

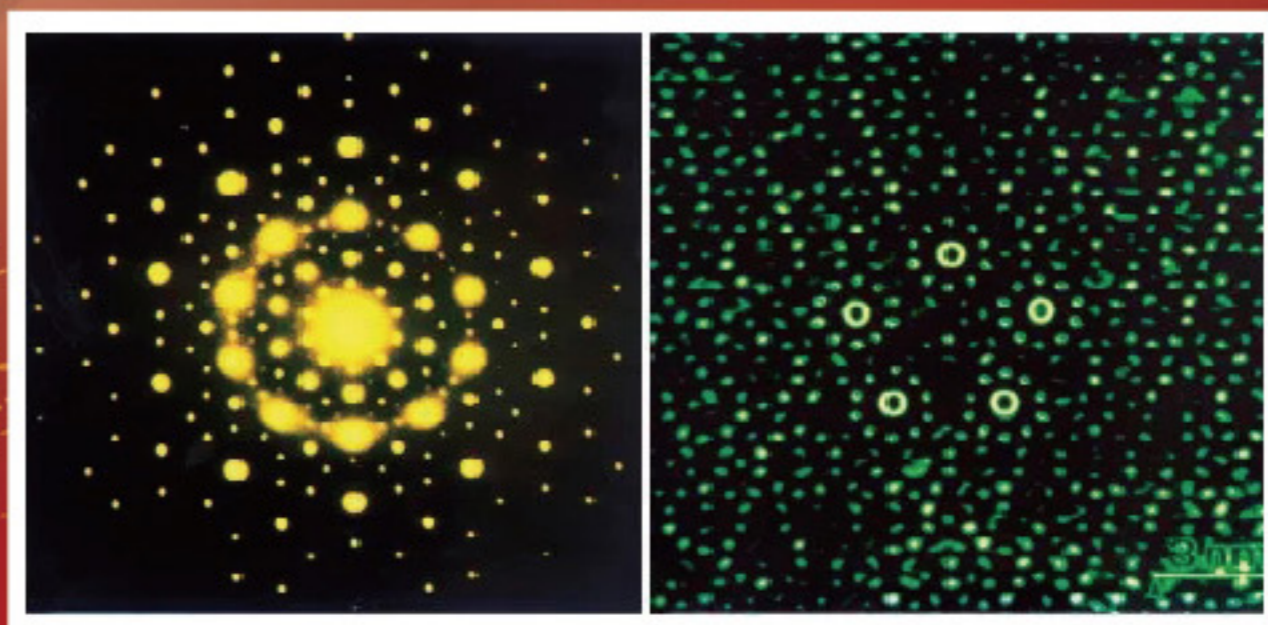
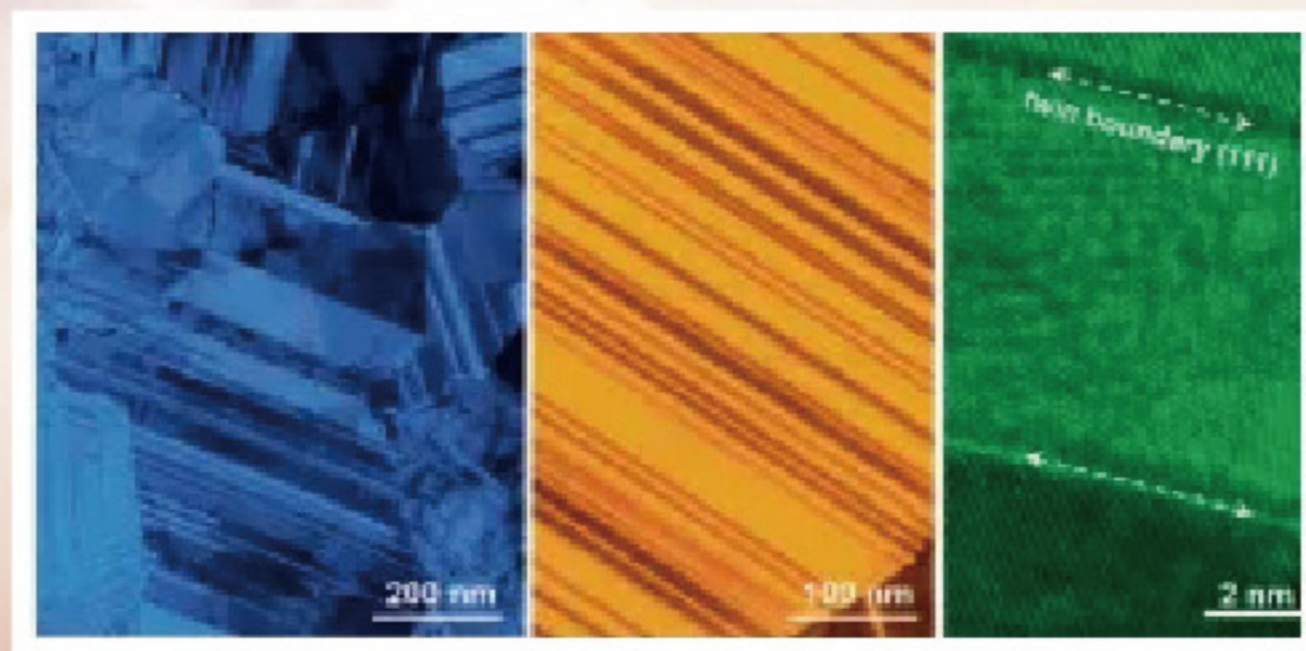
# 金属之光

# 12

中国科学院金属研究所  
2018年 第12期 (总第212期)

INSTITUTE OF METAL RESEARCH, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

纳米材料研究、五次对称性及  
Ti-Ni准晶相的发现成果入选  
“中国科学院改革开放四十年40项  
标志性重大科技成果”





# 新年 贺 词

岁末甫至，喜迎新年。值此辞旧迎新、吉祥喜庆的美好时刻，我谨代表中科院金属研究所领导班子一如既往地关心和支持研究所发展的各级领导和海内外各界友人，向全所广大干部职工、研究生和离退休老同志，致以新年的祝福！祝愿大家新年快乐、万事如意！

2018年，金属研究所领导班子以高度的政治责任感和政治站位，认真学习贯彻党的十九大精神，坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，牢固树立“四个意识”、坚定“四个自信”，深入学习领会习总书记在两院院士大会上的重要讲话精神，积极贯彻落实中科院“率先行动”计划和研究所“一三五”规划，坚持问题导向、发展取向，稳步推进研究所综合改革。

**谋篇布局，重点突破。**面对国家创新驱动发展战略对科技工作提出的新的更高要求，金属研究所加快综合性科技创新平台建设，努力做大做强、做强优势。在基础研究领域，我国材料领域首个国家研究中心—沈阳材料科学国家研究中心建设工作全面展开，科研架构、管理和技术支撑体系已基本健全，占地700余亩的新园区建设一期工程已正式启动。在应用研究领域，以建设国际一流的先进金属材料研发平台为目标，整合内外部优势创新资源，着力打造师昌绪先进材料创新中心。两大中心的建设实施，将进一步激发金属研究所的科技创新活力，为研究所的未来发展提供新引擎和新动力。

**规范管理，提升环境。**围绕率先建设国际一流科研机构的目标要求，金属研究所健全完善管理体制与运行机制为重要保障，加速推进研究所治理体系与治理能力现代化建设。在管理体系层面，以职责明晰、服务集约、运行有效为原则，优化了管理与支撑部门设置及其职能，选拔了一批中青年骨干担任中层领导职务。在制度体系层面，以管理制度化、制度流程化、流程信息化为准则，推进决策程序化、

管理规范化、监督经常化，不断提升精益化管理水平，努力营造健康良好的科技创新服务环境。

**潜心致研，收获颇丰。**面向世界科学前沿、面向国家重大需求、面向国民经济主战场，金属研究所积极开展材料领域关键科学技术问题研究，取得了一系列原创性成果和先进适用技术。全年在国际著名学术期刊《科学》、《自然》及其子刊上发表学术论文11篇，“金属纳米结构材料”被习总书记在两院院士大会上列举为重大科研成果产出。承担的先进飞行器、航空发动机、燃气轮机、核电装备、海洋装备等重大工程用关键材料研制和小批量供货任务进展顺利，解决了若干卡脖子的材料技术难题，“SEBF/SLF重腐蚀防护技术”入选“伟大的变革—庆祝改革开放40周年大型展览”并受到习总书记表彰，“压水堆核电高温高压水环境材料损伤关键测试技术及成套装备与应用”获国家技术发明二等奖。

**汇聚英才，广交朋友。**围绕率先建成国家创新人才高地的目标任务，金属研究所持续推进人才队伍建设，人才培养工作成效显著。新入选国家“万人计划”科技创新领军人才8人、国家创新人才推进计划5人，获国家杰出青年科学基金资助1人；新入选中科院“青年创新促进会”优秀会员2人、“关键技术人才”1人，获中科院青年科学家奖1人；新入选辽宁省优秀专家5人、“兴辽英才计划”15人。全年与300多家国内骨干企业开展技术合作，接待境外专家学者300余人次，中港纳米材料实验室在中科院评估中获评优秀。

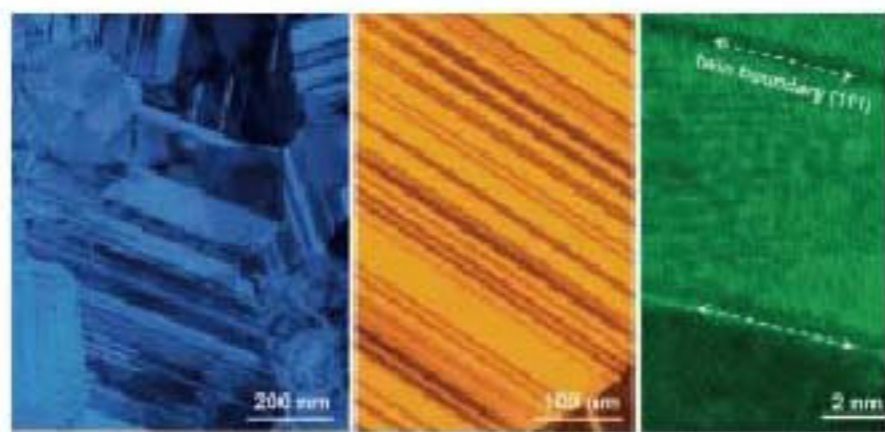
回首2018年，成功总是与艰辛相伴，愿景更加激励奋斗。展望2019年，金属研究所将以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，不忘科技报国初心，牢记科技强国使命，积极贯彻实施“率先行动”计划，锐意改革、勇于创新，努力产出更多一流科技成果，为国家做出更大的贡献！

中国科学院金属研究所 所长 左良



# 纳米材料研究、五次对称性及Ti-Ni准晶相的发现成果入选“中国科学院改革开放四十年40项标志性重大科技成果”

近期，中科院在系统梳理改革开放40年来我院广大科研人员取得的众多重大科技成果基础上，以“三个面向”为主线，综合凝练归纳出40项具有代表性的标志性重大科技成果。我所纳米材料研究成果（包含于“纳米科技创新”）、五次对称性及Ti-Ni准晶相的发现（包含于“非线性光学晶体研究及装备研制”）入选。



多种纳米孪晶金属的可控制备

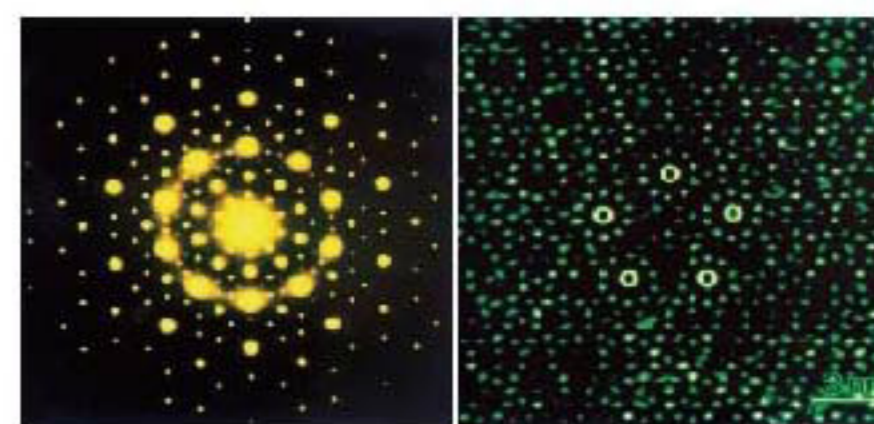
纳米材料研究：在纳米材料与器件领域，物理所、金属所等单位在碳纳米管制备、纳米结构及其物性调控、表面纳米化等方面，20多年来产出了一批国际引领性成果，促进了该领域的研究和发展。

五次对称性及Ti-Ni准晶相的发现：1984年，

金属所在钛镍钒急冷合金中发现具有5次对称的二十面体准晶，有力地论证了准晶的存在，打破了固体材料传统的晶体和非晶体分类标准，为物质微观结构及材料研究打开了全新的研究领域。获1987年度国家自然科学奖一等奖。该成果及后续有关研究作为推动航空航天准晶热障涂层、太阳能选择性吸收薄膜、准晶复合材料、准晶热电材料等新材料研发及应用奠定了理论基础。

40项标志性重大科技成果经中科院学术委员会委员审核把关，通过网络向院属单位和社会进行了公示，收录于《改革开放先锋创新发展引擎——中国科学院改革开放四十年》一书。

40项标志性重大科技成果经中科院学术委员会委员审核把关，通过网络向院属单位和社会进行了公示，收录于《改革开放先锋创新发展引擎——中国科学院改革开放四十年》一书。



Ti-Ni准晶相的高分辨电子显微镜图（左）和五次对称衍射图（右）

## 电子显微学研究发现固态物质新结构

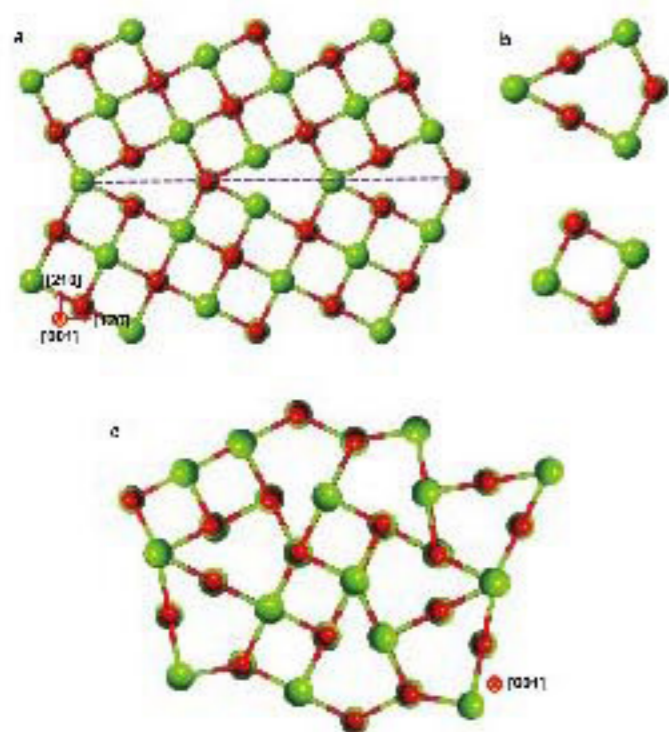


图1 一维有序晶体的原子结构示意图。MgO一维有序晶体可由MgO晶界结构单元组合而成。

中国科学院金属研究所陈春林研究员与日本东京大学Yuichi Ikuhara教授、重庆大学尹德强副教授等人合作，在陶瓷材料中发现了区别于晶体、准晶体和非晶体的固态物质新结构——一维有序结构（或称为一维有序晶体）。

固态物质按其对称性可分为三大类：晶体、准晶体和非晶体。晶体具有旋转对称性和平移对称性，其原子有规则地在三维空间呈周期性重复排列。准晶体具有旋转对称性，但不具有平移对称性。准晶体的原子排列具有长程有序，但不具有三维平移周期性。非晶体不具有旋转对称性和平移对称性，其原子排列不具有长程有序。以上是发现准晶体以后，人们对固态物质结构的普遍认识。

陈春林研究员等人利用扫描透射电子显微术与第一性原理理论计算相结合的方法，在MgO和

Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜材料中发现了一维有序晶体，更新了人们对固态物质结构的认识。该结构仅在一个方向上保留了晶体的平移对称性和周期性，在其他方向上其原子呈现无序排列，形成了具有一维平移周期性的长程有序结构。构成一维有序晶体的结构单元的原子排列与重位点阵倾转晶界的结构单元非常类似。研究表明，尽管MgO晶体是能隙为7.4eV的绝缘体，MgO一维有序晶体则是能隙为3.2eV的宽带半导体。一维有序晶体的发现表明固态物质结构的种类比人们已有认知更加丰富，并且新结构的物理性质与相应常见结构类型具有显著差异。

该项研究得到了中国科学院前沿科学重点研

究项目、国家自然科学基金与国家青年千人计划等项目的资助。相关成果于12月10日在Nature Materials上在线发表 ( <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0240-0> ) 。

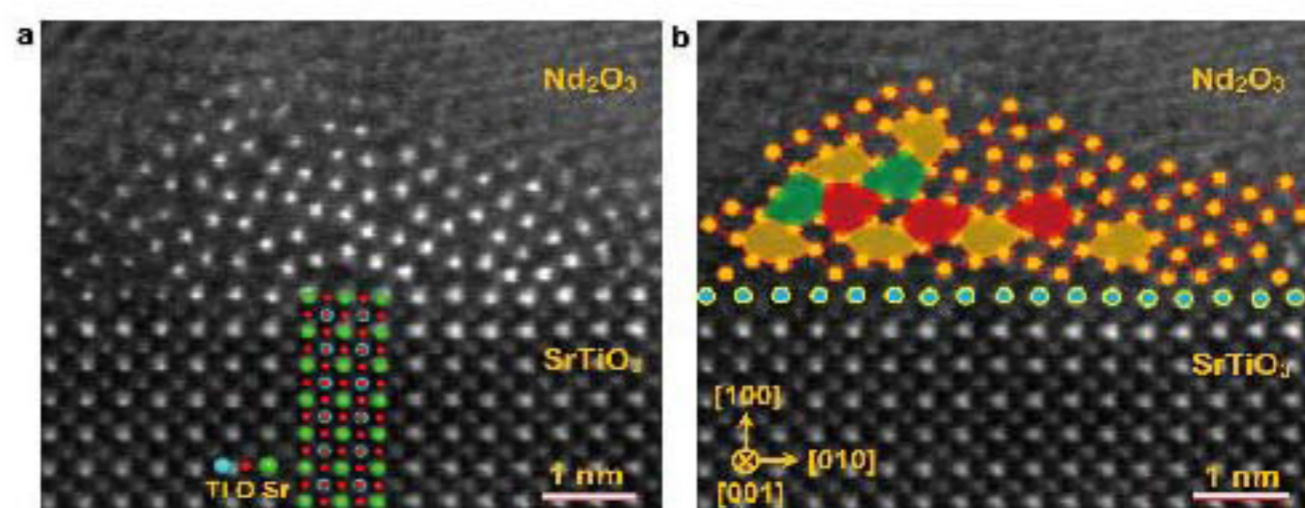
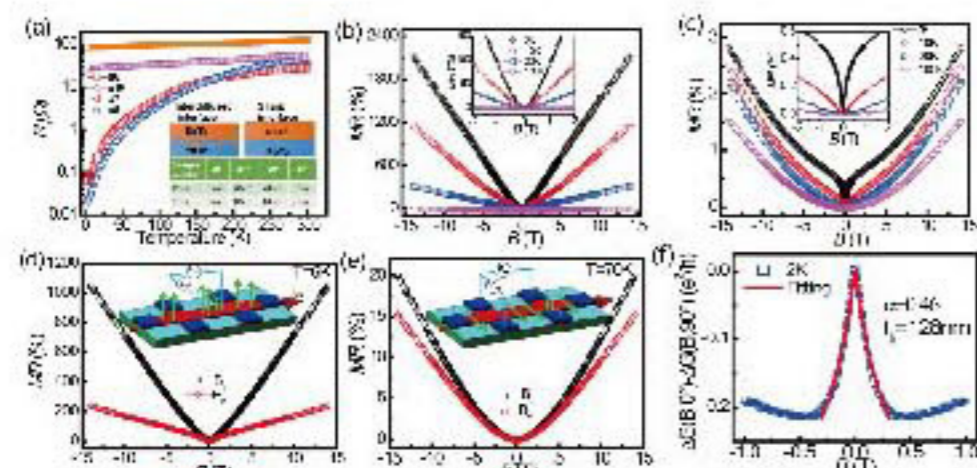


图2 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜材料中的一维有序晶体。Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>一维有序晶体由许多六边形结构单元构成(彩色阴影所示)，其原子排列与Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Σ9(221)[110]晶界结构单元类似。

## 拓扑晶体绝缘体电输运调控取得重要进展

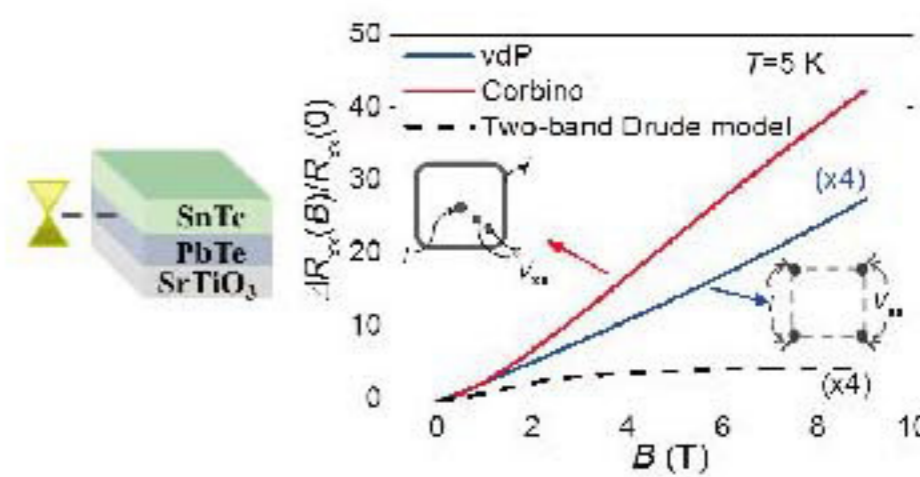
线性磁电阻是一种新型的磁电阻行为，由于具有线性变化特征，它对未来新型磁电阻器件的开发具有重要的应用价值与科学意义。拓扑晶体绝缘体是一类新型的拓扑材料，它不同于拓扑绝



缘体，其拓扑保护不是来自时间反演对称性，而是来自晶格对称性，因此更容易利用结构因素对其晶格对称性进行调控，以达到调控其拓扑表面态，进而调控其表面电输运的目标。在单晶拓扑晶体绝缘体薄膜上，如果实现线性磁电阻，进一步利用结构对称性来调控其拓扑表面态，将为拓扑晶体绝缘体真正应用于自旋电子学器件奠定重要基础，也会为拓扑晶体绝缘体的电磁输运机制理论研究提供重要的实验支撑。

近期，金属所沈阳材料科学国家研究中心功能材料与器件研究部张志东研究员、马嵩项目研究员与美国Case Western Reserve大学高翔教授

合作，利用分子束外延系统，在SrTiO<sub>3</sub>(111)单晶衬底上可控生长了PbTe/SnTe单晶异质结，观察到2150%的超大非饱和线性磁电阻(2K, 14T)。通过分析发现此类异质结在低温下显示与拓扑表面态Dirac电子相关的强金属导电特征，载流子具有超高迁移率。进一步控制生长条件，实现界面Pb原子可控扩散并改变SnTe薄膜中空穴浓度，诱导了SnTe薄膜的立方-菱方结构相变，引起了SnTe薄膜的结构对称性破缺，使PbTe/SnTe异质结的线性磁输运行为转变为强度降低几百倍的弱磁阻变化特征。



对超高线性磁电阻 PbTe/SnTe异质结的深入研究发现，利用Van de Pauw与Corbino两类测量方法均可测得未饱和线性磁电阻。通过分析，PbTe/SnTe拓扑晶体绝缘体异质结的电输运行为由多种载流子贡献。在低温区，电输运由表面态Dirac电子主(下转六版)

# 有机-无机杂化磁体磁性调控取得重要进展

不同于传统的金属、合金和氧化物磁体，有机磁体的磁性与合成过程密切相关。在过去的几十年中，科学家付出很多努力，尝试发展部分含有或全部由有机分子构成的有机磁体，如分子磁体、磁性有机金属框架和有机-无机杂化磁性材料。其中，结合无机结构片段和有机分子构筑的具有单晶结构特点的有机-无机杂化磁体，由于有机相与无机相界面处存在强的价键相互作用，产生了不同于组成

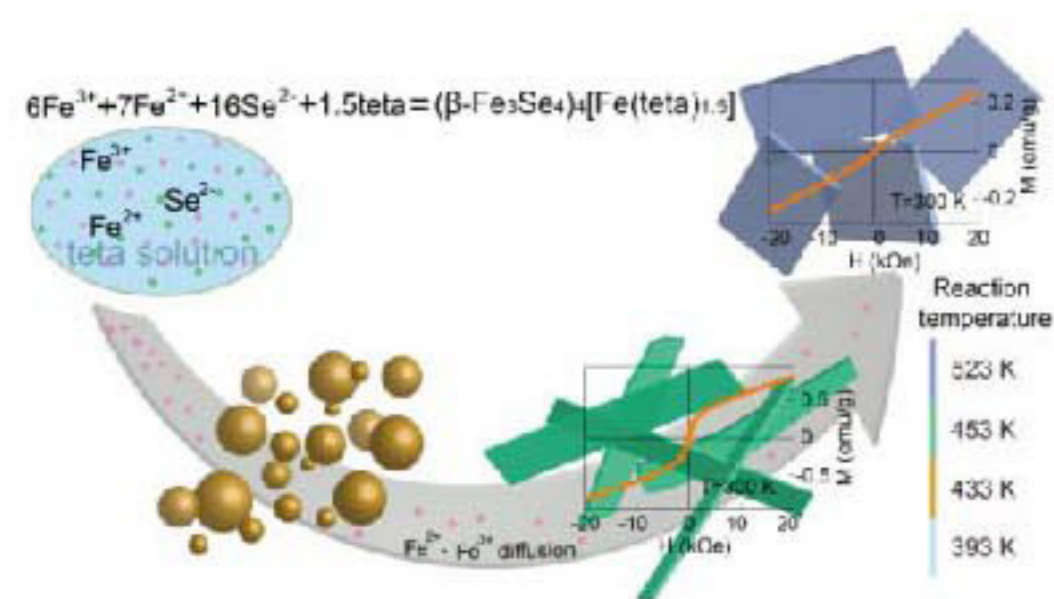


图1 高温有机化学溶液法合成新的室温磁性有机-无机杂化材料 $(\beta-Fe_3Se_4)_4[Fe(teta)_{1.5}]$ 纳米片的示意图。新的性质，在磁电耦合、磁光效应中受到广泛关注。有机分子具有柔性、易加工特性，有机-无机杂化磁体可以具有特殊的应用。磁有序温度高于室温，是磁性材料能够在室温或高于室温应用的前提。然而，在有机磁体中除了极为少数的分子磁体和磁性有机金属框架结构显示了磁有序温度接近或高于室温，文献中报道的磁性有机-无机杂化材料的磁有序温度均低于200 K。

金属所沈阳材料科学国家研究中心功能材料与器件研究部张志东研究员、李达研究员指导博士研究生潘德胜，在以可溶性Fe和Se为前驱体成功合成铁基 $\beta-FeSe$ 层状超

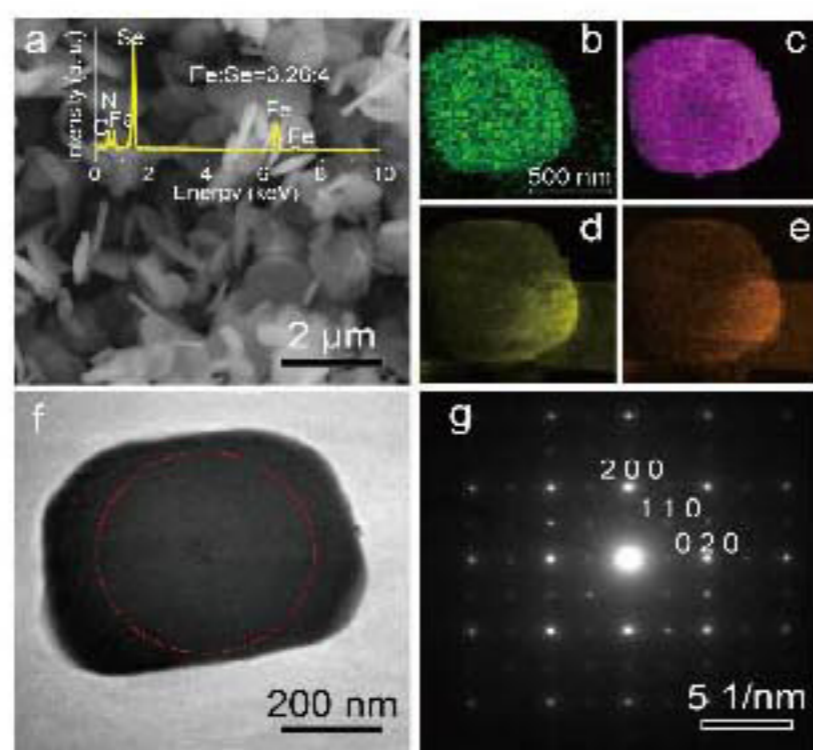


图2 (a)  $(\beta-Fe_3Se_4)_4[Fe(teta)_{1.5}]$ 杂化纳米片的扫描电镜和能谱分析结果，单个纳米片的(b) Fe, (c) Se, (d) C和(d) N元素分布, (f)透射电镜照片以及相应的(g)选区电子衍射结果。

导体(Chem. Mater. 201729(2) 842–848)的基础上，近期又采用高温有机化学溶液法，以高沸点有机胺（三乙烯四胺，teta）为溶剂，以可溶的Fe和Se前驱体为原料，一步合成了居里温度高于530K的新型磁性有机-无机杂化材料，并阐明了其生长机制。单相 $(\beta-Fe_3Se_4)_4[Fe(teta)_{1.5}]$ 杂化纳米片，由有机配体 $Fe(teta)_{1.5}$ 和无机结构单元 $\beta-Fe_3Se_4$ 构建而成，具有四方晶体结构（I4cm）。 $(\beta-Fe_3Se_4)_4[Fe(teta)_{1.5}]$ 杂化纳米片在温度低于530K稳定，高于530K至约700K缓慢分解。5–900 K范围内的磁性测量表明， $(\beta-Fe_3Se_4)_4[Fe(teta)_{1.5}]$ 杂化纳米片低于530K无磁相变，在室温下具有亚铁磁性。 $(\beta-Fe_3Se_4)_4[Fe(teta)_{1.5}]$ 杂化纳米片的居里温度不仅高于亚铁磁Fe-Se二元化合物（ $Fe_3Se_4$ 和 $Fe_7Se_8$ ）的居里温度，也远高于所有已报道的有序排列的有机-无机杂化材料的磁有序温度。杂化材料的磁性受到合成条件影响，在483K制备的

杂化纳米片低温5K下展示出硬磁特性，矫顽力高达11kOe。

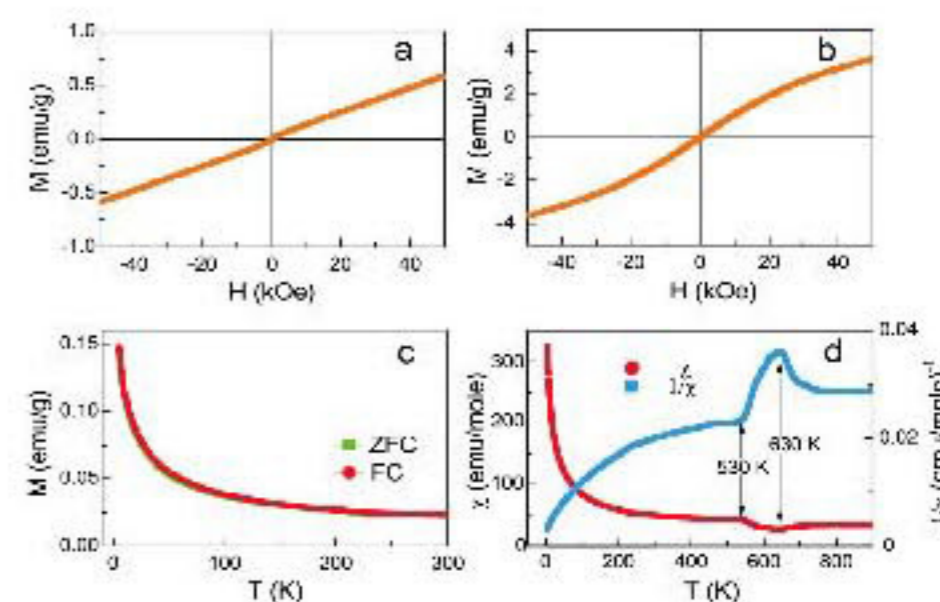


图3 523 K条件下合成的 $(\beta-Fe_3Se_4)_4[Fe(teta)_{1.5}]$ 杂化纳米片的磁性能。(a) 300 K和(b) 5 K下测量的磁滞回线。(c) 5–300 K范围内零场冷(ZFC)和场冷(FC)磁化强度-温度曲线。(d) 5–900 K范围内场冷磁化率( $\chi$ )和磁化率倒数( $1/\chi$ )-温度曲线。

韩拯研究员、李昶研究员和杨腾副研究员在杂化材料的结构和磁性分析方面提供了重要支持。台湾同步辐射研究中心Chinwei Wang博士、韩国材料科学研究所Chuljin Choi教授也参与了本工作。

相关结果发表在近日出版的Chemistry of Materials (Chem. Mater. 201830(24) 8975–8982)杂志上。该项工作得到了国家自然科学基金和科技部重点研发项目资助。

## 聚焦：纳米材料与力学联合实验室

**编者按：**日前，为进一步加强中国科学院与香港地区的科技合作，促进院属研究所与香港地区各大学之间组建的联合实验室的健康发展，提升合作双方的科研实力，2018年中国科学院组织开展了中科院与香港地区联合实验室的评估工作。

本次共有30个联合实验室参评，包括21个已有联合实验室和9个新参评联合实验室，其中有4个实验室获评为优秀类联合实验室，金属研究所卢柯研究员与香港城市大学吕坚教授负责的“纳米材料与力学联合实验室”名列优秀之列。中科院将对获评为优秀类和良好类的联合实验室给予连续五年的稳定经费支持，并将优先支持本次认定的22个联合实验室申请“中国科学院与香港裘槎基金联合实验室资助计划”。

纳米材料与力学联合实验室是由中国科学院金属研究所和香港城市大学共建，其背景可追溯至1998年金属研究所卢柯研究员与当时在法国特鲁瓦技术大学任职的吕坚教授首次提出“金属材料表面纳米化”概念，随后双方开展了紧密的合作研究，发表大量高水平论文，确立了我国在该方向的国际领先地位。2003年双方合作在SCIENCE期刊发表的成果“金属材料表面纳米化技术和全同金属纳米团簇研究”，被评为中国十大科技进展新闻之一。2008年在十年合作的基础上，双方组建了纳米材料与力学联合实验室，以此为依托承担了“中科院国际合作重点项目”和“中科院-裘槎基金资助计划”等项目，取得了一系列突破性进展，2011年SCIENCE报道的“揭示梯度纳米晶铜本征塑性变形机制”工作，再次被评为中国科学十大进展。

2012年，双方联合申请并获准了国家重大科

学研究计划“纳米金属材料的多级结构制备及优异性能探索研究”。卢柯研究员任项目首席科学家，同时卢柯研究员和吕坚教授作为课题负责人，分别负责项目中“多级纳米金属材料的结构设计、结构形成与演化及制备技术研究”、“多级纳米结构的稳定性研究及部分多级纳米金属材料的工业应用探索”两个课题。双方研究人员在合作完成国家重大科学研究计划项目的过程中，专注各自优势方向的研究，开展了高水平的研究工作，取得了纳米结构金属材料领域的突破性进展，使联合实验室的合作拓展到了一个新的高度。

双方先后开发出多种表面纳米化技术，并成功制备出具有高强度、高塑性及高稳定性等优异性能的梯度纳米结构金属材料，显著提高了传统材料的抗疲劳、耐磨损和耐腐蚀等性能，在国际上一直引领该领域的发展。表面纳米化技术在工业应用方面取得突破性进展。通过多方合作，与上海宝钢合作探索了表面梯度纳米结构在冷轧钢辊上的工业应用，完成了梯度纳米结构钢铁材料在延长轧辊寿命和提高涂层附着强度工业或中试应用探索，发展了平整机工作辊处理新工艺，明显提高了过钢量、辊件寿命和带钢表面质量，成果获2013年“中国产学研合作创新成果奖”。

联合实验室研究团队在梯度纳米结构金属和双相超纳金属等方面取得一系列重大突破，研究成果发表在SCIENCE和NATURE等国际一流刊物上。卢柯研究组发现，通过适当合金元素的晶界偏聚可以提高晶界稳定性，从而可以大幅度调控纳米金属的强度。这一发现表明在纳米金属中硬度不仅依赖于晶粒尺寸，也受控于晶界稳定性。晶界稳定性可成为纳米材料中除晶粒尺寸之外的另一个性能调控维度。同时，研究还发现极小晶粒尺寸纳米金属的硬化及软化行为充分展



现了由晶界稳定性控制的微观变形机制转变。这一发现为设计及制备具有如超高硬度等优异性能的新型纳米金属材料提供了新思路。该结果发表于SCIENCE (355(2017)1292-1296)。吕坚研究组首次制备出了超纳双相-玻璃纳米晶(Supra-nano-dual-phase glass-crystal)合金膜结构,这种结构使得镁合金具备3.3 GPa的超高强度,达到了近理论值。这一成果为未来发展各种新型超纳结构及其相关的特异物理及化学性能指出了一个全新的方向,作为封面推荐文章发表在NATURE(545(2017)80-83)上,这是21世纪以来,中国的物理科学(包括结构材料、力学与机械工程)研究成果首次登上NATURE杂志封面。由于双方梯度纳米结构材料研究的推动,在2015年美国MRS秋季会议及2017年美国TMS年会的学术会议中将梯度纳米结构材料列入了专题分会场,2014年和2016年均召开了关于纳米结构材料的GRC(Gordon Research Conferences)系列会议。

此外,联合实验室通过举办大型学术会议等方式,加快了双方不同学科研究人员跨学科的合作,增加两地交流机会,更好地体现联合实验室的优势。2018年6月,由吕坚教授任主席、卢柯研究员任副主席,双方于香港城市大学合作承办NANO2018会议,这是这个始于1992年全球最早的国际纳米科学与技术领域的系列会议首次在中国召开。同时与材料界一流杂志Advanced Materials和Materials Today分别组织两个研讨会,近800位来自世界各地的大学和机构代表参会并分享近期的研究成果。



2017年7月,卢柯研究员和吕坚教授再次联合申请并获准了国家重点研发计划“新型纳米金属材料的构筑及使役行为的研究”。卢柯研究员任项目首席科学家,卢柯研究员和吕坚教授作为课题负责人分别负责“新型纳米金属材料的结构设计、形成与演化及多级构筑技术研究”及“新型纳米金属材料的使役行为研究及部分工业应用探索”两个项目。在该项目中明确了双方在梯度纳米结构,层片纳米结构,多级复相纳米结构设计、形成与演化及多级构筑等领域的研究工作分工,课题间任务明确,相互贯通,在材料、制备技术、结构性能数据等方面实现共享合作。通过本项目的实施,联合实验室力争在纳米结构金属形成和稳定化基本原理、变形规律及结构-性能基本关系、耐蚀性等关键使役性能提高、以及探索工业应用等方面取得突破,获得具有自主知识产权的创新性成果,为推动纳米金属材料在工业领域中应用奠定科学基础,巩固我国在国际纳米金属研究领域的优势地位,并推动高性能纳米金属材料在我国社会经济和工业建设中的应用。

未来5年,联合实验室将通过共同培养研究生、双方技术人员互换、组织大型学术会议以及其它学术交流等方式,加快双方不同学科研究人员跨学科的合作,增加两地交流机会,更好地体现联合实验室的优势。双方各自完善的依托单位科研场所条件及实验设备、稳定充足的实验经费、具有国际影响力的学术带头人以及合理的梯队,无疑将促进双方未来五年的合作持续发展,取得丰硕的研究成果。

(上接二版)导;在室温区,电输运由体空穴主导。进一步深入研究发现,PbTe/SnTe异质结的线性磁电阻不能由经典Drude模型描述,说明其电输运行为具有不同于传统的电输运物理本质。这项实验工作为拓扑材料的电输运理论研究提供了一种新的实验现象与实验数据支撑。

以上相关实验工作由金属所博士生魏锋与Case Western Reserve大学博士后刘玟汶共同完成。相关论文分别在Physical Review B (Rapid Communications)与NanoLetters上在线发表。该项工作得到了国家自然科学基金、科技部重点研发项目和美国国家自然科学基金资助。



近日，“2018中国科学年度新闻人物”评选揭晓出10位获奖人物，金属所马宗义研究员当选。

12月31日，由金属所参与建设的中国科学院岛礁综合研究中心在南沙群岛美济礁正式启用。中心大楼采用金属所李京课题组



研究的新一代高性能涂层钢筋建设，课题组还建设了陆域腐蚀试验场、海水腐蚀试验场、腐蚀监测试验场、阴极保护试验场及腐蚀防护实验室，为全面开展南海海域腐蚀防护研究创造了必要条件。



12月18日，中科院重点部署项目“核电关键材料的研发与服役安全保障技术研究”通过中期评估。



12月17日，山西省教育厅及太原科技大学领导一行访问金属所，双方签署共建研究生联合培养基地协议。



12月16日至17日，材料服役行为研讨会暨中国材料进展培训班第二期——材料服役行为培训班在沈阳举办，20余家单位的120余名研究生与青年职工参加了培训。



12月11日至14日，2018重大装备制造基础专业研究生学术交流暨创新竞赛在大连举行，金属所博士生马彦、陈大勇和留学生Ali Abd El-Aty凭借竞赛项目“复杂薄壁铝合金零件冲击液压成形技术与设备”获得学术交流报告第一名和创新竞赛组唯一的一等奖。