

## 无机紫外光致发光研究进展

蔡重阳, 范 萱, 王 泽, 李磊朋\*, 杨艳民\*

(河北大学 物理科学与技术学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 力致发光是指某些材料体系在受到外部刺激(如挤压、弯曲、拉伸、冲击或刮擦)时能够发光的一种现象,在应力传感、防伪加密、生物组织成像以及健康结构监测等领域有着潜在应用价值。目前已有多种无机力致发光体系被成功开发,尤其是可见和近红外波段已经被大家广泛研究。但这些波段和太阳光谱严重重叠,这限制了其在特定场景中的应用潜力。相比之下,紫外波段(200~400 nm)具有独特优势,例如:光子能量较高,尤其深紫外波段和地球表面太阳光谱几乎无重叠,使得深紫外光致发光具备超高信噪比,因此在隐蔽通讯、特殊标记、健康结构监测等领域有着不可替代的应用价值。基于此,本文综述了无机紫外波段力致发光的研究进展,深入探究了其发展历程、应用价值以及未来研究方向,为该方向进一步发展提供参考。

**关键词:** 力致发光; 紫外; 日盲; 自恢复; 陷阱

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260136

CSTR: 32170.14.CJL.20260136

## Research Progress on inorganic Ultraviolet Mechanoluminescence

CAI Chongyang, FAN Xuan, WANG Ze, LI Leipeng\*, YANG Yanmin\*

(School of Physics, Hebei University, Baoding 071000, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: lpl@hbu.edu.cn; yangym@hbu.edu.cn

**Abstract:** Mechanoluminescence (ML) refers to a phenomenon where certain material systems emit light when subjected to external mechanical stimuli (such as compression, bending, stretching, impact or scratching), and it holds great potential for applications in stress sensing, anti-counterfeiting encryption, biological tissue imaging, and structural health monitoring. A variety of inorganic ML systems have been successfully developed to date, and the visible and near-infrared bands in particular have been extensively investigated. However, the severe overlap between these bands and the solar spectrum limits their application potential in specific scenarios. In contrast, the ultraviolet (UV) spectral range (200 - 400 nm) features unique advantages: for instance, it has high photon energy, especially the deep UV band shows no overlap with the solar spectrum at all, endowing UVC ML with an ultra-high signal-to-noise ratio. Therefore, it has irreplaceable application value in covert communication, special marking, structural health monitoring and other fields. Based on this, this review summarizes the research progress in inorganic UV ML, delves into its developmental history, application value and future research directions, and thus provides a reference for the further advancement of this research field.

**Keywords:** mechanoluminescence; ultraviolet; solar-blind; self-recoverable; trap

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(12374373)、(12474401); 内蒙古自治区科技创新能力提升计划项目(2026SCXHZ0173); 河北大学多学科交叉项目(DXK202301); 河北省教育厅在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZBS2025014)

National Natural Science Foundation of China (12374373)、(12474401); the Inner Mongolia Autonomous Region Science and Technology Plan Project (2026SCXHZ0173); Natural Science Interdisciplinary Research Program of Hebei University (DXK202301); Postgraduate Innovation Capacity Training Fund Project of Hebei Provincial Department of Education (CXZZ-BS2025014)

## 1 引 言

发光材料在人类的科技发展和日常生活中都扮演着重要角色,多种发光形式被相继开发并广泛研究,包括电致发光、光致发光、余辉发光以及力致发光等<sup>[1-7]</sup>。其中力致发光能将自然界的机械能(挤压、磕碰、摩擦等多种形式的机械能)转换为光能,这种特殊的能量转换方式使得力致发光材料在应力传感、防伪加密、生物医学等领域都有着广泛的应用前景,因此受到广泛关注<sup>[8-16]</sup>。特别值得注意的是,紫外光致发光材料,尤其是紫外C(UVC, 200 - 280 nm)波段力致发光具有独特的日盲特性,使其在紫外通讯、全天候结构健康监测等特殊应用中具有不可替代的价值<sup>[17-20]</sup>。

力致发光起源可追溯到远古时期,人类的祖先用燧石敲打取火时看到的火花,其实就是既发光又散热的一种现象。1605年,英国科学家弗朗西斯·培根在用小刀刮硬糖时观察到了发光,一般认为这是最早有关力致发光的文献记载<sup>[21]</sup>。但是在随后的几百年里,由于受限于仪器制约,该方向进展缓慢。直到1999年日本产业技术综合研究所的徐超男团队发现了弹性力致发光材料ZnS:Mn和Sr<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu,该类材料在连续施加压力的同时会产生明亮且可恢复的力致发光,为应用提供了可能,也标志着力致发光材料研究进入了新阶段<sup>[22, 23]</sup>。随后二十多年里,科研人员进行了大量探索,发现了诸多诸如硫氧化物(CaZnOS:Ln、SrZnOS:Ln、Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Ln等)<sup>[24-27]</sup>、铌酸盐(LiNbO<sub>3</sub>:Pr、Sr<sub>2</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:Pr、MgNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>:Cr等)<sup>[28-30]</sup>、镓酸盐(ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Cr、LiGa<sub>5</sub>O<sub>8</sub>:Pr、CaGa<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Ln等)<sup>[31-33]</sup>、铝酸盐(Ca-LaAl<sub>3</sub>O<sub>7</sub>:Tb、LaAlO<sub>3</sub>:Cr、Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce等)<sup>[34-36]</sup>、氟化物(MgF<sub>2</sub>:Ln、CaF<sub>2</sub>:Ln、NaYF<sub>4</sub>:Ln等)<sup>[37-39]</sup>等系列力致发光材料。对于力致发光而言,发光波段、亮度、敏感度、重复性以及自恢复性能等均为其关键性能指标。其中,亮度、敏感度、重复性以及自恢复性能直接决定了样品对外力的检测能力,而发光波段则直接决定了材料的应用场景。

截至目前,大多力致发光位于可见波段和近红外波段,例如ZnS:Cu(绿光)<sup>[40]</sup>、CaZnOS:Ln(380 - 1540 nm)<sup>[25, 26]</sup>、SrZnOS:Ln(420 - 1640 nm)<sup>[24]</sup>、Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Ln(380 - 1540 nm)<sup>[27]</sup>、SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Ln(375 - 1540 nm)<sup>[41]</sup>、Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ln(480 - 725 nm)<sup>[42]</sup>、Ca-Ga<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Ln(420 - 910 nm)<sup>[33]</sup>、Ca<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:Ln(350 - 800

nm)<sup>[43]</sup>等材料体系。紫外光区域(200 - 400 nm)的材料体系相对匮乏,这极大限制了力致发光材料在某些特殊领域的应用。

紫外光可划分为三个波段:紫外A(UVA, 315 - 400 nm)、紫外B(UVB, 280 - 315 nm)和紫外C(UVC, 200 - 280 nm)。此外,100 - 200 nm波段为真空紫外(VUV)波段,该波段需在真空环境中传输,故此处不作讨论。其中,UVA能量最低,但是穿透力最强,常用于光固化、光刻等技术。UVB能量高于UVA,对于植物育种、水质净化,昆虫趋光等具有重要作用。UVC波段能量更高,还可细分为近UVC光(230 - 280 nm)和远UVC光(200 - 230 nm),太阳光中含有UVC光,但由于臭氧层对UVC光的吸收,导致地球表面无UVC光背景噪声。因此我们可以将其应用在紫外通讯、健康结构监测等领域,同时该波段具有极强的杀菌消毒能力<sup>[44-47]</sup>。

本文将聚焦无机紫外光致发光的研究进展,拟重点介绍力致发光材料的分类、现有机理模型以及紫外光致发光材料的发展历史、研究现状和应用,最后还将总结紫外光致发光材料目前存在的主要问题和未来研究方向。

## 2 力致发光材料的分类和研究机理

### 2.1 力致发光的分类

在20世纪90年代末,有研究人员估计,大约36%的无机材料和50%的晶体材料均可实现力致发光,但绝大多数都为断裂发光(如火山爆发、石头碰撞等)<sup>[48]</sup>。随着力致发光体系的不断拓展,根据形变类型和可逆性可将力致发光分为三类,如图1所示:1、形变力致发光;2、破坏力致发光;3、摩擦力致发光。其中形变力致发光按恢复特性可进一步细分为弹性形变力致发光和塑性形变力致发光。摩擦力致发光则可按作用机制分为摩擦电诱导发光、摩擦化学诱导发光和摩擦热诱导发光。形变力致发光中的弹性形变力致发光是指材料在受力后仅发生弹性形变,外力撤去后可恢复至初始状态的力致发光现象。而塑性形变力致发光与破坏力致发光则是指材料在受力后发生塑性形变或结构破坏,无法恢复至初始状态的力致发光现象<sup>[9, 49, 50]</sup>。在各类力致发光材料中,弹性力致发光材料和摩擦力致发光材料因具有在连续的机械作用下可恢复的优异特性,成为目前研究重点,本文也将主要围绕该类力致发光材料展开介绍。

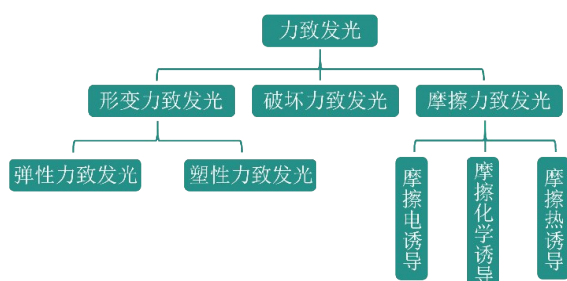


图1 力致发光分类

Fig.1 Classification of ML

目前仅仅是根据发光现象进行了以上分类,力致发光的过程还非常复杂,例如可能某一种材料存在着多种发光类型的共同作用。比如在对某一样品施加压力过程中,颗粒之间不仅存在相互挤压的压力,还不可避免的存在相对位移,从而产生摩擦效应,且当施加压力足够大时,还可能导致材料结构发生破坏。因此,目前研究较为广泛的力致发光材料,主要是因为其在连续机械刺激下可以实现重复发光的一类材料。

## 2.2 力致发光机理

深入探究发光机理不仅有助于理解力致发光现象的本质,还能为开发性能更优异的力致发光材料提供理论指导。经过多年的发展,研究者们基于不同体系的力致发光材料提出了不同的机理模型。对于可恢复型力致发光,目前比较清晰的两种机理包括压电效应和摩擦效应,每一种效应的力致发光还可细分为“陷阱控制型”和“非陷阱控制型”。二者核心差异为:非陷阱控制型无需预充能,样品受力后直接产生力致发光,随着施加压力的增加强度保持稳定且具备自恢复特性。陷阱控制型力致发光依赖于预辐照充能与陷阱载流子的缓慢释放,通常需要紫外或高能射线预辐照,随着施加力的次数增加,发光强度逐渐衰减,且无力致发光后需要重新进行辐照。

在具体某一个力致发光材料体系中,通常至少有一种机理能够很好地解释其发光现象。但是在某些情况下,多种机理可能会共同影响材料的发光性能,下文将围绕力致发光机理展开详细介绍。

## 1 压电型力致发光

在力致发光研究早期,徐超男团队基于 ZnS: Mn<sup>2+</sup> 的研究发现,其电致发光光谱和力致发光光谱高度一致,且 ZnS 属于非中心对称结构,具有压电效应,基于此提出了压电诱导电致发光机

制<sup>[22,23]</sup>。2010年,王旭升团队通过研究三明治结构的 (Ba,Ca)TiO<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup> 双相陶瓷的力致发光特性,详细对比了其力致发光和电致发光特性。当对该基质材料施加应力  $\geq 500$  N 时,压电相产生的压电场强度经计算可达 20 kV/cm,远超电致发光阈值 (12 - 15 kV/cm)。而当施加应力强度  $< 500$  N 时,压电场强度未达到电致发光阈值,这难以解释低应力下仍可出现力致发光的现象,而该电场可促使陷阱中存储的电荷脱陷,因此提出了电诱导载流子脱陷模型<sup>[51]</sup>。2015年,王中林团队发现,具有高压电系数的纤锌矿结构 ZnS:Mn<sup>2+</sup> 的力致发光强度比压电系数较低的闪锌矿 ZnS:Mn<sup>2+</sup> 高 20 倍,进一步验证了压电效应在力致发光过程中起着举足轻重的作用<sup>[52]</sup>。

除此之外,少量中心对称结构的材料体系在发生弹性形变时同样可产生力致发光现象。比如 BaZnOS:Mn<sup>2+</sup><sup>[53]</sup>、CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>:Pr<sup>3+</sup><sup>[54]</sup>、MgGeO<sub>3</sub>:Mn<sup>2+</sup><sup>[55]</sup> 等。然而中心对称结构本身不具备压电性,因此研究人员提出,材料在制备与掺杂过程中会形成缺陷或引入杂质,这些缺陷和杂质会改变晶体的局部结构,打破缺陷区域的局域对称性,从而产生压电效应。

## 2 摩擦型力致发光

部分材料在发生形变时并不会产生力致发光现象,只有与不同有机弹性基体材料(如 PDMS)复合后,在拉伸过程中才会产生力致发光。并且,其力致发光强度高度依赖所复合的弹性体。例如 Sr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>5</sub>Cl<sub>2</sub>:Ln<sup>3+</sup><sup>[56]</sup>、Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup><sup>[35,42]</sup>、CaZnGe<sub>2</sub>O<sub>6</sub>:Mn<sup>2+</sup><sup>[57]</sup>、BaMgAl<sub>12</sub>O<sub>17</sub>:Eu<sup>2+</sup><sup>[58]</sup> 等。

在摩擦效应导致的力致发光机理当中,同样可分为陷阱相关和与陷阱无关两种类型。与陷阱相关的模型中,徐超男团队发现 ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Mn<sup>2+</sup> 在摩擦作用下可产生力致发光。该研究通过控制还原温度实现对陷阱浓度的调控,结合热释光和力致发光强度的关联进行分析。发现力致发光强度随还原温度的变化趋势和热释光强度一致,且通过紫外光预辐照后可提升力致发光强度,明确了陷阱的作用。同时研究发现,电致发光光谱和力致发光光谱一致,基于以上发现,提出了该发光过程为摩擦起电产生的局部电场激发陷阱中捕获的载流子,从而产生电致发光的机理模型<sup>[65]</sup>。王赵锋团队基于 Sr<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:Eu<sup>2+,3+</sup>,Y<sup>3+</sup> 验证了陷阱对于摩擦诱导力致发光的作用。Y<sup>3+</sup> 掺杂为 Sr<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 晶格引入深浅

不同的电子陷阱,使其成为载流子的存储位点<sup>[66]</sup>。

与陷阱无关的力致发光在近几年得到了广泛研究,其发光过程通过机械摩擦产生摩擦电、接触起电或声子辅助能量转移,直接激发发光中心产生电子跃迁。在该过程中,发光强度与载流子的浓度无关,且加热清除陷阱中载流子后发光强度并无衰减。张加驰团队早期基于  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  提出了非陷阱、非压电型力致发光机理,该材料为立方中心对称结构,无压电性。通过建立接触带电电子云模型,明确了其发光是由摩擦起电导致的。颗粒与 PDMS 复合后,在受到拉伸以及摩擦时导致 PDMS 界面与颗粒产生相对位移,改变了样品和 PDMS 表面的电子云重叠程度。这种界面相互作用产生接触起电并释放能量,直接激发  $\text{Ce}^{3+}$  离子产生  $5d \rightarrow 4f$  的特征跃迁。热释光测试证实,该发光过程与材料中的陷阱无关<sup>[35,42]</sup>。王赵锋团队通过  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_5\text{Cl}_2:\text{Ln}^{2+,3+}$  体系,提出通过力学刺激(拉伸、摩擦等)导致的界面摩擦电诱导电子轰击模型。该过程同样无陷阱参与,只有与 PDMS 等弹性体结合,材料颗粒与聚合物链的界面产生摩擦,才会产生力致发光。PDMS 介质会捕获电子形成负电势,通过在摩擦电场中加速的电子轰击发光中心产生发光<sup>[56]</sup>。

总之,目前对于力致发光机理的解释目前正在逐步完善,紫外光致发光机理目前也沿用以上提到的力致发光机理模型进行解释。

### 3 紫外光致发光发展历史及研究现状

早期的力致发光主要集中在可见区域,包括  $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$  (黄色)和  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  (绿色)<sup>[22,23]</sup>。随着应用的需求,力致发光波段逐渐拓展到近红外和紫外区域。图 2 为紫外光致发光材料的发展简史,列举了一些代表性的工作,表 1 总结了近些年所报道的紫外光致发光材料。从表中可以看到,目前紫外光致发光材料的基质体系主要包括含氧酸盐、卤化物、硫氧化物等类型。其中,可实现紫外光致发光材料的含氧酸盐基质有石榴石结构 ( $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+},\text{Gd}^{3+}$ 、 $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+},\text{Gd}^{3+}$ )、焦磷酸盐结构 ( $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Ce}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ )、硼酸盐结构 ( $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ ) 等(图 3a-c)。在卤化物体系中,除了常见的金红石结构、萤石结构(如  $\text{MgF}_2$ 、 $\text{SrF}_2$ )外(图 3d 和 3e),研究人员同时在卤化物双钙钛矿材料  $\text{Cs}_2\text{NaScCl}_6:\text{Sb}^{3+}$  中实现了 UVA 力致发光(图 3f),为紫外光致发光材料的设计提供了新的思路。从合成方法来看,高温固相法是紫外光致发光材料最常用的合成方法,适用于氧化物、硫氧化物、氟化物等绝大多数基质体系。而其他合成方法如水热法、燃烧合成法仅分别在卤化物钙钛矿材料 ( $\text{Cs}_2\text{NaScCl}_6$ ) 和磷酸盐体系 ( $\text{Ca}_9\text{Bi}(\text{PO}_4)_7$ ) 中得到了应用。从发光中心的探索方向来看,早期的紫外光致发光材料主要以  $\text{Ce}^{3+}$  为发光中心,后期逐渐拓展到其他发光中心,包括  $\text{Gd}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$  和  $\text{Bi}^{3+}$  离子等。

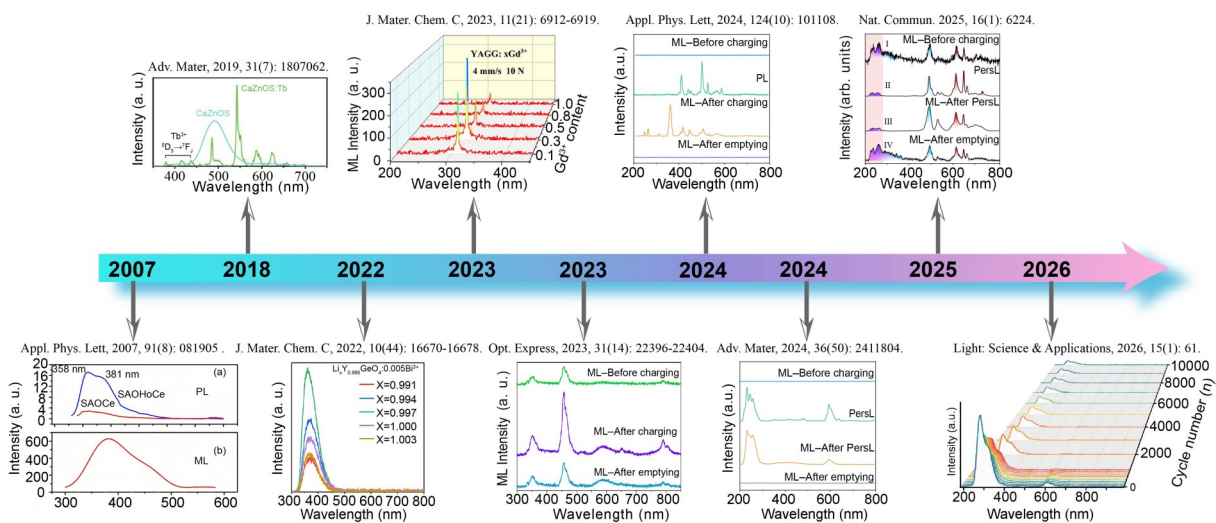


图 2 紫外光致发光材料的发展历史<sup>[17, 18, 26, 59-64]</sup>

Fig.2 Development history of ultraviolet ML materials

2007年首次在  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+},\text{Ho}^{3+}$  中实现了紫外光致发光,发光来源于  $\text{Ce}^{3+}$  的  $5d \rightarrow$

$4f$ , 峰值位于  $375\text{ nm}$ , 属于 UVA 波段(图 4a)<sup>[59]</sup>。随后的紫外光致发光研究多围绕  $\text{Ce}^{3+}$  离子展开。直

表1 紫外光致发光材料对比

Tab. 1 Comparison of UV mechnoluminescence compound

年份	基质材料	掺杂稀土离子	合成方法	力致发光峰值 (nm)	自恢复 (是/否)	预辐照 (需要/不需要)	参考文献
2007	$\text{SrAl}_2\text{O}_4$	$\text{Ce}^{3+}, \text{Ce}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$	高温固相法	375	-	不需要	[59]
2013	$\text{SrMgSi}_2\text{O}_6/\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	$\text{Ce}^{3+}, \text{Ce}^{3+}, \text{Er}^{3+}$	高温固相法	349, 371	-	不需要	[67]
2016	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	$\text{Ce}^{3+}$	燃烧合成法	400	否	需要	[68]
2016	$\text{SrMgAl}_{10}\text{O}_{17}$	$\text{Ce}^{3+}$	高温固相法	400	否	需要	[69]
2018	$\text{CaZnOS}$	$\text{Tb}^{3+}$	高温固相法	385	是	不需要	[26]
2022	$\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$	$\text{Ce}^{3+}$	高温固相法	327	是	不需要	[70]
2022	$\text{Ca}_9\text{Bi}(\text{PO}_4)_7$	$\text{Ce}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$	高温固相法	356	是	不需要	[71]
2022	$\text{LiYGeO}_4$	$\text{Bi}^{3+}$	高温固相法	355	否	需要	[60]
2023	$\text{MgF}_2$	$\text{Tm}^{3+}$	高温固相法	292, 350	是	不需要	[62]
2023	$\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$	$\text{Gd}^{3+}, \text{Pr}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$	高温固相法	313, 306	是	不需要	[61]
2024	$\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$	$\text{Ce}^{3+}$	高温固相法	339	是	不需要	[72]
2024	$\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$	$\text{Ce}^{3+}$	高温固相法	350, 385	否	不需要	[43]
2024	$\text{NaYF}_4$	$\text{Pr}^{3+}$	高温固相法	250, 272, 338	否	需要	[63]
2024	$(\text{Ca}, \text{Sr})_8\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{28}$	$\text{Ce}^{3+}$	高温固相法	390	否	需要	[73]
2025	$\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$	$\text{Pr}^{3+}$	高温固相法	314	是	不需要	[74]
2025	$\text{Cs}_2\text{NaScCl}_6$	$\text{Sb}^{3+}$	水热法	370	否	不需要	[75]
2025	$\text{Sr}_8\text{MgCe}(\text{PO}_4)_7$	Matrix	高温固相法	350 - 400	是	不需要	[76]
2025	$\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$	$\text{Pr}^{3+}$	高温固相法	230, 245, 258	否	需要	[64]
2025	$\text{SrF}_2$	$\text{Pr}^{3+}, \text{Ce}^{3+}, \text{Gd}^{3+}, \text{Tm}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$	高温固相法	222 - 400	是	不需要	[17]
2025	$\text{NaYGeO}_4$	$\text{Bi}^{3+}$	高温固相法	325 - 525	否	需要	[77]
2025	$\text{MgF}_2$	Matrix	高温固相法	300 - 400	是	不需要	[78, 79]
2025	$\text{CaY}_2\text{Ge}_4\text{O}_{12}$	$\text{Bi}^{3+}$	高温固相法	384	否	需要	[80]
2025	$\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7$	$\text{Ce}^{3+}$	高温固相法	340	是	不需要	[20]
2025	$\text{BaLaGa}_3\text{O}_7$	$\text{Bi}^{3+}$	高温固相法	380 - 500	否	不需要	[81]
2026	$\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2$	$\text{Pr}^{3+}$	高温固相法	272	是	不需要	[18]
2026	$\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{Pr}^{3+}$	高温固相法	264	是	不需要	[19]

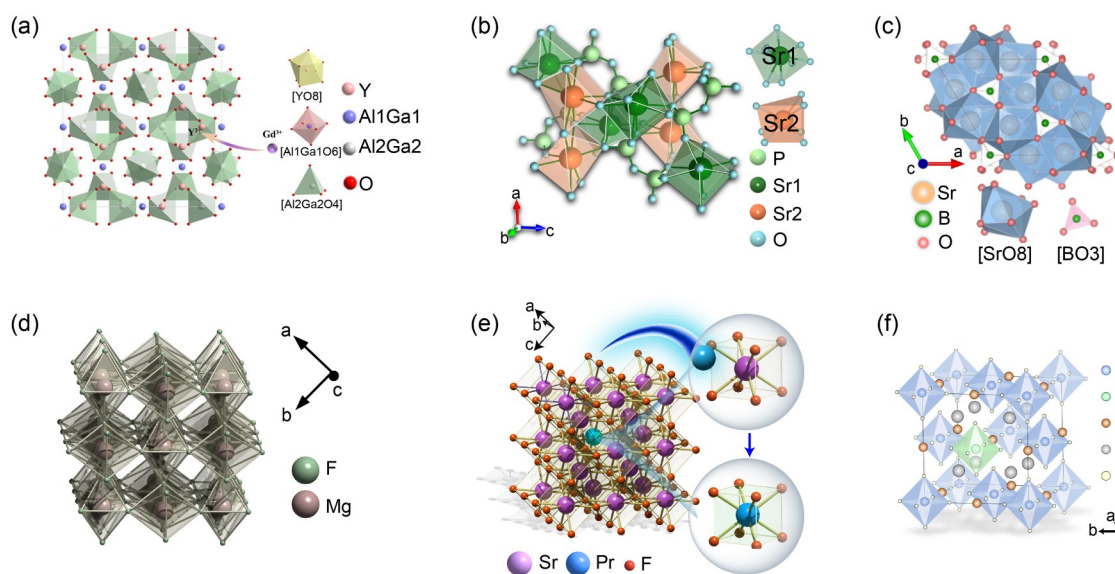


图3 (a) 石榴石结构  $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  结构图<sup>[61]</sup>; (b) 焦磷酸盐结构  $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$  结构图<sup>[64]</sup>; (c) 硼酸盐结构  $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2$  结构图<sup>[18]</sup>; (d) 金红石结构  $\text{MgF}_2$  结构图<sup>[62]</sup>; (e) 萤石结构  $\text{SrF}_2$  结构图<sup>[17]</sup>; (f) 卤化物双钙钛矿材料  $\text{Cs}_2\text{NaScCl}_6$  结构图<sup>[75]</sup>;

Fig. 3 (a) Crystal structure of garnet-type  $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ . (b) Crystal structure of pyrophosphate-type  $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$ . (c) Crystal structure of borate-type  $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2$ . (d) Crystal structure of rutile-type  $\text{MgF}_2$ . (e) Crystal structure of fluorite-type  $\text{SrF}_2$ . (f) Crystal structure of halide double perovskite material  $\text{Cs}_2\text{NaScCl}_6$ .

到2018年,王锋团队通过Li辅助的方法成功制备  $\text{CaZnOS}:\text{Tb}^{3+}$ ,并观察到峰值位于385 nm的力致发

光,源于  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_6$  跃迁(图4b)<sup>[26]</sup>。2022年杨中民团队首次报道了掺杂  $\text{Bi}^{3+}$  离子的紫外光致发

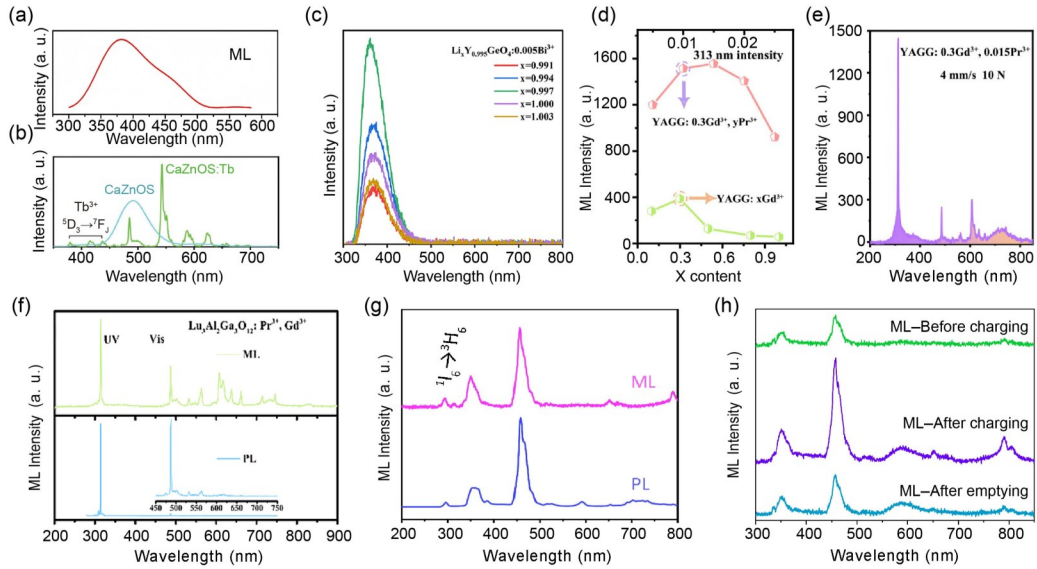


图4 (a)  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+},\text{Ho}^{3+}$ 的力致发光光谱<sup>[59]</sup>;(b)  $\text{CaZnOS}$ 的基质缺陷发光与掺杂 $\text{CaZnOS}:1\%\text{Tb}^{3+}$ 的力致发光对比<sup>[26]</sup>;(c) 经254 nm紫外灯预辐照1 min后的 $\text{Li}_x\text{Y}_{0.995}\text{GeO}_4:0.005\text{Bi}^{3+}$ 粉末的力致发光光谱<sup>[60]</sup>;(d)  $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:x\text{Gd}^{3+}$ 和 $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:0.3\text{Gd}^{3+},y\text{Pr}^{3+}$ 的力致发光强度随 $x$ 和 $y$ 值变化的演变<sup>[61]</sup>;(e)  $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:0.3\text{Gd}^{3+},0.015\text{Pr}^{3+}$ 的力致发光光谱<sup>[61]</sup>;(f)  $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+},\text{Gd}^{3+}$ 的力致发光光谱和光致发光光谱的比较<sup>[74]</sup>;(g)  $\text{MgF}_2:0.5\%\text{Tm}^{3+}$ 的光致发光光谱与力致发光光谱对比<sup>[62]</sup>;(h)  $\text{MgF}_2:0.5\%\text{Tm}^{3+}$ 力致发光材料在不同条件下的发光光谱<sup>[62]</sup>。

Fig. 4 (a) ML spectrum of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+},\text{Ho}^{3+}$ . (b) Comparison of intrinsic defect luminescence in  $\text{CaZnOS}$  host and ML from  $\text{CaZnOS}:1\%\text{Tb}^{3+}$ . (c) ML spectra of the  $\text{Li}_x\text{Y}_{0.995}\text{GeO}_4:0.005\text{Bi}^{3+}$  powders pre-irradiated by a 254 nm UV lamp for 1 min. (d) Evolution of the ML intensity of  $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:x\text{Gd}^{3+}$  and  $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:0.3\text{Gd}^{3+},y\text{Pr}^{3+}$  with the values of  $x$  and  $y$ . (e) ML spectrum of  $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:0.3\text{Gd}^{3+},0.015\text{Pr}^{3+}$ . (f) Comparing with ML and PL spectra of  $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+},\text{Gd}^{3+}$ . (g) Comparison of PL and ML spectra of  $\text{MgF}_2:0.5\%\text{Tm}^{3+}$ . (h) Spectra of  $\text{MgF}_2:0.5\%\text{Tm}^{3+}$  ML materials under different conditions.

光材料 $\text{LiYGeO}_4:\text{Bi}^{3+}$ (图4c),该材料经过254 nm紫外灯照射后,呈现UVA力致发光,发射峰值为355 nm,源于 $\text{Bi}^{3+}$ 离子的 $^3\text{P}_1\rightarrow^1\text{S}_0$ 跃迁<sup>[60]</sup>。

上述工作虽然实现了紫外光致发光,但均围绕UVA波段展开。直到2023年王元生团队在 $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Gd}^{3+}$ 中实现源于 $\text{Gd}^{3+}$ 的 $^6\text{P}_{7/2}\rightarrow^8\text{S}_{7/2}$ 的跃迁,发射波长位于313 nm,成功将力致发光拓展到了UVB波段。进一步,该团队通过共掺杂引入 $\text{Pr}^{3+}$ ,构建Pr-Gd能量传递通道,使 $\text{Gd}^{3+}$ 的力致发光强度提升4倍(图4d和4e)<sup>[61]</sup>。2025年徐旭辉团队通过将 $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ 中的 $\text{Y}^{3+}$ 离子换成与 $\text{Gd}^{3+}$ 半径更加匹配的 $\text{Lu}^{3+}$ 离子,即 $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Gd}^{3+},\text{Pr}^{3+}$ ,进而增强了其力致发光性能(图4f)<sup>[74]</sup>。在该体系中自恢复性得到了显著提升,当力致发光衰减后,放置90 s即可恢复到初始强度的90%。在此期间,我们团队在 $\text{MgF}_2:\text{Tm}^{3+}$ 中实现了源于 $\text{Tm}^{3+}$ 的 $^1\text{I}_6\rightarrow^3\text{H}_6$ 跃迁,发射波长位于292 nm,同样属于UVB波段,但其下降沿略微拓展到UVC区域,该材料的力致发光归因于自恢复型和陷阱控制型双重

作用(图4g和4h)<sup>[62]</sup>。

在 $\text{MgF}_2:\text{Tm}^{3+}$ 基础上,我们团队继续向更短波长推进。首先通过制备 $\text{Pr}^{3+}$ 掺杂的 $\text{NaYF}_4$ ,将力致发光波段拓展到250 nm,源于 $\text{Pr}^{3+}$ 的 $^1\text{S}_0\rightarrow^3\text{F}_4$ 跃迁。此外,短至215 nm处亦存在力致发光信号,源于 $\text{Pr}^{3+}$ 的 $^1\text{S}_0\rightarrow^3\text{H}_4$ 跃迁,可被清晰识别,但信噪比相较于250 nm力致发光较差。上述光子信号属于典型的陷阱控制型力致发光,样品需要X射线预先激发(图5a)<sup>[63]</sup>。另一方面, $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ 同样呈现出UVC力致发光,最短峰值位于230 nm。与前述案例类似, $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ 的力致发光同样属于陷阱控制型,需要经过X射线预先激发(图5b)<sup>[64]</sup>。进一步,我们团队将力致发光拓展到远UVC区域,通过分析 $\text{Pr}^{3+}$ 离子的特殊能级,提出了实现远UVC光子发射的指导准则。基于该准则,在 $\text{SrF}_2$ 中实现了源于 $\text{Pr}^{3+}$ 的 $4f5d\rightarrow^3\text{H}_4$ 跃迁,发射峰值位于222 nm(图5c)。该类材料无需预充能即可产生自恢复力致发光(源于 $\text{Pr}^{3+}$ 掺杂破坏 $\text{SrF}_2$ 中心对称结构带来的局部压电效应与摩擦电效应协同实

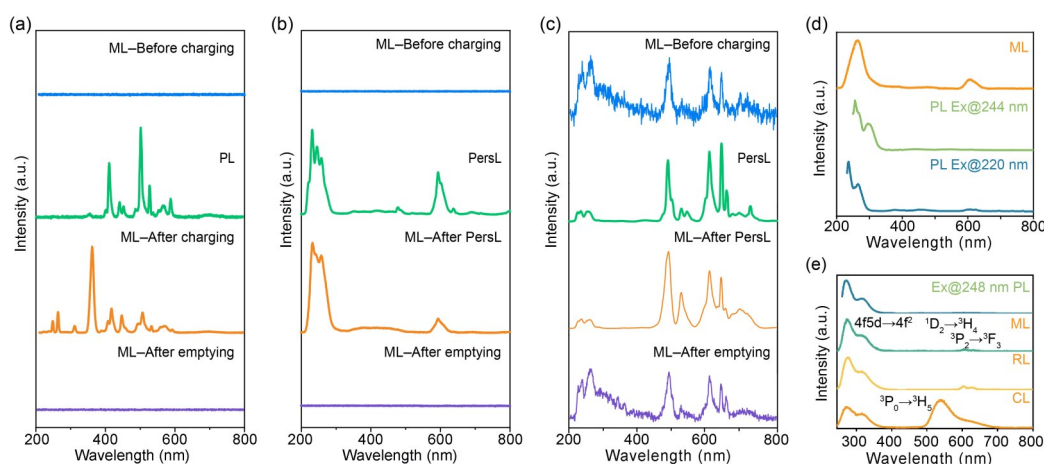


图5 (a)  $\text{NaYF}_4:\text{Pr}^{3+}$ 在不同激发条件下的光谱比较<sup>[63]</sup>; (b)  $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ 在不同激发条件下的光谱比较<sup>[17]</sup>; (c)  $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ 在不同激发条件下的光谱比较<sup>[17]</sup>; (d)  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS弹性薄膜在不同激发条件下的光谱比较<sup>[19]</sup>; (e)  $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS弹性薄膜在不同激发条件下的光谱比较<sup>[18]</sup>。

Fig. 5 (a) Spectral comparison of  $\text{NaYF}_4:\text{Pr}^{3+}$  under different excitation conditions. (b) Spectral comparison of  $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$  under different excitation conditions. (c) Spectral comparison of  $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$  under different excitation conditions. (d) Spectral comparison of  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS under different excitation conditions. (e) Spectral comparison of  $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS under different excitation conditions.

现),经X射线照射后,陷阱可捕获载流子,通过机械压力释放陷阱中载流子,其发光强度得到了数十倍提升,高温清除陷阱后可恢复初始状态,因此该类力致发光材料同时具有陷阱控制型力致发光的特性。除 $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ 外,还有 $\text{SrF}_2:\text{Gd}^{3+}$ (316 nm)、 $\text{SrF}_2:\text{Ce}^{3+}$ (326 nm, 393 nm)、 $\text{SrF}_2:\text{Tm}^{3+}$ (292 nm, 359 nm)、 $\text{SrF}_2:\text{Tb}^{3+}$ (382 nm)均实现了紫外光致发光<sup>[17]</sup>。2026年梁延杰团队连续报道了两种自恢复UVC力致发光材料,分别为 $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS与 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS(图5d和5e)。这两种力致发光材料分别实现了位于264 nm和272 nm的UVC力致发光,且具有优异的自恢复特性,两种UVC力致发光材料在连续拉伸10000次后仍然可探测到UVC信号。其中 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS在1 s可恢复至43.2%,24小时恢复至90.2%。 $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS在1 min可恢复至18.9%,24小时恢复至59.1%<sup>[18,19]</sup>。截至目前,已经有二十多种紫外光致发光材料被发现,这些研究突破了传统可见—近红外光致发光的波段限制,还成功实现了从近紫外到远紫外的全波段覆盖。

除上述无机紫外光致发光材料外,有机紫外光致发光材料也得到了有效拓展<sup>[82-84]</sup>。比如李振团队报道了基于DPP-BO实现了有机紫外光致发光材料,发射波段位于350 nm左右<sup>[85]</sup>。黄维团队开发了二苯基氧膦类材料,获得293 nm紫外光致发光,并实现293–741 nm宽波段可调发射<sup>[86]</sup>。这

些进展不仅凸显了紫外光致发光材料的巨大潜力,也强调了开发新型紫外波段力致发光化合物的必要性。由于本文主要聚焦于无机紫外光致发光的研究,所以在此不再过多赘述有机体系。

## 4 紫外光致发光材料的应用

### 4.1 特殊标记和防伪

2025年,我们团队基于 $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ 的远UVC力致发光展示了其在应急救援场景中的应用:被困人员手动拉伸 $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS弹性薄膜所产生的UVC力致发光可被日盲相机精准捕捉而不受到环境光源干扰,未来有望应用到复杂地形、强干扰环境的救援场景,从而解决传统光学救援信号易受环境光或天气影响的难题。同时该应用无需额外电源,为探险、火灾、地震等应急场景提供了更可靠的救援辅助(图6a)<sup>[17]</sup>。梁延杰团队利用自恢复响应特性更加优异的UVC力致发光材料 $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS,实现了隐蔽光学标记与追踪功能(图6b)<sup>[19]</sup>。

同期,该团队基于同样具备优异自恢复性能的UVC力致发光材料 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS,实现了复杂环境场(室内照明、室外阳光)中飞行物的精准定位<sup>[18]</sup>。为军事目标标记、野生动物迁徙追踪等场景提供了“隐形可识别”的解决方法(图6c)。综上,基于 $\text{Pr}^{3+}$ 掺杂的UVC波段的紫外光致发光材料,凭借日盲波段的低背景干扰、自恢复、

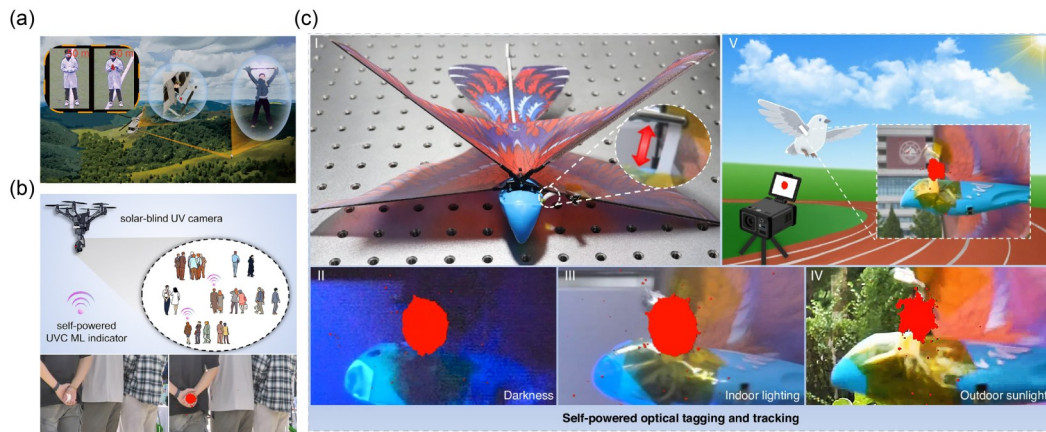


图 6 (a) 利用  $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}@\text{PDMS}$  UVC 力致发光薄膜实现户外应急救援的应用演示<sup>[17]</sup>; (b) 利用  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}@\text{PDMS}$  UVC 力致发光薄膜用于隐蔽式光学标记与追踪应用演示<sup>[19]</sup>; (c) 利用  $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}@\text{PDMS}$  UVC 力致发光薄膜用于光学标记与追踪的应用演示<sup>[18]</sup>。

Fig. 6 (a) Demonstration of outdoor emergency rescue using UVC ML films of  $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}@\text{PDMS}$ . (b) Demonstration of concealed optical marking and tracking using UVC ML films of  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}@\text{PDMS}$ . (c) Demonstration of optical marking and tracking using UVC ML films of  $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}@\text{PDMS}$ .

光学信号隐蔽的特点,其在应急救援、军事目标标记、野生动物追踪等特殊标记场景中有着显著优势。这一系列研究极大拓展了力致发光材料在无电源、高保密性、复杂环境中的应用。

#### 4.2 激发源

2025年,赵磊团队通过构筑能量传递方式丰富了力致发光应用场景: $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}@\text{PDMS}$ 复合薄膜在外力刺激下发射峰值为340 nm的UVA光,源于 $\text{Ce}^{3+}$ 的 $5d \rightarrow 4f$ 跃迁。在此基础上,研究团队将不具备力致发光性能的 $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Sr}_3\text{SiO}_5:\text{Eu}^{2+}$ 掺入该复合薄膜中,使其同样实现了力致发光,这一过程源于 $\text{Ce}^{3+}$ 的UVA发射到 $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Sr}_3\text{SiO}_5:\text{Eu}^{2+}$ 的能量传递。进一步,通过精准调节能量供体

和受体质量比,可以实现多色力致发光的精细调控(图7a)<sup>[20]</sup>。同年B. Vasanthi等人报道了通过 $\text{Bi}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ 共掺杂的 $\text{BaLaGa}_3\text{O}_7$ 体系,实现了无需预激发的 $\text{Eu}^{3+}$ 的红色力致发光。其核心在于 $\text{Bi}^{3+}$ 的宽发射带(380-500 nm)与 $\text{Eu}^{3+}$ 的激发峰(394 nm、465 nm)高效重叠,进而通过能量转移实现了 $\text{Eu}^{3+}$ 的红光发射,发射峰值为617 nm,源于 $\text{Eu}^{3+}$ 的 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 跃迁(图7b)<sup>[81]</sup>。由此可见,以紫外光致发光材料作为激发源,是拓展发光颜色的高效方式。借助紫外发射与目标荧光材料激发谱的光谱重叠,可通过辐射能量传递或离子间敏化作用,将机械能转化为多种颜色的发光,实现无需预激发的多色力致发光。该设计策略在光学传感、信息显示、安全防护与柔性光电传感器等场景中具备显著优势。

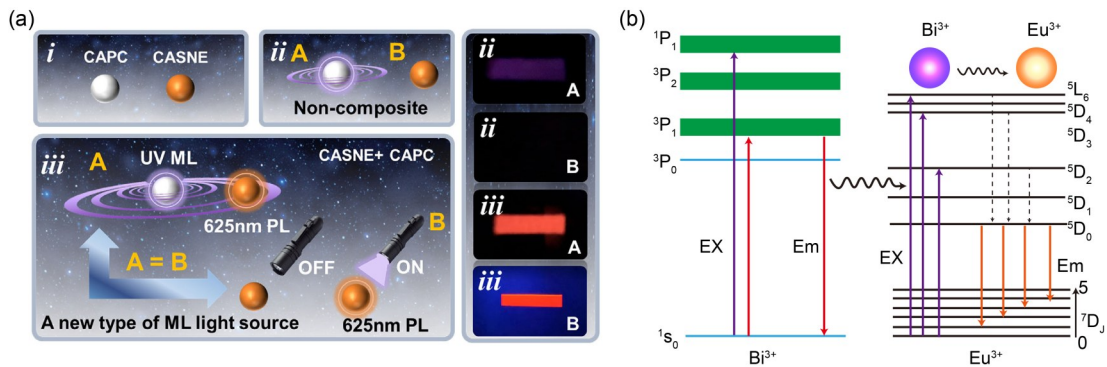


图 7 (a) 能量供体( $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}$ )与受体( $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ )间的辐射能量转移示意图<sup>[20]</sup>; (b)  $\text{BaLaGa}_3\text{O}_7$ 基质中 $\text{Bi}^{3+}$ 离子向 $\text{Eu}^{3+}$ 离子的能量传递示意图<sup>[81]</sup>。

Fig. 7 (a) Schematic diagram of radiative energy transfer between energy donor ( $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}$ ) and acceptor ( $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ ). (b) Schematic diagram of energy transfer from  $\text{Bi}^{3+}$  to  $\text{Eu}^{3+}$  ions in  $\text{BaLaGa}_3\text{O}_7$  host.

### 4.3 健康结构监测

2023年,王元生团队基于 $Y_3Al_2Ga_3O_{12}:Gd^{3+}$ 的UVB力致发光特性,提出了管式炉气路结构健康监测的应用方法(图8a):将 $Y_3Al_2Ga_3O_{12}:Gd^{3+}@PDMS$ 力致发光薄膜涂覆在柔性软管上,当软管在气体的压力下产生形变时,可通过紫外相机对形变程度进行监测,从而实现明亮环境下的应力可视化监测。尽管尚未实现在真实环境下进行验证,但为工业管路、气路等场景的结构健康实时监测提供了新的方法<sup>[61]</sup>。2025年,我们团队将UVC力致发光薄膜应用在桥体的结构健康监测领域。通过将 $SrF_2:Pr^{3+}@PDMS$ 复合膜涂覆于桥梁表面,在室外强光或室

内复杂照明环境中,可通过紫外相机精准定位到结构裂纹或应力集中区域。在对比实验中发现,传统可见力致发光在明亮环境中完全被背景光掩盖,无法有效识别(图8b)<sup>[17]</sup>。最近,梁延杰团队基于 $Sr_3(PO_4)_2:Pr^{3+}@PDMS$  UVC力致发光材料设计了自供电碰撞检测与预警指示器。通过两辆模型车构建碰撞模拟场景,该弹性体在机械冲击作用下可产生UVC力致发光。适用于汽车、精密机床等设备的碰撞预警与实时监测,可在难以供电的场景中捕捉撞击事件,为设备维护提供新的方法(图8c)<sup>[19]</sup>。

综上,UVC/UVB力致发光材料凭借独特的日盲特性,有望为结构健康监测提供新的思路。

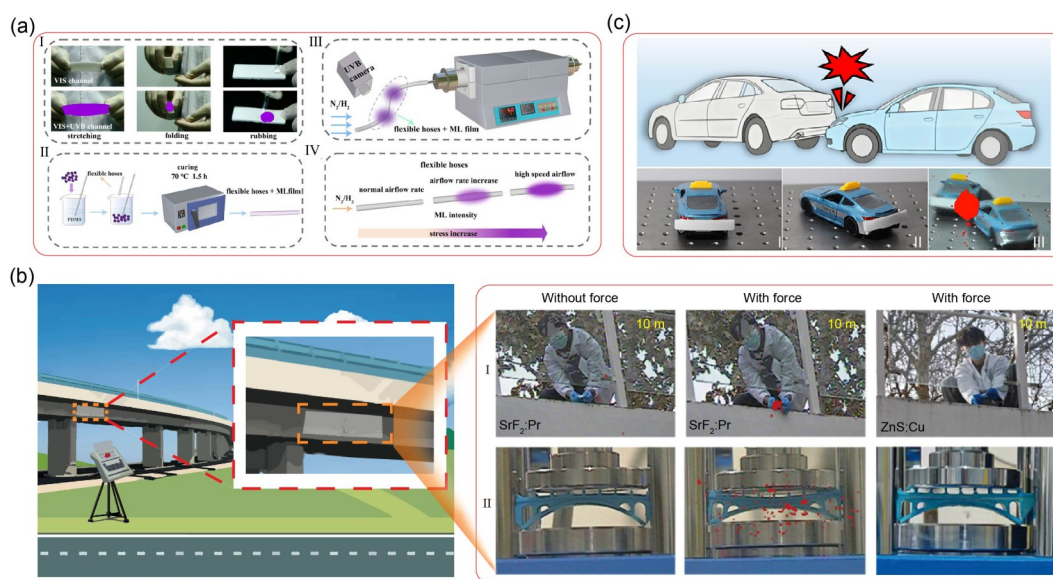


图8 (a)  $Y_3Al_2Ga_3O_{12}:0.3Gd^{3+}, 0.015Pr^{3+}$ 紫外B波段力致发光材料用于管式炉气路检测<sup>[61]</sup>。(b)  $SrF_2:Pr^{3+}@PDMS$ 紫外C波段力致发光材料用于结构健康监测。右图展示了 $SrF_2:Pr^{3+}@PDMS$ 、 $ZnS:Cu^{2+}@PDMS$ 在力刺激下,通过紫外相机的可见光通道和紫外C+可见光通道拍摄的照片<sup>[17]</sup>。(c)  $Sr_3(PO_4)_2:Pr^{3+}@PDMS$ 紫外C波段力致发光材料用于碰撞检测<sup>[19]</sup>。

Fig. 8 (a) The UVB ML material of  $Y_3Al_2Ga_3O_{12}:0.3Gd^{3+}, 0.015Pr^{3+}$  is applied to gas path detection of tube furnaces. (b) The UVC ML material of  $SrF_2:Pr^{3+}@PDMS$  is used for structural health monitoring. The right panel shows the photographs of  $SrF_2:Pr^{3+}@PDMS$  and  $ZnS:Cu^{2+}@PDMS$  films under force stimulation, captured by using the visible or UVC+visible channel of a solar blind camera. (c) The UVC ML material of  $Sr_3(PO_4)_2:Pr^{3+}@PDMS$  is applied to collision detection.

### 4.4 杀菌

2025年,徐旭辉团队基于 $Lu_3Al_2Ga_3O_{12}:Gd^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$ 的UVB力致发光实现了对大肠杆菌的灭杀(图9a)。基于该现象,该团队指出可通过擦拭过程中的摩擦作用产生UVB光,实现对冰箱内壁、电梯按钮等表面的杀菌,为自供能杀菌材料的开发提供了新思路(图9b)<sup>[74]</sup>。近期,梁延杰团队也将紫外光致发光材料应用于杀菌领域,基于 $Sr_3(BO_3)_2:Pr^{3+}@PDMS$ 优异的自恢复UVC力致发光特性,可实现对大肠杆菌(EC)和耐甲氧西林金黄色

葡萄球菌(MRSA)的高效灭杀,在对弹性体连续施加拉力10000次后,大肠杆菌死亡率达88.9%,耐甲氧西林金黄色葡萄球菌死亡率达70.1%(图9c)<sup>[18]</sup>。

针对紫外光致发光这一特性,其在各类医疗设备、食品包装、公共设施等场景中,可依靠日常摩擦接触实现绿色杀菌,具有广阔的应用潜力。然而实验中需对材料进行上万次拉伸,远超日常接触摩擦的实际次数,因此实际应用还需进一步优化。

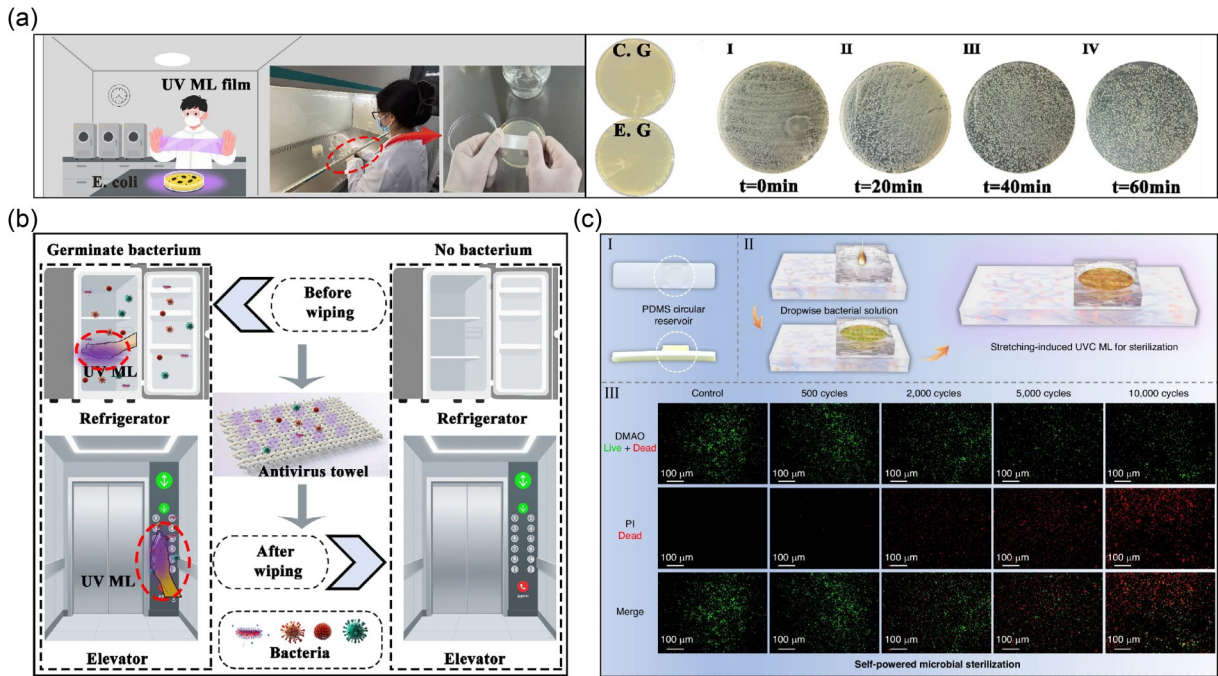


图9 (a)  $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Gd}^{3+}, \text{Pr}^{3+}$ 力致发光薄膜的示意图、实验图及灭菌效果图,展示了在连续拉伸条件下紫外线力致发光对大肠杆菌的杀灭效果<sup>[74]</sup>; (b) 使用  $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Gd}^{3+}, \text{Pr}^{3+}$ 力致发光薄膜制备的灭菌布用于冰箱和电梯按钮灭菌的示意图<sup>[74]</sup>。(c) 基于  $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS弹性薄膜的自恢复微生物杀菌的应用演示<sup>[18]</sup>。

Fig. 9 (a) The schematic diagram, experimental images and sterilization effect images of  $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Gd}^{3+}, \text{Pr}^{3+}$  ML films, demonstrating the bactericidal effect of ultraviolet ML on Escherichia coli under continuous stretching. (b) The schematic diagram of the sterilization cloth prepared using  $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Gd}^{3+}, \text{Pr}^{3+}$  ML film for sterilizing refrigerator and elevator buttons. (c) Demonstration of self-recovering microbial sterilization based on  $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ @PDMS elastic films.

## 5 结论与展望

综上所述,本文首先对紫外外力致发光的机理进行了梳理,重点阐述了压电效应和摩擦效应的作用机制。其次,综述了紫外外力致发光的发展历程与研究现状。最后对紫外外力致发光的应用场景进行了总结。经过科研人员的持续探索,紫外外力致发光材料在发光强度、发射波段调控、稳定性等性能方面均取得了有效进展。尽管相关研究已经取得了丰富的成果,但现阶段紫外外力致发光还面临着诸多挑战。

(1)在体系拓展方面:目前紫外外力致发光材料体系相对较少,且掺杂中心的种类受限,这导致其发光强度、稳定性、应用场景等方面进展缓慢。要拓展紫外外力致发光材料体系可采取双条路径。一方面充分借鉴光致发光、上转换发光以及余辉发光中已报道紫外波段的基质材料(这些发光形式已经经过长期发展,积累了大量性能优异的紫外发光基质材料,可有效避免基质对紫外光的自吸收,保障发光效率)。另一方面可进一步拓展可实现紫外外力致发光的发光中心。多种镧系稀土离子

的能级结构都延伸到了紫外区域,这些发光中心具备实现紫外发光的潜力。例如,  $\text{Nd}^{3+}$ 离子通过 ${}^4\text{D}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$  (354 nm)、 ${}^2\text{P}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$  (382 nm)等跃迁实现UVA的发射。 $\text{Er}^{3+}$ 离子通过 ${}^4\text{G}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  (380 nm)和 ${}^2\text{P}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  (315 nm)可实现紫外特征跃迁,覆盖了UVA和UVB区域。 $\text{Tm}^{3+}$ 离子则可通过 ${}^1\text{I}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  (290 nm)、 ${}^1\text{I}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  (345 nm)、 ${}^1\text{D}_2 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  (365 nm)跃迁,实现UVA至UVB波段的紫外发光。

(2)应用方面:紫外外力致发光材料,在结构健康监测、特殊标记、无人机定位、激发源、生物医学以及催化领域展现出独特的应用前景。但目前应用场景受限,急需拓展。

1、在特殊标记领域中,可利用UVC的高隐蔽性特点使其应用于高端防伪、安全标识等领域。比如未来无人机可能会穿梭于各个楼宇之间,可通过紫外外力致发光材料对其进行定位,该方法可有效规避城市复杂环境中的可见光、电磁信号干扰,且可减轻无人机的重量。为低空无人机管控、城市空中交通管理提供可靠的技术支撑。

2、目前常用汞灯作为激发源,然而由于《水俣公约》的实施,限制了其应用。紫外外力致发光

(200–400 nm)无需外接电源,便可制成便携式紫外激发源,应用于野外检测、应急场景等领域。比如在地质勘探领域其可激发矿物产生荧光,辅助判断矿石的种类。在考古调查时还可通过激发文物表面残留物,辅助判断文物材质与保存状态。

3、紫外光致发光材料在生物医学领域也有着极大的应用潜力,可将紫外光致发光材料与近红外光致发光材料复合,制成柔性生物相容性薄膜,精准贴合于假肢关节、骨科植入物等关键部位。该方法既解决了紫外光穿透性差的问题,又兼具

杀菌特性。

(3)人工智能方面:此外随着人工智能技术的快速发展,深度学习等也可以为实现紫外光致发光材料的研究提供新的思路。科研人员可利用人工智能方法对材料结构及光学性能进行初步预测,有效减少传统实验中的试错过程,充分提升工作效率。但需要明确的是,人工智能仅能作为材料研究过程中的辅助手段,无法完全替代科研人员的科研思维、理论分析和实验设计的能力,尤其是发光机理仍依赖科研人员根据实验现象进行专业分析。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] HARIYANI S, S6JKA M, SETLUR A, *et al.* A guide to comprehensive phosphor discovery for solid-state lighting [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2023, 8(11): 759-775.
- [ 2 ] YUKIHARA E G, MCKEEVER S W, ANDERSEN C E, *et al.* Luminescence dosimetry [J]. *Nat. Rev. Methods Primers*, 2022, 2(1): 26.
- [ 3 ] LIANG L L, CHEN J Y, SHAO K, *et al.* Controlling persistent luminescence in nanocrystalline phosphors [J]. *Nat. Mater.*, 2023, 22(3): 289-304.
- [ 4 ] ZHUANG Y X, XIE R J. Mechanoluminescence rebrightening the prospects of stress sensing: a review [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(50): 2005925.
- [ 5 ] ZHU J H, GU M R, CHEN Y H, *et al.* Chemiluminescent transition metal complexes: mechanisms and applications [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2025, 530: 216495.
- [ 6 ] CHAO K F, WANG Z E, DENG C X, *et al.* Improvement in mechanoluminescence performance and implementation of dual-mode photoluminescence based on Bi<sup>3+</sup> ion non-intrinsic defect control strategy [J]. *J. Rare Earths*, 2024, 43(10): 2128-2136
- [ 7 ] CHUN F J, WANG F. Recent advances in perovskite-based flexible electroluminescent devices [J]. *Acs Nano*, 2024, 18(38): 25939-25965.
- [ 8 ] CHANG S L, ZHANG K Y, PENG D N, *et al.* Mechanoluminescent functional devices: developments, applications and prospects [J]. *Nano Energy*, 2024, 122: 109325.
- [ 9 ] ZHANG J C, WANG X S, MARRIOTT G, *et al.* Trap-controlled mechanoluminescent materials [J]. *Prog. Mater. Sci.*, 2019, 103: 678-742.
- [ 10 ] CHENG H L, FANG S Q, LI Y, *et al.* Mechano-electro-optical conversion dynamics in mechanoluminescence and its application in remote human - robot interaction [J]. *Photonix*, 2025, 6(1): 50.
- [ 11 ] XIONG P X, PENG M Y, YANG Z M. Near infrared mechanoluminescence crystals: a review [J]. *iScience*, 2020, 24(1): 101944.
- [ 12 ] WU Y F, WU S, XIONG P X, *et al.* Near-infrared mechanoluminescence from Sr<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:Nd<sup>3+</sup> for potential bioimaging and non-destructive detection [J]. *J. Rare Earths*, 2025, 44(1): 85-93.
- [ 13 ] 杨秀霞,涂东. 近红外应力发光材料研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(2): 17.  
YANG X X, TU D. Research progress of near-infrared stress luminescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(2): 17. (in Chinese)
- [ 14 ] HAJRA S, KAJA K R, PANDA S, *et al.* Mechanoluminescence: Mechanisms, emerging applications, and future prospects [J]. *Nano Energy*, 2025, 145.
- [ 15 ] FENG A, Smet P F. A Review of Mechanoluminescence in Inorganic Solids: Compounds, Mechanisms, Models and Applications [J]. *Mater.*, 2018, 11(4).
- [ 16 ] 唐艺倩,雷键雄,张晓明,等. 无机可再生应力发光材料研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(4): 15.  
TANG Y Q, LEI J X, ZHANG X M, *et al.* Research progress of inorganic renewable stress luminescent materials [J].

- Chin. J. Lumin.*, 2021, 42 (4):15. (in Chinese)
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] LV X L, DUAN T Y, HUANG L P, *et al.* Robust solar-blind ultraviolet mechanoluminescence in flexible elastomers without pre-irradiation [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(11): e21006.
- [ 20 ] CHENG K G, GUO Z Y, ZHANG P, *et al.* A universal strategy for multicolor mechanoluminescence via radiative energy transfer based on ultraviolet mechanoluminescent material  $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}$  [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(7): 2401524.
- [ 21 ] FRANCIS. The advancement of learning [J]. *Educational Researcher*, 1994, 23(8): 4-12.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] CHEN C J, ZHUANG Y X, TU D, *et al.* Creating visible-to-near-infrared mechanoluminescence in mixed-anion compounds  $\text{SrZn}_2\text{S}_2\text{O}$  and  $\text{SrZnSO}$  [J]. *Nano Energy*, 2019, 68: 104329.
- [ 25 ] LI L J, WONDRAKZEK 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.
- [ 26 ] DU Y Y, JIANG Y, SUN T Y, *et al.* Mechanically excited multicolor luminescence in lanthanide ions [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 31(7): 1807062.
- [ 27 ] LIN F Y, LI X Y, CHEN C J, *et al.* Modeling polyhedron distortion for mechanoluminescence in mixed-anion compounds  $\text{RE}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Ln}^{3+}$  [J]. *Chem. Mater.*, 2022, 34(11): 5311-5319.
- [ 28 ] TU D, XU C N, YOSHIDA A, *et al.*  $\text{LiNbO}_3:\text{Pr}^{3+}$ : a multipiezo material with simultaneous piezoelectricity and sensitive piezoluminescence [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(22): 1606914.
- [ 29 ] PAN C, ZHANG J C, ZHANG M, *et al.* Trap-controlled mechanoluminescence in  $\text{Pr}^{3+}$ -activated  $\text{M}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  ( $\text{M} = \text{Sr}, \text{Ca}$ ) isomorphous perovskites [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(6): 1425-1434.
- [ 30 ] SUN J, LI Y Q, WANG L, *et al.* Multi-force-driven self-recoverable SWIR mechanoluminescence for underwater communication [J]. *Adv. Sci.*, 2026, (DOI: 10.1002/advs.202523643).
- [ 31 ] XIONG P X, PENG M Y, QIN K X, *et al.* Visible to near-infrared persistent luminescence and mechanoluminescence from  $\text{Pr}^{3+}$  doped  $\text{LiGa}_5\text{O}_8$  for energy storage and bioimaging [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(24): 1901107.
- [ 32 ] LIU S Q, ZHENG Y T, PENG D F, *et al.* Near-infrared mechanoluminescence of  $\text{Cr}^{3+}$  doped gallate spinel and magnetoplumbite smart materials [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 33(3): 2209275.
- [ 33 ] ZHANG P, ZHAO X H, JIA Z W, *et al.* High defect tolerance breaking the design limitation of full-spectrum multimodal luminescence materials [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(5): 2411532.
- [ 34 ] SHAO P S, XIONG P X, XIAO Y, *et al.* Self-recoverable NIR mechanoluminescence from  $\text{Cr}^{3+}$  doped perovskite type aluminate [J]. *Adv. Powder Mater.*, 2024, 3(2): 100165.
- [ 35 ] ZHOU J Y, GU Y, LU J Y, *et al.* An ultra-strong non-pre-irradiation and self-recoverable mechanoluminescent elastomer [J]. *Chem. Eng. J.*, 2020, 390: 124473.
- [ 36 ] QIN S Y, BIAN J L, HAN Y, *et al.* Intense and efficient green mechanoluminescence in  $\text{CaLaAl}_3\text{O}_7$  through  $\text{Tb}^{3+}$  doping [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2021, 145: 111535.
- [ 37 ] WANG C, LIU D Y, WEI X H, *et al.* Enabling Multimodal Luminescence in a Single Nanoparticle for X-ray Imaging Encryption and Anticounterfeiting [J]. *Nano Lett.*, 2024, 24(31): 9691-9699.
- [ 38 ] CAI C Y, LI L P, LI H M, *et al.* All-lanthanide mechanoluminescence from transparent Ln-doped  $\text{MgF}_2$ @elastomer for flexible and stretchable lighting and stress sensing [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2024, 9(7): 2301855.
- [ 39 ] WANG W X, WANG S W, GU Y, *et al.* Contact-separation-induced self-recoverable mechanoluminescence of  $\text{CaF}_2:\text{Tb}^{3+}$ /PDMS elastomer [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 2014.
- [ 40 ] JEONG S M, SONG S, LEE S K, *et al.* Mechanically driven light-generator with high durability [J]. *Appl. Phys. Lett.*,

- 2013, 102(5): 051110.
- [ 41 ] HUANG Z F, CHEN B, REN B Y, *et al.* Smart mechanoluminescent phosphors: a review of strontium-aluminate-based materials, properties, and their advanced application technologies [J]. *Adv. Sci.*, 2022, 10(3): 2204925.
- [ 42 ] WANG W X, WANG Z B, ZHANG J C, *et al.* Contact electrification induced mechanoluminescence [J]. *Nano Energy*, 2022, 94: 106920.
- [ 43 ] LI X, SUN J L, HUANG W T, *et al.* Irreversible  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$ -based multicolor mechanoluminescence for security labels [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2024, 9(21): 2301948.
- [ 44 ] ZHANG Y, YAN S, XIAO F, *et al.* Long-persistent far-UVC light emission in  $\text{Pr}^{3+}$ -doped  $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$  phosphor for microbial sterilization [J]. *Inorg. Chem. Front.*, 2023, 10(20): 5958-5968.
- [ 45 ] WANG X L, MAO Y B. Recent advances in  $\text{Pr}^{3+}$ -activated persistent phosphors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(10): 3626-3646.
- [ 46 ] LI L P, SUO H, WANG F. Ultraviolet light generation through lanthanide upconversion [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2025, 59(2): 234-245.
- [ 47 ] LI L P, ZI L Z, YANG F R, *et al.*  $\text{Pr}^{3+}$ -Based Visible-to-Ultraviolet Upconversion. A minireview [J]. *Adv. Phys. Res.*, 2024, 4(2): 2400097.
- [ 48 ] KRICKA L J, STROEBEL J, STANLEY P E. Triboluminescence: 1968 - 1998 [J]. *Luminescence*, 1999, 14(4): 215-220.
- [ 49 ] 敖宇辰, 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*, 44(6): 942-963.  
AO Y C, WANG J, CAI G M. Research progress on luminescence properties, luminescence mechanism and applications of inorganic mechanoluminescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 44(6): 942-963. (in Chinese)
- [ 50 ] 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)
- [ 51 ] ZHANG J C, WANG X, YAO X, *et al.* Strong elasto-mechanoluminescence in diphase  $(\text{Ba}, \text{Ca})\text{TiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  with self-assembled sandwich architectures [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2010, 157(12): G269.
- [ 52 ] 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.
- [ 53 ] LI L J, WONG K L, LI P F, *et al.* Mechanoluminescence properties of  $\text{Mn}^{2+}$ -doped  $\text{BaZnOS}$  phosphor [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(35): 8166-8170.
- [ 54 ] ZHANG J C, LONG Y Z, YAN X, *et al.* Creating Recoverable Mechanoluminescence in Piezoelectric Calcium Niobates through  $\text{Pr}^{3+}$  Doping [J]. *Chem. Mater.*, 2016, 28(11): 4052-4057.
- [ 55 ] XIAO Y, XIONG P X, ZHANG S A, *et al.* Deep-red to NIR mechanoluminescence in centrosymmetric perovskite  $\text{Mg-GeO}_3:\text{Mn}^{2+}$  for potential dynamic signature anti-counterfeiting [J]. *Chem. Eng. J.*, 2022, 453: 139671.
- [ 56 ] BAI Y Q, WANG F, ZHANG L Q, *et al.* Interfacial triboelectrification-modulated self-recoverable and thermally stable mechanoluminescence in mixed-anion compounds [J]. *Nano Energy*, 2022, 96: 107075.
- [ 57 ] WANG M Y, WU H, DONG W, *et al.* Advanced luminescence anticounterfeiting based on dynamic photoluminescence and non-pre-irradiation mechanoluminescence [J]. *Inorg. Chem.*, 2022, (6): 61.
- [ 58 ] GU Y, WANG W X, WANG S W, *et al.* A bifunctional luminescent whitening and sensing material based on photoluminescence and mechanoluminescence [J]. *Inorg. Chem.*, 2024, 63(5): 2577-2585.
- [ 59 ] ZHANG H, YAMADA H, TERASAKI N, *et al.* Ultraviolet mechanoluminescence from  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}$  and  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}, \text{Ho}$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(8): 081905.
- [ 60 ] SHAO P S, XIONG P X, XIAO Y, *et al.* Novel spectral band: ultraviolet A mechanoluminescence from  $\text{Bi}^{3+}$ -doped  $\text{LiY-GeO}_4$  [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(44): 16670-16678.
- [ 61 ] YANG X X, CHEN D X, LIANG Y J, *et al.* Energy focusing reinforced narrowband ultraviolet-B mechanoluminescence for bright-field stress visualization [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(21): 6912-6919.
- [ 62 ] LI P, LI L P, LI T, *et al.* Mechanically induced photons from ultraviolet-C to near-infrared in  $\text{Tm}^{3+}$  doped  $\text{MgF}_2$  [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(14): 22396-22404.
- [ 63 ] LI L P, LI P, LV X H, *et al.* Ultraviolet-C mechanoluminescence from  $\text{NaYF}_4:\text{Pr}^{3+}$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124

- (10): 101108.
- [ 64 ] LI H M, YANG Y M, LI P, *et al.* Force-induced ultraviolet C luminescence of Pr<sup>3+</sup>-doped Sr<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> for x-ray dosimetry [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(50): 2411804.
- [ 65 ] MATSUI H, XU C N, LIU Y, *et al.* Origin of mechanoluminescence from Mn-activated ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: triboelectricity-induced electroluminescence [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, 69(23): 235109.
- [ 66 ] TIAN B R, WANG Z F, SMITH A T, *et al.* Stress-induced color manipulation of mechanoluminescent elastomer for visualized mechanics sensing [J]. *Nano Energy*, 2021, 83: 105860.
- [ 67 ] 付晓燕, 房立均, 付海霞, 等. 紫外应力发光材料 SrMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>:Ce 的制备与光谱性质研究 [J]. *发光学报*, 2013, (第 8 期): 1006-1010.  
FU X Y, FANG L J, FU H X, *et al.* Preparation and spectral properties of uv mechanoluminescent material SrMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>: Ce [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(8): 1006-1010. (in Chinese)
- [ 68 ] TIWARI G, BRAHME N, SHARMA R, *et al.* Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>:Ce<sup>3+</sup> phosphors for mechanoluminescence dosimetry [J]. *Luminescence*, 2016, 31(8): 1479-1487.
- [ 69 ] TIGGA S, BRAHME N, BISEN D P. Photoluminescence and mechanoluminescence investigation of bluish-green afterglow SrMgAl<sub>10</sub>O<sub>17</sub>:Ce<sup>3+</sup> phosphor [J]. *J. Mater. Sci. :Mater. Electron.*, 2016, 28(6): 4750-4757.
- [ 70 ] 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.
- [ 71 ] MA Z, HAN Y, BAI Y, *et al.* Near-ultraviolet and deep red dual-band mechanoluminescence for color manipulation and biomechanics detection [J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 456: 141122.
- [ 72 ] WANG Z, LI K, DENG C, *et al.* Self-Recovering Multicolor Calcium Phosphate Mechanoluminescent Materials for Wearable Skin and Biomedical Applications [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(14): 2500439.
- [ 73 ] WANG Q, HUANG X, YANG H, *et al.* Trap-controllable near-ultraviolet elastico-mechanoluminescence of Ce<sup>3+</sup> doped phyllosilicate with melilite-type structure [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(13): 22551-22562.
- [ 74 ] LIU Z C, LV X L, LIANG Y J, *et al.* Self-Recovery UV Mechanoluminescence Material from Garnet Structure and its Bactericidal Application [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, (DOI: 10.1002/adfm.202529517).
- [ 75 ] SUO H, WANG N, ZHANG Y, *et al.* Excitation-mode-selective emission through multiexcitonic states in a double perovskite single crystal [J]. *Light:Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 21.
- [ 76 ] ZHANG P, GUO Z, WEI Z, *et al.* Multicolor mechanoluminescence for integrated dual-mode stress and temperature sensing [J]. *Inorg. Chem. Front.*, 2025, 12(6): 2315-2324.
- [ 77 ] EBRAHIM H H, CAO J, GHADAMYARI M, *et al.* Mechanoluminescence of Bi-Activated NaYGeO<sub>4</sub> Polycrystals and 3D Printed Scaffolds in the NUV/Blue and NIR Spectral Range [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(21): 2500715.
- [ 78 ] LIU W J, CHANG S L, DENG Y, *et al.* Self-Recoverable Ultraviolet Mechanoluminescence in Doping-Free MgF<sub>2</sub> for Stealth Anti-Counterfeiting [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 20(3): e01306.
- [ 79 ] CHANG S L, LIU W J, WANG Y L, *et al.* Bimodal Mechanoluminescence Enables Multicolor Luminescent Tailing for Ultra-Accurate Loading Speed Visualization and Detection [J]. *Adv. Sci.*, 2026, 13(10): DOI: 10.1002/advs.202524039.
- [ 80 ] EBRAHIM HOSSEINI H, CAO J, Ghadamyari M, *et al.* UV/NUV and BW-I Mechanoluminescence from Bi-Activated CaY<sub>2</sub>Ge<sub>4</sub>O<sub>12</sub> Polycrystals [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(30).
- [ 81 ] VASANTHI B, GOPAKUMAR N, ANJANA P S. Enhanced Red Emission from Bi<sup>3+</sup> Sensitized Eu<sup>3+</sup> Activated BaLa-Ga<sub>3</sub>O<sub>7</sub> Phosphors for Solid-State Lighting Applications [J]. *J. Fluoresc.*, 2025, 35(10): 9047-9062.
- [ 82 ] HOU T T, LI W L, WANG H Y, *et al.* An ultra thin, bright, and sensitive interactive tactile display based on organic mechanoluminescence for dual-mode handwriting identification [J]. *InfoMat*, 2024, 6(6): e12523.
- [ 83 ] LI C H, SCHRAMMA N, WANG Z J, *et al.* Ultrasensitive and robust mechanoluminescent living composites [J]. *Sci. Adv.*, 2023, 9(42): eadi8643.
- [ 84 ] YANG J C, MUN J, KWON S Y, *et al.* Electronic skin: recent progress and future prospects for skin-attachable devices for health monitoring, robotics, and prosthetics [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(48): 1904765.
- [ 85 ] YANG J, REN Z, XIE Z, *et al.* AIEgen with Fluorescence - Phosphorescence Dual Mechanoluminescence at Room Tem-

perature [J]. *Angew. Chem.*, 2016, 129(3): 898-902.

- [ 86 ] WANG H, XIAO Y, KONG S, *et al.* Solar-Blind UV Organic Mechanoluminescent Materials [J]. *Angew. Chem.*, 2025, 64(28).



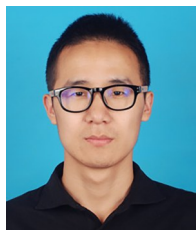
蔡重阳(1996-),男,河北石家庄人,河北大学博士研究生在读,主要从事无机发光材料与器件相关研究。

E-mail: 351216639@qq.com



杨艳民(1972-),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,教授,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事日盲波段多模态发光机理与应用相关研究。

E-mail: yangym@hbu.edu.cn



李磊朋(1992-),男,河北邢台人,博士研究生,副教授,2021年于哈尔滨工业大学获得理学博士学位,主要从事稀土掺杂发光材料与器件相关研究。

E-mail: lpl@hbu.edu.cn