

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-16

## 力致发光材料的先进表征技术

曾 帆, 庄逸熙\*, 解荣军\*

(厦门大学 材料学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 力致发光材料在机械作用下产生光子发射, 在智能穿戴、结构健康监测、生物力学成像和光电防伪等领域具有重要应用价值。先进表征技术是研究力致发光材料构效关系与物理机制、指导材料设计并评估工程适用性的重要手段。本文综述了力致发光材料表征技术的研究进展, 首先介绍万能材料试验机、落球塔、旋转电机和直线电机等常规力学加载设备, 以及光电信号采集和系统集成模块; 随后重点讨论瞬态动力学、单颗粒、原位高压和超声诱导力致发光等先进表征技术, 并分析其基本原理、适用场景与技术优势。最后, 总结当前表征技术在多物理场同步、时空分辨率、实际工况监测和高通量智能化方面面临的瓶颈, 并展望未来发展方向。

**关 键 词:** 力致发光; 先进表征; 力致发光效率; 瞬态力致发光

**中图分类号:**

**文献标识码:**

**DOI:** 10.3724/CJL.20260247

**CSTR:** 32170.14.CJL.20260247

## Advanced Characterization Techniques for Mechanoluminescent Materials

ZENG Fan, ZHUANG Yixi\*, XIE Rong-Jun\*

(State Key Laboratory of Physical Chemistry of Solid Surface, Fujian Provincial Key Laboratory of Materials Genome and College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: zhuangyixi@xmu.edu.cn; rxie@xmu.edu.cn

**Abstract:** Mechanoluminescent materials are capable of converting input mechanical stimuli into photon emission, offering substantial promise for smart wearables, structural health monitoring, biomechanical imaging, and optoelectronic anti-counterfeiting. Advanced characterization techniques provide the measurements needed to reveal the structure-property relationships and physical mechanisms, guide materials design, and assess engineering applicability. Here, we review recent advances in the characterization of mechanoluminescent materials. We first introduce conventional mechanical loading platforms, including universal testing machines, drop-ball impact systems, rotary motors, and linear motors, together with optoelectronic signal-acquisition and system-integration modules. We then focus on the advanced characterization techniques, including transient-response measurements, single-particle characterization, in situ high-pressure characterization, and ultrasound-induced mechanoluminescence, and discuss their underlying principles, applicability, and technical advantages. Finally, we summarize current challenges related to synchronized multiphysics measurements, spatiotemporal resolution, monitoring under practical operating conditions, and high-throughput intelligent characterization, and outline future research directions.

**Keywords:** Mechanoluminescence; Advanced characterization techniques; Mechanoluminescence efficiency; Transient mechanoluminescence

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(52532007, 12474412, U25B2063); 福建省自然科学基金(2023J06005); 广东省自然科学基金(2024A151501197)  
This work is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (52532007, 12474412, U25B2063), the Fujian Provincial Natural Science Foundation (2023J06005), and the Guangdong Provincial Natural Science Foundation (2024A15150119).

## 1 引 言

力致发光(mechanoluminescence, ML)是材料在受到压缩、拉伸、弯曲、摩擦或冲击等应力作用时产生发光的物理现象<sup>[1-4]</sup>。与光致发光和电致发光不同,力致发光材料无需持续的外部光源或电源即可将机械能转换为光能。近年来,随着力致发光材料研究的深入,其光谱范围已从可见光拓展至紫外及近红外波段,潜在应用领域持续拓宽,不仅在结构健康诊断、人机交互等方面受到广泛关注,在生物力学工程、血氧监测、复杂环境保密通信及光学防伪等领域也展现出巨大的应用价值<sup>[5-23]</sup>。

要实现力致发光材料的性能调控与器件集成,需要明确晶格应变响应、载流子输运动力学及力到光能量转换的耦合机制<sup>[24-28]</sup>。然而,常规力致发光表征在空间分辨率、时间响应和多物理场同步分析方面仍存在不足,难以分辨复杂的微观动力学过程<sup>[29]</sup>。这些限制驱动研究人员发展分辨率更高、同步能力更强的先进表征技术。例如,基于金刚石对顶砧(DAC)的原位高压表征技术突破了传统加载的压力极限,可在数十 GPa 的极端压力下研究力致发光性能,研究表明,力致发光强度与压力并非简单线性关系,而是同时受压力大小和压缩速率调控<sup>[30]</sup>。在微纳尺度,融合原子力显微镜与透射电子显微镜的单颗粒微纳表征技术可原位观测单晶粒内的局域极化畴分布、电荷迁移规律及界面电荷响应,为界定压电效应与摩擦电效应对发光的贡献提供了重要依据<sup>[31-34]</sup>。针对纳秒至微秒级的发光动力学,高时间分辨瞬态测试可记录载流子的俘获、脱陷和复合过程,并分析载荷施加、电荷变化与发光衰减之间的关系<sup>[35]</sup>。对于柔性和生物相容性材料,高频声场可作为非接触式的机械激励源,并可同步调控声压、频率和作用时间及采集发光信号,拓展了力致发光在体内生物成像及无创传感领域的应用范围<sup>[36-39]</sup>。这些方法获得的多尺度信息,可为研究力致发光机制和改进材料性能提供重要实验依据。

尽管先进表征技术发展迅速,但当前多数研究仍高度依赖常规的力/光测试手段。这类方法主要建立应力与发光强度的对应关系,但难以直接观测微观尺度的载流子俘获、脱陷及复合等动态过程<sup>[40-43]</sup>。由于缺少晶格尺度的原位观测手段,

微观应力调制局域电场、缺陷态分布及载流子迁移的作用机制尚不明确<sup>[44, 45]</sup>,难以指导材料设计。常规测试多以发光强度为主要指标,难以在相同时间和空间尺度上同步采集力、电、光等信号,因此不足以说明材料受力过程中多场相互作用的规律<sup>[26, 46-49]</sup>。缺少这些同步数据,会削弱理论建模的实验基础,并影响力致发光材料在精密探测和成像器件中的应用。

基于以上背景,本文首先围绕机械激励、光学采集与系统集成等典型表征技术模块,梳理力致发光的常规表征方法。在此基础上,从时间尺度、空间尺度及加载方式三个维度,进一步讨论瞬态动力学、单颗粒、原位高压及超声诱导等先进表征方法,系统分析各类方法的测试原理、可观测信息、适用范围与局限。最后,针对现有技术在时空分辨率、多物理场同步测量及定量分析等方面的不足,提出可能的改进方向,为力致发光机制研究、表征方法选择与材料性能优化提供思路。

## 2 常规的力致发光测试装置与表征技术

力致发光测试同时涉及力学加载与光信号测量,可靠的表征系统需要精确控制载荷,并保证力学和光学信号同步采集。常规系统通常由万能材料试验机、落球冲击系统、旋转电机或直线电机等力学加载装置与光学探测模块组成。测试可获得拉伸、压缩、弯曲、摩擦或冲击条件下的应力与应变曲线、位移、加载速率等力学参数,同时记录力致发光强度与时间曲线、发射光谱、衰减寿命和发光空间分布。依据这些数据,建立力致发光强度与应力或应变的关系,并对力致发光效率进行初步定量评估。下文介绍常用的施力装置、信号采集单元和系统集成方式。

### 2.1 力学加载与监测装置

#### 2.1.1 万能材料试验机

万能材料试验机载荷与位移控制精度高,可提供拉伸、压缩和弯曲等多种加载模式,因而常用于研究力致发光强度与应力、应变之间的关系。以力致发光复合膜的响应测试为例,日本产业技术综合研究所徐超男团队(现日本东北大学)利用万能材料试验机对样品施加可控的拉伸载荷,通过精确调整加载速率和形变量,标定了力致发光强度与应变的函数关系<sup>[50]</sup>。其测试配置包括力学

加载平台(万能材料试验机)、光学测量单元(LED光源及 CCD 相机)以及数据同步控制模块(应变片、数据采集器与计算机)。三部分同步工作,可

同时记录力学数据和发光信号,用于评估材料灵敏度,并标定发光强度与应变的线性关系(图 1(a))。

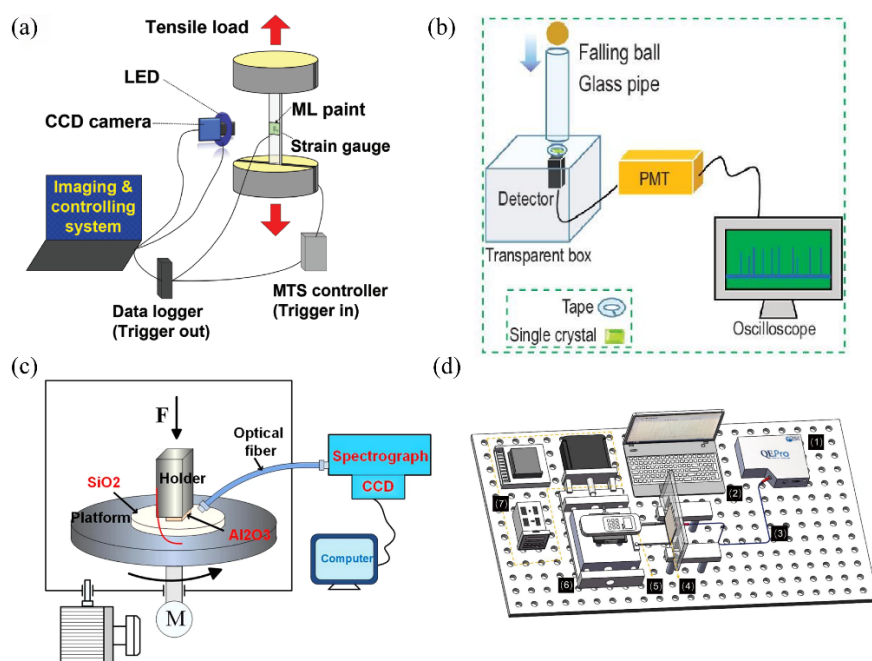


图1 各种力学加载装置。(a)万能材料试验机<sup>[50]</sup>; (b)落球装置<sup>[51]</sup>; (c)旋转电机<sup>[52]</sup>; (d)直线电机<sup>[53]</sup>。

Fig. 1 Mechanical loading apparatuses used for ML characterization. (a) universal testing machine<sup>[50]</sup>; (b) drop-tower apparatus<sup>[51]</sup>; (c) rotary motor<sup>[52]</sup>; (d) linear motor<sup>[53]</sup>.

### 2.1.2 落球装置

落球装置主要用于研究材料在高速冲击下的力致发光行为。该装置通常由带刻度的导向管、钢球和底部测试腔构成,通过调节下落高度实现不同冲击能量下的定量、重复加载。如图 1(b)所示<sup>[51]</sup>,冲击产生的发光信号由透明测试盒下方的探测器收集,并经光电倍增管放大后由示波器记录,从而获得力致发光的瞬态波形。进一步结合落球高度、发光强度和动态发光谱,可分析材料对冲击能量的响应及其重复激发特性。该类装置结构简单、加载过程易于控制,适用于研究冲击诱导的瞬态发光、发光强度与冲击能量之间的关系,以及材料在重复冲击下的稳定性。

### 2.1.3 旋转电机

旋转电机主要用于研究材料在持续摩擦、剪切或循环应力下的力致发光行为。在测试中,样品固定于底部旋转平台,摩擦头对样品施加恒定的压力并产生相对滑动,通过调节转台转速与载荷可改变摩擦条件。所得力致发光信号既可通过顶部的 PMT 捕获,也可通过底部的光敏介质记录其空间分布。如图 1(c)所示, SiO<sub>2</sub> 片固定在电机

驱动的旋转平台上, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 固定于加载架下方,并在法向力作用下与 SiO<sub>2</sub> 表面发生滑动接触。摩擦区域产生的发光信号由光纤收集,经光谱仪和 CCD 同步获得发光光谱与发光图像。清华大学锥建斌等利用该装置研究了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 滑动接触中的摩擦发光行为<sup>[52]</sup>。这类装置适合研究摩擦电效应、压电极化和界面电荷迁移的共同作用,可为力致发光柔性器件和智能可穿戴系统的设计提供参考。

### 2.1.4 直线电机

直线电机响应快、位移控制精度高且重复性较好,常用于力致发光材料的周期性动态测试。与传统机械凸轮相比,直线电机可提供较平稳的连续载荷,也能实现往复滑动摩擦和高频振动等加载模式,适用于时间分辨原位表征和材料疲劳特性研究。如图 1(d)所示,深圳大学彭登峰团队将样品固定于透明基底上,三维位移平台使带探针的压力计垂直对准样品,直线电机则驱动探针在薄膜表面进行精确的往复摩擦<sup>[53]</sup>。机械激发产生的发光信号经透明板下方连接的光纤光谱仪收集,并由计算机实时分析光谱随时间的变化。该配置能够精确控

制接触载荷、滑动速度和运行频率,提高了薄膜材料疲劳性能评估的精度。但该方法也存在局限:硬质探针与样品表面的直接接触摩擦容易引起表面划伤或结构局域损伤,这类损伤可能影响测试结果的重复性并缩短样品寿命。

### 2.1.5 力学监测装置

实时监测应力加载过程中的载荷变化,是构建力致发光强度与应力定量关系的基础。常用测力元件主要有应变片式和压电式传感器,其中压电传感器因响应速度快、动态范围宽,在瞬态冲击型力致发光测试中更具优势<sup>[54-56]</sup>。位移传感器用于记录样品形变量、压缩位移和加载行程,常见器件包括线性可变差动变压器(LVDT)、激光位移计和光栅编码器等。同步记录位移和载荷后,可进一步计算材料的应变、弹性模量及能量耗散行为,为解析力致发光机理提供力学基础数据<sup>[57-60]</sup>。

## 2.2 光学信号采集装置

力致发光测试通常需要同步采集光学信号,

以建立应力或应变与光学响应之间的关系。常用的光学信号采集器件包括光电倍增管(Photomultiplier tube, PMT)、电荷耦合器件(Charge-coupled device, CCD)光谱仪和互补金属氧化物半导体(Complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)图像传感器。

### 2.2.1 光电倍增管

PMT是一种高灵敏度光电探测器,主要由光阴极、电子倍增系统、聚焦与收集电极以及阳极组成<sup>[61]</sup>。入射光子在光阴极产生光电子,光电子经多个倍增极连续发生二次发射而获得高增益,最终由阳极收集并输出电流或电压信号,如图2(a)所示。PMT具有高灵敏度、低噪声、高增益和快速响应等优点,适合检测微弱、快速变化的力致发光信号。其光谱响应范围可根据光阴极材料和窗口材料进行选择,常用器件覆盖可见光至近红外波段。PMT一般为单点探测器,若需获得光谱信息,需与单色器或光谱仪联用。

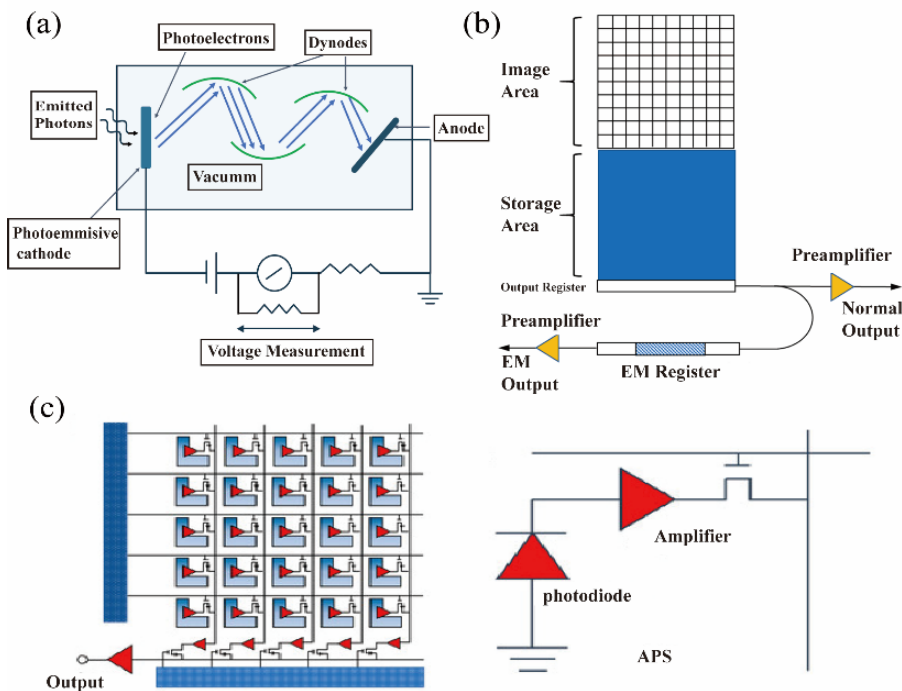


图2 各种光学信号采集装置。(a)光电倍增管;(b)电荷耦合器件<sup>[62]</sup>;(c)互补金属氧化物半导体图像传感器<sup>[62]</sup>。

Fig. 2 Optical detectors used for ML characterization. (a) Photomultiplier tube; (b) Charge-coupled device<sup>[62]</sup>; (c) Complementary metal-oxide-semiconductor image sensor<sup>[62]</sup>.

### 2.2.2 电荷耦合器件光谱仪

CCD光谱仪是一类以CCD阵列为探测器的多通道光谱测量仪器,其主要由入射光学系统、分光元件、CCD阵列和信号处理电路组成,如图2(b)所示<sup>[62]</sup>。入射光经透镜收集后由光栅或棱镜分光,不

同波长的光被投射至CCD阵列的相应像素,并依次完成光电转换、电荷存储、读出和模数转换。CCD光谱仪灵敏度高、动态范围宽且噪声较低,可用于光谱分析、显微成像和弱光探测。作为力致发光检测单元,CCD光谱仪可与光纤耦合,实时记

录材料局部区域在机械刺激下的发射光谱。

### 2.2.3 互补金属氧化物半导体图像传感器

CMOS 图像传感器由感光像素阵列、信号放大器、模数转换器和控制电路等模块构成,如图 2(c)所示。每个像素将入射光子转换为电荷,再经放大和模数转换形成数字图像。与 CCD 相比,CMOS 传感器具有功耗低、集成度高、读出速度快和易于片上处理等优点,适合力致发光的高速成像与空间分布测量<sup>[63]</sup>。但其动态范围、像素一致性和弱光信噪比受器件结构及读出电路影响,定量测试时需进行暗场、非均匀性和响应线性校正。

## 2.3 系统集成与常规的力致发光表征方法

力致发光定量表征的关键,是在时间和空间上准确对应力学激励与光学发射。为此,需要将施力装置、力学传感器和光学探测模块集成为稳

定、同步且可自动控制的测试系统。不同研究目标对系统配置和信号采集方式有不同要求。

### 2.3.1 力致发光光谱测试

力致发光光谱测试用于确定发射峰位、谱带形貌及其随载荷变化的响应,是识别发光中心、判断光谱稳定性并比较不同机械条件下发射行为的基础。为获得可靠的力致发光光谱,研究者开发了多种测试系统。例如,厦门大学解荣军等设计了一种便携式光纤探针表征系统(图 3(a))<sup>[64]</sup>。该系统将导光光纤插入定制玻璃套管。光纤探针可贴近样品的发光区域,将收集到的光信号实时传输至高灵敏度光谱仪,从而在微观形变过程中连续记录发射光谱。除标定力致发光峰位外,该装置还可测量力与光响应曲线和材料发光阈值,并适用于长期循环疲劳测试。

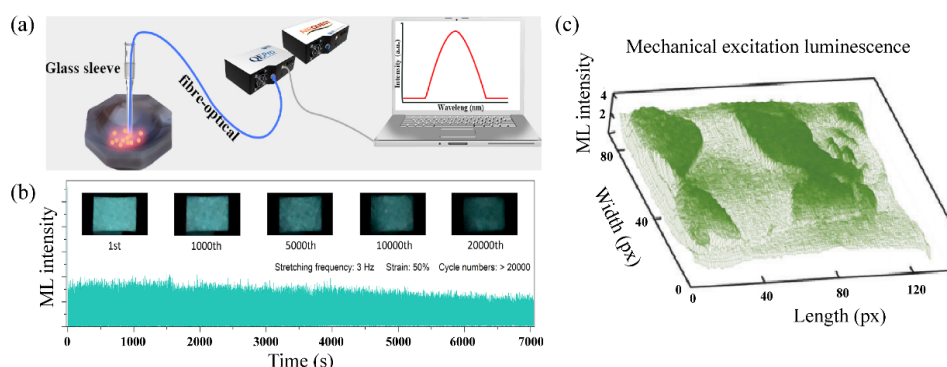


图3 常规力致发光表征方法。(a)力致发光光谱测试<sup>[64]</sup>; (b)力致发光强度—时间响应测试<sup>[65]</sup>; (c)力致发光成像测试<sup>[66]</sup>。

Fig. 3 Conventional ML characterization methods. (a) ML spectral measurement<sup>[64]</sup>; (b) ML intensity-time response measurement<sup>[65]</sup>; (c) ML imaging measurement<sup>[66]</sup>.

### 2.3.2 力致发光强度—时间响应测试

在力致发光强度与时间响应测试中,主要记录重复或持续加载过程中积分发光强度随时间和循环次数的变化。测试时通常同步触发力学加载单元与 PMT,记录强度与时间序列,并提取峰值强度、基线漂移、循环间波动和性能保持率等指标,以评估材料的疲劳稳定性和工作寿命。如图 3(b)所示,中国科学院兰州化学物理研究所王赵峰等在 3 Hz、50% 应变的连续拉伸条件下,对柔性复合弹性体进行了超过 20000 次循环监测<sup>[65]</sup>。强度与时间序列和不同循环节点的发光图像可用于判断长时间测试中的输出波动及性能保持率。

### 2.3.3 力致发光成像

与 PMT 或光纤光谱仪的单点探测不同,力致发光成像测试利用 CCD 或 CMOS 相机逐像素地记录发光强度,将机械载荷引起的局域发光转换为

二维强度图,并可经背景扣除、像素标定和三维重构获得空间分布。所得图像保留了发光位置、形貌、面积和强度梯度等信息,可用于识别应力集中区域、载荷位置和预编码图案。如图 3(c)所示,上海交通大学臧发恒等通过多尺度结构调控局域应力和出光过程,获得了具有熊猫轮廓的像素化力致发光图案,并以三维强度表面直观展示图案内部的亮度差异<sup>[66]</sup>。成像测试比单一强度或光谱曲线提供更多空间信息,但定量结果仍受成像距离、曝光时间、传感器动态范围及环境光抑制等条件影响,因此测试时应同步完成暗场校正和几何标定。

### 2.3.4 力致发光效率测试

力致发光效率通常定义为发射的光能  $E_p$  与输入的机械能  $E_M$  之间的比值,即  $\eta_{ML} = E_p / E_M$ 。若机械能按加载装置的输出或落球的重力势能计

算,所得为基于入射机械能的力致发光效率;只有测得材料实际吸收的机械能,才能进一步讨论材料自身的机械能到光能的转换效率。定量测量时,应在同一次机械激励中同步获得输入机械功和发射光能,并校正背景、探测器响应和光子收集误差。厦门大学庄逸熙等针对连续形变和冲击测试,分别采用积分球光纤光谱仪法和CMOS成像法开展力致发光效率测试。两种方法采用不同的机械能、光能采集方式和校准方案。

(1)积分球光纤光谱仪法。测量前,将光谱功率已知的标准光源与积分球进光孔对准,利用同一积分球和光纤光谱仪记录标准光谱及积分时间;完成标定后移除标准光源,将可拉伸力致发光薄膜贴近进光孔,并由机械载荷装置施加形变,同步记录样品光谱、积分时间和机械做功<sup>[67]</sup>。根据标准光源的波长与功率关系,并对进光孔、光源和样品发光面积进行几何修正后,将样品光谱换算为光谱辐射功率,再对发射波段和加载时间积分得到总光能,由此计算力致发光效率。积分球可均匀收集不同方向的发射光,降低发射角度和局部光斑对结果的影响,尤其适合弹性薄膜在拉伸等连续形变下的总辐射能测量。

(2)CMOS成像法。将力致发光复合薄膜贴附于CMOS传感器表面,并用遮光膜覆盖薄膜以外的感光区域;已知质量的小球从设定高度下落,以重力势能近似机械输入能量<sup>[68]</sup>。CMOS先记录冲击前背景帧,再连续采集冲击后的图像序列。对发光区域各像素的灰度增量进行时空积分,并结合灰度与电子转换系数、像素填充率、平均光电效率及探测半空间修正,可换算冲击过程中产生的总光能,由 $E_P/E_M$ 计算力致发光效率。该方法能够同步定位冲击位置并保留发光的空间分布,适合瞬时冲击;其定量精度依赖曝光线性、传感器光谱响应、背景扣除和薄膜与探测器贴合状态。

两种方案适用于不同的加载条件。CMOS成像法可获得瞬态冲击下的空间分辨发光信息,并换算单次冲击的能量;积分球光谱法更适合连续形变条件下的全方向光收集和光谱标定。比较不同材料时,需要同时报告样品尺寸、加载模式、机械能计算方法、曝光或积分时间、探测器校准及背景处理流程,以免将装置差异误判为材料本征效率差异。

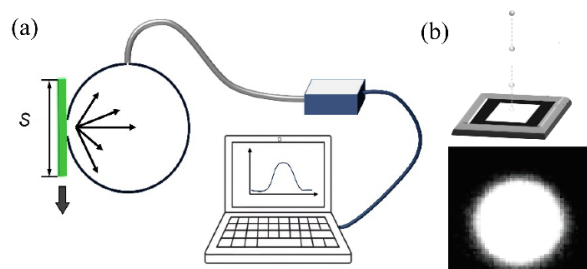


图4 力致发光效率的两种测试方法。(a)经标准光源标定的积分球光纤光谱仪法装置示意<sup>[67]</sup>; (b)CMOS成像法的装置示意及冲击发光光斑<sup>[68]</sup>。

Fig. 4 Two methods for measuring ML efficiency. (a) Schematic of the integrating-sphere-spectrometer method calibrated with a standard light source<sup>[67]</sup>; (b) schematic of the drop-ball-CMOS imaging method and the impact-induced emission spot<sup>[68]</sup>.

### 3 瞬态力致发光表征技术

#### 3.1 力致发光寿命与瞬态发光测试装置

力致发光寿命反映机械激励后载流子的释放、迁移和辐射复合过程,是分析力—光转换动力学的重要参数。万能材料试验机等常规设备的加载时间通常处于毫秒至秒量级,往往长于材料自身的发光衰减时间。实验测得的时间响应因而同时包含力学加载过程与材料本征发光衰减的共同贡献,难以直接用于寿命分析。针对这一时间展宽问题,厦门大学庄逸熙等构建了单次机械脉冲激发与高速光信号采集相结合的力致发光衰减表征系统,如图5(a)所示<sup>[35]</sup>。该系统利用小球自由落体撞击力致发光转换器产生瞬态机械脉冲,发射光经过滤光片和透镜组收集后,由光电倍增管转换为电信号,再经快速放大器放大并输入高带宽示波器记录,用于测量短时间内的力致发光衰减过程。

除分析载流子动力学外,瞬态发光测试获得的力致发光寿命参数还可用于筛选高频应力传感材料。图5(b)给出了ZnS:Mn<sup>2+</sup>转换器的归一化力致发光衰减曲线。信号在约35  $\mu$ s内上升至峰值,随后经历持续数毫秒的衰减;该35  $\mu$ s对应发光上升时间,采用双指数函数拟合可得到约0.97 ms的加权平均发光衰减时间(发光寿命)。图5(c)显示,在冲击能量固定为约1.5 mJ的100次重复测试中,寿命的标准差(Standard deviation, SD)和变异系数(Coefficient of variation, CV)分别为0.04和4.21%,而峰值强度的对应值分别0.33和21.7%。与容易受到撞击幅值、空间位置和采集时刻影响的峰值强度相比,寿命参数重复性更好,

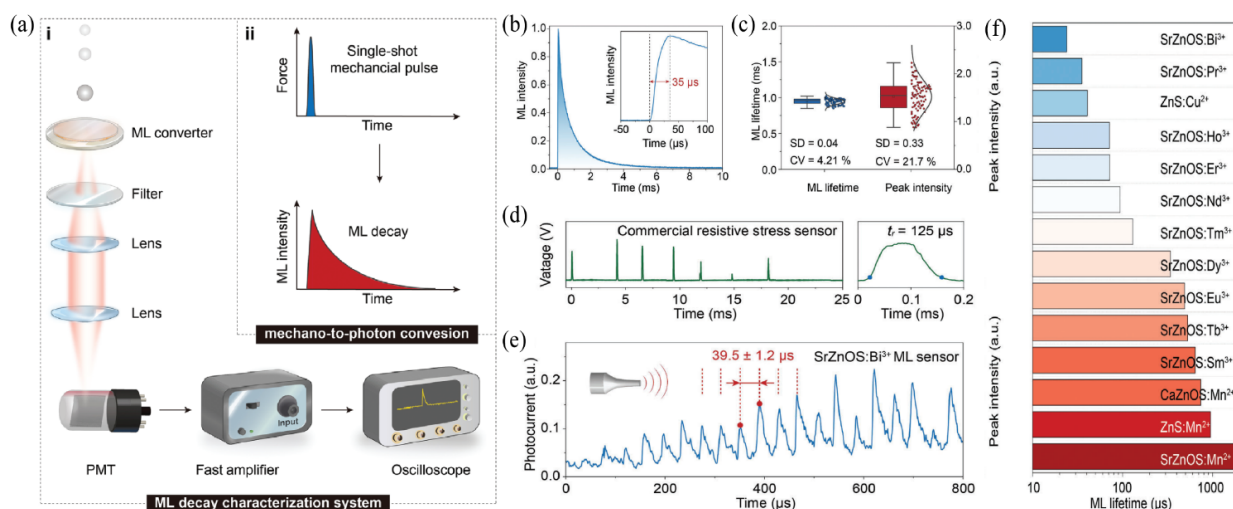


图5 力致发光寿命与瞬态发光测试<sup>[35]</sup>。(a)单脉冲激发力致发光衰减表征装置;(b)ZnS:Mn<sup>2+</sup>转换器的归一化力致发光强度—时间曲线,插图给出约35  $\mu$ s的发光上升时间;(c)100次重复测试中ZnS:Mn<sup>2+</sup>的力致发光寿命(左)和峰值强度(右)的统计分布,冲击能量约1.5 mJ,SD为标准差,CV为变异系数;(d)商用电阻式应力传感器的时间分辨输出;(e)SrZnOS:Bi<sup>3+</sup>力致发光传感器对25 kHz超声波的探测;(f)典型可自恢复力致发光转换器的寿命比较,测量范围为24–1790  $\mu$ s。

Fig. 5 ML lifetime and transient-response characterization<sup>[35]</sup>. (a) Single-pulse ML decay characterization system; (b) normalized ML intensity-time curve of a ZnS:Mn<sup>2+</sup> converter, with the inset showing an ML rise time of approximately 35  $\mu$ s; (c) statistical distributions of the ML lifetime (left) and peak intensity (right) of ZnS:Mn<sup>2+</sup> over 100 repeated tests at an impact energy of approximately 1.5 mJ (SD, standard deviation; CV, coefficient of variation); (d) time-resolved output of a commercial resistive stress sensor; (e) detection of 25 kHz ultrasonic waves using a SrZnOS:Bi<sup>3+</sup>-based ML sensor; (f) comparison of the ML lifetimes of representative self-recoverable ML converters, spanning 24–1790  $\mu$ s.

受应力波动的影响也较小。在器件响应测试中,图5(d)中商用电阻式应力传感器的单脉冲上升时间约为125  $\mu$ s,而图5(e)中基于SrZnOS:Bi<sup>3+</sup>的力致发光传感器可分辨25 kHz超声波的独立脉冲,响应时间为 $39.5 \pm 1.2 \mu$ s。图5(f)比较了多种可自恢复力致发光转换器,测得寿命跨越24–1790  $\mu$ s,其中SrZnOS:Bi<sup>3+</sup>最短(24  $\mu$ s),SrZnOS:Mn<sup>2+</sup>最长(1790  $\mu$ s)。较短的寿命可减少相邻机械作用的信号重叠,提高可分辨的应力脉冲频率。因此,寿命数据可作为超快、高频传感材料预筛选和器件匹配的依据。

### 3.2 高速显微成像技术

高速显微成像需要在单次瞬态机械作用中连续获取多帧图像。帧间隔缩短会减少积累光子数,使微弱力致发光信号更容易受到读出噪声和环境光干扰。因此,高速成像需要较高的光子收集率。为提高光子收集率,厦门大学解荣军团队将力致发光薄膜直接集成在CMOS图像传感器表面,构建近距离成像装置(图6(a))<sup>[16]</sup>。在瞬态机械冲击下,高帧率CMOS传感器可实现毫秒级时间分辨率和微米级空间分辨率,并原位记录冲击

瞬间应力集中区域的发光形貌及其随时间的变化。薄膜与像素阵列的间距接近零,去除远距离透镜聚焦,使朝向探测器一侧发射的光子能够直接进入像素;以入射传感器侧的总光强 $I_0$ 为基准,按80%的像素填充率估算,近距离模式的理论收集量约为 $0.8I_0$ ,而典型远距离透镜模式约为 $0.01I_0$ (图6(b))。这种近距离结构提高了入射至像素的光子通量,可补偿短曝光造成的信号损失,并将应力探测灵敏度提高约两个数量级。

该CMOS传感器的像素间距为100  $\mu$ m,设计帧率可达600 fps(frames per second)。实验中采用300 fps记录落球冲击时,相邻图像间隔为3.3 ms,可连续显示冲击中心的应力集中及随后超过30 ms的形变恢复过程(图6(c)和(d));所得二维分布的空间分辨率为254 dpi,对应约100  $\mu$ m的像素尺度。提高帧率会缩短积分时间并降低单帧信噪比,而降低帧率可提高灵敏度但牺牲时间分辨率,因此应根据冲击速度和最低可检测应力选择采集速率,并配合暗场背景扣除、像素响应校正和遮光处理。由此可在同一测量中显示毫秒级瞬态过程和百微米尺度的应力分布。

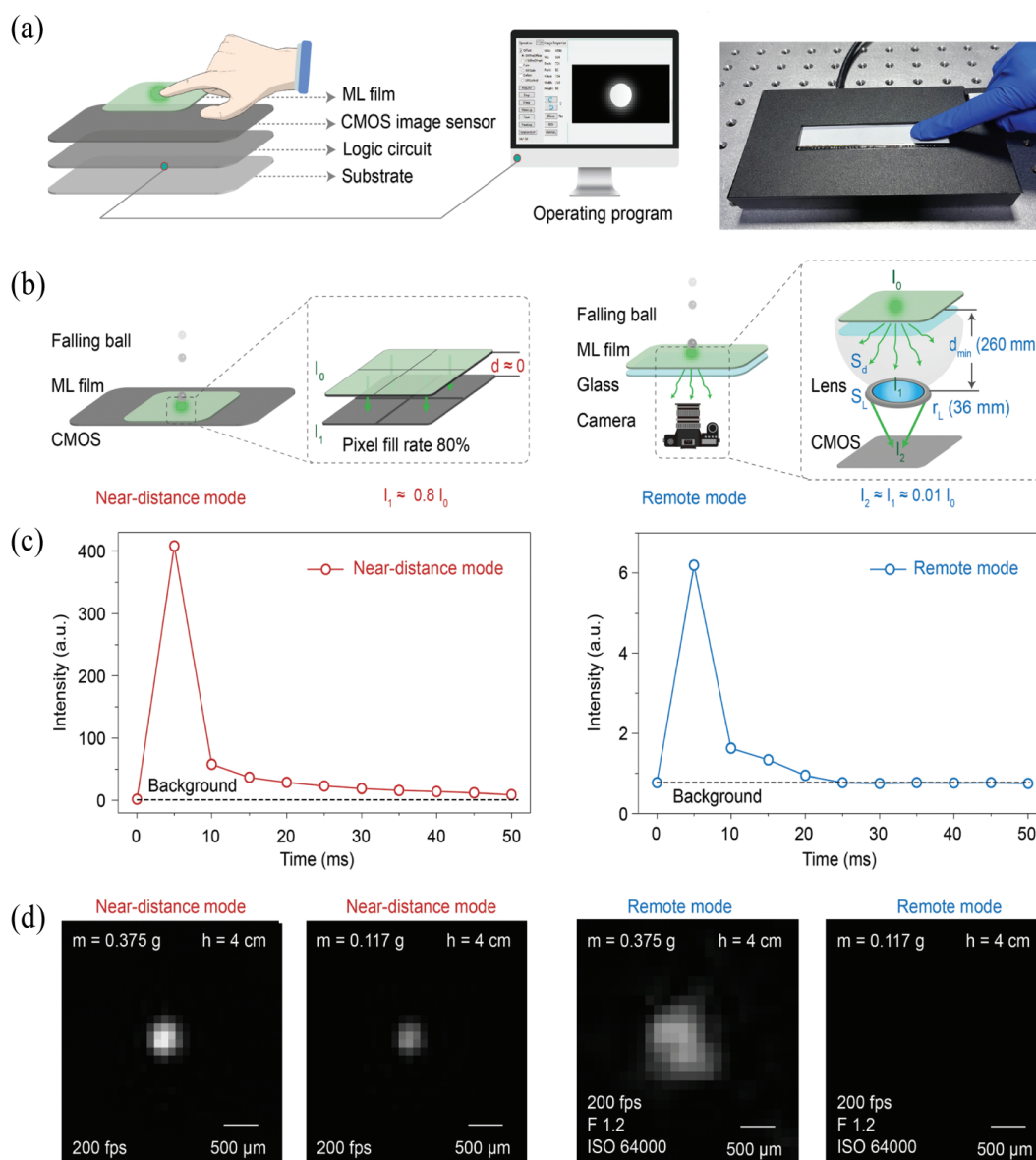


图6 近距离力致发光高速显微成像装置及性能<sup>[16]</sup>。(a)力致发光薄膜直接集成于CMOS图像传感器表面的装置结构与实物;(b)近距离模式(像素填充率80%,  $I_1 \approx 0.8I_0$ )与远距离透镜模式( $I_2 \approx 0.01I_0$ )的光子收集路径;(c)两种模式在落球冲击后的光强—时间响应;(d)不同落球质量下两种模式获得的灰度图像(200 fps, 标尺 500  $\mu\text{m}$ )。

Fig. 6 Near-distance high-speed microscopic ML imaging device and performance<sup>[16]</sup>. (a) Device architecture and photograph of an ML film directly integrated on a CMOS image sensor; (b) photon-harvesting paths in the near-distance mode (80% pixel fill factor,  $I_1 \approx 0.8I_0$ ) and remote lens-based mode ( $I_2 \approx 0.01I_0$ ); (c) intensity-time responses of the two modes after drop-ball impact; (d) grayscale images acquired in the two modes using balls of different masses (200 fps; scale bars, 500  $\mu\text{m}$ ).

## 4 单颗粒力致发光表征技术

### 4.1 原子力显微镜联用系统

常规力致发光表征通常以复合薄膜为对象,难以区分颗粒、聚合物基体和界面贡献,单颗粒测试可减少这些复合效应<sup>[69]</sup>。日本产业技术综合研究所徐超男等开发了结合原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)与光电探测器的联用系

统,实现了对单颗粒力致发光行为的原位测量<sup>[70]</sup>。如图7(a)所示,该测试系统主要由AFM、PMT以及示波器或光子计数器构成。在表征过程中,可利用AFM探针直接对单个颗粒施加压力,激发颗粒产生力致发光;产生的光通过光纤传输到PMT,并由光子计数系统完成光子计数;联用光谱仪时还可开展光谱分析。该系统可用于研究力致

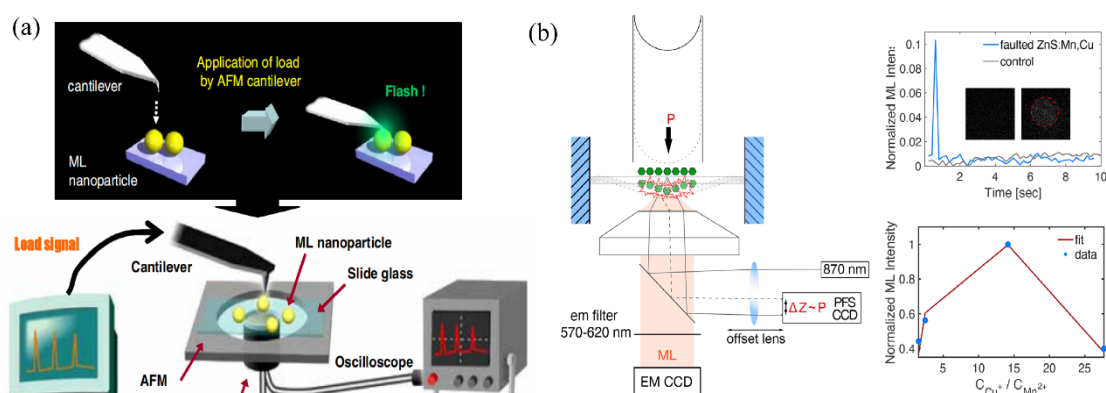


图7 单颗粒力致发光表征系统。(a)基于AFM的发射测量装置示意图<sup>[70]</sup>;(b)基于PFS的单颗粒力致发光测试装置<sup>[72]</sup>。

Fig. 7 Single-particle ML characterization systems. (a) Schematic illustration of the emission measurement apparatus based on AFM<sup>[70]</sup>; (b) PFS-based single-particle ML testing setup<sup>[72]</sup>.

发光机制和发光各向异性,并为开发高空间分辨率应力探针提供参考。但结果仍受探针与颗粒接触状态和基底约束影响,并且单颗粒发光强度较弱,也对探测灵敏度提出了较高要求。

#### 4.2 原位操控与光谱采集技术

在单颗粒力致发光测试中,微纳尺度力致发光信号较弱,且容易受到基底形变所致光学失焦的影响<sup>[71]</sup>。美国哈佛大学 Maria V. Mukhina 等为此在配备完美对焦系统(perfect focus system, PFS)的尼康 Eclipse Ti2 倒置宽场显微镜上,集成了原位机械操控与高灵敏光谱表征平台(图 7 (b))<sup>[72]</sup>。该系统在对单根 ZnS:Mn,Cu 纳米棒施加可控压力时,利用近红外激光实时监测受载玻片的 Z 轴形变;PFS 单元通过驱动物镜自动补焦,确保样品始终处于焦平面;同时,还利用载玻片的弯曲刚度将焦深变化量精确换算为作用于纳米棒的

实际压力。借助该平台,研究者分析了  $\text{Cu}^+/\text{Mn}^{2+}$  配比对单颗粒本征力致发光强度的调制规律,对比实验还表明,堆垛层错在发光激发中起主导作用。该系统将微纳操控、压力原位换算和高信噪比光谱测量集成在同一平台,为研究纳米晶体缺陷态介导的力致发光提供了实验方法。

### 5 高压下的力致发光表征技术

#### 5.1 金刚石对顶砧加压系统

在常规力致发光表征中,应力通常处于 MPa 量级及以下。为探究更高压力(GPa)条件下的力致发光行为,研究人员开发了基于动态金刚石对顶砧(dynamic diamond anvil cell, dDAC)的联用表征系统,其整体结构如图 8(a)所示。该系统的激发端由任意函数发生器驱动,向压电执行器输入设定的波形信号(图 8(b)–(e)),同时向后端检

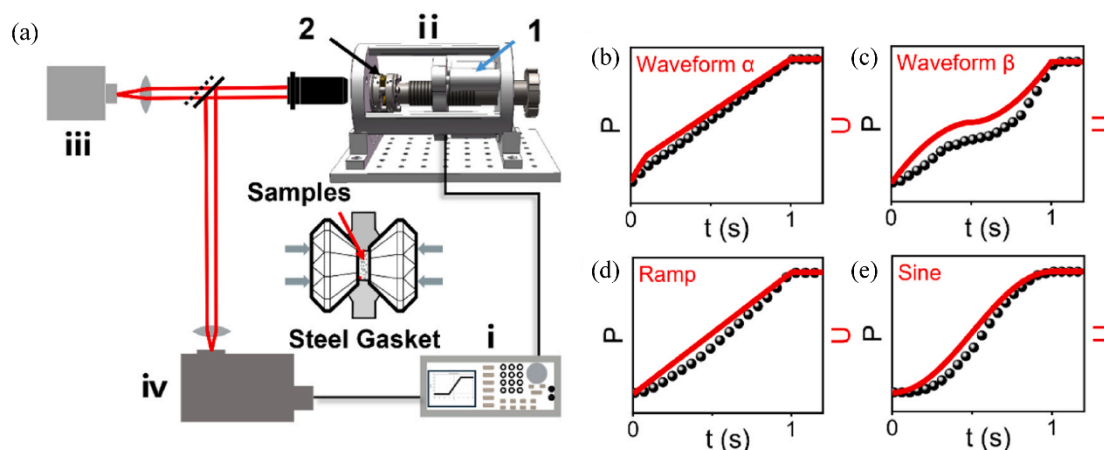


图8 (a)金刚石对顶砧表征系统示意图<sup>[73]</sup>;(b)–(e)任意函数发生器输出的四条波形,黑色圆点表示经红宝石压力计校准的实际压力变化<sup>[73]</sup>。

Fig. 8 (a) Schematic diagram of the diamond anvil cell characterization system<sup>[73]</sup>; (b – e) Four waveforms output from the arbitrary function generator. Black dots denote the actual pressure changes, calibrated via the ruby pressure gauge<sup>[73]</sup>.

测设备发送触发指令,使高压瞬态加载与信号采集保持同步。中国科学院北京纳米能源与系统研究所王中林团队利用该系统测试了  $\text{ZnS:Mn}^{2+}$  在高压下的力致发光性能。在压电执行器的快速驱动下,dDAC可按设定波形将样品快速压缩至约 30 GPa<sup>[73]</sup>。动态压缩过程中产生的力致发光由光学显微系统收集,快速相机记录发光区域,高灵敏度光谱仪同步采集光谱。

## 5.2 高压结构表征

极高压下的晶格响应与力致发光的产生密切相关。原位高压同步辐射 X 射线衍射(synchro-

tron X-ray diffraction, SXRD)可通过衍射峰、晶格参数和结构精修表征晶体结构随压力的变化,并为发光中心局域配位环境提供依据。如图 9(a)所示,北京高压科学研究中心杨文革等的结果表明,BaZnOS在压缩过程中,当压力不超过 15 GPa 时仍保持中心对称正交晶系结构<sup>[24]</sup>。研究结果还显示,发光中心的光学性质高度依赖局域配位晶体场。极高压引起的键长和多面体骨架畸变会改变晶体场强度及能级劈裂,这些结构信息可解释力致变色和发光阈值提供晶体学依据。

原位高压拉曼光谱适用于实时监测压力诱导

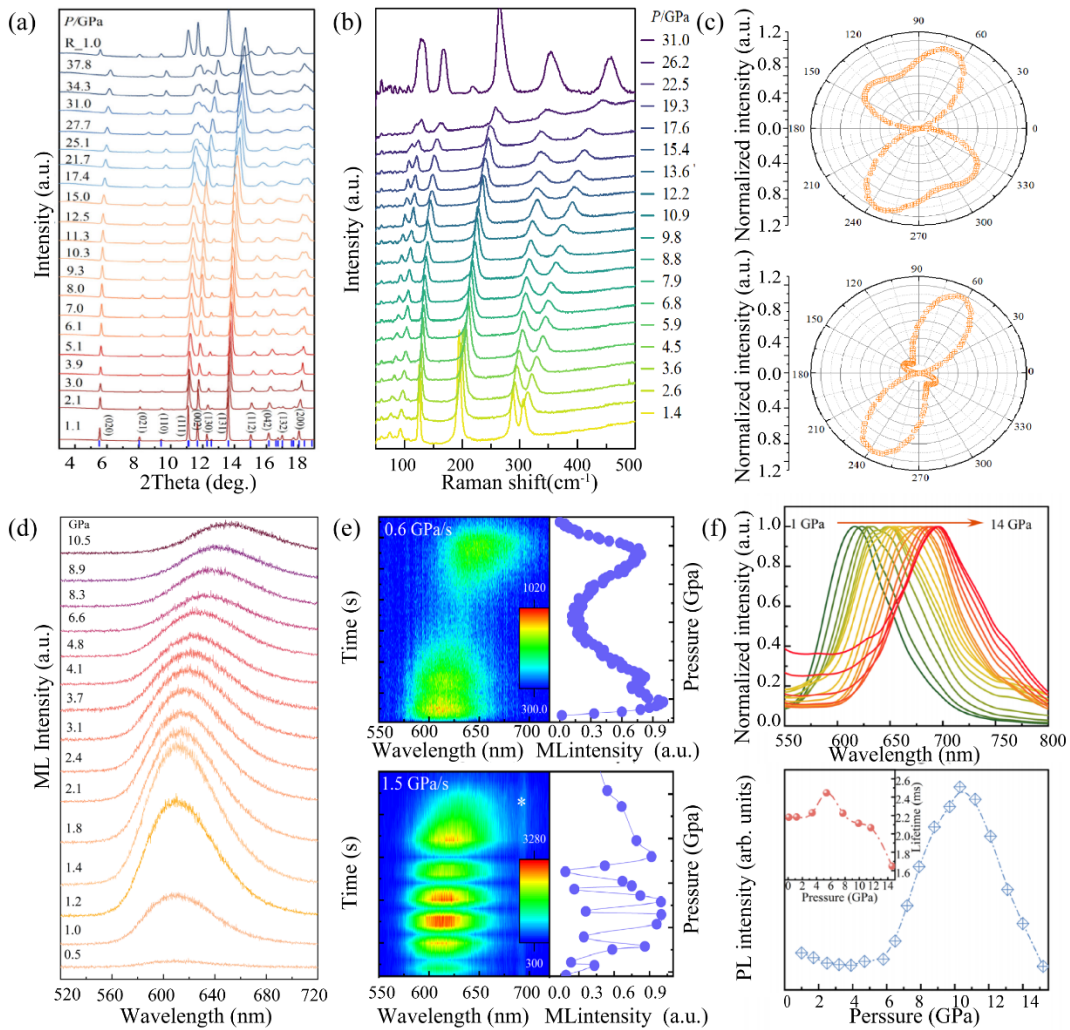


图 9 高压下的结构与发光表征。(a)BaZnOS: $\text{Mn}^{2+}$ 的原位高压 XRD 图谱<sup>[24]</sup>;(b)532 nm 激光激发下的 BaZnOS 高压拉曼光谱<sup>[24]</sup>;(c)BaZnOS 的偏振 SHG 信号<sup>[24]</sup>;(d)SrZnOS: $\text{Mn}^{2+}$ 在特定速率下快速压缩条件下的力致发光<sup>[74]</sup>;(e)SrZnOS: $\text{Mn}^{2+}$ 在不同负载速率下的力致发光<sup>[74]</sup>;(f)SrZnOS: $\text{Mn}^{2+}$ 的压力依赖性光致发光光谱<sup>[74]</sup>。

Fig. 9 Structural and luminescence characterization under high pressure. (a) In situ high-pressure synchrotron XRD patterns of Mn-doped BaZnOS, along with the variations in lattice parameters and bond lengths as a function of pressure<sup>[24]</sup>. (b) High-pressure Raman spectra of BaZnOS excited by a 532 nm laser<sup>[24]</sup>. (c) Polarized SHG signal of BaZnOS<sup>[24]</sup>. (d) ML of SrZnOS: $\text{Mn}^{2+}$  under rapid compression at given rates<sup>[74]</sup>. (e) Oscillatory ML behavior of SrZnOS: $\text{Mn}^{2+}$  at different loading rates<sup>[74]</sup>. (f) Pressure-dependent photoluminescence spectra of SrZnOS: $\text{Mn}^{2+}$ <sup>[74]</sup>.

的晶格振动变化,判定压致相变,解析极端高压下材料微观结构演化。如图9(b)所示,在加压至31.0 GPa的过程中,反映晶格弯曲振动特征的拉曼峰( $284\text{ cm}^{-1}$ 和 $300\text{ cm}^{-1}$ 谱带)由于化学键缩短及层间相互作用增强而持续蓝移。这些结果表明,各向异性压缩可能引起局域结构的非对称畸变,并通过调制基质带隙与陷阱能级深度影响力致发光过程中的载流子跃迁。

原位高压二次谐波产生(second harmonic generation, SHG)对空间反演对称性破缺较为敏感,可用于补充表征XRD难以分辨的局域极化变化。如图9(c),在BaZnOS的原位SHG测试中观察到随压力变化的非对称花瓣状偏振图案,这可能是压力诱导的局域结构畸变导致的。动态压缩过程中形成的局域极化场可能促进载流子脱陷和迁移,从而影响力致发光。

### 5.3 原位高压力致发光光谱

动态压缩条件下的力致发光同时受瞬时压力和压力变化速率 $dp/dt$ 影响,两者的作用需要分别讨论。对此,杨文革团队将dDAC系统与光谱仪联用,考察压力和压缩速率对力致发光瞬态动力学的影响<sup>[74]</sup>。当利用dDAC系统将样品快速压缩至约10 GPa时,SrZnOS:Mn<sup>2+</sup>的力致发光表现出显著的压力依赖性(图9(d))。实验表明,在连续压缩过程中,该材料的力致发光强度随压力升高呈现先增强后减弱的趋势;当压力保持恒定时,力致发光信号则逐渐消失,说明恒定压力本身不能持续激发力致发光。在低压下,约608 nm处的力致发光发射峰与光致发光光谱高度一致,表明该力致发光光源于Mn<sup>2+</sup>的 ${}^4\text{T}_1 \rightarrow {}^6\text{A}_1$ 能级跃迁;随着压力由常压增至约11 GPa,力致发光发射峰从608 nm持续红移至670 nm,这一红移可能与高压引起的晶体场增强有关。

除了压力大小外,一定压力下的加载速率是调控力致发光行为的另一关键因素。如图9(e)所示,利用高压力致发光光谱测试,考察了动态加载速率对力致发光的影响。当压缩速率由慢至快,力致发光依次经历宽峰弥散发射、多峰交替振荡,直至极高速率下的单发射峰,表明快速压缩条件下机械刺激与光子发射之间存在特定的时间响应关系。该振荡型力致发光主要出现在1.5–4 GPa的中低压区间,超过4 GPa时受到显著抑制并在10 GPa以上完全消失,说明高静水压会明显抑

制该力致发光过程。

### 5.4 原位高压光致发光光谱

探究力致发光机理时,需明确区分压电诱导载流子脱陷与晶格畸变对发光中心电子结构的影响。原位高压光致发光(photoluminescence, PL)光谱是排除应力干扰、探究高压下发光中心局域配位及能级变化的有效表征手段。如图9(f)所示,杨文革团队发现SrZnOS:Mn<sup>2+</sup>在1–14 GPa的静水压加载过程中,PL光谱表现出连续的红移<sup>[74]</sup>。PL与力致发光呈现相近的红移趋势,表明两者可能源于相同的发光中心跃迁。随着外压增大,基质晶格压缩、原子间距缩短,发光中心周围的局域晶体场可能随之增强,使Mn<sup>2+</sup>离子的d–d跃迁能级发生劈裂并引起发射波长红移<sup>[75]</sup>。高压PL光谱还可原位反映材料的微观结构与对称性变化,为确定晶相稳定区间和研究高压力致发光猝灭机制提供了依据。

## 6 超声波诱导的力致发光表征技术

### 6.1 聚焦超声诱导力致发光装置

传统接触式加载(如摩擦、按压和拉伸)难以在流体环境和深层生物组织中有效施加应力。针对这一限制,美国斯坦福大学洪国松团队开发了基于聚焦超声(Focused ultrao-sonic, FUS)的非接触式力致发光测试装置<sup>[76]</sup>。该系统通过声学透镜或换能器阵列将高频声能穿透介质并聚焦于微小体积内,实现对流体或生物组织中纳米力致发光材料的高时空分辨率激发与原位检测。在体外测试中(图10(a)上部),微管流体平台集成了紫外充能、超声激发与相机检测功能。微管下方的高频聚焦换能器施加聚焦声场,避免了接触加载造成的界面磨损。时间分辨曲线和循环测试结果显示,系统可记录与脉冲超声同步的力致发光响应,连续80次循环后发光强度仍保持稳定。在活体测试中(图10(a)下),系统采用环形超声换能器实现了声光同轴耦合。聚焦超声由外环向下穿透颅骨,激发小鼠脑血管内的力致发光胶体;激发的力致发光光子则通过换能器中心通孔垂直向上射出并被相机捕获。结合微位移机构,该装置可在脑部进行高精度空间定位和路径扫描。拟合曲线的半峰全宽较窄,表明即使在强散射脑组织中,该装置仍可达到亚毫米级空间定位精度。

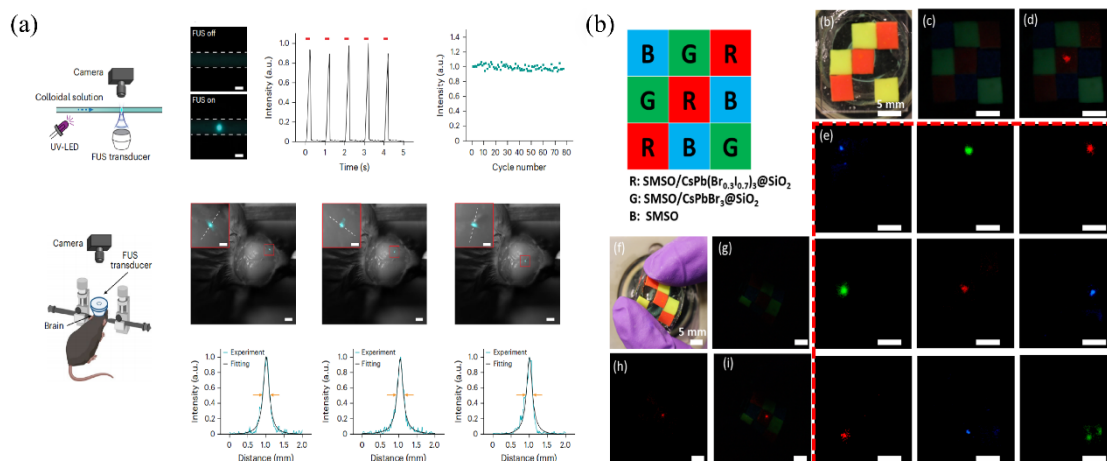


图 10 聚焦超声诱导力致发光表征。(a)循环系统中的超声扫描光源<sup>[76]</sup>;(b)基于颜色可调力致发光的聚焦超声激活柔性多色显示器<sup>[77]</sup>。

Fig. 10 Focused-ultrasound-induced ML characterization. (a) An ultrasound-scanning light source in circulatory systems<sup>[76]</sup>. (b) A FUS-activated, flexible multicolor display enabled by color-tunable ML<sup>[77]</sup>.

## 6.2 原位超声实时监测

原位超声实时监测可同步获取材料在超声作用下的发光强度、光谱及空间分布,揭示发光信号随声压、频率和作用时间的变化规律。由于部分传统力致发光材料存在颗粒大、色彩单一等局限,难以满足高空间分辨率与多色编码的监测需求。针对这一需求,研究人员结合带隙工程和复合封装技术,提出了声场原位实时监测方案。如图 10(b)所示,湖南大学谭蔚泓团队将发射蓝光的  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu},\text{Dy}$  (SMSO) 力致发光纳米胶体作为能量供体,与作为能量受体的量子点(绿光  $\text{CsPbBr}_3@\text{SiO}_2$  和红光  $\text{CsPb}(\text{Br}_{0.3}\text{I}_{0.7})_3@\text{SiO}_2$ ) 共同封装于 PDMS 基底中,制备出柔性 RGB 像素阵列<sup>[77]</sup>。当聚焦超声扫描特定像素时,声压激发 SMSO 发射蓝光,蓝光经能量转移进一步激发钙钛矿量子点产生高色纯度绿光或红光。图 10(b)右侧和下方显示,超声焦点对准特定像素块时,暗场中相应区域被点亮,发光光斑同时受声场分布、材料响应阈值、像素尺寸和光传播影响;经声场与光学点扩散校准后,其尺寸可用于估计超声焦域范围。该阵列既可产生高色纯度的超声激发发光,也可作为声到光转换探针,对动态超声声场进行快速、多色原位映射,并为无线控制柔性显示器和深层组织光子学接口的开发提供参考。

## 7 总结与展望

力致发光材料的表征已从常规宏观测试扩展至超快瞬态动力学、单颗粒、原位高压及超声诱导

等前沿方法。结合结构、光谱与成像等多维度数据,可从不同尺度获取晶格畸变、电荷迁移及缺陷相关的实验信息,为力致发光机制判断和材料设计提供依据。尽管如此,材料内部力—电—光耦合过程复杂,现有测试手段在多场同步、时空分辨、实际工况适配及材料筛选效率等方面仍存在不足。

(1)多物理场同步测量仍是亟待突破的关键问题。未来可将微区加压、超快时间分辨测量与纳米成像集成于同一平台,同步采集多种信号;同时建立可模拟力、热、光、电等复合条件的测试系统,以区分温度、电场等因素对力致发光性能及稳定性的影响。

(2)现有空间分辨成像多停留在微米尺度,难以分辨原子结构及缺陷变化;时间分辨率亦不足以记录更短时间尺度内的电子过程。将扫描探针、原子力显微表征与近场发光成像相结合,有望将空间分辨率提升至纳米甚至近原子尺度。超快光谱则可用于记录应力施加瞬间的电荷释放与迁移,为分析力致发光的微观过程提供直接信息。

(3)测试条件需进一步贴近实际应用场景。当前多数实验于受控实验室环境中开展,难以充分反映材料在真实工况下的工作状态<sup>[78]</sup>。面向建筑结构监测、生物成像及柔性电子等应用,可发展非接触、实时、原位监测方法,记录器件在实际工况下的发光变化,分析性能衰减与老化失效规律,进而指导延长材料与器件的使用寿命。

(4)力致发光新材料的筛选目前仍较大程度依赖经验试错。将自动合成、高通量并行测试、数

据分析与性能预测集成于同一平台,并建立标准化的结构—缺陷—发光数据库,结合人工智能技术能够大幅提高材料筛选效率,同时也有助于针对特定性能开展材料设计。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] HUANG Z, LI X, LIANG T, *et al.* Smart mechanoluminescent phosphors: a review of zinc sulfide-based materials for advanced mechano-optical applications [J]. *Responsive Mater.*, 2024,2(3):e20240019-1-52.
- [ 2 ] ZHUANG Y, XIE R J. Mechanoluminescence rebrightening the prospects of stress sensing: A review [J]. *Adv. Mater.*, 2021,33(50):2005925-1-33.
- [ 3 ] YU J, NIU Q, LIU Y, *et al.* Principles, properties, and sensing applications of mechanoluminescence materials [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023,11(43):14968-15000.
- [ 4 ] ZHANG J C, WANG X, MARRIOTT G, *et al.* Trap-controlled mechanoluminescent materials [J]. *Prog. Mater. Sci.*, 2019,103:678-742.
- [ 5 ] HIRAI Y. On sense and deform: molecular luminescence for mechanoscience [J]. *ACS Appl. Opt. Mater.*, 2024,2(6):1025-1045.
- [ 6 ] HAJRA S, KAJA K R, PANDA S, *et al.* Mechanoluminescence: mechanisms, emerging applications, and future prospects [J]. *Nano Energy*, 2025,145:111418-1-16.
- [ 7 ] JIANG S, WU X, YANG F, *et al.* Activation of mechanoluminescent nanotransducers by focused ultrasound enables light delivery to deep-seated tissue in vivo [J]. *Nat. Protoc.*, 2023,18(12):3787-3820.
- [ 8 ] XIONG P, PENG M, YANG Z. Near-infrared mechanoluminescence crystals: a review [J]. *iScience*, 2021,24(1):101944.
- [ 9 ] CHEN C, ZHUANG Y, TU D, *et al.* Creating visible-to-near-infrared mechanoluminescence in mixed-anion compounds  $\text{SrZn}_2\text{S}_2\text{O}$  and  $\text{SrZnSO}$  [J]. *Nano Energy*, 2020,68:104329.
- [ 10 ] SHAO P, XIONG P, XIAO Y, *et al.* Self-recoverable NIR mechanoluminescence from  $\text{Cr}^{3+}$  doped perovskite type aluminate [J]. *Adv. Powder Mater.*, 2024,3(2):100165-1-9.
- [ 11 ] ZHANG X L, LI P P, LI J, *et al.* Highly efficient mechanoluminescence of  $\text{SrAl}_{2-x}\text{Y}_x\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  via trap regulation for dynamic signature anticounterfeiting [J]. *J. Rare Earths*, 2025,43(6):1133-1139.
- [ 12 ] 杨苗,高亚淋,龙席,等. 力致发光材料的发光机理及生物医学应用研究进展 [J]. *发光学报*, 2025,46(8):1352-1383.
- YANG M, GAO Y L, LONG X, *et al.* Recent advances of luminescence mechanisms and biomedical applications of mechanoluminescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025,46(8):1352-1383. (in Chinese)
- [ 13 ] 陈剑,陈飞翔,邢振宇,等. 基于镧系发光纳米材料的神经影像与调控 [J]. *发光学报*, 2025,46(9):1577-1595.
- CHEN J, CHEN F X, XING Z Y, *et al.* Lanthanide-based luminescent nanoparticles for neuroimaging and neural modulation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025,46(9):1577-1595. (in Chinese)
- [ 14 ] DONG Y, AN W, WANG Z, *et al.* An artificial intelligence-assisted flexible and wearable mechanoluminescent strain sensor system [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2024,17(1):62-77.
- [ 15 ] LIN N, ZHANG Y, XIAO Z, *et al.* Self-powered and self-recovered mechanoluminescent electronic skins for detecting and distinguishing diverse external stimuli [J]. *ACS Sens.*, 2024,9(7):3783-3793.
- [ 16 ] ZHUANG Y, LI X, LIN F, *et al.* Visualizing dynamic mechanical actions with high sensitivity and high resolution by near-distance mechanoluminescence imaging [J]. *Adv. Mater.*, 2022,34(36):2202864-1-11.
- [ 17 ] LI C, QIAN K, ZHAO F, *et al.* Amplified sensitivity of rate-dependent mechanoluminescent metamaterials [J]. *Matter*, 2025,8(12):102335-1-10.
- [ 18 ] JEONG H I, JUNG H S, DUBAJIC M, *et al.* Super elastic and negative triboelectric polymer matrix for high performance mechanoluminescent platforms [J]. *Nat. Commun.*, 2025,16(1):854-1-11.
- [ 19 ] CHAO K F, WANG Z, DENG C, *et al.* Improvement in mechanoluminescence performance and implementation of dual-mode photoluminescence based on  $\text{Bi}^{3+}$  ion non-intrinsic defect control strategy [J]. *J. Rare Earths*, 2025,43(10):2128-2136.
- [ 20 ] 何平,韩卿,刘青隼,等. 基于电场响应材料的稀土发光器件 [J]. *中国稀土学报*, 2025,43(1):29-43.

- HE P, HAN Q, LIU Q D, *et al.* Rare-earth luminescent devices based on electric-field-responsive materials [J]. *J. Chin. Soc. Rare Earths*, 2025, 43(1):29-43. (in Chinese)
- [ 21 ] EINBERGS E, SPUSTAKA A, VITOLA V, *et al.* By visualizing the deformation with mechanoluminescent particles, additive manufacturing offers a practical alternative to stress and strain simulation [J]. *Designs*, 2023, 7(2):54-63.
- [ 22 ] LIU J, WU Z, TAO Y, *et al.* Green-orange bi-color switchable mechanoluminescent fiber of okra-like structure for visual signaling [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(6):e15254-1-10.
- [ 23 ] AHN S Y, TIMILSINA S, SHIN H G, *et al.* In situ health monitoring of multiscale structures and its instantaneous verification using mechanoluminescence and dual machine learning [J]. *iScience*, 2022, 26(1):105758-1-15.
- [ 24 ] WANG H, ZHAO B, ZHAO T, *et al.* Enhancing Mn-activated mechanoluminescence via pressure-regulated local structure in centrosymmetric BaZnOS for dynamic response applications [J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(45):e11805-1-9.
- [ 25 ] YANG X, WANG T, ZHAO L, *et al.* Recent progress in mechanoluminescence for multi-dimensional stress monitoring [J]. *Adv. Sci.*, 2025, 13(5):e19938-1-21.
- [ 26 ] CHEN B, ZHANG X, WANG F. Expanding the toolbox of inorganic mechanoluminescence materials [J]. *Acc. Mater. Res.*, 2021, 2(5):364-373.
- [ 27 ] 王博, 吴紫乐, 张媛珈, 等. 调控电子陷阱增强长余辉材料  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8:\text{Ce}^{3+}$  的发光性能 [J]. *中国稀土学报*, 2025, 43(5):1035-1044.
- WANG B, WU Z L, ZHANG M J, *et al.* Regulation of electron traps to enhance the luminescence properties of  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8:\text{Ce}^{3+}$  long-afterglow materials [J]. *J. Chin. Soc. Rare Earths*, 2025, 43(5):1035-1044. (in Chinese)
- [ 28 ] 李廷松, 王文丽, 刘强, 等.  $\text{Cr}^{3+}$  掺杂浓度对  $\text{YAGG}:\text{Ce}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$  发光陶瓷余辉性能的影响 [J]. *无机材料学报*, 2025, 40(9):1037-1044.
- LI T S, WANG W L, LIU Q, *et al.* Effect of  $\text{Cr}^{3+}$  doping concentration on the afterglow properties of  $\text{YAGG}:\text{Ce}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$  luminescent ceramics [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2025, 40(9):1037-1044. (in Chinese)
- [ 29 ] PAN W, GAO H, DUAN X H, *et al.* Design of multimodal stimuli-distinct responsive dynamic luminescence for visualized mechanical sensing [J]. *Chem. Eng. J.*, 2026, 534:174985.
- [ 30 ] ZHAO T, WANG H, JIANG J, *et al.* Rate-dependent mechanoluminescence in  $\text{SrZn}_2\text{S}_2\text{O}:\text{Mn}^{2+}$  for time-characterized optoelectronic devices [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2025, 129(9):4715-4723.
- [ 31 ] ZHANG D Y, XU Z, LI J Y, *et al.* Graphene-assisted electron-based imaging of individual organic and biological macromolecules: structure and transient dynamics [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(1):120-151.
- [ 32 ] HUO X, LI S, SUN B, *et al.* Revealing the role of interfacial charge transfer in mechanoluminescence [J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(9):656-665.
- [ 33 ] LIANG G, ZHANG C, YANG L, *et al.* Probing interfacial nanostructures of electrochemical energy storage systems by in-situ transmission electron microscopy [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2025, 17:245-274.
- [ 34 ] GOMEZ A, GICH M, CARRETERO-GENEVRIER A, *et al.* Piezo-generated charge mapping revealed through direct piezoelectric force microscopy [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8(1):1113-1122.
- [ 35 ] CHEN C, LIN Z, HUANG H, *et al.* Revealing the intrinsic decay of mechanoluminescence for achieving ultrafast-response stress sensing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(46):2304917-1-8.
- [ 36 ] SCHOBER G B, UZAIR U, REEL M, *et al.* Development of pH-sensitive film for detection of implant infection via ultrasound luminescent chemical imaging [J]. *Adv. Sens. Res.*, 2024, 3(6):2300182-1-14.
- [ 37 ] WANG W, TASSET A, PYATNITSKIY I, *et al.* Ultrasound triggered organic mechanoluminescence materials [J]. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 2022, 186:114343-1-13.
- [ 38 ] PHILIBERT M, YAO K. Explore ultrasonic-induced mechanoluminescent solutions towards realising remote structural health monitoring [J]. *Sensors*, 2024, 24(14):4595-4607.
- [ 39 ] KEREKES T W, YOU H, HEMMATIAN T, *et al.* Enhancement of mechanoluminescence sensitivity of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ /epoxy composites by ultrasonic curing treatment method [J]. *Compos. Interfaces*, 2021, 28(1):77-99.
- [ 40 ] YIN X, NIU G, WANG Y, *et al.* Mechanochromic organic materials: molecular mechanisms and multidimensional applications [J]. *Adv. Phys. Res.*, 2026, 5:e00125-1-30.
- [ 41 ] WEI X, ZHANG Z, SHI L, *et al.* Organic mechanochromic luminescence-based visualization of fatigue damage and life prediction of aluminum to steel resistance spot welds [J]. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2023, 46(9):3530-3542.

- 
- [42] HAN S, LI C, HAN Q, *et al.* Mechano-X coupling in multifunctional mechanical metamaterials [J]. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 2026,44:101272-1-21.
  - [43] SHARMA P, DAIPURIYA R, BHAGATJI A, *et al.* Impurity induced mechano-luminescence under different pressure impacts for Mn-doped ZnS microcrystals [J]. *Opt. Mater.*, 2021,122:111798-1-8.
  - [44] YANG Y, JIANG Q, ZHANG F. Nanocrystals for deep-tissue in vivo luminescence imaging in the near-infrared region [J]. *Chem. Rev.*, 2024,124(2):554-628.
  - [45] WU S, XIAO B, XIAO Y, *et al.* Cr<sup>3+</sup>-activated broadband near-infrared mechanoluminescence in garnet compound [J]. *Nano Energy*, 2023,116:108811-1-12.
  - [46] WANG C, LIU Z, YAKOVLEV A N, *et al.* Controlled mechano-luminescence properties of SrGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Tb<sup>3+</sup> co-doping with Dy<sup>3+</sup> and Eu<sup>3+</sup> ions [J]. *RSC Adv.*, 2023,13:16405-16412.
  - [47] LI X, XU R, XIE C, *et al.* Microscale architectures for intelligent soft robotics: from functional microneedles to biointegrated wearable systems [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2026,18(1):179-211.
  - [48] LIU H, SHAO Y, SONG Z, *et al.* Mechanoluminescence of ZnS under easily tailored phase transitions [J]. *Adv. Mater.*, 2025,37(45):e11469-1-11.
  - [49] WANG X, ZHANG H, YU R. Dynamic pressure mapping of personalized handwriting by a flexible sensor matrix based on the mechanoluminescence process [J]. *Adv. Mater.*, 2015,27(14):2324-2331.
  - [50] LIU L, XU C N, YOSHIDA A, *et al.* Scalable elasticoluminescent strain sensor for precise dynamic stress imaging and onsite infrastructure diagnosis [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2019,4(1):1800336-1-10.
  - [51] YANG T Y, LI S N, CHEN H S, *et al.* Self-recoverable elastico mechanoluminescence of a hybrid metal halide crystal [J]. *Natl. Sci. Rev.*, 2025,12(5):nwae372.
  - [52] WANG K, MA L, XU X, *et al.* Triboluminescence dominated by crystallographic orientation [J]. *Sci. Rep.*, 2016,6(1):26324.
  - [53] PENG D, JIANG Y, HUANG B, *et al.* A ZnS/CaZnOS heterojunction for efficient mechanical-to-optical energy conversion by conduction band offset [J]. *Adv. Mater.*, 2020,32(16):1907747-1-7.
  - [54] LI J, ZHOU G, HONG Y, *et al.* Highly sensitive, flexible and wearable piezoelectric motion sensor based on PT promoted  $\beta$ -phase PVDF [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2022,337:113415-1-8.
  - [55] JIN H, WANG W, ZHANG G, *et al.* Advances in flexible wearable pressure/strain sensors for motion monitoring in orthopaedic sports medicine [J]. *J. Orthop. Transl.*, 2026,57:101084-1-20.
  - [56] ALI W R, PRASAD M. Piezoelectric MEMS based acoustic sensors: a review [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2020,301:111756-1-31.
  - [57] JASTRZEBSKA M. Modern displacement measuring systems used in geotechnical laboratories: advantages and disadvantages [J]. *Sensors*, 2021,21(12):4139-4146.
  - [58] GUO K, YANG Z, YU C H, *et al.* Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials [J]. *Mater. Horiz.*, 2021,8(4):1153-1172.
  - [59] ZENG K, ZENG S, HUANG H, *et al.* Sensing mechanism and real-time bridge displacement monitoring for a laboratory truss bridge using hybrid data fusion [J]. *Remote Sens.*, 2023,15(13):3444-3461.
  - [60] JARMAN P. Sonoluminescence: a discussion [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1960,32(11):1459-1462.
  - [61] QUINN J R. *Development of a pattern recognition approach for analyzing flow cytometric data* [D]. Philadelphia: Drexel University, 2006.
  - [62] ZHU B, JONATHAN H. A review of image sensors used in near-infrared and shortwave infrared fluorescence imaging [J]. *Sensors*, 2024,24(11):3539.
  - [63] WANG Z, AL-JAWHARI H A, NAYAK P K, *et al.* Low temperature processed complementary metal oxide semiconductor (CMOS) device by oxidation effect from capping layer [J]. *Sci. Rep.*, 2015,5(1):9617.
  - [64] CHEN C J, ZHUANG Y X, TU D, *et al.* Creating visible-to-near-infrared mechanoluminescence in mixed-anion compounds SrZn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O and SrZnSO [J]. *Nano Energy*, 2020,68:104329.
  - [65] FANG S, ZHAO L, HE X, *et al.* Highly repeatable and cyclically stable mechanoluminescence of the flexible composite elastomer [J]. *Adv. Mater.*, 2025,37(32):2505071-1-10.
  - [66] MA X, WANG J, LI J, *et al.* Visually encoded mechanoluminescence through hierarchical structuring with microscale

- patterns and nanoscale features [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1):9550-1-10.
- [67] 庄逸熙, 郑元钿, 韩逸潇, 等. 一种基于积分球的力致发光效率测试装置及测试方法: 中国, CN202510831625.0 [P]. 2025.
- ZHUANG Y X, ZHENG Y T, HAN Y X, et al. A testing device and method for mechanoluminescence efficiency based on an integrating sphere: *China*, CN202510831625.0 [P]. 2025. (in Chinese)
- [68] 庄逸熙, 郑元钿, 解荣军. 一种力致发光效率的测试装置及方法: 中国, CN202510832200.1 [P]. 2025.
- ZHUANG Y X, ZHENG Y T, XIE R J. A testing device and method for mechanoluminescence efficiency: *China*, CN202510832200.1 [P]. 2025. (in Chinese)
- [69] FU C Q, MENG W, FU X, et al. Deeply trapped electrons induced long-time sustainable mechanoluminescence of X-ray irradiated  $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$  for detection of stress burst [J]. *J. Rare Earths*, 2025, 43(11):2368-2374.
- [70] TERASAKI N, SAKAI K, KOGA T, et al. Mechanoluminescence studies upon single nanoparticles by AFM-photomeasurement system [J]. *MRS Proc.*, 2006, 951(1):933-938.
- [71] MUKHINA M V, TRESBACK J, ONDRY J C, et al. Single-particle studies reveal a nanoscale mechanism for elastic, bright, and repeatable  $\text{ZnS:Mn}$  mechanoluminescence in a low-pressure regime [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(3):4115-4133.
- [72] MUKHINA M V, BUTTERFIELD A G, YOUNG H L, et al. Faulted  $\text{ZnS:Mn,Cu}$  nanorods provide nanoscale mechanoluminescence excitation in a biologically relevant force range [J]. *ACS Nano*, 2026, 20(11):9348-9357.
- [73] ZHANG L, SHI K, WANG Y, et al. Unraveling the anomalous mechanoluminescence intensity change and pressure-induced red-shift for manganese-doped zinc sulfide [J]. *Nano Energy*, 2021, 85:106005-1-8.
- [74] WANG H, ZHAO T, LI M, et al. Oscillatory mechanoluminescence of  $\text{Mn}^{2+}$ -doped  $\text{SrZnOS}$  in dynamic response to rapid compression [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1):548-568.
- [75] WANG H, CHEN X, LI J, et al. Pressure- and rate-dependent mechanoluminescence with maximized efficiency and tunable wavelength in  $\text{ZnS:Mn}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$  [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(23):28204-28214.
- [76] JIANG S, MALINAO M G, YANG F, et al. An ultrasound-scanning in vivo light source [J]. *Nat. Mater.*, 2026:1-10.
- [77] YANG F, CUI H, WU X, et al. Ultrasound-activated luminescence with color tunability enabled by mechanoluminescent colloids and perovskite quantum dots [J]. *Nanoscale*, 2023, 15(4):1629-1636.
- [78] 潘泽晟, 游雅萍, 郑雅, 等. 面向紫光激发白光LED用荧光材料的耐候性 [J]. *无机材料学报*, 2025, 40(3):314-322.
- PAN Z S, YOU Y P, ZHENG Y, et al. Weather resistance of phosphors for violet-excited white LEDs [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2025, 40(3):314-322. (in Chinese)



曾帆(1998-),男,江西抚州人,博士研究生,2024年获福建师范大学硕士学位,主要从事无机力致发光材料性能优化及机理的研究。

E-mail: zengfan@stu.xmu.edu.cn



解荣军(1969-),男,江苏镇江人,教授,博士生导师,1998年获中国科学院上海硅酸盐研究所博士学位,主要从事稀土掺杂发光材料、量子点、发光与显示器件、传感与探测器件、结构与功能陶瓷研究。

E-mail: rxjie@xmu.edu.cn



庄逸熙(1986-),男,福建泉州人,教授,博士生导师,2014年获京都大学博士学位,主要从事力致发光材料、长余辉发光材料及光电子器件研究。

E-mail: zhuangyixi@xmu.edu.cn