

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

D45-超晶格
D45-Superlattice

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



D45. 超晶格

分会主席：段曦东、崔勇、骆军委、董安钢、刘建伟

D45 -01

表界面结构及新物态的第一性原理研究

魏苏淮*

宁波东方理工大学

第一性原理计算在表界面结构及新物态研究中有着广泛的运用，对探索原子级表界面新奇物态，设计新功能材料与量子器件起到了极大的推动作用，已成为加速电子、光电和能源材料发展的重要工具。例如我们通过晶体结构映射方法，找到了金红石与锐钛矿的映射关系，确定了从金红石到锐钛矿的相变路径，并发现了当在锐钛矿界面约束下金红石相会演变成一个稳定的中间相（称为 MIS）。该界面相使金红石的带隙缩小至可见光范围，从而增强了光吸收。该 MIS 相具有更高的导带，显著增强了氢离子的还原能力，从而提升了锐钛矿与金红石混合物的光催化效果，解释了为什么锐钛矿与金红石 TiO_2 的混合物，P25，在性能上超过了单一相这一既有趣又长期令人困惑的实验事实。这种由连续相干界面的混合物产生的受限亚稳态为探索新物态提供了新思路。

D45-02

宽带可调谐量子级联激光器研究

刘峰奇*

中国科学院半导体研究所

量子级联激光器（Quantum Cascade Laser，简称 QCL）自 1994 年问世到现在经过 30 余年的发展，已经从最初的原理器件发展到可实用化的红外波段最具前景的半导体激光器。该报告简要介绍课题团队在 QCL 方面的研究进展，研制出波长 3.5--16 微米的一系列低阈值大功率 QCL，研制的 QCL 已用于脑科学、环境监测、国家重大需求等领域，累计用户 50 余家。宽调谐 QCL 可用于不同物质的同时检测，是 QCL 发展的核心技术之一。该报告对实现宽调谐 QCL 的主要技术途径和进展进行讨论，包括 QCL 阵列技术、单片多驱动 QCL 技术以及外腔 QCL 技术，结合课题团队的研究进展，提出在兼顾输出功率和调谐范围方面的优选技术方案。

D45-03

二维材料莫尔超晶格的构筑——从单粒子到关联物态

王雷*

南京大学物理学院，固体微结构国家重点实验室，南京 210093

二维材料是凝聚态物理研究的新颖材料体系的重要平台。将两种或多种二维材料堆叠，由于界面间相对角度或者晶格失配，会产生二维莫尔超晶格。控制堆叠的位置，厚度和晶格间相对角度可以实现多种新颖的电子结构。在技术上，实现二维材料超晶格的构筑经历了漫长的摸索，领域内经过了近十年的尝试，直至 pick-up 技术的发明[1]。我将回顾二维材料 pick-up 转移法的发明过程，该技术首次实现了将任意的单原子层“拿起来”并精准的放在任意设定的衬底位置，并在这个过程中不引入任何污染物，首次实现了原子级洁净的范德华界面，进而开启了二维材料界面间超晶格的新物理现象的探索[2]。这个开创性技术促成并发展了二维材料近十年来的一个新的领域分支——二维材料莫尔超晶格[1]。我将讨论在二维莫尔超晶格器件中如何调控不同的原子界面之间的参数以实现能带结构工程和随之产生的一系列新奇的物理发现，从多种单粒子现象，到近年来备受关注的莫特绝缘体和超导等关联物态等[3,4]。

[1] L. Wang et al., Science, 614 (2013).

[2] L. Wang et al., Science 350, 1231 (2015).

[3] L. Wang et al., Nature Materials 19, 861 (2020).

[4] L. Wang et al., Nature 597, 345 (2021)

D45-04

低维半导体材料的载流子动力学理论

王林军*

浙江大学

低维半导体材料在各种电子学和光电子学领域都发挥越来越重要的作用。特别地，二维材料和量子点有望得到广泛应用并推动科技进步，然而对其载流子动力学的理解还很有限，亟需突破传统方法的限制。我们发展了大尺度非绝热动力学方法 FCC-GFSH[1]和机器学习哈密顿量方法 DHNet[2]，并开发了非绝热动力学的通用模拟软件 SPADE[3]，揭示了二维材料单层、异质结和超晶格中的载流子动力学机制[4]，以及量子点的反常界面电子转移、热电子弛豫和非原位氧化动力学机制[5]。

参考文献

[1] J. Qiu, Y. Lu, L. Wang, J. Chem. Theory Comput., 2022, 18, 2803.

[2] Z. Wang, J. Dong, J. Qiu, L. Wang, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2022, 14, 22929.

[3] J. Dong, J. Qiu, X. Bai, Z. Wang, B. Xiao, L. Wang, J. Chem. Theory Comput., 2025, 21, 3300.

[4] B. Cao, J. Dong, Z. Wang, and L. Wang, J. Phys. Chem. Lett. 2025, 16, 4907.

[5] Y. Deng, F. Peng, Y. Lu, X. Zhu, W. Jin, J. Qiu, J. Dong, Y. Hao, D. Di, Y. Gao, T. Sun, M. Zhang, F. Liu, L. Wang, L. Ying, F. Huang, Y. Jin, Nat. Photonics, 2022, 16, 505.

D45-05

低维超晶格材料的可控构筑及原子表征

赵晓续*

北京大学 材料科学与工程学院

低维超晶格材料优于其独特的原子和电子结构，已成为低维量子材料领域的研究热点。利用化学气相沉积法和原子分辨的球差扫描透射电子显微镜，课题组实现了系列自插层 1H/1T 相 TaS₂ 的原子级超晶格构筑。结合第一性原理计算，揭示了自插层 Ta 原子在 TaS₂ 体系超晶格形成的机理，并发现了该超晶格体系具有室温非线性霍尔效应。利用类似的生长方法，课题组实现了系列 Fe₁+xS₂ 等超晶格体系的原子级构筑，及其在纳米器件领域的应用。

D45-06

基于范德华异质结与超晶格的量子输运研究

钱琦*

香港中文大学（深圳）

发展新型异质结与超晶格对于推进量子信息技术至关重要。传统异质结的构筑受晶格匹配限制，制约了材料功能的拓展。本次报告将重点讨论范德华异质结与超晶格的材料研发与量子输运特性的探索。我将介绍几种新型范德华集成技术—通过范德华相互作用力可在不同体系间实现原子级平整界面，并进一步扩展至多层结构形成高阶超晶格。这些技术促成了一系列量子输运现象的观测：包括在铅基卤钙钛矿中观测到弱局域化效应与铁电大极化子形成，手性分子插层超晶格中发现鲁棒的自旋隧穿效应，以及范德华限域对有机材料发光特性的调控。基于这些发现，我还将探讨范德华集成技术在构筑人工量子固体方面的广阔前景，通过调控化学组分、维度、层间距和结构基元，范德华异质结与超晶格将为基础研究和量子技术开辟全新的研究平台。

D45-07

铋化物超晶格材料与红外光电器件

牛智川*

中国科学院半导体研究所

铋化物超晶格材料是新一代红外光电器件变革性材料体系，通过能带工程设计配合原子级精度分子束外延生长技术，可实现覆盖近、中、远至太赫兹波段光电功能的高质量材料，基于该材料开发的中红外激光与中长波探测器件技术突破传统红外材料体系庞杂、制造工艺兼容差、成本高的长期技术瓶颈。近年来材料外延及器件工艺技术迅速进步，在光电集成装备中的应用迅速拓展，相关材料与器件已列为各国出口管控高技术。本报告主要介绍铋化物半导体技术发展国内外现状，重点报告本团队在超晶格、量子阱低维材料研究、量子阱高功率单模中红外激光器、超晶格中长波红外光电探测器、集成系统的应用成果等，展望铋化物超晶格材料与器件发展的前沿方向与应用前景，提出铋化物超晶格新材料及器件技术的全链条协同发展路径。

D45-08

聚合物/无机纳米粒子超晶格构建与存储性能

朱锦涛*、刘思萌、李旺、许江平、邓仁华

华中科技大学

无机纳米粒子的性能不仅取决于其尺寸、形状和材料种类，更依赖于其空间排列及组装有序性。基于无机纳米粒子构筑的超晶格结构具有严格的周期性和高度规整性，已成为当前该领域的一个研究热点。采用受限组装、直写打印等策略成功制备了聚合物接枝无机粒子超晶格材料，得到了具有大面积、非紧密堆积的二维超晶格单层膜等，并对其超晶格材料晶格参数等进行了调控。以该二维超晶格材料为纳米浮栅层，构筑了一种高性能有机场效应晶体管电信号存储器。相较于其他同类存储器，该类存储器在存储窗口、稳定性等方面都表现出优异性能。

D45-09

光-力耦合诱导半导体材料相变的理论与计算研究

周健*

西安交通大学

对材料几何结构和性质的调控有助于人们更好地将其应用于不同场景。例如为了提高数据存储密度和获得优异的电磁学性能，量子材料及其原子/电子结构的相变一直受到人们的广泛关注。光场（尤其是长波长低频光场）诱导半导体相变过程具有与材料非直接相互接触、大小方向可调、对结构损伤较小、不易引入杂质原子等特点，有望作为一种诱导相变的新型有效方案。与传统光致相变过程中利用光子吸收的热效应等方式不同，这种非共振的方式有助于大幅度降低相变过程中的产热，为信息传输和存储过程中热管理提供了新的方式。在本报告中，我们将重点讨论太赫兹-红外光诱导的半导体材料相变过程，我们提出了一种低频光致相变的热力学理论（类似于光摄技术原理），利用第一性原理计算并预言若干金属硫化物材料在太赫兹-红外光照下的结构响应。其中包括：IV 族硫化物的光致拓扑相变和过渡金属二硫化物单层的拓扑相变、铁电/铁弹共存下的材料铁性相变，其中部分预言已经被近期实验结果所实现，证明该理论的可行性和合理性。

D45-10

二维莫尔超晶格的物性与局域调控

黄元*

北京理工大学

二维材料中的莫尔超晶格因其独特的能带结构和强关联效应，成为探索新奇量子物态的重要平台。然而，堆叠角度差异导致的物性显著变化，使得系统性研究不同量子效应间的关联机制面临挑战。本报告聚焦扭曲双层二硫化钼（tBL-MoS₂）和单层-多层石墨烯体系，探讨莫尔超晶格的纳米尺度调控策略及其物性关联。在 tBL-MoS₂ 研究中，我们通过压电响应力显微镜（PFM）揭示了摩尔反铁电网络的极化动力学，发现局部电场可诱导三角形铁电畴的曲率变化，并在临界电压下形成具有双域壁结构（DDWs）的拓扑态。实验表明，该极化网络在结构缺陷存在时仍能通过自适应重构保持稳定分布。针对石墨烯莫尔体系，我们

利用原子力显微镜 (AFM) 针尖实现了纳米气泡的精准移动与应变场调控, 观察到三角形畴与条纹畴结构的可逆转变, 并通过多气泡协同作用调控超晶格的能量分布。本研究通过电场 ($tBL-MoS_2$) 和应变场 (石墨烯) 的纳米尺度调控, 建立了不同莫尔超晶格物性间的关联性研究方法, 为二维材料中量子效应的精准操控及器件应用提供了关键科学依据。

D45-11

菱方多层石墨烯中的可调拓扑平带

徐水钢*

西湖大学

具有平带电子结构及非平庸拓扑性的拓扑平带在凝聚态物理领域具有重要的研究意义, 为探索非常规超导、量子反常霍尔效应等新奇物态提供了理论载体。菱方堆垛多层石墨烯的低能区电子能带呈现层数依赖的指数色散关系, 兼具显著平带特性与强贝里曲率特征。更重要的是, 该体系的能带结构及贝里曲率分布可通过外加电场连续调控, 为实现可调量子反常霍尔效应等关联拓扑物态提供了理想的研究平台。然而, 本征菱方石墨烯的低能平带与高能色散带存在能带交叠, 这一特性制约了其拓扑性质的充分展现。在本次报告中, 我们将探讨如何通过引入莫尔超晶格, 基于布里渊区折叠效应, 在菱方多层石墨烯中构建出孤立的表面平带, 并在此平台上观察到层间极化铁磁态、手性可调的陈绝缘体态和高陈数量子反常霍尔态等新奇量子现象。特别地, 在菱方七层石墨烯体系中, 电子关联效应可自发诱导拓扑能隙的开启, 形成具有长程电子关联序的"反常霍尔晶体"相。这一发现不仅为理解电子关联与拓扑序的耦合机制提供新的视角, 更为陈绝缘体的动态调控开辟新途径。

D45-12

电子注入诱导碳基晶体有序结构相变

潘飞, 朱彦武*

中国科学技术大学 精准智能化学全国重点实验室

石墨是一种被广泛研究的碳基晶体, 主要包含两种结构: 六方相 (ABAB...堆叠, 简称 2H 相) 和菱形相 (ABCABC...堆叠, 简称 3R 相), 这是两种不同的周期性堆叠形式, 对于石墨的性质和应用产生了重要影响, 两种相可以互相转变。其中, 3R 相向 2H 相的转变通常需要高温石墨化处理, 所需温度较高, 能耗较大。研究表明通过对石墨粉体进行电子注入, 电子会转移至石墨的共轭 π 电子云, 导致石墨的层间距异常增大, 石墨层间的滑移能垒显著降低, 能够使得 3R 相得以在温和条件下快速转变为 2H 相。目前已探索的具有上述电子注入效应的材料包括氮化锂、氢化锂、碱金属锂、钠、钾等。对于面心立方堆叠的 C_{60} 分子晶体而言, 采用上述电子注入技术能够在常压下诱导晶格中相邻的 C_{60} 分子间形成共价键, 将其转变为 C_{60} 聚合物晶体和长程有序多孔碳 (LOPC) 晶体, 并且能够轻易实现克量级制备。计算研究表明 LOPC 结构可能是富勒烯 C_{60} 到石墨烯结构衍化中出现的一大类中间态结构。机理研究表明电子注入导致的电偶极矩传递作用降低了相邻 C_{60} 分子间的加成反应势垒; 进一步反应使得分子间共价连接方式由 sp^3 转变为弯曲 sp^2 结构, 但部分破碎的 C_{60} 仍保持良好的长程有序特征, 其室温电导率达 $1.2 \times 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$; 结构转变过程中电子从局域在分子上逐渐发展为远程离域特性。

D45-13

范德华异质结磁存储器

廖志敏*

北京大学

磁随机存储器 (MRAM) 具有非易失性、速度快、功耗低等优点, 有望推动诸如存内计算、神经形态计算和随机计算等新兴应用领域的发展。二维材料及其范德瓦尔斯异质结具有原子级平滑的界面和可调的物理特性, 为 MRAM 的技术发展提供了新方案。目前 MRAM 的信息写入主要通过奥斯特场、自旋转移力矩 (STT) 和自旋轨道力矩 (SOT) 三种方式来实现磁化翻转。利用电流诱导的奥斯特场实现磁化翻转的器件结构复杂, 能耗较高; 自旋转移力矩则存在读写路径不分离, 从而耐受性较差的问题。而基于拓扑表面态、

Rashba 效应或者自旋霍尔效应的 SOT 则通常面临着与垂直磁化翻转不兼容的问题，而垂直磁各向异性是 MRAM 器件小型化的关键。要利用 SOT 实现垂直磁化翻转，通常需要特殊的结构设计或者外磁场的辅助。

本报告将介绍一种在室温下工作的轨道转移力矩(orbit-transfer torque, OTT)磁随机存储器。它由二维范德华材料 $\text{WTe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{BN}/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ 构成异质结，其中 Fe_3GaTe_2 是一种二维铁磁金属，具有垂直磁各向异性（PMA）和高于室温的居里温度。通过电流诱导 WTe_2 中的轨道磁矩极化，利用界面 OTT 效应驱动 Fe_3GaTe_2 的垂直磁化翻转，从而实现数据的写入。数据读取通过 $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{BN}/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ 构成的磁隧道结 (MTJ) 来实现。这种全二维的磁电阻存储器实现了在室温下的无外磁场辅助的数据写入和读取。

D45-14

刚性与柔性长效稳定钙钛矿太阳能电池

张助华*

南京航空航天大学

目前，小面积($<0.1\text{ cm}^2$)钙钛矿太阳能电池的光电转换效率已经超过 26%，接近基于硅的商业技术水平。然而，PSC 面临着长期运行稳定性不足的难题，这使得该领域的研究重点从提升转换效率转向改进电池的运行稳定性。为此，科学家们发展了如液相处理方法等来钝化钙钛矿材料表面的缺陷，抑制材料运行环境下的老化，从而实现了能长达数千小时稳定运行的太阳能电池，但器件的面积仅有数平方厘米，无法满足商业化（需达到 900 cm^2 左右）需求。本报告将介绍团队最近发展的一种全新的基于气相的处理方法——气相氟蒸汽处理方法，能在常压下与钙钛矿表面进行大面积均匀钝化反应。与传统溶液处理方法相比，氟蒸汽处理实现了明显更均匀的表面钝化效果，使得整个薄膜能够大面积均匀展现出长的光致发光寿命，同时显著减少了诱发材料降解的缺陷源，从而在可企及的器件区域内实现了效率的一致提升和模组寿命的大幅延长。本报告同时还将介绍如何通过结合表面成分梯度化和功能化钙钛矿来提升太阳能电池的稳定性和效率。最后，报告还将介绍我们通过晶界增韧来提升柔性钙钛矿太阳能电池稳定性方面的进展。

D45-15

介观组装结构的电子显微解析

韩璐*

同济大学

介观结构材料特殊的组装形式及空间效应赋予了其多方面的独特性能，为人们提供了一个调控材料物理化学性质的崭新平台。对介观结构材料进行深入的结构解析和机理研究，不仅关乎其性能与应用，并可据此建立普适性的软物质组装理论，是该领域研究的关键。电子显微学以电子为探针，通过正空间、倒易空间、能量空间信息对材料结构展开研究，对于介观尺度组装结构的解析起着不可或缺的作用。这里将介绍课题组近年来针对不同类型介观结构，包括多种介孔结构、仿生双曲表面结构、手性无机介观结构等材料的电子显微分析工作，发展了针对介观结构的电子显微解析方法，揭示了介观尺度特殊的组装方式、构效关系、形成机制等关键问题。

D45-16

二维锡基卤化物钙钛矿的异质集成及激光研究

师恩政*

西湖大学

锡基卤化物钙钛矿凭借其可调带隙结构、优异的光电性能及低毒性，有望成为铅基钙钛矿的理想替代材料。在本报告中，通过调控生长溶液极性，报告人团队合成了一系列二维锡基卤化物钙钛矿单晶，实现了对量子阱厚度 (n 值) 的精确控制，并结合疏水性 π 共轭配体与双重氧化抑制策略稳定了 Sn^{2+} 。基于此，报告人团队系统研究了锡基钙钛矿薄层单晶的光泵浦激光行为，其荧光与激光行为均展现出了优于铅基钙钛矿的稳定性。此外，提出了一种动力学 Wulff 形状异质外延生长机制，可制备具有可控量子阱厚度 ($n = 1-3$) 的纯相二维铅-锡卤化物钙钛矿异质结构。这一普适性方法为合成多种相纯二维材料及异质结构，尤其是具有复杂晶体结构的材料，提供了可借鉴的新思路。

D45-17**层状混合超晶格中手性超导的特征**

万众*

香港大学

在信息技术和量子科学的交叉点，层状混合超晶格提供了一种新颖的人工超晶格合成方案，通过有机分子与无机二维晶体的结合，实现了前所未有的材料设计自由度。传统的固态异质结构通常受到严格的晶格匹配和化学相容性限制，而层状混合超晶格利用范德华间隙允许不同分子或原子插层而不破坏原有的共价键结构，从而创造出具有可编程电子、光学、自旋和拓扑性质的新型人工量子材料。

我们通过电化学和化学插层方法，成功在二维超导体 TaS₂ 中引入手性分子，构建出手性有机/无机超晶格。并利用相敏测量观察到半磁通量量子相移。这一现象表明手性分子的引入导致了时间反演对称性的自发破缺，并进一步在无外加磁场条件下观察到超导二极管效应，这为实现手性超导性提供了直接证据。此外，层状混合超晶格在电荷-电荷、电荷-自旋以及电荷-晶格相互作用的可控调控方面展现出巨大潜力，为量子计算、自旋电子学和低功耗电子器件提供了新的可能性。

D45-18**基于纳米自组装的呼出气检测**

王铁*

天津理工大学生命健康智能检测研究院，天津市生命健康检测重点实验室

呼出气检测是一种无创的疾病诊断方法，在肺癌的早期筛查中具有广泛的应用前景。然而，呼出气中的肺癌生物标志物种类繁多、含量低，且呼出气成分复杂、流动性强，对气体传感器实现目标分子的高灵敏检测提出了更高的要求。基于此，我们提出了基于纳米粒子组装界面结构的气态分子高灵敏检测传感芯片构建策略。从气态分子的传质动力学角度出发，设计了气体敏感的纳米组装微观界面结构，调节气态分子的捕获和吸附效率，揭示了纳米组装结构效应引起的气体流动形态变化机制，探索影响痕量气体标志物检测的动力学因素，实现了实际环境中气体标志物的选择性捕获和高灵敏检测。并从细胞、器官、活体三个层面研究肺癌相关的气体生物标志物，开发具有临床应用前景的呼出气疾病标志物检测传感器，促进肺癌呼出气检测从理论研究向临床应用的发展，为肺癌呼出气检测传感芯片实现在智能家居中的应用提供技术支撑。

D45-19**胶体分子及其超晶格材料**

聂志鸿*

复旦大学

分子是由原子按照特定方式精确键合而成，它们是参与生命与物质世界演化的最基本单元。打破传统分子体系中尺度与成分的界限，设计和构建由功能化无机纳米粒子组成的胶体分子，将有望加速高性能材料的革新。由于纳米粒子间的等离激元、激子、磁子等耦合作用，这类胶体分子可呈现出独特的集合性质，在传感、催化、超材料和光电器件等领域有重要应用前景。如何操控纳米粒子使其像原子形成分子那样自发地、有方向性地结合在一起，一直是一个充满挑战性的难题。我们团队长期致力于发展自组装构筑新型纳米胶体分子的方法学，探索胶体分子的物理和化学性质，并进一步以其为功能基元构筑超晶格等有序复合材料。

D45-20**3D printing of colloidal inorganic nanocrystals via photochemical bonding**

张昊*

Department of Chemistry, Tsinghua University

3D printing has been a transformative technology for building prototypes and various functional devices. However, direct 3D printing is typically restricted to metals and photocurable polymers. To address this issue, we

develop an approach for 3D printing of inorganic nanomaterials, or abbreviated as 3D Pin. 3D Pin uses (1) preformed, colloidal inorganic nanocrystals with various compositions as “artificial atoms” or building blocks, and (2) the photochemically bonding between nanocrystals via their native ligands with bisazide linkers. The broad library of colloidal nanocrystals and the nonspecific bonding chemistry of these nanocrystals render 3D Pin universal, as exemplified by over 10 semiconductors, metals, metal oxides, and their mixtures. The printing process allows for the formation of 3D objects in arbitrary forms and with nanoscale resolution (~ 150 nm). The printed structures show high materials purity (inorganic mass fraction over 90%), low porosity, high mechanical strength, and show emergent behaviors, such as chiroptical response.

D45-21

液液界面超快速构建胶体粒子超晶格单层膜及其 SERS 生物传感应用

李旭明、龚二猛、朱欣怡、宋丽平、黄又举*

杭州师范大学

由于难以克服的动力学和热力学吸附势垒，传统液-液界面自组装往往呈现耗时、重复性差、无法大面积制备等不足，并导致胶体粒子界面自组装尚未用于纳米薄膜工程化技术开发，进而限制了其功能应用。本报告在纳米粒子组装体系中引入具有超低表面能的全氟分子，赋予纳米粒子超高接触角，将动力学和热力学吸附势垒降低至极限，可以在 5 秒内实现超快速、宏观大面积、二维单层膜组装结构的构建。组装面积可满足工程技术成本要求(>4 英寸)，粒子成膜利用率高达 97.5%。与传统组装策略不同，这种组装技术可普适到多种纳米及微米粒子的快速大面积界面自组装。在全氟配体构筑独立于水油两相的“界面第三相”微环境的基础上，引入温度场，通常被认为对超晶格组装起破坏作用的参数。这一微环境不仅利用其与水-油两相的不相溶性提升了界面稳定性，还通过其低表面能特性显著降低超晶格畴形成及愈合的能量势垒，成功实现了大面积等离子体超晶格单层膜的构筑。纳米粒子二维膜进一步被设计成高性能 SERS 生物传感器，应用于人体健康检测监测领域。

D45-22

DNA 介导纳米超晶格的结构控制与性质研究

林海昕*

厦门大学

纳米超晶格是由纳米粒子组装成的有序材料，由于其组装基元的尺度和种类的多样性，使其可能具有传统晶体所不具备的特殊性质，因此逐渐成为研究热点。目前，已有多种不同结构的超晶格被不同的组装方法成功制备，但所制备的结构大多是密堆积结构，缺乏可控性，这极大地限制了组装体的应用范围。许多报道的性质由组装基元决定，与组装结构关系不大。而 DNA 作为纳米粒子的配体时，由于其相互作用的特异性和可编程性，在纳米粒子组装领域展示出了优越的结构控制能力，目前已经报道了超过 50 种不同结构的 DNA 介导超晶格，但仍然缺乏普适的结构控制策略以及结构相关的性质研究。为了解决这些问题，我们一方面将 DNA 修饰在各向异性的纳米粒子上，使 DNA 具有类似共价键的定向性，因此可通过控制纳米粒子的形状实现对成键数和键角的控制从而控制组装体的微观及宏观结构，成功制备出了包含低对称结构、多孔结构、准晶等复杂组装体，并探究了低对称性超晶体结构相关的异常光学性质。另一方面，结合表面微纳加工的方法，分别实现了对组装基元和组装体位置及取向的独立控制。为纳米超晶格材料的结构控制及器件集成化提供了新的思路 and 方向。

D45-23

纳米粒子的手性组装

刘堃*

吉林大学 化学学院 超分子结构与材料全国重点实验室

通过表面等离子体纳米粒子的手性组装实现手性光学信号的传递与增强的核心机制是当前纳米材料与光学交叉研究领域亟需突破的关键科学问题之一。本报告围绕该问题展开系统研究，重点聚焦纳米粒子

的手性组装行为及其表面等离子体激发下的手性光学响应调控。我们从手性生物分子与等离子体纳米粒子的界面相互作用出发,提出并发展了多种手性信号放大的策略,主要包括基于非手性纳米粒子的长程有序组装策略和基于手性纳米粒子的双重手性增强策略。通过构建半峰宽与峰间距对光学各向异性不对称因子(g 因子)的函数关系,揭示了组装结构有序性与手性光学响应之间的定量关联。在此基础上,发展了系列生物大分子诱导的纳米粒子手性组装方法,成功构筑出具有高有序度的螺旋结构,实现了 g 因子大幅提升(高达 0.12),并在淀粉样蛋白病的早期检测与药物筛选方面取得了重要应用突破。此外,我们通过调控纳米粒子的手性晶面生长,建立了对映体分离与精准合成的新路径,明确了生物体系对纳米尺度手性结构的选择性机制,并提出了基于手性纳米粒子自身组装的双重手性增强策略。该系列研究不仅拓展了手性纳米结构的构筑手段,也为深入理解其在生物识别、诊疗和光学功能材料等领域的应用潜力提供了理论基础与实践支撑。

D45-24

液桥限域微单晶阵列制备

吴雨辰*

中国科学院理化技术研究所

以集成电路为代表的先进制造业和信息技术产业是国家重要的战略发展方向。过去几十年中,纳米科技的发展创造了多种性能优异的纳米材料,但这些材料与传统无机半导体微加工技术不兼容,难以集成到光电器件中。液相微加工技术条件温和,是实现纳米材料到光电功能器件的关键途径。如何控制材料在液相微加工过程中的宏观图案化构筑和微观有序组装成为了高性能光电功能器件产业发展的关键技术瓶颈。为此,报告人从液相加工的关键媒介“界面”出发,结合界面微结构与化学修饰协同作用开发了液桥限域微加工技术:在宏观液膜中,调控局部毛细力梯度分布诱导液膜可控收缩形成图案化微液桥;在微观液桥中,调控蒸发毛细流和马兰戈尼流的动态平衡诱导结构单元的有序组装,实现了大面积、高精度的微单晶图案化制备,构筑了高性能光电器件和功能耦合器件。

D45-25

DNA 胶体组装

姚广保*

上海交通大学

胶体自组装研究致力于通过可编程方式构建目标结构并实现特定功能。胶体超晶格作为由微米/纳米粒子有序排列形成的组装体系,已成为构筑光子晶体、半导体电子器件及多功能光机械超材料的理想平台。这类材料的独特性能源于其精确结构对称性所调控的集体行为,这使得晶体学构型的精准控制成为功能化设计的关键所在。在众多胶体自组装驱动机制中,DNA 杂交技术展现出卓越的结构调控能力,已成功构建出目前最丰富的胶体材料体系。该技术通过水相环境中 DNA 功能化纳米颗粒的可编程相互作用,利用沃森-克里克碱基配对的高度可预测性实现对粒子间作用力的精确调控。DNA 介导的自组装已成功制备出 70 余种对称性可调的超晶格结构,充分彰显了其在胶体结构工程中的强大潜力。

本研究创新性地提出了“减材”图案化策略,通过桶状或四面体 DNA 折纸的选择性表面屏蔽,实现了具有区域特异性键合能力的纳米颗粒构建。通过精确调控 DNA 折纸与纳米颗粒的尺寸比例及结合位点,我们成功实现了颗粒表面可及性的精准控制,制备出具有可调补丁参数的功能化纳米粒子。基于此方法,我们构建了包括二维类石墨烯结构、一维线性链以及三维金刚石构型超晶格等多维度组装体系。这一创新策略为纳米尺度各向异性构建单元的制备提供了新思路,推动了具有特殊对称性纳米组装体的可控构建。该技术在光子晶体、声学超材料和光机械系统等领域具有广阔的应用前景,为新型功能材料的开发开辟了新的研究途径。

D45-26

纳米晶手性超晶格的构筑与性质

杨志杰*

山东大学

手性现象普遍存在，是物质的基本属性之一，与物质的物理、化学和生物性质密切相关。手性分子不仅广泛存在于生命体系，而且在不对称合成与医药领域已得到了广泛的应用。相较而言，控制材料的手性及相关功能研究仍处于起步阶段，是目前化学研究的国际前沿热点。其中，将手性引入到具有独特光电磁性质的无机纳米结构，构筑手性无机纳米材料，已成为近年来手性科学领域新的热点方向。将手性引入到纳米自组装体系，不仅能有效打破纳米晶组装的固有堆积方式，而且由于颗粒间不对称电磁耦合作用，产生手性效应。构筑手性纳米晶组装体的关键是引入对称性破缺要素，从而打破其固有组装方式。然而，由于不同纳米晶的化学组成、尺寸、形状及表面化学性质迥异，难以建立普适性的手性组装方法学。近年来，我们从纳米晶表面化学出发，引入宏观机械力和有机小分子作为对称性破缺要素，打破了纳米晶组装的高度对称性，构筑了手性纳米晶超晶格结构，并建立了手性纳米晶组装的普适性方法。

D45-27**先进透射电镜在纳米晶体自组装研究中的应用**

王达*

华南师范大学

自组装是自然界构筑复杂结构、实现复合功能的有力手段。作为一类胶体，纳米晶体具有可控的理化性质，并且展现出丰富的类原子相行为，被广泛地用在胶体可控自组装。近年来，纳米晶体在受限空间内的自组装成为软凝聚态物质领域的热门研究方向。一方面，研究纳米晶体在受限空间内的自组装为制备具有复杂结构的新型复合功能材料提供了一条有效的策略；另一方面，该研究为理解软凝聚态物质体系的结构与相变供了理想的实验模型，对理解物质的生长机制有着重大的意义。在本次报告中，我将介绍近年来我们在纳米晶体受限自组装及其结构表征中的研究进展。我们利用缓慢蒸发的乳液液滴作为球形受限空间，对纳米晶体进行了可控自组装，制备了一系列结构、组分可控的超粒子^[1-5]。我们开发并利用先进三维透射电镜成像技术(电子断层扫描技术，即 3D TEM)和先进重构方法，实现了对纳米晶体超粒子结构、组分的定量分析，并结合计算机模拟在单颗粒尺度下揭示了纳米晶体超粒子的形成机制。最后，我将介绍如何利用液相透射电镜精准表征纳米晶体晶体的软硬界面^[6]以及纳米晶体在其真实环境下的三维结构^[7]。

参考文献

- [1] Nat. Mater. 2015, 14, 56-60.
- [2] Nat. Phys. 2021, 17, 128-134.
- [3] Nat. Commun. 2021, 12, 3980.
- [4] Nat. Commun. 2018, 9, 2228.
- [5] Nat. Commun. 2022, 13, 6001.
- [6] Nat. Chem. 2024, 16, 1278.
- [7] Nat. Commun. 2024, 15, 6399.

D45-28**纳米自组装超结构材料及应用**

李同涛*

复旦大学

纳米颗粒的自组装是实现其宏观尺度功能应用的关键途径，有望突破单一功能基元的固有性能，构筑具有颠覆性材料特性的超结构。精准调控纳米颗粒的自组装行为，以可控方式构筑高性能超结构材料，是自组装领域的核心科学问题之一。为此，我们提出纳米自识别组装的核心策略，并通过调控纳米颗粒的几何形状和表面配体，发展了曲率识别、类分子识别等普适性组装方法，成功构筑了 Kagome 超晶格、互锁超晶格、堆垛超晶格等新型超结构。在此基础上，利用自组装材料的有序结构及可调控界面特性，从介观-纳米-原子多尺度揭示超结构材料的性能与界面耦合结构之间的构效关系，实现了其在能源催化领域的协同增效。

D45-29**表面活性自组装胶束阵列**

邱惠斌*

上海交通大学

微纳米阵列结构广泛存在于生物体表面和人造材料表面，赋予了表面丰富而独特的功能。在生命体系中，表面微纳米阵列是实现众多生物功能的关键结构。生命体中的微纳米阵列大部分都是柔性的，例如眼球、耳蜗、呼吸道等器官表面上的纤毛，它们承载着感知、输送、保护等重要功能，这些纤毛不但具有纤柔的形态与精确的尺寸，同时还具备多级次的微纳米结构。相比之下，人工合成的主要是模量较高的硬质微纳米阵列，受限于制备过程中高表面能引起的团聚、塌缩等问题，目前已开发的微纳米合成与加工技术难以像生命体一般构建高长径比的柔性微纳米阵列，在柔性主干上进一步构筑复杂的多级次结构更是异常困难；由于缺乏便于功能修饰的柔性多级次结构，传统的微纳米阵列功能拓展也较为困难。针对上述挑战，报告人提出了“表面活性自组装”新思路，建立了在各类材料表面构筑柔性多级次胶束阵列的普适性方法；设计合成了系列表面活性自组装基元，发展了胶束刷毛导向的外延功能化策略，实现了胶束阵列多级结构与功能的系统化定制；完成了胶束阵列在各类部件表面的高效构筑，推动了多类功能单元的精准集成与协同，开拓了胶束阵列的高性能催化、传感与能源应用。

D45-30**硅基异质结构及其光电器件**

皮孝东*

浙江大学硅及先进半导体材料全国重点实验室

在后摩尔时代，硅基光电集成是集成电路发展的重要方向。作为硅基光电集成的基础，硅基异质结构及其光电器件近年来备受关注。我们基于硅技术平台，围绕低维硅材料如硅量子点和硅纳米膜，通过跨尺度创新设计，构建了一系列新型硅基异质结构，制备了从紫外到中红外的宽光谱硅基光电探测器、融合了光传感与存算功能的硅基光电神经突触器件、外量子效率达到 13.2% 的硅基发光二极管、能用于集成电路防伪的硅基光学物理不可克隆函数。

D45-31**胶体纳米晶体表面配体结构、颗粒间相互作用与组装动力学**

樊绍川*

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

胶体纳米晶体自组装作为一种低成本、可规模化制备的自下而上材料构筑策略，在新型功能材料设计与器件集成领域具有重要应用前景。胶体纳米晶体的典型结构由无机核心与有机表面配体组成，其自组装动力学及组装体的力学性质主要受表面配体介导的颗粒间相互作用调控。然而，现有实验技术难以实现对纳米晶体表面配体结构的精确表征，这在一定程度上限制了对颗粒间相互作用机制的深入理解。

本研究采用多尺度分子动力学模拟方法，系统考察了核心尺寸、配体接枝密度、配体种类及溶剂环境等多重因素对溶液中纳米颗粒表面配体结构、颗粒间相互作用及组装动力学的影响。研究发现：对于烷烃炔尾链配体，其构象在纳米晶体表面呈现显著的结构多态性——既可形成无序结构，也可结晶成束。这种结构差异直接影响颗粒间相互作用：无序配体构象导致颗粒间排斥作用，而有序结晶配体则诱导相互吸引。由配体结晶导致的颗粒间相互吸引展现出显著的各向异性。基于此发现，我们通过在配体尾链中引入双键、支链和芳香环等修饰片段，构建了包含 28 种不同配体和 4 种溶剂的配体-溶剂体系库，通过系统的分子模拟计算与自组装实验验证，阐明了修饰片段类型、修饰位点以及溶剂尺寸等因素对颗粒间相互作用的调控规律。本研究通过多尺度分子模拟与实验验证相结合的研究策略，首次建立了胶体纳米晶体中配体结构-颗粒间相互作用-组装动力学的定量构效关系，为理性设计自组装超晶格材料提供了重要的理论依据和方法学指导。

D45-32

半导体/超导体异质界面的原子构造及物态调控

潘东*

中国科学院半导体研究所半导体芯片物理与技术全国重点实验室

基于马约拉纳零能模的拓扑量子计算是研制量子计算机的重要方案,获得稳定可靠的马约拉纳零能模是构建拓扑量子比特的前提。然而,受制于半导体/超导体异质结材料的质量问题,国际上至今仍难以获得稳定可靠的马约拉纳零能模。如何实现半导体/超导体异质界面的原子级构造,从而制备出可稳定展示马约拉纳零能模的量子材料,是半导体/超导拓扑量子计算研究需要解决的首要难题[1-3]。针对这一难题,我们利用分子束外延技术,在 Si 衬底上制备出了纯相超细 InAs 纳米线、单晶 InSb 纳米线及立式二维单晶 InSb 和 InAs 纳米片等高品质半导体纳米结构[4-8]。在此基础上,在这些高质量半导体纳米结构侧壁开展了超导 Al 的低温原位外延,获得了原子级平整的半导体/超导体异质结界面。与合作者通过低温输运测量,在 InAs/Al 纳米线中测得了硬超导能隙、双电子周期的库伦阻塞及库仑阻塞峰随磁场从双电子到单电子的演变等输运特征[9,10]。在大幅提高 InAs/Al 纳米线材料和器件质量后,观测到了量子化零偏压电导峰。该电导峰在量子化附近(5%精度范围内)形成一个电导平台。这是首次观测到随三个实验参数变化(磁场和两个门电极)都可形成平台的“量子化岛”[11]。实验结果同马约拉纳或准马约拉纳的预言吻合。此外,我们与合作者将上述超细 InAs/Al 纳米线加工成了约瑟夫森结,实现了超导二极管效应,约瑟夫森结超导二极管的整流效率达到 100%[12]。我们首次在国内发展出了高质量半导体/超导体异质纳米结构的低温原位分子束外延技术,样品质量及输运数据已优于国际同行水平。这些结果为下一步基于该材料体系的拓扑量子计算等研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] J. D. Sau, R. M. Lutchyn, S. Tewari, S. Das Sarma, Phys. Rev. Lett. 2010, 104, 040502.
- [2] R. M. Lutchyn, J. D. Sau, S. Das Sarma, Phys. Rev. Lett. 2010, 105, 077001.
- [3] H. N. Pan, C. X. Liu, M. Wimmer, S. Das Sarma, Phys. Rev. B 2021, 103, 214502.
- [4] D. Pan, et al., Nano Lett. 2014, 14, 1214.
- [5] D. Pan, et al., Nano Lett. 2016, 16, 834.
- [6] D. Pan, et al., Nano Lett. 2019, 19, 1632.
- [7] S. L. Yan, et al., Nano Lett. 2023, 23, 6497.
- [8] M. F. Xue, et al., Adv. Mater. 2023, 35, 2208952.
- [9] D. Pan, et al., Chin. Phys. Lett. (Express Letters) 2022, 39, 058101.
- [10] S. Zhang, et al., Phys. Rev. Lett. 2022, 128, 076803.
- [11] Z. Y. Wang, et al., Phys. Rev. Lett. 2022, 129, 167702.
- [12] H. T. Su, et al., Phys. Rev. Lett. 2024, 133, 087001.

D45-33

配体共价键合稳定纳米晶体超晶格

王颂*

华南师范大学

无机纳米晶体自组装的超晶格已成为具有多种结构和新兴功能的强大材料平台。然而,由于颗粒间的相互作用较弱,它们对溶剂和其他刺激的结构稳定性较低,从而限制了其应用。现有的稳定纳米晶体超晶格的策略通常需要在自组装之前设计或掺入特殊配体,并且仅适用于某些特定的纳米晶体、配体和结构。在这里,我们报告了一种通过配体强共价键合稳定具有不同纳米晶体组分和结构的超晶格的通用方法。其核心是使用光触发的氮宾交联剂,该交联剂不会干扰自组装过程,同时非特异性且有效地结合纳米晶体的天然配体。金属、半导体和磁性纳米晶体的稳定二维和三维超晶格在暴露于不同极性的溶剂(从甲苯到水)时保持其结构,并表现出高热稳定性和机械刚性。该方法还可以进一步稳定二元纳米晶体超晶格,超出了以前方法所能实现的范围。当用作表面增强拉曼光谱的可重复使用基底时,稳定的超晶格表现出强大且可重复的功能,这为开发不同的 NC 超晶格在更广范围内的应用创造了条件。

D45-34

量子点电致发光器件与材料

金一政*

浙江大学

在过去几年中,量子点发光二极管(QLED)原型器件的效率和寿命取得了巨大的进步,预示着以量子点发光二极管为基础的印刷显示技术有望应用于新一代的低成本、大面积、节能、高色域、超薄柔性显示器件。我们课题组围绕量子点电致发光的激子动力学这一关键科学问题开展研究,通过“激发态机理-材料化学-器件工程”三者循环反馈,理解量子点激发态性质、传输层材料光电性能、器件结构和器件性能之间的有机联系,从而为QLED“量身定制”相应的功能层材料与器件结构,实现了多尺度的高性能电致发光器件。

D45-35

太赫兹半导体光频梳

黎华*

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

光频梳在精密光谱、成像、通信等领域具有重要应用。在太赫兹(THz)波段,基于半导体多量子阱子带电子跃迁的量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)具有电泵浦、体积小、大功率等优点,是实现芯片级THz光频梳与双光梳的理想载体。在本工作中,基于大功率THz QCL器件与激光自探测,研究团队实现了窄线宽THz芯片光频梳与THz双光梳。并进一步提出了法里树锁定、相对锁相、自参考、杂化锁定等方法,提升THz光频梳与双光梳信号的长时稳定性。

D45-36

一维纳米材料组装与器件

刘建伟*

中国科学技术大学

纳米线结构单元可控组装及组装体功能是研制面向高技术应用的新型功能器件的丰富的物质基础之一,而发展简便、可靠、有效的纳米线组装技术是实现纳米线材料未来应用的关键。构筑宏观尺度纳米线组装体及其功能化不仅可以改进一维纳米材料的本征性能,而且可以创造出新的纳米特性和功能。而宏观尺度纳米线组装材料体系中又存在多种类型的界面,它们已成为该体系结构的重要组成部分,其界面效应及多尺度耦合效应将内生出不同于纳米结构单元物性的新功能,将是纳米材料实用化的基础。同时,不同种类、尺度的纳米线共组装不仅有效的解决了纳米结构单元的团聚问题,有利于实际应用,更在组装科学上生出不同于单一纳米结构单元的新的原理和方法。

利用纳米组装技术设计微观结构,调控器件中微观粒子传输效率,研制了多种高性能柔性智能响应器件。介绍近期发展的一些界面诱导纳米组装技术,研究纳米结构单元在界面的浸润、分散和组装规律,并制备出一系列纳米线多级结构薄膜。发现纳米微观结构设计,可以有效提升电子、光子等微观粒子的传输效率,促进柔性器件性能提升。制备了基于有序纳米线的柔性智能响应器件,并实现了多刺激响应。

参考文献

1. Manipulating Hetero-nanowire Films for Flexible and Multifunctional Thermoelectric Devices, Cheng Chen, Feng-Qi Xu, Jian-Wei Liu* et al. Adv. Mater. 2024, 36, 2400020.
2. Nanowire-based smart windows combining electro- and thermochromic for dynamic regulation of solar radiation. Si-Zhe Sheng†, Jin-Long Wang†, Jian-Wei Liu* and Shu-Hong Yu* et al. Nat. Comm. 2023,14, 3231.
3. Self-assembly of nanowires: from dynamic monitoring to precision control. Zhen He, Jin-Long Wang, Si-Ming Chen, Jian-Wei Liu*, and Shu-Hong Yu*, Acc. Chem. Res. 2022, 55, 1480-1491.
4. Biomimetic multimodal receptors for comprehensive artificial human somatosensory system Cheng Chen, Jie-Long Xu, Jian-Wei Liu* et al. Adv. Mater. 2024, 36, 2313228.
5. Efficient Methanol Oxidation Kinetics Enabled by an Ordered Hetero-Catalyst with Dual Electric Fields,

Tian Liu, Qing-Xia Chen, Zhen He, Jin-Long Wang, Si-Zhe Sheng, Jian-Wei Liu* and Shu-Hong Yu*, J. Am. Chem. Soc. 2025, 147, 5340–5349.

D45-37**半导体莫尔超晶格中关联态增强的激子非线性和相干性**

谭青海*

中国科学技术大学

Semiconductor moiré superlattices formed by stacking layered transition metal dichalcogenides have attracted significant attention due to their unique properties and potential applications. These moiré systems have demonstrated various phenomena, including strong optical nonlinearity, abundant correlated insulating states, anomalous quantum Hall effect, excitonic insulator, and ferromagnetism, which enable them promising in various applications, such as quantum simulator.

In this talk, I will talk about the giant optical nonlinearity of interlayer excitons in WSe₂/MoS₂ Moiré superlattices, we found that the coherence of moiré interlayer excitons can be enhanced through boson excitonic correlation and effects of Fermions correlated insulating states. Our work represents a significant step towards the application of semiconductor moiré materials in the fields such as quantum simulators and quantum information processors.

D45-38**Pressure tuning of hybridized excitons in_x000B_vdW heterostructures**

许杨*

中国科学院物理研究所

The weak van der Waals (vdW) forces between layers of two-dimensional materials and their heterostructures allow for versatile control over the interlayer coupling, opening new possibilities for exploring various emergent quantum states. Here, by developing gate-tunable optical spectroscopy within a diamond anvil cell (DAC), we demonstrate that 2H-stacked trilayer WSe₂ can host strongly hybridized excitons with four mixing species, i.e., interlayer/intralayer ground/excited states, under high pressures up to 6.6 GPa. These excitons manifest through a systematic spectral evolution of the optical resonances, showing pronounced enhancements of energy-level anticrossing and redistribution of oscillator strength. This enables us to determine the increase of hybridization strength between the intra- and interlayer excitons by a factor of three, and further distinguish their independent contributions in the hybridized states. Our findings illuminate the prospect of studying dynamically tunable bosonic interactions and engineering novel optoelectronic devices through the manipulation of the interlayer spacing.

D45-39**基于二维材料的范德华超晶格**

段曦东*

湖南大学

二维范德华超晶格具有可设计的结构和电子特性,并具有现有材料无法达到的新颖功能,不仅为精准操控原子界面处载流子、激子、光子及声子等提供了可能,也为新一代超薄、灵活和透明的电子和光电器件带来了新的机遇。为此,将不同的材料整合成异质结和超晶格,通过对化学成分和电子结构进行精细的空间调制,实现特定的电子功能,是化学材料科学界一直追求的目标。到目前为止,二维范德华异质结主要是通过机械剥离和逐层重新堆垛的方法获得。然而,其有限的产率和可重复性对于高阶超晶格的制备构成了指数级的挑战,限制了二维范德华超晶格的实际应用。我们利用毛细管效应和内应力导致薄膜自发卷曲的原理,引发二维原子晶体垂直异质结的自发卷曲,实现了高阶范德华垂直超晶格的精准构筑。利用界

面耦合作用，实现了高阶范德华超晶格的电子能带结构、手性、维度等物理性质的协同调控。研究为相关凝聚态物理研究提供了丰富的材料平台，为新型半导体结构集成电子器件的设计与开发奠定了重要基础。

D45-40

螺旋莫尔材料的四维制备及物性研究

樊晓鹏*

太原理工大学

二维莫尔超晶格材料被认为是新兴人工量子材料，在功能更丰富，功耗更低的应用有极大的前景。然而当下莫尔材料在材料横纵向尺寸 (x, y)，材料层数更多(z)，转角更丰富(θ)等四维可控方面仍然存在巨大的挑战。本课题组从螺位错驱动生长机制出发，结合非欧几里得衬底（不平整表面）的引入，采用化学气相沉积技术，实现了扭曲螺旋 WS_2 莫尔超晶格四维制备初步探索（具体为：成功制备三角、六角、扭曲三角和扭曲六角螺旋莫尔材料，材料尺寸 5-100 微米可调，材料层数 5-50 可调，层间转角 6-60°可调），得到了扭曲螺旋莫尔材料其非线性光学性质随层间转角渐变周期性振荡的光学性质，本研究可为莫尔材料四维可控制备提供更多解决方案，其新颖性质发现有利于丰富扭曲电子学认知。

D45-41

太赫兹量子级联激光光源研究进展

陆全勇*

北京量子信息科学研究院

太赫兹量子级联激光器(THz QCL)作为一种新兴的太赫兹辐射固态源，在医学、传感和通信等众多应用领域引起了人们的关注。然而由于所用波导结构的亚波长限制和多种模式激励，很难直接通过增加其器件面积来提升器件的光束质量和亮度。实际应用中，通常使用外部的光学透镜来增强太赫兹的光束亮度。在这次报告中，我将介绍一种具有相位设计太赫兹光子晶体谐振腔，可在大面积器件中实现单模高亮度面发射。同时由于其独特的子带间跃迁和快速增益特性，中红 QCL 拥有强大的非线性特性，使其成为非线性光子学的理想平台，通过腔内差频可在室温下直接产生太赫兹信号。在本次报告中，我将介绍我们在室温差频 THz QCL 研究方面的最新进展和未来面临的主要挑战。

D45-42

从无序到有序——二维杂化超晶格的模块化合成

周劲媛*

南开大学

二维原子晶体因其原子级厚度的层状结构、可调控的电子能带结构（涵盖超导体、金属、半导体、绝缘体等）及丰富的物性（如拓扑绝缘态、铁磁性等），成为研究低维量子限域效应的理想材料平台。显著的电子限域效应和高度暴露的表面赋予其独特的光、电、磁、热学等特性，对这些性质的精准调控是材料化学的重要研究方向。相较于二维材料体系，有机功能分子具有更丰富的结构可设计性，可通过化学合成和官能基团修饰实现性质的精准定制，但其较差的环境稳定性和难以形成长程有序固态薄膜的特性，限制了其在电子器件中的应用。有机-无机杂化超晶格通过将功能分子嵌入二维层状材料的范德华层间，构建具有周期性层状结构的异质体系，同时保留了二维材料和有机分子两种组分的功能多样性。二维杂化超晶格通过范德华力介导的跨尺度组装，突破了传统材料设计的维度壁垒，实现了从埃米尺度（有机小分子）到微/纳米尺度（二维原子晶体）的多维度调控。二维材料和有机分子之间的界面耦合效应可实现对材料的电子结构、光学性质和化学活性的精确调控，并可能诱导新物态的出现。这种维度融合的策略有效整合了二维材料的结构多样性和分子工程的灵活可设计性，为构建人造量子固体平台提供了新思路，可在单层极限下实现了对多体相互作用（如关联电子态、激子-极化激元、自旋轨道耦合等）的协同调控。这种从无序到有序的材料设计新范式，极大地拓展了物性调控的维度，为发展新型功能性纳米电子器件奠定了基础。

墙报

D45-P01

模板法和熵驱动组装的低密度超晶体

孙志伟、林海昕*

厦门大学

无机胶体纳米颗粒的有序组装体可以表现出单颗粒所没有的特性。然而，这些组装体的结构多样性受到组装基元几何结构的限制，这些基元通常只允许有限的几种组装配置。在本研究中，我们介绍了一种三步走策略，包括生长、组装和蚀刻。这种方法利用 Ag 壳层的空间位阻效应和体系的熵驱动力，可将常规纳米颗粒构建为非常规低堆积密度超晶体。其中，可利用单晶 Au 纳米球实现面心立方（FCC）、体心立方（BCC）和简单立方（SC）超晶体的受控组装。同时，我们使用八面体纳米颗粒成功地构建了具有尖端接触的非常规二维（2D）超晶格，以及 BCC/SC 三维（3D）超晶体。此外，该方法的适用性扩展到菱形十二面体、单晶纳米棒和十面体，允许构筑偏离传统封装规则的非经典组装体。小角散射技术表征了这些非常规组装体的相结构。有限差分域（FDTD）仿真证实，这些非常规架构表现出差异性的光吸收和增强的电磁耦合。该方法为构筑可调堆积密度的纳米粒子组件建立了一个强大的范式，从而为自下而上制备超材料提供了新的思路，对功能纳米材料的设计具有深远的影响。

D45-P02

星形纳米晶的类价键编程自组装

高雨童、万思好、李同涛、董安钢*

复旦大学化学系

当前，纳米晶自组装研究涉及复杂结构体系，主要集中于各向异性纳米晶的精确组装，但以凸面体颗粒的自组装为重点。本研究设计了一种独特的星形 FeCoMnOx 纳米晶，其构型特征表现为六个凹面和十二条棱。这种形状设计旨在突破传统凸多面体系统的组装瓶颈。通过采用曲率匹配的类价键自组装策略，该纳米晶成功实现了八面体与立方八面体的拓扑配位构型，有效解决了球形纳米晶组装中取向有序性的难题。我们通过熵驱动界面控制技术，结合排空力的精准调控，构建出具有 $p4m$ 和 cmm 对称性的可编程二维二元超晶格，并成功制备出 $p4g$ 、 $p6m$ 及 $AB4$ 三种非密堆积结构，突破了经典空间填充理论的限制。此外，该策略已拓展至三维组装领域，成功制备出直径达 20 微米的 NaCl 型和 Cu_3Au 型块体超晶格，充分展示了凹面体在跨维度组装中的卓越潜力。本研究不仅揭示了星形纳米晶在几何兼容性方面的独特优势，还为多组分超晶格材料的定向构建提供了可靠的理论与实验支持。

D45-P03

基于曲率介导的排空力构建非常规超晶格

万思好、李同涛、董安钢*

复旦大学化学系

为了构建精确可调的复杂超晶格，研究者们曾尝试以各向异性纳米晶和补丁颗粒作为构建基元进行自组装，但现有研究主要集中于简单凸形基元，颗粒取向调控能力仍然受限。本研究发现，非凸形哑铃状纳米晶（纳米哑铃）在曲率介导的排空力调控下，展现出从二维延伸至三维的互锁自组装行为。通过调控纳米哑铃局部曲率，我们可精准灵活调节颗粒键合方向性——此控制精度在传统凸形基元中难以实现。这些纳米哑铃能够长程有序组装形成多种复杂二维超晶格（如手性 Kagome 晶格）及三维互锁榫卯超晶格。理论计算表明 Kagome 晶格是热力学稳定相，其中排空力对稳定非密堆积结构至关重要。此外，三维互锁榫卯超晶格呈现显著力学性能增强，其弹性模量与硬度分别提升了 200.8% 和 317.9%（相较于非互锁六方组装体系）。Kagome 晶格等非常规结构的发现与三维互锁超晶格的优异力学性能共同印证了非凸形纳米晶在构建高性能复杂精密材料方面的巨大潜力。

D45-P04

几何自适应相互作用：构筑对称性及取向有序度可调的二元超晶格

郑子玥*

复旦大学

纳米晶体自组装是一种基于纳米尺度的材料组装技术，通过利用基元之间的氢键，范德华力，静电力等相互作用，使纳米颗粒自发地组装成具有特定结构和功能的材料。而二元纳米晶体超晶格的构筑，将不同理化性质的基元针对性的集成到单个超结构中，同时实现基元的有序排列，使其最大程度的发挥协同效应和集体效应，这为多功能材料的设计打开了广阔的空间。然而，超晶格的结构调控，尤其是同时实现对纳米颗粒的排列方式以及取向顺序的双重调控，仍然面临巨大挑战。

我们报道了一种几何自适应二元组装策略，通过四氧化三铁球状纳米颗粒和一种兼具凹面和凸面的哑铃形状稀土纳米颗粒的共组装，得到了不同结构的二元超晶格。通过对纳米颗粒形状的调整，实现了对纳米哑铃排列以及取向顺序的双重调控。

基于形状互补效应，纳米小球选择性的占据纳米哑铃的凹面，两者共组装形成了大面积高质量的二元超晶格。其中，纳米哑铃的六棱柱形凸面对相邻纳米哑铃施加指向性相互作用，指导纳米哑铃实现取向高度一致的六方排列。同时，通过调整处于纳米哑铃凹面的纳米小球的尺寸，可以连续的调控相邻纳米哑铃凸面间的距离，从而调控其所施加的指向性相互作用的大小，得到一系列不同结构的二元超晶格。我们观察到，随着纳米小球尺寸的增大，纳米哑铃从六方排列转为四方堆排列，过程中还伴随着纳米哑铃取向有序度的连续变化。当纳米小球尺寸被限制在一个特定的范围内，出现了一种独特的结构：四方超晶格中，存在夹角 30 度的两种取向纳米哑铃，且这两种取向的哑铃在四方超晶格中随机分布。纳米哑铃采用这样独特的取向顺序，以调和其固有的六重对称形状与四方超晶格的四重对称性，这是纳米哑铃几何自适应的结果。最后，我们通过几何计算不同排列模式下纳米哑铃的凹面孔隙尺寸，确定相变的临界值，搭建了合理的预测框架以实现超晶格结构的调控和预测。

这种几何自适应二元组装策略为设计具有可编程排列结构和取向顺序的二元超晶格提供了一种思路，并有望推广到多种非凸纳米晶体系。

仅发表论文

D45-PO01

单元大小对超结构材料的抗压性能影响的实验研究

蒋仕豪、赵欣、刘海博、吕会扬、朱健健*

中国民用航空飞行学院

3D printing technology enables the fabrication of complex geometries and is particularly well-suited for the manufacturing and optimization of lightweight structures. As a mainstream additive manufacturing method, Fused Deposition Modeling (FDM) offers unique advantages in the fabrication of composite materials. Lightweight design has become a fundamental requirement for modern aerospace materials. However, the design of lighter and higher-performance materials remains a great challenge. In order to break through this bottleneck, this study conducted a Fused Granular Fabrication (FGF) 3D printing to construct metastructures using Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) material. ABS is known for its low density and high compressive strength. When ABS is used to print architected metastructures, a substantial reduction in material weight can be achieved. The design approach in this study is based on the Kresling origami model. The fabricated metastructures consist of unit cells with varying volumes. Compression testing is employed to evaluate how cell volume influences compressive performance. Experimental results indicate that unit cell volume has a significant influence on the compressive performance of the material. These findings provide new insights into the design of light-weight metastructures and lay a theoretical foundation for future structural optimization, as well as the exploring of high-performance and light-weight structures by means of 3D printing.