划”、中组部“海外引进高层次人才”青年项目、燕赵科学家，并获河北省政府特殊津贴、天津市创新类领军人才等荣誉。面向国家重大装备对关键结构材料的需求，长期从事金属材料层状复合及强韧化研究。开发了2.0GPa级高强韧层状复合钢和1.5GPa级高强韧钛合金棒材。发表Nature、Nat. Commun.、Acta Mater.等高水平论文170余篇。



任J. Mater. Sci. Technol.和金属学报等高水平期刊青年编委。主持国家自然科学基金联合基金重点项目、面上项目、青年基金。任中国电子显微镜学会理事；中国电子显微镜学会原位电子显微学方法专业委员会副主任等学术兼职。

先进超快电子显微镜研制及应用

付学文¹

¹南开大学物理科学学院，南开大学超快电子显微镜实验室，天津市卫津南路94号，300071

*Email: xwfu@nankai.edu.cn

摘要正文： 4D超快电子显微镜由于可以在超高的时间和空间尺度直接观察物质的形貌变化、结构相变、载流子传输、磁结构演变等超快动力学过程，成为物理、化学、材料和生物等多学科研究领域重要的动力学研究手段之一[1,2]。本报告首先简单介绍4D超快电子显微镜技术的发展历程和当前研究现状，随后将重点介绍近年来我们在先进4D超快电子显微镜技术开发及其在低维功能材料非平衡态动力学研究方面取得的最新进展，包括：1) 针对磁涡旋、斯格明子等微观纳米拓扑磁结构动力学可视化测量的难题，发展了超快洛伦兹电子显微镜，实现了对拓扑磁结构的飞秒激光原位超快调控及动力学过程的可视化测量，揭示了飞秒激光对室温二维磁性材料中拓扑磁结构的可控擦写及内在物理机制[3]；2) 针对半导体中光生载流子动力学高时空分辨可视化测量的难题，开发了国际首套超快扫描电子显微镜与超快阴极荧光多模态载流子动力学探测系统，实现了对半导体载流子动力学在时间、空间和能量维度的跨尺度成像测量[4,5]。最后，本报告将对4D超快电子显微镜技术的未来发展和应用进行简单展望。

关键词： 超快透射电子显微镜，超快扫描电子显微镜，超快阴极荧光，拓扑磁结构动力学，光生电荷动力学。

参考文献

- [1] A. H. Zewail, *Science* **2010**, **328**, 187-193.
- [2] X. Fu et al., *Science* **2017**, **355**, 494-498.
- [3] Z. Li et al., *Nature Communications* **2024**, **15** (1), 1017.
- [4] Y. Zhang et al., *Advanced Science* **2024**, 202400633.
- [5] X. Chen et al. *Advanced Functional Materials* **2023**, 2306128.

报告人简介：

付学文，南开大学物理科学学院教授，博导，凝聚态与材料物理系主任，南开大学超快电子显微镜实验室负责人，入选国家四青、天津市杰青、南开大学百青等人才计划，担任国家重点研发计划青年首席科学家。从事超高时空分辨电子显微成像与探测技术开发及其在功能材料微观动力学中的应用研究。通过自主研发建立了国际上首个同时具备超快透射电镜、超快扫描电镜和超快阴极荧光的超高时空分辨物质动力学研究平台，发展了原位液相超快电镜、全射频超快电镜、超快扫描电镜与超快阴极荧光多模态系统等多项先进的原创超快电子显微镜技术。在Science、Nature、Science Advances、Nature Communications、PNAS、Advanced Materials、ACS Nano、Advanced Functional Materials、Nano Letters等期刊发表论文70余篇，申请发明专利11项（获授权6项）。入选2021年强国青年科学家提名，获天津市知识产权创新创业发明与设计大赛一等奖和二等奖等荣誉。主持基金委国家重大科研仪器研制项目、重大研究计划培育和面上项目，科技部重点研发计划青年项目，天津市杰出青年基金和重点项目等科研项目。



功能材料中轻元素的原子尺度定量成像

陈震^{1, 2, *}

¹北京凝聚态物理国家研究中心, 中国科学院物理研究所, 北京, 100190

²中国科学院大学, 物理科学学院, 北京, 100049

*Email: zhen.chen@iphy.ac.cn

摘要正文:

透射电子显微学技术是研究材料原子结构的主要手段之一, 但是对于轻元素例如氧元素的探测, 受限于其对高能电子弱的散射能力, 常规方法无法实现精确解析和定量测量。在该报告中, 我将展示我们近年来开发的基于四维扫描透射电子显微术(4D-STEM)的电子叠层成像技术, 并展示其在超高分辨率、轻元素原子分辨图像和三维结构解析方面的巨大优势[1]。我将介绍我们在镍基高温超导材料中氧缺陷结构[2]以及金属氢化物中原子尺度氢分布的原子尺度成像和定量的研究。这些轻元素原子结构的定量研究, 能够更深入地理解功能材料性能的微观起源, 促进新材料的研发。我将展望这种定量高分辨率成像技术在不同材料体系中的应用结果。

关键词: 功能材料; 轻元素原子结构; 电子叠层成像; 超导材料; 金属氢化物

参考文献

- 1 Z. Chen, *et al.*, Electron ptychography achieves atomic-resolution limits set by lattice vibrations, *Science*, **2021**, **372**, 826-831.
- 2 Z. Dong, *et al.*, Visualization of oxygen vacancies and self-doped ligand holes in $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7-\delta}$. *Nature*, **2024**, **630**, 847-852.

报告人/墙报展示人简介:

陈震为中国科学院物理研究所特聘研究员，博士生导师。现任中国材料研究学会材料分析表征分会理事。2014年于中国科学院物理研究所获理学博士学位，之后于澳大利亚莫纳什大学和美国康奈尔大学做博士后，后任清华大学材料学院副研究员。相关研究工作两次刷新图像分辨率吉尼斯世界纪录，并入选两院院士评选的2021年世界十大科技进展新闻之一。入选MIT Technology Review中国35位35岁以下创新人物(Innovators under 35 China)。代表性工作发表在Science、Nature及其子刊，主持和参与国家自然科学基金委和科技部等多项重大项目。



纳米催化剂的表界面动态演化

袁文涛*, 王勇*

浙江大学材料科学与工程学院, 电子显微镜中心, 杭州, 310027

*Email: wentao_yuan@zju.edu.cn, yongwang@zju.edu.cn

摘要正文:

纳米催化剂广泛应用在能源、环境及化工等领域。在这些实际应用场景中, 纳米催化剂的活性、选择性和稳定性与其微观结构密切相关。特别是作为与外界环境直接相互作用的基本单元, 纳米催化材料的表面和界面在实际反应条件下会与外场环境发生复杂的相互作用, 导致催化性能改变。因此, 在原子层面精确解析催化剂的表界面构型、阐明纳米催化剂表界面发生的微观物理化学过程, 对于催化剂的理性设计具有重要指导意义。然而长期以来相关研究面临着双重挑战: 一方面负载型纳米催化剂的表界面结构本身十分复杂; 另一方面在外场(如温度、气氛、压力等)作用下表界面会发生复杂的结构演变。在此背景下, 发展能够在反应条件下获取纳米催化剂表界面原子水平动态表征方法, 在反应条件下获取纳米催化剂表界面动态演变规律信息, 成为了揭示催化反应微观机制的关键突破口。近年来, 环境透射电子显微镜技术的迅速发展, 为研究者跨越催化研究中长期存在的“材料鸿沟”和“压力鸿沟”提供了重要方法支撑, 为理解催化过程提供了新的视角。本报告主要介绍: 我们团队近年来利用环境电子显微学方法, 在氧化物及氧化物负载型催化材料体系动态演变研究方面取得的进展。

关键词: 氧化物表面; 表面重构; 表界面动态演变; 原位电子显微学; 催化材料

参考文献

- [1] C. Zou⁺, W. Liu⁺, S. Chen, Y. Xu, Y. Tang, S. Li, F. Yang, L. Yu, C. Zeng, Y.-Y. Zhang, X. Hu, L. Wang, Z.-K. Han*, Y. Jiang, W. Yuan*, H. Yang, Y. Wang*. Two Distinct Oxidation Dispersion Mechanisms in Pd-CeO₂ Mediated by Thermodynamic and Kinetic Behaviors of Highly Dispersed Pd Species. **Phys Rev Lett.**, **2025**, 134: 218001.
- [2] K. Zhang⁺, G. Li⁺, C. Zou, S. Chen, S. Li, Z.-K. Han*, Y. Jiang, W. Yuan*, H. Yang, M. V. Ganduglia- Pirovano, Y. Wang*, A CeO₂(100) surface reconstruction unveiled by in situ STEM and particle swarm optimization techniques, **Sci. Adv.**, **2024**, 10: eadn7904.
- [2] G. Li⁺, X. Hu⁺, C. Zou, S. Li, Z.-K. Han*, W. Yuan*, Z. Zhang, Y. Wang*, Periodic one-dimensional subsurface channels induced by ordered oxygen vacancies on CeO₂ (110). **Nat. Commun.** **2025**, 16, 5661.
- [2] C. Li⁺, X. Guo⁺, Y. Jiang, Z.-K. Han, W. Yuan, H. Yang, Y. Wang, In situ revealing the dehydration and atomic structure evolution of protonated titanate nanotubes via environmental transmission electron microscopy, **Nano Today**, **2024**, 59: 102503.
- [2] G. Li⁺, C. Zou⁺, F. Wang, Z.-K. Han*, W. Yuan*, H. Yang, Y. Wang, Atomic-precision manipulation of defects in RuO₂ nanocrystals via electron-beam, **Adv. Funct. Mater.** **2024**, 24: 10524.
- [3] K. Wei⁺, Y. Ren⁺, Y. Zhao, F. Liu, X. Chen, Y. Wang, S. Zou*, C. Liu, Y. Pan, J. Huang, W. Yuan*, Z.-K. Han*, Y. Wang*, J. Fan*. Visualizing the substrate-dependent structural evolution of Na₂WO₄ via in-situ transmission electron microscopy, **Nano Today**, **2025**, 102751.

报告人简介:

袁文涛, 浙江大学材料学院研究员、国家优青、浙江省杰青。2017年在浙江大学博士毕业,

2021年加入浙江大学张泽院士/王勇教授研究团队。 研究兴趣集中在气氛环境下的催化材料的显微结构与性能的原位动态研究。研究兴趣集中在气氛环境下的催化材料的显微结构与性能研究。致力于通过环境透射电镜、大气压气体样品杆等先进原位电子显微学手段，在原子尺度下探索纳米催化剂表界面结构对外场环境的响应规律，揭示使役环境下催化剂表界面结构与性能的内在关联。在 *Science*, *Angew. Chem.*, *ACS Catal.*, *Nano Lett.* 等著名期刊发表SCI论文60余篇。担任重点研发青年科学家项目首席科学家，主持国自然面上、青年等项目；获得浙江省自然科学一等奖（2/5）、全国电子显微镜学会优秀青年学者奖、国际材料联合会“前沿材料青年科学家奖”等奖项。



原位变温电镜成像捕捉亚稳相

王立芬^{1,*}

¹中国科学院物理研究所，北京市中关村南三街八号，100190

*Email: wanglf@iphy.ac.cn

摘要正文：水作为宇宙中最常见的物质之一，拥有目前所有物质体系中最复杂的相图。虽然早在晶体学技术的发展初期就对水进行广泛研究，但水的相图及其相变微观动力学依然没有形成统一的理论。究其原因在于前期的宏观观察和微观研究中缺乏微观直接的成像研究手段，从而造成对微观结构及其演化机制的理解受限于经典理论推演的单相均一形成模型。因此目前的水领域研究中存在大量的微观模型和图像争议有待解决。在本报告中，报告人将汇报针对目前的研究现状，报告人在前期发展原位透射电镜成像技术的积累基础上，结合原位低温冷冻透射成像技术结合低剂量电镜成像技术，利用石墨烯为透明衬底，首次实验上采集到的气相冷凝结冰的实时原位实空间过程。并汇报通过统计采集冰的异质形核微观路径，发现了立方冰这一受到广泛关注、但缺乏直观实验数据的冰晶相。报告将详细汇报立方冰的异质形核微观机制及其与热力学稳定相六角冰的热力学竞争机制，并为通过调控异质形核生长微观动力学调控新相提供水研究方面的应用案例，为发展统一的相变理论提供水科学经验参量。

关键词：冰相；原位变温透射电镜；立方冰；异质形核

参考文献：

Huang, X.; Wang, L.; Liu, K.; Liao, L.; Sun, H.; Wang, J.; Tian, X.; Xu, Z.; Wang, W.; Liu, L.; Jiang, Y.; Chen, J.; Wang, E.; Bai, X., Tracking cubic ice at molecular resolution. *Nature* **2023**, 617 (7959), 86-91
Liao, L.; Yang, Q.; Cai, C.; Zhou, Y.; Sun, H.; Huang, X.; Chen, P.; Wang, J.; Li, X.; Tian, X.; Meng, S.; Bai, X.; Wang, L., The atomic configuration and metallic state of extrinsic defects in Nb-doped BiFeO₃ thin films. *Acta Materialia* **2024**, 273 () 119986.
Sun, H.; Yang, Q.; Wang, J.; Ding, M.; Cheng, M.; Liao, L.; Cai, C.; Chen, Z.; Huang, X.; Wang, Z.; Xu, Z.; Wang, W.; Liu, K.; Liu, L.; Bai, X.; Chen, J.; Meng, S.; Wang, L., Unveiling sulfur vacancy pairs as bright and stable color centers in monolayer WS₂. *Nature Communications* **2024**, 15 (1), 9476.

Tracking metastable by in-situ cryo-TEM

Lifen Wang^{1,*}

¹Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190

*Email: wanglf@iphy.ac.cn

Abstract Water, one of the most abundant substances in the universe, has the most complex phase diagram among known materials. Despite over a century of study, a unified understanding of its phase transitions and microscopic dynamics remains elusive, mainly due to the lack of direct imaging techniques capable of capturing structural evolution during phase change. Classical models often assume homogeneous, single-phase formation, which oversimplifies the multistep nature of real nucleation processes. To address this, we developed an in situ cryogenic transmission electron microscopy (cryo-TEM) method that combines low-dose imaging with graphene substrates, enabling real-time, real-space visualization of water vapor condensation and ice crystallization at the nanoscale. This technique allowed us to statistically analyze

heterogeneous nucleation pathways and, for the first time, directly observe the formation of cubic ice—a metastable phase long proposed but lacking firm experimental evidence. We identified its nucleation dynamics, structural evolution, and thermodynamic competition with the stable hexagonal phase. These observations offer new insight into the nonequilibrium nature of phase selection, revealing how kinetic factors determine which polymorph emerges during nucleation. Our findings validate theoretical predictions about cubic ice and show how direct imaging can uncover transient pathways not accessible by bulk measurements. By linking nanoscale dynamics to macroscopic phase behavior, this work presents a model system for controlling phase transitions through nucleation kinetics and provides an experimental basis for improving theoretical models of water's phase diagram. More broadly, our approach offers a general strategy for investigating complex phase transformations in other systems, contributing essential parameters and mechanistic understanding toward a unified theory of phase transitions in condensed matter.

报告人/墙报展示人简介:

王立芬，中国科学院物理研究所副研究员，博士生导师。2014年毕业于中国科学院物理研究所；2014-2018年任美国阿贡国家实验室博士后研究员；2018年入选物理所人才引进计划；2020年入选中国科学院青促会会员；担任Chinese Physics Letters、Chinese Physics B、Acta Physica Sinica、Physics期刊青年编委。主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金委优秀青年项目、国际地区联合项目等。围绕原位透射电镜微观表征方法开发和应用，已发表论文四十余篇，包括Nature（3篇），Nature Materials, Phys. Rev. Lett.（2篇），Angew. Chem. Int. Ed.（2篇）等。

