

专题: 高压下的光电物性调控与原位表征

## 高压对力致发光的调控: 总结与展望\*

赵婷婷<sup>1)</sup> 李梅<sup>1)</sup> 彭赏<sup>1)</sup> 赵博浩<sup>1)</sup> 冯琦<sup>1)</sup> 陈彦龙<sup>1)</sup> 袁骏<sup>1)</sup>  
韩莹雪<sup>1)</sup> 安娇<sup>1)</sup> 王毫<sup>2)†</sup> 蒋升<sup>3)‡</sup> 林传龙<sup>1)††</sup>

1) (北京高压科学研究中心, 北京 100193)

2) (四川轻化工大学物理与电子工程学院, 射线检测学科与技术中心, 自贡 643000)

3) (中国科学院上海高等研究院上海同步辐射光源, 上海 201204)

(2025年9月23日收到; 2025年10月27日收到修改稿)

力致发光 (mechanoluminescence, ML) 是一种在机械刺激下可直接发光的现象. 因其具备高空间选择性、快速响应及多模式发光协同等特性, 在结构健康监测、智能传感与光学防伪等领域展现出巨大的应用潜力. 然而, 该领域仍面临机理尚不明确、性能优异的可应用材料数量有限, 以及测试标准尚未建立等挑战. 近年来, 高压科学技术 (尤其是动态加载技术) 的持续突破与创新, 为 ML 研究提供了新的探索途径. 在 GPa 级高压条件下, 通过调控 ML 材料的原子间距、电子轨道和晶体结构, 不仅实现了对其发光强度与颜色的高效调控, 还成功捕获到从微秒到秒量级的发光动力学演化过程, 为揭示 ML 微观机制提供了关键实验数据支撑. 本文概述了高压技术在 ML 材料性能优化与机理研究方面的应用进展, 总结了其在提高发射强度、调控发光光谱、揭示动态过程等方面的成果, 并对未来高压力致发光研究的发展方向与挑战进行展望.

**关键词:** 高压, 力致发光, 动态金刚石对顶砧, 快速压缩**DOI:** 10.7498/aps.75.20251312**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251312

## 1 引言

力致发光 (mechanoluminescence, ML) 是指材料在机械刺激 (如压缩、弯曲、拉伸、切割、摩擦、振动或刮伤) 下产生发光的现象<sup>[1-3]</sup>. 该现象早在 12 世纪便已为人知, 直至 1605 年 Francis Bacon<sup>[4]</sup> 将该现象正式记录在文章中: “It is not the property of fire alone to give light...loaf-sugar in scraping or breaking”. 相较于光致或电致发光, ML 可在机械刺激下直接发光, 无需外部持续电源或光源的供能<sup>[5,6]</sup>. 同时, 其激发具有高度空间选择性与快速响

应特征, 便于应力/损伤的原位、可视化监测<sup>[7]</sup>. 此外, ML 可与上转换发光、长余辉发光、热致发光等多种发光模式相协同, 实现单模材料的多模式发光, 进一步提升光学防伪能力<sup>[8-10]</sup>. 这些特性表明 ML 材料在结构健康监测、智能防伪、触觉交互与无源传感等领域具有巨大的应用潜力.

高压科学为 ML 性能的提高和机制的探究提供了新的途径. 高压科学作为探究物质在极端高压条件下的结构演化、电子行为以及物理化学性质转变的学科<sup>[11-20]</sup>, 通过在实验室环境中施加千兆帕斯卡量级高压, 便可实现对物质内部原子距离、电子轨道、成键方式的调控, 揭示常规条件下无法

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFB3702102) 和国家自然科学基金 (批准号: 11974033, 12374019) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wanghaosuse@163.com

‡ 通信作者. E-mail: jiangs@sari.ac.cn

†† 通信作者. E-mail: chuanlong.lin@hpstar.ac.cn

获得的新颖物质和功能特性<sup>[21-23]</sup>. 鉴于 ML 材料巨大的应用前景, 研究人员致力于 ML 性能调控、新材料开发及发光机理探究等方向, 以满足日益精细和多样化的应用需求. 在性能调控方面, 发光强度和颜色的优化一直是 ML 重要的研究方向之一. 为实现这一目标, 通常采用调控烧结温度、基体元素替换、材料复合及多样化掺杂等手段, 从而增强发光强度并拓展谱带范围<sup>[24-27]</sup>. 研究进一步揭示, 晶体场和带隙的有效调控对于提升材料性能具有重要作用<sup>[24,28-30]</sup>. 值得注意的是, 高压实验技术在调控晶体场与带隙方面展现出独特优势已在高压光致发光研究中得到验证<sup>[31-33]</sup>, 预示着高压科学在 ML 性能调控领域蕴藏着巨大潜力. 此外, 高压调控过程无需引入其他外部变量, 为厘清性能变化的本征机理、揭示背后的物理化学规律以进一步推动性能的提升提供了纯净的研究条件. 在 ML 新材料的开发中, 由于其发光机制的理解尚不深入, 研究者通常从具有非中心对称结构的材料体系中进行筛选, 并通过实验手段进行验证. 高压实验技术作为一种强有力的调控手段, 可以通过压缩原子间距, 增强电子轨道的重叠与相互作用, 诱导多种结构相变, 从而获得在常压下难以实现的新结构和新材料<sup>[34,35]</sup>. 这不仅极大地拓展了 ML 材料的选择范围, 也为建立材料结构与 ML 性能之间的构效关系提供了实验依据. 在前述性能调控与新材料开发的基础上, 对 ML 机制的深入研究同样具有重要意义. 机制层面的认识不仅能够为 ML 新材料的开发和性能优化提供理论指导, 还有助于推动 ML 在传感、显示和应力探测等领域的实际应用. 然而, 当前对 ML 动力学过程的认识依然有限, 许多实验现象尚无法在现有理论框架下得到充分解释<sup>[36-38]</sup>. 尤为关键的是, ML 作为一个与时间密切相关的物理过程, 受限于现有实验手段, 其动力学过程中的关键时间尺度信息仍难以被有效获取. 为探究材料在高压下从平衡态到新平衡态的弛豫过程, 高压动态加载技术应运而生. 这项技术能够捕获材料在微秒至秒量级的非平衡态动力学行为, 为解析具有时间尺度的 ML 动力学过程、完善其机制细节提供了机遇. 同时, 现有 ML 材料研究多集中在 MPa 及以下的低压区间, 而在 GPa 级高压条件下的研究报告仍然稀缺. 因此, 深入揭示 ML 材料在更高压力下的响应规律, 不仅有助于拓展对其基本机制的理解, 也为其在宇宙、海洋和地质等极端条件下的

应用奠定了实验与理论基础. 综上, 高压动态加载技术在调控 ML 材料性能、发现新型 ML 材料、探究 ML 机制过程、拓展 ML 材料应用领域等方面具有较大的潜力.

近年来, 高压科学不仅将 ML 的应力领域拓展至更高压力环境, 也为其性能的调控和机制的理解提供了新的角度. 研究人员通过高压动态加载技术, 突破了作用于 ML 材料的压力范围及加载速率的限制, 并填补了 ML 领域在时间尺度研究方面的缺失. 本文将从以下几个方面综述高压 ML 的研究进展: 首先概述 ML 的发展历程、材料类别与主流发光机制, 并系统地介绍低压 (MPa 及以下) 及高压环境下的典型实验测试方法; 随后总结高压 (GPa) 技术在 ML 材料发光强度与颜色调控、ML 动力学过程研究方面的主要成果; 最后, 对未来高压 ML 材料的发展方向、面临的挑战与应用前景开展展望, 以推动高压科学在 ML 领域的深入发展和应用.

## 2 力致发光发展历史

ML 的发展伴随着科学的发展与进步. 在 ML 现象被发现的早期, 对具有 ML 发光特性的物质, 如硬糖、盐、玛瑙、钻石等, 人们主要通过肉眼或简单仪器观察<sup>[2,39]</sup>. 在这一时期, 对其理解多为: 物质能够保留接收到的光, 随后通过破碎释放出来, 并将该现象命名为“摩擦力致发光”(triboluminescence)<sup>[40,41]</sup>. 1980 年前后, 光电倍增管的引入使 ML 现象能够以数据形式被精确记录<sup>[42-44]</sup>. 在此阶段, 通过对数百种 ML 材料的探索, 不同的机制模型开始逐步构建并不断完善, 为后续 ML 研究奠定了重要基础. 1978 年, Chandra 和 Shrivastava<sup>[39]</sup> 首次正式地提出了术语“Mechanoluminescence”, 用以涵盖机械作用诱导的发光现象. 随后在文章《Classification of Mechanoluminescence》中对 ML 材料进行了系统分类, 并将“Triboluminescence”界定为 ML 的一种类型, 提出了“涉及位错诱导脱陷和压电诱导脱陷的过程可能为未来提供合适的 ML 材料”<sup>[2,45]</sup>. 这一预测很快得到了验证, 1999 年, Akiyama 等<sup>[46]</sup> 和徐超男等<sup>[47-50]</sup> 先后报道了  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$  首批肉眼清晰观测的高亮度 ML 材料, 使 ML 材料突破了应用瓶颈. 自此, ML 领域迎来了蓬勃发展的时期<sup>[51-54]</sup>. 大量高性能 ML 材料相继被发现, 其应用潜力也逐渐扩展至应力检测、

防伪加密、生物成像、人机交互等<sup>[51-54]</sup>, 如图 1(a) 所示<sup>[55-63]</sup>. 依据 Web of Science 数据库检索, 自 2000 年至 2024 年, ML 领域发表文章数量呈逐年上升趋势, 涉及材料科学、物理、化学、工程等多个领域, 如图 1(b) 所示. 伴随着 ML 在各个领域的蓬勃发展, ML 的机械作用范围也逐渐从 MPa 提升至 GPa. 2021 年, Zhang 等<sup>[64]</sup> 首次在高压环境即 GPa 压力尺度下, 利用高压动态金刚石对顶砧技术探测了 ZnS:Mn<sup>2+</sup> 的 ML 过程, 并发现在高压范围内 ML 材料仍能保持其发光特性, 同时强度和发光峰表现出明显的压力依赖性. 2023 年, Wang 等<sup>[55]</sup> 通过高压动态金刚石对顶砧探索 ZnS:Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup> 时, 发现了高压对 ML 效率和波长的巨大可调性. ZnS:Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup> 在 ~3.5 GPa 和 ~211.1 GPa/s 的压力和加载速率下, 发光效率较 MPa 压力范围及以下至少高出 1000 倍, 同时伴随压力依赖的黄色到红色的发光颜色变化. 这不仅使 ML 材料的应用

得以延伸至宇宙、深海和地质等极端高压环境, 同时也为发光强度与发射颜色的优化与调控开辟了新的途径. 在后续两年研究中, 该团队进一步拓展探索范围: 先是在具有自恢复特性的 ML 材料 SrZnOS 及 SrZn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O 中发现了具有高压及速率依赖性的振荡发光行为<sup>[56,57]</sup>. 同时, 在中心对称结构的 BaZnOS 材料中, 还观察到通过压力调控局部结构可诱导出可恢复力致发光现象<sup>[58]</sup>. 这些发现不仅丰富了 ML 材料动态发光行为的研究维度, 更为深入地理解自恢复力致发光的结构-性能关联、时间响应特性, 以及能量转换过程中的速率依赖动力学机制, 提供了全新视角. 随着高压技术与时间分辨探测技术的持续进步, 高压 ML 材料研究将迎来更精准的实验操控与动态观测手段. 基于此, 高压 ML 领域正在不断涌现一系列新的发现, 这也引起了越来越多的研究者关注.

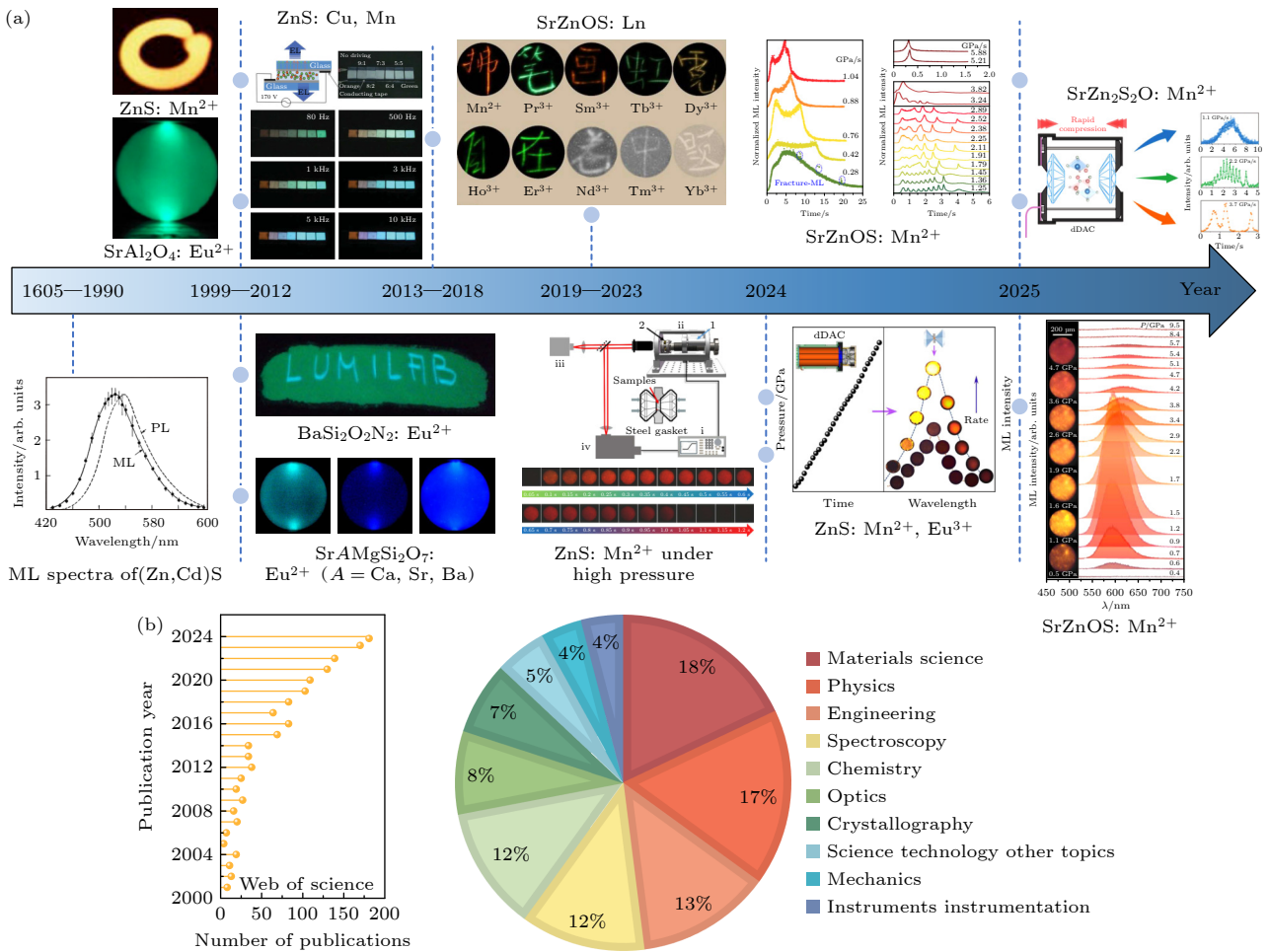


图 1 (a) ML 材料的发展历史<sup>[55-63]</sup>; (b) Web of science 数据库关于 ML 领域每年发文数量统计及对应学科分类

Fig. 1. (a) Development of ML Materials<sup>[55-63]</sup>; (b) annual publication count and subject classification in the field of ML from the Web of Science database.

### 3 力致发光的分类及机理

#### 3.1 ML 的分类

ML 现象广泛存在于各类化合物中, 目前已在超过 50% 的无机晶体和有机化合物中观测到 [65]. 基于外界机械刺激的作用方式, ML 可以分为由固体材料之间在摩擦滑动或接触分离时所产生的摩擦力致发光 (tribo-mechanoluminescence, TML) 和由于材料形变所产生的形变力致发光 (deformation-mechanoluminescence, DML), 如图 2(a) 所示. 根据激发机制的不同, TML 可进一步划分为电诱导摩擦力致发光、化学诱导摩擦力致发光、热诱导摩擦力致发光 [66,46]. 依据形变程度, DML 可分为断裂力致发光 (fractoluminescence, FML)、弹性力致发光 (elastoluminescence, EML) 和塑性力致发

光 (plasticoluminescence, PML) [66]. 进一步 EML 根据其重复性发光行为是否需要充能, 可分为自恢复型 ML 和陷阱控制型 ML [67,68].

TML 过程通常不引起永久形变, 因此具有良好的可重复性, 且其发光特性依赖于机械刺激材料. 如解荣军团队 [69] 通过优化摩擦材料界面, 将 TML 强度提升了 20 倍 (图 2(b)). 对于 DML 而言, 当材料在承受持续增加的外力作用时, 其首先经历弹性形变 (在这一阶段撤去外力后仍可恢复原状), 随后进入塑性形变 (在这一阶段撤去外力无法完全恢复原状), 最后发生断裂 (在这一阶段撤去外力后完全不可恢复原状, 产生不可逆的物理损伤). FML 具有不可重复性的特点: FML 的产生依赖机械刺激导致材料发生不可逆物理损伤 (如晶格断裂、结构破坏), 这一过程伴随材料宏观/微观结构的永久性改变, 因此其发光通常为单次触发且无重

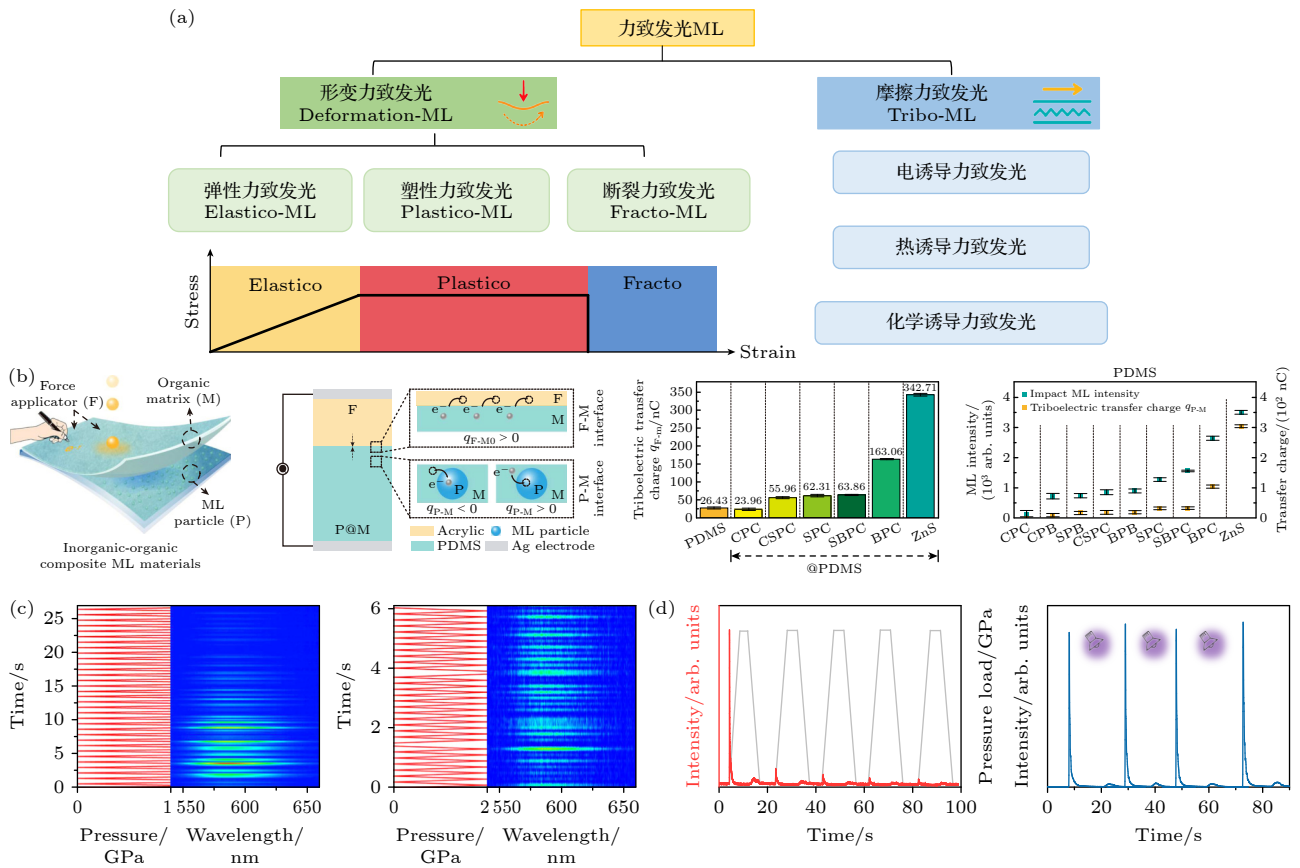


图 2 (a) ML 的分类; (b) 多界面体系中的 ML 和界面电子转移 [69]; (c) ZnS:Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup> 在重复机械压缩循环下自恢复力致发光稳定性测试 [55]; (d) NaNbO<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup> 在一次激发后进行多次机械压缩循环下的陷阱控制型 ML 稳定性评估, 以及其在 405 nm 激光再充能后的 ML 恢复能力

Fig. 2. (a) Classification of ML; (b) ML and interfacial electron transfer in multi-interface systems [69]; (c) evaluation of self-recovery ML stability of ZnS:Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup> during repeated mechanical compression cycles [55]; (d) evaluation of trap-controlled ML stability of NaNbO<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup> during repeated mechanical compression cycles after a single irradiation, and the recoverability of ML after 405 nm light recharging.

复性. 典型案例可见于各类有机 ML 材料, 当外力作用下有机分子链的断裂直接引发一次性发光, 损伤后无法通过撤去外力恢复发光能力. PML 具有有限重复性的特点: PML 过程中材料仅能部分恢复至初始状态 (如塑性形变后残留局部结构畸变), 因此其 ML 具有一定重复潜力, 但受限未完全恢复的结构缺陷, 发光强度与施加应力之间难以建立线性关联, 即相同应力下的发光响应存在波动, 无法实现定量的应力-发光对应. EML 具有稳定重复性的特点: EML 的核心特征是材料在外力作用下发生弹性形变, 撤去外力后可完全恢复原状 (如  $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$  的晶格弹性形变可逆性), 因此其 ML 具有稳定重复性, 且发光强度与施加应力通常满足特定函数关系 (如线性或幂次关系), 具备定量应用潜力. 进一步根据 EML 的发光机制差异, 可将其细分为自恢复型 ML 与陷阱控制型 ML: 二者虽均保持良好可重复性, 但表现特性有所不同, 自恢复型 ML 材料的重复性依赖晶格弹性的本征恢复能力, 以及由于外界刺激引起形变时所产生的压电场. 在晶格弹性形变与压电场的协同作用下, 陷阱态载流子的捕获与释放过程得以循环进行, 使发光响应能随形变即使同步且循环往复; 陷阱控制型 ML 的重复性则依赖陷阱能级的动态填充-释放平衡, 需通过二次激发 (如光、热) 补充陷阱电荷以维持重复发光, 恢复过程存在一定滞后性. 如图 2(c) 所示, 具有典型自恢复特性的 ML 材料, 在不需要外界辐照充能的条件下, 便可实现发光强度基本不变的多次重复性 ML 行为<sup>[55]</sup>. 然而, 对于陷阱控制型 ML, 如图 2(d) 所示, 在一次外界辐照充能后, 多次重复性 ML 发光强度随着重复次数的增加逐渐衰减, 但在辐照充能后, 又可恢复至初始 ML 状态. 基于弹性 ML 在周期性发光方面表现出的优良特性, 已成为当前研究与应用的主流方向. 需注意的是, 同一材料在机械刺激下的表现可能是由多种 ML 发光类型组成. 如, 断裂通常伴随着弹性和塑性形变, 但由于断裂会形成高能新表面, 其产生的发光通常会掩盖残余的弹性和塑性形变发光<sup>[70]</sup>.

### 3.2 ML 响应机制

ML 机制的探究对 ML 材料的调控、理解和应用具有重要指导意义. 自 ML 现象发现以来, 人们便开始尝试理解该现象. 但由于 ML 发光过程通常涉及多种类型的共同作用, 同时在单一发光类型中, 由机械能转换为光能过程也是一个多阶段能量

传递的过程, 因此目前对于 ML 机制的理解和认识仍处于探索阶段. 根据当前研究热点和普遍认可的机制模型, 选取了摩擦电诱导型 ML、压电诱导型 ML、陷阱控制型 ML 三个机制模型进行介绍.

#### 3.2.1 摩擦电诱导型 ML

摩擦电诱导 ML 机理涉及材料与接触物在动态相互作用过程中伴随的电子转移、化学反应及热效应等多种物理化学过程<sup>[71-74]</sup>. 由于上述过程通常发生于材料表面或周围介质, 其发光源既可能来自材料本身 (内源性发光), 也可能源于周围介质 (外源性发光). 例如, Longchambon<sup>[75]</sup> 在研究中发现, 当对硫酸镉、硝酸铈酰和氟化钙等在空气中进行摩擦时, 所测得的发光光谱中出现了氮的特征谱带, 表明该类材料的摩擦发光现象与空气中氮气的激发密切相关. 随着聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 等材料作为 ML 粉末的复合体的引入, 摩擦力致发光的优势逐渐显现. 如图 3 所示, 以 PDMS 和  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  复合体为例<sup>[76]</sup>: 1) 当材料受外界机械刺激时, 由于 PDMS 与  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  颗粒之间的摩擦作用发生接触起电效应, PDMS 表面生成摩擦电子; 2) 随后, 摩擦电子迁移至附近  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  晶格中; 3) 该电子由发光中心  $\text{Ce}^{3+}$  捕获并释放发光. 由于直接激发发光能级, 因此与预辐照和陷阱能级无关. 这也解释了一些不具有压电效应的中心对称晶体在摩擦作用下产生强烈的 ML 发光现象. 同时, 也有学者提出, 在摩擦电子向发光中心迁移的过程中可能会被缺陷态捕获, 并释放到导带中, 随后脱陷电子和空穴发生非辐射复合, 并将复合所释放的能量传递给发光中心激发其跃迁发光, 如  $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ <sup>[77]</sup>. 需要注意的是, 由于摩擦电发光引起的强度变化规律与弹性力致发光相似, 因此需要结合实验现象、实验条件及样品特性等具体分析.

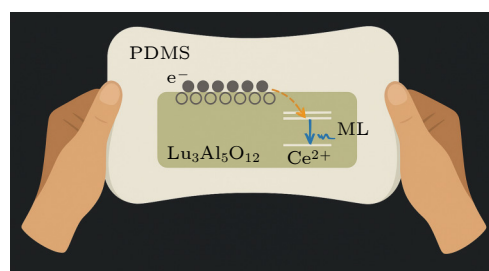


图 3  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{2+}/\text{PDMS}$  中的摩擦电诱导 ML  
Fig. 3. Triboelectricity-induced ML in  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{2+}/\text{PDMS}$ .

### 3.2.2 压电诱导型 ML

压电诱导型 ML 的核心在于: 具有压电效应的 ML 材料在受到外界机械作用时, 其内部会产生压电场, 该电场帮助陷阱中的电子得以脱陷并复合发光. 其中, 材料的压电效应既可源自其本征的非中心对称晶体结构, 也可来自于中心对称材料中因掺杂或合成过程引入晶格缺陷所诱发的微观不对称性<sup>[9,67,78]</sup>. 其机制过程具体来说通常包含以下过程<sup>[79]</sup>, 如图 4 所示: 1) 在外界机械刺激下, 内部产生的压电场促进了载流子的分离以及陷阱的捕获; 2) 随后导带与价带在压电场的作用下发生倾斜, 使被俘获电子更容易脱陷; 3) 脱陷电子随后迅速复合并将辐射能量传递至发光中心; 4) 发光中心中基态电子吸收能量并跃迁发光.

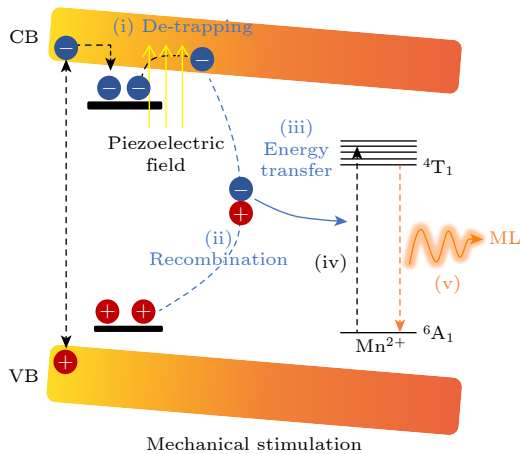


图 4 压电诱导型 ML 模型  
Fig. 4. Piezoelectric induced ML model.

对于压电诱导型 ML, 仍存在诸多值得深入探讨和实验验证的问题. 如对于 ML 性能优良的 ZnS: Mn<sup>2+</sup>, 由于其陷阱深度较浅, 在室温下难以储存被陷阱俘获的载流子, 有学者提出其 ML 现象可能是源于内部压电场诱导的电致发光<sup>[80]</sup>. 然而 ZnS:Mn<sup>2+</sup> 的应力阈值仅为 0.6 MPa, 对应的场强仅为 2 V/cm. 即使在完美 ZnS 晶体中, 所能产生的最大压电场仅为 320 V/cm, 也远低于电致发光所需的阈值场强<sup>[81]</sup>. 基于此, 有学者提出利用光激发产生的电偶极子可以增强电场常数, 但这种观点目前仍有待进一步验证. 由于缺少关于力致发光机制过程充足的实验证据, 对于其动力学过程及细节仍处于推测阶段. 除前述脱陷方式外, 也有研究学者认为电子脱陷可能由于压电效应导致的陷阱深度降低, 进而促

使电子更易脱陷<sup>[82]</sup>. 此外, 关于脱陷电子将能量传递至发光中心的途径, 除经典的电子-空穴复合能量传递机制外, 研究发现当缺陷能级与掺杂离子的能级足够接近时, 也可能通过量子隧穿弛豫过程将能量转移至发光离子的激发态<sup>[83]</sup>. 如 Dobrowolska 等<sup>[84]</sup> 通过低温热释光谱等实验, 在 YPO<sub>4</sub>:Ce<sup>4+</sup>, Ln<sup>3+</sup> (Ln = Er, Nd, Ho, Dy) 样品中观测到热辅助量子隧穿现象, 并发现随着掺杂浓度升高 (即发光中心与缺陷中心间距减小), 量子隧穿概率显著增大. 综上所述, 压电诱导 ML 模型仍存在诸多未明之处, 需通过进一步的研究予以完善和丰富.

### 3.2.3 陷阱控制型 ML

陷阱控制型机制的核心在于材料中陷阱能级对载流子 (电子或空穴) 的捕获与释放过程. 所谓“陷阱”, 通常是指晶体中因原子微观排列偏离完整晶格而形成的局部缺陷区域<sup>[85]</sup>. 晶体缺陷可分为本征缺陷和非本征缺陷. 本征缺陷源于晶体生长过程中固有的结构畸变, 也称为结构缺陷; 非本征缺陷则由掺杂引入, 因杂质原子在尺寸、电负性等化学性质方面与基质原子存在差异, 从而导致晶格结构出现局部失配<sup>[9,68,78]</sup>. 这些缺陷区域能够捕获并暂时束缚载流子, 在外部激励下又可将其释放, 进而影响材料的电学与光学性质. 该机制通常包含两个基本阶段: 1) 陷阱捕获载流子 (电子或空穴) 并将其存储于缺陷能级中; 2) 在机械外力作用下, 被束缚的载流子获得能量而发生逃逸, 最终通过复合跃迁过程发射出光信号.

陷阱能级在能带结构中的位置——即其相对于导带底或价带顶的能量深度, 直接影响载流子的释放行为. 根据陷阱能级结构及载流子释放路径的差异, 该机制可分为单级陷阱控制与多级陷阱控制两种类型. 在单级陷阱控制机制中, 以 SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: Eu<sup>2+</sup> 为代表, 如图 5(a) 所示, Xu 等<sup>[47]</sup> 提出当材料发生形变时, 位错运动可激活陷阱并促使空穴释放至价带, 进而将 Eu<sup>+</sup> 激发为 Eu<sup>2+</sup>; 随后激发态 Eu<sup>2+</sup> 跃迁回基态, 发射出波长约 520 nm 的绿光. 而在多级陷阱控制机制中, 以 CaZr(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Eu<sup>2+</sup> 为例, 如图 5(b) 所示, 不同深度的陷阱之间表现出协同效应<sup>[86]</sup>. CaZr(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 经紫外光预辐照后, 电子从 Eu<sup>2+</sup> 基态激发至导带, 形成 Eu<sup>2+</sup>-空穴对被不同深度的陷阱捕获. 在外加机械应力作用下, 陷阱中的电子按不同路径释放: 弱应变条件下, 浅陷阱电

子受激发进入导带; 强应变则使深陷阱中的电子通过隧穿或逐级跃迁至浅陷阱, 最终进入导带并与空穴复合发光. 这一过程充分反映了多陷阱能级参与下载流子迁移与复合的复杂性.

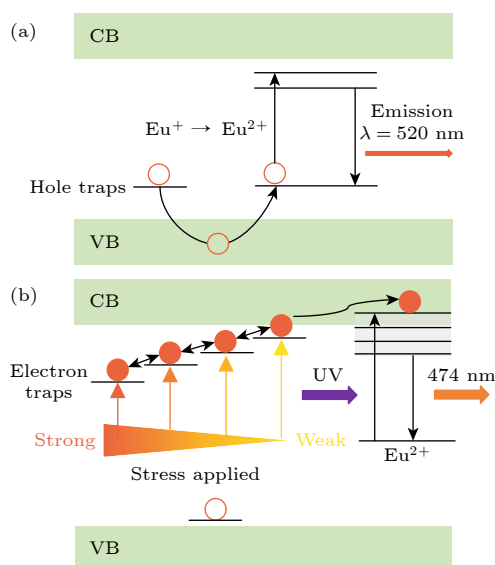


图 5 (a) 陷阱控制的 ML 模型; (b) 多级陷阱控制 ML 模型  
Fig. 5. (a) Trap-controlled ML model; (b) multi-level trap-controlled ML model.

## 4 ML 实验设备

目前, ML 测试尚未建立统一的标准化方法, 研究多依赖于自搭建的实验平台. 在常压测试条件下, 通常需将 ML 粉末与聚合物基体复合以固定样品, 但该方法存在应力分布不均、基体干扰显著以及压力范围有限等局限. 此外, 受限于常规机械激励设备的压缩方式, 往往难以实现较高的加载速率. 为突破上述限制, 高压动态加载技术被引入 ML 研究领域. 该技术利用微小砧面结构金刚石可产生 GPa 级别乃至更高的压力环境, 无需借助聚合物复合介质即可直接稳定样品, 从而避免了基体引入的干扰, 同时显著地提高了可实现的压力范围与加载速率. 得益于金刚石优异的光学通透性, 金刚石对顶砧 (diamond anvil cell, DAC) 可与多种原位光谱/成像技术联用, 为探究极端条件下 ML 性质提供了新方法.

### 4.1 低压 (MPa 及以下) 力致发光测试设备介绍

目前, 在 ML 低压范围中, 研究人员广泛依赖自搭建的实验系统进行表征, 典型的测试装置主要

由三个核心模块构成: 机械激励装置 (用于施加可控应力)、传感装置 (用于实时监测应力大小) 以及光学探测装置 (用于采集与分析发光信号), 这些模块的协同运算是准确获取 ML 响应的重要基础<sup>[87]</sup>. 在常压测试条件下, 样品制备尤为关键. 直接使用粉末样品虽可保留材料的本征发光特性, 但在机械加载过程中颗粒易发生位移, 导致测试结果重复性与可靠性较差. 为提高信号稳定性, 普遍将 ML 材料与透明聚合物基体复合固化, 形成稳定的测试模块, 如图 6(a) 所示<sup>[88]</sup>. 常用的聚合物基体包括具有优异透光性和应力传递能力的 PDMS (适用于拉伸与摩擦测试), 封装方便且易适用于多种测试平台的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) (适用于摩擦等测试), 以及力学强度较高的环氧树脂 (常用于压缩模式测试) 等, 如图 6(b) 和图 6(c) 所示<sup>[88,89]</sup>. 机械激励装置多样, 其选择取决于所需的应力类型 (如冲击、压缩、剪切、摩擦等). 常见的激励源包括落塔设备的自由落体球装置、万能试验机、超声等, 如图 6(d)–(f) 所示<sup>[90–92]</sup>. 同时, 鉴于 ML 信号较微弱, 光学信号收集多采用高灵敏度、低噪声的光电探测器, 如光电倍增管 (photomultiplier, PMT) 或单光子计数器 (single-photon counting module, SPCM), 以确保有效地捕获瞬态光子. 对于监测压缩/拉伸力致发光现象来说, 如与 PDMS 复合的力致发光材料, 以万能试验机为例, 通过装置软件设定特定的压缩/拉伸速率对样品进行机械作用, 并同步监测压力信号, 随后利用光纤将光学信号传导至光谱仪或单光子计数器进行采集获取 ML 信号. 对于监测摩擦力致发光现象来说, 如与 PET 复合的力致发光材料, 通常将 PET 粘贴在石英板玻璃上. 在样品的同一侧放置带有金属连接件的数字式推拉测试装置, 并将该装置固定在可移动平台上, 可移动平台由单轴运动控制器控制, 而数字式推拉装置用于控制施加的外力. 在样品的另一侧放置光纤, 与光谱仪相连, 用于采集 ML 光谱信号, 光纤可同步记录发光信号<sup>[93]</sup>. 值得一提的是, 部分应力施加方式会导致复合体应力承受不均的问题, 后续常需借助理论计算对实际受力分布进行辅助分析. 综上, 常压下常用的 ML 测试方法可采用多种机械作用方式进行测试, 但存在应力分布不均、基体干扰显著以及压力范围有限等问题.

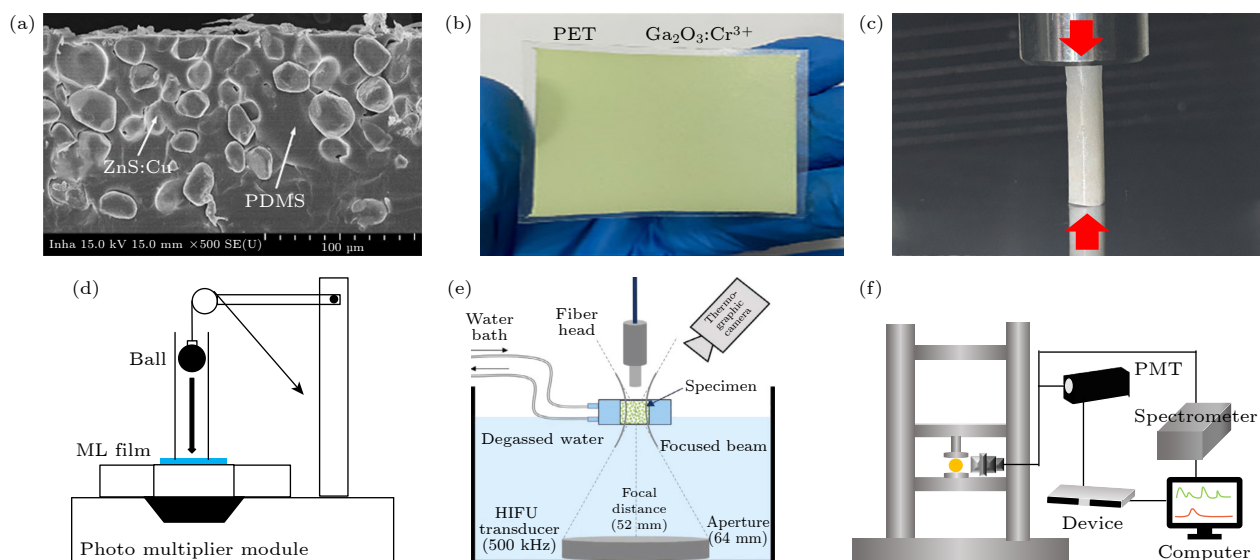


图6 (a) ZnS:Cu颗粒在PDMS基体中分布的截面SEM图<sup>[88]</sup>; (b)基于PET的ML测试装置的照片<sup>[89]</sup>; (c)基于环氧树脂的ML测试装置的照片; (d)落塔设备; (e) ML表征的超声振动设备<sup>[90]</sup>; (f)压缩测试系统的万能试验机

Fig. 6. (a) Cross-sectional SEM image showing ZnS:Cu particle distribution in PDMS<sup>[88]</sup>; (b) photograph of PET-based ML testing devices<sup>[89]</sup>; (c) photograph of epoxy-based ML testing device; (d) drop tower systems; (e) the ultrasonic vibration equipment for ML characterization<sup>[90]</sup>; (f) universal testing machines for compression testing system.

## 4.2 高压 (GPa) 力致发光测试设备介绍

高压 ML 测试系统同样由机械激励、光学探测与应力传感三大核心模块构成,其独特之处在于选用高压快速加载装置作为机械激励源.该装置不仅能够对样品施加高达 GPa 级的机械应力,还可实现高加载速率的精确可控.此外通过其密闭样品腔可直接稳定粉末样品,避免了复合介质的非本征干扰,为研究材料本征的 ML 机制提供了更直接、可靠的实验途径.该装置由 DAC 和外置压缩装置所组成.如图 7(a) 所示, DAC 是由两个材质坚硬的金刚石砧面对立组合而成,通过对两砧面施加作用力,实现对位于两砧面之间的样品的加压.依据压强计算公式  $P = F/S$  (其中  $P$  表示压强,  $F$  为作用力,  $S$  为受力面积),在相同作用力下,砧面越小,产生的压强越大.通过调整 DAC 砧面的大小及增加倒角等方法, DAC 目前已实现几百万个大气压的高压强,并用于地球内部及宇宙天体中高压物质的物性研究.在 DAC 中,两金刚石砧面间通常会放置预压钻孔的密封垫片,形成密闭的样品腔,用以容纳样品和标压物质.压力标定是高压实验中的关键环节,常见方法包括状态方程法、红宝石荧光法以及金刚石拉曼峰法.在 ML 研究中,由于红宝石荧光法具有良好的适用性与较高的精度,常被作为首选的压力标定手段.该方法基于红宝石  $R_1$  与  $R_2$

荧光峰随压力升高而发生线性红移的特性,通过测量其峰位偏移并代入已知的压力-波长标定关系式进行计算,可实现对 DAC 腔体内压力的原位、实时监测(见图 7(b)).

为实现可控的动态加载, DAC 需与外部驱动装置联用.依据驱动原理,可分为两类:一是气膜驱动的动态金刚石对顶砧(membrane controlled dynamic diamond anvil cell, mDAC);二是压电陶瓷驱动的动态金刚石对顶砧(dynamic diamond anvil cell, dDAC)<sup>[94,95]</sup>,如图 7(c)和图 7(d)所示. mDAC 由气膜和适配 DAC 的钢罐组成.气膜由两个圆环薄钢片焊接而成是调控压力的核心部件.通过控制流入气膜的气体流量及流速来控制气膜膨胀程度及快慢,实现对 DAC 加载速率及加压范围的控制,其加载速率可达  $0-10^1$  GPa/s. dDAC 则通过压电陶瓷在外加电压下伸缩的特性,实现对内置 DAC 的加压及卸压.其加压速率可达  $0-160$  TPa/s.由于压电陶瓷可通过信号发生器调控,因此 dDAC 可依据输出波形实现压力加载/卸载的速率和频率的控制,这为探究 ML 材料发光类型、动力学过程、可重复性等提供了得天独厚的优势(图 7(e)).在测试方面,得益于金刚石砧面从紫外到红外的透光性, mDAC/dDAC 可与时间分辨光谱、单光子计数器、高速相机等设备相结合,并在红宝石荧光法实时监测压力的保障下,实现对 ML 过程的高压原位、动态观测与机理研究.

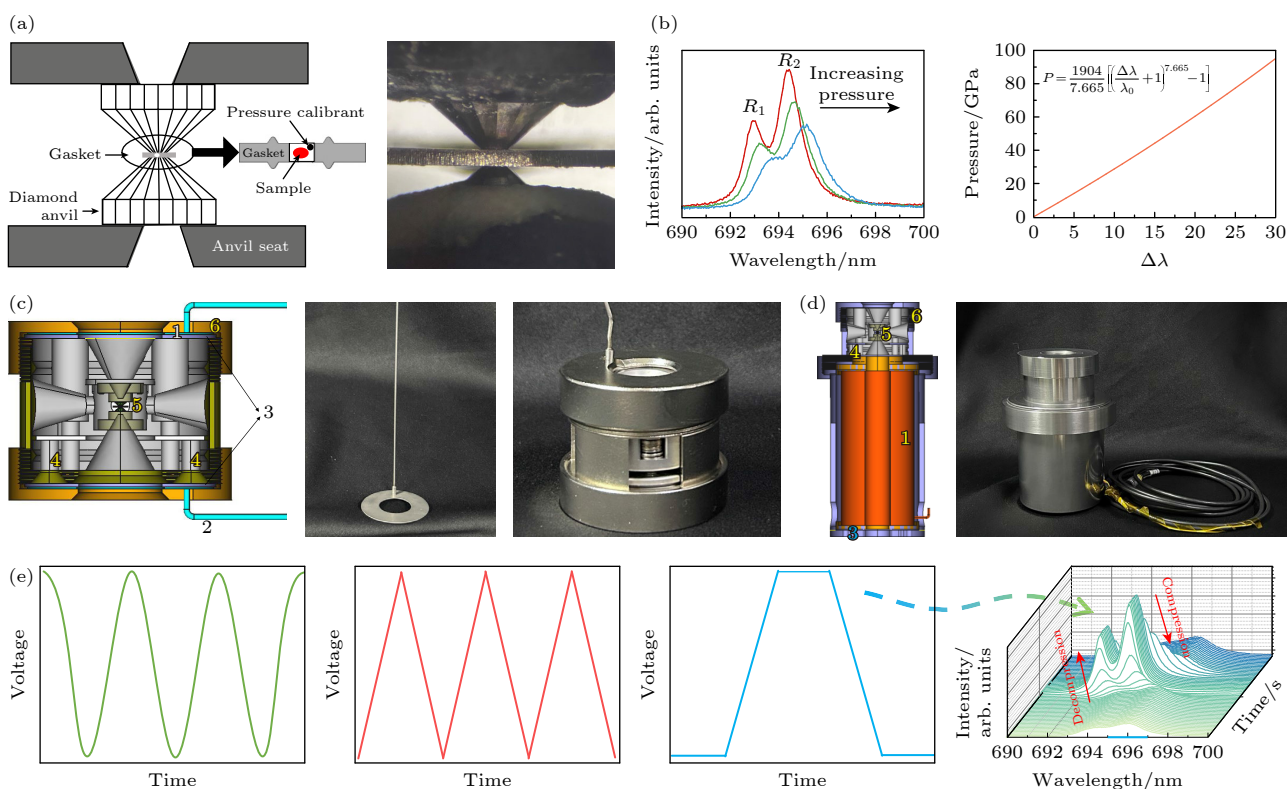


图 7 (a) DAC 装置示意图; (b) 随着压力的增加红宝石荧光图谱及红宝石荧光峰偏移量与压力值关系图; (c) 单气膜控制 DAC 装置<sup>[95]</sup>; (d) 压电陶瓷驱动 dDAC<sup>[95]</sup>; (e) 函数信号发生器产生的多种周期性波形及梯形波形对应的红宝石时间分辨荧光光谱  
 Fig. 7. (a) Schematic diagram of the DAC device; (b) ruby fluorescence spectra under increasing pressure and the relationship between the ruby fluorescence peak shift and pressure; (c) membrane-controlled DAC devices<sup>[95]</sup>; (d) dDAC driven by piezoelectric activator<sup>[95]</sup>; (e) various types of periodic waveforms generated by a function generator and the time-resolved fluorescence spectra of ruby corresponding to the trapezoidal wave.

## 5 高压力致发光研究现状

### 5.1 高压对 ML 材料发光效率及波长的调控

ML 因其在应力传感、人机交互和健康监测等领域的巨大应用潜力,使得发光强度的提升和颜色的调控成为当前 ML 领域关注的重点之一。为提高发光强度以提高应力识别的精准度,研究人员多从 ML 机制出发,通过改变掺杂浓度、共掺杂离子、构建异质结等方法来提高 ML 过程中载流子复合率。例如,调控陷阱深度浓度及分布是提高载流子复合率的角度之一,Zhang 等<sup>[96]</sup>探究了共掺杂不同稀土离子的  $(\text{Ba}, \text{Ca})\text{TiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ , Re (Re: Y, La, Nd, Gd, Yb, Lu), 发现共掺杂有效调控了其 EML 发光的强度,其中 Gd 掺杂使发光强度提升了 61%。通过对共掺杂不同稀土元素的热释光谱进行分析,发现共掺杂不同的稀土元素可以调控陷阱浓度和深度,并且 ML 强度对稀土离子的依赖性与陷阱浓度对稀土离子的依赖性一致,表明掺杂引起

了陷阱浓度的变化从而调控了 ML 的强度。此外,Zhang 等<sup>[24]</sup>通过在  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂  $\text{Y}^{3+}$  显著地提高了发光强度,分析认为,掺杂引起了晶格膨胀和晶体场的畸变,导致陷阱分布的改变,进而调控了陷阱能级分布,增强了载流子被捕获与脱陷过程。Peng 等<sup>[97]</sup>成功地构建了  $\text{ZnS}/\text{CaZnOS}:\text{Mn}^{2+}$  异质结,其发光强度优于  $\text{ZnS}$  一倍以上,高于  $\text{CaZnOS}$  三倍。通过密度泛函理论,发现这种高性能源于异质结界面区域的反常成键态诱导了价带和导带的偏移,从而降低了 ML 过程中电子激发和跃迁的势垒,带来高效率电荷转移和复合。除了强度的提升,ML 颜色也影响着相关应用领域。如在生物组织及体内成像领域,通常选用在生物组织中具有强穿透性的近红外波长;在紫外发光二极管、消毒杀菌等方面通常选用紫外波长<sup>[98-100]</sup>。因此,ML 颜色调控具有重要意义。常压下,研究人员多通过掺杂或共掺杂不同种类及比例的发光离子、基质离子取代、构建复合体、改变外力作用方式及速率等方法调控 ML 材料发光颜色<sup>[101-105]</sup>。高压科

学在调控材料带隙、晶体场和晶格参数等方面已展现出显著的优势,表明利用高压动态加载技术调控发光强度与颜色方面具有巨大潜力.近年来高压 ML 研究的进展迅速验证了这一设想.随着高压快速加载技术的引入,ML 材料所能承受的机械应力范围已扩展至 GPa 量级,显著地拓宽了其应用场景.与此同时,该技术还成功地实现了对 ML 强度与发光颜色的原位协同调控,为多模式光输出提供了新途径.值得一提的是,该调控过程无需引入额外变量,且可在高压原位条件下结合拉曼光谱、X 射线衍射、吸收光谱和光致发光光谱等多种表征手段,从而为深入理解发光性能调控背后的物理机制提供了纯净、可靠的实验条件.

2021 年, Zhang 等<sup>[64]</sup>首次利用 dDAC 构建了一种先进的 ML 表征系统,实现了对 ZnS:Mn 动态 ML 发光过程的精确研究.研究发现,当 ZnS:Mn 受压时,其 ML 光谱发生了明显的红移现象,最大红移达到约 45 nm.同时,ML 强度随压力呈现出火山状趋势,即在初期压力增大时 ML 强度线性上升,但当压力超过约 3.6 GPa 时,ML 强度开始逐渐降低.通过密度泛函理论,发现在压力的作用下,掺杂的 Mn 离子和表面空穴通过带隙偏移的耦合在提升 ML 强度上至关重要,表明高压对 ML 过程中离子复合率的调控作用.2023 年, Wang 等<sup>[55]</sup>采用锰和铕共掺杂 ZnS(ZnS:Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup>) 材料,在更宽的压力范围(最高至 11 GPa)和更高的压缩速率(最高至约 211.1 GPa/s)下,对压力和速率依赖的 ML 现象进行了系统研究,如图 8 所示.研究揭示,在千兆帕级压力下, ZnS:Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup>的 ML 效率表现出显著的速率依赖性,当压缩速率达到 211.1 GPa/s 时,ML 效率达到最高值,比兆帕级的 ML 效率提高了至少 1000 倍.同时,随着压力的变化,ML 的发射颜色可从黄色连续调节至红色.这种压力和速率依赖的 ML 行为归因于压力诱导晶格压电场的增强以及晶格与掺杂离子之间相互作用的显著增强,并伴随着掺杂锰离子的能级发生明显变化.高压 X 射线衍射和光致发光测量进一步证实了这种机制.此外, ZnS:Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup>在压缩-释放循环过程中表现出优异的重复性和微米级的精细调控能力,表明其在动态压力成像、应力传感器和多色显示等领域具有重要的潜在应用.

这些研究成果表明,高压 ML 利用高压快速加载技术可以实现 ML 材料强度和颜色的双调控,同

时将 ML 材料的可承受的环境压力大小提升至 GPa.此外,通过与多种高压原位实验技术相结合,进一步理解了带隙、晶体场对 ML 过程的重要意义.这无疑为 ML 材料强度和颜色的调控提供了新的策略,为未来 ML 材料的开发和应用奠定了重要基础.

## 5.2 高压对 ML 的速率依赖性与振荡特性机制探究

对 ML 机制的深入探索,是提升材料性能、拓展其应用前景的关键.在各类 ML 材料中,自恢复 ML 材料凭借其独特的可重复性,成功突破了该领域在实际应用中的瓶颈.然而,受限于实验设备,目前对 ML 过程中时间尺度机制的认知仍不充分,并制约了基于发光-时间依赖性的 ML 材料应用开发.从现有机制模型来看,ML 发光通常涵盖压电场的形成、载流子脱陷以及复合发光等多个阶段.由于自恢复 ML 材料无需预辐照即可发光,研究者根据实验现象推测,其过程可能涉及电子反复脱陷与再捕获的动态循环.由于自恢复 ML 发射可能涵盖复杂的多重相互作用与中间步骤,其脱陷、激发和自恢复过程对外界机械刺激的响应时间,应显著长于经典光致发光中直接光子激发的响应时间.已有研究显示,在较低压缩速率下,ML 强度随压缩率呈线性增长;而在较高压缩速率下,则出现与频率相关的非线性饱和现象.这表明压缩率与本征自恢复 ML 特征时间之间存在竞争关系,并对 ML 动力学行为具有重要影响.然而,压缩率究竟如何影响 ML 动力学,以及压电激发 (piezoelectrically-induced excitation, PIE) 与自恢复过程的确切特征时间目前仍不明确,解决这些问题对于设计高性能 ML 光电子器件具有重要意义.

基于此,2025 年, Wang 等<sup>[56]</sup>利用高压 dDAC 设备系统研究了掺杂 Mn<sup>2+</sup>的 SrZnOS 在快速压缩至约 10 GPa 过程中表现出的速率依赖性 ML 现象,不仅实现了颜色和强度的调控,还首次发现一种独特的振荡式力致发光现象,如图 9(a) 所示.当压缩速率低于约 1.2 GPa/s 时, SrZnOS:Mn<sup>2+</sup>的 ML 发光表现为宽峰、弥散型特征;而在 1.2—1.5 GPa/s 的临界速率区间,则观察到显著的多周期振荡发光,即发光强度随压缩过程呈现周期性增强与减弱的交替变化;当速率超过此临界范围后,ML 发光则被明显抑制.他们利用 X 射线衍射和光致发光测量证实 SrZnOS 晶体结构在 10 GPa 内

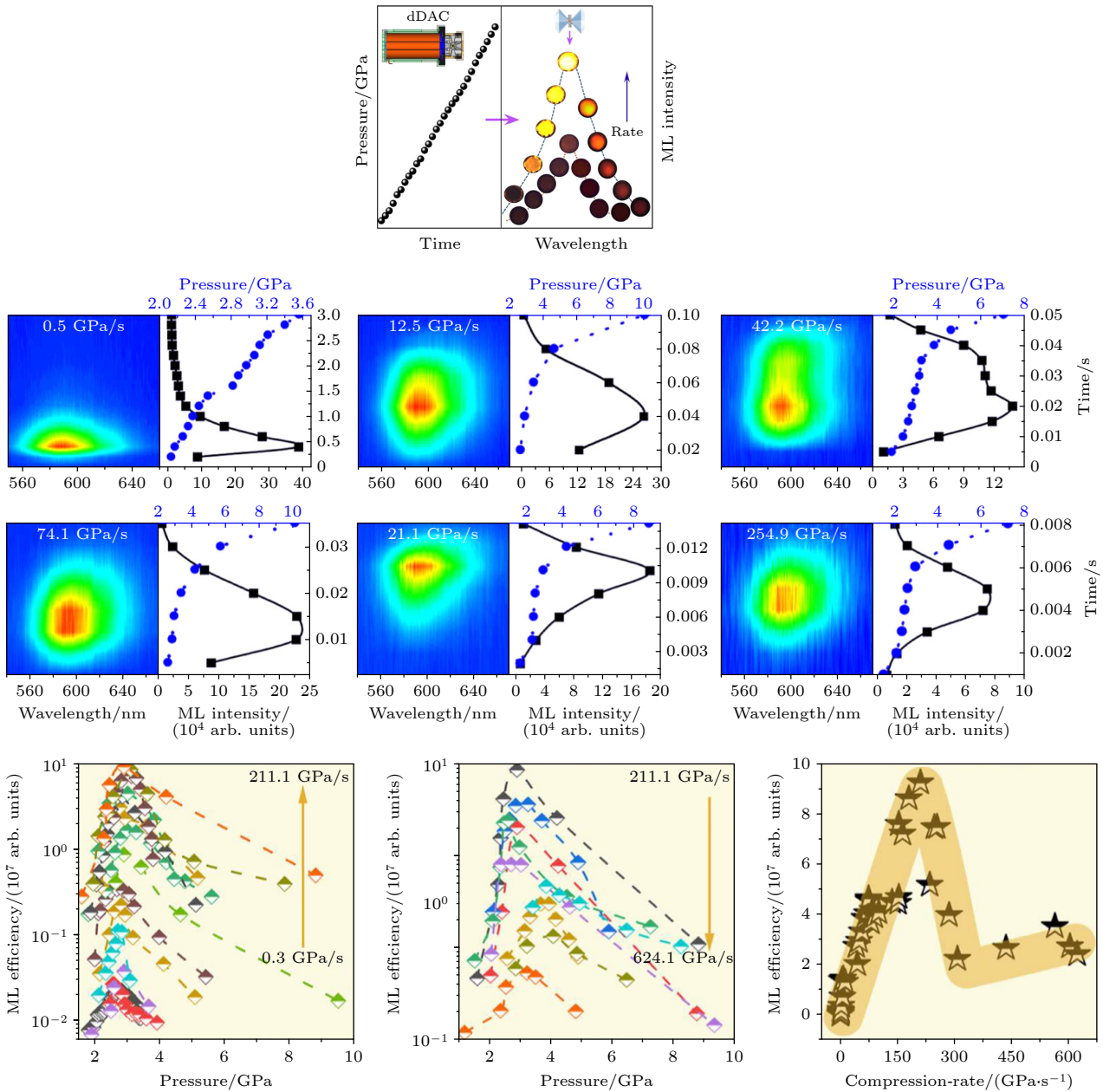


图 8 ZnS:Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup>在 dDAC 压缩下的压力递增与加载速率递增过程中的 ML 图像, 以及其压强与加载速率相关的发光行为<sup>[55]</sup>  
 Fig. 8. ML images of ZnS:Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup> under dDAC compression with increasing pressure and loading rate, and the corresponding pressure- and rate-dependent luminescence behavior<sup>[55]</sup>.

保持稳定, 并提出振荡式发光现象源自 PIE 与自恢复过程之间的周期性交互作用. 进一步分析发现, PIE 过程与自恢复过程具有各自的特征时间尺度, 临界速率附近时这两个过程的竞争最为激烈, 从而导致了 ML 的周期性振荡. 此外, 温度升高对 PIE 过程略有促进, 但对自恢复过程则产生抑制效应. 随后, Zhao 等<sup>[57]</sup> 在另一材料体系 SrZn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O: Mn<sup>2+</sup>中也发现了类似在快速压缩条件下的振荡式 ML 现象, 但与 SrZnOS:Mn<sup>2+</sup>不同的是, SrZn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O: Mn<sup>2+</sup>的振荡式 ML 出现的临界速率区间更宽 (约 1.7

至 4.7 GPa/s), 且在卸压过程中表现为宽峰特征, 而非明显的振荡, 如图 9(b) 所示. 此外, SrZn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O: Mn<sup>2+</sup>在 14.6 GPa 以下结构稳定, 且光致发光发射强度和波长在压力增加过程中均呈现单调变化. 他们同样采用压电诱导型 ML 模型进行解释, 提出该材料振荡式 ML 发光的多周期特征也源于压电诱导的激发过程, 但在发光动力学细节上有所不同, 尤其在压缩与卸压过程中的响应差异更为突出. 综上所述, 两种材料虽在速率依赖 ML 行为上均表现出周期性振荡特征, 但在临界速率区间、压缩与卸

压过程中的具体表现、结构稳定范围以及压力诱导的发光机理细节方面存在显著的差异. 这些发现不仅丰富了对压电诱导 ML 机制的理解, 也为具有时间特征的 ML 光电子器件设计提供了新的理论指导和材料选择依据.

在 ML 研究的整个历史进程中, ML 材料的结构起源始终是备受关注的核心议题. 对已报道 ML 材料的系统梳理显示, 大多数能产生 ML 现象的化合物均归属于非中心对称晶体范畴; 但需明确的是, 非中心对称晶体结构并非产生 ML 的必要前提. 例如, 在具有中心对称结构的晶体材料中, 便已观察到 ML 现象, 典型代表包括  $\text{CaF}_2:\text{Tb}^{3+}$  和  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ . 此外, Chandra<sup>[106]</sup> 早期对 36 种

具有 ML 特性的无机硫酸盐的研究也证实, 其中仅半数属于非中心对称晶体. 对此, 一种合理推测是: 材料的中心对称性可能被内部的点缺陷、缺陷簇或畴结构局部破坏, 进而诱导局部压电效应<sup>[107,108]</sup>. 但截至目前, 尚无直接实验证据证实该局部压电效应的存在, 也未能明确局部结构与 ML 特性间的关联——而这一关联, 对于开发中心对称材料中面向光电应用的高性能机械致敏系统至关重要. 近期, Wang 等<sup>[58]</sup> 的研究填补了这一空白: 他们在中心对称材料中首次发现了由局部非对称性引发的可恢复 ML 现象, 如图 10 所示. 该研究首先通过倍频响应实验, 证实中心对称材料  $\text{BaZnOS}$  中存在局部非对称结构, 同时借助缺陷光谱等表征证实材

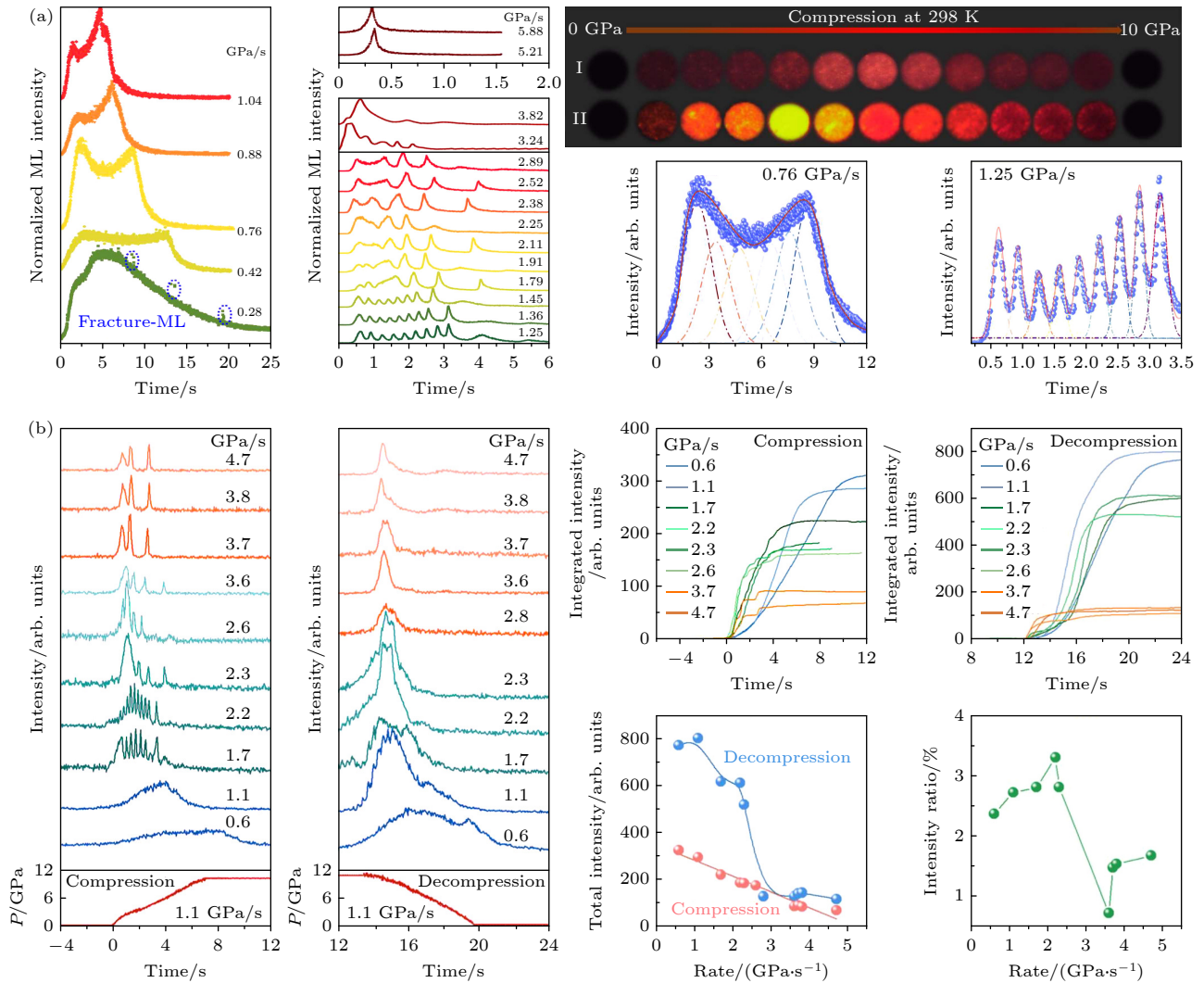


图 9  $\text{SrZnOS}:\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{SrZn}_2\text{S}_2\text{O}:\text{Mn}^{2+}$  在不同加载速率下的振荡型 ML 行为 (a)  $\text{SrZnOS}:\text{Mn}^{2+}$  在不同加载速率下的显微光学图像、振荡型力致发光行为和振荡型数据分析拟合结果<sup>[56]</sup>; (b)  $\text{SrZn}_2\text{S}_2\text{O}:\text{Mn}^{2+}$  在不同速率下快速加压和卸压下的自恢复 ML 行为和振荡型数据分析拟合结果<sup>[57]</sup>.

料内部丰富的缺陷能级, 为 ML 的产生提供前提条件; 随后借助压力下的结构演化分析, 进一步揭示 ML 现象的本质——源于压力诱导的  $[\text{Zn}/\text{MnS}_2\text{O}_2]$  四面体畸变. 这一畸变不仅会改变材料内部的局部压电场及陷阱的深度与密度分布, 结合理论计算

还发现, 其还能显著地调控 BaZnOS 的能带以及  $\text{Mn}^{2+}$  的能级结构, 最终实现对 ML 发射效率的调控. 这项作为研究中心对称材料中的 ML 响应开拓了一种新方法, 阐明了局部结构、压电效应和缺陷陷阱之间的相互作用.

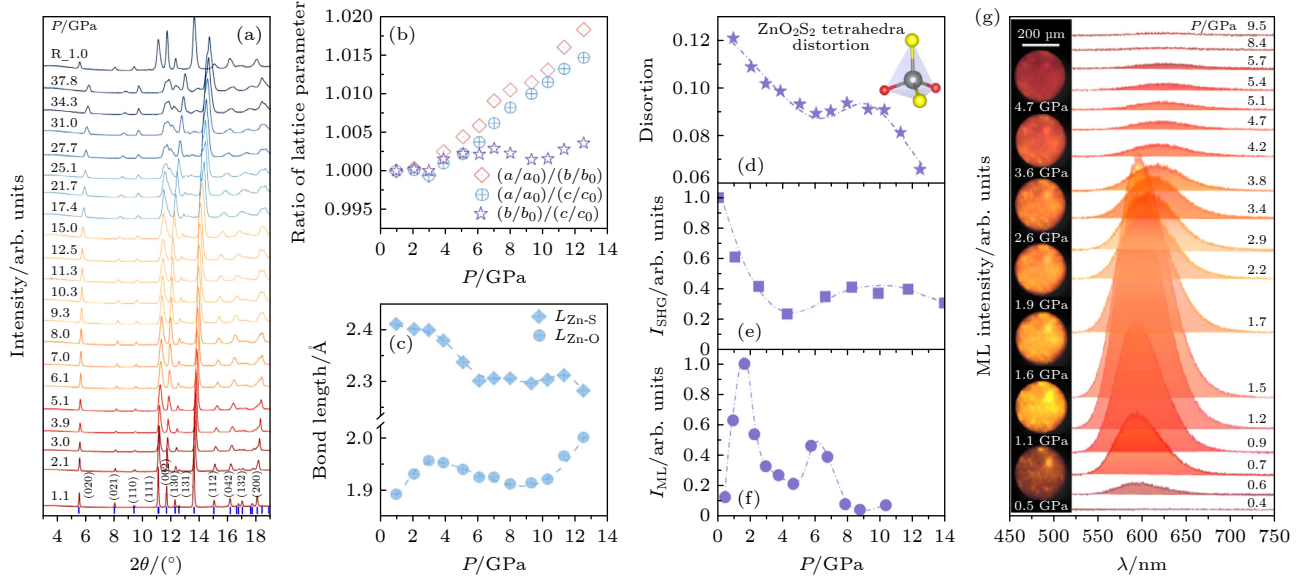


图 10 (a) BaZnOS: $\text{Mn}^{2+}$ 原位高压同步辐射 X 射线衍射图谱<sup>[58]</sup>; (b) 晶格参数随压力变化曲线<sup>[58]</sup>; (c) 键长随压力变化曲线<sup>[58]</sup>; (d) 四面体畸变随压力的变化及  $\text{ZnO}_2\text{S}_2$  四面体结构示意图<sup>[58]</sup>; (e) 压力诱导的二次谐波 (second harmonic generation, SHG) 信号响应<sup>[58]</sup>; (f) 不同起始压力下的总力致发光强度<sup>[58]</sup>; (g) BaZnOS: $\text{Mn}^{2+}$ 在 0.3 GPa/s 压缩速率下的力致发光谱及其光学图像<sup>[58]</sup>

Fig. 10. (a) *In situ* high-pressure synchrotron X-ray diffraction patterns of Mn-doped BaZnOS<sup>[58]</sup>; (b) lattice parameter as a function of pressure<sup>[58]</sup>; (c) bond length as a function of the pressure<sup>[58]</sup>; (d) variation of the tetrahedral distortion with pressure<sup>[58]</sup>, where the inset graph is the structure of the  $\text{ZnO}_2\text{S}_2$  tetrahedra; (e) pressure-induced SHG signal response<sup>[58]</sup>. (f) total ML intensity at different onset pressures<sup>[58]</sup>. (g) the ML spectra of BaZnOS: $\text{Mn}^{2+}$  under compression at a rate of 0.3 GPa/s with microscopic optical images in inset<sup>[58]</sup>.

## 6 总结与展望

本文系统地综述了高压 ML 领域的最新研究进展. 借助高压动态加载技术, 当前已成功开展了性能调控和发光机理方面的探究. 在性能调控层面, 通过调控带隙、压电场和晶体场, 实现了发光强度的优化和发光颜色的拓展; 在机理层面, 成功捕捉到从微秒到秒量级的动力学过程, 揭示了自恢复 ML 的时间特性, 为理解机械-光子能量转换中速率依赖的 ML 动力学提供了见解. 然而, 作为新兴研究领域, 仍面临一些挑战: 在实验方面, 首先, 静水压环境难以实现; 其次, 力致发光机械力探究类型仅局限于压缩, 而对于摩擦力致发光, 断裂力致发光的研究仍存在一定困难. 同时, 在性能调控方面, 虽已实现强度和颜色的调控, 但由于相关研究体系较少, 难以形成系统规律. 在高压作用下,

材料会发生丰富的结构相变, 但进一步分析结构转变过程与力致发光性能之间的关系仍有一定难度, 需借助理论计算等手段共同进行分析. 在机理分析方面, 力致发光过程较为复杂. 在一次压缩过程中, 可能有摩擦、断裂、弹性形变等多种物理过程, 在 dDAC 中剖析各个模式的动力学过程及比重仍存在困难. 在应用方面, 将高压 ML 探索成果应用于生产生活, 是亟需思考和发展的方向之一. 由于受到高压环境的限制, 将高压 ML 现象转化为生产生活中的实际应用仍面临一定挑战.

感谢北京高压科学研究中心的毛河光院士、杨文革教授和苏磊研究员、中国科学院高能物理研究所李晓东研究员、李延春研究员和杨栋亮副研究员, 中国工程物理研究院流体物理研究所的李俊研究员、李守瑞副研究员和陈小辉副研究员, 以及所有在快速压缩领域给予帮助和指导的合作者.

## 参考文献

- [1] Feng A, Smet P F 2018 *Materials* **11** 484
- [2] Jha P, Chandra B P 2014 *Luminescence* **29** 977
- [3] Chandra V K, Chandra B P, Jha P 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 161113
- [4] Bacon F 1605 *The Advancement of Learning* (London: Henrie Tomes) pp197-201
- [5] Zhan T, Xu C N, Fukuda O, Yamada H, Li C 2011 *Ultrason. Sonochem.* **18** 436
- [6] Chandra B P 1977 *Acta. Phys. Pol. A* **52** 61
- [7] Li C S, Xu C N, Zhang L, Yamada H, Imai Y, Wang W X 2008 *Key Eng. Mater.* **388** 265
- [8] Tang Y, Cai Y, Dou K, Chang J, Li W, Wang S, Sun M, Huang B, Liu X, Qiu J, Zhou L, Wu M, Zhang J C 2024 *Nat. Commun.* **15** 3209
- [9] Zhang J, Pan C, Zhu Y, Zhao L, He H, Liu X, Qiu J 2018 *Adv. Mater.* **30** 1804644
- [10] Zhao S, Wang Z, Ma Z, Fan F, Liu W 2020 *Inorg. Chem.* **59** 15681
- [11] Pimenta M L G, Comin R, Matos M J S, Mazzoni M S C, Neves B R A, Yankowitz M 2023 *Appl. Phys. Rev.* **10** 011313
- [12] Li B, Ji C, Yang W, Wang J, Yang K, Xu R, Liu W, Cai Z, Chen J, Mao H K 2018 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **115** 1713
- [13] Liu G, Kong L, Yang W, Mao H K 2019 *Mater. Today* **27** 91
- [14] Zhao D, Wang M, Xiao G, Zou B 2020 *J. Phys. Chem. Lett.* **11** 7297
- [15] Shang Y, Liu Z, Dong J, Yao M, Yang Z, Li Q, Zhai C, Shen F, Hou X, Wang L, Zhang N, Zhang W, Fu R, Ji J, Zhang X, Lin H, Fei Y, Sundqvist B, Wang W, Liu B 2021 *Nature* **599** 599
- [16] Yang M X, Chen J J, Cao B H, Gai X Q, Su Y G, Wang X W, Chen S, Guo L, Duan D F, Tian F B 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 067404
- [17] Yan X L, Feng Z B, Yu L, Liu C L 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 177801 (in Chinese) [闫晓丽, 冯振豹, 于蓝, 刘才龙 2025 物理学报 **74** 177801]
- [18] Yin X T, Liao D Y, Pan D, Wang P, Liu B B 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 067802 (in Chinese) [殷雪彤, 廖敦渊, 潘东, 王鹏, 刘冰冰 2025 物理学报 **74** 067802]
- [19] Ye R N, Wang J T, Yang J Y, Wang X X, Lei J C, Zhao W Y, Meng Y F, Xiao G J, Zou B 2025 *Chin. Phys. B* **34** 066204
- [20] Yu Z H, Ye Y G, Yang P T, Wang Y M, Chen L C, Li C L, Yuan J, Liu Z Y, Shen Z W, Wang S J, Li M T, Chu C Y, Wang X, Li J, Wang L, Yang W G, Guo Y F 2025 *Chin. Phys. B* **34** 088102
- [21] Yue L, Li Z, Yu L, Xu K, Liu R, Li C, Li Y, Yang D, Li X, Li Q, Liu B 2024 *J. Am. Chem. Soc.* **146** 25245
- [22] Xu T, Zhai C, Liu Z, Yang X, Hu S, Shang Y, Yue L, Dong J, Liu R, Li Q, Yao M, Liu B 2025 *Nat. Commun.* **16** 3550
- [23] Shi Y, Zhao W, Ma Z, Xiao G, Zou B 2021 *Chem. Sci.* **12** 14711
- [24] Zhang X, Li P, Li J, Li L, Xu S, Zhang J 2025 *J. Rare Earths* **43** 1133
- [25] Wu S, Wang S, Xiao B, Zhou Z, Yu H, Shao Z, Wang Y, Xiong P 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** 2401441
- [26] Zhu S, Song C, Tian Y, Ma L 2025 *Mater. Res. Bull.* **181** 113099
- [27] Zhao Y, Jing X, Ma Y, He P, Zhang Q, Li H 2025 *Adv. Opt. Mater.* **13** 2403516
- [28] Zheng Y L, Liu W, Koeckerling M, Rao G H, Zhao J T 2025 *Solid State Commun.* **399** 115881
- [29] Ambast A K, Sharma S K 2017 *Opt. Quantum Electron.* **49** 58
- [30] Lan Z, Zhou R 2025 *J. Alloys Compd.* **1010** 178099
- [31] Ye M, Zhou Y, Shao T, Liu H, Tao Q, Wang X, Tang R, Yue H, Li Y, Zhu P 2023 *J. Phys. Chem. C* **127** 6543
- [32] Errandonea D, Popescu C, Garg A B, Botella P, Martinez G D, Pellicer P J, Rodríguez H P, Muñoz A, Cuenca G V, Sans J A 2016 *Phys. Rev. B* **93** 035204
- [33] Shimizu T, Luong M V, Cadatal R M, Empizo M J F, Yamanoi K, Arita R, Minami Y, Sarukura N, Mitsuo N, Azechi H, Pham M H, Nguyen H D, Ichiiyanagi K, Nozawa S, Fukaya R, Adachi S ichi, Nakamura K G, Fukuda K, Kawazoe Y, Steenbergen K G, Schwerdtfeger P 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 141902
- [34] Zhang L, Wang Y, Lv J, Ma Y 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 17005
- [35] Mao H K, Chen X J, Ding Y, Li B, Wang L 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 015007
- [36] Lin F, Li X, Chen C, Pan X, Peng D, Luo H, Jin L, Zhuang Y, Xie R J 2022 *Chem. Mater.* **34** 5311
- [37] Tu S, Mizohata M, Sheng G, Liu L, Ming F, Xu C, Tu D, Zhang X, Alshareef H N 2020 *Adv. Funct. Materials* **30** 1909843
- [38] Pan X, Xie R J, Zhuang Y, Mei L 2022 *J. Chin. Ceram. Soc.* **50** 3147 [潘鑫, 庄逸熙, 梅乐夫, 解荣军 2022 硅酸盐学报 **50** 3147]
- [39] Chandra B P, Shrivastava K K 1978 *J. Phys. Chem. Solids* **39** 939
- [40] Tschugaeff L 1901 *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **34** 1820
- [41] Melvern C H, Cecil E B 1950 *J. Am. Chem. Soc.* **72** 2770
- [42] Chandra B P, Elyas M, Shrivastava K K, Verma R D 1980 *Solid State Commun.* **36** 931
- [43] Williams G P, Turner T J 1979 *Solid State Commun.* **29** 201
- [44] Chandra B P, Zink J I 1980 *Phys. Rev. B* **21** 816
- [45] Chandra B P, Rathore A S 1995 *Cryst. Res. Technol.* **30** 885
- [46] Akiyama M, Xu C N, Taira M, Nonaka K, Watanabe T 1999 *Philos. Mag. Lett.* **79** 735
- [47] Xu C N, Watanabe T, Akiyama M, Zheng X G 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 2414
- [48] Xu C N, Watanabe T, Akiyama M, Zheng X G 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1236
- [49] Xu C N, Watanabe T, Akiyama M, Zheng X G 1999 *J. Am. Ceram. Soc.* **82** 2342
- [50] Xu C N, Watanabe T, Akiyama M, Zheng X G 1999 *Mater. Res. Bull.* **34** 1491
- [51] Son C, Kim J, Kang D, Park S, Ryu C, Baek D, Jeong G, Jeong S, Ahn S, Lim C, Jeong Y, Eom J, Park J H, Lee D W, Kim D, Kim J, Ko H, Lee J 2024 *Nat. Commun.* **15** 8003
- [52] Timilsina S, Jo C W, Lee K H, Sohn K, Kim J S 2025 *Adv. Sci.* **12** 2409384
- [53] Chen D, Cui R, Huang C, Wang Z, Niu L 2025 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** 18844
- [54] Cai C, Li L, Lv X, Li H, Li T, Li P, Zhao W, Zi L, Feng S, Fan X, Zhang H, Peng D, Wang F, Qiu J, Yang Y 2025 *Nat. Commun.* **16** 6224
- [55] Wang H, Chen X, Li J, Li M, Liu K, Yang D, Peng S, Zhao T, Zhao B, Li Y, Wang Y, Lin C, Yang W 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 28204
- [56] Wang H, Zhao T, Li M, Li J, Liu K, Peng S, Liu X, Zhao B, Chen Y, An J, Chen X, Jiang S, Lin C, Yang W 2025 *Nat. Commun.* **16** 548

- [57] Zhao T, Wang H, Jiang J, Li M, Li J, Liu K, Peng S, Zhao B, Chen Y, An J, Li Y, Jiang S, Lin C 2025 *J. Phys. Chem. C* **129** 4715
- [58] Wang H, Zhao B, Zhao T, Li M, Peng S, Liu X, Chen Y, An J, Jiang S, Wang Y, Lin C, Yang W 2025 *Adv. Sci.* **45** e11805
- [59] Chandra B P 1982 *Pramana-J. Phys.* **19** 455
- [60] Zhang H, Terasaki N, Yamada H, Xu C N 2009 *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** 04C109
- [61] Botterman J, Eeckhout K V D, Baere I D, Poelman D, Smet P F 2012 *Acta Mater.* **60** 5494
- [62] Jeong S M, Song S, Lee S, Ha N Y 2013 *Adv. Mater.* **25** 6194
- [63] Chen C, Zhuang Y, Tu D, Wang X, Pan C, Xie R J 2020 *Nano Energy* **68** 104329
- [64] Zhang L, Shi K, Wang Y, Su L, Yang G, Huang B, Kong J, Dong X, Wang Z L 2021 *Nano Energy* **85** 106005
- [65] Kricka L J, Stroebel J, Stanley P E 1999 *Luminescence* **14** 215
- [66] Bünzli J C G, Wong K L 2018 *J. Rare Earths* **36** 1
- [67] Xie Y, Li Z 2018 *Chem* **4** 943
- [68] Chandra V K, Chandra B P, Jha P 2013 *J. Lumin.* **138** 267
- [69] Pan X, Zhuang Y, He W, Lin C, Mei L, Chen C, Xue H, Sun Z, Wang C, Peng D, Zheng Y, Pan C, Wang L, Xie R J 2024 *Nat. Commun.* **15** 2673
- [70] Zhuang Y, Xie R 2021 *Adv. Mater.* **33** 2005925
- [71] Stöcker H, Rühl M, Heinrich A, Mehner E, Meyer D C 2013 *J. Electrostat.* **71** 905
- [72] Mukherjee S, Thilagar P 2019 *Angew. Chem. Int. Ed.* **58** 7922
- [73] Hajra S, Kaja K R, Panda S, Song S, Jeong S M, Mishra Y K, Oh T H, Das G, Divya S, Kim H J 2025 *Nano Energy* **145** 111418
- [74] Bai Y, Wang F, Zhang L, Wang D, Liang Y, Yang S, Wang Z 2022 *Nano Energy* **96** 107075
- [75] Longchambon H 1922 *Frankl. Inst* **195** 269
- [76] Wang W, Wang Z, Zhang J, Zhou J, Dong W, Wang Y 2022 *Nano Energy* **94** 106920
- [77] Wang N, Pu M, Ma Z, Feng Y, Guo Y, Guo W, Zheng Y, Zhang L, Wang Z, Feng M, Li X, Wang D 2021 *Nano Energy* **90** 106646
- [78] Smet P F, Viana B, Tanabe S, Peng M, Hölsä J, Chen W 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 1414
- [79] Wang X, Zhang H, Yu R, Dong L, Peng D, Zhang A, Zhang Y, Liu H, Pan C, Wang Z L 2015 *Adv. Mater.* **27** 2324
- [80] Chandra V K, Chandra B P, Jha P 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 241105
- [81] Sasakura H, Kobayashi H, Tanaka S, Mita J, Tanaka T, Nakayama H 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 6901
- [82] Fan X H, Zhang J C, Zhang M, Pan C, Yan X, Han W P, Zhang H D, Long Y Z, Wang X 2017 *Opt. Express* **25** 14238
- [83] Kai H, Wong K, Tanner P A 2025 *Adv. Opt. Mater.* **13** 2500793
- [84] Dobrowolska A, Bos A J J, Dorenbos P 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 335301
- [85] Zhang Z T, Zhang J Y 2005 *Inorganic Photoluminescent Materials and Their Applications* (Beijing: Chemical Industry Press) 2005 pp34–41 (in Chinese) [张中太, 张俊英 2005 无机光致发光材料及应用 (北京: 化学工业出版社) 第 34—41 页]
- [86] Zhang J C, Xu C N, Long Y Z 2013 *Opt. Express* **21** 13699
- [87] Deng Y, Peng D, Chang S, Sun J, He J, Shan C X, Dong L 2025 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **58** 013002
- [88] Kim Y, Roy S, Jung G Y, Oh J S, Kim G W 2019 *Sci. Rep.* **9** 15215
- [89] Suo H, Wang Y, Zhang X, Zheng W, Guo Y, Li L, Li P, Yang Y, Wang Z, Wang F 2023 *Matter* **6** 2935
- [90] Ding Y, So B, Cao J, Wondraczek L 2022 *Adv. Sci.* **9** 2201631
- [91] Fu X, Zheng S, Shi J, Zhang H 2017 *J. Lumin.* **192** 117
- [92] Kim H J, Unithrattil S, Im W B 2020 *Ceram. Int.* **46** 12138
- [93] Liu S Q, Zheng Y T, Peng D F, Zhao J, Song Z, Liu Q L 2023 *Adv. Funct. Mater.* **33** 2209275
- [94] Wang H, Zhao T, Li M, Li J, Peng S, Liu X, Zhao B, Chen Y, Lin C 2024 *Chin. J. High Press. Phys.* **38** 030101 (in Chinese) [王毫, 赵婷婷, 李梅, 李俊龙, 彭赏, 刘旭强, 赵博浩, 陈彦龙, 林传龙 2024 高压物理学报 **38** 030101]
- [95] Wang B H, Li B, Liu X Q, Wang H, Jiang S, Lin C L, Yang W G 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 100702 (in Chinese) [王碧涵, 李冰, 刘旭强, 王毫, 蒋升, 林传龙, 杨文革 2022 物理学报 **71** 100702]
- [96] Zhang J C, Long Y Z, Wang X, Xu C N 2014 *RSC Adv.* **4** 40665
- [97] Peng D, Jiang Y, Huang B, Du Y, Zhao J, Zhang X, Ma R, Golovynskiy S, Chen B, Wang F 2020 *Adv. Mater.* **32** 1907747
- [98] Zhao F, Shao Y, Liu H, Mao Q, Yang H, Liu M, Liu Q, Zhong J 2025 *Chem. Eng. J.* **512** 162575
- [99] Wang X, Xiao Y, Xiong P, Zheng P, Wu S, Zhou Z, Xiao B, Shao P, Zhang M, Liu J, Gan J, Wang Y, Qian Q 2025 *Mater. Horiz.* **12** 3815
- [100] Dou C, Liang T, Zhao M, Song Z, Ning L, Peng D, Liu Q 2024 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2419716
- [101] Zhang S, Yang X, Xiao J, Li X, Peng Q, Luo S, Ba H, Zhang Y, Xu X 2024 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2404439
- [102] Zhang P, Zhao X H, Jia Z W, Dong J B, Liang T L, Liu Y, Cheng Q L, Ding L Q, Wu L, Peng D F, Kong Y F, Zhang Y, Xu J J 2024 *Adv. Mater.* **37** 2411532
- [103] Moon J S, Song S, Lee S K, Choi B 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 051110
- [104] Cheng K, Guo Z, Zhang P, Feng L, Zhou Y, Li L, Song H, Wang T, Zhao Y, Zhao L 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** 2401524
- [105] Wang Z, Meng Z, Mo S, Zhang L, Cheng P, Wang X, Ma Z 2025 *J. Solid State Chem.* **350** 125481
- [106] Chandra B P, Zink J I 1980 *Inorg. Chem.* **19** 3098
- [107] Chandra B P 1981 *Phys. Status Solidi A* **64** 395
- [108] Sweeting L M, Cashel M L, Dott M, Gingerich J M, Guido J L, Kling J A, Pippin R F, Rosenblatt M M, Rutter A M, Spence R A 1992 *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **211** 389

SPECIAL TOPIC—High-pressure modulation and in situ characterization of optoelectronic properties

## Regulation of high pressure on mechanoluminescence: Summary and Prospects\*

ZHAO Tingting<sup>1)</sup> LI Mei<sup>1)</sup> PENG Shang<sup>1)</sup> ZHAO Bohao<sup>1)</sup> FENG Qi<sup>1)</sup>

CHEN Yanlong<sup>1)</sup> YUAN Jun<sup>1)</sup> HAN Yingxue<sup>1)</sup> AN Jiao<sup>1)</sup>

WANG Hao<sup>2)†</sup> JIANG Sheng<sup>3)‡</sup> LIN Chuanlong<sup>1)††</sup>

<sup>1)</sup> (Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research, Beijing 100193, China)

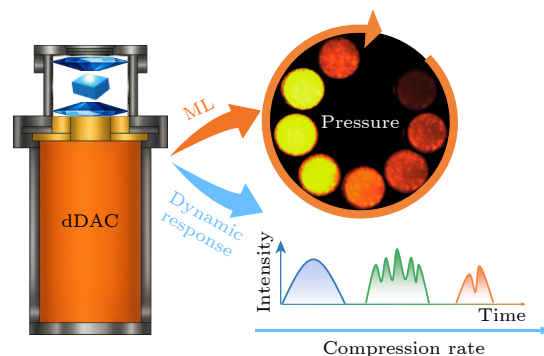
<sup>2)</sup> (Research Center for Ray Detection Discipline and Technology, School of Physics and Electronic Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

<sup>3)</sup> (Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

( Received 23 September 2025; revised manuscript received 27 October 2025 )

### Abstract

Mechanoluminescence (ML) is a phenomenon in which photon emission is produced directly under mechanical stimulation. Owing to its high spatial selectivity, rapid response, and multimodal emission capabilities, ML exhibits great potential for applications in structural health monitoring, intelligent sensing, and optical anti-counterfeiting. However, due to the complexity of ML modes, categories, and underlying kinetic processes, the field still faces several challenges, including the lack of a well-established mechanism, the limited availability of high-performance ML materials, and the absence of standardized testing standards. Existing studies have demonstrated that crystal field strength, band structure, and lattice configuration play crucial roles in governing the ML properties. High-pressure, with its unique ability to adjust these physical quantities, undoubtedly provides new pathways for advancing ML research. Recent breakthroughs in rapid loading techniques have further enabled the exploration of ML behaviors under high-pressure conditions. In the GPa pressure range, modulations of interatomic distances, electronic orbitals, and crystal structures can not only effectively control emission intensity and color, but also capture ML kinetic processes in microsecond-to-second timescales, thereby supplying essential experimental data for revealing the microscopic mechanisms of ML. In this review, we first provide a brief overview of the historical development, classification, and mechanistic understanding of ML, as well as commonly used ML characterization methods under ambient and high-pressure conditions. Then, we summarize the recent progress of high-pressure techniques in optimizing ML performance and elucidating ML mechanisms, with a focus on enhancing emission intensity, adjusting spectral characteristics, and revealing dynamic processes. Finally, the future directions and challenges for high-pressure ML research are discussed.



**Keywords:** high pressure, mechanoluminescence, dynamic diamond anvil cell, rapid compression

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251312](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251312)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251312](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251312)

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFB3702102) and the National Nature Science Foundation of China (Grant Nos. 11974033, 12374019).

† Corresponding author. E-mail: [wanghaosuse@163.com](mailto:wanghaosuse@163.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [jiangs@sari.ac.cn](mailto:jiangs@sari.ac.cn)

†† Corresponding author. E-mail: [chuanlong.lin@hpstar.ac.cn](mailto:chuanlong.lin@hpstar.ac.cn)

## 高压对力致发光的调控：总结与展望

赵婷婷 李梅 彭赏 赵博浩 冯琦 陈彦龙 袁骏 韩莹雪 安娇 王毫 蒋升 林传龙

### Regulation of high pressure on mechanoluminescence: Summary and Prospects

ZHAO Tingting LI Mei PENG Shang ZHAO Bohao FENG Qi CHEN Yanlong YUAN Jun HAN Yingxue AN Jiao WANG Hao JIANG Sheng LIN Chuanlong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 030802 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251312

CSTR: 32037.14.aps.75.20251312

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251312>

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

毫秒时间分辨同步辐射X射线衍射和高压快速加载装置及应用

Millisecond time-resolved synchrotron radiation X-ray diffraction and high-pressure rapid compression device and its application

物理学报. 2022, 71(10): 100702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212360>

高压下二维材料结构和光电性能研究进展

Recent progress of structures and photoelectric properties of two-dimensional materials under high pressure

物理学报. 2025, 74(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251034>

高压调控过渡金属硫族化合物及异质结构的光电性质

Optoelectronic properties of high pressure regulated transition metal chalcogenides and their heterostructures

物理学报. 2025, 74(17): 176802 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250498>

高压下HfS<sub>2</sub>的光电性质

Photoelectric properties of HfS<sub>2</sub> under high pressure

物理学报. 2025, 74(17): 177801 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250893>

高压导致纳米TiO<sub>2</sub>形变的电子显微研究

Electron microscopic study on high-pressure induced deformation of nano-TiO<sub>2</sub>

物理学报. 2023, 72(3): 036201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221656>

高压下非铅双钙钛矿Cs<sub>2</sub>TeCl<sub>6</sub>的光电性质调控

Pressure-modulated bandgap and optoelectronic properties in lead-free double perovskite Cs<sub>2</sub>TeCl<sub>6</sub>

物理学报. 2025, 74(17): 178503 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250693>