

合肥光源在功能材料领域中的应用

邹崇文 戚泽明 闫文盛 孙 喆 张国斌

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 230029)

1. 引言

合肥同步辐射光源用户在功能材料科学研究领域,包括拓扑量子材料、金属氧化物和相变材料、半导体和功能陶瓷材料以及高分子功能材料等多个方向开展了持续深入的探索,取得了一系列具有国际影响力的研究成果,为我国相关领域的发展起到了重要的推动作用。本文挑选了具有代表性的成果来展示合肥同步辐射光源在功能材料领域中的重要应用和研究进展。

2. 合肥光源在功能材料领域中的研究进展

2.1 拓扑量子材料

拓扑材料最早起源于具有表面导电性的绝缘体——“拓扑绝缘体”,其发展演化是将拓扑这一数学概念引入到固体电子材料的研究之中,从而形成一类具有奇异性质的量子功能材料。从物理概念上来说,拓扑绝缘体是一种具有金属性边界的绝缘体,而这些金属性的边界态来源于固体的能带结构的拓扑属性,它对系统的几何形状不敏感,只要材料保持绝缘,其性质就不会改变。拓扑量子材料近年来已经成为功能材料和凝聚态物理领域研究的国际前沿课题^①。

最早发现的拓扑态是量子霍尔态,它的霍尔电导对参数的连续变化不敏感,只依赖于边缘态的数

量。近几年来,随着人们对这类材料的了解越来越深入,更多形形色色的类似材料相继被发现,例如“拓扑外尔半金属”、“拓扑超导体”等,同时大量新奇量子态(例如狄拉克费米子和外尔费米子)在量子功能材料中得以实现^{②③}。在针对这些新奇拓扑材料中量子态的研究中,角分辨光电子能谱技术(Angle-resolved Photoemission Spectroscopy, ARPES)扮演了重要的角色。事实上,基于同步辐射光源的ARPES技术是研究材料电子态和能带结构非常强大的实验手段,能够直接探测布里渊区电子能量与动量之间的色散关系^{④⑤}。合肥同步辐射建有先进的角分辨光电子能谱实验站,为拓扑量子材料的研究提供了强大的实验工具。

在拓扑材料中,节线型拓扑半金属中存在能带翻转导致的一维节线型非平庸拓扑电子态和对应的鼓膜状表面态。当节线靠近费米能级时,材料会表现出更为新奇的物理性质和量子行为。最近上海微系统所刘中灏、沈大伟研究员课题组,与北京师范大学教授殷志平课题组以及南京大学教授温锦生课题组开展合作研究,通过合肥同步辐射和上海同步辐射光源的高分辨角分辨光电子能谱实验线站并结合第一性原理计算对高质量的SrAs₃单晶样品的低能电子结构进行了详细研究。该工作利用同步辐射角分辨光电子能谱实验技术,通过改变光子能量,直接观测到了SrAs₃材料中布里渊区费米能级附近的节点环拓扑电子结构。实验发现,与之前报道的节线型拓扑半金属不同,该材料费米能级

附近只存在一个节点环构成的费米面,与其他拓扑平庸的能带无相互干涉,如图1所示。因此, SrAs_3 一类材料是研究节线型拓扑量子态及其新奇输运性质的理想平台,并具有重要的潜在应用价值^⑥。

此外,上海交通大学钱冬、贾金锋教授领导的课题组以及美国犹他大学材料系刘峰教授课题组凭借自身在薄膜制备技术和原位表征方面的优势,利用合肥光源角分辨光电子谱(ARPES)实验装置,在拓扑绝缘体表面态研究方面取得了突破性进展。研究人员利用分子束外延技术在 Bi_2Te_3 和 Bi_2Se_3 衬底上生长Bi薄膜,并利用高分辨的角分辨光电子能谱技术,得到了这两种薄膜材料在不同温度和不同能量下的电子能带结构。通过比较它们的电子结构,发现 Bi_2Te_3 中存在的准粒子谱重整化行为很可能与双分子层Bi薄膜狄拉克态与衬底

Bi_2Te_3 狄拉克态在相近能级范围内的杂化有关,而当薄膜与衬底间的狄拉克态无杂化时(如 Bi_2Se_3),界面态中只存在单粒子行为。这一研究成果为拓扑绝缘体研究提供了一个新的研究道路。相关研究结果发表在美国科学院院刊*PNAS*上并受到广泛关注^⑦。

在凝聚态物理中,低能准粒子激发不受洛伦兹不变性的限制,这为第二类的狄拉克/外尔费米子提供了可能性。继实验上观测到第二类外尔费米子之后^⑧,第二类狄拉克费米子的实验观测仍属空白。基于这一研究现状,清华大学物理系周树云教授研究组在合肥同步辐射光源ARPES实验站上对1T对称性的二维层状量子材料 PtTe_2 的能带结构进行了表征,首次在这种材料中观测到了第二类狄拉克费米子存在的直接实验证据(图2)。相关成果发表在*Nat. Comm*期刊上^⑨。第二类狄拉克费米子的

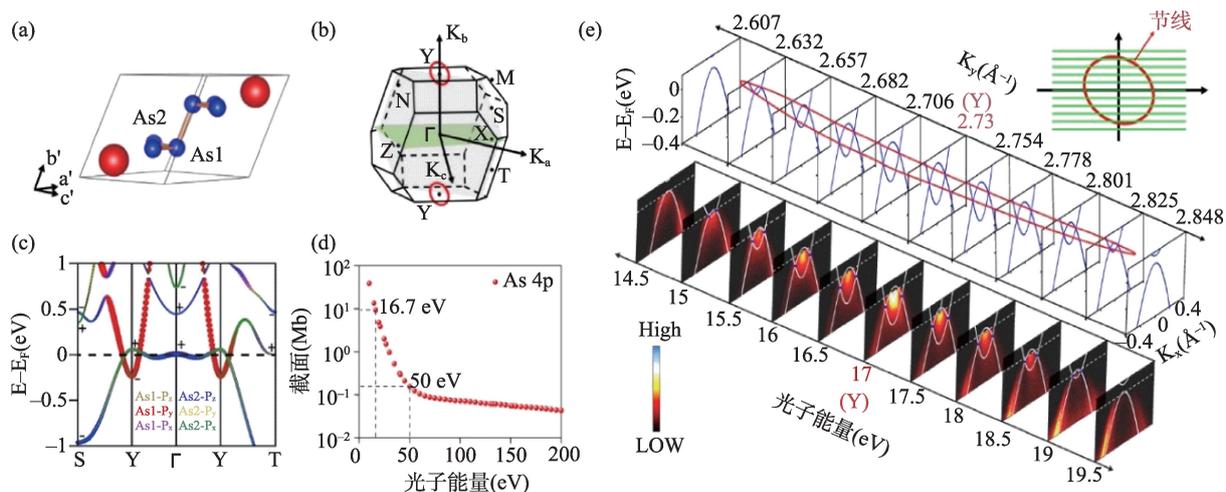


图1 SrAs_3 的晶体原胞结构、拓扑能带以及节线拓扑电子结构

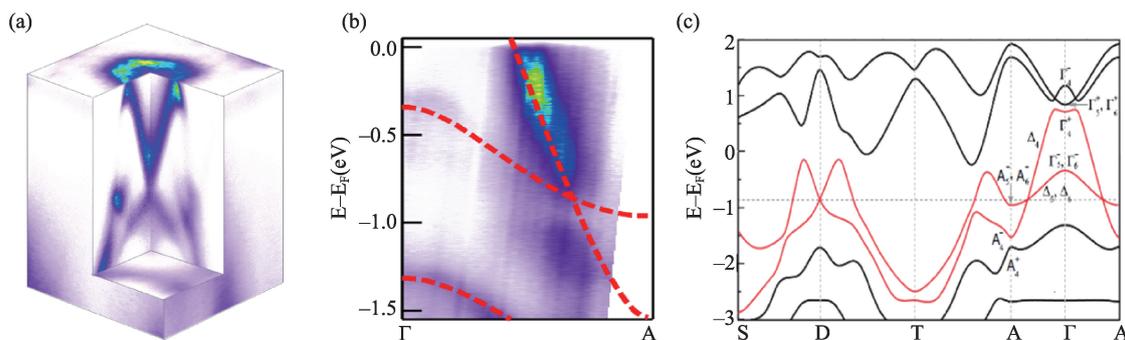


图2 PtTe_2 面内、面外高对称方向的电子色散关系

实现为从实验上实现从第二类狄拉克半金属到第二类外尔半金属或者拓扑晶体绝缘体的转变提供了很好的实验平台。

钛酸铽表面外延的单层 FeSe 薄膜呈现出最高 109 K 的超导行为,其物理起源尚不清楚。理论计算建议在薄膜中反铁磁作用会被极大增强,有助于在很高的电子掺杂下产生很大的自旋涨落。如何检验其中是否存在反铁磁序是很大的实验挑战。上海交通大学钱冬教授和南京大学吴镒教授针对此问题开展了合作研究,通过磁交换偏置测量,并利用合肥光源角分辨光电子谱(ARPES)装置,发现在单层 FeSe 母体薄膜中存在反铁磁长程序,其相变温度高于 140 K,通过电子掺杂后反铁磁序消失,出现超导。此发现为理解 FeSe 薄膜的奇特物性提供了重要信息。相关成果发表在 *Phys. Rev. Lett* 期刊上^⑧。

在量子功能材料中,重费米子化合物由于其独特的物理化学性质而受到凝聚态和材料物理学家的极大关注。目前研究的比较多的重费米子 CeMIn₅(M=Co, Rh, Ir)体系是重费米子化合物中非常重要的一个家族,其中 CeCoIn₅和 CeIrIn₅是超导体,而 CeRhIn₅是反铁磁体。Rh 在元素周期表中位于 Co 和 Ir 之间,但 CeRhIn₅却表现出与另二者完全不同的基态性质。为探索 CeRhIn₅与其姐妹化合物基态性质差异的起源,复旦大学封东来教授研究组通过合肥角分辨光电子能谱对其电子结构进行了系统研究,在低温观察到 f 电子与导带电子发生了明显的带间杂化,且该杂化存在明显的能带依赖性。该研究组还通过偏振光电子能谱辨别出 CeRhIn₅中不同的晶体场劈裂能级。这一工作对于增强人们对于重费米子的电子轨道和带间杂化的认识具有重要意义^⑨。

事实上,具有拓扑性质的量子材料具有广阔的应用前景。这一前沿领域的发展有望为未来的电子材料和器件,乃至量子拓扑体系与量子计算的创新探索奠定基础。众所周知,目前半导体信息技术的发展主要来源于 20 世纪量子力学的发展以及后续半导体工业和集成电路的革命性发展。如今各

类高性能芯片尺寸越来越小,功能越来越强,但是散热问题却构成阻碍摩尔定律持续发展的瓶颈。然而拓扑量子材料因为其独特的内部绝缘、表面无耗散的导电特性,有望成为未来信息产业革新的材料基础。而在这类材料的研究中,合肥同步辐射光源 ARPES 线站具有合适的光子能量区段和高能量分辨率,能够发挥重要和及其独特的作用。

2.2 氧化物相变功能材料和磁性材料

过度金属氧化物材料由于其内部存在的电荷、自旋、轨道、晶格等多重自由度以及电子之间的强关联相互作用,而表现出极其丰富的物理现象,即所谓的“emergent phenomena”,比如金属绝缘相变、超导效应、磁电耦合效应和热电/铁电效应等。由于这些独特而丰富的特性,过渡金属氧化物不仅是凝聚态物理和功能材料等领域的研究热点,同时也在光电传感器件、太阳能电池、数据存储和现代医疗等众多领域有着广泛的应用前景。因此深入研究这类氧化物功能材料对于国民经济发展和新材料的探索具有极其重要的意义。

作为典型的强关联氧化物相变材料,单斜相二氧化钒(VO₂)在 68 °C 时具有四到五个量级的绝缘-金属相变性质。VO₂的各种光电功能特性均与其相变密切相关,然而其相对过高的相变温度成为其实际应用的一大瓶颈问题。探索有效的相变调控方法来降低相变温度对推动其实际应用具有重要意义。通过氢原子的嵌入实现电子掺杂能够有效调控 VO₂的相变行为。然而传统的氢化掺杂技术依赖于高耗能的温度和压力等条件,又需昂贵的贵金属催化剂,且氢化后的材料表面沉积的催化金属还难以去除,这些不利因素成为制约 VO₂氢化相变调控和应用的障碍。

中科大邹崇文和江俊联合研究组在实验上偶然发现将具有合适功函数的金属颗粒和 VO₂薄膜接触后放入酸溶液中,发现了 VO₂薄膜能够迅速被氢化同时诱发相变。这种相变过程具有极其快速的扩散效应,因而仅用毫米尺寸的金属颗粒就可以

使直径两英寸的 VO_2 外延薄膜抗腐蚀并金属化,从而达到类似于“点石成金”的“化腐蚀为神奇的点铁成氢”的效果(图3)。这种新奇的固液界面的电荷转移和电子/质子协调掺杂诱导相变的现象引起人们极大的关注和兴趣。但是常规研究测试手段无法实现其原位动态观测。借助于合肥同步辐射光源在软X射线吸收谱技术的探测优势,课题组测量了经过酸溶液处理前后的 VO_2 薄膜样品中V和O的近边吸收谱。通过软X射线吸收谱实验对比发现,这种“点铁成氢”的室温金属化转变来自于酸溶液中自由质子嵌入 VO_2 薄膜晶格形成氢化掺杂,实现了电子轨道的逐步填充。这一成果突破了传统的掺杂技术使用高温、高压、以及贵金属的催化,发展了一种能更好兼容常规温和环境的掺杂方式,且操作简便成本极为低廉,对开发新型的功能材料与器件,促进基础理论的发展都有重要意义。相关研究结果发表在国际顶级学术期刊*Nat. Comm*上^②。

钙钛矿结构的氧化物功能材料也是目前研究的一大热点。基于软X射线的同步辐射表征技术为此类材料的电子结构研究提供了强大的表征手段。中国科学院物理所金奎娟研究组围绕氧化物界面极化场调控的基本科学问题,探索开展了基于功能氧化物薄膜界面工程和相关器件的研究。最近她们利用激光分子束外延技术制备出高质量 $\text{Sr-FeO}_{2.5}$ 薄膜,并利用离子液体调控 O^{2-} 离子的插入和析出,在 $\text{SrFeO}_{2.5}$ 中通过电场实现其钙铁石相与钙钛矿相的拓扑转换,并进一步通过合肥光源的软X射线谱学表征手段印证了这种相转变过程的发生,为先进的拓扑学相变材料在高性能人工突触中的潜在应用提供了实验依据。相关研究结果发表在国际顶级学术期刊*Advanced Materials*上^③。

通常磁性材料可分为铁磁性和反铁磁性,而在真实的材料中,铁磁材料通常是导电的,反铁磁材料通常是绝缘的。随着氧化物功能器件的发展,对

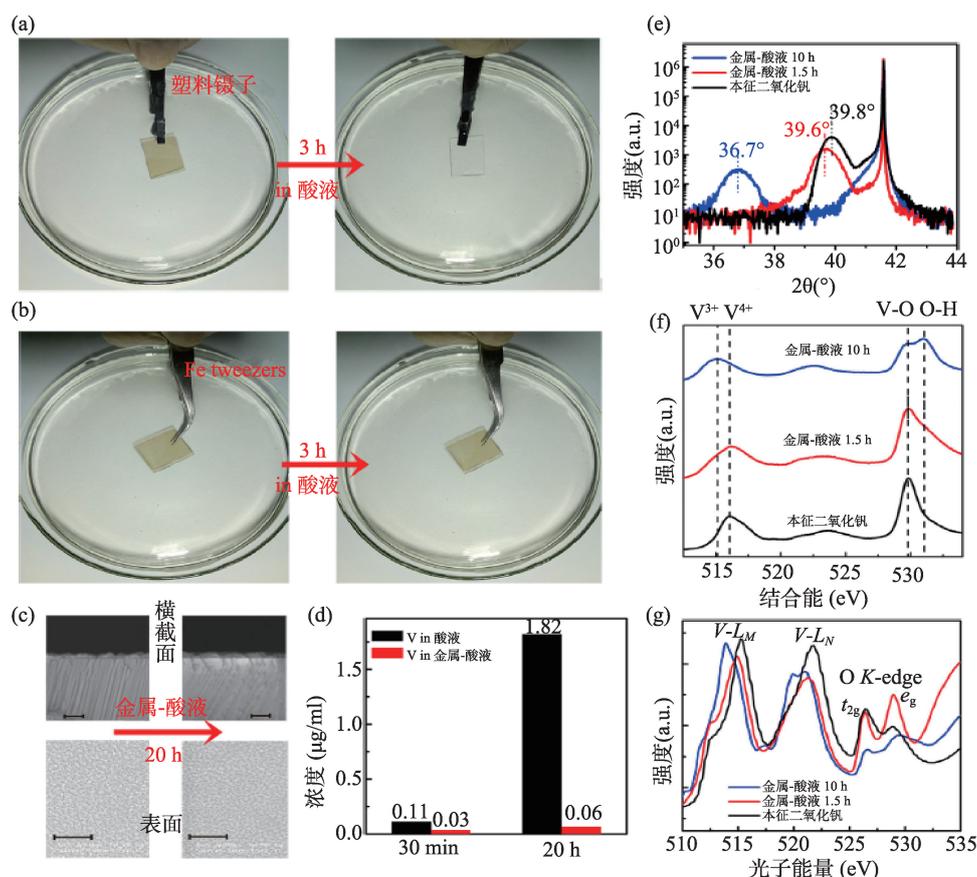


图3 在室温下通过金属-酸液处理 VO_2 薄膜诱导室温金属化相变以及相关样品的衍射、能谱和软X射线吸收谱表征

磁性功能材料的性能逐渐有了更多的需求,例如在量子拓扑器件中需要绝缘的铁磁材料(铁磁绝缘体),同时需要该铁磁绝缘体要具有高晶格对称性,以利于与其他材料外延生长成功能集成器件;需要具有尽可能高的铁磁转变温度,以利于更接近于器件的现实工作环境等。然而迄今为止,常用的铁磁绝缘体大多结构对称性低,因此存在薄膜质量差、性能不确定等问题。因此,寻找一种无掺杂,高居里温度的铁磁性绝缘体材料对于发展自旋电子器件等具有重要意义。

中科大陆亚林和翟晓芳课题组通过激光脉冲沉积技术制备出近似无缺陷的LaCoO₃薄膜,发现其是一个铁磁转变温度可以高达85 K的高温铁磁绝缘体。利用合肥同步辐射软X射线吸收谱技术(XAS),实验人员研究了薄膜材料中Co原子的近边

吸收谱,用以探测其化学价态(图4)。进一步的研究表明当氧缺陷被引入到拉应力下的LaCoO₃薄膜中时,产生的Co²⁺高自旋态与邻近的Co³⁺高自旋态或Co²⁺高自旋态形成局域的反铁磁相互作用,是削弱LaCoO₃薄膜磁性的内在原因。实验结果充分证实了钴酸镧(LaCoO₃)单晶薄膜在拉伸应变的状态下是一种稀有的无掺杂、钙钛矿结构铁磁绝缘体材料,并解释了产生高温铁磁转变现象的新机制。相关研究结果于2018年3月在国际顶级学术期刊PNAS上发表^[4]。

在磁性氧化物超晶格材料中,界面电子结构和电荷转移极大决定了其界面磁性的演化,借助同步辐射软X射线吸收谱技术能够直接对其进行探测。比如山西师范大学许小红课题组利用激光脉冲沉积(PLD)方法在SrTiO₃衬底上制备出了[(La_{0.7}

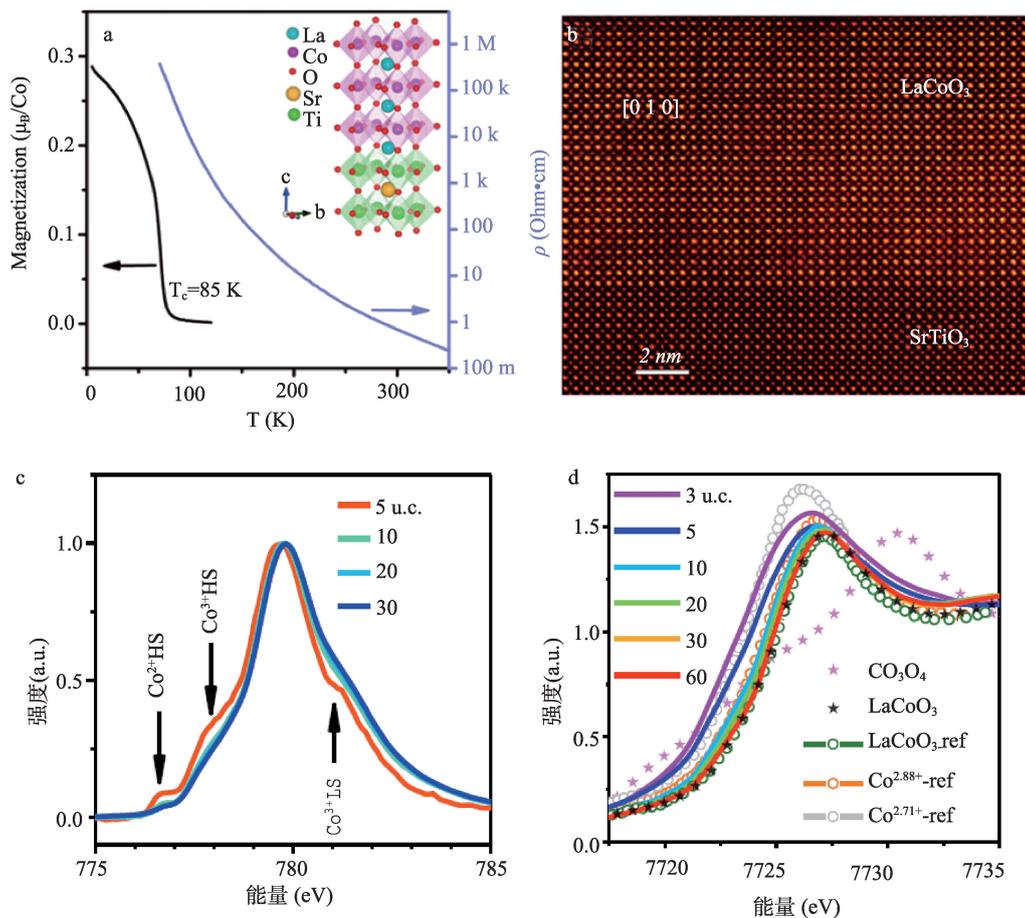


图4 LaCoO₃薄膜的磁化强度/电阻率与温度的关系以及HRTEM和同步辐射近边吸收谱表征

Sr_{0.3}MnO₃)₅-(LaNiO₃)_n]12 超晶格,在物性测量中观察到了显著的交换偏置效应。结合软X射线吸收谱学表征,明确了界面处Mn和Ni之间的电子转移引入的磁矩变化是导致出现大的偏置效应的基本原因^⑤。

2.3 半导体和功能陶瓷材料

III族氮化物(又称GaN基)宽禁带半导体具有优良的物理和化学性质,是发展半导体照明、新一代移动通信、新一代通用电源、新能源汽车等不可替代的新型半导体材料。如何通过掺杂调控其性质是氮化物半导体材料和器件发展的关键科学和技术问题,目前通过C掺杂获得半绝缘GaN是当前研制GaN基电子器件的主流方法。但作为IV族元素,C杂质在GaN中既可替代N原子,也可替代Ga原子,或者与其他杂质和缺陷形成复合体,使GaN中C的掺杂机理非常复杂,成为近年来氮化物半导体电子材料和器件领域关注的焦点问题之一,确定C杂质在GaN中的晶格位置对于解决上述问题至关重要。

红外光谱是研究C振动模的重要方法,但对于这种GaN薄膜中少量掺杂C元素在接近掠入射下进行偏振反射红外谱测量是个难题,借助高亮度同步辐射光源,北京大学杨学林和沈波教授课题组利用合肥光源红外谱学和显微成像实验站的变角和偏振红外反射谱技术,结合Raman谱学技术,实验中观察到半绝缘GaN中与C有关的两个局域振动

模,给出了C杂质在GaN中替代N位的直接证据,解决了这一长期存在的争议问题。该成果对于理解和认识C杂质在AlN、BN、ZnO等其他六方对称化合物半导体材料中的掺杂行为亦具有重要的参考价值。该成果发表在美国物理学会 *Phys. Rev. Lett.* 杂志上^⑥。

微波介质陶瓷是近半个世纪迅速发展起来的新型功能电子陶瓷,可以用来制作介质谐振器、介质滤波器、双工器、微波介质天线基板等器件,这些器件广泛应用于移动通信、卫星电视广播通信、雷达、卫星定位导航系统等等众多领域。衡量微波介质陶瓷性能优劣的三个物理量指标分别是介电常数,品质因数和谐振频率温度系数。其中,介电常数与器件的尺寸成反比,决定了微波器件的尺寸;高品质因数Q决定低介电损耗和优良的选频稳定性;近零的谐振频率温度系数确保器件的温度稳定性。通常认为,微波频段下的介质损耗由两部分组成:本征损耗和非本征损耗。本征损耗由晶格振动声学模造成,可以通过经典的一维谐振子模型解释;非本征损耗由各种缺陷造成。本征损耗由晶格结构和离子种类决定,而非本征损耗可以通过优化烧结工艺来改善。可以简单理解为,本征损耗决定了微波介质陶瓷品质因数Q的上限,然而迄今为止,人们仍无法精确地定量分析两种损耗方式对微波品质因数的贡献。由于分子中每个振动能级都含有若干个转动分能级,当分子中的原子吸收外界

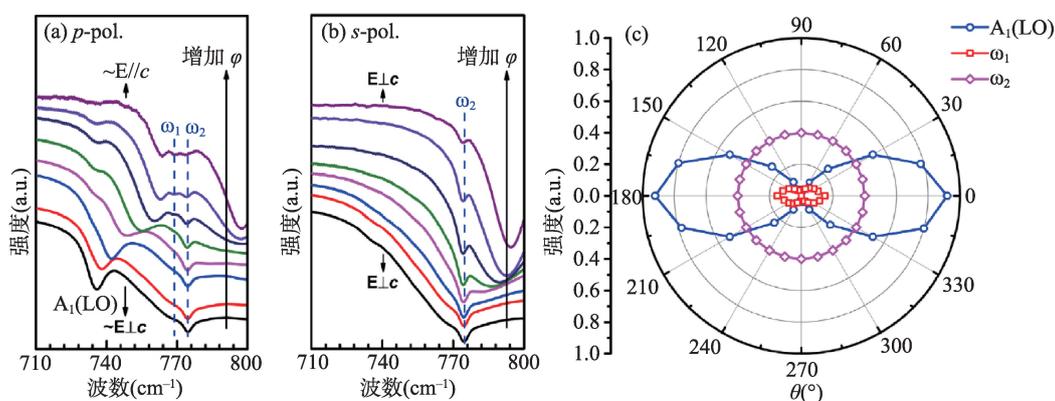


图5 不同偏振下的红外变入射角反射谱以及三种振动模式强度与偏振角度关系

能量而发生振动能级跃迁时,会伴随着转动能级的跃迁,因此,红外反射光谱可以有效地表征分子级别的振动对极化的贡献,分析本征振动模式对微波频段介电常数及介电损耗的贡献,成为研究微波介质介电常数及品质因数提供了强有力的工具。

利用合肥光源红外谱学和显微成像发展的远红外-近红外的宽波段反射谱测量技术,用户在微波介电陶瓷研究方面取得了一系列成果。针对不同掺杂的褐钇铋矿(LnNbO_4 系列),白钨矿结构(CaMoO_4 、 BiVO_4 等)系列微波介质陶瓷,通过研究红外声子模式分析出微波介质陶瓷内部的极化贡献,揭示结构与本征微波介电性能的影响,有助于陶瓷微波介电性能的改进与调控(图6)。相关结果在 *J. the European Ceramic Society*, *J. the American*

Ceramic Society 等陶瓷专业杂志上^[7-20]。

2.4 高分子功能材料

高分子晶体生长前端的分子图像一直扑朔迷离。为了解决高分子晶体生长前端是否存在预有序这一科学难题,中国科学技术大学李良彬课题组结合合肥光源常规显微红外成像、同步辐射偏振显微红外成像以及光学显微镜,原位检测全同聚 1-丙烯晶体与熔体的界面处的晶体生长过程。利用 X 射线微焦点衍射技术确认了球晶的边界与光学显微镜中的晶体边界一致。同时利用合肥同步辐射显微红外成像以及偏振纤维红外成像研究了晶体生长前端的结构演变过程(图 7)。研究结果表明在晶体生长前端有一个厚度为 30 微米的预有序层,存

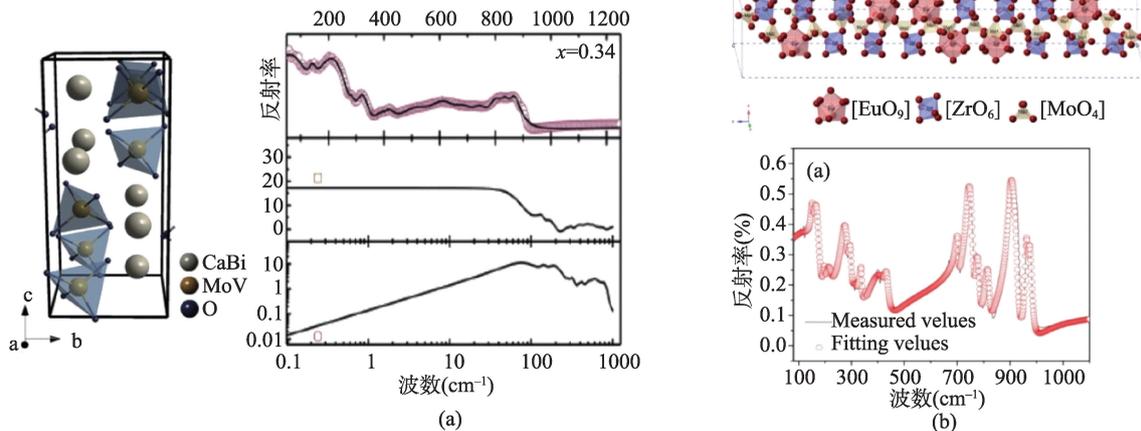


图6 $\text{Ca}_{1-x}\text{Bi}_x\text{Mo}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_4$ 和 $\text{Eu}_2\text{Zr}_5(\text{MoO}_4)_9$ 的远红外反射谱

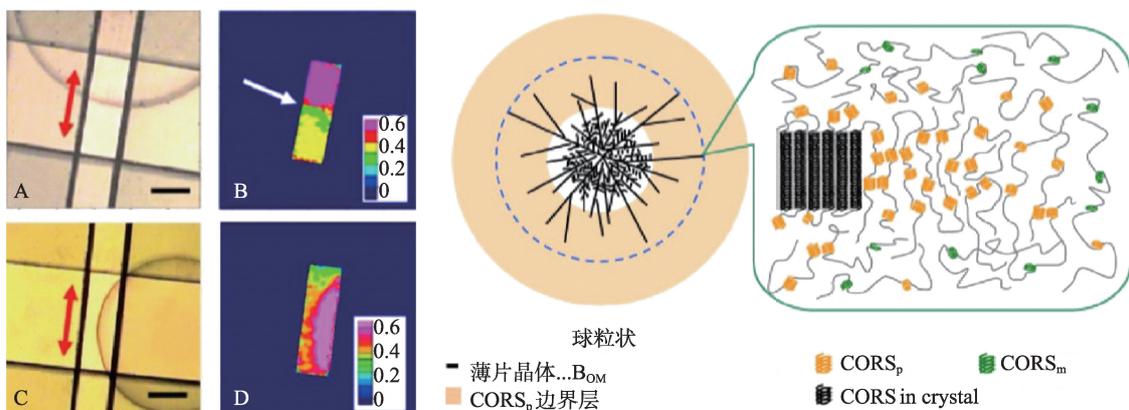


图7 红外成像原位跟踪聚丙烯球晶生长前端和相应的高分子生长前端模型图

在大量已经具有了部分分子内和分子间有序的有序预序结构,这进一步说明在结晶过程中分子链并非由无规状态直接参与晶体的形成。该研究成果对高分子结晶理论的完善具有重要的意义^②。

天然木材具有轻质高强的特点,如何制备具有该特点的材料是仿生材料研究领域面临的挑战。中国科学技术大学俞书宏教授团队发展了一种冰晶诱导自组装和热固化相结合的新技术,以传统的酚醛树脂或密胺树脂为基体材料,成功研制了一系列具有类似天然木材取向孔道结构的新型仿生人工木材。利用合肥光源软X射线CT成像对其微观结构进行表征,证实了其结构与天然木材的高度相似性。该系列仿生人工木材具有轻质高强、耐腐蚀和隔热防火等优点(图8)。研究成果发表于 *Science Advances* 上^②,并被 *Science* 科学新闻杂志(*Science News*)报道,及被 *Scientific American* 以“Artificial Wood”为题选为亮点工作。

机械强度和电导率是石墨烯基纤维能否在柔性微电子器件领域应用的至关重要的两个参数,而如何有效地同步提高两者的性能仍是目前面临的一个重大的挑战。受天然珍珠母多级尺度结构启发,中国科学技术大学俞书宏教授和合肥工业大学从怀萍教授组成的研究团队合作,原位引入聚多巴

胺衍生碳作为阻力增强剂、粘结剂与导电“桥梁”,获得了兼具高强度、高导电性的石墨烯基仿贝壳纤维。利用合肥光源软X射线CT成像,对其结构进行了成像表征,确认了其类珍珠母的多级次结构特征,并以此为基础分析了两个参数同步提升的内在机制。相关成果发表在 *Adv. Mater* 上^②。

3. 总结与展望

自运行开放以来,合肥光源发挥其在低能量区域的优势,发展了具有特色的实验线站和实验技术,接待了国内外大批实验用户,在功能材料研究领域产生了众多具有影响力的科学研究成果,极大地促进了我国功能材料的前沿研究和新型功能材料的开发利用。目前合肥光源各个实验线站在现有基础上,正在进一步提升线站性能,包括发展更多的原位测试手段和在线实验装置,从而满足更多用户的科研需求。此外新一代的合肥先进光源装置(Hefei Advanced Light Facility, HALF)即将完成预研,待“十四五”国家发展规划立项后进入建设阶段。新合肥光源的建设将极大提升同步辐射装置在在功能材料研究领域的能力,为我国功能材料科学研究跻身世界前列提供强大的平台支撑。

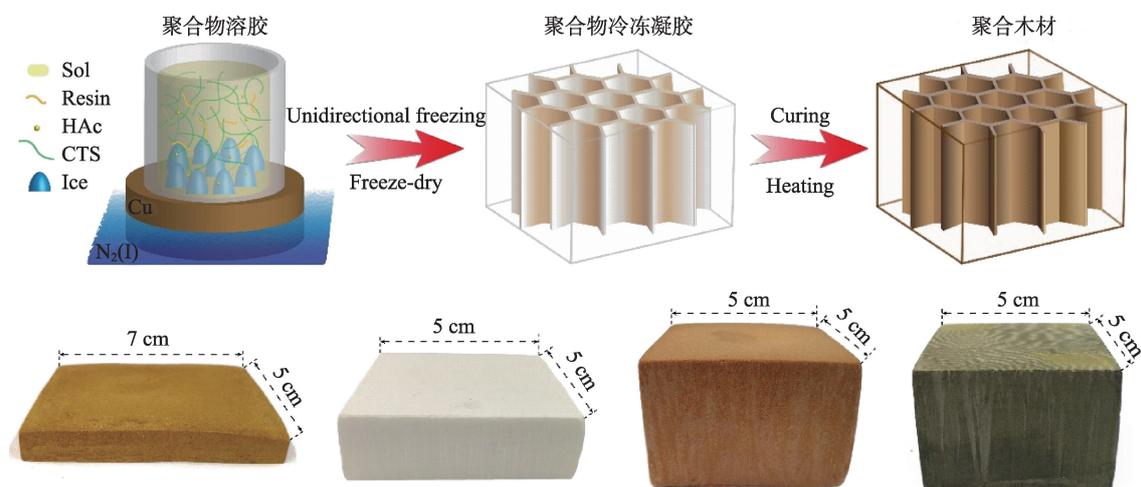


图8 仿生人工木材的制备过程与制备的多种人工木材

参考文献

- ① Bzdušek, T.; Wu, Q.; Rüegg, A.; Sigrist, M.; Soluyanov, A. A. Nodal-Chain Metals. *Nature* 2016, 538 (7623), 75-78.
- ② Quan, Y.; Yin, Z. P.; Pickett, W. E. Single Nodal Loop of Accidental Degeneracies in Minimal Symmetry: Triclinic CaAs₃. *Phys. Rev. Lett.* 2017, 118 (17), 176402.
- ③ Xu, Q.; Yu, R.; Fang, Z.; Dai, X.; Weng, H. Topological Nodal Line Semimetals in the CaP₃ Family of Materials. *Phys. Rev. B* 2017, 95 (4), 045136.
- ④ An, L.; Zhu, X.; Gao, W.; Wu, M.; Ning, W.; Tian, M. Chiral Anomaly and Nontrivial Berry Phase in the Topological Nodal-Line Semimetal SrAs₃. *Phys. Rev. B* 2019, 99 (4), 045143.
- ⑤ Li, S.; Guo, Z.; Fu, D.; Pan, X.-C.; Wang, J.; Ran, K.; Bao, S.; Ma, Z.; Cai, Z.; Wang, R.; Yu, R.; Sun, J.; Song, F.; Wen, J. Evidence for a Dirac Nodal-Line Semimetal in SrAs₃. *Sci. Bull.* 2018, 63 (9), 535-541.
- ⑥ Song, Y. K.; Wang, G. W.; Li, S. C.; Liu, W. L.; Lu, X. L.; Liu, Z. T.; Li, Z. J.; Wen, J. S.; Yin, Z. P.; Liu, Z. H.; Shen, D. W. Photoemission Spectroscopic Evidence for the Dirac Nodal Line in the Monoclinic Semimetal SrAs₃. *Phys. Rev. Lett.* 2020, 124 (5), 056402.
- ⑦ Miao, L.; Wang, Z. F.; Ming, W.; Yao, M.-Y.; Wang, M.; Yang, F.; Song, Y. R.; Zhu, F.; Fedorov, A. V.; Sun, Z.; Gao, C. L.; Liu, C.; Xue, Q.-K.; Liu, C.-X.; Liu, F.; Qian, D.; Jia, J.-F. Quasiparticle Dynamics in Reshaped Helical Dirac Cone of Topological Insulators. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2013, 110 (8), 2758-2762.
- ⑧ Deng, K.; Wan, G.; Deng, P.; Zhang, K.; Ding, S.; Wang, E.; Yan, M.; Huang, H.; Zhang, H.; Xu, Z.; Denlinger, J.; Fedorov, A.; Yang, H.; Duan, W.; Yao, H.; Wu, Y.; Fan, S.; Zhang, H.; Chen, X.; Zhou, S. Experimental Observation of Topological Fermi Arcs in Type-II Weyl Semimetal MoTe₂. *Nat. Phys.* 2016, 12 (12), 1105-1110.
- ⑨ Yan, M.; Huang, H.; Zhang, K.; Wang, E.; Yao, W.; Deng, K.; Wan, G.; Zhang, H.; Arita, M.; Yang, H.; Sun, Z.; Yao, H.; Wu, Y.; Fan, S.; Duan, W.; Zhou, S. Lorentz-Violating Type-II Dirac Fermions in Transition Metal Dichalcogenide PtTe₂. *Nat. Commun.* 2017, 8 (1), 257.
- ⑩ Zhou, Y.; Miao, L.; Wang, P.; Zhu, F. F.; Jiang, W. X.; Jiang, S. W.; Zhang, Y.; Lei, B.; Chen, X. H.; Ding, H. F.; Zheng, H.; Zhang, W. T.; Jia, J.; Qian, D.; Wu, D. Antiferromagnetic Order in Epitaxial FeSe Films on SrTiO₃. *Phys. Rev. Lett.* 2018, 120 (9), 097001.
- ⑪ Chen, Q. Y.; Xu, D. F.; Niu, X. H.; Peng, R.; Xu, H. C.; Wen, C. H. P.; Liu, X.; Shu, L.; Tan, S. Y.; Lai, X. C.; Zhang, Y. J.; Lee, H.; Strocov, V. N.; Bisti, F.; Dudin, P.; Zhu, J.-X.; Yuan, H. Q.; Kirchner, S.; Feng, D. L. Band Dependent Interlayer f-Electron Hybridization in CeRhIn₅. *Phys. Rev. Lett.* 2018, 120 (6), 066403.
- ⑫ Chen, Y.; Wang, Z.; Chen, S.; Ren, H.; Wang, L.; Zhang, G.; Lu, Y.; Jiang, J.; Zou, C.; Luo, Y. Non-Catalytic Hydrogenation of VO₂ in Acid Solution. *Nat. Commun.* 2018, 9 (1), 818.
- ⑬ Ge, C.; Liu, C.; Zhou, Q.; Zhang, Q.; Du, J.; Li, J.; Wang, C.; Gu, L.; Yang, G.; Jin, K. A Ferrite Synaptic Transistor with Topotactic Transformation. *Adv. Mater.* 2019, 31 (19), 1900379.
- ⑭ Meng, D.; Guo, H.; Cui, Z.; Ma, C.; Zhao, J.; Lu, J.; Xu, H.; Wang, Z.; Hu, X.; Fu, Z.; Peng, R.; Guo, J.; Zhai, X.; Brown, G. J.; Knize, R.; Lu, Y. Strain-Induced High-Temperature Perovskite Ferromagnetic Insulator. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2018, 115 (12), 2873-2877.
- ⑮ Zhou, G.; Song, C.; Bai, Y.; Quan, Z.; Jiang, F.; Liu, W.; Xu, Y.; Dhesi, S. S.; Xu, X. Robust Interfacial Exchange Bias and Metal-Insulator Transition Influenced by the LaNiO₃ Layer Thickness in La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃/LaNiO₃ Superlattices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9 (3), 3156-3160.
- ⑯ Wu, S.; Yang, X.; Zhang, H.; Shi, L.; Zhang, Q.; Shang, Q.; Qi, Z.; Xu, Y.; Zhang, J.; Tang, N.; Wang, X.; Ge, W.; Xu, K.; Shen, B. Unambiguous Identification of Carbon Location on the N Site in Semi-Insulating GaN. *Phys. Rev. Lett.* 2018, 121 (14), 145505.
- ⑰ Hao, S.-Z.; Zhou, D.; Pang, L.-X. The Spectra Analysis and Microwave Dielectric Properties of [Ca_{0.55}(Sm_{1-x}Bix)_{0.3}]MoO₄ Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 2019, 102 (6), 3103-3109.
- ⑱ Zhang, Y.; Wu, H. Crystal Structure and Microwave Dielectric Properties of La₂(Zr_{1-x}Tix)₃(MoO₄)₉ (0 ≤ x ≤ 0.1) Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 2019, 102 (7), 4092-4102.
- ⑲ Xiao, K.; Tang, Y.; Tian, Y.; Li, C.; Duan, L.; Fang, L. Enhancement of the Cation Order and the Microwave Dielectric Properties of Li₂ZnTi₃O₈ through Composition Modulation. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2019, 39 (10), 3064-3069.
- ⑳ Guo, H.-H.; Zhou, D.; Pang, L.-X.; Qi, Z.-M. Microwave Dielectric Properties of Low Firing Temperature Stable Scheelite Structured (Ca,Bi)(Mo,V)O₄ Solid Solution Ceramics for LTCC Applications. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2019, 39 (7), 2365-2373.
- ㉑ Cong, Y.; Hong, Z.; Zhou, W.; Chen, W.; Su, F.; Li, H.; Li, X.; Yang, K.; Yu, X.; Qi, Z.; Li, L. Conformational Ordering on the Growth Front of Isotactic Polypropylene Spherulite. *Macromolecules* 2012, 45 (21), 8674-8680.
- ㉒ Yu, Z.-L.; Yang, N.; Zhou, L.-C.; Ma, Z.-Y.; Zhu, Y.-B.; Lu, Y.-Y.; Qin, B.; Xing, W.-Y.; Ma, T.; Li, S.-C.; Gao, H.-L.; Wu, H.-A.; Yu, S.-H. Bioinspired Polymeric Woods. *Sci. Adv.* 2018, 4 (8), eaat7223.
- ㉓ Ma, T.; Gao, H.-L.; Cong, H.-P.; Yao, H.-B.; Wu, L.; Yu, Z.-Y.; Chen, S.-M.; Yu, S.-H. A Bioinspired Interface Design for Improving the Strength and Electrical Conductivity of Graphene-Based Fibers. *Adv. Mater.* 2018, 30 (15), 1706435.