

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

D37-量子材料
D37-Quantum Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

D37-量子材料

分会主席：俞大鹏、廖志敏、刘开辉、朱彦武、向斌

D37-01

一维材料组装体及其高性能器件

孟国文*

中国科学院合肥物质科学研究院 固体物理研究所

一维纳米材料的宏观组装体，在微纳器件中有广阔应用前景，但其批量制备是国际难题。预先制备好的零散一维材料，很难在空间批量组装；即使现有的超净室工艺，也难以直接批量制备一维材料的复杂组装体。我们开辟了基于多孔模板将一维材料在二维、三维空间原位连接组装的新方法。创制了一维分枝孔、三维纵横互连孔和叉指孔的多孔氧化铝模板；解决了可控制备一维材料组装体的难题。研发出了面电容比国际同类器件最高值高 25% 的微型滤波电容器，以及能量密度比国际同类器件最高值高 33% 的电介质电容器。研制了智能型高灵敏便携式检测箱，解决了高毒污染物和毒品临场快速检测难题。发展了制备一维分枝纳米结构的新方法，为构筑微纳电路提供了新方案。

D37-02

二维材料：从石墨烯到 MoSi_2N_4 体系

任文才*

中国科学院金属研究所

以石墨烯为代表的二维材料具有多种独特的物理化学性质，为电子信息、新能源等领域的发展提供了新的机遇。如何实现二维材料的控制制备和应用，特别是发现二维极限下的新材料、新物性和新应用，是二维材料领域的重要挑战。报告将重点介绍团队自 2007 年以来针对上述挑战取得的主要研究进展：(1) 建立了石墨烯的 CVD 生长机理和方法，实现了结构与性能调控，推动了其在柔性电子领域的应用；(2) 研制出高导热石墨烯散热材料，为高性能电子设备的稳定、可靠工作提供了重要支撑；(3) 开拓出二维 MoSi_2N_4 材料新体系，创制出二维超离子导体，开辟了二维材料研究新方向。

D37-03

多场下的离子输运和物性调控

李润伟*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

随着电子信息器件的微型化与功能集成化，电子器件尺寸已经进入纳米尺度。虽然器件工作电压不高，但器件内部电场强度很大，使得器件中出现离子迁移，导致器件不稳定。但从另外一个角度，可以通过多物理场精准控制纳米尺度下的离子迁移，构建纳米功能结构，产生新奇物理效应，进而有望设计出新型纳米功能器件，为后摩尔时代电子信息技术的持续发展提供新途径。在本报告中，我们将探讨在电、光、磁等多物理场作用下，纳米尺度离子的输运规律与物理机制；探讨如何通过外加物理场精确控制离子的空间分布，构筑纳米点接触结构和可重构的磁性异质结构等；探索可再构纳米结构中的新奇物理效应，包括室温整数（分数）量子电导效应、非对称磁电阻效应等。

D37-04

晶体群表示及在量子材料中的应用

姚裕贵*

北京理工大学物理学院

群论在物理学和晶体学中有着广泛的应用，在晶体能带分析特别是近年来拓扑物理等的研究中，空间群及其表示变得越来越重要。本报告将主要介绍课题组近年来在晶体群表示及其在量子材料中应用的研究

进展, 如计算 (磁) 空间群 (含 1651 种磁群、528 种磁层群、394 磁杆群) 任意不可约 (共) 表示的工具、晶体中演生粒子百科及应用、面内反常霍尔效应、电控自旋效应、电致霍尔效应等的设计与实现等。

D37-05

基于石墨烯的层间拖拽效应

曾长淦*

中国科学技术大学

两个空间相近但彼此绝缘的导电层构成了电双层结构。在其中一层施加驱动电流会在另一层诱导产生开路电压, 即产生层间拖拽效应。相较于传统单一导体层内输运, 层间拖拽这一独特的耦合输运行为可以同时反映层内电子态特性以及层间长程相互作用, 为发现新奇量子物态提供了更多可能性, 拓展了量子输运的研究维度。二维电子体系的发展为研究层间拖拽效应提供了新平台, 特别是使超短间距的层间强耦合研究成为可能。在本次报告中, 我将介绍近期在层间拖拽效应方面取得的系列进展, 包括: 无质量和有质量费米子之间的拖拽指纹特征, 层间拖拽路径的量子干涉, 基于二维超导的巨幅超流拖拽效应。在此基础上, 我将重点介绍基于摩尔超晶格的摩尔拖拽效应。这些进展表明新兴二维层状材料之间的准粒子强耦合会产生丰富的演生层间拖拽效应, 从而为新原理电子器件的发展提供新机遇。

D37-06

From quantum paraelectricity to quantum electric-dipole liquid

孙阳*

重庆大学

Geometric frustration and quantum fluctuations may prohibit the formation of long-range ordering even at the lowest temperature, and therefore liquid-like ground states could be expected. A well-known example is quantum spin liquids in frustrated magnets. Geometric frustration and quantum fluctuations may also happen in dielectric systems. The quantum fluctuation of electric dipoles yields quantum paraelectricity as observed in SrTiO₃. Nevertheless, geometric frustration in dielectrics is rarely reported. We show that the hexaferrite BaFe₁₂O₁₉ represents a prototype of quantum paraelectric with geometric frustration where antiferroelectrically coupled electric dipoles reside on a triangular lattice. In this case, a state named quantum electric-dipole liquid, an analogue of quantum spin liquids, could emerge at the lowest temperature. We present a series of experimental lines of evidence to reveal the existence of an unusual liquid-like quantum state in BaFe₁₂O₁₉. The quantum liquid phases of electric dipoles in frustrated dielectrics not only open up a new playground for fundamental physics but also hold a promise in applications of quantum information.

D37-07

二维超导中的反常金属态

刘易*

中国人民大学

In general, the zero-resistance superconducting state with phase-coherent Cooper pairs and the insulating state with localized Cooper pairs are believed to be the two ground states of two-dimensional (2D) bosonic systems. After decades of explorations, whether an intermediate metallic ground state exists in 2D superconducting system has been a long debate. In high-T_c superconducting YBCO films with triangular array of nanoholes, a robust intervening anomalous metallic state (i.e. quantum metal or Bose metal) characterized by resistance saturations at low temperatures is detected [1]. Since then, the anomalous metallic states have also been systematically investigated in ultrathin PdTe₂ films [2] and TaSe₂ nanodevices [3] by performing ultralow temperature transport measurements with high quality filters.

The microscopic origin of the anomalous metal state remains a major puzzle. Here, we report systematic

transport measurements on ultrathin crystalline FeSe films grown on SrTiO₃ (STO), where the 2D high-temperature superconductivity emerges at the interface [4]. Remarkably, under zero magnetic field, the anomalous metal state persists up to 20 K, an exceptionally high temperature standing out from previous observations. Furthermore, a linear-in-temperature resistance is observed below onset superconducting critical temperature, showing suppressed Hall coefficient compared to the normal state. We develop a microscopic model for the anomalous metal state under zero magnetic field based on the quantum tunneling of vortices influenced by the ohmic dissipation, which gives the quantitative explanation for the temperature dependence of resistance in various FeSe/STO samples. Our recent experimental progresses will shed new light on the origin of the intriguing anomalous metal state in 2D bosonic systems.

References:

[1] Science 366, 1505 (2019)

[2] Nano Lett. 20, 5728-5734 (2020)

[3] Nano Lett. 21, 7486-7494 (2021)

[4] arXiv:2111.15488, to be published in PRL

D37-08

层状过渡金属硫属化合物的物相调控及物性研究

黄富强*、方裕强

上海交通大学

层状过渡金属硫属化合物 (TMD) 因其量子自旋霍尔效应、不饱和巨磁阻、铁电、超导等奇特物性, 成为当前凝聚态物理、固体化学、材料化学和信息科学等学科交叉领域的研究热点。钼钨系硫属化合物 MX_2 ($M = Mo, W$; $X = S, Se, Te$) 被认为晶体结构类型最为丰富, 除了热力学稳定的 2H 相之外, 还存在热力学亚稳的 1T、1T'、1T'' 和 1T''' 相。然而在高温制备过程中, 亚稳相 MX_2 极易转变为 2H 相而导致晶体结构和物性缺失, 因此亚稳相 MX_2 单晶制备极具挑战。基于固体化学中“结构功能区”的晶体结构设计思路, 报告人提出在 MX_2 层间嵌入碱金属原子 A 构建“电子注入区”和“晶格稳定区”来降低亚稳相材料热力学自由能的策略, 发展出保持住亚稳相层状结构的低温拓扑化学法, 解决亚稳相 MX_2 晶体的制备难题。从晶体结构相似性出发, 利用 AMX_2 前驱体中碱金属离子的脱出合成系列亚稳相 MX_2 超导化合物并解析出晶体结构, 其中发现了 2M WS₂ 是一种新型拓扑超导体。通过角分辨光电子能谱发现亚稳相 2M WS₂ 的拓扑电子能带结构, 超导序参量和拓扑表面态使得 2M WS₂ 产生各向异性的马约拉纳束缚态; 在二维 2M WS₂ 上发现自旋-轨道-宇称耦合超导新机制, 实现面内方向超高的上临界磁场; 2M WS₂ 在低温区经历超导-费米液体-奇异金属的转变, 并发现费米液体准粒子转变为奇异金属过程中载流子巨大熵变。

D37-09

Electron and Magnon Resonant Tunneling Diodes

韩秀峰*

中国科学院物理研究所

Resonant tunneling originally refers to electron tunneling through the resonant states of double-barrier potentials with a series of sharply peaked transmission coefficients (close to unity) at certain energies. Electron resonant tunneling can be used to design promising electronic devices such as semiconductor resonant tunneling diode (RTD). If the quantum well states are spin-dependent, the electron resonant tunneling would exhibit spin-polarized or spin-selective properties, as observed the quantum well (QW) resonant tunneling magnetoresistance (QW-TMR) in the double barrier magnetic tunnel junctions (DB-MTJ) with a thin intercalary ferromagnetic layer. As a result of the quantum wave-particle duality, resonant tunneling can be further expanded to magnons--the quanta of spin waves, which opens up a new avenue of research--magnon resonant tunneling. Because of the bosonic nature and macroscopic quantum coherence, the magnon resonant tunneling may occur in

a wide spectrum and temperature range (room temperature and above room temperature), while the electron resonant tunneling typically occurs around the Fermi level and at low temperature or around room temperature. Here, we introduce the recent advances in resonant tunneling physics of electron and magnon, and outline possible device implications such as Spin-RTD, Magnon-RTD, and magnon field effect transistor (Magnon FET) etc.

D37-10

磁性相互作用的理论和数值计算研究

万贤纲*

南京大学物理学院、固体微结构国家重点实验室

磁性材料是一种重要的材料体系。得到描述其磁性性质的有效磁模型以及模型中的磁性相互作用具有重要的意义。报告中将汇报我们使用磁力理论和线性响应理论发展的计算海森堡相互作用、DM 相互作用的方法，以及使用这些方法做的相关工作。

D37-11

拓扑绝缘体中量子霍尔态调控的非互易输运

宋凤麒*、张帅

南京大学

在量子材料体系，对称性是十分重要的内容。当体系的反演对称性破缺时，则会导致新奇的输运现象，即非互易电输运，此时电阻的大小会依赖于电流的方向。拓扑绝缘体的表面态，尤其是外磁场下的量子霍尔态，为研究非互易电荷传输提供了一个独特的平台。实验上已经在拓扑绝缘体材料体系中发现了新奇的非互易输运现象。比如在拓扑绝缘体中，实现了磁手性各项异性导致的非互易输运和巨大的整流系数；在磁性拓扑绝缘体中，实现了由量子反常霍尔态调控的非互易输运。我们在高质量的拓扑绝缘体中，实现了拓扑表面态的量子霍尔效应。进一步的，我们观测到了由量子霍尔态调控的非互易输运现象，其展现出手性依赖的特征，且能通过改变费米面和磁场等来有效的调控其性质。这里的非互易归因于量子霍尔边缘态和狄拉克表面态之间的非对称散射。此外，我们发现了这里的非互易呈现出巨大非互易系数。我们的工作不仅揭示了拓扑绝缘体中量子霍尔态的非互易电荷传输特性，对为未来电子器件的研究具有重要意义。

D37-12

二维电子材料及其异质结构多功能器件

何军*

武汉大学

材料的设计开发和原子尺度精准调控是诸多量子技术的核心基础。二维半导体材料因其超薄的厚度、优异的电子特性以及与传统微电子工艺和柔性基底良好的兼容性，被认为是后摩尔时代高密度集成电路的重要候选对象。目前为止，具有本征层状和非层状结构的材料都可以制备出相应的二维形态。利用二维电子材料的量子特性开发新原理、新结构电子器件，探索与硅基器件的集成应用，已成为当前的研究热点。我们的研究主要集中于新型二维量子材料体系及后摩尔信息器件应用方面。在本报告中，我将集中讨论以下几个方面：1、面向规模化集成应用，利用范德华外延方法实现了多种关键二维半导体的硅基晶圆级单晶制备，发展了二维材料掺杂新工艺获得超高器件迁移率，厘清了一维量子自旋链中维度转换的关键机制，并通过对量子物态的高效调控实现了室温磁性半导体和室温多铁性，解决了 Science 杂志 125 周年提出的 125 个重要前沿科学问题之一；2、发展了二维晶体管金半接触、栅介质/半导体界面以及沟道表面界面的调控新方法，实现了二维电子器件的表界面调控和性能优化；3、开发出“后摩尔时代”新原理、新结构器件及芯片，包括二维 CMOS、红外半导体焦平面阵列、新架构光电集成和“全在一”多功能异质集成等，性能指标均为当时报道最高值。

D37-13

Superconducting quantum oscillations and anomalous negative magnetoresistance in nanohoneycomb patterned oxide interface

Yanwu Xie*
Zhejiang University

The extremely low superfluid density and unprecedented tunability of oxide interface superconductor provide an ideal platform for studying fluctuations in two-dimensional superconductors. In this talk, we present our result on $\text{LaAlO}_3/\text{KTaO}_3$ devices patterned with a nanohoneycomb array of insulating islands. Little-Parks like magnetoresistance oscillations have been observed, which is dictated by the superconducting flux quantum $h/2e$. An anomalous negative magnetoresistance appears under a weak magnetic field, suggesting magnetic-field-enhanced superconductivity. By examining their dependences on temperature, measurement current, and electrical gating, we conclude that both phenomena are associated with superconducting order parameter: The $h/2e$ oscillation provide direct evidence of Cooper pair transport; the ANMR is related to the strong superconducting fluctuations in constricted one-dimensional superconducting channels.

D37-14

二维量子磁体拓扑元激发中的新奇“拓扑克尔效应”

向斌*
中国科学技术大学

斯格明子的概念起源于粒子物理，后被广泛应用于描述凝聚态磁性材料中一类独特的拓扑元激发，其局域磁矩的涡旋导致量子化的拓扑电荷，这使它们有可能成为下一代信息比特。对于斯格明子的表征，常借助电学测量中的拓扑霍尔效应作为其存在的有力判据之一，这种效应源于显示拓扑电荷的涌现磁场对电子的散射，但电学测量仅适用于金属体系。随着拓扑磁性材料的有效拓展，领域迫切需要发展适用于更多体系的表征手段，例如针对非金属体系斯格明子的表征。

本研究团队利用化学气相输运法成功合成了高质量二维 CrVI_6 单晶（具有非平庸拓扑电子态），通过磁光克尔效应表征了该体系薄层样品的磁性结构并观察到系统性奇异“凸起”。该特征与块体的 M-H 磁滞回线完全不同，却与金属磁斯格明子体系的拓扑霍尔效应高度相似。通过理论分析表明两种磁性原子 Cr 与 V 的共存会导致中心反演对称性破缺，并在自旋轨道耦合作用下诱导出很强的 Dzyaloshinskii – Moriya 交换作用，从而具备产生拓扑磁结构——斯格明子的前提条件。随后，通过原子尺度的磁动力学模拟和理论计算，揭示出斯格明子的“拓扑荷”对于光电场下传导电子的散射是光学克尔角在磁翻转过程中出现“凸起”信号的微观原因。

该成果表明了利用光学手段开展拓扑磁结构无损/非侵入式探测的可行，它基于交变光电场，不仅可以对非金属体系中的斯格明子和其它拓扑元激发开展空间分辨、无损、非接触式探测，并且在原理上可以涵盖金属体系，为揭示拓扑磁结构的微观机理提供了有力的物理基础与表征方案。

D37-15

Towards the quantized anomalous Hall effect in AlO_x -capped MnBi_2Te_4

Chang Liu*
Renmin University of China

The quantum anomalous Hall effect in layered antiferromagnet MnBi_2Te_4 harbors a rich interplay between magnetism and topology, holding a significant promise for low-power electronic devices and topological antiferromagnetic spintronics. In recent years, MnBi_2Te_4 has garnered considerable attention as the only known material to exhibit the antiferromagnetic quantum anomalous Hall effect. However, this field faces significant challenges as realizing quantized transport at zero magnetic fields depends critically on fabricating high-quality device. In this work, we address the detrimental influences of fabrication on MnBi_2Te_4 by simply depositing an

AlOx thin layer on the surface prior to fabrications. Optical contrast and magnetotransport measurements on over 50 samples demonstrate that AlOx can effectively preserve the pristine state of the samples and significantly enhance the anomalous Hall effect towards quantization. Scaling analysis reveals the Berry curvature dominated mechanism of the anomalous Hall effect at various magnetic configurations. By adjusting the gate voltage, we uncover a gate independent antiferromagnetism in MnBi₂Te₄. Our experiment not only pave the way for fabricating high-quality transport devices but also advance the exploration of exotic quantum physics in 2D materials.

D37-16

原子可视化的物态调控研究

白雪冬*

中国科学院物理研究所

电子显微镜已进入亚埃分辨能力，在物质科学研究中发挥着越来越重要的作用。我们基于扫描探针技术，发展原位透射电镜方法和技术，自主研制完成原位电镜量子测量与调控装置，开展结构与物态调控研究，实时成像物理/化学现象的原子过程，使结构-性质关系测量与调控达到原子分辨水平。通过外场（光、电、力、超快激光、低温）和表界面生长模板等方法调控量子材料结构与物态。本报告将介绍我们在铁电极性拓扑结构、电荷密度波（CDW）相变以及亚稳结构表界面成核生长等调控研究的进展。

D37-17

Dirac-fermion approach and symmetry-driven anisotropic coupling effect in antiferromagnetic topological insulator

张海军

南京大学

Antiferromagnetic topological insulators (AFM TIs), which host magnetically gapped Dirac-cone surface states and exhibit many exotic physical phenomena, have attracted great attention. The coupling between the top and bottom surface states becomes significant and plays a crucial role in its low-energy physics. In this talk, we first briefly introduce the Dirac-fermion approach, and then show that the coupled surface states can be intertwined to give birth to a set of unique new Dirac cones, dubbed intertwined Dirac cones, through the anisotropic coupling enforced by crystalline n -fold ($n = 2, 3, 4, 6$) rotation symmetry in the presence of a PT -symmetry breaking potential, for example, an electric field. Interestingly, we also find that the warping effect further drives the intertwined Dirac-cone state into a quantum anomalous Hall phase with a high Chern number ($C = n=2, 3, 4, 6$). Then, based on first-principles calculations, we have explicitly demonstrated six intertwined Dirac cones and a Chern insulating phase with a high Chern number ($C = 3$) in MnBi₂Te₄/Bi₂Te₃ heterostructures, as well as the $C = 2$ and $C = 4$ phases in HgS and α -Ag₂Te films, respectively. This work reveals a new mechanism for designing the quantum anomalous Hall state with a high Chern number and also paves a way for studying the twistorics of AFM TIs with the interplay of magnetism, topology and highly tunable high-Chen-number flat bands.

D37-18

新型超导体的发现和物性调控

郭建刚*

中国科学院物理研究所

新超导体探索一直是超导物理、晶体物理和固态化学等学科的前沿课题之一，新体系的发现能有效推动凝聚态物理和材料物理等领域的交叉融合。在深入理解晶体结构的基础上，通过有效调控化学键的形成和断裂合成新物相，可以调节体系的载流子浓度，发现新超导体和新超导相。同时，结合原位栅压和原位

压力等，精细、原位地调控和观测了新超导体和电子相的产生和演变。基于此，我们成功地发现了几十种新超导体，包括 FeSe 基超导体，“超原子基”超导体 $\text{Au}_6\text{Te}_{12}\text{Se}_8$ 和 Ni 基超导体等，相关成果被列为《前沿研究》中凝聚态物理领域排名第 1 的新方向，引领 30 个国家的 400 多个研究组开展后续研究。本报告中，将重点汇报 Ni 和 SnSe_2 基新型超导晶体的发现和进展，包括晶体生长、结构相变和超导物性演化等内容。

D37-19

新型二维笼目晶格材料构筑与物性研究

张利杰*

湖南大学

笼目晶格由顶点共享三角形组成，具有几何挫折、拓扑、关联等量子物态。然而，目前的研究主要集中在块体材料中包含某个笼目晶格表面，这不可避免地会带来层间相互作用，从而影响其本征电子结构。二维笼目晶格仅在极少数体系中有报道。本研究采用超高真空低温扫描隧道显微镜结合密度泛函理论计算，对 $\text{Au}(111)$ 表面外延制备的两种笼目晶格进行了研究。在 Bi/Au 体系中，基于电子笼目晶格的模板效应，构建了两种单原子锗超晶格。笼格的模板效应通过第一性原理计算和 Mulliken 种群分析得到了证实[1]。此外，在 Ge/Au 体系中，通过外延法制备了镜面反转对称保护的 Dirac 节线(DNL)半金属 Au_2Ge [2]，并在此基础上制备了二维笼目晶格 Au_5Ge ，并证明其具有平带和邻近效应诱导的 DNL 态[3]。

[1] Q. Tian et al. Two-dimensional artificial Ge superlattice confining in electronic kagome lattice potential valleys. *Nano Lett.*, 23, 21, 9851 – 9857 (2023)

[2] Q. Tian et al. Twist-Angle Tuning of Electronic Structure in Two-Dimensional Dirac Nodal Line Semimetal Au_2Ge on $\text{Au}(111)$ *ACS Nano*, 18, 12, 9011–9018 (2024)

[3] Q. Tian et al. Two-dimensional kagome topological nodal line semimetal Au_5Ge with flat band. submitted to PRL.

D37-20

Exotic Electronic States in Low-Dimensional Systems: Flat Bands on Surfaces and Interfaces

Xianghua Kong*

Shenzhen University

Flat electronic bands near the Fermi level provide a fertile playground for realizing interaction-driven correlated physics. Herein, we report theoretical predictions and experimental realizations of nearly flat bands near or even across the Fermi level in low-dimensional systems focusing on both surface and interface phenomena.

We first identify surface kagome electronic states (SKESs) on Sn-terminated $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ surfaces. These SKESs arise from vertical p-d hybridization between surface Sn (subsurface S) atoms and the underlying Co kagome-lattice. Lateral hybridization further preserves the kagome symmetry and topological properties, as confirmed by nc-AFM and DFT calculations. By substituting surface Sn (subsurface S) with elements like Se or Te, we demonstrate the tunability of these SKESs, offering a method for large-area synthesis of kagome-lattice materials.

Additionally, we introduce a method to create moiré superlattices in untwisted homobilayers by applying in-plane heterostrains. This technique induces out-of-plane corrugations, forming twisted coloring-triangular lattices in each moiré supercell and leading to flat electronic bands. The “3D” strain approach in 2D interfacial systems effective in fabricating exotic electronic states, contrasting with nearly flat bands produced by uniform in-plane strain.

Our findings open new pathways for synthesizing and manipulating flat electronic states in low-dimensional materials, with significant implications for future quantum devices.

D37-21

二维材料成核控制及物相调控

魏文娅*

华南师范大学

随着电子器件不断微型化, 传统硅基技术接近极限, 电子器件发展面临巨大挑战。非中心对称二维材料, 如: 过渡金属硫化物 (TMDs)、六方氮化硼 (h-BN), C_3N 等都是极具潜力的下一代电子材料。高质量单晶的可控生长及物相调控是推动二维材料发展及广泛应用的关键, 本报告将详细介绍我们针对二维材料成核控制及物相调控的相关工作。

大量研究证明, 衬底台阶边界可打破二维材料生长多个等价晶相, 形成取向一致的核。但实际生长中, 二维单晶生长窗口非常狭窄, 常出现衬底平面和台阶边界同时成核, 造成大量晶界和缺陷。对此, 我们提出[1]选用绝缘衬底重构过程中, 含有大量氧缺陷的活性台阶。我们理论研究发现, 相对重构完成的绝缘衬底 (Al_2O_3) 平行台阶, 退火过程中含有大量 O 缺陷的台阶和 TMDs 相互作用更强, TMDs 成核率更高, 依据该生长机制, 实验成功在多种绝缘衬底 (Al_2O_3 、MgO 和 TiO_2 等) 上制备系列 TMDs 材料 (WS_2 、 NbS_2 、 $MoSe_2$ 、 WSe_2 和 $NbSe_2$ 等) [1]。

h-BN 是极具潜力的下一代绝缘材料, 足够厚度的叠层单晶是降低漏电流, 防止电击穿的关键。ABC 堆垛叠层在保有多层 h-BN 各种优异物理化学性质的同时, 具有独特的铁电性。然而, 与单层相比, 多层二维材料的生长机制更为复杂, 多层单晶 h-BN 生长必须解决厚度可控、取向一致、堆垛一致这三个关键性问题。我们提出[2]基于衬底的面内、外协同调控机制, 在单晶金属 Ni 衬底表面设计并制备具有斜面的高台阶, 以有效调控叠层单晶的生长。理论研究发现利用 Ni (520) 衬底表面降温聚合形成斜面高台阶能在生长过程中协同调控并锁定 ABC 堆垛叠层的面内晶格取向和面外滑移矢量, 诱导 ABC 堆垛晶畴形核长大。理论计算同时证明非中心对称 ABC 堆垛会导致其层间电极化矢量在面外方向积累, 展现出铁电性。叠层堆垛具有较小的层间滑移和极化翻转势垒, 铁电畴的理论宽度约仅为 10 纳米, 预示其作为高密度信息存储介质的潜力。本研究为二维单晶叠层的精确堆垛控制提供了有效途径, 并为叠层二维材料的多功能器件应用奠定了新基础。

双层 TMDs, 尤其是菱面体堆垛的双层单晶具有远高于单层的优异的光、电性能, 是新一代电子和光电器件的优秀材料平台。但是, 双层单晶生长依旧面临诸多困难。针对该问题, 我们[3]建立热力学模型, 并结合密度泛函理论(DFT)计算, 研究不同生长条件下双层 WS_2 的成核和生长行为。基于模型提出: 1. 高 W 源浓度是降低双层成核势垒, 实现双层成核的关键。2. 弱相互作用的衬底面促进上下两层同步均匀生长; 3. 蓝宝石表面原子台阶可以打破双层 WS_2 生长的等价晶相, 实现菱面体堆垛双层 WS_2 单晶的可控生长。基于该生长机制, 实验成功合成高质量菱面体堆垛双层 WS_2 单晶, 实现 TMDs 双层单晶制备的突破性进展。

二维 C_3N 具有类石墨烯蜂窝状无孔有序结构, 同时弥补石墨烯无带隙的缺憾, 在纳米电子学等领域有巨大的应用潜力, 我们围绕双层 C_3N 光电输运等性质进行研究和调控[4]。通过控制堆垛方式实现双层 C_3N 从半导体到金属性的转变, 与具有 1.2 eV 带隙的单层 C_3N 相比, 双层 C_3N 带隙有三种: 1) 金属性的 AA' 堆垛; 2) 带隙减少约 30% 的 AB' 堆垛; 3) 接近单层带隙的摩尔堆垛。双层 C_3N 大尺度的带隙调控在二维材料中也非常罕见。本文结合密度泛函和紧束缚理论构建物理模型, 揭示双层 C_3N 不同堆垛带隙变化的本质是上下层 p_z 轨道耦合的不同。该工作为碳基纳米材料在电子器件领域的应用提供了新选择。

本文对二维材料成核控制及物相调控的研究工作, 为二维材料可控生长及在光电领域的广泛应用奠定基础。

参考文献

- [1] PM Zheng*, WY Wei*, ZH Liang*, ..., F Ding#, KH Liu#, XZ Xu#; Nature Commun. 2023,14, 592.
- [2] L Wang*#, JJ Qi*, WY, Wei*, MQ Wu*, ..., F Ding#, XR Zheng#, KH Liu#, XD Bai#; Nature. 2024,629, 8010, 74-79.
- [3] C Chang*, XW Zhang*, WX Li*, QL Guo*, ..., WY, Wei#, KH Liu#, XZ Xu; Nat. Commun. 2024,15, 4130.
- [4] WY Wei*, SW Yang*, G Wang*, ..., GQ, Ding.#; ZH, Kang #.; QH Yuan#. Nat. Electron. 2021, 4:

486-494.

D37-22**二维菱方氮化硼的控制生长和物性研究**戚嘉杰¹、王理²、白雪冬²、刘开辉^{*1}

1. 北京大学物理学院

2. 中国科学院物理研究所

随着材料尺寸微缩,原子层厚度二维材料在量子限域作用下能展现出丰富的理化性质和新奇的量子特性。在庞大的二维材料家族中,氮化硼由于具有超宽的带隙、极高的化学稳定性、优良的热导率、低的介电损耗和原子级平整的表面等优点,被视为二维绝缘层的理想备选材料。特别是层间同向堆垛的菱方氮化硼,其面内、面外两个方向均中心反演对称性破缺,因此能表现出额外的光学非线性和界面铁电性,有望应用于未来电子学逻辑器件、集成光量子芯片、高密度铁电存储等领域。然而,菱方相是自然界中并不存在的热力学亚稳相。实现高质量菱方氮化硼晶体的按需定制,是研究其本身物性和研发新型应用的前提基础,也是当前亟待解决的研究瓶颈。其中蕴含两个关键科学难题:(1)多层晶畴的菱方堆垛(堆垛问题);(2)厚层晶体的连续生长(厚度问题)。

这里,针对堆垛问题,我们提出了一种倾斜台阶面锁定堆垛的生长机制,成功实现了对于单个氮化硼晶畴的逐层同向排列、一致滑移的堆垛锁定和对于所有氮化硼晶畴单一取向生长的控制。通过化学气相沉积技术,合成了面积达 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 、厚度2.2-12 nm可调的单晶纯相菱方氮化硼薄膜。系统的测试证明,其存在随厚度逐层累积的极化,且极化方向可以通过外加强电场改变氮化硼堆垛构型的方式而改变,表现出了可操纵的铁电特性。随后,针对厚度问题,我们设计了一套体相晶格输运以界面台阶调控的生长模式,利用衬底表面构建的原子级台阶结构,控制氮化硼逐层取向一致析出,确保合成的氮化硼具有层间同向堆垛构型;同时,选用高溶解度的金属衬底,保证该析出过程能持续发生并形成新的氮化硼层,最终得到厚层菱方氮化硼。其面内反演对称性破缺,因而能表现出极强的二次谐波响应,并在相干长度(1.6 μm)下实现~1%的非线性频率转换效率。

D37-23**非共线反铁磁 Weyl 半金属自旋量子态的全电学调控**

邓永城、王开友*

中国科学院半导体研究所

非共线反铁磁 Weyl 半金属,结合了反铁磁材料零杂散场和超快自旋动力学的优点,同时兼具 Weyl 费米子的巨大反常霍尔效应和手性异常等特征,引起了自旋电子学和量子材料等领域的广泛关注。然而,受限于体系反演对称性以及读取手段单一等问题,全电学方法调控非共线反铁磁自旋态一直未能实现。本报告中,我们利用非共线反铁磁 Weyl 半金属 Mn_3Sn 自身产生的非共线自旋轨道力矩首次实现了非共线反铁磁 Weyl 半金属自旋态的全电学调控。在 $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{AlO}_x$ 无重金属异质结体系中,我们利用 $5 \times 10^6 \text{ Acm}^{-2}$ 小电流密度的电流实现了 Mn_3Sn 无外场辅助的自旋量子态的一致性翻转,并演示了稳定的二态和多态特征,为非共线反铁磁在磁随机存储和新型量子计算方面的应用奠定了基础。我们的模拟表明,局域 Mn 原子能通过磁自旋霍尔效应产生非共线自旋轨道力矩,该力矩作用于临近的 Mn 磁矩,可以实现磁八极子自旋态的一致性翻转。上述发现将大大促进反铁磁自旋电子学及自旋量子物态调控的发展。

D37-24**陈数可调的二维量子反常霍尔绝缘体**

张卫兵*、李树宗

长沙理工大学

量子反常霍尔 (QAH) 绝缘体具有无耗散的边缘态,对发展下一代电子器件具有重要意义。然而现有候选材料观测温度低且陈数固定,寻找具有高工作温度和可调陈数的 QAH 绝缘体已成为当前相关领域的

研究焦点。基于第一性原理计算和紧束缚模型，我们预测了两种具有可调陈数的二维 QAH 绝缘体：1T 相 PrN_2 与 CeX ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) 单层。计算发现 1T 相 PrN_2 单层具有高达 600K 的磁转变温度和磁化方向依赖的拓扑态。当磁化方向位于 xy 平面时，单层 1T- PrN_2 具有低陈数 ± 1 的 QAH 效应，且符号随着磁化方向周期性改变。当磁化方向指向面外时，体系陈数可以达到 ± 3 。此外，我们进一步将磁化方向依赖的拓扑态推广到具有 Weyl 节线环的 CeX 单层，并建立了 Slater-Koster 框架下的紧束缚模型解释其物理起源。

D37-25

二维层状量子信息材料的原位表征

于霆*

武汉大学 物理科学与技术学院

以石墨烯为代表的二维层状材料展示出诸多新奇的量子效应和广泛的应用前景。这些二维体系中的量子效应通常对磁、电、热、力、声等物理场敏感，同时可被物理场调控，从而展现出新的物理现象和潜在应用。本报告将阐述二维金属、二维半导体等二维层状量子信息材料，在多物理场下的光谱学、光电、探针扫描等原位表征。

D37-26

3R 堆垛双层过渡金属硫族化合物单晶制备研究

徐小志*

华南师范大学物理学院

相比于单层过渡金属硫族化合物，菱面体堆垛的双层材料有着更优异的光学、电学和铁电性能，是新一代电子和光电子器件的备选材料。但是，目前单晶双层薄膜制备面临着以下问题：1. 双层成核势垒较高；2. 大尺寸均匀成膜不可控；3. 单一堆垛方式难以实现。因此，单晶菱面体堆垛双层过渡金属硫族化合物薄膜的制备尚未实现。在本次报告中，我将介绍一种远程外延制造技术，来实现蓝宝石上单晶双层菱面体堆垛过渡金属硫族化合物薄膜的通用制备。

D37-27

二维晶体材料中的超快量子周期振荡

钟建新*

上海大学

In this talk, I will introduce our recent proposals on a novel type of quantum oscillations in coupled two-dimensional crystals with much shorter oscillation period beyond Bloch oscillations, without the need of external electric fields. Using bilayer and trilayer graphene systems, we show that the time evolution of electron wavepacket in the coupled two-dimensional crystals with mirror symmetry exhibits a periodic oscillation in both the transverse and longitudinal directions with the period determined by $T = h/2u$, where h is the Planck constant, u is the interlayer hopping energy of electron. Additionally, we provide numerical evidence that a damped periodic oscillation occurs in the coupled graphene systems with degree of disorder W , with the decay time being inversely proportional to the square of W and a slight change of frequency proportional to the square of W . Moreover, we show that the period and electron distribution of the oscillation in the coupled two-dimensional crystals can be effectively tuned by external electric fields and by twisting of the coupled layers. Unlike the Bloch oscillation driven by electric fields, the periodic oscillation induced by interlayer coupling does not require the application of an electric field, has an ultrafast period reaching the range from femtoseconds to attoseconds much shorter than the electron decoherence time in real materials, and can be tuned effectively by adjusting the interlayer coupling and electric fields. Our findings may pave the way for future observation of ultrafast electron oscillations in two-dimensional crystals at the atomic scale.

D37-28**变铁性**

董帅*

东南大学

铁性（如铁磁性、铁电性）是物质材料非常重要的物理属性。单相存在着多种铁属性的多铁性材料，为实现磁电耦合提供了一种途径。然而，在多铁体系中实现的磁电耦合普遍都存在磁电耦合微弱，或其中某一铁性强度小等缺陷。寻找具有大强度并且强耦合的磁电效应仍然是个挑战。我们提出了一种设计策略，即同一材料当中具有多种铁性，但不同于多铁性材料，这些铁性存在于不同的相中。体系处于极性相还是磁性相，取决于声子不稳定性和电子不稳定性的相竞争。由于极性和磁性处于不同相中，当体系在两相之中转变时，天然地带来了磁性与铁电性的切换，并且不会影响铁性的强度，我们称这类特性为“变铁性”。通过理论计算，我们预测一些过渡金属三硫族化合物具有“变铁性”，并且可能存在着铁性相分离的特性。

D37-29**基于超快电子显微镜的拓扑自旋结构超快光调控**

付学文*

南开大学

拓扑磁结构如磁斯格明子等，因具有尺度小、拓扑保护以及在电磁光热物理场作用下独特的性能，被视为未来信息存储与处理技术最理想的信息载体之一。实现其应用的关键在于对其动力学行为的精确操控及理解，而拓扑磁结构小至纳米量级，对外场响应快至皮秒量级，对研究的时空分辨率提出了双重要求。超快电子显微镜结合了电子显微镜的高空间分辨率和飞秒激光的超快时间分辨率，为在超高时空尺度观察物质的形貌变化、结构转变、载流子传输、磁结构演变等动力学过程提供了绝佳手段。本报告首先将简单介绍超快电子显微镜技术的发展和研究现状，然后重点介绍我们在多场调控超快洛伦兹电子显微镜技术开发及其在拓扑磁结构动力学应用中的最新进展。我们开发了多种新型室温二维拓扑磁性材料，利用自主开发的超洛伦兹电镜技术实现了对其拓扑自旋结构的飞秒激光原位超快调控及动力学过程的可视化观测，揭示了飞秒激光对室温二维磁性材料中拓扑磁结构的可控擦写及内在物理机制，为基于拓扑磁结构的器件开发和应用提供了物理基础。

D37-30**准一维范德华层状材料的物性调控与器件**

周杨波*

南昌大学物理与材料学院

具有低对称性的层状范德瓦尔斯材料因其面内各向异性所带来的极为丰富的物性，近年正在二维材料家族中引起关注。我们系统研究了准一维层状半导体 ZrS₃ 的光电响应行为，发现其中受门电压及激发波长调制的偏振光电流响应行为。将各向同性的 MoS₂ 与各向异性的 ZrS₃ 组合形成范德瓦尔斯异质结，通过异质结形成的法布里-帕罗腔调制光-物质作用，实现了对 MoS₂ 光谱及光电流响应行为的偏振调控。最后，我们报道了一种新型的准一维层状材料 Nb₄P₂S₂₁，系统研究其中的紫外偏振光电响应行为，并发现了一种光诱导作用产生的阻变行为。我们的研究展示了准一维层状材料中丰富的物性及潜在的光电器件应用。

D37-31**具有可控扭转角度的大面积石墨烯莫尔超晶格体系**

陈珂*

河南大学

将二维单晶堆叠在一起时会出现周期性的莫尔条纹，即莫尔超晶格。它会产生一个新的二维周期性势

场, 改变原有二维体系的本征性质, 从而产生奇异物性。最近扭转双层石墨烯、石墨烯/二维材料异质结构成的莫尔超晶格为凝聚态物理与材料科学家提供了极具魅力的研究新体系, 产生了强关联效应、非常规超导和拓扑效应等诸多新奇的量子特性。然而, 目前研究这些体系的样品大多通过微机械剥离法制备, 仅能用于基础研究, 实现双层扭角可控的大面积样品制备仍面临巨大挑战, 限制了其在规模化集成器件中的实际应用。因此, 本报告介绍了一种晶圆级石墨烯莫尔超晶格体系的可控制备方法, 通过具有特定扭转角度的新量子态的调控, 有望产生更为丰富的新物态和耦合行为。该研究不仅为高性能二维材料纳米光子学器件的设计与构筑带来新的机遇, 也为未来电子信息元器件的研制提供材料基础。

D37-32

大尺寸单晶二维材料的制备及应用

张志斌*

北京大学

单晶材料是当代高科技的核心基础材料, 从第一代半导体的硅、第二半导体的砷化镓到第三代半导体的氮化镓无不推动了器件性能的巨大提高。二维材料由于其与当代硅基芯片工艺兼容而有望实现规模化应用, 成为当代跨学科交叉研究的热点材料体系。而大尺寸单晶二维材料的可控原子制造是研究其新颖性质并探索其高端应用的关键前提。在这个报告中我将介绍大尺寸单晶二维材料的制备及其相关应用, 包括界面调控米级单晶铜箔库制造、十万层单晶石墨连续外延制造以及双层石墨烯对铜的超高效防腐等。发展的材料和技术有望应用于电子器件、声学器件、光电催化、热管理工程等领域。

D37-33

微观结构对镍氧化物高温超导电性的影响

程金光*

中国科学院物理研究所

Ruddlesden-Popper (R-P)系列的 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 镍氧化物由 n 层 LaNiO_3 钙钛矿层与 LaO 岩盐层沿着 c 轴交替堆叠而成, 可形成单层 La_2NiO_4 ($n = 1, 214$)、双层 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ ($n = 2, 327$)、三层 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ ($n = 3, 4310$) 以及无穷层 LaNiO_3 ($n = \infty, 113$) 等结构相近的化合物。随着 n 增加, Ni 的价态逐渐升高, 对应 $\text{Ni}-3d$ 轨道的电子填充也逐渐改变。近期, 中山大学王猛团队与合作者发现 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶在 14GPa 高压下具有 $T_{\text{conset}} 80\text{K}$ 的高温超导现象, 引起了学界的广泛关注[1]。然而, 后续高压实验研究发现该超导相的体积分数很小, 且对压力环境非常敏感, 只有在较好的静水压下才能实现零电阻, 而且交流磁化率测试中很难探测到抗磁信号[2,3]。造成这一现状的主要困难是, 利用高压光学浮区法生长的 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶质量欠佳; 而确定高温超导相并提高超导体积分数成为当前研究的重点。

鉴于纯相单晶样品制备仍有挑战的现状, 我们决定针对多晶样品开展研究[4, 5]。采用溶胶-凝胶法合成了系列 $\text{La}_{3-x}\text{Pr}_x\text{Ni}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 1$) 多晶样品并进行了详细的晶体结构、物性表征以及高压调控研究, 结果显示样品的微观结构对其高压下的高温超导电性具有重要影响。首先, 通过高分辨透射电镜(TEM)和核四极矩共振(NQR)测试, 发现未掺杂的 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ -多晶样品虽然主相为双层 327 相, 但微观结构中存在大量单层和三层 R-P 相的交织共生, 即存在相当比例的 327/4310 和 327/214 界面和堆垛层错。掺杂实验发现, 随着 Pr 元素对 La 的替代, 上述交织共生现象被显著抑制, 尤其是在 $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ -多晶样品中, TEM 和 NQR 测试都观察不到 4310 相, 214 相的比例也大幅降低, 从而给出几乎接近单相的双层 327 结构多晶样品; 通过热重分析和中子衍射数据精修, 结果显示该样品的氧含量也非常接近理想配比, 即氧空位 ~ 0 。这些结果表明 $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ 多晶具有接近完美的单相双层钙钛矿结构。高压同步辐射 X 射线衍射实验显示, 该样品在 $\sim 11\text{GPa}$ 会发生正交 Amam 到四方 I4/mmm 结构相变; 高压电阻和磁化率测试结果表明, 其高压四方相具有高温超导电性, 20GPa 时超导转变起始温度 T_{conset} 超过 80K , 零电阻温度 T_{czero} 达到 60K , 超导体积分数约 60%, 这提供了体超导电性的关键实验证据。上述结果表明, $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 体系的高温超导电性确实来源于双层 327 相, 而样品的微观结构和单相性对于实现体超导具有重要影响。

D37-34

Sliding ferroelectricity in rhombohedrally stacked transition metal dichalcogenides

Jing Liang*, Ye Ziliang

University of British Columbia

The stacking order in van der Waals materials provides a novel and powerful approach to engineering their physical properties. When two monolayers of transition metal dichalcogenides are stacked in parallel (rhombohedral stacking), the equilibrium atomic structure exhibits interlayer asymmetry, resulting in spontaneous electrical polarization across the interface. When subjected to an external electric field, the stacking order and the corresponding polarization can be switched via interlayer sliding, a phenomenon recently termed sliding ferroelectricity. Using optical methods, we successfully unveil the switching mechanism in sliding ferroelectricity and highlight the critical role of pre-existing domain walls in achieving polarization switching. Through surface potential measurements, we experimentally determine the spatial distribution of polarization domains in 3R-MoS₂ and reveal the origin of pre-existing domain walls: shear strain during mechanical exfoliation triggers an avalanche of domain wall motion. These results play a fundamental role in enabling us to achieve non-volatile control over the optical response of these layered semiconductors.

D37-35**准一维电荷密度波材料 Ta₂NiSe₇ 中反常电输运的起源**

刘兰心、罗轩*

安徽省合肥市合肥物质科学研究院固体物理研究所

准一维电荷密度波材料的奇异输运行为对于揭示其 CDW 相的性质具有重要意义。Ta₂NiSe₇ 单晶是一种准一维范德华材料，在 60K 左右具有 CDW 相变。本文报道了 Ta₂NiSe₇ 单晶在 CDW 相变前后的各向异性电输运特性。 $T_{\text{CDW}} = 60 \text{ K}$ ，电阻率各向异性常数($\gamma = \rho_{\parallel} / \rho_{\perp}$)随温度发生突变，表明其 CDW 波矢主要由 b 轴分量组成。霍尔电阻率的分析结果表明，载流子的浓度和迁移率在 T_{CDW} 时都发生了突变。在 CDW 态时，面外转角磁电阻(AMR)的对称性表现出 C_2 和 C_4 对称分量；而面内 AMR 表现出 C_2 、 C_4 和 C_6 对称分量。除 C_2 分量外，其余分量在温度高于 T_{CDW} 时消失。结合理论计算，本文认为 CDW 跃迁使得 Ta₂NiSe₇ 的费米面发生轻微重构，导致低温下转角磁电阻出现更高对称性分量。此外，在低温下还成功观测到 Ta₂NiSe₇ 的平面霍尔效应(PHE)，基于分析得出 Ta₂NiSe₇ 中的 PHE 源自其各向异性轨道磁电阻，本质上是 Ta₂NiSe₇ 的多带效应。本文强调了在 CDW 形成过程中材料费米面各向异性的增强，并为研究 CDW 材料提供了一种新的思路。

D37-36**零磁场调控斯格明子**

罗雄、李玲龙*

东南大学物理学院

磁斯格明子是一种拓扑磁性结构，在存储器和逻辑器件中作为纳米级信息单元具有很好的前景。然而，对绝大多数体系而言，斯格明子仅仅存在非常低以及狭窄的磁场区间内，调控室温零磁场斯格明子一直是未来发展斯格明子器件的基础。在这里，基于扫描探针显微镜，在二维 Fe₃GaTe₂ 铁磁材料中通过探针诱导调控出零磁场，室温稳定的斯格明子结构，在纳米级别厚度下斯格明子能自发形成六角晶格，而在微米厚度样品中则展现出了超越拓扑数为-1 的斯格明子的多拓扑自旋结构。我们的研究结果为实现基于斯格明子快速操作的逻辑和存储器件开辟了一条重要的道路。

D37-37**转角双层碲化钼中具有拉曼活性的莫尔声子**吴有轩^{1,2}、王诗媛^{1,2}、陈绰琪^{1,2}、周聪³、陈琨^{1,2}、周健³、王志⁴、别亚青*^{1,2}、邓少芝^{1,2}

1. 中山大学光电材料与技术国家重点实验室

2. 中山大学电子与信息工程学院
3. 西安交通大学材料科学与工程学院
4. 中山大学物理学院

2H-MoTe₂是一种具有良好近红外光学活性的范德华材料，可与硅光子结构集成并实现光通信功能。最近，在转角双层 MoTe₂ 中，人们观察到了各种拓扑物理和相关的量子现象，例如量子反常霍尔效应和莫特绝缘态。这些研究结果都表明了转角 MoTe₂ 的重要性。虽然测量 MoTe₂ 莫尔超晶格的低频拉曼光谱可以提供转角双层结构的重要指纹特征，但相关实验分析结果仍然缺失。因此，在本研究中我们制备了一系列转角双层 MoTe₂，其层间相对转角可精确控制在 0° 至 60° 范围内。通过使用 532 nm 波长的激光测量偏振相关低频拉曼光谱，体系的剪切和层呼吸模式得以确认。随着双层 MoTe₂ 层间转角的增加，我们发现层呼吸模式的变化与莫尔超晶格的层间堆叠结构直接相关。更重要的是，根据单层 MoTe₂ 的声子色散关系，可以解释新出现的拉曼活性莫尔声子的起源。同时，不仅限于在转角双层(1+1)MoTe₂ 中，在转角堆叠的四层(2+2)MoTe₂ 中我们也发现了折叠的纵向声学 and 横向声学模式。这一低波数拉曼光谱结果提供了一个可靠的数据集，用于以快速简单的方式标定转角双层 MoTe₂ 的莫尔超晶格。

D37-38

Large asymmetric anomalous Nernst effect in the antiferromagnet SrIr_{0.8}Sn_{0.2}O₃

龚冬良*

中国科学院电工研究所

A large anomalous Nernst effect is essential for thermoelectric energy-harvesting in the transverse geometry without external magnetic field. It's often connected with anomalous Hall effect, especially when electronic Berry curvature is believed to be the driving force. This approach implicitly assumes the same symmetry for the Nernst and Hall coefficients, which is however not necessarily true. Here we report a large anomalous Nernst effect in antiferromagnetic SrIr_{0.8}Sn_{0.2}O₃ that defies the antisymmetric constraint on the anomalous Hall effect imposed by the Onsager reciprocal relation. The observed spontaneous Nernst thermopower quickly reaches the sub- $\mu\text{V/K}$ level below the Néel transition around 250 K, which is comparable with many topological antiferromagnetic semimetals and far excels other magnetic oxides. Our analysis indicates that the coexistence of significant symmetric and antisymmetric contributions plays a key role, pointing to the importance of extracting both contributions and a new pathway to enhanced anomalous Nernst effect for transverse thermoelectrics.

D37-39

电子注入诱导碳结构有序相变

潘飞，朱彦武*

中国科学技术大学 材料科学与工程系

作为锂离子电池负极、石墨烯批量制备等领域的重要原材料，石墨粉体一般包含两种晶格结构：六方相 (ABAB...堆叠，简称 2H 相) 和菱形相 (ABCABC...堆叠，简称 3R 相)。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 C₆₀ 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 C₆₀ 分子间形成共价键，将其转变为 C₆₀ 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 C₆₀ 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 C₆₀ 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 sp³ 转变为弯曲 sp² 结构，但部分破碎的 C₆₀ 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。

参考文献/Reference:

- [1] F. Pan, # K. Ni, # Y. Ma, # H. Wu, X. Tang, J. Xiong, Y. Yang, C. Ye, H. Yuan, M. Lin, J. Dai, M. Zhu, * P. Tan, Y. Zhu, * K. Novoselov, * Phase-Changing in Graphite Assisted by Interface Charge Injection. Nano Letters 2021, 21(13): 5648-5654.
- [2] [2] F. Pan, # K. Ni, # T. Xu, # H. Chen, Y. Wang, K. Gong, C. Liu, X. Li, M. Lin, S. Li, X. Wang, W. Yan, W. Yin, P. Tan, L. Sun, D. Yu, R. S. Ruoff, * Y. Zhu, * Long-range ordered porous carbons produced from C60. Nature 2023, 614(7946): 95-101.

D37-40

通过角度分辨的偏振 Raman 光谱揭示拓扑声子 β -MoB2 单晶中缺陷相关的 Raman 模式 程明*

中国科学院合肥物质科学研究院

β -MoB2 是一个拓扑声子材料，其中声子表面态的存在已被实验证实。此外，其在压力下会依次出现两个超导区域。其中，超导区域 I 晶格结构对应 β -MoB2，而超导区域 II 晶格结构对应于结构相变后的 α -MoB2。MoB2 体系最高超导转变温度可达 32K，为高压的 α -MoB2。后续的理论工作成功解释了区域 II 的超导起源。然而，对于 β -MoB2 的理论计算表明，这并非是一个能产生超导的结构。因此，超导区域 I 的物理起源仍是未知的。以上的结果促使了我们对于 β -MoB2 中声子性质的进一步探索。通过对于 β -MoB2 单晶进行系统的 Raman 测试，我们在 ac 面发现了七个振动模式。结合第一性原理计算，其中五个振动模式为对称性允许的 Raman 模式，而另两个为异常模式。通过进一步分析，我们排除了这两个模式的声子表面态起源，而将其归因于 B 原子层的堆垛层错。近期的理论计算表明，这样的堆垛层错结构可能为超导区域 I 的物理起源。

D37-41

Transport properties of van der Waals multiferroic tunnel junctions

Ru Zhang*

NanChang University

Multiferroic tunnel junctions (MFTJs) with a ferroelectric barrier sandwiched between two ferromagnetic electrodes are promising candidates for nonvolatile memory applications. The existence of ferromagnetism and ferroelectricity in atom thick van der Waals (vdW) material offers a promising opportunity for building multifunctional MFTJs. In this work, we propose a MFTJs with asymmetric electrode $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ and investigate the spin-dependent transport by using first principles calculations. We find that the conductance of MFTJ with monolayer α - In_2Se_3 is significantly declined with an evaluated tunneling magnetoresistance (TMR) when the magnetizations of the asymmetric electrodes are switched from parallel to antiparallel. While the polarization flipping of the monolayer α - In_2Se_3 has limited impact on the conductance of MFTJ with a small tunneling electroresistance (TER). Meaningfully, eight stable resistive states can be achieved in MFTJs with bilayer α - In_2Se_3 barrier. In which the magnetic alignments and ferroelectric configurations can effectively tune the transport of the MFTJs with giant TMR ratio up to 189000% and TER ratio 1161%. Our results highlight vdW MFTJs are promising candidates for the design of nonvolatile multilevel memory devices.

墙报

D37-P01

基于聚焦氮离子束的全二维短沟道场效应晶体管

曹正炆、廖志敏*、俞大鹏、姜晗歆

北京大学

进入后摩尔时代，随着集成电路特征尺寸持续缩小，短沟道效应、平面光刻衍射极限、统计不确定性、冯·诺伊曼能效瓶颈等问题日益严重，集成电路技术发展面临尺寸缩小瓶颈、能耗瓶颈及算力瓶颈等挑战。我们利用聚焦氮离子束的原位刻蚀技术在单层石墨烯上制备了超短尺度的沟道，并采用定点干法转移技术制备了全二维的短沟道场效应晶体管，室温下的开关比达到 10^4 。上述工艺不仅有效降低了晶体管的功耗，而且对晶体管的工作性能与耐久稳定性有了较好的改观。该内容为后摩尔时代新型晶体管器件的发展提供了创新思路，对于该领域的革新起到重要意义。

D37-P02

Electronic Nematicity of Charge Density Wave States in a Kagome Superconductor CsV3Sb5Hanxin Lou¹, Xing-Guo Ye¹, Xin Liao¹, Tong-Yang Zhao¹, Da-Peng Yu², Zhi-Min Liao^{*1}

1. School of Physics, Peking University

2. Shenzhen Institute for Quantum Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong, China.

The interplay between Fermi surface topology and electron interactions is known to spawn a plethora of exotic quantum states and unconventional phases, such as superconductivity, ferromagnetic order, and various density waves including charge, spin, and pair density waves, as well as Mott insulators. Among these, the kagome Hubbard model stands out as a quintessential representation of the intricate relationship between electronic correlations and fermiology within the geometrically frustrated kagome lattice. The manipulation of complex quantum states in kagome superconductors are significant for potential applications in quantum technologies. Of particular interest are the quasi-two-dimensional kagome superconductors AV_3Sb_5 ($A = K, Rb$ and Cs), which exhibit unconventional superconductivity alongside electronic nematicity and potential time-reversal symmetry breaking. The competition between the charge density wave (CDW) state and superconductivity stems from the electronic correlations, and is closely associated with the symmetry-breaking phenomena within the system. Here, we employ the disc-shaped devices to reveal the resistance anisotropy with current along different orientations to probe the symmetry breaking in the kagome metal CsV_3Sb_5 . An abrupt change in twofold anisotropy upon entering the CDW state is found, suggesting a nematic CDW state. Additionally, the resistance anisotropy is enhanced by applying magnetic fields, indicating a competition between CDW order and superconductivity. The results imply that the interplay between electronic correlations, Fermi surface topology, and external perturbations leads to rich phase diagrams and symmetry-breaking phenomena in kagome superconductors.

D37-P03

Engineering Berry curvature in two-dimensional materials

Xingguo Ye, Zhi-Min Liao*

School of Physics, Peking University

Berry curvature, as one of the central topics in topological physics, plays an important role in various quantum transport phenomena, such as various Hall effects and Circular dichroism. Recently, Berry curvature dipole (BCD), i.e., the dipole moment of Berry curvature is proposed to be able to induce second-order nonlinear Hall effect. The nonzero BCD can lead to high-frequency rectifiers, wireless charging, and energy harvesting

through the nonlinear Hall effect, promising for nonlinear quantum devices. However, the maximum symmetry allowed for nonzero BCD is a single mirror symmetry, unfavorable for real applications.

Here, via probing the nonlinear Hall effect, we demonstrate the electric field-manipulated Berry curvature dipole. A linear dependence between the Berry curvature dipole and the dc electric field is observed. The polarization direction of the Berry curvature is controlled by the relative orientation of the electric field and crystal axis, which can be further reversed by changing the polarity of the dc field. Our work provides a route to generate and control Berry curvature and Berry curvature dipole in broad material systems, and to facilitate the development of nonlinear quantum devices.

D37-P04

准一维狄拉克材料 La_3MgBi_5 中超大的反常霍尔电导率和奇特的轴向抗磁性

王义炎^{*1}、易哲铠¹、郭朋杰³、梁慧¹、李祎冉¹、苏平¹、李娜¹、周颖¹、吴丹丹¹、孙燕¹、岳小宇²、李秋菊¹、王守国¹、孙学峰¹

1. 安徽大学
2. 苏州城市学院
3. 中国人民大学

反常霍尔效应 (AHE) 是重要的电输运现象之一, 一般出现在铁磁材料中, 在没有磁性元素的材料中很少见。本项工作中, 我们对具有多类型狄拉克费米子的材料 La_3MgBi_5 开展了研究。虽然 La_3MgBi_5 中没有磁性元素, 但可以观察到清晰的 AHE 信号。值得注意的是, 其反常霍尔电导率达到了 $42356 \text{ } \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, 是目前所有 AHE 系统中的最大值。此外, 我们在 La_3MgBi_5 中首次发现并提出一个新的物理现象 — “轴向抗磁性”。在晶体的轴向方向上, 抗磁性明显增强并主导磁化强度。这种奇特的轴向抗磁性是费米能级上狄拉克费米子受限运动的结果。我们的研究结果不仅表明 La_3MgBi_5 是研究 AHE 和量子输运的合适平台, 也表明 315 型 Bi 基材料在探索新奇物性方面有着巨大潜力。

D37-P05

室温合成硫化镉量子点作为高效的单基质白光 LED 荧光粉

李农生¹、滕臻^{1,2}、黄晓鹏^{*1}

1. 北京师范大学珠海校区
2. 哈尔滨工程大学青岛研究 (生) 院

目前, 实现白光发光二极管的不同方法都存在着各自的问题, WLED 的性能和应用领域仍然面临诸多挑战和机遇。近年来, 基于近紫外 LED 芯片和单一基质荧光粉的新型白光 LED 结构备受瞩目, 但荧光粉技术的限制导致该类 WLED 器件的流明效率仍然偏低。为此, 本研究提出了一种绿色合成发白光的硫化镉 (CdS) 量子点, 并将其开发为单一基质白光 LED 荧光粉。与传统的高温合成方法相比, 该方法在室温下进行, 无需隔水隔氧, 使用乙醇作为溶剂, 反应速度快, 且无需特殊设备, 显著简化了生产流程, 提高了合成的经济性和环境友好性。经过优化, 这种量子点荧光粉在 410nm 近紫外光激发下表现出 35 lm/W 的高流明效率, 5884 K 的色温值, 以及 (0.32, 0.37) 的色坐标值, 展现出在高效白光 LED 应用中的巨大潜力。

D37-P06

基于砷化镉-石墨烯狄拉克异质结的宽光谱光电探测

廖馨、徐畅、范子璞、廖志敏^{*}

北京大学

Dirac semimetals are promising materials for broadband and fast photodetection due to their gapless nature. Dirac heterostructures consisting of 2D Dirac semimetal graphene and its 3D analogue Cd_3As_2 should take the ascendancy of high carrier mobility in both materials, while overcome the limitation of weak optical absorption in graphene-based devices and suppress the dark current occurring in pure Cd_3As_2 photodetectors. Herein, we report

high-performance photodetectors based on a 3D Dirac semimetal Cd₃As₂/monolayer graphene heterostructure, which show broadband photoresponse from visible (488 nm) to mid-infrared (10 μ m) wavelength region at room temperature without an external bias. The photodetectors are with a maximum responsivity of 0.34 mA/W at 488 nm and a fast response speed of 13 μ s. In addition, the photoresponse can be enhanced by a gate voltage even in a long wavelength region. Our work suggests that the combination of the graphene and 3D Dirac semimetal is promising for high-performance photodetectors with broadband detection, high sensitivity, and rapid response.

D37-P07

利用外尔半金属 TaIrTe₄ 中轨道电流实现室温范德华磁随机存储器的数据写入

刘星宇、李栋、潘振存、王安琦、张健天、于鹏、廖志敏*

北京大学

电流诱导的面外磁化已被用于无外场辅助垂直磁化翻转。识别能够高效地将电流转换为面外轨道/自旋极化电流的系统，对于推动磁存储技术的发展至关重要。在此，我们引入了贝里曲率偶极矩作为关键的评估因素，这可以通过非线性霍尔效应直接测量。在 Weyl 半金属 TaIrTe₄ 中，施加平行于贝里曲率偶极的电流会产生净贝里曲率以及面外轨道磁化，这可以有效操控 TaIrTe₄/Fe₃GaTe₂ 异质结中无外场辅助垂直磁化翻转。值得注意的是，在室温下，具有低临界电流密度约 2×10^6 A/cm² 的全电控范德华磁随机存储器得以实现。我们的研究结果揭示了非线性霍尔效应与无外场磁化翻转之间的联系，突显了贝里曲率偶极矩在推进轨道电子学发展的潜力。

D37-P08

轨道转移力矩驱动无外场垂直磁化翻转

李栋、潘振存、叶兴国、廖志敏*

北京大学

通过电控垂直磁化对于低功耗磁性随机存储器的高密度集成至关重要。尽管自旋转移矩(STT) 和自旋轨道扭矩 (SOT) 技术已被用来翻转具有垂直磁各向异性的自由层的磁化，但前者由于的高电流密度直接通过隧道结而具有有限的耐用性，而后者则通常需要外部磁场或特殊的结构设计来打破对称性。在这里，我们提出并实现了轨道转移力矩 (OTT)，即利用轨道磁矩对磁化施加扭矩，展示了一种无需外部磁场的电流驱动垂直磁体翻转的新策略。由于非零贝里曲率偶极子的存在，少层 WTe₂ 中的直流电产生了垂直极化的轨道磁矩，并且可以通过改变电流极性来切换极化方向。在此原理的指导下，我们构建了 WTe₂/Fe₃GaTe₂ 异质结构，在无外磁场下实现 OTT 驱动的垂直磁化翻转。进一步利用室温的垂直磁体 Fe₃GaTe₂，我们在 WTe₂/Fe₃GaTe₂ 范德华异质结中将这一效应推广至室温。

D37-P09

利用轨道转移力矩实现室温范德华磁存储

潘振存¹、李栋²、叶兴国¹、陈正³、陈朝晖¹、王安琦¹、田明亮³、姚光杰¹、刘开辉¹、廖志敏^{*1}

1. 北京大学物理学院

2. 北京大前沿交叉学科研究院

3. 合肥国家实验室

具有非易失性的磁阻式随机存取存储器(MRAM)促进了诸如存内计算、神经形态计算和随机计算等在内的新兴应用。二维范德华异质结具有原子级平滑的界面和高度可调的物理性质，为 MRAM 的发展提供了新的技术路线。该工作报道了基于 WTe₂/Fe₃GaTe₂/BN/Fe₃GaTe₂ 异质结构的全二维范德华磁存储器件，实现了室温下数据读取和写入的全电学调控。其数据读取基于由 Fe₃GaTe₂/BN/Fe₃GaTe₂ 构筑的磁隧道结，数据写入是通过 WTe₂ 中电流诱导的轨道磁矩极化来实现的，该磁矩对近邻的磁性层 Fe₃GaTe₂ 施加力矩作用，称为轨道转移力矩(OTT)效应。与传统的自旋转移力矩和自旋轨道力矩相比，OTT 效应充分利用了 WTe₂ 中面外取向的轨道磁矩，通过施加界面电流实现无外磁场辅助的垂直磁化翻转。该研究结果表明，

基于轨道转移力矩的 OTT-MRAM 极有希望作为低功耗、高性能的存储器件应用。

D37-P10**Density functional theory study on two-dimensional materials**

Jiarong Ma*

The Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou)

This study utilizes Density Functional Theory (DFT) simulations using the Vienna Ab initio Simulation Package (VASP) software to explore the electronic properties of the covalent organic framework (COF). The first-principle calculations provide valuable insights into the electronic band structure of COFs, revealing features such as Dirac cones and flat bands. Understanding these electronic properties is crucial for exploring the potential applications of COFs in various fields.

At the same time, there is a growing interest in the impact of doping COFs with alkali metals, as this can significantly change their electronic properties. The doping of COFs has the potential to enhance their properties and lead to novel electronic characteristics. The presence of flat bands in COFs is indicative of strong electron correlations, which have been a focus of fractional quantum hall effect study.

By investigating the electronic properties of COFs using DFT simulations and exploring their connection to topological phases and strong correlations, this research aims to contribute to a deeper understanding of the electronic behavior of these materials. This knowledge can potentially lead to the discovery of novel electronic phenomena and the development of advanced COF-based materials with tailored electronic properties.