

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

D14-量子材料的表面与界面
D14-Surface and Interface of Quantum
Materials

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



分会编号. D14. 量子材料的表面与界面

分会主席：杜轶、陈岚、郝维昌、冯宝杰、冯海凤

D14-01

氮化硼二维单晶的外延生长

白雪冬

1. 中国科学院物理研究所

D14-02

Understanding the coexistence of electron spin resonance and Kondo resonance in FePc

Bing Wang

University of Science and Technology of China

The coexistence of electron spin resonance (ESR) and the Kondo effect in many Kondo systems has long been a subject of fascination for the condensed matter physics community. The interplay between d- and f-orbital electrons in these systems has made the underlying mechanism elusive and actively debated. The advent of STM-ESR—a hybrid technique combining scanning tunneling microscopy (STM) and ESR spectroscopy—has enabled atomic-scale investigation of these phenomena. However, some recent studies on single Cu adatoms and FePc molecules, seemingly simple systems, reported an unexpected correlation of both ESR and Kondo resonances with a single spin-1/2 state, which obviously intensifies the debate. These observations raise a critical and widely discussed question: what is the microscopic mechanism underlying the coexistence of the both processes in single magnetic impurities?

In this talk, I will focus on understanding the mechanism of the coexistence of ESR and the Kondo effect in individual FePc molecules on MgO/Ag(100). We find that there are two $S = 1/2$ spin states in the Fe(II) $d\pi$ and dz^2 orbitals, which respectively contribute to the ESR and Kondo channels, rather than a single spin $S = 1/2$ state. By measuring magnetic resonance imaging (MRI) and minimizing variations in experimental parameters, we also reveal that the spatial distribution of ESR linewidth in the MRI mapping closely resembles the breaking symmetry of $d\pi$ orbitals due to Coulomb interactions, as supported by our DFT calculations. This MRI mapping of ESR linewidth provides for the first time the direct spatial characterization of the spin-lattice relaxation enhanced by the Pc ligand in single FePc molecules, which can help explain the previously observed $T_1 < T_2$ in FePc, in contrast with the typically observed $T_1 > T_2$ in single magnetic atoms. Moreover, our results can provide a better interpretation of the observed non-localized spin interaction in FePc dimers. Our findings not only advance the fundamental understanding of the observation of ESR signals in Kondo systems, but also open up avenues for potential applications in fields such as spintronics, quantum computing, and high-density data storage based on single molecular magnets.

D14-03

单原子层一维和二维材料的原子级精准构筑

于淼

电子科技大学

单原子层一维和二维材料的原子级精准构筑在表界面科学的精准操控、物性的深度探索与量子调控、颠覆性器件性能的突破等方面展现出多维度的重要性。特别是在凝聚态物理、材料化学和纳米科技交叉领域，这种精准构筑不仅为理解低维量子现象提供了理想模型体系，更为下一代信息存储、能源转换和量子计算等颠覆性技术奠定了材料基础。

其中，分子束外延生长（MBE）和表面合成是自下而上原子级精准构筑低维材料的核心手段。MBE通过超高真空环境中精确控制原子或分子束流，实现单原子层逐层外延生长，适用于单原子层无机材料的设计与构筑。表面合成则利用基底表面限制效应，通过前驱体分子模块的定向化学反应在基底表面直接构

建一维原子链或二维共价有机框架，为单原子层的有机低维材料构筑提供了高效平台。

本工作系统介绍了 MBE 方法构筑的多种一维、二维无机单层结构以及多层范德华界面，包括石墨烯、硼烯、过渡金属硫属化合物等；通过超高真空原位表征技术结合密度泛函理论计算，探索了这些材料的独特电子结构、结构相变、自旋、输运和催化性能。同时，利用表面合成技术，构筑了多种一维、二维有机单层结构，包括一维手性纳米链/带和二维宽禁带有机半导体，并研究了其逐步反应的变化过程和机制。针对表面合成领域的主要挑战，本工作还提出了将表面合成从金属基底扩展到半导体基底、从二维侧向耦合扩展到三维层间共价耦合的有效策略。

D14-04

低维合成材料中的新奇物性

冯宝杰

中国科学院物理研究所

二维合成材料不具有层状母体材料，仅能通过外延生长的方法获得。这类材料种类丰富，可以通过人工设计原子结构来实现丰富的物性，包括二维拓扑、阻挫、多铁等。在此次报告中，我将简要介绍我们团队近年来发现的几种新型的二维合成材料，成功实现了多种重要的低维拓扑、关联和多铁态。我们利用扫描隧道显微镜、角分辨光电子能谱等表面分析技术研究了这些材料的电子结构，并揭示了其可能的应用前景。

D14-05

二维材料的层间/层内结构原子级构筑与性能调控

武旭

北京理工大学

二维过渡金属硫族化合物（TMDs）材料，凭借其丰富元素构成和独特的原子结构，可以拥有先进半导体性质和多种电子关联物性。面向未来小尺寸、高性能器件应用，如何从原子尺度精确的调控二维 TMDs 的性质，成为了目前重要的研究方向，发掘新奇物性，推动新型信息功能器件发展。基于此，我们针对二维 TMDs，开展了范德华层间和层内的原子级构筑研究，并对其表、界面结构物性开展了高精度表征研究[1-3]。对于强层间耦合的二维半导体 PtTe₂ 等，其具有高载流子迁移率和优异的空气稳定性。我们利用范德华衬底的掺杂作用影响，在单层石墨烯（MLG）和双层石墨烯（BLG）界面上，成功制备出具有连续界面的单层 PtTe₂ 平面内电子结。通过不同层厚的二维材料带来的层间屏蔽作用，实现单层 PtTe₂ 的掺杂浓度性质的调控[4]。二维关联电子体系，如 VTe₂ 等具有丰富的量子物性，引入 Janus 结构，可以破坏中心反演对称并引入晶格调控，改变材料的原子结构。我们利用直接硒化法，可以将 VTe₂ 三明治结构原子层内的 Te 亚原子层精准替换为 Se 原子，构筑出自然界不存在的 VTeSe 体系，实现对其结构的原子级精准调控。这种崭新的 Janus 结构破坏了原本晶格的反演对称性，产生了由电荷调制参与的全新的 CDW 态，该研究为二维关联电子体系结构物性的高精准调控提供了新的方法[5]。

D14-06

铬硒非层状二维材料的表面及界面驱动电子态

苟健

浙江大学

含铬过渡金属硫族化合物因具有磁性而受到广泛关注，铬的硫族二维相不能通过解理三维块材的方式获得，却可以通过化学气相沉积和物理沉积的方法制备。其中，特别是通过 CVD 方法所制备的铬硒二维材料展现出面内铁磁和空气中稳定的特性，有利于实用化的二维自旋器件的开发。在我们的工作中，通过分子束外延生长的策略，我们发现可以获得另外一类铬硒的二维异构相，他们是具有 7 个原子层厚度的 Cr₈Se₁₂ 和具有 5 个原子层厚度的 Cr₂Se₃，并证实他们都是对空气稳定的二维半导体。此外，通过高空间

分辨的低温扫描探针显微表征技术，我们分别在 $\text{Cr}_8\text{Se}_{12}$ 中发现了表面 $2/3$ 层 Cr 原子填充所带来的类 Kagome 电子结构，和在 Cr_2Se_3 中观察到了载流子浓度调控下的电子有序相的演变。在半导体性属性的基础上，这一全新非层状铬硒二维材料为未来场效应自旋电子器件及关联电子器件的开发提供一种备选的方案

D14-07

极低温强磁场旋转扫描隧道显微谱仪的研发和应用

潘庶亨

中国科学院物理研究所

我们自主研发建设了一台极低温强磁场 STM 系统，其极限低温可以达到 3.5 mK，STM 扫描头可以在极低温和高达 18 T 的磁场中绕两个轴旋转。在研发过程中和建设完成后，我们对诸多超导材料进行了大量实验研究，发现了很多有趣的物理现象。尤其是在对铁基超导体 KFe_2As_2 的研究中，我们发现在其表面的超导转变温度 T_c 和上临界场 H_{c2} 都可增强为体材料的 5 倍，这一发现为研究二维超导提供了绝佳的实验平台。

D14-08

过渡金属氧化物界面的超导特性及其调控

曾长淦

中国科学技术大学

过渡金属氧化物超导界面由于电荷、晶格和自旋等多自由度间的强耦合，展现出极为丰富的物理特性，成为研究非常规超导的理想平台。同时，这类界面中二维电子系统的高度可调控性，也为新奇量子态的探索与调控提供了重要机遇。在本报告中，我将介绍基于 $\text{LaAlO}_3/\text{KTaO}_3$ 和 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 氧化物界面的超导特性及新奇量子态的研究进展，主要包括：1) 在 $\text{Ti}/\text{LaAlO}_3/\text{KTaO}_3(111)$ 隧穿结中，实验发现弱势垒下隧穿谱在超导能隙内呈现双峰结构，而强势垒下该特征消失。这一现象与理论计算的 p 波超导体隧穿特征高度一致，暗示 $\text{LaAlO}_3/\text{KTaO}_3$ 界面可能具有 p 波超导特性[1]；2) 基于 $\text{LaAlO}_3/\text{KTaO}_3(110)$ 界面，首次在同一系统中同时观测到正常与反量子格里菲斯相，并通过控制量子涨落实现了对这些相的有效调节[2]；3) 在 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 界面，发现面内弱磁场可以显著增强其超导临界温度和临界电流，进一步研究表明，这种增强可能源自界面磁畴的翻转过程，且超导增强幅度与 dxz,yz 轨道电子高度关联[3]。这些发现不仅加深了对氧化物异质结中新奇量子现象和非常规超导机制的理解，也为新型量子器件的发展提供了基础。

D14-09

基于扫描隧道显微镜的量子材料表面原子操纵及其应用

陈辉

中国科学院物理研究所

利用扫描隧道显微镜可以在单原子层次上对材料进行操纵，改变其结构与特性，实现原子级结构与物性的精准调控。近年来，扫描隧道显微镜原子操纵技术被广泛用于新型低维材料的精准构筑与物性调控。将介绍应用原子操纵技术对低维量子材料物性调控的最新研究进展，包括多原子自主操纵技术、原子空位操纵技术以及新型探针操纵模式：1) 探针局域电场模式；2) 调节探针-样品垂直间距模式；3) 无损形态调控模式；4) 可控裁剪刻蚀模式。通过这些原子操纵技术，实现表面原子结构调控与人工量子结构的构筑，并引入局域的电场、磁场、应力场等，实现在单原子层次上对低维材料的折叠边界态、电荷密度波、配对密度波、自旋轨道极化子、马约拉纳束缚态等新奇物性进行精准地调控。

D14-10

氮杂环卡宾嵌入纳米石墨烯的表面合成及电子结构研究

陈婷

中国科学院化学研究所

石墨烯纳米结构因其高度可调的物理化学性质，在有机光电材料与器件、自旋电子学以及未来的量子信息技术等领域展现出广阔的应用前景。本研究提出了一种在纳米石墨烯结构中引入氮杂环卡宾基元以引

入自由基的新思路。通过精心设计的前驱体分子和表面辅助的 C-N 偶联反应，我们首次在 Au(111)表面上成功合成了氮杂环卡宾衍生的纳米石墨烯多自由基分子。借助原子级精度的表征技术，我们揭示了这些自由基分子在 Au(111)表面上的结构和电子结构，阐明了电子结构及自旋特性与分子结构之间的内在联系，并揭示了氮杂环卡宾结构以及扩展 π 共轭体系对分子电子结构及自旋特性的调控规律。

在此基础上，我们进一步发展了一种基于表面缩环反应的方法，用于在纳米石墨烯体系中引入氮杂环卡宾基元。以含有嘧啶环的分子为前驱体，通过热退火策略，我们在 Au(111)表面成功构筑了氮杂环卡宾嵌入的六苯并晕苯 (NHC-HBC) 单体和二聚体结构。我们详细阐明了表面缩环反应的机理，并揭示了表面分子的电子结构及其与 Au(111)衬底之间的电荷转移作用。此外，我们利用 DFT 和 CASSCF/NEVPT2 方法深入研究了 NHC-HBC 单体及二聚体的本征电子结构和自旋特性。研究表明，氮杂环卡宾结构的引入不仅增强了分子 SOMO 的离域特征，还使其 SOMO 分布沿分子对称轴呈现方向性。我们进一步阐明了 NHC-HBC 单体具有开壳层特征，而 NHC-HBC 二聚体均呈现反铁磁相互作用，且反铁磁耦合的强度与氮杂卡宾结构的相对位置密切相关。

本研究提出了一种新型的氮杂环卡宾衍生石墨烯纳米结构的精准构筑方法，为开发新型自旋材料提供了重要的理论和实验基础。

D14-11

用于针尖增强光谱的原子结构针尖设计与局域梯度表征

张尧

中国科学技术大学

针尖增强光谱技术已经可以将单分子成像的空间分辨率推进到了单个化学键尺度，其中扫描探针的形貌（特别针尖尖端的原子级突起）对超高空间分辨率和强局域场增益有重要作用，并且此时局域场的梯度效应及其它高阶过程也会显著影响单分子的光谱特征。对于大尺寸的针尖来说，由于巨大的计算成本，传统的量子化学软件包只能模拟具有少数原子的金属团簇的拉曼散射，这不足以描述整个针尖对尖端极化过程的重要贡献。这里我们提出了一个结合原子级离散偶极近似(DDA)模型和密度泛函理论(DFT)的原子极化模型，用于模拟具有亚波长尺寸的大型金属针尖的拉曼光谱。在该模型中，针尖的极化率由整个针尖贡献，但针尖的振动模式以最尖端少数原子的贡献为主。研究发现，针尖的拉曼光谱特征对尖端的组成元素、原子堆积模式和尖端形貌非常敏感，因此可以作为“指纹”来识别不同原子结构的针尖。该方法可以进一步扩展到亚波长尺寸的金属针尖，并可以作为一个基本工具，以经济快速的方式实现对金属尖端和其他纳米结构的拉曼散射过程的模拟，有利于进一步理解原子结构在针尖和表面增强光谱中的作用。此外，我们还利用单分子作为探针，基于对其不同对称性振动模式在局域场下的拉曼极化响应过程的差异，实现了对局域场及其场梯度空间分布的实空间成像表征，并探究了不同针尖形貌对局域场及其场梯度空间分布的影响，提供了在亚纳米尺度上探测局域场梯度空间分布的一种新方法，为研究纳米光学中的高空间分辨率起源及其非线性过程提供了科学基础。

D14-12

单层 NiI₂ 的制备和自旋极化边缘态的实现

王宇¹、赵鑫磊²、姚莉⁴、刘慧如¹、程鹏¹、章一奇¹、冯宝杰¹、马锋杰³、赵瑾⁴、孙家涛⁵、吴克辉¹、陈岚^{*1}

1. 中国科学院物理研究所

2. 清华大学

3. 北京师范大学

4. 中国科学技术大学

5. 北京理工大学

二维体系的边缘态是一个具有独特性质的一维导电通道，探索具有自旋极化边缘态的量子材料对发展低功耗的电子器件、量子计算等具有重要意义。通过裁剪具有体边对应关系的二维磁性半导体材料来构建稳定的自旋极化边缘态是一种较为可行的方法。最近的研究表明，NiI₂ 是一种具有螺旋自旋序和手性诱导电极化的二维II型多铁性半导体。然而，单层极限下多铁性材料的一维自旋极化边缘态尚未得到研究。本文报道了利用分子束外延技术在碘修饰的金表面成功合成了单层 NiI₂ 岛。自旋极化的扫描隧道显微镜/谱

实验表明, 单层 NiI₂ 岛具有取向选择的自旋极化边缘态。进一步通过磁场扫描, 我们实现了边缘态在两个自旋极化状态下的切换, 并表现出回滞现象。结合第一性原理计算, 我们进一步证实了边缘态是自旋极化的, 且选择性地沿着 Ni 截止边而不是 I 截止边。这个结果将为通过选择边缘取向来调制边缘态及开发自旋电子器件提供机会, 并为新型拓扑态的研究提供可能的平台。

D14-13

基于自由基活化的表面在位反应

刘培念

中国药科大学

利用表面分析技术可以在原子水平对在位反应的中间体和反应产物进行精准表征, 代表了精准合成的研究新范式。其中, 环化脱氢反应是一种重要的成环反应, 能够直接将非平面分子转化为平面共轭的碳基纳米材料。然而, C-H 键能量较高使得脱氢反应需要在高温条件下进行, 同时分子中普遍存在 C-H 键且其键能差异较小, 也使得脱氢反应的选择性受到限制。

最近, 我们利用开放壳层共振结构的自由基加成显著降低了脱氢反应的温度, 并进一步提高了反应的化学选择性, 实现了在室温下通过金属 Au(111)表面诱导的脱氢成环反应。并且, 通过扫描隧道显微镜和非接触原子力显微镜等技术, 成功可视化了脱氢成环反应过程, 揭示了中间体的非平面结构, 并通过密度泛函理论计算进一步支持了该反应路径的合理性。在该研究中, 室温脱氢成环反应不仅能有效避免传统方法中高温脱氢对材料结构的损害, 还通过自由基加成反应的可逆性及热力学差异, 提高了反应的选择性(图一) [1]。该研究为表面上可控的有机分子脱氢提供了新的策略, 并为低温合成平面共轭碳基纳米材料开辟了新的研究方向, 具有潜在的应用价值。

D14-14

电流驱动的马基米德分子马达

吕京涛

华中科技大学

单分子结是理解极端小尺度下的非平衡统计和热力学过程的理想平台。即使在单分子尺度, 分子的输运性质也会受到分子自身或周围环境中多种自由度的影响, 比如分子振动、局域光学模式、自旋等。对这些相互作用及其伴随的不同形式能量转换过程的研究可以帮助我们更好的理解小尺度热力学和非平衡统计基本过程, 也有助于拓展单分子结在基础研究中的功能。这个报告将以电子-振动耦合导致的电子与原子自由度之间的传热、做功过程为例, 分析一个电流驱动的手性分子马达的理论设计和实验实现。

D14-15

二维笼目半导体的理论计算

孙家涛

北京理工大学

笼目材料具有独特的原子排布, 通常导致电子间破坏性相位相干而产生平带并引起多种新颖物态, 包括拓扑物态、强关联效应及超导性等, 因此笼目材料受到凝聚态物理学家们的广泛兴趣。这里我们研究了几种含无机或有机分子框架的二维笼目半导体材料。二维无机材料基质系统所预测的大量非共线磁结构使得其具有丰富多彩的拓扑物态, 这些磁结构决定了其与笼目基元相互作用的性质。有趣的是, 在非共线且非平面性的磁构型体系中, 即便是存在铁磁性与反铁磁性混合状态, 仍能观察到较大的拓扑陈数现象。通过对手性共轭有机分子进行研究我们进一步发现了其能够构成非中心对称的笼目格点, 从而实现高度量子化的拓扑物态特性, 这来自于分子间电子态而非原子占位。值得注意的是, 在具有强烈自旋轨道耦合作用的体系中(例如有机笼目半导体), 光子频率对体材料内部电子自旋态的依赖作用与波矢空间所表达出的拓扑特性之间会存在强烈的耦合效应。这种相互作用可以将实空间中离域的色散能带束缚为高度局域化的拓扑平带状结构, 有望实现高温环境下复杂量子霍尔效应相关的新颖物态。

D14-16

电子关联调制材料催化性能

胡振芑

南开大学

电子关联是凝聚态物理研究的重点之一，利用电子关联效应调制表面、界面电子结构，能够有效材料的催化反应性能。利用电子自旋交换相互作用和界面电子库仑作用，设计电子结构的调制方案，实现对 OER、ORR 等反应的高效催化。

D14-17

介观尺度二维氢键有机框架的制备及电子平带结构观测

高健智、张鑫、潘明虎

陕西师范大学

平带 (FBs) 是一种强相互作用的量子系统，近年来引起了人们越来越多的关注，从能带结构上看，平带就是关联的体现，能带越平关联就越强，体系就越“量子材料”。然而，平带材料的实验生长和合成一直具有较大的挑战性，实验方面很难实现二维晶格模型中预测的由破坏性量子干涉产生的平带结构单层材料。我们前期报道了基于氢键的组装结构[1]，本文我们研究了基于 1,3,5-三(4-羟基苯基)苯 (THPB) 分子的二维氢键(H-bond)有机框架(HOFs)在 Au(111)基底上的自组装生长。高分辨扫描隧道显微镜 (STM) 及低能电子衍射 (LEED) 结果显示了 THPB-HOF 薄膜的中尺度以及高度有序等特征，更重要的是，角度分辨光电子能谱结果显示了整个布里渊区的平带特征。密度函数理论计算分析表明，所观察到的拓扑平带来自于一个没有原子呼吸键的隐藏电子呼吸-kagome 晶格[2]。我们的研究表明，HOFs 自组装为合成二维有机拓扑材料提供了一种可行的方法，为探索拓扑平带的多体量子态铺平了道路。

D14-18

碳基小分子在金属表面的选择性脱氢环化

蔡金明

昆明理工大学

低维碳基纳米材料在电子、信息、能源、航空航天、国防等涉及国计民生的诸多领域有着广阔的应用前景，有望获得大规模应用、主导未来高科技产业。我们利用超高真空分子束外延-扫描探针显微镜等表征手段，可在实空间中表征碳基小分子的反应过程，精准构筑各类低维碳基纳米材料，如碳基多孔材料、石墨烯纳米带、纳米石墨烯等，从而精准调控其电子结构特性。

我们将几种碳基小分子蒸发在金属表面，并通过沉积速率、退火温度等调控，通过控制苯基迁移、多米诺脱氢环化、翻转脱氢环化等，精确构筑了几种碳基纳米石墨烯。结合理论计算，对低维碳基纳米材料制备机理和反应过程进行了深入探究。这些研究结果为表面新型物理化学反应及新型碳基纳米材料的合成提供了新的思路。

D14-19

SnO₂ 表面 O 空穴的直接碳酸根还原电催化机制研究

巨文博*、王俊、陈腾飞

华南理工大学

与电化学还原气态 CO₂相比，电化学还原 HCO₃⁻/CO₃²⁻能够耦合 CO₂捕集与转化步骤 [1]，省去了能量密集的 CO₂回收和压缩步骤，并有望实现捕集 CO₂分子的近乎完全转化效率 [2]。然而，大多数已报道的 HCO₃⁻/CO₃²⁻还原过程是通过 HCO₃⁻/CO₃²⁻在双极膜界面分解生成的 CO₂分子为中间态，其实质仍是电化学 CO₂还原。而双极膜界面过程需要额外的电能输入 [3]。

本研究探索了 SnO_x 表面上的直接 CO₃²⁻还原反应 (CO₃RR) [4]。密度泛函理论 (DFT) 计算表明，SnO₂表面存在的氧空位 (VO) 能显著增强其对 CO₃²⁻的吸附反应活性，吸附中间体 (*CO₃) 可通过拉曼光谱检测。原位电化学拉曼光谱确认了在部分还原的 SnO₂-xVO 表面上形成了 *CO₃，并确定了 *CO₃形成所需的电位条件。基于原位拉曼光谱的系统研究结果，发展了脉冲电解方法，成功将 CO₃²⁻转化为一氧化碳 (CO)，首次实现从 CO₃²⁻溶液中直接生成 CO 气体。我们提出了一个可行的反应循环过程，包括 SnO₂的部分还原、

CO₃²⁻的吸附与还原, 以及 SnO₂的再生, 为连续进行直接 CO₃²⁻还原提供了新的策略。

D14-20

Epitaxial Growth and Properties of Novel 2D Materials & Heterostructures

Yeliang WANG

School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

The novel properties of graphene honeycomb structure have spurred tremendous interest in investigating other two-dimensional (2D) layered structures beyond graphene for nanodevices. In this talk, I will mentioned the fabrication and properties of several 2D materials such as silicene, antimonene, magnetic VSe₂, semiconducting PtSe₂, superconductor transition-metal-trichalcogenide HfTe₃, and charge density wave NbSe₂, as well as quantum properties for nanoelectronics and valleytronics will also be introduced. In addition, the stacking heterolayers for ultrahigh density information storage, Majorana bound states and quantum computing will be also presented. The precise structural configurations at atomic-resolution of these materials will also be introduced, based on the measurements by several advanced techniques like XPS, LEED, STM/STS, AFM and STEM.

D14-21

镍基超导薄膜的分子束外延制备与物性研究

聂越峰

南京大学

近年来, 无限层 (IL) 和 Ruddlesden-Popper (RP) 结构镍氧化物中出现的新型高温超导态为揭示非常规高温超导的内在机理带来了新的机遇。然而, 高质量镍基超导材料的制备极具挑战, 从而限制了对其电子结构及超导机制的研究。本报告将介绍如何利用氧化物分子束外延(MBE)技术实现 IL 及 RP 结构镍基超导薄膜的原子精度制备, 并结合原位样品处理与表征等技术探究其电子结构与输运特性。

D14-22

二硫化钽异质结中的莫特物理与超导

王震宇

中国科学技术大学

二维材料的横向超晶格和异质结是实现新奇关联物态的理想体系。本报告将介绍体态异质结 4Hb-TaS₂ 中的莫特物理及其与超导的关联。我们利用扫描隧道显微谱追踪了体系中平态随电子填充 (0.2 个电子到半满) 的演化, 清晰地观测到 Hubbard 能带的整个形成过程 (Mott-Hubbard 图像) 及准粒子有效质量的发散 (Brinkman-Rice 图像)。同时, 低能电子态的重整化对近邻超导能隙产生了强烈的影响, 为理解超导态奇异的 Little-Park 效应及磁通记忆效应提供了关键线索。

D14-23

Chasing the Exotic Electronic Properties in Organic Quantum Materials

闫凌昊

苏州大学

The fabrication of atomically precise structures with designer electronic properties is currently being vigorously pursued within condensed-matter physics and materials chemistry research communities [1]. The required level of structural control can be reached by bottom-up chemical strategies that allow direct synthesis of well-defined structures from molecular precursors. These are part of the growing field of on-surface synthesis, which includes, for example, the synthesis of atomically well-defined carbon allotropes such as graphene nanoribbons [1], and the formation of metal-organic frameworks (MOFs) with controlled lattice structures [2].

In this talk, I will discuss our recent efforts to synthesize and investigate the electronic properties of low-dimensional organic materials under ultra-high vacuum (UHV) conditions, using low-temperature scanning tunneling microscopy (STM) and spectroscopy (STS), and plus non-contact atomic force microscopy (ncAFM), complemented by density-functional theory (DFT) calculations. Specifically, I will cover two topics: The

synthesis and characterization of novel low-dimensional organic materials, including biphenylene networks [3], planar cycloparaphenylenes [4] and non-benzenoid nanographenes [5]; The growth and characterization of 2D MOFs on weakly interacting 2D materials, such as graphene [6] and superconductor NbSe₂ [7-8]. We expect that a similar strategy can be applied to advance the development of emerging quantum materials.

D14-24

二维异质界面上的声子辅助能量传递

徐伟高

南京大学

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

D14-25

单层 FeSe/SrTiO₃ 薄膜中晶格尺度的超导性调制

张文号

华中科技大学

Typical BCS superconductors are microscopically homogeneous in real space governed by the coherent Cooper pairs with high phase stiffness of superfluid density, which is characterized by a coherence length. However, a periodic oscillation of superconducting order parameter may develop driven by breaking the time-reversal or translational invariance. To date, such modulated orders were specific to each material system, with a periodicity much larger than the lattice constant. Here we report the direct observation of a uniform lattice-scale pair density wave (PDW) in single-layer FeSe/SrTiO₃ films, enforced by peculiar interfacial structure of crystal symmetries breaking. Our spectroscopic imaging scanning tunneling microscopy unravels a spatial modulation of Cooper-pairing gap within a single unit-cell, depending on inequivalent atomic sites. Prominent periodic variation of superfluid density is visualized via Josephson current by a superconducting tip, indicating a real-space oscillation of the pairing order parameter in the sign-changing PDW state. Such a lattice-scale superconducting modulation, which coexists with a larger length scale of PDW order, indicates the lattice-scale variation of both pairing strength and phase stiffness. Our findings provide new insights into the intertwined density-wave orders of quasiparticle character in correlated electronic systems, and provoke future studies on the unconventional pairing interaction and phase stiffness in the two-dimensional limit.

D14-26

An Intrinsic Surface p-wave Superconductivity in Layered AuSn₄

朱文亮

陕西师范大学

The searching for topological superconductivity (TSC) is currently an exciting pursuit, for the reason that non-trivial topological superconducting phases could host exotic Majorana modes. Here, we report a new type of intrinsic TSC, namely intrinsic surface topological superconductivity (IS-TSC) and demonstrated it in layered AuSn₄ with T_c of 2.4 K. Different in-plane and out-of-plane upper critical fields, reflect a two-dimensional (2D) character of superconductivity. Two-fold symmetric angular dependences of both magneto-transport and zero-bias conductance peak (ZBCP) in point-contact spectroscopy (PCS) in superconducting regime, indicates an

unconventional pairing symmetry of AuSn4. A superconducting gap, surface multi-bands with Rashba splitting occurred at Fermi level (EF), in conjunction with first-principle calculations, strongly suggest that 2D unconventional SC in AuSn4 is originated from the mixture of p-wave surface and s-wave bulk contributions, which leads to a two-fold symmetric superconductivity. Our results provide an exciting paradigm to realize TSC via Rashba effect on surface superconducting bands in layered materials.

D14-27

氢化锗烯高压超导电性研究

奚忆莲、杜轶*

北京航空航天大学

二维材料中出现的超导现象吸引了大量的研究工作，这是因为这种令人意想不到且迷人的超导现象背后的起源和机制仍不清楚。特别是在二维体系中，即使无序性减弱，空间反演对称性破坏，超导也能存在。在本文中，我们首先利用 DAC 加压的方法对 GeH 单晶进行了详细的高压电输运测量，研究表明 GeH 在高压下出现超导现象（8.39 GPa, T_c 为 5.41 K），且随着压力的增加 T_c 呈两段线性降低，当压力增加到 34.11 GPa 时 T_c 降至 3.11 K。然而令人惊讶的是，体系在卸压的过程中 T_c 升高，当压力降至 5.81 GPa 时， T_c 异常升高到 6.11 K。超导电性与结构息息相关，因此为了进一步深入理解 GeH 在高压下表现出有趣的电子强关联行为背后的机理，分别对 GeH 单晶进行了原位高压同步辐射 XRD 测试、原位高压拉曼光谱测量、TEM/STEM 表征以及密度泛函理论计算综合研究结果表明，GeH 在高压下经历了两次结构相变，第一次相变是在~8 GPa 时 GeH 进入超导晶态，第二次相变是在~16.8 GPa 时 GeH 从超导晶态进入超导非晶态，且卸压过程中依旧保持超导非晶态。密度泛函理论计算分析，GeH 在高压下发生去氢过程从而进入超导态，二维 GeH 的超导电性应归因于高压下体系费米面附近电子态密度的增加以及增强的电子-声子耦合效应。GeH 样品卸压时 T_c 的升高来源于 Ge-Ge 面内声子振动模式的软化。压力诱导的 GeH 从二维晶态到二维非晶态的转变作为研究非晶态氢化物的超导机制提供了出色的材料平台。

D14-28

手性界面体系中的手性对映体相变过程的理论研究

李和平

自然界中同手性的起源是一个重要而开放的问题。在这里，我们展示了一个简单的手性系统，由非手性一氧化碳（CO）分子吸附在非手性 Au（111）衬底上构建而成。结合扫描隧道显微镜（STM）测量和密度泛函理论（DFT）计算，揭示了两种由 CO 七聚体组成的不对称手性团簇相。通过施加高电压，稳定的团簇相可以转变为由单个 CO 分子组成的亚稳定均匀相。紧接着，在降低偏置电压后的团簇相重组缩聚过程中，会发生对映体过量及其手性放大，从而产生均一手性表达。此结果提供了对同手性的物理化学起源的见解，并提出了一种可以影响手性分离和多相不对称催化等对映选择性化学过程的新方法。

D14-29

Room-temperature antisymmetric magnetoresistance and skyrmionic spin textures in van der Waals ferromagnet Fe₃GaTe₂ nanosheets

Haitao Yang*, Guojing Hu, Hongjun Gao

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, PR China

Van der Waals (vdW) ferromagnetic materials have emerged as a promising platform for the development of 2D spintronic devices. However, studies to date are restricted to vdW ferromagnetic materials with low Curie temperature (T_c) and small magnetic anisotropy. Here, a chemical vapor transport method is developed to synthesize a high-quality room-temperature ferromagnet, Fe₃GaTe₂ (c-Fe₃GaTe₂), which boasts a high T_c = 356 K and large perpendicular magnetic anisotropy. Due to the planar symmetry breaking, an unconventional room-temperature antisymmetric magnetoresistance (MR) is first observed in c-Fe₃GaTe₂ devices with step features, manifesting as three distinctive states of high, intermediate, and low resistance with the sweeping magnetic field. Moreover, the modulation of the antisymmetric MR is demonstrated by controlling the height of the surface steps [1]. In addition, skyrmions of distinct topological charges are artificially introduced and

engineered using magnetic force microscopy. The skyrmion lattice with opposite topological charges ($S = \pm 1$) can be tailored at the target regions to form topological skyrmion junctions (TSJs) with specific configurations. The delicate interplay of TSJs and spin-polarized device current were finally investigated via the in-situ transport measurements, alongside the topological stability of TSJs [2]. Our work provides new routes not only to achieve room-temperature 2D spintronic devices such as magnetic random storage and logic devices by utilizing the room-temperature antisymmetric MR, but also presents prospects for Fe₃GaTe₂-based heterostructures with the engineered topological spin textures.

D14-30

钒基和钛基笼目晶格材料的电子结构研究

沈大伟

中国科学技术大学

Kagome 晶格材料因其几何阻挫效应, 在费米能级附近展现出 Dirac 锥、范霍夫奇点 (vHS) 和平带等非平庸能带结构, 可诱导拓扑态、自旋/电荷密度波 (SDW/CDW)、自发磁序、分数量子霍尔效应及超导等多种新奇量子相。鉴于 Kagome 材料家族庞大且磁性复杂, 本文聚焦于磁性干扰较弱的 V 基与 Ti 基 Kagome 材料, 探究 Kagome 本征电子态。

在 RV₆Sn₆ 材料中, 我们利用 BL03U 微区 ARPE 重点研究了唯一具有 CDW 态的 ScV₆Sn₆, 观测到 CDW 态下的能带重整化及 M 点附近的 vHSs。联合态密度计算排除了费米面嵌套机制, 结合声子模计算与 kink 型色散, 表明 CDW 由声子软化与电子-声子耦合驱动。Mn 掺杂的 ScV₅MnSn₆ 中未出现 CDW 特征, 费米能级附近也无 vHSs, 证实掺杂可完全抑制 CDW。此外, 我们系统研究了 RV₆Sn₆ (R = Y、Gd、Tb、Lu) 的电子结构, 均展现类似 Kagome 色散和 vHSs, 但未见 CDW 行为, 进一步排除 CDW 起源于嵌套的可能。在 Ti 基 Kagome 材料中, ARPES 实验首次在 EuTi₃Bi₄ 中观察到 C₂ 对称性及两个能量不同的 vHSs, 对应不等价 M 点。结合理论计算发现其具有由时间反演和平移对称性保护的拓扑表面态, 确认为稳定的 Kagome 拓扑金属。对 RTi₃Bi₄ (R = Eu、Gd、Sm) 电子结构的系统比较表明, R 元素的 4f 磁矩可调控 Dirac 点、平带和 vHSs 的相对位置, SmTi₃Bi₄ 中还观测到随磁转变出现的 Zeeman 劈裂, 反映出磁性与能带结构的耦合。我们还拓展研究了 CsTi₃Bi₅, 其能带结构与 RbTi₃Bi₅ 类似, 但在 Bi 终端面发现了由表面局域电荷分布驱动和平带分裂, 区别于磁交换或轨道杂化机制, 提出了普适性更强的分裂模型, 为表面工程调控 Kagome 电子态提供了新路径。

D14-31

通过交织结构界面克服几何组错的磁性 Kagome 金属研究

柳仲楷^{*1}、程二建²、杨义峰³

1. 上海科技大学

2. 德国马普固体化学物理研究所

3. 中国科学院物理所

磁性 Kagome 材料为探索磁输运现象、对称性破缺以及电荷有序提供了独特平台, 这些现象源于其电子结构、拓扑性质与磁性之间复杂的相互作用。然而, 在传统的 Kagome 磁体中, 几何组错抑制了磁序的形成, 限制了体系的可控性以及新颖输运性质的涌现。在本研究中, 我们提出一种新的设计策略, 在 TbTi₃Bi₄ 中交织准一维的磁性 Tb 锯齿链与非磁性的 Ti 基 Kagome 双层结构。通过界面耦合, 该交织结构呈现出椭圆形螺旋磁序、自旋密度波以及异常大的能带折叠能隙。这种独特的磁性与电子态相结合, 进一步导致了高达 $10^5 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 的巨大反常霍尔电导。上述结果确立了 TbTi₃Bi₄ 作为强电子-磁性耦合 Kagome 金属的模型体系, 并强调了将独立设计的磁性层与电荷层交织以实现可控的输运特性。

D14-32

单层镍氧化物的强关联电子态

赵爱迪*

上海科技大学

基于哈伯德模型的高温超导机制是凝聚态物理学的核心研究内容之一。近年来镍基高温超导的发现为

高温超导及其机制研究提供了新的平台。其中，高温超导材料内超导面 NiO_2 的电子关联效应（如 Mott 绝缘体、自旋和电荷有序态）有可能是揭开其高温超导机制的重要线索。然而，在电子关联模型及其参数强度与超导配对对称性，层间耦合的作用和维度的效应，以及掺杂和氧缺陷的影响等关键问题上依然存在争议有待深入探索和厘清。如直接制备出母体材料的单层形式即 NiO_2 ，则有望“自下而上”地实现对高温超导机制的研究和理解。在报告中，我们将报道课题组在这一方面的进展。我们通过分子束外延方法成功制备了单层 NiO_2 薄膜并实现了碱金属的可控掺杂，结合扫描探针显微及其谱学方法，开展了单层 NiO_2 的本征关联电子态及其调控机制的研究。通过扫描单电子充电谱及其成像方法，我们确定了单层 NiO_2 中的强关联电子基态为莫特绝缘态，并对掺杂的单层 NiO_2 的强关联电子基态进行了深入探索。理论模拟揭示并证明了近邻相互作用即 V 项在其中起关键作用，对单层 NiO_2 中的关联电子性质研究应该考虑含 V 的扩展哈伯德模型。我们的研究为填补镍基超导体系在二维极限下的实验空白提供了第一步，有望为镍基高温超导机制的研究提供新的依据。

D14-33

Engineered quantum magnetic states: highly oriented skyrmion track arrays and bi-oriented antiferromagnetic order

Shiyu Zhu*, Hong-Jun Gao

Institute of Physics, Chinese Academy of Science

The precise engineering of quantum magnetic states represents a critical frontier in condensed matter physics, offering transformative potential for next-generation information technologies and fundamental studies of emergent phenomena. This work advances this field through two key breakthroughs. First, we demonstrate the controllable generation and regulation of large-area, highly-oriented skyrmion track arrays (STAs) in the ferromagnet Fe_3GaTe_2 using vector-magnetic-field manipulation. By modulating field parameters, we achieve precise control over STA orientation, ordering, skyrmion type, and density. Micromagnetic simulations confirm the critical roles of in-plane magnetic fields and the Dzyaloshinskii-Moriya interaction in STA formation. Second, in the novel quasi-1D kagome antiferromagnet GdTi_3Bi_4 —a platform for anisotropy, spin density waves, and anomalous Hall effects—we report a tunable bifurcation of magnetic anisotropy and the emergence of bi-oriented antiferromagnetic (AFM) order. Direct imaging reveals magnetic domain evolution during plateau transitions, exposing pronounced in-plane anisotropy along the a -axis. Temperature-dependent measurements uncover a bifurcation transition near 2 K, where this anisotropy splits into two distinct orientations ($\pm 7^\circ$ from the high-symmetry axis), revealing a hidden bi-oriented in-plane AFM order. Vector field modulation further delineates three distinct in-plane domain phases within the transverse magnetic field phase diagram. Together, these results establish powerful pathways for tailoring topological spin textures and complex magnetic orders, highlighting the profound tunability of quantum magnetic states in engineered materials.

D14-34

The Interplay of Stripe-like Charge orders, Electronic Correlation and Majorana Bound States in 2M-WS₂

Wei Li*

Tsinghua University

In this talk, I will show our scanning tunneling microscopy (STM) study on a Fu-Kane topological superconductor 2M-WS₂. We observed Majorana zero modes (MZMs) at the vortex cores of the material. Recently, we realized the spatial tuning of MZM by introducing a surface stripe charge order. We found that the charge order does not destroy the bulk topology, but can effectively push MZM downward away from the 2M-WS₂ surface. Moreover, we demonstrated that the stripe charge order developed in the vicinity of a strange metal phase in 2M-WS₂. Our results reveal the complex interplay of the charge order, superconductivity, electronic topology and correlation, providing strategies to spatially control MBSs and explore emergent quantum states.

D14-35

低维量子材料的结构调控和维度调控

卢建臣*

昆明理工大学

人工维度调控在电子结构操控与物性调制领域始终占据核心地位,是实现材料功能定制化的关键手段。然而,利用分子束外延(MBE)技术开展从二维材料到可控一维纳米带的维度调控研究,目前仍缺乏系统性探索,尤其是在原子级精确构筑方面存在显著技术瓶颈。在报告中,将以 CuSe 单层作为二维结构模板,通过精准调控 Te 元素的化学势,成功实现了高质量超窄锯齿型 CuTe 纳米带的原子级精准制备。实验结果表明,在向 CuSe 单层引入 Te 原子后,通过退火处理促使 Te 原子逐步取代晶格中的 Se 原子。随着 Te 取代比例的递增,晶格内部产生应变积累,进而诱导拉长纳米孔的形成。这些纳米孔不断扩张并相互连接,首先形成一维 $\text{CuSe}_{1-x}\text{Te}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) 纳米带,最终演变为具有蜂窝状晶格结构的超窄锯齿型 CuTe 纳米带。扫描隧道显微镜(STM)的高分辨表征,结合密度泛函理论(DFT)计算,完整验证了这一从二维到一维的结构转变历程。相较于二维 CuSe 及 $\text{CuSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 单层所呈现的半导体特性,新合成的一维 CuTe 纳米带展现出独特的金属导电性。DFT 计算进一步揭示,该纳米带锯齿型边缘存在显著的自旋极化态,这为其在自旋电子学领域的潜在应用提供了理论依据。本研究提出的维度调控策略,不仅实现了二维到一维纳米结构的可控转变,更为纳米材料合成工艺的优化升级开辟了全新路径,有望推动低维纳米材料在电子、能源等领域的前沿应用。

D14-36

范德华压强诱导的界面结构和量子态相变

何林

北京师范大学

在通过原子层堆叠组装的范德华(vdW)异质结中,天然存在定义明确的二维(2D)原子尺度的空间。该二维原子空间的独特特性在于,范德华封装可产生数吉帕的局部压力,这已被证实能够改变界面受限材料的结构与性质。在此,我们报道了石墨烯/WS₂异质结中局域范德华压力诱导的界面 WS₂量子点(QDs)的结构和量子态相变。在原子界面处,大部分界面 WS₂量子点($\approx 86\%$)从 1H 相转变为 1T'相,表明由于局部高范德华压力,1T'相而非半导体性的 1H 相成为更稳定的相。通过扫描隧道显微镜,我们直接成像了界面 1T' WS₂量子点的准粒子干涉图样和边缘态回路,揭示了纳米级 1T' WS₂量子点为量子自旋霍尔绝缘体。我们的发现为利用原子级范德华层间的二维原子空间实现结构和量子态相变开辟了新途径。

D14-37

凯库勒石墨烯的构筑与表界面调控

张翼*

南京大学

二维材料表面的电子散射会导致许多奇特的量子现象。我们利用角度分辨光电子能谱,在临界温度(34 K)下,直接观测到了 SiC(0001)衬底上外延单层和双层石墨烯在吸附无序杂质之后产生的谷间弹性散射和有序量子干涉现象,由此形成新的超晶格有序态,又称为“凯库勒畸变(Kekulé distortion)”。该有序态可以将石墨烯布里渊 K/K'点的两套不等价的狄拉克锥(Dirac cones)折叠到布里渊区中心,并导致手性的缺失[1]。而通过表面钾掺杂技术,我们发现表面的钾原子不仅能够诱导谷间弹性散射并产生狄拉克能带折叠,而且可以引入重电子掺杂而产生等离激元能带重整化,进而破坏原有的谷间电子散射波矢,最终导致折叠狄拉克能带完全消失[2]。此外,我们还对镧系稀土元素 Gd、Eu 插层的石墨烯进行了研究,发现了 Gd 插层石墨烯在 30 K 下会吸附环境中的氮原子作为散射中心,同样可以形成凯库勒石墨烯并产生狄拉克锥折叠[3]。与此不同, Eu 在石墨烯界面直接以凯库勒周期插层并形成了凯库勒畸变,得益于 Eu 元素半填充 4f 轨道的极大局域磁矩,石墨烯狄拉克电子与 4f 轨道局域磁矩会发生自旋-磁矩耦合的非弹性散射过程,并最终导致折叠狄拉克能带产生奇异的劈裂行为[4]。

以上关于表面无序杂质及界面元素插层方式所产生的石墨烯谷间电子散射及凯库勒畸变的形成能够对于狄拉克能带及电子结构产生明显的调控作用,是对以石墨烯为代表的二维量子材料物态调控的全新方

式，这对于狄拉克电子系统的调控研究具有影响深远的科学意义和价值。

D14-38

碳基量子材料的界面力学与自旋性质研究

刘梦溪*

国家纳米科学中心

具有 π 共轭自由基的开壳纳米石墨烯因其优异的性质，如微秒级自旋相干时间、亚微米级相干长度以及百毫电子伏量级的激发能等，被视为室温量子信息处理和低功耗自旋电子器件的理想候选材料。该类新型碳材料与电极之间的杂化界面为自旋操控提供了平台，然而在原子/分子尺度精确解析界面局域磁化行为与交换相互作用机制仍存在显著挑战。

我们构建了有机分子/磁性金属界面、电极-分子-电极模型以及二维磁性碳材料/介电材料异质结等自旋界面研究体系。利用基于 qPlus 力传感器的非接触原子力显微镜研究了金属单晶表面吸附的碳基量子材料剥离和滑移等界面力学行为；在此基础上，结合扫描隧道谱和非弹性电子隧穿谱探究了轨道对称性、轨道极化、界面杂化和分子手性对碳纳米分子的电子态分布以及自旋输运性质的影响，为设计具有可调自旋输运特性的界面提供了实验依据。

D14-39

主族元素一维纳米带的原子级精准合成

牛天超*

北京航空航天大学

具有原子级精准边界和可控宽度的低维半导体材料，有望成为下一代电子器件的理想沟道材料。在本报告中，将提出了一种制备最窄锯齿边缘纳米带的方法。借助扫描隧道显微镜和第一性原理计算，研究纳米带的结构与性质。通过理论计算阐述了在外延生长过程中的机理。自下而上的策略为原子级精确制备一维纳米带提供了有效途径，通过选择合适的材料作为衬底，有望推动多种具有定制化学与电子特性的低维材料的合成。

D14-40

发现室温金属 d 波交错磁体 KV₂Se₂O

钱天*

中国科学院物理研究所

Altermagnetism is a recently discovered unconventional magnetic phase that is characterized by time-reversal symmetry breaking and spin-split band structures in materials with zero net magnetization. Recently, spin-polarized band structures and a vanishing net magnetization were observed in semiconductors MnTe and MnTe₂, confirming this unconventional magnetic order. Metallic altermagnets offer advantages for exploring physical phenomena related to low-energy quasiparticle excitations and for applications in spintronics because the finite electrical conductivity of metals allows direct manipulation of the spin current through the electric field. We demonstrate that KV₂Se₂O is a metallic room-temperature altermagnet with d-wave spin-momentum locking. Our experiments probe the magnetic and electronic structures of this compound and reveal a highly anisotropic spin-polarized Fermi surface and the emergence of a spin-density-wave order in the altermagnetic phase. These characteristics suggest that KV₂Se₂O could be a helpful platform for high-performance spintronic devices and for studying many-body effects coupled with unconventional magnetism.

D14-41

Giant spin-orbit torque in a non-symmorphic topological Dirac semimetal

Zhiming Wang*

Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences

Nonsymmorphic symmetry offers a powerful framework for designing topological quantum states and

enhancing charge-to-spin conversion, critical for next-generation spintronics. Yet, realizing topological Dirac semimetals with high-efficiency spin-orbit torque (SOT) remains a significant challenge, limiting progress in low-power devices. Here, we demonstrate for the first time that hexagonal SrIrO₃ (SIO), a symmetry-enforced topological Dirac semimetal, exhibits giant spin-orbit torque efficiency of 2.26, representing the highest reported in topological semimetals to date. Direct visualization via in-situ angle-resolved photoemission spectroscopy on high-quality epitaxial thin films confirmed the symmetry-enforced topological Dirac semimetal state, intrinsically linked to this giant spin-orbit torque efficiency, revealing a synergistic mechanism involving spin-momentum locked surface states and three-dimensional Dirac points near the Fermi level. In hexagonal SIO/ferromagnet heterostructures, we furthermore achieve efficient magnetization switching at a low current density of 5.9×10^5 A/cm², surpassing the performance of most reported materials. These findings establish non-symmorphic symmetry as a transformative design principle for spintronic materials, enabling unprecedented charge-spin conversion efficiency and paving the way for ultra-low-power devices.

D14-42

准一维量子材料的新奇物性

杨乐仙*

清华大学

准一维量子材料由于其维度限制，表现出一系列有趣的性质，例如自发对称性破缺、谱函数的能隙及赝能隙、各类物相竞争等。尤其是其中的电荷密度波转变、超导、Luttinger 液体相以及拓扑物性等更是受到了广泛的关注。本次报告将介绍利用先进的角分辨光电子能谱（ARPES）对准一维体系的电子结构及新奇物性的研究。在钼基氧化物中，我们观察到 Luttinger 液体和电荷密度波之间的竞争，并将 Luttinger 液体相关的物理扩展到准二维体系；在 TaTe₄ 中，我们观察到轨道自由度在电荷密度波相变中的重要作用；在 Bi₄Br₄ 中，我们观察到表面态能隙并给出棱态存在的谱学证据。准一维体系为研究各类新奇物理提供了简单而丰富的材料库，是凝聚态物理基础研究的理想平台。

D14-43

准一维拓扑物质中新奇物态的构筑

庄金呈*

北京航空航天大学

准一维范德华晶体是一类结构特殊的材料，在空间某个特定方向其原子通过离子键或者共价键形成原子链，这些平行排列的原子链再藉由范德华力结合在一起形成二维/三维材料。这种独特的准一维材料以原子链作为结构基元，为块体材料的构筑和物性的调控提供了更多的自由度。我们以准一维铋卤原子链材料 Bi₄X₄ (X=I, Br) 为研究对象，成功制备了具有不同卤族元素配比的单晶材料，发现在二维的情况下，Bi₄X₄ 是大能隙量子自旋霍尔绝缘体，其能隙大小远超室温热扰动能量，提供了观测室温量子自旋霍尔效应的可行性。利用大能隙的量子霍尔绝缘体作为结构基元，通过界面耦合、层间耦合、堆垛方式等的协同效应，构筑具有不同拓扑物态的三维拓扑物质；改变体系自旋轨道耦合强度、应力大小等物理参量，有效调控晶体的物态，实现了丰富的拓扑物态以及双拓扑序共存的新奇态等。

D14-44

反铁磁量子反常霍尔效应调控研究

刘畅

中国人民大学物理学院

量子反常霍尔效应是一种无需外磁场、基于全新原理的量子霍尔效应，它的实现不仅为新奇拓扑物态构筑与物性调控提供了平台，更凭借其无耗散边缘态特性，在低功耗量子器件和标准计量等前沿领域展现出广阔的应用前景。作为目前唯一确认的具有体态反铁磁序的量子反常霍尔效应材料，本征磁性拓扑绝缘体 MnBi₂Te₄ 在过去几年引起了凝聚态物理和材料科学领域的广泛关注[1,2]。然而，受限于微纳加工对二

维材料的破坏， MnBi_2Te_4 领域在器件制备和物性调控方面面临巨大的挑战[3]。在本报告中，我们将介绍一种简单有效的器件制备工艺，通过在微纳加工过程中引入一层非晶 AlOx 薄膜，我们解决电子束曝光工艺中光刻胶对 MnBi_2Te_4 拓扑表面态的损伤[4]。超过 50 块 MnBi_2Te_4 样品光学衬度和量子输运测量表明， AlOx 可以有效保护器件的本征状态，并提升磁各向异性，从而帮助其实现零场下的反铁磁量子反常霍尔效应。基于这种 AlOx 封装的器件，我们利用栅极电压和矢量磁场调控，发现了一系列此前量子反常体系中没有观测过的新的量子效应，包括级联量子相变、平面磁场硬化磁滞以及层自由度依赖的自旋调控效应[5]。我们的实验不仅为制备高质量、无耗散输运器件铺平了道路，同时也推动了对二维材料中奇异拓扑量子现象的研究。

D14-45

高能同步辐射光源高分辨纳米电子结构线站进展介绍

刘晨、钱海杰、唐坤、边苓竹、王嘉鸥*

中国科学院高能物理研究所

依托于当今最新一代的同步辐射装置-高能同步辐射光源（HEPS），一条专注于探究微纳尺度表界面电子结构的软 X 射线束线站在北京建成，名为高分辨纳米电子结构线站（简称 High-NESS）。该线站以光电子能谱为主要功能，可提供光子能量覆盖 100eV 到 2000eV 且偏振可调的高通量光子，光斑可在毫米、微米、亚微米三种不同尺寸间切换。并且配备原位的样品制备、处理和传递系统，以及原位低温、应力、电场等调制手段。High-NESS 线站预计在 2026 年正式对国内外用户开放运行，有望为物理、材料、信息等领域的科学研究提供强大助力。本报告将介绍 High-NESS 线站的建设和调试进展，以及将人工智能技术应用用于小光斑光电子能谱数据挖掘方面的探索工作。

D14-46

利用各向异性势场调控狄拉克费米子新奇量子物态

任慧莹、任雅宁、何林*

北京师范大学物理与天文学院高等量子研究中心

在量子受限系统中，受限准粒子类型极大地影响着体系的性质。早期研究主要聚焦于薛定谔方程描述的传统费米子的量子受限行为，随着对石墨烯等二维体系研究的不断深入，量子受限狄拉克费米子展现出的新奇物性逐渐吸引了科学家们的关注。本报告中，我们借助扫描隧道显微镜纳米刻蚀技术在界面成功制备出 1T' 相 WSe_2 纳米岛，实现了对受限狄拉克费米子体系，即石墨烯/ WSe_2 异质结量子点的可控构筑[1]。进一步地，利用针尖操控界面纳米岛发生局域相变或在纳米岛中引入一维畴界，我们实现了对石墨烯中势场各向异性的有效调控[2]。基于各向异性势场[1]，我们开展了一系列深入研究：在椭圆形势场中，观测到了轨道量子数为 0 的 s 轨道与轨道量子数为 2 的 d 轨道之间的杂化，首次利用量子受限态模拟了原子内轨道杂化过程[3]；在一维受限势场中，观测到了电子-电子相互作用诱导的具有不同费米速度的两套密度波，这归因于实空间中的自旋-电荷分离[4]；通过向原子塌缩势场中引入各向异性，首次实现了各向异性原子塌缩态，并率先研究了各向异性原子塌缩势场中不同轨道角动量之间的散射对量子相位和干涉的影响[5]。

D14-47

在双层二硫化钨中利用电子束调控形成的莫尔超晶格

曾小会、李军*、曹克诚

上海科技大学

转角过渡金属硫族化合物（TMDCs）中的莫尔超晶格为探索丰富的电子性质和关联量子现象提供了一个通用的平台。然而，传统转角的制备方法依赖于转移和堆叠技术，因此容易受到界面污染的影响而限制了原有的性质。本工作介绍了一种原位扫描透射电子显微镜（STEM）方法，利用 300 keV 电子束在双层 WS_2 中动态操控形成莫尔超晶格并进行系统表征。通过利用高能电子束辐照，我们实现了对莫尔超晶格原位实时控制，实现了对扭转角度的精确调控和原子尺度的晶格重构。随后经历长时间的电子束辐照导致超晶格区域的钨原子陆续被打掉，这些钨原子迁移到相邻单层的钨空位处，实现了单层 WS_2 的自修复。该

技术为原子精确工程化莫尔驱动的电子态提供了一条途径，推动了二维量子材料中扭转电子学的研究。

D14-48**自旋耦合和自旋催化的双金属团簇的精准合成**

周雄

北京大学

具有明确组成和结构的单团簇因其出色的反应效率和可调节的构型而受到广泛关注。然而，单团簇的精准合成，尤其在异核团簇，仍面临巨大挑战。在本研究中，我们提出了一种逐步动力学调控策略，成功构建了两类结构迥异的双金属团簇。在正交构型的 Ma/O-Mb 簇中， Ma 和 Mb 通过氧原子以近乎垂直的方式连接，形成与线性 Ma-O-Mb 簇显著不同的构型，后者中 Ma 和 Mb 呈线性排列。这两类团簇展现出截然不同的自旋行为：线性簇中存在显著的超交换作用，表现出明显的自旋耦合， Fe-O-Co 簇中的自旋交换能量高达 55 meV；相比之下，正交簇中未观测到自旋耦合。值得注意的是，无自旋耦合的正交簇在低温下表现出优异的 O_2 解离活性，而线性簇则无这一反应特性。上述发现不仅增强了我们对双金属簇的精确构建及其自旋相互作用调控的理解，也为发展新型磁性纳米结构在自旋电子学和催化等领域的潜在应用提供了重要参考。

D14-49**分子间量子相干耦合的亚纳米光谱成像研究**

张杨*

中国科学技术大学

供体-受体分子间的能量转移是生命活动和光电转化中的基本过程。深入理解分子间传能机理，优化分子聚合体等有机光电功能材料的光学特性以及提升人工光合作用体系的传能效率，一直是分子光谱学与光化学等领域的热点问题。理论预测当供体与受体分子存在量子相干耦合的时候，传能效率会得到极大的提升，这很可能也是光合作用中传能效率高的原因。但是，具体的耦合机制及其在光合作用中的作用还存在争议。

精准表征是精确理解机理的前提。分子光谱是研究分子体系光电特性的重要表征手段。由于远场光谱技术的空间分辨能力受到光学衍射极限的制约，所测量的信息大都是大量分子系综平均后的结果，因此，亟待发展具有高空间分辨能力的光谱表征技术以在单分子层次获得传能微观机制的直观理解。

本报告将介绍如何发展将超高真空低温扫描隧道显微镜与光谱检测相结合的联用技术，通过调控等离子体共振特性，突破衍射极限制约，实现了亚纳米空间分辨的针尖增强电致/光致荧光成像；并利用亚纳米分辨的光谱成像技术，从实空间成像的角度“可视化”地研究了分子间能量转移机制。相关结果不仅为在单分子层次上研究分子间传能提供了新途径，而且为研发高效有机光电器件提供了科学依据。

D14-50**Electrostatic nano-corrals for quantum confinement of charged excitons**

Zhe Sun

Beihang University

Quantum corrals provide a platform for investigating quantum mechanical phenomena such as confinement and standing wave formation at the nanoscale. They were first observed in scanning tunneling microscopy experiments, where precisely arranged adatoms on a metallic surface create a circular boundary that confines localized, quantized electronic states. Building on this concept, we demonstrate an electrostatic excitonic corral in a monolayer transition metal dichalcogenide (TMDC), where charged exciton complexes are trapped by quantum-confined electrons and encircled by a cloud of neutral excitons. This confinement is achieved through a tunable electrostatic potential generated by a monolayer metallic screening layer with mechanically created nanopores. Unlike conventional electrostatic gating methods, our approach preserves strong localized electric fields by mitigating edge effects while simultaneously enabling direct optical spectroscopy of quantum-confined charged excitons. By leveraging the highly tunable electrostatic landscape in an asymmetric dual-gate semiconductor-metal heterostructure, we induce a transition between weakly confined (quasi-2D) and strongly

confined (quasi-0D) charged exciton states, as evidenced by distinct linewidth modulations in optical spectra. Our approach diverges from traditional electrostatic exciton confinement schemes, which predominantly rely on the DC Stark effect. These findings establish a versatile platform for dynamically controlling excitonic states through electrostatic engineering, with promising implications for quantum light sources and exciton-based information processing.

D14-51

实现分数层过渡金属硫族化合物

张钰

北京理工大学

在层状材料过渡金属硫族化合物 (TMDC) 中, 层内的 X-M-X (M 为过渡金属, X 为硫族元素) 通过较强的共价键连接, 而层与层之间则由较弱的范德瓦尔斯相互作用结合。因此, TMDC 材料的解理通常发生在层间。普遍认为, 通过破坏层内的 X-M-X 共价键来实现分数层 TMDC 材料是不可能的。我们利用扫描隧道显微镜 (STM) 的探针操纵技术, 成功地在 WTe₂、MoSe₂ 等 TMDC 材料中实现了 2/3 层体系, 并观测到了与其单层材料截然不同的晶格重构和一维电子态调制特性 [1,2]。

在实验中, 我们首先将单层石墨烯转移到 TMDC 材料上作为保护层。通过对该体系施加脉冲电压, 成功去除了 TMDC 中最上层数百个硫族元素原子, 进而实现了对 2/3 层 TMDC 的可控制备。STM 测试结果表明, 2/3 层 WTe₂ 的晶格会自发重构, 呈现出与单层 WTe₂ 截然不同的超晶格特征。该结构进一步诱导了电子态表现出一维电荷密度调制 [1]。该研究结果扩展了对 TMDC 材料的传统理解, 有望促进更多新奇量子物态的发现和应用。

D14-52

二维半导体薄膜的分子束外延制备和铁电性能研究

梁艳

中国科学院物理研究所

二维铁电半导体在下一代高性能电子器件的发展中具有重要意义, 其独特之处在于极化翻转过程发生在沟道材料内部, 而非发生在介电层中。当前该领域面临两大核心挑战: 一是大尺寸二维半导体薄膜的精准可控合成, 二是在这类材料中铁电性能的实现。本次报告主要介绍两部分内容: 1. 二维 Bi₂O₂Se 中铁电金属性研究。我们利用分子束外延 (MBE) 方法制备 n 型 Bi₂O₂Se 薄膜, 薄膜由于 Se 空位表现出金属性, 室温载流子迁移率达到 300 cm²/V s。二维材料中由于电子被限制在面内, 因此电场可以从面外调控极化。我们通过压电力显微镜 (PFM) 信号证明了薄膜具有室温铁电性, 在厚度分别为 6 纳米、2.4 纳米和 1.2 纳米 (单层) 的 Bi₂O₂Se 薄膜中观察到了可切换的自发极化。截面扫描透射电子显微镜 (STEM) 图像中的铁电偶极子图表明, 在电场作用下 [Se] 原子的位移是 Bi₂O₂Se 薄膜铁电性的主要来源。2. 二维 p 型 BiCuSeO 薄膜的室温面外铁电性研究。我们首次利用 MBE 方法合成了厚度低至约 3 纳米的二维 p 型 BiCuSeO 薄膜。并首次证实了薄膜具有垂直方向的铁电性, 具备畴写入和读取能力。密度泛函理论 (DFT) 结合 STEM 图像中的铁电偶极子图谱, 表明在 BiCuSeO 薄膜中, [CuSe] 层在电场作用下的极化位移是薄膜铁电性的来源, 二维 BiCuSeO 的垂直方向电阻切换行为显示出了双极导电特性。

D14-53

LaAlO₃/TiO₂ 双层薄膜异质界面的二维电子气

闫虹*

西北工业大学

Understanding and controlling the emergent electronic transport property at interfaces of oxides has been a major issue in condensed matter physics for both fundamental science and technological applications. In this work, we report a two-dimensional electron gas (2DEG) at the interfaces of amorphous-LaAlO₃/TiO₂ (a-LAO/TiO₂) thin film heterostructures, which exhibits a high carrier density of $\sim 10^{14}$ cm⁻² while low mobility of ~ 100 cm²V⁻¹s⁻¹. Unique large negative MR is detected in the 2DEG, arising from the depression of magnetic scattering. The Kondo behaviors of sheet resistance dependence below 50 K are observed depending on TiO₂ thickness on

0.7PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O₃-0.3PbTiO₃ (PMN-PT) substrates. Furthermore, the electric-field-controlled hysteresis loop-like resistance changes are obtained in a-LAO/TiO₂/PMN-PT heterostructures. A resistance enhancement of ~8% at room temperature was achieved at an electric field of +2 kV/cm which indicates that such 2DEG is rather sensitive to strain in TiO₂ layer. Thus, this work creates a new path to exploring the physics of low-dimensional oxide electronics and non-volatile memory and logic devices.

D14-54

二硒化铌纳米结构中的量子受限效应

周丽丽、张钰*、王业亮

北京理工大学

限制在纳米尺度材料中的载流子有望表现出偏离本征基态的显著受限现象。过渡金属硫族化合物中的电子具有多体相互作用，可以表现出超导、电荷密度波、莫特绝缘态等量子物态，这为探究低维量子受限效应提供了平台。在我们的工作中，我们通过扫描隧道显微镜分别研究了在单层 H 相二硒化铌纳米岛^[1]和纳米带^[2]上的二维和一维量子受限效应。对于单层 H 相二硒化铌纳米岛^[1]，我们研究了不同基底对其电子态的调制作用，并发现了有趣的相互纠缠的多重量子受限效应。石墨烯上的单层 H 相二硒化铌纳米岛通常会表现出畴界，但是当基底是 H 相二硒化铌或 T 相二硒化铌时，这种畴界会消失。并且 H 相二硒化铌和 T 相二硒化铌基底可以在单层 H 相二硒化铌纳米岛上有效地诱导出条纹电荷态。此外，更有趣的是，我们的光谱测量进一步揭示了在 H 相二硒化铌基底上的单层 H 相二硒化铌纳米岛中的两种量子受限态，它们分别分布在纳米岛的边缘和内部，并随着能量的变化呈现出一种相互竞争纠缠的状态，这是一种独一无二的量子受限态。对于单层 H 相二硒化铌纳米带^[2]，成功制备出具有均匀几何形状的离散过渡金属纳米带的研究非常有限，在我们的研究中，我们不仅成功制备出单层 H 相二硒化铌纳米带，并在上面发现了一种新的周期为 2.1 纳米的电荷密度调制，在占据和未占据状态下，电荷密度表现出反相。

D14-55

结构重构导致的转角双双层石墨烯中具有低能平带的电子 Kagome 晶格

张默涵¹、张亚磊²、郝辰悦¹、郭子涵¹、闫超¹、赵亚新¹、任雅宁¹、袁声军²、何林*¹

1. 北京师范大学

2. 武汉大学

在二维范德华异质结体系中，电子能带结构对层间扭转角和晶格重构都高度敏感。通过精准调控范德华材料的层间旋转角可以形成可调周期尺度的莫尔超晶格，为探索新奇量子现象提供了理想平台。值得注意的是，当体系发生超越刚性晶格旋转模型的结构重构时，会产生超越传统理论预期的电子态特性，然而这一关键机制尚未得到充分重视。以转角双层石墨烯为例，其结构重构可以诱导三角网格图案的手性一维导电通道。这种结构重构效应还可以推广到其他二维范德华系统。

这里，我们聚焦于小角度转角双层-双层石墨烯中的结构重构现象。研究发现，结构重构导致各个堆垛区域面积发生改变并使平带局域在 ABCA 堆垛。更有趣的是我们在结构重构的小角度转角双层-双层石墨烯中发现了一种稳定且可调控的电子 Kagome 晶格，该 Kagome 晶格的能带在低能区域具有平带结构。通过减小两套双层之间的扭转角，我们实现了从电子 Kagome 晶格到电子呼吸型 Kagome 晶格的转变，并且对这一转变过程进行了直接成像。我们的研究表明，小角度转角双层-双层石墨烯有望成为一种用于探索 Kagome 晶格相关物相的材料。

D14-56

表面催组装

王永锋

北京大学

D14-57

低维异质结构的精准构筑及其器件特性研究

鲍丽宏*

中国科学院物理研究所

低维纳米材料是多种新奇物理现象和科学问题的载体，是电子器件实现纳米化和量子化的基础和核心。在众多低维纳米材料中，以石墨烯为代表的二维原子晶体材料，具有带隙可调控、高迁移率、低介电常数和奇异的自旋、能谷等新奇的物理性质及可调控的原子结构和界面，因其高效的静电调制和对短沟道效应免疫的特性成为了构筑高性能电子器件的优良候选者。特别是基于二维原子晶体堆叠形成的范德瓦尔斯异质结，具有原子级锐利的界面和多样化的能带排列等特性，成为了构筑更小、更快、更低功耗的信息器件最有前景的材料体系之一。

在本报告中我将介绍我们利用二维范德瓦尔斯异质结的原子级锐利界面及增强的界面耦合特性，无需修改商用的器件结构，在国际上首次成功构筑了超快、非易失浮栅存储器件，成功实现了极快的纳秒级（~21 纳秒）编程/擦除时间（商用闪存器件为百微秒），极高的擦除/写入比（10¹⁰），极长的存储时间（>10 年）和优异的耐久性。进一步我们利用高真空洁净环境下二维材料的剥离与堆垛技术，成功构筑了基于全二维材料的超快（编程/擦除速度达 20 纳秒）浮栅非易失存储器。在相同电容耦合比的条件下，该器件面积占比仅为之前超快浮栅非易失存储器的 1/15。该全二维浮栅存储器不仅可以通过电学脉冲进行编程、擦除，还可以利用二维材料沟道优异的光响应特性对电学写入的数据进行光学擦除操作。通过电学和光学的协同操作，在单个器件上实现了四个可重构、可切换的电流状态，展示了“OR”逻辑功能。这些结果充分展示了基于范德瓦尔斯异质结在构筑高性能逻辑、光电、存储器件方面的能力，有望解决硅基半导体器件进一步缩微化带来的瓶颈问题。

D14-58

拓扑平带石墨烯纳米带的表面构筑

马传许*

合肥国家实验室

拓扑平带材料为探索拓扑和关联共同作用下的新型量子物态，比如非常规超导体和分数拓扑相等，提供了重要平台[1]。然而，实际具有此类能带结构的材料非常有限，转角石墨烯是其中之一。尽管前期的研究已经报导了一些平带体系，但是其拓扑非平庸属性是无法保证的。近年来，表面合成技术的显著发展，为自下而上地类似搭积木的方式构建低维拓扑平带体系成为可能。

理论上，基于量子相消干涉原理，可在奇数宽度的扶手椅型石墨烯纳米带中引起平带[2]。然而，此类平带具有类似原子轨道的局域特征，天然是非平庸的。而且，其能带平整性仅在紧束缚（TB）近似下才能保持，在密度泛函理论（DFT）下显示出显著色散。我们首先提出通过构筑周期性孔洞石墨烯纳米带的方式，即形成石墨烯反量子点超晶格，来同时保证带的平整度与拓扑非平庸特征[3]。虽然 DFT 以及 SSH 模型计算均确认了该策略的有效性，但是实际表面合成的石墨烯纳米带终端决定了其拓扑平庸属性。因此，在保证拓扑非平庸特征的基础上引起平带特征变得更加有效。我们在前期提出的利用隐藏的非凯库勒（non-Kekuléan）纳米石墨烯共价欧联获得拓扑石墨烯纳米带的基础之上[4]，本项研究通过引入自由基诱导的分子间脱氢环化反应，可有效产生拓扑平带。基于扫描隧道显微镜（STM）和非接触原子力显微镜（nc-AFM）表征，我们展示了具有区域选择性的五边形内嵌 GNRs 的高效合成。其中，新形成的五边形结构具有显著的扩展态，但彼此之间几乎没有重叠，因而产生平带，而其拓扑属性是由建造单元直接决定的。鉴于人们对低维材料中强电子关联效应的研究兴趣不断增加，这一研究成果有望推进与 π 电子系统相关的奇异量子现象的探索。

D14-59

异质结量子材料与器件

刘衍朋、刘颖*、张尔文、吕品、汪洋

南京航空航天大学

将石墨烯与其他二维材料进行简单人工堆垛,可形成晶格错配引起的二维莫尔超晶格结构,具有一系列新奇的力-电-磁耦合功能性。这类超晶格因其超薄特性易受到力场、电场和磁场等外物理场的耦合调谐,成为力学、材料、物理和信息等交叉学科的新前沿。以石墨烯/黑磷异质结为例,我们相继发现了晶格应变与超晶格结构具有强转角依赖的关系,界面应力应变与赝磁场间的对应关系,层间电声耦合增强磁场响应,多层黑磷量子阱结构对外电场的非对称响应等,发展出一系列高性能谷自旋器件、磁阻器件、电子选择器、光电探测器等元器件,助力石墨烯等低维材料及其异质结构在电子、光学和信息领域的应用。

D14-60

菱方石墨烯层依赖的电子结构与关联效应

殷隆晶*

湖南大学

菱方(ABC)堆垛的多层石墨烯体系由于其本征平带诱导的新奇电子强关联效应,近几年来受到了广泛关注。最近,电输运实验在不同层数的菱方石墨烯体系发现了超导、多铁、量子反常霍尔效应等一系列丰富的强关联量子现象。然而,该体系关于上述电子关联效应的微观谱学实验证据还非常匮乏,对其层数依赖的电子结构和关联效应演化也有待探索。本人长期从事菱方堆垛石墨烯体系的实验研究,利用低温扫描隧道显微镜/隧道谱(STM/STS)局域探测技术,近期在菱方多层石墨烯平带电子关联效应的谱学探测中取得了系列进展。主要包括:1)系统揭示了三层到九层菱方石墨烯平带结构和电子关联效应的层数演化规律,发现了液氮温区下的电子关联态,并提出六层菱方石墨烯具有该体系最强的电子关联效应;2)从谱学上揭示了强磁场下三层菱方石墨烯中丰富的对称性破缺态和电子强关联效应;3)在菱方四层层石墨烯/MoS₂异质结中,从实空间上直接观测到理论预言的谷间相干态的存在,证实其是由自旋轨道耦合近邻诱导产生的自发对称性破缺态。上述研究从谱学上揭示了菱方石墨烯体系层依赖的电子结构和电子强关联效应,为实现更易探测、更具鲁棒性的关联量子态提供了良好平台。

D14-61

大规模二维有机框架/石墨烯异质结构及其新型电子能带结构

张鑫、高健智、潘明虎*

陕西师范大学

目前构建二维有机-无机异质结的策略大多涉及湿化学过程或剥离和转移,从而导致界面污染、结晶不良或尺寸受限。在这里,我们展示了一种“自下而上”的构筑方法,用于制造具有清洁界面和高结晶薄片的二维大规模异质结构。作为一个原型实例,我们在高取向热解石墨基底上自组装了一个有序的氢键有机框架。有机框架为蜂窝状晶格,同时,在一个晶格中具有位错/无位错的两部分,类似于分子“石墨烯”。有趣的是,基底的最顶层通过强层间耦合被有机框架自提拉,从而有效地形成了浮动的有机框架/石墨烯异质结构。异质结构的单层继承了其固有特性,显示出石墨烯的独特狄拉克带和有机框架的窄带。我们的研究结果表明,通过自提拉效应制造具有大尺度均匀性和高结晶性的二维有机-无机异质结构是一种很有前景的方法,这种方法普遍适用于大多数范德华材料。

D14-62

石墨烯中贝里相位调控与新奇量子物态研究

任雅宁*、何林

北京师范大学

相位是所有干涉现象的根源,是量子力学中极其重要的物理量。贝里相位作为一种几何相位,在揭示微观体系中的新奇量子现象以及探索新型量子物态方面发挥着关键作用。在以往的实验研究中,材料的贝里相位通常被视为一个常数。然而,贝里相位本质上是贝里曲率在闭合路径所围区域上的积分,因此通过调节电子运动路径或调控贝里曲率的分布,都可以实现对贝里相位的有效控制。

这里,我们通过在石墨烯中引入量子点并施加外磁场,有效调控了电子轨迹,从而实现了体系贝里相位的控制 [1,2]。在单层石墨烯量子点中,磁场导致贝里相位从 0 到 π 的跳变,进而导致量子受限能谱

中 $\pm m$ 角动量简并度的解除[1]。在双层石墨烯量子点中，我们首次发现磁场导致贝里相位从 0 到 2π 连续变化，产生了随磁场演化的谷极化能谱，为能谷电子学中谷极化量子态的实现提供了全新思路[2]。

进一步，我们发展了一种具有可调背栅的量子点制备方法 [3,4]，能够在实验中精确调控垂直电场，从而实现了贝里曲率的连续调节。通过该方法，我们成功在双层石墨烯量子点中实现了 $M=0$ 和 $M=1$ 角动量简并度的解除，进一步验证了贝里曲率在量子点能谱调控中的关键作用 [5]。这一进展不仅展示了贝里几何相位对量子能级结构的深远影响，也为未来基于几何自由度的量子器件设计提供了新的平台。

D14-63

基于感算融合架构的智能成像器件

王振兴*

国家纳米科学中心，北京，100190

传统成像技术主要通过分辨率、帧频、动态范围等性能的提升，获得高质量的图像或视频信息，服务“给人看”。人类社会正逐步进入智能时代，成像技术服务的主体正从“给人看”向“给机器看”转变，要求机器能够对图像进行精准的识别、分类和处理。而传统成像技术其“传感”和“计算”单元分离的架构，使其存在数据高冗余、高功耗、长延时等难题，难以满足高性能智能成像的需求。因此具有“感算融合架构”的成像新技术成为当前的研究前沿。报告人将重点介绍课题组在面向智能成像器件的研究进展，其中包括面向大规模器件应用的晶圆级二维半导体材料制备和“感算融合”成像器件构筑。

D14-64

滑移铁电隧穿结

薛加民*

上海科技大学

滑移铁电体是一种新型的铁电体系。它们具有极低的翻转势垒，超快的翻转过程以及无疲劳的翻转特性。然而，其较弱的极化使得其隧穿结的电阻变化较小。为了解决这一问题，我们研究了电极态密度调控的滑移铁电隧穿结。通过铁电调控电极的态密度来实现较大的隧穿电阻变化以及可以通过栅极控制的隧穿阻态。

D14-65

Redirecting On-surface Cycloaddition Reactions in a Self-assembled Ordered Molecular Array on Graphite

Yuli Huang*

International Campus of Tianjin University, Fuzhou

The synthesis of atomically precise carbon nanostructures in ultra-high vacuum has seen extensive progress on metal surfaces. However, this remains challenging on chemically inert surfaces. It is because the thermally activated C-C coupling encounters a severe “desorption problem” on weakly interacting substrates. In this study, we report an extraordinary $[2+2]+[2+2]$ cycloaddition triggered by mild annealing ($\sim 210^\circ\text{C}$) in a highly ordered π -conjugated molecular array on graphite using scanning tunneling microscopy. In contrast to irregular dendritic fragments typically obtained on metal substrates, large supramolecular islands are observed here with cycloaddition products and other polymers over 30%, which are embedded as defective individuals or chains (grain boundaries). First-principles calculations reveal that the energy barriers of the multiple dehydrohalogenation and cycloaddition reactions are reduced by catalytic Fe atoms but remain energetically unfavorable. A distinct driving mechanism is proposed for redirecting the reactions on graphite surface, where additional intermolecular coupling, steric hindrance, and interfacial interactions play significant roles. This study introduces a new paradigm for understanding on-surface synthesis on non-metal substrates.

D14-66

基于插层的低维结构与界面耦合调控研究

吴奇龙

厦门理工学院

插层作为调控低维材料结构与物性的关键手段，能够显著影响材料的晶格构型及电子态分布，从而有效调控界面耦合强度与能带结构。本报告将以 Kagome-Co₉Te₁₆和 WSe₂两类二维体系为例，系统阐述插层引发的结构转变及其对低维界面耦合的调控机制。

在二维 Kagome-Co₉Te₁₆体系中，采用分子束外延技术将 Co 原子插层于 1T-CoTe₂层间，诱导上层 Co 原子层翘曲，成功制备了稳定的 Kagome 晶格结构。此外，在 Au(100)衬底上，通过调控 WSe₂与金属的晶格转角，实现了价带及 Γ 点的调控，构筑了内建电场强度高达 $2.4 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的原子尺度 NPN 型同质结。针对金与单层 WSe₂的强界面耦合，进一步引入锗插层，借助分子束外延调控锗的覆盖度及退火条件，有效降低了界面耦合强度，实现 P 型掺杂的精准调控。

D14-67

二维材料中键合强度与多重量子序：从 MA2Z4 家族到过渡金属化合物的表界面工程

王磊*

内蒙古大学

二维金属材料中展现出电荷密度波、超导电性和拓扑电子态等多重量子序的交织演化，为新型量子材料和器件开发提供了重要平台。本文从硅元素钝化 MoN₂ 表面形成范德华二维材料 MoSi₂N₄ 的实验突破获得启发，提出基于强化学键合插层构筑的多原子层二维材料设计新方法。该策略在 MoSi₂N₄、WSi₂N₄ 和超厚二维材料 MoSi₂N₄(MoN)_{4n} 等实验体系中得到验证，并成功推演出二维 MA2Z4 材料家族。为解析该材料体系的物性多样性，我们建立了基于价电子数判据的晶体分类法则，系统揭示了其超导态、拓扑态、能谷电子态、阻塞原子绝缘体、电荷密度波等丰富量子现象。

区别于强键合材料体系，我们在（近）范德华作用区域内进一步探索了弱键合材料中界面相互作用对晶体结构和电子结构的重构效应。研究发现：双层 TiB₄ 中界面电荷转移和轨道杂化可诱导 Ti 原子位移和拓扑节线的扩大，并且具有应变可调的超导转变温度；硼基化合物 KB₉ 表现出独特的狄拉克锥、范霍夫奇点和超导性转变的协同演化；过渡金属硫族化物 TiX₂（X = S, Se, Te）则呈现电荷密度波和铁电极化的强耦合。这些发现不仅构建了二维量子材料的多尺度设计框架，更为实现可编程量子器件、低功耗电子学及拓量子计算等应用开辟了新路径。

D14-68

Research on the Thermal Conductivity and Thermal Expansion Coefficient of TiAl₃ Alloys Prepared by Electromagnetic Directional CrystallizationRenfu Wang¹, yakun zhang^{2,4}, wenhui ma^{2,3}, xiuhua chen¹

1. School of Materials and Energy, Yunnan University, Kunming 650504, China.
2. National Engineering Research Center of Vacuum Metallurgy/Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China
3. School of Engineering, Yunnan University, Kunming 650500, China
4. Silicon Industry and Engineering Research Center of Yunnan Province, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

The intermetallic compound TiAl₃, distinguished by its exceptional specific strength, low density, and superior oxidation resistance, has emerged as a promising candidate for high-temperature structural applications. In this study, TiAl₃ alloy was synthesized via electromagnetic directional crystallization technology utilizing aluminum alloy scrap (AAS) and Ti sponge as raw materials, achieving effectively removal and purification of impurities (e.g., Fe, Mn, Zn, and Mg). The focus was on the segregation removal of impurity Fe (reduced to 0.25 wt.%) and the formation enthalpy calculated by first-principles, the results indicated that Si has a repulsive effect

on Fe, promoting the segregation removal of Fe. Furthermore, the results show that Si (content ~ 2.27 wt.%) will be solid-solved in the TiAl_3 prepared by this way. The solid-solved Si will cause lattice distortion, enhance phonon scattering, reduce the mean phonon free path, thereby significantly reducing the thermal conductivity ($30\text{-}34$ W/(m K)), and at the same time, improve the stability of the thermal expansion coefficient (CTE) ($7.21 \times 10^{-6}\text{-}12.33 \times 10^{-6}$ K $^{-1}$), which matches the typical high-temperature alloy matrix and meets the requirements of high-temperature structural materials. Furthermore, the heat transfer mechanism within the TiAl_3 alloy was elucidated as a synergistic interplay of phonon-electron coupling. This study establishes a novel, sustainable methodology for TiAl_3 fabrication through AAS and Ti sponge utilization, with great potential for high-temperature structural engineering applications.

D14-69

Direct evidence of intrinsic Mott state and its layer-parity oscillation in a breathing kagome crystal down to monolayer

Wenhui Li¹, Huanyu Liu¹, Zishu Zhou², Hongbin Qu¹, Jiaqi Zhang¹, Weixiong Hu¹, Chenhaoping Wen¹, Ning Wang², Hao Deng¹, Gang Li¹, Shichao Yan^{*1}

1. ShanghaiTech University

2. The Hong Kong University of Science and Technology

We report direct spectroscopic evidence of correlation-driven Mott states in layered Nb_3Cl_8 through combining scanning tunneling microscopy (STM) and dynamical mean-field theory. The Hubbard bands persist down to monolayer, providing the definitive evidence for the Mottness in Nb_3Cl_8 . While the size of the Mott gap remains almost constant across all layers, a striking layer-parity-dependent oscillation emerges in the local density of states (LDOS) between even ($n = 2, 4, 6$) and odd layers ($n = 1, 3, 5$), which arises from the dimerization and correlation modulation of the obstructed atomic states, respectively. Our conclusions are supported by a critical technical advance in atomic-scale LDOS mapping for highly insulating systems. This work provides the definitive experimental verification of correlation-driven Mott ground states in Nb_3Cl_8 while establishing a general protocol for investigating the interplay of electronic correlation and interlayer coupling in layered insulators by using low-temperature STM technique.

墙报

D14-P01

CrSb 二维薄膜中交错磁性的厚度依赖性

李柯仁¹, 杜轶^{*1}

1. 北京航空航天大学

交错磁体作为一类新型磁性材料, 拥有独特的晶体对称性与自旋排列, 因而兼具铁磁材料的强自旋极化特性和反铁磁材料的零杂散场优势, 为解决传统磁性材料应用的瓶颈提供了全新方向。其中 CrSb 凭借其高温稳定性、巨大自旋分裂和独特对称性, 成为交错磁体研究的热点材料, 受到研究者的广泛关注, 但受限于实验上制备、表征和调控的技术难点, 当前研究主要聚焦于三维块体材料体系, 当其被减薄至二维极限时, 交错磁性是否还能维持尚未得到探索。在此, 我们通过分子束外延技术生长并结合扫描隧道显微镜实验和密度泛函理论计算, 研究了二维 CrSb 的交错磁性。我们发现 1 UC 的晶体结构表现出与交错磁性不兼容的对称性, 7/4 UC 满足交错磁的晶体对称性与自旋排列, 而且从 10/4 UC 开始表现出与体相相同的交错磁性质。这些发现表明 CrSb 二维极限下的磁序具有显著的厚度依赖性, 并揭示了其交错磁性稳定存在的临界厚度。这为理解低维极限下交错磁性的稳定性机制及基于二维 CrSb 的自旋电子器件设计提供了重要依据。

D14-P02

缓冲层辅助下的二维溴化锰薄膜在 Au(111)表面的外延生长

王占泽^{1,2}、孙铭悦^{1,2}、黄玉立*¹

1. 天津大学福州国际联合学院
2. 新加坡国立大学物理系

作为一类极具应用前景的二维磁性半导体材料，层状过渡金属卤化物（TMHDs）因其可调控的绝缘带隙特性与多样化的磁有序行为，在近年来受到广泛关注。本研究使用超高真空分子束外延（MBE）技术，成功在 Au(111)衬底上实现了单层及多层 MnBr₂ 薄膜的有序二维生长。结合原位扫描隧道显微镜（STM）、扫描隧道谱（STS）和 X 射线光电子能谱（XPS）等多种表征手段，直接揭示了薄膜的原子结构、电学性质和化学计量信息。结合第一性原理密度泛函理论（DFT）计算，我们进一步分析了薄膜层数及衬底相互作用对其半导体带隙与自旋极化态密度的调控效应。研究表明，MnBr₂ 薄膜必须依托预先形成的 MnBr_x 缓冲层才能在 Au(111)衬底上实现稳定的外延沉积。此外，实验中发现了多种具有不同表面原子密度的缓冲层结构，其表面有明显的鱼骨状重构条纹，揭示该缓冲层在调节界面应变与促进后续 MnBr₂ 成核过程中的关键作用。STS 测试结果显示单层及多层 MnBr₂ 均为带隙约 2.10 eV 的宽带隙半导体。XPS 测试结果进一步表明缓冲层的化学计量比为 MnBr_{1.63}，而双层薄膜为 MnBr_{1.93}。此外，理论计算表明 MnBr₂ 具有较强的自旋极化特性，且 Au(111)衬底对 MnBr₂ 薄膜的电子和自旋结构没有明显的影响。本工作系统研究了二维 MnBr₂ 薄膜的可控外延生长机制及其电学性质，为实现二维磁性材料的精准可控生长提供了新的策略思路，也为 MnBr₂ 薄膜在低维电子与自旋器件中的潜在应用奠定了坚实的基础。

D14-P03

Reversible Phase Transition and Magnetic Properties of Two-Dimensional Layered Iron Bromides

Mingyue Sun^{1,2}, Yihe Wang^{1,2}, Zhanze Wang², Yuli Huang*²

1. National University of Singapore, International Campus of Tianjin University
2. Tianjin University, International Campus of Tianjin University

The development of large and uniform crystalline 2D flake magnetic materials, due to their low energy consumption and rapid response times, remains a central focus for researchers. In this study, molecular beam epitaxy (MBE) is employed, using iron bromide (FeBr₂) as the source material to fabricate on an Au(111) surface at room temperature. Low-temperature scanning tunneling microscopy (STM) measurements reveal two distinct phases with varying thicknesses. As the growth progresses, FeBr_{1.5} transforms into FeBr₂, which could revert to FeBr_{1.5} over time at 150 °C. The semiconducting behavior of FeBr₂ is identified through scanning tunneling spectroscopy (STS) and ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS) measurements. Additionally, X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) measurements of FeBr₂ indicate that the monolayer exhibits ferromagnetic behavior, while the bilayer suggests a possible interlayer antiferromagnetic coupling. These findings provide a valuable platform for the thermodynamic study of low-dimensional materials and highlight FeBr₂ as a promising candidate for application in advanced multifunctional magnetic devices.

D14-P04

Structural evolution and electronic structure characterization of potassium doped blue phosphorus

Kun Liu, Chen Liu, Jinfeng Xu, Jiaou Wang*

The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences

Potassium ion batteries are a new type of energy storage device, and phosphorus, as the anode material with the highest theoretical capacity, indicates that phosphorus based negative electrode materials have broad application prospects in potassium ion batteries. In recent years, many research works have shown that applying low dimensional materials or nanostructures to the preparation of ion battery anodes is of great help in improving

battery capacity. We use low-energy electron diffraction (LEED), synchrotron radiation in-situ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and angle resolved photoelectron spectroscopy (ARPES) to investigate the interaction between potassium and blue phosphorus, as well as the structural modulation caused by electron doping. By molecular beam epitaxy (MBE), potassium atoms rapidly mix with the blue phosphorus surface and adsorb at the hollow site at room temperature. Subsequent high-temperature annealing will form a new $(5\sqrt{3}\times 5\sqrt{3})R30^\circ$ structure, or annealing and potassium supplementation will form a more stable 2×2 structure. And the detection of electronic structures also allowed us to observe new energy bands from these two structures that had never been observed before. This study reveals the complex interaction between potassium and two-dimensional phosphorene, providing guidance for the preparation of novel low dimensional materials.