

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025

福建 厦门

D33-原子级制造与智能传感
D33-Atomic-level manufacturing and
Smart Sensing

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



D33. 原子级制造与智能传感

分会主席：潘曹峰、宋凤麒、刘开辉、杜世萱、武恩秀

联系人：吴慕鸿

报告

D33-01

二维材料光学晶体

刘开辉^{1*}

1. 北京大学

光学晶体（如 BBO、KBBF、LiNbO₃ 等）具备实现激光频率转换、参量放大、信号调制等关键功能，是激光技术和装备的核心。目前，基于传统体相光学晶体的物理理论和材料体系已臻于完善。二维材料具备超高非线性系数、外场易调的光学性质、兼容硅基芯片等优点，是新一代光学晶体的理想备选材料。然而，二维材料的光与物质相互作用距离短，导致其非线性转换效率极低，难以成为真正有用的光学晶体。本报告将介绍我们在二维材料光学晶体的材料生长设计、物理理论发展、光学器件构造的一些思考和进展。发展出的转角二维材料光学晶体有望成为新一代光学晶体体系，开辟激光技术应用新领域。

D33-02

新奇二维材料及异质结的原子制造及物性

王业亮^{1*}

1. 北京理工大学

石墨烯蜂窝状结构的新奇特性引发了人们研究其他二维层状材料的广泛兴趣，以探索其在纳米器件中的应用潜力。本次报告将重点介绍硅烯、锑烯、磁性 VSe₂、半导体 PtSe₂、超导过渡金属三硫化物 HfTe₃ 以及具有电荷密度波特性的 NbSe₂ 等多种二维材料的制备与物性研究，同时阐述这些材料在纳米电子学与能谷电子学中的量子特性。此外，还将展示基于异质结堆叠的超高密度信息存储技术、马约拉纳束缚态及其在量子计算中的应用。通过 X 射线光电子能谱（XPS）、低能电子衍射（LEED）、扫描隧道显微术/谱学（STM/STS）、原子力显微术（AFM）和扫描透射电子显微术（STEM）等先进表征技术，我们将从原子尺度揭示这些材料的精确结构构型。

References:

Nano Lett.13, 685 (2013); Nano Lett. 13, 4671 (2013); Adv. Mater. 26, 4820 (2014); Nano Lett. 15, 4013 (2015). Adv. Mater. 28, 5013 (2016); Adv. Mater. 29, 1605407 (2017); Nat. Mater. 16, 717 (2017); Nano Lett. 18, 2213 (2018); Science Bulletin 63, 419 (2018); Nano Lett. 19, 6323 (2019); Nat. Commun. 11, 659 (2020); Nat. Commun. 12, 1978 (2021); Nat. Commun. 12, 58 (2021); ACS Nano 15, 16589 (2021); InfoMat 4, e12274 (2022); ACS Nano 16, 1332 (2022); Nano Lett. 22, 1190 (2022); Nat. Commun. 13, 1843 (2022); Nat. Mater. 22, 450 (2022); ACS Nano 17, 2702 (2023); ACS Nano 17, 4387 (2023); Nano Lett. 24, 6560 (2024); Nano Lett. 24, 8843 (2024); Nano Lett. 24, 8208 (2024); ACS Nano 18, 11933 (2024); Nat. Commun. 15, 2336 (2024); ACS Nano acsnano.4c16830 (2025); Adv. Mater. adma.202417052 (2025).

D33-03

原子层材料及其电子器件的空间辐射效应研究

李沫^{1*}，张宇¹，汤苏涵¹，汤戈²，张健¹，郭红霞³，欧阳晓平³

1. 电子科技大学

2. 成都理工大学

3. 西北核技术研究院

随着商业航天与深空探测技术的迅猛发展,空间电子系统对高性能抗辐射器件的需求持续攀升,推动新型材料体系器件研发成为极端环境电子学的关键研究方向。石墨烯、碳管等低维材料通常因其本征高载流子迁移率、优异机械强度、高热导率等特性展现出巨大的潜力。然而,空间辐射环境中的高能粒子及高能光子等辐射因素可诱发晶格位移损伤与电离效应,在材料中引发晶格缺陷、陷阱电荷和载流子浓度变化等,从而显著劣化材料的电学、热学等性能。进一步地,在低维材料电子器件中,辐射诱导的界面陷阱电荷和栅介质层电荷陷阱等会影响器件阈值电压和开关特性等,严重制约器件可靠性。因此,深入研究低维材料及其电子器件的辐射损伤机理及其与器件性能的关联规律,具有重要的价值。本报告将介绍我们在石墨烯、CNT、MoS₂等低维材料及其电子器件的重离子及中子辐射效应损伤机理的研究进展,包括不同能量与注量的重离子/中子在低维材料中产生的缺陷性质的差异,以及器件电学和光学性能的变化规律。这些工作丰富了对低维材料与器件辐射效应的物理认识,建立了辐射损伤与电学性能的关联,为抗辐射低维电子器件的设计及其在空间中的应用提供了参考。

参考文献

- [1] Kanhaiya P, Yu A, Netzer R, et al. Carbon nanotubes for radiation-tolerant electronics. ACS Nano, 2021, 15(11), 17310-17318
- [2] 史明霞,王焕灵,陈飞良,等. 石墨烯及石墨烯场效应管的辐照效应研究进展. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(6):513-522, 534
- [3] Tang G, Pam M E, Zhang H, et al. Fast neutron irradiation induced effects on monolayer MoS₂. Applied Physics Express, 2019, 12(5), 056001
- [4] Zhang H, Lan M, Tang G, et al. Discrete color centers in two-dimensional hexagonal boron nitride induced by fast neutron irradiation. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(39):12211-12216

D33-04

论文题目 柔性触觉传感器与智能触觉

鲍容容^{1*}

1. 北京航空航天大学

触觉感知器件与芯片是机器人人工智能产业发展的先决条件。作为触觉感知的核心,应力应变传感器是近年来柔性电子等领域的研究热点。如何实现多种材料界面间的模量匹配与形变协同,防止多物理量传感过程中形变对其他信号的干扰,是传感器高灵敏、高稳定性、高集成性的关键问题。与此同时,传感器的应用领域和运行环境差异性大,如何针对不同需求设计传感器参数,使系统性能实现优化是传感器从实验室走向产业化的瓶颈问题之一。本报告从材料-器件-阵列系统全链条研究了新型触觉传感器制备、可拉伸触觉传感器阵列集成、以及智能触觉系统的设计,研究成果将为我国人工智能机器人等下一代智能灵巧器件的发展奠定基础。

D33-05

面向功能异质界面精准评测的超快光谱新技术

崔乾楠^{1*}

1. 东南大学

面向掩埋在微纳器件及芯片深处的隐藏界面,发展趋近原子水平超高分辨的无损检测及成像技术,对于推动原子级制造与精密光谱无损检测技术的协同深入发展有重要的科学意义和应用价值。虽然超快激光脉冲实现超高时间分辨成像的能力令人期待,但光波的本质限制了其空间分辨率和穿透力。超快激光脉冲与二维半导体薄膜的相互作用所发射出的纳米声波脉冲,兼具超短脉宽纳米波长和大穿透深度的物理优势,是一种综合性能优异的隐藏界面超高分辨成像工具。纳米声波脉冲在隐藏界面处形成的回波,不仅加载了

隐藏界面的结构与功能信息，而且可被超快激光脉冲所实时追踪探测，为实现微纳器件隐藏界面的无损检测及成像，开辟了一条走向超高时空分辨成像的新路径。报告人前期自主发展了纳米声波脉冲的全光发射与界面探测技术，并开展了许多探索性工作。本报告将重点分享我们近期在该研究领域的一些进展与思考，展望面向功能异质界面精准评测的超快光谱新技术如何助推原子级制造。

D33-06

面向原子级制造的金属富勒烯理论研究

杨涛^{1*}

1. 西安交通大学

金属富勒烯是指富勒烯内嵌或外接金属原子/离子/原子簇而形成一类原子团簇，具有确定的原子数目和化学结构。由于金属与富勒烯之间的协同作用，金属富勒烯具有新颖的光学、电学、磁学等物理与化学性质，是开展原子级制造的理想基元之一，已经在集成电路、量子计算、超导、核技术、能源、催化等领域展现出重要的应用潜力。

本次报告将介绍我们面向原子级制造国家战略，通过发展适用于超高温、超高压强、强辐射等环境条件下团簇的理论计算方法，结合 *ab initio* 波函数计算方法、密度泛函理论、分子动力学等计算物理方法，与实验团队开展紧密合作，预测与阐明金属富勒烯的原子结构、电子结构、电子动力学和原子级制造器件性能。

参考文献：

- [1] J. Chen, et al. M. Zhang*, X. Lu*, T. Yang*, F. Song*, Nano Lett. 25, 5762 (2025)
- [2] Y. Lin, et al. G. Xing*, S. Yang*, T. Yang*, W. Cai*, M. Li*, W. Huang, C. Liang*, Nature DOI:10.1038/s41586-025-08961-9 (2025)
- [3] F. Wang, et al. M. Zhang*, X. Lu*, T. Yang*, F. Song*, Nature Commun. 15, 2450 (2024)
- [4] J. Chen, et al. M. Zhang*, T. Yang*, Y. Tan*, Appl. Phys. Lett. 125, 153101 (2024)
- [5] C. Zhang, D. Liu, T. Yang*, J. Phys. Chem. Lett. 16, 1206 (2025)
- [6] M. Xiong, T. Yang*, J. Chem. Phys. 162, 024301 (2025)
- [7] H. Gao, et al. T. Yang*, J. Chem. Phys. 161, 074301 (2024)
- [8] F. Huang, M. Xiong, J. Zhou*, T. Yang*, J. Chem. Phys. 160, 184302 (2024)
- [9] F. Huang, J. Zhou*, T. Yang*, Phys. Chem. Chem. Phys. 26, 29475 (2024).
- [10] Y. Shui, et al. T. Yang*, J. Chem. Phys. 159, 244302 (2023)
- [11] Z. Li, T. Yang*, Phys. Rev. C 108, 054604 (2023)
- [12] Y. Shui, et al. T. Yang*, J. Chem. Phys. 157, 184306 (2022)
- [13] M. Li, T. Yang*, et al. G. Hou*, Cell Rep. Phys. Sci. 3, 100910 (2022)
- [14] G.-L. Hou*, T. Yang*, et al. E. Janssens*, Angew. Chem. Int. Ed. 60, 27095 (2021).

D33-07

相结构可控叠层单晶精准制造及物相调控理论研究

魏文姬^{1*}

1. 华南师范大学

二维材料通过较弱的范德华作用堆垛形成叠层，目前已在叠层发现莫特绝缘态、反常超导态、摩尔激子态等新奇物理现象。高质量叠层单晶可控生长及物相调控是推动其发展及应用的关键。本报告将详细介绍我们在该领域最新研究进展。

叠层生长机制更为复杂，必须解决厚度/取向/堆垛三个关键问题，我们针对叠层单晶可控生长提出多项创新性机理：1）基于热动力学构建 TMDs 多维度调控成核的理论模型，基于该模型证明增加金属源浓度是实现双层成核的关键，提出较弱的二维材料-衬底层间耦合有利于上下层“齐头并进”式均匀生长，协

同单原子台阶衬底和 TMDs 的表界面作用打破多种等价晶向, 据此实验首次实现双层过渡金属硫化物单晶可控生长的技术突破和创新^[1]。2) 基于衬底的面内、外协同调控机制, 发展了序斜面高台阶调控叠层晶体相结构的新机制。理论研究发现, 金属镍 (Ni) 表面杂乱台阶高重构为有序斜面高台阶具有热力学优势及温控自发性。同时, 根据晶格匹配, Ni (100) 表面沿着 (110) 斜面的有序高台阶可锁定菱方相 BN 叠层的层间滑移矢量, 攻克叠层生长层间堆垛难以调控的问题, 为二维叠层单晶的精确堆垛控制提供了有效途径^[2]。3) 基于金属原子筛的选择性过滤, 发展晶格传质-界面外延生长机制, 有效过滤生长源杂质, 同时突破衬底催化失活的限制, 实现高纯叠层可控生长^[3, 4]

叠层堆垛方式为调控材料光电性质提供了新的自由度。二维 C3N 具有类石墨烯蜂窝状无孔有序结构, 同时弥补石墨烯无带隙的缺憾, 在纳米电子学等领域有巨大的应用潜力, 我们围绕双层 C3N 光电输运等性质进行研究和调控^[5]。通过控制堆垛方式实现双层 C3N 从半导体到金属性的转变。与具有 1.2 eV 带隙的单层 C3N 相比, 双层 C3N 带隙有三种: 1) 金属性的 AA'堆垛; 2) 带隙减少约 30% 的 AB'堆垛; 3) 接近单层带隙的摩尔堆垛。双层 C3N 大尺度的带隙调控在二维材料中也非常罕见。本文结合密度泛函和紧束缚理论构建物理模型, 揭示双层 C3N 不同堆垛带隙变化的本质是上下层 pz 轨道耦合不同导致的能带劈裂, 该工作为碳基纳米材料在电子器件领域的应用提供了新选择。

参考文献

- [1] C Chang[#], XW Zhang[#]...WY Wei*, KH Liu*, XZ Xu*. Nat. Commun. 2024,15, 4130.
 [2] L Wang[#], JJ Qi[#], WY, Wei[#]...F Ding*, XR Zheng*, KH Liu*, XD Bai*. Nature. 2024,629, 8010, 74-79.
 [3] B Qin[#], CJ Ma[#], QL Guo[#], XZ Li[#], Wenya Wei, ...GY Zhang*, C Liu*, KH Liu*, XD Bai*. Science 2024, 385, 99–104.
 [4] MC Ding[#], ZB Zhang[#], WY Wei[#]...PH Tan*, GY Zhang*, KH Liu*, XD Bai*. Adv. Mater. 2025, 2500461.
 [5] WY Wei[#], SW Yang[#]...GQ, Ding*; ZH, Kang*, QH Yuan*. Nat. Electron. 2021, 4: 486-494.

D33-08

Direct synthesis and property modulations of 2D transition-metal chalcogenides via interface intercalation, defect engineering, layer thickness

Yanfeng Zhang^{1*}

1. 北京大学

The direct synthesis and property modulations of 2D transition-metal chalcogenides (TMDCs) via interface modulation, defects and layer thickness, etc., have attracted a lot of attentions in developing more intriguing physical and chemical properties and applications.⁽¹⁻³⁾ Intercalation of native metal atoms in the van der Waals gaps of 2D layered transition metal dichalcogenides (TMDCs) is promising to afford intriguing properties. Herein, we report the direct synthesis of one-unit cell thick kagome-structured Co-telluride (Co₉Te₁₆) on Gr/SiC(0001) via an MBE route, and clarify its formation mechanism, and the possible flat band states from Co-intercalation in 1T-CoTe₂ layers, by in situ scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/STS) combined with DFT calculations. A ferrimagnetic order is also predicted in kagome-Co₉Te₁₆. This work should provide a novel route for the direct synthesis of ultrathin kagome materials via a metal self-intercalation route.⁽⁴⁾ We also report the direct preparation of monolayer 1D-defect-induced Co₄Te₇ superlattices on lattice-matched SrTiO₃(001) via MBE, and the explorations of the atomic structure and the novel electronic states around EF⁽⁵⁾. This work should offer valuable insights into the engineering of periodic 1D-defect patterns in 2D TMDCs materials. We also report the successful synthesis of ultrathin h-GaTe layers on the graphene/SiC(0001) substrate, the identification of the layer-dependent vdW quantum well states (QWSs) by onsite STM/STS and their origins by DFT calculations, and the widely tunable band gaps.⁽⁶⁾ This work should deepen our understanding on the electronic tunability of 2D III–VI semiconductors by thickness and defect engineering.

References:

1. Ji Q Q, Li C, Gu L*, Liu Z F*, Zhang Y F* et al., Metallic Vanadium Disulfide Nanosheets as a Platform Material for Multifunctional Electrode Applications, Nano Lett. 2017, 17, 4908.
2. Zai H C#, Yang P F#, Su J#, Yin R Y#, Zhang Y F*, Zhou H P* et al., Wafer-scale Monolayer MoS₂ Film Integration for Stable, Efficient Perovskite Solar Cells, Science 2025, 387, 186.
3. Huan Y H; Zhang Y F* et al., Composition-Controllable Syntheses and Property Modulations from 2D Ferromagnetic Fe₅Se₈ to Metallic Fe₃Se₄ Nanosheets, Adv. Mater. 2023, 35, 2207276.
4. Wu Q L, Quan W Z, Zhang Y F* et al., Atomically Thin Kagome-Structured Co₉Te₁₆ Achieved through Self-Intercalation and Its Flat Band Visualization, Nano Lett. 2024, 24, 7672.
5. Quan W Z, Zhang Y F* et al., Spontaneous Line Defect-Induced Co₄Te₇ Superlattices on SrTiO₃(001) Featuring Flat Bands, Adv. Funct. Mater. 2024, 2315831.
6. Quan W Z, Zhang Y F* et al., Substantial Energy Band Modulation of Semiconducting Hexagonal GaTe Quantum Wells by Layer Thickness and Mirror Twin Boundaries, ACS Nano 2024, 18, 20591.

D33-09

边缘半金属接触提升 TMD 中的体光伏效应

乔双^{1*}

1. 河北大学

近年来, 研究发现二维层状材料及其不对称堆叠结构可通过自发极化产生较大的体光伏效应 (BPVE), 但光生载流子的高效提取和利用问题仍有待解决。我们通过采用铋半金属电极的边缘接触 (EC) 构型, 在增强 3R-MoS₂ 的 BPVE 方面取得新的发现。与传统的表面接触 (TC) 构型形成鲜明对比, EC 构型中金属电极与材料边缘及基底形成强键合作用, 可对 3R-MoS₂ 产生显著拉伸应变, 打破面内旋转对称性; 同时边缘接触构型能充分捕获光辐照区域内各层材料的面内极化效应, 从而使 BPVE 光电流增强超过 100 倍。另外, 我们还进一步构建了 3R-MoS₂/WSe₂ 异质结, 成功实现了 BPVE 与传统光伏效应的协同耦合, 这一发现为光电探测器和光伏器件的发展提供了新的技术路径。

D33-10

二维原子层半导体材料及异质结: 从输运机制到多功能应用

武恩秀^{1*}

1. 天津大学

我们基于二维原子层异质结构建及界面工程, 研发适用于原子层半导体材料的可逆、可控、非易失性紫外光电掺杂方法, 调控二维半导体材料输运特性、定制器件性能, 推动创新应用。具体工作包括构建基于 MoTe₂ 同质结的反双极性场效应管和 p 型场效应管, 两者实现了完美的电导匹配, 进而构建出具有高度对称性的标准三值反相器; 构建半金属 Td-WTe₂/半导体 MoS₂ 异质结构, 利用 Td-WTe₂ 态密度下降区域的类窄带隙特性, 首次实现了超低峰谷电压差 (0.01V) 的负微分电阻效应, 为高频低功耗振荡器提供了新的解决方案; 构建 ReS₂/h-BN/石墨烯异质结构光电突触器件实现了 1024 级 (10 比特) 的高精度光电子突触权重, 其 500fJ/spike 的超低能耗特性和多功能应用为实现高效能神经形态计算提供了思路。

D33-11

半导体激光模式调控与应用

卢俊峰^{1*}

1. 南京航空航天大学

ZnO 作为一种直接带隙宽禁带半导体材料, 具有高达 60 meV 的激子束缚能, 远高于室温热离化能 (26 meV), 因此, 在室温下激子可以在 ZnO 中稳定的存在, 是实现室温或者更高温度下的紫外自发与受激辐射的理想材料, 在获得低域值、高品质因子的紫外激光上体现出十分突出的本征物理优势。此外, 非中心

对称的纤锌矿结构 ZnO 微纳米材料还具备特殊的压电性能,当材料受到外加应力时,晶体内部的离子极化引起介电常数变化,从而对材料折射率进行有效调控。本工作有机地结合了 ZnO 光学微腔自身压电特性及其激光模式,通过外部机械应变产生的 ZnO 谐振腔晶体内部的离子极化,改变折射率,实现相干激光的动态调控。我们系统分析了应变对 ZnO 折射率的影响,建立了应变与模式移动的对对应关系,获得了超精确度的应力传感,相比较压阻效应引起的能带移动所导致的自发辐射谱的移动,其光谱分辨能力提升了一个数量级;同时,结合压阻效应对增益区间的调制,可灵活进行模式选择性输出,实现单模激光。该研究成果为动态调控相干光源提供了一种行之有效的方法,同时也为发展一种基于颜色分辨的应力传感元器件提供了一个新的思路。

D33-12

固态量子自旋在探索新物理中的应用

孔熙^{1*}

1. 南京大学

基于金刚石氮-空位 (Nitrogen-Vacancy, NV) 色心体系在室温大气条件下就有着优异的性质,用作量子探针时具有很高的探测灵敏度,单个 NV 色心的探测灵敏度可以达到纳特斯拉每根号赫兹级别,相当于一秒钟内可以探测地磁场大小的十万分之一。同时 NV 色心原子级别的尺度使得它天然的具有极高的空间分辨能力。正是因为这些优异的性质,我们发展了精密测量技术,进一步提高测量方法,并将其应用到基本常数变化和暗物质测量领域。

D33-13

低激发阈值二维 MoS₂ 光声换能器的界面力学量测

乐振¹, 崔乾楠^{1*}

1. 东南大学

本研究基于二维半导体材料的独特物理性质,系统研究了超快光声换能器在原子级界面力学表征中的应用。通过形变诱导机制构建的二维光声换能器系统展现出 $27.58 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的低激发阈值特性,为低损伤阈值界面力学分析提供了新途径。采用多层二硫化钼 (MoS₂) 体系中的相干声子 (Coherent Acoustic Phonons, CAP) 定向激发特性,利用超快泵浦-探测技术精确解析了皮秒声波 (Picosecond Acoustic, PA) 脉冲在异质界面的传输动力学。近年来,本研究团队利用 PA 脉冲的非侵入特性可实现对 SiO₂、PMMA 和 BaF₂ 等异质介电衬底的原位界面力学表征。并基于 CAP 振动频率与薄膜厚度的本征关联性,建立了高精度厚度反演方法,其检测灵敏度达到亚纳米量级。未来,研究希望进一步提出将超快声学表征技术集成于原子制造过程监测,通过声学信号与生长参数的动态关联,为薄膜生长速率调控与缺陷形成分析提供闭环反馈控制策略。

D33-14

手性及极化可控的二硫化钨条带阵列精准原子制造

薛国栋¹, 刘开辉^{1*}

1. 北京大学

过渡金属硫族化合物 (TMD) 因其原子级厚度、高载流子迁移率和超快电荷转移等优点受到先进光电器件以及基础物理研究领域的广泛关注。将二维 TMD 材料空间限域为一维结构,将引入量子限域效应以及丰富的边缘、手性结构,为低维材料的物性调控带来全新自由度。在极限尺寸场效应晶体管、非常规光伏器件、电催化析氢反应等方向有着广阔的发展前景。目前,尽管基于传统微加工工艺可将二维 TMD 薄膜裁剪加工为特定一维结构,但该方案具有有限的加工精度且导致大量边缘结构缺陷。本研究 (Science 2024, 384, 1100) 提出了一种“多重界面耦合原子制造”新策略,成功实现了具有可控手性与相干极性的二硫化钨 (WS₂) 条带阵列的“全同”控制制造。通过精准设计特定晶面蓝宝石衬底,调控表面原子级台阶与晶格排布的相对关系,成功实现了扶手椅型、之字型、手性结构 (含左手手性、右手手性) 的 WS₂ 条带的精

准原子制造。其中，扶手椅型条带阵列具有沿轴方向的相干极性，表现出增强的体光伏效应。通过系统研究手性结构与体光伏效应的对应关系，实现 1000 余根扶手椅型条带阵列的自发光电流集成输出。该研究为一维结构的原子级精准制造提供了定制化方案，有望促进其在新型电学、光电转换器件的阵列化集成芯片加工。

D33-15

石墨烯冷冻电镜载网的原子级制造

彭海琳^{1*}

1. 北京大学

本报告将介绍课题组在石墨烯薄膜的原子级精准合成、规模化制造、界面调控、石墨烯载网制备及其高分辨冷冻电镜成像方面的进展：实现了高品质石墨烯薄膜的精准快速合成和规模化制备，研制了石墨烯薄膜连续生长和 4 英寸石墨烯单晶晶圆生长装备；率先研制了一系列新型石墨烯支撑膜透射电镜载网，与合作者实现了金属单原子成像和蛋白颗粒高分辨率冷冻电镜结构解析；提出了洁净石墨烯支撑膜载网批量制备新方法，实现了生物大分子冷冻电镜的高分辨率成像；发展了石墨烯支撑膜不同带电基团功能化修饰方法，实现了蛋白多取向分布及冷冻电镜高分辨率三维重构成像；开发了新型超平整石墨烯电镜载网，破解了高分辨冷冻电镜表征中均匀薄冰的制备难题，实现了多种小蛋白（分子量小于 70 kDa）的高分辨三维重构结构解析；开发了石墨烯三明治封装电镜载网技术，实现了“石墨烯-液体-石墨烯”三明治结构的可控构筑，有效缓解了生物大分子的冷冻电镜成像时气液界面问题以及电子束轰击导致的荷电效应，进而实现了多种生物大分子的高分辨结构解析；研制了自增韧的石墨烯/氮化硼复合支撑膜，兼具高强和高韧特性，能耐受反复快速热冲击，基于该薄膜实现了高熵合金纳米颗粒的原位制备和原子级分辨率表征。

D33-16

面向先进制程集成电路的二维半导体材料与器件

张铮^{1*}

1. 北京科技大学

后摩尔时代，发展突破尺寸微缩极限的新材料与新器件，研制面向 1nm 制程的下一代集成电路是全球关注的焦点。在面向 1nm 先进制程非硅材料新赛道上，二维过渡金属硫族化合物（TMDC）材料，因具有突破尺寸极限的稳定结构、与块体硅材料相当的优异半导体性能，成为最具竞争力的非硅关键新材料体系之一。美国、欧盟、韩国等纷纷出台国家计划支持开展非硅新材料研究。2021 年，三星、IMEC、Intel、TSMC 等陆续公布了面向下一代 1 nm 先进制程芯片的二维 TMDC 新材料技术路线；国际半导体联盟技术路线图也将二维材料列为 2028 年商用芯片的 1.5 nm 制程技术路线中。我们团队聚焦二维半导体材料在未来先进制程集成电路应用目标，围绕晶圆级高质量二维半导体材料制备，高性能全二维范德华异质结电子学器件的设计构筑，与硅基工艺兼容的二维半导体器件集成与互联等方面开展了研究，提出了二维限域熔融生长机制，实现了 2 英寸单晶单层二硫化钼的高质量生长，获得了接近莫特肖特基理论极限接触性能的二维半导体器件，研制出皮瓦级 Pseudo-CMOS 架构二维半导体逻辑门电路，建设了 6 英寸二维半导体材料与器件实验平台，牵头启动建设 8 英寸二维半导体工艺验证平台，验证了二维半导体材料在集成电路应用的可行性。

参考文献

- [1] Jiang, H.; Zhang, X.; Chen, K.; et al. Two-dimensional Czochralski growth of single-crystal MoS₂. *Nature Materials* 2025, 24, 188 – 196. （封面文章）
- [2] Wei, X.; Zhang, X.; Yu, H.; et al. Homojunction-loaded inverters based on self-biased molybdenum disulfide transistors for sub-picowatt computing. *Nature Electronics* 2024, 7, 138-146.
- [3] Zhang, X.; Zhang, Y.; Yu, H.; et al. Van der Waals - Interface - Dominated All - 2D Electronics. *Advanced Materials* 2023, 35. 2207966.

D33-17

From Lab to Fab: 二维半导体如何迈出产业化第一步

包文中^{1,2*}

1. 复旦大学
2. 原集微科技（上海）有限公司

近年来作为学术界研究热点的二维半导体材料，也逐渐引起了工业界的关注，TSMC、Intel、IMEC 的前沿研发部门近年来正在大力推动二维半导体材料体系和先进制程的融入，并一致认为其是实现未来 1nm 以下节点的最可行关键技术。在此背景下，我们在实现批量生长高质量晶圆级二维材料的基础上，系统性的发展了多个可实用并且可以半导体 CMOS 工艺兼容的二维器件工艺，包括有效的掺杂、金半接触和栅介质生长等分立工艺。在此基础上发展出了二维半导体系统性成套流片工艺。2025 年取得了突破性成果：基于二维半导体材料（二硫化钼 MoS_2 ）的 32 位 RISC-V 架构微处理器“无极（WUJI）”成功问世。该芯片通过自主创新的特色集成工艺，通过开源简化指令集计算架构（RISC-V），在国际上实现了二维逻辑芯片最大规模验证纪录，完成了从材料到架构再到流片的全链条自主研发。

D33-18

芯片微系统中先进热功能结构的原子级构筑与应用

秦光照^{1*}

1. 湖南大学

随着新能源汽车从电动化到智能化的发展，具有高功率算力的智驾芯片作为智能化的核心，其安全稳定可靠工作，是新能源汽车的行车保障之基。智驾芯片面临车载工况下的高温和强振动挑战，亟需高效散热技术保障其稳定可靠工作。该报告将介绍芯片微系统散热技术中的微纳力热功能结构原子级构筑与应用研究，通过原子排布和结构设计实现热量传递的高效控制，从理论发展、结构设计和器件应用三个方面汇报相关研究工作。包括发展先进力热功能结构的原子级设计与调控理论；发展基于机器学习技术的高通量多尺度模拟仿真方法，通过结构的多尺度设计实现先进力热性能；提出过程可逆的通过外加电场调控热导率的新思路，成功构建电控热开关器件，并在后续的实验中证实。相关研究作为汽车智驾芯片稳定可靠工作所面临的高温和强振动等挑战提供解决方案。

D33-19

范德华界面调控

张广宇^{1*}

1. 中国科学院物理研究所

长期聚焦二维范德华界面调控的实验研究，取得的系列国际影响力的原创性成果。1) 二维金属：提出范德华挤压的原子制造技术，实现二维金属的普适制备。审稿人高度评价该工作“开创了二维金属这一重要研究领域”、“代表二维材料研究领域的一个重大进展”。加州大学欧文分校的 Sanchez-Yamagishi 教授在《自然》撰写 News & views，评价该工作“实现了大面积真正的二维金属”、“一个令人印象深刻的壮举”。2) 转角范德华界面的精准构筑和物性调控：国际首次实现了零转角石墨烯-氮化硼莫尔超晶格的外延构筑，发现超晶格对石墨烯能带的显著调制作用，揭示了超晶格狄拉克点及其量子霍尔效应；率先提出了以双层石墨烯为母体构造新莫尔超晶格体系—2+2 转角石墨烯，发现了电场可调的平带结构和强关联效应，并进一步利用多场调控揭示了费米面的重构及关联绝缘态的量子振荡；利用晶格失配超过 20% 的范德华异质非公度界面来消除莫尔效应，国际上首次实现了任意转角下的界面超滑；基于范德华界面超滑特性，提出了全新的滑移自组装技术，实现了单一手性密排的单层碳纳米管范德华晶体，解决了诺贝尔奖得主 R. Smalley 教授 20 年前提出的碳纳米管领域一个重要难题。3) 二维半导体晶圆及器件：国际上率先实现了 2 英寸高定向单层二硫化钼晶圆的外延制备，并通过设备和工艺迭代，进而实现了 4 英寸和 8 英寸高定向的单层二硫化钼晶圆；克服了热动力学的基本限制，实现了层数可控的二维半导体晶圆的范德华外延制备；

并围绕“二维半导体器件物理”这一重大科学问题进行系统攻关，率先构筑了中规模二维柔性集成电路。

参考文献：

- 1) Jiaojiao Zhao, LuoJun Du*, Guangyu Zhang*, et.al. Nature 639, 354 (2025).
- 2) Zhichun Zhang, Guangyu Zhang*, Zhiwen Shi* et.al. Science 387, 1310 (2025).
- 3) Biao Qin, Guangyu Zhang*, Kaihui Liu* et.al. Science 385, 99 (2024).
- 4) LuoJun Du*, Guangyu Zhang*, et.al. Science 379, eadg0014 (2023).
- 5) Wei Yang, Guangyu Zhang*, et.al. Nature Materials 12, 792 (2013).
- 6) Cheng Shen, Guangyu Zhang*, et.al. Nature Physics 16, 520 (2020).
- 7) Mengzhou Liao, Guangyu Zhang*, et.al. Nature Materials 21, 47 (2022).
- 8) Na Li, Guangyu Zhang*, et.al. Nature Electronics 3, 711 (2020).
- 9) Fanfan Wu, LuoJun Du*, Guangyu Zhang* et.al. Physical Review Letters 131, 256201 (2023).
- 10) Le Liu, Wei Yang*, Guangyu Zhang* et.al. Physical Review X 13, 031015 (2023).

D33-20

量子点气体传感器芯片材料设计与工艺研究

唐艳婷¹，毛镕煜¹，郭兰鹏¹，郭兰鹏¹，邢颖颖¹，李华曜¹，刘欢^{1*}

1. 华中科技大学集成电路学院

半导体气体传感器正向着高灵敏度、低功耗和高集成度方向快速发展。胶体量子点作为稳定分散在溶液中的纳米半导体颗粒，具有独特的量子效应和优良的可溶液加工特性，有望成为新一代半导体气体传感器芯片关键敏感材料。基于胶体量子点表面配体可置换的特点，采用原子级表面配体工程实现气敏活性与稳定性的协同调控，设计并制备出室温气敏效应显著、化学性质稳定的量子点气敏薄膜。针对量子点薄膜电导率低导致传感器电阻信号微弱的问题，利用二维层状半导体材料迁移率高的优势，结合量子点电容耦合效应换能机制，采用薄膜晶体管结构实现了片上信号放大。在此基础上引入介质层降低量子点/二维材料界面缺陷，进一步提高了晶体管气体传感器的沟道迁移率、电流开关比和长期稳定性。研究工作为半导体气体传感器芯片设计与工艺协同优化打下基础。

D33-21

基于固态原子自旋量子传感的新相互作用探索

黄璞^{1*}

1. 南京大学

探索宇宙的构成是基础物理学研究的重要课题。传统研究手段主要依赖天文学观测，近年来发展的量子精密测量技术为这一领域提供了新方法。金刚石中的固态原子自旋体系（特别是 NV 色心）在量子传感与精密测量领域受到广泛关注。NV 色心作为具有独特量子特性的晶格缺陷结构，在磁场测量、量子干涉及暗物质探测等领域展现出重要应用潜力。本研究通过 NV 色心探索超越标准模型的新相互作用取得以下进展：（1）研制基于 NV 色心的高灵敏度磁传感器件，实现了速度依赖的自旋-质量相互作用高精度探测，确定了新的约束参数范围；（2）首次将 NV 色心与微纳力学系统耦合，完成自旋-质量相互作用的实验验证，并给出类轴子暗物质参数的约束条件；（3）基于 NV 色心实现金刚石内部高频应力场的高精度测量，揭示了高频精细结构常数变化与暗物质耦合常数的关联性，获得对超轻暗物质耦合常数的新限制。

D33-22

低维物质光电各向异性研究

陈平¹，潘曹峰^{3*}，邱建荣^{1,2}，...

1. 广西大学

2. 浙江大学

3. 北京航空航天大学

大数据、物联网、人工智能的迅猛发展,传统的冯诺依曼系统由于数据存储和处理分离,局限性日显,人类大脑存算一体、低功耗优势,迸发了类脑神经形态计算的第四次工业革命。其中,二维材料因优异的光电性能、原子层厚度、低功耗等优势,被誉为突破摩尔极限的类脑计算材料,然而,二维材料类脑模拟中,人工神经元的节点匮乏。本文在光热稳定的过渡金属二硫化物(TMDC)上构建七种本征屏蔽层,创新性的实现了TMDC的电学各向异性,通过界面载流子捕获和释放调控,构建并实现了人工神经元的树突、轴突和胞体功能,同时将人工神经元应用于机械臂行为调控和声音监控识别,实现200种动物声音识别;基于传输速率的问题,开发偏振复用神经网络,突破稀土偏振难以调控的问题,提升Ho³⁺、Tm³⁺等偏振度至0.93,用于偏振识别,实现4个偏振方向的智能识别,为偏振复用神经网络计算提供实验基础。低维物质光电各向异性的研究为光电神经网络发展和应用提供参考。

D33-23

菱方氮化硼光学晶体的制造与应用

戚嘉杰¹, 刘开辉^{1*}

1. 北京大学物理学院

菱方氮化硼材料,由于具有宽光谱透明度、优良的化学稳定性、大非线性系数和激光损伤阈值,被视为超薄深紫外光学晶体的理想备选材料。然而,层间的库伦排斥作用导致了菱方堆垛是一种热力学亚稳定的结构。实现高质量菱方氮化硼晶体的按需定制,是研究其本身物性和开发新型应用的前提,也是当前亟待攻克的研究壁垒。在这里,我们设计了一种“晶格传质-界面生长”的新模式,通过高溶解度金属晶格传递硼、氮原子,并在衬底-材料界面构建原子台阶,逐层控制氮化硼取向一致析出,实现了厚层菱方氮化硼晶膜的可控制备。随后,我们实验证实了单体菱方氮化硼晶体在二次谐波产生和纠缠光子对产生中的应用潜力;并开发了转角相位匹配理论,通过氮化硼层间转角赋予参量光转角依赖的非线性几何相位,补充其在频率转换过程中失配的相位,最终在3.2 μm厚度下实现了8%的二次谐波转换效率。

D33-24

新型铁电拓扑结构的实验探索

马秀良^{1*}

1. 松山湖材料实验室

铁电体中晶胞内正负电荷中心不重贴是铁电极化的结构起源。铁电极化可以在外加电场的作用下发生反转,因此可用来记录二进制信息的“1”和“0”。自上世纪八十年代起,物理学家就相继预测在一定的条件下铁电材料中可能出现极化拓扑结构,且理论上该结构在信息处理、传输、超高密度信息存储等方面具有重要的应用价值。但经过数十年的探索,铁电材料中的拓扑结构却一直没有得到实验证实。其主要困难在于铁电材料中的极化拓扑结构一般都包含本体对称性所不允许的连续极化旋转。

我们通过脉冲激光沉积实施应变调控,将铁电氧化物(如PbTiO₃、BiFeO₃等)以原子尺度外延生长在特定的衬底上,外延体系中特性的边界条件以及晶格参数的不匹配导致氧八面体的位移、畸变、旋转等,从而调控出一系列新型铁电极化拓扑结构,如通量全闭合畴、半子及半子晶格、周期性电偶极子波、布洛赫点(Bloch Point)以及斯格明子超晶体等。这些新型铁电拓扑结构的发现对探索基于铁电材料的高密度非易失性信息存储器件具有重要意义。

D33-25

利用STEM-EELS探测低维纳米材料中的声子极化激元

高鹏^{1*}

1. 北京大学

声子极化激元是极性材料中光学声子与电磁波强耦合形成的准粒子,在理解光与物质相互作用方面发挥着关键作用,并为亚波长尺度上控制光提供了独特的可能性,成为了纳米光子学与中红外光子器件研究的关键对象。在原子尺度制备与二维材料兴起的背景下,如何高分辨率地探测与调控此类模式成为研究热

点。

我们利用扫描透射电子显微镜中的电子能量损失谱 (STEM-EELS), 发展了一种适用于低维极性材料中声子极化激元研究的新范式。相比传统的光学手段, STEM-EELS 展现了独特的优势, 包括高空间分辨率、大动量转移, 以及高效的宽频激发与探测能力, 特别适合探测具有强空间局域性和大波矢的极化激元模式。

本报告将介绍以下研究成果:

(1) 借助 STEM-EELS 亚纳米级的空间分辨能力, 我们证实了 SiC 纳米棒中表面声子极化激元的几何效应, 观测了多壁氮化硼纳米管中双曲声子极化激元的回音壁模式, 揭示了其极小的模式体积 ($\sim 10^{-10}$) 和极高的 Purcell 因子 ($\sim 10^{12}$), 为纳米尺度的模式调控与纳米光子学器件设计提供了重要见解。

(2) 借助快速电子的连续激发与探测能力, 我们获得了 ZnO 纳米线和 α -MoO₃ 纳米带中支持的表面声子极化激元在宽频率范围 (延伸至远红外区域) 内的色散关系。

(3) 借助快速电子的高动量转移能力, 我们实现了对极薄二维材料中声子极化激元色散关系的完整测量。实际上, 无质量光子的动量本质上非常小, 造成了天然的动量失配, 传统光学技术通常只能传递布里渊区动量的约 10^{-2} , 而 STEM-EELS 中的快速电子则可以实现多个布里渊区的动量转移, 这对于获得二维材料中声子极化激元的完整色散关系至关重要。我们成功探测了少层氮化硼和钛酸锶薄膜中的声子极化激元, 在宽动量转移范围内获得了其色散关系, 并证实了单层氮化硼与低至 8 个晶胞厚度的钛酸锶薄膜中声子极化激元表现出超高的波长压缩比 (> 487) 和超慢的群速度 ($\sim 10^{-5} c$)。

本研究不仅拓展了 STEM-EELS 在原子尺度声子极化激元研究中的应用边界, 也为二维材料中亚波长光场调控及相关光子器件设计提供了新思路。

D33-26

基于 AFM/KPFM 技术的原子尺度多物理量精密测量与表征

马宗敏^{1*}, 温焕飞¹, 朱强¹, 唐军¹, 刘俊¹

1. 中北大学

原子尺度下多物理量的表征测试可以揭示新材料、原子制造等微观条件下的新物性、新效应。原子尺度精密测量则是在所需的原子级精度下, 对组成结构单元的每个原子、积累的电子乃至多模态下的多物理场进行精确测试分析, 完成原子尺度下的材料设计制造、功能器件的结构、性能等诸多物理特性的测试表征, 从而确保精密制造过程中结构设计的合理性与优异性。本报告利用超高真空 AFM 结合 KPFM 技术完成原子尺度的结构、力、电荷等多物理量在线检测, 分析了原子尺度测试过程中所存在的问题与挑战。旨在为新器件制造、新材料开发和新物性发现进行前沿方法与技术探索。

D33-27

In-situ differential optical reflectance spectroscopy for controlled growth of TMDC monolayers

Wanfu Shen^{1*}, Chunguang Hu¹

1. 天津大学

Large-scale growth of monolayer transition metal dichalcogenides (TMDs) has seen significant progress through techniques such as molecular beam epitaxy (MBE), chemical vapor deposition (CVD), and metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). These methods leverage advanced strategies like seeding growth, catalytic reactions, and substrate-induced epitaxy, enabling the integration of TMDs into scalable nanodevices. However, challenges persist in achieving high reproducibility and portability across different growth systems. In situ optical monitoring emerges as a critical solution to these issues.

For MBE growth, established in situ techniques—such as ellipsometry, differential reflectance spectroscopy (DRS), reflectance anisotropy spectroscopy (RAS), and oblique-incidence reflectance difference (OIRD)—are widely employed due to the compatibility of large viewports with the growth environment. In contrast, CVD/MOCVD systems face inherent limitations: the need for a symmetric temperature field near the substrate

restricts viewport size, while large thermal gradients ($\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) between precursor sources and the substrate necessitate long chamber distances, posing challenges for optical diagnostics.

Here, we report in situ monitoring of TMD monolayer growth (MBE, CVD, MOCVD) using differential optical techniques (DRS, RAS, OIRD). We developed a synchronized DRS-RAS system with sub-monolayer thickness resolution and millisecond response, enabling real-time analysis of film/substrate interactions and coverage dynamics. For CVD growth, an OIRD setup achieved 63ms temporal resolution and deep sub-monolayer sensitivity, facilitating the study of MoS_2 growth kinetics. By correlating optical signatures with growth parameters, we systematically mapped the evolution of monolayer MoS_2 morphology, ultimately achieving reproducible growth on 2-inch wafers.

D33-28

原子尺度上纳米团簇相干声子动力学调控及声子探针制备

赵正朴^{1*}

1. 北京大学物理学院

在原子尺度上理解并调控固体中的相干声子对于研究能量传输、热耗散及开发基于声子的新型器件技术具有重要意义。相干声子作为固体中原子的集体同相位振动，能够以超高频率调制材料的光学、电学、热力学和力学性质。然而，传统的光学方法受限于衍射极限，难以在纳米尺度上实现相干声子的精确探测与操控。本研究通过结合飞秒激光与扫描隧道显微镜技术，首次实现了对单个纳米团簇相干声学支声子的纳米级时空分辨探测与调控。通过局域表面等离激元共振效应，针尖-样品隧穿结中的超快光电流发射被显著增强并被限制在纳米尺度空间内。等离激元共振诱导的热电子产生脉冲压力，从而激发出纳米团簇的相干声学支振动模式。该技术具备时间分辨和空间分辨能力，能以纳米级精度区分不同相干声子模式。通过将不同尺寸的纳米团簇修饰于针尖尖端，我们以高度可控的方式制备出一系列频率覆盖 10 GHz 至 1 THz 超宽范围的声子探针，该探针有望用于各类材料高频力学信号的相干探测。这项工作在纳米尺度调控相干声学支声子提供了新途径，为发展基于声子的先进器件与技术奠定了基础。

D33-29

应力发光层状半导体的掺杂与剥离特性研究

彭登峰^{1*}

1. 深圳大学

应力发光 (Mechanoluminescence) 是指发光体在机械力作用下产生的发光现象，亦称为力致发光。应力发光材料与普通发光材料存在激励方式不同，具备“力”激励发光的独特特性。由于其无需光照和通电即可发光，部分应力发光材料在清洁光源和可视化应力探测方面展现出独特优势。具有自恢复性 (Self-recovery) 的应力发光特性半导体材料，如 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 与有机硅胶弹性体复合后，在数十万次反复动态压强下仍能保持可重复的发光性能，在可视化应力传感和智能无源显示器件领域展现出极为重要的应用前景。本报告主要介绍 CaZnOS 层状半导体基质单体与异质结材料通过掺杂稀土离子、过渡金属离子实现的高亮度应力发光特性。同时，通过化学方法实现了 CaZnOS 的剥离，研究其块体与少层二维结构的光致发光与力致发光特性。基于所合成的应力发光材料，我们在阐明其机理的同时，展示了其作为自驱动微光源，在应力/应变分布可视化成像与自驱动微纳光源等领域的应用前景^[1-5]。

文献:

[1]. Chunfeng Wang, Dengfeng Peng*, Caofeng Pan*, Mechanoluminescence materials for advanced artificial skin, Science Bulletin, 2020, 65(14), 1147-1149

[2]. Dengfeng Peng*, Yue Jiang, Bolong Huang*, Feng Wang*, et.al., A ZnS/CaZnOS Heterojunction for Efficient Mechanical-to-Optical Energy Conversion by Conduction Band, Advanced Materials, 2020, 32, 1907747.

[3]. Yangyang Du, Bolong Huang*, Dengfeng Peng*, Feng Wang*, et.al., Mechanically Excited Multicolor Luminescence in Lanthanide Ions, *Advanced Materials*, 2019, 31, 1807062

[4]. Teng Zheng, Marcin Runowski*, Dengfeng Peng*, et.al., Mechanoluminescence and Photoluminescence Heterojunction for Superior Multimode Sensing Platform of Friction, Force, Pressure, and Temperature in Fibers and 3D-Printed Polymers, *Advanced Materials*, 2023, 35(40), 202304140

[5]. Yuantian Zheng, Dengfeng Peng*, et.al., Molten Salt Shielded Synthesis of Monodisperse Layered CaZnOS-Based Semiconductors for Piezophotonic and X-Ray Detection Applications, *Small*, 2022, 18 (12), 2107437

D33-30

高精度、选择性原子层刻蚀及其原位表征技术

欧阳亦^{1*}, 左雪芹², 梅永丰³

1. 复旦大学义乌研究院
2. 江苏迈纳德微纳技术有限公司
3. 智能机器人与先进制造创新学院, 复旦大学

随着集成电路制程的升级, 高深宽比、三维微纳结构(如 FinFET 和 3D NAND)对现有刻蚀工艺提出了更高的要求。在特征尺寸小于 10 nm 时, 特征尺寸精度将在 3-4 个原子的量级上, 目前干法刻蚀技术难以满足要求^[1-3]。原子层刻蚀技术(ALE)一种新型的高精度刻蚀手段, 该技术通过自限性反应逐层剥离待刻蚀薄膜的最外层原子, 并通过循环次数控制刻蚀深度, 具有极大应用前景^[4, 5]。然而, 当前 ALE 技术仍然需要解决一系列难题, 例如(1)针对不同氧化物、氮化物薄膜的刻蚀工艺开发;(2)如何实现不同材料之间的刻蚀选择性;(3)能否利用各向同性气相反应实现纳米结构的侧向刻蚀, 等等。针对以上难题, 我们目前已攻克一系列氧化物薄膜的 ALE 工艺, 并研究了刻蚀速率的影响因素, 实现了 Al₂O₃、ZnO、Ga₂O₃、In₂O₃、IGZO 等薄膜的埃米级别刻蚀精度控制, 未来可进一步应用于 III-V 族半导体材料、氮化物、金属等薄膜的高精度刻蚀; 通过石英晶振微天平(QCM)在刻蚀过程中进行原位分析, 解析了 ALE 工艺的自限性反应过程; 此外, 开发了金属氧化物/氮化物的选择性刻蚀工艺; 最后作为应用展示, 我们利用各向同性 ALE 实现了多层纳米结构的侧向刻蚀, 获得了悬空的多层纳米结构。以上结果展示了 ALE 技术在先进半导体器件制造过程中的应用潜力。

参考文献

[1] Gottlieb S. Oehrlein, Stephan M. Brandstadter, Stephan M. Bruce, et al., Future of plasma etching for microelectronics: Challenges and opportunities, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 42 [4] 041501 (2024)

[2] Jack Nos, Sylvain Iséni, Martin Kogelschatz, et al., Cryogenic cyclical etching of Si using CF₄ plasma passivation steps: The role of CF radicals, *Appl. Phys. Lett.*, 126 [3] 031602 (2025)

[3] Jomar U. Tercero, Akiko Hirata, Michiro Isobe, et al., Surface chemical reactions of etch stop prevention in plasma-enhanced atomic layer etching of silicon nitride, *Surf. Coat. Technol.*, 477 130365 (2024)

[4] Marcel Junige, Steven M. George, Selectivity between SiO₂ and SiN_x during thermal atomic layer etching using Al (CH₃)₃/HF and spontaneous etching using HF and effect of HF+ NH₃ codosing, *Chem. Mater.*, 36 [14] 6950-6960 (2024)

[5] Ross Edel, Ezra Alexander, Taewook Nam, et al., Removing defects from sputter damage on InGaP surfaces using thermal atomic layer etching, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 42 [6] 062602 (2024)

D33-31

低维层状材料的电子显微学研究及结构依赖光学性质

郭泉林¹, 刘开辉^{1*}

1. 北京大学

低维层状材料因其独特的量子限域效应和可调的对称性，已成为新一代光电器件与技术的理想备选材料。近年来，通过原子制造策略调控晶体结构及对称性（如层间转角、异质结构等），以实现材料物性的按需定制，逐渐成为凝聚态物理、材料物理和光学工程等众多领域的前沿方向。透射电子显微镜由于其超高的空间分辨率，成为了低维材料结构与生长机理研究的重要技术手段。本研究基于原子制造材料制备工艺，结合球差校正透射电子显微技术，系统探索了低维材料中结构与相关物性的内在规律。近年来，我们通过界面生长方法，制备了厚层菱方堆垛的氮化硼（Advanced Materials 2024, 36, 2303122）及过渡金属硫族化合物（Science 2024, 385, 6704），实现对不同堆垛结构的电子衍射模拟及实验表征，实现对不同层数菱方堆垛原子像衬度的实验验证，并研究其非线性光学响应。首次解析多壁氮化硼纳米管（BNNT）中的手性、螺旋性和极性共同作用的相干极化堆垛结构，并揭示手性光学非线性效应（Nature Nanotechnology 2024, 19, 1299）。

D33-32

基于扫描探针显微镜的原子制造技术

郇庆^{1*}，马瑞松¹

1. 中国科学院物理研究所

在当今前沿科技领域，原子级精密操控技术作为原子制造的核心基础，正逐渐成为推动众多学科交叉发展与高新技术突破的关键力量。扫描探针显微镜(scanning probe microscope, SPM)是目前实空间分辨及操控能力最高的科学仪器，在原子级尺度形貌表征、量子物性测量及纳米结构构筑等领域发挥着越来越重要的作用，是未来实现原子级制造的重要手段。本团队成功研发了一系列干式扫描探针显微镜，包括亚 3K、亚 2K 和亚 K 等多种干式低温 SPM，并能够与超导磁体融合，搭配自主研发的多功能扫描探针控制器，极大地提升了设备的性能、稳定性和扩展性。本报告重点介绍了自研 SPM 系统的设计、降温方案、减振方法及在原子操控领域的应用等，展望了 SPM 在未来原子级精密制造的发展趋势。

D33-33

半球谐振陀螺材料基础与性能调控

赵万良^{1*}

1. 上海航天控制技术研究所

半球谐振陀螺（HRG）是一种基于高纯熔融石英材料的精密惯性传感器，其核心谐振子通过熔融石英的优异机械品质因数和极低的热膨胀系数实现超稳定振动，是具有巨大发展前景的新一代惯性敏感器。通过原子沉积（ALD）、刻蚀（ALE）等工艺，可实现谐振子材料成分、缺陷及表面形貌的原子级精确调控，显著提升半球谐振子的 Q 值和频率稳定性。如利用 AL₂O₃/ZnO/TiO₂ 纳米叠层薄膜原子层级设计可以优化应力分布，降低能量耗散并减小热弹性噪声。同时，原子级对称修调技术可以将谐振子非对称性控制在亚纳米量级，减少干扰模态并使陀螺零偏稳定性逼近理论极限。该技术路径为下一代壳结构谐振子及量子化振动态调控奠定基础，推动 HRG 向航天级精度与微型化方向发展。

D33-34

原子级纳米酶的精准仿生构筑及生物传感应用

王颖¹，崔小强^{2*}

1. 哈尔滨工程大学

2. 吉林大学

...

纳米酶（nanozymes）作为一类蕴含类酶特性的生物纳米材料，具有成本低、稳定性好、可重复使用和易于规模化制备等优势，是我国科学家自主创新进行跨学科研究的典范，属于中国原创领域。作为连接均相天然酶催化与异相纳米酶催化的理想材料，具有单原子位点的纳米酶能够充分模拟天然酶的活性中心和配位环境，有望成为下一代精准医学的核心工具之一。为此，我们主要聚焦原子级纳米酶精准构筑与仿

生催化探索, 从原子级别精确仿生构筑与调控单原子生物催化剂的配位环境, 从实验和理论角度深入解析原子结构与纳米酶性能构效关系, 实现异相催化剂均相化促进交叉应用等方面取得了系列创新性成果: 1) 针对原子级纳米酶活性与特异性仍不能媲美天然酶的瓶颈, 系统阐明原子级金属中心和配位环境与纳米酶活性和特异性之间构-效关系, 实现理性指导高性能原子级纳米酶合成, 为从原子尺度精准仿生构筑纳米酶开辟新途径; 2) 针对原子级纳米酶催化机理不明确现状, 利用原子级金属中心与载体相互作用模拟天然酶活性中心和辅酶因子协同效应, 深入揭示原子级纳米酶本征活性构效规律, 实现原子级纳米酶催化动力学和催化机理认知的补充和深化, 为推动新一代纳米酶体系发展完善新机制; 3) 针对原子级纳米酶种类单一和应用范围受限的挑战, 明确原子级结构与纳米酶多酶活性之间构-效关系, 设计并开发具有多酶活性的原子级纳米酶, 实现原子级纳米酶的多功能性, 为满足纳米酶多种生物传感应用需求提供新思路。

D33-35

基于比率型力致发光的触觉传感

孙俊璐¹, 单崇新¹, 董林^{1*}

1. 郑州大学

人工触觉赋予机器人感知, 比率型力致发光材料由于灵敏度高, 无荧光背景干扰等特点, 可实现对应力自校准的定量化显示, 是实现高性能人工触觉的重要潜在途径。然而目前力致发光材料体系种类匮乏, 故需要开发新的材料体系。硼酸盐力致发光材料具有制备温度低, 配位形式丰富等特点, 是自校准力致发光材料。但硼酸盐材料仍存在发光机理不清晰、性能不佳、器件灵敏度低等问题, 离实际应用有一定的距离。针对上述问题, 本项目拟开展硼酸盐比率型力致发光材料的系统制备与发光机理研究: 利用高温固相法制备系列样品, 建立材料属性与发光性能的构效关系, 优化制备工艺; 开发透射电子显微镜原位应力测试技术, 构建应力与硼酸盐相组分的对应关系; 结合时间分辨光谱和第一性原理计算研究自校准力致发光缺陷载流子辐射复合竞争机制, 阐明比率型力致发光缺陷调控及增强的物理本质; 建立机器学习模型, 指导比率型力致发光材料的性能优化; 选取高性能比率型力致发光材料, 构建低检测阈值、宽响应范围和高色彩对比度的全光学人工触觉, 为我国智能传感发展提供支撑。

D33-36

范德华异质界面的皮秒声波脉冲双向发射

汪钰杰¹, 崔乾楠^{1*}

1. 东南大学

在原子级制造中, 表界面不仅是连接不同材料或结构的过渡区域, 更是决定制造精度、器件性能和功能实现的核心要素。相较于传统化学键合界面, 二维(2D)材料与异质结构形成的范德华表界面研究处于起步阶段, 且具有重要的科学价值和应用潜力。通过超快激光脉冲与表界面的瞬态相互作用, 向材料或器件内部激发并追踪纳米波长、高穿透性的超快声波(PA)脉冲, 为获取其精细结构、功能信息以及表界面力学性能提供了优秀方案^[1]。

本文通过飞秒激光泵浦-探测技术研究 PMMA^[2]/MoS₂/BaF₂ 复合异质结构体系, 结合干涉模型与瞬态差分反射信号的光谱分析, 在频域上分离了不同介质中的声学振动模式, 在时域上实现了 PA 脉冲信号与 MoS₂ 晶格的相干声学声子(CAP)振荡信号的分离。实验成功测量了 PMMA 表界面的模量不均一性(变异系数为 3.26%), 定量表征了 PMMA、BaF₂ 中 PA 脉冲的衰减系数分别为 3.10 μm^{-1} 和 1.93 μm^{-1} , 为原子级制造的材料表界面优化提供了重要参数。基于弹性波传播模型的理论计算表明, PMMA 与 BaF₂ 中 PA 脉冲的理论振幅比为 1.04, 揭示了实验中 MoS₂/介质界面的耦合不对称效应, 这一发现为原子级制造中的范德华界面精准调控奠定了理论基础。本研究不仅为 2D 材料软涂层封装的界面力学设计提供了高时空分辨的检测新范式, 也为基于原子级精度的光声换能器设计与能量交换机制研究开辟了新途径。

D33-37

基于静电纺丝导电复合纤维膜的结构调控及传感性能研究

周康康^{1*}

1. 郑州大学

静电纺丝技术因其可制备微纳米级纤维材料，且工艺简单、成本低、操作灵活，在柔性传感领域展现出巨大潜力。随着对智能材料和柔性传感器的需求不断增加，基于静电纺丝的传感器成为研究的热点。静电纺丝复合纤维膜能够通过调节纤维的结构、形态以及材料的组合，精确控制传感器的灵敏度、响应时间和耐用性。此外，复合材料的引入使得传感器不仅具备了优异的机械柔性，还能适应多种复杂环境下的应变检测需求，如在可穿戴设备、智能机器人、健康监测等领域的应用。然而，尽管基于静电纺丝的传感器在多个领域显示出广阔的应用前景，仍然在关键性的灵敏度和稳定性方面存在挑战。受贻贝多层微结构的启发，通过静电纺丝工艺和高压喷涂技术，我们设计并制备了导电复合纤维膜。该传感器以 TPU 纤维膜为基体，不仅赋予了器件优异的可拉伸性能，还确保了良好的佩戴舒适性。通过构建一维碳纳米管 (CNTs) 和二维石墨烯 (GR) 相互隔离的独立导电网络，实现了二者的协同导电作用，且互不干扰。这种独特的结构设计不仅保证了传感器性能的稳定性和可靠性，更为重要的是，通过精确调控 CNTs 或 GR 层的数量，可以实现对传感器灵敏度和检测范围的可控调节，从而实现了导电网络对外界刺激的高效响应性能。通过研究 CNTs 与 GR 的含量配比以及不同复合方式对传感性能的影响，优化后的传感器具有低检测限 (0.05% 应变)、高灵敏度 ($GF > 152537$)、宽检测范围 (高达 364% 应变)、快速响应/回复时间 (80 ms/100 ms) 以及良好的循环耐久性 (1000 次循环)，此外，当组装成摩擦纳米发电机 ($3 \times 3 \text{ cm}^2$) 时，复合纤维膜也表现出优异的摩擦电性能，包括高摩擦电输出 (开路电压 $V_{oc} = 135.4 \text{ V}$ ，短路电流 $I_{sc} = 1.25 \text{ } \mu\text{A}$) 和功率密度 (88 mW m^{-2})，并具备可靠的供电、自供电传感和脉搏监测能力，在生物信号采集领域展现出显著优势，特别是在结合机器学习算法后，实现了多手势运动的高精度识别，为未来手势智能交互技术的发展提供了新的可能性。

D33-38

Artificial Symmetry Design for Flexomagnetoelectric Effect

Jinxing Zhang^{1*}

1. Beijing Normal University

Symmetry engineering is explicitly effective to manipulate and even create phases and orderings in strongly correlated materials. Flexural stress is universally practical to break the space-inversion or time-reversal symmetry. In this presentation, I will share with you about symmetry engineering via a graded strain in strongly correlated materials. By introducing strain gradient in a centrosymmetric antiferromagnet Sr_2IrO_4 , the space-inversion symmetry is broken accompanying a nonequivalent O p -Ir d orbital hybridization along the z axis. Thus, an emergent polar phase and out-of-plane magnetic moment have been simultaneously observed in these asymmetric Sr_2IrO_4 thin films, which both are absent in its ground state. Furthermore, upon the application of a magnetic field, such polarization can be controlled by modifying the occupied d orbitals through spin-orbit interaction, giving rise to a flexomagnetoelectric effect^[1]. We propose such a magnetoelectric effect exhibits an axonic coupling, where $\mathbf{P} // \mathbf{M}$ may enables direct coupling between external axions and internal axion-like field, so that signals from axion-matter interaction may be amplified by magnetoelectric and magnetic response^[2]. This work provides a general strategy to artificially design multiple symmetries and ferroic orderings in strongly correlated systems.

References:

- [1] X. Liu et al., Flexomagnetoelectric effect in Sr_2IrO_4 thin films, *Physical Review Letters* 133, 156505 (2024);
- [2] R. Lei et al., Emerging axion detection in artificial magnetoelectric materials, arxiv.org/pdf/2505.08477;

D33-39

单原子催化剂精准设计与应用探索

吴宇恩^{1*}

1. 中国科学技术大学

吴宇恩教授课题组,近些年来一直专注于催化剂的理性设计及精细调控,并将其应用于能源小分子“化学键”的精准活化。发展了自上而下的合成策略实现了高金属载量、配位结构均一的单原子催化剂的可控制备,实现了对活性中心金属-金属键、配位数等原子结构的精准调控,并将其应用于氧分子等能源小分子的精准活化。利用主客体策略实现了具有双原子中心的燃料电池阴极催化剂合成,解决了非 Pt 催化剂在酸性条件下不稳定的难题;采用表面缺陷工程策略制备了高效廉价的 Ru 单原子合金电解水催化剂,相比于商业 Ru 基催化剂成本和稳定性提升了两个数量级。发展了原子蒸发法,解决了大规模制备中均一性的问题。面向不同的工业应用场景开发了多达 200 多种单原子催化剂,建立了单原子催化剂的大数据库和年产超 1000 吨的生产线。开发了一种全新的氧气调控技术——电子氧肺技术,可安全、高效的实现氧气的富集和脱除。未来,我们拟开发面向国防、医疗供氧、粮食储藏、食品保鲜、冶金、化工合成等行业的制氧、除氧、控氧反应器,开发多款针对不用使用场景的以电子氧肺技术为核心的高效氧气调控原型设备。建立了年产超 1000 吨的单原子催化剂生产线,实现了多项技术成果转化(>1700 万元)。开发的单原子饲料添加剂将养殖业饲料中锌的用量降低 90%以上,比常规的纳米氧化锌、精油、抗菌肽等替抗类产品具有更强的防治动物细菌性和病毒性腹泻的功能,有效解决高锌所带来的粮食安全和环境残留污染问题,产品销售至天邦、新希望等国内知名养殖企业,目前累计销量突破 3000 吨。研发单原子铜制剂,大幅度减少农药金属残留(>90%),大幅度减少农药金属残留对土壤的污染,同时有效避免了高铜所带来的药害和混配性问题,改变了高端无机农药被国外(杜邦等)产品垄断的局面施药面积突破 300 万亩。目前,开发的单原子催化材料系列产品已经应用于能源、催化、农业、医疗等领域,和美的、中国化学工程集团、天邦等企业形成紧密合作关系。

D33-40

纳米碳分子的合成及功能

谭元植^{1*}

1. 厦门大学

纳米碳分子作为碳材料纳米尺寸的结构片段,不但提供了清晰可调的结构模型,而且在光电转化、微电子、传感、催化等方面表现出优异的性能和重要的应用前景。纳米碳分子具有纳米级共轭 π 骨架,碳骨架间存在多重 π - π 相互作用,使其成为超分子组装中的重要结构基元。通过对纳米碳分子进行功能化,可以调控其电子能级、分子几何结构等,进而实现对超分子组装结构和行为的调控。为此我们发展了系列的精确碳簇功能化方法,获得了系列的功能化纳米碳分子。以功能化纳米碳分子为基元,通过分子间的 π - π 相互作用,构筑了多种超分子组装体。例如我们通过平衡碳纳米分子内核 π - π 相互作用和边缘基团的位阻效应,实现了确定结构的稳定的双层纳米碳分子的合成;利用曲面纳米碳分子不对称的 π 电子云,实现了系列凹-凸型超分子组装体的构筑。

D33-41

电场驱动原子级厚度石墨烯自限沉积技术

吴蕴雯^{1*}, 赵思博¹

1. 上海交通大学

石墨烯在集成电路互连中的实际应用潜力,主要受限于其制备方法所控制的石墨烯尺寸、厚度、连续性与均匀性。目前,石墨烯的制备方法主要包括机械剥离法、化学气相沉积法(CVD)、氧化还原法、外延生长法等[5]。机械剥离法虽然可以获得高质量的单层石墨烯,但产量低、成本高,难以满足工业化生产需求。CVD 法可以制备大面积石墨烯薄膜,但通常需要高温和金属催化剂,且转移过程复杂,容易引入缺

陷。氧化还原法虽然操作简单、成本低廉，但制备的石墨烯存在结构缺陷，无法保持较大尺寸，且连续性难以保证。外延生长法可以获得大面积连续均匀的高质量石墨烯，但仅限于特定衬底，且成本较高。

本研究利用有机自组装单分子层桥联二氧化硅与氧化石墨烯片层，利用单分子层末端基团与氧化石墨烯含氧官能团间的自限制反应，采用电场辅助方法，实现原子级厚度的氧化石墨烯的大面积沉积，并通过退火热还原，实现了原子级厚度石墨烯的制备。本研究基于界面分子基团调控，实现了原子级厚度石墨烯的水相沉积，通过微观形貌观察、厚度表征验证了石墨烯的质量。进一步地，将沉积制备的石墨烯作为互连扩散阻挡层进行阻挡性能测试，运用 X 射线衍射 (XRD)、电流-电压 (I-V) 测试分别评估了石墨烯的抗热扩散、抗电扩散性能。本研究为原子级厚度的高质量石墨烯沉积制备提供了全新思路。

D33-42

多模态柔性触觉感知技术

张婷¹，何英博¹，陈璐¹，马伟泽¹，李世彬^{1*}

1. 电子科技大学

人体皮肤凭借其卓越的多模态触觉感知能力，实现了对压力、剪切、弯曲等多种物理刺激的高灵敏、高空间分辨识别，使人类能够灵巧地操控物体与工具。随着人工智能与机器人技术的飞速发展，基于多模态柔性触觉传感器的信息反馈系统，已逐步成为推动智能机器人高效操作和安全交互的核心支撑。以柔性电子皮肤为代表的新型传感器，能够集成多种传感单元，实现对复杂环境下多维物理信号（如压力、弯曲、温度等）的同步精确感知。然而，现有柔性触觉传感器多聚焦于单一物理参数，难以满足机器人在非结构化环境下对复杂触觉信息综合感知的需求。为突破这一瓶颈，跨尺度微纳结构设计及原子级制造等先进工艺为多模态触觉传感单元的高性能集成、灵敏度提升和微型化奠定了基础。通过在纳米到宏观多尺度下精准调控材料和器件界面，可实现高密度、多功能、低功耗的柔性电子皮肤阵列系统。这一技术将显著提升智能机器人在复杂环境中的自适应性和人机协作能力，同时为医疗健康、虚拟现实等交叉领域的创新应用提供了坚实支撑。

D33-43

多层氮化硼的断裂

宋智功^{1*}

1. 江南大学

由二维结构单元构成的范德华材料具有强大的面内共价键合和较弱的层间相互作用。尽管单层二维材料（如单层六方氮化硼(h-BN)）展现出卓越的抗断裂性，但在范德华材料中保持这些优异性能仍是一个挑战。在此，我们揭示了多层 h-BN 断裂过程中的一种反常力学层间耦合机制，该机制涉及层间摩擦增韧和边缘重构脆化。我们识别出了异步和同步两种断裂模式及其对缺陷尺寸的依赖性。在同步断裂模式中，边缘重构会消除单层 h-BN 中由晶格不对称性诱导的增韧机制，导致多层 h-BN 发生脆化；而异步断裂模式则能带来更强的抗断裂性。这些发现将为调控范德华材料（包括异质结构和层状结构）中的层间相互作用提供基础性指导，以实现更优的力学和功能性能。

D33-44

二维滑移铁电体系中的非易失光学调控研究

梁晶^{1*}

1. 深圳国际量子研究院

原子级极限尺度的铁电性对于实现高集成度、低功耗的非易失性光电子芯片至关重要。然而，传统铁电材料的自发极化在原子尺度往往难以存续。二维界面滑移铁电为实现极限尺度铁电性提供了新的思路：自发极化发生在菱形堆垛的二维材料（hBN、TMDs 等）界面，并在双层极限尺度保持稳定。本报告将介绍近期在菱方堆垛二硫化钼（3R-MoS₂）体系中开展的一系列研究，包括界面自发极化源自不对称层间耦合、极化翻转路径受预置畴壁动力学主导等基本物理机制；并重点探讨通过库仑工程有效实现电极化对材

料光学性质的超快、低功耗的非易失调控，为开发基于二维界面滑移铁电材料的高性能非易失光学存储与超快光调控器件奠定基础。

D33-45

面向人机交互的智能可穿戴柔性传感材料的结构设计 with 性能研究

翟威^{1*}

1. 郑州大学

随着人机交互技术向多模态、沉浸式方向加速演进，智能可穿戴柔性传感材料因其卓越的机械柔顺性、生物相容性及多物理场耦合响应特性，已崛起为构建新一代人机交互系统的关键基础材料。研究聚焦人机交互应用场景，开展柔性传感材料的结构-性能关联机制系统性研究。通过构建三维导电网络骨架、设计梯度多孔结构等创新策略，成功同时实现传感材料的宽响应范围和高灵敏度突破。通过探究智能传感材料的“结构-工艺-性能”协同关系，建立合适的理论模型，为开发适用于运动监测、健康管理、虚拟现实等人机交互场景中的应用提供了材料基础与理论支持。

D33-46

面向原子级制造的团簇人工分子和一维原子线的理论设计

周思^{1*}

1. 华南师范大学

原子级制造是通过对原子的规模化精准操控，将制造的可控量推进到原子及原子基元的水平，逐步实现原子级精度制造、原子级结构制造，最终实现逐一原子的按需创制，是赋能产品获得逼近理论极限性能的变革性制造技术^[1]。低维材料（如团簇、一维和二维材料）为原子级制造提供了重要的组装单元，通过高通量计算筛选稳定的低维结构、预测其物理性质并揭示其组装规律，可为功能导向的实验合成提供必要的理论支撑。基于第一性原理计算，我们以正二十面体 $M@Au_{12}$ （ M 为过渡金属）幻数团簇为构造单元，通过调控团簇间的耦合方式及异质原子掺杂调节电荷数，构建了与 N_2 、 O_2 、 CO 等分子具有相似轨道特征的人工分子。这类团簇人工分子的极化率较天然分子高出一个数量级，在电场作用下表现出显著的量子限域的斯塔克效应和独特的电-光调制特性^[2]。此外，我们还搜索了一系列结构精准、表面无悬挂键的一维过渡金属硫族化合物和卤化物原子线，它们不仅具有优异的稳定性，还呈现出丰富多样的电子结构和磁性性质^[3-5]。其中， Cr_6Te_6 、 Mo_6Te_6 和 W_6Te_6 原子线表现出强激子结合能，是潜在的激子绝缘体^[6]；而 WTe_3 原子线可发生自发扭转，诱导金属-半导体转变，在线偏振光作用下产生沿轴向、手性调制的自旋电流^[7]。通过系统的理论模拟，助力构建包含团簇和一维原子线的结构及物性数据库，推动原子级制造技术的快速发展。

参考文献：

- [1] 宋凤麒，戴庆，物理 52, 371 (2023)
- [2] P. Han, T. Du, S. Zhou*, and J. Zhao*, Small Methods 2402262 (2025)
- [3] C. Shang, L. Fu, S. Zhou*, J. Zhao, JACS Au 1, 147 (2021).
- [4] L. Fu, C. Shang, S. Zhou*, Y. Guo, J. Zhao, Appl. Phys. Lett. 120, 023103 (2022).
- [5] C. Shang, Y. Zhao, Y. Su, S. Zhou*, J. Zhao, Nanoscale 14, 16427 (2022).
- [6] Y. Zhao, H. Q. J. Zhao, L. Kang, S. Zhou*, Nano Lett. 25, 1108 (2025).
- [7] C. Shang, H. Dong, Y. Zhao, W. Pei, J. Zhao, J. Zhou*, S. Zhou*, Phys. Rev. B 110, 235428 (2024).

D33-47

超快光声光谱监测 2D 层状半导体/聚合物异质结构的热演化

侯飞杨¹，汪钰杰¹，徐春祥¹，崔乾楠^{1*}

1. 东南大学

聚合物薄膜作为绝缘层和热界面材料，在先进封装、柔性电子和微电子领域中发挥着重要作用。随着芯片集成需求的迅速增加，需要阐明在更高温度和复杂热界面条件下工作的微米和纳米厚聚合物薄膜的操作性能。尽管传统的光学光谱法对于监测薄膜的光学特性快速且简便，但诸如机械性能和受温度影响的界面质量等信息却难以获取。因此，非侵入性检测聚合物薄膜及其异质结构的热影响变得至关重要且备受期待。超快光声光谱技术能够满足此类测量的需求，可以实现聚合物薄膜中纳米级波长的皮秒声（PA）脉冲全光学发射和检测。本工作中，利用 2D 层状半导体(MoS₂)作为超快光声换能器，通过飞秒激光泵浦探测技术，在 2D 层状半导体/PMMA 薄膜异质结构中全光学生成和跟踪皮秒声脉冲的传播。通过改变环境温度和泵浦激光脉冲的入射方向，对 PMMA 薄膜的声速进行了原位监测。通过实验成功测量了 PMMA 的玻璃化转变温度以及玻璃化转变过程中声速的变化。我们的工作提供了一种全光学方法来无创评估聚合物薄膜的热响应，这对于热界面材料和微电子器件的热管理研究非常重要。

参考文献:

Hou F, Wang Y, Yue Z, et al. Monitoring thermal evolutions of 2D layered semiconductor/polymer heterostructure with ultrafast photoacoustic spectroscopy[J]. Applied Physics Letters, 2025, 126(13).

墙报

D33-P01

A High Stretchability Micro-Crack Tactile Sensor System Based on Strain-Isolation Substrate

Xiaojun Pan^{1*}

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

The integration of inflexible constituents onto pliable substrates is widely acknowledged as the most pragmatic approach for the realization of stretchable electronics. Nevertheless, the assurance of enduring connectivity between rigid electrode components and these compliant substrates poses a formidable quandary. In the scope of our investigation, we proffer a resolution by conceptualizing a PDMS substrate replete with strain isolation partitions, which can generate Young's modulus difference of approximately 30 times. These partitions efficaciously safeguard the steadfast linkage between rigid components and electrodes, even under diverse strain provocations, a stable connection can be maintained even when able to withstand strain exceeding 120%. Using this substrate, we constructed a visual deformation sensing system based on microcrack type sensors. Compared with traditional flexible substrates (2% strain), systems based on strain isolation substrates have better tensile stability (10% strain). This groundbreaking innovation bestows stretchable micro-crack strain-sensing systems the resilience to contend with the potentially formidable rigors of everyday application.

D33-P02

石墨相氮化碳的缺陷构筑及载流子动力学研究

韦廷查^{1*}

1. 华南师范大学

石墨相氮化碳（g-C₃N₄）作为一种无金属二维半导体，凭借其可见光响应（带隙约 2.7 eV）、优异的化学稳定性及环境友好等特性，已成为光催化领域的研究焦点，被广泛应用于水分解制氢、环境污染物降解以及二氧化碳光还原等绿色能源领域。然而，其可见光捕获效率不足以及光生载流子易发生自复合等问题仍然制约其实际应用。探索 g-C₃N₄ 带隙的调制以及实现材料内部电荷的定向迁移调控将有助于提升光子的吸收效率和抑制光生载流子的自复合。本研究针对 g-C₃N₄ 光响应过程中光子吸收效率低、载流子复

合率高、迁移效率低等核心问题，通过构筑钠掺杂和氮空位的双类型缺陷结构，协同调制实现了 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 带隙的进一步降低，拓展了其光谱吸收范围，同时该结构能够促进了光生载流子的定向迁移进而抑制载流子自复合。在可见光降解去除污染物反应中催化速率获得了 5 倍的提升。研究揭示了双缺陷位点协同对光生载流子分离、传输的调控机制，为高效光催化材料的设计提供了实验依据。

D33-P03

A chalcogenide-cluster-based semiconducting nanotube array with oriented photoconductive behavior

Jiaqi Tang^{1*}

1. Beijing Institute of NanoEnergy and NanoSystems, Chinese Academy of Sciences

The interesting physical and chemical properties of carbon nanotubes (CNTs) have prompted the search for diverse inorganic nanotubes with different compositions to expand the number of available nanotechnology applications. Among these materials, crystalline inorganic nanotubes with well-defined structures and uniform sizes are suitable for understanding structure–activity relationships. However, their preparation comes with large synthetic challenges owing to their inherent complexity. Herein, we report the example of a crystalline nanotube array based on a supertetrahedral chalcogenide cluster, $\text{K}_3[\text{K}(\text{Cu}_2\text{Ge}_3\text{Se}_9)(\text{H}_2\text{O})]$ (1). To the best of our knowledge, this nanotube array possesses the largest diameter of crystalline inorganic nanotubes reported to date and exhibits an excellent structure-dependent electric conductivity and an oriented photoconductive behavior. This work represents a significant breakthrough both in terms of the structure of cluster-based metal chalcogenides and in the conductivity of crystalline nanotube arrays (i.e., an enhancement of ~ 4 orders of magnitude).

D33-P04

Stretchable and Lithography-Compatible Interconnects Enabled by Self-Assembled Nanofilms with Interlocking Interfaces

Xiang Li^{1*}

1. Beihang University

Stretchable interconnects with miniature widths are vital for the high-density integration of deformable electronic components on a single substrate for targeted data logic or storage functions. However, it is still challenging to attain high-resolution patternability of stretchable conductors with robust circuit fabrication capability. Here, we report a self-assembled silver nanofilm firmly interlocked by an elastomeric nanodielectric that can be photolithographically patterned into microscale features while preserving high stretchability and conductivity. Both silver and dielectric nanofilms are fabricated by layer-by-layer assembly, ensuring wafer-scale uniformity and meticulous control of thicknesses. Without any thermal annealing, the as-fabricated nanofilms from silver nanoparticles (AgNPs) exhibit conductivity of $1.54 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$ and stretchability of $\sim 200\%$, which is due to the impeded crack propagation by the underlying PU nanodielectrics. Furthermore, it is revealed that AgNP microstrips defined by photolithography show higher stretchability when their widths are downscaled to $100 \mu\text{m}$ owing to confined cracks. However, further scaling restricts the stretchability, following the early development of cracks cutting across the strip. In addition, the resistance change of these silver interconnects can be decreased using serpentine architectures. As a demonstration, these self-assembled interconnects are used as stretchable circuit boards to power LEDs.

D33-P05

A multi-user wearable waistband system for real-time health monitoring of respiration, ECG, and body temperature

Siyuan Wang^{1*}

1. Beijing Institute of NanoEnergy and NanoSystems, Chinese Academy of Sciences

Wearable health monitoring systems have gained significant attention for real-time physiological signal tracking, particularly in elderly care settings where continuous, non-invasive monitoring is critical. Current systems, however, face limitations in multi-signal integration, user comfort, and practicality for long-term use. Existing approaches often rely on separate devices for measuring vital signs, leading to cumbersome setups and restricted mobility. Additionally, few solutions support simultaneous multi-user monitoring, hindering scalability in group care environments like nursing homes. In this study, we present a highly integrated waistband device that addresses these gaps by concurrently measuring respiration, electrocardiogram (ECG), and body temperature. The respiratory sensor employs a resistive pressure sensor. Its alignment with the ECG electrodes and the temperature sensor eliminates the need for auxiliary respiratory devices (e.g., masks) and enhances wearability. With the integration of a Bluetooth transmission circuit system, this real-time health monitoring system enables long-term stable testing for multiple users. A 24-hour synchronized test involving 10 participants was conducted, demonstrating effective health monitoring capabilities and the potential to identify underlying health issues. This innovation provides a scalable, comfortable solution for intelligent healthcare systems, demonstrating practical value in elderly care applications.

D33-P06

Tuning the light emission of a Si micropillar quantum dot light-emitting device array with the strain coupling effect

Yepei Mo^{1*}, Rongrong Bao^{2,3}, Caofeng Pan^{2,3}

1. Beijing Institute of NanoEnergy and NanoSystems, Chinese Academy of Sciences

2. Institute of Atomic Manufacturing, Beihang University

3. International Institute for Interdisciplinary and Frontiers, Beihang University

Using an optical signal to realize sensing of a strain signal is a promising application for tactile sensors. However, most research is now focused on piezophototronic LED arrays, which are difficult to incorporate into the Si-based semiconductor industry. Due to the poor photoelectric performance of Si-based devices caused by the indirect band gap of Si, it has always been challenging to construct high density light-emitting devices with Si. Here, a Si-based quantum dot light-emitting device (QLED) array composed of p-Si micropillars is designed and fabricated, and the mechanism for modulation of the strain coupling effect in Si on the electroluminescence performance of Si-based QLEDs is studied. The introduction of QDs easily provides efficient and adjustable light emission and meets the requirements of different practical applications. The emission intensity of the QLED depends on the injected current density, and the transportation processes of the carriers can be modulated by the strain coupling effect. The combination of Si-based photonic devices with pressure sensing may have a significant impact on the fields of electronic skin and human-machine interfaces. More importantly, this technology is fully compatible with the dominant Si-based semiconductor industry. Therefore, it shows promise in realizing the integration of large-scale Si_x0002_based photonic devices and expanding their application fields.

D33-P07

面向室温 NO₂检测的高稳定双介电层界面优化型 PbS 量子点/黑磷场效应晶体管气体传感器

毛镕煜¹, 刘欢^{1*}

1. 华中科技大学

尽管基于硫化铅/黑磷 (PbS/BP) 的薄膜晶体管 (TFT) 已经展现出卓越的二氧化氮 (NO₂) 检测能力, 但直接将硫化铅量子点 (PbS QDs) 作为气敏层集成到导电通道中, 会带来一系列关键挑战, 包括关态电

流升高、开关比降低以及环境稳定性差。

本研究首次提出了一种创新的介质层界面调控策略：通过构建双介质层三氧化二锑/三氧化二铝（ $\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ）异质结构，在物理上将沟道层与传感层分隔开。在检测 NO_2 时，这种双介质层器件的转导因子相比传统结构提升了 143%。优化后的传感器在仅需 10 mV 工作电压和纳瓦级功耗下，即可实现 1.6 ppb 的超低检测限，且在 30 天内稳定性衰减小于 26%。

通过双栅调控机制分析，揭示了栅极诱导电场与气体吸附热力学之间的协同作用机制。这项工作通过“介质隔离-功能解耦”的设计理念，为半导体气体传感器开辟了新的范式，成功克服了传统异质结器件固有的性能局限。所提出的架构为开发具有可编程传感动态特性的可调谐气体传感器提供了重要的支撑

D33-P08

Temperature Decoupling of a Hydrogel-Based Strain Sensor under a Dynamic Temperature Field

Zemin Li^{1*}

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

Hydrogels possess several interesting characteristics and have attracted increasing attention for flexible interactive strain-sensing. However, hydrogel strain sensors are easily influenced by temperature because of the intrinsic characteristics of the materials, thus, their sensing accuracy is significantly affected. Herein, a strategy is proposed to eliminate the influence of temperature by building an in-situ hydrogel temperature sensor next to the strain sensor to monitor ambient temperature changes and simultaneously correct the strain signal. By introducing silicon nanoparticles and modified graphene, the hydrogel exhibits a good balance between conductivity and stretchability. The hydrogel strain sensor exhibits a working range of up to 1000% and a sensitivity of 8.1. It can monitor human movement and shows good stability. Moreover, the hydrogel-based sensor demonstrates an impressive thermal response sensitivity ($-7.16\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). This bimodal sensor not only realizes the decoupling of the strain sensor from the temperature but protects the temperature sensor from the influence of strain. More importantly, the device is also able to accurately control the manipulator under dynamic temperatures, proving the feasibility of the design. This strategy provides a new method to eliminate the influence of temperature on strain sensing and assists in the development of the interactive-sensing field.

D33-P09

Gradient Modulus Strategy for Alleviating Stretchable Electronic Strain Concentration

Boning Sun^{1,2}, Zemin Li^{2,3}, Zhuoyu Song⁴, Yang Yu^{1,2}, Zhonglong Zhang^{1,2}, Runhui Zhou^{2,3}, Boru Jin^{1,2}, Ziyu Chen^{1,2}, Yushu Wang^{1,2}, Jiang He², Rongrong Bao², Wenchao Gao², Caofeng Pan^{2*}

1. Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region School of Physical Science & Technology
Guangxi University

2. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems

3. School of Nanoscience and Engineering University of Chinese Academy of Sciences

4. Department of Engineering Mechanics Dalian University of Technology

The island-bridge structural design is a common strategy for imparting stretchability to flexible electronic devices. In this structure, the low modulus regions bear most of the deformation, while the rigid islands, which house the electronic components, undergo minimal deformation. However, due to the modulus differences that can be several times or even several orders of magnitude larger, severe strain concentration occur at the edges of the rigid islands in high modulus regions. This strain concentration caused by rigid constraints not only reduces the stretchability of the soft substrate but also degrades the mechanical performance of the interconnected structures, thereby significantly affecting the overall stability of the device. Starting from finite element simulations, this paper introduces modulus gradient regions and optimizes geometric parameters, significantly alleviating the strain

concentration at the edges of the rigid islands. Serpentine-shaped circuits are then transferred to a substrate with strain isolation, which demonstrates better stretchability stability under 20% elongation compared to traditional strain isolation strategies. In addition, the stretchable light emitting diode (LED) system with gradient modulus has better stretchability compared to the system with conventional strategy. This suggests that this strategy has great potential in maintaining the stability of stretchable systems.

D33-P10

MOF 基全纤维摩擦电皮肤用于自供电智能语音交互

赵祎^{1*}

1. 郑州大学

基于广泛分布的可穿戴传感技术的智能语音交互是快速发展的人机交互的重要基础。然而，传统的能源系统和不理想的可穿戴体验限制了便携式人机交互的发展。在这里，我们提出了一种基于全纤维功能化金属有机框架（MOF）的可穿戴摩擦电皮肤（MT-skin），用于自供电的智能语音交互。分层设计的全纤维摩擦层使 MT-skin 具有优异的穿戴性能，包括良好的透气性、自清洁能力、生物相容性和抗菌能力（对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌能力达到 99.97%）。通过原位生长策略，用 ZIF-67 纳米晶体对热塑性聚氨酯纤维进行改性，形成独特的珍珠项链状结构，从而使功能化的 MT-skin 的摩擦电输出提高了大约 10 倍，功率密度达到 1.85 W/m²。此外，通过物联网（IoT）技术开发了可穿戴自供电传感系统，实现了智能语音控制和识别，促进了人工智能领域人机交互界面的发展。

D33-P11

Impacts of the Lattice Strain on Light Emission in Layered Perovskite Thin flakes

Zhonglong Zhang^{1*}, Runhui Zhou¹, Meili Li¹, Yanfang Zhang¹, Yepi Mo¹, Yang Yu¹, Zhangsheng Xu¹, Wenqiang Wu³, Shixuan Du², Caofeng Pan³

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

2. Institute of Physics & University of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences

3. Institute of Atomic Manufacturing, Beihang University

Strain engineering, as a non-chemical tuning knob, can enhance the performance of semiconductor devices. Here, an efficient manipulation of light emission is revealed in thin-layered 2D perovskite strongly correlated to layer numbers of $[\text{PbI}_6]^{4-}$ octahedron (n) and $[\text{C}_6\text{H}_5(\text{CH}_2)_2\text{NH}_3]_2(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{PbI}_{3n+1}$ (N) by applying uniaxial strains (ϵ) via bending the flexible substrate. As $\langle n \rangle$ increases from 1 to 3, an efficient light emission redshift (ϵ from -0.97% to 0.97%) is observed from bandgap shrinkage, and the shrinkage rate increases from 1.97 to 10.38 meV/%, which is attributed to the predominant uniaxial intralayer deformation due to the anisotropy of the $[\text{PbI}_6]^{4-}$ octahedron lattice strain. Conversely, as $\langle N \rangle$ increases from 7 to 48 for $n = 3$, the deformation related to bandgap shrinkage rate is more prominent in small- N flakes ($\langle N \rangle \approx 7$, 15.2 meV/%) but is easily offset in large- N flakes ($\langle N \rangle \approx 48$, 7.7 meV/%). This anisotropic lattice deformation, meanwhile, inevitably modulates the carrier recombination dynamics of $[\text{C}_6\text{H}_5(\text{CH}_2)_2\text{NH}_3]_2(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{PbI}_{3n+1}$, which is essential for the development of highly efficient photoelectronic devices.

仅发表论文

D33-PO01

触觉传感的创新：实现卓越灵活传感器性能的微结构设计

吴冠成^{1*}

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

触觉传感器因其检测和量化触觉信息的能力而引起了相当大的兴趣。将微结构设计整合到柔性触觉传感器中已成为一种有效的策略,可以提高其对压力变化的敏感性,从而提高其线性度、灵敏度和机械稳健性。文章强调了微结构柔性触觉传感器进步的必要性,讨论了用于制造传感器电极、封装层和有源传感介质的常用材料,分别阐明了这些材料的优点和局限性。文章深入介绍了具有不同微结构的触觉传感器,包括但不限于微金字塔、微半球、微柱、微孔、微裂纹、拓扑互连结构、多级结构、随机粗糙结构和受动植物启发的仿生微结构,并总结每个类别的代表性工作。文章还介绍了柔性触觉传感器在智能环境领域的应用,尤其是在监测生理信号、检测滑动运动和识别表面纹理方面的应用。文章对微结构触觉传感器必须克服的首要挑战和困境进行了总结,以进一步开发和增强触觉传感器的功能和性能,为它们集成到更复杂的高级传感系统中铺平了道路。

D33-PO02**Recent progress in construction methods and applications of perovskite photodetector arrays**Hui Lu¹, Wenqiang Wu², Zeping He¹, Xun Han³, Caofeng Pan^{1*}

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

2. Institute of Microscale Optoelectronics, Shenzhen University

3. ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center, School of Micro-Nano Electronics, Zhejiang University

Metal halide perovskites are considered promising materials for next-generation optoelectronic devices due to their excellent optoelectronic performances and simple solution preparation process. Precise micro/nano-scale patterning techniques enable perovskite materials to be used for array integration of photodetectors. In this review, the device types of perovskite-based photodetectors are introduced and the structural characteristics and corresponding device performances are analyzed. Then, the typical construction methods suitable for the fabrication of perovskite photodetector arrays are highlighted, including surface treatment technology, template-assisted construction, inkjet printing technology, and modified photolithography. Furthermore, the current development trends and their applications in image sensing of perovskite photodetector arrays are summarized. Finally, major challenges are presented to guide the development of perovskite photodetector arrays.

D33-PO03**触觉传基于融合型微传感集成的智能电池**路瑶^{1*}

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

随着锂离子电池在电动汽车和储能系统中的广泛应用,电池安全性与状态监测的智能化需求日益突出。本文提出了一种基于多微型传感集成的智能电池系统,通过将传感器与软包锂离子电池隔膜多功能融合,实现了电池内部温度、压力及电解液化学状态的实时监测。研究采用静电纺丝技术设计并制备了一种多功能复合隔膜,该隔膜兼具优异的离子传导性、机械强度及嵌入式传感功能。通过优化静电纺丝工艺参数,实现了高灵敏度微纳传感器的原位集成,同时确保隔膜的电化学稳定性。实验结果表明,该多功能隔膜在保持电池循环性能的基础上,可实时反馈电池内部状态变化,显著提升了电池的安全性和智能监测能力。本研究的创新点在于:(1)提出了一种传感器-隔膜一体化设计策略,解决了传统传感系统侵入性高、兼容性差的问题;(2)开发了基于静电纺丝的多功能隔膜制备技术,为智能电池的微型传感集成提供了新思路。该成果为下一代高安全性、自感知智能电池的开发提供了重要技术支撑。

D33-PO04**Robust Surface Reconstruction Induced by Subsurface Ni/Li Antisites in Ni-Rich Cathodes**Jiarun Ding^{1,2}, Xinyan Li^{1*}

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Systems, Chinese Academy of Sciences

2. School of Nanoscience and Engineering, University of Chinese Academy of Sciences

Loss of active materials is a critical problem of layered oxide cathodes for lithium-ion batteries and undermines their long-term electrochemical performance. However, the atomic-scale outward migration mechanism of transition metals and oxygen remains elusive due to a highly localized environment at surface. Here, the robust surface reconstruction of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC811) induced by artificially introduced Ni/Li antisites is reported. Using scanning transmission electron microscopy, the outward co-migration process of nickel and oxygen ions is directly revealed at the atomic scale, finally resulting in a stable surface structure. The robust nature of this surface structure originates from the strong linear superexchange interaction between subsurface Ni-Li and surface Ni as supported by first-principles calculations. An idealized subsurface structure with 13 Ni-Li is designed to suppress the outward migration of transition metal and oxygen ions and provide a universal lattice-coherent surface protection strategy for layered lithium transition metal oxide cathodes.