特邀综述

超快电子显微学表征技术概述*

刘芳# 邓颖# 刘竞超# 陈乐楠 纪少政 刘传普 陈祥 付学文†

(南开大学物理科学学院, 超快电子显微镜实验室, 弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2026 年 3 月 1 日收到; 2026 年 3 月 24 日收到修改稿)

超快电子显微学表征技术是融合超快激光与电子显微学的新型表征分析手段, 包含超快透射电子显微镜、超快扫描电子显微镜及超快阴极荧光等技术, 可在飞秒时间尺度与原子晶格/纳米空间尺度上追踪非平衡动态过程, 为光与物质相互作用微观机制的研究提供了全新手段. 该技术基于光子泵浦-电子探测原理, 通过精准调控激光与电子脉冲的时间延迟, 实现对载流子弛豫、晶格振动、结构相变和磁畴演化等超快动力学过程的直接追踪. 目前, 该技术已成功应用于二维材料、半导体器件、催化材料、磁性材料、生物大分子等体系的研究, 深化了对材料非平衡态现象的理解, 为新型功能材料与器件设计优化提供了重要支撑. 随着电子源与探测系统的改进, 其时空分辨率持续提升, 在原子尺度超快过程研究中展现出巨大潜力, 将推动凝聚态物理、材料科学、信息科学等领域的突破性发展.

关键词: 超快电子显微学, 超快阴极荧光, 时空分辨表征, 载流子动力学, 结构动力学, 磁畴动力学

DOI: 10.7498/aps.75.20260292 **CSTR:** 32037.14.aps.75.20260292

1 引 言

在凝聚态物理与材料科学研究中, 物质在外界激发下所经历的非平衡态演化过程, 通常发生在飞秒至皮秒时间尺度, 并伴随原子尺度的结构重构与电子态变化. 传统电子显微技术虽具备亚纳米至原子级空间分辨能力, 但其时间分辨率受限于连续电子束探测机制, 难以直接观测超快动力学过程, 如结构相变[1]、载流子动力学[2]、激子动力学[3]以及电磁响应[4]等瞬态行为. 因此, 发展兼具超高时间与空间分辨率的表征手段, 成为揭示光与物质相互作用微观机制的关键.

超快电子显微学 (ultrafast electron microscopy, UEM) 正是在这一背景下发展起来的一类前沿表征技术. 该技术通过将飞秒激光引入传统电子显微镜体系, 构建“光子泵浦-电子探测”的时间分辨实验框架[5], 实现了对非平衡态过程的时空同步观测. 相比于纯光学超快谱学, UEM 具备更高的空间分辨能力; 相比于传统电子显微镜, 则在时间维度上实现了从毫秒至飞秒甚至阿秒尺度的跨越, 使得在原子尺度上直接追踪动态过程成为可能.

从技术实现方式与信号获取机制来看, 本文涉及的 UEM 主要包括三类代表性技术: 超快透射电子显微镜 (ultrafast transmission electron microscope, UTEM)、超快扫描电子显微镜 (scanning ultrafast electron microscope, SUEM) 以及超快阴极荧光 (ultrafast cathodoluminescence, U-CL).

* 国家重点研发计划 (批准号: 2024YFA1408000, 2023YFB3307701, 2023YFA1507000)、国家自然科学基金 (批准号: 12127803, 92477130, 12427806, 12074195, 22573050)、南开大学 2025 年科研仪器实验技术研发项目 (批准号: 25NKSYJS05)、111 计划 (批准号: B23045) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 63213040, C029211101, C02922101, ZB22000104, DK2300010207, 63243194, 9242000728) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: xwfu@nankai.edu.cn

© 2026 中国物理学会 Chinese Physical Society

其中, UTEM 基于透射电子成像与衍射机制, 适用于探测材料内部结构及体相动力学过程[6,7]; SUEM 通过扫描电子束并利用二次电子信号成像, 更适合研究表面与近表面区域的载流子输运与界面电荷动力学[8]; 而 U-CL 则结合电子激发与光子探测, 可实现对激发态载流子复合过程及局域光学响应的时间分辨研究[9]. 这三类技术在时空分辨能力与探测对象上形成互补, 共同构成了 UEM 技术体系的核心框架. 为便于读者从整体上把握本文涉及的技术体系, 图 1 系统展示了 UEM 的主要技术分支, 以及各分支技术的定位、基本原理与典型应用场景.

自 21 世纪初美国加州理工学院诺贝尔奖得主 Ahmed H. Zewail 教授提出四维电子显微镜 (4D electron microscope) 概念以来[10], UEM 技术在电子源调控[11]、时间分辨测量方法及多模态联用等方面取得了快速发展. 当前, UTEM 已广泛应用于晶格动力学[12]、相变过程[13]及磁结构演化研究[14]; SUEM 在载流子输运与界面动力学探测中展现出独特优势[15]; U-CL 则在纳米光学与激发态动力学研究中发挥重要作用[16]. 与此同时, 结合原位环境技术与新型电子探测手段, UEM 正逐步拓展至液相体系[17]、生物大分子[18]、量子材料[19]等更为复杂的研究对象, 显著推动了多学科交叉发展.

图 1 超快电子显微学主要技术分支及其典型表征场景示意图, 该图概括了 UTEM, SUEM 和 U-CL 主要的技术定位、基本原理及代表性应用方向, 用于展示本文涉及技术体系的整体框架

Fig. 1. Schematic diagram of the major branches of ultrafast electron microscopy and their typical characterization scenarios. The figure summarizes the main technical features, basic working principles, and representative applications of UTEM, SUEM, and U-CL, providing an overall framework of the techniques discussed in this review.

尽管取得了显著进展, UEM 仍面临若干技术难题. 例如, 在 UTEM 中, 高时间分辨率与高空间分辨率之间的耦合限制仍有待突破; SUEM 在提升时空分辨率的同时需兼顾二次电子信号效率及样品表面电场效应; U-CL 在多模态联用与极端条件测量方面仍存在技术瓶颈. 此外, 复杂非平衡过程的定量解析方法亦有待进一步发展. 这些问题在一定程度上制约了 UEM 技术在更广泛领域中的深入应用.

基于上述背景, 本文系统综述超快透射电子显微学、超快扫描电子显微学及超快阴极荧光三类核心技术的发展脉络、基本原理及典型应用, 重点梳理近年来相关领域的重要研究进展, 并分析不同技术路径的优势与局限. 在此基础上, 进一步展望 UEM 在多模态融合、极端条件探测及超高时空分辨测量等方向的发展趋势, 旨在为相关领域研究提供系统性参考, 并为新型功能材料的设计与微观动力学机制研究提供方法学支持.

2 超快透射电子显微镜技术

2.1 技术概述

UTEM 融合飞秒激光泵浦-探测技术与传统透射电子显微镜 (TEM), 可对材料内部结构及其动态过程进行时间分辨观测, 兼具纳米尺度空间定位能力与飞秒至阿秒量级的时间精度. TEM 自 20 世纪 30 年代被发明以来, 以原子级空间分辨率特性成为揭示物质静态微观结构的核心工具, 可精确表征材料形貌、晶体结构及化学成分. 原位动态 TEM 技术虽能实现毫秒至微秒时间尺度的物理化学过程研究[20–22], 但受探测机制限制, 常规 TEM 难以观测皮秒至飞秒量级的超快过程, 如载流子动力学、化学键断裂、晶格振动等瞬态现象.

20 世纪 80 年代飞秒激光器的发明为突破时间分辨率瓶颈提供了契机, 泵浦-探测技术的发展奠定了电子显微镜时间分辨能力提升的基础. 1983 年, 柏林工业大学 Bostanjoglo 团队[23] 率先提出脉冲电子成像概念; 21 世纪初, 诺贝尔奖得主 Ahmed H. Zewail 团队成功将飞秒激光脉冲与电子显微镜结合, 首次实现了飞秒时间分辨的透射电子显微成像[10], 标志着 UTEM 的正式诞生, 将 TEM 的时间分辨率推向纳秒至亚皮秒尺度. 经过近二十多年的持续发展, UTEM 已成为凝聚态物理、光化学、材料科学、近场光学、结构生物学等交叉领域的革命性动态观测科学工具[12,13,24].

2.2 工作原理

UTEM 实现超快时间分辨的核心物理基础是泵浦-探测技术: 泵浦脉冲 (飞秒激光) 首先激发样品产生非平衡动力学过程, 随后利用时间延迟可控的超短电子脉冲 (探测脉冲) 对激发态样品进行成像或衍射, 通过精确扫描泵浦与探测脉冲的时间延迟, 重构动态过程的完整时间演化轨迹.

在脉冲生成机制上, 紫外飞秒激光轰击阴极表面, 通过单光子或双光子吸收效应发射光电子, 电子脉冲宽度受激光脉冲宽度和阴极材料能带结构共同影响. 21 世纪初, 研究人员将纳秒激光器引入透射电子显微镜电子枪, 实现基于单个电子脉冲的成像与衍射[25], 成功应用于不可逆过程的动力学研究[26]. 该类实验通常采用单次成像 (single-shot) 模式, 即在一次激发后利用单个电子脉冲完成结构信息的记录, 适用于如相变、烧蚀及不可恢复结构演化等不可逆过程[27]. 然而, 在单次成像模式中, 为获得足够信噪比, 需提高单脉冲电子数, 强烈的空间电荷效应将显著展宽电子脉冲, 从而将时间分辨率限制在纳秒量级[28]. 在此基础上, 发展出的动态透射电子显微学 (dynamic TEM, DTEM) 为不可逆过程研究提供了更丰富的时间信息获取手段. 特别是文献 [29] 报道的“电影模式”(movie-mode DTEM), 通过在电子光路中引入高速电磁偏转器, 将不同延迟到达样品的电子脉冲依次偏转至探测器的不同区域, 从而在一次实验中获取样品被单个激光脉冲激发后动力学过程的多帧时间序列图像. 该方法在保持单次激发条件的同时, 实现了对不可逆过程的“准连续”时间分辨观测, 使得传统单次成像只能获得单帧信息的局限得到有效突破[29]. 目前, 该技术已被用于研究激光诱导相变、冲击响应及快速相界面演化等过程, 为理解复杂非平衡动力学提供了重要实验手段.

相比之下, 2005 年 Ahmed H. Zewail 团队[10] 发展的基于飞秒激光的 UTEM, 则通常工作在频闪 (stroboscopic) 模式下, 通过重复激发-探测循环逐步重建动力学过程, 实现亚皮秒时间分辨率[12]. 两类方法在时间分辨能力与适用体系上形成互补: 前者侧重不可逆过程的单次捕获, 后者则适用于可逆或可重复动力学过程的高时间分辨研究.

需要指出的是, UTEM 和 SUEM 在时间分辨实现上具有共同框架: 均以超快激光脉冲作为激发源, 通过延迟线调控泵浦与探测之间的相对时间, 并利用脉冲电子束记录样品在不同延迟时刻的瞬态响应. 因而, 两者之间的主要区别并不在于泵浦-探测思想本身, 而在于电子束的形成与操控方式、样品信号的产生机制以及最终成像模式的不同.

典型 UTEM 系统由超快激光系统与 TEM 本体构成 (如图 2(a), (b) 所示[30]). 激光经分束后, 一路用于触发光阴极发射脉冲电子束作为探针, 另一路作为泵浦光激发样品; 二者之间的时间延迟由光学延迟线精确控制. 由于探测电子束沿 TEM 镜筒传播并穿透电子透明样品, UTEM 可进一步结合明场/暗场成像、电子衍射、电子能量损失谱以及洛伦兹成像等模式, 实现对晶格振动、结构相变、电荷重分布与磁结构演化等过程的时间分辨探测.

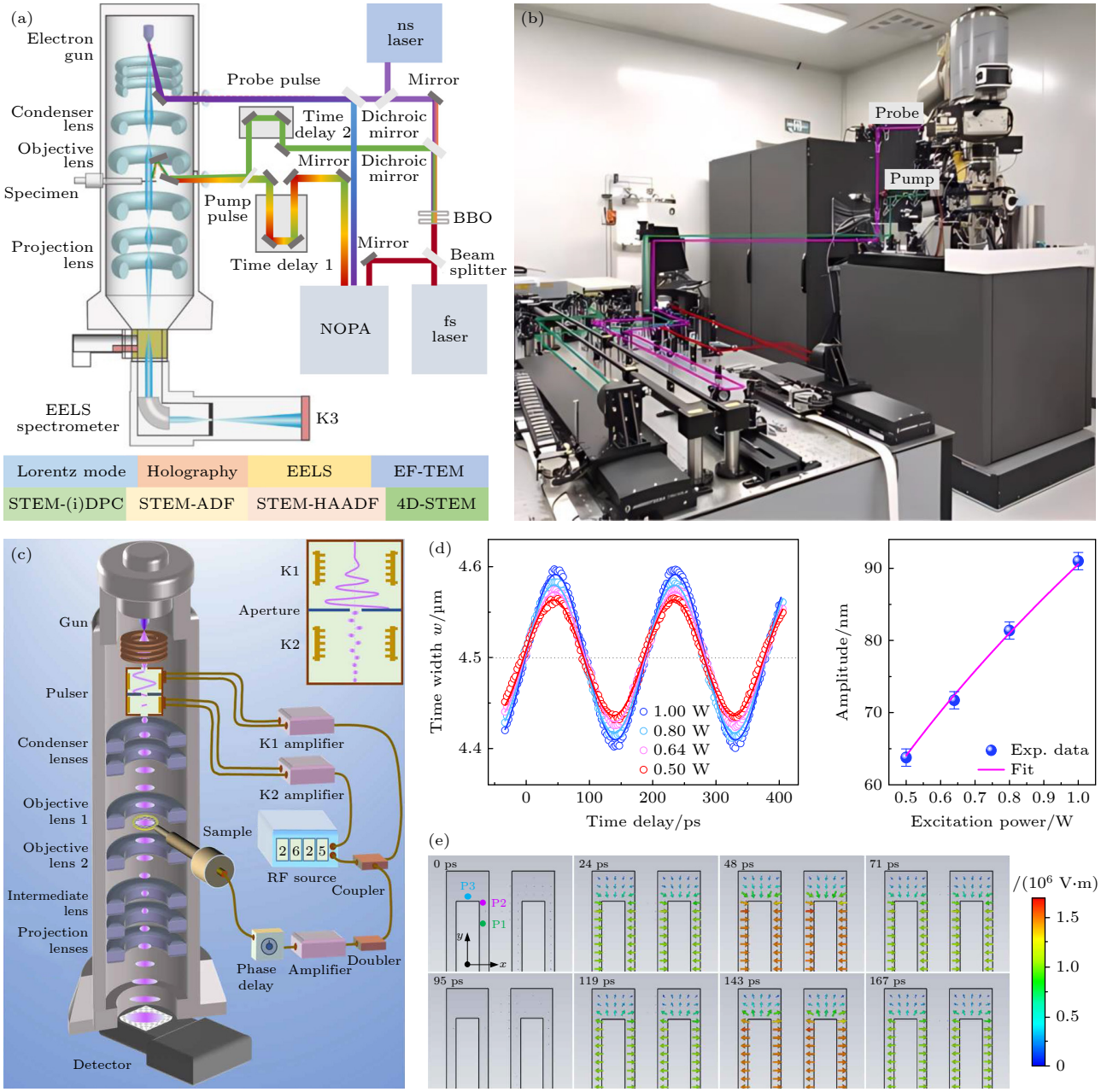


图 2 典型的 UTEM 系统及频闪 TEM 技术 (a) 基于超快激光的 UTEM 装置示意图; (b) 系统实物图[30]; (c) 基于射频脉冲电子发生器的 UTEM 装置示意图; (d) 电磁波传播动力学对激发功率的依赖性; (e) 双梳状结构中电磁波传播动力学的数值模拟[38]

Fig. 2. A typical UTEM system and stroboscopic TEM technique: (a) Schematic of the UTEM instrument based on ultrafast laser; (b) photograph of the system[30]; (c) schematic of the UTEM based on RF pulser; (d) excitation power dependence of the EM wave propagation dynamics; (e) numerical simulations on the EM wave propagation dynamics in two interdigitated combs[38].

无激光源的频闪 TEM 技术早在 20 世纪 60—70 年代问世[31–33], 近年来重新获得学界关注[34]. 该技术无需改造电子源, 通过在电镜柱内引入静电或射频束流偏转装置, 将连续电子束切割为短脉冲[35–37], 既能保持电子源的原始相干性与能量展宽, 又能便捷切换脉冲与连续发射模式. 其千兆赫兹重复频率兼具 10%—20% 的高占空比, 既保证信噪比, 又显著缩短数据采集时间, 但较高的重复频率要求被测材料的激发态寿命处于纳秒量级, 在一定程度上限制了应用范围. 迄今, 该技术已成功应用于电磁场激励下材料的动力学研究[38] (图 2(c)—(e)), 针对化学动力学研究设计的可见光辐照、热激励等新激励方式也有望与该技术结合, 为研究先进功能材料的磁学、等离激元和激子动力学提供广阔前景[39].

2.3 技术应用

UTEM 集成多样化先进功能, 包括超快成像[40–45]、超快衍射[46–58]、超快洛伦兹透射电子显微术[59–64]、时间分辨冷冻电子显微术[65–71]、时间分辨扫描透射电子显微术[72] 以及光诱导近场电子显微术等, 将传统 TEM 的静态表征能力拓展至飞秒-纳米/原子时空分辨率的动态研究领域, 成为量子材料、催化反应与生物分子动态研究中不可或缺的工具.

2.3.1 超快电子显微成像与超快电子衍射

材料在光激发下, 能量从电子系统传递至声子系统, 引发相干声子产生[73–75]、光致相变与结构响应[76–79]、电子-声子耦合等一系列动态过程[80–83]. 超快电子衍射 (UED) 和透射实空间成像是研究此类超快结构动力学的核心技术: UED 利用超短电子脉冲探测样品的瞬时衍射花样, 通过分析倒易空间的结构信息追踪动力学演化, 自 20 世纪 80 年代发展以来[84,85], 已广泛应用于气体、液体[86] 及块体材料[87] 的结构动力学研究, 兼具高时间分辨率和对晶格周期性变化的高灵敏度; UTEM 展现出多模态集成和纳米尺度高灵敏度探测的特点, 可通过成像特征在纳米尺度直接观测畴结构演化、晶格瞬态响应, 结合洛伦兹电子显微模式还能实现磁畴动力学的直接成像, 为理解复杂材料的超快动力学过程提供独特手段.

UTEM 的飞秒电子成像技术为动态物理过程提供了直观呈现方式, 其高空间分辨率实现了纳米尺度动力学过程的研究. 例如加州理工学院 Ahmed H. Zewail 课题组[88] 拍摄的石墨样品高分辨率 UTEM 图像 (图 3(a)), 清晰可见 3.4 Å的晶面间距; 该课题组还发展四维电子断层扫描技术, 将三维体积成像与飞秒时间分辨率结合[89,90], 并成功捕捉到碳纳米管在非平衡状态下的复杂环状结构及其形貌动力学, 观测到数十兆赫兹的振荡频率 (图 3(b))[90], 为材料科学和生物科学研究提供了新方法.

UTEM 为捕捉纳米材料中的声子传输过程提供了独特手段, 可追踪脉冲激光激发下相干声子的动力学行为. 例如 Flannigan 等[40–42] 通过纳米-皮秒时空尺度的实空间直接成像, 系统研究了 MoS_2 中光激发缺陷介导的各向异性声子动力学 (图 3(c)); Sie 等[57] 基于 UED 技术结合太赫兹光脉冲激发, 在 Weyl 半金属 WTe_2 中实现亚皮秒量级的层间剪切应变调控 (图 3(d)), 揭示了太赫兹频率剪切声子模驱动的对称性破缺机制, 为超高速拓扑电子器件开发提供新思路; Zong 等[91] 在范德瓦耳斯反铁磁体薄膜中观测到自旋序放大的 GHz 层间剪切振荡, 揭示了自旋去磁化驱动晶格剪切形变的微观机制, 为自旋调控的高频纳米谐振器设计提供新方案 (图 3(e)).

UTEM 在光诱导相变研究中发挥重要作用, 已被广泛应用于晶体熔化、成核和生长过程[92–95]、钙钛矿材料晶格畸变[96–98] 以及电荷密度波 (CDW) 相变[99–101] 等研究. Siwick 等[102] 利用飞秒电子衍射的单发模式, 对铝薄膜中激光诱导的固-液相变过程进行原子尺度动态追踪 (图 3(f)), 首次揭示了强驱动热力学条件下固液转变的不可逆原子重组路径; Danz 等[44] 采用定制的暗场光阑阵列, 以飞秒时间分辨率和 5 nm 空间分辨率追踪了电荷密度波畴的演化过程, 阐明了 1T-TaS_2 中的弛豫路径与畴壁动力学 (图 3(g)), 为光激发后的相变机制提供直接结构证据.

随着原位 TEM 技术的发展, 电子显微表征从静态结构分析迈向复杂环境中动态过程的直接观测, 原位样品杆技术与 UTEM 的深度融合极大拓展了其应用范围 (图 4(a))[103], 实现了电场、磁场、应力场、温度场及气液环境下材料结构演化与动态响应的纳米级甚至原子分辨率表征[17,104]. 在液体

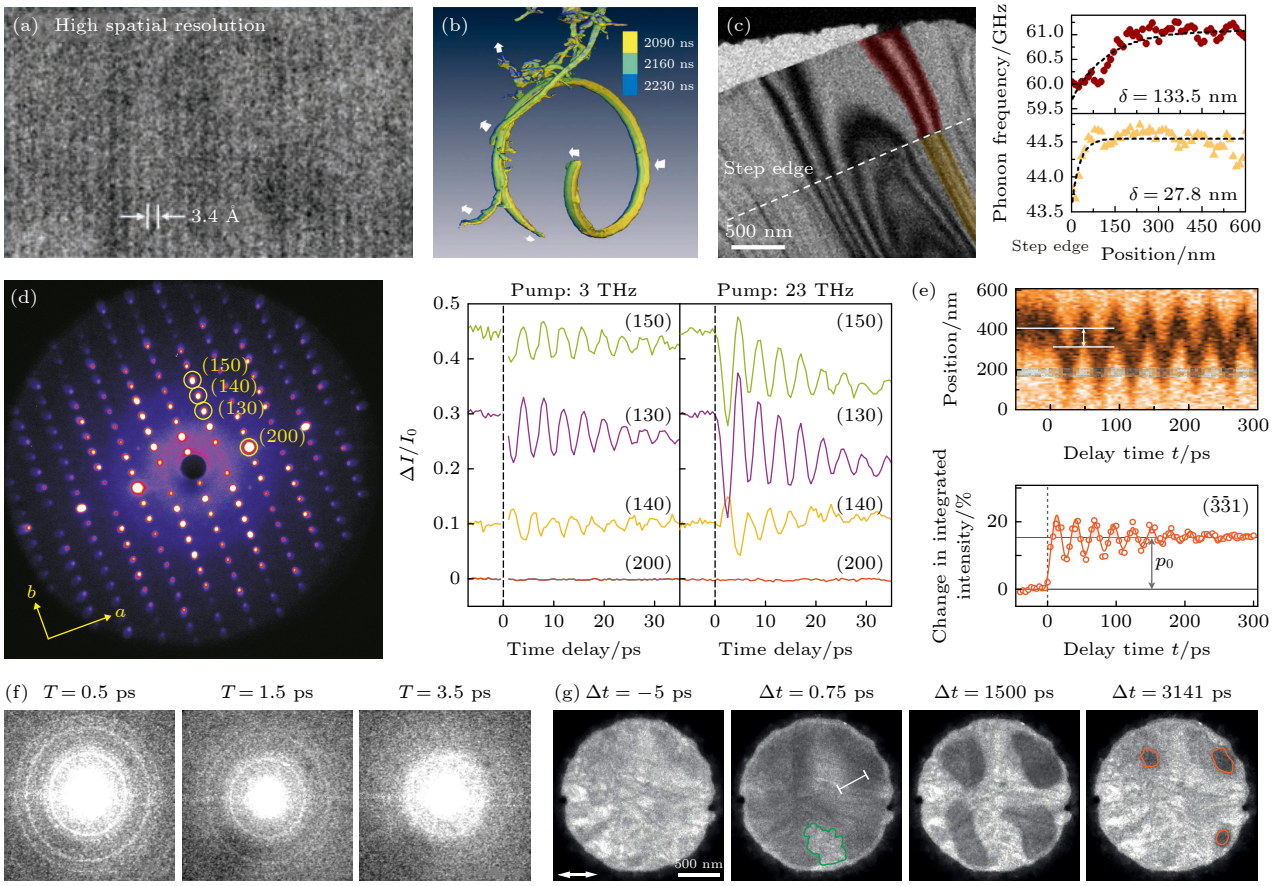


图 3 超快电子显微成像技术的应用 (a) 石墨的高分辨率 UEM 图像, 晶面间距为 3.4 Å[88]; (b) 碳纤维的光致动力学, 箭头表示碳纳米管各个部分机械振动的方向[90]; (c) 2H-MoS_2 的 UEM 图像, 与空间位置相关的声子频率变化现象[41]; (d) WTe_2 在平衡状态下的衍射图谱, 布拉格峰强度的变化与太赫兹泵浦脉冲和电子束之间的时间延迟的函数关系[57]; (e) $FePS_3$ 样品特征弯曲条纹位置随时间的演变和 UED 图像[91]; (f) 多晶 Al 中超快固液相变的飞秒电子衍射研究[102]; (g) 1T-TaS_2 中激光诱导电荷密度波相变的暗场像[44]

Fig. 3. Applications of ultrafast electron microscopy imaging techniques: (a) High-resolution UEM image of graphitized carbon with lattice-plane separations of 3.4 Å[88]; (b) mechanical vibrations of a carbon nanotube, where the arrows indicate the direction of the individual sections of a carbon nanotube[90]; (c) representative UEM image of a freestanding 2H-MoS_2 flake with highlighted region of interest (ROIs) from which phonon dynamics were mapped and position-dependent phonon frequency in each ROI[41]; (d) measured diffraction pattern of WTe_2 at equilibrium and changes in Bragg peak intensity as a function of time delay between the terahertz pump pulses and the electron beam[57]; (e) evolution of characteristic curved fringe positions with time and corresponding UED image of a free-standing $FePS_3$ sample[91]; (f) femtosecond electron diffraction study of an ultrafast solid-liquid phase transition in polycrystalline Al[102]; (g) ultrafast DF micrographs of transient domain configurations in the 1T-TaS_2 film obtained in the laser pump-electron probe scheme[44].

环境方面, UTEM 结合原位液体样品杆可在纳米尺度直接观察水相体系中的光诱导成核动力学过程[86,105], 例如 Fu 等[105](图 4(b)) 通过将液体环境集成到 UTEM 中, 研究激光脉冲触发的水中纳米颗粒的活性布朗动力学, 还在液-气界面观测到单光子激活的金纳米粒子的单向超快弹道运动[86], 将 UTEM 的应用边界拓展至非平衡态流体与气相反应体系. 此外, 通过对 UTEM 内样品施加电场, 可直接观察电化学反应[106]、极化[107]、磁化[108] 和机电响应[109] 等场致现象, Mattes 等[110] 证明采用太赫兹压缩电子脉冲的超快电子束探针可直接探测电子器件中的局部电磁场, 实现飞秒、微米和毫伏分辨率 (图 4(c)), 使 UTEM 成为研究纳米级器件中电子和结构动力学的强大工具.

2.3.2 超快洛伦兹透射电子显微镜

磁性材料在数据存储[111]、逻辑运算[112–114] 以及量子计算[115–117] 等领域具有广阔应用前景. 其磁性起源与自旋、轨道间的相互作用密切相关, 并与超导、铁电等序参量相互耦合, 因此在纳米及超快尺度下研究磁结构的动态演化, 对理解磁性本质及动态行为至关重要.

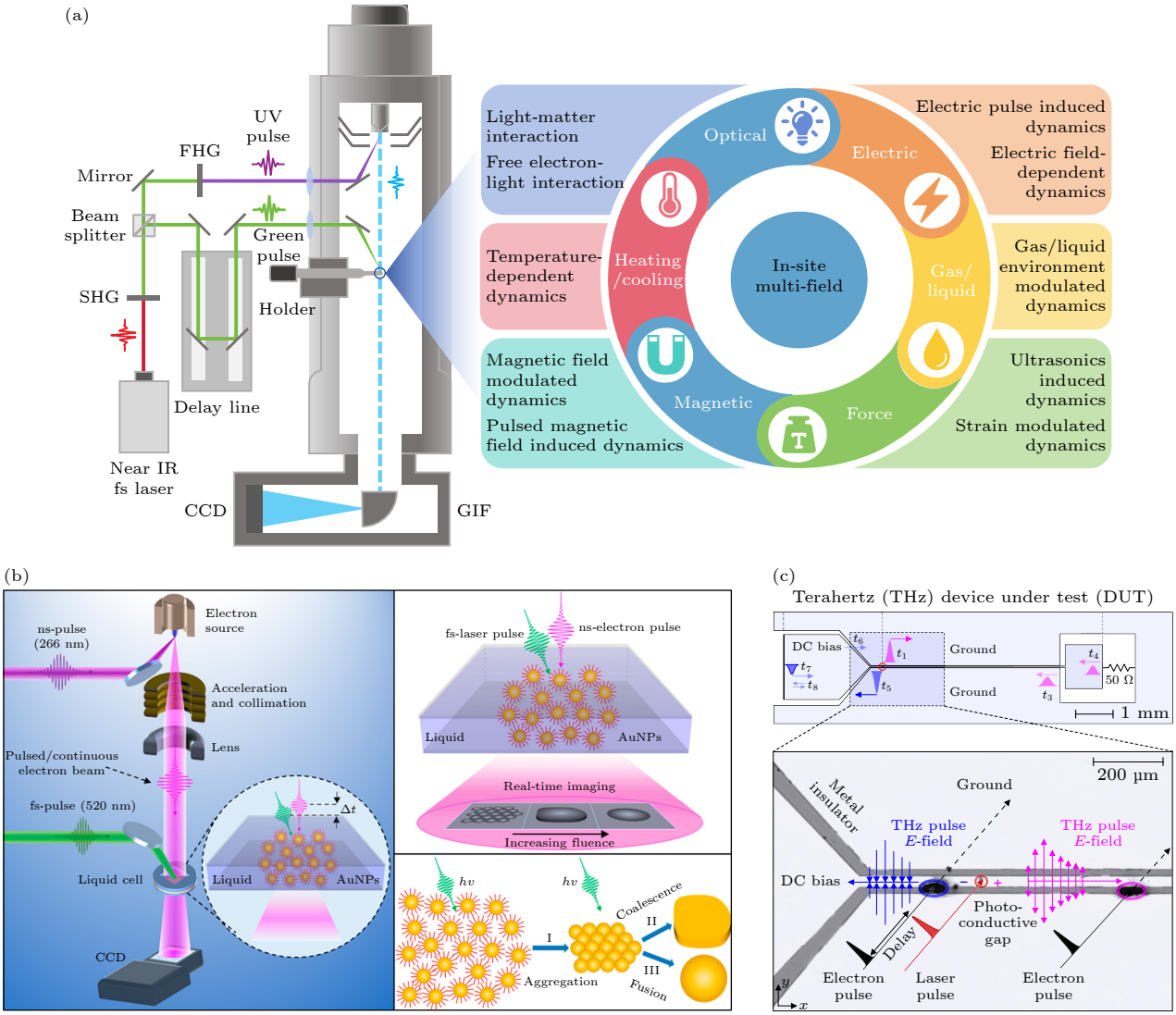


图 4 原位 TEM 技术及应用 (a) 将原位多场技术与 UTEM 相结合, 用于研究复杂环境中的超快动力学[103]; (b) 通过 4D-EM 技术对液态金纳米粒子光致形变反应动力学的实时成像[105]; (c) 太赫兹电子器件示意图及光学显微镜图像[110]

Fig. 4. *In-situ* TEM techniques and their applications: (a) Schematic illustrating the integration of *in-situ* multi-field techniques with UTEM for studying ultrafast dynamics in complex environments[103]; (b) schematic illustration of real-time imaging of photomorphic reaction dynamics of gold nanoparticles (AuNPs) in liquid by four-dimensional electron microscopy (4D-EM)[105]; (c) schematics of the terahertz electronics device under test and optical microscope image of the active region[110].

洛伦兹透射电子显微镜 (Lorentz transmission electron microscope, LTEM) 是一种利用电子束在样品内部磁感应强度作用下发生洛伦兹偏转来形成磁衬度的透射电子成像方法[118]. 对于具有磁畴或畴壁结构的样品, 不同区域的面内磁感应分布会使透射电子产生方向相反或大小不同的横向偏转; 在适当离焦条件下, 这种微小偏转可转化为明暗相间的菲涅耳衬度, 从而实现磁结构的实空间成像. 因而, LTEM 并非直接探测磁矩, 而是通过磁结构对电子传播轨迹的调制来反演样品中的磁构型. 传统 LTEM 能够在纳米尺度上直接观察磁畴、磁涡旋及拓扑自旋结构, 但主要局限于准静态或较慢演化过程[119]; 将泵浦-探测时间分辨方案引入 LTEM 之后, 才使得退磁、畴壁运动、磁纹成核及斯格明子写入/湮灭等非平衡瞬态过程的直接成像成为可能. 超快洛伦兹透射电子显微镜 (ULTEM) 正是在 LTEM 磁衬度机制与超快时间门控相结合的基础上发展起来的[59–64].

首套 ULTEM 系统由 Zewail 团队[120]开发, 通过离轴电子全息术与时间分辨的菲涅耳成像模式, 成功观测了铁磁薄膜中的磁化反转与畴壁运动动力学. 近年来, 利用 ULTEM 探究纳米尺度磁结构超快动态演化的研究日益增多: Rubiano da Silva 等[121]利用飞秒洛伦兹显微镜探测了光诱导

退磁过程中的结构演化, 实现了对单个纳米结构中超快退磁过程的直接成像, 空间分辨率优于 100 nm, 时间分辨率高达 700 fs (图 5(a)); 在 FeGe 材料体系中, 低温纳秒 ULTEM 实验实现了磁斯格明子的可控写入 (图 5(b)), 揭示了其在不同激光强度下的动态演化规律[14]. Gao 等[59] 将瞬态光栅激发与 ULTEM 相结合, 实现纳米级空间分辨率和皮秒级时间分辨率的磁化动力学控制与探测 (图 5(c)); Zhang 等[122] 在 $(Mn_{0.5}Ni_{0.5})_{65}Ga_{35}$ 合金体系中, 利用 ULTEM 观测到飞秒激光激发后磁畴结构的瞬态响应 (图 5(d)), 识别出磁畴演化的三阶段动力学; ULTEM 还被应用于研究电流驱动下的磁结构动力学[63], Möller 等[63] 以优于 10 nm 的空间精度追踪了磁涡旋的轨道运动, 深入分析了其运动轨迹与衰减特性 (图 5(e)); 在 $Co_9Zn_9Mn_2$ 材料中, Shimojima 等[62] 通过泵浦-探测模式的透射电子显微成像, 系统观测了斯格明子在纳秒至微秒时间尺度上的扩增、漂移、收缩与合并等行为 (图 5(f)), 揭示了其复杂的时空演化路径.

综上, ULTEM 为纳米尺度磁结构的超快动力学研究提供了重要的实验表征能力, 推动了对复杂自旋结构动态行为的深入理解, 成为研究磁结构尤其是纳米拓扑自旋结构微观动力学不可或缺的工具.

2.3.3 时间分辨冷冻电子显微学

UTEM 在生物学研究中的应用, 主要体现为将生物大分子及其复合体系的研究由静态结构表征推进到动态过程解析. Vanacore 等[123] 的研究表明, 时间维度的引入使电子显微方法能够更加直接地关联结构变化与生物功能 (图 6(a)), 而这一思想与冷冻电镜结合后, 进一步发展出以时间分辨冷冻电子显微学 (time-resolved cryo-electron microscopy, cryo-EM) 为代表的研究范式 (图 6(b))[68–71]. Murata 等[124] 指出, 时间分辨 cryo-EM 对于动态生物大分子的意义, 不仅在于解析不同构象状态本身, 更在于揭示复杂分子机器在功能循环中的状态分布、构象转换及异质性特征. 围绕这一目标, 时间分辨 cryo-EM 的生物学应用主要集中于瞬态中间态捕获、蛋白质构象变化路径重建、大型分子机器工作循环解析以及病毒快速动态行为表征等方面 (图 6(c))[65–67]. 近年来, 瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL) Lorenz 课题组[125] 在该方向取得了重要进展. 他们提出并发展了一种基于激光诱导“熔融-再玻璃化”(melting-revitrification) 的微秒时间分辨 cryo-EM 方法. 该方法通过短脉冲激光瞬时加热冷冻样品, 使其在微秒时间尺度内进入瞬态液相, 从而允许蛋白质发生构象变化, 随后通过快速再玻璃化过程将这些瞬态结构“冻结”并进行电镜成像 (图 6(d)), 这一策略有效突破了传统 cryo-EM 在时间分辨率上的限制, 使得在接近天然环境条件下捕获蛋白质非平衡态构象成为可能. 进一步地, 结合喷射玻璃化 (jet vitrification) 等新型样品制备技术, 该方法已被拓展至更广泛的生物体系[126], 包括病毒动力学及膜蛋白结构转变等 (图 6(e)). 总体而言, 这些研究表明, 时间分辨的 cyro-EM 在生物学中的应用正逐步从动态构象分布分析走向对真实生物过程的时间分辨结构重建, 并为阐明生物体系中结构变化与功能实现之间的内在联系提供了重要手段.

2.3.4 五维扫描透射电子显微学

五维扫描透射电子显微学 (5D-STEM) 实现了纳米材料中晶格、电荷等物理性质的超快动态映射 (图 7(a))[72], 核心原理是利用超短电子脉冲对样品进行二维实空间扫描, 同时在每个扫描点记录完整的电子衍射图样或电子束偏转信号, 同步获取实空间坐标 (x, y)、时间 (t) 及动量空间 (k_x, k_y) 的五维信息 (图 7(b)).

5D-STEM 技术的发展最早可追溯至 2009 年, Yurtsever 和 Zewail[127] 首次提出利用超快会聚束电子衍射 (U-CBED) 观测硅中声波的传播, 实现了 UTEM 对纳米尺度单颗粒结构动力学的研究; 此后, Claus Ropers 团队[128] 利用 U-CBED 探测光激发诱导的纳米结构应变动力学. 2022 年, Nakamura 等[72] 将 U-CBED 进一步发展为 5D-STEM-CBED. 这一进展不仅首次实现了纳米尺度应变的时域定量映射, 5D-STEM 还在继承 U-CBED 对应变动力学定量分析能力的基础上, 显著增强了二维空间扫描与 mapping 能力, 从而能够对纳米尺度时间依赖应变场进行更系统的空间分布表征 (图 7(c)—(g)). 利用该方法, Nakamura 等[72] 在硅纳米薄膜中观测到光诱导声波的产生与传播, 并揭示了动量-频率空间中的应变分布及任意方向的声子色散关系.

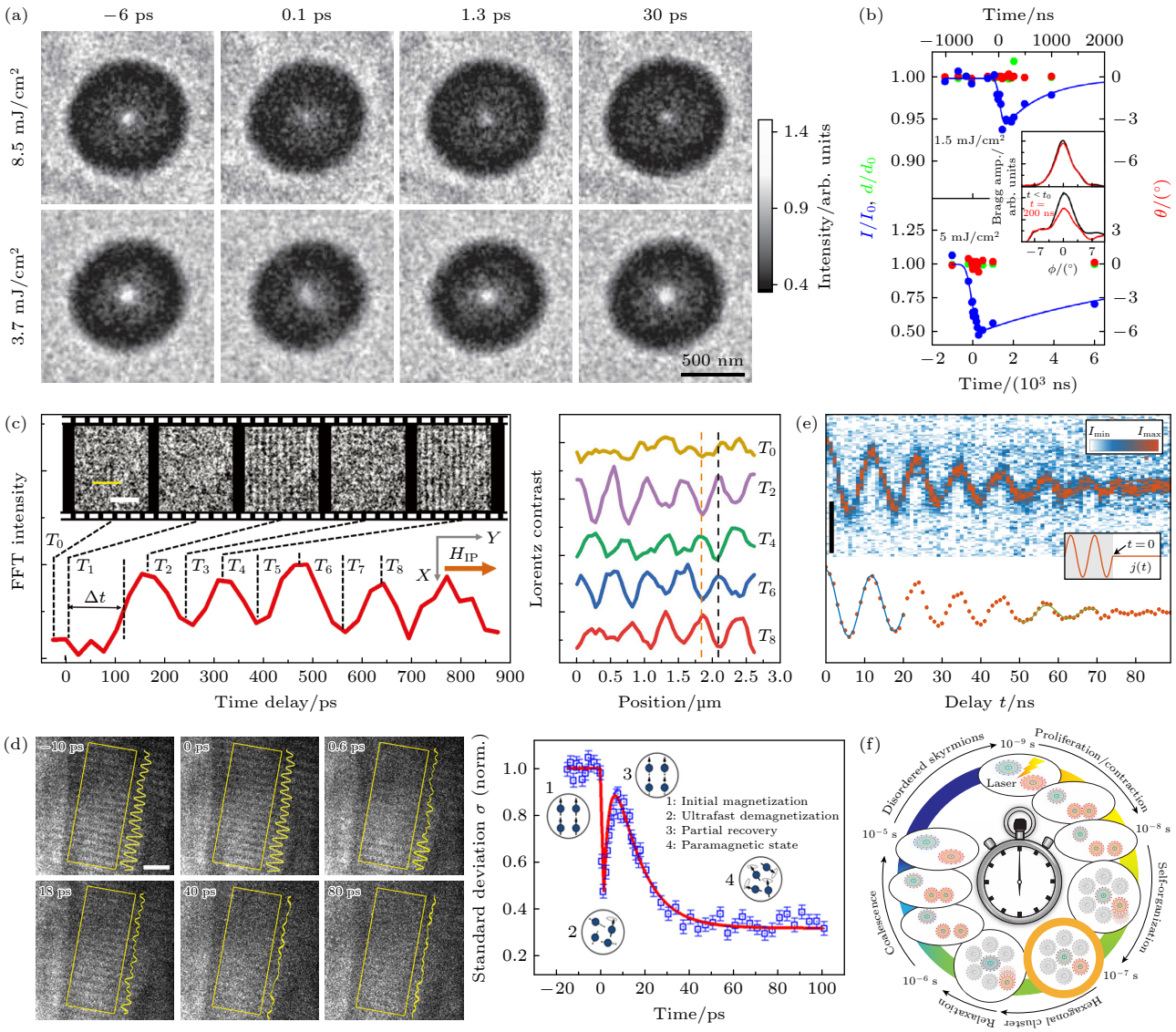


图 5 超快洛伦兹透射电子显微镜的应用 (a) 使用 ULTEM 观测到的磁涡旋退磁过程[121]; (b) FeGe 纳米薄片中斯格明子晶格参数的时间演化[14], 上图和下图分别为激光能量密度约 1.5 mJ/cm² 和 5 mJ/cm² 时的测量结果: 斯格明子间距 (d/d_0, 绿色圆点, 左轴)、取向角 (红色圆点, 右轴) 和磁化强度 (I/I_0, 蓝色圆点, 左轴); (c) 沿 y 方向 ($\alpha = 3°$, $\beta = 0°$) 250 mT 磁场作用下, $Ni_{80}Fe_{20}$ 薄膜中磁畴随时间变化的图像及其相应的 FFT 变换[59], 以及黄虚线处的线轮廓在不同时间延迟下的振荡曲线; (d) Mn-Ni-Ga 合金体系中不同时刻的磁畴结构及其动力学曲线[122]; (e) 射频电流频率 $f_{ex} = 101.5$ MHz、电流密度 $j = 2.9 \times 10^{11}$ A/m² 的条件下, 时间分辨的磁涡旋核心沿 x 轴的运动, 说明其核心朝着平衡位置进行阻尼正弦运动[63]; (f) 利用纳秒 ULTEM 研究的 $Co_9Zn_9Mn_2$ 中斯格明子的可重复的演化过程[62]

Fig. 5. Applications of ultrafast Lorentz transmission electron microscope: (a) Demagnetization process of a magnetic vortex observed by ULTEM[121]; (b) temporal dynamics of the Skyrmion lattice parameters in FeGe nanosheets[14]; Skyrmion-Skyrmion distance (d/d_0, green dots, left axis), orientation angle (red dots, right axis) and magnetization strength (I/I_0, blue dots, left axis) at approximately 1.5 and 5 mJ/cm² fluence, top and bottom panels, respectively; (c) time-resolved images of magnetic domain evolution in a $Ni_{80}Fe_{20}$ thin film under an applied magnetic field of 250 mT along the y direction ($\alpha = 3°$, $\beta = 0°$), together with the corresponding FFT spectra; the oscillatory line profiles extracted along the yellow dashed line at different time delays are also shown[59]; (d) magnetic domain configurations in a Mn-Ni-Ga alloy system at different time moments and the corresponding dynamical curves[122]; (e) time-resolved motion of the magnetic vortex core along the x axis driven by a radio-frequency current with an excitation frequency of $f_{ex} = 101.5$ MHz, current density $j = 2.9 \times 10^{11}$ A/m², demonstrating a damped sinusoidal motion of the vortex core toward its equilibrium position[63]; (f) repeatable evolution process of Skyrmions in $Co_9Zn_9Mn_2$ studied using nanosecond LTEM[62].

5D-STEM 能以极高的时空分辨率观测纳米材料的超快动力学行为, 可捕获光激发下晶格结构、局域应变、相变及畴结构的瞬态变化, 定量映射纳米尺度下的时间依赖应变场, 对研究超快光控应变、纳米声波传播等至关重要, 还可应用于结构相变、介电响应与磁动力学等超快非平衡现象研究.

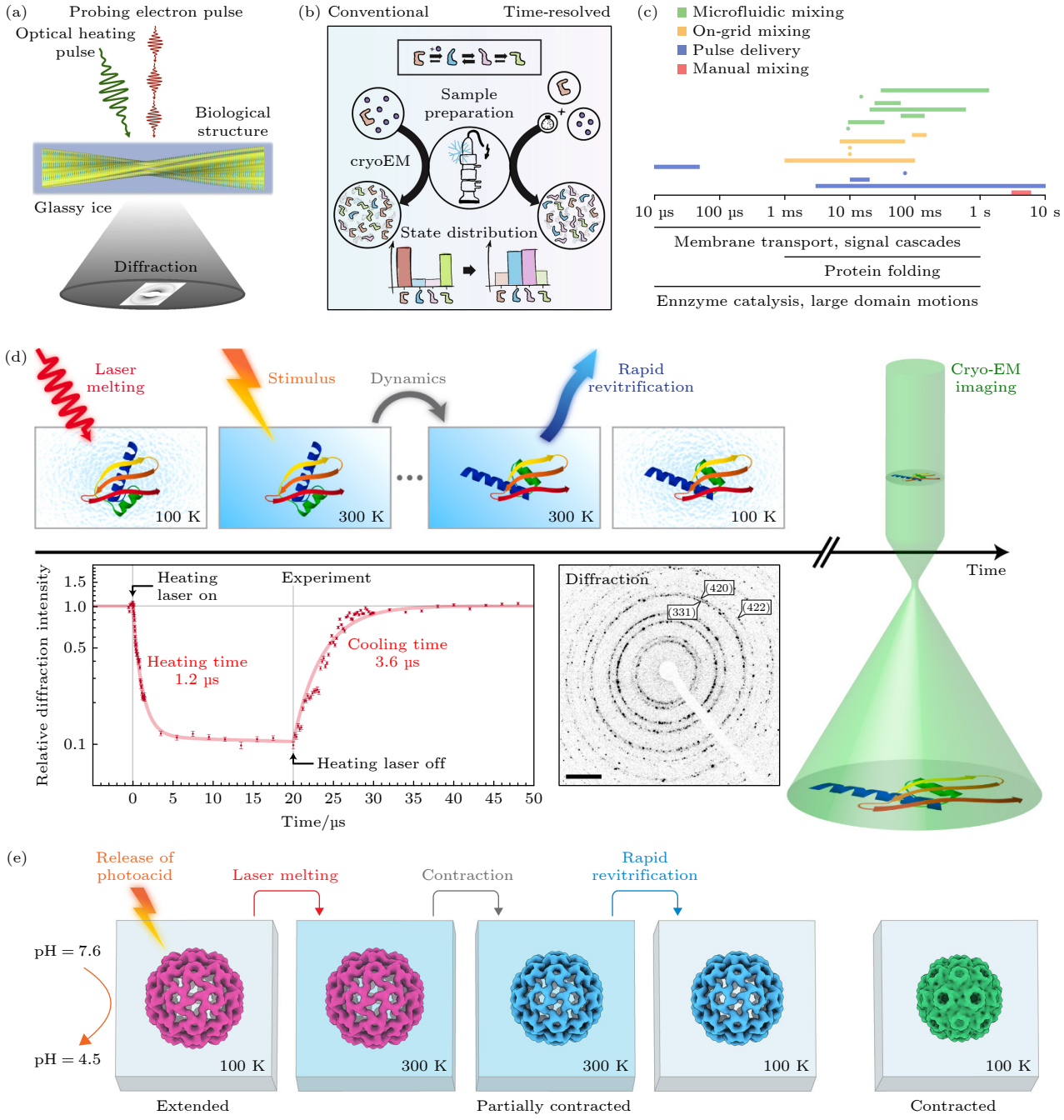


图 6 时间分辨冷冻电镜相关实验原理、方法学进展、时间尺度及典型应用示意 (a) 生物样品的四维 cryo-EM 实验示意图[123]; (b) 时间分辨 cryo-EM 的方法学发展及其在一系列生物学问题中的应用[68]; (c) 时间分辨 cryo-EM 技术可实现的时间尺度概览及所用技术类别[65], 图中标注了生物大分子运动的典型时间尺度; (d) 时间分辨冷冻电镜中蛋白质原位加热熔化、刺激诱导构象变化与快速再玻璃化的原理及样品被石墨烯夹层封装的几何构型示意[125], 插图为微秒激光脉冲照射下样品对应衍射峰强度随时间的变化曲线; (e) 豇豆褪绿斑驳病毒 (CCMV) 收缩过程的微秒时间分辨冷冻电镜研究的实验设计[126], 示例了病毒从玻璃态到经过激光束辐照的快速熔化态再到关闭激光后的再玻璃态的全过程

Fig. 6. Schematic diagrams of experimental principles, methodological advances, time scales, and typical applications of time-resolved cryo-EM: (a) Schematic of a four-dimensional (4D) cryo-EM experiment for biological samples[123]; (b) methodological development of time-resolved cryo-EM and its applications in addressing a series of biological questions[68]; (c) overview of the achievable time scales and corresponding technical categories of time-resolved cryo-EM[65], where the typical time scales of biomacromolecular motions are labeled in the figure; (d) schematic of the experimental principle (*in-situ* heating-induced melting of proteins, stimulus-triggered conformational changes, and rapid re-vitrification) and sample geometry (encapsulated between graphene layers) in time-resolved cryo-EM[125], where the inset shows the temporal evolution of the corresponding diffraction peak intensity of the sample under microsecond laser pulse irradiation; (e) experimental design of a microsecond time-resolved cryo-EM study on the contraction process of cowpea chlorotic mottle virus (CCMV)[126]; this example illustrates the entire process of the virus from the glassy state, to the rapidly melted state upon laser irradiation, and back to the re-vitrified state after laser shutdown.

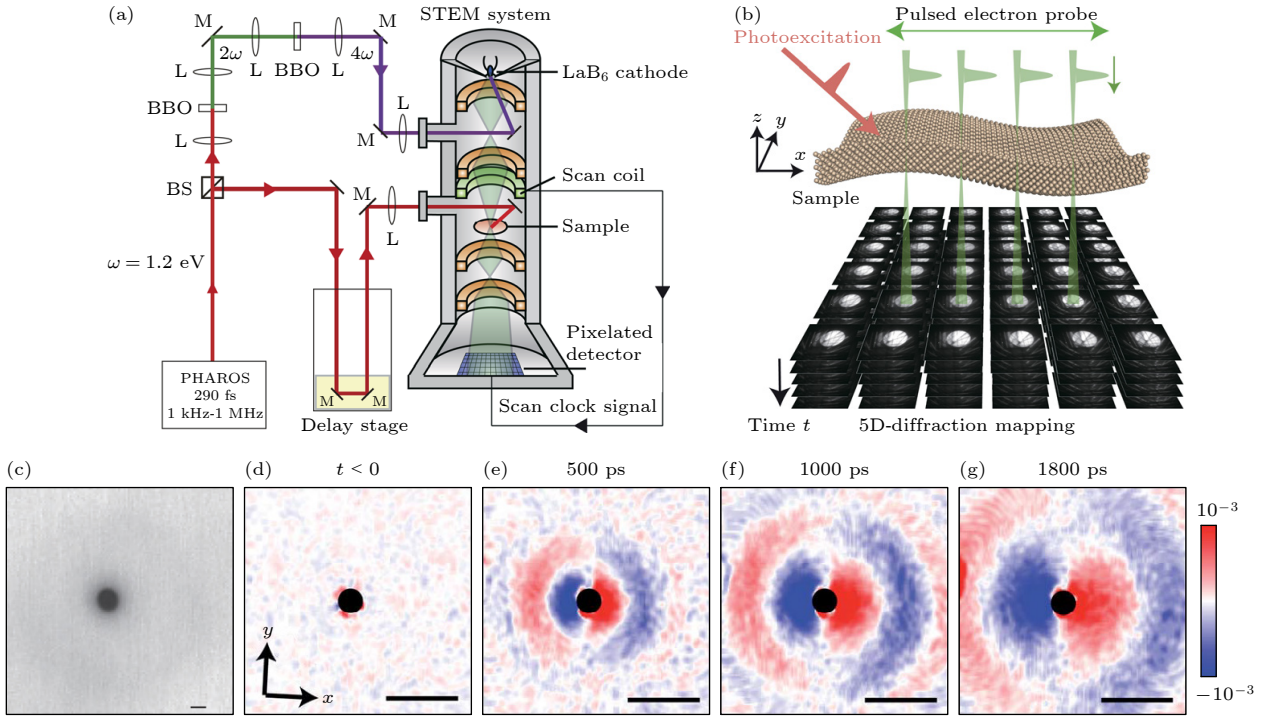


图 7 五维扫描透射电子显微技术及相干声子研究 (a), (b) 5D-STEM 系统示意图, 图示 5D-STEM 的核心组件, 包括飞秒电子源、四维 (空间+时间) 探测器阵列及同步泵浦激光系统[72]; (c) 硅薄膜的明场 STEM 成像; (d)—(g) 相干声学声子传播的快照, 通过时间分辨的 5D-STEM 技术捕捉硅薄膜中相干声学声子的传播过程[72]

Fig. 7. Five-dimensional scanning transmission electron microscopy and studies on coherent phonons: (a), (b) Schematic of the 5D-STEM system, where the key components of 5D-STEM are illustrated, including the femtosecond electron source, four-dimensional (spatial + temporal) detector array, and synchronized pump laser system[72]; (c) bright-field STEM imaging of the Si thin film; (d)–(g) snapshots of coherent acoustic phonon propagation in silicon thin films captured by time-resolved 5D-STEM technique[72].

通过持续改进电子源、探测器及同步控制系统等核心组件, 5D-STEM 的时空分辨率与探测灵敏度将进一步提升, 为纳米材料科学展现出新的研究前景.

2.3.5 时间分辨电子能量损失谱

晶格与电子系统的动态多模态探测是解耦各类自由度之间相互作用的有力手段, 这种耦合往往导致材料呈现新奇非平衡态与瞬态特性[129–131]. 从能量维度来看, 配备电子能量损失谱仪的 UTEM 可用于重构超快电子动力学过程, 例如赤铁矿中的元素电荷转移[132]、碳纳米管[133] 和氮化硼纳米管[134] 中等离激元峰的红移, 其时间分辨率可达飞秒量级. 凭借亚电子伏量级的能量分辨率及覆盖数百电子伏的探测范围, 时间分辨电子能量损失谱技术 (time-resolved electron energy-loss spectroscopy, Tr-EELS) 已应用于从集体电子振荡到电子动力学的多项研究.

在过渡金属氧化物研究中, Su 等[132] 利用 EELS 中 Fe L_3 边的特征, 在赤铁矿中成功区分了 Fe^{4+}和 O 空穴态, 发现 Fe^{4+}空穴的寿命 (几 ps) 远短于后者, 从原子尺度解释了其在不同光波长下光催化性能的差异, 展示了元素选择性研究电荷动力学的潜力 (图 8(a)); 在碳材料研究中, 该技术揭示了石墨中相干声子引发晶格周期性变化[135], 进而导致其等离激元峰在 EELS 谱中发生强度与位置的动态变化 (图 8(b)). 进一步地, 通过对比 Low-Loss 与 Core-Loss 的信号, 解析了皮秒尺度和纳秒尺度的不同物理机制: 皮秒尺度的 σ*边发生红移, 本质源于未占据空能带下移与体系带隙收缩, 而纳秒尺度的变化则对应热效应导致的面内键长伸长与热无序[136] (图 8(c)); 在单壁碳纳米管等一维材料中, Tr-EELS 通过观测 π 与 π+σ 等离激元峰的动态红移现象 (图 8(d)), 结合德鲁德模型, 成功区分了电子驱动与声子驱动的晶格动力学[137]. Tr-EELS 结合 UTEM 的时间分辨能力, 可根据探测的能量损失区域以不同时间分辨率追踪电子动力学过程.

2.3.6 光诱导近场电子显微术

光诱导近场电子显微术 (photon-induced near-field electron microscopy, PINEM) 是一种结合超

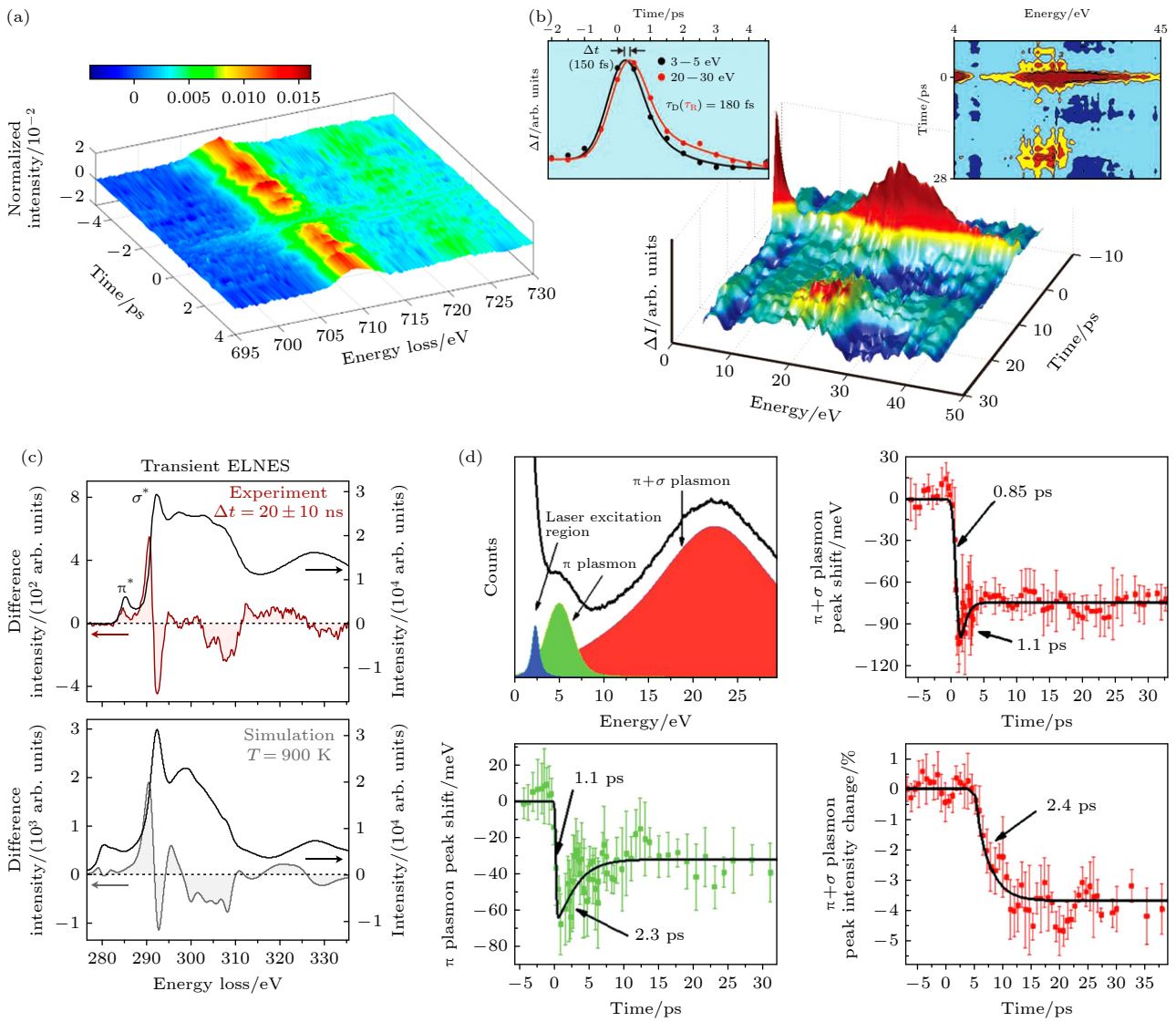


图 8 超快电子能量损失谱技术和元素价态分析 (a) α-Fe_2O_3 的 FEELS 时间-能量-振幅动态图[132]; (b) 石墨的三维强度-能量-时间 EELS 图, 显示了不同时间延迟下光谱变化的时间-能量-振幅动态图[135]; (c) 石墨的纳秒时间分辨 EELS[136]; (d) 单壁碳纳米管的飞秒 EELS[137]

Fig. 8. Ultrafast electron energy loss spectroscopy and elemental valence analysis: (a) 3D intensity-energy-time dynamics of the overall Fe L-edge FEELS[132]; (b) three-dimensional intensity energy time EELS plot for graphite; the plot shows the time energy amplitude evolution of spectral changes at different time delays[135]; (c) nanosecond-resolved core-loss spectroscopy for graphite[136]; (d) femtosecond EELS of single-walled carbon nanotubes[137].

快激光与 TEM 的前沿技术, 能够直接观测光与物质相互作用中的近场动态过程, 并解析局域光场的时空演化行为, 核心物理基础是光-电子能量耦合: 飞秒激光脉冲激发样品产生局域增强的近场光场 (表面等离激元、声子极化激元等), 近场与透射电子束发生非弹性相互作用导致电子能量增益或损失, 通过 EELS 或能量过滤成像技术分析电子的能量分布, 反演出样品局域光场的空间分布及其动态演化信息. Barwick 等[138] 通过实验证明, 在满足能量-动量匹配的条件下, 自由电子可通过纳米结构的介导与光学近场发生相互作用, 并由此开发了 PINEM.

在典型的 PINEM 实验中, 电子穿过光学近场区域时会吸收或损失整数倍的光子能量, 导致其能谱的零损失峰两侧出现等间距的增益峰和损失峰 (图 9(a) [138]); 而通过设置能量过滤狭缝选择特定能量增益的电子进行成像, 可实现对光学近场空间分布的纳米尺度可视化. PINEM 已被广泛应用于物理、化学、材料及生物等领域的超快近场动力学研究, 可提供纳米-飞秒量级分辨率的高衬度图像[139–143], 能有效增强对蛋白质囊泡[144]、细胞器[145]、石墨烯层阶[146] 等弱散射衬度结构的成像效果, 还可用于研究各类极化激元的产生、传播与

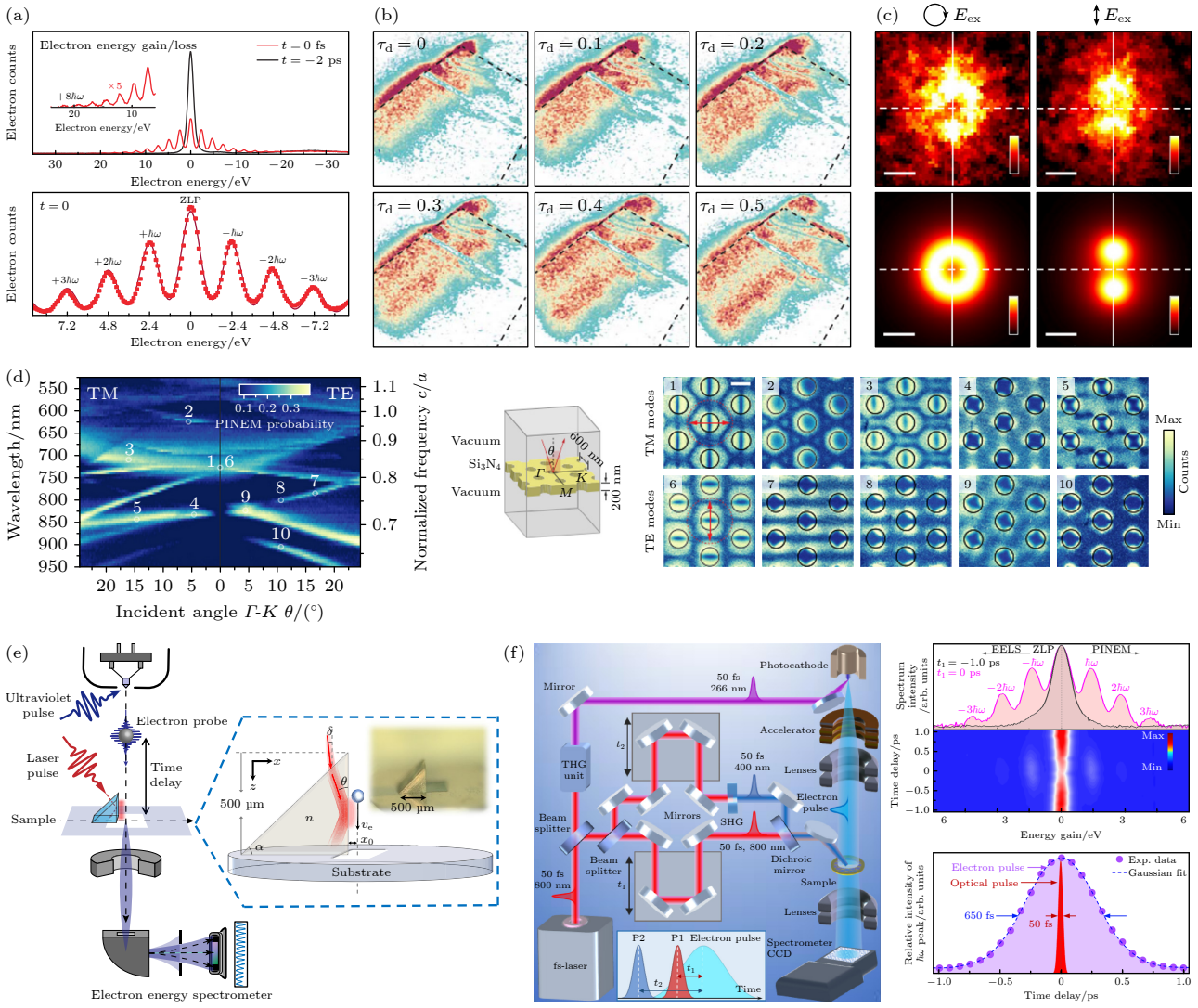


图 9 在 UEM 中的电子-光子相互作用与量子调控 (a) 光子参与及未参与相互作用的电子能谱[138]; (b) 六方氮化硼 (hBN) 中的声子-极化激元[148]; (c) 电子涡旋束[157]; (d) 电子与光子晶体光学布洛赫模式的相互作用[166]; (e) 光波与自由电子波函数之间的共振相位匹配[168]; (f) 双色 PINEM 实验[169]

Fig. 9. Electron-photon interaction and quantum manipulation in UEM: (a) Electron energy spectra for interaction with and without photons[138]; (b) phonon-polariton in hBN[148]; (c) electron vortex beam[157]; (d) electrons interact with the optical Bloch mode of photonic crystals[166]; (e) resonant phase-matching between a light wave and a free-electron wavefunction[168]; (f) two-color PINEM[169].

衰减动力学, 例如观察金膜中的表面等离激元斯格明子[147]和六方氮化硼中的声子极化激元[148](图 9(b)), 甚至可在可见光至远红外光谱范围内以毫电子伏特量级的能量分辨率研究不同能量的极化激元[149]. 与时间分辨光发射电子显微学 (TR-PEEM) 和扫描近场光学显微学 (TR-SNOM) 相比, PINEM 基于透射电子分析, 能研究埋藏界面处的极化激元行为, 是一种非侵入式检测方法[150].

自由电子-光子的相互作用为在阿秒尺度上调控电子波包提供了新途径[151], 研究者已成功实现对电子波包的强纵向与横向相位调控[147,152], 展示了光驱动的 Ramsey 型干涉测量[153–155]、多色非线性相互作用[156]乃至产生电子涡旋束等成果[157,158](图 9(c)), 经过相干整形的电子束有望应用于原子级精度的量子测量[159–161]、相位衬度成像[162]、电子光学像差校正[163–165]等领域. 为增强自由电子-光子的相互作用强度, 光学谐振腔被广泛用于增强光场局域与光-物质耦合效率, 2020 年, Wang 团队与 Kfir 团队分别通过光子晶体的光学布洛赫模式[166](图 9(d))和介质微球腔的回音壁模式[167]显著提升了电子-光子耦合强度. 除了增强光场强度外, 在满足相位匹配条件下延长电子与光场的相互作用距离也能有效增强耦合效率. Wang 团队[168]利用全反射产生的倏逝光场与电子束相互作用, 获得了

带宽超过 1700 eV 的电子能量梳状谱 (图 9(e)). 通过协同提升光场强度与作用距离, 基于集成光子学结构和介质激光加速器的方案已实现了对连续电子束的有效操控.

另一方面, PINEM 技术在提升时间分辨率方面取得了关键突破. Fu 等[169] 提出新型双色超快泵浦-探测 PINEM 方案, 利用飞秒激光与电子脉冲的相互作用产生脉宽仅约 50 fs 的探测电子脉冲, 将 UTEM 的时间分辨率提升了一个数量级, 并在约 50 fs 和几纳米的时空尺度下, 揭示了单个 Mott 绝缘体 VO_2 纳米线中绝缘体-金属相变的超快介电响应动力学 (图 9(f)).

PINEM 技术通过灵活调控激光参数, 为自由电子的精确操控提供了多样化手段, 实现了飞秒-纳米尺度的光学近场动态成像, 其应用已拓展至 SEM 和点投影显微镜中的低能电子-光子相互作用研究[170]. 该技术的应用前景广阔, 可用于界面局域电磁场的时空成像、纳米光子学与等离激元现象可视化等研究, 融合超快光学与电子显微的特点, 在保持电子显微镜空间分辨优势的同时, 将时间精度推进至飞秒-阿秒尺度, 显著推动了纳米光子学、催化科学、量子材料等领域的研究进展, 未来应用有望扩展至极端物理条件、生命科学等交叉前沿领域.

2.3.7 阿秒电子显微镜

阿秒电子显微镜 (attosecond electron microscope, AEM) 是一类新兴的 UTEM 技术, 其核心在于将电子显微镜的时间分辨能力拓展到阿秒时间尺度 (10^{-18} s). 其核心思想是: 以光学场相位作为内禀时间参照, 对自由电子波函数施加相干相位调制, 在电子态中引入与光学周期严格锁定的时间结构; 并通过能量分辨的电子谱学测量获取能量信息, 同时借助相位敏感的相干干涉或层析读出提取瞬时相位与延迟信息, 从而实现对光学亚周期电磁响应和电子动力学的定量重构.

AEM 的发展源于超快与阿秒激光科学、超快电子显微术与电子衍射技术两大领域的交汇, 在相干的自由电子-光相互作用过程中, 光学场相位被编码到电子波函数中, 经自由空间色散传播后演化为时间域中的聚束, 生成具有阿秒时间结构的电子波包, 使电子显微镜从传统的静态或准静态成像手段, 拓展到对亚光周期瞬态过程的直接探测. 例如, Feist 等[161] 在电子显微镜束线中建立了自由电子量子态的相干光相位调制, 指出相干叠加态在传播过程中会演化为阿秒电子脉冲串, 为 AEM 奠定了概念和实验基础. AEM 的独特之处在于可在单一平台上同时记录亚光周期时间信息与纳米至晶格尺度空间信息, 弥补了传统电镜缺乏超快时间基准、标准超快光谱空间分辨率受限的不足. AEM 的核心工作流程分为两步: 首先通过激光驱动调制膜或纳米结构, 对电子束施加周期性相位/能量调制, 产生光子能量间隔的能谱边带, 将透射电镜的电子束“光学压缩”成与光周期同步的阿秒脉冲串; 再利用该电子探针在光周期内对样品进行可延迟采样, 通过扫描光激发与电子探针的相对延迟, 测量空间分辨的电子能谱随时间延迟的变化, 定量重构近场在亚光学周期尺度上的时空演化.

AEM 的发展历史可以沿着一条清晰而连贯的技术脉络加以梳理: 从自由电子-光相互作用中的量子相干调制与阿秒脉冲串的形成, 发展到 TEM 平台中的阿秒计量学与亚周期成像, 再到干涉式振幅与相位读出方法, 以及面向结构化电子波函数的进一步拓展. 2015 年 Feist 等[161] 报道了 UTEM 中通过近场耦合相干调制电子脉冲, 建立了从电子相干调制到阿秒时间结构的演化路径 (图 10(a)); 2017 年 Priebe 等[171] 利用锁相光学近场相互作用推进了对自由电子量子态的相干控制, 引入 SQUIRRELS 层析技术重构电子密度矩阵和维格纳函数; 2018 年 Morimoto 和 Baum[172] 将相关概念扩展到阿秒电子脉冲串的衍射和显微术, 实现了倒易空间中精确的相位/延迟敏感测量 (图 10(b)); 2020 年 Ryabov 等[173] 利用连续波激光调制连续电子束, 生成亚光周期电子脉冲序列, 在连续束 TEM 中实现了阿秒尺度的计量表征 (图 10(c)); 2023 年 Nabben 等[174] 在传统 TEM 构型中展示了亚光周期 AEM 成像/计量学, 实现了低至 1.9 as 的相位分辨率和 480 as 的有效时间分辨率 (图 10(d)). 在读出方面, Gaida 等[175] 提出并实验验证了类似外差探测的 AEM 方案 (FREHD), 实现对振幅和相位信息的相位敏感恢复 (图 10(e)). 与此同时, AEM 方法学还向结构化电子波函数拓展, Fang 等[176] 将光学螺旋相位印刻到电子束纵向动量调制中, 形成了“电子线圈”型结构化态, 为阿秒时间分辨与手性电子束工程相结合提供了新路径 (图 10(f)).

目前 AEM 仍面临核心挑战: 在阿秒尺度下实现原子级的可控探测与操控难度大, 时空性能间存在权衡, 在超快化学反应和电荷转移的直接观测方面, 还受限于分辨率、损伤、信噪比等因素. 未来 AEM 的发展取决于三方面: 一是通过调制

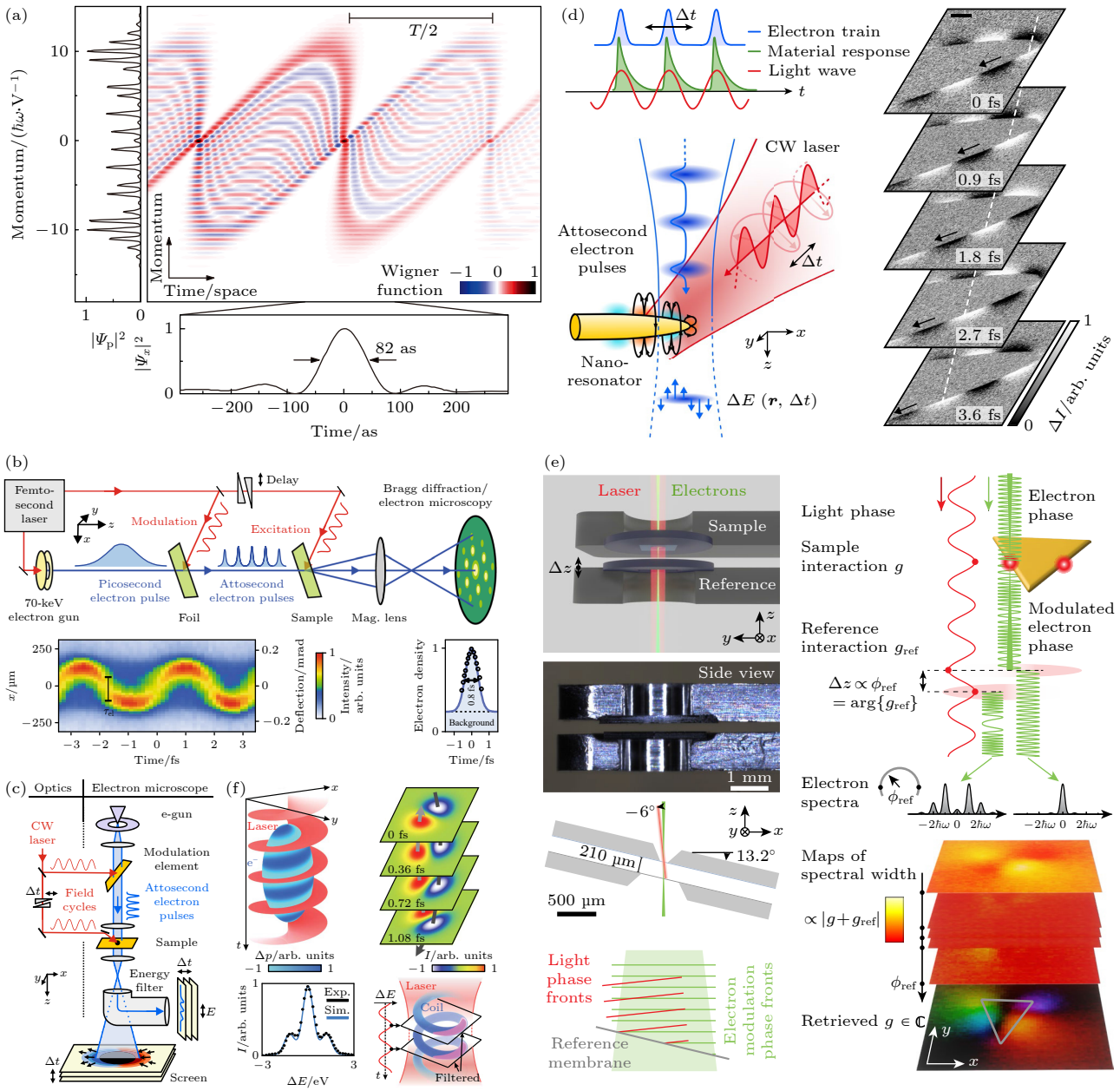


图 10 AEM 的发展与代表性应用 (a) 维格纳函数的动量投影, 显示激光诱导的光谱调制[161]; (b) 在介质膜处产生和表征激光压缩的阿秒电子脉冲串[172]; (c) 阿秒分辨率电子显微镜的概念和实验布局[173]; (d) 单光周期分辨成像; 能量变化图 $\Delta E(r, \Delta t)$ 提供了场周期对比度, 并产生了具有纳米-阿秒精度的时间序列增益/损失图像[174]; (e) 高空间分辨率的自由电子零差检测[175]; (f) 阿秒电子线圈; 光学涡旋印刻出空间-时间依赖的动量偏移 Δp; 自由空间传播形成手性线圈, 而平面波阿秒选通结合延迟扫描实现了三维重建[176]

Fig. 10. Development of AEM and representative applications: (a) Momentum projection of the Wigner function showing laser-induced spectral modulations[161]; (b) generation and characterization of laser-compressed attosecond electron pulse trains at a dielectric foil[172]; (c) concept and experimental layout of attosecond-resolution electron microscopy[173]; (d) light-cycle-resolved imaging within one optical cycle; energy-change maps $\Delta E(r, \Delta t)$ provide field-cycle contrast and yield time-sequenced gain/loss images with nanometre-attosecond precision[174]; (e) high-spatial-resolution FREHD (free-electron homodyne detection)[175]; (f) attosecond electron coils; an optical vortex imprints a space-time dependent momentum shift Δp; free-space propagation forms a chiral coil, and planar-wave attosecond gating with delay scanning enables 3D reconstruction[176].

门控、干涉读出等方法提升对比度、抑制背景; 二是加强相位锁定、漂移控制等稳定性与计量学严谨性, 推动从原理验证向定量工具转变; 三是集成片上纳米光子结构与计算显微镜及 AI 重构, 开发高通量高相干探针. 尽管商业化面临技术成熟度、成本与可靠性挑战, 但 AEM 仍被视为超快物质动力学的关键探测手段之一, 其从产生阿秒电子结构迈向亚周期成像的转变, 有望在量子材料、纳米光子学、光化学及超快能量转换等领域引发范式变革.

2.4 小 结

UTEM 显著拓展了传统透射电子显微镜对动态过程的观测能力, 为物质动态行为的原子尺度解析提供了不可替代的实验手段. 目前, 国内外开展 UTEM 研究的知名团队主要包括: 美国加州理工学院已故 Ahmed H. Zewail 教授团队以及由其学术体系发展而来的 Mohamed Th. Hassan 教授团队、美国布鲁克海文国家实验室 Yimei Zhu 教授团队、美国阿贡国家实验室 Martin Holt 教授团队、美国明尼苏达大学 David J. Flannigan 教授团队; 日本理化学研究所 Kazutomo Ishizaka、Takahiro Shimojima 等研究团队; 韩国 KAIST Oh-Hoon Kwon 教授团队; 以色列理工学院 Ido Kaminer 教授课题组; 瑞典皇家理工学院 Jonas Weissenrieder 教授团队; 德国康斯坦茨大学 Peter Baum 教授团队、马克斯-普朗克研究所 Claus Ropers 教授课题组以及奥尔登堡大学 Sascha Schäfer 教授团队; 瑞士洛桑联邦理工学院 Fabrizio Carbone 教授团队; 中国科学院物理研究所李建奇教授团队、中国科学院上海光学精密机械研究所王康鹏研究员团队、中国科学院西安光学精密机械研究所惠丹丹研究员团队、上海交通大学仲冬平教授团队以及南开大学付学文教授团队等. 这些团队利用 UTEM 技术, 在飞秒至皮秒时间尺度及纳米级空间分辨率下, 揭示了材料动态结构演化与超快能量转换的微观机制, 研究对象涵盖低维量子材料[177]、钙钛矿光伏材料[98]、拓扑绝缘体[178] 和生物大分子[18] 等体系, 观测到固体材料中实时的晶格动力学[57]、钙钛矿材料光照下的超快晶格畸变[97] 等关键物理现象. 这些成果为理解物质的超快响应机制提供了直接实验证据, 有力推动了新能源、量子器件等相关领域的发展. 随着阿秒电子源、人工智能驱动数据分析以及极端环境样品杆等技术的突破, UTEM 将进一步深化物理、化学与生命科学的交叉融合, 推动材料设计、能源转换与生物医学等领域的研究范式变革, 成为人类探索微观世界超快动态过程的核心显微镜之一.

3 超快扫描电子显微镜技术

3.1 技术概述

随着半导体光电子元器件向集成化、高速化和小型化发展, 对器件检测设备和材料表征技术的性能要求不断提升. 半导体微纳器件的本征材料多为量子点、二维材料等微纳尺度半导体材料[179], 其功能实现依赖于微纳界面处载流子在外场作用下的动力学与能量转换过程, 如激发态电子与空穴的产生[180–182]、分离、扩散、输运、俘获、能量弛豫[183]、非辐射复合以及复合发光[184] 等, 这些过程通常发生在飞秒到纳秒的时间尺度以及纳米到微米的空间尺度, 常见于光-电[185]、电-光与光-光转换等过程[185].

要深入理解半导体器件在真实工作环境下的微观载流子动力学及其物理机制, 需要借助兼具时间分辨与空间定位能力的表征手段, 在原位条件下直接观测器件界面处载流子的动力学过程, 从而建立微观动力学行为与器件宏观性能之间的内在联系. 在这一背景下, 面向载流子超快动力学研究的高时空分辨表征技术不断发展, 其中, Ahmed H. Zewail 团队[186] 于 2010 年在加州理工学院提出的超快扫描电子显微学 (scanning ultrafast electron microscopy, SUEM) 是代表性技术之一. 该技术在传统扫描电子显微镜基础上引入超快动态探测能力, 使表面与近表面区域的非平衡过程能够在纳米尺度下被直接追踪[88]; 目前报道的 SUEM 系统时间分辨率可达约 500 fs, 空间分辨率可达 5—10 nm[187].

3.2 工作原理

与 UTEM 类似, SUEM 同样建立在泵浦-探测时间分辨框架之上, 如图 11 所示[186,188], 但其关键区别在于: 探测电子束并不穿透样品, 而是被聚焦为纳米尺度电子探针并逐点扫描样品表面; 相应的瞬态信息主要通过激发表面产生的二次电子信号进行读取, 并最终以扫描图像形式重建. 在典型的 SUEM 系统中, 一路飞秒激光用于激发样品产生电荷动力学, 另一路同步的紫外飞秒激光用于触发电子枪产生飞秒电子进行扫描成像, 通过调节延迟时间并采集不同延迟下的差分图像, 即可获得表面与近表面区域超快动力学的时空演化信息. 从电子光学角度看, TEM 以平行或会聚电子束穿透电子透明样品, 并通过物镜与投影镜系统在像平面或衍射平面形成图像; SEM 则以高度会聚的电子束在样品表面逐点扫描, 图像由各扫描位置产生的二次电子、背散射电子或其他信号重建而成. 前者更擅长获取内部结构和晶体学信息, 后者则更强调表面形貌及近表面物性分布. SUEM 正是在 SEM 逐点扫描框架下引入超快时间维度, 因此天然具有表面敏感、实空间直观和器件兼容性强的特点.

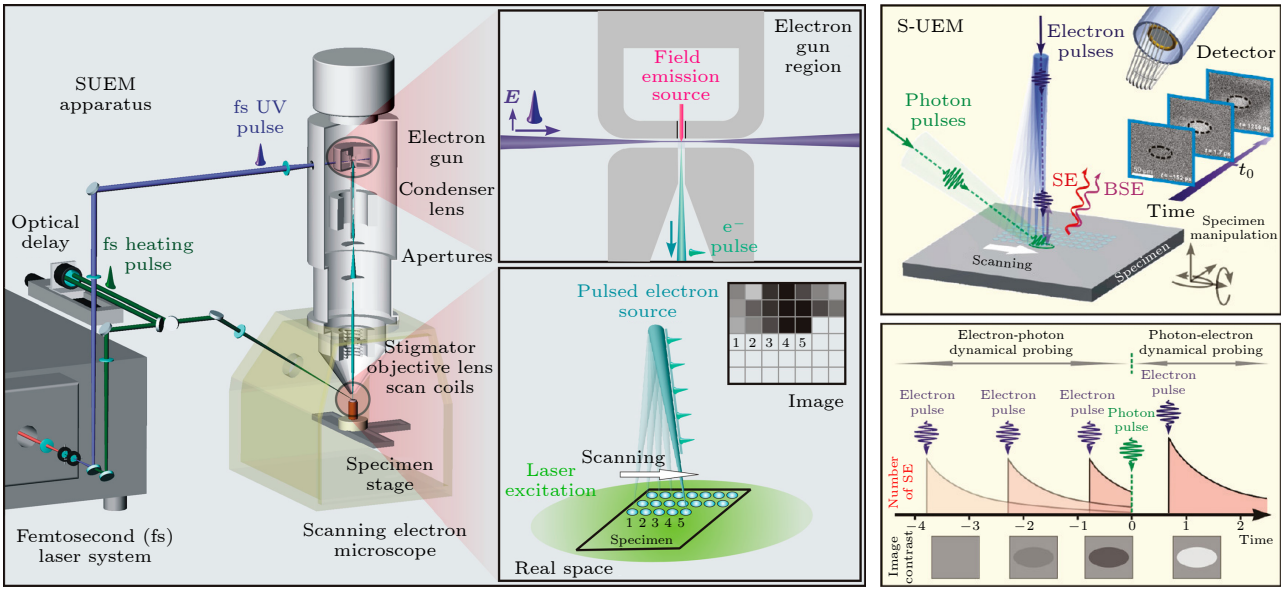


图 11 SUEM 的工作原理示意图[186,188]

Fig. 11. Schematic diagram of the working principle of ultrafast scanning electron microscopy[186,188].

SUEM 的成像衬度本质上来源于光生载流子对二次电子发射的调制. 电子被激发到高能态后更易逸出表面, 使受激区域呈现亮衬度; 空穴富集则会增强散射并降低二次电子产额, 从而形成暗衬度. 因此, 图像灰度可用于表征局域载流子分布的变化. 由于二次电子逃逸深度极浅 (通常小于 10 nm), SUEM 对表面与近表面电荷分布具有高度敏感性, 可在实空间中区分并追踪电子与空穴的动态演化过程.

3.3 载流子动力学中的研究与应用

凭借二次电子信号对表面与近表面电荷分布的高灵敏度, SUEM 特别适用于研究半导体及低维材料中的光生载流子时空演化. 其应用大体可归纳为两类: 一类是异质结、结区与器件界面中的跨界面电荷分离与迁移; 另一类是均一材料表面或低维晶体中的面内扩散、各向异性输运与复合过程.

3.3.1 材料界面载流子动力学

SUEM 可有效表征光电材料界面电荷转移的超快动力学过程, 以硅 p-n 结为例[8], 该技术可清晰成像光生载流子在实空间内的激发、传输与复合过程 (图 12(a)), 激发后纯 n 型与纯 p 型硅均出现亮衬度, 且 p 型硅因吸收截面更大而衬度更强、范围更广. p-n 结区的动力学过程可分为初始激发、电荷传输与分离、最大化分离、复合弛豫 4 个阶段, 更高的激发能量密度会加速弛豫过程, 且载流子动力学在光照区域内存在空间不均匀性, 光斑中心的载流子复合速率快于边缘区域. SUEM 还被应用于 Si/Ge 异质结[189]、p-Si/SiO_2 界面[190]、InGaAs/InP 雪崩光电二极管[191]、MoS_2 厚度异质结[192] 等多种材料界面的载流子动力学研究, 通过时空分辨成像清晰揭示了光生载流子跨界面扩散、时空演化的关键特征. 图 12(b) 直观呈现了 Si/Ge 异质结的载流子跨界面迁移行为, 清晰显示 Si 侧、Ge 侧及界面处激发时, 载流子的扩散方向与衬度变化规律, 其结果与异质结内建电势和能带偏移的载流子分布特征一致[189]; 图 12(c) 记录了 p-Si/SiO_2 界面在不同泵浦-探测延迟时间下的 SUEM 图像, 同时量化呈现了不同功率密度下环形区域的信号随延迟时间的动态变化[190]; 图 12(d) 所示为 InGaAs/InP 雪崩光电二极管在不同延迟时间的成像结果, 并对比了暗、亮衬度区域二次电子强度的时间演化差异[191]; 图 12(e) 则在不同时间延迟下捕捉到不同厚度 MoS_2 界面的载流子分布, 通过衬度差异直接区分了光激发下过量电子与空穴的空间位置[192]. 综上, SUEM 在界面研究中的核心优势在于能够将内建电场、能带偏移及局域二次电子衬度直接关联起来, 从而在实空间中追踪光生载流子的分离、跨界面迁移及复合路径. 相较于传统时间分辨光谱获得的平均信息, 适于揭示异质结和功能器件中空间不均匀的超快界面过程.

3.3.2 材料表面载流子动力学

若将研究对象由界面转向均一材料表面, SUEM 的优势则主要体现在对面内载流子扩散、晶

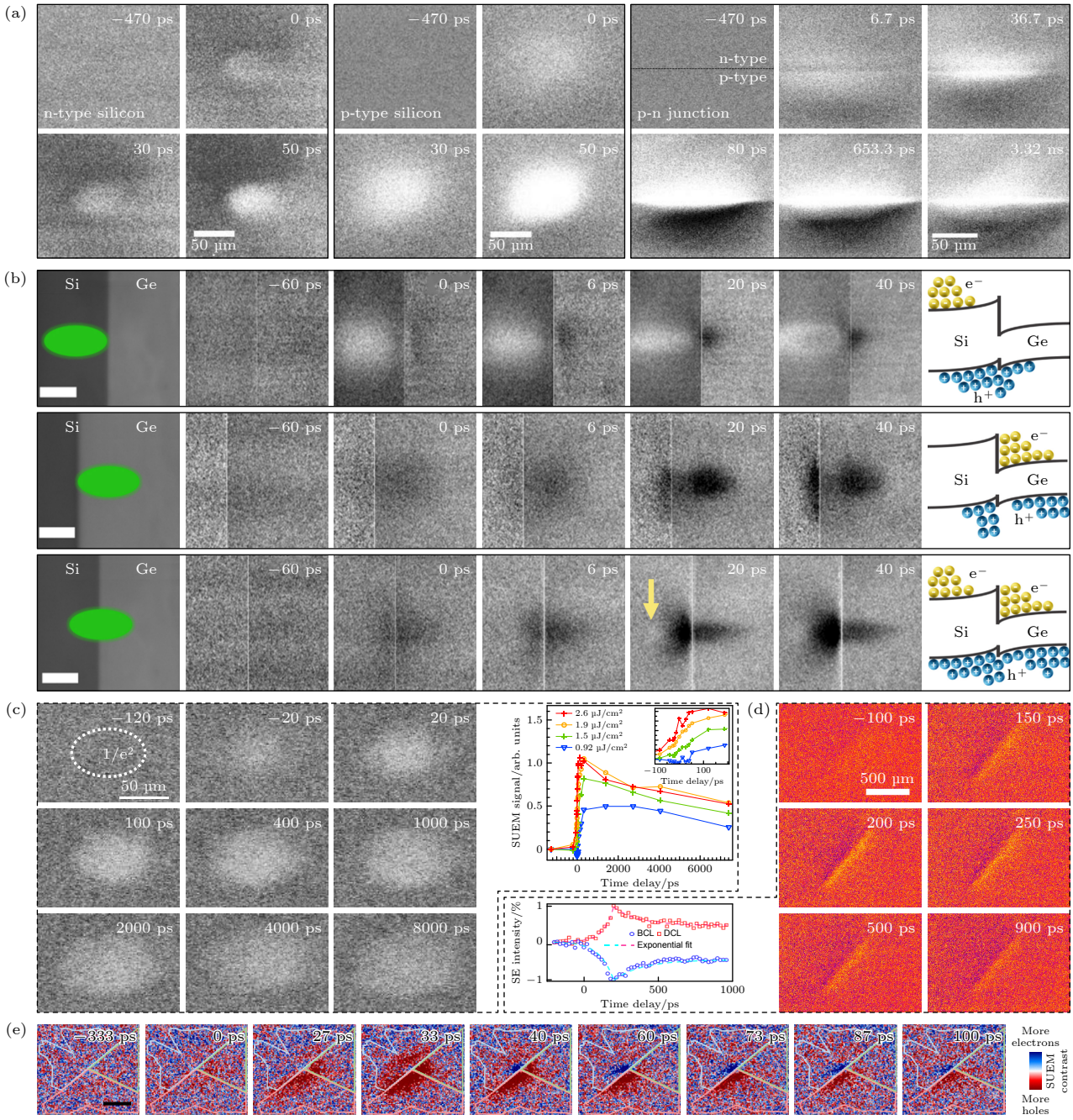
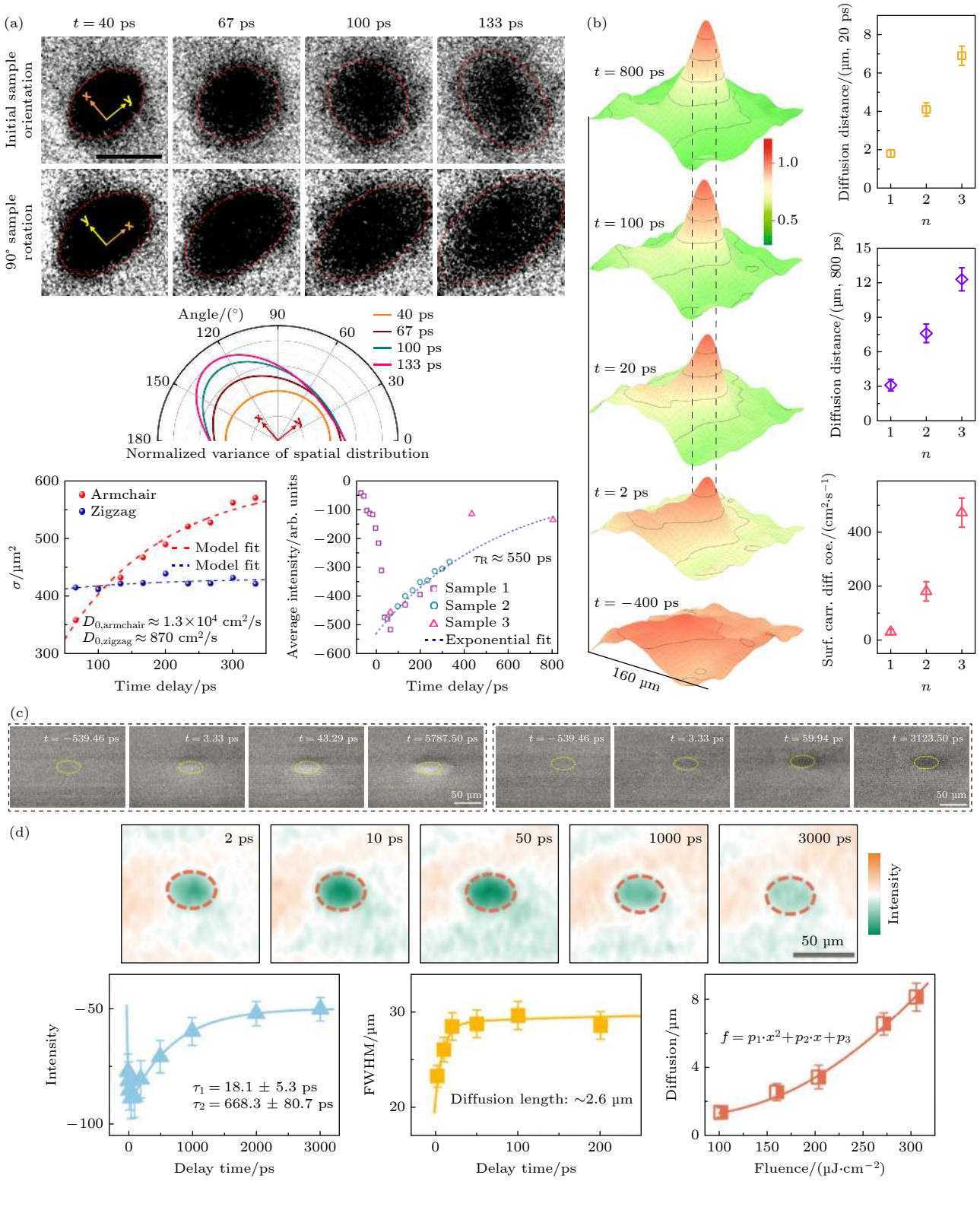


图 12 使用 SUEM 进行的界面载流子动力学研究 (a) 有无 p-n 结情况下的动力学[8], 硅 n 型和 p 型样品在没有结的情况下作为独立晶片进行研究; (b) 在 Si/Ge 异质结附近拍摄的 SUEM 对比度图像, 绿色椭圆表示光泵浦光束的位置[189]; (c) 左图为 p-Si/SiO_2 界面的不同泵浦-探测时间延迟的 SUEM 图像, 右图为环形区域中的 SUEM 信号在不同功率密度下随延迟时间的变化[190]; (d) 右图为 GaAs/InP 雪崩光电二极管 (APD) 不同延迟时间的 SUEM 图像; 左图为暗对比度区域 (DCL) 与亮对比度区域 (BCL) 的二次电子强度随延迟时间的变化[191]; (e) MoS_2-Au 界面不同的时间延迟对比图像, 具有相应的 MoS_2 薄片轮廓, 蓝色和红色的对比分别为光激发下过量的电子和空穴, 比例尺为 50 μm[192]

Fig. 12. SUEM studies of interfacial carrier dynamics: (a) Dynamics with and without the p-n junction. Silicon n-type and p-type samples without a junction were studied as individual wafers. (b) SUEM contrast images near a Si/Ge heterojunction[189]. (c) SUEM images of the p-Si/SiO_2 interface at different pump-probe time delays (left), SUEM signals in annular regions as functions of delay time under varying power densities (right) [190]; (d) SUEM images of an InGaAs/InP avalanche photodiode (APD) at different delay times (right), secondary electron intensity variations of the dark-contrast lobe (DCL) and bright-contrast lobe (BCL) as functions of delay time (left) [191]; (e) time-delay-dependent contrast images at the MoS_2-Au interface, with outlines of the MoS_2 flake. Blue and red contrasts correspond to excess electrons and holes under photoexcitation, respectively; scale bar is 50 μm[192].

向各向异性输运以及表面复合行为的直接成像. 对于低维层状材料而言, 这类信息对于理解晶格对称性、表面态及缺陷分布如何调控非平衡载流子演化尤为关键. 以黑磷 (BP) 为典型研究对象[193], SUEM 成像清晰揭示其光生热空穴扩散的强各向异性, 沿晶格 x 方向的扩散率比 y 方向高出约 15 倍, 该方向偏好源于其低对称晶格结构, 且空穴复合寿命约 550 ps, 较短的寿命与材料本征带隙及表面氧化位点相关 (图 13(a)); 针对二维钙钛矿[194], 图 13(b) 呈现了 $n = 3$ 样品载流子分布的三维颜色编码图, 并对比了 $n = 1, 2, 3$ 三种样品在不同时间的载流子扩散距离与表面扩散系数, 反映出维度对载流子



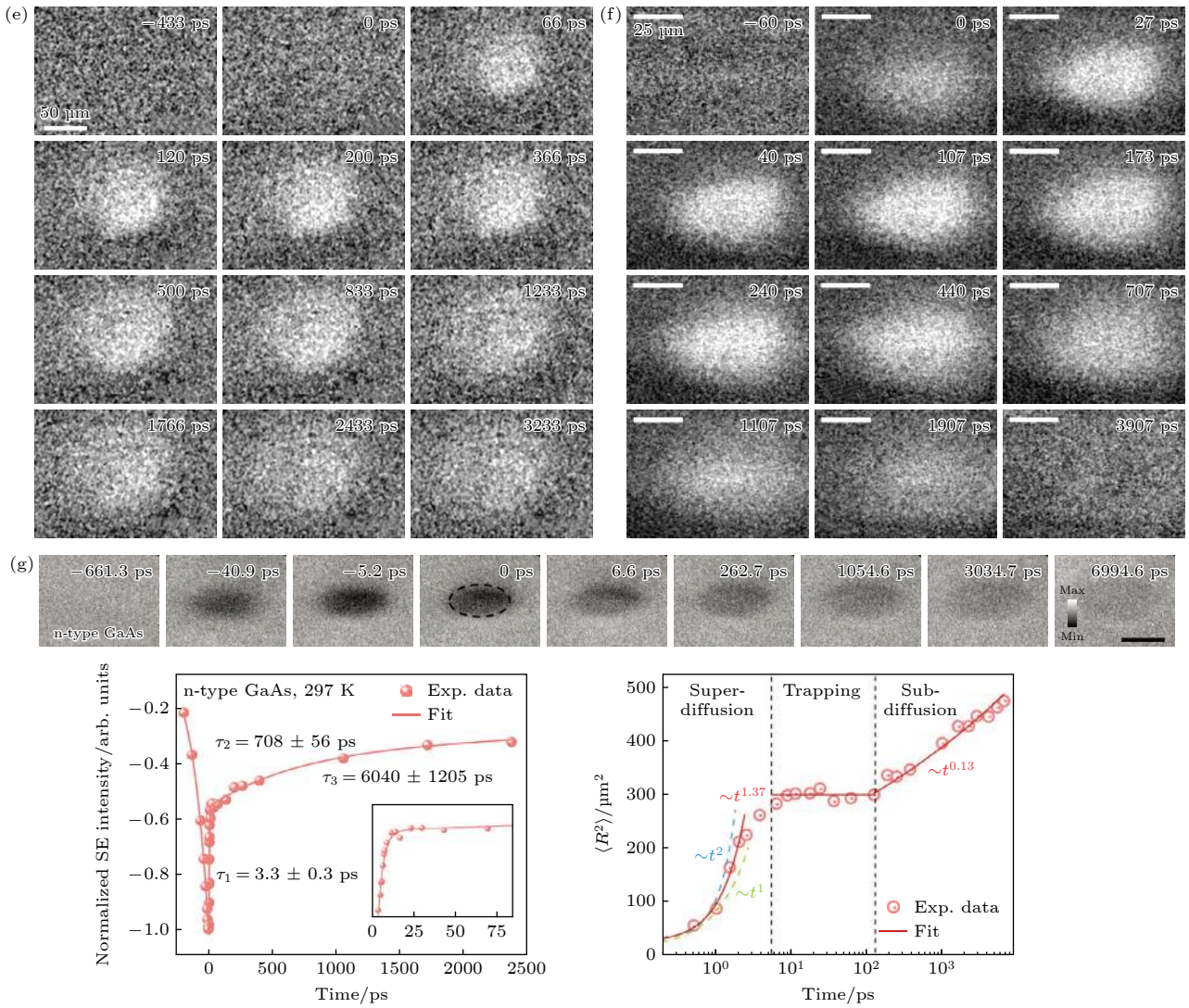


图 13 基于 SUEM 的半导体材料表面载流子动力学研究 (a) BP 表面空穴扩散的 SUEM 成像[193], 第 2 排样品旋转 90°, 比例尺为 60 μm; 图下方为基于 SUEM 的黑磷热空穴输运与复合动力学测试结果, 依次展示各向异性空穴分布方差、双晶向空穴时间演化及冷却过程拟合、空穴强度衰减曲线; (b) 左图为 $n = 3$ 的 2D 钙钛矿样品源自 SUEM 差分图像的 3D 颜色编码图, 并使用 2D 高斯函数进行处理; 右图为 $n = 1$, 2 和 3 的 2D 钙钛矿 3 个测量样品在~20 和 800 ps 处的扩散距离以及表面载流子扩散系数[194]; (c) $MAPbI_3$ 单晶的 (001)(左图) 和 (100)(右图) 取向在不同时间延迟下的 SE 的时间分辨图像[195]; (d) 上图为单层 WS_2 样品中光诱导载流子输运演变的差分 SUEM 图像; 下图为 SUEM 信号强度和半高全宽 (FWHM) 作为延迟时间的函数的演变, 以及不同激发注量下计算的扩散距离[196]; (e) BAs 晶体的 SUEM 差分图像[197]; (f) α-$RuCl_3$ 的不同延迟时间 SUEM 差分图像, 光泵注量为 400 μJ/cm^2 [198]; (g) n 型 GaAs 表面载流子的 SUEM 时空动力学表征, 通过差分图像、信号衰减曲线与扩散二阶矩演化, 清晰呈现光生载流子从超扩散、局域化到亚扩散的连续超快演化行为[187]

Fig. 13. SUEM studies of surface carrier dynamics: (a) SUEM imaging of hole diffusion on the BP surface[193], where the sample on second row is rotated by 90°, scale bar is 60 μm; the panels below present the SUEM characterization of hot hole transport and recombination dynamics in BP, showing the normalized variance of anisotropic hole distribution, time evolution of hole distribution along two crystal directions with fitting accounting for hole cooling, and decay curves of average hole intensity, respectively; (b) 3D color-coded maps of an $n = 3$ 2D perovskite sample derived from SUEM difference images and processed using a 2D Gaussian function (left); measured diffusion distances and surface carrier diffusion coefficients for three samples of $n = 1$, 2, and 3 2D perovskites at ~20 and 800 ps (right)[194]; (c) time-resolved SE images of $MAPbI_3$ single crystals in the (001) (left) and (100) (right) orientations at different time delays[195]; (d) SUEM difference images showing the evolution of photoinduced carrier transport in a monolayer WS_2 sample (top); evolution of SUEM signal intensity and full width at half maximum (FWHM) as functions of delay time, along with calculated diffusion distances under different excitation fluences (bottom) [196]; (e) SUEM difference images of a BAs crystal [197]; (f) SUEM differential images of α-$RuCl_3$ at different delay times under a photoexcitation fluence of 400 μJ/cm^2[198]; (g) spatiotemporal dynamics of photocarriers on n-type GaAs surface characterized by SUEM; the differential images, signal decay curves, and evolution of the second moment of carrier distribution clearly reveal the continuous ultrafast evolution of photocarriers from superdiffusion, localization to subdiffusion[187].

输运的调控作用; 对 $MAPbI_3$ 单晶的研究中[195], 图 13(c) 展示了其 (001) 和 (100) 不同晶面在不同时间延迟下的时间分辨二次电子图像, 直观呈现晶面取向对载流子动态的影响; 在单层 WS_2 体系中[196], 图 13(d) 通过差分 SUEM 图像捕捉光诱导载流子输运过程, 并量化分析了信号强度、半高全宽随延迟时间的演变及不同激发通量下的扩散距离; 图 13(e) 为 BAs 晶体的 SUEM 差分图像[197], 清晰呈现了泵浦脉冲作用后, 载流子引发的亮衬度区域从快速扩大到缓慢延展、强度渐弱的动态过程; 对于 α-$RuCl_3$, 图 13(f) 在高分辨率下展示了不同延迟时间的 SUEM 差分图像[198], 呈现出中心亮区的特征衬度, 反映其载流子的时空分布规律; 在 n 型 GaAs 单晶体系中, SUEM 实时观测到表面载流子依次经历超扩散、缺陷局域化与亚扩散的超快动力学过程, 直观揭示表面态对载流子输运与弛豫的规律 (图 13(g)[187]). 上述研究表明, SUEM 能够在纳米尺度上直接解析低维材料中热载流子的扩散方向性、输运非均匀性及复合动力学过程, 从而建立材料结构特征与非平衡载流子行为之间的联系. 这一能力使其在研究低层状材料和新型光电体系时具有独特优势.

3.4 原位超快扫描电子显微镜技术

3.4.1 技术概述

原位 SUEM 是在常规 SUEM 时间分辨成像框架基础上进一步引入电、热、力、气氛等原位外场调控模块, 使样品能够在更接近真实工作环境的条件下进行超快观测. 因而, 其新增价值主要体现在“外场耦合”下的超快扫描二次电子成像: 前者扩展了实验条件的真实性与复杂性, 后者则仍沿用 SUEM 既有的泵浦-探测与扫描成像机制. 借助这一技术, 材料在多场耦合作用下的瞬态响应、结构演化及湮灭过程得以在纳米尺度上被直接追踪. 与常规 SUEM 相比, 原位 SUEM 的优势在于将表面敏感的超快成像能力与可控外场加载有机结合, 使研究对象由理想静态样品扩展至更接近器件工作状态或复杂环境条件的真实体系. 典型原位模块包括加热/冷却、力学加载、光电偏压及环境气氛控制等, 它们分别可用于观察相变、形变与位错、电荷动力学和电化学过程等问题的时间分辨研究.

3.4.2 研究现状与应用进展

环境 SUEM 能够在可控气氛条件下探测样品表面的载流子动力学行为, 例如利用二次电子与气体分子的碰撞会发生级联放大、增强信号并提升探测效率的特性, 研究人员研究了 CdSe 晶体表面在不同气氛环境下的界面动力学 (图 14(a)—(d)), 实验表明 CdSe 的极性面与非极性面会与气体分子发生不同的相互作用, 在极性气氛 (水蒸气) 下, CdSe 的 (1010) 表面会出现暗对比度, 而 (0001) 表面为亮对比度[199]. 环境 SUEM 的发展, 使得对材料表面分子动力学的实时成像成为可能, 为在超越可见光衍射极限的空间分辨率下, 以飞秒时间分辨率研究界面相互作用提供了广阔前景. 利用具有电学模块的原位 SEM, 可在施加电场或电流的情况下观察材料表面的微观结构变化与电势分布演化, 该技术已成功实现对光电导天线电极上电势分布的高时空分辨可视化成像[200], 系统时间分辨率可达 43 ps, 实验观测到了界面处的超快载流子时空分布演化、载流子复合以及电路中的超快响应特性等物理现象 (图 14(e)), 为高频电子器件的工作状态可视化提供了全新的研究方法. 具有变温模块的原位 SEM 允许在–190—1500 ℃ 的宽温度范围内进行原位观察, 可用于研究材料的相变、热稳定性以及极端下的性能变化, 为高温、低温环境下材料的动力学行为研究提供了有效手段.

3.4.3 总结与展望

相较于常规 SUEM, 原位 SUEM 的关键提升在于将外场加载与时间分辨表面成像有效耦合, 使材料在接近真实工作状态下的瞬态响应能够被直接观测. 尽管发展迅速, 该技术仍面临一些挑战: 技术复杂度与成本高昂, 系统集成度高, 涉及光学、电子学、真空、精密机械等多个领域, 设备昂贵且操作与维护难度大; 时空分辨率的协同优化仍需突破, 极端外场耦合下的信号探测灵敏度有待提升. 未来该技术的主要发展方向包括: 一是突破性能极限, 追求更高的时间分辨率 (迈向阿秒) 和空间分辨率, 实现两者在极限条件下的同步提升; 二是深化多场耦合融合, 开发能够同时集成光、电、热、力、磁等多种外场激励的原位样品台, 模拟更复杂的服役环境; 三是实现智能化和自动化, 引入人工智能和机器学习算法, 用于实验参数的自动化优化、动态过程的自动识别与特征提取, 以及大数据的高通量分析; 四是推动技术实用化与普及, 随着新型超快电子源等关键部件的成熟, 开发更稳定、紧凑、用户友好的设备, 推动技术在更广泛科研和工业领域的应用.

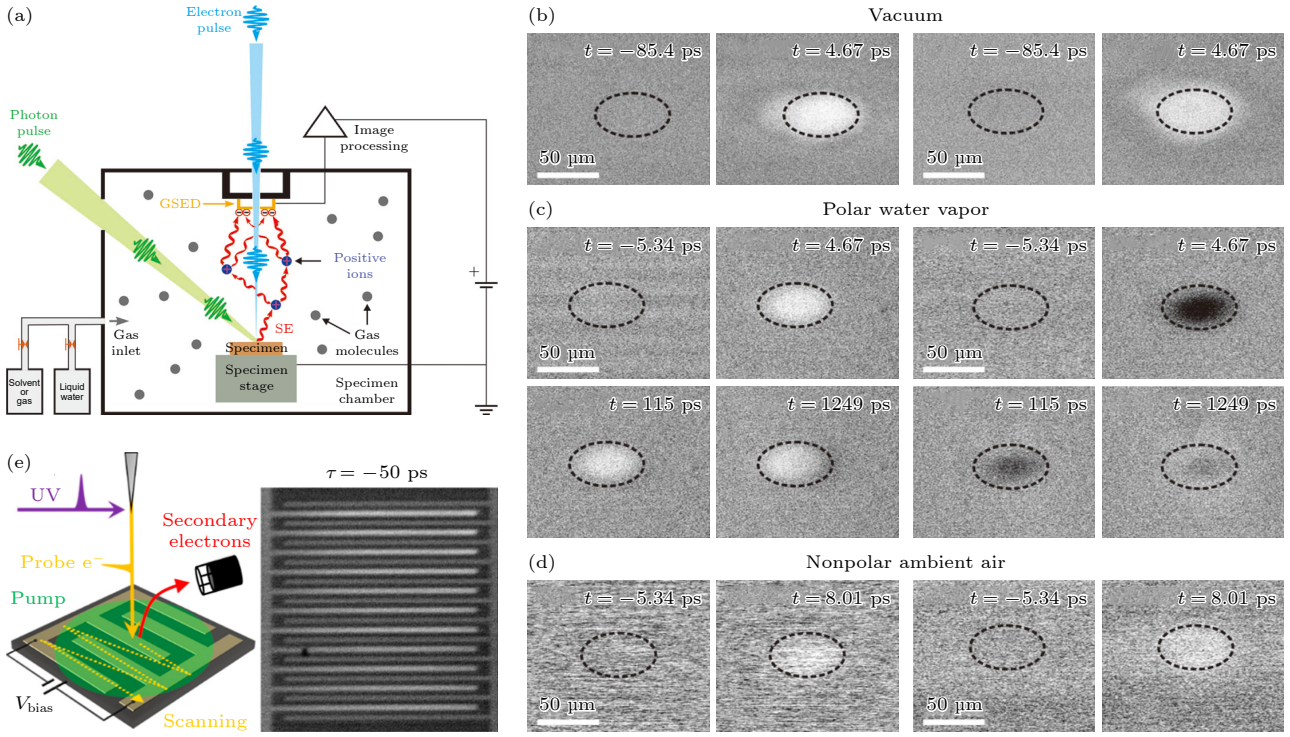


图 14 原位 SUEM 系统及主要应用 (a) 气体环境扫描超快电子显微镜示意图[199]; (b)—(d) CdSe 在气体环境中的扫描超快电子显微镜动力学[199], 在 (b) 高真空、(c) 暴露于水蒸气和 (d) 暴露于非极性环境空气的条件下, CdSe (0001)(左) 和 (1010)(右) 在指定延迟时间下相对于负时间帧的差分图像; (e) 加电扫描超快电子显微镜示意图与在–50 ps 延迟时间下采集的时间分辨扫描电镜图像, 偏置电压 V_b = –20 V[200]

Fig. 14. *In-situ* SUEM system and its main applications: (a) Environmental SUEM (schematic)[199]; (b)—(d) difference images referenced to a negative-time frame[199], CdSe (0001) (left) and CdSe (1010) (right) at the indicated delay times in a high vacuum (b), the surfaces exposed to water vapor (c) and the surfaces exposed to nonpolar ambient air (d); (e) scanning ultrafast electron microscopy schematic and time-resolved SEM image acquired at a delay time of –50 ps under a bias voltage V_b = –20 V[200].

3.5 小 结

SUEM 成像技术实现了对半导体表界面光生载流子动力学的直接可视化, 能够清晰区分电子与空穴在实空间中的分布及演化过程, 在研究各类结区中电荷超快动力学行为方面展现出独特优势. 当前, 国内外开展超快扫描电子显微镜研究的主要高校与科研机构包括美国加州大学圣芭芭拉分校 Bolin Liao 教授课题组、沙特阿卜杜拉国王科技大学 Omar F. Mohammed 教授课题组、荷兰代尔夫特理工大学 Jacob P. Hoogenboom 教授课题组、意大利米兰理工大学 Alberto Tagliaferri 教授课题组、中国科学院物理研究所李建奇教授课题组、上海交通大学仲冬平教授课题组、以及南开大学付学文教授课题组等. 这些团队运用 SUEM 技术在纳米空间尺度和飞秒时间尺度上, 系统揭示了晶体半导体[201]、半导体纳米线与纳米晶[202]、非晶半导体[203]、半导体 p-n 结[8]、以及二维材料[193] 等多种半导体体系中光生载流子的超快动力学行为, 发现了非晶硅表面电子-空穴的分离与捕获过程[203]、重掺杂半导体中光生载流子的超扩散行为、二硫化钼厚度异质结引起的光生载流子分离[192] 等重要现象. SUEM 凭借其超高时空分辨率及表面探测高灵敏性, 能够实现对表界面载流子动力学的四维时空成像, 在揭示功能器件内部复杂结构中的电荷传输机制方面展现出巨大潜力, 为半导体材料与器件的性能优化和新型器件设计提供了重要的实验依据.

4 超快阴极荧光技术

4.1 技术概述

如前文所述, 超快阴极荧光技术 (ultrafast cathodoluminescence, U-CL) 是在电子束激发阴极荧光基础上引入时间分辨维度发展起来的超快表征方法. 相较于侧重透射成像与衍射的 UTEM 以及依赖二次电子成像的 SUEM, U-CL 的突出特点在于通过“电子束激发-光子信号读出”的方式,

同时获取局域发光强度、光谱特征及寿命信息, 因此特别适合研究纳米结构、低维半导体和量子材料中的激发态载流子弛豫、能量转移与辐射复合等过程. 传统静态阴极荧光 (CL) 的工作原理如图 15(a) 所示[204]. 当聚焦电子束入射到样品表面时, 会同时产生二次电子、背散射电子、俄歇电子、X 射线以及阴极荧光等多种信号. 其中, 阴极荧光是由电子束激发产生的电子-空穴对经辐射复合发射光子形成, 因此兼具电子显微镜的高空间分辨率和光谱分析能力. 对于传统 CL 而言, 连续电子束激发能够以纳米尺度空间分辨率表征材料的能带结构、缺陷态、应力分布以及杂质分布等信息, 但由于采用连续电子束激发, 其测量结果本质上是时间积分的稳态响应, 难以分辨载流子俘获、激子复合和局域能量转移等超快动力学过程的真实时间顺序. U-CL 通过引入脉冲电子束与时间分辨光子探测, 将 CL 由稳态谱学拓展到超快动力学测量, 使电子显微镜术首次能够在纳米空间尺度上直接关联局域结构、发光行为与激发态寿命, 从而成为连接电子显微成像与超快光谱分析的重要桥梁. 基于上述特点, 本节将围绕 U-CL 的实现原理、技术发展及其在半导体、低维材料和纳米光学体系中的应用展开讨论.

4.2 工作原理

U-CL 的实现可概括为两个关键环节: 脉冲电子束激发与时间分辨光子探测 (图 15(b)[205]). 紫外飞秒激光触发光阴极发射超短电子脉冲, 被加速聚焦后入射样品在局域区域内激发电子-空穴对、激子或其他非平衡激发态; 这些激发态在弛豫和复合过程中发射具有特征寿命与能量分布的光子信号. 通过时间相关单光子计数、条纹相机等手段记录光子辐射相对于电子激发时刻的时间, 即可获得发光强度随延迟时间的演化曲线, 并进一步提取载流子寿命、局域复合动力学及能量转移信息.

U-CL 的发展主线, 本质上是围绕“更短电子脉冲、更高荧光探测时间分辨率、更优空间相干性”三者协同优化展开的. 其技术演进大致经历了从静电束闸实现纳秒分辨率, 到飞秒激光触发光阴极实现皮秒分辨, 再到纳米级场发射光阴极超快电子源提升时空分辨能力的几个阶段. U-CL 光谱测量技术研究始于 20 世纪 80 年代[206,207], 研究人员主要采用静电电子束闸产生脉冲电子束, 并结合时间相关单光子计数[208,209]或取样积分器[210,211]进行测量, 例如 Steckenborn 等[207]在 SEM 中加入脉冲偏转电场对连续电子束进行脉冲调制, 实现了

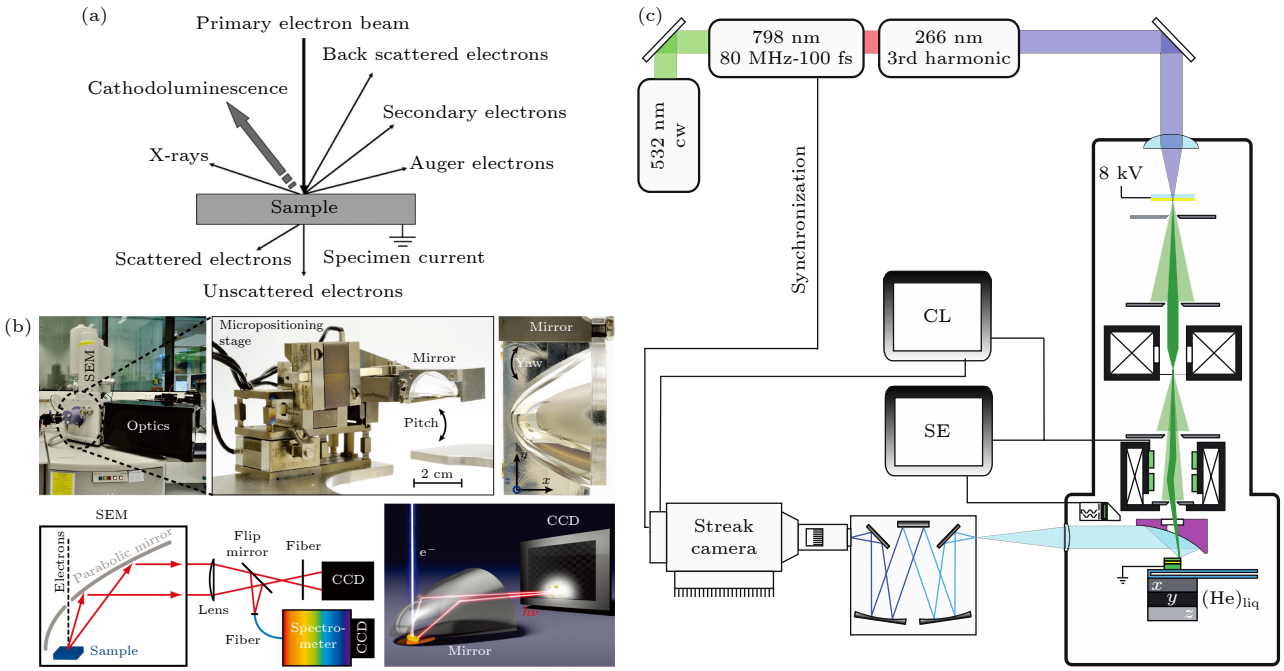


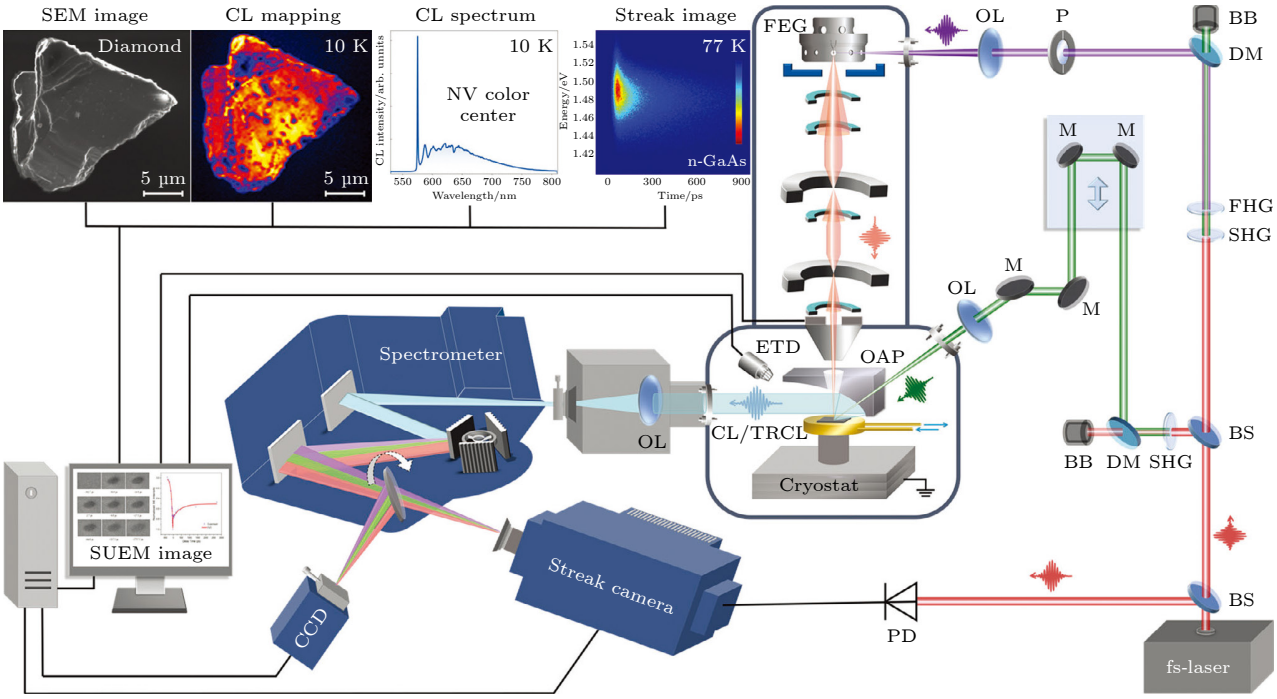
图 15 超快阴极荧光系统 (a) 阴极荧光原理示意图[204]; (b) 基于 SEM 的阴极荧光测量系统[205]; (c) Benoit Deveaud 教授课题组[212]研制的第一代 U-CL 系统

Fig. 15. Ultrafast cathodoluminescence system: (a) Illustration of the fundamental principle of cathodoluminescence[204]; (b) configuration of a cathodoluminescence measurement system integrated with a scanning electron microscope[205]; (c) first generation ultrafast time-resolved cathodoluminescence system developed by Prof Benoit Deveaud's group[212].

时间分辨率约 4.5 ns 的 CL 测量; 2018 年, 荷兰 Delmic 公司联合美国赛默飞公司推出基于该方案的商用时间分辨阴极荧光系统, 该方案保留了场发射电子束的较高相干性和空间分辨率, 但时间分辨率仅为纳秒量级, 无法满足大多数光电材料载流子复合发光寿命的测量要求. 2005 年, 瑞士洛桑理工大学 Deveaud-Plédran 教授课题组[16]将飞秒激光和 SEM 结合, 集成阴极荧光光谱仪和条纹相机, 首次实现皮秒时间分辨的 U-CL 技术. 该团队将 SEM 的热发射电子枪替换为平面金属光阴极, 利用紫外飞秒激光脉冲激发产生超短脉冲光电子, 将阴极荧光探测的时间分辨率提升到数十皮秒量级, 并揭示了宽禁带半导体纳米结构中新奇的光生载流子转移和发光动力学机制 (图 15(c)[212]), 但该方案的空间分辨率只有约 50 nm. 为进一步提升时空分辨率, 南开大学付学文教授课题组[187]使用肖特基场发射灯丝替换平面金属光阴极, 大幅减小光电子产生区域, 有效提高脉冲光电子的相干性, 将 U-CL 的时间分辨率提升至约 4.5 ps, 空间分辨率提升至约 10 nm (图 16), 显著改善了超快阴极荧光的时空分辨性能.

4.3 载流子动力学应用研究

U-CL 技术通过将纳米级的空间、能量分辨率与皮秒级的时间分辨率相结合, 为在极端时空尺度上研究光与物质的相互作用提供了独特的测量工具, 极大地拓展了微观动力学研究的维度. 与 SUEM 相比, U-CL 具有能量敏感特性, 信号绝大部分来源于材料体内, 可直接反映载流子的辐射复合过程; 而 SUEM 具有表面敏感特性, 能够直接对半导体材料表面或界面光生载流子的时空演化动力学进行成像, 但无法直接区分辐射复合与非辐射



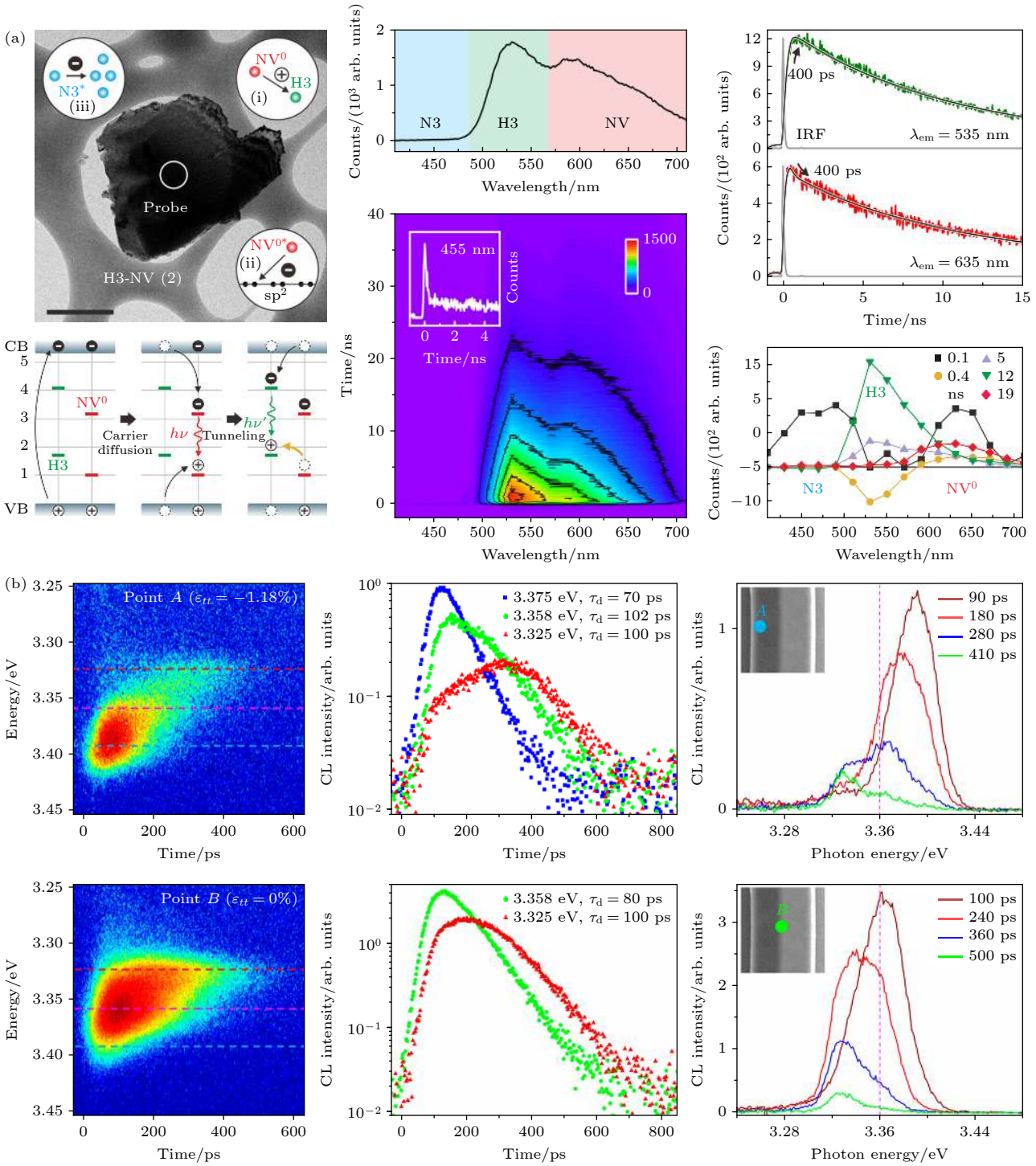
M: Mirror
P: Polarizer
OL: Optical lens
BS: Beam splitter
BB: Beam blocker
FEG: Field emission gun
OAP: Off-axis parabolic mirror
ETD: Everhart-Thornley detector
PD: Photodiode
CCD: Charge coupled device
S/FHG: Second/fourth harmonic generation
TRCL: Time-resolved cathodoluminescence

图 16 基于飞秒电子的 SUEM 与 U-CL 联合系统示意图[187]. 该显微平台整体包含一台经过改造的 SEM, 其集成了超快飞秒光学系统、CL/U-CL 信号收集探测模块以及可调控样品温度 (10—300 K) 的低温恒温器. 示意图左上角插图展示了该显微平台多种运行模式下的代表性测量结果: 从左至右依次为 10 K 温度下金刚石样品的 SEM 图像、CL Mapping 图像和 CL 光谱, 以及 77 K 温度下 n 型 GaAs 样品的条纹相机图像, 左下角插图呈现了一组 n 型 GaAs 样品的典型 SUEM 图像及相应动力学曲线

Fig. 16. Schematic of the fs electron-based microscopy combining SUEM imaging and U-CL detection[187]. The entire microscopy platform includes a modified SEM with the integration of an ultrafast fs optical system, a CL/U-CL signal collection and detection module, and a cryostat with controllable sample temperature (from 10 to 300 K). The representative measurement results of various operations of the microscopy platform are displayed in the top-left inset of the schematic diagram, of which from the left to the right are the SEM image, CL mapping image, and CL spectrum of a diamond sample at 10 K, as well as a streak camera image of a n-type GaAs sample at 77 K, respectively. The bottom-left inset shows a set of typical SUEM images and a corresponding dynamic curve of the n-type GaAs.

复合过程. 两者在功能上形成良好互补, 结合后能在超高时空和能量分辨下, 全面解析半导体材料表/界面和体相载流子的动力学信息.

U-CL 在半导体材料研究和光电器件开发中展现出广泛的应用前景. 例如, 研究者利用 UEM 产生的脉冲电子束作为激发源, 在透射电子显微镜中实现了 50 nm 空间分辨率和 100 ps 时间分辨率的时间分辨阴极荧光测量[9], 以纳米金刚石中的氮相关色心为模型体系, 测量了单个纳米颗粒内不同色心的发光寿命, 揭示了 NV^0 色心向 H3 色心在皮秒时间尺度的空穴转移过程 (图 17(a)), 证实了电荷转移的量子隧穿机制, 为纳米尺度能量转换过程研究提供了强大工具; 进一步地, 研究者结合条纹相机探测实现了皮秒 U-CL 测量, 发现非均匀应变场中的激子可由高能区向低能区定向迁移 (图 17(b)), 表现为发光峰位随时间连续红移以及不同能量处寿命的显著差异, 从而直接揭示了应变调控下激子输运的动态机制[213]. 南开大学付学文教授团队[187]



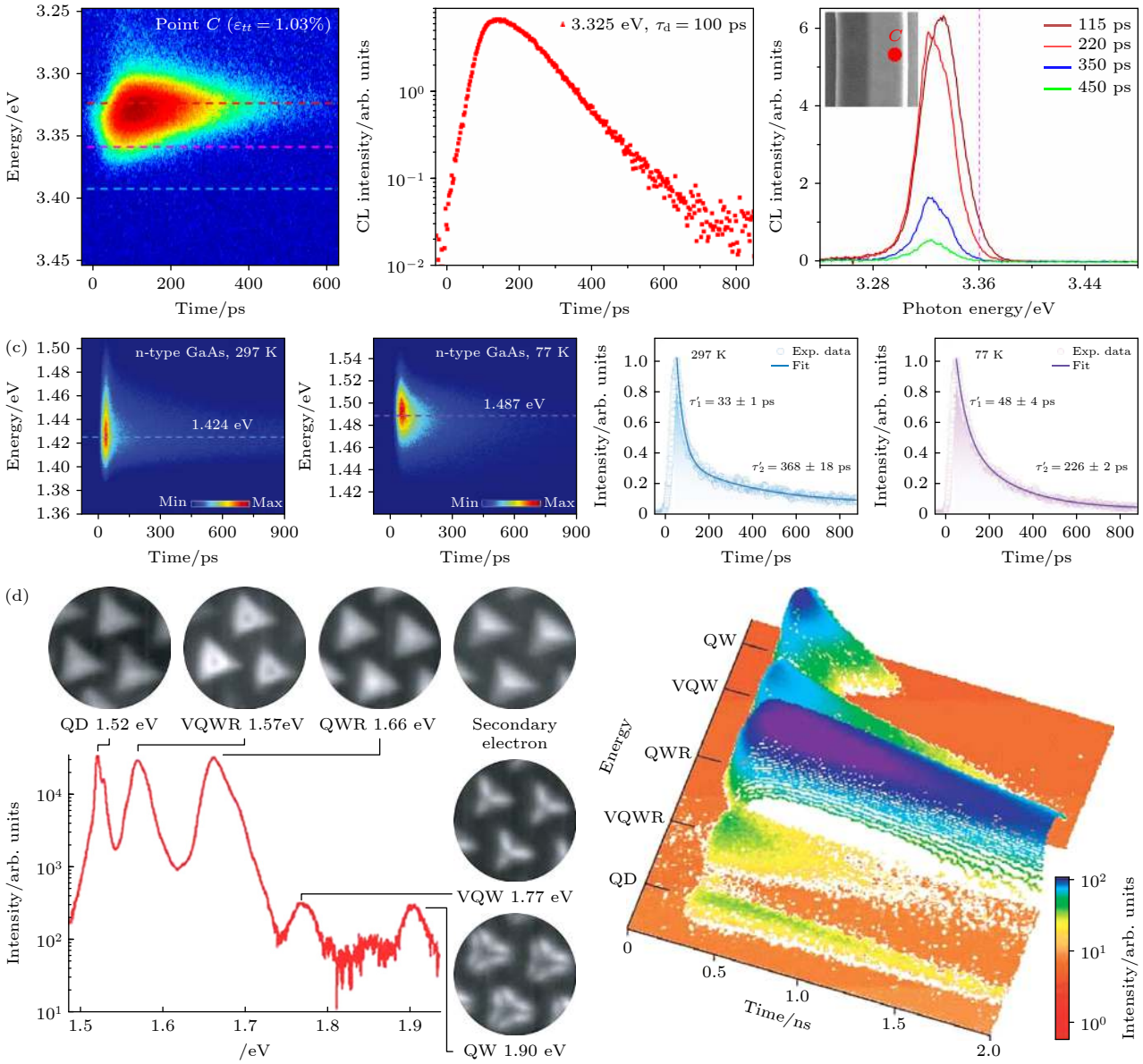


图 17 超快阴极荧光技术的主要应用 (a) 纳米金刚石中的氮相关色心之间的电荷转移动力学[9]; (b) ZnO 纳米线中应变梯度驱动的激子漂移过程[213], 其中条纹相机图显示发光能量随时间的连续红移, 而对应的衰减曲线与时间分辨光谱揭示了不同能量态的动力学差异; (c) n 型 GaAs 中载流子复合动力学及其温度依赖[187], 其中条纹相机图与对应衰减曲线表明近带边发射经历多时间尺度复合过程, 并受缺陷俘获与辐射复合共同调控; (d) 时间分辨阴极荧光在单个金字塔异质纳米结构中的应用[16], 左图为不同量子结构对应的阴极荧光光谱及空间分布图, 表明阴极荧光能够在单结构尺度上分辨不同发光通道; 右图为不同量子结构的时间分辨阴极荧光瞬态响应, 揭示了载流子在耦合纳米结构中的扩散、俘获与转移过程

Fig. 17. Main applications of ultrafast cathodoluminescence: (a) Charge transfer dynamics between nitrogen-related color centers in nanodiamonds[9]; (b) strain-gradient-driven exciton drift in ZnO nanowires[213], where the streak camera images reveal a continuous redshift of the emission energy over time, while the corresponding decay curves and time-resolved spectra indicate distinct dynamical behaviors at different energy states; (c) carrier recombination dynamics and their temperature dependence in n-type GaAs[187], where the streak images together with the corresponding decay traces demonstrate multiscale recombination processes of near-band-edge emission, governed by the interplay between defect trapping and radiative recombination; (d) application of time-resolved cathodoluminescence in a single pyramidal heterostructure[16], where the left panel shows cathodoluminescence spectra and spatial maps corresponding to different quantum structures, highlighting the capability of CL to resolve distinct emission channels at the single-structure level; the right panel presents the time-resolved CL transients of these structures, revealing carrier diffusion, trapping, and transfer processes within the coupled nanostructure.

通过开发 SUEM 与超快阴极荧光多模态载流子动力学探测系统, 在飞秒与纳米时空分辨尺度直接追踪了 n 型掺杂砷化镓半导体中的光生载流子动力学过程, 成功区分了表面载流子和体相载流子的动力学行为, 全面直观地给出了其表面光生载流子动力学的物理图像, 并将时空分辨率提升到 4.5 ps

和 10 nm (图 17(c)). 此外, U-CL 结合空间分辨光谱成像[16], 可在单个砷化镓基金字塔形纳米结构内同时实现发光通道的精确定位与动力学解析 (图 17(d)), 不同结构的发光瞬态差异直接揭示了载流子的扩散、俘获及转移过程, 体现了其在纳米尺度空间-时间关联表征中的独特优势.

随着技术的不断进步和创新, U-CL 有望在基础科学研究和产业应用中发挥更为重要的作用, 特别是在新型半导体材料与高性能光电功能器件的开发方面, 将为理解和优化材料性能提供关键的科学依据和技术支撑.

4.4 小 结

U-CL 是近年来在纳米光子学、凝聚态物理和材料科学领域兴起的尖端表征技术, 融合扫描电子显微镜的高空间分辨率与超快激光技术的高时间分辨率, 为探测材料在纳米尺度的光物相互作用动力学提供了前所未有的视角. 该技术的核心优势体现在三方面: 一是高空间分辨率, 聚焦电子束可达纳米级, 远优于衍射极限的光学分辨率; 二是高时间分辨率, 飞秒脉冲电子束可探测飞秒至纳秒量级的能量弛豫和载流子动力学过程; 三是独特的激发方式, 电子束激发比激光激发更直接、更高效, 对光学选择定则禁止的激发过程如动量空间间接跃迁、暗态等非常敏感. U-CL 在多个前沿研究领域发挥着关键作用, 包括纳米等离激元学、半导体纳米科学与光子器件中的载流子动力学和缺陷研究、量子材料与信息科学、光子集成电路与超构表面等. 作为一种强大的“纳米尺度超快摄像机”, U-CL 能够同时对材料的光学特性进行“空间定位”和“时间追踪”, 弥补了传统稳态荧光光谱 (仅含空间或光谱信息) 和纯超快光学技术 (空间分辨率受限) 之间的空白.

未来 U-CL 的发展方向包括: 一是追求更高时空分辨率, 实现亚纳米空间分辨率和飞秒量级时间分辨率; 二是深化多模态联用, 与 CL, EELS 等技术更深度集成, 提供互补的材料物理化学信息; 三是发展极端条件测量能力, 开发低温、加电、加磁等条件下的测量系统, 研究更丰富的量子现象; 四是推动技术实用化, 优化电子源和探测系统, 降低设备成本, 提升系统稳定性和操作便捷性. 随着技术的不断成熟, 超快阴极荧光将成为探索纳米世界动态过程、推动下一代光子和量子技术发展的不可或缺的科学工具.

5 结论与展望

超快电子显微镜学表征技术的发展是材料微观动力学研究领域的重要里程碑, 该技术已从早期单纯追求时间分辨率提升, 逐步演进为兼具超高时空分辨率、多物理场耦合和多物理量协同测量能力的综合性研究平台. 电子脉冲的产生与操控技术的革新是推动超快电子显微镜进步的核心驱动力, 飞秒激光技术的引入不仅突破了传统电子显微镜的时间分辨瓶颈, 更通过相干控制实现了对电子波包的精确操纵, 为原子尺度超快过程的探测奠定了技术基础.

近年来, 随着电子光学系统的持续优化与新型探测方法的不断引入, 超快电子显微镜在揭示非平衡态物理过程方面展现出前所未有的潜力, UTEM, SUEM, U-CL 三大核心技术各有侧重、互补协同, 在低维量子材料、能源转换材料、半导体器件、生物大分子体系等前沿领域取得了一系列突破性发现: UTEM 实现了原子尺度下晶格振动、相变演化、磁畴动力学等超快过程的时空解析; SUEM 实现了半导体表界面载流子的四维时空成像, 清晰揭示了电荷转移、扩散的超快动力学规律; U-CL 实现了纳米尺度载流子辐射复合过程的高时空分辨探测, 弥补了稳态荧光光谱与超快光学技术的研究空白. 这些研究成果不仅深化了对材料非平衡态物理过程的理解, 完善了凝聚态物理的基础理论体系, 还为新型功能材料的设计优化以及光电器件的性能提升提供了直接的实验依据, 为清洁能源、信息存储、纳米光子学、量子信息等领域的技术发展奠定了坚实的科学基础.

当前超快电子显微学表征技术仍面临若干关键挑战: 时间分辨率向数十飞秒乃至阿秒量级的提升仍需突破电子源和电子脉冲操控技术的瓶颈; 高时间与高空间分辨率的协同优化尚未实现, 复杂非平衡态过程的定量解析方法仍有待完善; 极端环境 (强场、低温高压、复杂气液环境等) 下的原位动态表征能力有待加强; UTEM, SUEM, U-CL 的多模态联用技术开发仍需取得实质性突破, 多物理量的同步探测能力有待提高. 这些挑战的解决将高度依赖于电子光学、激光物理、计算科学、材料科学等多学科的深度交叉与协同创新. 可以预见, 随着

阿秒电子源、人工智能驱动的数据分析、极端环境样品台、片上纳米光子结构等技术的不断突破, 超快电子显微镜的时空分辨率、探测灵敏度和多模态联用能力将进一步提升, 其在复杂环境下原子尺度超快过程研究中的优势将更加凸显.

未来, 超快电子显微镜表征技术将成为揭示物质微观世界超快动态过程的核心工具, 推动凝聚态物理、材料科学、化学动力学、纳米光子学等领域的突破性发展, 为新型功能材料的开发、下一代光电器件与量子器件的设计优化提供前所未有的超高时空分辨研究手段, 助力人类在微观尺度探索物质本质的进程中迈出更坚实的步伐.

付学文, 南开大学物理科学学院教授、博士生导师, 任凝聚态与材料物理系主任, 入选国家海外高层次引进青年人才、天津市杰青、南开大学“百名青年学科带头人”等人才计划. 2009 年获北京师范大学物理学学士学位, 2014 年获北京大学凝聚态物理博士学位, 毕业后先后在美国加州理工学院 (诺贝尔奖得主 Ahmed H. Zewail 教授研究组) 和布鲁克海文国家实验室任博士后与助理研究员, 2019 年年底入职南开大学物理科学学院担任教授和博士生导师, 牵头建立南开大学超快电镜实验室和超快电镜科研团队. 担任国家重点研发计划青年项目首席科学家, 主持基金委国家重大科研仪器研制项目、重大研究计划培育项目、面上项目和天津市重点项目等, 曾获强国青年科学家提名、南开大学青年五四奖章等荣誉. 长期致力于 4D 超快电子显微镜、超快光谱与成像等高时空分辨成像技术开发与低维功能材料非平衡态动力学研究, 研制了世界首台全射频超快电镜、首套超快扫描电镜-超快阴极联合系统等原创科学仪器, 率先发展了原位液相超快电镜、亚百飞秒双色近场超快电镜等前沿技术. 以第一/通信作者在 *Science*, *Nat. Nanotech.*, *Nat. Phys.*, *Phys. Rev. Lett.*, *Sci. Adv.* (4), *Nat. Commun.* (3), *Light Sci. Appl.*, *Adv. Mater.* (2), *Adv. Sci. Instrum.*, *Rev. Sci. Instrum.*等期刊发表论文 60 余篇, 获授权发明专利 9 项, 多项仪器成果实现转化应用.

参考文献

[1] Landau L D 1937 *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **7** 926
[2] Sun D, Wu Z K, Divin C, Li X B, Berger C, de Heer W A, First P N, Norris T B 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 157402
[3] Pierret A, Loayza J, Berini B, Betz A, Plaçais B, Ducastelle F, Barjon J, Loiseau A 2014 *Phys. Rev. B* **89** 035414
[4] Wang H, Xiao X, An Q, Xiao Z, Zhu K, Zhai S, Dong X, Xue C, Wu H 2024 *Small* **20** 2309773
[5] Woutersen S, Emmerichs U, Bakker H J 1997 *Science* **278** 658
[6] Zewail A H, Thomas J M 2009 *4D Electron Microscopy: Imaging in Space and Time* (Singapore: World Scientific)
[7] Yang H X, Sun S S, Zhang M, Li Z W, Li Z A, Xu P, Tian H F, Li J Q 2018 *Chin. Phys. B* **27** 070703
[8] Najafi E, Scarborough T D, Tang J, Zewail A 2015 *Science* **347** 164
[9] Kim Y J, Kwon O H 2021 *ACS Nano* **15** 19480
[10] Lobastov V A, Srinivasan R, Zewail A H 2005 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **102** 7069
[11] Luo D, Hui D D, Wen W L, Liu R, Wang X, Tian J S 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 152901 (in Chinese) [罗端, 惠丹丹, 温文龙, 刘蓉, 王兴, 田进寿 2017 物理学报 **66** 152901]
[12] Lian Y L, Sun J Y, Jiang L 2023 *Int. J. Mech. Syst. Dyn.* **3** 192
[13] Wang W T, Sun S S, Li J, Zheng D G, Huang S Y, Tian H F, Yang H X, Li J Q 2023 *Chin. Phys. B* **33** 010701
[14] Berruto G, Madan I, Murooka Y, et al. 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 117201
[15] Liao B N, Najafi E 2017 *Mater. Today Phys.* **2** 46
[16] Merano M, Sonderegger S, Crottini A, Collin S, Renucci P, Pelucchi E, Malko A, Baier M H, Kapon E, Deveaud B, Ganière J D 2005 *Nature* **438** 479
[17] Fu X W, Chen B, Tang J, Hassan M T, Zewail A H 2017 *Science* **355** 494
[18] Du D X, Simjanoska M, Fitzpatrick A W 2023 *J. Struct. Biol.* **215** 107941
[19] Hart J L, Cha J J 2021 *Nano Lett.* **21** 5449
[20] Liu C M, Yang K M, Zhang J Q, Cheng S B, Shan C X 2024 *Microstructures* **4** 2024055
[21] Jiang T S, Pivak Y, Ni F, van der Gugten G, Li J J, Zhuo F P, Molina-Luna L 2024 *Microstructures* **4** 2024058
[22] Zhang F, Liu W 2024 *Microstructures* **4** 2024041
[23] Bostanjoglo O, Horinek W 1983 *Optik (Stuttgart)* **65** 361
[24] Filippetto D, Musumeci P, Li R K, Siwick B J, Otto M R, Centurion M, Nunes J P F 2022 *Rev. Mod. Phys.* **94** 045004
[25] Dömer H, Bostanjoglo O 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 4369
[26] LaGrange T, Armstrong M R, Boyden K, et al. 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 044105
[27] Plemmons D A, Suri P K, Flannigan D J 2015 *Chem. Mater.* **27** 3178
[28] LaGrange T, Reed B W, Santala M K, McKeown J T, Kulovits A, Wiezorek J M, Nikolova L, Rosei F, Siwick B J, Campbell G H 2012 *Micron* **43** 1108
[29] LaGrange T, Reed B W, Masiel D J 2015 *MRS Bull.* **40** 22
[30] Ji S Z, Guo J T, Li Z F, Tong L, Guo J Q, Liu J C, Deng Y, Liu C, Sun Z P, Chen X, Gao C T, Liu F, Feng M, Fu X W 2025 *Rev. Sci. Instrum.* **96** 033701
[31] Spivak G, Dyukov V, Sedov N, Nevzorov A 1967 *A Stroboscopic Secondary-emission Electron Microscope* (Wright-Patterson AFB, OH: *Foreign Technology Division*) Report No. FTD-HT-66-757
[32] Bostanjoglo O, Rosin T 1977 *Opt. Acta* **24** 657
[33] Plows G, Nixon W 1968 *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **1** 595
[34] Montgomery E, Leonhardt D, Roehling J 2021 *Microsc. Today* **29** 46
[35] Verhoeven W, Van Rens J, Kemper A, Rietman E, Van Doorn H, Koole I, Kieft E, Mutsaers P, Luiten O 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 083703
[36] Lau J W, Schliep K B, Katz M B, Gokhale V J, Gorman J J, Jing C, Liu A, Zhao Y, Montgomery E, Choe H 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 021301
[37] Reisbick S A, Han M G, Liu C, Zhao Y, Montgomery E, Jing C, Gokhale V J, Gorman J J, Lau J W, Zhu Y 2022 *Ultramicroscopy* **235** 113497
[38] Fu X W, Wang E D, Zhao Y B, Liu A, Montgomery E, Gokhale V J, Gorman J J, Jing C G, Lau J W, Zhu Y M

2020 *Sci. Adv.* **6** eabc3456
[39] Qiu J Q, Ha G H, Jing C G, Baryshev S V, Reed B W, Lau J W, Zhu Y M 2016 *Ultramicroscopy* **161** 130
[40] Zhang Y C, Flannigan D J 2019 *Nano Lett.* **19** 8216
[41] Zhang Y C, Flannigan D J 2021 *Nano Lett.* **21** 7332
[42] McKenna A J, Eliason J K, Flannigan D J 2017 *Nano Lett.* **17** 3952
[43] Cremons D R, Plemmons D A, Flannigan D J 2016 *Nat. Commun.* **7** 11230
[44] Danz T, Domröse T, Ropers C 2021 *Science* **371** 371
[45] Li J J, Qi Y P, Yang Q, Yue L Y, Yao C Y, Chen Z J, Meng S, Xiang D, Cao J M 2024 *Adv. Mater.* **36** 2313742
[46] Qi Y P, Guan M X, Zahn D, Vasileiadis T, Seiler H, Windsor Y W, Zhao H, Meng S, Ernstorfer R 2022 *ACS Nano* **16** 11124
[47] Luo D, Zhang B Y, Sie E J, Nyby C M, Fan Q Y, Shen X Z, Reid A H, Hoffmann M C, Weathersby S, Wen J G, Qian X F, Wang X J, Lindenberg A M 2023 *Nano Lett.* **23** 2287
[48] Ji S Z, Granas O, Kumar Prasad A, Weissenrieder J 2022 *Nanoscale* **15** 304
[49] Eichberger M, Schäfer H, Krumova M, Beyer M, Demsar J, Berger H, Moriena G, Sciaini G, Miller R J D 2010 *Nature* **468** 799
[50] Erasmus N, Eichberger M, Haupt K, Boshoff I, Kassier G, Birmurske R, Berger H, Demsar J, Schwoerer H 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 167402
[51] Frigge T, Hafke B, Witte T, et al. 2017 *Nature* **544** 207
[52] Gao M, Lu C, Jean-Ruel H, et al. 2013 *Nature* **496** 343
[53] Möhr-Vorobeva E, Johnson S L, Beaud P, Staub U, De Souza R, Milne C, Ingold G, Demsar J, Schaefer H, Titov A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 036403
[54] van der Veen R M, Kwon O H, Tissot A, Hauser A, Zewail A H 2013 *Nat. Chem.* **5** 395
[55] Kogar A, Zong A, Dolgirev P E, et al. 2019 *Nat. Phys.* **16** 159
[56] Horstmann J G, Böckmann H, Wit B, Kurtz F, Storeck G, Ropers C 2020 *Nature* **583** 232
[57] Sie E J, Nyby C M, Pemmaraju C D, et al. 2019 *Nature* **565** 61
[58] Mankowsky R, Subedi A, Först M, Mariager S O, Chollet M, Lemke H T, Robinson J S, Glownia J M, Minitti M P, Frano A, Fechner M, Spaldin N A, Loew T, Keimer B, Georges A, Cavalleri A 2014 *Nature* **516** 71
[59] Cao G L, Jiang S, Åkerman J, Weissenrieder J 2021 *Nanoscale* **13** 3746
[60] Nagaosa N, Tokura Y 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 899
[61] Felser C, Parkin S 2022 *MRS Bull.* **47** 600
[62] Shimojima T, Nakamura A, Yu X, Karube K, Taguchi Y, Tokura Y, Ishizaka K 2021 *Sci. Adv.* **7** eabg1322
[63] Möller M, Gaida J H, Schäfer S, Ropers C 2020 *Commun. Phys.* **3** 36
[64] Padmanabhan H, Stoica V A, Kim P K, et al. 2022 *Adv. Mater.* **34** 2202841
[65] Mäeots M E, Enchev R I 2022 *Biol. Crystallogr.* **78** 927
[66] Klebl D P, Aspinall L, Muench S P 2023 *Curr. Opin. Struct. Biol.* **83** 102696
[67] Lorenz U J 2024 *Curr. Opin. Struct. Biol.* **87** 102840
[68] Amann S J, Keihsler D, Bodrug T, Brown N G, Haselbach D 2023 *Structure* **31** 4
[69] Evans J E, Browning N D 2013 *Microscopy* **62** 147
[70] Herzik J, Mark A 2020 *Nature* **587** 39
[71] Zhao Y M, Qi C, Zhu C H, Zhu Y, Zhang Y Z, Gu T N, Tian H F, Wang W T, Huang S Y, Yang H X, Li J Q, Sun F 2025 *Innov. Life* **3** 100145
[72] Nakamura A, Shimojima T, Ishizaka K J F D 2022 *Faraday Discuss.* **237** 27
[73] Zheng Q, Tian Y, Shen X, Sokolowski-Tinten K, Li R K, Chen Z, Mo M Z, Wang Z L, Liu P, Fujita T, Weathersby S P, Yang J, Wang X J, Chen M W 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 063101
[74] Wei L L, Sun S S, Guo C, Li Z W, Sun K, Liu Y, Lu W J, Sun Y P, Tian H F, Yang H X, Li J Q 2017 *Struct. Dyn.* **4** 044012
[75] Qian Q K, Shen X Z, Luo D, Jia L X, Kozina M, Li R K, Lin M F, Reid A H, Weathersby S, Park S, Yang J, Zhou Y, Zhang K Y, Wang X J, Huang S X 2020 *ACS Nano* **14** 8449
[76] Xu C H, Jin C, Chen Z J, Lu Q, Cheng Y, Zhang B, Qi F F, Chen J J, Yin X Q, Wang G H, Xiang D, Qian D 2023 *Nat. Commun.* **14** 1265
[77] Li J J, Wu L J, Yang S, Jin X L, Wang W, Tao J, Boatner L, Babzien M, Fedurin M, Palmer M, Yin W G, Delaire O, Zhu Y M 2022 *Phys. Rev. X* **12** 021032
[78] Morrison V R, Chatelain R P, Tiwari K L, Hendaoui A, Bruhács A, Chaker M, Siwick B J 2014 *Science* **346** 445
[79] Yang D S, Baum P, Zewail A H 2016 *Struct. Dyn.* **3** 034304
[80] Ji S Z, Granas O, Weissenrieder J 2021 *ACS Nano* **15** 8826
[81] Hu J B, Xiang Y, Ferrari B M, Scalise E, Vanacore G M 2023 *Adv. Funct. Mater.* **33** 2206395
[82] Li J J, Yue L Y, Chen Z J, Xiang D, Cao J M 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 171905
[83] Britt T L, Li Q, René de Cotret L P, Olsen N, Otto M, Hassan S A, Zacharias M, Caruso F, Zhu X, Siwick B J 2022 *Nano Lett.* **22** 4718
[84] Mourou G, Williamson S 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 44
[85] Williamson S, Mourou G, Li J C 1984 *MRS Online Proc. Libr.* **35** 87
[86] Fu X W, Liu S Y, Chen B, Tang J, Zhu Y M 2021 *ACS Nano* **15** 6801
[87] Tauchert S R, Volkov M, Ehberger D, Kazenwadel D, Evers M, Lange H, Donges A, Book A, Kreuzpaintner W, Nowak U, Baum P 2022 *Nature* **602** 73
[88] Zewail A H 2010 *Science* **328** 187
[89] Kim Y J, Lee Y, Kim K, Kwon O H 2020 *ACS Nano* **14** 11383
[90] Kwon O H, Zewail A H 2010 *Science* **328** 1668
[91] Zong A, Zhang Q, Zhou F R, et al. 2023 *Nature* **620** 988
[92] Hu J B, Karam T E, Blake G A, Zewail A H 2017 *Chem. Phys. Lett.* **683** 258
[93] Yoo B K, Kwon O H, Liu H, Tang J, Zewail A H 2015 *Nat. Commun.* **6** 8639
[94] Mo M Z, Chen Z, Li R K, Dunning M, Witte B B L, Baldwin J, Fletcher L, Kim J, Ng A, Redmer R, Glenzer S H 2018 *Science* **360** 1451
[95] Barwick B, Park H S, Kwon O H, Baskin J S, Zewail A H 2008 *Science* **322** 1227
[96] Yazdani N, Bodnarchuk M I, Bertolotti F, et al. 2023 *Nat. Phys.* **19** 47
[97] Seiler H, Zahn D, Taylor V C A, Bodnarchuk M I, Windsor Y W, Kovalenko M V, Ernstorfer R 2023 *ACS Nano* **17** 1979
[98] Zhang H, Li W B, Essman J, et al. 2023 *Nat. Phys.* **19** 545
[99] Siddiqui K M, Durham D B, Cropp F, et al. 2021 *Commun. Phys.* **4** 152
[100] Cheng Y, Zong A, Li J, et al. 2022 *Nat. Commun.* **13** 963
[101] Cheng Y, Zong A, Wu L J, et al. 2024 *Nat. Phys.* **20** 54
[102] Siwick B J, Dwyer J R, Jordan R E, Miller R J D 2003 *Science* **302** 1382

[103] Shaozheng J, Lenan C, Xuewen F 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 016101

[104] Fu X W, Chen B, Tang J, Zewail A H 2017 *Sci. Adv.* **3** e1701160

[105] Fu X W, Chen B, Li C C, Li H, Liao Z M, Yu D P, Zewail A H 2018 *J. Phys. Chem. Lett.* **9** 4045

[106] Yuan Y F, Amine K, Lu J, Shahbazian-Yassar R 2017 *Nat. Commun.* **8** 15806

[107] Liu Z R, Wang H, Li M, Tao L L, Paudel T R, Yu H Y, Wang Y X, Hong S Y, Zhang M, Ren Z H, Xie Y W, Tsymbal E Y, Chen J S, Zhang Z, Tian H 2023 *Nature* **613** 656

[108] Yu X Z, Morikawa D, Nakajima K, Shibata K, Kanazawa N, Arima T H, Nagaosa N, Tokura Y 2020 *Sci. Adv.* **6** eaaz9744

[109] Espinosa H D, Bernal R A, Filleter T 2013 *In-situ TEM Electromechanical Testing of Nanowires and Nanotubes* (Hoboken, NJ: Wiley) pp191–226

[110] Mattes M, Volkov M, Baum P 2024 *Nat. Commun.* **15** 1743

[111] Parkin S, Yang S H 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 195

[112] Zhang X C, Ezawa M, Zhou Y 2015 *Sci. Rep.* **5** 9400

[113] Song C K, Zhao L, Liu J H, Jiang W J 2022 *Nano Lett.* **22** 9638

[114] Raab K, Brems M A, Beneke G, Dohi T, Rothörl J, Kammerbauer F, Mentink J H, Kläui M 2022 *Nat. Commun.* **13** 6982

[115] Psaroudaki C, Panagopoulos C 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 067201

[116] Psaroudaki C, Peraticos E, Panagopoulos C 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 260501

[117] Xia J, Zhang X C, Liu X X, Zhou Y, Ezawa M 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 106701

[118] Chapman J, Scheinfein M 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **200** 729

[119] Harvey T R, Rubiano da Silva N, Gaida J H, Möller M, Feist A, Schäfer S, Ropers C 2021 *MRS Bull.* **46** 711

[120] Park H S, Baskin J S, Zewail A H 2010 *Nano Lett.* **10** 3796

[121] Rubiano da Silva N, Möller M, Feist A, Ulrichs H, Ropers C, Schäfer S 2018 *Phys. Rev. X* **8** 031052

[122] Zhang M, Li Z A, Sun S, Xu P, Zhu C, Tian H, Li Z, Zhang Y, Yang H, Li J Q 2019 *Phys. Rev. Appl.* **12** 034037

[123] Vanacore G, Fitzpatrick A, Zewail A 2016 *Nano Today* **11** 228

[124] Murata K, Wolf M 2018 *Biochim. Biophys. Acta (BBA) Gen. Subj.* **1862** 324

[125] Voss J M, Harder O F, Olshin P K, Drabbels M, Lorenz U J 2021 *Chem. Phys. Lett.* **778** 138812

[126] Harder O F, Barrass S V, Drabbels M, Lorenz U J 2023 *Nat. Commun.* **14** 5649

[127] Yurtsever A, Zewail A H 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **108** 3152

[128] Feist A, Rubiano da Silva N, Liang W, Ropers C, Schafer S 2018 *Struct. Dyn.* **5** 014302

[129] Giannetti C, Capone M, Fausti D, Fabrizio M, Parmigiani F, Mihailovic D 2016 *Adv. Phys.* **65** 58

[130] Carbone F, Hengsberger M, Castiglioni L, Osterwalder J 2017 *Struct. Dyn.* **4** 061504

[131] Orenstein J 2012 *Phys. Today* **65** 44

[132] Su Z X, Baskin J S, Zhou W, Thomas J M, Zewail A H 2017 *J. Am. Chem. Soc.* **139** 4916

[133] Vanacore G M, van der Veen R M, Zewail A H 2015 *ACS Nano* **9** 1721

[134] Li Z W, Xiao R J, Xu P, Zhu C H, Sun S S, Zheng D G, Wang H, Zhang M, Tian H F, Yang H X, Li J Q 2019 *ACS Nano* **13** 11623

[135] Carbone F, Kwon O H, Zewail A H 2009 *Science* **325** 181

[136] van der Veen R M, Penfold T J, Zewail A H 2015 *Struct. Dyn.* **2** 024302

[137] Zheng D G, Zhu C H, Li Z A, Li Z W, Li J, Sun S S, Zhang Y Z, Wang F Q, Tian H F, Yang H X, Li J Q 2020 *Nanoscale Adv.* **2** 2808

[138] Barwick B, Flannigan D J, Zewail A H 2009 *Nature* **462** 902

[139] Yurtsever A, Van Der Veen R M, Zewail A H 2012 *Science* **335** 59

[140] Yurtsever A, Baskin J S, Zewail A H 2012 *Nano Lett.* **12** 5027

[141] Yurtsever A, Zewail A H 2012 *Nano Lett.* **12** 3334

[142] Vanacore G M, Berruto G, Madan I, Pomarico E, Biagioni P, Lamb R, McGrouther D, Reinhardt O, Kaminer I, Barwick B 2019 *Nat. Mater.* **18** 573

[143] Liu H H, Gage T E, Singh P, Jaiswal A, Schaller R D, Tang J, Park S T, Gray S K, Arslan I 2021 *Nano Lett.* **21** 5842

[144] Flannigan D J, Barwick B, Zewail A H 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **107** 9933

[145] Lu Y, Yoo B K, Ng A H, Kim J, Yeom S, Tang J, Lin M M, Zewail A H, Heath J R 2019 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **116** 22014

[146] Park S T, Yurtsever A, Baskin J S, Zewail A H 2013 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **110** 9277

[147] Tsesses S, Dahan R, Wang K, Bucher T, Cohen K, Reinhardt O, Bartal G, Kaminer I 2023 *Nat. Mater.* **22** 345

[148] Kurman Y, Dahan R, Herzig Shenfux H, Rosolen G, Janzen E, Edgar J H, Koppens F H, Kaminer I 2023 *Optica* **10** 612

[149] Auad Y, Dias E J, Tencé M, Blazit J D, Li X, Zagonel L F, Stéphan O, Tizei L H, García de Abajo F J, Kociak M 2023 *Nat. Commun.* **14** 4442

[150] Hu F, Luan Y, Scott M, Yan J, Mandrus D, Xu X, Fei Z 2017 *Nat. Photonics* **11** 356

[151] Morimoto Y, Baum P 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 193202

[152] Wong L, Rivera N, Murdia C, Christensen T, Joannopoulos J, Soljačić M, Kaminer I 2020 *Nat. Commun.* **12** 1700

[153] Vanacore G M, Madan I, Berruto G, Wang K, Pomarico E, Lamb R, McGrouther D, Kaminer I, Barwick B, García de Abajo F J 2018 *Nat. Commun.* **9** 2694

[154] Vanacore G, Madan I, Carbone F 2020 *La Riv. Nuovo Cim.* **43** 567

[155] Echternkamp K, Feist A, Schafer S, Ropers C 2016 *Nat. Phys.* **12** 1000

[156] Tsarev M, Thurner J, Baum P 2023 *Nat. Phys.* **19** 1350

[157] Cai W, Reinhardt O, Kaminer I, de Abajo F J G 2018 *Phys. Rev. B* **98** 045424

[158] Madan I, Leccese V, Mazur A, Barantani F, Lagrange T, Sapozhnik A, Tengdin P, Gargiulo S, Rotunno E, Olaya J, Kaminer I, Grillo V, De Abajo F, Carbone F, Vanacore G 2022 *ACS Photonics* **9** 3215

[159] Ruimy R, Gorlach A, Mechel C, Rivera N, Kaminer I 2020 *Phys. Rev. Lett.* **126** 233403

[160] Abajo J, Giulio V 2020 *Optica* **7** 1820

[161] Feist A, Echternkamp K E, Schauss J, Yalunin S, Schäfer S, Ropers C 2015 *Nature* **521** 200

[162] Roitman D, Shiloh R, Lu P, Dunin - Borkowski R, Arie A 2021 *ACS Photonics* **8** 3394

[163] Konečná A, de Abajo F J G 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 030801

[164] Mihaila M C C, Streshkova N L, Koz'ak M 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 203802

[165] Mihaila M C C, Koutenský P, Moriová K, Koz'ak M 2025

Nat. Photonics **19** 1309
[166] Wang K P, Dahan R, Shentcis M, Kauffmann Y, Hayun A B, Reinhardt O, Tsesses S, Kaminer I 2020 *Nature* 582 50
[167] Kfir O, Lourenço-Martins H, Storeck G, Sivis M, Harvey T R, Kippenberg T J, Feist A, Ropers C 2020 *Nature* **582** 46
[168] Dahan R, Nehemia S, Shentcis M, Reinhardt O, Adiv Y, Shi X, Be'er O, Lynch M H, Kurman Y, Wang K 2020 *Nat. Phys.* **16** 1123
[169] Fu X, Barantani F, Gargiulo S, Madan I, Berruto G, LaGrange T, Jin L, Wu J, Vanacore G M, Carbone F 2020 *Nat. Commun.* **11** 5770
[170] Shiloh R, Chlouba T, Hommelhoff P 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 235301
[171] Priebe K E, Rathje C, Yalunin S V, Hohage T, Feist A, Schäfer S, Ropers C 2017 *Nat. Photonics* **11** 793
[172] Morimoto Y, Baum P 2018 *Nat. Phys.* **14** 252
[173] Ryabov A, Thurner J W, Nabben D, Tsarev M V, Baum P 2020 *Sci. Adv.* **6** eabb1393
[174] Nabben D, Kuttruff J, Stolz L, Ryabov A, Baum P 2023 *Nature* **619** 63
[175] Gaida J H, Lourenço-Martins H, Sivis M, et al. 2024 *Nat. Photonics* **18** 509
[176] Fang Y, Kuttruff J, Nabben D, Baum P 2024 *Science* **385** 183
[177] Moradifar P, Liu Y, Shi J J, Siukola Thurston M L, Utzat H, van Driel T B, Lindenberg A M, Dionne J A 2023 *Chem. Rev.* **123** 12757
[178] Shimojima T, Nakamura A, Ishizaka K 2023 *Microscopy* **72** 287
[179] Rivera P, Yu H, Seyler K L, Wilson N P, Yao W, Xu X 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 1004
[180] Wang H N, Zhang C J, Rana F H 2015 *Nano Lett.* **15** 8204
[181] Huang J W, Dong N N, McEvoy N, et al. 2019 *ACS Nano* **13** 13390
[182] Breusing M, Ropers C, Elsaesser T 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 086809
[183] Kim H, Lee S, Shin J, et al. 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 1054
[184] Sirtori C 2021 *Nat. Photonics* **15** 1
[185] Yao Z P, Lum Y W, Johnston A, Mejia-Mendoza L M, Zhou X, Wen Y G, Aspuru-Guzik A, Sargent E H, Seh Z W 2023 *Nat. Rev. Mater.* **8** 202
[186] Yang D S, Mohammed O F, Zewail A H 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **107** 14993
[187] Zhang Y Q, Chen X, Yu Y C, Huang Y, Qiu M X, Liu F, Feng M, Gao C T, Deng S B, Fu X W 2024 *Adv. Sci.* **11** 2400633
[188] Mohammed O F, Yang D S, Pal S K, Zewail A H 2011 *J. Am. Chem. Soc.* **133** 7708
[189] Shaheen B S, Huynh K, Quan Y, Choudhry U, Gnabasik R, Xiang Z, Goorsky M, Liao B 2024 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **121** e2410428121
[190] Ellis S, Bartelt N, Léonard F, Celio K, Fuller E, Hughart D, Garland D, Marinella M, Michael J, Chandler D 2021 *Phys. Rev. B* **104** L161303
[191] Tian Y, Yang D, Ma Y, Li Z W, Li J, Deng Z, Tian H F, Yang H S, Sun S X, Li J Q 2024 *Nanomaterials* **14** 310
[192] Wong J, Davoyan A, Liao B L, Krayev A, Jo K, Rotenberg E, Bostwick A, Jozwiak C M, Jariwala D, Zewail A H 2021 *Nano Lett.* **21** 5745
[193] Liao B L, Zhao H, Najafi E, Yan X D, Tian H, Tice J, Minnich A J, Wang H, Zewail A H 2017 *Nano Lett.* **17** 3675
[194] Wang L J, Wu W T, Yang J, Nughays R, Zhou Y F, Ugur E, Zhang X, Shao B Y, Wang J X, Yin J, De Wolf S, Bakr O M, Mohammed O F 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 124
[195] Nughays R O, Yang C, Nematulloev S, Yin J, Harrison G T, Zhao J, Fatayer S, Bakr O M, Mohammed O F 2023 *Adv. Opt. Mater.* **11** 2300190
[196] Wang L J, Liu Y, Yang J, Xu X M, Shao B Y, Zhu H W, Cai H T, Sun T L, Yin J, Alshareef H N, Bakr O M, Zhu Y H, Mohammed O F 2025 *ACS Energy Lett.* **10** 1741
[197] Usama C, Fengjiao P, Xing H, Basamat S, Taeyong K, Ryan G, Geethal Amila G, Haoran S, Alex A, Ding-Shyue Y, Zhifeng R, Bolin L 2023 *Matter* **6** 206
[198] Choudhry U, Zhang J, Huang K, Low E, Quan Y, Shaheen B, Gnabasik R, Yan J, Rubio A, Burch K S, Liao B 2024 arXiv: 2406.07355 [cond-mat.str-el]
[199] Yang D S, Mohammed O F, Zewail A H 2013 *Angew. Chem. Int. Ed.* **52** 2897
[200] Arashida Y, Jeong S, Kawasaki K, Emoto Y, Noyama G, Hada M, Kishibe Y, Shigekawa H, Akada K, Yoshida S, Fujita J I 2024 *ACS Photonics* **11** 2171
[201] Cho J, Hwang T Y, Zewail A H 2014 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **111** 2094
[202] Fu X W, Chen X, Jacopin G, Shahmohammadi M, Zhang C W, Liu F, Liu R, Ganière J D, Liao Z M, Deveaud B 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2101969
[203] Liao B L, Najafi E, Li H, Minnich A J, Zewail A H 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 871
[204] Götze J, Kempe U 2009 *Cathodoluminescence and Its Application in the Planetary Sciences* (Springer) pp1–22
[205] Coenen T, Brenny B J, Vesseur E J, Polman A 2015 *MRS Bull.* **40** 359
[206] Hastenrath M, Balk L J, Löhnert K, Kubalek E 1980 *J. Microsc.* **118** 303
[207] Steckenborn A, Münzel H, Bimberg D 1981 *J. Lumin.* **24** 351
[208] Khatsevich S, Rich D H, Keller S, DenBaars S P 2007 *Phys. Rev. B* **75** 035324
[209] Rich D H, Tang Y 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 3716
[210] Rich D H, Lin H T, Konkar A, Chen P, Madhukar A 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 665
[211] Díaz-Guerra C, Piqueras J, Castaldini A, Cavallini A, Polenta L 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2341
[212] Corfdir P, Abid M, Mouti A, Stadelmann P A, Papa E, Ansermet J P, Ganiere J D, Deveaud-Plédran B 2011 *Nanotechnology* **22** 285710
[213] Fu X W, Jacopin G, Shahmohammadi M, Liu R, Benameur M, Ganiere J D, Feng J, Guo W L, Liao Z M, Deveaud B, Yu D P 2014 *ACS Nano* **8** 3412

INVITED REVIEW

A review of ultrafast electron microscopy characterization techniques*

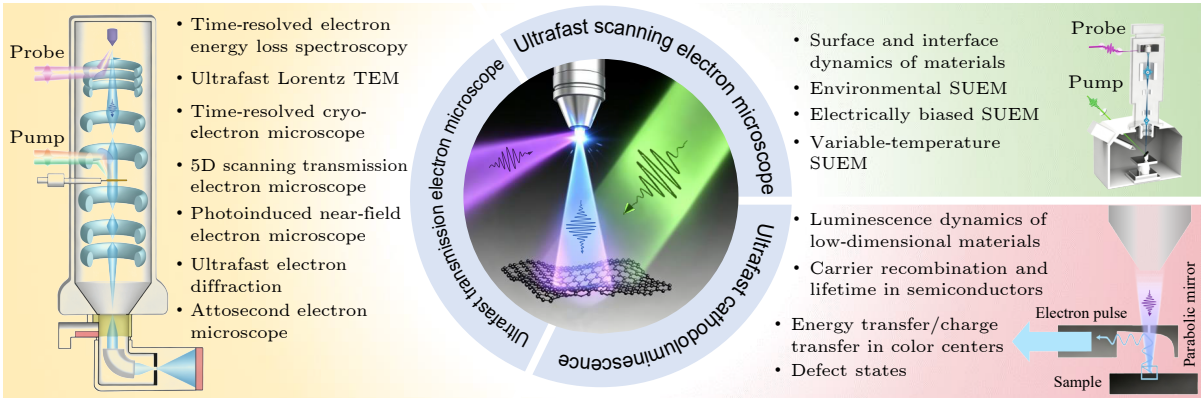
LIU Fang # DENG Ying # LIU Jingchao # CHEN Lenan JI Shaozheng
LIU Chuanpu CHEN Xiang FU Xuewen †

(*Key Laboratory of Low-Light Nonlinear Photonics Ministry of Education, Ultrafast Electron Microscopy Laboratory, School of Physical Sciences, Nankai University, Tianjin* 300071, *China*)

(Received 1 March 2026; revised manuscript received 24 March 2026)

Abstract

Ultrafast electron microscopy (UEM) has emerged as a powerful characterization technique that integrates ultrafast laser technology with electron microscopy. It encompasses a range of modalities, including ultrafast transmission electron microscope (UTEM), scanning ultrafast electron microscope (SUEM), and ultrafast cathodoluminescence (U-CL). These techniques enable the direct tracking of nonequilibrium dynamics with femtosecond temporal resolution and atomic-to-nanoscale spatial resolution, offering unprecedented insight into the microscopic mechanisms of light-matter interactions. Based on the optical-pump–electron-probe scheme, UEM allows precise control of the time delay between laser and electron pulses, thereby facilitating real-time observation of ultrafast processes such as carrier relaxation, lattice vibrations, structural phase transitions, and magnetic domain evolution. To date, UEM has been successfully applied to a wide range of systems, including two-dimensional materials, semiconductor devices, catalytic materials, magnetic materials, and biological macromolecules. These studies have significantly advanced the understanding of nonequilibrium phenomena in materials and provided critical support for the design and optimization of next-generation functional materials and devices. With ongoing improvements in electron sources and detection systems, the spatiotemporal resolution of UEM continues to advance, demonstrating great potential for probing ultrafast processes at the atomic scale and driving breakthroughs in condensed matter physics, materials science, and information science.



Keywords: ultrafast electron microscopy, ultrafast cathodoluminescence, spatiotemporal characterization, carrier dynamics, structural dynamics, magnetic domain dynamics

DOI: 10.7498/aps.75.20260292 **CSTR:** 32037.14.aps.75.20260292

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2024YFA1408000, 2023YFB3307701, 2023YFA1507000), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12127803, 92477130, 12427806, 12074195, 22573050), the Nankai University's 2025 Scientific Research Instrument Experiment Technology R&D Program (Grant No. 25NKSYJS05), the 111Program (Grant No. B23045), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. 63213040, C029211101, C02922101, ZB22000104, DK2300010207, 63243194, 9242000728).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: xwfu@nankai.edu.cn

物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

超快电子显微学表征技术概述

刘芳 邓颖 刘竞超 陈乐楠 纪少政 刘传普 陈祥 付学文

A review of ultrafast electron microscopy characterization techniques

LIU Fang DENG Ying LIU Jingchao CHEN Lenan JI Shaozheng LIU Chuanpu CHEN Xiang FU Xuewen

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 75, 150701 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260292
CSTR: 32037.14.aps.75.20260292
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.75.20260292
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

层状镍基超导体的电子结构和超快动力学
Electronic structure and ultrafast dynamics of nickel-based high-temperature superconductors
物理学报. 2025, 74(17): 177402 https://doi.org/10.7498/aps.74.20250856

超快自旋动力学: 从飞秒磁学到阿秒磁学
Ultrafast spin dynamics: From femtosecond magnetism to attosecond magnetism
物理学报. 2024, 73(15): 157501 https://doi.org/10.7498/aps.73.20240646

阿秒瞬态吸收光谱: 揭示电子动力学的超快光学探针
Attosecond transient absorption spectroscopy: an ultrafast optical probe for revealing electron dynamics
物理学报. 2025, 74(15): 153302 https://doi.org/10.7498/aps.74.20250546

激光诱导自旋阀结构的超快自旋动力学研究
Research on ultrafast spin dynamics of laser-induced spin valve structures
物理学报. 2025, 74(6): 068501 https://doi.org/10.7498/aps.74.20241744

高压下$NbOCl_2$光生载流子超快动力学
Ultrafast photocarrier dynamics of $NbOCl_2$ under pressure
物理学报. 2026, 75(14): 068501 https://doi.org/10.7498/aps.75.20260135

变温飞秒受激拉曼光谱技术揭示类胡萝卜素(球形烯)的激发态结构动力学
Excited-state structural dynamics of carotenoid (spheroidene) revealed by temperature-dependent femtosecond stimulated Raman spectroscopy
物理学报. 2026, 75(12): 068501 https://doi.org/10.7498/aps.75.20251755