

2023 年
第 24 期

先进制造 与新材料

ADVANCED MANUFACTURING
& NEW MATERIALS BRIEFING



上海科学技术情报研究所
上海市前沿技术发展研究中心
技术与创新支持中心(TISC)

超晶格为器件研究提供重要材料平台

编者按

1970 年，美国 IBM 实验室的江崎和朱兆祥提出了超晶格的概念。他们设想如果用两种晶格匹配很好的材料交替地生长周期性结构，每层材料的厚度在 100nm 以下，则电子沿生长方向的运动将会产生振荡，可用于制造微波器件。这个设想两年以后在一种分子束外延设备上得以实现。可见，超晶格材料是两种或多种不同组元以几个纳米到几十个纳米的薄层交替生长并保持严格周期性的多层膜，事实上就是特定形式的层状精细复合材料。

超晶格材料及其性质的研究一直是半导体物理学、材料科学、微电子学和光电子学中一个非常活跃的领域。因其独特结构带来的电学、光学以及磁学性质，超晶格在电子器件、光电器件、量子器件、磁存储等领域展现出广阔的应用前景。

本期《先进制造与新材料》简报对近期国内外在超晶格基础研

究、材料合成、应用研究等方面取得的相关成果予以介绍。

目 录

基础研究.....	1
剑桥大学发现多晶合金中超晶格本征层错.....	1
中国科学家新成果奠定光晶格量子计算基础.....	2
材料合成.....	4
复旦研究团队提出超晶格组装新方法.....	4
中美学者在单原子层铂自组装超晶格材料研究方面取得进展....	6
应用研究.....	8
有序结构量子点超晶格应用于提升光电探测性能.....	8
中南大学在莫尔超晶格量子器件研究领域取得新成果.....	10

基础研究

剑桥大学发现多晶合金中超晶格本征层错

超晶格本征层错（SISF）是喷气发动机中使用的现代镍基高温合金低温蠕变变形的罪魁祸首，其存在的温度范围为 $650 \sim 800^{\circ}\text{C}$ ，在反相边界（APB）剪切和爬升辅助滑行之间运行，且与单晶和多晶合金都有关联。虽然这些层错是在 50 多年前发现的，但它们的成核机制仍不清楚。更好地理解这一过程可以助力更准确的机械性能预测模型和制造具有卓越性能的合金的新策略。

SISF 位错排列也解释了这种蠕变状态的应力取向和温度依赖性。这些材料的低堆垛层错能有利于在基体中将完全位错分裂成 Shockley 部分。在析出物中，SISF 传播促进了单轴紧张和压缩，因为这些加载方向产生的剪应力与方程式中超偏的 Burgers 矢量对齐。相反，反向加载会在前导部分产生更大的剪切应力，有利于 SESF 的形成和微孪晶，后者需要在与 SESF 相邻的滑动平面上滑动额外的前导部分。此外，这种加载状态下的粘塑性行为源于断层前端附近的扩散过程。隔离在 SISF 之前形成的元素降低了缺陷的能量损失，并且超部分之后的局部原子重新排序将最初形成的高能断层转换为能量低得多的 SISF。SISF 成核过程之前的步骤尚不清楚：这两个共面和不同位错最终恰好在相邻的原子平面上两种位错之间的排斥性质暗示了这一事件只是偶然发生的可能性很小。有人提出位错的交叉滑移-单晶超合金的通道可以促进所需的相遇，尽管他们预测这对于加载方向作为相关的全位错固定处与界面会有 60° 混合晶格。然而，所有这些机制仍然限于理论。

剑桥大学材料与冶金系 León-Cázares 等人通过透射电子显微镜提供第一个实验证据，证明 SISF 从多晶合金中的交叉滑移事件中成核。在提出的成核机制中，交叉滑移允许两种不同的形成 SISF 所需的位错在沉淀界面的相邻平面上相遇。引入新生层错的概念：在晶体平面上形成的初始堆垛层错，其位错在滑离时继续形成共面层错。这种成核机制和随后的位错演化被详细考虑到单个 Shockley 部分和所涉及的完全位错上的剪切应力，以及交叉滑移的能垒的应力方向依赖性。这些发现将指导该领域未来的表征工作，并为更现实的蠕变行为预测模型的建模提供信息。相关论文以题为“Nucleation of superlattice intrinsic stacking faults via cross-slip in nickel-based superalloys”发表于金属材料顶刊《材料学报》（*Acta Materialia*）。

分析表明，滑移面和交叉滑移面上的剪切应力促进了双交叉滑移行为。当二者需要在 γ/γ' 界面位错，交叉滑移可以促进初生 SISF 成核所需的反应。在完全形成这种层错后，位错可以通过在沉淀内的耦合和在基质中去耦合而在相邻平面上继续滑动，从而在其尾流中形成额外的 SISF。所提出机制的变化可能对镍基高温合金蠕变过程中其他平面缺陷的形核产生进一步的影响。

相关链接：

- [1] 剑桥《Acta Materialia》：首次实验证实！多晶合金交滑移形成超晶格本征层错[EB/OL]. (2022-11-13)[2023-12-18]. https://www.sohu.com/a/605265995_344863.
- [2] 首次试验验证！剑桥大学发现多晶合金中超晶格本征层错[EB/OL]. (2022-12-12) [2023-12-18]. <https://www.toutiao.com/article/7176060836375560719/>.
- [3] F.D. León-Cázares, R. Schlütter, F. Monni et al. Nucleation of superlattice intrinsic stacking faults via cross-slip in nickel-based superalloys [J/OL]. *Acta Materialia*. (2022-12) [2023-12-18]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645422007509>.

中国科学家新成果奠定光晶格量子计算基础

量子纠缠是决定量子计算性能的重要技术。中国科学技术大学潘建伟院士、苑震生教授等与清华大学马雄峰副教授、复旦大学周游副研究员合作，使用光晶格中束缚的超冷原子，通过制备二维原子阵列、产生原子比特纠缠对、连接纠缠对的分步扩展方式制备了多原子纠缠态，并通过显微学技术调控和观测其纠缠性质，向制备和测控大规模中性原子纠缠态迈出重要一步，为研制新型高性能量子计算机奠定基础。该研究成果近日发表在国际知名学术期刊《物理评论快报》（*Physical Review Letters*）。

量子纠缠是量子计算的核心资源，量子计算的性能将随纠缠比特数目的增长呈指数增长。因此，大规模量子纠缠态的制备、测量和相干操控是该研究领域的核心问题。在实现量子比特的众多物理体系中，光晶格中的超冷原子比特具备良好的相干性、可扩展性和高精度的量子操控性，成为实现量子信息处理的理想体系之一。

自 2010 年开始，中国科大研究团队系统研究了光晶格中原子的多体相变、原子相互作用、熵分布动力学等，并于 2020 年实现纠缠保真度为 99.3% 的 1000 多对原子纠缠态。这一系列研究工作推动了原子纠缠对保真度的提升和原子并行操控能力的增强，为连接扩展成更大的多原子纠缠态、进而开展量子计算研究打下基础。但是，在之前的工作中，由于技术上对单原子比特操控能力仍然不足、光晶格相位漂移较大、缺乏多原子纠缠判定的有效方法，进一步连接纠缠对和测控多原子纠缠态遇到了瓶颈问题。

为解决上述问题，潘建伟、苑震生团队研发了一种新型的等臂交叉束干涉、自旋依赖超晶格系统，并集成自主研发的单格点分辨、宽波段消色差的量子气体显微镜和多套用于光斑形状编辑的数字微镜，兼具多原子全局并行和局域单格点测控的能力，并实现了晶格相位长期稳定。

在此基础上，该团队取得填充率为 99.2% 的原子二维阵列的制备及原位观测，选择其中 49 对原子制备了纠缠贝尔态，平均保真度为 95.6%，寿命为 2.2 秒；进一步，他们使用纠缠门将相邻纠缠对连接起来，制备了 10 原子一维纠缠链和 8 原子二维纠缠块，首次突破光晶格中原子纠缠对连接和多原子纠缠判定的瓶颈，为开展更大规模的光晶格量子计算和模拟打下基础。

《物理评论快报》高度评价该成果，审稿专家认为：“此工作向使用光晶格体系开展基于测量的量子计算迈出重要一步。”

相关链接：

[1] 中国科学家新成果奠定光晶格量子计算基础[EB/OL]. (2023-09-07)[2023-12-12].

https://epaper.timedg.com/html/2023-09/07/content_1695361.htm.

[2] 量子纠缠研究新突破！中国科学家新成果奠定光晶格量子计算基础[EB/OL]. (2023-09-06)[2023-12-18]. https://www.guancha.cn/industry-science/2023_09_06_707584.shtml.

[3] Weiyong Zhang, Minggen He, Hui Sun et al. Scalable multipartite entanglement created by spin exchange in an optical lattice [EB/OL]. Physical Review Letters. (2023-08-18)[2023-12-18]. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.131.073401>.

材料合成

复旦研究团队提出超晶格组装新方法

日前，上海复旦大学赵东元院士团队提出新型材料组装方法，借此造出一种多孔碳材料，在电化学钠储存上具有一定的潜在应用。

上述方法的原理在于将软胶束基元与硬刚性颗粒互相结合。也就是说，这种方法是一款软硬协同的顺序组装法。其中：软胶束基元，指的是三嵌段共聚物 Pluronic F127/聚多巴胺复合材料；硬刚性颗粒，指的是胶体二氧化硅纳米球。硬二氧化硅球的引入，不仅巧妙绕过了软胶束组装的不兼容，而且还能保持与 F127/聚多巴胺胶束的充分相互作用，从而可以制备双峰有序的结构，进而可以制备多孔碳材料。这种多孔碳的孔隙可以被调控，并能够快速进行氧化还原反应，具有良好的赝电容钠离子存储性质，有望为组装介观结构、多尺度纳米结构、以及复杂层次结构的提供新的解决方案。研究人员尝试将多孔碳用于制备钠离子电池，测试结果显示这种电池的性能较为出色。

不过，该课题仍然处于基础研究范畴。一方面，研究人员只是在实验室进行少量合成，距离量产还有一定距离；另一方面，这种合成方法在成本上能否替代同类商用产品还是一个未知数，而要想实现实用化和产业化还需要更多的探索。

作为一类新型纳米结构，由有序纳米颗粒组成的三维超晶格，在光电器件、能量转换、催化、存储等方面具有广泛的应用潜力，近年来一直备受学界关注。通过调整和集成纳米颗粒的协同功能、组成单元、形态、尺寸，可以有效地控

制超晶格材料的性质。随着纳米粒子自组装的不断发展，已经出现多种超晶格材料包括金属氧化物、化合物、团簇等由刚性构件组成的超晶格。然而，将软材料比如超分子胶束组装成具有多重有序的结构，或者组装成复杂性的层次结构，仍然存在较大挑战性。

胶束是由两亲性表面活性剂/嵌段共聚物组成的软凝聚态物质。对于胶束来说，它里面的大多数介孔结构来源于具有高可控性和通用性的单胶束组装，但是这时的胶束里面只有一个周期介孔。多个胶束或与其他介观单位的协同组装，可以为探索新性质和新技术提供潜在机会。

不过，与硬纳米晶超晶格不同的是，目前依旧很难合成复杂胶束的超晶格。当前主要存在困境是：软超分子组装的关键在于如何合理平衡组装单元之间的相互作用。这就需要在组装过程中既有足够的作用力，同时也要保持软模板分子的亚稳态，也就是所涉及的不同胶束或介观单元必须既能独立共存、又能相互作用。而在多数情况之下，不同胶束更加倾向于自发融合或自发聚集，这就导致在组装时会出现互相干扰，从而让多胶束组装体系的建立遭到严重限制。

课题组基于此开展了研究，即基于超晶格材料中面临的一些不足，提出新的路线和方法。

课题组在研究中通过使用各种表征技术，对所合成材料的结构和理化性质进行全面分析和详细证明。在软-硬模板的巧妙帮助之下，研究人员进行精细的次序组装，借此构筑出含有有序双峰的多孔超结构，为新型介孔材料的发展提供了宝贵见解。

担任论文共同通讯作者的内蒙古大学教授兰坤表示：“整体来看，我们这次只是尝试使用一种迂回策略来实现双重有序孔结构。对于软胶束的多元组装来说，本质上并没有得到真正的解决。”

所以，课题组打算继续开展两方面的探索：

其一，计划实现更高级别的超级装配，在该次方法的基础之上实现更多元、更多组成的集成组装，包括将外层从两层变为多层，以及实现不同的物质组分。同时，将内层氧化硅变成其他纳米形貌、以及其他功能性内核，甚至在内核还可以赋予更多功能，例如在二氧化硅球里包覆活性物质或者掺杂活性物质，以此拓展更多的潜在应用。

其二，面向软胶束之间不兼容、无法相对稳定存在、且组装时彼此互相干扰的问题，通过设计控制两种不同的胶束单元，来进行真正意义上的二元自组装。“虽然十分困难，但是相信这样的研究在介孔材料组装合成领域会具有重要意义。”兰坤说。

相关链接：

[1] 复旦赵东元院士团队提出超晶格组装新方法，软硬结合打造新型多孔碳材料，有望实现电化学的钠储存[EB/OL]. (2023-10-18) [2023-12-15].

<https://new.qq.com/rain/a/20231018A06NPU00>.

[2] Lu Liu, Yalin He, Sixing Yin et al. Bimodal ordered porous hierarchies from cooperative soft-hard template pairs [J/OL]. Matter. (2023-08-23)[2023-12-15].

[https://www.cell.com/matter/pdf/S2590-2385\(23\)00381-8.pdf](https://www.cell.com/matter/pdf/S2590-2385(23)00381-8.pdf).

中美学者在单原子层铂自组装超晶格材料研究方面取得进展

在国家自然科学基金项目资助下，北京航空航天大学郭林教授团队与美国加州大学洛杉矶分校段镶锋教授团队合作，在精准构建非晶单原子层铂自组装超晶格材料研究方面取得进展。相关研究成果以“具有单原子层铂和可编程有机配体的杂化层状超晶格结构”（Hybrid lamellar superlattices with monoatomic platinum layers and programmable organic ligands）为题，发表在化学类国际权威期刊《美国化学会志》（*Journal of the American Chemical Society*）。

单原子层或少原子层厚度的超薄二维金属材料具有与传统块体材料显著不同的物理和化学特性，在催化、光学和电子学等领域展现出潜在的应用。然而，与石墨烯等本征层状材料相比，金属材料倾向于形成紧密堆积的三维结构，其单原子层厚度超薄二维结构的精准构建一直是无机合成领域的重大挑战之一。

维度调控是改善贵金属纳米材料性能的重要途径，其中二维贵金属纳米材料尤其是原子级厚度二维纳米材料的可控制备一直是无机合成领域内研究的难点。研究团队提出一种基于不同羧酸配体的精准调控策略，成功制备了二维非晶单原子层铂和有机配体层自组装而成的层状超晶格材料。

所制备的单原子层铂自组装超晶格材料具有独特的原子/电子结构。其铂层厚度约为 0.4 nm，具有长程无序和低配位的非晶结构，且电子由铂向羧酸配体发生了偏移；在长链配体间范德华力的作用下，单原子铂层倾向于组装为层状超晶格结构，该过程由原位 DLS 和 SAXS 实验证实。配体的存在可以有效降低单原子铂层的表面能，其诱导产生的超晶格结构还可有效缓解应力应变，提高了原子级厚度二维金属纳米材料的结构稳定性。

该研究工作还提供一种在原子尺度对贵金属纳米材料微结构进行精准调控的方法，设计合成一系列具有不同长度和结构有机配体的层状超晶格材料；还可以在原子尺度对材料的层间距、电子结构和配位环境等进行精准的调节，进一步调控催化反应的活性和选择性。该合成策略还可推广至银、金等超薄二维非晶金属材料，具有良好的普适性。

理论研究表明，不同配体的选择可以有效调节糠醛催化加氢过程中过渡态的结构和势垒，进一步调控产物的选择性。最终，实现催化产物为糠醇或四氢糠醇选择性精准可调，且具有良好的催化循环稳定性。

该研究揭示了非晶单原子层铂自组装超晶格材料独特的原子/电子结构、优异的催化特性和良好的结构普适性，为原子级厚度二维非晶金属材料可控合成、结构调控和构效关系研究提供了新思路。

相关链接：

- [1] 我国学者与海外合作者在单原子层铂自组装超晶格材料研究方面取得进展[EB/OL]. (2022-12-29)[2023-12-15]. <https://www.nsfc.gov.cn/publish/portal0/tab1218/info88076.htm>.
- [2] 北航郭林课题组 J. Am. Chem. Soc.：单原子层铂自组装超晶格材料[EB/OL]. (2022-12-30)[2023-12-15]. https://www.sohu.com/a/622701619_635042.
- [3] Pengfei Hu, Haosen Yang, Shulin Chen et al. Hybrid Lamellar Superlattices with Monoatomic Platinum Layers and Programmable Organic Ligands [J/OL]. Journal of the American Chemical Society. (2022-12-22)[2023-12-15]. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jacs.2c11928>.

应用研究

有序结构量子点超晶格应用于提升光电探测性能

红外光电探测器可以获取目标反射和自发的红外辐射，具有抗干扰性强、全天候观测、探测距离远、分辨率高等优点，在国防、通信、遥感、航天等领域中扮演着不可替代的角色。目前量子点红外探测器主要以旋涂方式制备无序结构的量子点膜，这种无序结构对于载流子分离与传输不利。而量子点光电器件的性能强烈地依赖于量子点间耦合的强度，可以通过增强量子点之间的载流子离域来改善光电性能和电荷传输。最近的研究表明，量子点之间高能态和空间无序的存在会削弱电子耦合，从而严重抑制量子点薄膜中的电荷输运。

鉴于此，华南师范大学半导体科学与技术学院刘霄副研究员和南方科技大学电子与电气工程系 Byung-Ryool Hyun 教授利用 PbS 量子点纳米晶体在硅衬底上的自组装，获得具有微米尺度高度有序且密堆积的 PbS 量子点超晶格，并研究长程有序对形成介晶 PbS 量子点超晶格探测器光电特性的影响，结果表明，退火处理诱导其形成具有优选生长取向的介晶超晶格，这是通过取向性连接实现的。与旋涂法得到的无序量子点结构和溶剂挥发法得到的紧密堆积超晶格相比，介晶超晶格的取向对电子离域和耦合的改善明显，并表现出优异的光电探测性能。这种性能的提高归因于量子点之间的有序原子排列，从而增强电子的离域耦合。此项研究预示着介晶超晶格在下一代量子点光电器件方面具有广阔的应用前景。文章使用透射电子显微镜（TEM）、选区电子衍射（SAED）和掠入射小角 X 射线散射（GISAXS）技术对 PbS 量子点超晶格的结构性质进行表征。

该工作制备了三种不同类型的光电探测器，包括随机堆积结构、紧密堆积超晶格和介晶超晶格，并对它们的晶体结构和器件性能进行了比较。结果表明，退火处理诱导了具有优选生长方向的介晶超晶格，与无序量子点结构和紧密堆积的超晶格相比，介晶超晶格的取向改进和电子耦合表现出优异的光电探测器性能。实验结果表明，介晶超晶格中存在微尺度到原子尺度的有序化结构，对下一代量子点光电器件的制备具有很好的启发。

介晶超晶格在面心立方的[111]superlattice 平面上形成了六边形层，也被称为“蜂窝超晶格”。此外，所对应的选区电子衍射（SAED）图像表明 PbS 量子点具有很高的结晶度和取向性。根据介晶超晶格的放大 TEM 和 SAED，可以推断出 PbS 量子点沿其{111}QD 晶面排列，在六角形平面结构中孔间距为 12.3 nm。使用两层截断八面体单元构建的介晶超晶格模型，其中六个{100}和八个{111}晶面展示出通过{100}QD 晶面附着的过程。这种结构与介晶超晶格的结构一致，呈现蜂窝结构，相邻的三个量子点之间的键角约为 90°。HRTEM 图像清楚地表明，相邻量子点具有高晶体质量和择优结晶方向的融合原子晶格。

为了进一步证实量子点紧密堆积超晶格、介晶超晶格之间的结构和取向差异，进行了 TEM 和扫描透射电子显微镜（STEM）表征。结合文章的支持信息可知，BCC 紧密堆积和 FCC 紧密堆积共存于界面自组装的 PbS 量子点中，这与之前的报道是一致的。FCC 紧密堆积超晶格的 TEM 图像显示出六方电子衍射斑点，这归因于量子点的部分取向生长。为了研究介晶超晶格中原子的堆积方式和相干度，采用像差校正的高角度环状暗场（HAADF）STEM 测量来观察原子晶格。图像显示了由两层量子点组成的超晶格的六边形周期，以及量子点的形状变形。当量子点彼此接近时，它们在平面上的转动自由度越小，导致相对的{100}之间

的静电和范德华相互作用占主导地位。由于量子点间距离的减小，相邻的量子点之间开始形成晶桥。这些面内的{100}引力具有方向性，使得超晶格的对称性从面心立方或体心立方转变为具有向上指向的{111}面的六角形。

为了在微米尺度结构中形成原子尺度的有序结构，对 FCC 或 BCC 密排超晶格的样品进行了退火热处理，以产生介晶超晶格，去除部分表面绝缘配体，进一步改善 PbS 量子点器件的电荷输运特性。利用 GISAXS 对介晶超晶格的结构性质进行了更详细的表征。紧密堆积超晶格的 GISAXS 图案显示出强烈的光斑，不同的散射峰被标记为面心立方超晶格和平行于衬底的(111)superlattice 平面。图案中观察到的尖峰显示了紧密堆积超晶格在纳米尺度上的高周期有序。旋涂 PbS 量子点薄膜的 GISAXS 图案与紧密堆积的超晶格相比，旋涂的 PbS 量子点薄膜显示出具有微弱峰的环状图案，表明样品为多晶结构。介晶超晶格的 GISAXS 图案中，没有指示纳米尺度的面心立方或体心立方堆积的散射峰。相反，散射峰来自介晶超晶格中的六角形排列。计算得到的空穴-空穴距离为 12.5 nm，与相应的 STEM 和 TEM 的图像一致，表明介晶超晶格中存在着微米尺度到原子尺度的有序化。

采用旋涂的 PbS 量子点薄膜所制备的器件是不导通的，因此这篇文章主要研究紧密堆积超晶格和介晶超晶格的光电性能，绘制超晶格器件在 80°C 下退火 15 分钟前后的转移曲线。对于退火和非退火器件，从转移曲线得出的载流子迁移率与之前的报道一致，表明在超晶格固体中形成的融合连接增强了电子耦合并导致更高的迁移率。光电探测器的响应度 (R) 和探测率 (D^*) 分别提高大约两倍和三倍。在相同条件下，介晶超晶格器件的 R 和 D^* 都高于紧密堆积超晶

格器件，这归因于通过脱落配体形成 PbS 量子点介晶超晶格，改善了光电性能，增强了电荷输运。

相关链接：

[1] 华南师大《Small》：有序结构量子点超晶格应用于提升光电探测性能[EB/OL]. (2023-05-13) [2023-12-18]. https://www.sohu.com/a/675311158_344863.

[2] Chuanglei Wang, Zhenjun Chen, Zheng Liu et al. Adjusting Microscale to Atomic-Scale Structural Order in PbS Nanocrystal Superlattice for Enhanced Photodetector Performance [J/OL]. Small. (2023-04-17)[2023-12-18]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sml.202300975>.

中南大学在莫尔超晶格量子器件研究领域取得新成果

近日，中南大学物理与电子学院教授刘艳平、何军与美国加州州立大学北岭分校 Gang Lu、澳大利亚悉尼大学刘宗文以及湖南大学潘安练、段曦东教授等国内外学者合作，在《先进材料》（*Advanced Materials*）上发表题为“TMDCs 莫尔超晶格层间耦合效应的量子调制”（Strong Interlayer Coupling in Twisted Transition Metal Dichalcogenide Moiré Superlattices）的研究论文。

在范德瓦尔斯材料中，层间扭曲或晶格失配可以形成莫尔超晶格（Moiré superlattices），其周期随着扭曲角的变化而连续变化。莫尔超晶格可以产生空间周期性的莫尔势，改变材料的电子和能带结构，从而产生强相关联的量子现象，为研究多体系统的量子模拟提供可能，促进了量子光学器件的发展。

二维莫尔超晶格为探索新的强相关联的物理现象提供一个强大的平台，这些现象都取决于界面层间耦合相关的莫尔势。

目前，莫尔超晶格主要通过机械剥离技术和人工堆叠方法制备。然而，人工转移方法不可避免地造成由不纯界面引发的层间耦合在空间上的不均匀性，阻碍了对周期性莫尔超晶格物理性质及其应用的深入理解。因此，直接生长具有均匀的层间耦合和最小晶格重构的莫尔超晶格仍然是一个挑战，对莫尔超晶格的应用构成严重限制。

针对这一难题，该研究创新性通过 Sn 原子辅助生长克服堆积自由能，并使用 CVD 生长技术直接制备不同扭角的 WSe_2 莫尔超晶格。利用低频拉曼散射光谱验证了其均匀性，证明了强的界面耦合。扭曲角为 1.5° 的 CVD 生长的莫尔结构的莫尔势比人工堆叠的更深（增加了 155%），表明界面耦合可以调节莫尔势的深度。第一性原理模拟揭示莫尔超晶格中的平带现象，为莫尔激子的产生提供理论基础。

该研究成果提出一种合成二维莫尔超晶格的新方法，并为设计和优化其莫尔性能提供策略，这种新策略将有望用于量子计算、量子通讯、新型超导体等领域。

据悉，“低维物理与量子器件”是中南大学物理与电子学院特色研究方向和“十四五”规划重点发展支持方向之一。此项研究得到国家自然科学基金面上项目、湖南省自然科学基金杰出青年项目、湖南省重点研发项目、湖南省芙蓉学者特聘教授基金、中南大学创新驱动青年团队项目、中南大学高性能复杂制造国家重点实验室自主研究课题、澳大利亚 ARC Discovery、博士后面项目等多个项目的支持，并获得中南大学高性能计算公共平台在材料结构计算等方面提供的有力支持。

相关链接：

[1] 中南大学在莫尔超晶格量子器件研究领域取得新成果[EB/OL]. (2023-02-12)[2023-12-18].
<https://news.csu.edu.cn/info/1061/155065.htm>.

[2] Haihong Zheng, Hongli Guo, Shula Chen et al. Strong interlayer coupling in twisted transition metal dichalcogenide Moiré superlattices [J/OL]. *Advanced Materials*. (2023-01-28)[2023-12-18].
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.202210909>.



地址：上海市永福路 265 号

邮编：200031

编辑：吴春莹

责编：崔晓文

编审：林鹤

电话：021-64455555

邮件：istis@libnet.sh.cn

网址：www.istis.sh.cn