

# 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

### D12-先进磁性功能材料

### D12-Advanced Magnetic Functional Materials

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



## D12. 先进磁性功能材料

分会主席：王守国、姜勇、蒋成保、吴韬、王荣明、宋成、侯仰龙

### D12-01

#### High-performance Nd-Fe-B permanent magnet via the grain boundary restructuring approach

Mi Yan\*

Zhejiang University

Since the 1980s, Nd-Fe-B with largest energy product  $(BH)_{\max}$  approaching the theoretical limit has become the landmark of permanent magnetic material. However, the long-standing drawbacks of Nd-Fe-B, i.e. poor corrosion resistance, low coercivity, high Dy/Tb and low La/Ce/Y consumption have greatly limited the continually expanding of Nd-Fe-B magnets. Concerning the above obstacles, grain boundary restructuring (GBR) is proposed by replacing the conventional Nd-rich intergranular phases with the novel ones. From GB design, processing, structure evolution, to property evaluation, here we demonstrate that GBR approach provides a versatile route towards high performance of RE-Fe-B (RE, rare earth) with low cost. New intergranular phases with high-electrode-potential can lower the driving force for grain boundary corrosion, enhancing the intrinsic corrosion resistance of Nd-Fe-B by ten times. New intergranular phases enriched with HREs permit the formation of magnetically hardening shell surrounding Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B grains, increasing the coercivity for 250 °C service temperature at low Dy/Tb utilization. Meanwhile, series of RE-Fe-B magnets with high La/Ce/Y substitution level ( $\geq 40$  wt%) and key technologies for mass production are developed based on grain boundary restructuring, saving the RE resources and lowering the material costs substantially.

### D12-02

#### 二维磁性纳米材料的化学合成及其磁性调控

侯仰龙\*

中山大学材料学院

二维磁性材料因具有较高的磁转变温度、丰富的结构和新奇的物性，引起了广泛的关注。近年来，我们致力于二维非层状磁性纳米材料的可控合成和自旋调控研究。一方面，利用液相法合成了系列超薄铁基纳米片，并研究了表界面的化学作用对成核及生长过程的影响规律。另一方面，利用化学气相沉积法(CVD)获得了系列二维非层状磁性纳米材料：通过基底台阶诱导合成了楔形结构的 EuS 纳米片；通过限域方法合成了室温磁性的 Fe<sub>7</sub>Se<sub>8</sub> 纳米片。重要的是，我们发展了普适性的热力学诱导的竞争生长模型，为预测和指导二维非层状材料生长提供了一个定量判断标准，并且在该模型指导下设计了通用的 CVD 方法生长了二维过渡金属氧化物、稀土金属氧卤化物纳米片。此外，我们建立了薄膜外延生长新范式，在单层 WSe<sub>2</sub> 上生长了 Cr<sub>5</sub>Te<sub>8</sub> 晶体。这些研究为二维磁性材料的可控合成提供了有力的指导，并为开发新型自旋电子器件奠定了基础。

进一步，我们探索了二维磁性材料独特的磁结构。研究发现，超薄 Fe 纳米片具有厚度和几何形状依赖的磁涡旋结构。此外，在铁磁半金属 Co<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub> 中实现了电流直接高效地调控磁翻转，并建立了电流辅助的畴壁运动模型，可以通过调控接触电极的几何形状进一步减小改变矫顽力的阈值电流以及改变正负电流的对称性，具有高效率和低阈值等优点。这些发现结合了磁性、拓扑结构和金属性，为实现低能耗计算和存储的自旋电子器件奠定了材料基础。

综上所述，我们设计了系列可控合成二维磁性材料的化学方法，对其自旋和磁学性能进行了研究与调控，并将进一步探索其在自旋电子学和磁性器件中的应用。

**D12-03****过渡金属异质结构纳米材料的原子级制造和原位表征**

王荣明\*

北京科技大学新金属材料全国重点实验室

实现原子尺度精确制造是构建未来信息和能源功能器件的基础，在一定特征尺度深刻理解纳米晶的成核生长及结构演化过程是实现原子尺度精确制造的基石，发展原位、动态、高时空分辨的纳米材料表征新方法与新技术，实现反应/服役条件下纳米材料结构及表面原子的精确表征是突破原子尺度精确制造难题的关键。

基于环境气氛球差校正透射电镜，以过渡金属异质结构为主要研究对象，原位研究了其表面结构、界面原子构型及其在外场作用下的结构演化<sup>[1-3]</sup>。揭示了单壁碳纳米管在金属间化合物和单质金属催化剂上的成核与生长模式<sup>[4]</sup>；原位观察了 Au 纳米颗粒在各向异性二维半导体 ReS<sub>2</sub> 表面的迁移和聚合行为，发现由于界面各向异性相互作用导致 Au 颗粒的取向迁移<sup>[5]</sup>；发现了固相环境下 Pt 纳米晶经由非晶团簇生长到临界尺寸~2.0 纳米后晶化的生长规律<sup>[6]</sup>；发现金属 Pt 与 MoS<sub>2</sub> 载体之间的强相互作用调控了异质结构界面的电子态，促进了 Pt-MoS<sub>2</sub> 异质结构的电催化析氢性能<sup>[7]</sup>；基于纯相 c-Fe<sub>5</sub>C<sub>2</sub> 活性相的生成过程原位表征，发现“纯相碳化铁”催化体系可实现高碳效合成气直接制线性  $\alpha$ -烯烃<sup>[8]</sup>。

[1] Zhao, H. F., Wang, R. M.\* and co-authors, Adv. Mater., 35 (2023) 2206911.

[2] Wang, R. M., Nature Catalysis, 3 (2020) 333.

[3] Ye, H.Y., Zhang, Z.H., Wang, R.M.\*, Small, 19 (2023) 2303872

[4] Yang, F., Wang, R. M.\* and co-authors, Science Advances 8 (2022) eabq0794.

[5] Cao, Y. D., Wang, R. M.\* and co-authors, Nano Lett. 23 (2023) 1211

[6] Ye, H. Y., Wang, R. M.\* and co-authors, Small Methods 6 (2022) 2200171.

[7] Shan, A. X., Wang, R. M.\* and co-authors, Nano Energy 94 (2022) 106913.

[8] P. Wang, R.M. Wang and co-authors, Nature 635 (2024) 102.

**D12-04****高频磁性材料的微观机制**

车仁超

复旦大学

近年来，5G/6G 高频通讯、无线互联、毫米波、电磁防护、隐身伪装等领域快速发展，对高性能电磁波吸收材料的需求日益迫切。自 1997 年以来，本团队连续研究磁性吸波材料与物理机制，主要进展包括：（1）碳基电磁波吸收材料，实现微区的电磁协同，Adv. Mater.16, 401 (2004)论文已被他引 2000 多次，为吸波材料领域开创之作；（2）基于铁钴镍合金、设计并制备了多种磁核壳型吸波材料，并阐明了磁微球表面粗糙化，增强低频吸收的机制；（3）构筑“电磁、磁磁”耦合型、核壳吸波材料；（4）表界面对磁畴演化的约束及其在电磁温多场下的响应行为；（5）二维铁磁材料的原位磁驱动，混合型斯格明子的演化。上述结果依托于自主研发的洛伦兹透射电子显微镜附件，已深入开展材料在变温多场耦合条件下的演化机制。揭示了金属纳米化、碳管限域和核壳多重耦合增强吸波性能的新机理。

**D12-05****烧结钕铁硼多元素协同晶界扩散技术与装备研发**

张雪峰\*

天津工业大学

稀土永磁材料是新能源、航空航天和国防军工等领域所需关键材料。然而，稀土永磁严重依赖 Pr、Nd、Sm、Dy、Tb 等战略稀土，其大规模使用导致我国稀土资源应用不平衡。杭州电子科技大学稀土永磁

团队基于“多元素协同”的理念，针对高耐温钕铁硼磁体重稀土利用率低的难题，提出重稀土元素壳层局域化的思路，开发多元素协同晶界扩散新技术和装备，同步提升扩散磁体的矫顽力、电阻和抗腐蚀性能，并首创了扩散物光固印刷技术，相比于现有热固技术固化时间从原来的 15-20 min 降低到 10 s 之内、固化温度从 >150 °C 降低到室温。形成了自主知识产权的晶界扩散磁体成套技术，成功打破了日本的专利封锁。

## D12-06

### 磁性功能材料中的拓扑磁性以及多场调控最新进展

王守国\*

安徽大学

以调控电子自旋本征属性为基础的自旋电子学，是自 1988 年发现巨磁电阻效应（GMR）以来三十年来凝聚态物理、材料科学和信息科学的研究热点之一，研究领域主要包括新材料探索、物性研究、以及器件设计与开发等。随着隧穿磁电阻效应（TMR）、自旋转移矩效应（STT）、自旋塞贝克效应（Spin Seebeck）、磁性斯格明子（Skyrmions）等新现象、新效应和新结构的发现，自旋电子学材料获得了更加广泛的应用（例如计算机硬盘读写头、磁性随机存储器）。但随着超高磁信息存储技术的发展，自旋电子学也面临着材料和物理等方面的诸多挑战。

报告人首先介绍拓扑磁性材料中拓扑磁结构的观察与调控，主要包括二维范德华  $\text{Fe}_{5-x}\text{GeTe}_2$  单晶和  $\text{TbCoSi}$  多晶材料中的磁半子和  $\text{CoHo}$  合金薄膜材料中的反斯格明子等。重点关注  $\text{CoHo}$  合金薄膜材料中自旋重取向诱导的新奇拓扑磁结构，首次实现具有反斯格明子的合金薄膜材料的制备；随后重点介绍多晶  $\text{TbCoSi}$  块体材料中新发现的磁半子，利用中国散裂中子源大科学装置证实了该体系中自旋重取向诱导的倾斜磁矩。

报告人在第二部分将重点介绍具有拓扑表面态的  $\text{Pt}_3\text{Sn}/\text{Co}$  双层膜、垂直各向异性  $\text{L1}_0\text{-FeCrPt}$  铁磁单层膜以及超薄单晶外延反铁磁  $\text{IrMn}$  薄膜材料中的无外磁场翻转，为未来开发新型无外磁场、全电场调控的自旋电子学器件提供材料支撑。

## D12-07

### 非晶/纳米氢化物双相磁热合金

沈宝龙\*

东南大学

磁制冷技术采用固态制冷材料，具有低碳环保、高效节能的特点，可广泛应用于深空探测、量子计算等领域。研发高性能制冷材料，是磁制冷技术发展与应用的关键和难题。近年来，科学家已陆续开发出一系列具有较大磁熵变值和制冷能力的非晶合金，日益引起人们的关注。但非晶合金的峰值磁熵变较低且室温塑性变形能力差，成为该类材料作为磁制冷剂应用的瓶颈。研究团队在长期从事非晶合金的磁热与力学性能工作的基础上，采用雾化法制备出  $\text{Gd}$  基非晶合金粉末，然后通过等温吸氢方法引入纳米级氢化物，形成了独特的双相纳米非晶氢化物（SNDP-GH）结构。氢化物形成导致反铁磁性转变，在奈尔温度下磁化强度随温度变化率增大，显著增强了磁熵变，同时保持了良好的软磁特性，磁熵变值达到  $18.7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，是氢化前样品的两倍多。同时，SNDP-GH 的双相纳米结构有效启动剪切转变区，促进形成多重剪切带，显著增强了合金的强度和延展性，打破了传统非晶合金的强度-延展性权衡。研究结果表明，SNDP-GH 结构为实现优异机械性能和磁热性能提供了新策略，为设计新型高性能结构-功能一体化材料开辟了新途径，有望推动磁制冷等领域的技术进步。

**D12-08****Highly sensitive surface acoustic wave magnetic field sensor**

宋成\*

清华大学

Strong coupling between different quasiparticles is an intriguing topic in advanced quantum technologies. Surface acoustic waves (SAWs), carrying coherent phonons at gigahertz frequencies, provide a viable platform to achieve the strong coupling regime between SAW phonons and other quasiparticles, e.g. magnons. Although SAW devices have also been used to develop magnetic field sensors based on the change of Young's modulus  $E$  or shear modulus  $G$ , showing an ultra-low limit of detection (LoD) and the application for detecting weak magnetic signals at tens of picotesla. Concomitant disadvantages include single response direction, millimeter-scale size, complex device structure and fabrication process still remain. The strongly coupled magnon-phonon system has great potential to overcome the above challenges for weak magnetic detection. Here, we demonstrate a highly sensitive SAW magnetic field sensor by achieving strong coupling between SAW phonons and magnons in a thin FeGaB film embedded in an acoustic cavity. By analyzing SAW phonon dispersion, the strong coupling regime manifests itself in a frequency anti-crossing and a cooperativity larger than 1. Notably, a high frequency sensitivity of 6 Hz/nT and a phase sensitivity of 440  $^\circ$ /mT is achieved within the anti-crossing region. Combined with the evaluation of phase noise, the LoD is determined to be 140 pT/Hz<sup>0.5</sup> @ 10 Hz and 45 pT/Hz<sup>0.5</sup> @ 100 Hz. I will also present the observation of exceptional points in the magnon-phonon coupling system, based on which we fabricated a highly sensitive surface acoustic wave magnetic field sensor. Besides the fundamental significance to hybrid magnon-phonon quasiparticles, our work proposes brand-new sensing mechanisms for conveniently developing miniaturized SAW magnetic field sensors with high sensitivity and low LoD.

**D12-09****电写入磁霍普夫子**

杜海峰\*

中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心

磁霍普夫子 (magnetic hopfion) 是一类新型三维拓扑磁结构, 其拓扑特性由霍普夫荷 (Hopf charge) 描述。磁霍普夫子所对应的层展磁场具有丰富的三维结构, 因此可以用类似于经典电磁场的多极展开进一步得到层展磁多极子。本报告中, 我将讨论如何在实验上实现这种磁结构。

**D12-10****电流调控磁斯格明子拓扑特性**

张颖\*

中国科学院物理研究所

Magnetic topological spin textures such as skyrmions and antiskyrmions emerge as promising candidates for information carriers in high-density memory, neuromorphic computing applications, and logic components due to their unusual topological properties and emergent electromagnetic phenomenon. Here, we have experimentally demonstrated the current-driven dynamics of antiskyrmions in a Mn<sub>1.4</sub>PtSn chiral magnet at room temperature, without the requirement for an external magnetic field. This is realized by embedding antiskyrmions in helical stripe domains, which naturally provide one-dimensional (1D) straight tracks along which the antiskyrmion sliding can be easily launched with low current density and without transverse deflection from the antiskyrmion Hall effect. The dominant factors for the higher mobility of antiskyrmion embedded in helical stripes are discussed, manifesting the contribution of increased driving force and averaged pinning potential as unravelled by

micromagnetic simulation and the collective pinning theory. We further show that our method can be applied to the sliding motion of merons in stripe domains. Our findings provide clear demonstration and comprehensive understanding of antiskyrmion gliding along natural stripe tracks under a low current density.

## D12-11

### 铁磁/非磁异质结的自旋输运与转换

王学锋\*

南京大学

自旋电子学是后摩尔时代高能效芯片发展的重要方向。如何实现铁磁/非磁异质结中自旋流的高效产生和转换是该领域的关键问题。近期，我们在非共面磁性异质结  $\text{Cr}_5\text{Te}_6/\text{Pt}$  中实现了巨大的反常霍尔电阻率，研究表明温度变化和电子-空穴相互扩散都导致了贝里曲率的重建；通过实空间的磁力显微镜技术观察到界面处存在的拓扑自旋织构，结合原子级模拟证实拓扑自旋织构诱导了巨大反常霍尔效应。另外，我们也在  $\text{YIG}/(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$  异质结中实现了室温下电场可调自旋霍尔角（从 $\sim 0.76$  提升至 $\sim 0.9$ ），归因于拓扑绝缘体薄膜中的逆自旋霍尔效应以及表面态的逆 Edelstein 效应，增强了人们对拓扑表面态提升自旋流转换效率的理解。

## D12-12

### 钐钴永磁材料的多物理场组织控制与高性能化

马天宇\*、宋欣

西安交通大学

作为高温磁性最强的永磁材料， $\text{SmCoFeCuZr}$  永磁材料在高铁大功率高温电机、火箭离子推进器和雷达通讯系统等领域不可或缺。提高材料中 Fe 对 Co 的替代量可提高理论最大磁能积并显著降低材料成本，成为当前该类型磁体的重要研发方向。然而，当 Fe 替代量超过临界值 20 wt.% 时，磁体纳米胞状组织变得不完整，即对矫顽力起关键作用的胞壁析出相减少，且固态相变残余缺陷增多，矫顽力和方形度急剧恶化，导致最大磁能积远低于理论值，严重制约应用。本报告将介绍以下内容：1)  $\text{SmCoFeCuZr}$  永磁材料形成独特纳米胞状组织过程所涉及的固态相变、溶质原子配分和缺陷演化<sup>[1,2]</sup>；2) 基于缺陷对析出相形核与生长的协同作用，将应力和磁场引入热处理过程，加速材料固态相变、缺陷分解和溶质原子配分<sup>[3,4]</sup>；3) 通过优化工艺，增多胞壁析出相并调控其成分、减少残余缺陷，提高了材料的矫顽力和最大磁能积<sup>[5]</sup>。

[1] Xin Song, Tianyu Ma, Xianglong Zhou, Fan Ye, Tao Yuan, Jingdong Wang, Ming Yue, Feng Liu, Xiaobing Ren, Atomic scale understanding of the defects process in concurrent recrystallization and precipitation of Sm-Co-Fe-Cu-Zr alloys, *Acta Materialia* 202 (2021) 290 – 301.

[2] Xin Song, Dan Huang, Wentao Jia, Yao Liu, Jianrong Gao, Yang Ren, Tianyu Ma, In-situ high-energy X-ray diffraction study of the early-stage decomposition in 2:17-type Sm-Co-based permanent magnets, *Acta Materialia* 244 (2023) 118580.

[3] Xin Song, Wentao Jia, Yao Liu, Jian Li, Dan Huang, Xiaolian Liu, Lizhong Zhao, Xianglong Zhou, Yang Ren, Feng Liu, Tianyu Ma, Rapid-thermal-process pre-treatment promoted precipitation towards strengthening hard magnetism of Sm2Co17-type magnets, *Acta Materialia* 274 (2024) 119966.

[4] Xianglong Zhou, Tao Yuan, Tianyu Ma, Shortened processing duration of high-performance Sm-Co-Fe-Cu-Zr magnets by stress-aging, *Journal of Materials Science & Technology* 106 (2022) 70–76.

[5] Jian Li, Xin Song, Yao Liu, Wentao Jia, Zhiyi Ma, Lizhong Zhao, Xiaolian Liu, Tianyu Ma, Magnetic-field-assisted solute partitioning in 2:17-type Sm-Co-Fe-Fe-Zr magnets towards enhancing coercivity, *Journal of Materials Science & Technology* (in press).

**D12-13****纳米晶磁性材料可控制备及性能研究**

杜娟\*、郑强、耿琪瑶、全伟

上海大学材料科学与工程学院

杨松 姚璐璐 何江海 边宝茹

中科院宁波材料所

当把磁性材料的晶粒尺寸降低到纳米尺度后会出现奇特的磁学性能。对于硬磁材料来说，晶粒尺寸达到单畴临界尺寸时其矫顽力会出现一个极大值。硬磁相的晶粒尺寸与矫顽力的关系呈  $1/\ln D^n$ ，当硬磁纳米颗粒达到单畴临界尺寸附近时高矫顽力会出现一个极大值，而继续降低晶粒尺寸矫顽力又会降低。此外实验结果和理论预测表明，当具有高矫顽力的硬磁材料与具有高剩磁的软磁材料在纳米尺度复合后，可同时兼具硬磁相的高矫顽力和软磁相的高剩磁，纳米复合永磁材料可获得超高磁能积。

基于纳米磁性材料的研究，我们取得了系列研究进展：（1）采用原位和准原位透射电镜技术，发现了磁性纳米颗粒原子尺度生长过程，澄清了磁性纳米颗粒生长机制。（2）通过对生长过程的调控，实现了磁性纳米颗粒 0.5nm 步长的精准调控；发展了有序磁性纳米颗粒宏量制备方法；成功制备出了具有晶粒取向的高饱和磁化强度介晶材料。（3）发展了表面活性剂辅助低温化学沉积（LTCC）的新型制备工艺，实现了软磁相 5nm 晶粒尺寸调控，构筑了兼具高矫顽力和高磁能积的各向异性  $\text{SmCo}_5@FeCo$  壳核纳米复合材料。

**D12-14****高性能软磁合金深过冷凝固策略**

吴琛\*、陈起明、王克冰、张心阳、刘广、严密

浙江大学材料科学与工程学院

金属软磁材料主要用于信息与能源的转换和传输，是 5G 通讯、电子信息、能源交通等领域的关键基础材料之一。根据微结构的差异，软磁合金可分为晶态、非晶和纳米晶合金三类。本文采用深过冷凝固策略，分别调控三类软磁合金的显微组织结构，突破了饱和磁化强度与矫顽力难以同时优化的瓶颈。对于晶态软磁合金，过冷凝固可有效调控晶界特性，在保持高磁化强度的同时降低矫顽力。对于非晶和纳米晶软磁合金，过冷凝固有利于提高非晶形成能力，为设计具有高 Fe 含量的非晶和纳米晶软磁合金提供了可能。合金中高铁磁性元素含量保证了高饱和磁化强度，且非平衡凝固条件下制备的合金不仅非晶基体的无序度得以有效提高，亦具有细化和均匀分布的纳米晶粒，进而降低磁晶各向异性和矫顽力。

**D12-15****稀土有序占位过渡金属碳化物 i-MAX 相及其 二维衍生物 i-MXene 的研究进展**

崔伟斌\*、杨家鑫、孙淑丽、陈昭辉、种禾、赵妮、郭宏运

东北大学

过渡金属碳化物 MAX 相因其兼具陶瓷和金属特性、层状晶体结构并转化为二维碳化物而广受关注，但鲜有磁性元素能够引入至 MAX 相晶格的报道。近年来，人们发现 Y/Sc 可以进入 M<sub>2</sub>AC 型 MAX 相晶格并获得之前无法合成的非稳态相，然而稀土与过渡金属之间物化性质之间的巨大差异，导致晶格占位重构，Y/Sc 原子位于 M 原子六元环中心，略凸向 A 原子层，出现 Sc/Y 原子占位的有序化，化学通式为： $M_4/3R_2/3AC$ （M = Cr、Mo、W，R = 重稀土元素，A = Al、Ga），对称群也从传统 MAX 相的 P6<sub>3</sub>/mmc 转变为原子有序占位 i-MAX 相的 C2/c 或 Cmcm。受此启发，本课题组陆续探索合成几种基于原子有序占位的 i-MAX 体系，确定了其晶体结构及原子占位信息，表征了 R 类别引起的磁性变化，揭示了 A 位原子（Al 和 Ga）对材料力学与机械性能的影响，揭示了堆垛有/无序引发的对称性和晶体缺陷。在此基础上，通过重新构造堆垛单元，设计构造出又一兼具层间与面内有序的 s-MAX 新相，丰富了正在蓬勃发展的过渡金属层状碳化物家族成员。研究工作同时探讨了一下相关 i-MAX 或 s-MAX 体系的二维衍生物的制备及

应用。

## D12-16

### 拓扑催化：从电子电荷到自旋

李国伟\*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

拓扑材料是近十几年来物理、材料领域的热点体系之一。其中所蕴涵的拓扑性质，如高迁移率电子、鲁棒的拓扑表面电子态等也成为了调控分子催化转换的利器，对多种催化反应的机理及效率有着重要的影响。尤其是近些年来快速发展的手性拓扑结构，所存在的自发电子自旋极化不仅为更高更快的信息存储与处理提供了契机，也是突破现有催化理论框架、设计下一代高效率催化材料的重要自由度。我们通过毫米至厘米级高质量拓扑单晶材料的合成，系统研究了表面态、电子自旋等对催化制氢及水氧化反应的影响。这不仅可以实现高催化效率、高稳定性催化材料的设计，也为探索分子手性的出现提供了契机。

[1] Shubin Sun, Yudi Zhang, Xin Shi, Wen Sun, Claudia Felser, Wei Li, Guowei Li. *Advanced Materials*. 2024, 36 (37), 2312524.

[2] Yang, Q.; Li, G.; Manna, K.; Fan, F.; Felser, C.; Sun, Y., Topological engineering of Pt-group-metal-based chiral crystals toward high-efficiency hydrogen evolution catalysts. *Adv Mater* 2020, 32: e1908518.

[3] Li, G.; Yang, Q.; Manna, K.; Zhang, Y.; Merz, P.; Shekhar, C.; Sun, Y.; Felser, C., Observation of asymmetric oxidation catalysis with B20 chiral crystals. *Angew Chem Int Ed* 2023, 62: e202303296.

[4] Yudi Zhang, Kathryn E Arpino, Jian Liu, Claudia Felser, Guowei Li, Observation of a robust and active catalyst for hydrogen evolution under high current densities. *Nature Communications*. 2023: 13 (1), 7784.

## D12-17

### SmCo 基纳米晶永磁粉体的制备及磁性能研究

安士忠\*

北京航空航天大学

高性能 SmCo 基纳米晶永磁粉体在纳米复合磁体和生物医药等领域有重要潜在应用。然而，其规模化可控制备仍面临较大挑战。尝试采用适合于规模化制备的行星式球磨法，制备了 SmCo 基纳米晶永磁粉体，并研究了其磁性能。主要包括：（1）采用行星式球磨法制备 SmCo<sub>5</sub> 微纳米片，研究了球料比、球磨时间和表面活性剂含量对 SmCo<sub>5</sub> 粉体形貌和磁性能的影响规律；（2）选用有机物化学包覆法在 SmCo<sub>5</sub> 微纳米片表面包覆一层石墨烯，该粉体经 250℃氧化 48 h 后其重量增加较同等条件下未包覆石墨烯的 SmCo<sub>5</sub> 粉体显著降低，抗氧化能力明显提升；（3）对比研究了低温球磨和常规球磨对 SmCo<sub>5</sub> 和 SmCo<sub>5</sub>/Fe 纳米晶粉体形貌、相组成和磁性能的影响，结果表明低温球磨可以有效抑制冷焊和相变，减少污染，提升 SmCo<sub>5</sub> 和 SmCo<sub>5</sub>/Fe 纳米晶粉体的磁性能。

## D12-18

### 基于共线型范德华反铁磁材料的隧道结

赵伟民<sup>1</sup>、刘依伦<sup>1</sup>、杨柳<sup>2</sup>、王国鹏<sup>3</sup>、田明亮<sup>3</sup>、邵定夫<sup>2</sup>、王澜\*<sup>1</sup>

1. 合肥工业大学物理学院

2. 中科院合肥强磁场中心

3. 安徽大学物理学院

磁隧道结是高性能自旋电子器件中的关键组件。传统磁隧道结依赖于铁磁材料，但利用反铁磁材料可显著提高速度和封装密度。本文报道了一种基于范德华异质结构的全共线反铁磁隧道结（AFMTJ），其工作原理与具有非共线反铁磁配置的磁隧道结截然不同。该反铁磁隧道结异质结构器件采用 A 型反铁磁金属



作为电极，非磁性半导体作为隧道势垒，其隧穿磁电阻比率高达 75%。值得注意的是，通过范德华反铁磁体特有的自钉扎效应，这种磁隧道结可实现非易失性。实验和理论分析揭示了一种与界面驱动的自旋极化输运相关的新隧穿磁电阻机制，尽管该块状共线反铁磁体具有自旋无关的特性。我们的工作不仅证明了全共线反铁磁隧道结可提供与传统磁隧道结相当的性能，还为反铁磁自旋电子学引入了一种新范式，其中利用了反铁磁界面的自旋特性。

#### D12-19

##### 基于稀土-过渡族亚铁磁绝缘体的自旋流调控

李岩\*

电子科技大学

自旋流是自旋电子学的研究核心之一。稀土-过渡族亚铁磁体因其独特的磁补偿特性，兼具铁磁与反铁磁材料的优点，成为实现高效自旋操控的重要材料平台。本研究以稀土-过渡族亚铁磁绝缘体  $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  为基础，通过结构设计，结合自旋波/磁振子的相干性和手性特征，系统探索了多种自旋流调控方法。实现了相干自旋传输调控、磁振子-磁振子耦合和手性选择的磁振子过滤等，为发展新型高性能自旋电子器件提供了物理基础与材料支撑。

#### D12-20

##### 基于合成反铁磁的非线性磁化动力学

马付胜\*

南京师范大学物理科学与技术学院

Nonlinear magnetization dynamics has been studied since 1950s, which is mainly based on YIG with millimeter size. However, this kind of investigations has rarely been carried out using magnetic thin films sputtered on silicon substrate. In this talk, we will firstly introduce the linear magnetization dynamics of synthetic antiferromagnet of distinct spin configurations. Secondly, we will present the magnon-magnon coupling in different regimes: strong, ultra-strong, and deep-strong. At the end, we introduce the nonlinear dynamic phenomena in SAFs. Especially, the proposal of magnonic scenario of generating chaotic combs based on magnon-magnon coupling mechanism in silicon based synthetic antiferromagnet platform. The realized magnonic frequency combs can transition to chaos via various routes, i.e., subcritical Hopf bifurcation, torus-doubling bifurcation, and torus breakdown.

#### D12-21

##### 准一维钴基自旋链材料的各向异性磁化平台研究

金纶\*

东南大学

准一维钴基自旋链材料作为一类可以研究低维体系中磁序、阻挫、量子临界的复杂共同作用的理想载体，长期受到业内学者的广泛关注。钴基斜辉石体系 ( $\text{ACoX}_2\text{O}_6$ ) 的晶体结构（共边的  $\text{CoO}_6$  八面体组成的 zig-zag 型一维链由  $\text{XO}_4$  四面体桥接）和磁结构（链内铁磁耦合、链间反铁磁耦合）均已通过低温中子粉末衍射数据解出，且比热数据验证出该体系中形成长程反铁磁序的电子自旋无论在低场还是高场下均倾向于 Ising 耦合。这些特质均与  $\text{CoNb}_2\text{O}_6$  等材料高度相似，从而证明该类材料具备了成为上述理想载体的潜质。然而，由于该类材料的优质单晶生长难度较大，其物性表征仍停留在各向同性阶段，这极大地阻碍了该体系内不同方向上新奇物性的涌现。通过光学浮区法， $\text{CaCoGe}_2\text{O}_6$  和  $\text{CaCoSi}_2\text{O}_6$  的毫米级别优质单晶生长得以实现，并在该体系中首次观测到了具有极强各向异性的磁化平台。尽管这两种材料在晶体结构和磁结构方面几近相同，这些磁化平台的磁矩以及出现的临界场和方向均具有本质化的差异。这说明该材料体系中

桥接四面体的选择能够极大地影响一维钴基自旋链之间超交换路径上的磁耦合强度，为后续进行材料物性的导向性调控提供了思路。

## D12-22

### 面向下一代存储技术的范德华异质结自旋轨道力矩反铁磁存储器：无外场操作机制与性能优化

张力舒\*

山东大学

传统铁磁体/重金属自旋轨道力矩 (SOT) 技术虽能显著提升磁性存储器效能，但其物理机制存在本质局限：金属层分流效应导致电流损耗、对称性破缺依赖外磁场实现抗阻尼翻转、界面缺陷引发自旋散射、以及杂散磁场敏感性等问题[1]。为此，本研究提出一种基于范德华 (vdW) 异质结的无外场自旋轨道力矩反铁磁存储器[2]，其核心结构由垂直磁各向异性反铁磁材料  $\text{LaBr}_2$  双层与对称性破缺外尔半金属单层  $\text{Td}$  相  $\text{WTe}_2$  构成。通过密度泛函理论、非平衡格林函数方法与宏观自旋动力学模拟的系统研究，我们发现该 vdW SOT 器件展现出超低临界电流密度 ( $\sim 10$  兆安/平方厘米) 和 250 皮秒量级的无外场磁化翻转速度，实现了极低能耗的高效写入性能。同时，器件读取误差率显著降低，隧道磁阻比高达 4250%。优异的读写性能源于  $\text{LaBr}_2$  电介质特有的库仑相互作用、 $\text{WTe}_2$  中非零  $z$  向上自旋极化的显著增强以及异质界面邻近效应的协同调控。

参考文献

[1] Zhang, L., Zhou, J., Li, H.,\* Shen, L.,\* Feng, Y.\* (2021) Appl. Phys. Rev., 8 , 021308.

[2] Zhang, L.; Yuan, Z.; Yang, J.; Zhou, J.; Jiang, Y.; Li, H.; Cai, Y.; Tsymbal, E.; Feng, Y.P.; Zhu, Z.; Shen, L. (2024) Phys. Rev. B 110 (22), L220409.

## D12-23

### 磁性纳米薄膜中的磁子相互作用研究

于国强\*

中国科学院物理研究所

随着后摩尔时代数据量的指数级增长，开发兼具高运算速度和低能耗特性的新型信息存储与逻辑运算器件已成为突破冯·诺依曼架构瓶颈的关键课题。基于电子电荷与自旋属性衍生的自旋电子器件，相较于传统的微电子和半导体器件，在存储密度、能耗效率以及功能集成等方面展现出显著优势。然而，由于晶格散射等因素导致的焦耳热损耗在电荷输运过程中难以避免，这严重限制了器件能效的进一步提升。磁子 (magnon) 是自旋波量子化的准粒子，因其兼具玻色子特性与长程相位相干性，并且无需电荷迁移即可传递角动量信息的独特优势，为构建低功耗器件提供了全新范式。近年来，磁子因其独特的性质而受到广泛关注，特别是磁子之间的相互作用机制已成为磁子学领域中的核心科学问题。该报告将主要介绍团队近期关于磁性纳米薄膜中磁子相互作用的线性与非线性现象的研究，具体包括两部分内容：

(1) 在线性现象部分，我们重点关注磁子-磁子耦合。磁子-磁子混合系统作为一种新的耦合体系，最近受到研究者的密切关注。然而，迄今为止，研究者们只在补偿亚铁磁体和天然反铁磁体等材料中实验实现了磁子-磁子的超强耦合，其观察到的最大归一化耦合强度未超过 0.4，远低于深度强耦合的条件。此外，实现超强耦合通常需要低温或者极大的磁场等严苛的实验条件，而且宏观大小的晶体样品与互补金属氧化物半导体平台不兼容，这些因素都阻碍了实际应用。相较之下，人工反铁磁 (synthetic antiferromagnet, SAF) 体系由于其具有的高自由度，是研究磁子-磁子耦合的理想载体，因此也是研究超强磁子-磁子耦合甚至深度强磁子-磁子耦合的合适体系。通过引入 SAF 中两个铁磁层之间的磁各向异性不对称性，我们在三种 SAF 磁构型中理论和实验上证明了室温超强磁子-磁子耦合的实现。通过用广义 Hopfield 模型对混合磁子系统进行量子化，我们证明了 SAF 中磁子-磁子耦合性质随磁构型的不同而变化，其中同向旋转耦合强度  $g_1$  和反向旋转耦合强度  $g_2$  的值遵循不同的规律。根据具体的磁构型，归一化的反向旋转耦合强度  $g_2/\omega_0$  可以有如下的取值范围： $g_2/\omega_0 = 0$ 、 $g_2/\omega_0 \gg g_1/\omega_0$  或  $g_2/\omega_0 \gg g_1/\omega_0$ 。这种耦合强度的高自由度可以极大

克服由于超辐射相变导致的  $g_1(2)/\omega_0$  不能大于 0.5 的限制，并可使混合磁子系统中的耦合趋向于深度强耦合状态。在实验上，我们实现了混合磁系统中的近深度强耦合，其中  $g_1/w_0$  可达 0.963。我们的发现表明 SAF 是进一步探索超强耦合甚至深度强耦合中的新奇现象的理想体系。

在非线性现象中，我们聚焦三磁子与四磁子散射过程及其高次谐波效应。自然界中普遍存在着非线性效应，其范围横跨宇宙学的引力波至纳米磁性结构中的自旋波。在众多非线性效应中，高次谐波现象备受瞩目。由于在信息科技领域的应用，研究者们致力于在磁性体系中实现磁子的高次谐波。已有理论计算表明，磁子高次谐波可以在具有拓扑结构的磁织构中发生，例如：磁畴壁、磁斯格明子以及磁涡旋。这是因为较大的磁矩梯度能够引发显著的三磁子过程，而这一过程是产生磁子倍频以及高次谐波的关键。对于拓扑平庸的磁结构，是否存在磁子高次谐波现象，还亟待探索。我们采用金刚石量子传感技术，在磁性镍铁薄膜中观察到了高达 55 阶的磁子高次谐波信号。在精心设计的单畴结构和多畴结构两组样品中，均成功探测到磁子高次谐波效应，表明其产生与磁畴边界处磁矩的动态翻转并无直接关联。通过理论计算和微磁学模拟，我们揭示了非线性自旋波产生于样品边缘处的非共线磁性结构。利用高阶自旋波驱动金刚石 NV 电子自旋拉比振荡，首次成功展示了磁子高次谐波具有优良的相位相干性。这项研究展示的非共线磁结构诱导的相干磁子高次谐波现象，为基于磁子的信息处理器件奠定了基础，有望应用于宽频磁信号的探测。

## D12-24

### 高频磁性材料与器件研究进展

柴国志\*

兰州大学

磁性材料是能量和信息传输、转换和存储的重要功能材料。其中高工作频率下具有高磁导率的高频磁性材料是能量和信息的转换和处理的核心载体。本报告中将介绍兰州大学高频磁动力学研究团队在高频磁性材料与器件方面的研究工作。

1. 在 DC~1 MHz 频段，高磁导率磁芯材料是变压器、开关电源等实现快速充放电和能量转换的关键，其性能直接决定了能量转化的速度和效率。针对该应用场景我们开发了变压器、开关电源等使用的高磁导率磁芯材料。

2. 在 10 kHz~10 MHz 频段，由于高频磁性材料的涡流和畴壁共振效应，其具有磁热和磁阻抗效应，可作为高精度小型化传感器件的核心敏感材料，在该频段下我们开发了小型化传感器，该传感器件在保持传感器超高测试精度的同时大幅降低传感器载荷的体积、功耗和重量。

3. 在 1 MHz~10 GHz 频段，高频磁性材料的动力学性质主要由自然共振和铁磁共振决定，在该频段下实现了用于装备隐身与集成化磁功能器件的高磁导率、高工作频率软磁材料。

4. 在 1 GHz~100 GHz 频段，高频磁性材料的磁动力学过程主要表现为自旋波，基于自旋波的手征性可以实现供下一代通信使用的 mm 波隔离器、环形器等微波器件，在该频段下主要实现了基于材料自旋波与亚铁磁共振等效应的原理器件。

## D12-25

### 轨道电子学材料与器件性能研究

张德林\*

天津工业大学

磁性随机存储器是一种新型非易失性存储芯片，在物联网、数据中心、消费及工业用微处理器、人工智能终端等方面具有很大的应用前景，成为下一代存储器件芯片的最佳候选者之一。设计和开发存储密度高、运行速度快、器件能耗低、热稳定好及寿命长等优异性能的磁性存储器是面临的科学和技术难题。轨道霍尔效应无需依赖材料的强自旋轨道耦合效应，通过外电场作用在非磁层中将电荷流转换为轨道流，进而在磁性材料中转换为自旋流及轨道矩并对其磁矩进行调控，可以用来设计新型的磁性存储和逻辑器件。

报告人通过实验设计，利用太赫兹发射谱测量观察到轻金属 Ti 和 Mn 中的逆轨道霍尔效应，实验上首

次证实了轨道电子学领域的重要物理现象逆轨道霍尔效应<sup>[1]</sup>。利用轻金属（例如，Zr、Ti），率先实现了轨道转矩驱动不同轨道-自旋转换系数铁磁材料（例如[Co/Pt]<sub>n</sub>、CoFeB/Gd/CoFeB、Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>）的磁化翻转，降低了器件的翻转电流密度<sup>[2,3]</sup>。同时，通过 Pt, Gd 和 MgO 掺杂 Ti 轨道霍尔通道，实现了对 Ti 的轨道霍尔电导、电导率和轨道杂化的调控，增强了轨道矩效率和降低了磁化翻转电流密度<sup>[4]</sup>。本次会议，报告人将围绕反铁磁和合成反铁磁结构中的轨道流和轨道矩驱动垂直磁化翻转报告最近的实验进展。

本文得到国家重点研发计划项目、国家自然科学基金区域联合重点项目、面上项目、天津市自然科学基金重点项目等资助。

#### 参考文献

- [1] P. Wang, D. Zhang\*, Y. Jiang\*, et al, Inverse orbital Hall effect and orbitronic terahertz emission observed in the materials with weak spin-orbit coupling. npj Quantum Mater. 8, 28 (2023)
- [2] Y. Yang, D. Zhang\*, Y. Jiang\*, et al, Orbital torque switching in perpendicularly magnetized materials. Nat. Commun. 15, 8645 (2024).
- [3] Heshuang Wei, D. Zhang\*, Y. Jiang\*, et al, Orbital torque switching of room temperature two-dimensional van der Waals ferromagnet Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>. Arxiv 6046353 (2024) [Nat. Commun. (2025)]
- [4] Y. Yang, et al., Enhanced orbital torque efficiency and magnetization switching through Ti<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub> (M = MgO, Gd, and Pt) for efficient orbitronic devices. Adv. Funct. Mater. (2025)

## D12-26

### 柔性磁传感材料与器件

杨华礼

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

柔性磁传感器件结合了柔性电子便携、可共形贴附、易变形的特点和磁传感器非接触探测、矢量场感知等独特性质，赋予可穿戴电子产品磁场感知、触觉探测等功能，在人形机器人、虚拟现实等新兴领域具有重要应用前景。然而，由于构建磁传感器的磁敏材料在大形变下易发生断裂，使得其变形能力面临挑战；同时，在形变条件下，受磁弹耦合作用影响，磁敏材料的易磁化轴易发生改变，导致器件性能不稳定。基于以上挑战，我们开展了柔性磁传感材料的制备、物性调控和传感器研制方面的工作，揭示了应力对柔性磁性薄膜磁各向异性的定量调控规律，掌握了柔性磁性薄膜在应力作用下保持磁矩取向稳定的基本方法，研制出了抗拉伸干扰的超弹性自旋阀磁传感器和三维力传感器等。这些研究结果为实现柔性磁电功能器件在人机交互等领域的应用奠定了良好的基础。

#### 参考文献

- [1] Huali Yang#, Shengbin Li#, Yuanzhao Wu\*, Xilai Bao, Ziyin Xiang, Yali Xie, Lili Pan, Jinxia Chen, Yiwei Liu\*, and Run-Wei Li\*; Advances in Flexible Magnetosensitive Materials and Devices for Wearable Electronics, Advanced Materials, 2024, 36(37): 2311996
- [2] Mengchao Li, Huali Yang\*, Yali Xie\*, Kai Huang, Lili Pan, Wei Tang, Xilai Bao, Yumeng Yang, Jie Sun, Xinming Wang, Shenglei Che, and Run-Wei Li\*; Enhanced Stress Stability in Flexible Co/Pt Multilayers with Strong Perpendicular Magnetic Anisotropy, Nano Letters, 2023, 23(17): 8073-8080
- [3] Xilai Bao, Huali Yang\*, Yali Xie\*, Jiabin Wang, Ri He, Pavlo Makushko, Lili Pan, Yubo Wang, Jinxia Chen, Mengting Zou, Ruohan Zou, Chenxu Liu, Lin Guo, Tao Zhu, Denys Makarov\*, and Run-Wei Li\*; Flexible Exchange-Biased Films with Superior Strain Stability, Advanced Functional Materials, 2024, 34(51): 2409844
- [4] Lili Pan, Yali Xie\*, Huali Yang\*, Xilai Bao, Jinxia Chen, Mengting Zou, and Run-Wei Li\*; Omnidirectionally Stretchable Spin-Valve Sensor Array with Stable Giant Magnetoresistance Performance, ACS Nano, 2025, 19(5): 5699-5708

## D12-27

**Highly efficient spin-orbit torque magnetization switching in a ferromagnetic single layer**

Miao Jiang\*

Beijing Institute of Technology

The explosive growth of artificial intelligence has exposed fundamental challenges in current memory technologies (e.g., SRAM, DRAM, and Flash), including the memory wall, power consumption bottlenecks, and volatility limitations. Spin-orbit torque magnetic random-access memory (SOT-MRAM), leveraging the electron spin, offers a promising solution with non-volatile storage, nanosecond-scale read/write speeds, and high endurance. The conventional SOT magnetization switching system typically consists of ferromagnetic/heavy metal (FM/HM) heterostructures. To address the efficiency limitations caused by interfacial spin relaxation and spin memory loss, researchers have proposed inducing SOT magnetization switching in single-layer FM films. This approach significantly reduces the critical switching current density ( $J_c$ ) and has become a focal point in the field.

Symmetry breaking is a prerequisite for SOT magnetization switching in single-layer films. By exploiting structural inversion asymmetry and strong in-plane effective fields in functional layers, we achieved SOT magnetization switching in perpendicularly magnetized semiconducting single-layer films, reducing  $J_c$  by three orders of magnitude and enabling effective gate voltage modulation<sup>[1-3]</sup>. Furthermore, to enhance the scalability of spintronic devices, we introduced macroscopic symmetry breaking through inhomogeneous elemental distribution, utilizing the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) to promote domain wall nucleation and motion<sup>[4-5]</sup>. Furthermore, we achieved a high SOT efficiency in an epitaxial half-Heusler single layer at room temperature, which primarily stems from the intrinsic non-centrosymmetric structure, half-metallic properties, and optimized epitaxial growth<sup>[6]</sup>. Our findings enhance the understanding of the physical mechanisms in SOT magnetization switching in single-layer systems and significantly advance the practical applicability of high-efficiency SOT-based memory devices.

## References:

- [1] Jiang, M.; Asahara, H.; Sato, S.; Kanaki, T.; Yamasaki, H.; Ohya, S.; Tanaka, M. *Nat. Commun.* 2019, **10**, 2590.
- [2] Jiang, M.; Asahara, H.; Sato, S.; Ohya, S.; Tanaka, M. *Nat. Electron.* 2020, **3**, 751.
- [3] Jiang, M.; Asahara, H.; Ohya, S.; Tanaka, M. *Adv. Sci.* 2023, **10**, 2301540.
- [4] Jiang, M.; Yang, X.; Qu, S.; Wang, C.; Ohya, S.; Tanaka, M. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2024, **16**, 23497.
- [5] Jiang, M.; Yang, X.; Yu, Y.; Ohya, S.; Tanaka, M. *APL Materials* 2025, **13**, 041106.
- [6] Han, Z.; Huo, Y.; ...; Jiang, M. 2025, *in submission*.

## D12-28

**低维磁性材料的动力学及阻尼特性**

袁喆\*

复旦大学

二维磁性材料的发现，不仅极大地拓展了磁性材料的范围，也为研制新原理自旋信息器件提供理想的研究平台。目前对二维磁性材料的研究大多聚焦在其静态物理性质方面，对于其所具有的独特动力学特性还有待深入研究。我们通过第一性原理计算等工具，系统研究了低维磁性体系的磁动力学特征，包括低维磁性材料的翻转特性，磁阻尼的微观机制和调控手段等，为设计低维高效自旋电子学器件提供重要的理论依据。

## D12-29

## 存算一体自旋电子材料与器件

田玉峰\*

山东大学

存算一体器件通过在存储器中嵌入计算能力，避免了数据频繁搬运，可以有效克服传统冯·诺依曼架构存在的“存储墙”和“功耗墙”瓶颈，从而满足快速发展的自动驾驶、图像识别等人工智能技术对超高密度信息存储与超快信息处理的迫切需求。特别是利用电子自旋作为信息载体的自旋电子器件，凭借其固有的非易失性、低功耗、高速度等优点，成为存算一体器件研究的理想选择。

在本报告中，我们将介绍课题组最近将自旋轨道矩驱动垂直磁化翻转用于存算一体应用的研究进展：

(1) 设计了室温剩磁态磁矩抵消而反常霍尔电阻增强的  $\text{CoPt/Ru/CoTb}$  人工反铁磁异质结，实现了无外磁场的电流驱动的垂直磁化翻转，解决了长期以来人工反铁磁器件霍尔读出信号低的难题，并构建了高识别率的人工神经网络。(2) 构建了可分别调控面内和面外交换偏置的  $\text{IrMn/Co/Ru/CoPt/CoO}$  等磁性异质结，在单一器件中实现纯电控多态存储和自旋逻辑运算，为可实用化的存算一体自旋器件提供了原型器件。

## D12-30

## 基于手性结构自旋选择性的圆偏振光电效应研究

王晓蕾\*

北京工业大学

分子手性、电子自旋极化与光偏振均打破了空间各向同性对称，各自独立地展现了它们内在的量子层面特性。这三者量子特性的同时相互作用与相互转化，不仅将刷新物理机制，还将进一步促进功能性量子光自旋电子器件的发展。然而，关于这种基本关联的直接实验证据仍显匮乏。这里，我们提出了一种实验方案，获得了手性分子对圆偏振光的直接光电流响应。该响应通过角动量守恒和手性诱导自旋选择性(CISS)效应（即电子穿过螺旋结构后产生的自旋极化现象）将上述三个特性紧密联系起来。我们进行了圆偏振光电效应(CPGE)测量，其光电流符号取决于分子的手性。我们构建了紧束缚哈密顿量模型，并利用非平衡格林函数方法进行了量子输运模拟。实验结果与输运模拟高度吻合，揭示了CPGE的根源在于分子手性、电子自旋和光螺旋性三者之间的相互作用。本研究突破性地实现了在纯手性系统中对CPGE的测量，为基于CISS的CPGE提供了新机制，并为设计功能性光自旋电子器件提供了新策略。

## D12-31

## 基于狄拉克拓扑表面态的无辅助场电流驱动垂直磁矩翻转研究

赵云驰\*<sup>1</sup>、张毅<sup>1,2</sup>、王守国<sup>3</sup>

1. 中国科学院物理研究所

2. 北京科技大学

3. 安徽大学

存在于拓扑材料中的拓扑表面态具有自旋-动量锁定、高自旋极化率及拓扑保护等特性，将这些优势应用于磁性多层膜材料的设计构建将有望突破磁存储单元工作时能耗过高及对外部磁场依赖等瓶颈，实现磁存储及逻辑器件的高能效驱动。

在本工作中，我们利用超高真空分子束外延技术基于第二类狄拉克半金属材料  $\text{Pt}_3\text{Sn}$  制备出具有单晶外延结构的狄拉克半金属/磁性金属异质结构薄膜。在该体系中，由拓扑材料  $\text{Pt}_3\text{Sn}$  与铁磁材料  $\text{Co}$  构成的异质界面处形成了第二类狄拉克拓扑表面态并诱导出具有面外自旋极化分量的特殊自旋织构，在电场激发下可产生非常规自旋-轨道力矩(unconventional SOT)并作用于相邻的铁磁层，因此基于该薄膜材料的器件可在不依赖外磁场辅助的条件下实现电流驱动的磁矩翻转。该工作成功利用拓扑表面态实现了磁性多层膜材料器件中垂直磁矩的高效全电学驱动，为未来进一步发掘拓扑材料在新型磁性功能材料中的应用提供

了理论和实验依据，在实际磁存储及逻辑器件的产业化应用中也具有重要潜力。

## D12-32

### 利用多晶重金属的自旋霍尔效应产生垂直极化自旋流

刘前标\*

中国科学院半导体研究所

高效率操控垂直磁各向异性材料对发展低功耗、快速、高密度的磁随机存储器具有重要意义，然而传统自旋霍尔效应等产生的横向极化自旋(y spin)需要面内磁场辅助才能翻转垂直磁矩。垂直极化自旋(z spin)可在无外磁场的情况下翻转垂直磁矩，因此寻找 z spin 成为目前自旋电子学的研究热点之一。

目前垂直自旋的产生主要局限于磁性或晶体对称性破缺的单晶材料，这些单晶材料难与半导体集成工艺兼容。本工作中，我们突破单晶材料的限制，提出了一种普适地产生垂直自旋的新方案，即通过非均匀电场打破重金属薄膜的横向 ( $\mathcal{M}_{xz}$ ) 和垂直镜面 ( $\mathcal{M}_{xy}$ ) 对称性，再通过自旋霍尔效应产生垂直自旋。通过改变器件的长度、宽度、厚度、以及重金属种类，我们可以显著地调控垂直自旋的大小。利用该方案产生的垂直自旋，我们在无外场下实现 Ta/FeCoB ( $H_C=200$  Oe) 垂直磁矩低电流、近完全的翻转。此外，该方法有望集成到目前的 SOT-MRAM 器件中，实现无外场、低功耗、高密度存储。

## D12-33

### Discovery of Unconventional Scaling in Orbital Hall Effect for Energy-Efficient Spintronics

Xuan Zheng<sup>1</sup>, Siyang Peng<sup>1</sup>, Zhiming Wang<sup>\*1</sup>, Runwei Li<sup>1,2</sup>

1. Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Science

2. Eastern Institute of Technology, Ningbo, 315200, China

Orbital torque has recently emerged as a promising approach for electrically controlling magnetization in spintronic devices. However, unraveling the underlying mechanisms governing the orbital Hall effect (OHE), especially extrinsic scattering's role in its scaling with conductivity ( $\sigma_{xx}$ ), is crucial for realizing the full potential of orbital torque in energy-efficient spintronic devices. Using SrRuO<sub>3</sub> (SRO) as a model system, we discover an unconventional scaling of orbital Hall conductivity ( $\sigma_{OH}$ ) with tunable  $\sigma_{xx}$ . Systematically  $\sigma_{xx}$  tuning reveals remains constant at high  $\sigma_{xx}$  but strikingly enhances as  $\sigma_{xx}$  decreases, contrasting with spin Hall effect suppression at low  $\sigma_{xx}$ . This behavior underscores the Dyakonov-Perel-like orbital relaxation mechanism as key to unconventional OHE. Leveraging this scaling, we achieve enhanced orbital torque via concurrent increases in orbital Hall conductivity and orbital Hall angle, demonstrating 3-fold power reduction in spin-orbit torque switching with moderate  $\sigma_{xx}$  reduction. Our work highlights the dominant role of extrinsic disorder scattering in unconventional OHE and establishes a transformative paradigm for energy-efficient spintronics.

## D12-34

### 各向异性的层间 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用及其对磁矩翻转的影响研究

賁吉军<sup>\*1</sup>、席力<sup>2</sup>

1. 西北工业大学

2. 兰州大学

在自旋电子学存储研究中，人工反铁磁结构因其低杂散场特性和高热稳定性，相较于传统铁磁体系展现出显著的高密度存储优势。近年来研究表明，在人工反铁磁结构中除了海森堡相互作用、RKKY 相互作用及界面 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI) 外，还存在一种间接的不对称相互作用，即层间 DMI。研究层间 DMI 的特性及其潜在应用，对于推动自旋电子学领域基础研究的发展以及人工反铁磁材料的实际应用均具有重要意义。本研究采用电流诱导的磁滞回线偏移方法定量测量了 Pt/Co/Pt/Ru/Pt/Co/Ta 多层膜

体系的层间 DMI 强度，实验结果表明层间 DMI 具有各向异性的特征，并且其强度与间隔层 Ru 的厚度密切相关。第一性原理计算的结果进一步揭示各向异性的层间 DMI 起源于面内原子分布高对称方向的对称性破缺。之后我们研究了层间 DMI 对自旋轨道力矩翻转磁矩的影响，结果表明层间 DMI 会引起磁矩翻转的不对称性，在此基础上可以实现五种不同的逻辑功能 (AND, NAND, OR, NOR, NOT)。此外，理论模拟的结果进一步表明，各向异性 DMI 不仅会破坏磁化翻转对称性，还可以通过缩短翻转时间来提高磁矩翻转效率。我们的研究不仅加深了对层间 DMI 的理解，而且为设计基于层间 DMI 的自旋电子器件提供了重要的理论依据。

## D12-35

### 交错磁 RuO<sub>2</sub>薄膜的可控制备和电学物性研究

董怡娜、许诗琪、张春盼、韩俊峰\*

北京理工大学

二氧化钌 (RuO<sub>2</sub>) 作为一种新型的交错磁材料，其高导电性与交错反铁磁序的共存特性，为自旋电子器件开发提供了潜在材料基础。但关于它的交错磁性还存在争议，高品质的制备该材料是研究其电磁物性的关键。本研究采用磁控溅射技术在 Si (100) 衬底上制备 RuO<sub>2</sub> 薄膜，通过优化氩氧比和生长温度实现物性调控。实验发现，通过改变氧分压，可以实现载流子类型从电子主导转变为空穴主导，打破了 RuO<sub>2</sub> 体材料中 N 型载流子主导的固有认知。X 射线光电子能谱与拉曼分析表明，该转变可能源于氧空位浓度变化引起的能带结构畸变或缺陷能级变化。X 射线衍射和原子力显微表征显示，薄膜存在温度诱导的晶向转变和表面形貌演化。此外，在 2 K 低温下，还观测到弱反局域化效应，揭示了自旋轨道耦合主导的量子干涉效应。该研究发现 RuO<sub>2</sub> 为罕见的 p 型金属氧化物实例，不仅为其磁性的争议提供了一种解释的方案，还为自旋电子学器件设计提供了一种全新的 p 型材料。

## D12-36

### 低维量子铁磁材料与器件

王勇\*

西安电子科技大学

汇报人于南京大学固体微结构物理国家重点实验室获得理学博士学位，师从自旋电子学专家都有为院士；随后入选西安电子科技大学“华山学者人才”计划并加入郝跃院士团队。过去长期聚焦后摩尔时代计算与存储的关键问题，针对芯片高算力、低功耗等核心需求开展材料、器件和信息交互传感的多层次创新工作，在“新型室温量子铁磁材料及自旋器件”等方面做出了系列原创贡献。已在 Nature (三作)、Science Advances 等主流期刊发表学术论文 70 余篇，其中以第一及通讯作者在 Proceedings of the National Academy of Sciences-美国科学院院报、Advanced Materials、ACS Nano、Advanced Functional Materials、Nano Letters、Nano Research 等国内外主流期刊发表 30 余篇，H 因子 23，谷歌引用 1500 余次；参与编写教指委规划教材一部；申请/授权发明专利 10 余项；主持国家自然科学基金、国家重点研发计划子课题、陕西省高层次人才计划以及博士后科学基金等项目；入选国家博士后创新人才支持计划（导师：郝跃院士）、陕西省高层次人才青年人才计划、小米青年学者奖励计划。取得的主要创新性学术成果如下：

1、提出对高纯度半导体氮化碳 (≥99.999%) 进行多次高温热退火，进而引入高浓度的局域自旋，极大地提高了磁引入效率，从而实现了具有高饱和磁化度 ( $M_s=4.12 \text{ emu/g}$ ) 和高居里温度 ( $T_c=524.2 \text{ K}$ ) 的无金属强室温铁磁性，揭示了铁磁耦合机制为长程偶极-偶极相互作用，利用软 X 射线磁性圆二色测试首次证实了碳基氮化物材料的本征磁源为基面上引入的不饱和 -C=N 键和 N-C=N-H 键，解决了多年来学术界对碳基材料体系室温铁磁性的争议，相关成果发表于 ACS Nano 2021 (第一作者)、Nano Research 2024 (第一作者) 等，并以第一完成人申请 3 项专利 (CN 2024104696769; CN 2024115767077; CN 2024115767236)。在此基础上，提出对高纯度氮化碳利用氟化退氟技术进行微结构调控，实现了室温下  $M_s=18.7 \text{ emu/g}$ 、 $T_c=879.5 \text{ K}$  的无金属碳基铁磁材料关键性能指标，室温  $M_s$  和  $T_c$  两项核心指标均大幅突



破原有无金属材料的世界记录，相关技术发表于 *Advanced Materials* 2019（第一作者），并以第一完成人申请 1 项专利（CN2025103742196）。

2、针对本征层状铁磁材料居里温度低于室温、载流子迁移率低的瓶颈，实现了一种高性能层状室温铁磁（ $T_C=320\text{ K}$ ）铬碲碲（CIT）。该材料室温  $M_s$  高达  $52.3\text{ emu/g}$ 。此外，CIT 还表现出强的磁热效应，5 T 下的最大磁熵变高达  $3.26\text{ J/kg K}$ ，并以第一完成人申请 3 项专利（CN 2024104698586；CN 2024105071172；CN 2025101730832）；实现了高迁移率（ $473\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ ）的铬硫氯范德华铁磁半导体材料，相关成果发表于 *ACS Materials Letters* 2025（第一作者）；发掘了室温本征铁磁硼化物材料，其中，硼化锰室温下的  $M_s$  高达  $15.5\text{ emu/g}$ ， $T_C$  更是达到了  $585.9\text{ K}$ ，揭示了单层  $\text{MnB}$  的本征磁性来源。另外，硼化铁的  $T_C$  也能够达到  $500.4\text{ K}$ ，室温下的  $M_s$  高达  $65.3\text{ emu/g}$ ，并在离子凝胶中首次实现类巨磁阻效应，开发出可拓展、自愈合的人工突触磁存储智能传感阵列与磁响应远程虚拟现实触觉传感器。

## D12-37

### Spin wave mediated quantum corrections in epitaxial antiferromagnetic $\text{Cr}_2\text{Al}$ films

Peng Chen, Cunxu Gao\*

Lanzhou University

Although quantum corrections (e.g., weak localization and electron-electron interaction) due to disorder, coherence, and interactions have been intensively studied for decades, understanding the magnon-electron interaction effect on quantum transport properties in magnetic systems still remains a challenge. Thus, the role of spin waves in the quantum transport of magnetic materials has not yet been fully understood. Driven by the miniaturization of spintronics devices possibly moving forward to quantum transport dimensions, in this work, we investigate spin wave mediated quantum transport in epitaxial antiferromagnetic  $\text{Cr}_2\text{Al}$  films. Temperature( $T$ )-dependent conductance measurements reveal an additional linear  $T$  contribution in the low-temperature range ( $T < 30\text{ K}$ ), which can be ascribed to the spin wave mediated electron-electron interactions in antiferromagnets. Brillouin light scattering confirms an antiferromagnetic resonance at near  $80\text{ GHz}$ , consistent with the spin-flop field  $H_{\text{SF}} \propto 30\text{ kOe}$  derived from magnetoresistance measurements. Furthermore, the anomalous Hall effect in  $2\text{ nm}$   $\text{Cr}_2\text{Al}$  films exhibits  $G_{\text{AH}} \propto \ln T$  and  $G_{\text{AH}} \propto G_{xx}^{0.9}$  ( $T < 100\text{ K}$ ), indicating that electron-electron Coulomb interactions contribute to the anomalous Hall effect through the extrinsic skew scattering mechanism, while the spin wave mediated electron-electron interactions show no contribution. These results provide critical insights into the effect of spin waves on the quantum transport properties of magnetic materials.

## D12-38

### 数字化集成技术在稀土永磁行业的应用与展望

常颖\*

大连理工大学

数字化仿真技术在稀土永磁制备行业中的应用主要表现在以下几个方面：能够缩短产品研发周期、提升生产效率、避免大量试错；在制备方面，尤其是装备、模具设计方面，起到事半功倍的效果；在服役性能预测方面，能够实现加载、温度等条件下器件开裂的多尺度演变可视化特征；从而得到系列最优的成分和工艺设计方案。

本报告联合多家头部稀土永磁生产企业，依托于实际产线装备，针对稀土永磁速凝-冷却-破碎工艺，分别基于热-流-固多物理场耦合的流体力学和凝固行为以及离散元理论，利于有限元联合仿真策略，系统开展了稀土永磁合金的熔炼温度、倾倒角度、冷却辊转速、辊面粗糙度、冷却水道设计，以及气流磨装备等工艺参数和结构特征对磁粉颗粒的微观组织形貌、磁性能、粒度分布和生产效率的影响机制研究，并通过机器学习，圆满完成了速凝工艺生产效率提升 15%，气流磨出粉效率提升 40%，气流磨的磨粉过程中每

吨磁粉成本降低 20-25%的目标，为稀土永磁行业的材料参数库建立提供了前期数据支持，也为行业迈向数值化、智能化方向奠定了前期基础。

## D12-39

### 磁斯格明子应变调控

侯志鹏\*

华南师范大学

应变工程调控对开发低能耗斯格明子自旋电子学器件具有重要意义。然而，传统的应变施加通常低于 0.5%，这限制了对斯格明子在显著应变下独特性质的探索。此外，虽然已知单轴应变会各向异性地改变磁相互作用，但其对斯格明子的具体影响尚未得到充分研究。在此，我们将斯格明子的多层膜与柔性液晶薄膜相结合，实现了通过高达 1% 的光致单轴应变诱导的、可逆的多步斯格明子相变过程。我们的结果表明，斯格明子相变对应变大小和方向均非常敏感。具体而言，当施加低于 0.6% 的应变且方向平行于条状磁畴时，这些条状磁畴会转变为圆形斯格明子。当应变超过 0.6% 时，这些斯格明子会垂直于应变方向伸长，表现出显著的负泊松比效应，在 0.8% 应变下变形程度可放大至 40%。进一步的应变会破坏斯格明子的拓扑结构，最终使其恢复为条状磁畴。微磁模拟揭示，这些奇特现象源于应变诱导的 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用（DMI）的各向异性调制。我们的发现为斯格明子操控引入了一种新颖的组合：柔性基底、远程光激活以及显著的单轴应变。这为利用光致伸缩-磁弹性耦合和拓扑磁系统中 DMI 的各向异性调控来设计低功耗、多态的自旋电子学器件提供了一种前景广阔的策略。

## D12-40

### 三维拓扑磁结构构筑及其应用

汤进\*

安徽大学

在经典物理模型中，对斯格明子等拓扑磁结构的描述为二维空间中自旋的漩涡状排布。而真实的磁性材料具有厚度维度，使二维拓扑磁结构扩展为三维管状结构。在最简单的构造中，这些二维结构沿厚度方向延伸成管，保持沿轴向的平移不变性，可用经典的二维磁结构模型来描述。然而，在磁性薄膜材料中，厚度方向的对称性破缺会影响磁相互作用，从而导致在厚度方向可能存在自旋调制和磁表面态。三维拓扑磁表面态会和自旋极化电子、磁振子等作用影响层展电磁场，带来新颖的拓扑磁电性质。因此，亟须完善拓扑磁结构的三维模型与理论，进而利用厚度维度来丰富拓扑磁结构家族。

我们在不同材料体系中理论预测并实验构筑了新型三维拓扑磁结构，并基于三维拓扑磁结构特性，开发了拓扑磁结构调控方法。

## D12-41

### 非传统磁体体积效应的 ErCoFe 磁体中零膨胀效应研究

许家旺，沈保根，王守国，\*

安徽大学

零膨胀（ZTE）合金因其卓越的尺寸稳定性，在现代精密工业领域（包括望远镜制造、卫星技术与半导体生产）具有关键需求。本此报告的研究是在  $\text{ErCo}_{2.8}\text{Fe}_{0.2}$  磁体中发现了高性能 ZTE，其在 10–220 K 的宽温区内表现出极低的热膨胀系数  $\alpha_v = 2.7 \text{ ppm K}^{-1}$ 。通过 Er 原子中独特的亚晶格磁体效应，铁取代的  $\text{ErCo}_{3-x}\text{Fe}_x$  磁体中的负热膨胀行为可被精准调控为高性能 ZTE 特性。此外，洛伦兹透射电子显微镜直接观测到磁化主导权从 Er 亚晶格向 Co/Fe 亚晶格转变的过程，进一步阐明了高性能 ZTE 背后的调控机制。本研究提出了一种便捷有效的策略来优化 Er-Co-Fe 磁体的热膨胀特性，为未来研究提供了重要指导——通过利用此类体系中磁性能与晶体结构的强关联性，可进一步拓展磁性材料的应用范围。

## 参考文献

- [1] J.W. Xu, B.G. Shen, S.G. Wang, et al, Adv. Funct. Mater. 2025, 35, 2416314.  
[2] J.W. Xu, S.G. Wang, Y. Zhang, B.G. Shen, et al, Adv. Mater. 2023, 35, 2208635.

## D12-42

## 反对称交换耦合力矩的全电场操控

于东星\*

兰州大学

**摘要：**信息单元读写的高效操控是自旋电子学的前沿研究方向。报告人团队围绕超低功耗磁信息操控开展了全电场自旋力矩研究，在基于反对称交换耦合力矩的全电场磁翻转操控与新型自旋电子器件设计领域取得了重要进展。报告人团队发现，作为一种倾向于使两个自旋互相垂直排列的反对称交换耦合，Dzyaloshinskii-Moriya (DM)相互作用不仅是磁斯格明子、手性磁畴壁等磁结构产生与稳定的重要因素，还能在磁电多铁材料中通过电场调制产生反对称交换耦合力矩，实现面内磁<sup>[1]</sup>和垂直磁<sup>[2]</sup>翻转。与需要借助电流传递自旋角动量的机制不同，报告人团队预测这种特殊的磁操控机制不需要电流参与，只需以磁斯格明子等拓扑磁结构作为自旋角动量传递和转移的载体，产生反对称交换耦合力矩以驱动全电场磁翻转。此次报告将围绕我们在全电场磁操控领域的最新研究进展<sup>[1-3]</sup>，详细介绍反对称交换耦合力矩在驱动垂直磁和面内磁翻转方面的潜能，预测其在现代自旋电子技术中的应用前景。

**报告人简介：**于东星，兰州大学物理科学与技术学院研究员。2020 年于兰州大学获理论物理学博士学位；2020 年至 2023 年在宁波材料技术与工程研究所从事博士后工作；2023 年至今，兰州大学物理科学与技术学院研究员。研究方向主要为自旋电子学理论和器件。所研究的反对称交换耦合力矩、单纳米赛道逻辑门为解决全电场磁操控问题、逻辑门完备性重构问题提供了新思路。相关成果得到包括诺贝尔物理学奖得主 Albert Fert 教授等的高度评价，并以第一作者发表在 Physical Review Letters (2 篇)、National Science Review 等国际顶级学术期刊上。主持了包括国家自然科学基金(面上及青年)、中国博士后科学基金(面上及特别资助)在内的多项国家级项目。

## 参考文献

- [1] Dongxing Yu, Yonglong Ga, Peng Li, Jiawei Jiang, Jinghua Liang, Liming Wang, Chenglong Jia\*, Kai Chang†, Hongxin Yang‡, Voltage-Controlled Bimeron-Torques Switching of In-plane Magnetization, Phys. Rev. Lett. 133, 206701 (2024).  
[2] Dongxing Yu, Yonglong Ga, Jinghua Liang, Chenglong Jia\*, and Hongxin Yang†, Voltage-Controlled Dzyaloshinskii-Moriya Interaction Torque Switching of Perpendicular Magnetization, Phys. Rev. Lett. 130, 056701 (2023).  
[3] Dongxing Yu, Hongxin Yang\*, Mairbek Chshiev, and Albert Fert, Skyrmions-based logic gates in one single nanotrack completely reconstructed via chirality barrier, Natl. Sci. Rev. 9, nwac021 (2022).

## D12-43

## Topological spin textures and spin excitation in strongly correlated oxides

Yuelin Zhang\*

Beijing Normal University

Manganite oxide  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  (LSMO) is a half-metallic ferromagnet with a Curie temperature of about 380 K, low magnetic damping and efficient spin-wave propagation. It has also attracted a lot of attention and demonstrates the multiple functionalities for potential application in spintronics and magnonics.

At the beginning of this talk, I will briefly introduce previous progress, including current-controlled propagation of spin waves <sup>[1]</sup>, artificial symmetry designing of strain-driven DM interaction with coexisting frequency nonreciprocities of spin-wave <sup>[2]</sup>, nonlinear scattering <sup>[3]</sup>, magnon-polarons in multiferroic

heterostructures and so on. Then, I will mainly present the exploration of switchable and long-distance propagation of chiral magnonic edge state in quasi-antiferromagnetic spin textures<sup>[4]</sup>. We artificially engineer magnetic damping and spin spirals of strongly correlated oxide LSMO, by designing its electronic bands and spin structures simultaneously. The coexistence of such a quasi-AFM spin texture with low magnetic damping made it possible for us to probe the spin-wave propagation through LSMO films between two integrated coplanar waveguides. We observed long-distance propagation of spin waves in spirals, associated with the optical mode of the quasi-AFM spin texture. The antiferromagnetically coupled spin spirals provide a strong dynamic dipolar interaction, which drive the strong coupling between optical magnons and domain-wall magnons. The micromagnetic simulation indicates that such a hybridized spin wave highly localizes and chirally propagates along the edge of nanochannel over long distance, i.e., chiral magnonic edge state. The observed hybridized magnons with a robust chirality can be reversibly and selectively switched on/off under external field.

[1] C. Liu. et al., Nat. Nanotechnol. 14, 691–697 (2019)

[2] Y. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. 127, 117204 (2021)

[3] Y. Zhang et al., Chin. Phys. B 32, 107505 (2023)

[4] Y. Zhang et al., Nat. Mater. 24, 69–75 (2025)

#### D12-44

##### 四方结构人工磁体冰中畴壁的动态演化机制

涂黎明<sup>1</sup>、刘行健<sup>1</sup>、葛军饴<sup>\*1,2</sup>

1. 材料基因组工程研究院，上海大学

2. 上海市高温超导重点实验室，上海大学

人工自旋冰是基于纳米磁体设计的周期性阵列，是当前研究结构阻挫以及集体物理行为的重要平台。然而纳米磁体间较弱的相互作用以及体系中存在的大量拓扑缺陷限制了该体系深入研究，尤其是基态磁结构以及动力学演化等行为。我们提出了一种基于宏观尺度磁体设计的新型人工自旋冰系统，因其支持直接光学观测和精准外部调控的优势，成为研究结构阻挫的理想实验平台。本研究通过以四方结构人工磁体冰为例研究了不同磁结构的生长过程，并通过施加外部磁场对其调控，揭示了畴壁的动态演化规律。研究发现畴壁从点缺陷逐步扩展为长程拓扑链缺陷，其动力学受偶极相互作用和几何阻挫协同调控；畴壁断裂会激发磁单极子-反单极子对的产生，促使畴壁持续扩散至晶格边界以减少系统内部缺陷，而当畴壁扩散过程受基态晶格阻碍时，会沿基态晶格边界延伸直至终止于晶格边界。这些发现揭示了人工自旋冰中畴壁演化的基本规律。

#### D12-45

##### Neuromorphic computing based on skyrmions in two-dimensional van der Waals ferromagnets Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>

Yuejie Zhang<sup>1</sup> Peng Li<sup>2\*</sup>

1. Corporate Research Center, Midea Group, Foshan 528311, China

2. School of Microelectronics, University of Science and Technology of China, Hefei, China

Magnetic skyrmions offer a pathway to low-power, high-density spintronic devices, yet their practical realization at room temperature in two-dimensional van der Waals ferromagnets remains underexplored. Here, we investigate skyrmion nucleation, control and readout in Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> flakes, a 2D magnet with a Curie temperature above 350 K and strong perpendicular anisotropy. We demonstrate that skyrmion formation and stability depend sensitively on flake thickness. Spin-orbit torques generated by platinum contacts stretch isolated skyrmions into elongated stripe domains and drive domain-wall propagation under current pulses of order  $10^6$  A cm<sup>-2</sup>. Micromagnetic simulations reproduce the observed dynamics and clarify the underlying mechanism. Real-time electrical detection of the skyrmion–stripe transition is achieved via anomalous Hall resistance, which we exploit

to implement a multiply-accumulate convolutional neural network that reaches 92% accuracy in handwritten-digit recognition. Our results establish  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  as a versatile platform for room-temperature, neuromorphic and racetrack spintronic applications.

## D12-46

### 低功耗自旋电子学器件

王飞\*

山西师范大学

自旋轨道转矩是近年来发展起来的新一代电流驱动磁化翻转技术，具备信息写入速度快、功耗低、耐久度高、稳定性好等特点，因此成为未来非易失性磁存储器的理想选择之一。自旋轨道转矩器件走向实际应用的关键是探索一种自旋源材料，该材料既能够产生垂直极化的自旋流，又具备高自旋霍尔电导率。目前，可以产生垂直极化自旋流的材料通常具有较低的自旋霍尔电导率 ( $< 8 \times 10^3 (\hbar/2e)(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ )，当与铁磁层形成异质结时，导致铁磁层分流效应显著，进而增加器件的功耗。为了实现对垂直磁化铁磁层的全电学、低功耗操控，我们采用机械剥离方法制备了  $\text{TaIrTe}_4$  纳米片，研究发现该材料不仅能够实现对垂直磁化铁磁层全电学操控，而且表现出较高的面内自旋霍尔电导率，达到了  $5.44 \times 10^4 (\hbar/2e)(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$  [1]。此外，我们利用分子束外延技术制备了圆晶尺寸的  $\text{WTe}_2$ ，并与高自旋霍尔电导率的  $\text{PtTe}_2$  形成范德瓦尔斯异质结[2]。研究表明， $\text{PtTe}_2/\text{WTe}_2$  双层膜具有迄今为止最高的面内 ( $2.32 \times 10^5 (\hbar/2e)(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ) 和面外 ( $0.25 \times 10^5 (\hbar/2e)(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ) 自旋霍尔电导率，并且在翻转垂直磁化  $\text{CoFeB}$  层时功耗比使用  $\text{WTe}_2$  单层低了 33 倍。更为重要的是，我们发现  $\text{PtTe}_2$  中产生的面内极化的自旋流可以在  $\text{WTe}_2$  层中转变为面外极化的自旋流，实现了自旋到自旋的转换。我们还将高性能的  $\text{PtTe}_2/\text{WTe}_2$  双层膜应用于磁振子器件中，通过磁振子转矩成功实现了垂直磁化铁磁层的全电学、低功耗操控[3]。最后，在室温下，我们在 (001)取向的低晶体对称性材料  $\text{SnTe}$  中观察到巨大的非线性霍尔效应，实现了从 23 MHz 到 1 THz 的零偏压超宽带整流，并且能够在低至 -60 dBm 的超低输入功率水平下工作，覆盖多种无线电频率[4]。

## D12-47

### 新型自旋材料/磁性异质结中的 DMI、自旋转矩和轨道转矩研究

王译\*

大连理工大学

在磁随机存取存储器 (MRAM) 等现代自旋电子学应用中，磁矩操控方式以及在各种相互作用下的磁矩翻转是重要的研究内容。科研人员先后发现了自旋转矩效应，如自旋转移力矩效应 (STT)、自旋轨道转矩效应 (SOT) 和磁子转矩效应 (Magnon torque, MT)，以及新兴的轨道转矩效应 (Orbital torque, OT)。同时 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI) 在自旋轨道转矩 (SOT) 驱动的磁化翻转以及手性畴壁运动中起着重要作用，DMI 能够稳定诸如磁性斯格明子和手性畴壁等非平凡的拓扑磁性结构。在存在 DMI 的情况下，磁性动力学及磁矩翻转过程研究对于新型自旋电子学器件开发具有重要意义。

我们聚焦于基于新型自旋材料 (拓扑材料 BST、金属氧化物  $\text{WO}_3$  等) 的磁性异质结材料体系中磁矩翻转机制和 DMI 相互作用研究。分别观察到了明显的 DMI 以及左手性 Néel 型磁畴壁。DMI 显著影响手性畴壁的运动行为，其 DMI 系数约  $97 \mu\text{J}/\text{m}^2$ ，与基于传统重金属的器件中观察到的数值相当。我们在存在 DMI 的情况下，成功实现了 3d 铁磁性  $\text{CoFeB}$  的高效垂直磁矩翻转，翻转电流密度低至  $1.36 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$ ，比传统重金属体系低约两个数量级，与 MBE 生长的 BST 拓扑绝缘体相当。另外，我们在发现  $\text{WO}_3$  氧化物的轨道霍尔电导率比自旋霍尔电导率高出两个数量级。利用显著的 SOT 和 OT，在  $\text{WO}_3$  磁性异质结中实现了垂直磁矩翻转，其中有效的 OT 占有有效转矩的 50% 以上。

## D12-48

## 低损耗微波磁介电材料及电磁特性调控研究

孙启帆\*、邬传健、孙科、蒋晓娜、余忠、兰中文  
电子科技大学

基于高介电常数材料的微波器件小型化技术往往存在电容性强、带宽窄、阻抗匹配困难等缺点。与高介电常数材料相比，磁介电材料具有大于 1 的相对磁导率和介电常数，其较小的电容性和较低的电磁能量密度可有效兼顾小型化和宽频化。此外，磁特性的引入拓展了材料的电磁可调维度，使材料的特征阻抗与环境更为接近，降低了阻抗匹配难度。然而受磁导率自然共振频率限制，传统低损耗磁介电材料通常在特高频（UHF）以下的频率范围使用。因此，急需开发磁导率和介电常数可调、低磁损耗和介电损耗、高截止频率的磁介电材料。

采用具有平面磁晶各向异性的六角铁氧体材料，通过  $\text{SrTiO}_3$  掺杂，使得  $\text{Sr}^{2+}$  取代  $\text{Ba}^{2+}$  离子，实现材料高频磁导率提升；过量的  $\text{SrTiO}_3$  富集于晶界，形成高介电壳层，可有效提高介电常数。 $\text{SrTiO}_3$  掺杂的平面六角铁氧体材料具有磁导率和介电常数在 7~12 的范围可调，且保持磁损耗角正切小于 0.1，介质损耗角正切小于 0.01，特征阻抗与空气阻抗差异小于 10%。

在另一项工作中制备了一种新型六角铁氧体磁介电材料——18H 六角铁氧体，并研究了其微波磁介电性能。 $\text{Mg-Zn}$  掺杂的 18H 六角铁氧体表现出很强的磁导率自然共振，共振频率高达 5GHz，并具有 0.1-0.2 的磁谱阻尼系数和 486-660Oe 的亚铁磁共振线宽。由于极低的磁谱阻尼系数， $\text{Mg-Zn}$  18H 六角铁氧体具有低至 0.06 的优异磁损耗角正切以及小于 0.006 的介质损耗角正切。通过改变配方中 Mg 与 Zn 的原子比，这种低损耗特性可覆盖 2-4GHz 的频率范围，且磁介电特性优于迄今为止报道的 S 频段微波铁氧体。

## D12-49

Fe 和 Cu 原子迁移在 2:17 型  $\text{Sm-Co-Fe-Cu-Zr}$  永磁体氧化机制和磁损耗中的作用

柴康洁、张勇、李志明\*  
中南大学材料科学与工程学院

氧化所引起的不可逆磁性能损耗是  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁体中一个至关重要的问题。在此，我们系统地揭示了两种代表性磁体的氧化机制及其对应的磁性能损耗，即一种高磁能积磁体（铁含量相对较高、铜含量较低，工作温度低于 350℃，称为 HE 磁体）和一种耐高温磁体（铁含量较低、铜含量较高，工作温度低于 500℃，称为 HT 磁体）。研究发现， $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁体的氧化行为呈现阶梯性特征。在氧化第 I 阶段时（氧化时间 $\leq 60$  h），氧驱动 Cu 原子从 1:5H 胞壁相向 2:17R 基体相迁移，引发胞壁相的优先氧化。其中，相较于 HE 磁体，HT 磁体因其高 Cu 低 Fe 含量表现出更为剧烈 Fe 和 Cu 原子迁移，导致磁体中沿 1:5H 胞壁相的优先氧化行为更加显著，进而引起愈发剧烈的相组织损坏以及更高的磁性能损耗。然而，在氧化第 II 阶段时（氧化时间 $\geq 60$  h），Fe 和 Cu 原子在磁体中的迁移显著提高了 2:17R 基体相的氧势能，从而有效改善了基体相的抗氧化性，延缓了磁体的氧化进程。其中，HT 磁体的氧化依旧优先沿 1:5H 胞壁相发生，而在 HE 磁体中，2:17R、1:5H 和 1:3R 相同时分解氧化。因此 HT 磁体表现出更为完整的胞状结构和更低的磁损耗。我们的研究深入揭示了  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型磁体的成分依赖性氧化现象，这或许对设计开发具有优异耐氧化以及磁性能的磁体具有重要指导意义。

## D12-50

 $\text{LaMn}_2\text{Ge}_2$  单晶合金的磁畴调控

陈一冲<sup>1</sup>、李斐<sup>2</sup>、靳帅滔<sup>1</sup>、刘宇佳<sup>1</sup>、聂浩<sup>2</sup>、张浩宇<sup>2</sup>、张伦勇<sup>2</sup>、王学云\*<sup>1</sup>

1. 北京理工大学
2. 哈尔滨工业大学

具有拓扑结构的磁畴，如磁涡旋、磁泡和斯格明子，对于开发下一代存储器件具有重要价值和发展潜

力。近期，在一系列具有 Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) 相互作用的稀土基磁体中观测到了这类自旋织构，从而引发了新一轮的研究热潮。其中，具有高居里温度和强磁各向异性的  $\text{LaMn}_2\text{Ge}_2$  为研究这些磁结构提供了理想平台。本文利用磁力显微镜(MFM)成像技术研究了  $\text{LaMn}_2\text{Ge}_2$  块体单晶的磁畴结构。在不同磁场和温度条件下，观测到了多种磁畴图案，如条纹畴、迷宫结构以及斯格明子气泡。更有趣的是，通过场冷却 (FC) 处理，成功诱导出了具有精细结构的有序气泡状磁畴。本研究对  $\text{LaMn}_2\text{Ge}_2$  合金中多样的本征磁畴进行了详细探究，为探索其磁电性能与微观结构之间的关系建立了研究平台。

## D12-51

### 具有优异应变稳定性的柔性交换偏置薄膜

包锡来<sup>1</sup>、杨华礼<sup>1</sup>、谢亚丽<sup>1</sup>、Denys Makarov<sup>2</sup>、李润伟\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

柔性自旋电子器件，可应用于智能纺织品、软机器人、电子皮肤等诸多领域，已发展成为连接现实世界和数字世界的主要纽带。此外，包括磁场传感器、非易失性存储器和逻辑器件在内的自旋电子器件都依赖于交换偏置效应。然而，由于交换偏置场在机械应变下的稳定性尚未得到研究，制约了柔性自旋器件的发展。

在这项工作中，我们在 50 微米厚的聚酰亚胺 (PI) 柔性衬底上制备了具有强垂直各向异性 (PMA) 和较大垂直交换偏置场 ( $H_{\text{PEB}}$ ) 的柔性  $\text{IrMn}/[\text{Co}/\text{Pt}]_3$  多层。通过自行设计的拉伸模具对样品施加单轴拉伸应变。使用 SAXS 对样品的结构进行拉伸下的表征，我们证实 3% 拉伸应变是磁性多层膜发生弹性变形的应变极。通过对样品施加拉伸应变，我们观察到  $H_{\text{PEB}}$  随之减小。此外，本工作揭示了通过合理设计具有特性结构和磁性能的柔性  $\text{IrMn}/[\text{Co}/\text{Pt}]_3$  薄膜，可以极大抑制应变对交换偏置场的影响。针对本工作制备的磁性薄膜，可以通过增强垂直各向异性、降低结晶度以及降低铁磁/反铁磁界面交换耦合能，极大地降低垂直交换偏置场在应变下的下降趋势。本工作提出的柔性交换偏置结构，在已报道的柔性系统中具有最优异的交换偏置场的应变稳定。这种优异的应变稳定性来源于应变下稳定的铁磁磁矩、较低的应变传递效率以及通过调控界面消除的应变驱动的锻炼效应。

本工作得到的结论为开发具有出色应变稳定性的柔性自旋电子器件提供了有效方法，使其成为传感器和存储器件领域的有力竞争者。

## D12-52

### 平庸磁性异质结中垂直自旋和反常磁阻的物理起源

朱礼军\*

中国科学院半导体研究所

通过面内电荷流产生垂直极化自旋流，有望实现垂直各向异性自旋轨道矩存储和逻辑器件的高效全电翻转 [1]。然而，反演对称性不允许在自旋霍尔材料等均匀体系内部产生垂直自旋，人们通常只限于在原子结构或磁结构反演对称性破缺的单晶体系（如  $\text{WTe}_2$ 、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ 、 $\text{RuO}_2$  等）寻找垂直自旋的蛛丝马迹，限制了垂直自旋轨道矩器件的应用和片上集成。最近，我们提出了通过引入电场对称性破缺改变自旋霍尔电导垂直分量的新方法，在磁控溅射沉积的多晶重金属自旋霍尔器件中实现了垂直极化自旋流的高效产生 [2]。进一步研究发现垂直自旋起源于内禀自旋霍尔效应 (intrinsic Spin Hall effect)，其自旋轨道矩效应可以通过电场对称性破缺的程度和材料工程等实现大范围调控和增强。

关于磁矩在垂直电流平面旋转过程产生的反常磁阻 (unusual magnetoresistance, UMR) 的发现，对很多自旋电子学效应的理解和应用产生了巨大的影响。这类反常磁阻的机制通常被归结为自旋流受到的磁矩取向相关界面散射，因应不同的实验需求，引入了自旋霍尔磁电阻 (Spin Hall magnetoresistance)、Rashba 磁阻 (无明显自旋霍尔效应的体系)、轨道磁阻 (既无明显自旋霍尔效应也无明显自旋轨道耦合) 等一系列模型。寻找反常磁阻效应最本质的物理起源，为不同材料体系、不同外在表现的实验观测建立一个简单、

统一、普适的物理图像具有重要意义。本报告第二部分，我们将介绍在磁性单层金属薄膜中观测到的巨大 UMR 效应及其高阶效应和加和关系 (sum rule)。这一观测与最近王向荣等提出的双矢量磁阻模型 (two-vector UMR) 吻合，可通过磁矩和界面电场引起的电子散射理解，而无需涉及任何自旋流 [3]。通过系统文献数据复现，我们惊喜的发现现有文献中那些用以 claim 各种 SMR 以及其他与自旋流相关或无关的模型的实验数据的所有特征，均可以通过 two-vector UMR 模型完美解释，而无需考虑任何自旋流、Rashba 效应或轨道流。

参考文献：

- [1] L. Zhu, Adv. Mater. 2023, 35, 2300853.
- [2] Q. Liu, X. Lin, Z. Nie, G. Yu, L. Zhu, Adv. Mater. 2024, 36, 2406552.
- [3] L. Zhu, Q. Liu, X. Wang, arXiv:2410.23543.

## D12-53

### 大尺寸磁性二维薄膜的可控制备及物性调控研究

张晓倩\*

东南大学物理学院

近年来，二维磁性材料首次在实验上被证实其磁性可以在单原子层厚度仍然保留，使得基于二维材料构建异质结器件的独特优势能够应用到自旋电子学中，极大地促进了电子自旋在存储、通讯以及量子技术等方面的应用。虽然二维铁磁性已得到证实，但迄今为止报道的二维磁性材料大多是从块体剥离的微米级尺寸的薄片，二维磁性材料的大尺寸制备以及实现室温本征铁磁性对基础研究及应用来说是一个亟需解决的关键科学问题。我们重点围绕大尺寸磁性二维  $\text{CrTe}_2$  薄膜的分子束外延制备、磁各向异性、原子级磁性以及能带结构等方面展开系列研究工作。此外，我们将从制备异质结、在范德华间隙插层原子等角度，分别介绍近邻效应调控  $\text{CrTe}_2$  二维磁性、调控层间磁性交换耦合等方面的研究进展，为深入理解二维磁性的微观物理机制及探索新一代自旋电子器件的应用奠定基础。

参考文献：

- [1] X. Zhang et al., Adv. Mater., 37, 2411137 (2025)
- [2] X. Zhang et al., Adv. Mater., 36, 2311591 (2024)
- [3] X. Zhang, et al., Adv. Funct. Mater., 32, 2202977 (2022).
- [4] X. Zhang, et al., Nat. Commun., 12, 2492 (2021).
- [5] X. Zhang, et al., ACS Nano, 15, 15710 (2021).

## D12-54

### 高熵尖晶石铁氧体( $\text{Zn,Mn,Cr,Fe}$ ) $3\text{O}_4$ 纳米晶粉末的微观结构和磁学性能

兰颂\*<sup>1</sup>、曹军<sup>1</sup>、谭优<sup>1</sup>、夏金花<sup>1</sup>、廖海棠<sup>1</sup>、李萍<sup>1</sup>、桂奎<sup>2</sup>、廖新仁<sup>2</sup>

1. 重庆交通大学

2. 重庆上甲电子股份有限公司

直接法制备单相高熵氧化物，需借助高温热处理实现多主元的扩散互溶，但元素的高温扩散导致球磨粉末晶粒尺寸的显著增大。本文以  $\text{ZnO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  氧化物粉末为原材料，采用直接法和间接法固态制备成分为  $(\text{Zn}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{CrFe})\text{O}_4$  的高熵尖晶石铁氧体，研究了粉末样品的粒度分布、结构演变和磁学性能。间接法引入了尖晶石型前驱体，通过机械合金化分步实现各元素在尖晶石结构中同一亚晶格的占位互溶。与直接法相比，间接法有效避开了高温热处理，从而获得纳米晶粒尺寸 ( $\sim 11\text{nm}$ ) 的高熵铁氧体粉末，但存在大量的菱方结构  $(\text{Fe,Cr,Mn,Zn})_2\text{O}_3$  第二相 (体积含量  $\sim 40\%$ )。  $(\text{Zn}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{CrFe})\text{O}_4$  高熵尖晶石铁氧体为亚铁磁性，具有较低的磁化强度。在  $400\text{ kA/m}$  的外加磁场下，直接法和间接法粉末样品的磁化强度分别为  $2.7\text{ A m}^2/\text{kg}$  和  $2.8\text{ A m}^2/\text{kg}$ ，矫顽力分别约为  $2050\text{ A/m}$  和  $1740\text{ A/m}$ 。本研究表明，基于间隙位置元素占位的间接法是一种固态制备高熵氧化物纳米晶结构的有效途径，但仍需优化工艺抑制第二相的生成。



## D12-55

## 新型磁性纳米体系的构建及在肝癌磁热疗中机制的研究

张琳雪、李启帆、邬传健、蒋晓娜、余忠、兰中文、孙科\*

电子科技大学材料与能源学院

超顺磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒因其优异的磁热转换性能、生物相容性和多模态诊疗潜力，在生物医学领域备受关注，尤其在肿瘤高温消融、磁共振成像和靶向治疗中具有重要应用价值。然而，肝癌的复杂致病机制和现有治疗药物的局限性，亟需开发新型纳米材料策略。磁热疗（MHT）作为一种非侵入性、高选择性的治疗手段，为肝癌治疗提供了新思路，而纳米颗粒的尺寸是调控其磁学性能、生物分布及治疗效率的关键参数。本研究通过合成不同尺寸的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒（4.0~13.5 nm），系统评估了其在肝癌细胞中的尺寸依赖性生物行为。探索出适用于体外高温消融和体内肿瘤生长抑制的纳米颗粒尺寸，并进一步深入探索肝癌的治疗。我们首次报道了一种基于磁性水凝胶结构的可注射热消融 mPEG-b-PLV- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性水凝胶在 MHT 中的应用。该磁性水凝胶在磁场作用下将多功能纳米材料整合到热响应水凝胶中，在肝癌细胞中引发了近乎 100% 的细胞死亡，并在其他癌细胞中也产生了类似的广泛死亡效应。基于体外和体内研究的证据，我们证明了在磁场作用下 mPEG-b-PLV- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性水凝胶通过诱导大量活性氧积累、严重脂质过氧化和线粒体损伤，共同触发了铁死亡、自噬和细胞凋亡这三重细胞死亡效应。此外，本工作揭示了在磁场作用下的 mPEG-b-PLV- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性水凝胶通过抑制 SLC7A11 表达重新编程了半胱氨酸-谷胱甘肽代谢，加剧了氧化还原失衡并抑制了细胞存活。研究表明，在磁场作用下，mPEG-b-PLV- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性水凝胶通过靶向 SLC7A11-半胱氨酸-谷胱甘肽轴，有望成为一种癌症治疗的新策略。

## D12-56

## 碳磁离子学：电压驱动碳输运调控磁性

谭政伟<sup>\*1</sup>、Jordi Sort<sup>2</sup>、Enric Menéndez<sup>2</sup>

1. 复旦大学义乌研究院

2. Universitat Autònoma de Barcelona

Control of magnetism through voltage-driven ionic processes (i.e., magneto-ionics) holds potential for next-generation memory devices and computing. This stems from its non-volatility, flexibility in adjusting the magnitude and speed of magnetic modulation, and energy efficiency. The search for alternative mobile ions is pivotal to embracing new phenomena and applications. Here, we demonstrate voltage-driven dual-ion (C & Fe) transport to modulate ferromagnetism in Fe<sub>40</sub>C<sub>60</sub>-based heterostructures (reaching a modulation of saturation magnetization exceeding 400 %). The interplay between C & Fe segregation and iron carbide formation upon partial thermal recrystallization results in a layered heterostructure, consisting of an amorphous-like C-rich region atop a Fe-rich layer containing non-stoichiometric iron carbides. This leads to an increased electrical resistance across the heterostructure (by a factor of ~ 104 concerning the as-grown sample), which is central to achieving such a strong magneto-ionic response. Voltage-driven ion transport occurs uniformly, with C and Fe acting as negative and positive ions, respectively. Since carbon exhibits minimal cytotoxicity, this introduces a biocompatible dimension to magneto-ionics, paving the way for the convergence of spintronics and biotechnology.

## D12-57

## 二维磁性材料能谷极化拓扑相变与磁晶各向异性的应变调控

黄河<sup>\*1</sup>、张泽毓<sup>1</sup>、王守国<sup>1,2</sup>

1 北京科技大学材料学院，北京

2 安徽大学材料学院，合肥

能谷是动量空间中能带结构的局部极小值或极大值，谷自由度被认为是除了电子的自旋和电荷以外的第三个自由度。由于在动量空间中存在较大的分离，谷自由度在低能声子和平滑变形方面具有较强的稳定性，这在信息处理方面特别具有吸引力。基于此，通过第一性原理计算及紧束缚模型，我们预测了一种新型的能谷材料，二维铁磁 Janus  $\text{MClBr}$  ( $\text{M} = \text{Ru}, \text{Os}$ ) 单层，我们在该类材料中通过应变实现了谷极化拓扑相变和垂直磁各向异性。

由于空间反演对称性和时间反演对称性的破缺， $\text{H-RuClBr}$  和  $\text{OsClBr}$  单层中可以实现自发的谷极化，其值分别为 247 meV 和 150 meV，超过了大多数已报道的二维铁谷材料的值。值得注意的是，在外加双轴应变的情况下，由于 Ru 的不同自旋的相互作用， $\text{H-RuClBr}$  单层的易磁化轴会转向面外方向，对于易磁化轴改变的原因，我们通过二阶微扰理论进行了详细的说明。除此之外，在  $\text{H-RuClBr}$  和  $\text{OsClBr}$  单层中也观察到了谷极化反常霍尔效应到谷极化量子反常霍尔效应的转换。对于拓扑态出现的原因，我们利用紧束缚模型进行了详细的解释。该工作表明  $\text{MClBr}$  ( $\text{M} = \text{Ru}, \text{Os}$ ) 单层在谷电子学及拓扑方面有较好的应用前景 [1]。

#### 参考文献

[1] Z. Zhang, H. Huang, L. Wang, Y. Zhao, C. Liu, S. Zhou, Y. Wu, J. Zhao, G. Qiao, D. Wang, J. Zhang, X. Zheng, and S. Wang, *Phys. Rev. B* **110**, 035128 (2024).

#### D12-58

##### Low-Field-Driven Giant Magnetocaloric Effect in $\text{KGdF}_4$ for Sub-Kelvin Cryogenic Refrigeration

Jiwei Yao<sup>1,2</sup>, Weijun Ren<sup>1</sup>, Qing Guo<sup>1</sup>, Peng Liu<sup>1</sup>, Ziqi Guan<sup>1</sup>, Changjiang Bao<sup>1</sup>, Zhenquan Zhang<sup>1</sup>, Dan Huang<sup>1</sup>, Kun Zhang<sup>1</sup>, Yanxu Wang<sup>1</sup>, Dongliang Zhao<sup>2</sup>, Jun He<sup>2</sup>, Bing Li<sup>\*1</sup>

1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences.

2. Division of Functional Material Research, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China

Magnetic refrigeration is a promising technology capable of achieving sub-Kelvin temperatures without using  $^3\text{He}$ . However, conventional magnetocaloric materials suffer from drawbacks such as high driving magnetic fields, low magnetic entropy change ( $\Delta S_M$ ), and structural instability, limiting their practical application. In this work,  $\text{KGdF}_4$  with different crystal structures was synthesized, and the structure dependence of the magnetocaloric effect was investigated. Notably, in the cubic  $\text{KGdF}_4$  (C- $\text{KGdF}_4$ ), the chemical disorder of  $\text{Gd}^{3+}/\text{K}^+$  increases the  $\text{Gd}^{3+}$ - $\text{Gd}^{3+}$  distance and weakens the dipolar interactions, and thus leads to a large  $-\Delta S_M = 30.5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  at 1.3 K at the magnetic field change of 10 kOe, which is more than three times of that of the commercial Gadolinium Gallium Garnet ( $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ , GGG) under the same conditions. Furthermore, the magnetic ordering temperature of 0.6 K of the C- $\text{KGdF}_4$  is lower than most reported Gd-based magnetocaloric materials. These excellent magnetocaloric performances suggest that C- $\text{KGdF}_4$  is a highly promising candidate for ultra-low-temperature magnetic refrigeration.

#### D12-59

##### 反铁磁隧道结的读写物理机制

邵定夫\*

中国科学院合肥物质科学研究院

Antiferromagnetic tunnel junctions (AFMTJs) hold great promise for spintronic devices with high operation speed, high storage density, and low power consumption. The realization of their information read/write functionality relies on achieving high tunneling magnetoresistance (TMR) and deterministic Néel vector switching. Through theoretical modeling, we reveal three distinct TMR mechanisms in AFMTJs based on 1) momentum-dependent spin splitting, 2) sublattice-projected Néel spin currents, and 3) uncompensated interfacial spin-polarizations. Furthermore, we demonstrate the mechanism of deterministic Néel vector switching via asymmetric spin torque generated by electric-field-induced non-identical spin accumulations between sublattices in collinear antiferromagnets. The proposed mechanisms establish a comprehensive theoretical framework for developing high-performance AFMTJs.

**D12-60****基于多尺度原位可视化生长实现二维功能材料原子级制造**

张智宏\*

北京科技大学

尽管二维功能材料的制备已经取得了较大的进展，但距其规模化制备仍然有很大距离，关键瓶颈问题如下：（1）原子尺度形核机制不明确，目前对二维材料形核的认识多基于理论计算与模拟，缺乏实验验证，无法提出通用的形核控制技术，难以实现形核的有效调控，如取向、层数等；（2）从原子尺度到介观尺度，缺陷的形成以及晶畴生长过程中的旋转、拼接行为不明确，无法实现缺陷的有效调控；（3）宏观生长条件对原子尺度材料生长行为的影响不明确。因此，建立二维功能材料形核生长跨尺度物理图像是亟待解决的科学难题，相关研究成果可进一步推动此类材料在电子器件、信息技术、新能源等前沿领域的创新应用。针对二维材料研究领域形核生长机制这一核心科学问题，我们利用和发展原位生长表征技术，包括环境气氛球差校正透射电子显微（ETEM）技术及原位光学成像化学气相沉积（CVD）技术，开展二维功能材料原位生长，在不同尺度实时观察材料的形核、生长行为，跨尺度揭示其形核生长机制；同时结合理论计算加深对形核生长机制的理解，为精准制备二维功能材料提供理论支撑，并基于此探索高质量二维功能材料的可控合成方法，推动二维功能材料从实验室走向工业化应用。

**D12-61****Low-energy helium ion beam irradiation on the magnetic properties of thin films**

sylvain Eimer\*, BOYU ZHANG, KAI WANG

自旋芯片与技术全国重点实验室

Spintronics, a burgeoning field aiming to manipulate electron spins for information processing, has spurred intense research into enhancing device performance. This study will investigate the efficacy of employing helium ion irradiation on thin film multilayers with diverse substrates to augment spintronics functionality. The utilization of helium ions offers unique advantages, including precise control over irradiation dosage and minimal damage to underlying structures. Multilayer thin films, comprising alternating ferromagnetic and non-magnetic layers, serve as the foundation for spintronic devices, with substrate variation influencing material properties and device characteristics.

The research will employ advanced fabrication techniques to produce thin film multilayers on distinct substrates, including silicon, sapphire, and gallium arsenide. Helium ion irradiation is systematically applied to these samples, with varying doses and energy levels, to evaluate its impact on spintronics performance metrics such as magnetoresistance and magnetic coercivity. Through comprehensive characterization utilizing techniques such as X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and vibrating sample magnetometry, the evolution of material structure and magnetic properties post-irradiation can be elucidated.

Results should indicate that helium ion irradiation induces structural modifications and tailored magnetic

properties in thin film multilayers, thereby enhancing their suitability for spintronics applications. The observed enhancements in magnetoresistance and magnetic coercivity demonstrate the potential of this approach in optimizing spintronic device performance. Furthermore, substrate-dependent effects on irradiation response highlight the importance of substrate selection in spintronics device design.

This research will contribute to the ongoing efforts in advancing spintronics technology by providing insights into the strategic utilization of helium ion irradiation on thin film multilayers with varied substrates. The findings offer valuable guidance for optimizing device performance and underscore the significance of innovative fabrication techniques in pushing the boundaries of spintronics research and applications.

## D12-62

### Fe-Si-V 合金中分层微观结构的加速演化

倪释凌\*

华南理工大学

通过将透射电子显微镜 (TEM) 和三维原子探针 (APT) 相结合, 研究了单晶  $\text{Fe}_{79.5}\text{Si}_{15.5}\text{V}_{5.0}$  (at.%) 合金的分层微观结构的相分离行为。分层的 A2 板在其宿主 D03 沉淀相中形成, 并建立了一个复杂的相互连接的颗粒网络。A2 板的形成主要是由 D03 沉淀相中的 Fe 和 V 的过饱和度驱动。我们利用相组成、三元相图和混合焓来确定分层微观结构的相分离机制。通过空间分布图 (SDM) 确定了 D03 沉淀相内的位点占有率。我们推测, 弹性各向异性的比率 (齐纳比率) 在决定分层颗粒形态方面起着关键作用。

## D12-63

### 烧结钕铁硼磁体各向异性力学响应及原子尺度变形机理研究

叶俐江\*

中南大学

烧结钕铁硼磁体因其出色的磁性能而被广泛应用于电动汽车和风力发电领域。然而, 低对称性和缺乏足够的滑移系统限制了它们在高应力或高速环境中的应用。迄今为止,  $\text{Nd-Fe-B}$  磁体背后的变形行为尚不为人知。在此, 我们报告了四方晶系  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  的变形机制。具体来说,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  相通过晶格畸变和原子层沿特定晶体学方向错位形成的纳米级剪切带来适应塑性变形。我们证实特定滑移系统在变形过程中优先被激活。晶体取向效应、富钕相的优先分布以及晶粒尺寸差异共同影响着不同取向磁体的机械性能。此外, 我们的统计表明,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  相的硬度是富钕相的 1.5-1.7 倍, 因此减少块状富钕相的富集和强化晶界相是增韧的关键。我们的研究为理解与钕铁硼磁体相关的变形行为和机械各向异性提供了基础。

## D12-64

### 二维范德华磁体 $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ 中类自旋玻璃态诱导磁交换偏置特性

胡少杰\*

深圳技术大学

通过反常霍尔效应 (AHE) 与动态磁化特性相结合的方法, 对二维范德瓦尔斯 (vdW) 铁磁体中的交换偏置机制进行了实验研究。富碲 (Te)  $\text{FeGeTe}$  范德瓦尔斯铁磁体的交流磁化率随温度变化及其频率响应特性表明, 其磁性存在类玻璃态转变。还发现反常霍尔电压的不可逆温度依赖性遵循德阿尔梅达-图利斯 (de Almeida-Thouless) 线规律。此外, 类自旋玻璃相的冻结温度与交换偏置的消失温度存在关联。这些重要特征表明, 二维范德瓦尔斯铁磁体中交换偏置现象的出现, 是由  $\text{FeGeTe}$  材料中类自旋玻璃态的存在所诱导的。该研究首次通过实验数据揭示了范德瓦尔斯铁磁体中交换偏置的底层物理机制, 为推动对此类材料磁调控机制的理解提供了新的理论依据。

**D12-65****1: 12 型稀土铁基永磁材料的磁性能研究**

沈雷、付宝勤\*、侯氢、崔节超、李敏

四川大学 720 所

1: 12 型稀土铁基永磁材料因具有超过  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  系合金的内禀磁特性而备受关注, 被认为是极具潜力的新一代稀土永磁材料。针对  $\text{SmFe}_{12}$  型铁基稀土永磁材料的晶体结构, 计算了大量数据, 涵盖了 Co、Al、V、Ga、Ti、Mo、Nb、Si 等元素在 Fe 位点的掺杂情况, 记录了详细的晶格常数、结合能、电子结构和磁矩等性能数据。根据数据训练出了一套神经网络, 用以预测掺杂不同浓度、种类的元素时对材料的影响。同时还研究了元素在 8f、8i、8j 三个 Fe 等效位点掺杂的情况, Ti、V 等元素更喜欢占据 Fe 的 8i 位点, 这会导致饱和磁化强度降低得幅度更大。可为国内外稀土永磁材料的研发提供理论指导, 缩短材料研发周期、降低成本。

**D12-66****高熵合金宽温域磁制冷性能研究**

邵艳艳\*、方凯、严涛、徐锋

Nanjing University of Science and Technology

磁制冷作为一种绿色高效的制冷技术, 凭借其零温室气体排放与高能效的显著优势, 在清洁能源领域 (特别是液氢储运) 展现出核心价值。通常来说, 增加磁相变过程中的体积变化可以有效提高磁熵变, 但强一级相变会导致工作温区变窄。因此, 对于大多数磁热材料而言, 同时提高磁熵变和制冷温区是一个普遍面临的难题。磁热高熵合金借助多组元熵调控, 能够通过协同作用实现超越单一元素或传统合金的性能提升, 为精准调控和拓宽制冷温区以及提升磁熵变性能开辟新途径。本工作聚焦于等原子比  $\text{GdDyHoErTm}$  高熵合金, 对其结构、磁相变以及磁热性能展开了深入研究。研究发现, 该高熵合金呈现出具有六方密堆结构的均匀相, 其组成元素处于随机混合状态。由于各组元元素的不同磁性质, 此稀土高熵合金展示出复杂的磁性和磁相变。在室温以下存在多个磁相变温区, 相应磁热效应之间的耦合作用显著拓宽了制冷温区, 形成了平台状的磁热效应。镧系稀土元素因其未填满的 4f 电子壳层, 在低温区能够产生明显的磁热效应。因此,  $\text{GdDyHoErTm}$  高熵合金展现出大的相对制冷能力 (5 T 磁场, 1110J/kg)。高熵的设计策略显著提升了低温磁制冷材料的综合性能, 为高效环保的磁制冷技术提供方案。

## 墙报:

## D12-P01

利用第二类狄拉克半金属  $\text{Pt}_3\text{Sn}$  的拓扑表面态实现垂直磁矩的无场翻转赵云驰<sup>\*1</sup>、张毅<sup>1,2</sup>、祁杰<sup>3</sup>、王守国<sup>3</sup>

1. 中国科学院物理研究所
2. 北京科技大学
3. 安徽大学

通过自旋轨道力矩操控磁矩翻转被认为是实现下一代全电控磁存储器件的理想方式，但是常规的自旋轨道力矩器件在翻转具有垂直磁各向异性的铁磁层时需要打破对称性，这会导致器件结构变得复杂，影响器件的小型化，限制其实际应用。因此，寻找能够产生非常规自旋流的自旋源材料成为了可能的突破方向。

$\text{Pt}_3\text{Sn}$  是一种具有第二类狄拉克点的拓扑狄拉克半金属，且具有较大的自旋转化效率，是实现下一代高密度低功耗磁存储器件的理想自旋源材料。本工作通过分子束外延技术制备了 (111) 取向的单晶外延  $\text{Pt}_3\text{Sn}$  薄膜。通过反射高能电子衍射和扫描透射电子显微镜等方法可以证明该薄膜具有良好的单晶外延质量和有序度。第一性原理计算表明  $\text{Pt}_3\text{Sn}$  的 (111) 表面具有由于第二类狄拉克点导致的拓扑表面态，且展现出受对称性保护的自旋织构，并且在特定晶向可以产生非常规的自旋流。利用该非常规的自旋流可以通过自旋轨道力矩效应实现对具有垂直磁各向异性的铁磁层的无外磁场辅助的磁矩翻转。

## D12-P02

## 具有铁磁和非共线反铁磁电极的隧道结中的角依赖型隧穿磁阻效应

骆晴晴、邵定夫\*

中国科学院合肥物质科学研究院固体物理研究所

基于铁磁 (FM) 金属电极的磁隧道结 (MTJs) 表现出隧穿磁阻 (TMR) 效应，这一现象可以通过两个自旋导电通道和隧穿过程中自旋守恒的模型来很好地解释。最近，基于非共线反铁磁 (AFM) 电极的反铁磁隧道结 (AFMTJs) 也预测并观察到了 TMR 效应，这为高速度和高密度自旋电子学应用带来了希望。这些发现挑战了传统的 TMR 机制，因为通常在非共线 AFM 金属中不存在自旋守恒。在此研究中，我们探讨了  $\text{Mn}_3\text{GaN}/\text{SrTiO}_3/\text{SrRuO}_3$  (001) MTJ 中的自旋极化隧穿现象，其中参考层是非共线 AFM  $\text{Mn}_3\text{GaN}$  电极，自由层是共线 FM  $\text{SrRuO}_3$  电极。通过量子输运计算，我们预测  $\text{SrRuO}_3$  的铁磁化旋转导致角度依赖的 TMR 主要是由两个电极的平均动量相关的自旋极化匹配控制。这些结果表明，尽管隧穿过程中自旋守恒被破坏，但动量相关的自旋极化是一个有价值的量，可用于阐明具有非共线 AFM 电极的 MTJ 中的 TMR。

## D12-P03

## Angular Dependent Tunneling Magnetoresistance in a Tunnel Junction with Ferromagnetic and Noncollinear Antiferromagnetic Electrodes

Qingqing Luo, DING FU Shao\*

Key Laboratory of Materials Physics, Institute of Solid-State Physics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences

Magnetic tunnel junctions (MTJs) based on ferromagnetic (FM) metal electrodes exhibit a tunneling magnetoresistance (TMR) effect, which can be well understood using a model of two spin-conduction channels and spin conservation in the tunneling process. Recently, TMR has been predicted and observed in antiferromagnetic (AFM) tunnel junctions (AFMTJs) based on noncollinear AFM electrodes, promising for high-speed and high-density spintronic applications. These findings challenge the conventional mechanism of TMR due to generally no spin conservation in noncollinear AFM metals. Here, we explore spin-polarized tunneling in an  $\text{Mn}_3\text{GaN}/\text{SrTiO}_3/\text{SrRuO}_3$  (001) MTJ, where the reference layer is a noncollinear AFM

Mn<sub>3</sub>GaN electrode and the free layer is a collinear FM SrRuO<sub>3</sub> electrode. Based on quantum-transport calculations, we predict that the rotation of FM magnetization of SrRuO<sub>3</sub> leads to the angular-dependent TMR being largely controlled by the matching of the average momentum-dependent spin polarization of the two electrodes. These results demonstrate that despite broken spin conservation in the tunneling process, the momentum-dependent spin polarization of the electrodes is a valuable quantity which can be used for elucidating TMR in MTJs with noncollinear AFM electrodes.

#### D12-P04

##### **Highly Efficient Room-Temperature Spin-Orbit Torque in an Epitaxial Half-Heusler Alloy NiMnSb Single Layer on MgO (100) Substrates**

Zeyu Han, Yongjun Huo, Miao Jiang\*

School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology

A central challenge in spintronics lies in realizing highly efficient, room-temperature spin-orbit torque (SOT) devices to advance low-power magnetic memory and logic technologies. The conventional SOT systems rely on heavy metal/ferromagnet bilayer structures. Their efficiency is constrained by interfacial spin scattering, short spin diffusion lengths, and the inherent complexity of multilayered architectures. Meanwhile, the competition between the “bulk” spin Hall effect and the “interface” inverse spin galvanic effect has limited a deep understanding of the physical mechanisms of SOT. Breaking the inherent crystal inversion symmetry of single-layer ferromagnets provides a direct pathway to generate current-induced spin polarization, effectively reducing the current density required for the magnetization switching [1-3]. However, existing demonstrations of such systems have been confined to low-temperature operation or exhibited only moderate efficiencies. Achieving both room-temperature functionality and high efficiency remains a critical, yet unmet, challenge in spintronics.

In this work [4], we overcome the limitations mentioned above via a synergistic design of materials and structures in an epitaxial half-Heusler NiMnSb single layer. By employing a 45° rotational epitaxial alignment, we reduced the lattice mismatch to only 0.15% and achieved high crystallinity with atomically flat surfaces ( $R_a \approx 0.45$  nm) utilizing high-vacuum magnetron sputtering. The SOT efficiency was confirmed to be 16.8 Oe/(10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>) at room temperature in our NiMnSb single layer, which is higher than conventional Pt/Co bilayers [5] and surpasses previously reported values for GaAs-based NiMnSb single layer [6]. This breakthrough stems from NiMnSb's intrinsic non-centrosymmetric structure, half-metallic properties, and optimized epitaxial growth. Our work advances the development of practical applications for a single-layer SOT-based memory device with higher efficiency, lower power consumption and better integration.

#### D12-P05

##### **Micromagnetic simulations for magnetic-field-free magnetization switching by spin-orbit torque in a perpendicularly magnetized (Ga,Mn)As single layer**

Yitao Yu, Miao Jiang\*

School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology

Spin-orbit torque magnetic random access memory (SOT-MRAM) has emerged as a highly promising candidate for next-generation memory technologies due to its reliability, high density, and nonvolatility. It offers significant advantages in mitigating write-read interference and enhancing device endurance. To improve scalability and optimize magnetization switching efficiency, field-free SOT magnetization switching has been successfully demonstrated in a perpendicularly magnetized (Ga,Mn)As single-layer system.[1] Nevertheless, the underlying physical mechanism of this phenomenon requires further investigation to advance the practical application of high-efficiency SOT-based memory devices.

In the present work, we performed micromagnetic simulations using the Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) to understand the field-free magnetization switching behavior in a (Ga,Mn)As single layer.[2] Through the micromagnetic simulations, we confirm that the field-free switching is mainly attributed to the giant in-plane component of Dzyaloshinskii–Moriya effective field (HDM), which can serve as an assist field to break the in-plane symmetry and achieve deterministic switching. Furthermore, the direction of HDM is determined by the initial magnetization states, leading to varying polarities of SOT magnetization switching. Our findings elucidate the physical mechanism of field-free SOT switching in single-layer systems and advance the development of practical applications for a single-layer SOT-based memory device with higher efficiency, lower power consumption and better integration.

#### Reference

- [1] Jiang M, Yang X, Qu S, et al. Field-free spin–orbit torque magnetization switching in a perpendicularly magnetized semiconductor (Ga,Mn)As single layer [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(18): 23497-23504.
- [2] Jiang M, Yang X, Yu Y, et al. Micromagnetic simulations for magnetic-field-free magnetization switching by spin–orbit torque in a perpendicularly magnetized (Ga,Mn)As single layer [J]. APL Materials, 2025, 13(4): 41106.

### D12-P06

#### Interface-controlled antiferromagnetic tunnel junctions

Liu Yang<sup>1,2</sup>, Yuan-Yuan Jiang<sup>\*1,2</sup>, Xiao-Yan Guo<sup>1</sup>, Lan Wang<sup>3</sup>, Evgeny Y. Tsymbal<sup>4</sup>, Ding-Fu Shao<sup>1</sup>

1. Institute of Solid State Physics, HFIPS
2. University of Science and Technology of China
3. School of Physics, Hefei University of Technology
4. University of Nebraska, Lincoln, Nebraska

A magnetic tunnel junction (MTJ) is the key building block of high-performance spintronic devices. While the conventional MTJs are based on ferromagnetic (FM) materials, using antiferromagnetic (AFM) materials instead may largely increase the operation speed and the packing density. The existing prototypes of the AFM tunnel junction (AFMTJs) are associated with a magnetic phase transition or the spin-dependent current within the bulk antiferromagnets. Here we emphasize a previously overlooked prototype of AFMTJs, where the electrodes with an A-type AFM stacking supports an interfacial spin current capable of driving a notable tunneling magnetoresistance (TMR) effect, despite the spin-independent nature within the bulk. Using a van der Waals (vdW) antiferromagnet Fe<sub>4</sub>GeTe<sub>2</sub> as a representative A-type electrode, we demonstrate a negative TMR solely attributed with the interfacial spin current. This prototype of AFMTJs can be also realized by a broad range of non-vdW A-type antiferromagnets supporting the roughness-robust interfaces, allowing convenient switching of the Néel vector, and thus open a new paradigm for AFM spintronics employing the properties at interfaces instead of within the bulk antiferromagnets.

### D12-P07

#### Magnetic and microwave absorption properties of highly Al-doped strontium hexaferrite nanoparticles obtained by glass crystallization

Haochen Wei<sup>1</sup>, L.A. Trusov<sup>\*1</sup>, E.A. Gorbachev<sup>1</sup>, E.S. Kozlyakova<sup>2</sup>, L.N. Alyabyeva<sup>2</sup>

1. Shenzhen MSU-BIT University
2. Moscow Center for Advanced Studies

MFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> hexaferrites (M = Ba, Sr, Pb) are important industrial materials widely used in the production of permanent ceramic magnets and high-frequency electromagnetic wave absorbers. Aluminum substitution



enhances the material's coercivity and natural ferromagnetic resonance frequency. However, modern applications require the development of structured anisotropic materials composed of aligned magnetic particles. Conventional synthesis methods, which involve high-temperature particle sintering, are unsuitable for this purpose. The glass crystallization method, in contrast, eliminates the sintering and enables the production of isolated hexaferrite particles, which can be separated as stable colloids or non-aggregated powders.

The aim of this study is to synthesize aluminum-substituted strontium hexaferrite nano- and submicron-sized particles via crystallization of  $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}\cdot 4\text{Sr}_2\text{B}_2\text{O}_5$  glass (where  $x = 2$  and  $4$ ) and to investigate their properties. Partial substitution with aluminum is necessary to increase the coercive force and millimeter-wave absorption frequency of the material.

Amorphous glass samples were prepared by melt quenching between rotating steel rollers. Subsequent heat treatment at 700–950 °C yielded glass-ceramic composites containing crystallized hexaferrite particles. The borate glass matrix was then dissolved in 3% HCl, isolating the magnetic particles in the form of powders and colloidal suspensions for further analysis.

The hexaferrite particles were studied by powder X-ray diffraction, electron microscopy, inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, magnetic measurements, and terahertz spectroscopy. Colloidal solutions were investigated by dynamic light scattering.

XRD analysis confirms that the particles consist of a single-phase M-type hexaferrite. Within the temperature range of 700–800 °C, thin platelet-like nanoparticles form, while annealing at 850–950 °C reduces their diameter-to-thickness ratio. The average particle diameters are 40 nm (700 °C), 50 nm (750 °C), and 70 nm (800 °C), with a consistent thickness of 10 nm across all nanoparticle samples. At 950 °C, the particles grow significantly, reaching dimensions of about 170 nm × 120 nm. Hexaferrite particles are also partially doped with aluminum. The aluminum content in  $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  increases with an increase in the annealing temperature from  $x = 0.9$  (700 °C) to  $x = 2.8$  (900 °C). It has been confirmed that aluminum is predominantly included in octahedral positions 2a and 12k.

The coercivity of nanoparticles increases with the degree of substitution and particle size, reaching values of 3900, 5500, and 6500 Oe at annealing temperatures of 700, 750, and 800 °C, respectively. The saturation magnetization of the samples lies in the range of 30.0 – 37.6 emu/g.

Stable colloidal solutions were obtained from particles synthesized at temperatures ranging from 700 to 800 °C. It is demonstrated that particles in an acidic medium are positively charged, which ensures the stability of colloids within the pH range of 2–4. At pH < 2, the particles reversibly aggregate, and at pH > 4, the surface is discharged, and strong aggregates of particles are formed.

The samples were examined by terahertz spectroscopy. It was determined that the resonant absorption of electromagnetic radiation by samples occurs in the range of 50 – 70 GHz, and the resonant frequency rises with increasing aluminum content and particle size.

This research was supported by the Russian Science Foundation, grant number 24-79-10053.

## D12-P08

### Magnetism and Phase Transition in Fe<sub>3</sub>Ge<sub>2</sub>

Zhikang Cui<sup>1</sup>, Boyu Zhang<sup>\*1</sup>, Peng Wu<sup>2</sup>

1. School of Integrated Circuit Science and Engineering, Beihang University

2. Beihang University

In recent decades, extensive research has been conducted on the Fe-Ge system. As a complex alloy system, certain Fe-Ge compounds exhibit magnetic behavior that changes with phase transitions, demonstrating unique properties.

As an intermetallic compound, Fe<sub>3</sub>Ge<sub>2</sub> has been widely studied in the form of nanospheres and nanowires.

Studies have shown that nanocrystalline Fe<sub>3</sub>Ge<sub>2</sub> exhibits clear ferromagnetism with a Curie temperature close to room temperature. [1] In contrast, bulk Fe<sub>3</sub>Ge<sub>2</sub> powder demonstrates a Curie temperature above room temperature, which may be attributed to size or dimensional effects.

This paper reports a phase transition of Fe<sub>3</sub>Ge<sub>2</sub> occurring around 120 K, which is similar to that observed in FeGe[2], and attempts to explore structural changes during this transition by using Raman spectroscopy.

Single crystal samples were grown using chemical vapor deposition[3]. The samples were characterized by EDX and XRD, and other magnetic properties of Fe<sub>3</sub>Ge<sub>2</sub> were studied by Raman[4] and PPMS.

The composition of the grown samples is Fe<sub>3</sub>Ge<sub>2</sub>, which were characterized by EDX and XRD. Further studied by Raman to gain a deeper understanding of the magnetic properties of Fe<sub>3</sub>Ge<sub>2</sub>.

Iron Germanium, Metal Germanide Alloys, X-ray diffraction.

[References]

[1] Vaughn, Dimitri D., et al. Chemistry of Materials 25.21 (2013): 4396-4401.

[2] Teng, Xiaokun, et al. Nature 609.7927 (2022): 490-495.

[3] Wu, Xueliang, et al. Physical Review Letters 132.25 (2024): 256501.

[4] He, Ge, et al. Physica status solidi (b) 259.5 (2022): 2100169.

## D12-P09

### Optimizing terahertz emission in magnetic materials using light ion irradiation

Zhenbin Zhu, boyu zhang\*

Fert Beijing Institute, School of Integrated Circuit Science and Engineering, Beihang University, Beijing, China.

Ferromagnetic (FM)/non-magnetic (NM) multilayers have attracted significant attention for their terahertz emission due to the spin-charge conversion mechanism. The novel spintronic THz source can achieve a peak electric field of 300 kV/cm [1]. And recently, orbitronic terahertz sources based on the inverse orbital Rashba-Edelstein effect or the inverse orbital Hall effect in Ni have been discovered [2,3]. We aim to explore methods for optimizing spintronic THz sources.

Ni/Cu/MgO, Ni/Pt/MgO and Ni/Ta/MgO structures exhibiting in-plane anisotropy were deposited on glass substrates. We employed light ion irradiation using He<sup>+</sup> ions on these heterostructures and measured the resulting changes in THz radiation intensity via a terahertz time-domain spectroscopy system.

In this study, we observed enhancements in terahertz emission, demonstrating that ion irradiation can effectively enhance terahertz sources in magnetic heterostructures. Specifically, we achieved a 77% increase in THz signal for the Ni/Cu heterostructure and a 50% increase for Ni/Ta. In contrast, no observable change was detected in the Ni/Pt structure after irradiation, indicating that ion irradiation has a pronounced effect on orbital-related mechanisms, while it does not influence spin current contributions. Additionally, we varied the irradiation duration and fluence, both of which led to different degrees of enhancement. With a deeper understanding of the underlying mechanisms, we anticipate further improvements in THz emission performance.

To conclude, we optimized the emission efficiency of spintronic terahertz sources through ion irradiation and demonstrated its selective impact on orbital-related effects in different material systems. The enhancement in terahertz emission also varied under different irradiation conditions. Our work provides valuable insight into the interplay between spin and orbital dynamics and offers a promising strategy for the development of advanced terahertz sources.

Femtosecond laser, Terahertz emission, Ion irradiation, Orbital effects

[References]

[1] T. Seifert, S. Jaiswal, M. Sajadi, et al. Appl. Phys. Lett. 110(25), 252402, 2017.

[2] Y. Xu, F. Zhang, A. Fert, et al. Nat. Commun. 15(1), 2043, 2024.

[3] P. Wang, Z. Feng, Y. Yang et al. npj Quantum Mater. 8, 28, 2023.

**D12-P10****Y–Co co-substitution strategy towards jointly enhanced magnetic performance and thermal stability of Ce-rich Nd–Y–Ce–Fe–Co–B nanostructured permanent magnets**

Jia Li, Jiaying Jin\*, Mi Yan

School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University

Developing the Ce-rich Nd–Ce–Fe–B permanent magnets with low cost and high competitiveness is strongly desired for the balanced utilization of rare earth (RE) resources, while hindered by the degraded magnetic properties and thermal stability. Here we present a Y–Co co-substitution strategy to address the trade-offs between coercivity, remanence, maximum energy product, and thermal stability in the  $[\text{Nd}_{0.5}(\text{Y}_x\text{Ce}_{1-x})_{0.5}]_{30.5}(\text{Co}_y\text{Fe}_{1-y})_{68.5}\text{B}_{1.0}$  ( $x = 0$  and  $0.15$ ,  $y = 0, 0.05, 0.10, 0.20$  and  $0.30$ ) nanostructured permanent magnets. The optimal Y and Co concentrations ( $x = 0.15$ ,  $y = 0.05$  or  $0.10$ ) yield the maximized room-temperature  $H_{\text{cJ}}$  of  $1.08\sim 1.12$  T,  $J_{\text{r}}$  of  $0.71\sim 0.74$  T,  $T_{\text{C}}$  of  $579\sim 618$  K, together with favorable temperature coefficients  $\alpha$  of  $-0.15\sim -0.12\%/K$  and  $\beta$  of  $-0.35\sim -0.34\%/K$  within  $300\sim 400$  K interval, all of which are better than those of the initial Ce50 magnet ( $x = 0$ ,  $y = 0$ ). The enhanced magnetic performance and thermal stability are attributed to Y–Co co-substitution in the 2:14:1 lattice to improve the temperature coefficients, together with the tailored Ce valence. Upon moderate Y–Co co-substitution, the preferential Co occupation of the Fe(4c) and Fe(8j<sub>1</sub>) sites among the six non-equivalent Fe sites enlarges the local Ce-site steric volume and induces a Ce valence shift towards  $\text{Ce}^{3+}$ , as demonstrated by the hyperfine structure analysis via joint  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectra and Ce  $L_{3\text{-edge}}$  X-ray absorption near-edge fine structure spectra. Above findings delight future work towards high-performance Ce-rich RE–Fe–B permanent magnets via fully exploiting the synergistic effects of multiple REs and alloying elements.

**D12-P11****亚毫米级二维铁磁材料的制备及性能研究**

姜琦涛、薛武红、许小红\*

山西师范大学

以电子自旋为主要信息载体的自旋电子器件具有体积小、速度快、功耗低等优势，是后摩尔时代信息存储器件的有力竞争者。特别是，二维磁性材料的发现为构建新功能的磁电子器件提供了材料基础。二维磁性材料在原子层厚度依然保持长程磁序，具有表面无悬挂键、弱层间耦合、可进行“原子乐高”功能异质集成、易于调控等优势，在高密度磁信息存储和自旋电子学领域具有重要应用前景，成为国际上的前沿热点。然而，二维磁性材料目前存在居里温度较低、环境不稳定、难以大尺寸可控制备等困难，极大地限制了其应用和发展。因此，探索稳定性更好的新型二维磁性材料，并用简便、经济可控的方法实现其大尺寸超薄制备，对于推动二维磁性材料的应用具有重要的意义与价值。此外，磁性二维材料的磁畴及其演变能够为相关器件的性能优化提供重要参考。基于此，我们开发了一种简单、经济、可扩展、氢修饰的化学气相沉积方法，可控合成了亚毫米级超薄高质量  $\text{Cr}_5\text{Te}_8$  磁性纳米片，值得一提的是，纳米片横向尺寸最大可达  $450\text{ }\mu\text{m}$ 、空气稳定性好且居里温度较高。此外，通过对  $\text{Cr}_5\text{Te}_8$  纳米片的磁畴演化的直接观察，揭示了畴壁成核在控制磁化逆转过程中的主导作用。有趣的是， $\text{Cr}_5\text{Te}_8$  纳米片表现出非单调磁电阻特性。该工作在 CVD 法制备大尺寸二维磁性材料领域实现了重要突破，为在二维尺度理解和调控磁相关性质提供了理想平台。有望推动二维磁性材料在自旋电子学器件中的应用和发展。

**D12-P12****阻挫磁体中的非共线磁构型**

董守哲、许可、黄厚兵\*

北京理工大学前沿交叉科学研究院

由于在高性能磁性器件领域的潜在应用价值，纳米级非共线构型材料的探索持续引发研究热潮。相较于铁磁材料，阻挫磁体中的非共线结构因具备更小特征尺寸与独特物理属性，展现出更高的科学研究价值。然而当前缺乏对四方晶格中阻挫磁体中纳米级非共线畴结构的有效理论描述。

在此，我们提出一种基于相场模型的计算方法，用于预测正方晶格体系中阻挫磁体的磁构型分布。通过解析最近邻铁磁相互作用 ( $J_1$ ) 与第三近邻反铁磁交换作用 ( $J_3$ ) 的竞争机制，成功确定了体系的亚稳态畴结构分布。从理论层面推导了非共线相稳定存在的热力学条件，并系统研究了不同  $J_1$ - $J_3$  参数下自旋体系对外加磁场的响应特性，重点分析了拓扑孤子态的演化规律。

本研究成果不仅为深入理解阻挫磁体的复杂磁学特性提供了关键理论支撑，还为探索该类材料在新型电感元件、高密度存储器件等领域的应用潜力提供了系统性理论指导，对推动自旋电子学器件的前沿发展具有重要科学意义。

**D12-P13****Submicron particles of SrFe<sub>12-x</sub>Mn<sub>x</sub>O<sub>19</sub>: crystal structure features, magnetic and microwave absorption properties**Jianing Chen<sup>1</sup>, Lev Trusov<sup>\*1</sup>, Evgeny Gorbachev<sup>1</sup>, Ekaterina Kozlyakova<sup>2</sup>, Liudmila Alyabyeva<sup>2</sup>

1. Shenzhen MSU-BIT University

2. Moscow Center for Advanced Studies

To date, M-type hexaferrites (MFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, M<sup>2+</sup> = Ba<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>) are the most important hard magnetic insulators. Due to their large magnetocrystalline anisotropy, they can provide rather high coercivity (even comparable to rare-earth materials) and, being dielectrics, are characterized by the natural (i.e., observed in a zero applied magnetic field) ferromagnetic resonance (NFM) in the millimeter range (30 – 300 GHz). These functional properties are in demand in many application areas, ranging from magnetic recording to spintronics.

The magnetic properties of the hexaferrites are most conveniently controlled by substituting iron ions in the crystal structure. However, only some cations lead to an increase in the hard magnetic properties, i.e., the coercive force and the resonant absorption frequency. It is currently known that such cations are Al<sup>3+</sup> and chromium Cr<sup>3+</sup>, and there is also information that substitution with Mn<sup>3+</sup> can lead to this effect. The challenge is that to obtain a material with improved properties, it is necessary to maintain the particle size within the single-domain region, i.e., about 1  $\mu$ m, which is usually difficult under high-temperature solid-phase synthesis conditions.

In the present work, for the first time, we obtained submicron particles of single-phase hexaferrites with the chemical composition SrFe<sub>12-x</sub>Mn<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0 - 8$ ) and systematically studied the features of their crystal structure, particle morphology, magnetic, and millimeter-wave absorption properties. The samples were obtained via an optimized citrate-nitrate auto-combustion method, in which the porous structure of the precursor makes it possible to limit diffusion and maintain submicron particle sizes even at high temperatures. It was found that the optimal synthesis temperatures are in the range of 900 – 950 degrees; at lower temperatures, the reaction does not proceed completely, and at higher temperatures, the reduction of Mn<sup>3+</sup> and the formation of MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> occur.

The features of the crystal structure were studied using anomalous X-ray diffraction. It was shown that manganese ions predominantly occupy the octahedral sites 4f<sub>2</sub>, 2a, 12k (in descending order) and avoid the trigonal bipyramidal site 2b. The substitution resulted in a gradual decrease in the saturation magnetization and the magnetocrystalline anisotropy. However, the anisotropy field increased with substitution, causing the enhancement of the hard magnetic properties. The introduction of Mn<sup>3+</sup> ions into the hexaferrite structure up to  $x$

= 7 led to a significant increase in the coercive force from 4.5 to 10.6 kOe and a rise in the natural ferromagnetic resonance frequency from 50 to 95 GHz at room temperature. The substitution was also accompanied by a gradual decrease in Curie temperature.

Magnetic and absorption properties at low temperatures were also studied. The coercive force and FMR frequency pass through a broad maximum at temperatures of 250 – 300 K and then drop to 50 K. Below 50 K, the coercivity and FMR frequencies for all compositions show anomalous behavior and increase again.

Thus, the substitution of hexaferrites with manganese ions allows for smooth control of magnetically hard properties, which makes manganese-substituted hexaferrites extremely in demand for the development of rare-earth-free permanent magnets, subterahertz electronics, and spintronics, as well as next-generation wireless technologies.

#### D12-P14

##### 选择性激光熔化构建共晶界面实现高强韧性 La-Fe-Co-Si 磁热合金的快速制备

张若琛\*

沈阳理工大学

本研究通过选区激光熔化向 La-Fe-Co-Si 合金中添加 Cu 元素,在合金中构建了由细化的  $\alpha$ -Fe 和 LaCuSi 相组成的富 La、Cu、Si 共晶界面,从而快速实现了强度与塑性的协同提升。结果表明,铸锭的孔隙率从 2.52 vol%降低至 1.84 vol%,这是目前激光增材制造 La-Fe-Si 基合金中报道的最低孔隙率。与未构建共晶界面的样品相比,该铸锭表现出更高的硬度。更重要的是,得益于  $\alpha$ -Fe 和 LaCuSi 相的塑性,铸锭的延伸率显著提高至 6%,并首次在铸态样品中观察到明显的屈服阶段,屈服强度达 549.43 MPa,延伸率为 6%,同时抗压强度高达 583.88 MPa。经过 1323 K 短时 (12 h) 退火后,材料中形成了大量细化的磁热 La(Fe,Co,Si)<sub>13</sub> 相,界面相转变为与 La(Fe,Co,Si)<sub>13</sub> 相半共格的 LaCu<sub>2</sub> 相以及塑性 LaCuSi 相。在细晶强化与第二相强化的共同作用下,抗压强度进一步提升 36%至 918.98 MPa,且未牺牲塑性,这是该材料迄今报道的最高强度值。此外,材料在 300 K–340 K 宽温区内展现出优异且稳定的磁热循环性能。

#### D12-P15

##### Synthesis of $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> through conversion of M-type hexaferrite nanoparticles for advanced magnetic storage applications

Jingtong Duan<sup>\*1,2</sup>, E.A. Gorbachev<sup>1,2</sup>, L.N. Alyabyeva<sup>3</sup>

1. SHENZHEN MSU-BIT UNIVERSITY

2. Lomonosov Moscow State University

3. Center for Photonics and 2D Materials, MIPT

M-type hexaferrite nanoparticles remain the predominant medium for magnetic data storage applications. However, the persistent demand for higher recording densities necessitates corresponding reductions in particle size, a trend that has pushed hexaferrites to their intrinsic superparamagnetic diameter ( $D_{sp}$ ) limit. This fundamental limitation arises from the impracticality of further decreasing  $D_{sp}$  through existing methods, thereby creating a critical need for alternative high-coercivity materials. Among promising candidates,  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stands out due to its significantly greater magnetic anisotropy compared to M-type hexaferrites, enabling a substantial reduction in  $D_{sp}$  and improved performance in magnetic recording media.

Despite its potential,  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> synthesis remains challenging owing to thermodynamic metastability, with existing methods being economically inefficient for industrial-scale production. Therefore, the objective of this work was to develop a methodology for obtaining  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> through conversion of M-type hexaferrite nanoparticles. Key steps included: preparing strontium hexaferrite nanoparticles with controlled size and magnetic properties via borate glass crystallization; their coating by silica via TEOS hydrolysis; optimization of annealing conditions; and

confirmation of  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase formation using synchrotron X-ray diffraction and SQUID magnetometry.

In this work, hexaferrite nanoparticles were coated with silicon dioxide to both promote the target chemical reaction and prevent their recrystallization into  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with larger crystal sizes. During heat treatment, strontium ions migrated into the silica matrix while the iron oxide transformed into  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Thermogravimetric analysis in a gradient magnetic field demonstrates that thermal treatment of SiO<sub>2</sub>-coated hexaferrite composites in the temperature range of 910–1000 °C initiates the partial phase transformation, producing a mixed-phase composition dominated by  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with residual M-type hexaferrite as the secondary phase. Complete conversion to phase-pure  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is achieved through subsequent isothermal annealing at 1100 °C for 30 minutes. Magnetic characterization reveals hysteresis behavior with a notable inflection point at zero field. The measured coercivity of 7.4 kOe, substantially lower than the characteristic 15–20 kOe range for  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, indicates the presence of superparamagnetic contributions attributed to the formation of  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystallites with dimensions below 10 nm.

This work successfully demonstrates, for the first time, a viable pathway for converting M-type hexaferrites into  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, thereby opening new possibilities for repurposing existing hexaferrite materials in advanced magnetic storage technologies.

The research was supported by Russian Science Foundation grant no. 24-79-10053.

## D12-P16

### 在二维范德华铁磁体中近室温下操控交换偏置

刘大象\*

中国科学技术大学

作为交换偏置（EB）的宿主，范德华（vdW）磁性材料表现出了与传统磁性材料不同的有趣和独特的功能。大多数 vdW 系统中的 EB 远低于室温，这对实际应用构成了挑战。文章通过使用克尔显微镜，在自然氧化的二维（2D）vdW 铁磁 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 纳米片中展示了接近室温的创纪录的高 Blocking temperature 和在 100 K 下接近 2 kOe 的巨大正 EB 场。此外，文章实现了不需要多次场冷而通过磁场来控制交换偏置的正负和有无。因此，研究清楚地揭示了高达接近室温的 vdW 磁性材料中稳定的、相当大的以及符号可控的 EB，因此将 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 确立为一种新兴的室温工作 vdW 材料，并为设计实用的 2D 自旋电子器件铺平了道路。

## D12-P17

### 范德华磁体 CrSBr 磁相变的表面灵敏检测

裴方方<sup>1</sup>、余晶晶<sup>2</sup>、周家园<sup>2</sup>、李倩\*<sup>1</sup>、杨蒙蒙<sup>2</sup>

1. 中国科学技术大学核科学与技术学院，国家同步辐射实验室
2. 安徽大学物理科学与信息技术研究所，磁性功能材料与器件安徽省重点实验室

CrSBr 作为一种空气稳定的 A 型二维范德华（vdW）反铁磁体（AFM），引起了人们极大的关注，但也引发了关于其大跨度有序温度的争议。我们通过表面灵敏的同步辐射 X 射线磁线性二色性和同步辐射 X 射线磁圆二色性测量，结合振动样品磁强计体磁化表征，对超高质量单晶 CrSBr 的磁相变进行了系统研究。我们发现表面和块体 CrSBr 的层间 AFM 有序在 132-142 K 范围内保持相似的 Néel 温度。然而，表面 CrSBr 层内铁磁（FM）有序一直维持到~238 K，比块体 CrSBr 的居里温度高 70 K，这表明 CrSBr 中的表面和块体内居里温度存在显著差异。此外，我们还确定了 CrSBr 中磁矩~3 $\mu$ B/Cr 的 Cr<sup>3+</sup>离子的半填充 t<sub>2g</sub> 电子态。我们的研究结果丰富了对 CrSBr 中电子结构和磁性的理解，为未来的自旋电子器件提供了有前景的板块。

**D12-P18****Enhancement of Perpendicular Magnetic Anisotropy in Tm<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(111) Epitaxial Films via Synergistic Stoichiometry and Strain Engineering**

Zhengguo Liang, Lingfei Wang\*

University of Science and Technology of China

Establishing a reliable control of perpendicular magnetic anisotropy (PMA) is challenging but essential for the full utilization of rare-earth iron garnets in spintronic devices. In this study, we present a feasible approach to enhance the PMA of ferrimagnetic thulium iron garnet (TmIG) films. This approach involves precise adjustments in cation stoichiometry and epitaxial strain state. By fine-tuning the pre-ablation process and oxygen partial pressure during pulsed laser deposition, we can grow a series of high-quality TmIG films with variable cation stoichiometry, i.e. the Tm/Fe molar ratio. Our finding reveals that cation stoichiometry plays a crucial role in determining the magnetic properties of the TmIG films. Particularly, the stoichiometric TmIG film has the strongest PMA due to the maximized magnetostriction coefficient. Combining this stoichiometry optimization and strain engineering, we achieved an unprecedented PMA strength of  $\sim 30 \text{ kJ/m}^3$  for TmIG. This achievement demonstrates a simple and effective method for harnessing the magnetic properties of rare-earth iron garnet films, paving the way for their advanced applications in next-generation spintronic devices.

**D12-P19****Interface-Engineered Oxygen Vacancy Channels in Epitaxial Brownmillerite Manganite Films**

Qiming Lv, Feng Jin, Lingfei Wang\*

Hefei National Research Center for Physical Sciences at the Microscale

Controlling ordered oxygen vacancies offers a promising approach to inducing emergent phenomena and novel functionalities in materials. However, achieving precise geometric control over oxygen vacancy channels (OVCs) in brownmillerite (BM) manganites, whether horizontally or vertically aligned, remains a challenge. Here, we demonstrate the modulation of OVC orientations—horizontal and vertical—in coherently epitaxial BM-La<sub>0.67</sub>Ca<sub>0.33</sub>MnO<sub>2.5</sub> thin films by varying the crystalline orientation of NdGaO<sub>3</sub> substrates, which share the same orthorhombic symmetry. Importantly, horizontal OVCs result in a sharp heterointerface with substrates, while vertical OVCs form an interface layer due to the necessity of oxygen connectivity across the interface. All these films can undergo reversible topotactic phase transitions to and from perovskite La<sub>0.67</sub>Ca<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>, accompanied by a crossover between half-metallic ferromagnetism and insulating antiferromagnetism. Furthermore, the modulated topotactic phase transitions are attributed to reduced manganese valence states, and the significant suppression of oxygen-manganese hybridization. These findings provide new insights into the design of oxygen-vacancy-engineered electronics with tunable properties, opening pathways for potential applications in memory devices and sensors.

闪报:

## D12-01

### 二维碲化铬磁性材料的腐蚀控制合成与磁性研究

夏宝瑞\*

兰州大学

近年来,诸如  $\text{CrI}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  具有本征铁磁性的二维材料在实验中被陆续合成与制备,为自旋电子学的研究带来了新的机遇与挑战。但是它们在空气中的稳定性较差,难以在实际应用中发挥应有的作用。基于此,一种较为稳定的非层状结构的碲化铬( $\text{Cr}_x\text{Tey}$ )材料引起了人们的关注,它们存在着多种物相结构和随着厚度可调控的居里温度(TC),有望为二维磁性材料的应用研究提供新的样本。本实验利用化学气相沉积我们制备了  $\text{CrTex}$  纳米片样品,通过调节实验参数观测了其在生长过程中的沉积-腐蚀分解-再沉积的现象及其特征的分形形貌,并在 100 K 下观察到了材料中的条纹畴结构。磁性表征结果显示,制备所得样品中在低温时存在着铁磁与反铁磁共存的特征,多相磁结构的耦合-解耦过程造成了条纹畴的出现。此外,通过高能离子辐照实验对沉积的纳米片样品进行了金属元素的掺杂,成功地使纳米片表现出了更高居里温度的铁磁相。

## D12-02

### 利用轨道霍尔效应翻转垂直磁矩以及模拟人工神经元和突触的研究

魏晋武\*

兰州大学

轨道霍尔效应(Orbital Hall effect, OHE)最近引起了人们的广泛关注,因为它有可能在自旋电子学的实际应用中产生轨道电流,从而实现磁性随机存储器中磁矩的电学操控和模拟人工神经网络的功能。最近的理论和实验研究表明,在轻金属中,即使没有强的自旋轨道耦合效应(SOC),OHE 也会产生显著的轨道流(JOH)。由于 OHE 的存在,纵向电荷流可以产生横向轨道流,并且当轨道流注入到相邻的铁磁体(FM)中时,它可以通过 SOC 转换为自旋流,并对 FM 中的磁矩产生力矩效应,称为轨道力矩(OT)。目前的研究表明,在磁性材料中,镍中轨道流转化为自旋流的效率要高于钴或铁。这促使人们选择镍基铁磁系统来开发和研究新型轨道电子器件。本工作中,我们围绕具有垂直磁各向异性的 Co/Ni 多层膜和轻金属 Ti 构成的材料体系,研究了轨道力矩翻转垂直磁矩的效率,以及模拟人工神经元和突触。

我们利用磁控溅射生长了  $\text{Pt}[\text{Co/Ni}]_x/\text{Ti}$  样品。为了定量表征 OHE 产生的有效场,我们进行了反常霍尔效应和二次谐波霍尔电压测量。实验结果表明,随着 Ti 层厚度的增加,有效场  $\Delta H_x$  与电流密度的斜率逐渐上升,由于 Pt 层中的电流密度由于分流效应而降低,因此 Ti 层产生的轨道力矩将占主导。经过计算,随着 Ti 层厚度的增加, Ti 层中每单位电流密度产生的有效场也随之上升。具体而言,对于 25 nm 的 Ti 层厚度,每单位电流密度产生的有效场约为 560 Oe per  $10^7 \text{ A/cm}^2$ ,轨道力矩的效率  $\xi_{\text{OT}}$  约为 0.25。

在面内磁场的辅助下,轨道力矩可以实现磁化翻转,翻转比率约为 60%。对于正(负)方向上的面内辅助磁场,翻转极性为逆时针(顺时针)的,临界翻转电流密度约为  $1.2 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 。相比之下,参考样品  $\text{Pt}[\text{Co/Ni}]_x/\text{Pt}$  中并没有观察到明显的磁化转换,这与对称 Pt 层结构中的自旋力矩效率非常低有关。除了展示有效的磁化翻转行为外,翻转回线还表现出一系列多态的反常霍尔磁电阻,表明轨道力矩实现的磁化翻转具有模拟人工神经元和突触的潜力。通过实验研究,通过改变写入脉冲电压的大小,这些回路清楚地展现出多个非易失性横向霍尔电阻,并且这种多状态响应反映了典型的忆阻行为,结果曲线类似于众所周知的 sigmoid 函数。实验数据与 sigmoid 函数吻合良好,表明实验结果有效地模拟了人工神经元的行为。此外,在基于多态翻转的人工神经网络中,通过脉冲序列持续控制,可以模仿突触行为,包括长期抑制(LTD)和长期增强(LTP)等行为。本研究工作一方面提高了对轨道力矩的认识,另一方面为开发基于 OHE 的新型轨道电子器件提供了研究基础。



**D12-03****A Low-Cost Thermogravimetric Approach for Semi-Quantitative Control of Magnetic Phases: Case Study on  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Fe-Si-O Xerogels**Yifan Wang<sup>\*1</sup>, Evgeny Gorbachev<sup>1</sup>, Liudmila Alyabyeva<sup>2</sup>

1. Shenzhen MSU-BIT University

2. Laboratory of Terahertz Spectroscopy, Center for Photonics and 2D Materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia.

In the field of materials production, optimizing preparation conditions to achieve materials with superior performance and higher yields has long been a goal for scientists. Magnetic materials, with their unique properties, find widespread applications in modern society, such as in data storage, communications, healthcare, and spintronics. However, conventional sample detection methods face limitations, including long processing times, high costs, sample damage, and limited sensitivity. Therefore, developing accessible alternatives for real-time monitoring is crucial for advancing materials research from both fundamental and industrial perspectives.

In this study, we developed a strategy for semi-quantitative phase analysis using a thermogravimetric analyzer equipped with a permanent magnet, focusing on Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> polymorphs ( $\alpha$ -,  $\gamma$ -,  $\epsilon$ -) embedded in a silica matrix. The initial samples were Fe-Si-O xerogels containing 10, 20, 30, 40, and 50 wt% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Thermogravimetric cycling under a gradient magnetic field was performed across multiple temperature ranges (900–1100 °C), with systematic variations in the final cycle temperatures (900–1100 °C) and isothermal durations (0–20 h). In this methodology, each curve kink is attributed to the critical point of a specific magnetic phase ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:  $T_N \approx 950$  K;  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:  $T_N \approx 840$  K;  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:  $T_N \approx 490$  K), with the transition magnitude proportional to the phase concentration. This work successfully established a model, advancing the idea to a quasi in situ approach that enables the acquisition of phase composition information during cyclic heat treatment of the sample through analytical signals.

The results, validated by powder XRD, magnetometry, and particle size measurements, showed excellent consistency. The proposed method is suitable for magnetic systems exhibiting phase transitions and distinct the Neel temperatures among phases. In the case of these samples, XRD demonstrated better sensitivity to weakly ferromagnetic  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, while the proposed method exhibited significantly higher sensitivity to  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is a material with low raw costs, high coercivity, and ferromagnetic resonance frequency, yet its metastability poses challenges for industrial applications. The measurements revealed that the content of  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> increased with higher annealing temperatures and remained relatively stable during prolonged isothermal annealing at 1100°C. The highest yield of  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (approximately 0.3 g per gram of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@SiO<sub>2</sub>) was observed in xerogels containing 30 and 40 wt% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

The research was supported by Russian Science Foundation grant No. 24-79-10053.

仅发表全文:

## D12-PO01

### 分子吸附 C4N3 单层有机自旋无隙半导体的设计

赵冬秋\*

安阳师范学院

自旋无隙半导体 (SGS) 是一类零带隙材料, 具有完全自旋极化的电子和空穴, 在自旋电子学、电子学和光电子学中具有用于高速、低能耗应用的显著潜力。本文应用第一性原理计算表明, Pca21 C4N3 单层表现出铁磁基态。其能带结构展现出类似 SGS 的特征, 自旋向下通道的价带和导带之间的能隙在费米能级附近比另一个自旋通道的小得多。为了增强其 SGS 特性, 我们通过在其表面吸附 CO 气体分子向 Pca21 C4N3 单层引入电子。稳定的气体吸附 (CO@C4N3) 有效地缩小了自旋向下通道的带隙, 而对自旋向上通道带隙的改变不明显。此外, 向 CO@C4N3 系统注入空穴可以增加净磁矩并诱导 SGS 到金属相变, 而向 CO@C4N3 系统注入电子则可以降低净磁矩并导致 SGS 到半金属相变。该研究不仅强调了一种新型有前途的材料用于实际无金属自旋电子学应用, 还展示了一条可行的设计 SGS 的途径。

## D12-PO02

### 二次固溶对 2:17 型钐钴永磁材料磁性能的影响

朱生志\*<sup>1</sup>、祁永梅<sup>2</sup>、岳智文<sup>2</sup>、仁青立志<sup>2</sup>

1. 青海理工学院工学院

2. 青海大学机械工程学院

2:17 型钐钴永磁材料具有良好的磁性能和高居里温度, 被广泛应用于航空航天、雷达通讯和石油化工等领域。本文制备了名义成分为  $\text{Sm}_{24}\text{Co}_{51}\text{Fe}_{16}\text{Cu}_6\text{Zr}_3$  (wt%) 的合金, 对固溶态合金进行了不同时间的二次固溶处理, 随后进行等温时效处理。发现合金的剩磁  $B_r$ 、内禀矫顽力  $H_{cj}$  和最大磁性能  $(BH)_{\max}$  均随着二次固溶处理时间的增加, 呈现先降低再增加的趋势, 并在 1180 °C 二次固溶处理 2 h 后磁性能达到最低:  $B_r = 11.13$  kGs,  $H_{cj} = 33.33$  kOe,  $(BH)_{\max} = 24.16$  MGOe。继续延长二次固溶处理时间至 8 h, 合金的磁性能得到全面提高:  $B_r = 11.84$  kGs,  $H_{cj} = 34.86$  kOe,  $(BH)_{\max} = 32.93$  MGOe。上述结果为提高 2:17 型钐钴永磁材料的性能提供重要参考。

## D12-PO03

### 轴对称纳米流体自然对流与热传递的格子-Boltzmann 模型

朱玉麒、胡洋\*

北京交通大学

本文提出了一种用于模拟轴对称纳米流体自然对流与热传递的格子玻尔兹曼模型。构造了两个多松弛时间模型来求解柱坐标系下的 Navier-Stokes 方程和能量方程, 并对上述模型进行了调整, 使其能够用于匀强梯度磁场作用下的数值模拟。在结果和讨论部分, 首先检验了温度场和流场的控制方程, 本文数值模拟结果与解析解和参考文献的数值解匹配较好。然后通过 Cu-H<sub>2</sub>O 纳米流体自然对流以及 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O 纳米流体自然对流算例分析了瑞利数、纳米颗粒体积分数、以及磁场数对等温线、壁面努塞尔数、以及纳米流体流速产生的影响。结果表明, 该模型能较好地反映纳米流体流动过程中的温度场与流场变化特性。