

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

July 8-11, 2024  
Guangzhou, China

**D12-先进磁性功能材料**  
**D12-Advanced Magnetic Functional**  
**Materials**

**Organized by**

Chinese Materials Research Society

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

## D12. 先进磁性功能材料

分会主席：王守国

### D12-01

#### 二维磁性纳米材料的化学合成及其磁性调控

侯仰龙<sup>1,2\*</sup>

1. 中山大学
2. 北京大学

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。

### D12-02

#### 80 纳米斯格明子在 100 纳米轨道中的稳定运动

杜海峰<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院合肥物质科学研究院

电流驱动磁斯格明子沿纳米条带的运动对于新型赛道类自旋电子器件的发展至关重要。尽管对斯格明子的运动进行了广泛研究，但超小斯格明子在超窄纳米条带内的电流驱动运动的实验验证仍未实现。在此，我们揭示了在宽度仅为 100 纳米的 FeGe 纳米条带中单个 80 纳米大小的斯格明子的运动。通过使用低至 2 纳秒的控制脉冲宽度，我们观测到斯格明子能够在广泛的电流密度范围内沿轨道稳定移动。这种几何限域系统中磁性边缘扭曲产生的势能引入了斯格明子惯性，并确保了斯格明子运动无霍尔角。

### D12-03

#### 磁性范德瓦尔斯材料中的 DMI 设计

侯志鹏<sup>1\*</sup>

1. 华南师范大学

Realizing room-temperature magnetic skyrmions in two-dimensional van der Waals ferromagnets offers unparalleled prospects for future spintronic applications. However, due to the intrinsic spin fluctuations that suppress atomic long-range magnetic order and the inherent inversion crystal symmetry that excludes the presence of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction, achieving room-temperature skyrmions in 2D magnets remains a

formidable challenge. In this study, we target room-temperature 2D magnet  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  and unveil that the introduction of iron-deficient into this compound enables spatial inversion symmetry breaking, thus inducing a significant Dzyaloshinskii-Moriya interaction that brings about room-temperature Néel-type skyrmions with unprecedentedly small size. To further enhance the practical applications of this finding, we employ a homemade in-situ optical Lorentz transmission electron microscopy to demonstrate ultrafast writing of skyrmions in  $\text{Fe}_{3-x}\text{GaTe}_2$  using a single femtosecond laser pulse. Our results manifest the  $\text{Fe}_{3-x}\text{GaTe}_2$  as a promising building block for realizing skyrmion-based magneto-optical functionalities.

#### D12-04

##### 电磁兼容材料设计及应用研究

张雪峰<sup>1\*</sup>

1. 杭州电子科技大学

电磁兼容材料是解决现代电子系统中电磁干扰、辐射等问题的关键基础材料，是实现电子信息装备小型化、雷达隐身的重要支撑，在国防军工、航空航天领域存在重大需求，同时也是消费电子、5G 通讯等高端民用领域的基础功能材料。然而其工作频段受到斯诺克极限等限制，已无法满足目前通讯高频化、场景复杂化和器件小型化的应用需求。我们提出异质界面电磁极化新理论，开发原位表面包覆新技术，克服电磁兼容材料高频响应下的斯诺克极限难题。提出多离子联合替代新思想，发现微观局域结构电荷密度差异性分布，揭示对称性破缺诱导电偶极子来增强介电损耗的物理机制，建立宽带电磁兼容材料的设计原则。同时也在推动基础研究的工程应用，开发了系列高频宽带核@壳结构复合型吸波/屏蔽材料，并在 5G 基站等电子信息装备中实现应用。

#### D12-05

##### 拓扑磁性及多场调控的最新进展

王守国<sup>1\*</sup>

1. 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  $\text{Fe}_{5-x}\text{GeTe}_2$  单晶材料和垂直磁性霍尔天平材料。重点关注居里温度可调的  $\text{Fe}_{5-x}\text{GeTe}_2$  单晶拓扑磁结构，首次在 180 度畴壁处自发拓扑（反）麦纽（Anti)meron 链的形成；随后重点介绍霍尔天平材料体系中新发现的拓扑磁性斯格明子，利用中国散裂中子源大科学装置首次证实了垂直霍尔天平材料中具有角度可控的倾斜磁矩。

报告人在第二部分将重点介绍垂直各向异性  $L1_0\text{-FeCrPt}$  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。

#### D12-06

##### 关联电子材料对称性的人工操控

张金星<sup>1\*</sup>

1. 北京师范大学

对物质对称性的操控是研究凝聚态物理和创造全新功能的重要基础。然而，传统天然晶体受限于自身

的固有结构，难以改变或控制其对称性。因此，亟待找到全新的手段，精确操控材料的对称性，进而人工设计并创造所需的功能特性及其器件应用。近十年来，汇报人在北师大建立的研究小组提出利用表/界面化学、梯度/动态应变、人工超晶格等手段控制关联电子材料的对称性，进而实现多铁性低维畴结构的有序构筑和低功耗调控。在本汇报中，我将着重介绍在关联电子体系中有效创造对称破缺和 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用，在非对称超晶格中 (non-equivalent superlattice)，同时实现了时间反演和空间反演对称性的破缺，进而带来了由界面 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用诱导的磁电相变。针对这种普适的对称性操控手段以及所衍生的物理现象，我还将跟大家共同探讨它们在新概念、高性能信息器件领域的潜在应用。

## D12-07

### 多孔磁性纳米材料制备和表征

于永生<sup>1\*</sup>

1. 哈尔滨工业大学

锶铁氧体因其性价比高、耐化学腐蚀性好、永磁性能适中等优点近年来引起了人们的广泛关注，其晶体结构中丰富的亚晶格位点为金属阳离子取代改善永磁性能提供了无限可能，然而，锶铁氧体的矫顽力和稀土永磁体相比仍有一定的差距。因此，我们基于自蔓延燃烧法制备了稀土离子和  $\text{Al}^{3+}$  共取代的锶铁氧体多孔材料，显著改善了锶铁氧体的永磁性能。在  $\text{Al}^{3+}$  单独取代锶铁氧体时， $\text{Al}^{3+}$  的取代使锶铁氧体的晶粒大小降低到单畴临界尺寸附近，多孔结构确保了这些单畴晶粒磁矩反转主导的矫顽力机制并降低了晶粒之间的磁相互作用，Fe-O-Fe 结构逐渐被 Fe-O-Al 结构替换引起超交换作用和饱和磁化强度的降低以及非共线自旋成分的增加，因此，矫顽力逐渐增大， $\text{SrFe}_7\text{Al}_5\text{O}_{19}$  多孔材料的矫顽力达到 33 kOe，但随着  $\text{Al}^{3+}$  取代量的进一步增加， $\text{SrFe}_{6.5}\text{Al}_{5.5}\text{O}_{19}$  多孔材料的磁滞回线表现出类自旋玻璃态的直线型磁化和退磁行为，矫顽力开始降低。在  $\text{SrFe}_7\text{Al}_5\text{O}_{19}$  的基础上引入稀土离子，研究发现，15 种稀土元素离子分别与  $\text{Al}^{3+}$  共取代的锶铁氧体多孔材料的矫顽力均得到了进一步的提高，其中  $\text{Y}^{3+}$  取代量为 0.06 时  $\text{Sr}_{0.94}\text{Y}_{0.06}\text{Fe}_7\text{Al}_5\text{O}_{19}$  多孔材料的矫顽力达到 40.7 kOe，是目前已知铁氧体领域未进行磁取向时的最高矫顽力。 $\text{Y}^{3+}$  取代锶铁氧体中的  $\text{Sr}^{2+}$  引起阳离子空位缺陷，缺陷处的局部应力集中使其矫顽力进一步得到提高。该工作为制备高性能永磁铁氧体提供了重要指导意义。

## D12-08

### 二维半导体 MoS<sub>2</sub> 中的分数量子霍尔效应

韩拯<sup>1\*</sup>

1. 山西大学

寻找实现高迁移率二维半导体的方法或材料体系，是凝聚态物理乃至纳米电子学的一个重要研究方向。众所周知，自量子霍尔效应首次在量子阱高迁移率二维电子气中被发现以来已逾 40 年。截止目前，人们已知可实现量子霍尔或分数量子霍尔效应的二维电子体系依然非常有限。其中，高迁移率二维本征半导体的低温基态在电输运上尤为难以实现，主要瓶颈在于欧姆接触的获得非常困难。本报告将介绍我们在二硫化钼的 N 型半导体场效应晶体管的低温欧姆接触稳定可靠制备方面的最新进展，相关器件在 mK 温度、强磁场下可观测到填充系数  $\nu=1$  的量子极限和  $2/3$ 、 $1/3$  填充的分数量子化横向电导平台。这是能够通过电输运（除拓扑转角电子体系外）观测到分数量子霍尔效应的首个二维本征带隙 N 型半导体材料。该实验结果为基于二维半导体的低温基态下高迁移率电子晶体管 (HEMT)、低温放大器等纳米电子学器件提供了可能。

## D12-09

### 低维材料构筑与超常物性

周家东<sup>1\*</sup>

1. 北京理工大学

二维材料因其丰富的种类和结构多样使其表现出优异的物理性质如铁磁、铁电、超导等。因此二维材料在诸多领域包括晶体管、光电传感器、高性能自旋电子学器件等领域有着潜在的应用价值。如何从原子层次制备和构筑二维材料是实现其应用的关键。本报告主要聚集新型二维材料的原子制造与性质研究。具体包括：1)开发普适的方法实现多组分及多相的二维超导、铁磁与反铁磁材料的制备，基于此实现磁性和超导的调控，并研究其在光电器件中的应用，2)化学气相沉积方法制备磁性 Cr 基硫族化合物的不同相和组成，如 CrTe, CrTe<sub>2</sub>, Cr<sub>5</sub>Te<sub>8</sub> 等，深入研究二维 Cr 基材料的结构与磁学性能之间的关系，3)化学气相沉积方法合成 Cr 基插层二维铁电材料并研究其铁电特性。

## D12-10

### 铁基磁致伸缩材料大磁致伸缩效应机理及高性能单晶生长

吴煜焯<sup>1</sup>, 徐一琛<sup>1</sup>, 牛洁珏<sup>1</sup>, 颜克愚<sup>1</sup>, 蒋成保<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学

在纯铁中加入少量无磁性元素 Ga 形成的 FeGa 磁致伸缩材料，磁致伸缩应变相比纯 Fe 提高了十倍。研究表明，Ga 的加入在微观结构上主要引起两种变化，一部分 Ga 固溶在体心立方晶格中，形成无序体心立方基体；另一部分 Ga 形成了四方的局域化学有序的纳米异质结构并弥散分布在基体中。第一性原理研究表明，固溶态的 Ga 原子引起 FeGa 合金晶格软化以降低磁致伸缩性能的“阻力”，体现为弹性常数  $c_{11}$ - $c_{12}$  数值的减小；四方局域化学有序纳米异质结构会显著增强磁弹耦合作用，增大磁致伸缩性能的“动力”；两者的协同作用共同诱导了 FeGa 合金的大磁致伸缩性能。进一步研究表明，在 FeGa 中固溶微量稀土原子可进一步提升磁致伸缩性能，然而在近平衡态条件下，单晶生长和稀土原子固溶难以同时实现。因此，我们自主设计研制了快速定向凝固装备，可实现在远平衡快速凝固条件下生长单晶材料。三维原子探针层析结果表明，稀土原子以固溶态形式存在。单晶材料性能达到 489 ppm，显著优于现有定向凝固技术所制备单晶材料的磁致伸缩性能。

## D12-11

### 高 Fe 含量 2:17 型 Sm-Co 永磁合金高性能化研究

张天丽<sup>1</sup>, 胡明尧<sup>1</sup>, 席龙龙<sup>1</sup>, 蒋成保<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学

2:17 型 Sm-Co 永磁合金具有居里温度高、稳定性好、内禀矫顽力大的特点，但其饱和磁化强度偏低限制了其应用。通过 Fe 元素替代 Co 元素提高 2:17 型 Sm-Co 永磁合金的饱和磁化强度，理论上有助于实现高磁能积，同时降低材料成本，因此逐渐成为研究人员关注的重点。但研究发现，Fe 含量超过一定值反而导致 2:17 型 Sm-Co 磁体的内禀矫顽力快速恶化，从而阻碍了磁体最大磁能积的提升。深入研究了 Fe 含量增加带来的 2:17 型 SmCo 磁体固溶态相结构和微观结构变化及其对应的时效产物改变。揭示了 Fe 含量对 2:17 型 SmCo 磁体固溶态相组成和相结构的影响机制，探究了不同时效产物与固溶态微观结构的关联性，为高 Fe 含量 2:17 型 SmCo 磁体的高性能设计和制备提供支撑。

## D12-12

### 钕钴磁体中的结构缺陷：作用、演化及调控

宋欣<sup>1</sup>, 李健<sup>1</sup>, 马志毅<sup>1</sup>, 马天宇<sup>1</sup>

1. 西安交通大学

位错和层错作为常见的结构缺陷在金属材料中广泛存在，并对材料的力学性能产生重要影响，因此，基于结构缺陷的金属强韧化理论和方法发展较为成熟。相对而言，结构缺陷对材料功能特性的作用研究还很成熟。本报告以畴壁钉扎型永磁材料——Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> 烧结磁体为例，探讨位错和层错等结构缺陷对磁性能的作用机理、它们的演化过程和调控方法等。首先，结构缺陷聚集区使局部自由能升高，导致非均匀退

磁过程，从而不利于矫顽力和退磁曲线方形度。其次，原位同步辐射 XRD 和高分辨 TEM 结果表明，六方  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  相到菱方  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  相的转变以及  $\text{SmCo}_5$  相的共析出（即相分解过程），同时需要原子扩散和不全位错滑移，从而表明结构缺陷是扩散-位移混合型固态相变不完全的产物。最后，基于缺陷对析出相形核与生长的协同作用，建立了压应力时效、形核温度附近预时效和快速升降温预处理等工艺，使  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型磁体在分解之前保持高密度缺陷状态，在增多  $\text{SmCo}_5$  析出相的同时，大幅减少了不利于矫顽力的残余结构缺陷，显著提高了磁体的磁性能。

### D12-13

#### 轻稀土掺杂的低成本高性价比烧结钕铁硼磁体的性能与组织结构的关系

姬欣怡<sup>1</sup>，张澜庭\*<sup>1</sup>，刘梅<sup>1</sup>，朱虹<sup>1</sup>，张安绮<sup>1</sup>，董占吉<sup>2</sup>，彭众杰<sup>2</sup>，刘健<sup>3</sup>，钟兆喆<sup>3</sup>

1. 上海交通大学
2. 烟台东星磁性材料股份有限公司
3. 丰田汽车技术研发（上海）有限公司

为了实现驱动电机工作温度（~150°C）下保持较高的磁性能，我们前期的工作报道了利用主动学习的策略通过三轮迭代开发轻稀土掺杂的低成本高性价比烧结钕铁硼磁体，本工作主要报道在三轮迭代中实验制备磁体的典型化学成分、组织结构与性能的关系。我们在伪三元 RE-TM-B（RE=NdPr, La, Ce, Y）（TM=Fe, Co, Ni）成分空间内设计了 24 个  $(\text{Nd}_{80}\text{Pr}_{20})_{30.80-x-y-z}\text{La}_x\text{Ce}_y\text{Y}_z\text{Fe}_{66.67-u-w}\text{Co}_u\text{Ni}_w\text{B}_{0.96}\text{M}_{1.57}$ （M=Al, Cu, Ga, Ti, wt.%）成分的样品作为迭代起点，这些磁体中除主相  $\text{RE}_2\text{TM}_{14}\text{B}$  外，在三叉晶界处还形成了 fcc  $\text{NdO}_x$ 、 $\text{La}_3\text{NdO}_x$ 、 $\text{NdFe}_4\text{B}_4$ 、 $\text{RETM}_2$  Laves 相，主相晶粒尺寸为 4.12~4.69  $\mu\text{m}$ ，部分磁体晶界处缺乏均匀且连续的富稀土晶界相导致矫顽力低。经模型迭代推荐了第一轮  $\text{Ce}_4\text{Co}_{7.2}$ 、 $\text{La}_{10.5}\text{Co}_{10.2}\text{Ni}_{4.4}$ 、 $\text{La}_{10.5}\text{Ce}_{2.6}\text{Co}_{10.2}\text{Ni}_{4.4}$  三个磁体成分，La、Ce 元素倾向于在晶界相中偏聚，形成  $\text{NdO}_x$  和  $\text{REFe}_2$  相，减低主相含量，导致磁体室温 Br 降低。为优化 Br，算法推荐了  $\text{La}_{5.3}\text{Co}_{9.2}\text{Ni}_{0.7}$ 、 $\text{La}_{8.8}\text{Co}_{10.2}\text{Ni}_{2.2}$ 、 $\text{La}_{12.3}\text{Co}_{10.2}\text{Ni}_{3.0}$  作为第二轮成分，发现  $\text{REO}_x$  和  $\text{REFe}_2$  相主要富集在三叉晶界处，不仅降低主相的含量，还缺乏连续的晶界相，导致室温 Br 和  $\text{H}_{\text{cJ}}$  降低。在上述 2 轮推荐的 6 种成分磁体中，发现只有  $\text{Ce}_4\text{Co}_{7.2}$  磁体表现出优于原始不掺杂磁体的高温（150°C） $\text{H}_{\text{cJ}}$ ，同时大部分磁体都存在  $\text{H}_{\text{cJ}}$  偏低的问题，扫描电镜分析显示微观结构中缺少薄层晶界相。为提高  $\text{H}_{\text{cJ}}$ ，模型进一步推荐了第三轮  $\text{Ce}_{1.33}\text{Co}_{1.03}$ 、 $\text{La}_{1.76}\text{Ce}_{1.33}\text{Ni}_{0.37}$ 、 $\text{Ce}_{6.62}\text{Y}_{0.53}\text{Co}_{1.03}$  磁体成分，主相晶粒间形成明显连续的晶界相，起到强的去磁隔离作用，提高磁体的  $\text{H}_{\text{cJ}}$ 。前两组成分的磁体与不掺杂磁体对比，在成本近似及减少 10% 的基础之上，室温和高温（150°C）Br 接近不掺杂磁体，且室温和高温（150°C）的  $\text{H}_{\text{cJ}}$  明显提高，由此实现了与磁体化学成分、组织结构相关的剩磁与矫顽力的协同优化。

### D12-14

#### 重温 Nd-Fe-C 稀土永磁合金

范佳宁<sup>1</sup>，周帮<sup>1</sup>，余红雅<sup>1</sup>，刘仲武\*<sup>1</sup>

1. 华南理工大学

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$  化合物具有比  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  更高的磁晶各向异性场，因此，Nd-Fe-C 合金是很有前景的永磁材料。但是，除了早期的一些工作<sup>[1,2]</sup>，长期以来，对 Nd-Fe-C 永磁的研究非常缺乏。本文系统研究了熔体快淬 Nd-Fe-C 合金的成分工艺对组织和磁性能的影响。

结果表明，Nd-Fe-C 合金与 Nd-Fe-B 合金在成相规律和冶金行为方面有显著差异。和 Nd-Fe-B 合金不同，直接快淬很难得到  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$  硬磁相，直接快淬的 Nd-Fe-C 合金由软磁  $\alpha\text{-Fe}$  相与  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$  相组成。通过高温短时间热处理可析出硬磁相，提升硬磁性能。但是，Nd-Fe-C 合金的相组成对成分十分敏感。在最佳热处理工艺下， $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{84}\text{C}_6$  合金以  $\alpha\text{-Fe}$  相为主相，同时含有少量的  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$  和  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$  相，矫顽力仅为 28 kA/m； $\text{Nd}_{12}\text{Fe}_{82}\text{C}_6$  合金中形成了  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$  相与  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$ 、 $\alpha\text{-Fe}$  相共存的纳米复合结构，具有明显的剩磁增强效应，矫顽力为 425 kA/m； $\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{80}\text{C}_6$  合金中  $\alpha\text{-Fe}$  相消失，相组成为  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$  和  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$  相，矫顽力为 539 kA/m。此外，热处理前合金的结晶状态对 Nd-Fe-C 合金的显微结构和磁性能影响显著，

已晶化的合金退火后矫顽力高于过淬合金。由于软磁相的存在，Nd-Fe-C 合金的退磁曲线普遍存在“塌肩”现象。最后，通过 B 和 Cu 协同调控优化了 Nd-Fe-C 合金的显微结构，获得了方形度良好的退磁曲线，Nd<sub>14</sub>Fe<sub>79.5</sub>Cu<sub>0.5</sub>C<sub>5</sub>B<sub>1</sub> 合金的矫顽力 H<sub>cj</sub>=1256 kA/m，剩磁 J<sub>r</sub>=0.77 T，最大磁能积(BH)<sub>max</sub>=102.2 kJ/m<sup>3</sup>。

## D12-15

### Tb 基合金晶界扩散改善烧结钕铁硼磁体矫顽力和耐腐蚀性的研究

许翊莘<sup>1</sup>，张许行<sup>1</sup>，余红雅<sup>1</sup>，刘仲武\*<sup>1</sup>

#### 1. 华南理工大学

钕铁硼永磁需要应用于不同的工作环境，提升磁体的稳定性和耐腐蚀性对于延长其服役寿命具有重要意义。晶界扩散技术是获得高性能钕铁硼磁体的有效方式，通过设计重稀土-非稀土合金扩散源，有望开发高矫顽力和强耐腐蚀性的钕铁硼磁体<sup>[1,2]</sup>。然而，不同非稀土元素的成相和分布规律尚不明确，与重稀土元素的协同作用尚不清晰。本文研究了 Al、Ni 两种非稀土元素对 Tb 元素扩散及磁体耐腐蚀性的影响。

本文以 54M 烧结钕铁硼磁体作为基材，通过晶界扩散 Tb 基合金 (Tb-Al、Tb-Al-Ni、Tb-Ni)，同时提高了磁体的矫顽力和耐腐蚀性。研究表明，Tb-Al-Ni 扩散对矫顽力和耐腐蚀性提升效果最佳。相比原始磁体，其矫顽力增量为 859 kA/m，腐蚀电流密度降低了 98 %。微观分析表明，主相晶粒表面形成了高各向异性(Nd,Tb)<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 壳层，能有效抑制晶粒表面反磁化畴的形核。Ni 元素通过晶界深入扩散进磁体内部，弥散分布于磁体的三角晶界中，通过在晶界形成 RE<sub>3</sub>Ni 相，提高了磁体晶界相的电位及化学稳定性，减小主相与晶界相的电位差。分层电化学测试的结果表明不同深度处磁体的耐腐蚀性皆有提升，磁体中心的腐蚀电流密度相比原始磁体降低了 74 %，证明 Ni 元素深度扩散提高了整个磁体的耐腐蚀性。Al 元素一部分进入主相，提高主相晶粒的各向异性场，另一部分偏析于晶界中，起润湿作用，减小了主相表面的缺陷。此外，Al 和 Ni 元素的协同扩散为 Tb 元素提供扩散通道，提高了其扩散效率。研究结果为进一步开发高环境稳定性钕铁硼永磁提供了理论和实验依据。

## D12-16

### Mechanically robust high magnetic performance Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> sintered magnets via microstructure modification with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doping

Lei Wang<sup>1</sup>, Qiangfeng Li<sup>1</sup>, Meng Zheng<sup>1</sup>, Ze Duan<sup>1</sup>, Minggang Zhu<sup>1</sup>, Yikun Fang\*<sup>1</sup>, Wei Li<sup>1</sup>, Youhao Liu<sup>2</sup>, Xiaofei Yi<sup>2</sup>

1. Division of Functional Materials Research, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing

2. State Key Laboratory of Rare Earth Permanent Magnetic Materials, Earth-Panda Advanced Magnetic Material Co.

Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>-type magnets have high magnetic energy density, high intrinsic coercivity, good corrosion resistance, and excellent thermal stability. However, the microstructures of the magnets are unique cellular one with hexagonal 1:5 cell boundary phase, rhombohedral 2:17R cell phase and rhombohedral 1:3 lamellar phase. The hexagonal and rhombic crystal systems are difficult to plastic deformation due to the low number of slip systems. Thus, the magnets have intrinsic brittleness and are prone to brittle transgranular cleavage. making them difficult to adapt to high stress, vibration or mechanical shock applications. In this work, a small amount of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders (≤ 0.3 wt%) were incorporated into the Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>-type sintered magnets, obtaining with both high mechanical and magnetic properties. It is found that 0.1 % weight percentage of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doping is enough for enhancing the flexural strength by about 20% (~ 180 MPa for the case of c-axis parallel to height). Meanwhile, the (BH)<sub>max</sub> remains around 219 kJ/m<sup>3</sup>, H<sub>cj</sub> is 2052 kA/m, which is over 95% of that of the original magnets without doping. The promising improvement in flexural strength is mainly attributed to the grain size effective refinement caused by Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles including newly-formed ones from the reaction of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder and Sm in the matrix. Furthermore, the grain size of the magnets decreases significantly with increasing of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

doping up to 0.3 wt%. Especially, the grain size of 0.3 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  doped-magnets is refined by 37%. However, the flexural strengths (for c-axis parallel to height and c-axis parallel to width cases) of the magnets decrease sequentially and are even lower than that of the original magnet. The microstructure investigations indicate that the decrease in flexural strength is may closely correlated to the larger cell size and the incomplete cell boundaries phase. The obtained results infer that the flexural strength is susceptible to not only grain size but also cellular structure of the magnets.

## D12-17

### 钕铁硼永磁选区晶界扩散及其退磁机制研究

张许行<sup>1</sup>, 刘相熠<sup>1</sup>, 蒋杰<sup>1</sup>, 邱万奇<sup>1</sup>, 刘仲武\*<sup>1</sup>

1. 华南理工大学

选区晶界扩散 (SAGBD) 作为一种新型晶界扩散技术, 能够大幅提高厚钕铁硼磁体的矫顽力, 引起了广泛的研究兴趣, 然而目前选区晶界扩散磁体的退磁机制缺乏系统地研究。本文利用 Tb-Cu 合金晶界扩散剂, 采用不同晶界扩散方法 (传统 c 面扩散、顶点扩散、选区扩散、选区 c 面扩散和选区 ab 面扩散) 处理了不同厚度的钕铁硼磁体, 研究了其磁性能、微观结构、元素分布及退磁过程, 分析了选区晶界扩散的影响机制。研究表明, 针对厚度为 5、7.5、10 和 12.5mm 的磁体, 最佳扩散方法分别为 c 面扩散、c 面扩散、选区扩散及选区 ab 面扩散。随着磁体厚度的增加, c 面扩散处理的磁体的矫顽力和方形度逐渐下降, 但顶点扩散和选区扩散的增强作用逐渐明显, 这主要归因于有效扩散区域的增加。对于 12.5mm 厚的磁体, 选区 ab 面扩散表现最高的重稀土扩散效率, 分别为 c 面扩散的 2.9 倍和选区 c 面扩散的 3.8 倍。分析了 c 面扩散和 a 面扩散磁体, 选区扩散并没有表现出明显的各向异性扩散。通过对微观结构及磁体的退磁过程进行分析, c 面扩散只能有效抑制退磁畴在 c 面的形核及扩展, 顶点扩散能够直接抑制退磁畴在顶点附近的直接形核及扩展, 而选区扩散能够显著抑制退磁畴在 a 面的形核及扩展。

## D12-18

### 反斯格明子低电流密度直线驱动研究

张颖<sup>1</sup>, 何至东<sup>1</sup>, 沈保根<sup>1</sup>

1. 中国科学院物理研究所

大数据、智能化的信息时代迫切需要高密度、高速度、低功耗的新型磁性信息单元和信息处理方法。磁矩呈涡旋状排列的拓扑斯格明子 (skyrmion)、反斯格明子 (antiskyrmion)、磁浮子 (bobble)、磁麦勃 (meron) 等新型拓扑磁畴结构的发现、新奇拓扑磁性的研究、以及新型拓扑磁性材料的探索, 引起了学术界和产业界的高度关注。基于电流驱动磁畴结构运动来实现数据信息传输寻址功能的拓扑磁赛道存储等新型自旋电子学器件有望解决传统磁性存储瓶颈问题, 实现低功耗、高密度信息存储功能。然而, 电流作用下铁磁材料中的 (反) 斯格明子会受到内禀 (反) 斯格明子霍尔效应的马格努斯力而侧向偏转甚至湮灭, 成为限制其实际应用的关键问题。

长期以来铁磁背底中的反斯格明子需要磁场稳定且很难实验实现电流驱动, 困扰着反斯格明子的进一步深入研究。针对这一难点问题, 本研究组通过调控将反斯格明子限域在具有天然直线轨道的条形磁畴中, 利用局部磁矩转动带动整体移动, 类似位错滑移的有效方法, 率先在国际上实现了反斯格明子电流驱动的突破, 且同时具有室温、零磁场、低功耗、直线运动的特性, 解决了 (反) 斯格明子霍尔效应偏转的瓶颈问题。微磁学模拟从条形磁畴限域效应和集体钉扎理论两方面验证和解释了拓扑磁畴结构在铁磁和螺磁畴背底下的电流驱动行为。该方法具有很好的普适性, 为克服斯格明子霍尔效应偏转, 零场、低功耗驱动拓扑磁畴结构直线运动的原理性器件设计提供了实验和理论依据, 开拓了新思路。

## D12-19

### Omnidirectional emergent electromagnetic induction in a short-period helimagnet MnCoSi

Yong Chang Lau<sup>1</sup>

1. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

Helimagnet is an ideal platform for studying the intricate interplay between chirality, topology, magnetism, and electronic transport. Recently, sizeable emergent electromagnetic induction was found in a few helimagnets with short-period helical order (e.g.  $\text{Gd}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$  and  $\text{YMn}_6\text{Sn}_6$ ), pathing a route towards the realization of a scalable, integrated quantum inductor that produces no stray field to the surrounding.

In the talk, I will present our recent progress on a non-chiral centrosymmetric magnetic functional material  $\text{MnCoSi}$ , including the direct observation of short-period helical order in  $\text{MnCoSi}$  using Lorentz Transmission Electron Microscopy, the modulation of its helical pitch and magnetic transformation temperature via uniaxial strain, and the surprising observation of omnidirectional emergent electromagnetic induction in  $\text{MnCoSi}$  at room temperature.

**D12-20****手性磁结构诱导拓扑磁阻效应**张伦勇<sup>1</sup>

1. 哈尔滨工业大学

磁斯格明子等拓扑手性磁结构及其材料将支撑未来电子信息技术的发展，对此类具有特殊拓扑结构的磁态的电学效应的研究为其进一步的电学探测提供基础，是目前该领域研究的重要内容之一。基于纵向电阻与横向霍尔的耦合关系，我们近期细致研究了部分手性磁结构材料在手性磁结构成相区的异常磁阻效应。实验探测到磁斯格明子成相区内异常磁阻的产生，揭示出该异常磁阻与手性磁结构产生演化的关系，发现采用近来提出的基于量子相干输运修正理论的手性磁结构磁阻效应模型可对实验探测到的异常磁阻予以很好描述，证明了手性磁结构诱发的拓扑磁电阻效应的存在。为探测斯格明子等手性磁结构的形成及研究此类拓扑磁结构的演化行为提供了新的电学手段。

**D12-21****反对称交换耦合力矩驱动全电压磁翻转的机制研究**于东星<sup>1</sup>

1. 兰州大学

低功耗、长寿命、高密度的信息存储和逻辑运算器件的开发是当前自旋电子学领域的重点研究内容之一。非易失性磁随机存储器、磁逻辑门等自旋电子器件主要依赖自旋转移力矩或自旋轨道力矩实现磁矩的电学操控。相关自旋力矩通常由自旋极化电流或由电流转化的纯自旋流产生，极大促进了现代信息技术的发展。报告人团队通过前期理论工作发现，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压调制产生反对称交换耦合力矩，驱动磁斯格明子膨胀，实现垂直磁翻转。与需要借助电子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，只依赖于DM相互作用矢量的调制，可为新型自旋电子器件的开发提供新思路。此次报告将围绕本团队在全电压磁操控领域的最新研究进展，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。

**D12-22****基于拓扑绝缘体的低功耗磁性存储技术**崔宝山<sup>1</sup>

1. 兰州大学

Giant spin-orbit torque (SOT) from topological insulators (TIs) has great potential for the low-power SOT-driven magnetic random-access memory (SOT-MRAM). Here, we demonstrate the functional 3-terminal SOT-MRAM device by integrating the TI [(BiSb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>] with perpendicular magnetic tunnel junctions (pMTJs), where the tunneling magnetoresistance is employed for the effective reading method. The ultralow switching current density of  $1.5 \times 10^5 \text{ A cm}^{-2}$  is achieved in the TI-pMTJ device at room temperature, which is 1-2 orders of magnitude lower than that in conventional heavy metals-based systems, due to the high SOT efficiency  $\theta_{\text{SH}} = 1.16$  of (BiSb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. Furthermore, all-electrical field-free writing is realized by the synergistic effect of a small spin-transfer torque current during the SOT. The thermal stability factor ( $\Delta = 66$ ) shows the high retention time (> 10 years) of the TI-pMTJ device. This work sheds light to the future low-power, high-density, and high-endurance/retention magnetic memory technology based on quantum materials.

## D12-23

### 洛伦兹电镜原位分析 Alnico 合金富 Fe-Co 相形态对磁粘滞行为的影响机制

赵之赫<sup>1</sup>, 夏卫星<sup>1</sup>, 赵江涛<sup>1</sup>, 刘雷<sup>1</sup>, 孙颖莉<sup>1</sup>, 丁勇<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

磁粘滞现象是造成永磁合金在贮存和服役环境下磁性能衰减的主要原因, 但微观组织结构与磁粘滞行为的联系尚不明确。采用 Alnico 合金为研究对象, 以建立微观组织结构、磁化反转机制及其与磁粘滞性能的关联性为主要目标, 通过调整调幅分解的工艺参数, 调控了 Alnico 合金的微观组织结构, 表征了不同富 Fe-Co 相( $\alpha_1$  相)形态下的磁畴结构, 利用原位加磁试验分析了反磁化过程和磁粘滞过程中的磁畴反转现象, 测试了不同微观结构的磁体的磁粘滞性能, 并阐明了磁粘滞性能的影响机制。通过磁场热处理工艺控制实现了  $\alpha_1$  相取向和再分裂结构(纳米  $\alpha_1'$  组织)的精确调控。降低外加磁场强度可以增加垂直易轴方向的  $\alpha_1$  相的体积分数, 增加热处理温度可以增大纳米  $\alpha_1'$  组织的体积分数。基于制备出的不均匀相体积分数不同的 Alnico 样品进一步探讨磁化反转机制和磁粘滞机制。通过理论计算和原位加磁试验分析了 Alnico 合金的反转机制。垂直易轴的  $\alpha_1$  相的出现会改变磁化反转的分布, 提升了在较低和较高磁场强度下发生磁化反转的占比; 而  $\alpha_1$  相取向差小时, 会集中在较窄的反转场范围内发生磁化反转。纳米  $\alpha_1'$  组织具有较  $\alpha_1$  相低的磁化反转场, 并且会在  $\alpha_1$  相作用下发生偏转, 因此纳米  $\alpha_1'$  组织的出现明显改变了不同磁场下的反磁化机制。研究发现, 磁粘滞过程中发生的是磁畴的不可逆反转, 磁粘滞系数由不可逆磁化率和波动场两个因素决定。Alnico 合金中, 垂直易轴的  $\alpha_1$  相和纳米  $\alpha_1'$  组织均具有较低的反转场, 增大了可逆反转占比的同时降低了 Alnico 合金在不同磁场下的不可逆磁化率。 $\alpha_1$  相的取向变化不影响波动场, 而  $\alpha_1$  相分裂会增大波动场。两者的综合影响决定磁粘滞系数随外加磁场的变化规律。

## D12-24

### SRO/TmIG 中异质结中的拓扑微结构与各向异性研究

黄湛为<sup>1</sup>, 张帮敏<sup>1</sup>

1. 中山大学物理学院

Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DMI)能够稳定和操纵新的拓扑自旋结构。DMI 的调控为极低功耗器件在磁绝缘体中操纵手性自旋结构提供了可能性。本研究采用激光脉冲沉积(PLD)在 SrTiO<sub>3</sub> 衬底上制备了 Tm<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>/SrRuO<sub>3</sub> 双层薄膜样品, 主要研究了氧化物双层中磁性拓扑结构的调控方法。研究发现该器件中存在拓扑霍尔信号 (THE), 表明其中存在磁拓扑结构。进一步改变 SrRuO<sub>3</sub> 层与 Tm<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 层的厚度, THE 信号随 Tm<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 层厚度增加而增加, 证明了拓扑结构起源于 Tm<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 中。另外沿<100>和<110>晶向分别是施加电流, 二者的 THE 信号幅值表现出显著差异。通过定量表征 DMI 信号, 得到其与 THE 具有一致的变化趋势, 证明 DMI 是 THE 与 Tm<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 厚度和晶向耦合的关键桥梁。通过 DMI 与 THE 信号的研究, 有望启发对氧化物中拓扑磁结构的测量方法, 并提升对拓扑微结构内在机理的理解。

## D12-25

## 范德华磁性材料的电调控室温磁相变以及超快电调控磁庞阻

王澜<sup>1</sup>

1. 合肥工业大学

范德华磁性材料的电调控室温磁相变以及超快电调控磁庞阻。

由于二维自旋电子器件在室温应用中的巨大潜力，寻找可电调控的室温范德华铁磁体一直是物理学和材料科学的研究热点。由于反铁磁材料远快与铁磁材料的超快磁动力学以及不易受外界干扰的特性，基于反铁磁材料的自旋电子学近年来成为研究热点。本报告将展示两个有关电调控范德华材料磁特性的最新结果。首先，我们通过具有大电子掺杂浓度的质子门，在室温（290K）下成功地调控了准 2D 磁体 Cr1.2Te2 中的磁性。我们发现，在电子掺杂下，矫顽力和反常霍尔电阻率都表现出非单调演化，矫顽力和反常霍尔效应的消失揭示了室温下掺杂诱导的磁相变。DFT 计算进一步揭示了由于 Cr1.2Te2 中的质子嵌入诱导的层空间变化而形成的铁磁/反铁磁相变。另外，我们发现作为一种准层状铁磁性材料，Mn3Si2Te6 纳米片表现出与其块体晶体对应物根本不同的磁阻行为。它们提供了对自旋电子学至关重要的三个关键特性。首先，在电流控制的电阻和磁阻中观察到，与块体晶体相比，响应至少快 6 个数量级。其次，电流对电阻调制仅需要超低电流密度（~5A/cm<sup>2</sup>）。第三，实现了门电压可调控磁阻。理论计算表明，Mn3Si2Te6 纳米片中独特的磁阻行为源于磁场诱导的费米能级带隙位移。电流引起的电阻快速变化归因于自旋轨道转矩，这是一个本质上超快的过程。

## D12-26

二维范德瓦尔斯材料 Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 中的电流诱导磁畴壁移动马天平<sup>1</sup>，章文杰<sup>2</sup>，管一澄<sup>2</sup>，Stuart Parkin<sup>2</sup>

1. 安徽大学

2. Max Planck Institute of Microstructure Physics

近期，具有长程磁有序的二维范德瓦尔斯材料成为了研究热点。高可调控性使得二维范德瓦尔斯材料成为了下一代功能器件极具竞争力的平台。然而这些材料体系中，拓扑纳米磁结构的动力学行为机理仍有待研究。本工作中，我们研究了基于剥离二维范德瓦尔斯材料 Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 的赛道存储器件中电流诱导磁畴壁移动。其中，由自旋转移力矩诱导的磁畴壁移动速度较之前的体材料体系提高了约一个量级，可达 5.68 m/s。通过包含手套箱与磁控溅射腔体的真空互联系统，我们制备了 Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>/重金属异质结，确保了极高的界面质量，进而可以施加自旋轨道力矩。通过改变重金属层材料，我们发现自旋轨道力矩既可与自旋转移力矩相竞争（Pt 重金属层），也可与其加强（W 重金属层）。在 Pt 重金属层的器件中，随着注入电流密度的改变，磁畴壁移动方向发生了明显的反转。磁畴壁移动的机制从自旋转移力矩主导（沿电子方向）变为自旋轨道力矩主导（沿电流方向）。通过磁畴壁运动速度的磁场依赖行为，我们认为在 Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 体系中，存在着源于块体的 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用。这一工作促进了基于二维范德瓦尔斯磁性材料的拓扑纳米磁结构动力学行为机制的深入理解。

## D12-27

## 一种新型磁性二维材料的发现

程鹏<sup>1</sup>

1. 中国人民大学物理学系

我们发现一种全新的磁性二维材料 FePd<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>。从晶体结构上看，它同时具有由 Fe 组成的准一维 Zigzag 链和二维层状结构特征。我们可以生长出厘米量级的 FePd<sub>2</sub>Te<sub>2</sub> 单晶，发现它可以被机械剥离至 5nm 厚，是一种典型的二维材料。通过磁化、输运、比热、中子散射、扫描隧道显微镜等实验手段，我们发现 FePd<sub>2</sub>Te<sub>2</sub> 是一个具有强磁各向异性、居里温度为 183K 的二维强关联铁磁金属。有趣的是，它在面内强单轴各向异

性和孪晶行为的共同作用下形成了奇异的面内自旋纹理结构。FePd<sub>2</sub>Te<sub>2</sub> 为低维磁性和自旋电子学应用研究提供了一个新的材料平台。

## D12-28

### Manipulation and detection of the magnetic order in van der Waals magnets

陈祥<sup>1</sup>

1. 中山大学

The quasi-two-dimensional (quasi-2D) van der Waals materials demonstrate versatile and intriguing electronic and magnetic properties, such as unconventional superconductivity, quantum anomalous Hall effect with dissipationless chiral edge states, proximate quantum spin liquid state, etc. One of the intense research interests include the realization of magnetically ordered state(s) in atomic-thin van der Waals magnetic materials. Here, we show that by chemical substitution, the magnetic order in the prototypical van der Waals metal Fe<sub>5</sub>GeTe<sub>2</sub> can be effectively manipulated. In particular, the ferromagnetic onset temperature is greatly enhanced by Ni replacement of Fe in Fe<sub>5</sub>GeTe<sub>2</sub>. On the other hand, the magnetic order, as well as the stacking order, of the bulk van der Waals magnets can be investigated by the complementary scattering probes, including the well-established neutron diffraction technique and the resonant X-ray scattering technique.

## D12-29

### Co 掺杂 Fe<sub>5</sub>GeTe<sub>2</sub> 的磁性和电输运性质研究

张俊超<sup>1</sup>, 李玲龙\*<sup>1</sup>

1. 东南大学

Fe<sub>5</sub>GeTe<sub>2</sub> (F<sub>5</sub>GT) 是一种层状范德瓦尔斯结构, 已经成为室温自旋电子学中引人注目的候选材料之一, 因其固有的铁磁行为而备受关注。然而, F<sub>5</sub>GT 复杂的磁性特性需要更深入的探索。在本研究中, 我们合成了 (Fe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>)<sub>5</sub>GeTe<sub>2</sub> (x = 0-0.47) 单晶, 并对钴 (Co) 掺杂对磁性和输运性质的影响进行了全面的研究。我们的磁性测量显示出 F<sub>5</sub>GT 的居里温度 (T<sub>c</sub>) 随着 Co 掺杂比例的增加而提高, 超过室温, 在 x = 0.24 时达到 325 K。此外, Co 掺杂使 F<sub>5</sub>GT 的易磁化方向向平面取向调整, 导致磁各向异性显著增强。值得注意的是, 当 x = 0.47 时, 出现了具有转变温度 (TN) 为 340 K 的反铁磁基态, 并伴随着场诱导的 spin-flop 转变。此外, 我们的电输运测量为理解 Co 掺杂对 F<sub>5</sub>GT 的影响提供了补充见解, 揭示了材料内强自旋-电荷耦合的机制。第一性原理计算表明, Co 掺杂在层间堆叠和磁基态方面发挥着重要作用。这项研究揭示了 Co 掺杂的 F<sub>5</sub>GT 在高性能室温自旋电子学应用中的巨大潜力。

## D12-30

### 亚铁磁材料中的磁子输运

秦明辉<sup>1</sup>

1. 华南师范大学

磁子作为一种磁有序系统中的集体激发, 具有低能耗和超高的工作频率等优势, 有望作为信息载体应用于通讯和计算领域, 使得磁子输运成为当前自旋电子学的研究热点之一。

鉴于磁畴壁作为磁子波导的可调控性, 我们从理论上研究了磁子在亚铁磁畴壁中的传输。研究表明: 磁子色散依赖于净自旋角动量和磁子的手性, 对于正(负)净角动量, 左手(右手)磁子表现为无间隙色散关系, 而右手(左手)磁子出现频率间隙, 使得亚铁磁畴壁可以作为磁子的手性过滤器, 即只有具有特定手性的磁子才能被激发和传输; 相比于磁畴, 畴壁内磁子激发的能量消耗极小, 而磁子群速度也快得多, 展示了畴壁作为磁子波导的优越性; 亚铁磁畴壁中电流诱导的磁子多普勒频移可由净角动量控制, 为磁子的调控提供了更多可能性。

另外，磁子在传输过程中与磁纹理呼吸模式的非线性过程会诱发磁子频率梳，可用于磁子的频率测量和频谱展宽。而频率梳的可控性对调制频率梳的工作频率和提高测量精度至关重要。为了实现齿数可控的磁子频率梳，我们研究了亚铁磁斯格明子诱发的磁子频率梳。研究表明：净角动量可以调控斯格明子呼吸模和磁子频隙，随着净角动量的增加，斯格明子尺寸减小，导致呼吸频率增大，梳齿间距增大；净角动量和层间耦合系数决定了磁子的频隙，可以通过控制材料结构进行调制；亚铁磁磁子频率梳相干模式的频率范围处于千兆赫到太赫兹，有望实现微波和太赫兹波之间的链接。

本工作展示了亚铁磁材料中磁子与磁结构的交互作用，揭示了磁子丰富的输运行为。

## D12-31

### X-type antiferromagnets

邵定夫<sup>1</sup>

1. 中国科学院合肥物质科学研究院

Physical phenomena in condensed matter normally arise from the collective effect of all atoms in the solid, while selectively addressing a lone atomic sublattice by common electric or magnetic means is elusive. Here, we introduce cross-chain antiferromagnets as an uncharted class of magnetically ordered crystals, where the stacking of two magnetic sublattices form a pattern of intersecting atomic chains, supportive to the sublattice selectivity. We dub these solids X-type antiferromagnets and demonstrate that they reveal unique spin-dependent transport properties not present in conventional magnets. Using  $\beta$ - $\text{Fe}_2\text{PO}_5$  as a representative example of such X-type antiferromagnets, we predict the emergence of sublattice-selective spin-polarized transport, where one magnetic sublattice is conducting, while the other is not. As a result, spin torque can be exerted solely on a single sublattice, leading to unconventional ultrafast dynamics of the Néel vector capable of deterministic switching of the antiferromagnetic domains. Our work uncovers a previously overlooked type of magnetic moment stacking in antiferromagnets and reveals sublattice-selective physical properties promising for high-performance spintronic applications.

## D12-32

### CoPt 单层膜晶体对称性相关的无场磁化翻转

朱涛<sup>1</sup>

1. 中国科学院物理研究所

基于自旋轨道矩 (SOT) 驱动的快速且高效的磁化翻转在自旋电子学材料及器件的研究中显示出巨大的应用潜力。特别是不施加外磁场就能实现自旋轨道矩驱动的磁化翻转引起了研究人员极大的兴趣，其中 CoPt 合金单层膜因其优异的垂直磁各向异性，以及对称性相关的无场磁化翻转而得到了广泛地关注。本文系统地研究了垂直磁化的  $\text{Co}_x\text{Pt}_{100-x}$  单层合金膜的自旋轨道矩与其成分的关系，结合极化中子反射技术 (PNR) 对薄膜的磁性深度分布等关键信息的精确表征，对  $\text{Co}_x\text{Pt}_{100-x}$  单层合金膜 SOT 驱动无场磁化翻转现象的产生机制进行了分析。

研究表明  $\text{Co}_x\text{Pt}_{100-x}$  单层合金膜的面内和面外 SOT 有效场与其合金成分有很强的依赖关系，在合金元素占比相等时，即在  $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$  中有显著的增强，进一步发现  $\text{Co}_x\text{Pt}_{100-x}$  单层合金膜中与晶体对称性相关呈三重对称的无场磁化翻转可能来源于  $L1_1$  的纳米结构。

当 Co 含量时， $\text{Co}_x\text{Pt}_{100-x}$  单层膜会发生面内、面外 SOT 有效场符号的改变，但两者变化趋势并不一致，PNR 测量结果表明  $\text{Co}_x\text{Pt}_{100-x}$  单层膜样品在衬底附近出现富 Pt 的界面层， $\text{Co}_x\text{Pt}_{100-x}$  单层膜的面外 SOT 会受到界面层的显著影响，即面外 SOT 是界面效应主导的。

## D12-33

### 垂直霍尔天平薄膜中倾斜磁矩调控及应用

张静言<sup>1</sup>

## 1. 北京科技大学

霍尔天平材料具有典型的铁磁层/隔离层/铁磁层的三明治结构，具有明显的垂直磁各向异性，其层间耦合作用易于调控，基于此可以实现多组态磁存储模式。该材料还可以实现存储单元中的逻辑运算从而提高器件整体的运算效率，有望实现存算一体化智能器件设计。报告人将重点介绍垂直霍尔天平材料中倾斜磁矩调控，实现共线倾斜磁矩到非共线倾斜磁矩的有效转换，报告人借助中国散裂中子源极化中子反射谱仪首次对霍尔天平材料的磁矩进行精确表征，证实了（非）共线倾斜磁矩的存在，为后续的拓扑磁性、自旋轨道矩相关研究提供了材料基础。鉴于上述研究进展，报告人通过薄膜结构优化实现共线倾斜磁矩构型，成功地获得了室温高密度磁性斯格明子并实现多态调控。同时，精确调控非共线倾斜磁矩构型，实现了机型可控地全电控自旋轨道矩诱导磁化翻转。相关研究工作地开展为高密度、低功耗的新一代自旋电子学器件设计提供了一条思路。

## D12-34

## 亚铁磁绝缘体自旋电子器件及其高效轨道-自旋转换

安红雨<sup>1</sup>

## 1. 深圳技术大学

基于自旋电子学的最新一代磁随机存储技术由于其超快读写速度、低能耗、高安全性等优点而备受关注。近年来，稀土铁石榴石亚铁磁绝缘体材料  $\text{Re}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (ReIG, Re 为 Tm, Gd 等稀土元素) 由于其对电流绝缘、自旋扩散距离长、阻尼小等优良特性得到广泛关注。

本报告将主要介绍课题组近年来在 ReIG 纳米薄膜制备、自旋电子器件性能研究方面所做的一些工作。首先，采用利于大规模工业化生产的磁控溅射镀膜法通过系统改变关键实验参数制备了具有优良垂直磁各向异性的 ReIG 纳米薄膜，并精确测量了重金属/ReIG 薄膜的自旋轨道矩。结果显示相比于传统的脉冲激光沉积法，利用磁控溅射法制备的重金属/ReIG 异质结器件自旋轨道矩产生效率显著增强。通过系统改变温度进行测量发现，在 ReIG 角动量补偿温度附近，自旋轨道矩产生效率也有显著提高。另外，在 Pd/ReIG 异质结器件中发现，氢气可以有效调控其拓扑霍尔效应。最后，在 Ta/Pt/ReIG 异质结中成功实现了轨道流-自旋流的有效转换，使得自旋轨道矩产生效率提高了一个数量级。这些工作为提高亚铁磁绝缘体中自旋轨道矩产生效率，降低能耗提供了科学理论依据，并为基于亚铁磁绝缘体的高效率、低能耗新型自旋存储芯片的研发提供了参考。

## D12-35

## 非共线反铁磁体中与磁场诱导的拓扑轨道动量相关的相变研究

邓司浩<sup>\*1,2</sup>, 王聪<sup>3</sup>, 黄清镇<sup>1</sup>, 何伦华<sup>1,4</sup>

1. 散裂中子源科学中心
2. 中国科学院高能物理研究所
3. 北京航空航天大学
4. 中国科学院物理研究所

在新兴的反铁磁自旋电子学领域，人们探索了各种方法来调控材料的反铁磁结构，进而促进新一代自旋芯片的开发与应用。其中，具有非共线磁结构的反铁磁体表现出独特的自旋相关输运特性，费米能级附近的外尔点作为贝里曲率的源产生反常霍尔效应，使磁态的电读出成为可能。值得注意的是，电输运性质的研究工作（尤其是理论计算）通常针对单晶材料进行，这是因为多晶材料中的各种各向异性一般会相互抵消。然而，从材料科学的角度来看，多晶材料与单晶一样有趣，因为它们随机排列的晶粒可以平衡晶体依赖性而得到更广泛的应用。例如，多晶金属在反铁磁自旋电子学中的潜力已经通过多晶反铁磁异质结的自旋轨道矩翻转得到证实。此外，在多晶非共线反铁磁材料中，随着每个晶粒中的反铁磁磁结构的改变，

电阻率张量的所有非对角元是否会抵消尚不清楚。

本次报告中，我们将介绍在非共线反铁磁多晶材料中的横向电阻率对弱磁场的强烈响应以及磁场诱导的拓扑轨道动量的存在[1]。对于具有非共线反铁磁结构的多晶反钙钛矿材料  $\text{Mn}_3\text{Zn}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}\text{N}$ ，我们观察到横向电阻率（垂直于电流的电压）是外加磁场的偶函数，不属于反常霍尔效应。在弱磁场下，横向电阻率可以从有限值变为零。通过中子衍射实验及其详细的分析，揭示了磁结构随温度和磁场的微小变化，证实了横向电阻率的出现是由于非共线自旋排列的不同磁相之间的转变，这表明横向电阻率数值对磁结构变化高度敏感。同时，基于自旋对称性分析发展了现象学模型来描述电阻率张量对磁场和温度的依赖性，揭示高对称相由场诱导的拓扑轨道动量稳定。电阻率张量的大小和方向取决于磁场相对于亚晶格磁化的方向，而不是晶体轴。因此，电阻率的横向分量在粉末样品中不会消失。相关研究拓展了用多晶材料实现反铁磁自旋电子学应用的可能性。

同时，我们还将简要介绍中国散裂中子源通用粉末衍射谱仪的最新进展。

## D12-36

### 单层膜零磁场辅助磁化翻转及其机制探讨

姜淼<sup>1</sup>，杨新源<sup>2</sup>，曲晟源<sup>1</sup>，汪辰達<sup>2</sup>，大矢忍<sup>2</sup>，田中雅明<sup>2</sup>

1. 北京理工大学
2. 东京大学

自旋轨道力矩磁随机存储(SOT-MRAM)凭借其特有的非易失性、高效率、高速度和低功耗等优势，被广泛认为是实现高性能存储的关键技术之一。为了消除传统多层膜体系存在的界面自旋散射等限制，进一步提高磁化翻转效率，我们通过利用功能层自身的结构反演不对称以及强面内有效场的作用，成功在垂直易磁化半导体单层膜自体系下诱导实现了 SOT 磁化翻转，将临近翻转电流密度降低了 3 个数量级，并实现了栅极作用下的有效调控。

然而，实现确定性磁化翻转通常需要外磁场辅助进行对称性破缺，从而一定程度上限制了 SOT 存储器件的集成。为了提高自旋电子学器件的可扩展性，我们通过诱导元素的不均匀分布进行对称性破缺，并利用 DM 相互作用形成的有效场诱导自旋倾斜促进畴壁形核，成功在单层膜体系下实现了高效率的零场辅助 SOT 磁化翻转，并对其物理机制展开了深入探讨。研究成果将大幅促进单层膜 SOT 磁化翻转器件的可应用性进展。

## D12-37

### Manipulating exchange bias with a single femtosecond laser pulse

Boyu Zhang<sup>1</sup>，Zongxia Guo<sup>1,2</sup>，Gregory Malinowski<sup>2</sup>，Stéphane Mangin<sup>2</sup>，Weisheng Zhao<sup>1</sup>，Michel Hehn<sup>2</sup>

1. Beihang University
2. Institut Jean Lamour, CNRS, Université de Lorraine

Ultrafast manipulation of magnetic order has challenged our understanding the fundamental and dynamic properties of magnetic materials. So far single shot magnetic switching has been limited to ferrimagnetic alloys and multilayers. Whether a similar scenario can be observed in antiferromagnets remains unknown. In ferromagnetic (FM)/antiferromagnetic (AFM) bilayers, exchange bias arises from the interfacial exchange coupling between the two layers and results in a field shift ( $H_e$ ) of the FM layer hysteresis loop. Exchange bias phenomena have found widespread use in fundamental scientific research and a large variety of spintronic devices, including sensors and magnetic random-access memory (MRAM). Many studies have already focused on the possibility to manipulate the exchange bias effect using thermal annealing with or without applied magnetic field and spin polarized current. Here we demonstrate the possibility to manipulate the exchange bias (change of the sign and amplitude of  $H_e$ ) with a single femtosecond laser pulse in perpendicular to film plane magnetized IrMn/CoGd bilayers. We have studied the influence of the laser fluence and the number of pulses for various IrMn

thicknesses to determine the fastest and the most energy-efficient way to set the exchange bias field. Our results establish a method to set the exchange bias in a bilayer system that has potential application for ultrafast and energy-efficient spintronic devices.

### D12-38

#### Tailoring the Ferromagnetic-Antiferromagnetic competition and Spin reorientation in $\text{Cr}_{1+\delta}\text{Te}_2$ thin layers with temperature and Cr intercalation

Feiyue Wang<sup>1,2</sup>, Ying Deng<sup>3</sup>, Guanqi Li<sup>4</sup>, Huai Zhang<sup>5</sup>, Xin-Jie Liu<sup>6</sup>, Ben-Chuan Lin<sup>6</sup>, Xuwen Fu<sup>3</sup>, Zhipeng Hou<sup>5</sup>,  
Ya-Qing Bie<sup>\*1,2</sup>

1. State Key Lab of Optoelectronic Materials and Technologies, Guangdong Province Key Laboratory of Display Material and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China
2. School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China
3. Ultrafast Electron Microscopy Laboratory, The MOE Key Laboratory of Weak-Light Nonlinear Photonics, School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China
4. School of Integrated Circuits, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China
5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology, Institute for Advanced Materials, South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China
6. Shenzhen Institute for Quantum Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

Van der Waals magnetic materials have emerged recently as the forefront of innovation for atomic-thin data storage solutions. Among these, magnetic transition metal dichalcogenides, particularly chromium telluride with its varied lattice structures and atomic stoichiometries, have garnered significant interest largely due to their potential for exhibiting room temperature ferromagnetism and strong perpendicular magnetic anisotropy. Yet, the compound  $\text{Cr}_{1+\delta}\text{Te}_2$ , which allows for tunable valency from  $\text{Cr}^{2+}$  ( $3d^4$ ) to  $\text{Cr}^{4+}$  ( $3d^2$ ), stands out for its capacity to modulate electronic and magnetic properties across a broad spectrum. Despite its promising attributes, the full understanding of  $\text{Cr}_{1+\delta}\text{Te}_2$  has been elusive, complicated by the interplay of ferromagnetic and antiferromagnetic interactions, noncollinear spin textures, and adjustable magnetic anisotropy. In our study, we delve into the relationship between magnetic phase transition, spin orientation, and various factors such as intercalation lattice structure, temperature, thickness and strain, aiming to provide a detailed microscopic insight into the magnetic tunability. By employing exfoliated Cr-intercalated  $\text{CrTe}_2$  samples, we have investigated their magnetic behavior across different temperatures using polar reflective magnetic circular dichroism and Lorentz transmission electron microscopy. Furthermore, our research extends to the exploration of temperature-dependent magnetic circular dichroism across varying intercalation ratios and material thicknesses. Incorporating first-principal calculations, we observed a pronounced competition between antiferromagnetic coupling in the interlayer chromium elements and ferromagnetic coupling within the intrinsic layers. Additionally, we noted that intercalation-induced concentration changes significantly influence spin reorientation at lower temperatures. Our study sheds light on the potential microscopic mechanisms underlying magnetic competition in intercalated chromium telluride, offering valuable insights for the advancement of two-dimensional spintronic devices.

### D12-39

#### 序构高性能纳米复合永磁材料

张海天<sup>1</sup>, 张湘义<sup>2</sup>

1. 北京航空航天大学
2. 燕山大学亚稳材料国家重点实验室

稀土永磁材料是一种关键的战略材料，与新能源产业和国防高技术发展紧密相关。这类材料的发展受限于磁化强度与矫顽力之间的相互倒置关系，特别是在纳米复合永磁材料领域，这种矛盾关系表现得尤为突出。结合近年来的研究成果，我们在本报告中提出了一种创新方法：通过微结构的有序化，如构建晶粒尺寸梯度、多相层状结构或核-壳结构，控制纳米复合磁体的退磁过程以提升矫顽力，而不降低磁化强度。这一方法突破了传统合金化策略中通过加入非磁性或反铁磁元素而导致磁化强度降低的局限，有效解决了磁化强度与矫顽力之间的矛盾。此外，该方法具有普适性，不仅能增强其他磁性材料的性能，还可用于调控多种功能材料中的电子、声子和离子的输运行为。

#### D12-40

### SOT-MTJ-Based True Random Number Generators (TRNGs) and Their Applications in Probabilistic Neuron Networks

Caihua Wan<sup>\*1</sup>, Ran Zhang<sup>1</sup>, Xiaohan Li<sup>1</sup>, Guoqiang Yu<sup>1</sup>, Xiufeng Han<sup>1</sup>

1. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

Such artificial intelligence as generative neuron networks are booming, which allows spintronics as a spring of randomness to have immense chances to apply for. Based on the studies on the field-free spin-orbit torque (SOT) effect and successful development of high-performance SOT-magnetic tunnel junctions (MTJ), we have been investigating applicability of SOT-MTJ as stochastic samplers in probabilistic neuron networks and probabilistic computing such as the Bayesian Networks (BN) for inference and reasoning, the restricted Boltzmann machines (RBM) prevalent in unsupervised learning and combinatorial problem solvers. These works show SOT-MTJs well match the needs of BN and RBM nodes, enabling the SOT-MTJ-sampled RBM to achieve handwritten and spoken digits recognition, generation and crossmodal learnings. Their works clearly demonstrate spintronic devices ready for developing hardware tailored for probabilistic neuron networks and also open a promising outlet for spintronics, especially, SOT devices.

#### D12-41

### 全电学低功耗自旋轨道转矩器件

王飞<sup>1</sup>, 许小红<sup>1</sup>

1. 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 ( $< 8 \times 10^3 (\hbar/2e)(\Omega\text{m})^{-1}$ )，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 TaIrTe<sub>4</sub> 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  $5.44 \times 10^4 (\hbar/2e)(\Omega\text{m})^{-1}$ 。此外，我们利用分子束外延技术制备了圆晶尺寸的 WTe<sub>2</sub>，并与高自旋霍尔电导率的 PtTe<sub>2</sub> 形成范德瓦尔斯异质结。研究结果表明，PtTe<sub>2</sub>/WTe<sub>2</sub> 双层膜具有迄今为止最高的面内 ( $2.32 \times 10^5 (\hbar/2e)(\Omega\text{m})^{-1}$ ) 和面外 ( $0.25 \times 10^5 (\hbar/2e)(\Omega\text{m})^{-1}$ ) 自旋霍尔电导率，并且在翻转垂直磁化 CoFeB 层时功耗比使用 WTe<sub>2</sub> 单层低了 33 倍。更为重要的是，我们发现 PtTe<sub>2</sub> 中产生的面内极化的自旋流可以在 WTe<sub>2</sub> 层中转变为面外极化的自旋流，实现了自旋的转换。最后，我们将高性能的 PtTe<sub>2</sub>/WTe<sub>2</sub> 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。

#### D12-42

### 基于多铁异质结构的电场调控自旋电子器件

陈爱天<sup>1</sup>

## 1. 电子科技大学物理学院

磁性隧道结是自旋电子学的核心器件，在磁性存储器、自旋逻辑器件等方面都有重要应用。磁性隧道结是两层磁性层中间夹一非磁性绝缘层的三明治结构，调控磁性层的磁矩取向能够调控磁性隧道结的电阻，目前主要利用电流，通过自旋转移力矩或自旋轨道力矩效应来实现对磁性隧道结的调控。而在铁磁/铁电多铁异质结构中，基于应变媒介磁电耦合，能够实现电场对磁性的调控，为发展电场调控型低能耗自旋电子器件提供了技术方案。为此，我们结合磁性隧道结和铁电材料，在铁电衬底上成功制备高质量磁性隧道结，通过应变媒介磁电耦合使自由层磁矩旋转 90 度，实现了室温零磁场下电场对磁性隧道结电阻的非易失性调控；进一步，通过引入多方向应变连续调节自由层磁矩旋转和引入磁偶极相互作用，成功实现了电场对隧道磁电阻高/低电阻态的完全调控。相关研究为发展电写磁读的新型自旋存储器件提供了参考。

## D12-43

## 低对称性引起的非传统自旋轨道力矩研究

陈是位<sup>1</sup>，梁世恒<sup>1</sup>

## 1. 湖北大学

以人工智能和大数据为代表的新型信息技术的高速发展对信息处理与存储器件的性能提出了更高的要求。相比利用外磁场驱动磁矩翻转的传统信息存储方式，基于自旋轨道耦合机制的自旋轨道力矩（Spin orbit torque, SOT）效应，通过利用电子的自旋属性，可快速且低功耗地调控磁矩方向并实现非易失性信息存储，同时具有更小的器件单元尺寸、更好的半导体工艺兼容性等特点，可为后摩尔时代的低功耗信息存储和逻辑计算器件提供物理基础，对于推动新一轮信息产业革命具有重要意义。但是，现有研究表明，在普通重金属/铁磁金属异质结中基于面内极化自旋流（ $\sigma_y$ ）诱导的传统面内自旋轨道力矩（ $\tau_y$ ）在驱动垂直磁矩翻转的过程中需要引入额外的辅助磁场以打破垂直磁矩的空间对称性，这不但增加了自旋轨道力矩器件的功耗和制备复杂度，也不利于自旋轨道力矩器件高密度、高集成度化的发展目标。为此，各国科学家致力于探索和认知具有新奇物态的自旋流产生材料，以及探索无外磁场辅助时电流驱动垂直磁矩翻转（也即无场翻转或全电控垂直磁矩翻转）的新物理机制，从而实现低功耗全电控垂直磁矩翻转及信息存储。

随着反铁磁自旋电子学的兴起，一类特殊的 Mn 基二元反铁磁材料引起了科研人员的广泛关注。其 Mn 原子亚晶格形成 Kagome 结构，同时由于几何阻挫和 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用，Kagome 结构中的 Mn 原子磁矩呈现出 120° 夹角的自旋结构，因此也被称为非共线反铁磁。相关研究成果表明非共线反铁磁不但具有大的室温反常霍尔效应和拓扑结构诱导的 Weyl 费米子等新奇物理特性，同时其低磁对称性可产生由面外极化自旋流诱导的非传统自旋轨道力矩。相比于传统自旋轨道力矩，该力矩既可以替代外辅助磁场打破垂直磁矩的空间对称性，也可以驱动垂直磁矩翻转，是实现低能耗全电学方法驱动垂直磁矩翻转的高效方式，也是当前自旋电子学的重要研究热点与前沿领域。目前，国内外多个课题组针对拓扑反铁磁中的非传统自旋轨道力矩进行了重点研究并取得了诸多进展，并证实了该力矩具有重要的研究意义和应用前景，但关于非传统自旋轨道力矩的起源机制及调控方式仍然有一些科学性问题的亟须探究并解决。

在我们的工作中，利用自旋力矩-铁磁共振测量手段，对具有高对称立方结构的非共线反铁磁体  $Mn_3Pt$  中自旋流及其相关自旋轨道力矩各向异性进行了系统研究。不同于已有研究结果，实验发现沿  $Mn_3Pt[100]$  和  $[010]$  晶向施加电流时，所产生的自旋流及其相关自旋轨道力矩存在明显差异，这与立方结构高度对称性的特征相悖。通过晶体结构与磁结构对称性分析，这种反常的自旋流各向异性可由时间反演奇对称（ $T$ -odd）的磁自旋霍尔效应和时间反演偶对称（ $T$ -even）的自旋霍尔效应的共同贡献所解释。同时，基于  $Mn_3Pt$  中非传统自旋轨道力矩实现了全电学方法驱动垂直磁矩翻转。该研究揭示了通过时间反演奇对称的磁自旋霍尔效应与偶对称自旋霍尔效应相结合，在高对称的立方结构非共线反铁磁体中产生各向异性自旋流的新机制，对推动非共线反铁磁自旋电子学发展以及器件的实用化具有重要意义。

## D12-44

**Fabrication, Properties and Device Applications of Topological Functional Thin Films and Heterostructures**Xuefeng Wang<sup>1</sup>

1. Nanjing University

Recently, topological materials have attracted intensive attention mainly due to their high carrier mobility, spin-momentum-locking surface states and unique physical properties for various applications. However, it is essential to obtain large-area, high-quality thin films and heterostructures from the practical electronic devices viewpoint. In this presentation, we demonstrate high-quality, single-crystalline topological telluride films with centimeter-scale size either by pulsed laser deposition or by chemical vapor deposition. For Weyl semimetal  $WTe_2$  films, they exhibit intriguing quantum phenomena, such as Shubnikov-de Haas quantum oscillations, weak anti-localization, and nontrivial Berry phase at low temperatures. The anisotropic spin dynamic relaxation process is revealed by the ultrafast time-resolved magneto-optic Kerr technique. For ferromagnetic  $Cr_5Te_6$  films, they show a colossal intrinsic topological Hall effect (THE) up to about  $1.6 \mu\Omega \cdot cm$ . Such a THE can be maintained until 270 K, which is attributed to the field-stimulated noncoplanar spin textures induced by the interaction of the in-plane ferromagnet and antiferromagnet infrastructures. The first-principles calculations further verify the considerable Dzyaloshinskii-Moriya interaction in  $Cr_5Te_6$ . Meanwhile, the helicity-dependent terahertz (THz) emission is observed in Dirac semimetal  $PtTe_2$  films via circular photogalvanic effect (CPGE) under normal incidence. This is activated by artificially controllable Te-vacancy defect gradient, which is unambiguously evidenced by the electron ptychography. The defect gradient lowers the symmetry, which not only induces the band spin splitting, but also generates the Berry curvature dipole (BCD) responsible for the CPGE. Such BCD-induced helicity-dependent THz emission can be manipulated by the Te-vacancy defect concentration. These findings set up an important foundation of topological functional films/heterostructures for the future applications in high-speed spintronic and terahertz devices.

**D12-45****笼目磁体  $RMn_6Sn_6$  中拓扑电荷与自旋输运**屈哲<sup>1</sup>

1. 中国科学院合肥物质科学研究院

笼目磁体由于其特殊的晶格对称性，能带结构本征具有狄拉克色散、范霍夫奇点和平带，在  $k$  空间存在强的贝利曲率场；与此同时，该晶格也具有很强的阻挫作用，可承载各种新奇的自旋结构。 $RMn_6Sn_6$  作为一类新型的笼目磁体，具有无缺陷的  $Mn$  基磁性笼目层，较弱的层间相互作用，以及由  $4f-3d$  耦合导致的从面外到面内，铁磁、亚铁磁到反铁磁的丰富的磁基态，为系统研究笼目磁体中拓扑电荷与自旋输运提供了一个高度可调控的平台。近期我们聚焦这一问题开展探索。在拓扑电荷输运方面，我们以具有面外亚铁磁性的  $TbMn_6Sn_6$  为研究对象，综合利用电学、热电、热学测量，发现其反常霍尔、能斯特、热霍尔这三种效应之间的比例关系超越了经典 Mott 公式和 Wiedemann-Franz 定律的预期，并可由基本的陈数能隙狄拉克模型所描述，从输运角度给出了贝利曲率场所导致的电荷与熵的拓扑关联；在拓扑自旋输运方面，我们提出了一种产生自旋阀效应的新机制，通过外磁场诱导具有层间阻挫相互作用的块材笼目磁体的螺磁状态失稳，从而产生自发模拟了传统自旋阀中人工多层膜结构的严格沿螺旋轴堆叠的条纹状磁畴结构，在  $TmMn_6Sn_6$  的介观器件中实现了超过 160% 的巨磁阻 (GMR) 效应。我们的研究为理解笼目磁体中拓扑电荷与自旋输运效应提供重要信息。

**D12-46****拓扑手性晶体的晶格-电子耦合及手性化学效应**李国伟<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

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。这其中，厘清自旋极化电子的产生、传递机制是实现自旋催化概念的关键。近年来，在拓扑手性材料中发现的晶格-电子耦合作用不仅使奇异手性电子态的出现成为可能，也为自旋极化电子的调控提供了理想平台。我们系统研究了 PtAl、PtGa、PdGa、CoSi 等多种手性单晶的氢分子还原行为及其对多种过渡组金属电子结构的影响，发现了其手性拓扑表面态可在较大的能量窗口内和氢分子发生直接的电子转移并展现了优异的催化性能。进一步通过调控晶种的化学成分，利用自助熔剂法获得了两种不同手性晶格的 PdGa 大尺寸单晶。以治疗帕金森氏综合症的有效药物多巴 (DOPA) 为例，两种手性分子展现了明显不同的氧化能力。第一性原理计算证实了这种强烈依赖于晶体手性的分子氧化行为主要来自于材料内禀的强轨道角动量极化。这种强晶格-电子耦合为开发具有高鲁棒性的强手性响应并实现在手性二极管、太赫兹手性光电子器件、手性分子精准识别等领域的应用提供了理论指导。

## D12-47

### 大自旋强关联无序及其诱导的低温磁热效应

杨子煜<sup>1</sup>

1. 深圳大学

基于磁热效应的绝热去磁制冷技术，是实现超低温的有效途径之一。由于磁热材料的体积直接决定设备的磁系统和屏蔽设计，因此研发具有大体积冷却能力的磁热材料至关重要。虽然提高磁离子密度可以增强体积制冷能力，但也会导致更强的磁相互作用，使得长程磁关联出现在较高的温度。因此，目前极少有材料能在超低温下表现出较大的体积磁熵变数值。本工作提出了一种以强关联自旋无序来实现低温下大体积磁熵变的方法，并在钆硅酸盐  $\text{Gd}_{9.33}[\text{SiO}_4]_6\text{O}_2$  体系中得到了验证。该材料具有非常高的磁离子密度 ( $1.78 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ )，即使在极低的 50mK 温度下，仍未出现长程磁有序。这一特性使其展现出巨大的体积单位磁热响应，远高于顺磁盐制冷工质钆镓石榴石，还超越了大部分已报道的体系。这一研究为寻找和开发具有更高体积密度表现的超低温磁热材料提供了新的思路。实验结果显示， $\text{Gd}_{9.33}[\text{SiO}_4]_6\text{O}_2$  内具有反铁磁耦合作用，在温度低于 1.5K 时出现强关联自旋无序，直至最低探测温度 50mK 时仍未有长程磁有序出现的迹象。在外加磁场为 7T 时，其磁熵变可达  $-\Delta S_{\text{mag}} = 0.43 \text{ J cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$  ( $66.6 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )，同时最高绝热温变为  $T_{\text{ad}} = 23.8 \text{ K}$ ，这些数值优于大多数已报道的材料体系。此外，在 4 K 以下， $\text{Gd}_{9.33}[\text{SiO}_4]_6\text{O}_2$  粉晶的热导率约为  $5 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，与顺磁盐  $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  相近。通过添加银粉 (50 wt%)，其热导率可提高至  $10^{-1} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  的量级。 $\text{Gd}^{3+}$  的位点无序及准一维特性在维持低温下的磁熵中起到了关键作用，而高密度的大自旋无序使得  $\text{Gd}_{9.33}[\text{SiO}_4]_6\text{O}_2$  展现出优异的体积磁熵变。

## D12-48

### $\text{Mg}_3\text{Bi}_2$ 基材料的磁热电效应研究

冯涛<sup>1</sup>

1. 南方科技大学

磁热电 (横向热电) 技术主要基于能斯特效应即在垂直于温度梯度的方向上施加磁场可产生垂直于温度梯度和磁场方向的横向热电势，可以实现热能与电能之间的直接相互转换，在能源转换及低温制冷领域中具有巨大的应用潜力。同时，其特殊的横向几何结构不仅有利于解耦电子和声子传输，还有助于简化热电器件。拓扑半金属由于其低能激发具有线性色散的特点，往往对磁场表现出明显的响应行为，被认为是一类具有广阔前景的磁热电材料。 $\text{Mg}_3\text{Bi}_2$  是近几年来发现的一种全新的拓扑材料，2022 年报告人首次报道了通过缺陷工程手段可在该材料中实现强磁热电效应，并阐明了磁热电性能与材料中 Mg 缺陷的关系。

在考虑自旋轨道耦合时， $\text{Mg}_3\text{Bi}_2$  为 Z2 拓扑绝缘体，相比于拓扑半金属 (如 Dirac 半金属) 的线性色散特性，Z2 拓扑绝缘体态  $\text{Mg}_3\text{Bi}_2$  的磁热电性能仍有巨大提升空间。针对这个问题，研究团队又创新性地提出通过锰掺杂引入负化学压力进而诱导拓扑相变增强磁热电效应的研究思路，最终在多晶  $\text{Mg}_{3+\delta}\text{Bi}_2\text{Mn}_{0.1}$  中实现了可媲美单晶材料的高磁热电性能。XRD 精修表明随着锰的引入， $\text{Mg}_{3+\delta}\text{Bi}_2\text{Mn}_{0.1}$  材料的晶胞体积

逐渐增大。同时，材料的磁阻从 940% 提升至 16600% (2K, 14 Tesla)，最终该材料的横向热电势和横向功率因子分别达到 617 和 20393 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-2</sup> (14 K and 14 Tesla)，该工作通过引入负化学压力诱导拓扑相变的策略为获得高性能磁热电材料的研究提供了一条新途径。

### D12-49

#### 双钙钛矿锰氧化物 Pr<sub>1.5</sub>A<sub>0.5</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (A=Mg, Ba) 的磁热效应和临界行为研究

云慧琴<sup>1</sup>, 刘景顺<sup>1</sup>, 李泽<sup>1</sup>

1. Inner Mongolia University of Technology

本研究采用高温固相反应法制备了 Pr<sub>2</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (母相) 和 Pr<sub>1.5</sub>A<sub>0.5</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (A=Mg, Ba) 的多晶样品。研究了 Mg 和 Ba 在 A 位掺杂对母相样品磁热效应和临界行为的影响。结果表明，制备的系列样品单相性良好，属正交晶系，空间群均为 Pbnm。通过有效掺杂改变了材料内部的分子磁矩与交换作用的强度，进而影响了材料的居里温度与磁熵变。同时，进一步增强了样品的相变连续性，驱动其制冷温区由 Pr<sub>2</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 的 ~110 K 扩展至 Pr<sub>1.5</sub>Ba<sub>0.5</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 的 ~128 K。在 7 T 的磁场下，该系列样品的相对制冷能力值分别达到了 ~ 483.46 J kg<sup>-1</sup>、~ 428.22 J kg<sup>-1</sup> 和 ~ 479.88 J kg<sup>-1</sup>，展现出可观的制冷能力。临界行为分析表明，母相表现出短程交换相互作用，而 Pr<sub>1.5</sub>A<sub>0.5</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (A=Mg, Ba) 是具有少量弱迁移电子的铁磁体，并在临界温度附近存在长程铁磁交换作用。此外，在不同磁场下序参数 n 对温度的依赖性的研究，验证了相变类型和获得的临界指数的准确性。本研究不仅展示了 Pr<sub>1.5</sub>A<sub>0.5</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (A=Mg, Ba) 系列多晶样品成为高效磁制冷材料的巨大潜力，还为磁制冷材料的设计和 optimization 提供了重要的理论和实验依据。

### D12-50

#### K/Ni 离子协同掺杂对 La<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>MnO<sub>3</sub> 磁热效应的影响

谢卓家<sup>1</sup>, 张伟建<sup>1</sup>, 邹正光<sup>1</sup>, 姜心雨<sup>1</sup>

1. 桂林理工大学

因为钙钛矿锰氧化物具有较好的磁热效应和磁阻等属性而被广泛的研究。在这一体系中 La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> 呈现出了丰富的结构相图，磁相图和电相图。其中，La<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>MnO<sub>3</sub> 与 La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> 体系中的其他材料相比，其居里温度更接近室温 (T<sub>c</sub>=330 K)。与此同时，La<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>MnO<sub>3</sub> 的磁热效应不大。故可以通过离子掺杂的手段来获得居里温度在室温附近并且具有较大磁热效应的钙钛矿锰氧化物。我们用溶胶-凝胶法制备了 La<sub>0.8-x</sub>K<sub>x</sub>Sr<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.95</sub>Ni<sub>0.05</sub>O<sub>3</sub> (x = 0.05, 0.10, 0.15) 粉末，XRD 测量表明这些样品是 R-3c 空间群的菱形钙钛矿结构。在实验的测试范围内发现 La<sub>0.8-x</sub>K<sub>x</sub>Sr<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.95</sub>Ni<sub>0.05</sub>O<sub>3</sub> 均是单相结构。通过使用 FULLPROF 软件对 La<sub>0.8-x</sub>K<sub>x</sub>Sr<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.95</sub>Ni<sub>0.05</sub>O<sub>3</sub> 的结构进行细化，进一步证实了其是一个 R-3c 空间群的菱形钙钛矿结构。利用综合磁学测量系统 MPMS 对样品进行了磁性测试。通过磁性测试发现随着 K<sup>+</sup> 含量的增加，居里温度从 305 K 上升至 320 K，且在居里温度附近都发生铁磁-顺磁的二级相变。当施加外加磁场时，在居里温度附近发现最大磁熵变为 4.00, 4.11 和 3.39 J/(kg K)。进一步得出 La<sub>0.8-x</sub>K<sub>x</sub>Sr<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.95</sub>Ni<sub>0.05</sub>O<sub>3</sub> 的相对冷却功率分别为 272.28, 288.15 和 304.90 J/kg。

### D12-51

#### Manipulation of Magnetic Properties in Vertically Aligned Nanocomposite Films

Rui Wu<sup>1</sup>

1. South China University of Technology

In vertically aligned nanocomposite (VAN) films, one can take advantage of various interactions (strain, exchange interaction, magnetoelectric coupling etc) at the interface between different phases to achieve the enhancement of magnetic properties. In this talk, I will introduce our works related to the manipulation of magnetic properties in "3-1" type nanocomposite films: First, we introduced the interfacial p-n junction in

(Na,Bi)TiO<sub>3</sub>-CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> VAN to successfully suppress leakage and achieve in-situ electric field control of magnetism; Then, we introduced the antiferromagnetic material NiO into the VAN film to achieve self-biased magnetoelectric effect and electric field control of the exchange bias effect simultaneously in the (Na,Bi)TiO<sub>3</sub>-NiO-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> three-phase nanocomposite film; recently, with optimizing the growth process, the size of the magnetic unit of the three-phase system was successfully reduced down to 10 nanometer level, which greatly increased the area density of the magnetic unit. At the same time, the system based on soft magnetic NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> shows a coercive force of up to 2T, which is approximately 10 times higher than before. We ascribe the increase in coercivity of this system to the ferromagnetic-antiferromagnetic interface exchange interaction, vertical strain, and reduced magnetic column size.

## D12-52

### 磁性薄膜中的应变梯度及物性调控

张帮敏<sup>1</sup>

1. 中山大学

随着器件的小型化、多功能化的发展趋势，薄膜器件的制备与优化具有非常重要的意义。相较于块体材料，薄膜材料具有很多新奇的性质，其中一个特点就是应变梯度广泛存在于异质结薄膜中。过渡族金属氧化物中各种自由度的相互作用在材料中诱导了一系列新奇的物理现象，与材料的轨道结构、局域环境、磁电特性等有密切的联系。本报告主要讨论 ABO<sub>3</sub> 结构的氧化物中，应变梯度对薄膜的晶格常数、氧八面体及其之间相互调制的影响。在 LSMO/LAO 超晶格中，LSMO 和 LAO 之间的晶格失配在薄膜诱导了应变梯度，LSMO 层中不同的单胞层具有不同的 c/a 比例，并表现出了不同相变温度，具有准二维的特性；对于 STO 衬底上制备的锰氧化物单层膜，应变梯度不仅使其晶格常数发生非均匀变化，其氧八面体的畸变也具有渐变的趋势，并诱导产生了铁磁绝缘相；进一步的研究表明，应变梯度的大小与失配应变的大小无直接关联，氧八面体的旋转模式和晶格常数的相互调制可以在薄膜诱导较大的应变梯度，并影响材料内部的磁相互作用。该工作表明薄膜中广泛存在的应变梯度可以有效的调控材料的磁电特性。

## D12-53

### Magnetostriction, Soft Magnetism, and Microwave Properties in Co-Fe-C Alloy Films

Jiawei Wang<sup>1,2,3</sup>, Cunzheng Dong<sup>2</sup>, Yuyi Wei<sup>2</sup>, Xianqing Lin<sup>3</sup>, Mingmin Zhu<sup>1</sup>, Guoliang Yu<sup>1</sup>, Yang Qiu<sup>1</sup>, Yan Li<sup>1</sup>,  
Haomiao Zhou<sup>1</sup>, Nian X. Sun<sup>2</sup>

1. China Jiliang University

2. Northeastern University

3. Zhejiang University of Technology

In the past decades, ferromagnet-metalloid alloy films of Co-Fe-B have been widely used in spintronic devices due to their excellent performance, such as easy industrial-scale fabrication, considerable ability for tunneling magnetoresistance and perpendicular magnetic anisotropy. However, the insufficient thermal tolerance and interfacial state densities in the typical Co-Fe-B/MgO system limits the devices' optimization. Here, we report on the magnetostrictive behavior, soft magnetism, and microwave properties of a series of (Co<sub>0.5</sub>Fe<sub>0.5</sub>)<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub> films grown on silicon (001) substrates. The addition of carbon changes the Co-Fe-C films from nanocrystalline body-centered-cubic to an amorphous phase and leads to a high saturated magnetostriction constant of 75 ppm, high piezomagnetic coefficient of 10.3 ppm/Oe, excellent magnetic softness with a low coercivity less than 2 Oe, narrow ferromagnetic resonance line width of 25 Oe at the X band, extremely low Gilbert damping of 0.002, and up to 500 °C thermal stability. The large saturated magnetostriction constant and piezomagnetic coefficient result from the coexistence of nanocrystalline body-centered-cubic and amorphous phases. The extremely low Gilbert damping is related to the minimized density of states around the Fermi energy

of the alloys induced by carbon doping. It indicates that the high thermal stability of the medium doping Co-Fe-C alloy films originate from the stable structure phase and elements distribution during thermal annealing. The combination of these properties makes Co-Fe-C films promising candidates to be widely used in strain-mediated magnetoelectric devices and microwave magnetic devices.

#### D12-54

##### 基于界面局域环境优化磁性纳米材料微结构及催化性能

夏田雨<sup>1</sup>

1. 郑州大学

磁性纳米催化材料的表界面环境和其催化性能密切相关，活性位点周围的局域微环境深刻影响着界面电催化反应的进行。针对某一催化反应体系调控磁性纳米材料的微结构，优化其界面局域环境，能够从本质上改善磁性纳米材料的催化性能，在增强其本征活性的同时提高其长时间催化稳定性。电催化反应在很大程度上取决于纳米催化剂的内在活性和活性位点的数量，只关注其中一个而忽略另一个无法获得最佳催化效率。我们通过限域硒化反应设计并制备出了(CoFe)Se<sub>2</sub>@(CoFe)-N-C 纳米复合材料，能够同时提高催化活性位点的“质”和“量”。这种优异的(CoFe)Se<sub>2</sub>@(CoFe)-N-C 纳米催化材料在电化学析氧反应中表现出卓越的性能。特别是在苛刻的碱性电解质中进行了长达 500 小时的超长反应后，其过电位几乎保持不变。密度泛函理论计算也同时证实，(CoFe)Se<sub>2</sub>@(CoFe)-N-C 中的双金属硒化物和金属-N-C 的催化协同效应极大地优化了中间产物的吸附能力，调控其速率决定步骤。这种调控手段有利于理解磁性纳米催化材料构效关系的物理本质，指导提高同类反应的催化性能。

#### D12-55

##### 天线小型化用低损耗微波磁介电材料

李启帆<sup>1</sup>

1. 电子科技大学

基于高介电常数材料的天线小型化技术存在效率低、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，且由于其较小的电容性和较低的电磁能量密度，可以有效实现天线小型化和带宽增强。5G 天线急需具有高磁导率和介电常数、低磁损耗和介电损耗、高截止频率的磁介电材料。由于受磁导率自然共振频率限制，传统微波铁氧体通常在数百兆赫兹以下的频率范围内使用，从而无法满足这些要求。

我们通过固相反应法合成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。18H 六角铁氧体的晶体结构可以看作 Y 型六角铁氧体晶体结构中的 T 块插入三层六方钛酸钡块。Mg-Zn 掺杂的 MgZn 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，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。此外，磁谱阻尼系数在 300-410K 的温度范围内随温度的变化率为 0.0004K<sup>-1</sup>，这表明 Mg-Zn 18H 六角铁氧体的微波磁损耗具有出色的热稳定性。

将 Mg-Zn18H 六角铁氧体用作 3.6GHz 贴片天线的基板材料，天线的小型化系数约为 5。与传统电介质基板相比，基于 Mg-Zn18H 六角铁氧体的天线带宽显著提高约 50-110%。18H 六角铁氧体表现出作为传统 S 频段低损耗微波六角铁氧体替代品的巨大潜力，展现了在微波器件小型化领域潜在的商业价值。

#### D12-56

##### 液态金属基磁性复合材料制备及应用

于得海<sup>1</sup>，何志祝<sup>1</sup>

## 1. 中国农业大学

本报告介绍了一种液态金属基磁性复合材料，即通过永磁性粉末与室温液态金属复合，实现了高导电 ( $>10^6 \text{S/m}$ )、剩磁性 ( $>30 \text{emu/g}$ ) 和高导热性 ( $35.62 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )，阐述了通过钕铁硼颗粒相互吸引特性形成具有多孔隙定向网络结构将基载液固定其中形成磁性功能材料的机理，探究了其电-磁-热-力多功能协同特性、可操作性和长期稳定特性，展示了磁性复合功能材料的磁控效应在柔性电子、软体机器人和热管理等方面的应用价值。

## D12-57

## Pr-Co 合金辅助热压热变形制备各向异性双相纳米复合磁体

夏敬贤<sup>1</sup>, 周帮<sup>1</sup>, 黄韦达<sup>1</sup>, 余红雅<sup>1</sup>, 刘仲武<sup>1</sup>

## 1. 华南理工大学

纳米复合永磁一直被认为有希望成为下一代稀土永磁材料。由于缺乏低熔点晶界相和  $\alpha\text{-Fe}$  软磁相过多，通过热加工制备各向异性 Nd-Fe-B/ $\alpha\text{-Fe}$  纳米复合磁体是稀土永磁领域面临的重大技术难题。本文将 Pr-Co 合金添加到纳米复合磁粉中，在热压热变形过程中发生原位扩散，制备了各向异性纳米复合磁体。

在 Pr-Co 合金与纳米复合合金粉末混合的热压成型过程中，低熔点 Pr-Co 合金在热压过程中熔化，扩散进入磁粉，增加了热压磁体的致密度，其饱和磁极化强度和剩磁均优于未添加 Pr-Co 合金的热压磁体。Pr 元素进入主相，增加了主相的各向异性场，提高了磁体的矫顽力。进一步，以含 Pr-Co 合金 16.7 wt.% 的热压磁体作为前驱体，制备了热变形磁体。低熔点稀土合金在磁体热加工过程中充当晶界润滑剂，有利于晶粒翻转，获得取向。获得的热变形磁体的剩磁为 1.20 T，矫顽力为 836 kA/m，最大磁能积达 27.1 MGOe。分析表明，Pr 元素一方面进入主相，另一方面与 Nd 元素在晶界相富集，导致磁体矫顽力升高。Co 元素均匀分布于主相和晶界相，其从主相置换出来的 Fe 以及纳米磁粉中富含的 Fe 大量存在于薄层晶界相，有利于磁体的剩磁与饱和磁化强度。研究结果为进一步开发各向异性纳米复合热压和热变形磁体提供了理论和实验依据。

## D12-58

## 柔性磁敏三维力触觉传感器研究

杨华礼<sup>1</sup>, 谢亚丽<sup>1</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

柔性磁传感器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，在人机交互等领域具有重要应用前景。本次报告主要介绍全柔性磁性触觉传感器方面的工作，我们设计了基于磁弹性体和自旋阀薄膜的全柔性磁性触觉传感器，发现通过缓冲层工艺和底钉扎结构，可以调控反铁磁 IrMn 层的晶体结构，进而实现对自旋阀器件自偏置场和矫顽场的调控；最终获得了与在 Si 基衬底上性能相当的柔性自偏置自旋阀传感器，器件磁电阻值 8.7%，矫顽场 10 Oe，最高磁灵敏度 0.23%/Oe；通过优化形状各向异性和磁弹性体的磁化结构，降低了器件的磁回滞；探索了柔性衬底的微加工技术和柔性互联工艺，实现了压应力和剪切力的解耦，获得了具有三维力探测功能的柔性触觉传感器。该触觉传感器时间响应速度快 (~20 毫秒)、稳定性好 (在 6000 次循环后器件性能基本不变)、灵敏度高 (可探测 ~0.1Pa 压应力和 ~2mN 剪切力)，为实现触觉感知和智能抓取等应用提供了基础。最后，针对该触觉传感器可能面临的应力稳定性不足和柔韧性差等挑战，将介绍一些相关的研究结果，并提出可能的解决方案。

## D12-59

## 半导体金属氧化物异质结纳米材料的界面能带结构调控及其光降解应用

刘家龙\*<sup>1</sup>, 王强<sup>1</sup>, 王维<sup>1</sup>

## 1. 北京化工大学

半导体金属氧化物具有与可见光能量匹配的带隙宽度，在光的照射下产生电子和空穴，并进一步产生具有强氧化性和还原性的自由基（如·OH 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup>），使溶液污染物降解为二氧化碳和水。由于单一组分半导体金属氧化物的光生载流子复合过快，且不同氧化物导带底和价带顶的电势有所不同，并非所有氧化物都能同时产生强氧化性和还原性的自由基，因此采用两种或两种以上半导体形成异质结以调控界面能带结构，改善光吸收、载流子复合、电子传输效率，并最终提升光降解有机物、重金属离子的性能。本研究介绍了一系列半导体金属氧化物异质结纳米材料的合成，完成了从 II 型、Z 型到 S 型异质结的设计、转化和构建。首先通过水热法制备了一种 II 型高效的(1T/2H)-MoS<sub>2</sub>/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 异质结，具有良好的光催化去除有机染料性能，并能够实现磁回收。随后遴选具有不同能带结构的 WS<sub>2</sub> 与 MoS<sub>2</sub> 配对制备了 Z 型 CdS/WS<sub>2</sub> 异质结，使得光生电子和空穴分别保留在具有高还原性和高氧化性的能带上，第一性原理计算为解释其光催化染料降解和 Cr(VI) 离子还原反应的机理提供了理论依据。此外，结合水热法与煅烧法制备了 S 型 TCN/BiOI 异质结，其中 TCN 为一维管状 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>，并通过电子自旋共振谱证实了·OH 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 自由基的生成，这使其在光降解抗生素和 Cr(VI) 离子还原反应中表现优异。此外，还通过形貌、晶面选择调控 CeO<sub>2</sub> 纳米棒的带隙，并制备了一维 CeO<sub>2</sub>/ZnO 异质结纳米材料，实现从 II 型到 S 型构型转变。这一系列工作为设计和制备具有 S 型异质结光催化剂建立了一条新的途径。

## D12-60

## 微波/毫米波移相器用 Li 系铁氧体关键技术研究

蒋晓娜<sup>1</sup>，刘松林<sup>1</sup>，李贤韬<sup>1</sup>，余忠<sup>1</sup>，孙科<sup>1</sup>，邬传健<sup>1</sup>，李启帆<sup>1</sup>，兰中文<sup>1</sup>

## 1. 电子科技大学

微波/毫米波铁氧体移相器是无源相控阵雷达中相移单元的关键部件，具有承载功率高的独特优势，Li 系铁氧体因具有饱和磁化强度 ( $4\pi M_s$ ) 可调范围宽、剩磁比高及居里温度 ( $T_c$ ) 高等优势而成为 X 及以上频段移相器的首选材料。但铁氧体移相器存在外观尺寸难以小型化的技术瓶颈。为实现小型化，不仅需要移相器的结构进行优化设计，而且需要尽可能提高铁氧体的  $4\pi M_s$ ，以提高移相器单位长度的相移量。但这会导致铁氧体材料在未饱和磁化时的低场损耗增加，尤其在低温（如： $T < -40^\circ\text{C}$ ）下，这种现象更严重。另外，在低温时磁晶各向异性常数 ( $K_1$ ) 也会导致微波损耗上升。因此，针对上述矛盾问题，开展 Li 系铁氧体材料相关理论与技术研究。

为避免低场损耗，依据铁氧体移相器低 P 值设计原则和小型化设计要求进行铁氧体磁芯选材。采用归一化饱和磁化强度确定应用频段内铁氧体的  $4\pi M_s$ 。通过调控 Li 系铁氧体次晶格上的金属离子种类、数量及占位，获得适宜  $4\pi M_s$  及低磁化强度温度系数的配方体系。分析研究离子分布对铁氧体超交换作用和磁矩分布、 $T_c$  及  $K_1$  的影响，进而分析其对矫顽力 ( $H_c$ ) 和铁磁共振线宽 ( $\Delta H$ ) 的影响。发现通过非磁性离子 ( $\text{Ti}^{4+}\text{Zn}^{2+}$ ) 联合取代有助于获得适宜的  $4\pi M_s$  及低磁晶各向异性，对减小低场损耗和  $\Delta H$  具有重要作用。基于亚铁磁性超交换作用机制，研究铁氧体材料磁化强度、磁晶各向异性等性能参数的温度特性及调控技术。结合铁氧体自发磁化机制、磁畴理论及磁化方程等理论基础，研究铁氧体在不同温度时的剩磁及退磁等状态的磁现象，发现温度下降引起的  $K_1$  和  $4\pi M_s$  上升会导致低温损耗增加。利用 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等添加剂助熔和阻晶交互作用，促进烧结过程中不同温度段的铁氧体固相反应，不仅可调控晶粒/晶界特性，而且可降低烧结温度，抑制 Li 挥发，故可进一步实现高剩磁比 ( $B_r/B_s$ )、低  $H_c$  和低微波损耗（微波磁损耗和介电损耗）控制。最终获得了具有低损耗和低剩磁温度系数 ( $\alpha_{Br}$ ) 的铁氧体材料性能调控关键技术。

基于优化的铁氧体性能参数及移相器设计理论，进行 X 波段及 Ka 波段移相器研制，测试结果表明优化后的铁氧体材料能够有效降低 X 波段移相器在低温、低频下插入损耗高的问题。Ka 波段铁氧体移相器在满足 360°相移的同时具有插入损耗小的显著特点。这能为相控阵雷达系统进一步小型轻量化提供关键材料支撑，对推动雷达探测装备系统性能改善及产品升级具有重要意义。

## D12-61

### 低损耗自偏置微波铁氧体材料及微集成器件应用研究

孙科<sup>1</sup>, 邬传健<sup>1</sup>, 楚兆龙<sup>1</sup>, 李启帆<sup>1</sup>, 蒋晓娜<sup>1</sup>, 余忠<sup>1</sup>, 兰中文<sup>1</sup>

1. 电子科技大学

微集成是未来微波器件的发展方向, 尤其是在空间雷达技术、5G 毫米波技术、无人驾驶技术等领域亟需微波器件完全摆脱外置磁钢束缚, 实现 MICC 化。但制约其进一步提升的“卡脖子”技术是应用于其中的低损耗自偏置微波铁氧体材料。

采用传统氧化物陶瓷法研制出低损耗自偏置微波铁氧体材料, 着重分析了自偏置微波铁氧体材料的占位分布及温度稳定性。低损耗自偏置微波铁氧体材料的  $\mu_s(T) \sim T$  曲线为典型的 Q 型曲线; 拟合所得的分子磁矩  $\mu_s(T)_{\text{fit}}$  与实测值  $\mu_s(T)_{\text{test}}$  吻合良好; 表 1 所示列出了通过 MATLAB 拟合所得的五种主要的分子场系数  $\omega_{\text{im}}$  以及居里温度的实测值  $T_c(\text{test})$  与拟合值  $T_c(\text{fit})$  之间的对比。从表中可以得出以下结论: (1) 由于  $2a$ 、 $2b$  和  $12k$  晶位上的磁矩自旋向上, 而  $4f_1$  和  $4f_2$  晶位上的磁矩与之相反, 因此分子场系数  $\omega_{\text{bk}}$  的符号与  $\omega_{\text{bf}2}$ 、 $\omega_{\text{kf}1}$ 、 $\omega_{\text{af}1}$  和  $\omega_{\text{kf}2}$  相反; (2) 五种主要分子场系数的绝对值随着 La-Co 取代量的增加而减小, 分子场系数的减小表明各晶位之间的交换作用减弱, 即居里温度  $T_c$  下降; (3) 在相同取代量下, 相较于其余四种,  $2b-4f_2$  晶位之间的交换作用最大, 即分子场系数  $\omega_{\text{bf}2}$  的绝对值最大。

通过优化工艺配方, 研制出综合性能优异的低损耗自偏置微波铁氧体材料, 并设计出 X 波段微型环形器实物原型, 在  $-40 \sim 110$  °C 时插损  $\leq 1.0$  dB, 隔离度  $\geq 16$  dB, 带宽为 0.4 GHz。

#### D12-62

### 过渡金属氧化物的氢致相变研究进展

周轩弛\*<sup>1</sup>, 许小红<sup>1</sup>

1. 山西师范大学

强关联氧化物中电荷、晶格、轨道及自旋等多种自由度间的关联、耦合与重构, 使其材料体系中衍生出丰富的新奇物性, 而如何实现其物性的可控设计与精准调控成为目前凝聚态物理和材料科学领域的前沿研究重点及共性科学问题。本报告将详细介绍本课题组近年来在强关联氧化物氢致相变领域中的研究进展。我们基于氢化或质子化相关的电子掺杂效应有效地调控强关联氧化物的电子占据态、电子轨道构型及自旋构型, 触发其发生多重可逆的莫特电子相变及磁转变, 并引入新的功能调控自由度—离子, 进而在关联氧化物材料体系中发现多种新型量子态和功能特性。最近, 我们借助核反应分析对氢化强关联氧化物中的氢含量进行精准的定量化表征, 厘清了氢含量在强关联氧化物氢致相变中的关键作用及氢致相变的物理机制, 并从氢化动力学的角度进一步探索强关联氧化物氢相关相图中的新奇物性和多重相变特性。我们期望利用氢化或质子化的手段进一步探索强关联氧化物材料体系中的新奇物性、新物理、新器件和新应用。

#### D12-63

### 防腐蚀吸波材料的设计与制备

马林<sup>1</sup>, 马嵩<sup>1</sup>

1. 中国科学院金属研究所

我国是一个海洋大国, 海上电子信息安全十分重要, 电磁波吸收材料在其中起着关键的作用, 传统吸波材料常因不具备防海水及微生物腐蚀性能而易发生失效。因此, 对新型防腐蚀吸波材料的研制及其作用机制研究至关重要。为解决前述问题, 本工作以磁性金属作为磁性来源, 碳材料作为吸波所需要的介电以及防腐蚀的来源, 制备碳包裹软磁金属纳米胶囊防腐蚀吸波材料。磁性金属元素可赋予磁电复合材料可控的阻抗特性, 多种形式及形貌的碳材料可改善电磁匹配以达到平衡, 还可以作为防腐蚀的基础制备防腐蚀吸波材料。

#### D12-64

**两步酸化绝缘包覆改善 FeSiBCr 非晶软磁复合材料磁性能**袁童欣<sup>1</sup>, 黎向东<sup>1</sup>, 王弘祥<sup>1</sup>, 余红雅\*<sup>1</sup>, 刘仲武<sup>1</sup>

1. 华南理工大学

非晶合金较传统软磁材料具有低的矫顽力、高的电阻率和较高的耐蚀性等优异的服役性能, 在高频应用中具有较大的优势。但是, 与晶态金属相比, 非晶合金结构均匀, 没有晶界、位错和层错, 同时由于熔融快淬也避免了第二相和成分偏析等缺陷, 利用传统包覆方法难以在其表面生成高电阻率的绝缘层, 无法满足非晶软磁复合材料的高频应用。

为了改善 FeSiBCr 非晶磁粉的绝缘包覆效果, 在粉末表面制备出连续、均匀且电阻率高的绝缘层, 本研究采用磷酸-盐酸两步酸化对 FeSiBCr 非晶粉末进行绝缘包覆处理, 分析了复合绝缘层的生长机制, 系统研究了盐酸浓度对 FeSiBCr 非晶软磁复合材料磁性能的影响。研究表明, 经过盐酸二次酸化后, H<sup>+</sup>与磷化非晶粉末表面岛状磷酸盐优先反应, 使磷酸盐溶解, 粉末表面粗糙度降低; 同时在酸性条件下, H<sup>+</sup>与 O<sub>2</sub>共同作用, 将磷化绝缘层中的 Fe<sup>2+</sup>氧化为 Fe<sup>3+</sup>, 并生成了金属氧化物, 大大提高了磁粉芯的体积电阻率。但当盐酸浓度过高时, H<sup>+</sup>会破坏绝缘层的完整性, 导致磁性能恶化。当盐酸浓度为 0.5 wt.% 时的磁粉芯有最佳的综合磁性能, 与磷化非晶磁粉芯相比, 其体积电阻率提升 103.4%, 达到 3.56×10<sup>5</sup> Ω·m, 磁导率仅下降 0.16%, 磁芯损耗降低 16.04%, 为 3244 mW/cm<sup>3</sup> (100 mT, 100 kHz)。

**D12-65****退火温度对 Gd 基金属纤维组织结构和磁性能的影响**于世阳<sup>1</sup>, 李泽<sup>1</sup>, 刘景顺\*<sup>1</sup>

1. 内蒙古工业大学

Gd 基金属纤维由于其显著的磁热效应, 可作为一种潜在的磁制冷工质, 得到了研究者的广泛关注。本文采用旋转蘸取工艺制备了 Gd 基金属纤维并进行退火处理, 探究其结构变化对磁学性能的影响, 并对其机理进行了系统的阐述。研究结果表明, 所制备的 Gd 基金属纤维具有良好的非晶形成能力和热稳定性。经 380 °C 退火处理后, 纤维的最大磁熵变值  $\Delta S_m^{\max}$  为 7.20 J/kg K, 其制冷能力 RC 和相对制冷量 RCP 分别为 459.4 J/kg 和 588.7 J/kg。由高分辨透射电子显微分析结果可知, 退火处理后纤维内部组织有序度由 4.69% 提高到 20.31%, 局部区域呈明显的明暗相间条纹, 出现了原子团簇现象, 使其内部磁晶各向异性降低。同时, 当外磁场作用时, 纤维内部微区原子磁矩转动状态及磁畴结构分布会发生明显变化, 进而影响纤维整体的一般磁学性能及磁热特性。总之, 上述研究工作可促进 Gd 基金属纤维在磁制冷工程的应用。

**D12-66****ATMP 处理还原铁粉制备软磁复合材料**祁相如<sup>1</sup>, 刘晓\*<sup>1</sup>

1. 山东大学

本研究采用氨基三亚甲基磷酸(ATMP)表面处理制备铁基软磁复合材料(SMCs)。分析了 SMCs 的组成和微观结构, 以评估其磁性能的变化。随着处理时间的增加, 粉末表面的绝缘层逐渐增厚, 改变了环形样品压实后的内部形态和导电路径。磁性能和铁芯损耗的变化主要是由于电阻率的增加和磁稀释效应的增强。通过调整加工时间, 获得了最佳的软磁性能( $\mu_e = 96.7$ ,  $P_t = 266.6 \text{ mW/g}$ , 在 100 kHz 和 50 mT 条件下测量)。与未处理样品相比, 损耗降低了 75.2%, 提高了软磁复合材料在中高频的应用潜力。

**D12-67****一体成型电感绝缘耐压测试方法及其提高途径**王弘祥<sup>1</sup>, 吴雅祥<sup>1</sup>, 余红雅\*<sup>1</sup>, 袁涵<sup>1</sup>, 刘仲武<sup>1</sup>

1. 华南理工大学

随着电路拓扑和功率半导体向高功耗、集成化、可持续化高速发展，电工电子设备对能量转换系统中的软磁材料提出了高效且稳定的功率转换需求。一体成型电感以磁粉芯（软磁复合材料）为核心工艺路线，凭借优异的磁性能表现在交变电路中起着储能和扼流的关键作用，但高功耗、高频率的应用放大了其结构上的不耐电压特性。因此，平衡磁粉芯的磁性能及服役性能就成为扩大一体成型电感应用领域的关键。但是，目前市面上的一体成型电感普遍存在不耐高压的缺点，且尚未见标准化的绝缘耐压测试方法。

本文研究了一体成型电感的绝缘击穿机理，厘清了一体成型电感无法承受高电压的根本原因，通过分析 AC/DC、漏电流阈值设置参数的影响，对磁粉芯及一体成型电感的绝缘耐压测试方法提出了相应的建议。随后，基于异质界面的构造和纳米颗粒复合，探究了从材料角度提高一体成型电感绝缘耐压性能的基本途径。研究表明，与常规工业磷化处理相比，利用低浓度磷化和纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合制备而成的磁粉芯磁性能达到  $\mu_e=36.17$ ， $Q=58.13$  (1MHz)，磁损耗  $P_{cv}$  为  $649.1\text{kW m}^{-3}$  (50mT, 100kHz)。基于磁性能满足应用需求的前提下，实现统计耐压强度从 135V 增至 169V，增幅超过 25%。通过微观结构表征和计算模拟分析，证明磁粉芯绝缘耐压强度与体系介电常数、自由体积分布密切相关。本研究为一体成型电感的绝缘耐压测试标准化及其在高电压下的应用优化提供了参考。

## 墙报

### D12-P01

#### Restricted Boltzmann Machines Implemented by Spin-Orbit Torque Magnetic Tunnel Junctions

Xiaohan Li<sup>1</sup>, Caihua Wan<sup>\*1</sup>, Xiufeng Han<sup>1</sup>

1. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

Artificial intelligence has surged forward with the advent of generative models which rely heavily on stochastic computing architectures enhanced by true random number generators with adjustable sampling probabilities. In this study, we develop spin-orbit torque magnetic tunnel junctions (SOT-MTJs), investigating their sigmoid-styled switching probability as a function of the driving voltage. This feature proves ideally suited for such stochastic computing algorithms as the restricted Boltzmann machines (RBM) prevalent in pretraining processes. We exploit SOT-MTJs as both stochastic samplers and network nodes for RBMs, enabling the implementation of RBM-based neural networks to achieve recognition tasks for both handwritten and spoken digits. Moreover, we further harness the weights derived from the preceding image and speech training processes to facilitate crossmodal learning from speech to image generation. Our results clearly demonstrate that these SOT-MTJs are promising candidates for developing hardware accelerators tailored for Boltzmann neural networks and other stochastic computing architectures.

### D12-P02

#### Ce 磁体中 Tb 的最大化利用：Pr 的协同扩散机制

宋笑龙<sup>1</sup>, 孙齐松<sup>1</sup>, 方以坤<sup>1</sup>, 朱明刚<sup>\*1</sup>

1. 钢铁研究总院

稀土永磁材料广泛应用于风力发电、新能源汽车、工业电机和国防新技术领域，是世界各国发展高新技术产业和国防军工尖端技术的战略材料。稀土永磁材料始终围绕着高性能和高性价比两个主题展开，这对高性价比的 Ce 磁体的研发提出更高的要求。目前，Ce 磁体中扩散重稀土面临着扩散深度有限的难题，且随着磁体中 Ce 含量越高越明显。本研究提出了 Ce 磁体中最大化利用重稀土 Tb 的策略。采用粉末冶金工艺制备了 Ce 占稀土总量为 40 wt.% 的双主相磁体，名义成分为  $[(\text{PrNd})_{0.6}\text{Ce}_{0.4}]_{30.5}\text{Fe}_2\text{B}_{1.0}\text{M}_{0.95}$  (M=Co, Cu, Ga, Al wt.%), 命名为 DMP Ce40。分别以  $\text{Tb}_{80}\text{Al}_{20}$  和  $\text{Pr}_{60}\text{Tb}_{20}\text{Al}_{20}$  (at%) 为扩散源制备了晶界扩散 Ce 磁体，命名为 Tb-Al 和 Pr-Tb-Al。结合第一性原理计算和微磁学模拟，探讨了在 Ce 磁体中如何最大化利用重稀土 Tb。扩散 Pr-Tb-Al 合金后，矫顽力、剩磁和最大磁能积分别为 16.37 kGs、12.72 kOe 和 38.77 MGOe。

与原始 DMP Ce40 磁体(7.50 kOe、12.73 kGs 和 36.00 MGOe)相比,磁性能得到明显的提升。进一步深入探讨了 Ce 磁体中 Pr 协同扩散的动力学机制。元素分布结果表明, Tb 元素沿晶界的扩散能力增强了。Pr 元素的协同扩散效应促进了 Tb 元素的深度扩散。微观结构显示,进入主相部分的 Tb 形成富 Tb 壳结构,核壳结构的深度(沿 c 轴)增加。磁化反转和磁畴演化过程共同揭示了磁体热稳定性提高的根本原因。通过优化重稀土扩散源合金的组份以及扩散工艺,双主相 Ce 磁体的矫顽力得到了明显的提升,同时保持了剩磁基本不降。它为拓宽高 Ce 含量的 Ce 磁体的应用领域提供了新的实验支持。

## D12-P03

### 多极自旋波驱动斯格明子动力学

类延盟<sup>1</sup>, 秦明辉\*<sup>1</sup>

1. 华南师范大学华南先进光电子研究院

斯格明子具有新颖的物理特性并且在功能器件中有广泛的应用前景,从而引起了研究人员的极大关注。有效调控斯格明子的动力学行为不仅可以推动自旋电子学器件的发展,还会带来丰富的物理现象。作为晶格中自旋磁矩的集体振动,自旋波在与斯格明子相互作用时存在动量交换,斯格明子会受到散射压力而运动。本工作利用微磁学模拟,在铁磁材料 Pt/Co 中,发现一种携带轨道角动量的柱面波—多极自旋波可以有效驱动斯格明子。并且轨道角动量量子数导致散射压力和激发场力的不同,实现了对斯格明子动力学的调控。首先,通过涡旋光的激发产生了多极自旋波,并且通过改变轨道角动量量子数的大小和符号,实现了对多极自旋波极数和旋向的调控。其次,改变轨道角动量量子数的符号,不仅激发场力受到量子数符号的影响,而且自旋波散射角度也发生变化,进而引起了散射压力的变化。这两个力的共同作用导致单个斯格明子在正量子数下和负量子数下分别向波源处运动和圆周运动。最后,考虑到真实 Pt/Co 体系中普遍存在多个斯格明子,当量子数为正时,模拟表明多个斯格明子会出现融合为一个斯格明子。本文的研究结果表明,通过改变轨道角动量量子数的符号不仅实现了斯格明子运动轨迹的调控,还实现了多个斯格明子的融合,为设计基于斯格明子的纳米振荡器和逻辑器件提供了一个新的方案。

## D12-P04

### 基于 Ni 和 Cr 的冶金行为设计超高耐蚀性 NdFeB 磁体

吴亚萍<sup>1</sup>, 方以坤<sup>1</sup>, 朱明刚<sup>1</sup>, 李卫<sup>1</sup>

1. 钢铁研究总院有限公司

为解决烧结 NdFeB 磁体耐蚀性不高的问题,通常的方法是提升晶界相耐蚀性。事实上, NdFeB 主相在氧化环境中也会发生氧化分解,且为自发反应,因此主相也发生腐蚀。然而关于提升主相耐蚀性和主相耐蚀性对 NdFeB 整体耐蚀性影响的系统研究鲜有报道。本文基于第一性原理计算,设计了一种独立调控晶界相和主相的策略,利用 Ni 和 Cr 在晶界相和主相具有择优分布冶金行为的特点设计并制备了 NdNiFeCrB 磁体。通过对该新型磁体和传统 NdFeB 磁体的腐蚀行为和微观结构研究,为获得腐蚀速率较低的超高耐蚀性以及“不锈”钕铁硼新型磁体的设计和制备提供经验。通过元素分布和微观结构分析, NdNiFeCrB 磁体中 Ni 和 Cr 的元素分布满足在晶界相和主相的择优分布,结果显示 NdNiFeCrB 磁体在湿热环境和 3.5wt% NaCl 溶液中的耐蚀性明显优于传统 NdFeB 磁体,通过腐蚀行为研究和开尔文扫描探针电位分析表明, NdNiFeCrB 磁体耐蚀性得到提高的原因在于:(1) Ni 和 Cr 的添加降低了晶界相和主相的电位差,从热力学上降低了腐蚀倾向性;(2) Ni 进入晶界相后,与 Nd 形成了稳定的化合物 Nd<sub>3</sub>Ni,降低了晶界相的化学活性;Cr 进入主相减少氧对主相的扩散,有助于保护基体免受持续腐蚀。因此,提升 NdFeB 磁体耐蚀性的关键在于降低晶界相和主相的电位差,同时提升晶界相和主相的稳定性。

## D12-P05

### 电流驱动 Kitaev 磁体中的斯格明子和反斯格明子

关淑华<sup>1</sup>, 邹小龙<sup>1</sup>

## 1. 清华大学深圳国际研究生院

Skyrmion and antiskyrmion have attracted great interest in condensed matter physics due to their application prospects in data storage, which requires deep understanding and feasible control of their dynamics. Despite recent progress on their current-driven dynamics, the effects of Kitaev interaction are rarely explored. Here, we take monolayer frustrated magnet  $\text{NiBr}_2$  as an example to reveal the general current-driven skyrmion and antiskyrmion dynamics induced by Kitaev exchange. Through first-principles calculations and Monte Carlo simulations, a magnetic field-strain phase diagram is proposed, which contains five different phases, including topological skyrmion and antiskyrmion. Subsequently, by performing Landau-Lifshitz-Gilbert simulations, we find that the skyrmion / antiskyrmion has specific helicity in the presence of Kitaev term, leading to its translational motion under current driving. Furthermore, the helicity is unlocked for sufficiently high current density, resulting in its rotation. The critical behaviors and skyrmion velocity are analyzed by Thiele theory. Based on these phenomena, we propose two new proof-of-concept devices, skyrmion separator and non-gate logic unit. Our findings lay a foundation for studying topological structures dynamics in Kitaev magnets.

**D12-P06****Enhancement of Perpendicular Magnetic Anisotropy in  $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (111) Epitaxial Films via Synergistic Stoichiometry and Strain Engineering**Zhengguo Liang<sup>1</sup>, Lingfei Wang\*<sup>1</sup>

1. USTC

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-P07****涡旋光驱动铁磁畴壁的超快动力学**刘雨飞<sup>1</sup>, 秦明辉\*<sup>1</sup>

1. 华南师范大学华南先进光电子研究院

光调控磁结构具有易操作, 响应快, 低能耗等优点, 涡旋光的光子可同时携带自旋角动量(SAM)和轨道角动量(OAM), 通过角动量的传递可以用涡旋光操纵和驱动磁孤子, 即俗称的“光镊子”。我们使用微磁学模拟研究了涡旋光与铁磁纳米环中畴壁相互作用的动力学行为, 我们的模拟参数基于现实中的  $\text{Pt/Co/AIO}_x$  铁磁体系。我们发现线偏振涡旋光和圆偏振涡旋光对磁畴壁呈现出不同的驱动效果。线偏振光主要通过光磁场与畴壁磁化方向的匹配来携带畴壁圆周运动, 畴壁在运动的过程中  $\phi$  角周期性地切换, 因而体系中不能存在使畴壁具有固定手性的 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DMI), 轨道角动量量子数  $m$  互为相反数的线偏振光分别可以操纵畴壁做方向相反, 速度大小相等的圆周运动。圆偏振光由于同时携带 SAM 和 OAM, 因而与线偏振光相比, 圆偏振光对畴壁运动的调控多了一个自由度, 畴壁的运动呈现出更

丰富且有规律的现象，同时为了迎合 SAM 的作用，畴壁在运动的过程中需要保持固定的手性，因而 DMI 是必不可少的。我们还基于我们研究的铁磁纳米环中的畴壁提出了其在开发磁纳米振荡器方面的潜力。

## D12-P08

### DMI 诱导的亚铁磁自旋波非互易传输

刘雨飞<sup>1</sup>, 秦明辉\*<sup>1</sup>

1. 华南师范大学华南先进光电子研究院

自旋波作为一种磁有序体内的低能集体激发，具有波长短，不产生焦耳热的特点，这些特点使其有望运用于未来的磁存储和逻辑器件中。而在亚铁磁体中，自旋波具有更高的工作频率(GHz 级)，且易于被探测。Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DMI)作为一种普遍存在于手性磁体中和磁性层界面的反对称相互作用，进一步可能打破自旋波传输的简并性，因此产生的非简并效应可以用来作为信息比特来记录信息和进行逻辑运算。我们基于稀土元素 Gd 和过渡金属 Co 经反铁磁耦合形成的亚铁磁化合物的材料参数，从理论和微磁学模拟出发研究了 DMI 对亚铁磁自旋波传输的影响。我们发现 DMI 会引发亚铁磁自旋波的非互易传播，这背后的物理机制是 DMI 的存在打破了亚铁磁体磁序在低能激发下的能量对称性。我们还发现这种非互易现象实质上是一种多普勒频移，频移的方向取决于自旋波的手性和 D 矢量的方向，而与净角动量密度的符号无关。同时由于 DMI 可以提高系统的自由能，因而其存在可以在低频区有效地延缓亚铁磁自旋波的衰减。我们还提出了我们的发现在实验上的一些应用，如借助自旋波的非互易传输测量亚铁磁材料的 DMI 强度，估算角动量补偿点温度，借助 DMI 调控自旋波的相位和振幅。

## D12-P09

### 基于电爆炸的碳包覆 FeCoNi 三元合金纳米粉体制备及其电磁吸收性能

梁沥文<sup>1</sup>, 吴坚\*<sup>1</sup>, 殷泽坤<sup>1</sup>, 孔春才<sup>2</sup>, 王斌<sup>2</sup>, 石桓通<sup>1</sup>, 李兴文<sup>1</sup>

1. 西安交通大学电气绝缘与电力设备国家重点实验室

2. 西安交通大学物理学院

电磁波吸收材料在通信、电子、雷达、航天等技术迅速发展的环境下，解决电磁干扰和电磁污染具有重要意义。基于对高性能电磁波吸收材料的重大需求，探索非金属复合吸波材料的高效合成手段有着重要意义。金属丝电爆炸法作为一种快速冷却 ( $10^8\text{K/s}$ ) 的纳米粒子合成策略，具备优异的合金化能力，然而目前对其产物种类的探索仍局限于少组分合金，对于碳复合材料的探索较少。本文采用金属丝电爆炸法合成了 FeCoNi@C 核壳型复合纳米吸波材料，探究了核壳型结构对电磁波吸收机理的影响。Fe、Co 和 Ni 的金属丝直径为 0.3mm，长度为 7.5cm，选择丝束性能为 48K (48000 根) 的碳纤维丝，将 Fe、Co、Ni 三元金属丝与碳纤维以不同原子比均匀缠绕在一起并连接在电爆炸腔体的正极和负极，向  $4\mu\text{F}$  电容器中以 12mA 电流充入电压 28kV 进行丝爆后使用铜网收集产物。由 XRD 衍射图观察到了具有 (111) (200) 和 (220) 晶面的单相 FCC 结构，电爆炸产物的相种类单一，未出现其他杂相，未观察到其他金属碳化物和单质碳，证实了丝爆法是一种合成高纯度碳复合材料的优异方法。不同原子比例下的粒径分布未出现显著差异，均呈现出正态分布且近 50% 集中在  $0.03\mu\text{m}\sim 0.06\mu\text{m}$  之间。由 EDS 线扫描和面扫描结果可知，结果均与典型的碳包覆 FeCoNi 合金的核壳型结构相对应。将粉末/石蜡(质量比为 4:1)混合压缩成内径 3mm，外径 7mm，厚度 2mm 的标准测试环样，填充率为 80% 进行电磁吸收性能测试。由电磁参数分析可知，碳层与金属颗粒之间的异质界面能够有效提高了介电损耗能力，增强自然共振和交换谐振过程，其衰减损耗能力相比合金纳米粒子显著增强，主要是由于增强了介电损耗能力。当厚度为 1.5mm 时最大有效吸波带宽达到 6.48GHz，当厚度为 2.8mm 且频率为 4.69GHz 时最大反射损耗达到 -58.84dB。此项工作探究了核壳型结构对微观吸波机理的影响并为丝爆法合成碳复合材料提供了参考，也证实了金属丝电爆炸法能够作为一种有效的碳复合吸波材料合成手段，有望进一步提高吸波材料的合成效率和综合性能。

## D12-P10

### 利用低熔点元素构筑 SmFe<sub>12</sub> 基烧结磁体的晶间相

周相龙<sup>\*1</sup>, 吴汪宗<sup>1</sup>, 姜波<sup>1</sup>, 徐海波<sup>1</sup>, 马强<sup>1</sup>

1. 中国科学院赣江创新研究院

ThMn<sub>12</sub> 型 SmFe<sub>12</sub> 基永磁材料因其兼具高内禀磁性能、高热稳定性及低稀土含量, 是极具发展潜力的稀土永磁材料之一。但是, 在添加非磁性元素稳定 SmFe<sub>12</sub> 相结构的同时, 如何在烧结磁体中构筑起低熔点富稀土晶间相已成为突破该磁体矫顽力瓶颈的关键。我们在优化合金成分以稳定 SmFe<sub>12</sub> 相基础之上, 添加低熔点元素 Cu, 通过传统粉末冶金工艺制备了名义成分为 Sm<sub>7.7</sub>Fe<sub>75-x</sub>V<sub>9.2</sub>Ti<sub>6.2</sub>Al<sub>1.5</sub>Cu<sub>x</sub> (x=0、0.4, at.%, 其中 Sm 过量 40 wt.%) 的磁体。通过多种表征方法对两类磁体展开了对比研究, 发现了低熔点元素 Cu 添加使磁体中形成连续薄层的富 Sm 晶间相, 同时在三角晶界处形成了 Sm-Cu 相。因此, 磁体的矫顽力、剩磁分别由 4.7 kOe、5.4 kG 提升到 5.1 kOe、6.1 kG, 而剩磁的提升还与低熔点元素添加更有利于液相烧结, 使磁体的致密度提高有关。通过进一步研究烧结工艺发现, 高温或长时间烧结可以显著提高磁体的致密度, 但不利于磁性能。

综上, 我们对添加低熔点 Cu 元素 SmFe<sub>12</sub> 基烧结磁体做了对比研究, 证实了过量钐和低熔点元素添加可构筑连续、均匀薄层晶间相, 揭示了组织演变规律; 为 SmFe<sub>12</sub> 基永磁材料的实用化提供了理论依据。

#### D12-P11

##### 自旋交叉阵列的无外场磁化翻转

邓永城<sup>1</sup>, 李伟浩<sup>1,2</sup>, 兰修凯<sup>1,2</sup>, 刘雄华<sup>1</sup>, 王开友<sup>\*1,2</sup>

1. 中国科学院半导体研究所

2. 中国科学院大学

自旋轨道力矩(SOT)器件具有高速、低功耗、高稳定性等优点, 在自旋电子学领域具有广泛的应用前景。基于 SOT 交叉阵列 (crossbar array) 器件的全电学调控是 SOT 走向应用的关键, 目前未见相关报道。本报告实现了基于 SOT 交叉阵列器件的霍尔交叉节点的全电学磁化翻转。通过分析电流分布和微磁学仿真, 发现自旋交叉阵列器件的无场 SOT 翻转是由于网状电路的分流效应导致霍尔交叉处电流密度梯度分布不对称所致。另外本工作还演示了自旋交叉阵列器件的三态磁化翻转和写保护功能。这一工作将进一步推动基于自旋交叉阵列器件的高效内存或边缘计算的应用。

#### D12-P12

##### 具有高效电磁波吸收和防腐性能的双氧化物包覆羰基铁复合材料

齐炜炜<sup>1,2</sup>, 项岚<sup>1</sup>, 宁明强<sup>1</sup>, 李媛媛<sup>1</sup>, 满其奎<sup>\*1</sup>, 沈宝根<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 江西理工大学

目前对电磁波 (EMW) 吸收需求的不断提高, 不仅要满足传统的“薄”、“轻”、“宽”、“强”, 还要求具有出色的耐腐蚀性能以确保在恶劣环境中长期稳定和有效的服役性能, 因此开发能够有效应用于极端腐蚀环境下的高效防腐电磁波吸收材料势在必行, 也是当前研究的热点问题。本文通过溶胶-凝胶法和高温热处理合成了具有宽带 EMW 吸收和优异耐腐蚀性的双氧化物 (ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>) 包覆羰基铁 (CI) 复合材料。基于 ZrO<sub>2</sub> 层的成分调制和 SiO<sub>2</sub> 层对介电常数的有效平衡, 所制备复合材料的最小反射损耗 (RL<sub>min</sub>) 为 -48.58 dB@1.9 mm, 有效吸收带宽 (EAB) 为 7.62 GHz@1.6 mm。此外, CI@ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 还表现出优异的耐腐蚀性, 腐蚀电流密度为 8.6×10<sup>-7</sup> A/cm<sup>2</sup>, 极化电阻为 3.6×10<sup>5</sup> Ω。本工作为优化宽带 EMW 吸收性能以及针对耐腐蚀应用的大规模生产提出了一种新的思路。

#### D12-P13

##### 高矫顽力、高剩磁烧结 Nd-Fe-B 磁体的结构与磁性研究

姜波\*<sup>1</sup>, 李岩文<sup>1</sup>, 徐海波<sup>1</sup>, 周相龙<sup>1</sup>, 马强<sup>1</sup>

1. 中国科学院赣江创新研究院

烧结 Nd-Fe-B 稀土永磁材料是当今磁性能最高、应用最广、发展速度最快的新一代永磁材料<sup>[1]</sup>。近年来, 随着风力发电、混合动力汽车产业的快速崛起, 市场对于高综合磁性能的钕铁硼磁体需求如日剧增。当前开发高性能钕铁硼磁体, 特别是高矫顽力磁体, 主要通过添加重稀土元素 (HRE) Dy、Tb 来形成磁性各向异性场更高的(HRE, Nd)<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 相来实现矫顽力的提高, 但是由于 Fe 原子和 Tb/Dy 原子之间的反铁磁耦合会使得剩磁下降<sup>[2-3]</sup>。此外, HRE 元素的价格远高于 Nd 的价格, HRE 的添加将显著增加磁体制造的材料成本。因此, 开发低重稀土含量的高矫顽力钕铁硼磁体对于提高稀土永磁材料的磁特性和降低生产成本具有重要意义。

本文采用了双合金工艺, 在 Nd-Fe-B 的主体成分中, 辅助添加富 Tb 合金, 结合无压取向成型技术, 制备了高矫顽力 (~18.5kOe)、高剩磁 (~14.8kG) 的低 Tb 含量 (<1.2 wt%) (Nd,Tb)-Fe-B 稀土永磁体, 实现重稀土元素的高效利用。研究表明, 磁体内部形成了连续且均匀的晶界相, 降低了主相晶粒之间的交换耦合; 同时主相晶粒表层形成了薄的 Tb-Fe 壳层, 提高了主相的磁晶各向异性场, 提升矫顽力。通过无压取向成型技术, 改善了传统压力成型工艺中取向不足的问题, 进一步提高了剩磁。本工作为高矫顽力、高剩磁烧结 Nd-Fe-B 磁体的开发提供了新的方向和思路。

## D12-P14

### 铂基稀土合金化合物的合成与氧化还原性能的研究

马丹丹<sup>1,2</sup>, 马金福<sup>2</sup>, 李国伟\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 北方民族大学

近年来, 质子交换膜燃料电池(PEMFC)技术已广泛应用于燃料电池汽车。然而, 为了满足轻型和重型运输以及降低成本的双重要求下, PEMFC 需要在大电流密度下保持高性能和长使用寿命。因此, PEMFC 的广泛应用在很大程度上依赖于电催化剂质量活性的显著提高, 以应对缓慢的氧还原反应(ORR)和整个燃料电池运行条件下的稳定性。理论和实验研究得出结论, 将 Pt 与稀土金属(REMs)合金化导致的 ORR 活性是迄今为止报道的最高的。同时, Pt-REM 合金具有较高的长期稳定性, 引起了学术界的关注。Pt-Gd 已被确定为 ORR 中最有前途的 Pt-REM 合金之一, 我们通过形成不与氧气和水反应的中间体后在还原气氛下生成 PtGd/C 纳米结构电催化剂。该催化剂半波电位为 0.90V, 在经过 10000 圈循环后, 半波电位下降较少, 展现了优异的稳定性。

## D12-P15

### Observation of planar Hall effect in quasi-two-dimensional topological insulator candidate Ni<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>2</sub>

Yuzhe Ma\*<sup>1</sup>

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

The observation of the Planar Hall Effect (PHE) sheds light on the spin textures and topological characteristics of materials, indicating potential applications in quantum computing and electronic devices. However, in bulk single crystals of topological insulators (TIs), where the chiral anomaly is absent and the contribution of topological surface states can be overlooked, the origin of PHE remains elusive. Here, we have obtained high-quality single crystals of Ni<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>2</sub> and systematically investigated their magneto-electric transport properties. The ordinary Hall resistivity reveals the simultaneous presence of electrons and holes. A novel  $\pi$ -period PHE, which depends on the relative angle with the driving electric and magnetic fields, has been observed, indicating the breaking of mirror reflection symmetry. The angular dependence of in-plane anisotropic magnetoresistance and the field-dependent PHE signal underscore the critical role of anisotropic orbital

magnetoresistance. Our findings offer a new platform for deepening our understanding of the PHE and its underlying mechanisms in TIs.

## D12-P16

### 稀土金属磷酸盐催化材料的构筑

刘思彤\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

过渡金属磷酸盐因其储量丰富、环境友好、具有独特的化学/物理特性和可调的多功能性而受到广泛关注，非常适合于先进的高效能量转换和存储应用。1989年 Kupka 和 Budniok 利用电催化生成 Ni-Co-P 并用于 OER 反应。有趣的是，他们发现材料的结晶相和非晶相的活性几乎相似，并且在反应过程中，它们也被氧化成它们的相应的氢氧化物。2015年，受到这项开创性工作的启发，Yoo 和同事(2015)对催化过程进行了深入研究。重要的是，对 CoP 纳米颗粒催化后样品的分析显示，这些磷化物转化为由富磷酸盐钴氧/羟基分子单元组成的新型多孔材料，才是实际的催化位点。在本工作中，合成了一个含稀土与过渡金属磷酸盐的混合物，在 500mA cm<sup>-2</sup> 的电流密度下，可以稳定运行 280h，其衰减幅度约为 10%。

## D12-P17

### MnBi 基单晶的生长及永磁性能的研究

王正琪\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

在费米能下具有高载流子迁移率的几种非磁性拓扑 Weyl 半金属中观察到较大的非饱和磁阻。然而，铁磁系统很少表现出大的磁阻，因为在低费米速度的重 d 带中局域电子。本研究通过助熔剂法生长 MnBi 单晶，并研究了铁磁性 MnBi 在低温下可达到 1200% 的巨大正 MR 的大线性非饱和磁电阻和高迁移率。

## D12-P18

### Flexible anisotropic Ce<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub>@CN/PU composite for electromagnetic wave absorption

Hind Bourouis<sup>1</sup>, Wu Chen<sup>1</sup>, Yan Mi<sup>1</sup>

1. Zhejiang university

Electromagnetic energy conversion materials have been widely developed and applied in the fields of communications and military radar cloaking to increase the resistance to electromagnetic interference with the development of electronic information technology and communication technology. The rapid growth of smart portable electronics has led to an increasing demand for flexible microwave absorbers. Excellent microwave absorbing materials must have high absorption, wide effective absorption bandwidth, low thickness, and good mechanical properties.

In this study, we developed an ultrathin, self-foaming composite using the rare-earth magnetic alloy Ce<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub> powder and carbon nanotubes in a polyurethane matrix. Ce<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub> was selected for its high permeability at high frequencies and significant magnetic loss. Ce<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub> was synthesized by arc melting and ball milling Ce<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub> followed by nitriding at 724 K for one hour. The carbon nanotubes and magnetic powders were mixed into the polyurethane matrix using a simple mixing and casting method. A magnetic field was applied to the composite, the phase structure and powder morphology were characterized by X-ray diffraction and scanning electron microscopy, and the VSM test was also performed.

The self-foamed anisotropic composite exhibited a minimum reflection loss value of -47.6 dB and an effective absorption bandwidth (EAB) of 6.75 GHz at a thickness of 1.5 mm. The material exhibited a high strain rate of 134% at break, indicating excellent flexibility. The porosity and anisotropy improved the impedance

conditions and attenuation, and the synergistic effects of dielectric and magnetic losses, combined with the good mechanical properties of the polymer, significantly enhanced the electromagnetic energy conversion performance of the composite.

### D12-P19

#### 操纵手性拓扑半金属 PtGa 中的电子自旋极化以实现燃料电池催化

孙树彬<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

燃料电池阴极氧还原反应 (ORR) 涉及氧分子从三重态到单线态的转变, 这一过程伴随着自旋电子的转移, 同时也会导致  $H_2O_2$  生成等竞争反应的发生进而降低反应效率。拓选手性晶体中由手性晶格诱导的自旋选择性效应 (CISS) 能够有效应对这一挑战。本工作通过一步热解法制备了一种具有手性结构的金属间化合物 PtGa, 发现了自旋极化电子对氧还原反应的重要影响机制。在同等 Pt 负载量下, 相较于商业 Pt 催化剂, 具有手性结构的 PtGa 在 0.9V 下的质量活性与比活性均提高了 5 倍。并且得益于其金属间化合物结构带来的稳定性, 在 10000 次的加速循环测试中表现出优异的催化稳定性。这项工作为 Pt 基金属间化合物的设计提供了一种新思路, 同时对于催化氧还原反应过程的内在机制提供了一种新的认识。

### D12-P20

#### 条形磁畴轨道中实现反斯格明子电流驱动的突破

何至东<sup>1</sup>, 张颖<sup>\*1</sup>

1. 中国科学院物理研究所

具有拓扑特性的纳米尺度磁性 (反) 斯格明子有望作为新型磁性信息单元构建高密度、高速度、低功耗的磁性信息器件来满足大数据、云计算、智能化信息时代的迫切需要, 是当前凝聚态物理和自旋电子学领域的研究热点和关键科技应用前沿。我们通过调控  $Mn_{1-x}Pt_xSn$  手性磁体将反斯格明子限域在具有天然直线轨道的条形磁畴中, 利用电流自旋转移力矩效应改变反斯格明子两侧磁矩方向, 在实验上首次报道了反斯格明子的电流驱动行为。此时反斯格明子受到的偏转马格努斯力与天然轨道限域反作用力相互抵消保证了直线运动, 且驱动电流密度 ( $\sim 4 \times 10^9 \text{Am}^{-2}$ ) 比传统磁电子学器件降低了 2 个数量级, 突破了此前反斯格明子没能被电流驱动的现状, 同时解决了 (反) 斯格明子霍尔效应偏转的瓶颈问题, 获得了适合器件应用的兼具室温、零磁场、低功耗、直线运动的反斯格明子特性。进一步借助微磁学模拟和集体钉扎理论, 我们揭示了 (反) 斯格明子在螺旋条纹背景中相较于典型铁磁状态下更容易被驱动的物理机制, 且该方法具有很好的普适性, 可扩展至条纹磁畴内的拓扑麦约或斯格明子的直线低电流密度驱动。

### D12-P21

#### 一种用于高效电磁波吸收的多孔 $Ba_2Co_2Mn_{1.2}Fe_{10.8}O_{22}$ /碳复合材料的新合成方法

赖永康<sup>1,2</sup>, 田峰<sup>1</sup>, 满其奎<sup>\*1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 中国科学技术大学

设计一种具有超宽有效吸收带宽 (EAB) 和低填充的电磁波 (EMW) 吸收材料是解决电磁污染问题的关键。在本研究中, 通过冷冻干燥法以及高温碳化过程 (400°C、500°C、600°C、700°C) 制备了径向多孔  $Ba_2Co_2Mn_{1.2}Fe_{10.8}O_{22}/C$  ( $Mn-Co_2Y/C$ ) 复合材料。研究表明, 600°C 退火得到的样品具有优异的电磁波吸收性能, 在 1.7mm 厚度下实现了 5.77GHz 的最宽 EAB, 这归因于样品通道内 EMW 的多次反射以及  $Mn-Co_2Y$  铁氧体与碳材料之间的界面极化。碳材料的引入优化了  $Mn-Co_2Y$  的阻抗匹配特性, 使得电磁波更容易进入材料内部, 从而表现出更佳的电磁波吸收性能。值得注意的是,  $Mn-Co_2Y/C$  磁损耗较低而介电损耗较高, 磁损耗主要源自低频时的自然共振和高频时的涡流损耗, 介电损耗源自于弛豫损耗和电导损耗。

**D12-P22****轻质壳聚糖气凝胶装载 ZIF-67 纳米立方体的复合材料吸波性能研究**李臣<sup>1</sup>, 高玉<sup>1</sup>, 满其奎\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

由于现代通信技术的快速发展,随之而来的是越来越严重的电磁波污染,开发新型高效的电磁波吸收材料非常重要。气凝胶具有薄、轻、宽的突出特点,被看作是未来吸波材料的一大重点。在本研究中,通过壳聚糖(CS)锚定咪唑酸分子筛框架-67(ZIF-67)定向冷冻干燥,并在600~900℃的不同温度下对ZIF-67/CS气凝胶进行退火处理,制备了三维超轻Co/C@CS气凝胶。有序多层碳壁的构建不仅延长了电磁波的传输路径,而且加速了电子的跳迁,使微波衰减增强。所得Co/C@CS气凝胶是嵌有Co/C纳米颗粒的互连碳片网络,其电磁波吸收性能与退火温度有关。在900℃下,Co/C@CS气凝胶在密度仅为3.1 wt%时,具有8.38 GHz的超宽有效吸收带宽(EAB)和54.87 dB的最小反射损耗(RL<sub>min</sub>)等优异的电磁波吸收性能。该研究为制备新型电磁波吸收材料提供了一种有前途的策略。

**D12-P23****Room-temperature spontaneous exchange bias in antiferromagnet Fe<sub>3</sub>BO<sub>6</sub> polycrystalline**Lifeng Wang<sup>1</sup>, Ling Cai<sup>1</sup>, Xiong He<sup>1</sup>, Liqing Pan<sup>1</sup>

1. Hubei Engineering Research Center of Weak Magnetic-field Detection, College of Science, China Three Gorges University

The exchange bias (EB) effect refers to a shift of the hysteresis loop along the magnetic field axis.<sup>[1]</sup> The conventional exchange bias effect is generated by the high temperature field cooling process, and the spontaneous exchange bias (SEB) effect is generated from the high temperature zero field cooling process. The EB has been extensively studied and has broad applications in ultra-high density magnetic recording, giant magnetoresistance, spin valves and other spintronic devices. In ferromagnet (FM)-antiferromagnet (AFM) particle systems such as Co/CoO, Ni/NiO and Fe/FeO<sub>x</sub>, the EB effect can be applied to suppress the superparamagnetic effect, which shows great potential for high-density information storage applications. In FM-AFM bilayer or multilayer film system, such as NiFe/CoO, permalloy/FeMn/Co and permalloy/Au/CoO, the CEB effect can be used to design spin valves and spin tunneling devices.

In this work, we observed a giant SEB effect in Fe<sub>3</sub>BO<sub>6</sub>, where the value of the spontaneous exchange bias field at room temperature is as large as about 4234 Oe. We propose that this giant SEB originates from the exchange-coupling interactions between the surface weak ferromagnet state and the bulk antiferromagnet state. This theoretical analysis results are further verified by comparing the magnetic properties of the Fe<sub>3</sub>BO<sub>6</sub> with relatively low crystallinity. The results of this investigation will help to find promising candidate materials for a device based on the SEB effect.

**D12-P24****人工反铁磁中高度可调的超强至近深度强磁振子-磁振子耦合**王宇强<sup>1</sup>, 张宇<sup>2</sup>, 李超众<sup>3</sup>, 魏晋武<sup>3</sup>, 何斌<sup>1</sup>, 许宏均<sup>1</sup>, 夏及皓<sup>1</sup>, 罗需明<sup>1</sup>, 李嘉辉<sup>1</sup>, 董京<sup>1</sup>, 何文卿<sup>1</sup>, 严政人<sup>1</sup>, 杨雯龙<sup>1</sup>, 马付胜<sup>2</sup>, 柴国志<sup>3</sup>, 严鹏<sup>4</sup>, 万蔡华<sup>1</sup>, 韩秀峰<sup>1</sup>, 于国强\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 南京师范大学

3. 兰州大学

4. 电子科技大学

混合磁振子系统——自旋的集体激发与其他准粒子相耦合,在过去的十年中得到了广泛的研究。由于

磁振子和光子之间固有的偶极相互作用较弱, 只有少数研究报道了在低温条件下的磁振子-光子超强耦合, 而深度强耦合还尚未实现。近年来, 磁振子-磁振子混合系统逐渐得到人们关注。与磁振子-光子耦合不同, 两个磁振子模式之间固有的较强的相互作用导致了增强的耦合强度。但是到目前为止, 实验上仅在补偿亚铁磁和反铁磁中观察到了超强磁振子-磁振子耦合, 且最大归一化耦合强度不到 0.4, 离深度强耦合状态的实现还有很大的距离。此外, 宏观晶体样品与互补金属-氧化物-半导体平台不兼容, 这可能阻碍实际应用。我们注意到, 人工反铁磁(SAF)材料体系由于其所具有的高自由度, 是研究磁振子-磁振子耦合的优秀载体。SAF 是一种多层膜磁性异质结构, 它由上下两层铁磁层以及中间的非磁金属层构成, 其中上下两层铁磁层通过 RKKY 相互作用联系在一起。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振子-磁振子耦合的实现。通过用广义 Hopfield 模型对混合磁振子系统进行量子化, 我们证明了 SAF 中磁振子-磁振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  $g_2/\omega$  可以有如下的取值范围:  $g_2/\omega = 0$ 、 $g_2/\omega < g_1/\omega$  或  $g_2/\omega > g_1/\omega$ 。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  $g_1(\omega)/\omega$  不能大于 0.5 的限制, 并可使混合磁振子系统中的耦合趋向于深度强耦合状态。在实验上, 我们实现了混合磁振子系统中的近深度强耦合, 其中  $g_1/\omega$  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。

## D12-P25

### 合金化元素添加对 Fe-32Ni-5Co 合金性能的影响

陈英明<sup>1</sup>, 于一鹏<sup>1</sup>, 王晶<sup>1</sup>, 张敬霖<sup>1</sup>, 罗曦<sup>1</sup>, 卢凤双<sup>1</sup>, 张建福\*<sup>1</sup>

#### 1. 钢铁研究总院

Fe-32Ni-5Co 合金作为一种超因瓦合金, 因其极低的热膨胀系数而在精密仪器和设备中有广泛应用。本研究探讨了在 Fe-32Ni-5Co 合金中添加 0.3%Nb、0.3%Cu 和 0.3%Mo 等合金化元素对合金热膨胀系数、马氏体相变温度、机械性能和居里温度的影响。

实验结果揭示, 添加的合金化元素均能有效稳定合金, 未明显提升合金热膨胀系数, 使其维持在  $3.0 \times 10^{-6}/K$  左右 ( $-60 \sim 100^\circ C$ ), 并显著降低合金的马氏体相变温度至  $-60^\circ C$  以下。Nb 元素的添加通过在晶界处析出碳化物, 提高了合金的室温抗拉强度, 从 433 MPa 提高至 463 MPa。Cu 元素的引入优化了合金的软磁性能, 矫顽力约降低了 10 A/m, 并提升了居里温度至  $235^\circ C$ 。Mo 元素通过形成细小且弥散分布的碳化物 Mo<sub>2</sub>C, 不仅将抗拉强度从 433 MPa 提升至 456 MPa, 还小幅改善了合金的软磁性能。

研究目标在于, 通过精确控制合金化元素的添加量和优化热处理工艺, 可以显著提升 Fe-32Ni-5Co 合金的综合性能, 满足不同应用场景的特定需求。研究结果为开发具有优异软磁性能、低膨胀性能兼具良好机械性能的新型合金提供了新的思路。

## D12-P26

### 单相垂直磁化 NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 薄膜中反常霍尔效应的符号反转与类交换偏置效应

康鹏华<sup>1,2</sup>, 周国伟<sup>2</sup>, 金朝<sup>1</sup>, 许小红\*<sup>1</sup>

#### 1. 天津大学

#### 2. 山西师范大学

具有垂直磁各向异性(perpendicular magnetic anisotropy, PMA)和金属行为的过渡金属氧化物(transition metal oxides, TMOs)在开发新一代高密度、低功耗、非易失性自旋电子器件方面具有广阔的应用前景。近年来, 尽管已经取得了很大进展, 但 TMOs 在室温或更高温度下同时表现出 PMA 和优异的金属性仍然是一个巨大的挑战, 限制了其实际应用。

在本工作中, 我们采用脉冲激光沉积技术在 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (001)衬底上制备了一系列不同沉积温度、不同厚度的 NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (NCO)薄膜。我们通过结构表征, 输运和磁性测量, XPS 以及第一性原理计算, 建立了不同沉积温度的 NCO 薄膜的磁性、导电行为、反常霍尔效应(anomalous Hall effect, AHE)和结构与阳离子分

布及价态之间的联系。结果表明，沉积温度较高的 NCO 薄膜中分布了更多的  $\text{Ni}^{2+}$ ，导致晶格膨胀，XRD 峰向小角度移动，导电行为也从金属转变为半导体。AHE 与温度的依赖关系表明，在一定温度下，沉积温度较高的样品的 AHE 符号发生反转，这是 Berry 曲率决定的内禀机制和杂质散射主导的外禀机制共同作用的结果。此外，沉积温度较高的样品的面外磁滞回线表现出类似交换偏置效应(exchange bias (EB)-like effect) 的现象，这是由  $\text{Co}^{2+}$  含量和氧空位的增加导致薄膜中局部的反铁磁耦合引起的。与传统 EB 效应不同，这里的钉扎自旋体现在整个薄膜中，而后者则出现在界面。第一原理计算进一步支持了实验结果。此外，我们还实现了基于 NCO 同质结的垂直磁隧道结的设计。这项研究为设计新型自旋电子器件提供了新的机遇。

## D12-P27

### 二维范德华铁磁材料 $\text{Fe}_{4.8}\text{GeTe}_2$ 的磁临界行为研究

张颖<sup>1</sup>

1. 淮南师范学院

范德华铁磁体  $\text{Fe}_{5-x}\text{GeTe}_2$  具有 Fe 缺陷可调的居里温度(TC)，随 Fe 离子浓度的不同，其 TC 可在 270 - 310 K 区间变化，这表明 Fe 缺陷会在  $\text{Fe}_5\text{GeTe}_2$  中引入复杂的磁行为。为了深入理解  $\text{Fe}_{5-x}\text{GeTe}_2$  中磁性为，我们通过调研  $\text{Fe}_{5-x}\text{GeTe}_2$  ( $\text{Fe}_{4.8}\text{GeTe}_2$ ) 晶体在 TC 周围的临界现象，系统研究了其磁交换机制。利用不同的分析方法，我们得到了一组可靠的临界指数值： $\text{TC} = 285 \text{ K}$ ， $\beta = 0.364(2)$ ， $\gamma = 1.293(1)$ ， $\delta = 4.62(1)$ 。通过对这些临界指数的对比分析得出  $\text{Fe}_{4.8}\text{GeTe}_2$  的磁性行为是一种三维(3D)磁交换机制，其交换距离衰减模型为  $J(r) \approx r^{-4.85}$ ，与三维海森堡模式下的远程磁耦合非常相似。我们对  $\text{Fe}_{4.8}\text{GeTe}_2$  的磁交换机制的研究为下一代自旋电子器件的应用提供了巨大的前景。

## D12-P28

### 室温铁磁性全碳膜的制备

Yue Wang<sup>1</sup>, Yufeng Liu<sup>1</sup>, Xin Wang<sup>1</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Jilin University

Creating room-temperature ferromagnetism in carbonaceous materials is of great importance in fundamental physics and various potential applications in fields where the characters such as low density, transparency, and biocompatibility are essential. Graphene and its derivatives graphene oxide (GO) and reduced GO (rGO) possess extraordinary physicochemical properties, low weight, and nontoxicity. Pristine graphene is diamagnetic in nature due to solely  $\text{sp}^2$  hybridization, while GO and rGO show ferromagnetic (FM) ordering at low temperature and the ordering can preserve up to room temperature. However, an all-carbon material with desirable FM properties, abundant resources, and cost effectiveness has not been prepared yet. In this study, we used an available method of cast-coating followed by a step-by-step thermal treatment to fabricate rGO-based carbon films composed of rGO nanosheets and rGO microfibers. We studied their room-temperature FM and magnetoresistance effects. The composite film exhibits enhanced FM effect (saturation magnetization,  $M_s \sim 0.096 \text{ emu g}^{-1}$  and coercivity  $\sim 61 \text{ Oe}$ ), around 1332.8% enhancement compared to rGO ( $0.0067 \text{ emu g}^{-1}$ ,  $87 \text{ Oe}$ ) and rGOF. Magnetoresistance effects show negative values that also confirm the FM characteristics in the rGO-based composite films. ICP-MS measurements exclude the contribution of FM metal elements to the mass susceptibility of the samples. The high ratio of  $\text{sp}^3/\text{sp}^2$ , moderate oxygen content and density of hydroxyl and epoxy groups were found to be corresponding to a high  $M_s$  in the rGO-based films. This type of all-carbon film has been expected to be applied in spin electronic devices and biomedicine in the near future.

仅发表论文

**D12-PO01****预时效对 2:17 型钐钴永磁的磁性能影响与性能调控**朱生志<sup>1,2</sup>\*, 格来尼玛<sup>2</sup>, 刘平杨<sup>2</sup>, 刘辉<sup>1,2</sup>, 蒲方昭<sup>1,2</sup>, 许林倩<sup>1,2</sup>, 张世鹏<sup>1,2</sup>, 钱才让<sup>1,2</sup>

1. 青海理工学院工学院
2. 青海大学机械工程学院

2:17 型钐钴永磁材料因其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。2:17 型钐钴永磁的磁性能来源于  $\text{SmCo}_5\text{H}$  胞壁相对畴壁的钉扎作用, 促进其析出成核能够提高磁体的磁性能。本文通过对  $\text{Sm}_{24.8}\text{Co}_{50.4}\text{Fe}_{15.9}\text{Cu}_{6.4}\text{Zr}_{2.5}$  (wt%) 胞状组织演变过程的研究, 发现短时间预时效能够促进  $\text{SmCo}_5\text{H}$  胞壁相的析出, 经过 840 °C 等温时效和缓慢冷却后, 剩磁  $B_r$  从 9.0 增加到 10.2 kGs, 内禀矫顽力  $H_{c_j}$  从 30.6 kOe 增加到 35.2 kOe, 最大磁能积  $(BH)_{\max}$  从 19.3 增加到 24.9 MGOe。随着预时效时间的延长, 磁体的磁性能与未经预时效的磁体磁性能相当, 因此预时效可以有效调控 2:17 型钐钴永磁的磁性能。