

长余辉发光与力致发光纳米材料

赵沛航, 庄逸熙, 解荣军

(厦门大学材料学院, 福建 厦门 361005)

摘 要:长余辉发光与力致发光是 2 类无须持续原位光激发的独特发光现象, 分别通过载流子在陷阱中的存储-延迟释放和机械刺激诱导的能量转换产生光信号。尽管激发方式和时间响应特性存在差异, 二者在载流子的产生、捕获与去捕获等过程具有重要共性。随着纳米材料合成与缺陷调控技术的发展, 长余辉发光与力致发光材料逐渐由块体和微米尺度体系向纳米尺度拓展, 尺寸效应、界面效应及陷阱效应显著增强, 为发光性能优化及应用拓展提供了新的机遇。本文系统综述了长余辉发光与力致发光纳米材料的研究进展, 重点总结了现有研究对典型纳米化制备策略、发光机理及二者在载流子去捕获过程的理解, 并概述了其在低背景噪声生物成像与生物医学、应力响应与结构健康监测、柔性器件与信息显示等领域的代表性应用。最后, 对纳米尺度下性能保持与结构协同调控、发光性能定量表征以及工程化应用面临的关键挑战与发展趋势进行了展望。

关键词:长余辉发光; 力致发光; 可控合成; 纳米发光材料

中图分类号: O782 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)09-3087-21

网络出版时间: 2026-08-21



发光材料作为一类重要的光学功能材料, 在照明显示、信息存储、生物医学与能源转换等领域具有广泛的应用价值。随着智能制造、健康监测与柔性电子等新兴学科快速发展, 以光信号为传输媒介的传感技术因其远程读取能力、可视化程度高、响应快速及易于集成等显著优势而备受关注。特别是刺激响应性发光材料, 能够将外界刺激(如温度、力、电场或化学环境等)转化为可量化的光学信号, 为环境监测、结构健康监测与可穿戴传感提供了新的材料基础。然而, 在复杂环境下, 传统实时光激发传感技术普遍面临背景荧光干扰强、光散射导致检测深度受限以及探针光稳定性欠佳等挑战。这促使研究者致力于开发具有低背景噪声、高稳定性和多场耦合响应能力的新型刺激响应发光体系。

在此背景下, 无须持续外部光源激发的特殊发光体系逐渐受到研究者的广泛关注。其中, 长余辉发光材料能够在外部光源或高能辐射激发停止后, 通过载流子的捕获与延迟释放, 实现持续数分钟至

数小时甚至更长时间的发光过程^[1]。力致发光材料则可在机械应力、摩擦力或压力等外力作用下, 将机械能直接转化为光信号, 其发光行为既可以表现为应力触发的即时响应, 也可能与材料内部缺陷能级的去捕获过程相互作用, 呈现出一定的延迟发光特征^[2,3]。尽管长余辉发光与力致发光在激发方式、时间响应特性上存在差异, 但二者均依赖于材料内部缺陷与陷阱结构对载流子的调控, 其发光过程在物理本质上具有一定共性。将二者置于统一的材料与机理框架下进行综合讨论, 对于深化对刺激响应性发光行为的理解具有重要意义。

近年来, 随着纳米材料合成与精细表征技术的持续进步, 长余辉发光与力致发光材料逐渐由传统块体和微米尺度向纳米尺度延伸。尺寸减小所带来的界面效应增强、表面与缺陷态比例升高以及结构调控自由度提升, 使纳米发光材料在分散性、刺激响应灵敏度及与复杂体系(如生物组织、柔性基体)的相容性方面展现出显著优势, 推动了其在生物

收稿日期: 2025-12-31。 修订日期: 2026-01-20。

基金项目: 国家自然科学基金(12474412, 5253000021, U25B2063); 福建省自然科学基金(2023J06005); 广东省自然科学基金(2024A1515011197)。

第一作者: 赵沛航(1995), 男, 博士研究生。

通信作者: 庄逸熙(1986), 男, 博士, 教授。

解荣军(1969), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-12-31. Revised date: 2026-01-20.

First author: ZHAO Peihang (1995-), male, Doctorial candidate.

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

Correspondent author: ZHUANG Yixi (1986-), male, Ph.D., Professor.

XIE Rongjun (1969-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhuangyixi@xmu.edu.cn; rxjie@xmu.edu.cn

成像、生物学和柔性器件等前沿领域的发展。然而, 现有研究与综述在系统性和整体性方面仍存在不足: 一方面, 不同纳米化合成策略对晶体结构完整性、缺陷/陷阱分布及发光性能的影响多以分散形式报道, 尚缺乏对合成路径、结构特征与发光行为之间内在关联的系统梳理; 另一方面, 长余辉发光与力致发光材料在纳米尺度下往往被分别讨论, 仍缺乏对两者载流子捕获与去捕获过程之间内在联系、机理共性及适用边界的统一认识, 这在一定程度上限制了对相关材料设计规律的深入理解。

基于此, 本文围绕长余辉发光与力致发光纳米材料的纳米化路径、发光机理与应用适配关系进行系统综述, 从纳米尺度下的合成路径、结构特征、载流子行为、应用需求之间的关联关系出发, 对 2 类发光材料进行统一梳理。首先, 从纳米材料制备角度出发, 对“自上而下”的物理细化与化学解构方法, 以及“自下而上”的溶胶-凝胶法、共沉淀法、水热/溶剂热法、高温热分解法与模板辅助法等典型合成策略进行归纳比较, 重点分析其在结晶度保持、粒径与形貌调控及缺陷与陷阱构建方面的差异与影响。随后, 在基质晶格、发射中心与陷阱能级协同作用的框架下, 对长余辉发光中载流子的存储-延迟释放过程与力致发光中应力诱导能带调制及陷阱去捕获机制进行对比讨论, 梳理已实现纳米化的代表性材料体系及其对应的刺激方式。在此基础上, 重点综述该类纳米材料在低背景噪声生物成像与分子示踪、治疗介导与诊疗一体化, 以及应力传感、结构健康监测和柔性器件/信息显示等方向的前沿应用进展, 进一步对纳米尺度下发光性能与结构协同优化、机理的定量化认知及工程化应用所面临的关键挑战与发展方向进行展望。

1 长余辉发光与力致发光纳米材料的制备

长余辉发光与力致发光纳米材料的制备主要采用自上而下和自下而上 2 类基本策略。自上而下法通常以块体或微米级发光材料为基础, 通过物理或化学手段实现尺寸微缩化, 其优势在于能够在较大程度上继承主体材料的晶体结构、掺杂分布及缺陷体系, 从而有利于保持较高的发光强度和稳定性。然而, 该类方法在材料粒径尺寸均一性和形貌精细调控方面存在一定局限。相比之下, 自下而上法通过原子、离子或分子尺度的反应与组装构筑纳米结

构, 能够在合成过程中对材料的尺寸、形貌、组成及表面性质进行精细调控, 更有利于获得分散性良好、结构均一的纳米发光材料, 但由于该类方法通常需要相对温和的条件, 其产物在结晶度、深能级陷阱构建及高强度发光性能方面面临一定挑战。

基于上述特点, 本章将围绕长余辉发光与力致发光纳米材料的典型合成策略, 系统梳理自上而下与自下而上 2 类方法的技术路线与适用范围, 重点比较不同合成方法在结构可控性、缺陷与陷阱调控能力、发光性能保持程度及应用适配性等方面的优势与局限, 为后续材料设计与应用研究提供参考。

1.1 自上而下法

在长余辉发光与力致发光材料的纳米化研究中, 自上而下法因其能够在较大程度上保留宏观发光材料高结晶度与缺陷结构的优势而备受关注。该方法以块体或微米级发光材料为起点, 通过后续处理实现尺度微缩化。其核心并非单纯获得更小尺寸的颗粒, 而是在尺寸细化过程中尽可能保持原有的陷阱结构与载流子调控能力, 从而避免因结构重构导致的发光强度衰减问题。

根据尺寸细化过程中所采用的驱动方式不同, 自上而下法可进一步分为物理细化法和化学解构法两类。前者依赖外加机械能实现颗粒尺寸减小, 典型代表为高温固相法结合后续机械研磨法。后者则通过构建特定化学环境, 使块体或微米级材料发生缓慢、受控的表面溶解或解构, 在保持基质晶相与缺陷结构的前提下实现纳米化。2 类策略在尺寸可控性、结构完整性及发光性能保持方面各具特点。

1.1.1 物理细化法 高温固相法是合成无机长余辉发光与力致发光材料最为传统且应用最广泛的方法之一, 其核心优势在于能够在高温条件下通过充分的固相扩散与反应, 获得结晶度高、结构稳定且发光性能优异的材料。该方法通常将反应原料按化学计量比充分混合, 在特定气氛中实现晶相形成、发射中心价态调控及缺陷结构构建过程。由于反应过程以扩散控制为主, 高温条件有助于提高反应完全性并抑制杂相生成, 因此该方法在块体和微米级发光粉体的制备中长期占据主导地位。

在纳米尺度发光材料的制备中, 高温固相反应本身难以直接实现精细的尺寸与形貌调控, 因而通常被用来制备初步块体或微米级材料, 再结合后续的材料细化过程实现由微米尺度向纳米尺度的转化。传统上, 该过程主要依赖机械研磨方式(如球磨), 通过调控研磨时间、转速及研磨介质等参数,

在一定程度上可将颗粒尺寸减小至几十纳米。例如, Sharma 团队^[4]通过对 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 微米级材料进行持续球磨处理, 可逐步获得粒径为 20~40 nm 的纳米发光颗粒。

然而, 这一路径的本质特征在于先获得发光性能优异的材料, 再通过外力实现尺寸细化。其代价是在纳米化过程中不可避免地引入内应力、位错缺陷及表面损伤, 这些结构扰动往往会导致发光中心猝灭、陷阱结构破坏及发光性能衰减, 尤其不利于对长余辉发光与力致发光相关的缺陷结构的保

持^[5]。此外, 机械研磨过程还容易引发颗粒团聚和导致粒径分布变宽, 从而进一步影响材料在纳米尺度下发光性能的稳定性与可重复性。

1.1.2 化学解构法 为克服物理细化法在结构损伤方面的固有局限, 近年来逐渐发展出一类结合温和和化学过程实现纳米化的自上而下策略, 即化学解构法。这类方法借鉴天然生物矿化与去矿化过程, 通过构建欠饱和或缓冲控制的化学环境, 使微米级发光材料发生缓慢、受控的表面溶解与解构, 从而在不引入剧烈机械扰动的前提下实现尺寸细化。美

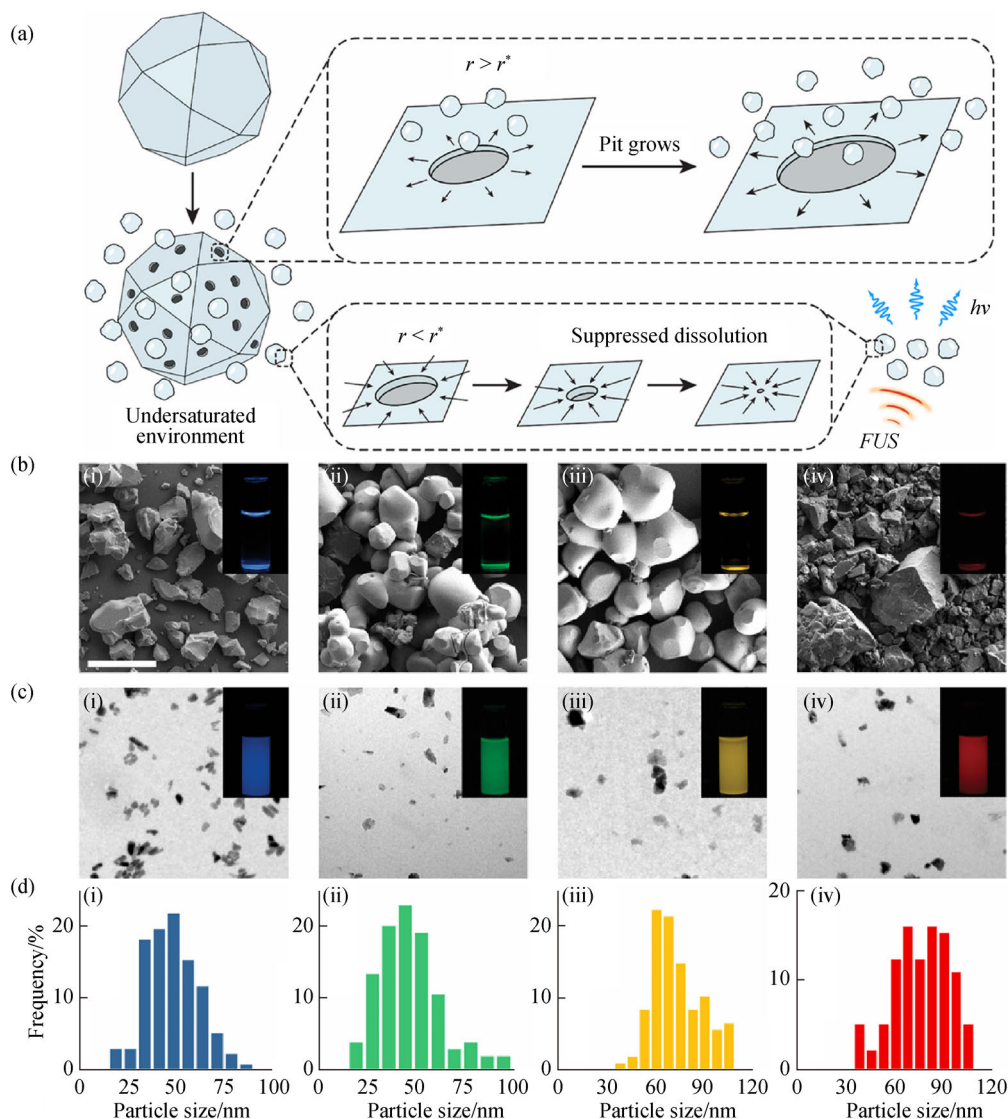


图 1 (a)受控表面溶解策略合成纳米材料的示意图及其材料粒径表征^[6]。(b)经固相反应制备的块体力致发光材料的扫描电子显微镜(SEM)照片。(c)采用抑制溶解策略制备的力致发光材料的透射电子显微镜(TEM)照片。(d)力致发光材料的粒径分布直方图。其中:(b)和(c)的比例尺分别为 50 μm 和 200 nm。(i) $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 、(ii) $\text{ZnS}:\text{Cu}, \text{Al}$ 、(iii) $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 以及(iv) $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}$

Fig. 1 (a) Schematic illustration of the controlled surface dissolution strategy for the synthesis of nanomaterials and the corresponding particle size characterization ^[6].(b) Scanning electron microscopy (SEM) images of bulk mechanoluminescent materials prepared *via* a solid-state reaction.(c) Transmission electron microscopy (TEM) images of mechanoluminescent materials fabricated using a dissolution-suppression strategy.(d) Particle size distribution histogram of the mechanoluminescent materials.The scale bars in (b) and (c) are 50 μm and 200 nm, respectively.(i) $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$; (ii) $\text{ZnS}:\text{Cu}, \text{Al}$; (iii) $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$; and (iv) $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}$

国斯坦福大学 Hong 团队的研究工作表明,在适当的溶液条件和动力学控制下,微米级发光材料可在保持原有晶相结构、掺杂离子分布及缺陷特征的前提下,逐步转化为稳定分散的纳米发光材料^[6,7]。与传统机械球磨法相比,这类化学解构法能显著减轻结构损伤和发光淬灭效应。因此,该方法更有利于获得兼具高亮度、良好稳定性和可设计性的纳米发光材料,尤其适用于对缺陷结构高度敏感的长余辉发光与力致发光体系。

总体而言,自上而下策略制备的材料在发光性能保持方面具有先天优势,但在纳米尺度结构可控性方面仍存在一定局限。一方面,高温固相反应通常需要较高的反应温度(多在 1000 °C 以上)和较长的反应时间,不利于直接实现对材料的精细尺寸与形貌调控;另一方面,无论是物理细化过程还是后续化学解构过程,均需在尺寸减小与结构完整性、缺陷稳定性之间进行权衡^[5]。尽管可通过引入助熔剂、多步反应策略或受控化学环境在一定程度上改善反应完全性与粒径分布^[8–11],但如何在纳米尺度下同时实现结构完整、缺陷可控与发光性能优异,仍是自上而下纳米化策略面临的核心挑战。

1.2 自下而上法

相较于自上而下策略侧重于在既有发光性能基础上实现尺寸细化,自下而上法通过原子、离子或分子尺度的可控反应与组装过程,直接构筑纳米结构,能够在材料合成阶段对粒径、形貌、掺杂分布及表面状态进行精细调控。这类方法以结构与组成的可设计性为核心优势,更适用于制备粒径较小、分散性良好且表面易于功能化的长余辉发光与力致发光纳米材料,在生物成像、传感及柔性器件等对尺寸均一性和体系兼容性要求较高的应用场景中表现出明显优势。

在长余辉发光与力致发光纳米材料研究中,自下而上法已发展出多种较为成熟的技术路线,主要包括溶胶-凝胶法、共沉淀法、水热/溶剂热法、高温热分解法以及模板辅助法等。这些方法通常以可溶性金属盐或有机金属化合物为前驱体,通过对反应体系组成、动力学条件及后处理工艺的精确调控,实现对纳米材料晶体结构、掺杂分布及表面化学状态的协同调节。然而,与自上而下策略相比,自下而上法在缺陷与陷阱结构的构建能力方面仍存在一定局限,这也成为其在长余辉与力致发光体系中进行进一步提升发光性能的关键挑战之一。

1.2.1 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是一种在相对

低温度条件下制备纳米材料的重要自下而上合成策略,在材料组成均匀性、粒径及形貌调控方面具有显著优势。该方法通常以可水解的金属盐或金属有机化合物为前驱体,通过水解与缩合反应形成均匀的溶胶体系,随后经凝胶化及热处理过程获得目标材料。为抑制不同金属离子在反应过程中的分离和局部富集,反应体系中常引入柠檬酸等有机多齿配体作为螯合剂,使多组分离子在分子尺度上实现均匀络合,从而为后续晶化过程提供化学组成高度均一的前驱体基础。

由于溶胶-凝胶过程在分子或纳米尺度上完成前驱体的混合与组织,所得凝胶通常具有纳米级的空间结构特征。同时,有机络合网络在一定程度上限制了晶核的迁移与团聚,使材料在随后的热处理过程中不易发生显著的晶粒长大和团聚,从而有利于保持纳米尺度和良好分散性。Zhang 团队通过溶胶-凝胶法成功合成了 $\text{LiGa}_5\text{O}_8:\text{Cr}^{3+}$ 纳米材料^[12],并系统研究了煅烧温度对该材料结构和发光性能的影响。研究表明,即使在 800~900 °C 的高温处理下,该材料仍可保持纳米尺度和较好的分散性。类似地,该方法也被应用于 ZnS 基纳米发光材料的制备,如 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 等体系^[13–16]。通过对前驱体组成和反应条件的调控,可获得粒径在数十纳米甚至更小的发光纳米材料。

与高温固相法相比,溶胶-凝胶法在降低反应温度、改善掺杂离子分布均匀性以及实现纳米尺度结构调控方面具有明显优势,适用于对材料尺寸、形貌及表面可修饰性具有明确要求的应用场景。然而,该方法也存在一定局限性:一方面,溶胶-凝胶法通常需要经历较为复杂的前驱体制备和有机组分去除过程,工艺流程相对烦琐;另一方面,材料的最终晶化仍依赖高温煅烧过程,而在此条件下形成的缺陷密度通常低于高温固相法制备的对应材料,这在一定程度上限制了深陷阱的构建,使所得纳米材料的长余辉发光持续时间和力致发光强度往往相对较弱。

1.2.2 共沉淀法

共沉淀法是指在含有 2 种或更多种金属阳离子的溶液体系中,通过加入沉淀剂诱导金属离子同步沉淀,从而形成化学组成均一的前驱体沉淀物,经分离、洗涤、干燥及后续热处理后获得目标材料的一种合成方法。该方法的核心特征在于能够在溶液阶段实现多组分离子的充分混合与协同沉积,从而在前驱体阶段获得良好的元素掺杂均匀性。因此,共沉淀法在无机纳米材料,尤其是

多元素掺杂发光材料的制备中得到广泛应用。在长余辉发光与力致发光纳米材料的合成中, 共沉淀法常被用于制备成分均匀、粒径可调的前驱体体系, 并通过后续高温煅烧实现晶化过程。与高温固相法相比, 该方法能够在相对较低的温度条件下完成前驱体的形成, 有利于改善掺杂离子的空间分布均匀性, 并在一定程度上降低杂相生成的可能性。此外, 通过调控沉淀剂种类、反应体系的 pH 值以及溶液环境等, 可对前驱体的形貌和材料粒径尺度进行一定程度的调节, 从而为纳米尺度结构控制提供更多调控自由度^[17]。

为进一步实现对材料微观形貌的精细调控, 共沉淀法中常引入表面活性剂或络合剂作为结构导向组分^[18]。不同类型的表面活性剂可通过调控晶核形成速率、限制晶体各向异性生长或诱导前驱体自组装行为, 引导沉淀物形成特定的微观形貌。这一策略使共沉淀法由单纯的成分调控手段, 进一步升级为兼具结构设计能力的合成方法。Chen 团队研究表明, 通过该策略合成的 ZnS 及其稀土或过渡金属掺杂体系材料, 尺寸可控制在数纳米至十余纳米范围内, 并表现出明显的量子限域效应^[19,20]。

尽管共沉淀法在工艺简便性、反应条件温和以及组分均匀性方面具有显著优势, 但其局限性同样不容忽视。共沉淀过程对反应条件高度敏感, 局部离子浓度波动可能导致前驱体团聚或成分偏析。同时, 沉淀剂和络合剂的引入会带来同离子效应或竞争络合效应, 从而影响目标相的形成。此外, 该方法制备的前驱体通常也需经过高温煅烧才能获得结晶度良好的发光相, 在纳米尺度下不可避免地面临结晶度提升与尺寸可控性之间的权衡问题。

1.2.3 水热/溶剂热法 水热/溶剂热法是一类在密闭反应体系中, 利用溶剂在高温高压条件下的特殊物理化学性质, 实现无机材料成核与晶体生长的液相合成方法^[21]。与依赖高温扩散的固相路线不同, 该方法通过溶液化学过程主导成核与晶体生长, 使反应体系能够在相对温和的条件下实现晶相形成与尺寸调控。该策略通常将金属盐或络合物前驱体溶解于水或有机溶剂中, 并置于密闭反应容器(如聚四氟乙烯内衬高压釜)内, 在中低温条件下诱导结晶反应, 从而获得结晶度较高、粒径可控的纳米材料。从晶体生长机理, 水热/溶剂热反应过程主要经历成核与晶体生长 2 个阶段: 反应初期, 前驱体在高温高压环境中逐步溶解并达到过饱和状态, 诱导晶核形成; 随后在热力学与动力学因素共同作用下, 晶

核发生定向或各向同性生长, 最终形成稳定的纳米晶体。为获得纳米尺度产物并抑制晶粒过度长大, 研究中通常通过引入表面活性剂或络合剂(如油酸、聚乙烯亚胺、乙二胺四乙酸以及十六烷基三甲基溴化铵等)对晶体生长过程进行调控, 从而改善产物的分散性与形貌均一性^[22-25]。

在长余辉发光与力致发光纳米材料的合成中, 水热/溶剂热法的优势不仅在于尺寸控制, 更在于其能够在相对温和条件下同步调控成核速率、晶体生长以及掺杂/缺陷引入过程, 为后续缺陷结构构建与发光性能优化提供基础。以尖晶石型 $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 为例, Gerus 等^[26]系统比较了溶液 pH 值、合成温度以及后续煅烧条件对结构与余辉材料性能的影响, 指出不同合成路径会引起反位缺陷与陷阱分布的差异, 从而调制余辉强度与持续时间。这表明, 水热过程中的化学环境参数与后续热处理路径之间存在协同作用, 其对缺陷态分布的影响难以通过单一参数变化进行表征。此外, 水热/溶剂热体系对组分化学计量与溶剂环境高度敏感, 因而也常被用作粒径、形貌与掺杂效率的耦合调控平台^[27]。除氧化物体系外, 硫化物等材料在水热条件下也表现出明显的结构可塑性。Long 团队工作表明, 通过调节前驱体配比即可在一定范围内改变 ZnS 纳米材料的粒径分布^[28]。在此基础上, 通过进一步控制反应动力学及配体/溶剂环境, 水热/溶剂热法还可拓展到一维结构等复杂形貌的构筑, 从而为力致发光体系中形貌、界面、应力传递关系的优化提供新的可能^[29]。这类湿化学路线的关键在于将反应参数调控转化为成核、生长、

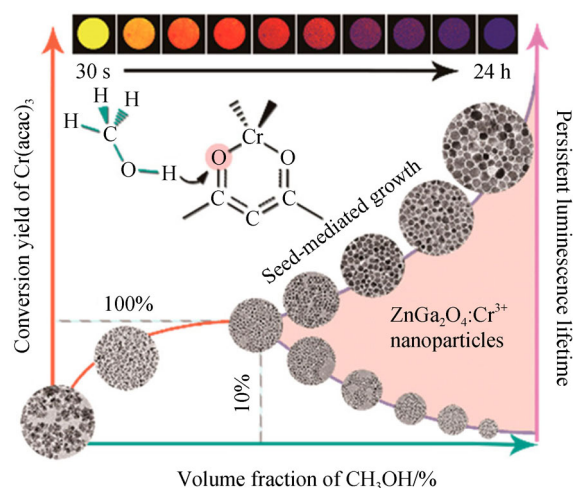


图 2 通过溶剂热法合成 $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 纳米材料, 并通过甲醇调控材料尺寸和发光性能^[27]

Fig. 2 Solvothermal synthesis of $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ nanomaterials with size and luminescence properties tuned by methanol^[27]

掺杂与缺陷演化过程的可控耦合,而非简单的工艺条件叠加。

总之,水热/溶剂热法具有反应条件相对温和、产物粒径和形貌可控性强、产物分散性好等优点,在制备小尺寸长余辉发光与力致发光纳米材料方面表现出明显优势。与溶胶-凝胶法和模板辅助法相比,该方法在部分体系中能够在无须高温煅烧的条件下直接获得目标晶相。然而,由于缺少高温烧结形成深能级陷阱的过程,水热/溶剂热法合成的材料在余辉持续时间和力致发光强度方面表现通常相对有限。因此,在实际应用中往往需要结合后续退火处理或缺陷工程调控,以在纳米尺寸可控性与发光性能之间实现合理平衡。

1.2.4 高温热分解法 高温热分解法是一种在有机溶剂体系中,通过加热目标元素的有机前驱体使其发生热分解反应,从而生成纳米晶体的液相合成方法。该方法通常在高沸点有机溶剂中进行,并配合长链有机配体作为稳定剂和表面钝化剂,在高温条件下实现前驱体的快速分解以及纳米晶的成核与生长过程。其核心优势在于能够在较窄的时间窗口

内实现成核与生长过程的有效分离,从而对纳米晶的尺寸分布和形貌演化进行精细调控。因此,高温热分解法在制备尺寸高度均一、单分散性良好的纳米材料方面表现出显著优势。通过调控反应温度、反应时间、前驱体浓度以及有机配体的种类和比例,可在较宽范围内精确调节纳米材料的粒径、形貌及表面化学性质。

在长余辉发光与力致发光纳米材料研究中,高温热分解法主要应用于部分氧化物及氟化物纳米晶体系的构筑,尤其适用于对晶体尺寸、界面结构及壳层构型具有较高要求的材料体系。例如,Zou 团队^[30]在油酸/油胺混合溶液中热分解三氟乙酸盐前驱体,成功制备了 $\text{Lu}_6\text{O}_5\text{F}_8:\text{Tb}^{3+}$ 纳米晶,并通过 Li^+ 和 Na^+ 掺杂实现了对粒径的连续调控(2.6~9.9 nm)。此外,Liu 团队利用高温热分解法合成了一系列氟化物纳米发光材料^[31,32],并通过壳层包覆等结构设计手段有效提升了发射强度与稳定性^[33],同时在一定程度上拓展了材料的结构设计空间并提升了材料的功能可调性^[34]。此外,有研究通过高温热分解法制备了 Er^{3+} 掺杂的 NaYF_4 纳米晶体,并系统对比了

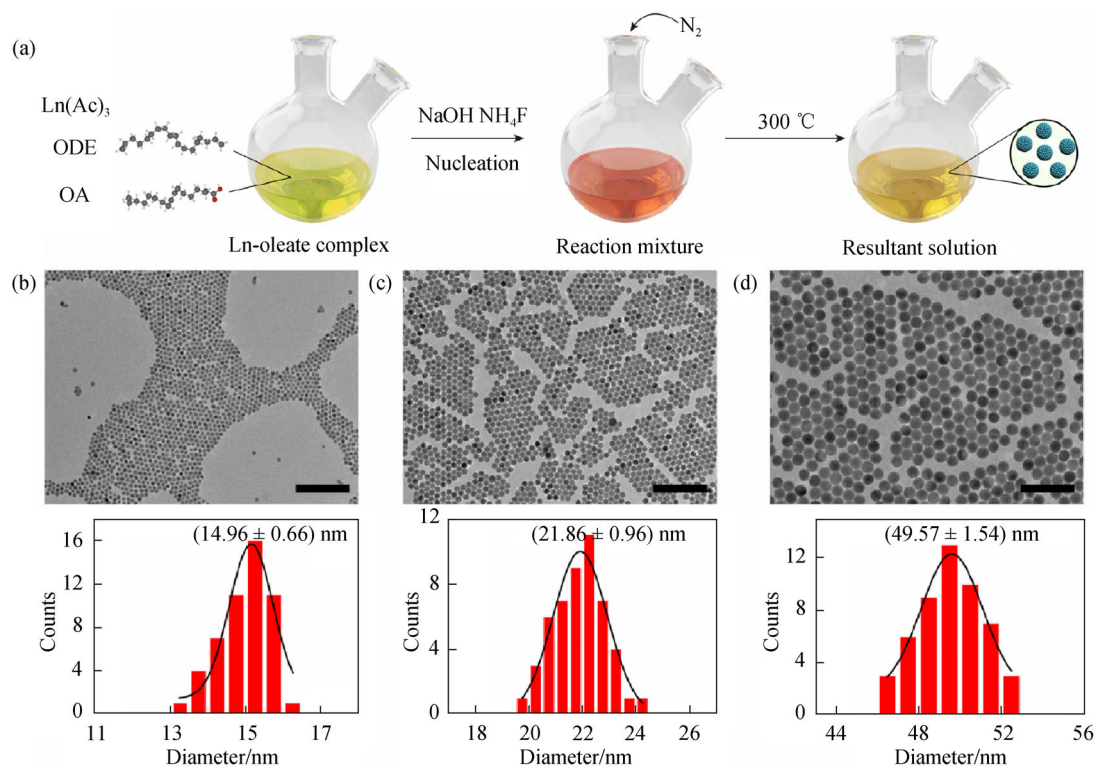


图3 通过热分解法合成 Ln^{3+} 掺杂纳米晶,并通过调整原料添加量控制纳米晶尺寸^[34]。(a) $\text{NaLuF}_4:\text{Ln}/\text{Gd}$ ($\text{Ln} = \text{Pr}^{3+}$ 、 Sm^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Tm^{3+} 和 Nd^{3+}) 纳米晶的合成示意图。(b) 合成所得六方相 $\text{NaLuF}_4:\text{Tb}/\text{Gd}$ 纳米晶的低分辨 TEM 照片(上)及对应的粒径分布(下)

Fig. 3 Thermal decomposition synthesis of Tb^{3+} -doped nanocrystals with size regulation achieved by varying precursor loading^[34]. (a) Schematic illustration of the synthesis of $\text{NaLuF}_4:\text{Ln}/\text{Gd}$ nanocrystals ($\text{Ln} = \text{Sm}^{3+}$ 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Tm^{3+} , and Nd^{3+}). (b) Low-resolution TEM images (top) and the corresponding particle size distributions (bottom) of the as-synthesized hexagonal-phase $\text{NaLuF}_4:\text{Tb}/\text{Gd}$ nanocrystals

其与传统块状材料在持续发光和力致发光性能上的差异,揭示了尺寸缩小对发光行为及多功能响应特性的显著影响^[35]。上述研究表明,高温热分解法在纳米晶结构精细调控及复合结构构筑方面具有独特优势,尤其适用于多壳层或界面工程相关研究领域。

然而,高温热分解法在长余辉发光与力致发光纳米材料的实际应用中仍存在一定局限性。首先,该方法通常依赖有机溶剂和有机配体体系,反应条件相对苛刻,对实验操作规范性、成本控制提出了较高要求;其次,所得纳米晶表面普遍被有机配体包覆,需通过配体交换或后处理才能实现水相分散或适配生物应用,而相关处理过程会引入表面缺陷或导致发光性能衰减,从而影响发光稳定性与可重复性。基于上述特点,高温热分解法更适合作为一种用于研究纳米晶结构与发光关系和表面调控效应的模型合成方法。

1.2.5 模板辅助法 模板辅助法是通过引入预先构建的空间限域结构,对纳米材料形貌结构进行精准调控的一类合成策略。其核心思想在于利用模板所提供的几何约束或自组装界面,限制晶体的成核与生长行为,从而在纳米尺度上实现对发光材料的可控构筑。与溶胶-凝胶、共沉淀、水热/溶剂热及高温热分解等主要依赖化学动力学调控的合成方法相比,模板辅助法更强调空间限域效应在结构形成与演化过程中的主导作用。根据模板材料的性质不同,模板辅助法一般可分为硬模板法和软模板法 2 类。硬模板包括二氧化硅纳米球、介孔二氧化硅、阳极氧化铝等刚性结构模版,其尺寸和形貌稳定,可在合成过程中为目标材料提供明确的空间边界。软模板则多由表面活性剂、嵌段共聚物、胶束或乳液体体系构成,依赖分子自组装行为形成瞬态限域空间,具有结构可调性强但热稳定性相对较低的特点。

在长余辉发光与力致发光纳米材料的构筑中,模板策略不仅有利于形貌和尺寸控制,更重要的是可通过限域生长条件与后续热处理工艺的相互作用,间接调控材料的结晶质量与缺陷/陷阱结构。以牺牲模板策略为例,Yuan 团队利用金属-有机框架衍生的前驱体路线制备了 $\text{SiO}_2@\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}@\text{SiO}_2$ 纳米材料^[36],热释发光表征结果表明,该合成路线有利于形成较高比例的深陷阱结构(最大陷阱深度约 0.8 eV)。同时,Zn-Ga 反位缺陷被认为是维持长余辉输出的重要结构基础。进一步通过调节 Cr/Zn 配比,可在一定范围内优化陷阱分布与余辉衰减行为,从而体现出模板法在组成调控、缺陷构建与余

辉性能之间协同调节的能力^[37]。除上述牺牲模板策略外,硬模板在限域固相反应与缺陷调控中的作用也逐渐受到关注。有研究通过溶胶-凝胶过程在 ZnS 基纳米结构外构筑二氧化硅壳层,并在高温煅烧过程中利用其提供的空间限域效应抑制纳米晶烧结,同时诱导受限固相反应,实现了 Ag^+ 、 Cu^+ 和 Mn^{2+} 等掺杂离子的可控引入^[38],该二氧化硅壳层在此过程中起到了硬模板的作用,使材料在保持纳米尺度稳定性的同时获得了可调控的缺陷结构与多模态机械发光响应,进一步表明模板限域对发光行为调控具有重要影响。

模板法所带来的尺寸可控性在部分应用场景中也可能表现为尺寸受限。如常用 SiO_2 纳米球或介孔 SiO_2 模板通常对应百纳米量级材料,该尺度在体内渗透与组织分布方面并非最优选择,对生物应用存在一定限制^[39]。相比之下,软模板依赖表面活性剂或嵌段共聚物的自组装限域,可为介孔金属氧化物等结构单元的构筑提供更灵活的结构参数窗口。Liu 团队研究表明,一些由软模板诱导形成的介孔 TiO_2 、 Al_2O_3 等在高温下仍具有一定结构稳定性^[40],这为进一步作为限域平台为长余辉发光和力致发光材料结晶与缺陷/陷阱的构筑提供了思路,也为后续发展兼具高结晶度与可控孔结构的刺激响应发光纳米材料留下空间。

模板辅助法在结构可控性和形貌设计方面具有显著优势,尤其适用于构筑复杂、非球形或多级结构的纳米发光材料。然而,该方法通常涉及模板引入与去除等多步操作,合成流程相对复杂,且模板材料及其去除过程可能对目标材料的表面状态、结晶程度和发光性能产生影响。因此,如何在限域效应、结晶质量与缺陷调控之间实现协同优化,是模板辅助法在长余辉发光与力致发光纳米材料领域中亟待深入解决的关键问题。

2 发光性质与材料体系

长余辉发光与力致发光材料的共同特征在于其光输出过程并非由瞬时辐射复合直接决定,而是高度依赖于材料内部能级结构、缺陷类型及载流子的非平衡迁移与释放行为。对于长余辉发光体系而言,余辉强度与持续时间主要受陷阱深度、陷阱密度以及载流子在禁带内的迁移行为与动力学过程共同影响。而在力致发光体系中,发光亮度、响应阈值及循环稳定性则与基质晶格的电学响应特性(如压电或极化行为)、应力传递效率以及缺陷或陷阱在机械

作用下的去捕获过程密切相关。尽管二者在外部激发形式和时间响应尺度上存在明显差异,但从物理本质上看,二者均可视为由缺陷与陷阱主导的非平衡发光过程,其关键区别在于载流子脱陷所依赖的触发方式。

除发光动力学外,材料的发射波段(从可见光至近红外)以及其材料的可加工形态(如胶体分散体系、核壳结构及复合薄膜或弹性体)在很大程度上决定了材料在低背景生物成像、应力可视化以及柔性器件集成中的适用性与性能上限。因此,从材料设计角度出发,长余辉发光与部分力致发光体系可归为由基质晶格、发射中心与缺陷相关陷阱共同构成的发光系统。其中,基质材料决定晶体结构与能带特性,发射中心提供具体的辐射跃迁通道,而缺陷或杂质相关能级则在载流子的存储、转移与释放过程中发挥核心调控作用。正是这种对缺陷结构与能级分布的高度依赖性,使材料体系的选择及其在纳米尺度下的结构调控成为影响发光性能和应用潜力的决定性因素。在第1章合成与调控策略的基础上,围绕2类现象的发光过程和典型纳米材料体系进行总结与梳理。

2.1 长余辉发光纳米材料的发光特性与代表性体系

长余辉发光材料的主要特征在于在短时间外部激发后仍可持续发光,余辉持续时间可由数秒延伸至数小时甚至更长,这一特性使其在无须持续外部光源照射条件下仍可提供稳定的光学信号,在生物成像、信息存储和状态指示等领域展现出独特优势。与瞬态荧光或磷光体系不同,长余辉发光本质上依赖于载流子在缺陷或陷阱能级中的存储与延迟释放过程,其发光行为对材料的能级结构与缺陷分布高度敏感。

在材料体系方面,传统长余辉发光材料主要集中于铝酸盐、锆酸盐、尖晶石及氮氧化物等无机体系,典型基质包括 SrAl_2O_4 、 CaAl_2O_4 、 ZnGa_2O_4 、 LiGa_5O_8 和 Zn_2GeO_4 等^[41–46]。发射中心多为 Eu^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{2+} 和 Ce^{3+} 等离子,其特征能级跃迁可实现从可见光到近红外(NIR)波段的发光调控^[41–45]。近年来,随着纳米合成与尺寸调控策略的发展,上述体系已成功实现纳米化,并在保持长余辉特性的同时改善了材料的分散性与可加工性。在纳米尺度下, $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 和 $\text{LiGa}_5\text{O}_8:\text{Cr}^{3+}$ 等尖晶石和类尖晶石体系因其稳定的晶格框架、较深的陷阱分布和 NIR 区域的余辉发射特性,成为研究最为广泛的长余辉纳米材料之一。此外,稀土掺杂氟化物体系(如 $\text{NaYF}_4:$

Er^{3+} 和 $\text{NaYF}_4:\text{Nd}^{3+}$ 等)因其核壳结构近年来也被用于构建 X 射线激发或多模态激发的长余辉纳米探针,在深层成像和多模态诊断中表现出独特优势。

围绕长余辉发光的物理机制,研究者提出了多种理论模型用于描述载流子的捕获与去捕获行为,包括导带–价带(CB–VB)模型^[47]、量子隧穿模型^[48,49]以及基于特定缺陷(如氧空位)的局域陷阱模型^[50]。这些模型从不同角度解释了载流子在禁带内的迁移路径和释放机制,其适用性通常取决于具体材料体系、缺陷类型及激发条件。目前尚不存在能够普遍适用于所有长余辉体系的统一机理描述,这一现象在一定程度上反映了陷阱类型多样性及纳米尺度效应对载流子行为的显著影响。

在上述材料体系与机理研究基础上,长余辉发光纳米材料的发展正由传统可见光体系逐步向 NIR 波段,尤其是近红外二区(NIR–II)窗口拓展,同时更加注重与多模态成像、刺激响应性能和功能集成的结合,为其在复杂生物与工程应用环境中的进一步拓展奠定了材料与物理基础。

2.2 力致发光纳米材料的发光特性与代表性体系

力致发光材料的基本特征在于能够在外加机械刺激作用下产生光信号,其发光行为既可以表现为与外部应力同步的瞬态响应,也可在特定材料体系中伴随一定程度的延迟发光过程。与长余辉发光主要依赖热激励或载流子隧穿过程实现去捕获不同,力致发光更强调机械刺激诱导的多种物理效应对载流子释放与辐射复合过程的协同调控。从物理本质上看,其具体机理通常与材料的晶体结构、电学特性及缺陷状态密切相关。

现有研究普遍认为,在具有压电性或极化特性的力致发光材料中,外加机械应力可在材料内部诱导局域电场,并引发能带结构的重新分布,从而有效降低陷阱能级与导带或发射中心之间的势垒高度^[51–54],促进原本处于亚稳态的载流子从陷阱中释放并参与辐射复合^[55–59]。这一应力诱导电场与能级调制机制已被广泛用于解释 ZnS 、 CaZnOS 等典型力致发光材料中的发光行为^[55,60]。除压电场效应外,机械应力还可能通过引起晶格畸变直接调制局域缺陷结构,从而改变陷阱能级的深度与分布^[42,61–64]。在应力作用下,晶格常数及局域配位环境的微小变化可导致部分深陷阱发生浅化,使其由以热激活为主的去捕获过程转变为对应力更为敏感的释放行为^[65–67]。从这一角度看,力致发光中的应力辅助去捕获机制与长余辉发光中的热辅助去捕获机制具有

一定相似性,但其外部触发因素由热扰动转变为机械扰动。此外,在摩擦型力致发光体系及多相异质结构材料中,摩擦电效应及界面电荷积累同样被认为是影响载流子释放的重要因素^[67]。机械摩擦或界面滑移可在材料表面或界面区域形成局域高电场,从而进一步调制能带结构,或直接为陷阱中的载流子提供额外能量,促进其释放与复合发光^[68-70]。该类机制在薄膜、聚合物复合材料及柔性器件等体系中尤为显著^[3,68],也为力致发光在柔性应力传感与可穿戴器件中的应用提供了物理基础。

从材料体系角度来看,典型的力致发光材料主要包括 ZnS 基、硅酸盐基、铝酸盐基及硫化物等无机体系,如 ZnS:Cu,Al、SrAl₂O₄:Eu²⁺、CaZnOS:Mn²⁺/Nd³⁺和 Sr₂MgSi₂O₇:Eu²⁺,Dy³⁺等。这类材料通常通过高温固相反应获得结晶度较高的前体,其力致发光性能与晶体结构、电学特性及缺陷分布密切相关。需要指出的是,现有关于力致发光机理与性能的系统研究仍集中于块体或微米尺度材料。近年来,借助机械球磨、化学解构及生物矿化启发等策略,部分 ZnS 基和硅酸盐基力致发光材料已成功实现纳米化,并在一定程度上保持了力致发光响应,同时显著改善了材料的分散性及其在复合体系中的加工适应性。然而,在纳米尺度下实现稳定、可重复且可定量调控的力致发光行为仍面临诸多挑战。一方面,尺寸效应与界面效应使力致发光过程对缺陷分布、界面状态及应力传递路径表现出更高敏感性;另一方面,这种敏感性也为在柔性器件与复合材料中实现精细化应力响应调控提供了新的设计空间。因此,如何在纳米尺度下协调结构稳定性、缺

陷可控性与力致发光响应的可靠性,已成为推动该类材料进一步发展的关键问题。

2.3 长余辉发光与力致发光材料体系的共性与差异

从材料构成与发光机理层面来看,长余辉发光与力致发光材料在物理本质上具有一定共性,二者均依赖基质晶格、发射中心以及缺陷或杂质相关能级之间的协同作用来实现载流子的捕获、释放与辐射复合^[3]。然而,2类发光体系在外界刺激方式、载流子动力学时间尺度以及材料设计侧重方面仍存在明显差异。

长余辉发光材料更强调载流子的长期存储与缓慢释放,其性能优化通常聚焦于陷阱能级深度与分布,以实现持续时间可控且背景干扰较低的发光输出。相比之下,力致发光材料则更关注机械刺激与光信号之间的直接耦合响应,其发光行为对基质晶格的电学响应特性、应力传递路径及应力诱导去捕获效率高度敏感,更适用于应力可视化和动态响应场景。

在纳米尺度下,这2类发光行为并非彼此孤立。一方面,部分长余辉发光纳米材料在外部机械刺激作用下可表现出力致发光特征,显示出捕获过程对刺激方式的多重响应性;另一方面,将力致响应机制引入长余辉体系,也为其实实现再激发、多模态刺激响应及功能扩展提供了新的途径。基于上述认识,从材料体系整合与机理关联的角度,对已报道的长余辉发光与力致发光纳米材料进行并列梳理与对比,有助于为后续刺激响应性发光纳米材料的理性设计与性能优化提供参考依据。为此,本文对典型材料体系及其发光特性进行了系统汇总,见表1。

表 1 长余辉发光与力致发光纳米材料体系

Table 1 Representative persistent luminescent (PerL) and mechanoluminescent (ML) nanomaterials

Materials	ML	PerL	Application	Reference
ZnS	√		Biological imaging / Optogenetic therapy	[15,29,71,72]
SrAl ₂ O ₄	√	√	Biological imaging / Biological therapy	[4,7,8,73]
Sr ₂ MgSi ₂ O ₇	√	√	Optogenetic therapy / Fluorescence imaging	[6,7,74]
Sr _{1.6} Mg _{0.3} Zn _{1.1} Si ₂ O ₇		√	Biological detection	[75]
Sr ₂ MgSi ₂ O ₇	√		Pressure sensing	[76]
MgGeO ₃		√	Biological imaging	[45]
Zn _{1.1} Ga _{1.8} Ge _{0.1} O ₄		√	Biological imaging / Biological detection and therapy	[77,78,79,80,81]
CaTiO ₃	√		Optogenetic therapy	[6]
Ca _{0.85} Sr _{0.15} S		√	Fluorescence imaging	[7]
ZnGa ₂ O ₄		√	Biological imaging / Biological detection	[27,36,37,43,71,82]
LiGa ₅ O ₈		√	Fluorescence imaging	[12]
Zn ₃ Ga ₂ Sn ₂ O ₁₀		√	Biological therapy	[83]
Lu ₆ O ₅ F ₈		√	Biological imaging	[31]
NaYF ₄		√		[32]
NaGdF ₄		√		[33]
NaLuF ₄		√	Biological imaging	[36,84]

3 长余辉发光与力致发光纳米材料的应用

随着纳米材料可控合成与缺陷调控技术的不断发展,长余辉发光与力致发光材料正由传统块体和微米级体系向纳米尺度延伸。相较于宏观体系,纳米化策略不仅显著改善了材料的分散性与可加工性,还通过增强界面效应、强化缺陷与陷阱对载流子行为的调控作用,使材料对外界刺激的响应更加灵敏且易设计。这些优势使长余辉发光与力致发光纳米材料在复杂环境以及空间受限条件下展现出宏观体系难以实现的应用潜力。

由应用导向的趋势进行分析,该领域的关注重点已由单纯的发光性能评估,逐步转向围绕具体应用需求的材料体系设计与功能集成。在生物相关应用中,长余辉发光纳米材料凭借预激发–延迟发光的工作模式有效降低背景干扰,在生物成像与分子示踪等方面表现出独特优势。力致发光纳米材料则因其机械或声学刺激触发的发光机制,为实现无创、远程或深部激活的光信号输出提供了新的物理路径。在非生物领域,纳米尺度下发光材料与柔性基体、复合结构和器件系统的兼容性显著提升,也为光学传感、结构健康监测及信息可视化等应用拓展了实现路径。

基于上述背景与应用需求,围绕长余辉发光与力致发光纳米材料的代表性应用进行系统梳理。首先,介绍其在生物成像与分子示踪中的应用进展,并分析关键材料设计要素。其次,总结其治疗介入与诊疗一体化体系中的功能构建思路与代表性研究。最后,概述其在应力传感、柔性电子及信息可视化等非生物应用中的发展现状与潜在前景,并结合纳米尺度特征讨论相关性能需求与挑战。

3.1 生物成像与分子示踪应用

长余辉发光纳米材料在生物成像与分子示踪中通常采用预激发–延迟成像的工作模式,即材料经短时间光源照射或高能辐射激发后引入生物体系,在无持续外加光源条件下采集余辉信号。该模式能有效规避生物组织自发荧光和散射光干扰,显著提升成像对比度与信噪比^[74,85]。同时,纳米尺度材料易于在体内实现均匀分散,并可通过表面修饰引入聚合物包覆或靶向配体,以满足生物成像对生物相容性、稳定性及靶向识别能力的综合要求。因此,长余辉发光纳米材料已在低背景生物成像与分子示踪

领域展现出广泛的应用潜力。

近年来,基于长余辉发光纳米材料的生物分析与分子示踪研究不断拓展,已实现对多种生物相关小分子及生物大分子的高对比度检测,包括谷胱甘肽、多巴胺以及蛋白质和核酸等^[86–88]。以长余辉纳米颗粒为能量供体构建的时间分辨荧光共振能量转移平台可实现对半胱天冬酶-3、小分子核糖核酸(miRNA)及蛋白等靶标的时间分辨检测,并可进一步用于细胞凋亡相关的寿命成像与定量分析,体现了延迟读出在复杂生物背景中的方法学优势^[88]。Zhao 团队^[77]构建的 $\text{ZnGaGe:Eu}^{2+},\text{Cr}^{3+}$ 长余辉 NIR 纳米探针,通过表面硼酸基团修饰实现受体介导的细胞内吞过程,用于乳腺癌细胞迁移过程的动态监测。上述研究表明,合理的表面功能化设计能够在保持长余辉特性的同时,显著提升纳米材料的生物适配性和成像选择性。

基于光学窗口角度,相较于可见光发射体系,NIR 长余辉发光纳米材料在生物成像中具有更突出的优势。NIR 光在生物组织中的散射和吸收较弱,可显著提高成像穿透深度和信噪比^[89,90]。在此基础上,Lin 团队报道的 $\text{MgGe}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{O}_3:\text{Yb}^{3+}$ 纳米材料可经 X 射线反复激发产生 NIR–II 区余辉发射,其信号发射能够穿透毫米级生物组织,展现出良好的深层组织成像潜力^[91]。此外,Pei 团队构建的 X 射线激发 NIR–II 长余辉核壳纳米晶 $\text{NaYF}_4:3\%\text{Er}^{3+}@\text{NaGdF}_4$ ^[92],通过引入 NaGdF_4 壳层有效提升了材料余辉发光强度并缩短了纵向弛豫时间(T_1),从而实现了 T_1 加权磁共振成像(MRI)正对比增强,为构建长余辉发光与磁共振等多模态成像探针提供了思路。

相较之下,力致发光材料在生物成像领域的研究仍主要集中于块体或微米尺度体系,真正意义上的力致发光纳米材料应用尚处于起步阶段^[93]。Xu 团队及其合作者率先报道了 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7:\text{Nd}^{3+}$ 等 NIR 力致发光材料在机械刺激下产生 NIR 发射,并通过多种生物组织模型验证了其良好的组织穿透能力^[84,94]。随后,Peng 团队进一步拓展了 $\text{LiNbO}_3:\text{Nd}^{3+}$ 和 $\text{CaZnOS}:\text{Er}^{3+}$ 等体系的 NIR 力致发光特性^[95,96]。需要指出的是,这类研究的核心意义在于验证机械刺激触发光信号用于生物成像的物理可行性,而非构建成熟的纳米成像体系。

此外,近年来还出现了一些与传统无机力致发光材料相关但机理不同的刺激响应发光成像策略。例如,Tan 团队报道了一种基于超声激发的分子/纳

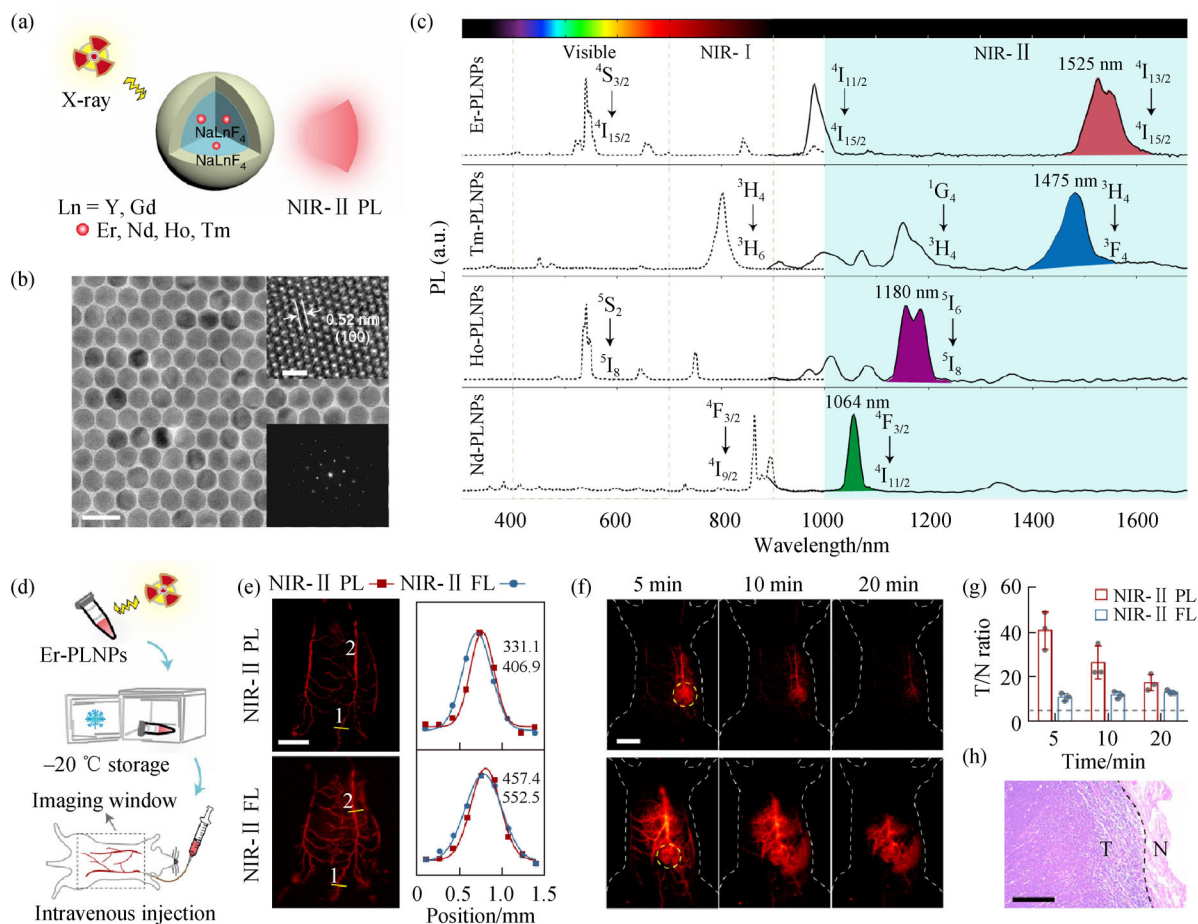


图 4 长余辉发光纳米晶形貌与发光表征并基于 NIR-II 区长余辉发光的血管成像^[92]。(a) 镧系掺杂纳米晶中 X 射线激活持久发光(PL)产生过程的示意图。(b) 合成所得 $\text{NaYF}_4:3\%\text{Er}^{3+}@\text{NaYF}_4$ 纳米晶的低分辨 TEM 照片, 比例尺为 50 nm。插图: 单个 $\text{NaYF}_4:3\%\text{Er}^{3+}@\text{NaYF}_4$ 纳米晶的高分辨 TEM 照片(右上)及其对应的电子衍射图样(右下), 比例尺为 2 nm。(c) 镧系掺杂纳米晶经 X 射线辐照后的可调长余辉发光光谱。(d) NIR-II 区 PL 血管成像的示意图。(e) 静脉注射掺 Er^{3+} 纳米晶后 10 s(p.i.) 活体小鼠血管的 NIR-II 的 PL(左上)和 NIR-II 荧光(FL, 左下)成像图像(左), 以及对应位置 1(右上)和位置 2(右下)的血管归一化强度分布曲线(右), 并标注了半高全宽(μm)。比例尺为 1 cm。(f) 多次注射掺 Er^{3+} 纳米晶后, 活体小鼠肿瘤区域随时间变化的 NIR-II 长余辉发光(上)和 NIR-II 荧光(下)成像图像。比例尺为 1 cm。(g) 图(f)中肿瘤的肿瘤/正常组织信噪比($n = 3$, 生物学独立小鼠)。黑色虚线表示 Rose 判据。(h) 切除肿瘤组织的苏木精-伊红染色结果。比例尺为 400 μm

Fig. 4 Morphology and luminescence characterization of persistent luminescent nanocrystals and NIR-II persistent luminescence-based vascular imaging^[92]. (a) Schematic illustration of X-ray-activated persistent luminescence (PL) generation in lanthanide-doped nanocrystals. (b) Low-resolution TEM image of the as-synthesized $\text{NaYF}_4:3\%\text{Er}^{3+}@\text{NaYF}_4$ nanocrystals; scale bar, 50 nm. Insets: a high-resolution TEM image of a single $\text{NaYF}_4:3\%\text{Er}^{3+}@\text{NaYF}_4$ nanocrystal (top right) and the corresponding electron diffraction pattern (bottom right); scale bar, 2 nm. (c) Tunable persistent luminescence spectra of lanthanide-doped nanocrystals after X-ray irradiation. (d) Schematic illustration of NIR-II PL vascular imaging. (e) NIR-II PL (top left) and NIR-II fluorescence (FL, bottom left) images of blood vessels in a living mouse at 10 s post-injection (p.i.) after intravenous administration of Er^{3+} -doped nanocrystals (left), together with the corresponding normalized intensity profiles of blood vessels at positions 1 (top right) and 2 (bottom right) (right); the full widths at half maximum (μm) are indicated. Scale bar, 1 cm. (f) Time-dependent NIR-II persistent luminescence (top) and NIR-II fluorescence (bottom) images of tumors in living mice after multiple injections of Er^{3+} -doped nanocrystals. Scale bar, 1 cm. (g) Tumor-to-normal tissue signal-to-noise ratios of the tumors shown in (f) ($n = 3$ biologically independent mice). The black dashed line denotes the Rose criterion. (h) Hematoxylin and eosin staining of excised tumor tissue. Scale bar, 400 μm

米体系发光成像方法, 该体系通过超声诱导的压电效应与后续化学发光过程实现信号增强, 在体内成像中表现出较高的信噪比和组织穿透能力^[97]。尽管

其发光机制与无机力致发光在物理本质上存在差异, 但这类研究为发展无创、深部刺激触发的发光成像技术提供了有益思路。

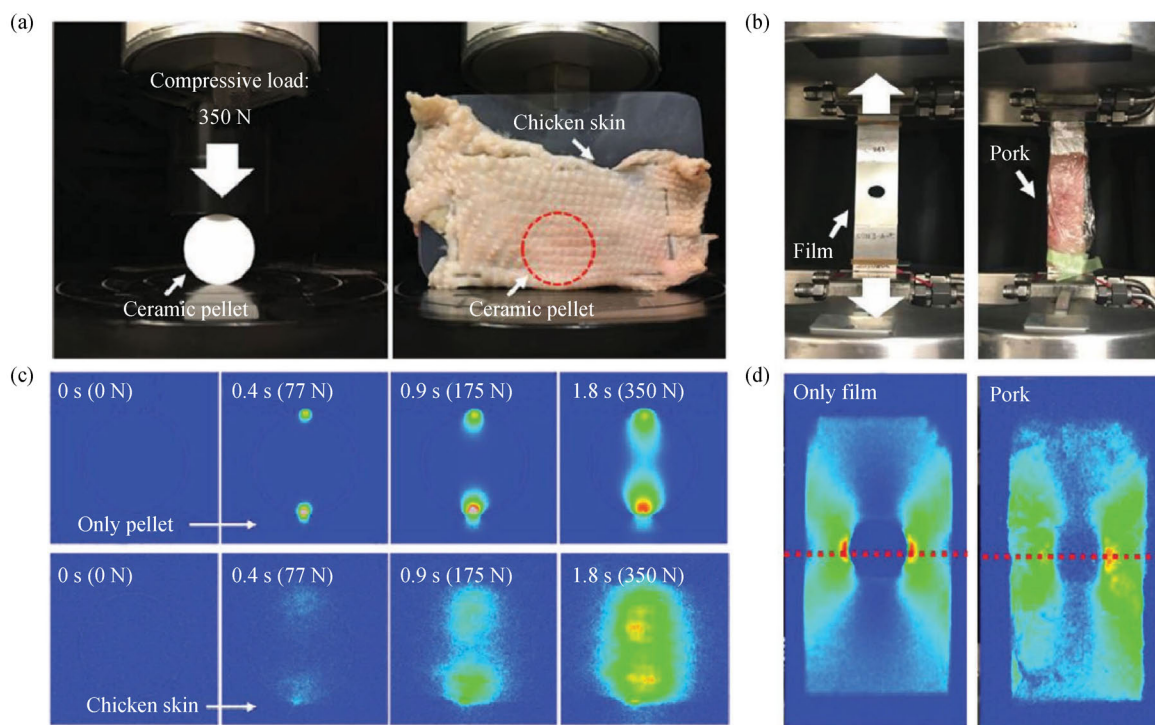


图5 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7:\text{Nd}^{3+}$ (SSN)力致发光组织穿透能力测试^[84]。(a)SSN 压片样品的光电成像传感器(charge-coupled device, CCD)成像图。(b)SSN 薄膜样品的 CCD 成像图。(c)在加载速率为 $3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、载荷为 350 N 的加载循环过程中,对 SSN 压片进行加载时,使用 InGaAs-CCD 相机记录的图像序列,显示 NIR 光分布的实时变化。(d)在施加拉伸载荷(名义应变变为 $600\text{ }\mu\text{st}$)条件下,使用 InGaAs-CCD 相机记录的 SSN 薄膜 NIR 压致发光图像

Fig. 5 Evaluation of the tissue penetration capability of mechanoluminescence from $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7:\text{Nd}^{3+}$ (SSN) ^[84]. (a) Charge-coupled device (CCD) image of the SSN pellet sample. (b) CCD image of the SSN film sample. (c) Sequence of images recorded using an InGaAs-CCD camera during loading of the SSN pellet in a load cycle with a loading rate of $3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ and an applied load of 350 N, showing the real-time distribution of near-infrared (NIR) emission. (d) Near-infrared piezoluminescence images of the SSN film recorded with an InGaAs-CCD camera under tensile loading (nominal strain: $600\text{ }\mu\text{st}$)

总体而言,在生物成像与分子示踪领域,长余辉发光纳米材料已形成较为成熟的研究体系,而力致发光相关研究仍主要停留在块体或微米尺度材料及概念验证阶段。未来若能将长余辉发光纳米材料在陷阱工程和生物适配性方面的优势,与力致发光中机械刺激触发的物理机制相结合,有望推动新一代刺激响应性发光成像探针的发展。

3.2 治疗介导与诊疗一体化应用

近年来,长余辉发光纳米材料已由单一成像探针逐步拓展至治疗介导与诊疗一体化应用领域,其核心优势在于能够在体内无须持续外部光源的条件下提供稳定的余辉发光信号,从而有效克服传统光疗技术在深部组织中面临的穿透深度有限、背景干扰显著以及长时间光照可能引发的光毒性与热损伤等问题^[94,98–101]。基于这一特性,长余辉发光纳米材料为构建一体化治疗体系提供了物理基础,在光动力治疗(PDT)、光热治疗(PTT)、药物递送以及免疫调控等方向展现出应用潜力^[78–80,102]。

在 PDT 领域,长余辉发光纳米材料可作为内源光源持续激活光敏剂,从而显著拓展 PDT 在深部组织中的应用场景。Zou 团队利用大孔-介孔二氧化硅构建了多功能杂化长余辉发光纳米平台,实现了 NIR 长余辉成像、MRI 和正电子发射断层成像(PET)多模态成像,并进一步整合化疗与长余辉敏化 PDT,系统展示了其在诊疗一体化体系中的综合优势^[103]。随后,多项研究通过引入刺激响应结构或精准递送策略,进一步提升了治疗的靶向性与安全性。例如,Zhao 等构建了组织蛋白酶 B/谷胱甘肽双重响应的介孔二氧化硅药物递送系统,实现了肿瘤余辉成像引导下的精准化疗^[73]。Chen 等^[104]提出的脂质体包覆长余辉发光纳米材料,在保持优异余辉性能的同时显著提升了药物负载效率和体内示踪能力,从而增强了肿瘤抑制效果。这些研究表明,长余辉发光不仅可用于成像指示,还可作为调控治疗过程的重要功能单元。

除 PDT 外,长余辉发光纳米材料还被用于构建

无须持续光源的光热及协同治疗体系^[105]。Li 团队报道了一种基于长余辉发光纳米材料的余辉激发 PTT 与一氧化氮释放协同平台^[81], 通过超声触发实现纳米材料的持续运动和局部富集, 从而增强细胞摄取效率和治疗持续性, 在无须化疗药物的条件下实现了显著的肿瘤生长抑制。该研究表明, 将长余辉效应与外部物理刺激(如超声)相结合, 有望进一步突破传统光疗在深层肿瘤治疗中的应用限制, 并为多物理场协同治疗提供新的设计思路^[82,106]。

在持续性光动力与免疫治疗方向, 长余辉发光纳米材料同样展现出独特优势。Liu 团队构建了 Cr^{3+} 与 Bi^{3+} 共掺杂铈镓锆酸盐(ZGGO)长余辉纳米材料, 并在其表面包覆介孔二氧化硅以负载铈酞菁(ZnPc), 构成 $\text{ZGGO}:\text{Cr}^{3+}, \text{Bi}^{3+}@\text{mSiO}_2\text{-ZnPc}$ 纳米平

台, 实现了成像引导下的长余辉敏化 PDT, 并在体内表现出良好的肿瘤抑制效果^[107]。在此基础上, 该团队进一步提出温度响应的“蜡封”诊疗平台, 通过光热激活释放长余辉信号以持续激发光敏剂, 从而降低非靶向损伤并提高治疗安全性^[83]。与此同时, 长余辉发光纳米材料也被引入肿瘤免疫治疗领域。

Wang 等开发了一种铈镓硅酸盐(ZGS)长余辉发光纳米材料为核心, 硅烷化偶联酞菁类光敏剂修饰于表面, 同时引入透明质酸(HA)构成靶向修饰的持续性抗肿瘤纳米免疫刺激剂(ZGS-Si-Pc@HA), 该体系可实现长余辉介导的免疫原性细胞死亡, 并在联合免疫检查点抑制剂后显著增强抗肿瘤免疫反应和免疫记忆效应, 展示了长余辉发光材料在成像、治疗与免疫多功能整合中的应用潜力^[108]。

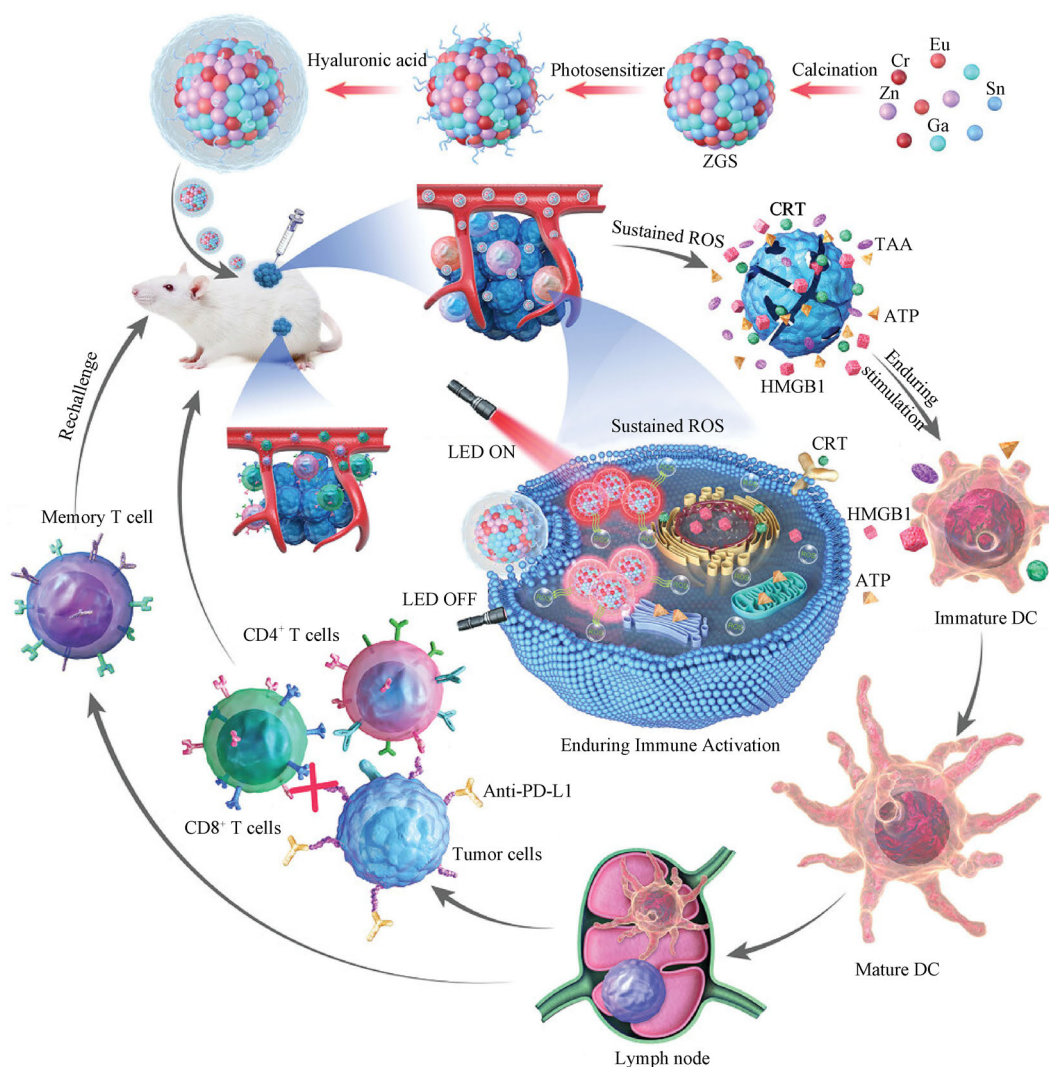


图 6 ZGS-Si-Pc@HA 合成流程及其肿瘤免疫治疗过程^[108]

Fig. 6 Schematic illustration of the preparation of ZGS-Si-Pc@HA and its immunotherapeutic effects^[108]

除长余辉发光体系外, 力致发光及声-光转换机制也被探索用于神经调控和光遗传学相关应用。通

过将声能转化为局部光信号, Wang 团队与 Hong 团队分别构建了声-光遗传系统, 实现了对深部神经元

的微创刺激与行为调控^[109,110], 尽管该类体系在发光机理上已超出传统无机力致发光材料的范畴, 但其展示了“机械刺激-光信号-生物调控”的新型诊疗模式, 为发展无创、深部刺激触发的诊疗策略提供了重要启示。

3.3 应力传感与信息显示等非生物应用

除生物医学领域外, 长余辉发光与力致发光纳米材料在结构健康监测、柔性电子、可穿戴器件及人机交互等非生物应用中同样展现出重要应用价值^[111,112]。这类应用通常关注材料在复杂力学环境下的实时响应能力、可视化读出方式以及与器件系统的集成兼容性。其中, 力致发光材料能够在外加机械应力作用下直接产生可见或 NIR 光信号, 为应力分布、损伤演化及力学行为的可视化提供了一种直观、无须外接电源的检测手段, 因此在工程结构与智能器件领域受到广泛关注。

在结构健康监测方面, 力致发光材料已被广泛用于裂纹萌生与扩展、应力集中区域以及冲击损伤过程的实时可视化。通过将力致发光材料引入陶瓷、混凝土或高分子基体中, 可在材料受载、摩擦或断裂过程中直接获取局域应力变化信息, 实现对结构状态的原位监测。Sohn 团队系统研究了一系列基于力致发光传感器的裂纹动态检测^[113–117], 揭示了快速断裂过程中应力演化与裂纹传播之间的内在联系, 为断裂力学研究和高可靠结构设计提供了重要实验依据。随着材料尺度向纳米级缩小, 力致发光材料在复合体系中的分散性和界面结合能力显著提升, 有助于降低应力传递损失并提高低应力区的检测灵敏度, 这一优势使其在薄膜、层状复合材料及微结构器件中的应用更具潜力, 尤其适用于对空间分辨率和界面稳定性要求较高的监测场景^[71,72,111,118]。

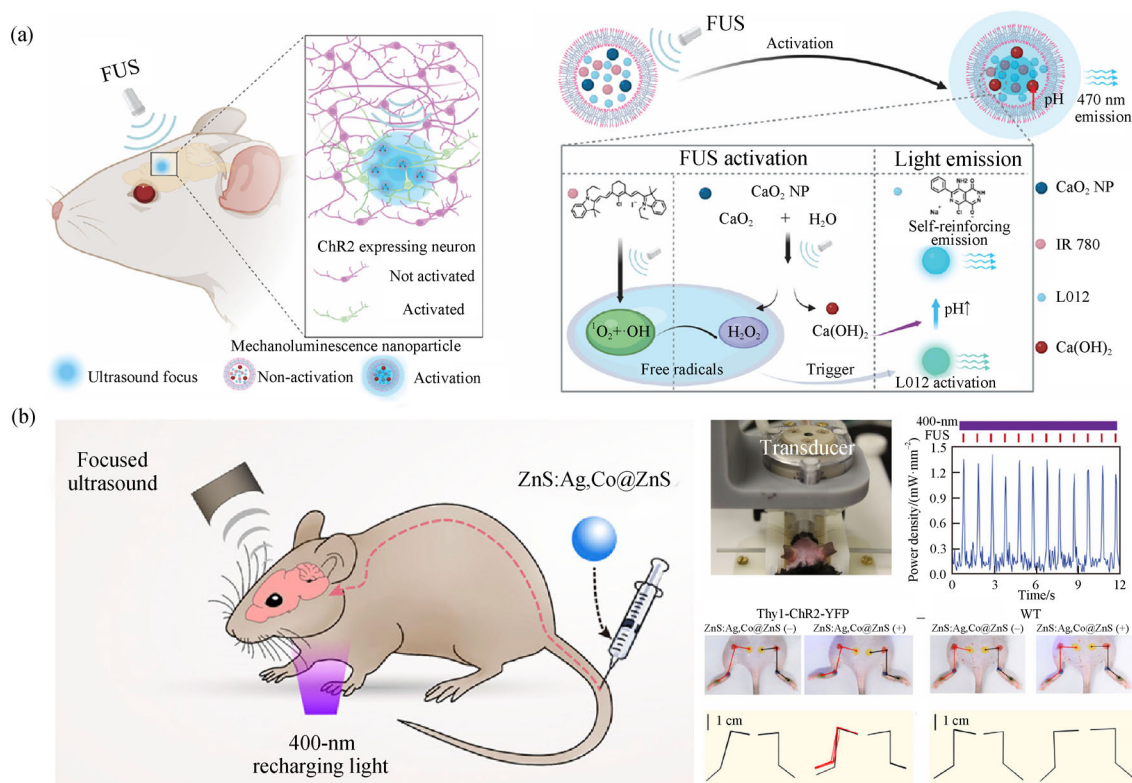


图 7 (a)聚焦超声激活力致发光纳米材料脂质体在焦点处释放蓝光从而实现神经激活的示意图^[109]。(b)体内声-光遗传学刺激诱导的运动行为调控^[110]

Fig. 7 (a) Schematic illustration of neural activation enabled by focused ultrasound-activated mechanoluminescent nanomaterial liposomes, which emit blue light at the focal region upon ultrasound stimulation^[109]. (b) *In vivo* modulation of motor behavior induced by sono-optogenetic stimulation^[110]

近年来, 力致发光纳米材料逐渐被引入柔性电子和可穿戴器件中, 用于构建可视化力学传感和人机交互系统。通过将纳米级力致发光材料与弹性高分子(PDMS)复合, 可获得兼具良好柔韧性与稳定

发光响应的柔性材料。在此基础上, 研究者进一步将力致发光与摩擦电效应相结合, 构建了力-光-电多模态传感体系。Wang 和 Pan 团队率先报道了将透明摩擦纳米发电机与 ZnS 基力致发光复合材

料集成的双模能量转换器件^[119], 实现了机械刺激向电信号和光信号的同步输出, 为自供能柔性传感和电子皮肤提供了新的设计范式。进一步研究表明, 在高压或大形变条件下, 力致发光响应在灵敏度和动态范围方面具有独特优势, 可作为传统电学传感的重要补充^[76]。基于这一特性, 相关研究已展示了基于力致发光复合材料的“光子皮肤”在人体运动监测、触觉反馈及人机交互中的应用潜力, 体

现了力致发光材料在可视化交互界面构建中的独特价值^[120,121]。

除直接机械刺激外, 近年来出现的超声诱导力致发光纳米体系进一步拓展了其应用边界。通过将纳米级力致发光材料作为超声响应单元, 可在非接触、远程刺激条件下实现局域发光输出, 这为深层结构检测、柔性显示和无线光学信号传输提供了新思路。Hong 团队利用生物矿物启发的抑制

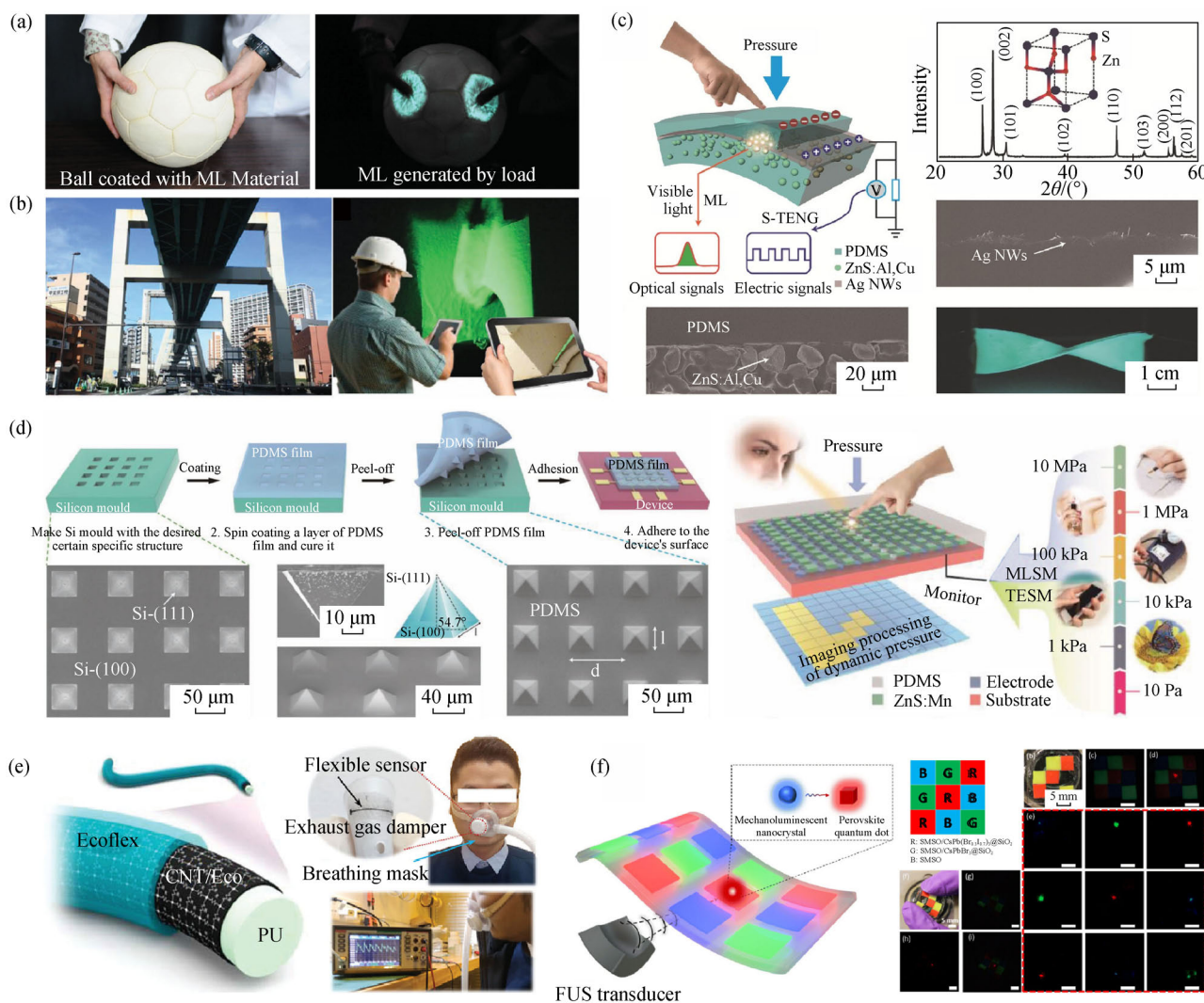


图 8 (a)力致发光材料受力可视化发光^[111]。(b)力致发光材料现场定量应变成像和公路接缝段的有效危险等级诊断^[118]。(c)基于力致发光集成器件示意图以及表征^[119]。(d)力致传感器制备流程图以及表征, 并用于日常生活场景^[76]。(e)基于聚氨酯的导电微纤维示意图以及用于呼吸监测系统的实物照片^[121]。(f)聚焦超声激活柔性像素阵列结构示意图以及全色域输出能力的 3×3 像素阵列结构示意图和照片^[122]

Fig. 8 (a) Stress-induced luminescence visualization in mechanoluminescent materials ^[111] (b) In situ quantitative strain imaging using mechanoluminescent materials and effective hazard-level diagnosis of highway joint sections ^[118]. (c) Schematic illustration and characterization of integrated devices based on mechanoluminescent materials ^[119]. (d) Fabrication process and characterization of mechanoluminescent sensors, together with their applications in daily-life scenarios ^[76]. (e) Schematic illustration of polyurethane-based conductive microfibers and photographs of their application in a respiratory monitoring system ^[121]. (f) Schematic illustration of a focused ultrasound-activated flexible pixel array structure and a 3×3 pixel array demonstrating full-color output capability, including structural schematics and photographs ^[122]

溶解策略制备了粒径可低至约 20 nm 的力致发光胶体材料^[122], 并将其与弹性体和量子点复合, 构建了柔性多色发光像素阵列, 展示了其在可穿戴显示和光子器件中的应用前景。

总之, 长余辉发光与力致发光纳米材料在非生物应用中的核心优势在于其无须外接电源的发光响应、良好的界面兼容性以及对多模态刺激的响应能力。其中, 力致发光材料在应力可视化和柔性传感方面已展现出较为成熟的应用基础, 而长余辉发光材料则有望在状态记忆、延迟显示和低功耗信息记录等方面发挥独特作用。未来, 通过进一步优化纳米材料的发光效率、稳定性及器件集成方式, 有望推动其在结构健康监测、智能可穿戴系统和新型人机交互平台中的实际应用。

4 挑战与展望

近年来, 长余辉发光与力致发光纳米材料在可控合成、发光机理解析及多领域应用方面取得了显著进展, 逐步展现出无须持续外部光源、具备时间维度与多刺激响应特性的独特优势。相较于传统块体和微米级体系, 纳米尺度不仅赋予材料更优异的分散性、界面可设计性和体系集成能力, 也使缺陷行为、载流子动力学及界面效应发生显著变化, 从而在性能调控和应用拓展方面打开了新的空间。然而, 正是这些纳米尺度特有的结构与物理特征, 在带来新机遇的同时, 也对材料设计、机理解析及应用转化提出了更高要求。当前, 该领域的发展仍面临若干需系统解决的关键挑战。

首先, 在纳米尺度下实现发光性能与结构可控性的协同优化, 仍是制约长余辉发光与力致发光纳米材料进一步发展的基础性问题。自下而上的合成策略在粒径均匀性、分散性及表面可修饰性方面具有明显优势, 但往往难以构建与块体材料相当的深能级陷阱体系, 从而限制其发光性能。而自上而下方法虽可继承成熟的晶体结构和缺陷分布, 却在纳米化过程中易引入表面损伤、内应力累积及粒径分布不均等问题, 导致发光性能衰减和稳定性下降。如何在纳米尺度下兼顾高结晶度、合理陷阱分布与稳定界面结构, 是未来材料设计需突破的核心方向。通过多步反应与后处理策略、界面限域生长、生物矿物启发方法以及精细化缺陷工程, 实现对载流子捕获与释放行为的定向调控, 有望为高性能纳米发光体系的构建提供新的解决思路。

其次, 尽管已有研究围绕长余辉发光提出导带–

价带模型、量子隧穿模型及缺陷相关模型等多种理论框架, 但现有模型多针对特定材料体系和实验条件, 尚缺乏对不同体系具有普适性的统一描述。对于力致发光, 尤其是在纳米尺度下, 其应力诱导载流子释放与辐射复合过程仍主要借鉴块体材料的机理解释, 尚未充分考虑材料表面态、界面电场、尺寸效应及局域应力集中等纳米尺度特有因素。未来有必要将先进原位、准原位表征技术(如原位光谱、电镜与应力施加手段)与多物理场耦合模拟、第一性原理计算相结合, 对载流子在缺陷位点、界面和应力场中的动态行为进行系统研究。通过建立可定量描述载流子存储、去捕获与复合过程的理论模型, 将有助于从经验调控迈向机理驱动的材料设计模式。

再者, 从应用角度看, 发光性能、材料稳定性与实际使用条件下的可靠性之间的平衡, 仍是制约材料走向实用的重要因素。纳米材料的高比表面积和丰富表面态在提升界面相容性和刺激响应灵敏度的同时, 也可能增加非辐射复合通道, 导致发光衰减及循环稳定性下降。在生物医学应用中, 除发光性能外, 还需重点关注纳米材料的长期生物安全性、体内代谢与清除路径, 以及刺激方式(如光、超声或机械刺激)的生物安全阈值。在工程结构与柔性器件应用中, 则面临机械耐久性、界面稳定性及长期服役可靠性等方面挑战。通过表面包覆、核壳结构设计、可降解或可清除材料构筑以及多相复合策略, 在提升体系稳定性的同时保持高效发光响应, 将是实现应用落地的关键方向。

尽管长余辉发光与力致发光纳米材料已在生物成像、肿瘤诊疗、结构健康监测、柔性电子及信息安全等领域展示出丰富的应用潜力, 但要使其从实验室概念验证迈向规模化应用, 仍需解决一系列工程化问题, 包括规模化制备过程的一致性与可重复性、成本控制、器件集成方式以及系统级可靠性评估等。未来研究应更加注重应用场景驱动的材料设计, 加强材料、器件与系统层面的协同优化, 并通过跨学科合作推动其在真实复杂环境中的长期测试与示范应用。

总体而言, 长余辉发光与力致发光纳米材料作为一类兼具时间维度和多刺激响应特性的功能材料, 正逐步由单一发光现象研究迈向多功能集成与应用导向的发展阶段。随着纳米尺度结构调控手段的不断成熟、发光机理认识的持续深化以及应用需求的持续牵引, 该类材料有望在多模态成像、智能

感知、柔性器件及新型诊疗技术等方向实现新的突破。未来,构建结构可预测、性能可调控、响应机制清晰且具备工程可行性的长余辉发光与力致发光纳米材料体系,将是该领域持续发展的重要目标。

参考文献:

- [1] LIANG G J, RUAN Z H, LIU Z X, et al. Toward multifunctional and wearable smart skins with energy-harvesting, touch-sensing, and exteroception-visualizing capabilities by an all-polymer design[J]. *Adv Elect Materials*, 2019, 5(10): 1900553.
- [2] XIE Y J, LI Z. Triboluminescence: Recalling interest and new aspects[J]. *Chem*, 2018, 4(5): 943–971.
- [3] ZHANG J C, WANG X S, MARRIOTT G, et al. Trap-controlled mechanoluminescent materials[J]. *Prog Mater Sci*, 2019, 103: 678–742.
- [4] SHARMA L, SAHARE A, SAHARE P D. Mechanoluminescence (ML) and thermoluminescence (TL) studies in SrAl_2O_4 : Eu, Dy: Effect of particle size and redox reactions[J]. *Indian J Phys*, 2025, 99(10): 3677–3699.
- [5] FUJIO Y, XU C N, NISHIBORI M, et al. Development of highly sensitive mechanoluminescent sensor aiming at small strain measurement[J]. *J Adv Dielect*, 2014, 4(2): 1450016.
- [6] YANG F, WU X, CUI H, et al. Palette of rechargeable mechanoluminescent fluids produced by a biomineral-inspired suppressed dissolution approach[J]. *J Am Chem Soc*, 2022, 144(40): 18406–18418.
- [7] YANG F, WU X, CUI H, et al. A biomineral-inspired approach of synthesizing colloidal persistent phosphors as a multicolor, intravital light source[J]. *Sci Adv*, 2022, 8(30): eabo6743.
- [8] SHARMA R, SHARMA U. Influence of fluxing agent on the luminescence properties of SrAl_2O_4 : Eu^{2+} nanophosphors[J]. *J Alloys Compd*, 2015, 649: 440–446.
- [9] DU Y Y, JIANG Y, SUN T Y, et al. Mechanically excited multicolor luminescence in lanthanide ions[J]. *Adv Mater*, 2019, 31(7): 1807062.
- [10] XU Y F, MA D K, GUAN M L, et al. Controlled synthesis of single-crystal SrAl_2O_4 : Eu^{2+} , Dy^{3+} nanosheets with long-lasting phosphorescence[J]. *J Alloys Compd*, 2010, 502(1): 38–42.
- [11] WANG X F, HE J L, QIU Z X, et al. CaS : Eu^{2+} @ CaZnOS : Mn^{2+} : A dual-UV/green-excited and dual-red-emitting spectral conversion with all-weather resistance[J]. *Ceram Int*, 2020, 46(7): 9734–9740.
- [12] FU X Y, LIU C L, SHI J P, et al. Long persistent near infrared luminescence nanoprobes LiGa_5O_8 : Cr^{3+} -PEG- OCH_3 for *in vivo* imaging[J]. *Opt Mater*, 2014, 36(11): 1792–1797.
- [13] PATERIA D, BAGHEL R N, BISEN D P, et al. Synthesis, characterization and thermoluminescence studies of $(\text{ZnS})_{1-x}(\text{MnTe})_x$ nanophosphors[J]. *Luminescence*, 2017, 32(3): 375–381.
- [14] TIWARI A, KHAN S A, KHER R S, et al. Effect of capping on the mechanoluminescence of γ -irradiated ZnS : Cu nanophosphors[J]. *J Lumin*, 2011, 131(6): 1172–1176.
- [15] SHI Y W, SHI Y D, XIE Q. Flexible 2D graphene-coupled ZnS : Mn^{2+} mechanodetectors for heart rate monitoring[J]. *J Lumin*, 2020, 226: 117441.
- [16] ZHENG Z Q, ZHAO J, JIN D F, et al. 2D graphene-coupled ZnS : Mn^{2+} mechanodetectors for monitoring the pulse rate[J]. *Ceram Int*, 2020, 46(10): 16533–16536.
- [17] CHEN J T, GU F, LI C Z. Influence of precalcination and boron-doping on the initial photoluminescent properties of SrAl_2O_4 : Eu, Dy phosphors[J]. *Cryst Growth Des*, 2008, 8(9): 3175–3179.
- [18] CHENG B C, LIU H J, FANG M, et al. Long-persistent phosphorescent SrAl_2O_4 : Eu^{2+} , Dy^{3+} nanotubes[J]. *Chem Commun*, 2009(8): 944–946.
- [19] CHEN W, MALM J O, ZWILLER V, et al. Energy structure and fluorescence of Eu^{2+} in ZnS : Eu nanoparticles[J]. *Phys Rev B*, 2000, 61(16): 11021–11024.
- [20] HOROZ S. Effect of Eu^{2+} doping on structural, optical, magnetic and photovoltaic properties of ZnS quantum dots[J]. *Superlattices Microstruct*, 2017, 111: 1043–1049.
- [21] YUAN W W, YUAN P, LIU D, et al. *In situ* hydrothermal synthesis of a novel hierarchically porous TS-1/modified-diatomite composite for methylene blue (MB) removal by the synergistic effect of adsorption and photocatalysis[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2016, 462: 191–199.
- [22] DELL'AGLI G, COLANTUONO A, MASCOLO G. The effect of mineralizers on the crystallization of zirconia gel under hydrothermal conditions[J]. *Solid State Ion*, 1999, 123(1/4): 87–94.
- [23] ZHANG J Q, HUANG K K, YUAN L, et al. Mineralizer effect on facet-controllable hydrothermal crystallization of perovskite structure YbFeO_3 crystals[J]. *CrystEngComm*, 2018, 20(4): 470–476.
- [24] ROBLE M, ROJAS S D, WHEATLEY R, et al. Hydrothermal improvement for 3R-CuFeO_2 delafossite growth by control of mineralizer and reaction atmosphere[J]. *J Solid State Chem*, 2019, 271: 314–325.
- [25] TANI E, YOSHIMURA M, SŌMIYA S. Formation of ultrafine tetragonal ZrO_2 powder under hydrothermal conditions[J]. *J Am Ceram Soc*, 1983, 66(1): 11–14.
- [26] GERUS A, BOIKO V, CIARAMITARO V C, et al. Controlling a defect structure of the ZnGa_2O_4 : Cr^{3+} spinel through synthesis parameters for persistent luminescence optimization[J]. *Mater Res Bull*, 2023, 168: 112473.
- [27] WEI X J, HUANG X D, ZENG Y, et al. Longer and stronger: Improving persistent luminescence in size-tuned zinc gallate nanoparticles by alcohol-mediated chromium doping[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(9): 12113–12124.
- [28] HOA T T Q, VAN VU L, CANH T D, et al. Preparation of ZnS nanoparticles by hydrothermal method[J]. *J Phys: Conf Ser*, 2009, 187: 012081.
- [29] WANG Z X, TAI Y Y, NAM J, et al. Calcination-induced transformation of ZnS : Mn^{2+} nanorods to microparticles for enhanced mechanoluminescence[J]. *Chem Mater*, 2023, 35(17): 6845–6852.
- [30] ZOU H R, ZHU W J, ZHAO J T, et al. Sub-10 nm lanthanide-doped $\text{Lu}_6\text{O}_5\text{F}_8$ nanoscintillators for real-time high-resolution dynamic 3D X-ray imaging[J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(49): 2409156.
- [31] WANG F, HAN Y, LIM C S, et al. Simultaneous phase and size control of upconversion nanocrystals through lanthanide doping[J]. *Nature*, 2010, 463(7284): 1061–1065.
- [32] WANG F, DENG R R, LIU X G. Preparation of core-shell NaGdF_4 nanoparticles doped with luminescent lanthanide ions to be used as upconversion-based probes[J]. *Nat Protoc*, 2014, 9(7): 1634–1644.
- [33] LI X M, SHEN D K, YANG J P, et al. Successive layer-by-layer strategy for multi-shell epitaxial growth: Shell thickness and doping position dependence in upconverting optical properties[J]. *Chem Mater*, 2013, 25(1): 106–112.
- [34] OU X Y, QIN X, HUANG B L, et al. High-resolution X-ray luminescence extension imaging[J]. *Nature*, 2021, 590(7846): 410–415.

- [35] LI L P, LI H M, LIU Y F, et al. Persistent- and mechanoluminescence of Er^{3+} -doped NaYF_4 for multipurpose use[J]. *Small Meth*, 2025, 9(5): 2401615.
- [36] GE P H, SUN K N, LI H Y, et al. Preparation and luminescent properties of persistent luminescent materials ZnGa_2O_4 : Cr^{3+} by sol-gel-combustion[J]. *Optik*, 2021, 231: 166316.
- [37] YAN Z C, YIN C, SUN M J, et al. A novel removable template method for the preparation of persistent luminescence nanoparticles with biocompatible size and high intensity[J]. *J Mater Chem B*, 2023, 11(18): 4076–4082.
- [38] WANG Z X, JIN L, NI H Y, et al. Controllable doping for tunable and multimodal emission in ZnS-based mechanoluminescent nanocrystals[J]. *Nano Lett*, 2025, 25(30): 11747–11755.
- [39] LIU Y, LUO Y F, ELZATAHRY A A, et al. Mesoporous TiO_2 mesocrystals: Remarkable defects-induced crystallite-interface reactivity and their *in situ* conversion to single crystals[J]. *ACS Cent Sci*, 2015, 1(7): 400–408.
- [40] LIANG L L, CHEN J Y, SHAO K, et al. Controlling persistent luminescence in nanocrystalline phosphors[J]. *Nat Mater*, 2023, 22(3): 289–304.
- [41] YANG S H, LEE H Y, TSENG P C, et al. Photoelectric properties of $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$: Eu^{2+} phosphors produced by co-precipitation method[J]. *J Lumin*, 2021, 231: 117787.
- [42] YUAN W H, TAN T, WU H Y, et al. Intense UV long persistent luminescence benefiting from the coexistence of $\text{Pr}^{3+}/\text{Pr}^{4+}$ in a praseodymium-doped $\text{BaLu}_2\text{Al}_2\text{Ga}_2\text{SiO}_{12}$ phosphor[J]. *J Mater Chem C*, 2021, 9(15): 5206–5216.
- [43] LIU H H, REN F, ZHOU X G, et al. Ultra-sensitive detection and inhibition of the metastasis of breast cancer cells to adjacent lymph nodes and distant organs by using long-persistent luminescence nanoparticles[J]. *Anal Chem*, 2019, 91(23): 15064–15072.
- [44] CRAWFORD S E, OHODNICKI P R, BALTRUS J P. Materials for the photoluminescent sensing of rare earth elements: Challenges and opportunities[J]. *J Mater Chem C*, 2020, 8(24): 7975–8006.
- [45] ZHENG S H, SHI J P, FU X Y, et al. X-ray recharged long afterglow luminescent nanoparticles MgGeO_3 : Mn^{2+} , Yb^{3+} , Li^+ in the first and second biological windows for long-term bioimaging[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(26): 14037–14046.
- [46] ZHANG X L, LI P P, LI J, et al. Highly efficient mechanoluminescence of $\text{SrAl}_{2-x}\text{Y}_x\text{O}_4$: Eu^{2+} , Dy^{3+} via trap regulation for dynamic signature anticounterfeiting[J]. *J Rare Earths*, 2025, 43(6): 1133–1139.
- [47] LI L P, LI T Y, HU Y, et al. Mechanism of the trivalent lanthanides' persistent luminescence in wide bandgap materials[J]. *Light Sci Appl*, 2022, 11: 51.
- [48] MUSHTAQ U, AYOUB I, KUMAR V, et al. Persistent luminescent nanophosphors for applications in cancer theranostics, biomedical, imaging and security[J]. *Mater Today Bio*, 2023, 23: 100860.
- [49] PAN Z W, LU Y Y, LIU F. Sunlight-activated long-persistent luminescence in the near-infrared from Cr^{3+} -doped zinc gallogermanates[J]. *Nature Mater*, 2012, 11(1): 58–63.
- [50] AITASALO T, DEREN P, HÖLSÄ J, et al. Persistent luminescence phenomena in materials doped with rare earth ions[J]. *J Solid State Chem*, 2003, 171(1/2): 114–122.
- [51] CHANDRA B P, CHANDRA V K, JHA P. Elastico-mechanoluminescence and crystal-structure relationships in persistent luminescent materials and II–VI semiconductor phosphors[J]. *Phys B Condens Matter*, 2015, 463: 62–67.
- [52] ZHANG J C, GAO N, LI L, et al. Discovering and dissecting mechanically excited luminescence of Mn^{2+} activators via matrix microstructure evolution[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 31(19): 2100221.
- [53] ZHANG P, ZHENG Z Z, WU L, et al. Self-reduction-related defects, long afterglow, and mechanoluminescence in centrosymmetric $\text{Li}_2\text{ZnGeO}_4$: Mn^{2+} [J]. *Inorg Chem*, 2021, 60(23): 18432–18441.
- [54] YANG L, LI L, CHENG L X, et al. Intense and recoverable piezoluminescence in Pr^{3+} -activated CaTiO_3 with centrosymmetric structure[J]. *Appl Phys Lett*, 2021, 118(5): 053901.
- [55] XU C N, WATANABE T, AKIYAMA M, et al. Artificial skin to sense mechanical stress by visible light emission[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(9): 1236–1238.
- [56] XU C N, WATANABE T, AKIYAMA M, et al. Direct view of stress distribution in solid by mechanoluminescence[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(17): 2414–2416.
- [57] CHANDRA B P, XU C N, YAMADA H, et al. Luminescence induced by elastic deformation of ZnS: Mn nanoparticles[J]. *J Lumin*, 2010, 130(3): 442–450.
- [58] ZHANG J C, FAN X H, YAN X, et al. Sacrificing trap density to achieve short-delay and high-contrast mechanoluminescence for stress imaging[J]. *Acta Mater*, 2018, 152: 148–154.
- [59] LIU Y, XU C N. Electroluminescent ceramics excited by low electrical field[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(24): 5016–5018.
- [60] PENG D F, JIANG Y, HUANG B L, et al. A ZnS/CaZnOS heterojunction for efficient mechanical-to-optical energy conversion by conduction band offset[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(16): 1907747.
- [61] ZHANG H W, YAMADA H, TERASAKI N, et al. Ultraviolet mechanoluminescence from SrAl_2O_4 : Ce and SrAl_2O_4 : Ce, ho[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(8): 081905.
- [62] LI X, HU R, WANG X S, et al. Intense mechanoluminescence and photostimulated luminescence with less afterglow in $\text{Pr}^{3+}/\text{Gd}^{3+}$ Co-doped LiTaO_3 phosphors[J]. *J Lumin*, 2021, 238: 118222.
- [63] SU M, LI P H, ZHENG S H, et al. Largely enhanced elastico-mechanoluminescence of CaZnOS : Mn^{2+} by co-doping with Nd^{3+} ions[J]. *J Lumin*, 2020, 217: 116777.
- [64] JIA J N, GAO X W, ZOU G Z. Alkaline-earth-metal-ions blending enhanced self-activated and Bi^{3+} -activated mechanoluminescence from $\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{ZnOS}$ [J]. *Adv Funct Mater*, 2022, 32(46): 2207881.
- [65] WANG W X, SUN Z Y, HE X Y, et al. How to design ultraviolet emitting persistent materials for potential multifunctional applications: A living example of a NaLuGeO_4 : Bi^{3+} , Eu^{3+} phosphor[J]. *J Mater Chem C*, 2017, 5(17): 4310–4318.
- [66] VAN DEN EECKHOUT K, SMET P F, POELMAN D. Persistent luminescence in Eu^{2+} -doped compounds: A review[J]. *Materials*, 2010, 3(4): 2536–2566.
- [67] JHA P, CHANDRA B P. Survey of the literature on mechanoluminescence from 1605 to 2013[J]. *Luminescence*, 2014, 29(8): 977–993.
- [68] MATSUI H, XU C N, LIU Y, et al. Origin of mechanoluminescence from Mn-activated ZnAl_2O_4 : Triboelectricity-induced electroluminescence[J]. *Phys Rev B*, 2004, 69(23): 235109.
- [69] MATSUI H, XU C N, TATEYAMA H. Stress-stimulated luminescence from ZnAl_2O_4 : Mn[J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(8): 1068–1070.
- [70] ZHANG J C, XUE X Y, ZHU Y F, et al. Ultra-long-delay sustainable and short-term-friction stable mechanoluminescence in Mn^{2+} -activated $\text{NaCa}_2\text{GeO}_4\text{F}$ with centrosymmetric structure[J]. *Chem Eng J*, 2021,

- 406: 126798.
- [71] GOEDEKE S M, HOLLERMAN W A, BERGERON N P, et al. Developing a phosphor-based health monitoring sensor suite for future spacecraft[J]. *Sens Propuls Meas Appl*, 2006, 6222: 62220B.
- [72] FUJIO Y, XU C N, TERASAWA Y, et al. Sheet sensor using SrAl_2O_4 : Eu mechanoluminescent material for visualizing inner crack of high-pressure hydrogen vessel[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2016, 41(2): 1333–1340.
- [73] ZHANG H J, ZHAO X, CHEN L J, et al. pH-driven targeting nanoprobe with dual-responsive drug release for persistent luminescence imaging and chemotherapy of tumor[J]. *Anal Chem*, 2020, 92(1): 1179–1188.
- [74] PAN L M, ZHAO X, WEI X, et al. Ratiometric luminescence aptasensor based on dual-emissive persistent luminescent nanoparticles for autofluorescence- and exogenous interference-free determination of trace aflatoxin B1 in food samples[J]. *Anal Chem*, 2022, 94(16): 6387–6393.
- [75] XU H D, CHENG X T, SUN X B, et al. Caspase-3-triggered intracellular gadolinium nanoparticle formation for T_1 -weighted magnetic resonance imaging of apoptosis *in vivo*[J]. *Nano Lett*, 2023, 23(13): 6178–6183.
- [76] WANG X D, QUE M L, CHEN M X, et al. Full dynamic-range pressure sensor matrix based on optical and electrical dual-mode sensing[J]. *Adv Mater*, 2017, 29(15): 1605817.
- [77] ZHAO H X, LIU C X, GU Z, et al. Persistent luminescent nanoparticles containing hydrogels for targeted, sustained, and autofluorescence-free tumor metastasis imaging[J]. *Nano Lett*, 2020, 20(1): 252–260.
- [78] WU S Q, LI Y, DING W H, et al. Recent advances of persistent luminescence nanoparticles in bioapplications[J]. *Nano-Micro Lett*, 2020, 12: 70.
- [79] LIU B, WANG Z Y, LIU Z M, et al. NIR activated upconversion based nanocatalysts for CT/PA imaging-guided triple synergistic PTT/PDT/CDT cancer treatment[J]. *J Rare Earths*, 2025, 43(5): 909–921.
- [80] LI Y, HU D H, KONG M Y, et al. A NIR-to-NIR non-emissive rare-earth nanoprobe that specifically lights-up inflammatory condition *in vivo*[J]. *J Rare Earths*, 2025, 43(9): 1827–1834.
- [81] ZHANG Z L, YAN H, CAO W X, et al. Ultrasound-chargeable persistent luminescence nanoparticles to generate self-propelled motion and photothermal/NO therapy for synergistic tumor treatment[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(16): 16089–16106.
- [82] HU H, FENG W, QIAN X Q, et al. Emerging nanomedicine-enabled/enhanced nanodynamic therapies beyond traditional photodynamics[J]. *Adv Mater*, 2021, 33(12): 2005062.
- [83] LIU G Y, ZHANG S C, SHI Y H, et al. “Wax-sealed” theranostic nanoplatform for enhanced afterglow imaging-guided photothermally triggered photodynamic therapy[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, 28(42): 1804317.
- [84] TU D, XU C N, KAMIMURA S, et al. Ferroelectric $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$: Nd^{3+} : A new multipiezo material with ultrasensitive and sustainable near-infrared piezoluminescence[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(25): 1908083.
- [85] 曹龙, 孙霞, 罗小芳, 等. 聚苯乙烯包覆的长余辉纳米颗粒的合成及其体内成像[J]. *中国稀土学报*, 2025, 43(3): 502–508.
CAO Longlong, SUN Xia, LUO Xiaofang, et al. *J Chin Soc Rare Earths*, 2025, 43(3): 502–508.
- [86] YU Z Z, LIU B, PAN W, et al. A simple approach for glutathione functionalized persistent luminescence nanoparticles as versatile platforms for multiple *in vivo* applications[J]. *Chem Commun*, 2018, 54(28): 3504–3507.
- [87] TANG J, SU Y Y, DENG D Y, et al. A persistent luminescence microsphere-based probe for convenient imaging analysis of dopamine[J]. *Analyst*, 2016, 141(18): 5366–5373.
- [88] ZHANG L, LEI J P, LIU J T, et al. Persistent luminescence nanoprobe for biosensing and lifetime imaging of cell apoptosis *via* time-resolved fluorescence resonance energy transfer[J]. *Biomaterials*, 2015, 67: 323–334.
- [89] ZHENG Y H, WEI H P, LIANG P, et al. Near-infrared-excited multicolor afterglow in carbon dots-based room-temperature afterglow materials[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2021, 60(41): 22253–22259.
- [90] ZHUANG Y X, UEDA J, TANABE S. Tunable trap depth in $\text{Zn}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_2\text{O}_4$: Cr, Bi red persistent phosphors: Considerations of high-temperature persistent luminescence and photostimulated persistent luminescence[J]. *J Mater Chem C*, 2013, 1(47): 7849.
- [91] LIN Y L, HU J, GUO Y W, et al. Enhanced persistent luminescence of MgGeO_3 : Yb^{3+} nanoparticles *via* substitution of Ge^{4+} by Ga^{3+} ions for biological applications[J]. *J Lumin*, 2023, 257: 119741.
- [92] PEI P, CHEN Y, SUN C X, et al. X-ray-activated persistent luminescence nanomaterials for NIR-II imaging[J]. *Nat Nanotechnol*, 2021, 16(9): 1011–1018.
- [93] 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.
- [94] XIONG P X, PENG M Y, CAO J K, et al. Near infrared mechanoluminescence from $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$: Nd^{3+} for *in situ* biomechanical sensor and dynamic pressure mapping[J]. *J Am Ceram Soc*, 2019, 102(10): 5899–5909.
- [95] XIONG P X, PENG M Y. Near infrared mechanoluminescence from the Nd^{3+} doped perovskite LiNbO_3 : Nd^{3+} for stress sensors[J]. *J Mater Chem C*, 2019, 7(21): 6301–6307.
- [96] LI L J, WONDRACZEK L, PENG M Y, et al. Force-induced 1540 nm luminescence: Role of piezotronic effect in energy transfer process for mechanoluminescence[J]. *Nano Energy*, 2020, 69: 104413.
- [97] WANG Y J, YI Z G, GUO J, et al. *In vivo* ultrasound-induced luminescence molecular imaging[J]. *Nat Photon*, 2024, 18(4): 334–343.
- [98] LI J, XU C N, TU D, et al. Tailoring bandgap and trap distribution *via* Si or Ge substitution for Sn to improve mechanoluminescence in $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$: Sm^{3+} layered perovskite oxide[J]. *Acta Mater*, 2018, 145: 462–469.
- [99] KAMIMURA S, YAMADA H, XU C N. Strong reddish-orange light emission from stress-activated $\text{Sr}_{n+1}\text{Sn}_n\text{O}_{3n+1}$: Sm^{3+} ($n = 1, 2, \infty$) with perovskite-related structures[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(9): 091113.
- [100] WANG N N, JI S L, DING D. Research progress in development of dioxetane intermediates-based afterglow luminescent materials and their applications in bioimaging[J]. *Chin J Lumin*, 2025, 46(5): 830–846.
- [101] WANG J, ZHANG B B. Research progress of persistent luminescent nanoparticles in biomedical detection, bioimaging and tumor therapy[J]. *Chin J Lumin*, 2024, 45(2): 252–268.
- [102] SHI J P, SUN X, LI J L, et al. Multifunctional near infrared-emitting long-persistence luminescent nanoprobe for drug delivery and targeted tumor imaging[J]. *Biomaterials*, 2015, 37: 260–270.
- [103] LU L, SUN M Z, WU T, et al. Native point defect modulated Cr^{3+} - LaAlO_3 as an *in vitro* excited contrast medium for *in vivo*

- near-infrared persistent deep-tissue bio-imaging[J]. Chem Commun, 2021, 57(74): 9366–9369.
- [104] CHEN L J, YANG C X, YAN X P. Liposome-coated persistent luminescence nanoparticles as luminescence trackable drug carrier for chemotherapy[J]. Anal Chem, 2017, 89(13): 6936–6939.
- [105] SUN H T, ZHANG Q, LI J C, et al. Near-infrared photoactivated nanomedicines for photothermal synergistic cancer therapy[J]. Nano Today, 2021, 37: 101073.
- [106] HE L R, YU X J, LI W W. Recent progress and trends in X-ray-induced photodynamic therapy with low radiation doses[J]. ACS Nano, 2022, 16(12): 19691–19721.
- [107] YANG J, ZHAO Y Y, MENG Y Q, et al. Irradiation-free photodynamic therapy *in vivo* induced by enhanced deep red afterglow within NIR-I bio-window[J]. Chem Eng J, 2020, 387: 124067.
- [108] WANG R P, SHI J P, SONG L, et al. Sustained antitumor immunity based on persistent luminescence nanoparticles for cancer immunotherapy[J]. Adv Funct Mater, 2021, 31(52): 2106884.
- [109] WANG W L, KEVIN TANG K W, PYATNITSKIY I, et al. Ultrasound-induced cascade amplification in a mechanoluminescent nanotransducer for enhanced sono-optogenetic deep brain stimulation[J]. ACS Nano, 2023, 17(24): 24936–24946.
- [110] WU X, ZHU X J, CHONG P, et al. Sono-optogenetics facilitated by a circulation-delivered rechargeable light source for minimally invasive optogenetics[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2019, 116(52): 26332–26342.
- [111] YOSHIDA A, LIU L S, TU D, et al. Mechanoluminescent testing as an efficient inspection technique for the management of infrastructures[J]. J Disaster Res, 2017, 12(3): 506–514.
- [112] ZHANG X, ZHOU W S, LI H, et al. Guided wave-based bend detection in pipes using in-plane shear piezoelectric wafers[J]. NDT E Int, 2020, 116: 102312.
- [113] SOHN K S, SEO S Y, KWON Y N, et al. Direct observation of crack tip stress field using the mechanoluminescence of SrAl_2O_4 : (Eu, Dy, Nd)[J]. J Am Ceram Soc, 2002, 85(3): 712–714.
- [114] KIM J S, KWON Y N, SHIN N, et al. Visualization of fractures in alumina ceramics by mechanoluminescence[J]. Acta Mater, 2005, 53(16): 4337–4343.
- [115] KIM J S, KWON Y N, SOHN K S. Dynamic visualization of crack propagation and bridging stress using the mechano-luminescence of SrAl_2O_4 : (Eu, Dy, Nd)[J]. Acta Mater, 2003, 51(20): 6437–6442.
- [116] KIM J S. Quasi-dynamic visualization of crack propagation and wake evolution in Y-TZP ceramic by mechano-luminescence[J]. Met Mater – Int, 2008, 14(2): 165–169.
- [117] KIM J S, KWON Y N, SHIN N, et al. Mechanoluminescent SrAl_2O_4 : Eu, Dy phosphor for use in visualization of quasidynamic crack propagation[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(24): 241916.
- [118] LIU L S, 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: 1800336.
- [119] FANG H J, WANG X D, LI Q, et al. A stretchable nanogenerator with electric/light dual-mode energy conversion[J]. Adv Energy Mater, 2016, 6(18): 1600829.
- [120] QIAN X, CAI Z R, SU M, et al. Printable skin-driven mechanoluminescence devices via nanodoped matrix modification[J]. Adv Mater, 2018, 30(25): 1800291.
- [121] GAO J W, FAN Y B, ZHANG Q T, et al. Ultra-robust and extensible fibrous mechanical sensors for wearable smart healthcare[J]. Adv Mater, 2022, 34(20): 2107511.
- [122] 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.

作者贡献声明:

赵沛航: 论文构思、调查研究、设计研究方法、软件使用、验证、绘制图表、撰写初稿

庄逸熙: 提供资源、获取资助、论文构思、监督指导、审阅与修订

解荣军: 提供资源、获取资助、监督指导、审阅与修订

Persistent Luminescent and Mechanoluminescent Nanomaterials

ZHAO Peihang, ZHUANG Yixi, XIE Rongjun

(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)

Extended Abstract

Persistent luminescence and mechanoluminescence are two distinct luminescent phenomena that do not require continuous *in-situ* optical excitation. They generate optical signals through the storage and delayed release of charge carriers from traps and mechanical stimulus-induced energy conversion, respectively. Different excitation mechanisms and temporal response characteristics both share fundamental similarities in the processes of carrier generation, trapping, and detrapping. Advances on nanomaterial synthesis and defect engineering enable the extension of persistent luminescent and mechanoluminescent materials from bulk and microscale systems to the nanoscale systems, where significantly enhance size, interface, and trap effects provide new opportunities for performance optimization and application expansion. This review systematically summarizes recent progress on persistent luminescent and mechanoluminescent nanomaterials, with a focus on typical nanoscale preparation strategies, luminescence mechanisms, and a unified understanding of carrier detrapping processes. Representative applications in low-background bioimaging and biomedicine, stress-responsive structural health monitoring, flexible devices, and information display are also outlined. Finally, key challenges and future trends are discussed in terms of performance preservation and structural synergy in nanoscale, quantitative characterization of luminescence properties, and engineering-oriented applications.

Summary and prospects This review summarizes recent progress on the synthesis, mechanisms, and applications of persistent luminescent and mechanoluminescent nanomaterials. We emphasize that advances across both top-down and bottom-up routes substantially improve control over particle size, morphology, and-critically-the defect/trap structures governing carrier trapping and detrapping. We highlight a trap-centric perspective that links delayed emission in persistent luminescence with stress-assisted carrier release in mechanoluminescence *via* comparing the physical bases of the two phenomena. Translating these materials to the nanoscale can broad their utility, particularly for autofluorescence-free bioimaging and diagnostics, as well as self-powered, visually intuitive stress sensing and flexible optoelectronic devices. Collectively, these studies illustrate a shift from viewing luminescence as an isolated metric toward engineering integrated, stimulus-responsive nano-systems tailored to application demands.

Some key challenges remain despite a rapid development. A central limitation is the trade-off between achieving precise nanoscale structural control and preserving the deep, stable trap populations needed for strong afterglow or mechanoluminescent output. In addition, a predictive and quantitative understanding of how interfaces, surface states, and localized mechanical fields regulate carrier dynamics in nanomaterials is still lacking. For practical deployment, a long-term stability under environmental and cyclic loading, biocompatibility, and scalable yet reproducible fabrication must be addressed. Future work should involve: 1) advancing *in-situ/operando* characterization and computation to map trap distributions and carrier pathways, 2) developing hybrid or composite architectures that balance structural integrity with optical functionality, and 3) validating application-driven prototypes in realistic settings from deep-tissue theranostics to structural health monitoring.

Keywords persistent luminescence; mechanoluminescence; controlled synthesis; luminescent nanomaterials