

专题: 关联电子材料与散射谱学

合肥先进光源: 赋能关联电子系统研究

孙喆[†] 沈大伟 罗震林 闫文盛

(中国科学技术大学, 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

(2024 年 7 月 8 日收到; 2024 年 8 月 13 日收到修改稿)

合肥先进光源是一个第四代衍射极限储存环光源, 计划于 2028 年投入运行, 凭借其高亮度和高相干性 X 射线, 将突破当前 X 射线技术研究关联电子系统所面临的时空分辨率瓶颈, 为理解这些材料中新奇物性的本质和微观起源提供关键信息. 本文介绍了合肥先进光源的主要科学目标和技术优势, 重点阐述了角分辨光电子能谱、磁圆二色、相干 X 射线散射和相干 X 射线成像等核心技术在量子材料和关联电子系统研究中的应用前景. 这些技术将能精细解析电子/自旋/轨道态的分布和动力学过程, 揭示各种新奇量子现象, 以及关联电子体系中各种序参量的涨落. 合肥先进光源的建成将为解码复杂量子态和非平衡演化行为提供先进的技术支持, 最终推动量子材料和关联电子系统在能源、信息等前沿领域的应用.

关键词: X 射线谱学, 相干 X 射线散射, 相干 X 射线成像, 关联电子系统

PACS: 07.85.Qe, 61.05.C-, 07.85.Tt, 71.27.+a

DOI: 10.7498/aps.73.20240943

CSTR: 32037.14.aps.73.20240943

1 引言

同步辐射是一种独特的电磁辐射, 由接近光速运动的带电粒子 (通常是电子) 在强磁场作用下被迫偏转时产生^[1,2]. 在同步辐射光源中, 电磁辐射覆盖了从红外到 X 射线的宽广波长范围, 并沿着电子束偏转的切线方向形成高度准直的强光束. 基于同步辐射与物质的相互作用后产生的电子或光子信号, 同步辐射装置发展出众多的谱学、散射和成像实验技术, 利用光子研究各种环境中的物质的微观结构、电子态、化学成分等, 为物理、化学、材料科学等领域的前沿研究提供有力支持. 由于加速器物理和技术的进步, 同步辐射的亮度已经提高了许多数量级. 与此同时, 利用同步辐射研究物质的新方法也不断发展, 从而产生了在实空间、倒易空间、能量、动量和时间尺度上表征物质属性的新技术, 使人们对物质世界的精细探测和分析能力得到

迅速进展. 这种进步不仅仅是渐进式的, 在某些情况下具有革命性的创新.

同步辐射实验能力的进步需要在空间、时间和能量分辨等关键参数的提升方面依赖于 X 射线的亮度和相干性指标. 正在全球范围内发生的第四代加速器性能变革得益于多弯铁消色散结构的应用, 各个建设或升级的储存环光源能够使水平电子发射度降低 1—2 个数量级. 这种加速器技术的变革实现了显著的光子亮度和相干性增益, 将光子发射度进一步降低至光的衍射极限——“辐射波长/ 4π ”, 使得同步辐射装置的各个实验站可以获得高度相干的 X 射线和更小的聚焦光斑, 推进了探测微观物质结构的时空分辨极限, 促进了 X 射线科学的跨越式进展^[3,4].

合肥先进光源 (HALF) 是一个第四代衍射极限储存环光源, 计划于 2028 年投入运行, 专注于从红外到硬 X 射线的能量范围. 与国际上在建和升级的四代光源相比, HALF 侧重在低能区范围的

[†] 通信作者. E-mail: zsun@ustc.edu.cn

真空紫外和软 X 射线的实验技术, 在解析电子态、磁性和化学价态等方面具有突出的优势, 将使其更适宜于研究量子材料和关联电子系统. 与同样侧重低能区实验技术的美国 Advanced Light Source 升级光源 (ALS-U) 相比, HALF 的亮度约高 15%, 高亮度直线节数量达到 35 个, 数倍于 ALS-U 的供光能力. HALF 的一期项目包括新建 10 条光束线, 其中 2 条光束线工作在真空紫外范围、6 条在软 X 射线范围、2 条在硬 X 射线范围. 这些束线配备了多种类型的实验站, 将为用户提供先进的谱学、成像和散射技术, 包括光电离质谱、角分辨光电子能谱、X 射线磁圆二色谱、光电子发射显微镜、近常压光电子能谱、共振 X 射线散射、相干 X 射线成像、X 射线吸收谱、X 射线发射谱、小角和广角 X 射线散射、X 射线光电子能谱等. 凭借高相干性和显著提升的空间、时间分辨率, 众多类型的 X 射线实验技术将拓展探索复杂非均匀体系、非平衡或工况状态下动态过程的能力.

关联电子系统由于电荷、自旋、轨道和晶格自由度之间的微妙耦合, 常常表现出极富变化的相图和复杂的不均匀性, 并产生多种多样的奇异物性, 如高温超导、庞磁阻、量子相变、金属绝缘相变、重费米子等. 这些体系中存在的相分离、相渗流等纳米尺度异质结构, 对宏观性质如电阻率、磁性、铁电等产生决定性影响. 当前 X 射线技术研究这些现象所面临的主要瓶颈在于缺乏足够的时空分辨率, 无法精细刻画相变过程、微结构和空间异质电子结构的微观细节.

HALF 极大提高了相干 X 射线通量, 为研究关联电子系统提供了全新的机遇. 利用相干衍射成像技术, HALF 能够揭示相变过程中相分离、渗流等细节, 深入洞察宏观输运性质的微观起源. X 射线光子相关谱可在时间域内探测快速动力学过程, 能够测量关联电子体系中各种序参量的涨落, 包括电荷序、自旋序、磁畴等, 研究其平衡态或非平衡态的动力学. 借助光源的高亮度和低发散度的优势, HALF 的谱学技术易于实现微米级甚至百纳米级的空间分辨, 有望在实空间直接映射出复杂不均匀性系统中微观尺度上发生的变化, 深入解析相分离、应力、量子限域、化学掺杂等因素对电子态、磁性、各种元激发的影响. 接下来, 本文将介绍 HALF 的实验技术在量子材料和关联电子系统研究中的应用.

2 角分辨光电子能谱

角分辨光电子能谱 (angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES) 作为一种具有动量分辨的实验技术, 在凝聚态物理领域, 特别是关联电子系统研究中扮演着不可或缺的角色^[5]. 它能够直接测量晶体材料的能带色散, 精确表征电子结构的多方面细节特征, 如电子态密度、费米面、能隙、电子-电子/电子-声子相互作用等, 为我们理解超导、重费米子、电荷/自旋密度波等奇异量子现象提供关键的实验数据. 然而, 随着人们对关联电子系统研究的不断深入、对新材料体系的不断探索, 传统 ARPES 技术在能量分辨率、空间分辨率和功能性方面显示出局限性.

在关联电子材料如铜基超导体、铁基超导体、多种过渡金属氧化物体系中, 基于成分、载流子浓度、应力等因素引起的电荷、自旋、轨道自发有序态常常表现出明显的空间分离行为, 导致出现纳米尺度的电荷/自旋条纹、电子相分离和电子液晶行为等丰富现象. 传统 ARPES 技术由于受到能量分辨率 (典型 ~ 5 meV) 和空间分辨率 (20—50 μm) 的限制, 难以精细刻画关联电子系统中微小的电子态变化和复杂的不均匀性. 第四代衍射极限光源 HALF 的出现突破了这一瓶颈, 利用其极高的亮度和相干性, 采用 Kirkpatrick-Baez (KB) 镜对入射 X 射线束进行二次聚焦可将光斑缩小至微米级, 随着 KB 镜加工技术的发展, 未来有望实现百纳米级光斑. 这使得 ARPES 线站能够在更高的能量分辨率和空间分辨率下运行, 同时保持足够的信号强度, 这将为揭示量子材料中复杂电子行为的本质提供新的机遇.

合肥先进光源将在真空紫外 (VUV) 和软 X 射线区域分别建立一条 ARPES 光束线. 在 VUV 光束线中, ARPES 将实现 1 meV 的能量分辨率和 3 μm 的空间分辨率. 在软 X 射线光束线中, 纳米 ARPES 终端站将使用波带片聚焦实现 100 nm 的空间分辨率, 常规软 X 射线 ARPES 终端站将达到 3 μm 的空间分辨率. 与全球类似设施相比, 这些技术指标带来了几个优势. 以超导为例, 关键症结在于电荷、自旋、轨道和晶格自由度之间的耦合. 基于 ARPES 测量, 研究者们观察到了能隙对称性、kink 行为、准粒子有效质量和散射率非平庸变

化等一系列现象,但由于分辨率的限制,仍然存在丰富的细节变化需要精确捕捉. HALF 的 ARPES 线站的高能量分辨率和高空间分辨率将使我们能够在非均质的材料中精确定位在某个均质区域内^[6-9], 测量出电子结构的细节特征,如超导能隙的大小、对称性和各向异性,并呈现出由于掺杂、应力、温度等引起的相关参数的空间变化,进而揭示这些局域效应如何影响超导相变和临界行为.同时,由于能量和动量是典型的 ARPES 数据的两个维度,能量分辨率的提升也能够直接提高实验数据的动量分辨率.这些技术进步对确定超导微观机制至关重要.由于 HALF 的同步辐射具有优异的相干性,ARPES 可以与相干 X 射线衍射进行深度集成,实现对样品的多模态协同表征,获得更丰富的空间和时间尺度上的信息.

HALF 的 ARPES 线站还将配置自旋探测器,实现自旋分辨 ARPES (spin-ARPES) 能力.自旋是凝聚态物理中一个至关重要的自由度,在诸多量子材料中扮演着核心作用,测量和解析材料中电子的自旋态对于深刻认识和调控量子关联行为至关重要. Spin-ARPES 与具有更高空间分辨率的聚焦光斑相结合,能够精准对单一磁畴进行探测,更准确地测量材料的磁畴结构,尤其有利于微纳尺度材料的电子结构和磁性性质研究.

值得一提的是,ARPES 作为一种独特的电子结构表征技术,在量子材料与器件的设计-制备-表征范式中扮演着关键角色.理论计算为探索新材料和新现象提供指引,而 ARPES 则在实验层面直接反映出电子的行为,两者相互印证、相辅相成. HALF 的 ARPES 线站还将配备多种原位样品制备和调控手段,能够在线制备或处理样品与原型器件,实现应力、门电压、梯度成分等的原位和工况测量.这种集成化设计将材料的本征电子结构与宏观功能性质直接联系,为理论计算提供反馈并指导器件性能优化.

3 高灵敏时间空间分辨磁性材料表征

磁性是凝聚态物质中一种重要的性质,与材料的电子结构和晶体结构密切相关.近年来,随着对关联电子系统和量子材料研究的不断深入,研究者们越来越认识到磁性在这些体系中扮演着至关重要的角色.然而,由于关联电子系统和量子材料往

往具有复杂的磁性结构和动态行为,传统的磁性测量方法难以满足研究需求.宏观探针对材料性质的测量结果通常是整体平均值,无法直接获取关于磁性和微观结构不均匀性的关键信息.而这种本质上的磁性和结构的不均匀性,正是理解关联电子系统和量子材料内在物理机制的关键所在.因此,发展高空间分辨、高时间分辨、高灵敏的磁性研究技术对于理解这些体系的磁性本质至关重要. HALF 光源中将建设一条为磁性材料提供先进的磁性测量能力的线站.它将包括 X 射线磁圆二色性 (X-ray magnetic circular dichroism, XMCD)、铁磁共振 (ferromagnetic resonance, FMR) 和光电子发射显微镜 (photoemission electron microscopy, PEEM) 等磁性探测技术,配备可调控的温度和磁场环境,使我们能够从磁性的角度对关联电子系统的电荷、自旋、轨道和结构进行多模态的研究.

XMCD 利用 X 射线与磁性材料的相互作用,从具有不同 X 射线偏振或磁场方向的吸收谱的微小差异中获取材料的磁性信息^[10,11]. XMCD 能够同时测量元素的价态和磁矩信息,具有元素选择性.与传统的磁测量技术相比, XMCD 不仅可以获取总的平均磁矩信号,更可借助同步辐射源的高亮度和极化功能,对局域磁矩和各向异性进行高灵敏度探测. HALF 的 XMCD 实验站配置 9 T+2 T 的原位磁场和 4 K 低温环境,其独特之处在于利用两个分别产生左旋和右旋圆偏振 X 射线的波荡器作为光源 (图 1(a)). 如图 1(c) 所示,光束线将两束光子能量一致的 X 射线聚焦到样品上同一个点 ($200\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$),在光路中使用斩波器进行左右旋圆偏振的高速切换,结合锁相放大技术,可以将对微弱磁性的检测灵敏度提高两个量级.这将使我们能够首次观测到一些极弱的磁性,如表面/界面处的缺陷磁矩,或探测在非磁性基质中的纳米磁性簇.与此同时,针对不同探测深度,该实验站配置了体相敏感的荧光探测模式、表面敏感的全电子产额探测模式,以及极表面敏感的部分电子产额探测模式.

FMR 是一种利用微波激发磁性材料内的自旋进动,检测其吸收谱信号来研究磁性动力学行为的手段^[12,13].它具有极高的时间分辨率,可用于观测快速的自旋驰豫和自旋波传播等动态过程.该技术依赖于同步辐射储存环的运行模式,以及微波激发与同步辐射 X 光脉冲的同步水平,理论上可以达

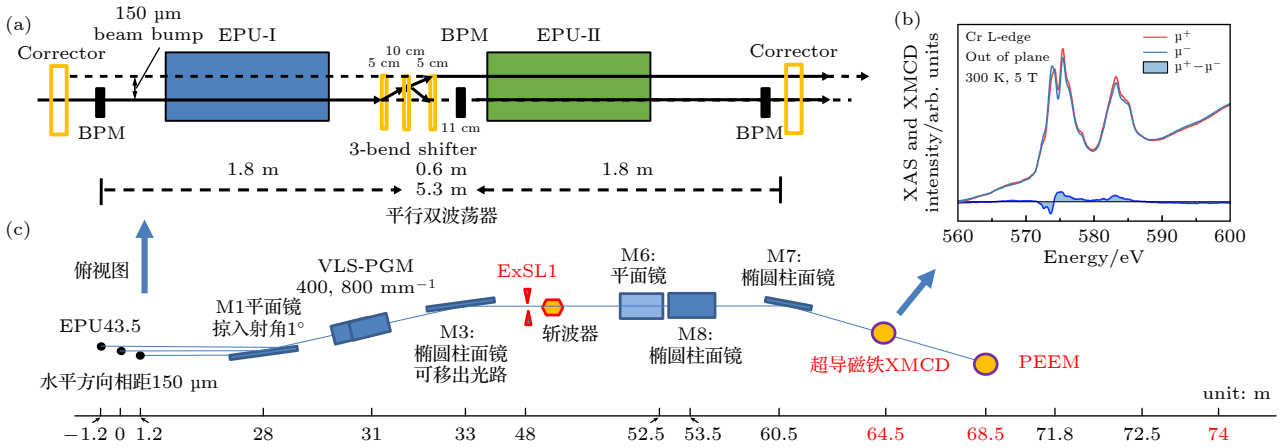


图 1 合肥先进光源 XMCD 线站配置 (a) 双波荡器光源示意图; (b) XMCD 谱; (c) 双光路设计的俯视图

Fig. 1. Configuration of the XMCD beamline at the Hefei Advanced Light Source: (a) Schematic diagram of the twin undulator sources; (b) XMCD spectrum; (c) top view of the dual beam path design.

到 10 ps 的时间分辨率; 同时, 该实验技术对信噪比有极高的要求, 需要能够分辨出 10 ps 甚至更高的自旋进动的变化. 在关联电子系统中, 自旋弛豫过程往往与电子之间的相互作用密切相关, 例如自旋-轨道耦合、自旋-晶格耦合等. 高时间分辨的 FMR 技术能够精确测量自旋弛豫时间, 从而帮助我们理解这些相互作用如何影响自旋动力学过程. FMR 实验站还配置有一个八极矢量电磁铁系统, 可产生高质量、可精细调控的三维任意方向 0.8 T 矢量磁场, 为模拟和调控磁性材料在复杂外场环境下的行为提供了有利条件.

PEEM 是用 X 射线照射样品表面产生光电子, 再用静电透镜成像, 从而研究材料表面和近表面区域的性质^[14]. PEEM 的空间分辨率约为 20 nm, 不仅能直接观测磁畴结构和自旋纹理的实空间分布, 更可以结合 X 射线脉冲的时间结构, 实现高时间分辨的磁畴/自旋动力学成像. 针对关联电子系统和量子材料研究的特点, HALF 的 PEEM 实验站的最低温度可以低于 20 K, 满足相当数量的关联电子体系的研究需求.

4 相干 X 射线散射

随着 X 射线相干性的大幅度提升, 相干 X 射线散射的优势变得越发显著, 它可以深入观测量子材料、能源材料、生物大分子等复杂凝聚态系统的微观结构和动力学行为. 凭借其极高的时空分辨率、元素选择性、无损伤探测等独特优势, 这项技术已在材料科学、生命科学等诸多领域展现出巨大

的应用价值. 在量子材料和关联电子体系的研究中, 相干 X 射线散射技术可以提供丰富的多尺度时间和空间信息, 我们可以直接观测到这些材料中电荷密度波等量子态在实空间的分布情况和时间尺度上的动态涨落行为.

一般来说, 非相干光照射到非周期性结构上会产生弥散的衍射光强分布, 无法对结构进行细致分析. 然而, 相干 X 射线照射在无序体系上将产生一种具有斑点状分布的散射图样, 被称为“散斑”. 这些散斑的强度分布和时空演化与样品的微观结构及其动力学密切相关^[15]. 散斑的空间分布与材料的微观结构相对应, 可以用于解析非周期结构, 并分析电子的密度分布、自旋与轨道的取向等. 图 2 展示了 LSAT 衬底上的 PrNiO₃ 薄膜中的反铁磁畴的共振相干 X 射线衍射图案, 反映了在反铁磁相变阶段, 反铁磁畴的稀疏分布和大小随着温度的演化规律^[16].

另一方面, 利用 X 射线光子相关谱 (X-ray photon correlation spectroscopy, XPCS) 技术对散斑图案进行时间相关分析, 我们能获取样品内部各种尺度结构的动态信息^[17]. XPCS 技术的核心是测量散斑图案随时间的强度变化, 并计算不同时间延迟下散斑强度的相关函数. 该相关函数的形状和衰减速率能反映出样品内部各种结构动力学的特征时间尺度和行为模式. 利用这一技术, 我们可以追踪量子材料中的电子/自旋/晶格相关运动, 直接观测到诸如电荷/自旋密度波、电荷有序/无序转变等奇特量子现象^[18-20].

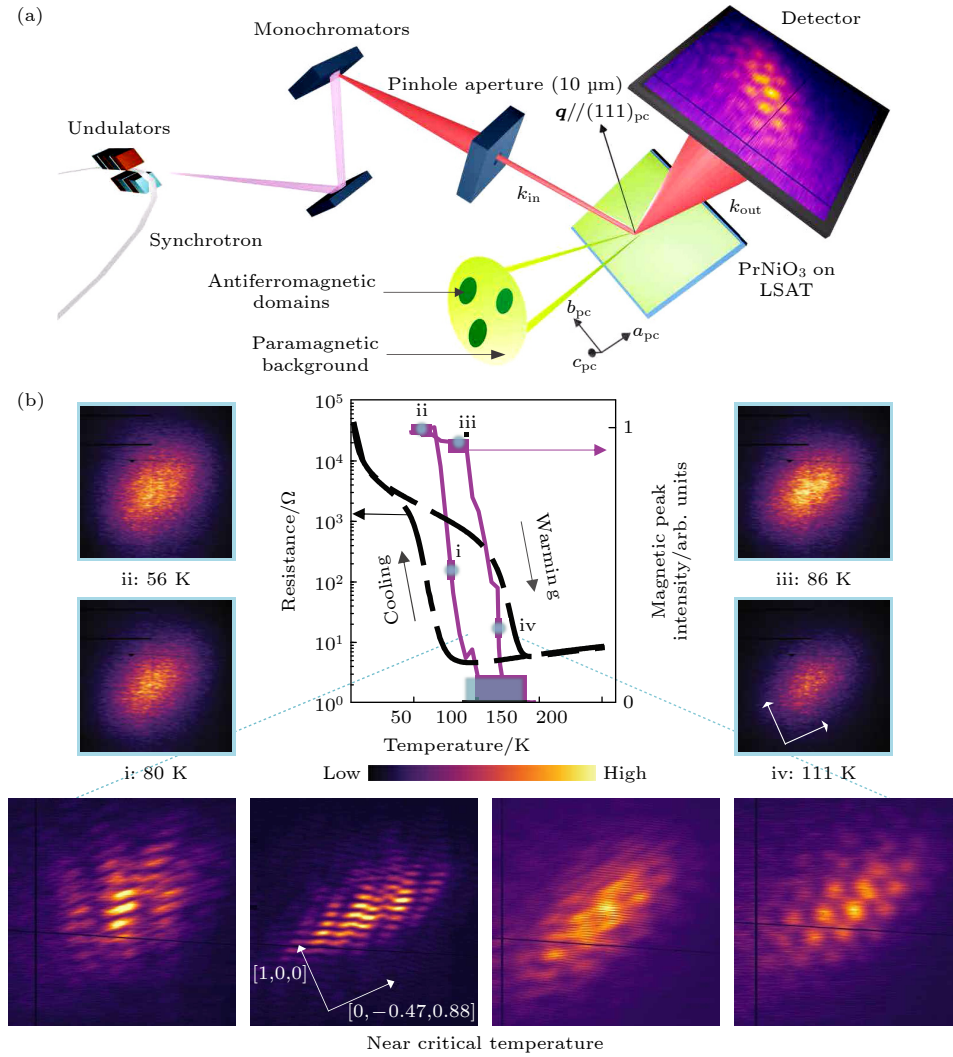


图 2 相干 X 射线散射实验设置 (a) 和反铁磁衍射图案的演化 (b) (得到文献 [16] 的授权重印, 版权归 ©2022 美国科学促进会所有)

Fig. 2. Coherent X-ray scattering experimental setup (a) and evolution of antiferromagnetic diffraction patterns (b) (Reproduced with permission of Ref. [16], Copyright of ©2022 The American Association for the Advancement of Science).

在第三代同步辐射光源上, 相干 X 射线散射技术已取得了一定的应用. 但由于光源相干性有限, XPCS 等技术在时间分辨率、信噪比和探测极限等方面都受到了一定的限制, 难以对一些快速动力学过程和微弱信号作深入研究. 随着新一代衍射极限储存环光源 HALF 的建成, 相干 X 射线散射的技术能力也将获得全方位的提升. 首先, HALF 光源极高的亮度意味着更高的相干 X 射线通量, 使得 XPCS 等技术的时间分辨率可以提高 4—5 个数量级, 从目前的微秒量级提升至几纳秒量级, 有望捕捉量子材料中一些快速的相变和关联电子动力学过程. 其次, HALF 的量子材料散射实验站将提供 5 T 磁场和液氦低温环境, 这将有力推动对各种磁性相关量子态 (如斯格明子、自旋密度波) 的

深入研究. 此外, HALF 的低发射度和小光斑尺寸也将显著提高散射信号的信噪比, 特别是对于探测非常规晶体结构或无序样品数据尤为关键. 相干 X 射线散射还能够与 X 射线吸收谱、光电子能谱等多种谱学技术相结合, 同时获取能量、空间、时间等多维度的信息.

除了关联电子系统, 相干 X 射线散射技术在材料和生命科学领域也可以大显身手 [19,21]. 在软凝聚态物理研究中, 这项技术被广泛应用于研究高分子材料、胶体等无定形系统的行为, 助力开发新型柔性功能材料. 相干 X 射线散射技术还可为生物医学研究提供全新视角, 追踪蛋白质折叠、生物大分子运动等行为. 在地质学和材料科学的交叉领域, 结合成像和谱学, 相干 X 射线散射技术可探索

矿物的溶解/沉淀行为及其与环境的相互作用。

5 相干 X 射线成像

成像技术是利用同步辐射光源研究物质科学的重要手段, 第四代光源的高亮度和低发射度将极

大地提升成像技术的能力. 相干 X 射线衍射成像是当代成像技术的一个重要变革. 传统的扫描透射 X 射线显微镜和全场透射 X 射线显微镜存在分辨率瓶颈, 而相干衍射成像方法则完全颠覆了这一格局, 它突破了传统 X 射线成像仪器的分辨率瓶颈, 可以实现纳米级的高分辨率成像. 该技术利用

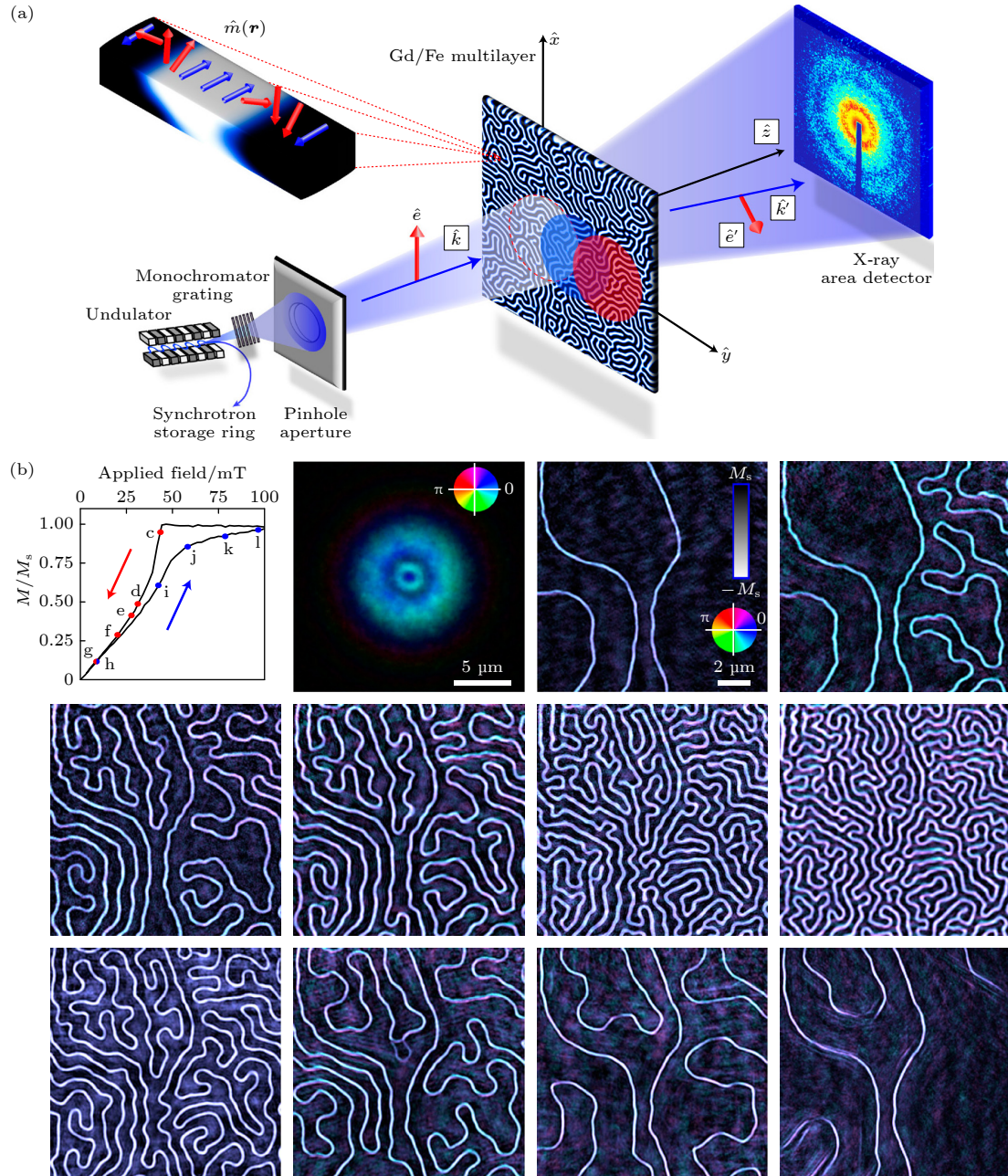


图 3 相干衍射成像技术对多层 Gd/Fe 薄膜中的铁磁畴的成像和原位磁场调控研究 (a) X 射线扫描相干 X 射线成像测量的示意图, 对比度主要来自 X 射线磁圆二色性 (XMCD) 效应, 在远场用 X 射线面探测器记录衍射图案; (b) 样品磁化强度随外加磁场变化时, 重建图像中 Gd 的磁构型演化 (得到文献 [25] 的授权重印, 版权归©2011 美国国家科学院所有)

Fig. 3. Coherent diffraction imaging of ferromagnetic domains in multilayer Gd/Fe thin films and their *in-situ* magnetic field manipulation study: (a) Schematic diagram of X-ray scanning coherent X-ray imaging measurement, where the contrast primarily arises from the XMCD effect, and diffraction patterns are recorded in the far-field using an X-ray area detector; (b) evolution of the Gd magnetic configuration in reconstructed images as the sample magnetization changes with the applied external magnetic field (Reproduced with permission of Ref. [25], Copyright of ©2011 National Academy of Sciences).

相干 X 射线束照射样品, 收集样品的远场衍射图样, 并利用相位恢复算法从衍射图样中重建出样品的相位信息, 最终得到样品的电子密度分布图像^[22-24]. 相干衍射成像的分辨率主要受限于相干 X 射线通量、波长和样品稳定性. 随着第四代同步辐射光源极大增强的相干 X 射线通量, 相干衍射成像技术展现出越来越广阔的应用前景, 尤其在研究量子材料和关联电子系统等量子效应显著的复杂体系中具有独特优势. 例如, 图 3 展示了利用与 Gd 元素的 M_5 吸收边匹配的光子能量, 从衍射图案中重建出 Gd/Fe 多层薄膜中的磁畴结构随外场调控的变化^[25].

量子材料和关联电子体系中存在丰富的相分离和畴结构等微纳尺度特征, 意味着宏观量子行为具有微妙的微观起源. 传统探测手段难以全面揭示这些量子态的本质和形成机制. HALF 的谱学技术虽然可以利用聚焦 X 射线获得一定的空间分辨率优势, 但是相干衍射成像技术凭借其优异的空间分辨率和元素选择性成像能力, 可以精细解析这些体系中复杂的化学成分、电子态和磁性分布, 厘清复杂相互作用和动力学行为, 为理解和调控关联电子系统及功能提供关键线索^[26,27].

软 X 射线相干衍射成像在研究拓扑磁性材料、铁电/铁磁多铁性材料以及强自旋轨道耦合体系等方面具有独特优势. 软 X 射线能区可以激发材料的内壳层电子, 根据其能量特征获得元素选择性的信息. HALF 的软 X 射线成像线站配置了椭圆偏振波荡器作为光源, 可以产生线偏振和圆偏振. 利用软 X 射线磁圆二色性和线二色性效应, 相干衍射成像可以高分辨地映射磁矩取向、畴结构、拓扑缺陷及其动态行为, 例如手性涡旋和磁畴壁运动, 为理解调控这些新型量子态的机理提供关键实验数据^[28]. 软 X 射线虽然对元素非常敏感, 但是存在穿透能力不足的问题. 为了弥补这方面的不足, HALF 还布局了一条硬 X 射线相干衍射成像线站, 能量范围为 2.1—10 keV, 在保证穿透性的同时, 还能够对 Fe\Co\Ni\Cu 等元素保持足够的敏感性.

不仅如此, 相干衍射成像还可实现三维成像, 从而揭示关联电子系统和量子材料的复杂三维几何结构和化学形貌. 对于调控一些非均质电子系统而言, 掌握它们的三维结构至关重要, 相干衍射成像的 3D 成像能力恰巧可以满足这方面的需求. 原位调控是研究材料性质和功能的关键手段, 可以实

时观察材料在不同环境条件下的结构和性质变化. 在量子材料研究中, 原位调控可以用来研究材料在不同温度、磁场、电场等条件下的相变、畴结构演变、拓扑缺陷形成等过程. 例如, 利用原位温度调控, 可以观察铁磁材料在不同温度下的磁畴结构演变, 利用原位电场调控, 可以研究材料在不同电场下的电荷分布、材料的电致相变过程. 相干衍射成像技术与原位调控手段的结合, 可以实现对材料的实时、动态、高分辨成像, 为理解材料的结构-性质关系和功能机制提供新的视角^[29].

总的来说, 软 X 射线和硬 X 射线相干衍射成像线站将成为当今量子物质研究的利器, 极大拓宽我们探索量子调控的视野. 凭借超高空间分辨率、元素及化学价态识别、快时间分辨和三维成像等优势, 必将助力于揭示关联电子系统和量子材料种种奥秘, 深化我们对量子调控机理的认识.

6 结 论

HALF 衍射极限储存环将作为全球一流的第四代同步辐射光源, 以其独特的高亮度、高相干性 X 射线为量子材料和关联电子系统的前沿科学研究带来了前所未有的机遇. 然而, 要充分释放先进光源的潜能, 实验线站面临着多项关键技术挑战, 包括高品质相干光的传输、样品定位的高精度与高稳定性、复杂的原位与工况样品环境集成、海量数据处理与分析等. 展望在量子材料和关联电子系统研究中的应用前景, HALF 的各个线站无疑将为解码复杂量子态和非平衡演化行为提供先进的技术支持. 高亮度将提高谱学技术的空间分辨率, 揭示更多新奇量子现象; 高相干性使相干衍射和成像的空间和时间分辨能力大幅提升, 可精细解析电子/自旋/轨道态的分布和动力学过程. 然而, 发挥 HALF 的潜能依赖于持续创新, 如开展实验技术的多模态集成, 配置物态精细调控的实验环境, 实现智能算法辅助等, 如此才能全面发挥 HALF 作为国际一流光源的独特优势.

参考文献

- [1] Als-Nielsen J, McMorrow D (translated by Feng D L) 2015 *Modern Elements of X-ray Physics* (Shanghai: Fudan University Press) (in Chinese) [Jens Als-Nielsen, Des McMorrow 著 (封东来 译) 2015 现代 X 光物理原理 (上海: 复

- 旦大学出版社)]
- [2] Mai Z H 2013 *Synchrotron Radiation Sources and Applications* (Vol. 1 and 2) (Beijing: Science Press) (in Chinese) [麦振洪 2013 同步辐射光源及其应用 (上卷和下卷) (北京: 科学出版社)]
- [3] Eberhardt W 2015 *J. Electron Spectrosc.* **200** 31
- [4] Eriksson M, van der Veen J F, Quitmann C 2014 *J. Synchrotron Radiat.* **21** 837
- [5] Sobota J A, He Y, Shen Z X 2021 *Rev. Mod. Phys.* **93** 025006
- [6] Iwasawa H 2020 *Electron. Struct.* **2** 043001
- [7] Lisi S, Lu X B, Benschop T, de Jong T A, Stepanov P, Duran J R, Margot F, Cucchi I, Cappelli E, Hunter A, Tamai A, Kandyba V, Giampietri A, Barinov A, Jobst J, Stalman V, Leeuwenhoek M, Watanabe K, Taniguchi T, Rademaker L, van der Molen S J, Allan M P, Efetov D K, Baumberger F 2021 *Nat. Phys.* **17** 189
- [8] Cattelan M, Fox N A 2018 *Nanomaterials-Basel* **8** 284
- [9] Mo S K 2017 *Nano Converg.* **4** 6
- [10] Chen C T, Sette F, Ma Y, Modesti S 1990 *Phys. Rev. B* **42** 7262
- [11] van der Laan G, Figueroa A I 2014 *Coordin. Chem. Rev.* **277** 95
- [12] Klewe C, Qian L, Mengmeng Y, N'Diaye A T, Burn D M, Hesjedal T, Figueroa A I, Chanyong H, Jia L, Hicken R J, Shafer P, Arenholz E, van der Laan G, Qian Z 2020 *Synchrotron Radiat. News* **33** 12
- [13] Purbawati A, Coraux J, Vogel J, Hadj-Azzem A, Wu N J, Bendiab N, Jegouso D, Renard J, Marty L, Bouchiat V, Sulpice A, Aballe L, Foerster M, Genuzio F, Locatelli A, Mentès T O, Han Z V, Sun X D, Núñez-Regueiro M, Rougemaille N 2020 *ACS Appl. Mater. Inter.* **12** 30702
- [14] Barinov A, Dudin P, Gregoratti L, Locatelli A, Mentès T O, Niño M A, Kiskinova M 2009 *Nucl. Instrum. Meth. A* **601** 195
- [15] Sutton M, Mochrie S G J, Greytak T, Nagler S E, Berman L E, Held G A, et al. 1991 *Nature* **352** 608
- [16] Bluschke M, Basak R, Barbour A, Warner A N, Fürsich K, Wilkins S, Roy S, Lee J, Christiani G, Logvenov G, Minola M, Keimer B, Mazzoli C, Benckiser E, Frano A 2022 *Sci. Adv.* **8** eabn6882
- [17] Shpyrko O G 2014 *J. Synchrotron Radiat.* **21** 1057
- [18] Sandy A R, Zhang Q T, Lurio L B 2018 *Annu. Rev. Mater. Res.* **48** 167
- [19] Zhang Q T, Dufresne E M, Sandy A R 2018 *Curr. Opin. Solid St. M.* **22** 202
- [20] Shpyrko O G, Isaacs E D, Logan J M, Feng Y J, Aeppli G, Jaramillo R, Kim H C, Rosenbaum T F, Zschack P, Sprung M, Narayanan S, Sandy A R 2007 *Nature* **447** 68
- [21] Grübel G, Madsen A, Robert A 2008 *Soft Matter Characterization* (Dordrecht: Springer) p953
- [22] Fan J D, Jiang H D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 218702 (in Chinese) [范家东, 江怀东 2012 物理学报 **61** 218702]
- [23] Miao J W, Ishikawa T, Robinson I K, Murnane M M 2015 *Science* **348** 530
- [24] Rau C 2017 *SRN* **30** 19
- [25] Tripathi A, Mohanty J, Dietze S H, Shpyrko O G, Shipton E, Fullerton E E, Kim S S, McNulty I 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **108** 13393
- [26] Prosekov P A, Nosik V L, Blagov A E 2021 *Crystallogr. Rep.* **66** 867
- [27] Pfeiffer F 2018 *Nat. Photonics* **12** 9
- [28] Donnelly C, Scagnoli V 2020 *J. Phys. : Condens. Matter* **32** 213001
- [29] Lo Y H, Zhao L, Gallagher-Jones M, Rana A, Lodico J J, Xiao W, Regan B C, Miao J 2018 *Nat. Commun.* **9** 1826

SPECIAL TOPIC—Correlated electron materials and scattering spectroscopy

Hefei Advanced Light Facility: Empowering research of correlated electron systems

Sun Zhe[†] Shen Da-Wei Luo Zhen-Lin Yan Wen-Sheng

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

(Received 8 July 2024; revised manuscript received 13 August 2024)

Abstract

The Hefei Advanced Light Facility is the fourth-generation diffraction-limited storage ring light source, scheduled to begin operation in 2028. With its high-brightness and highly coherent X-rays, it will break through the current spatiotemporal resolution bottlenecks of X-ray techniques in studying correlated electron systems, providing crucial information for understanding the nature and microscopic origins of novel physical properties in these materials. This article introduces the main scientific goals and technical advantages of the Hefei Advanced Light Facility, focusing on the application perspectives of advanced technologies such as angle-resolved photoemission spectroscopy, magnetic circular dichroism, coherent X-ray scattering, and coherent X-ray imaging in researches of quantum materials and correlated electron systems. These techniques will enable the detailed analysis of the distribution and dynamics of electronic/spin/orbital states, reveal various novel quantum phenomena, and elucidate the fluctuations of order parameters in correlated electron systems. The completion of the Hefei Advanced Light Facility will provide advanced technical supports for decoding complex quantum states and non-equilibrium properties, ultimately promoting the application of quantum materials and correlated electron systems in frontier fields such as energy and information.

Keywords: X-ray spectroscopy, coherent X-ray scattering, coherent X-ray imaging, correlated electron systems

PACS: 07.85.Qe, 61.05.C-, 07.85.Tt, 71.27.+a

DOI: [10.7498/aps.73.20240943](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240943)

CSTR: [32037.14.aps.73.20240943](https://cstr.cn/32037.14.aps.73.20240943)

[†] Corresponding author. E-mail: zsun@ustc.edu.cn



合肥先进光源：赋能关联电子系统研究

孙喆 沈大伟 罗震林 闫文盛

Hefei Advanced Light Facility: Empowering research of correlated electron systems

Sun Zhe Shen Da-Wei Luo Zhen-Lin Yan Wen-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 190703 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240943

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240943>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

上海光源硬X射线相干衍射成像实验方法初探

Preliminary exploration of hard X-ray coherent diffraction imaging method at SSRF

物理学报. 2020, 69(3): 034102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191586>

基于高次谐波X射线光源的三维纳米相干衍射成像技术

Three-dimensional nano-coherent diffraction imaging technology based on high order harmonic X-ray sources

物理学报. 2022, 71(16): 164205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220976>

上海软X射线自由电子激光单脉冲成像定时的设计与实现

Design and implementation of timing system for single-shot imaging at Shanghai soft X-ray free-electron laser

物理学报. 2024, 73(12): 120701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240383>

强场X射线激光物理

High field X-ray laser physics

物理学报. 2021, 70(8): 084101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210096>

针对微尺寸X射线源的非相干全息层析成像

Tomographic incoherent holography for microscale X-ray source

物理学报. 2023, 72(19): 195203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230920>

面向先进光源线站等大科学装置的低温X射线能谱仪原理及应用进展

Development of basic theory and application of cryogenic X-ray spectrometer in light sources and X-ray satellite

物理学报. 2021, 70(18): 180702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210350>