

文章编号: 1000-7032(2026)08-1343-27

力致发光触觉传感器件研究进展

李祖刚, 朱德亮, 王春枫*

(深圳大学 材料学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 触觉传感是实现具身智能高维感知的重要基础, 在智能机器人、智能制造、智能交互、虚拟/增强现实等领域具有重要应用价值。力致发光材料能够在机械刺激作用下直接产生光信号, 为触觉信息的可视化获取提供了新的技术途径。相较于传统基于电信号读出的触觉传感器件, 力致发光型触觉传感器件具有结构灵活、抗电磁干扰能力强以及易于实现高空间分辨率成像等优势。近年来, 随着材料创新与结构设计的不断进步, 基于力致发光的触觉传感技术取得了显著进展。本文系统综述了力致发光材料在触觉传感器件中的研究进展。从触觉传感应用需求出发, 归纳了力致发光材料的关键性能指标及其优化策略, 包括灵敏度提升、循环稳定性增强、传感范围拓展以及信噪比优化等, 同时总结了高空间分辨触觉成像与多模态传感的发展现状。在应用层面, 介绍了力致发光触觉传感器件在电子签名、人工皮肤、手势识别、人机交互及软体机器人等领域的典型应用。最后, 讨论了当前力致发光触觉传感器件在静态刺激响应、多物理场信号解耦及系统集成等方面面临的主要挑战, 并对其未来发展方向进行了展望。本文可为力致发光材料在触觉传感领域的进一步研究与应用提供参考。

关键词: 发光材料; 力致发光; 触觉传感; 触觉成像; 人工智能

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260107

CSTR: 32170.14.CJL.20260107

Recent Advances in Mechanoluminescent Tactile Sensing Devices

LI Zugang, ZHU Deliang, WANG Chunfeng*

(College of Materials Science and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

* Corresponding Author, E-mail: cfwang@szu.edu.cn

Abstract: Tactile sensing is essential for high-dimensional perception in embodied intelligence, yet conventional electrical sensors are limited by complex readout, electromagnetic interference, and restricted imaging resolution. Mechanoluminescence materials, which directly convert mechanical stimuli into optical signals, offer a promising alternative for visualized and interference-resistant tactile sensing. This review summarizes recent advances in ML materials for tactile sensing, focusing on key performance metrics and optimization strategies, including sensitivity enhancement, improved cycling stability, extended sensing range, and signal-to-noise ratio optimization. Progress in high-resolution tactile imaging and multimodal sensing is further highlighted. Representative applications in electronic signatures, artificial skin, human-machine interfaces, and soft robotics are discussed. Finally, critical challenges, including static stimulus response, multimodal signal decoupling, and system integration, are analyzed. This review provides insights into the design of next-generation ML-based tactile sensing systems.

Keywords: luminescent materials; mechanoluminescence; tactile sensing; tactile imaging; artificial intelligence

收稿日期: 2026-03-30; 修订日期: 2026-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(52372154, U22A2077, 12074263); 广东省基础与应用基础研究面上项目(2025A1515012171); 深圳市基础研究面上项目(JCYJ20240813142628038)

Supported by National Natural Science Foundation of China (52372154, U22A2077, 12074263); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2025A1515012171); Shenzhen Science and Technology Innovation Commission (JCYJ20240813142628038)

1 引 言

人类依赖视觉、听觉、嗅觉、味觉与触觉“五感”实现对外界环境的精准感知。其中,触觉传感主要依托皮肤这一高度复杂的感知系统,通过力、温度、湿度等多维信息,完成对所接触物体重量、材质、纹理、温湿度等复杂特征的感知与重构,在物体识别、力觉反馈与精细操作中发挥着不可替代的作用。随着智能机器人、智能制造、智能交互以及虚拟/增强现实等领域的快速发展,构建能够复现甚至超越人类皮肤触觉感知能力的人工触觉系统,已成为当前信息技术与智能感知领域的重要前沿^[1-2]。

当前,主流的触觉传感器多基于电阻式、电容式、压电式或摩擦电式等“力-电”转换机制,在灵敏度、响应速度、传感范围与器件集成度方面取得了显著进展^[3]。然而,由电学信号传导本质所决定,这类器件普遍面临信号读出电路复杂、易受电磁干扰、大面积阵列布线困难以及功耗较高等问题,制约了其在高分辨率触觉成像与复杂环境下的稳定应用。光学型触觉传感器通过“力-光”信号转换模式,为解决上述问题提供了新的思路^[4-8]。其中,力致发光(Mechanoluminescence, ML)材料能够在机械刺激作用下直接产生光信号,无需外部供能与复杂读出电路,天然具备结构灵活、抗电磁干扰能力强以及易于实现高空间分辨率成像等优势,已成为构建新型触觉传感体系的重要候选方案。

力致发光触觉传感的研究可追溯至 20 世纪 90 年代末。1999 年, Xu 等报道了 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}, \text{ZnS}:\text{Mn}$ 弹性 ML 材料,开展了应力分布可视化研究,并率先提出了基于力致发光的人工皮肤概念^[9-10]。此后,随着材料体系与器件结构的持续优化,力致发光触觉传感技术不断取得突破性进展。2015 年, Wang 等基于 $\text{ZnS}:\text{Mn}$ 体系构建柔性力致发光应力传感器,实现了机械刺激到光信号的实时转换与同步采集,显著提升了应力成像的响应速度与信息传输效率,推动了触觉可视化发展^[11]。2018 年, Qian 等通过打印 $\text{ZnS}:\text{Mn}/\text{Cu}@\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合结构,构建了皮肤驱动的力致发光器件,实现了面部表情变化的自驱动感知与动态可视化,为可穿戴人机交互提供了新范式^[12]。2020 年, Jang 等将 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 力致发光层与 MoS_2 晶体管进行异质集成,构建了兼具光电转换与信号调控能力的触觉阵列,实现

了从单个心肌细胞尺度到足印压力的宽动态范围检测,拓展了其在高性能电子皮肤中的应用边界^[13]。2022 年, Zhuang 等通过将 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 与 CMOS 器件近距离耦合,实现了 254 dpi 空间分辨率与约 3.3 ms 响应速度的动态压力成像,显著提升了触觉成像系统的时空分辨能力^[14]。近期, Chang 等构建了仿毛发 PDMS/ $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 微纤毛阵列,通过高长径比结构实现应力集中,成功将激发阈值降低至 10 mN (约 0.5 kPa),为弱力感知提供了有效策略^[15]。同时,作者团队通过多孔与核壳结构设计调控力致发光材料的力学-光学耦合行为,实现了压缩应变与振动刺激的可视化感知与动态成像^[16];利用 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 与 $\text{ZnS}-\text{CaZnOS}:\text{Mn}$ 材料差异化的力光响应特性,实现了对应变与剪切力的可区分传感^[17];通过耦合 $\text{ZnS}-\text{CaZnOS}:\text{Mn}$ 的力致发光效应与 PEDOT:PSS 的热响应行为,实现了力与温度信息的同步获取与无串扰检测^[18];并将力致发光材料与人工光电突触器件相结合,协同力致发光与持续光电导机制,实现了触觉信息的“感知-存储-处理”一体化,为类脑智能感知系统的发展提供了新的技术路径^[19]。

尽管近年来已有综述围绕力致发光材料的发光机理、性能调控及一般应用进行了系统总结,但针对其在触觉传感器件中的研究进展仍缺乏专门梳理。为此,如图 1 所示,本文从触觉传感的应用需求出发,系统归纳了力致发光材料的关键性能



图 1 力致发光触觉传感的关键性能指标与应用

Fig.1 Key metrics and representative applications of mechanoluminescent materials for tactile sensing

指标及其优化策略,包括灵敏度、循环稳定性、传感范围及信噪比等;同时,总结了高空间分辨触觉成像与多模态传感的发展现状,并介绍了该类器件在电子签名、人工皮肤、手势识别、人机交互及软体机器人等领域的典型应用。与以往主要聚焦于力致发光机理、材料体系或一般性应用的综述不同,本文更加突出力致发光触觉传感器这一交叉方向的应用导向特征,以期对相关领域的研究提供更具针对性的参考。

2 力致发光材料

2.1 力致发光机制

力致发光材料中机械刺激向光信号的转化机制是理解材料行为及其器件应用的基础。早期研究通常将 ML 现象归因于固体材料在断裂或塑性变形过程中产生的能量释放,例如天然矿物在地震或火山喷发等剧烈机械作用下发生断裂并伴随发光。基于受力形变方式的不同,ML 一般可分为断裂型(FML)、塑性型(PML)和弹性型(EML),其中弹性力致发光因可逆性好、适用于传感器件而成为当前研究重点。此外,根据材料在发光前是否需要外部预激发(如紫外或X射线),ML 材料还可分为预激发型和自恢复型两类,这两类体系通常与材料内部缺陷的深度与分布密切相关^[20]。总体而言,从机械能到光发射的转化过程涉及多尺度、多物理过程的耦合,目前尚缺乏统一的理论框

架。现阶段较具代表性的机制主要包括位错诱导机制、压电诱导机制以及摩擦电诱导机制。

位错诱导机制最早由 Chandra 等于 1982 年提出,认为材料在机械刺激下产生的位错运动(如增殖、缠结、塞积及湮灭等)可释放能量,或激发缺陷中心中的载流子复合,从而产生发光(图 2(a))^[21]。随后研究发现,许多 ML 现象出现在压电材料中,因此提出了压电诱导机制。该机制主要适用于陷阱控制型的弹性力致发光材料,认为在弹性形变过程中产生的压电电场能够调制陷阱能级,促进陷阱中载流子的释放,进而通过能量转移激发发光中心产生辐射跃迁(图 2(b))。对于中心对称结构的材料,尽管其体相不具备宏观压电性,但实际晶体中表面及界面处的对称性破缺、晶格畸变等因素可能引入局域电场或类压电效应,从而参与 ML 过程^[22]。然而,这类材料的发光行为通常与复合弹性体密切相关。因此,研究者进一步提出了摩擦电诱导机制。在该机制中,ML 材料与弹性体在动态接触过程中产生摩擦电荷,这些电荷可被材料中的缺陷态俘获,并通过与空穴复合将能量传递至发光中心,从而实现光发射(图 2(c))。此外,对于部分非陷阱主导的中心对称体系,也有研究认为其发光可能源于摩擦电直接激发的电致发光过程^[23]。上述各种机制都对力致发光的内在机制理解做出了重要贡献,并且为筛选适合作为 ML 触觉传感的力致发光材料提供了指导。

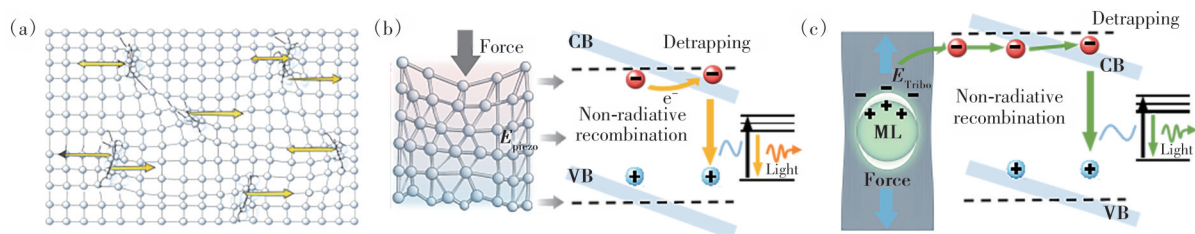


图2 力致发光机理示意图。(a)位错移动诱导型力致发光机理;(b)压电诱导型力致发光机理;(c)摩擦电诱导型力致发光机理

Fig.2 Schematic illustration of ML mechanisms. (a) Dislocation-motion-induced ML mechanism. (b) Piezoelectricity-induced ML mechanism. (c) Triboelectricity-induced ML mechanism

2.2 力致发光材料制备

无机力致发光(ML)材料的发光性能与其晶体结构、缺陷态分布及微观形貌密切相关。已有研究表明,ZnS、SrAl₂O₄、CaZnOS、钙钛矿及氟化物等典型 ML 体系,通常需要在较高温度下才能形成稳定且具有发光活性的晶体结构。因此,高温固相法仍是当前无机 ML 材料最常用、最成熟的制备策略之一^[24]。该方法一般包括原料混合、球

磨、高温烧结及后续研磨等步骤,有助于实现基体与掺杂离子的充分反应,并获得结晶性良好的发光基质。然而,该方法制备的颗粒通常尺寸较大且分布不均,这在一定程度上会削弱应力传递效率并降低发光均一性,从而限制其在高分辨率触觉成像及高信噪比传感器件中的应用。

熔盐屏蔽法通过在氧化铝舟中将 ML 前驱体置于底部,并在其上覆盖 NaCl 等熔盐,在高温下

熔融形成液相包裹环境。一方面,该方法提供了有利于离子扩散与晶体生长的液相反应介质;另一方面,熔盐层可作为空气隔离屏障,使材料在无惰性气氛保护的条件下仍能实现稳定生长。例如, Ma 等采用该方法制备了纤锌矿/闪锌矿双相共存的 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ (图 3(a)), 该异质相结构能够

有效调控内部应力分布及缺陷能级,从而显著增强 ML 强度^[25]。此外, Zhu 等在空气气氛下利用熔盐屏蔽法成功合成了单相、高结晶度且具有完整层状堆叠结构的 Mn^{2+} 掺杂 ZnGa_2S_4 晶体, 相较传统固相法, 其量子产率和 ML 强度均显著提升^[26]。

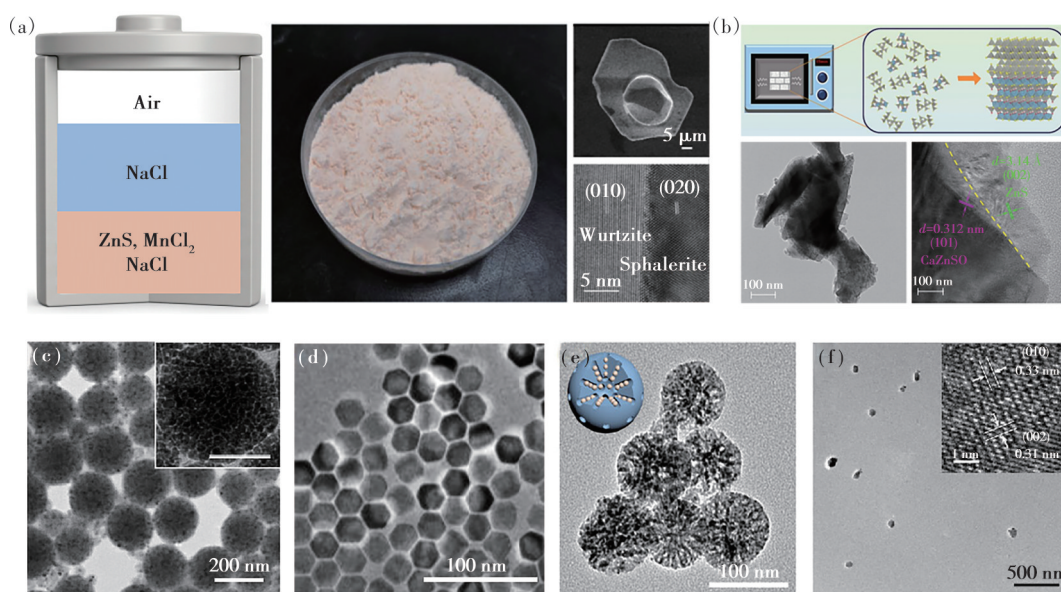


图 3 力致发光材料典型制备方法示意图。(a)熔盐屏蔽法制备双相共存 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ ^[25]; (b)微波辅助固相烧结法构筑 $\text{ZnS}/\text{CaZnOS}:\text{Mn}^{2+}$ 异质结^[28]; (c) SiO_2 包覆 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 纳米晶的制备^[29]; (d) 共沉淀法制备 Cs^+ 掺杂 $\text{NaLuF}_4:\text{Tb}^{3+}$ 纳米晶^[30]; (e) 模板限域法制备 $\text{ZGSO}@\text{MSN}$ 复合纳米颗粒^[32]; (f) 水热法制备核壳结构 $\text{ZnS}:\text{Ag}, \text{Co}@\text{ZnS}$ 力致发光纳米颗粒^[33]

Fig.3 Typical preparation strategies of mechanoluminescent materials. (a) Molten-salt shielding synthesis of biphasic $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ mechanoluminescent materials^[25]. (b) Microwave-assisted solid-state sintering for constructing $\text{ZnS}/\text{CaZnOS}:\text{Mn}^{2+}$ heterojunction mechanoluminescent materials^[28]. (c) Preparation of SiO_2 -coated $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ nanocrystals^[29]. (d) Coprecipitation synthesis of Cs^+ -doped $\text{NaLuF}_4:\text{Tb}^{3+}$ nanocrystals^[30]. (e) Template-confined synthesis of $\text{ZGSO}@\text{MSN}$ composite nanoparticles^[32]. (f) Hydrothermal synthesis of core-shell $\text{ZnS}:\text{Ag}, \text{Co}@\text{ZnS}$ mechanoluminescent nanoparticles^[33]

微波辅助固相烧结技术则通过快速、均匀的体相加热显著缩短合成时间,同时避免了复杂的保护气氛和后续研磨步骤。例如, Du 等将 ML 前驱体压片后置于坩埚中,并构建活性炭辅助的隔热体系,在 800 W、2.45 GHz 微波条件下成功合成了 CaZnOS 、 SrZnOS 及 BaZnOS 等多种四元 ML 材料,所得样品表现出优异的晶体质量与发光性能^[27]。进一步地,该团队利用该方法调控 $x\text{ZnS}/(1-x)\text{CaZnOS}:\text{Mn}^{2+}$ 体系中的组分比例(图 3(b)),构建了一系列异质结材料,并借助其快速制备优势实现了性能的高效筛选,为 ML 材料的成分优化提供了新的研究路径^[28]。

相比之下,溶液法在降低合成温度、减小颗粒尺寸以及改善形貌均一性方面具有明显优势。例如, Wang 等以胶体 $\text{ZnS}:\text{Mn}$ 为前驱体,通过超声乳

化构筑尺寸可控的纳米组装体,并引入 SiO_2 包覆层进行表面保护,经后续煅烧获得 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 力致发光纳米晶(图 3(c))^[29]。Peng 等通过共沉淀法制备了粒径约 25 nm、单分散的六方相 Cs^+ 掺杂 $\text{NaLuF}_4:\text{Tb}^{3+}$ 纳米晶,并将其与环氧树脂复合制备透明 ML 复合薄膜。相比传统微米颗粒,该纳米晶/树脂复合体系显著降低了光散射损失,同时兼具良好的力致发光性能与光波导特性(图 3(d))^[30]。Ran 等通过水热法在介孔二氧化硅表面沉积 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ (ML) 与 $\text{CaS}:\text{Eu}^{2+}$ (余辉)材料,并经高温退火获得兼具力致发光与余辉发光的复合纳米颗粒,进一步结合生物膜包覆与功能分子修饰,实现了材料的纳米化、复合化及生物功能化^[31]。类似地,该团队还利用介孔二氧化硅模板吸附 Zn^{2+} 、 Ga^{3+} 、 Sn^{4+} 和 Cr^{3+} 前驱离子(图 3(e)),经高温煅烧获

得ZGSO@MSN复合纳米结构。与传统固相法相比,该方法在颗粒尺寸调控、分散性提升及表面功能化方面具有明显优势^[32]。此外,Wu等采用水热法成功制备了核壳结构ZnS:Ag,Co@ZnS纳米颗粒(图3(f)),其平均粒径约为86.6 nm。结构表征表明该材料为纤锌矿相ZnS,由于其非中心对称结构具有更高的压电系数,相较闪锌矿相更有利于产生强烈的力致发光响应^[33]。

3 灵敏度

灵敏度反映器件对微小机械刺激的可分辨能力,通常可用输出信号对应变或应力的变化率加以表征。面向ML触觉传感器,提高灵敏度的路径有材料本征增强和结构放大增强。在材料层

面,可以调控发光中心、陷阱密度与深度和界面结构等提升单位应力下的发光效率;而在结构层面,可以通过合理设计器件微结构实现应力的局域化集中与放大,从而增强对微小应力的灵敏度^[34]。

3.1 材料本征增强

对于典型的陷阱控制型ML材料,机械刺激激发陷阱载流子释放产生非辐射复合,从而激发发光中心,因此通过陷阱工程调控陷阱深度与密度是提升ML输出的有效路径^[35]。在多种陷阱调控手段中,掺杂/离子置换被证明是有效策略^[36]。例如,Fan等在CaZnOS:Mn²⁺中引入Sr²⁺部分替代Ca²⁺位点,形成(Ca,Sr)ZnOS:Mn²⁺固溶体,通过调控陷阱深度与带隙结构,使力致发光强度提升约一个数量级,并成功拓展了其在超声监测领域的应用(图4(a))^[37]。

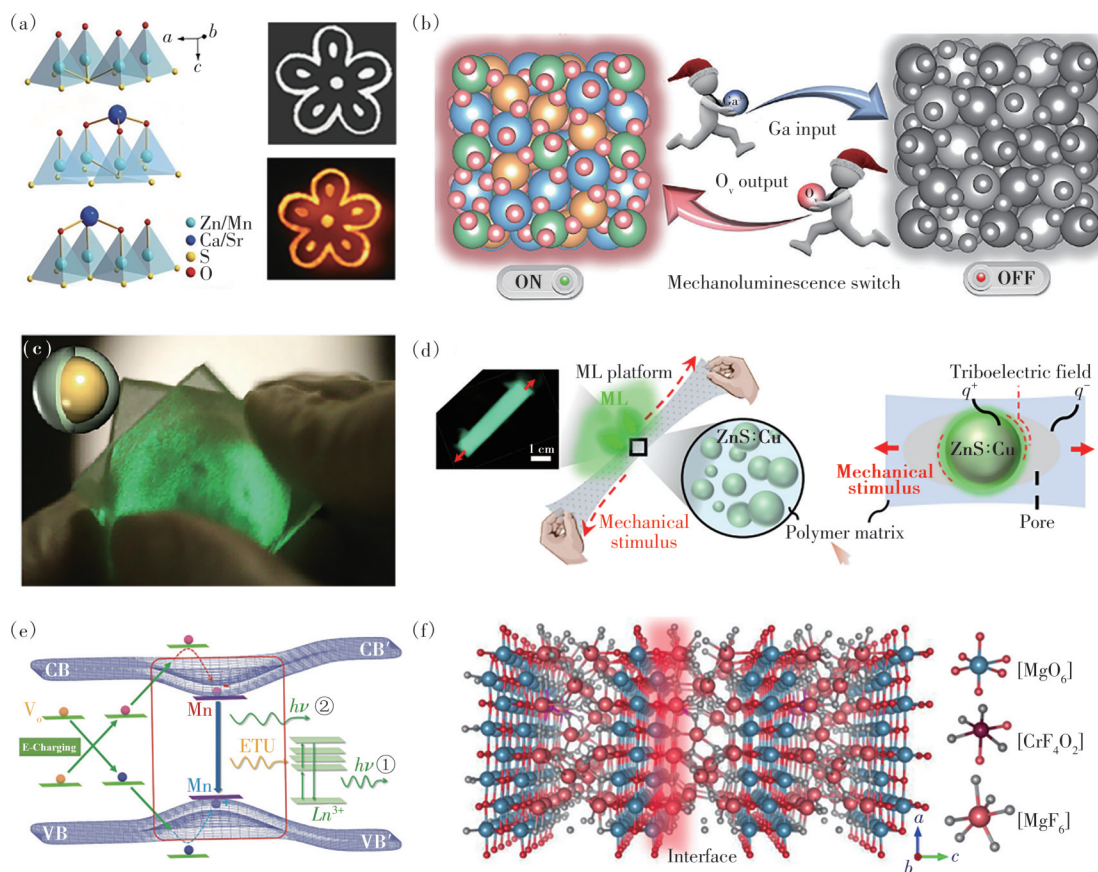


图4 力致发光材料发光强度调控策略示意图。(a)共掺杂陷阱工程提升ML强度^[37];(b)缺陷调控增强近红外ML输出^[42];(c)ZnS@Al₂O₃核壳结构增强摩擦电诱导型ML^[45];(d)基体筛选优化高拉伸条件下的ML性能^[46];(e)ZnS-CaZnOS压电半导体异质结中力致发光转换机制^[49];(f)MgO-MgF₂异质结界面配位环境示意图^[54]

Fig.4 Schematic illustration of strategies for regulating emission intensity of mechanoluminescent materials. (a) Enhancement of ML intensity *via* codoping-enabled trap engineering^[37]. (b) Enhanced near-infrared ML output through defect regulation^[42]. (c) Enhancement of triboelectrification-induced ML by a ZnS@Al₂O₃ core-shell structure^[45]. (d) Optimized ML performance under large strain *via* matrix selection^[46]. (e) Mechanoluminescent conversion mechanism in a ZnS-CaZnOS piezoelectric semiconductor heterojunction^[49]. (f) Schematic illustration of the interfacial coordination environment in the MgO-MgF₂ heterojunction^[54]

Li 等在 $\text{LiTaO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 中引入 $\text{Ca}^{2+}/\text{Si}^{4+}$ (分别占据 Li^+ / Ta^{5+} 位点) 调控陷阱能级与分布, 使 ML 强度提升约 262%, 并拓展其线性响应载荷范围^[38]。Meng 等通过 Tm^{3+} 共掺杂在 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_5\text{Cl}_2:\text{Eu}^{2+}$ 中引入并优化陷阱, 使弱载荷下更易去俘获并在 Eu^{2+} 中心 (~610 nm 宽带) 辐射复合, ML 强度较未掺杂样品提升约 16 倍, 同时深陷阱有助于在较大载荷区保持稳定输出^[39]。Duval 等在 $\text{BaO}-\text{SiO}_2-\text{Si}_3\text{N}_4$ 体系的氧氮化物微晶玻璃中, 通过共掺杂 Ho^{3+} 与 Eu^{2+} (Ho 占据 Ba^{2+} 位点), 调控陷阱能级与分布, 使力致发光强度显著优于 Pr 、 Nd 等其他稀土共掺杂体系, 并通过热处理优化微结构进一步增强了 ML 响应^[40]。Yan 等在 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ 中引入 Ho^{3+} (占据 Ca^{2+} 位点), 通过改变陷阱能级与分布, 增加了陷阱浓度并引入深能级陷阱, 使力致发光强度显著提升, 同时持续力致发光时间延长至约 10 s, 并保持良好的循环稳定性与应力线性响应^[41]。除陷阱调控外, 缺陷工程同样可作为提升灵敏度的重要手段。以 $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 为例, Wu 等通过 Al^{3+} 部分替换为 Ga^{3+} 引入氧空位并诱导晶格畸变, 这些缺陷能级可作为电荷存储与释放中心, 促进机械刺激下的复合过程, 从而增强 Cr^{3+} 中心的近红外 ML 输出 (图 4(b))^[42]。此外, 材料尺寸也会显著影响 ML 强度。Li 等在 $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$ 中通过选用微米尺度晶体并调控 X 射线辐射时间, 调控陷阱载流子浓度, 证实了微米尺度样品相较于纳米尺度具有更优的力致发光性能, 并实现了力致发光强度的有效调控与良好重复性^[43]。

对于摩擦电诱导型的 ML 材料, 界面工程与基体筛选对弱刺激输出尤为关键^[44]。如图 4(c) 所示, Lee 等通过表面涂层工程在 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ -PDMS 体系中调控界面摩擦电效应, 证实了 Al_2O_3 涂层相较于 MgO 及 SiO_2 涂层具有更优的界面电荷密度与力致发光性能, 并实现了力致发光强度的有效调控与良好重复性^[45]。Jeong 等系统揭示了弹性聚合物基体在 $\text{ZnS}:\text{Cu}@ \text{AlO}_x$ 复合 ML 体系中的关键作用, 指出基体的透明度、弹性与摩擦电性能共同决定了器件的发光性能。通过对比多种弹性聚合物与 $\text{ZnS}:\text{Cu}@ \text{AlO}_x$ 颗粒的界面相互作用, 发现高负摩擦电性是维持大形变条件下有效界面电荷积累的主导因素, 从而有效抑制传统复合体系在高拉伸状态下的亮度衰减, 据此筛选出 Ecoflex 与 Dragon Skin 两类高性能基体, 在实现超过 100% 超

弹性的同时, 获得了最高达 $139 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 的发光亮度 (图 4(d))^[46]。

异质界面工程能够通过界面能带偏移与内建电场促进载流子分离与复合, 从而在低载荷下获得更高光子产额并降低激发阈值^[47-48]。例如, Peng 等构建了 ZnS/CaZnOS 异质结, 其通过能带偏移促进界面电荷转移与复合, 使力致发光强度提升至商用 ZnS 的 2.2 倍、 CaZnOS 单相的 3.5 倍, 并在 1 N 微小力刺激下即可激活发光, 同时通过 Mn^{2+} 与镧系离子共掺杂实现了全光谱可调发光 (图 4(e))^[49-50]。Wei 等进一步将上述异质结材料与 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 复合, 构建了全光学触觉传感平台, 器件同样表现出优异的灵敏度^[17]。Li 等构筑了 $\text{ZnF}_2/\text{ZnO}:\text{Mn}^{2+}$ 力致发光异质结材料, 通过优化 ZnF_2 与 ZnO 的量比 (最佳比例为 7:3), 使其力致发光强度显著提升, 远高于单相 $\text{ZnF}_2:\text{Mn}^{2+}$ 及无 ML 响应的 $\text{ZnO}:\text{Mn}^{2+}$ ^[51]。

异质界面工程与陷阱工程相协同的策略也被用于提高压电诱导型 ML 材料的性能。例如, Yang 等在 $\text{Li}_{1-x}\text{Na}_x\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 体系中通过 Na^+ 掺杂形成 LiNbO_3 与 NaNbO_3 两相共存的异质结界面, 利用能带偏移与界面电子结构调制, 显著拓宽陷阱能级分布并优化载流子传输效率, 实现了无需预辐照、可重复性优异的力致发光性能^[52]。Wang 等在 $\text{Na}_{1-x}\text{Mg}_x\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 体系中通过引入 Mg^{2+} 形成 $\text{NaNbO}_3/\text{MgNb}_2\text{O}_6$ 异质结界面, 实验与理论计算表明, 异质结的形成引入了大量浅能级陷阱, 增加了有效载流子浓度, 同时降低了带隙, 促进了电子跃迁与能量传递, 在优化配比 (8Na/2Mg) 下, 该体系的力致发光强度显著提升, 较单一相 NaNbO_3 或 MgNb_2O_6 表现出更优的发光性能, 并展现出良好的应力响应特性与循环稳定性^[53]。Wu 等利用 MgO 与 MgF_2 的结构相似性构筑了 $\text{MgO}/\text{MgF}_2:\text{Cr}^{3+}$ 异质结, 利用能带偏移与内建电场显著提升载流子迁移率 (电子迁移率从 $1.07\times 10^2 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 提升至 $4.09\times 10^2 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 空穴迁移率从 $1.72\times 10^2 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 提升至 $4.62\times 10^2 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), 并协同优化缺陷形成能, 使力致发光强度相较于单一 $\text{MgF}_2:\text{Cr}^{3+}$ 提升约 18 倍 (图 4(f))^[54]。

3.2 结构放大增强

与材料端提高 ML 触觉传感的灵敏度不同, 结构设计的核心是将外界载荷转化为更强、更可控的局域应力或者应变场, 从而降低激发阈值、提

高弱机械刺激下的器件灵敏度。仿生结构设计为ML触觉传感器的设计提供了优化路径,即通过参考自然界已有的力学结构,将外界载荷转化为更强、更可控的局域应力或者应变场,从而显著降低ML激发阈值并提升成像对比度。如图5(a)所示, Ji等受蜘蛛腿关节裂缝器官启发,在含 $\text{ZnS:Mn/Cu@Al}_2\text{O}_3$ 微粒的PDMS柔性复合膜中引入狭缝微结构,利用狭缝尖端的几何结构可将原本分

散的弱应力聚焦至狭缝角点,产生显著的应力集中,从而增强弱刺激下的ML响应^[55]。该狭缝结构在弱应变(<10%拉伸)条件下实现了10~30倍的ML强度提升,在相同15%拉伸应变下,狭缝侧相较无狭缝侧亮度提高约2.5倍,并在5%~8%的小应变区间即可快速达到饱和响应,体现出器件对微小形变的高灵敏特性。Sou等借鉴犬齿在咬合过程中通过牙釉质有效传力至牙周韧带受体的机

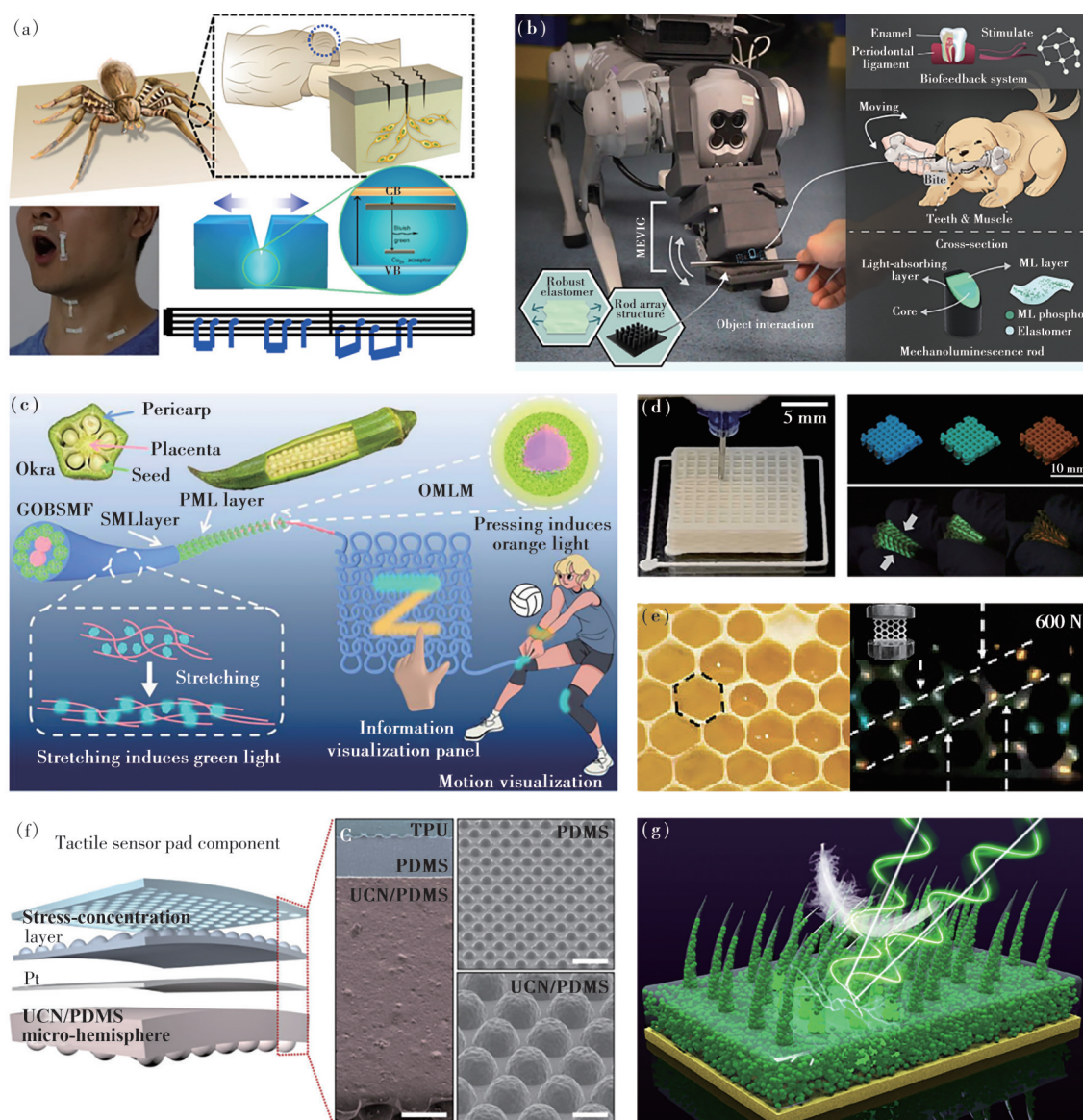


图5 结构设计提高灵敏度。(a)仿蜘蛛腿关节裂缝器官的狭缝结构^[55];(b)仿牙齿传力机制的圆柱杆阵列结构^[56];(c)仿秋葵三层同轴结构设计实现绿橙双色可切换力致发光纤维^[57];(d)3D打印多孔晶格结构^[58];(e)光固化3D打印蜂窝结构^[59];(f)仿表皮褶皱界面的二维半球阵列^[62];(g)高长径比毛发阵列结构^[15]

Fig.5 Enhanced sensitivity through structural design. (a) Slit microstructures inspired by spider leg joint slit organs^[55]. (b) Cylindrical rod arrays inspired by tooth force-transmission mechanisms^[56]. (c) Green-orange switchable mechanoluminescent fiber enabled by a biomimetic three layer coaxial okra-inspired structure^[57]. (d) 3D-printed porous lattice structures^[58]. (e) UV-curing 3D-printed honeycomb structures^[59]. (f) Bioinspired 2D hemispherical arrays mimicking epidermal interfaces^[62]. (g) High-aspect-ratio hair-like microarray structures^[15]

制,设计了圆柱杆阵列结构,使外界机械刺激在杆根部产生显著应力集中,从而提高 ML 灵敏度并扩大有效接触面积(图 5(b))^[56]。有限元模拟表明,柱状结构在侧向滑动下的位移响应较平压状态提升 21.84 倍,有效降低了力致发光触发阈值。为保证真实光照环境下的稳定成像,作者进一步在阵列外层集成吸光层,在 400~850 nm 范围内可阻挡约 99.9% 的环境光干扰,从结构层面确保成像系统主要捕捉 ML 事件信号而非背景光,提高了器件的环境鲁棒性与可用性。Liu 等受秋葵横截面结构启发构建了具有三层同轴结构的绿橙双色可切换力致发光纤维。该纤维以 PDMS 纱线为芯层提供力学支撑,中间层由不连续排列的橙色力致发光微珠构成压敏层,外层则为 ZnS: Cu/Al₂O₃/PDMS 复合材料的拉敏层。通过静电极化将 PVDF-HFP 的 α 相转变为 β 相,使压敏层压电系数 d_{33} 从 0.1 pC·N⁻¹ 提升至 8.2 pC·N⁻¹,发光强度提升 22 倍。在拉敏层中引入 Al₂O₃ 纳米颗粒增强应力传递效率,使发光强度较传统 ZnS/PDMS 纤维提升 5 倍。该纤维在小于 12.7 kPa 压力下呈橙色发光,在小于 10% 拉伸应变下呈绿色发光,响应时间分别小于 1 000 ms 和 500 ms,经 1 800 次压缩循环和 1 000 次拉伸循环后仍保持稳定发光,并具备良好的耐磨性、疏水性及环境稳定性(图 5(c))^[57]。

3D 打印为 ML 触觉结构设计提供了更强的可制造性与结构可编程能力。通过 ML 复合墨水或嵌入式打印策略,可实现微结构阵列、梯度厚度与复杂力学骨架的一体成型,从而在提升空间输出灵敏度的同时降低器件组装复杂度。例如,Zhao 等通过 3D 打印技术将传统平面结构的力致发光器件拓展至周期性多孔晶格体系,系统构建了具有正泊松比的网格结构以及具有负泊松比的回入六边形结构(图 5(d))^[58]。不同几何构型显著改变了应力分布与形变模式,从而实现发光图案与响应特性的可编程关联,为可穿戴电子皮肤等多形变应用场景提供了按需定制的结构设计路径。Guo 等在 MgF₂: Yb²⁺, Mn²⁺ 体系中实现了应力响应的颜色可调力致发光,并将其与紫外固化 3D 打印技术相结合,构建了具有复杂几何形状的结构力学可视化平台(图 5(e))^[59]。通过将材料与光固化环氧树脂复合,作者成功打印出蜂窝状与三角形等三维结构,并利用不同结构在载荷下的应力分布差异以及材料发光颜色随应力变化(从青色过

渡至橙色)的特性,实现了应力分布的空间可视化与定量分析。Sun 等采用 3D 打印技术,以 ZnS: Cu/硅胶复合墨水为原料,通过调控墨水流变性能(磷光体与硅胶质量比 4:1)成功打印出具有负泊松比的拉胀结构力致发光光子皮肤^[60]。为进一步解决拉胀结构拉伸性有限(延伸率约 11%)及发光不均匀问题,采用硅胶封装策略,使封装后器件有效拉伸范围扩展至 50%,发光亮度在 10% 应变下达 7.4 cd·m⁻²,经 10 000 次循环后仍保持约 70% 初始亮度,且通过应力均匀化实现了发光均匀性显著改善。除此之外,3D 打印结构还可以实现功能材料之间的深度耦合,从而拓展 ML 触觉器件在特殊环境下的应用边界。Duan 等采用 3D 打印模具成型技术构建蜂窝状腔体结构,将剪切增稠凝胶与 ZnS: Cu/PDMS@SiO₂ 力致发光层复合,制备出 ML-SSG 多功能材料,该材料可耗散超 80% 冲击能量、实现应力可视化、达到 V0 级阻燃,并结合卷积神经网络实现 95.6% 识别准确率的非接触式人机交互^[61]。

在微纳尺度上,阵列化结构可通过应力局域化与像素可分辨性协同提升力致发光灵敏度。Son 等模拟表皮-真皮褶皱界面,构建二维半球阵列结构,利用局部应力集中实现发光信号的像素化编码,通过单帧图像中轴对称与非轴对称发光形态的差异,成功解耦静态法向力与动态剪切力,最高空间分辨率达 100 μ m,适用于高分辨表面纹理识别(图 5(f))^[62]。Wang 等采用电纺纳米纤维一体化封装策略,在 ZnS: Mn²⁺ 微粒周围形成局域电场增强结构,引入压电诱导电致发光与力致发光协同增强机制,使电纺膜在相同压力下发光强度达到滴涂对照样的约 4 倍^[63]。Shan 等将传统 PDMS/ZnS: Cu 薄膜构筑为高长径比毛发阵列,通过结构诱导的应力集中使 0.1 N 载荷下发光强度提升近 10 倍,在 10~100 mN 小载荷区仍保持可分辨输出,最低激发阈值低至 10 mN(约 0.5 kPa),且在 0.1~3 N 范围内灵敏度约为平面膜的 4.5 倍,展现出毫牛顿级低阈值与优异的动力学响应特性(图 5(g))^[15]。

4 循环稳定性

循环稳定性是决定力致发光触觉器件能否在长期、连续工况下可靠工作的核心指标,通常涵盖循环保持率与衰减曲线、自恢复能力(即停止刺激后的恢复程度与恢复时间)、环境稳定性(温度、湿度及光照等外部因素影响)以及在弯折、拉伸、剪

切等复杂形变条件下的机械可靠性。断裂型 ML 依赖微裂纹扩展或结构破坏释放能量,虽能产生强发光信号,但过程不可逆,少量循环后即出现显著衰减甚至失效。预激发型 ML 需通过紫外或 X 射线等预填充陷阱,机械刺激触发载流子释放与辐射复合,但其预处理流程及陷阱逐步耗尽导致信号衰减,循环稳定性较差,限制了其在连续、长时触觉感知场景中的应用。如图 6(a) 所示,Zhou 等在 $\text{MgGa}_2\text{O}_4/\text{PDMS}$ 薄膜上施加约 10 N 循环机械刺激,观察到 ML 强度随循环次数逐步减弱,但经再次 UV 照射后可恢复至接近初始强度,表明其循环稳定性受限于陷阱储能与耗尽过程;而 $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}/\text{PDMS}$ 在相同循环条件下 ML 强度基本保持稳定,且 UV 激发前后变化不明显,得益于其

优化的自恢复特性^[64]。弹性自恢复型 ML 材料能够在循环加载过程中维持良好的输出一致性,更契合可穿戴与阵列化触觉应用需求。Cai 等以 MgO 基近红外 ML 材料为对象,在无需预激发的条件下系统评估了其在多种载荷模式与器件形态中的循环稳定性(图 6(b))^[65]。在摩擦、压缩和拉伸等循环机械刺激下, $\text{MgO}:\text{Cr}^{3+}$ 与 $\text{MgO}:\text{Ni}^{3+}$ 复合材料均呈现先快后慢的两阶段衰减特征。其中, $\text{MgO}:\text{Cr}^{3+}/\text{PDMS}$ 薄膜在 1 000 次拉伸循环后仍保持约 15% 初始强度, $\text{MgO}:\text{Ni}^{3+}$ 陶瓷在 1 000 次摩擦循环后仍可检测到发光输出,其循环稳定性显著优于 $\text{CaZnOS}:\text{Er}^{3+}$ 和 $\text{CaZnOS}:\text{Nd}^{3+}$ 等对比材料。衰减主要归因于初期循环中的颗粒重排及 ML 颗粒与弹性体界面相互作用的弱化,而非热效应。

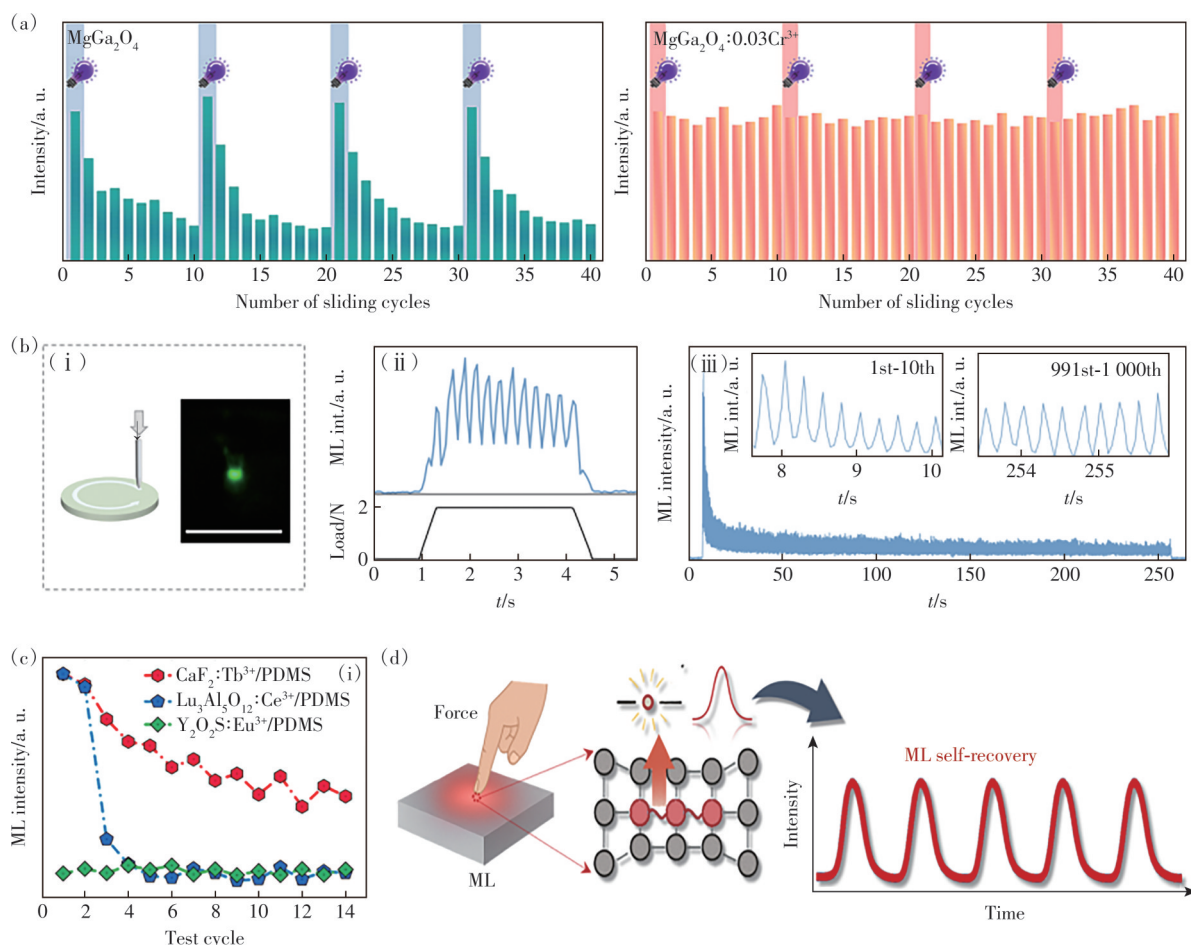


图6 力致发光触觉传感器的循环稳定性。(a)预激发型 ML 薄膜的循环稳定性^[64];(b)自恢复型 ML 器件的循环稳定性^[65];(c)摩擦电诱导型 ML 的界面自恢复稳定性^[66];(d)自恢复型 ML 的循环稳定性预测^[68]

Fig.6 Cyclic stability of mechanoluminescent tactile sensors. (a)Cyclic stability of pre-excited ML films^[64]. (b)Cyclic stability of self-recoverable ML devices^[65]. (c) Interfacial self-recovery stability of triboelectrification-induced ML^[66]. (d) Cyclic stability of self-recoverable ML^[68]

对于晶体结构中心对称的非压电 ML 材料,其循环稳定性主要与复合基体有关。Zhang 等报

道了基于中心对称氟化物 $\text{CaF}_2:\text{Tb}^{3+}$ 与 PDMS 复合的弹性体,在反复拉伸条件下展现出优异的自恢

复力致发光性能(图 6(c))^[66]。在连续拉伸循环中,该弹性体每次拉伸后 ML 强度可恢复至前一次的 60%~75%,并在超过 30 次拉伸后仍可观测到明显发光,显著优于 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}/\text{PDMS}$ 等对比体系(三次拉伸后几乎完全衰减)。循环稳定性的提升归因于 CaF_2 -PDMS 界面更低的接触-分离循环能量($\Delta E_{23}=1.241\text{ eV}$),使氟化物颗粒在分离后能够有效恢复与 PDMS 的紧密接触,减少界面损伤。He 等报道了基于中心对称结构 $\text{CaGa}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ 与 PDMS 复合的弹性体,在拉伸与摩擦下呈现明亮橙色力致发光(500~710 nm)^[67]。该材料遵循界面摩擦电诱导电子轰击机制,即机械刺激引发 $\text{CaGa}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ 颗粒与 PDMS 相对位移,形成界面摩擦电场,加速电子轰击 $\text{CaGa}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ 颗粒并激发 Mn^{2+} 的 ${}^4\text{T}_1\rightarrow{}^6\text{A}_1$ 跃迁。在循环稳定性方面,发光强度在 100 次拉伸后趋于稳定,且相邻拉伸间隔时间越长,稳定阶段强度越高,归因于 PDMS 黏弹滞后效应,即更长恢复时间有利于界面接触恢复。近期, Wu 等提出了一种快速量化与预测 ML 自恢复稳定性的方法(图 6(d))^[68]。由于 ML 与光激发释光(OSL)均涉及载流子在陷阱中的俘获-释放-复合过程,且循环稳定性受缺陷能级分布、载流子迁移与复合动力学等共同因素调控,因此可用 OSL 循环稳定性作为 ML 自恢复表现的前筛指标,并在多种不同机制的 ML 材料中进行了验证,为前期筛选循环稳定性优异的 ML 材料提供参考。

目前, Wang 等报道的 $\text{ZnS}:\text{Mn}$ 在 15 MPa 的压力刺激下经过超 11 000 次的循环后依然能保持良好的 ML 性能,验证了压电诱导型 ML 材料优异的弹性自恢复特性^[11]。类似地, Fang 等报道的 $\text{CaBa}_4(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}/\text{PDMS}$ 复合弹性体在 3 Hz 的测试频率、50% 的拉伸应变条件下,实现了超过 20 000 次的循环测试后依然具有肉眼可见的力致发光效果^[69]。这两种材料在不同机械刺激条件下展现的优异循环稳定性测试结果为制备 ML 型触觉传感器件提供了材料基础,并且为后续开发优异稳定性 ML 材料树立了性能标杆。

5 传感范围

传感范围是衡量 ML 触觉器件实际应用能力的指标,通常定义为从最小可检测力刺激(激发阈值)到输出饱和或器件失效前最大力刺激之间的有效工作区间。与单纯追求 ML 强度不同,宽传感范围要求器件在低载荷区与高载荷区均具

备足够的信噪比与可分辨输出,同时保持结构完整性与信号稳定性。

Yan 等发现 ML 颗粒与弹性体的比例直接影响传感范围,ML 颗粒含量提高会增强发光强度但会导致复合物柔性降低,当 $\text{Sr}_9\text{LiMg}(\text{PO}_4)_7:\text{Dy}^{3+}$ 与 PDMS 质量比为 1:2 时,力学性能与发光输出达到折中最优,有效应变传感范围为 20%~100%,应力传感范围为 2~10 N(图 7(a))^[70]。为拓宽传感范围,多效应耦合策略被广泛采用。Wang 等构建了摩擦电与 ML 耦合的压力传感矩阵,在低力区利用摩擦电阵列获取高灵敏度电信号,在高力区借助 $\text{ZnS}:\text{Mn}$ 采集 ML 信号,将检测范围分段覆盖至 0.6~200 kPa 与 650 kPa~30 MPa(图 7(b))^[71]。类似地, Zhang 等通过 $\text{Nafion}@\text{Ag}@\text{ZnS}/\text{PDMS}$ 三明治复合传感膜实现了 ML 与电信号同步采集,并在 0~60 N 范围内将传感范围划分为 0~1 N、1~10 N、10~60 N 三个区间分别进行线性拟合,表明该体系更适合分段标定而非单一斜率描述(图 7(c))^[72]。

降低激发阈值是实现低载荷区传感的关键。Tu 等通过在压电基体 LiNbO_3 中掺杂 Pr^{3+} 并精确调控 Li/Nb 比,在微应变区实现高灵敏度弹性 ML,报道其呈线性响应且传感范围(0~1 000 N)接近无阈值,为微小力环境下的应用奠定了材料基础(图 7(d))^[73]。Ye 等通过 $\text{Li}^+/\text{Dy}^{3+}$ 共掺杂策略对 $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ 进行缺陷工程调控,协同优化氧空位与抑制铈空位,成功将力致发光激发阈值降低至 Pa 级,并在 72~500 Pa 压力范围内实现了线性传感响应^[74]。除材料本征外,结构设计亦可有效拓展下限传感范围。如图 7(e)所示, Chang 等利用高长径比毛发状 ML 阵列实现应力集中,将传感范围下限降低至 10~100 mN^[15]。另一方面,在高压感知场景中,传感范围的上限同样至关重要。Yuan 等通过在 $\text{CaZnOS}:\text{Bi}^{3+},\text{Li}^+$ 中共掺 Nd^{3+} 调控陷阱分布,将传感范围上限从 620 N 提升至 3 000 N,显著拓宽了 ML 材料的高压工作区间(图 7(f))^[75]。Jang 等将 ML 器件与 MoS_2 FET 有源矩阵耦合,使传感范围扩展至 200 Pa~5 MPa,在高压与微小机械刺激下均能获得清晰 ML 信号^[13]。

力致发光触觉传感范围还受机械刺激模式与加载条件的影响。Wang 等报道,在压缩载荷模式下,ML 器件的传感范围为 1 000~3 500 N,呈现良好线性关系($R^2\approx 0.988$);而在摩擦刺激下,仅需约 12 N 即可触发发光,激发阈值明显低于压缩模式

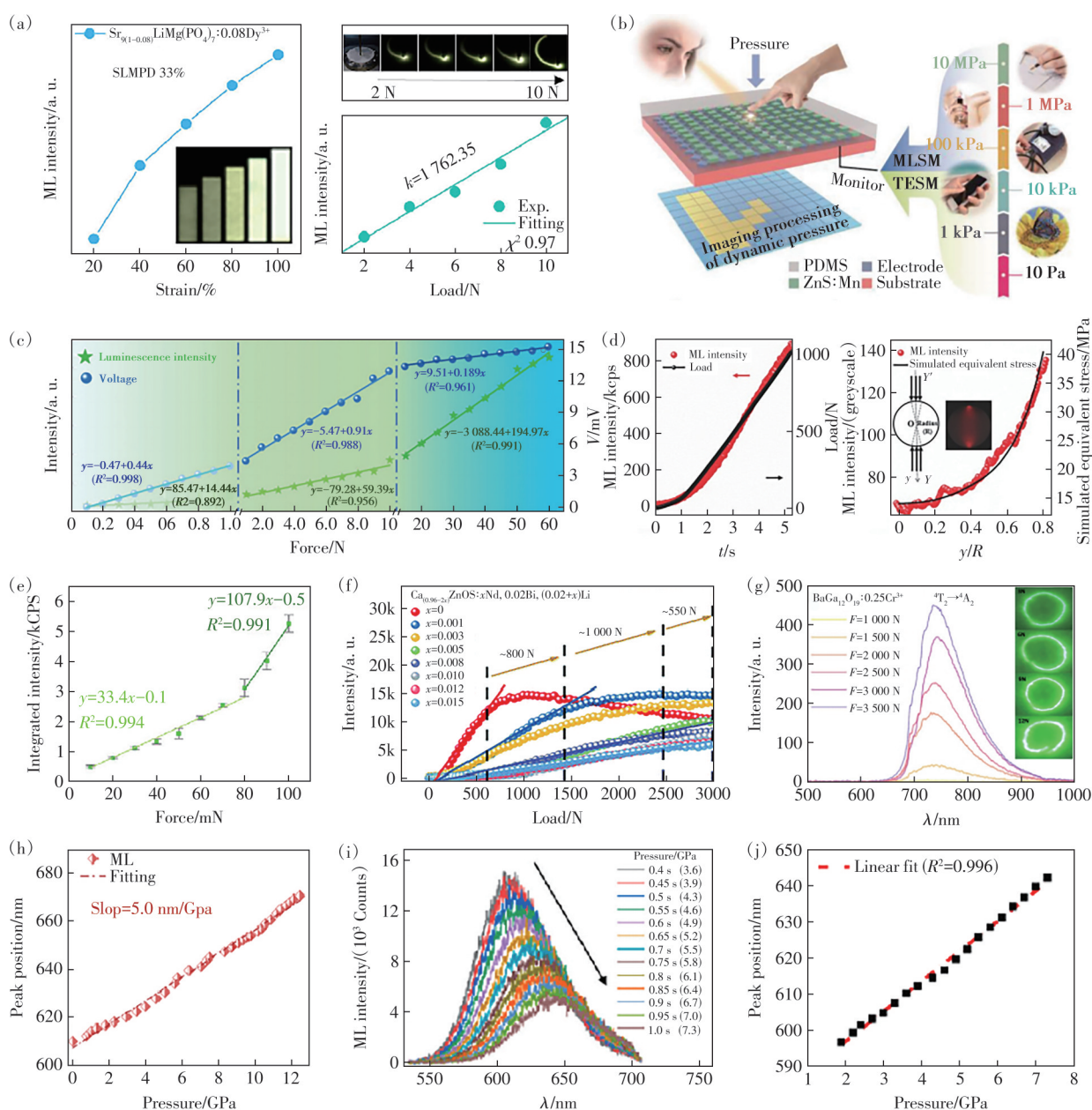


图 7 力致发光触觉传感器传感范围的拓展策略。(a) ML 颗粒/弹性体比例对传感范围的影响^[70];(b)摩擦电-ML 耦合实现分段宽量程压力传感^[71];(c)光电双信号协同的分段标定传感^[72];(d)低阈值材料实现宽范围力学传感^[73];(e)仿毛发阵列结构拓展低载荷传感下限^[15];(f)陷阱调控提升高载荷传感上限^[75];(g)不同机械刺激模式下的传感范围差异^[76];(h)压缩速率依赖的 ML 光谱量程表征^[77];(i)~(j)压力诱导峰位红移的波长窗口表征^[78]

Fig.7 Strategies for expanding the sensing range of mechanoluminescent tactile sensors. (a) Effect of the ML particle/elastomer ratio on the sensing range^[70]. (b) Segmented wide-range pressure sensing enabled by triboelectric-ML coupling^[71]. (c) Segmented calibration based on synergistic optical and electrical signals^[72]. (d) Wide-range mechanical sensing enabled by low-threshold materials^[73]. (e) Lower detection limit extended by hair-like array structures^[15]. (f) Enhanced upper sensing limit through trap engineering^[75]. (g) Sensing range under different mechanical stimulation modes^[76]. (h) Compression-rate-dependent ML spectral characterization of the sensing range^[77]. (i)~(j) Wavelength-window characterization *via* pressure-induced peak redshift^[78]

(图 7(g))^[76]。加载速率亦对传感范围产生影响。Wang 等以压电型 $\text{SrZnOS}:\text{Mn}^{2+}$ 为模型,在无预激发条件下开展 0~10 GPa 快速压缩测试,发现 ML 响应光谱随压缩速率呈现明显分区,且随压力增

大,光谱中心波长呈近线性递增,表明可利用光谱位置对传感范围进行多维度表征(图 7(h))^[77]。Zhang 等在动态压缩过程中观察到 $\text{ZnS}:\text{Mn}$ 的 ML 从约 1.9 GPa 开始出现(中心波长约 597 nm),随

压力升高红移至 7.3 GPa 时的约 642 nm, 实现约 45 nm 的压力诱导红移, 形成压力-波长映射关系, 使传感范围同时涵盖压力窗口 (1.9~7.3 GPa) 与波长窗口 (597~642 nm), 拓展了信号采集维度 (图 7(i)~(j))^[78]。对于带余辉的 ML 体系, 有效传感范围的建立还需考虑背景信号扣除。Luo 等通过 Dy^{3+} 共掺优化传感范围, 在 0~1 000 N 压力区间内 ML 强度随应力逐步增加, 并通过先记录余辉强度再扣除背景的方式获得真实 ML 信号, 从而优化了有效传感范围的标定^[79]。

6 信噪比

在室内外光照变化与反射眩光等复杂场景中, ML 型触觉传感器的稳定运行不仅依赖于发光强度, 更取决于输出信号的信噪比。环境可见光背景及材料非线性响应均可能显著降低信号质

量^[80-82]。因此, 近年来, ML 研究已由单一提高发光强度拓展至多波段调控与背景抑制, 通过材料设计提升触觉识别的鲁棒性与定量可靠性。本节重点讨论比率型 ML、特定波段 ML 以及力致消光 (MQ) 三种信噪比优化策略。

比率型力致发光利用材料在机械刺激下同时产生两个或多个可区分的发光波长, 将其强度比值作为应力表征参数, 从而实现自参照测量。如图 8(a) 所示, Wu 等在 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (CPO) 中引入 Tb^{3+} (绿, 544 nm) 与 Mn^{2+} (红, 651 nm) 双发光中心, 封装为 CPO: $\text{Tb}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ /PDMS 复合薄膜, 通过双通道强度比 $I_{\text{Tb}}/I_{\text{Mn}}$ 的颜色可视化 (绿-黄/橙-红) 实现了应力定量测量^[83]。在 0~0.12 MPa 气压加载下, $I_{\text{Tb}}/I_{\text{Mn}}$ 从 6.235 降至 1.17, 拟合优度达 99.96%, 展现出高灵敏与高精度的比值型压力读出能力, 显著提升了复杂环境下 ML 触觉成像的信噪比与定量

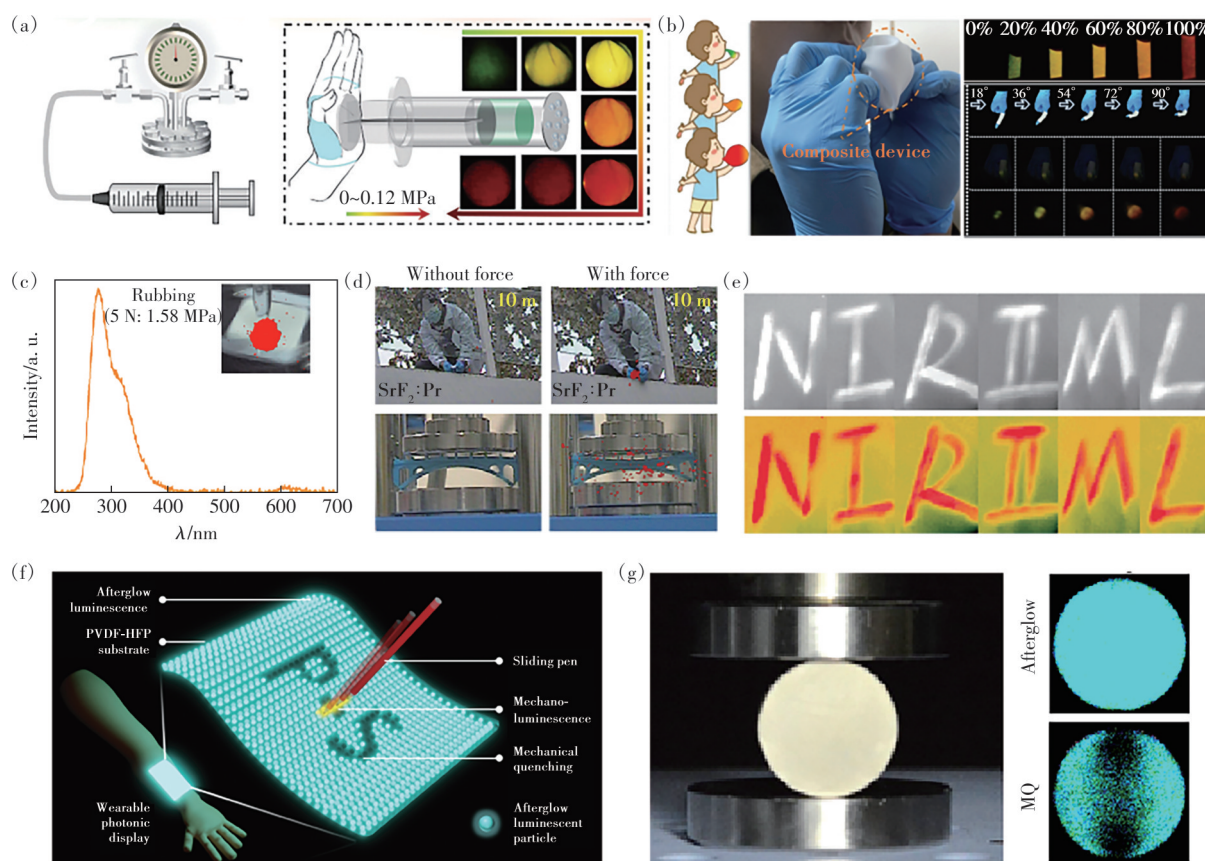


图 8 力致发光触觉传感器信噪比的优化策略。(a) CPO: $\text{Tb}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ 比率型 ML^[83]; (b) $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Tb}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ 比率型 ML^[84]; (c) $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ 日盲紫外 ML 光谱^[88]; (d) 日盲紫外 ML 在白天光照条件下的抗干扰成像示例^[89]; (e) 近红外 (NIR) ML 示例^[65]; (f) 力致消光 (MQ) 用于擦写记录^[94]; (g) MQ 在动态加载与静态载荷下的可视化响应^[95]

Fig.8 Optimization strategies for the signal-to-noise ratio of mechanoluminescent tactile sensors. (a) Ratiometric ML in CPO: $\text{Tb}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ ^[83]. (b) Ratiometric ML in $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Tb}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ ^[84]. (c) Solar-blind UVC ML spectrum of $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ ^[88]. (d) Solar-blind UVC ML imaging under daylight conditions^[89]. (e) Near-infrared (NIR) ML demonstration^[65]. (f) Mechanically induced quenching (MQ) for erasable writing/recording^[94]. (g) MQ responses under dynamic loading and static load holding^[95]

可靠性。Xu等以 $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Tb}^{3+},\text{Mn}^{2+}$ 为发光基体复合PDMS制备柔性器件,利用双峰积分强度作为参照,有效克服了绝对强度易受湿度、温度、光照与加载速率等外界因素干扰的问题(图8(b))^[84]。该器件贴附于手指关节进行应变监测时,在明场、半暗与暗场条件下均能保持清晰的颜色区分。Yang等利用 $\text{CaZnOS}:\text{Bi}^{3+},\text{Mn}^{2+}$ 中发光中心激发阈值不同的特点,在0~5 000 N压力范围内实现ML颜色随压缩载荷实时变化,提升了动态测量过程中的信噪比^[85]。Zhou等在 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 基体中构建了 $\text{Eu}^{2+}\text{-Dy}^{3+}$ 、 $\text{Eu}^{2+}\text{-Tb}^{3+}$ 等多种ML组合,均呈现显著发光颜色变化,并进一步建立了绝对灵敏度、相对灵敏度与信号可分辨性的评价体系,使不同比率型ML体系具有可比性^[86]。

特定波段ML通过构建低背景光学窗口提升信噪比。其中,日盲紫外(UVC, 200~280 nm)因臭氧吸收几乎无太阳背景,而近红外(NIR, >700 nm)可通过窄带滤光与专用探测器有效抑制可见光干扰。早期UVC-ML多属陷阱控制机制,需X射线等预充电后再通过机械刺激释放载流子。例如, $\text{NaYF}_4:\text{Pr}^{3+}$ 需预激发才能在250 nm附近产生ML,热释光等测试证实其陷阱填充-释放过程,且可通过日盲相机完成ML信号验证^[87]。近年来,研究者进一步发展出无需预激发、可重复且具自恢复能力的UVC-ML弹性体。如图8(c)所示,Lv等将 $\text{Sr}_3\text{-(BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ 与PDMS复合,实现了峰位约272 nm的UVC力致发光,在超过10 000次循环拉伸后仍保持可检测输出,展现出良好的循环稳定性与应用潜力^[88]。Cai等在 $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ 中实现了中心约222 nm的far-UVC-ML发光,将ML短波边界推进至far-UVC区间^[89]。该体系不仅在直接机械激发下产生自恢复UVC-ML,还可在X射线预充电后出现持续发光,并进一步产生陷阱控制型UVC-ML,其中陷阱控制ML强度约为自恢复ML的90倍,体现了直接激发与陷阱调控耦合带来的强度增益。在抗干扰应用层面,作者利用日盲相机分别采集UVC与可见通道,实现了明亮环境下桥梁及结构表面受力区域的远程可视化监测(图8(d)),凸显了UVC窗口在强背景光条件下的天然信噪比优势。

近红外ML同样展现出优异的抗干扰能力。Cai等以MgO为基底,通过掺杂 Cr^{3+} 实现了覆盖NIR-I与NIR-II的宽谱NIR-ML输出^[65]。该体系可在明场环境光下直接成像检测(图8(e)),为构

筑宽谱、耐久且环境自适应的NIR-ML材料与器件提供了设计思路。在稀土近红外发光体系中,宿主晶格的声子能量往往决定非辐射弛豫强度,从而影响NIR-ML强度。Wang等通过重元素硒化物宿主替代,开发出 Nd^{3+} 掺杂的 SrZnOSe 基晶体,实现自供能NIR-ML输出,其ML信号与外力呈良好线性响应,并展示了在组织遮挡条件下的信息传输与生物力学监测潜力,体现了低声子能量宿主对提升NIR-ML强度与可用性的关键作用^[90]。此外,Dou等在 $\text{KGa}_{11}\text{O}_{17+x}(\text{KGO}):\text{Cr}^{3+}$ 体系中构建了高度集成的NIR多模态发光材料,该材料同时具备短寿命NIR-PL、超长余辉(>144 h)与可重复NIR-ML,并呈现秒级光致变色以及对X射线、紫外、可见、近红外光与热扰动的多刺激响应,为高信噪比传感器件提供了材料选择^[91]。

力致消光(Mechanical-quenching, MQ)是指材料在外加机械刺激下,其预先储存的发光(尤其是长余辉/磷光)出现强度降低或瞬时熄灭的现象,最早在 $\text{CaZnOS}:\text{Cu}$ 等长余辉体系中系统观察并用于应力可视化^[92]。与受力发光的ML不同,MQ提供了受力变暗的信号通道,在强背景光或曝光漂移条件下更易通过差分方式提取有效信号,为触觉与应力成像的信噪比优化提供了独特的信号维度。目前,MQ研究主要集中在具有明显陷阱储能与长余辉特征的发光体系中。这类材料的优势在于余辉本身提供了背景光源,机械作用通过改变陷阱载流子的释放与复合路径即可产生高对比度的暗区信号。但其局限也较为明确,通常需预激发以建立初始余辉状态,增加了使用流程与长期应用的难度。在定量化方向,Tu等提出了利用余辉寿命或衰减曲线表征机械载荷的方法,相比单纯依赖强度,寿命参数更不依赖光路和拍摄条件,从而提升了应力传感测量的信噪比^[93]。进一步地,Kim等将余辉颗粒的MQ与瞬时ML耦合引入可穿戴电子皮肤(图8(f)),通过机械刺激实现余辉图案的局部擦除,并验证了其在潮湿甚至水下环境中的可用性,展示了MQ在可擦写显示与交互记录中的应用价值^[94]。此外,Huang等系统对比了动态加载与静态保持加载(图8(g)),证明材料在静态应力保持阶段仍能维持稳定暗区,并可在微应变刺激下产生可识别的MQ响应,突出了MQ在静态与准静态应力场景中的优势,也为构建高信噪比触觉传感体系提供了思路^[95]。

7 空间分辨率

传统电学触觉传感器件通常依赖电极阵列或扫描电路进行信号读出。若要进一步提升空间分辨率,往往需要缩小单元尺寸,但这会带来布线复杂、串扰增强、信号衰减及制造难度上升等问题。相比之下,力致发光器件可在受力位置直接发光,压力分布能够被相机或光电探测器直接记录,因而更容易获取连续、直观的二维甚至动态图像,在实现高像素密度显示和高分辨压力映射方面具有天然优势。此外,由于输出信号本质上是二维光学图像,可直接结合灰度提取、轨迹重建、特征识别及机器学习等方法,对受力轨迹、局域压力分布及动态接触过程进行分析,展现出在高分辨触觉传感器件领域的广阔应用潜力。

力致发光触觉成像的本质在于将接触界面的应力或应变场转化为具有空间分布特征的光强或光谱图像,并通过相机或光电阵列实现像素化读出。对于 ML 型触觉器件,空间分辨率一方面取决于应力场在器件内部的局域化程度;另一方面,与 ML 光子的产生与提取效率、成像信噪比密切

相关,同时还受镜头与传感器的采样性能影响。当前较为直接有效的策略是通过微结构阵列与分级结构实现应力局域化与光提取增强,从而在单一 ML 薄膜上获得高对比度、可识别的像素化输出。Ma 等设计了微米级凸/凹阵列与纳米级蜂窝纹理构成的分级结构,将应力集中与 ML 信号增强协同耦合,实现了 637 PPI 的高分辨像素化输出,发光强度较纯薄膜提升约 366%,并展示了大像素数预编码图案,体现出可编程触觉可视化能力(图 9(a))^[96]。除结构设计外,材料本征的局域响应能力同样决定了成像分辨率与可识别性^[97]。如图 9(b)所示,Wang 等利用 UV 光刻制备了像素化 ML 阵列(254 dpi),实现了可用于动态触觉成像的高分辨 ML 压力映射^[11]。Ye 等利用 $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ 实现 72 Pa 超低激发阈值的同时,获得了优异的触觉成像空间分辨率(图 9(c))。该材料在指纹识别应用中展现出约 200 μm 的分辨率,能够清晰解析指纹的岛状结构、末端、汗孔及脊线分叉等三级细节特征^[74]。通过热激活延迟成像,材料可区分暗脊与亮谷,径向灰度衰减进一步映射了压力梯度分布,中心区域因压缩更强、载流子消耗更

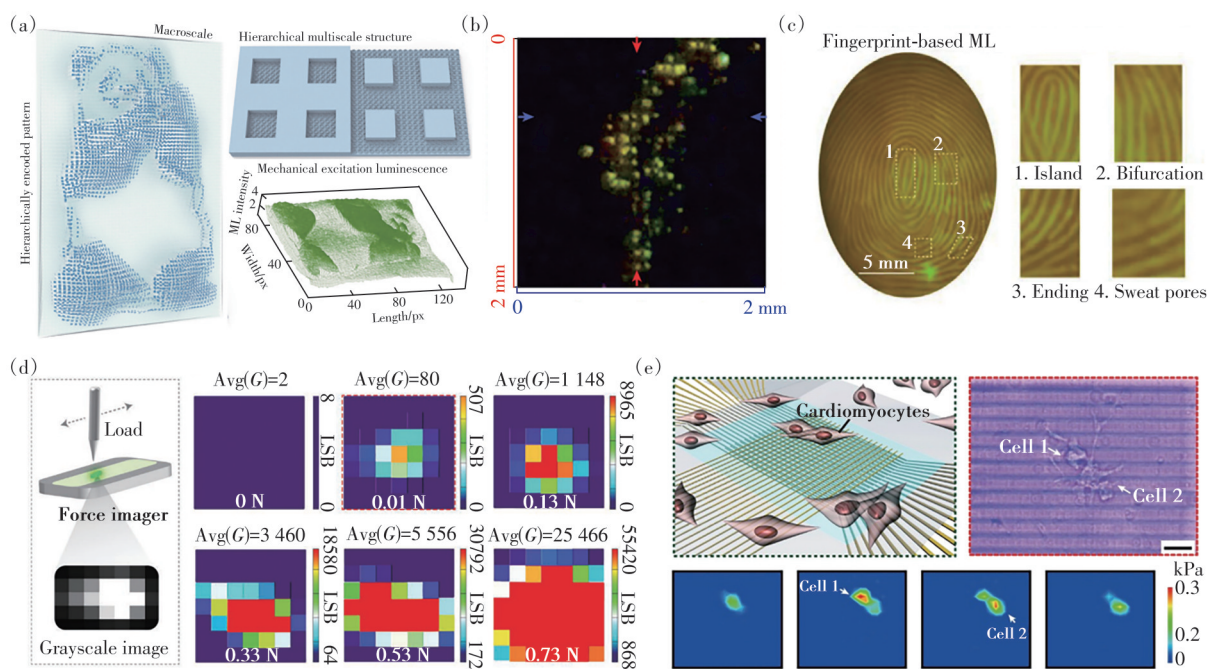


图 9 力致发光触觉传感的高分辨成像策略。(a)分级微纳结构增强的高分辨力致发光触觉成像^[96];(b)阵列化像素输出用于压力映射^[11];(c)高分辨 ML 材料用于指纹识别^[74];(d)近距离光子收集的 ML 成像方案^[14];(e)ML 层与 MoS_2 晶体管有源矩阵耦合实现单个心肌细胞尺度的压力检测^[13]

Fig.9 High-resolution strategies for mechanoluminescent (ML) tactile imaging. (a) High-resolution mechanoluminescent tactile imaging enabled by hierarchical microstructures^[96]. (b) Pixelated array output for pressure mapping^[11]. (c) High-resolution ML materials for fingerprint recognition^[74]. (d) Near-field photon-collection ML imaging scheme^[14]. (e) ML layer coupled with a MoS_2 transistor active-matrix for pressure sensing at the single cardiomyocyte scale^[13]

多而呈现更低残余发光强度,其空间分辨率达 $(218.5\pm48.1)\mu\text{m}$ 。同时,优化光信号采集装置也可显著提升成像分辨率。Zhuang 等通过近距成像策略,将 $\text{ZnS}:\text{Cu}+\text{Al}_2\text{O}_3$ @PDMS 复合薄膜直接沉积于 CMOS 图像传感器表面,利用像素间距 $100\mu\text{m}$ (254 dpi)的阵列探测器实现了高分辨率应力分布成像。近距成像使光子收集率提升至约 80%,较传统远场成像模式提高两个数量级(图 9(d))^[14]。在落球冲击实验中,300 fps 帧率(间隔 3.3 ms)清晰捕捉了应力场的动态演化过程,金属印章压印测试进一步验证了 254 dpi 的空间分辨能力,可分辨直径约 $100\mu\text{m}$ 的像素级应力分布。Park 等通过将空气介电层 MoS_2 晶体管与 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 力致发光层集成,构建了高分辨率的主动矩阵压力传感阵列^[13]。该阵列中单个 FET 像素尺寸可缩小至 $6\mu\text{m}\times6\mu\text{m}$,像素间距仅 $10\mu\text{m}$,实现了亚细胞级的空间分辨率。在心肌细胞搏动监测中,该阵列成功捕捉到单个心肌细胞(直径约 $100\mu\text{m}$)的搏动过程,

以 20 ms 的时间间隔连续记录二维压力分布图,可清晰分辨细胞收缩产生的约 200~300 Pa 压力信号(图 9(e))。

为更清晰地对比不同力致发光材料体系在触觉传感中的应用潜力,本文进一步总结了代表性器件的关键性能参数(见表 1)。可以看出,不同材料体系在激发阈值、传感范围、循环稳定性、空间分辨率以及器件集成方式等方面均存在显著差异,表明力致发光器件的性能优化具有明显的材料依赖性与应用导向特征。从整体发展水平与实际应用可行性来看,ZnS 基材料体系目前仍最有望率先实现实际应用。这主要得益于其研究基础较为成熟、器件设计路径丰富、性能调控范围较宽,并且已在高分辨成像、阵列化集成以及可视化触觉传感等方面得到了较为充分的验证。相比之下,其他材料体系虽在部分单项性能指标上表现出一定优势,但在长期稳定性、规模化制备能力以及综合性能平衡方面仍有待进一步优化与提升。

表 1 力致发光型触觉传感器器件的关键性能
Tab. 1 Key performance parameters of mechanoluminescent tactile sensors

ML 材料	峰位/nm	阈值	循环次数	传感范围	空间分辨率	文献
$\text{ZnS}:\text{Mn}$	585	0.8 N	10 000	0.8~10 N	$100\mu\text{m}$	[11]
$\text{ZnS}:\text{Mn}/\text{Cu}@ \text{Al}_2\text{O}_3$	480/590	230 kPa	10 000	230~2 500 kPa	$<100\mu\text{m}$	[12]
$\text{ZnS}:\text{Cu}-\text{MoS}_2$	510	200 Pa	2 000	200 Pa~5 MPa	$10\mu\text{m}$	[13]
$\text{ZnS}:\text{Cu}/\text{CMOS}$	510	0.23 N	1 920	kPa 级	$100\mu\text{m}$	[14]
$\text{ZnS}:\text{Cu}$	510	0.1 N	—	0.1~3 N	0.5 mm	[15]
$\text{ZnS}/\text{CaZnOS}:\text{Mn}$	590	2 N	100	0~8 MPa	—	[18]
$\text{ZnS}:\text{Mn}/\text{Cu}@ \text{Al}_2\text{O}_3$	585	1 N	20 000	1~2 N	—	[55]
$\text{ZnS}:\text{Mn}/\text{Cu}$	510/590	5 N	1 800	$<12.7\text{ kPa}$	—	[57]
$\text{Nafion}@ \text{Ag}@ \text{ZnS}$	510	0.2 N	300	0.2~60 N	—	[72]
$\text{ZnS}:\text{Cu}$	510	9 kPa	—	9~40 kPa	$40\mu\text{m}$	[96]
$\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$	510/590	5 N	2 000	5~60 N	—	[98]
$\text{MgO}:\text{Cr}^{3+}$	800/1 350	—	1 000	—	1.5 mm	[65]
$\text{CaF}_2:\text{Tb}^{3+}$	550	0.1 N	14	0.1~0.5 N	—	[66]
$\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$	222	5 N	20	5~25 N	—	[89]
$\text{CaGa}_2\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$	590	32 kPa	100	32~96 kPa	—	[67]
$\text{Sr}_2\text{LiMg}(\text{PO}_4)_7:\text{Dy}^{3+}$	580	2 N	16	2~10 N	—	[70]
$\text{LiNbO}_3:\text{Pr}^{3+}$	620	1 N	5	1~1 000 N	—	[73]
$\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$	580	72 Pa	70	72~500 Pa	$200\mu\text{m}$	[74]
$\text{CaZnOS}:\text{Bi}^{3+},\text{Li}^+,\text{Nd}^{3+}$	480/910	1 N	—	1~3 000 N	—	[75]
$\text{SrZnOS}:\text{Mn}^{2+}$	620	0.5 GPa	—	0.5~10.5 GPa	—	[77]
$\text{SrZnOSe}:\text{Nd}^{3+}$	910	5 N	10	5~55 N	—	[90]
$\text{BaGa}_{12}\text{O}_{19}:\text{Cr}^{3+}$	720	12 N	1	1 000~3 500 N	—	[76]
$\text{CPO}:\text{Tb}^{3+},\text{Mn}^{2+}$	540/650	0.5 N	300	0.01~0.12 MPa	—	[83]
$\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$	272	0.3 MPa	20 000	0.3~1.5 MPa	—	[88]
$\text{Zn}_{1.2}\text{Ga}_{1.6}\text{Ge}_{0.2}\text{O}_4:\text{Cr}$	690	0.1 N	3 000	0.4~3 000 kPa	—	[99]

需要进一步指出的是,力致发光触觉器件涉及灵敏度、循环稳定性、传感范围、信噪比及空间分辨率等多项关键性能参数,而这些参数之间往往存在显著的耦合与权衡关系。例如,在低刺激

力场景中,器件需要具备较低的激发阈值和较高灵敏度,以确保微弱刺激能够产生可检测的 ML 信号;而在高载荷条件下,则需避免信号过早饱和、发光衰减或结构失效,从而维持足够的动态范

围与输出稳定性。因此,单纯追求高灵敏度通常会压缩器件的高载荷工作窗口,而过度强调宽传感范围又可能牺牲低载荷区域的信号强度和信噪比。从应用角度出发,力致发光器件的关键不在于单一性能指标的极致提升,而在于面向具体应用场景的综合性能优化。基于当前研究进展与典型应用需求,可归纳出若干具有指导意义的关键指标,如对于触觉成像与压力可视化,空间分辨率($<0.1\text{ mm}$)、信噪比(>10)以及良好的循环重复性(>104 次)是核心指标;对于可穿戴感知与人机交互,低检测阈值($<1\sim 10\text{ kPa}$)、优异的柔性以及长期循环稳定性更为关键;而对于定量压力检测与结构健康监测,则需要更宽的传感范围(kPa 至 MPa 量级)、良好的力-光线性关系(R^2 接近1)以及长期环境稳定性。

8 多模态传感

多模态触觉传感的核心目标是在同一器件平台中同步获取两类及以上互补信息(如力-温度、力-湿度、力-摩擦等),并通过多通道输出与解耦策略提升信息维度与环境鲁棒性^[91,100]。对于基于力致发光的触觉体系而言,多模态传感的实现路径主要分为两类:其一是多通道光学信号输出,即在单一器件中集成 ML 与光致发光(PL)、余辉(PersL)或热释光(TL)等多种发光过程^[101-102];其二是多效应耦合,即将 ML 效应与摩擦电、压电、电阻等电学效应相结合,实现光信号与电信号的协同感知与解耦^[103]。

温度信号是触觉传感器件中的关键信息维度,不仅影响器件对材质等交互信息的判断,还关乎其在复杂环境下的稳定性。在现有 ML 传感体系中,温度信息主要通过温度敏感的光信号进行输出。例如,Zheng 等将 $\text{ZnS/CaZnOS}:\text{Mn}^{2+}$ 掺入纤维素微纤维制备可编织 ML 纤维,利用 Mn^{2+} 发光能级对局域晶场及键长的高度敏感性,通过记录 PL 光谱的位置、宽度及寿命变化实现温度标定(图 10(a))^[104]。Chen 等针对双镧系掺杂 $\text{SrZnSO}:\text{Tb}^{3+},\text{Eu}^{3+}$,提出利用 $\text{Tb}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ 的 ML 发射强度比表征温度、ML 积分强度表征应力,实现了应力与温度的双模传感,并通过指数拟合建立了发光颜色比值与温度的单调关系^[105]。Ding 等在 $\text{CaZnOS}:\text{Er}^{3+}$ 体系中,利用温度变化下两条发射峰的强度比作为温度读出信号,实现了 ML 触觉的双模传感,并借助该比值推算出不同超声功率下的温度差

异,结果与热成像相机测得值一致(图 10(b))^[106]。Zhang 等开发了 $\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 共掺 NaNbO_3 微米颗粒复合热塑性聚氨酯(TPU)的柔性可拉伸复合膜,其中 Pr^{3+} 负责陷阱控制的红色延迟发光与余辉,可在温度与机械刺激下实现 ML 书写与轨迹可视化, Er^{3+} 则提供 980 nm 激发的绿色上转换发光(图 10(c)),将热响应、ML、紫外下转换 PL 与近红外上转换等多种刺激通道集成于同一材料平台,为多时间尺度、多波段的触觉信息采集提供了典型范式^[107]。

除纯光学信号外,光-电双通道输出也是多模态传感的重要实现方式^[108]。Ma 等将 ZnS/CaZnOS 力致发光层与 PEDOT:PSS 热敏电阻层集成,构建了一种信号自解耦的压力-温度双模传感器件。其中,压力传感通过力致发光材料的压光效应实现,输出光信号;温度传感则利用 PEDOT:PSS 的热阻效应实现,输出电信号(图 10(d))^[108]。Fang 等将透明可拉伸的单电极摩擦纳米发电机与 ZnS 基力致发光复合层集成,在外部压力作用下可同时产生可读取的电学脉冲信号与可见发光信号,实现了同一机械刺激的双物理通道输出(图 10(e))^[109]。Lu 等构建了电-光双模三明治结构,上层为 SIS-EVA 基体嵌入 $\text{ZnS/CaZnOS}:\text{Mn}^{2+}$ 颗粒的 ML 层,中间为 SIS-EVA/银浆/液态金属微粒弹性电极层,下层为 SIS-EVA 基底,在复杂机械状态下可同时输出摩擦电信号与清晰 ML 光学轨迹,实现了力可视化与精确测量的互补^[110]。Wang 等以 $\text{ZGGO}:\text{Cr}^{3+}$ 为功能层实现摩擦电与 ML 同步输出,其中摩擦电电压用于定量评估外力大小,ML 用于空间定位与力分布可视化,并将两类信号融合用于目标识别与手术机器人接触风险监测^[99]。

在多模传感中,ML 信号的位置、峰宽等信息亦可用于对刺激力本身进行解耦。Yang 等基于 $\text{LiTaO}_3:\text{Tb}^{3+}$ 材料,利用 ML 强度表征应力大小,同时利用 ML 峰形随加载速率呈线性变化的特点反推加载速率,实现同一发光信号不同特征量的多维信息解耦(图 10(f))^[111]。Su 等同样在 $\text{Y}_3\text{In}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 体系中利用不同压力下光谱不同以及 ML 衰减时间不同的特点,构建了光谱比率和时间通道比率,实现了同一发光中心的两种独立光学信号读出方式^[112]。Lyu 等通过 $\text{Ga}^{3+}/\text{Ge}^{4+}$ 共掺杂陷阱工程构建了 $\text{LiTaO}_3:\text{Bi}^{3+},\text{Tb}^{3+}$ 材料体系,该体系同时具备超过 40 h 的余辉发光、X 射线成像及预激发条件下

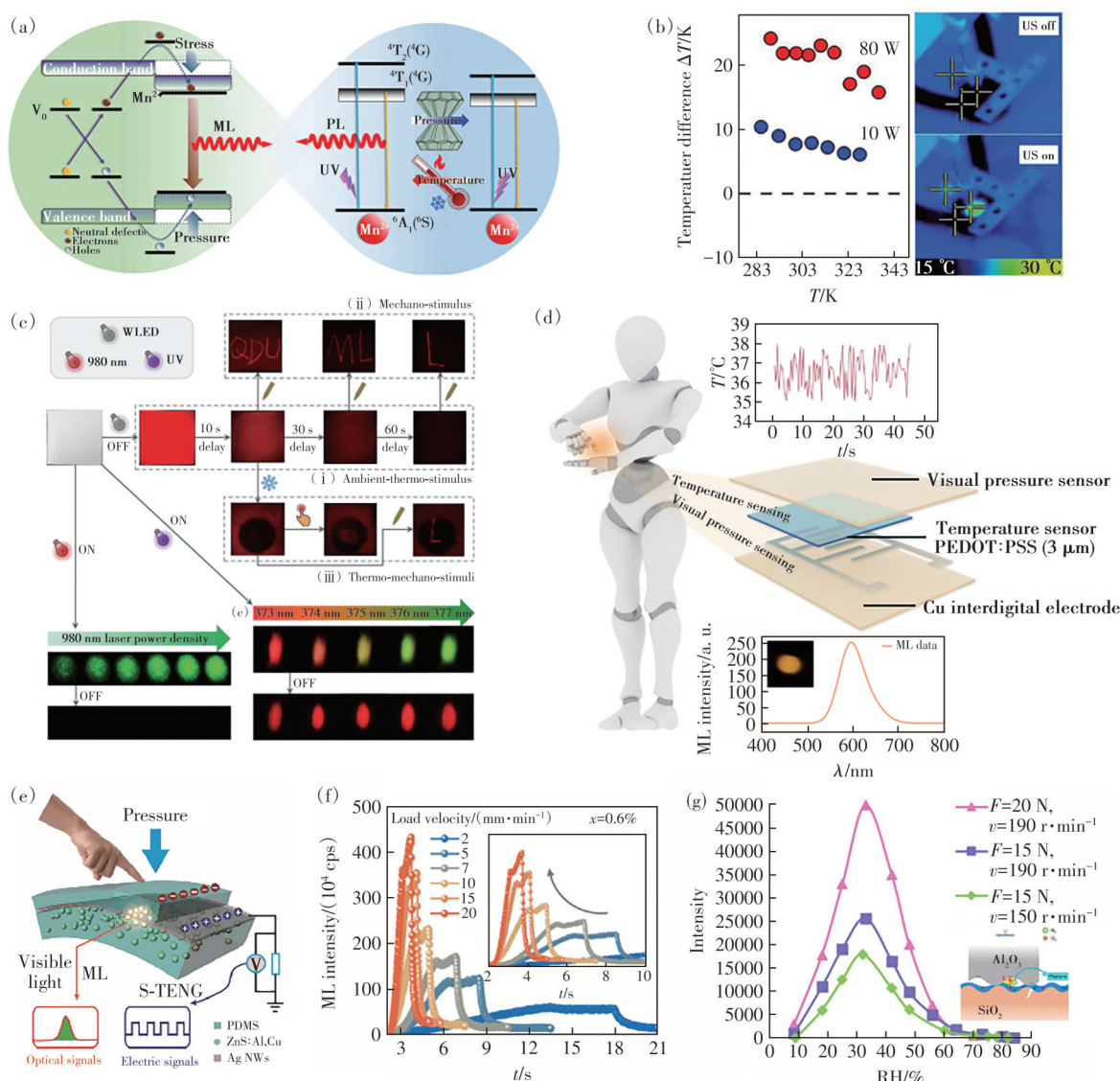


图10 力致发光触觉传感器的多模态感知策略。(a)传感平台工作机制示意图,包括应力诱导ML模式(左)和温度/压力协同诱导PL模式(右)^[104];(b)基于发光强度比的力-温双模传感^[106];(c)多波段发光耦合的多模态传感^[107];(d)光-电耦合的压力-温度双模传感^[18];(e)力致发光与摩擦电信号协同输出^[109];(f)基于峰形特征的应力-速率解耦感知^[111];(g)湿度耦合的力致发光响应^[115]

Fig.10 Multimodal sensing strategies for mechanoluminescent tactile sensors. (a) Temperature sensing based on PL spectra^[104]. (b) Force-temperature bimodal sensing based on emission intensity ratios^[106]. (c) Multimodal sensing via multiband luminescence coupling^[107]. (d) Pressure-temperature bimodal sensing based on optical-electrical coupling^[18]. (e) Synergistic output of mechanoluminescent and triboelectric signals^[109]. (f) Decoupled stress-rate sensing based on spectral peak features^[111]. (g) Humidity-coupled mechanoluminescent response^[115]

的ML输出,为信息储存、辐射成像与应力传感的多功能器件设计提供了基础^[113]。Guo等将ZnS:Cu(ML)与光致发光层(PSL)耦合,当器件受力时,PSL层会将ML信号捕获到陷进中,并且在980 nm的近红外光刺激下再次产生光信号,从而实现机械刺激的光学储存,具有视觉和触觉感知的多模态功能^[114]。

湿度是与力、温度并列的关键感知维度,尤其

在可穿戴贴肤场景中与汗液、皮肤水合等因素密切相关。Zhang等以SiO₂/Al₂O₃摩擦体系为模型,揭示了摩擦致发光强度可被环境相对湿度定量调制,呈现先增强后衰减的非单调规律且存在临界湿度(图10(g))^[115]。随相对湿度升高,发光强度先上升,在临界点达到峰值后下降,并在高湿条件下趋近于零。机制分析表明,临界湿度以下界面水由层状转变为斑点状形貌,导致表面电导增加、

摩擦带电能垒降低、接触电势差增大,从而增强界面电荷积累与局域电场,促进气体放电并提升发光输出。该工作从机制层面阐明了湿度作为可调控环境变量,为力-湿度多模态触觉传感的材料设计提供了新思路。

9 ML 触觉传感应用

力致发光触觉传感能够将机械刺激直接转化为光学信号,天然适用于空间成像与可视化表达,并便于与图像处理及机器学习方法融合。近年来,ML型触觉传感器件已在智能防伪、光子皮肤、软体机器人、人机交互与手势识别等多个应用场景中进行了探索与验证。

笔迹识别场景中,ML器件的突出优势在于除笔迹轮廓外,还可同步输出与书写过程相关的压力分布与时空演化特征,为电子签名防伪与行为生物特征识别提供更高维度的信息。Wang等构建了基于力致发光的柔性压力传感矩阵,以 ZnS:

Mn 为功能层并进行透明封装,使受压区域即时发出光学信号,实现受力轨迹的阵列化成像(图 11(a))^[11]。通过 CCD 采集书写过程的发光图像序列并对灰度信息进行解析,该器件可实时重建二维压力分布,在获取笔迹形貌的同时提取个体化书写习惯特征,从而提升电子签名验证的可靠性。类似地,Li等采用可重复、高强度、低阈值的 ZnS-CaZnOS: Mn²⁺异质结材料与 PDMS 构建柔性发光膜,书写时产生清晰的光学信号,经灰度提取与处理后得到动态书写特征,形成区分度更高的个体化书写指纹,用于防伪验证与身份判别^[28]。Suo等进一步利用 ML 材料设计制作了 NIR-ML 驱动的触觉笔,集成了光电二极管和电子控制模块(图 11(b))^[116]。书写时,笔尖中的 ML 膜在外力作用下瞬时发出近红外光,由硅光电二极管转化为电压信号,并以 20 ms 的时间分辨率连续采集与无线传输,展现出在复杂环境下签名认证与智能交互方面的应用潜力。

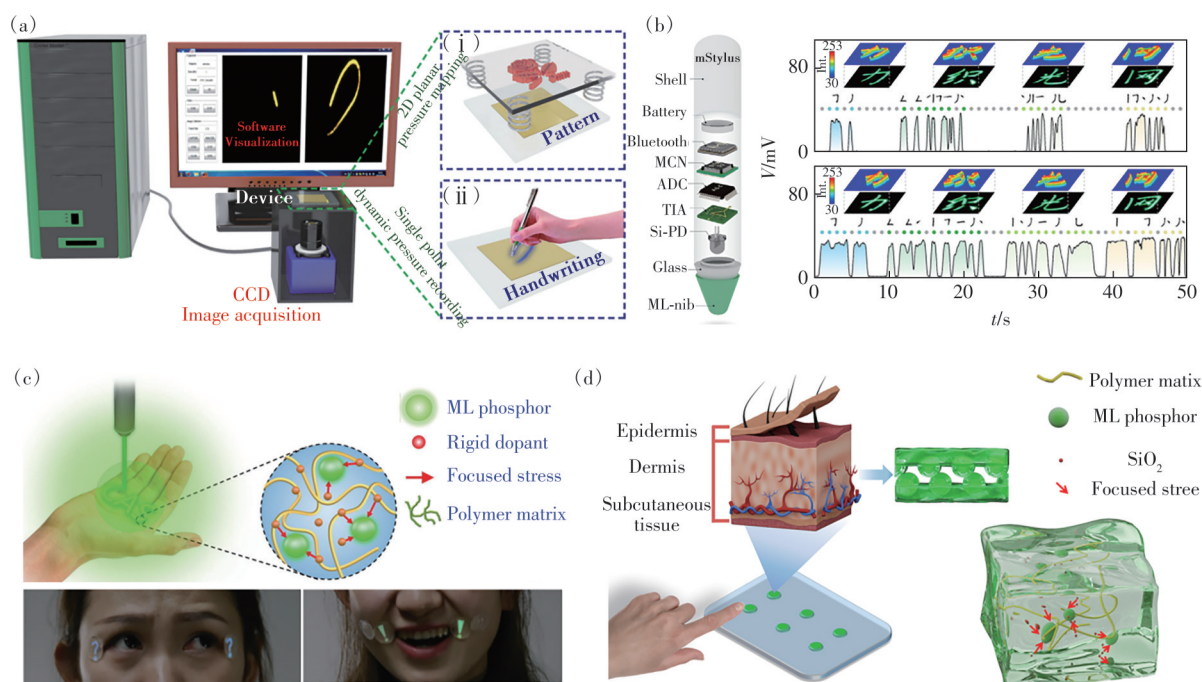


图 11 力致发光触觉传感应用示例。(a)基于 ML 压力传感矩阵的动态笔迹成像^[11];(b)近红外 ML 触觉笔用于签名识别^[116];(c)图案化 ML 光子皮肤用于表情可视化^[12];(d)互锁微结构增强的 ML 光子皮肤用于盲文识别^[117]

Fig.11 Applications of mechanoluminescent tactile sensors in handwriting recognition and photonic skin. (a) Dynamic handwriting imaging based on an ML pressure-sensing array^[11]. (b) Near-infrared ML tactile pen for signature recognition^[116]. (c) Patterned ML photonic skin for facial expression visualization^[12]. (d) Interlocking-microstructure-enhanced ML photonic skin for Braille recognition^[117]

光子皮肤是 ML 触觉传感最直观且易于规模化展示的应用方向。Qian 等将刚性 ZnS:Mn²⁺(Mn/Cu)@Al₂O₃ 微粒分散于柔性 PDMS 中,并引入 SiO₂

纳米粒子调控基体弹性模量,增强外力向发光颗粒的应力传递,在较弱刺激下仍能获得较强的 ML 输出并提高成像对比度(图 11(c))^[12]。作者利用

可打印工艺制备图案化 ML 薄膜, 贴附于面部不同区域, 通过嘴角、眼角与面颊等部位的微小肌肉运动触发特定符号图案发光, 实现发光表情展示, 体现了 ML 电子皮肤在可穿戴交互与应力可视化中的应用潜力。类似地, Yan 等通过互锁微结构将外部机械刺激集中至 ML 颗粒附近, 并设计上硬下软的模量梯度, 实现了低载荷下的出光增强与多点定位, 并将其应用于盲文识别场景, 准确率达 99% (图 11(d))^[117]。

软体机器人通常处于大形变与多点接触工况, 若驱动与感知系统依赖电极、导线与复杂封装, 往往会带来结构冗余与可靠性下降, 尤其在水下、暗场或强电磁干扰环境中更为突出。将力致发光材料引入软体机器人结构, 可实现运动到光信号的直接转换, 使机器人在无需额外供电或复杂读出电路的情况下获得直观的可视化反馈。如图 12(a) 所示, Cai 等将对机械刺激敏感的甲藻培养液封装于透明弹性体腔室内, 当结构变形或腔



图 12 力致发光触觉传感器在软体机器人、人机交互以及手势识别场景的应用示例。(a)软体机器人中的可视化力致发光反馈^[118];(b)活体复合软体机器人的多色力致发光显示^[119];(c)基于力致发光牙套的人机交互^[98];(d)全光学触觉交互与无线控制^[17];(e)自供能力致发光器件的手势识别^[120];(f)水下手势识别与无源光通信^[60]

Fig.12 Representative applications of mechanoluminescent tactile sensors in soft robotics, human-machine interaction, and gesture recognition. (a) Visual mechanoluminescent feedback in soft robots^[118]. (b) Multicolor mechanoluminescent display in living composite soft robots^[119]. (c) Human-machine interaction via a mechanoluminescent mouthguard^[98]. (d) All-optical tactile interaction and wireless control^[17]. (e) Gesture recognition using a self-powered mechanoluminescent device^[120]. (f) Underwater gesture recognition and passive optical communication^[60]

体内液体流动时,对 ML 材料产生机械刺激,实现无电源光输出^[118]。为增强发光强度,作者在腔体内部引入微柱等微结构以放大剪切作用,并通过添加染料实现发光颜色可调。将该 ML 体系作为机器人皮肤时,可在黑暗环境中可视化接触压缩及非接触扰动(如气流)。当该体系与液压驱动爬行软体结构及四足软体系统耦合时,可实现运动诱发 ML 照明,同时通过制备不同字符形状,用于黑暗条件或水下的信息标识与光学通信。针对小型且复杂的腔室环境,Cai 等进一步在活体复合材料外部引入疏水且透气的 ML 弹性体涂层,显著提升活体复合物在苛刻条件下的存活与发光寿命(图 12(b))^[119]。作者还采用挤出式直写方法将活体复合材料打印为多种二维或三维结构,打印分辨率达约 0.39 mm。为拓展软体机器人信号表达能力,作者使用染色弹性体涂层作为光学滤波层实现不同颜色的 ML 发光输出,使同一类软体机器人具备多颜色编码的信息传递能力。

人机交互场景中,触觉输入需要被快速、稳定地编码并解码为可执行指令。与传统电学触控相比,ML 体系可将机械输入直接转化为光信号,输出形式天然兼容相机、光电探测与机器学习算法,同时光学信号对电磁环境不敏感,更适用于潮湿及复杂接触等电学方案难以稳定部署的场景。Hou 等提出力致发光驱动的分式光纤传感牙套,将不同发光颜色的 ZnS 基力致发光薄膜嵌入弹性光纤,利用不同咬合轨迹产生的光谱差异进行指令编码(图 12(c))^[98]。作者将 2×3 力致发光阵列集成于 3D 打印软质牙套中,配置双高灵敏 RGB 颜色传感芯片与柔性电路,验证了器件在 5~60 N 范围内的近线性响应,同时具备约 52.6 ms 的时间分辨率与 2 000 次循环的稳定性。该牙套进一步应用于电脑/手机操作与轮椅导航,实现虚拟键盘输入与虚拟钢琴演奏等辅助交互任务,体现了 ML 传感器件在可穿戴交互中的系统可行性。Wei 等构建了基于异质力致发光材料的自供能全光学触觉传感平台,将 ZnS:Cu 与 ZnS-Ca-ZnO:Mn 两种 ML 材料嵌入 PDMS 基体,利用其对拉伸应变与剪切力的差异化响应(分别输出绿光与橙光),实现了多模态触觉刺激的异色光可视化转换^[17]。该平台无需外部电源、电极与复杂线路,通过相机采集 ML 信号并进行颜色判别与轨迹识别,编码为二进制指令后经 WiFi 模块无线传输,

实现对遥控汽车(RC car)与电脑游戏(如俄罗斯方块)的实时控制(图 12(d))。

手势识别是可穿戴触觉系统的重要应用方向,要求器件能够将手指弯曲、伸展等复杂形变转化为可区分的可视化信号并保持长期稳定输出。如图 12(e)所示,Zhao 等受头足类动物皮肤发光机制与蜘蛛裂隙器官超灵敏响应启发,开发了基于 MXene/CNT 协同导电网络与应变依赖微裂纹结构的自供能力致发光器件^[120]。该器件在应变传感方面实现了 0.001% 的超低检测限、 3.92×10^7 的超高灵敏度及 5 ms 快速响应,并在超过 45 000 次拉伸循环中保持稳定。在可穿戴手势识别应用中,器件集成于手指可同步输出电阻变化与发光强度信号,不同弯曲角度($0^\circ \sim 90^\circ$)及多种手势(如数字“1”“2”“3”、握拳等)均呈现可区分的发光响应与电信号特征,实现了形变的可视化与定量化同步监测。Tan 等利用 3D 打印技术构建了具有负泊松比结构的 ZnS:Cu/硅橡胶自供能力致发光器件,并通过硅橡胶封装显著改善了曲面贴合性与发光均匀性,在 10 000 次拉伸循环后仍保持约 70% 的初始亮度^[60](图 12(f))。将该器件集成于手套后,通过将单指与双指弯曲分别编码为摩尔斯电码中的“点”与“划”,成功实现了“UP”、“OK”、“SOS”等指令的水下无线光通信,并在高盐及 7~50 ℃宽温域条件下保持稳定输出,展示了其在复杂水下环境中手势识别与无源通信的可行性与可靠性。

10 结论与展望

本文系统梳理了 ML 材料在触觉传感器件中的研究进展。与以往主要聚焦于力致发光机理、发光材料体系或一般应用的综述不同,本文更加突出力致发光触觉传感器件这一交叉方向的应用导向特征。总体而言,ML 材料能够将机械刺激直接转化为光信号,具备无需复杂电学读出、易于阵列化成像、抗电磁干扰能力强以及天然兼容视觉信息处理等突出优势,在人工皮肤、动态压力成像、笔迹与纹理识别以及人机交互等领域展现出独特潜力。近年来,随着缺陷工程、界面调控、异质结构筑及复合封装等策略的持续发展,ML 材料在发光强度、响应阈值及循环稳定性等关键性能方面不断提升,为高性能触觉器件奠定了坚实的材料基础。同时,比率型、特定波段发光(如日盲紫外与近红外)以及力致消光等材料的引入,有效提高了系统在复杂光照与环境扰动下的信噪比与

抗干扰能力。此外,仿生结构设计、3D打印及微纳结构工程的融合,显著提升了触觉成像分辨率与识别准确性。最后,力-温度、力-湿度等多模态耦合感知的探索,进一步拓展了信息维度与应用边界。总体来看,ML触觉传感器件正由力-光可视化演示逐步迈向可识别、可定量、可交互的实用化体系。

尽管如此,面向实际应用与规模化推广,ML触觉传感技术仍需在材料、器件与系统层面实现协同突破。

(1)可持续力致发光

现有ML响应多为瞬态发光,光学信号持续时间有限,难以满足长时程连续监测需求,尤其在弱信号条件下易受成像环境波动影响。未来需通过精细调控陷阱能级分布、引入能量存储-释放机制以及构建光充电-力致发光耦合体系,实现由瞬态响应向准稳态或可持续发光的转变,从而拓展其在结构健康监测与长期交互记录等场景中的应用潜力。

(2)静态刺激响应能力

当前,ML体系对动态载荷高度敏感,但在静态或准静态条件下普遍缺乏稳定输出,限制了其在持续接触、握持力监测及慢变形感知中的应用。未来可围绕界面电荷累积、压电-光电耦合以及机械诱导载流子缓释等机制,设计对静态刺激敏感的新型ML材料,并结合陷阱态工程与复合结构封装,实现静态载荷下的持续或可读光信号输出,弥补静力检测能力不足。

(3)多模态信号采集与解耦

现有ML触觉传感多集中于单一力学信号,对温度、湿度等环境变量的协同感知及其解耦仍不充分,同时多通道信号间易存在串扰问题。未来可引入光谱、寿命等自参照参数,构建多波段与

多物理场协同感知体系,并结合数据驱动方法与物理模型约束,实现多维信号的高精度解耦与融合解析,从而提升复杂环境下的综合感知能力与可靠性。

(4)系统集成与器件小型化

当前,多数ML触觉系统依赖外部成像设备与复杂光学路径,限制了系统集成度与应用灵活性。未来需推动ML材料与光电探测阵列、柔性电子器件及无线通信模块的深度融合,发展低功耗或自驱动的集成化传感单元,同时通过微结构设计及封装优化,提高器件的柔性、透光性与机械稳定性,以满足可穿戴设备与机器人皮肤对轻量化与高集成度的需求。

(5)统一测试与评价标准

目前,ML触觉传感领域尚缺乏统一的测试规范与评价体系,不同研究之间在激励条件、光信号采集方式及环境参数控制等方面差异较大,导致性能难以横向比较。亟需建立涵盖激励模式、信号采集条件、环境控制、信噪比及稳定性等关键指标的标准化测试体系,形成从材料筛选到器件评价的统一框架,为技术可重复性与工程化应用提供基础支撑。

总而言之,凭借力-光直接转换这一独特机制,ML材料为构建高灵敏、多模态、高分辨的触觉传感系统提供了全新路径。随着可持续发光机制、静态响应能力、多模态解耦策略、系统集成技术及标准化体系的持续突破,ML触觉传感有望在沉浸式人机交互、智能机器人、虚拟现实及先进健康监测等领域实现更广泛的应用与产业化落地。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260107>

参 考 文 献:

- [1] LI S J, WU T, XU J L, *et al.* Biomimetic multimodal tactile sensing enables human-like robotic perception [J]. *Nat. Sens.*, 2026, 1(1): 52-62.
- [2] CHEN Z, OU N, ZHANG X Y, *et al.* Training tactile sensors to learn force sensing from each other [J]. *Nat. Commun.*, 2026, 17(1): 2101.
- [3] WANG C F, DONG L, PENG D F, *et al.* Tactile sensors for advanced intelligent systems [J]. *Adv. Intell. Syst.*, 2019, 1(8): 1900090.
- [4] YU S, PARK T H, JIANG W, *et al.* Soft human-machine interface sensing displays: materials and devices [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(43): 2204964.

- [5] LI X Y, WU Z R, CHEN Z T, *et al.* From touching to seeing: visualized pressure sensing in electronic skins [J]. *Soft Sci.*, 2025, 5(2): 16.
- [6] HE J Q, WEI R L, MA X L, *et al.* Contactless user-interactive sensing display for human-human and human-machine interactions [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(25): 2401931.
- [7] WANG C F, HU H J, PENG D F, *et al.* Soft devices empowered by mechanoluminescent materials [J]. *Soft Sci.*, 2023, 3(4): 39.
- [8] WANG C F, PENG D F, PAN C F. Mechanoluminescence materials for advanced artificial skin [J]. *Sci. Bull.*, 2020, 65(14): 1147-1149.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] WANG X D, ZHANG H L, YU R M, *et al.* Dynamic pressure mapping of personalized handwriting by a flexible sensor matrix based on the mechanoluminescence process [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(14): 2324-2331.
- [12] 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.
- [13] JANG J, KIM H, JI S, *et al.* Mechanoluminescent, air-dielectric MoS₂ transistors as active-matrix pressure sensors for wide detection ranges from footsteps to cellular motions [J]. *Nano Lett.*, 2020, 20(1): 66-74.
- [14] ZHUANG Y X, LI X Y, LIN F Y, *et al.* Visualizing dynamic mechanical actions with high sensitivity and high resolution by near-distance mechanoluminescence imaging [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(36): 2202864.
- [15] CHANG S L, ZHANG K Y, LIU W J, *et al.* Hair-like mechanoluminescent structures with ultralow activation threshold for dynamic force sensing [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(35): 2507634.
- [16] WANG C F, MA R H, PENG D F, *et al.* Mechanoluminescent hybrids from a natural resource for energy-related applications [J]. *InfoMat*, 2021, 3(11): 1272-1284.
- [17] WEI R L, HE J Q, GE S P, *et al.* Self-powered all-optical tactile sensing platform for user-interactive interface [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2023, 8(1): 2200757.
- [18] MA X L, WANG C F, WEI R L, *et al.* Bimodal tactile sensor without signal fusion for user-interactive applications [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(2): 2789-2797.
- [19] HE J Q, WEI R L, GE S P, *et al.* Artificial visual-tactile perception array for enhanced memory and neuromorphic computations [J]. *InfoMat*, 2024, 6(3): e12493.
- [20] 潘鑫, 庄逸熙, 梅乐夫, 等. 力致发光材料机制: 回顾、进展及挑战 [J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(12): 3147-3164.
- PAN X, ZHUANG Y X, MEI L F, *et al.* Mechanism of mechanoluminescent materials: review, progress and challenges [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2022, 50(12): 3147-3164. (in Chinese)
- [21] CHANDRA B P, ELYAS M, MAJUMDAR B. Dislocation models of mechanoluminescence in γ - and X-irradiated alkali halides crystals [J]. *Solid State Commun.*, 1982, 42(10): 753-757.
- [22] 杨苗, 高亚淋, 龙席, 等. 力致发光材料的发光机理及生物医学应用研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(8): 1352-1383.
- YANG M, GAO Y L, LONG X, *et al.* Recent advances of luminescence mechanisms and biomedical applications of mechanoluminescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(8): 1352-1383. (in Chinese)
- [23] 王宇, 索浩, 王锋. 力致发光材料的前沿应用进展 [J/OL]. *发光学报*, [2026-04-16]. <https://cjl.lightpublishing.cn/zh/article/doi/10.37188/CJL.20260074>.
- WANG Y, SUO H, WANG F. Recent progress in frontier applications of mechanoluminescent materials [J/OL]. *Chin. J. Lumin.*, [2026-04-16]. <https://cjl.lightpublishing.cn/zh/article/doi/10.37188/CJL.20260074>. (in Chinese)
- [24] 教宇辰, 王谨, 蔡格梅. 无机应力发光材料的发光特性、发光机理及应用研究进展 [J]. *发光学报*, 2023, 44(6): 942-963.
- AO Y C, WANG J, CAI G M. Advances in luminescence characteristics, luminescence mechanisms and applications of inorganic mechanoluminescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(6): 942-963. (in Chinese)
- [25] MA R H, WANG C F, YAN W, *et al.* Interface synergistic effects induced multi-mode luminescence [J]. *Nano Res.*,

- 2022, 15(5): 4457-4465.
- [26] ZHU M J, LUO J C, LIANG T L, *et al.* Novel red mechanoluminescence in Mn-doped ZnGa₂S₄ crystal phosphors *via* a molten salt shielding method [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(12): 2300517.
- [27] DU J R, WANG T Y, LI Y K, *et al.* Efficient synthesis of quaternary piezo-phonic materials for pressure visualization and E-signature anti-counterfeiting [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 494: 152989.
- [28] LI Y K, DU J R, WANG X M, *et al.* Facile construction of mechanoluminescence heterojunctions facilitating personalized anti-counterfeiting E-signature devices [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 512: 162658.
- [29] WANG Z X, JIN L, TIUKALOVA E, *et al.* Size and structural control of mechanoluminescent ZnS: Mn²⁺ nanocrystals for optogenetic neuromodulation [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(20): 19340-19352.
- [30] PENG S C, XIA P, WANG T, *et al.* Mechano-luminescence behavior of lanthanide-doped fluoride nanocrystals for three-dimensional stress imaging [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(10): 9543-9551.
- [31] RAN P, CAO W X, ZHENG H, *et al.* Intrabacterial nitroreductase-activated imaging and persistently illuminated photodynamic therapy for intracellular infection theranostics [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(38): 2402731.
- [32] XU S X, MENG L K, HU Q, *et al.* Closed-loop control of macrophage engineering enabled by focused-ultrasound responsive mechanoluminescence nanoplatfrom for precise cancer immunotherapy [J]. *Small*, 2024, 20(46): 2401398.
- [33] 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. USA*, 2019, 116(52): 26332-26342.
- [34] 聂君心, 朱来攀, 王中林. 掺杂硫化锌摩擦电致发光薄膜研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(6): 961-980.
NIE J X, ZHU L P, WANG Z L. Progress of doped ZnS films on triboelectrification-induced electroluminescence [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(6): 961-980. (in Chinese)
- [35] ZHAO F Y, SHAO Y H, LIU H Z, *et al.* Self-recoverable and tunable ultra-broadband NIR mechanoluminescence in Cr³⁺-doped gallogermanate material [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 512: 162575.
- [36] LI W H, WU S, REN J, *et al.* Defects in inorganic mechanoluminescent phosphors: insights and impacts [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(40): 2506198.
- [37] FAN Y T, YANG Y L, LI T, *et al.* Enhanced mechanically induced red-light emitting novel mechanoluminescence materials for ultrasonic visualization and monitoring applications [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(18): 5868-5875.
- [38] LI X, WANG X S, HU R, *et al.* Modulating trap levels *via* co-doping Ca²⁺/Si⁴⁺ in LiTaO₃:Pr³⁺ to improve both the intensity and threshold of mechanoluminescence [J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 896: 162877.
- [39] MENG W, CAI P B, FU X Y, *et al.* Sensitive mechanoluminescence from Eu²⁺, Tm³⁺ co-doped Sr₃Al₂O₅Cl₂ phosphors [J]. *J. Lumin.*, 2022, 248: 118983.
- [40] DUVAL A, HOUZOT P, ROCQUEFELTE X, *et al.* Mechanoluminescence of (Eu, Ho)-doped oxynitride glass-ceramics from the BaO-SiO₂-Si₃N₄ chemical system [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123(1): 011905.
- [41] YAN Y J, FANG S F, LI Y Y, *et al.* Trap-regulated highly efficient mechanoluminescence and persistent mechanoluminescence of Ca₂MgSi₂O₇:Eu²⁺ [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(34): 11509-11517.
- [42] WU S, XIAO B L, JIANG D L, *et al.* Realizing near infrared mechanoluminescence switch in LAGO:Cr based on oxygen vacancy [J]. *Small*, 2024, 20(31): 2309034.
- [43] LI L P, LI H M, LIU Y F, *et al.* Persistent- and mechanoluminescence of Er³⁺-doped NaYF₄ for multipurpose use [J]. *Small Methods*, 2025, 9(5): 2401615.
- [44] PAN X, ZHUANG Y X, HE W, *et al.* Quantifying the interfacial triboelectricity in inorganic-organic composite mechanoluminescent materials [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 2673.
- [45] LEE G, SONG S, JEONG W H, *et al.* Interfacial triboelectricity lights up phosphor-polymer elastic composites: unraveling the mechanism of mechanoluminescence in zinc sulfide microparticle-embedded polydimethylsiloxane films [J]. *Small*, 2024, 20(17): 2307089.
- [46] JEONG H I, JUNG H S, DUBAJIC M, *et al.* Super elastic and negative triboelectric polymer matrix for high performance mechanoluminescent platforms [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 854.
- [47] LIU S Q, GUO Y, SONG Z, *et al.* Bright chromium-sensitized lanthanide NIR-II mechanoluminescence in a piezoelectric oxide [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(43): e06957.
- [48] LIU H Z, SHAO Y H, DOU C, *et al.* Tuning mechanoluminescence from red to near-infrared light in CaZnOS: Mn²⁺ [J].

- Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(14): 2403472.
- [49] 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.
- [50] CAO R, YAN Y J, ZHOU B, *et al.* Interfacial high-energy driven resultant mechanoluminescence: spectral evidence and promising applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, DOI: 10.1002/adfm.76794.
- [51] LI L P, CAI C Y, LV X H, *et al.* Stress-triggered mechanoluminescence in ZnO-based heterojunction for flexible and stretchable mechano-optics [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(32): 2301372.
- [52] YANG X X, LIU R, XU X H, *et al.* Effective repeatable mechanoluminescence in heterostructured $\text{Li}_{1-x}\text{Na}_x\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$ [J]. *Small*, 2021, 17(46): 2103441.
- [53] WANG C, SHI H Z, LI W H, *et al.* Interface-mediated mechanoluminescence enhancement from heterojunction phosphors: experiment and theory [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(25): 30891-30901.
- [54] WU S, WANG S Y, SHAO Z G, *et al.* Self-powered near-infrared mechanoluminescence through MgO/MgF₂ piezo-phonic heterojunctions [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 8912.
- [55] JI H Z, TANG Y T, SHEN B, *et al.* Skin-driven ultrasensitive mechanoluminescence sensor inspired by spider leg joint slits [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(50): 60689-60696.
- [56] SOU K W, CHAN W S, LEI K C, *et al.* A bio-inspired event-driven mechanoluminescent visuotactile sensor for intelligent interactions [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(20): 2420872.
- [57] LIU J L, WU Z, TAO Y, *et al.* Green-orange bi-color switchable mechanoluminescent fiber of okra-like structure for visual signaling [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(6): e15254.
- [58] ZHAO J Y, SONG S, MU X, *et al.* Programming mechanoluminescent behaviors of 3D printed cellular structures [J]. *Nano Energy*, 2022, 103: 107825.
- [59] GUO L C, XIA P, WANG T, *et al.* Visual representation of the stress distribution with a color-manipulated mechanoluminescence of fluoride for structural mechanics [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(49): 2306875.
- [60] SUN X L, LING S H, QIN Z H, *et al.* 3D printing of auxetic self-powered mechanoluminescent photonic skins for underwater communication and safety monitoring [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(33): 2502743.
- [61] DUAN S L, SANG M, CHEN H, *et al.* Shear stiffening-based mechanoluminescent device for impact-thermal coupling protection and impact visualization [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(48): 2411821.
- [62] SON C, KIM J, KANG D, *et al.* Behavioral biometric optical tactile sensor for instantaneous decoupling of dynamic touch signals in real time [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 8003.
- [63] WANG Z X, TAI Y Y, YE Z Y, *et al.* Integration of ZnS:Mn²⁺ microparticles into electrospun PVDF-based nanofibers for enhanced mechanoluminescence [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(51): 2410358.
- [64] ZHOU M X, LI P L, MENG X, *et al.* Local electric field-induced mechanoluminescence caused by disordered occupation of Mg²⁺ and Ga³⁺: tunable luminescence performance and its applications [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 505: 159500.
- [65] CAI Y Y, CHANG J Q, ZHANG J, *et al.* Dual-window broadband near-infrared mechanoluminescence in MgO-based phosphors [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(13): e22739.
- [66] WANG W X, WANG S W, GU Y, *et al.* Contact-separation-induced self-recoverable mechanoluminescence of CaF₂:Tb³⁺/PDMS elastomer [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 2014.
- [67] HE Y W, WANG J, FANG S F, *et al.* Intense and repeatable orange mechanoluminescence of Mn²⁺ activated CaGa₄O₇ for visualized mechanics sensing [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(13): 6588-6597.
- [68] WU S, WANG Y Z, XIONG P X. Forecasting mechanoluminescence self-recovery stability *via* optically-stimulated luminescence [J]. *Adv. Powder Mater.*, 2026, 5(4): 100390.
- [69] FANG S F, ZHAO L S, HE X, *et al.* Highly repeatable and cyclically stable mechanoluminescence of the flexible composite elastomer [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(32): 2505071.
- [70] YAN Y J, ZHOU B, GUO Z Y, *et al.* Interfacial interaction modulated radiation defects for self-charging persistent mechanoluminescence [J]. *Small*, 2025, 21(39): e06203.
- [71] 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.
- [72] ZHANG P, TENG Z W, ZHAO L, *et al.* Multi-dimensional mechanical mapping sensor based on flexoelectric-like and

- optical signals [J]. *Adv. Sci.*, 2023, 10(19): 2301214.
- [73] TU D, XU C N, YOSHIDA A, *et al.* LiNbO₃:Pr³⁺: a multipiezo material with simultaneous piezoelectricity and sensitive piezoluminescence [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(22): 1606914.
- [74] YE Z J, FANG S Q, ZHANG T C, *et al.* Ultrasensitive Pa-level persistent mechanoluminescent material toward all-optical neural synapses for tactile-visual information recognition and memory [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(3): e14909.
- [75] YUAN J Y, YANG Y L, YANG X C, *et al.* Regulating the trap distribution to achieve high-contrast mechanoluminescence with an extended saturation threshold through co-doping Nd³⁺ into CaZnOS:Bi³⁺,Li⁺ [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(24): 7689-7696.
- [76] WANG X S, XIAO Y, XIONG P X, *et al.* Self-recoverable broadband near infrared mechanoluminescence from Ba-Ga₁₂O₁₉:Cr³⁺ using a multi-site occupation strategy [J]. *Mater. Horiz.*, 2025, 12(11): 3815-3826.
- [77] WANG H, ZHAO T T, LI M, *et al.* Oscillatory mechanoluminescence of Mn²⁺-doped SrZnOS in dynamic response to rapid compression [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 548.
- [78] ZHANG L, SHI K Y, WANG Y L, *et al.* Unraveling the anomalous mechanoluminescence intensity change and pressure-induced red-shift for manganese-doped zinc sulfide [J]. *Nano Energy*, 2021, 85: 106005.
- [79] LUO J C, REN B Y, ZHANG X H, *et al.* Modulating smart mechanoluminescent phosphors for multistimuli responsive optical wood [J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(1): 2305066.
- [80] MA Z D, FANG S F, ZHOU B, *et al.* Trap-controlled, recoverable, and persistent mechanoluminescence for collision early-warning and mechanics displaying applications [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2025, 10(2): 2401079.
- [81] NIE X L, WANG C F, LU X Y, *et al.* Circularly polarized mechanoluminescence for force-insensitive optical information decryption [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, 36(29): e26708.
- [82] LI S J, GUO C Q, GONG J H, *et al.* SandWorm: event-based visuotactile perception with active vibration for screw-actuated robot in granular media [J]. *IEEE Trans. Robot.*, 2026, 42: 1008-1027.
- [83] ZHANG P F, WU Y T, GUO Z Y, *et al.* Design of visualized ratiometric mechanoluminescent materials for high-resolution pressure sensing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(2): 2412911.
- [84] WANG T L, ZHANG P F, XIAO J Q, *et al.* Trap assisted dynamic mechanoluminescence toward self-referencing and visualized strain sensing [J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(3): 2410673.
- [85] YANG Y L, YANG X C, YUAN J Y, *et al.* Time-resolved bright red to cyan color tunable mechanoluminescence from CaZnOS:Bi³⁺, Mn²⁺ for anti-counterfeiting device and stress sensor [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(16): 2100668.
- [86] ZHOU S, CHENG Y, XU J, *et al.* Ratiometric mechanoluminescence of double-activator doped phosphatic phosphors: color-resolved visualization of stress-sensing and quantified evaluation for sensing performance [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(52): 2208919.
- [87] LI L P, LI P, LV X H, *et al.* Ultraviolet-C mechanoluminescence from NaYF₄:Pr³⁺ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(10): 101108.
- [88] LV X L, DUAN T Y, FANG S F, *et al.* Self-powered mechanoluminescent elastomer for solar-blind ultraviolet emission [J]. *Light Sci. Appl.*, 2026, 15(1): 61.
- [89] CAI C Y, LI L P, LV X H, *et al.* Multi-stimulated far-UVC luminescence for solar-blind imaging [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 6224.
- [90] WANG Y Z, REN B Y, ZHENG W L, *et al.* Synthesis of SrZnOSe crystals with low phonon energy for enhancing near-infrared mechanoluminescence [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(50): 2406899.
- [91] DOU C, GAO J G, SONG Z, *et al.* Multimodal stimuli-responsive luminescence and photochromism of Cr³⁺-doped gallate β-alumina [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(44): 2508216.
- [92] TU D, XU C N, FUJIO Y, *et al.* Phosphorescence quenching by mechanical stimulus in CaZnOS:Cu [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(1): 011908.
- [93] TU D, XU C N. Lifetime-based measurement of mechanical load using mechanical-quenching of CaZnOS:Cu [J]. *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 2017, 125(6): 438-440.
- [94] KIM S J, YANG F, JUNG H S, *et al.* Mechanoluminescence and mechanical quenching of afterglow luminescent particles for wearable photonic display [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(23): 2314861.
- [95] HUANG X R, YANG H, WEI Y, *et al.* Dynamic and static stress sensing based on mechanical quenching phenomenon

- from CaZnOS:Cu⁺ [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(9): 2402010.
- [96] MA X L, WANG J X, LI J, *et al.* Visually encoded mechanoluminescence through hierarchical structuring with microscale patterns and nanoscale features [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 9550.
- [97] KIM N W, BANDYOPADHYAY S, KIM J Y, *et al.* Dual-functional alumina additive enabling efficient, volumetric mechanoluminescence for nighttime safety footwear [J]. *Adv. Mater.*, 2026, DOI: 10.1002/adma.73936.
- [98] HOU B, YI L Y, LI C, *et al.* An interactive mouthguard based on mechanoluminescence-powered optical fibre sensors for bite-controlled device operation [J]. *Nat. Electron.*, 2022, 5(10): 682-693.
- [99] WANG W J, WANG Y F, XIANG L, *et al.* A biomimetic nociceptor using centrosymmetric crystals for machine intelligence [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(7): 2310555.
- [100] TIMILSINA S, JO C W, LEE K H, *et al.* Dual-modal sensing skin adaptive to daylight, darkness, and ultraviolet light for simultaneous full-field deformation measurement and mechanoluminescence responses [J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(2): 2409384.
- [101] GUO J X, GUO F, YANG H, *et al.* Force-triggered non-volatile multilevel mechano-optical memory system for logic computation and image recognition [J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(14): 2413409.
- [102] YU Y J, XU H B, SONG E H, *et al.* Electroluminescence, mechanoluminescence, and triboelectric from superior multimode systems based on flexible hydrogels for human motion sensing [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2024, 9(4): 2301628.
- [103] XIE Z L, XUE Y F, ZHANG X H, *et al.* Isostructural doping for organic persistent mechanoluminescence [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 3668.
- [104] ZHENG T, RUNOWSKI M, MARTIN I R, *et al.* Mechanoluminescence and photoluminescence heterojunction for superior multimode sensing platform of friction, force, pressure, and temperature in fibers and 3D-printed polymers [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(40): 2304140.
- [105] CHEN C J, ZHUANG Y X, LI X Y, *et al.* Achieving remote stress and temperature dual-modal imaging by double-lanthanide-activated mechanoluminescent materials [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(25): 2101567.
- [106] DING Y C, SO B, CAO J K, *et al.* Ultrasound-induced mechanoluminescence and optical thermometry toward stimulus-responsive materials with simultaneous trigger response and read-out functions [J]. *Adv. Sci.*, 2022, 9(23): 2201631.
- [107] ZHANG J C, PAN C, ZHU Y F, *et al.* Achieving thermo-mechano-opto-responsive bitemporal colorful luminescence via multiplexing of dual lanthanides in piezoelectric particles and its multidimensional anticounterfeiting [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(49): 1804644.
- [108] BARZOWSKA J, HAIDER S S, ZHENG T, *et al.* Turning sound and force into light with AlN: Mn²⁺ mechanoluminescence [J]. *Sci. Adv.*, 2026, 12(26): ead5469.
- [109] 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.
- [110] LU Z R, LI W K, ZHU L M, *et al.* Self-healing electro-optical skin for dual-mode human-machine interaction [J]. *Nano Energy*, 2025, 135: 110617.
- [111] YANG H, WEI Y, JU H N, *et al.* Microstrain-stimulated elastico-mechanoluminescence with dual-mode stress sensing [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(26): 2401296.
- [112] SU K, SZYMCAK M, MEI L F, *et al.* Spectro-temporal ratiometric strategy for thermally invariant optical manometry [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(13): e22909.
- [113] LYU T S, DORENBOS P, XIONG P X, *et al.* LiTaO₃:Bi³⁺, Tb³⁺, Ga³⁺, Ge⁴⁺: a smart perovskite with high charge carrier storage capacity for X-ray imaging, stress sensing, and non-real-time recording [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(39): 2206024.
- [114] GUO J X, GUO F, ZHAO H J, *et al.* In-sensor computing with visual-tactile perception enabled by mechano-optical artificial synapse [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(14): 2419405.
- [115] ZHANG Y R, MA L R, WANG K F, *et al.* Triboluminescence modulated by humidity [J]. *J. Lumin.*, 2017, 182: 22-28.
- [116] SUO H, LI L, SUN J, *et al.* A self-powered tactile sensor resistant to environmental interference [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(6): e16596.
- [117] LIU Y, SUN Y, JIANG C L, *et al.* Bio-inspired multi-point positioning fiber array sensor with epidermis-dermis inter-

locking structure [J]. *Opt. Laser Technol.* 2025, 192: 113938.

[118] LI C H, HE Q G, WANG Y, *et al.* Highly robust and soft biohybrid mechanoluminescence for optical signaling and illumination [J]. *Nat. Commun.* , 2022, 13(1): 3914.

[119] LI C H, SCHRAMMA N, WANG Z J, *et al.* Ultrasensitive and robust mechanoluminescent living composites [J]. *Sci. Adv.* , 2023, 9(42): eadi8643.

[120] ZHAO Y, GAO W C, DAI K, *et al.* Bioinspired multifunctional photonic-electronic smart skin for ultrasensitive health monitoring, for visual and self-powered sensing [J]. *Adv. Mater.* , 2021, 33(45): 2102332.



李祖刚(1998-),男,云南曲靖人,博士研究生,2024年于昆明理工大学获得硕士学位,主要从事力致发光材料与器件的研究。
E-mail: 2450012001@mails. szu. edu. cn



王春枫(1989-),男,河南商丘人,博士,研究员,2019年于郑州大学获得博士学位,主要从事光电功能半导体材料与器件方面的研究。
E-mail: cfwang@szu. edu. cn