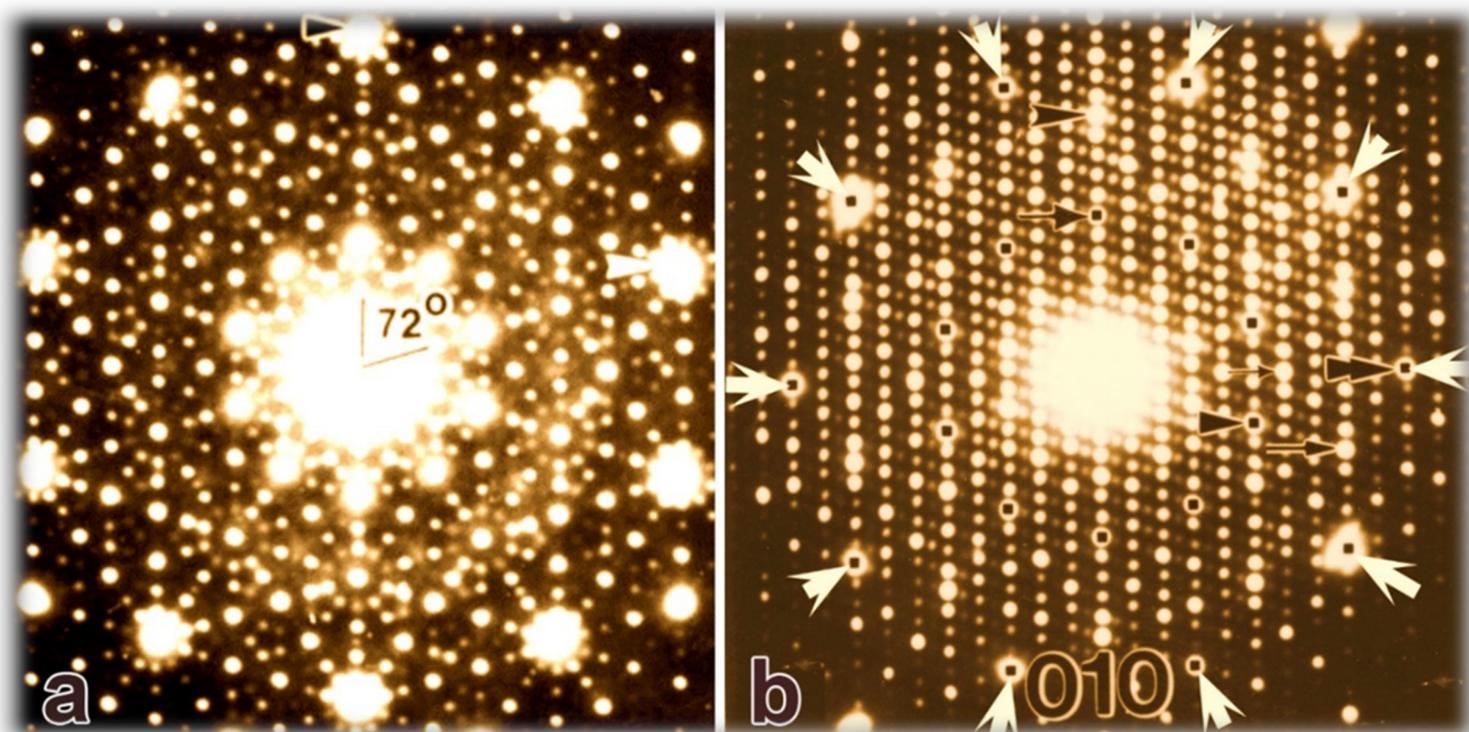
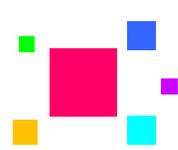




松山湖材料实验室
广东省东莞市松山湖国际创新创业社区
Email: bacem@sslabs.org.cn

十次对称准晶及相关晶体相





大湾区电镜中心举办第一届学术与技术交流会

2022年3月24-25日，大湾区电镜中心举办了第一届学术与技术交流会。受疫情影响，本届交流会在网上进行，160多位专家学者线上参加了本届交流会并与报告人进行了热烈讨论。

电镜中心组织该交流会旨在为相关领域的学者提供一个学术与技术交流的平台，期望通过交流产生新的思想、通过合作使不同学科类别的科学家取长补短、发挥各自的优势，从而共同解决某些重大基础性科学难题。

本次交流会不仅使与会者增进了彼此之间的



了解，同时也对大湾区电镜中心、对松山湖材料实验室有了更深入的认识。大湾区电镜中心学术与技术交流会每年将举办2-3次，每次设一个主题，正常情况下线下举行。

大湾区电镜中心第一届学术与技术交流会会议日程		
3月24日		
时间	报告内容	报告人
09:00-09:10	大湾区电镜中心负责人致辞	马秀良 研究员
09:10-09:50	空间与动量同时分辨的四维电子能量损失谱学技术	高鹏 教授 北京大学
09:50-10:20	非晶合金的稳定性探索	柯海波 研究员 松山湖材料实验室
10:20-10:30	休息	
10:30-11:00	基于铁电极化的量子材料构筑及其亚埃尺寸结构调控	朱银莲 研究员 松山湖材料实验室
11:00-11:30	氧化铁界面与位错的结构与特性	陈春林 研究员 中科院金属所
11:30-13:30	午休	
13:30-14:00	三维原子断层成像方法与材料科学研究	田学增研究员 中科院物理所
14:00-14:30	二维十次准晶的原子坐标确定	靳千千 副研究员 广西科技大学
14:30-15:00	铁电薄膜应变调控与原子结构	唐云龙 研究员 中科院金属所

15:00-15:30	高指数取向铁电薄膜中畴结构调控的多尺度计算研究	王宇佳 研究员 中科院金属所
15:30-15:40	休息	
15:40-16:10	高指数取向铁电薄膜极化行为的原子图谱解析及其电学性能调控	冯燕朋 博士 松山湖材料实验室
16:10-16:40	[111]取向PbTiO ₃ 铁电薄膜结构的应变调控及其原子构型图谱	邹敏杰 博士 松山湖材料实验室
16:40-17:10	多铁薄膜中缺陷组态的原子结构及其功能性调控	耿皖荣 博士 松山湖材料实验室
3月25日		
时间	报告内容	报告人
09:00-09:30	金属腐蚀基础科学问题的像差校正电子显微学解析	张波 研究员 中科院金属所
09:30-10:00	镁合金强化机制的像差校正电子显微学研究	邵晓宏 项目研究员 中科院金属所
10:00-10:10	休息	

10:10-10:40	WTe ₂ 二维材料中本征缺陷的原子像	韩梦娇 副研究员 松山湖材料实验室
10:40-11:10	大湾区电镜中心一期设备配置功能介绍及新技术探讨	吴波 研究员级高工 松山湖材料实验室

11:10-11:40	双束微纳加工及成像技术探讨	杨立新 高级工程师 中科院金属所
11:40-11:50	总结	马秀良 研究员

实验室理事会成员莅临电镜中心参观考察

2022年4月13日，松山湖材料实验室（以下简称“实验室”）召开了第一届理事会第七次会议。实验室理事长王恩哥院士、东莞市委副书记/松山湖党工委书记/副理事长刘炜、副理事长冯稷研究员、中科院物理所所长/实验室法人代表方忠院士、实验室主任汪卫华院士等9位理事会成员参加了会议，广东省科技厅副厅长吴世文，东莞市科技局、财政局相关领导和实验室领导班子成员列席了会议。

会前，实验室理事会成员及参会人员集体参观

考察了大湾区电镜中心，并对电镜中心的建设风格、建设质



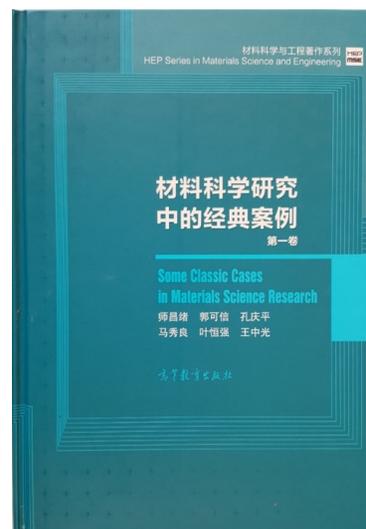
量以及建设进展给予了充分肯定和高度评价。

马秀良研究员向实验室青年学者推荐图书阅读

“掌握材料，掌握未来”。在世界图书日到来之际，马秀良研究员向实验室广大青年学者推荐阅读《材料科学研究中的经典案例》，诚望大家站在前人的肩膀上，开创材料科学的美好未来。

世界图书日的设立旨在通过写作和阅读使所有人都能尊重和感谢为人类文明做出过巨大贡献的文学、文化、科学、思想大师们。2014年由高等教育出版社出版的《材料科学研究中的经典案例》以材料发展史中部分经典的研究案例和典型人物为主线，讲授新材料发现和新技术突破的研究背景和研究思路，解读典型人物的成长历程、专业背景、

性格特征、学术思想和成果贡献等。该书不但能激起广大青年读者对材料科学领域历代先驱者的无限敬仰，也有可能激发年轻学者对投身于材料科学研究、探索自然奥秘的热情和决心。



马秀良研究员应邀参加浙江大学电镜中心成立十周年庆典

2022年5月15日，电子显微学高端论坛暨浙江大学电镜中心成立十周年庆典活动在杭州举行。马秀良研究员应邀参加了庆典活动并做了题为“像差校正与材料科学新机遇”的邀请报告，详细介绍

了研究团队近年来在新型铁电拓扑结构的构筑以及金属腐蚀机理等基础性科学问题研究方面的进展。

马秀良，男，汉族，1964年3月出生于辽宁省东沟县。中国科学院物理研究所研究员、松山湖材料实验室研究员，大湾区显微科学与技术研究中心负责人。



1988年毕业于大连理工大学材料工程系。曾师从我国著名科学家、中国电子显微学奠基人之一郭可信先生，在中国科学院北京电子显微镜实验室和大连理工大学从事 Al 基合金中十次对称准晶及复杂合金相的冶金学和晶体学研究，1994年获博士学位。1995—2001年先后在德国多特蒙德大学、日本精细陶瓷研究中心（名古屋）、东京大学、香港城市大学及德国鲁斯卡电镜中心等从事固体材料结构与缺陷的高分辨电子显微学研究。

2001—2022年为中国科学院金属研究所研究员，先后任沈阳材料科学国家（联合）实验室固体原子像研究部主任（2006—2018），沈阳材料科学国家研究中心材料结构与缺陷研究部主任（2018—2022），金属研究所第十二届学术委员会主任（2019—2022）。

马秀良博士长期致力于材料基础科学问题的透射电子显微学解析。1991—1995年发现可形成稳定十次对称准晶的唯一的二元合金体系和成分（*Metall. Trans.* 1992; *Metall. Mater. Trans.* 1994），这一发现修正了此前普遍认为稳定的十次对称准晶只在三元合金系中存在这一观点；制备出毫米量级十次准晶单晶体并测得其有别于传统周期性晶体的独特的物理性能数据（*Phys. Rev. Letts.* 1991）；在 Al 基合金中发现并确定 20 余种晶胞参数以黄金分割比（1.61803...）渐进膨胀的大单胞新物相，并将之归纳为单斜和正交两大点阵群族，丰富和发展了这些合金系已有的平衡相图，提出准晶相是上述两大晶体群族中共有的极限成员（单胞无穷大）这一重要观点（*Metall. Mater. Trans.* 1995; *Acta Cryst.* 1995）。这些工作为当时中国的准晶实验研究走在国际前列做出了贡献。

2010年主持购置引进中国大陆最早一台300kV 双球差校正透射电子显微镜，并带领团队重点关注新型铁电拓扑结构的构筑、亚埃尺度的结构特性以及金属腐蚀机理等基础科学问题的像差校正电子显微学解析。相继在铁电材料中发现通量全闭合畴结构（*Science* 2015, *ACS Nano* 2018）、半子拓扑畴及半子晶格（*Nature Materials* 2020）、周期性电偶极子波（*Science Advances* 2021），为探索基于铁电材料的高密度信息存储和传输提供了新途径；构筑出具有巨大线性应变梯度及超低弹性能的铁性功能纳米结构（*Nature Communications* 2017），提供了如何利用位错的特性构筑具有连续带隙变化的梯度功能材料的概念、原理及方法；澄清了奥氏体不锈钢点蚀形核初期 MnS 局域溶解的成因，将不锈钢点蚀机理的认识从先前的微米尺度提升至纳米及原子尺度（*Acta Materialia* 2010）；实现了对氯离子在金属钝化膜中传输路径的直接观测，为修正和完善基于模型和假说所建立起来的钝化膜击穿理论提供了原子尺度的结构信息（*Nature Communications* 2018）；提出通过界面原子构型的重构从而提高不锈钢耐蚀性的新方法，使不锈钢在酸中的活化时间最高延长了两个数量级，大幅度提升了钝化膜的稳定性及不锈钢的耐蚀性能（*Nature Communications* 2022）。这些工作相继被具有重要影响力的国际学术期刊的推介和点评（*Science* 2018; *Nature* 2021）。

马秀良研究员曾获国家教育部科技进步一等奖（1993）；德国“洪堡”基金（1995）；美国 ISI“经典引文奖”（2000）；中国科学院“百人计划”（2000）；国家杰出青年科学基金（2003）；国务院政府特殊津贴（2006）；新世纪百千万人才工程国家级人选；郭可信教育基金会“郭可信杰出学者奖”（2016）；中国电子显微学会“钱临照奖”（2018）；辽宁省自然科学一等奖（2020）等荣誉。主持完成国家杰出青年基金项目、国家自然科学基金重点项目、中科院前沿局重点研究项目、科技部 973 课题等科研项目。现已在具有重要影响力的国际学术期刊上发表论文 310 余篇，被引用 10000 余次。在国际会议以及国

内外重要学术机构做邀请报告和学术讲座 100 余次。已培养及正在培养博士、硕士研究生 80 余人，部分毕业生获国家自然科学基金优秀青年基金、中组部 QR 计划（青年）以及中科院“百人计划”等人才项目。

现兼任中国电子显微学会副理事长、常务理事；中国电子显微学会物理与材料专业委员会主任；中国微米纳米技术学会副理事长；中国物理学会固体缺陷专业委员会委员；Scientific Reports 编辑委员会委员；APL Materials 编辑咨询委员会委员；Materials Letters 期刊编辑委员会委员；Progress in Natural Science—Materials International 编辑委员会委员；松山湖材料实验室学术委员会委员；广东省信息功能氧化物材料与器件重点实验室学术委员会委员；第十二届辽宁省政协委员。

杨立新，男，高级工程师，1988年12月出生于辽宁省朝阳市。中科院电镜联盟秘书处成员。2010年毕业于辽宁工程技术大学机械学院，获学士学位，2017年获得中国科学院大学在职硕士学位。2010年起先后任中国科学院金属研究所助理工程师、工程师、高级工程师。2021年10月加入松山湖材料实验室大湾区电镜中心，担任客座高级工程师。自2011年起先后参与双球差校正透射电镜、脉冲激光沉积系统（PLD）、原子力显微镜(AFM)、透射电镜制样设备、聚焦离子束双束显微镜（FIB）等实验平台的建设，并负责设备的后期维护，保证了设备运行机时均达到科技部标准机时的2倍以上；并对百余名研究生进行相关设备的技术培训；作为项目负责人主持中科院仪器设备功能开发技术创新项目3项，作为技术骨干参与中国科学院科研仪器设备研制项目1项，所开发的先进实验技术为科研人员解决了诸多材料微观结构分析研究方面的技术难题，利用自己的技术特长参与了相关科研项目研究工作，近百篇相关成果发表在包含Science、Nature Materials（作者之一）、Nature Communications等具有重要国际影响



力期刊上；积极参与课题组相关研究工作，在Nature Materials、Nature Communications、Nano Letters和JMST等高水平期刊发表论文20余篇，其中作为第一作者及共同第一作者论文7篇。

魏欣欣，女，博士后，1992年9月出生于河南省滑县。2015年6月毕业于河南科技大学材料科学与工程学院，获学士学位。2015—2022年就读于中国科学技术大学材料学院，获工学博士学位。



2022年6月起，任职于松山湖材料实验室大湾区电镜中心，从事博士后研究。魏欣欣博士的主要研究方向为不锈钢超薄钝化膜的微观结构和宏观腐蚀性能的关系研究，目前以第一或共同第一作者在具有重要影响力的国际学术期刊 Nature Communications, Corrosion Science 上发表 SCI 论文 2 篇。以合作者身份在 Corrosion Science 等杂志上共发表论文 6 篇，在学期间曾荣获金属研究所师昌绪奖学金、“优秀学生干部”、安徽省及中国科学技术大学“优秀毕业生”等荣誉。

宋晓雪，女，工程师，1991年12月出生于江苏省苏州市。2014年毕业于金陵科技学院材料科学与工程专业，获学士学位。2017年毕业于苏州大学材料科学与工程专业，获硕士学位。2015年10月—2016年3月在西班牙加泰罗尼亚化学研究所访问交流。硕士期间主要从事二维材料的压电性能的研究，并以第一作者在 Nanoscale、Applied Physics Letters 发表 SCI 论文两篇。2017—2021年期间主要从事聚焦双束场发射扫描电子显微镜、场发射扫描电子显微镜及离子减薄仪等设备的检测及维护工作。2022年3月入职松山湖材料实验室大湾区电镜中心。曾获“金陵科技学院优秀学生奖学金”、“江苏省本专科优秀毕业论文三等奖”、“苏州大学国际交流奖学金”、“苏州市吴江区“重点产业紧缺专技人才”等。





钝化膜稳定性及不锈钢耐蚀性研究取得重要进展

电镜中心马秀良、张波和魏欣欣等人利用在过钝化电位下的阳极极化处理，在不破坏不锈钢钝化膜的同时实现了对金属表面原子构型的重构，使不锈钢在酸中的活化时间最高延长了两个数量级，大幅度提升了钝化膜的稳定性及不锈钢的耐蚀性能。2022年2月7日，英国《自然·通讯》(Nature Communications)以“Enhanced corrosion resistance by engineering crystallography on metals”为题在线发表了该项研究成果。2月15日，nature 出版集团旗下的学术期刊 Communications Engineering 对该项工作进行了介绍。

不锈钢表面几纳米厚的钝化膜赋予了其优良的耐腐蚀性能。钝化膜的稳定性是决定不锈钢耐蚀性的重要因素，是腐蚀领域备受关注的基本科学问题之一。早在1930年，科学家就发现了一个有趣的实验现象，铁表面的氧化膜在稀酸中很快发生溶解失效，但是当将其从铁基体剥离转移到塑料载体上时，就可以在稀酸溶液中保持相当长时间免遭腐蚀，这一实验现象说明了氧化膜与金属基体的电接触对于氧化膜的稳定性有重要影响。1962年有学者提出了还原溶解理论对这一现象进行了合理的解释，认为表面氧化膜下的铁基体发生氧化溶解，同时氧

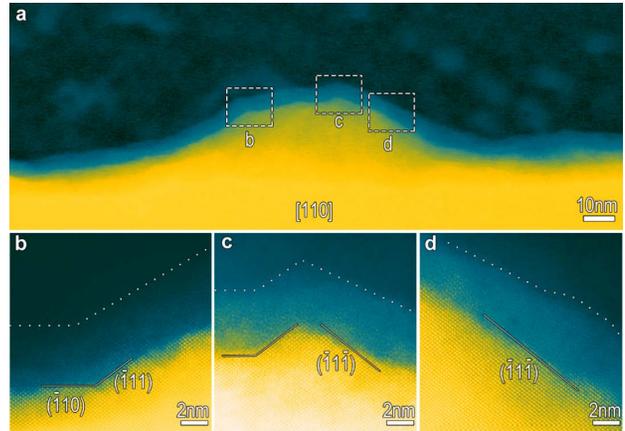


图2: 高分辨成像直观显示过钝化处理将金属/钝化膜界面修饰成由密排{111}晶体学面构成的低能界面。

化膜发生还原溶解，且金属基体的氧化溶解速率决定了氧化膜的还原溶解速率。由于该过程的速度控制步骤发生在氧化膜与金属界面处，这意味着界面结构可能对钝化膜的稳定性有显著影响。尽管如此，长期以来有关金属钝化膜稳定性的研究主要集中在钝化膜自身的特性，钝化膜与金属的界面原子构型对钝化膜稳定性的影响鲜有关注，二者之间的关系尚未建立。

研究小组利用像差校正透射电子显微镜，通过对比在稀硫酸溶液中浸泡前后的 FeCr15Ni15 单晶合金表面钝化膜的剖面显微图像，发现原子尺度平直的钝化膜/基体界面变得起伏，说明在界面处发生了基体的非均匀溶解，在实验上证实了还原溶解理论的合理性；同时发现起伏界面都沿着密排的{111}面，说明界面处基体的溶解具有与晶体学取向相关的各向异性，沿[111]方向的溶解速率最慢。

基于这一实验现象，他们利用在过钝化电位下的阳极极化处理，促进金属在界面处的阳极溶解过程，同时抑制表面钝化膜的还原溶解过程，实现了在不破坏钝化膜的同时对异质界面原子构型进行重构。利用像差校正透射电子显微术、扫描电子显微术以及原子力显微术等多尺度微结构分析手段，发现钝化膜/基体界面处发生的非均匀溶解导致金属表面产生大量高低起伏的由{111}面作为外表面

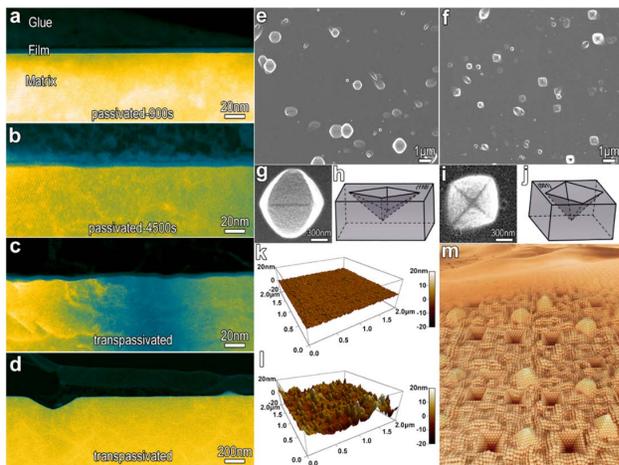


图1: 金属/钝化膜界面的晶面重构及其多尺度微结构解析，过钝化处理后金属表面的凹凸起伏由密排的{111}晶体学面构成。



的纳米多面体，起伏的基体表面由均匀连续的氧化膜覆盖（图 1-2）。腐蚀性能测试表明，过钝化处理的单晶合金以及商用 304 不锈钢在酸中的活化时间最高延长了两个数量级，在盐水溶液中的点蚀击破电位显著提高（图 3）。

通常认为，过钝化处理是一种腐蚀破坏过程。然而，上述研究结果表明特定过钝化电位下的阳极极化处理会产生类似‘优胜略汰’的作用，在钝化膜/基体界面处留下大量的{111}面，将商用合金中的随机活性晶界修饰为由{111}面构成的惰性晶界，从而显著提高材料的耐腐蚀性能。

这一研究结果实现了原子尺度的界面重构，显著提高了钝化膜的稳定性及材料宏观耐腐蚀性能，建立了界面原子构型与钝化膜稳定性的关联，为进一步提高不锈钢的耐蚀性提供了一种新的思路和方法，同时也在原子尺度上对过钝化机制给予了新

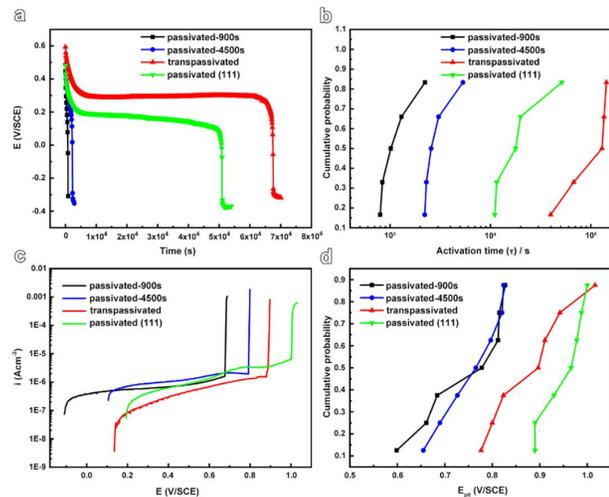


图 3: 低能密排界面显著提高了材料的耐还原溶解及抗点蚀能力。

的认识和理解。这项工作是继揭示氯离子击破钝化膜机制（Nature Communications 2018）后，该团队在有关钝化膜研究方面的又一项重要进展。



图 4: Communications Engineering 对该项工作进行了介绍。

研究发现 $\text{BiFeO}_3/\text{DyScO}_3$ 异质结中切应变以及由此产生的螺位错网络

螺型位错核心处的原子畸变位移主要平行于位错线，即便是对于具有亚埃尺度分辨能力的透射电镜而言，也很难直接对螺型位错的结构和伯氏矢量等进行原子尺度的实验观测。

近日，电镜中心朱银莲、唐云龙以及博士生陈雨亭等人利用电子显微技术在 $\text{BiFeO}_3/\text{DyScO}_3$ 异质结中发现大规模螺位错网络。他们利用[001]取向 DyScO_3 正交衬底与 BiFeO_3 薄膜之间的晶格角度畸变差异成功引入了面内切应变；通过透射电子显微

镜成像直接观察到了该体系中的螺位错网络(图 1, 图 2)，并对其柏氏矢量和原子结构进行了系统解析，确定了主导弛豫体系剪切应变的螺型位错网络是由 $a[100]$ 和 $a[0\bar{1}0]$ 两组纯螺型位错构成。他们通过实验设计及分析，进一步揭示了位错网络随薄膜厚度的演变规律，并对螺位错相关的电学、光学特性进行了探索性研究。

这一工作阐明了氧化物异质外延结构中剪切应变的显著效应及其弛豫机制，明确了剪切应变与



螺位错形成的直接关联。提出剪切应变的大小可以通过不同衬底和掺杂等直接进行调控的观点，进而对未来基于剪切应变调控的异质外延体系设计提供了可行的方法。同时，在异质外延体系中引入可

控纯螺型位错阵列也为深入理解螺型位错的结构本质和基于螺型位错的材料结构与性能研究开辟了一条新途径。

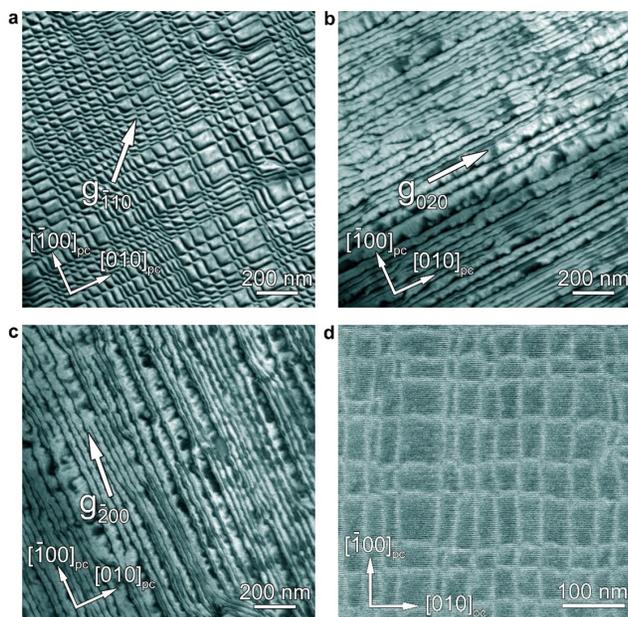


图 1: BiFeO₃(15 nm)/DyScO₃(001)o 平面样品中的螺位错。

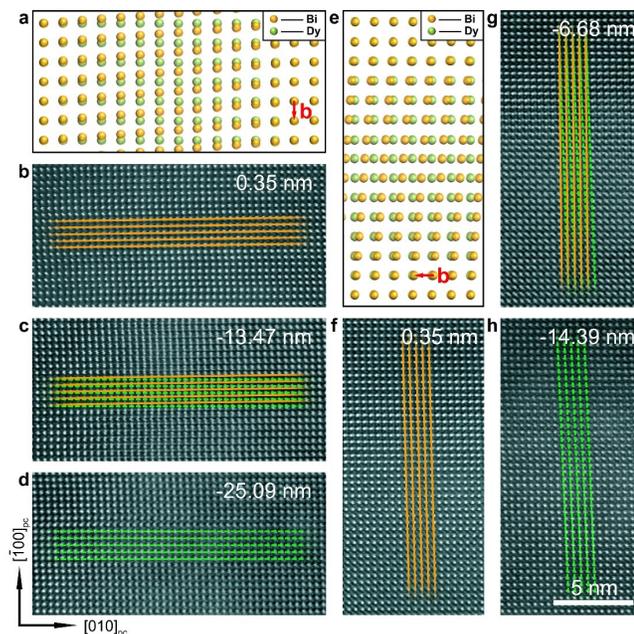


图 2: 螺位错在不同离焦值下的平面 HAADF-STEM 像。

封面图片：

AlCo 二元合金中稳定的十次对称准晶及其相关晶体相的电子衍射图。剑桥大学卡文迪许实验室在上世纪五、六十年代曾经先后有十几名研究生在 W. H. Taylor 指导下系统地用 X 射线研究铝合金相。其中，R. C. Hudd 在其硕士论文（1962）中虽然有关于 AlCo 合金五次对称的描述，但因 X 射线衍射谱无法标定只好作为未知相留了下来。1991 年 5 月，正在卡文迪许实验室访问的郭可信先生看到 R. C. Hudd 的硕士论文后即刻通过传真安排当时的硕士研究生马秀良做 AlCo 合金的缓冷研究。

在大连理工大学铸造工程研究中心利用电磁感应炉炼制完成 10 余公斤成分在 Al₁₀Co₄~Al₁₃Co₄ 的合金后，马秀良于 1991—1995 年中科院北京电子显微镜实验室利用电子衍射和 X 射线衍射对这些合金进行了系统研究，不仅发现二元稳定十次对称准晶（如封面图 a），而且发现并确定一系列晶胞参数以黄金分割比（1.61803...）渐进膨胀的大单胞新物相（其中之一如封面图 b），并将之归纳为单斜和正交两大点阵群族，由此提出准晶相是上述两大晶体群族中共有的极限成员（单胞无穷大）这一重要观点。

这些新物相的发现和确定不但解答了数十年来有关 AlCo 合金中未知相的疑惑，而且修正了此前普遍认为稳定的十次对称准晶只在三元合金系中存在这一观点，对于理解准晶体的形成过程和结构特征具有重要意义，也为当时中国的准晶实验研究走在国际前列做出了贡献。相关论文（X. L. Ma and K. H. Kuo, Metall. Trans. 1992）被认为是 1981—1998 期间在中国大陆完成的最具影响力的 47 篇研究论文之一，作者因此于 2000 年获美国 ISI（Institute for Scientific Information）经典引文奖。