

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-19

无机紫外光致发光材料研究进展:从储能释放到自恢复发射

吕旭龙¹, 王笑军^{2*}, 梁延杰^{1*}

(1. 山东大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. Department of Physics, Georgia Southern University, Statesboro, GA 30460, USA)

摘要: 紫外光致发光材料能够响应机械刺激产生紫外发光,从而实现机械刺激到光学信号的转换,是一类兼具力学响应与高能光子输出的新型智能发光材料。凭借高光子能量和优异隐蔽性,该类材料在无源传感、信息安全、光学标记及微生物灭活等领域展现出重要应用前景。近年来,随着陷阱调控、自恢复发射和柔性复合器件技术的发展,紫外光致发光研究正由传统的储能释放逐步拓展至深紫外自供能发射。本文系统综述了紫外光致发光材料、发光机制与功能应用的最新研究进展。首先,从陷阱控制型和自恢复型两类机制出发,解析机械刺激下载流子的俘获、释放、迁移与复合过程;随后,按照A区紫外(UVA, 320–400 nm)、B区紫外(UVB, 280–320 nm)和C区紫外(UVC, 200–280 nm)三个波段,总结代表性材料体系、发光中心及性能特征,揭示紫外光致发光由长波向短波、由预充能释放向自恢复输出的发展趋势;进一步归纳其在力光转换、动态加密、柔性传感、日盲探测和自供能微生物灭活等场景中的应用探索。最后,围绕新型发光中心设计、深紫外发光效率提升、自恢复机制解析和器件集成等关键问题,对该领域未来发展方向进行展望。本文旨在为紫外光致发光材料的理性设计、机制研究和功能应用提供系统参考。

关键词: 力致发光; 紫外发光; 日盲紫外; 陷阱调控; 自恢复发光

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260248

CSTR: 32170.14.CJL.20260248

Inorganic Ultraviolet Mechanoluminescent Materials: From Energy-Storage Release to Self-Recoverable Emission

LV Xulong¹, WANG Xiao-Jun^{2*}, LIANG Yanjie^{1*}

(1. School of Materials Science & Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Department of Physics, Georgia Southern University, Statesboro, GA 30460, USA)

* Corresponding Authors, E-mail: yanjie.liang@sdu.edu.cn; xwang@georgiasouthern.edu

Abstract: N Ultraviolet mechanoluminescent materials can emit ultraviolet light in response to mechanical stimuli, thereby enabling the conversion of mechanical inputs into optical signals. They represent an emerging class of smart luminescent materials that combine mechanical responsiveness with high-energy photon emission. Owing to their high photon energy and excellent optical concealment, these materials show great promise in passive sensing, information security, optical tagging, and microbial inactivation. In recent years, advances in trap regulation, self-recoverable emission, and flexible composite devices have driven ultraviolet mechanoluminescence from conventional energy-storage-and-release systems toward self-powered deep-ultraviolet emission. This review systematically summarizes recent progress in ultraviolet mechanoluminescent materials, luminescence mechanisms, and functional applications. First, the carrier trapping, release, migration, and recombination processes under mechanical stimulation are discussed from the perspectives of two representative mechanisms: trap-controlled and self-recoverable mechanoluminescence. The review then classifies reported materials according to the three ultraviolet regions—UVA (320 – 400 nm), UVB (280 – 320 nm), and UVC (200 – 280 nm)—and summarizes their representative material systems, luminescent centers, and

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(12474407)

Supported by National Natural Science Foundation of China (12474407)

performance characteristics. This classification highlights the evolution of ultraviolet mechanoluminescence from longer- to shorter-wavelength emission and from pre-charged carrier release to self-recoverable output. Recent application explorations in mechano-optical conversion, dynamic encryption, flexible sensing, solar-blind detection, and self-powered microbial inactivation are further discussed. Finally, future perspectives are provided on key issues including the design of new luminescent centers, efficiency enhancement of deep-ultraviolet emission, elucidation of self-recovery mechanisms, and device integration. This review aims to provide a systematic reference for the rational design, mechanistic understanding, and functional application of ultraviolet mechanoluminescent materials.

Keywords: mechanoluminescence; ultraviolet luminescence; solar-blind ultraviolet; trap regulation; self-recoverable luminescence

1 引 言

力致发光(Mechanoluminescence, ML)是指材料在压缩、弯曲、摩擦、冲击、拉伸或断裂等机械刺激作用下产生光发射的现象,本质上是机械能向光能的直接转换^[1-5]。作为一种独特的刺激响应型发光行为,力致发光兼具实时响应、无源激发和可视化输出等优势,在应力传感、结构健康监测、人机交互、防伪加密及智能显示等领域展现出广阔应用前景^[6-15]。尽管力致发光现象早在1605年便已有记载^[16],但长期以来相关研究主要集中于破坏性断裂发光体系^[17-23],这类体系通常不可逆,难以实现循环重复利用,因而严重限制了其实际应用。直到1999年,徐超男等首次报道了具有自恢复发光特性的 ZnS:Mn^{2+} 和 $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 弹性力致发光材料,实现了非破坏性机械刺激下稳定且可重复的光输出^[24-25]。这一里程碑式突破标志着现代力致发光研究的兴起,并推动了新型材料开发、机理探究和应用拓展的研究热潮。

经过二十余年的快速发展,已报道的力致发光材料主要集中于可见光和近红外波段^[26-34]。然而,随着高安全等级信息传输、复杂环境应力感知以及多功能光集成等前沿需求不断增长,传统可见光ML体系的局限性日益凸显。一方面,可见光信号易受环境背景光干扰,在明场条件下信噪比较低;另一方面,其发光过程具有直观可见性,难以满足高隐蔽性信息传输和先进防伪的严苛要求^[35-40]。此外,可见光光子能量较低,难以直接触发光催化、微生物灭活以及日盲探测等依赖高能光化学响应的功能过程。因此,开发兼具高隐蔽性、低背景干扰和高光子能量输出的紫外光致发光材料,已成为该领域的重要发展方向。

相较于可见光,紫外光具有更高的光子能量和

更强的光谱选择性^[41-44]。按照波长范围,紫外光通常可分为A区紫外(UVA, 320-400 nm)、B区紫外(UVB, 280-320 nm)和C区紫外(UVC, 200-280 nm)三个波段,并对应差异化的功能应用^[45-49]:UVA光能够激发多种宽禁带半导体和荧光体系,在光催化及光转换领域具有重要价值^[50-51];UVB光,尤其是310-313 nm窄带UVB光,是白癜风和银屑病等皮肤疾病临床治疗中常用且有效的光疗波段之一^[52-53];UVC光因其强核酸损伤能力和独特的“日盲”特性,在微生物灭活、深紫外通信及日盲探测等领域具有重要应用价值^[54-55]。不同于主要承担“力学信号可视化”功能的可见光力致发光,紫外光致发光不仅提供非可见的光学读出方式,还能够利用高能紫外光子直接驱动光转换、光催化、微生物灭活和日盲探测等功能过程。因此,紫外光致发光的意义并不局限于将发射波长由可见区拓展至紫外区,更在于构建“机械能输入-紫外光输出-功能响应”的新型能量转换路径。这一特点使其有望由传统应力传感材料进一步发展为自供能紫外光源及智能光功能器件。

尽管近年来紫外光致发光研究发展迅速,但整体仍处于起步阶段。目前已报道的紫外光致发光体系不足三十种,其发光中心主要集中于 Ce^{3+} ^[37,56-66]、 Tb^{3+} ^[67-70]、 Bi^{3+} ^[71-72]、 Gd^{3+} ^[74-75]、 Tm^{3+} ^[76]、 Pr^{3+} ^[77-81]等少数离子以及基质缺陷发光体系^[73](表1-2和图1),整体材料体系仍较为分散。与此同时,不同紫外波段所涉及的能量转换机制、陷阱调控规律以及自恢复动力学存在显著差异,相关研究尚缺乏系统归纳与深层次比较。特别是随着自恢复深紫外光致发光材料和柔性复合器件的不断涌现,紫外光致发光正由单纯的物理现象观察逐步迈向功能化应用探索。然而,目前针对该领域的系统性综述仍较为匮乏,尚未形成贯通“发光机制-材料体系-前沿应用”的完整认知框架。

表 1 UVA 力致发光材料

Tab. 1 UVA mechanoluminescent materials

发光中心	材料体系	发射峰/nm	机理	参考文献
Ce ³⁺	SrAl ₂ O ₄ :Ce ³⁺	358, 381	陷阱控制型	[56]
	SrAl ₂ O ₄ :Ce ³⁺ , Ho ³⁺	358, 381	陷阱控制型	[56]
	SrMgSi ₂ O ₆ :Ce ³⁺	349, 371	陷阱控制型	[57]
	SrMgSi ₂ O ₆ :Ce ³⁺ , Er ³⁺	349, 371	陷阱控制型	[57]
	Sr ₂ MgSi ₂ O ₇ :Ce ³⁺ , Er ³⁺	~350, ~370	陷阱控制型	[57]
	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ :Ce ³⁺	400	陷阱控制型	[58]
	SrMgAl ₁₀ O ₁₇ :Ce ³⁺	400	陷阱控制型	[59]
	(Ca, Sr) ₈ Mg ₃ Al ₂ Si ₇ O ₂₈ :Ce ³⁺	~390	陷阱控制型	[60]
	Sr ₂ P ₂ O ₇ :Ce ³⁺ /PDMS	~330	自恢复型	[61]
	Ca ₉ Bi(PO ₄) ₇ :Ce ³⁺ /PDMS	356	自恢复型	[37]
	Ca ₂ B ₂ O ₃ :Ce ³⁺ /PDMS	350, 385	自恢复型	[62]
	Ca ₉ Al(PO ₄) ₇ :Ce ³⁺ /PDMS	340	自恢复型	[63]
	SrMgCe(PO ₄) ₇ /PDMS	373	自恢复型	[64]
	Ca ₂ P ₂ O ₇ :Ce ³⁺	339	自恢复型	[65]
	Ca ₂ P ₂ O ₇ :Ce ³⁺ /PDMS	339	自恢复型	[65]
	Sr ₂ Al ₂ SiO ₇ :Ce ³⁺ /PDMS	393	自恢复型	[66]
Tb ³⁺	Lu ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ :Tb ³⁺	~385	陷阱控制型	[67]
	CaZnOS:Tb ³⁺	~385	自恢复型	[68]
	Y ₃ Ga ₅ O ₁₂ :Tb ³⁺ /PDMS	~385	自恢复型	[69]
	Ca ₉ NaMg(PO ₄) ₇ :Tb ³⁺ /PDMS	~385	自恢复型	[70]
Bi ³⁺	LiYGeO ₄ :Bi ³⁺	355	陷阱控制型	[71]
	CaY ₂ Ge ₄ O ₁₂ :Bi ³⁺ /PDMS	~390	自恢复型	[72]
基质缺陷	MgF ₂	~340	陷阱控制型 自恢复型	[73]

表 2 UVB 和 UVC 力致发光材料

Table 2 UVB and UVC mechanoluminescent materials

发光中心	材料体系	发射峰/nm	机理	参考文献
Gd ³⁺	Y ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ :Gd ³⁺ /PDMS	313	自恢复型	[74]
	Y ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ :Gd ³⁺ , Pr ³⁺ /PDMS	313	自恢复型	[74]
	Y ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ :Gd ³⁺ , Bi ³⁺ /PDMS	313	自恢复型	[74]
	Lu ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ :Pr ³⁺ , Gd ³⁺ /PDMS	313	自恢复型	[75]
Tm ³⁺	MgF ₂ :Tm ³⁺	292, 350	陷阱控制型 自恢复型	[76]
	NaYF ₄ :Pr ³⁺	250, 272	陷阱控制型	[77]
	Sr ₂ P ₂ O ₇ :Pr ³⁺	230, 245	陷阱控制型	[78]
Pr ³⁺	SrF ₂ :Pr ³⁺ , SrF ₂ :Pr ³⁺ /PDMS	222	陷阱控制型 自恢复型	[79]
	Sr ₃ (PO ₄) ₂ :Pr ³⁺ /PDMS	264	自恢复型	[80]
	Sr ₃ (BO ₃) ₂ :Pr ³⁺ /PDMS	272	自恢复型	[81]

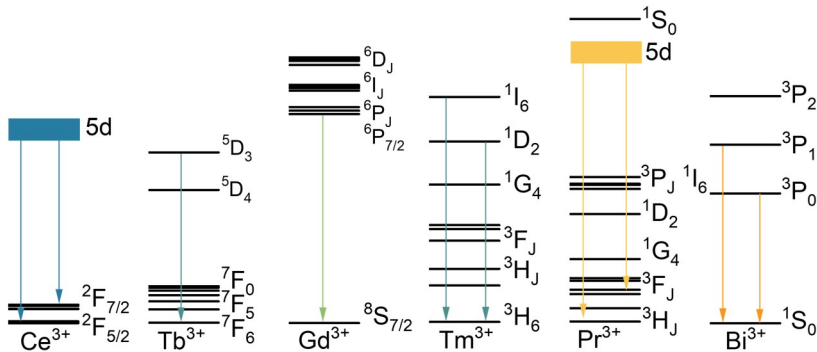


图 1 Ce³⁺、Tb³⁺、Gd³⁺、Tm³⁺、Pr³⁺和 Bi³⁺的离子能级结构及其潜在的紫外发射跃迁。箭头表示各稀土或金属离子可能发生的紫外辐射跃迁

Fig.1 Ion energy-level diagrams of Ce³⁺, Tb³⁺, Gd³⁺, Tm³⁺, Pr³⁺ and Bi³⁺ and their potential ultraviolet emission transitions. The arrows indicate the possible ultraviolet radiative transitions of these ions

基于此,本文系统综述近年来紫外光致发光材料的研究进展。首先,从陷阱控制型和自恢复型两类核心机制出发,阐述机械刺激驱动紫外发光过程中载流子的产生、俘获、迁移与复合动力学;随后,按照UVA、UVB和UVC三个波段对现有紫外光致发光材料进行分类比较,总结不同发光中心与基质体系之间的构效关系及性能演化规律;进一步结合各波段紫外光的光物理与光化学特性,探讨其在力光转换、信息安全、结构健康监测、光学标记和微生物灭活等领域的交叉应用潜力;最后,从新型材料设计、自恢复深紫外发光构筑、多场耦合机制解析以及器件化应用等维度,展望该领域未来的发展方向与挑战。本文旨在为紫外光致发光材料的理性设计、机制研究和功能应用提供参考。

2 力致发光的分类与机制

力致发光是一类由机械刺激诱导光发射的现象。传统分类主要依据材料受力过程中的宏观力学形变特征,将其分为断裂力致发光、塑性力致发

光和弹性力致发光三类^[82-83]。其中,断裂和塑性力致发光通常伴随不可逆结构破坏或永久性机械损伤,而弹性力致发光则在材料结构保持完整的条件下实现可逆、稳定的重复发光,因而构成了当前研究的核心方向。

随着对发光微观过程认识的不断深入,人们逐渐认识到,决定材料发光可重复性和衰减特性的关键因素并不只是宏观力学响应方式,更在于机械刺激下载流子的产生、俘获、迁移与释放动力学。因此,现代力致发光体系通常可依据载流子的起源与动力学行为,进一步划分为陷阱控制型和自恢复型两类核心机制^[20,27]。前者依赖光照等外部辐射预先填充陷阱,机械刺激主要作为外场激励释放储存载流子;后者则无需预激发过程,机械刺激即可实时诱导电子-空穴对分离与复合,从而实现可持续的连续光输出(图2a-c)。在紫外光致发光体系中,这两类机制基本覆盖了目前已报道的主要材料体系,因此本章围绕这两类微观机制展开探讨。

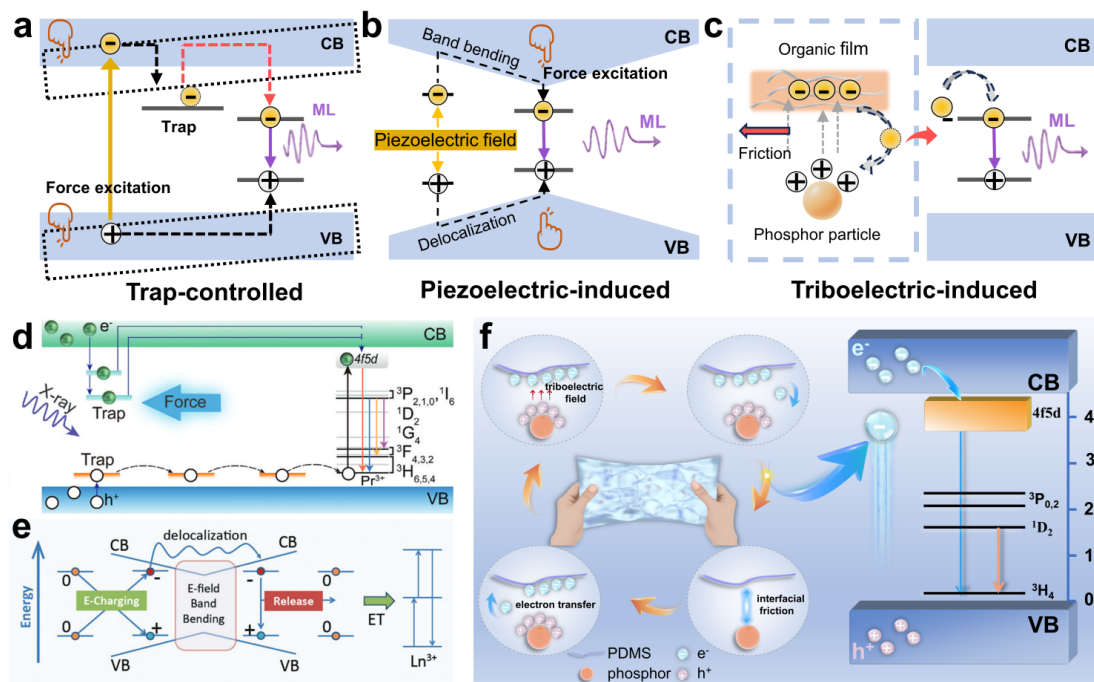


图2 几种常见的力致发光机制。机械刺激下(a)陷阱控制型、(b)压电驱动型和(c)摩擦起电驱动型力致发光机理示意图^[41]; (d) $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ 的力致发光机理示意图^[78]; (e) $\text{CaZnOS}:\text{Tb}^{3+}$ 的力致发光机理示意图^[68]; (f) $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 的力致发光机理示意图^[81]

Fig.2 Several common ML mechanisms. Schematic diagrams of ML mechanisms under mechanical stimulation: (a) trap-controlled, (b) piezoelectric-induced, and (c) triboelectric-induced ML under mechanical stimulation^[41]; proposed ML mechanisms for (d) $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ ^[78], (e) $\text{CaZnOS}:\text{Tb}^{3+}$ ^[68], and (f) $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ ^[81]

2.1 陷阱控制型力致发光

陷阱控制型力致发光是目前研究最成熟、体

系最丰富的力致发光机制之一。其核心特征是发光过程具有明显的“分步进行”特征:在施加机械

刺激前,材料需要先通过紫外光、可见光或X射线等高能辐射进行预充能(图2a)。在光激发过程中,自由电子与空穴被晶格缺陷或离子掺杂形成的陷阱能级俘获并储存。随后,当材料受到外部机械应力时,晶体中的压电效应或局域应力场可诱导瞬态内电场,使能带结构发生倾斜并降低陷阱的有效束缚势垒,促使被俘获载流子脱陷并重新迁移至导带或价带。最终,释放的电子与空穴发生辐射复合,或将能量传递至激活离子,从而产生特征紫外发射。

在许多无机陷阱控制型ML体系中,压电电场诱导脱陷被认为是最重要的机制之一^[84]:在非中心对称的压电晶体中,机械应力引发的宏观极化电场不仅能够显著降低陷阱深度,还可驱动脱陷载流子定向迁移,从而提高辐射复合几率。值得注意的是,对于空间群呈中心对称的晶体,掺杂离子的局域引入和晶格畸变也可能在局部打破反演对称性,形成微观局域压电场并参与载流子释放。以 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ 为例,X射线辐照后,基质中的深、浅陷阱俘获并储存载流子;当施加外力时,晶体内部局域压电场驱动载流子释放并复合,将能量传递给 Pr^{3+} 离子,进而激发特征力致发光(图2d)^[78]。此外,铁电畴壁释放模型和位错运动模型等也被相继提出^[85-86],说明陷阱控制型ML可能涉及多种微观过程的耦合,而压电场在其中通常发挥着重要作用。

陷阱控制型力致发光体系的关键优势在于其“可充能”特性:通过二次光照即可重新填充耗尽的陷阱以恢复发光。然而,由于该过程在本质上消耗晶格中预存的载流子,随着储存载流子的逐渐耗尽,其力致发光强度通常呈现随时间衰减特征。此外,对预充能的依赖也限制了其在极端无光环境下的长期连续工作。尽管如此,陷阱控制机制在紫外光致发光体系中仍具有特殊的物理意义和技术优势。由于紫外发射对应较高光子能量,普通强度的机械刺激很难直接驱动高能辐射跃迁;而陷阱控制机制通过预充能过程实现能量的提前存储与积累,使后续微弱力学扰动即可作为“触发开关”释放高能紫外光子。这一机制降低了机械刺激直接产生紫外发射的物理门槛,也使高效、高强度紫外光致发光更易实现。因此,合理调控晶格中的陷阱深度与浓度,并精确优化发光中心能级匹配,是实现高能紫外光子可控释放的

核心途径。

2.2 自恢复型力致发光

自恢复型力致发光无需外部预激发,主要依赖机械刺激的实时驱动诱导载流子连续产生并触发发光。其突出优势在于材料能够在长周期机械循环中保持相对稳定的光输出,且不易受到有限载流子库枯竭的限制。根据载流子产生的物理来源,自恢复型体系主要可分为压电驱动机制和摩擦起电驱动机制两类。

(1) 压电驱动机制

压电驱动机制通常存在于具有本征非中心对称结构的压电发光材料中。同时,在部分中心对称基质中,掺杂离子引起的局域晶格畸变与晶格对称性破缺也可能诱导微观压电效应。当施加外加应力时,晶格整体或局域极化产生宏观/微观压电势,导致导带与价带发生局域弯曲,并可能降低载流子产生或分离所需的有效势垒。随后,实时产生的载流子在局域内电场驱动下定向迁移,并在发光中心发生辐射复合(图2b)。由于摆脱了对预存载流子的依赖,压电驱动机制具有良好的实时响应特性,且发光强度通常与外加应力呈正相关^[40]。典型体系如 $\text{CaZnOS}:\text{Tb}^{3+}$,在机械应力引发的强局域压电场作用下,晶格能带发生显著弯曲,从而大幅降低缺陷态或能带间的电子隧穿势垒,驱动电荷的原位实时产生与定向迁移,最终输出 Tb^{3+} 的紫外/可见特征发射(图2e)^[68]。

(2) 摩擦起电驱动机制

摩擦起电驱动机制是近年来柔性力致发光领域的研究热点。不同于晶格内部的压电极化,该机制主要源于“发光颗粒/柔性弹性体(如聚二甲基硅氧烷,PDMS)”复合薄膜体系。在宏观拉伸、弯曲或摩擦作用下,发光颗粒与聚合物基质界面发生微观相对位移,并通过反复接触-分离诱导显著的摩擦起电效应(图2c)。在这一过程中,电子可依据两相材料表面功函数或表面电子亲和能力差异发生界面电荷转移^[87],并在异质界面处形成高密度电荷层和强局域静电场。在强界面电场作用下,界面转移电荷及其回迁过程可诱导载流子复合或能量转移,从而激发发光中心产生紫外发射。以 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 复合体系为例,动态机械形变促使 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}$ 发光颗粒与PDMS弹性体界面反复接触-分离,界面电荷转移建立起局域静电场。随后,电子跨越界面回迁并与空穴复合,

将能量传递给 Pr^{3+} 离子, 最终驱动 UVC 力致发光 (图 2f)^[81]。摩擦起电驱动机制的发光性能高度依赖于接触两相的表面功函数差异、界面有效接触面积和机械激发频率等因素^[88-91]。这一能量转换路径降低了对刚性无机压电基质的依赖, 并通过界面工程和摩擦电序列调控, 为柔性可穿戴器件和智能电子皮肤的开发提供了新的材料设计思路。

陷阱控制型和自恢复型力致发光分别代表了机械能向光能转换的两类重要微观模式。前者依赖晶格缺陷中预存载流子的外场释放, 具备较高瞬时发光强度和较成熟的材料构筑方案, 但不可避免地受制于“充能-耗尽”的循环限制; 后者则通过压电极化或界面摩擦起电实现载流子的原位实时产生, 具有更好的输出稳定性, 更适合长周期工业在线监测和柔性智能传感。对于紫外光致发光而言, 早期研究多依赖陷阱控制机制积蓄足够能量以驱动高能紫外光子发射; 近年来, 摩擦起电等自恢复机制的引入从根本上摆脱了材料对外部预充能的依赖, 彻底释放了紫外波段在全天候、无源不间断工作场景中的应用潜力。需要强调的是, 这两类机制在实际材料体系中并非彼此孤立, 而常伴随复杂的共存与多场耦合效应。例如, 机械刺激产生的压电场在驱动实时自恢复发射的同时, 也可能加速晶格中残余浅陷阱载流子的释放。因此, 通过陷阱能级工程、压电晶格调制和界面摩擦电效应的协同设计, 构筑兼具高瞬时亮度、长周

期循环稳定性和快速自恢复能力的新型多模态紫外光致发光体系, 是该领域未来迈向实用化的重要方向。

3 紫外光致发光研究现状

与相对成熟的可见光力致发光相比, 紫外光致发光 (UV-ML) 的发展面临更严峻的物理瓶颈。其根本原因在于, 高能紫外光子的产生对激活离子的能级结构、基质材料的带隙宽度以及载流子的动态激发-复合过程提出了更严格要求。尤其对于 UVB (280-320 nm, 约 3.88-4.43 eV) 和 UVC (200-280 nm, 约 4.43-6.20 eV) 波段, 较高的发射能量使常规发光中心难以实现高效辐射跃迁; 同时, 深紫外光子容易受到基质本征自吸收以及缺陷态诱导非辐射弛豫过程的限制。因此, 在相当长一段时间内, 力致发光研究主要集中于长波可见光和近红外区域。

2007 年, 徐超男等首次在 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+}$ 和 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ 体系中观察到可重复的紫外光致发光现象, 证实了机械刺激驱动高能紫外发射的可行性, 正式开启了紫外光致发光研究^[56]。随后十余年间, 相关研究主要围绕陷阱控制型体系展开, 通过调控陷阱深度和电荷捕获能力实现紫外输出。近年来, 伴随着自恢复力致发光机制的兴起, 无需预充能的实时响应体系不断涌现, 推动该领域研究前沿从 UVA 逐步向 UVB 和 UVC 深紫外区域拓展 (图 3)。

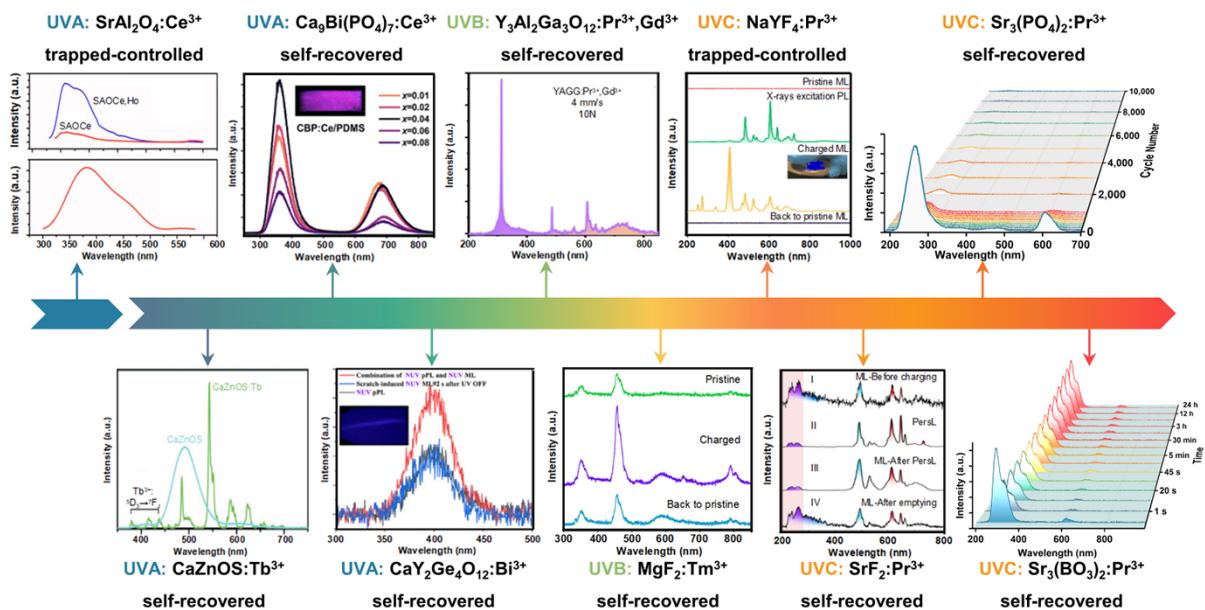


图3 紫外光致发光材料的发展历史^[56, 68, 37, 72, 74, 76-77, 79-81]

Fig.3 Development history of ultraviolet mechanoluminescent materials.^[56, 68, 37, 72, 74, 76-77, 79-81]

根据发射波长差异,目前已报道的紫外光致发光材料主要分布于UVA、UVB和UVC三个波段。不同波段不仅对应差异化的发光中心、基质体系和能量转换机制,也清晰映射出紫外光致发光由“低能近紫外”向“高能深紫外”发展的演进脉络。

3.1 UVA 力致发光

UVA波段(320-400 nm)是目前材料体系最丰富、研究基础最成熟的紫外光致发光区域。由于该波段邻近可见光边界,对基质带隙宽度的要求相对宽松,且 Ce^{3+} 、 Tb^{3+} 和 Bi^{3+} 等发光中心均可通过特征能级跃迁实现近紫外发射,因此UVA波段成为紫外光致发光领域最早取得突破的研究方向。

早期UVA力致发光主要依赖陷阱控制型机制。其中, Ce^{3+} 离子凭借其宇称允许的 $5d \rightarrow 4f$ 跃迁,发射波长通常可覆盖320-400 nm范围,是应用最广泛的UVA发光中心^[61]。继徐超男团队在 SrAl_2O_4 :

Ce^{3+} 中发现UVA力致发光,并通过 Ho^{3+} 调控陷阱结构显著增强ML强度之后(图4a)^[56],研究人员迅速将 Ce^{3+} 激活体系拓展至硅酸盐及铝硅酸盐基质。例如 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7:\text{Ce}^{3+}$ 在紫外充能后展现出横跨300-470 nm的宽带紫外光致发光(图4b)^[58]; $\text{SrMgSi}_2\text{O}_6:\text{Ce}^{3+}$ ^[57]、 $\text{SrMgSi}_2\text{O}_6:\text{Ce}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ ^[57]、 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Ce}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ ^[57]以及 $\text{SrMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Ce}^{3+}$ ^[59]也表现出良好的UVA储能力致发光特性。这些材料通常具有丰富的本征缺陷和适宜的陷阱能级结构,能够有效存储载流子并在机械刺激作用下实现释放。此外,UVA发光中心也日趋多元: Tb^{3+} 离子的 $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_6$ 高能跃迁位于385 nm附近, Bi^{3+} 的 $^3\text{P}_1 \rightarrow ^1\text{S}_0$ 跃迁同样能输出稳定近紫外光。近年来报道的 $\text{LiYGeO}_4:\text{Bi}^{3+}$ (图4c)^[71]和 $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Tb}^{3+}$ (图4d)^[67]等体系表明,通过理性设计基质配位环境和缺陷局域能级,陷阱控制型UVA力致发光材料的综合性能可得到显著优化。

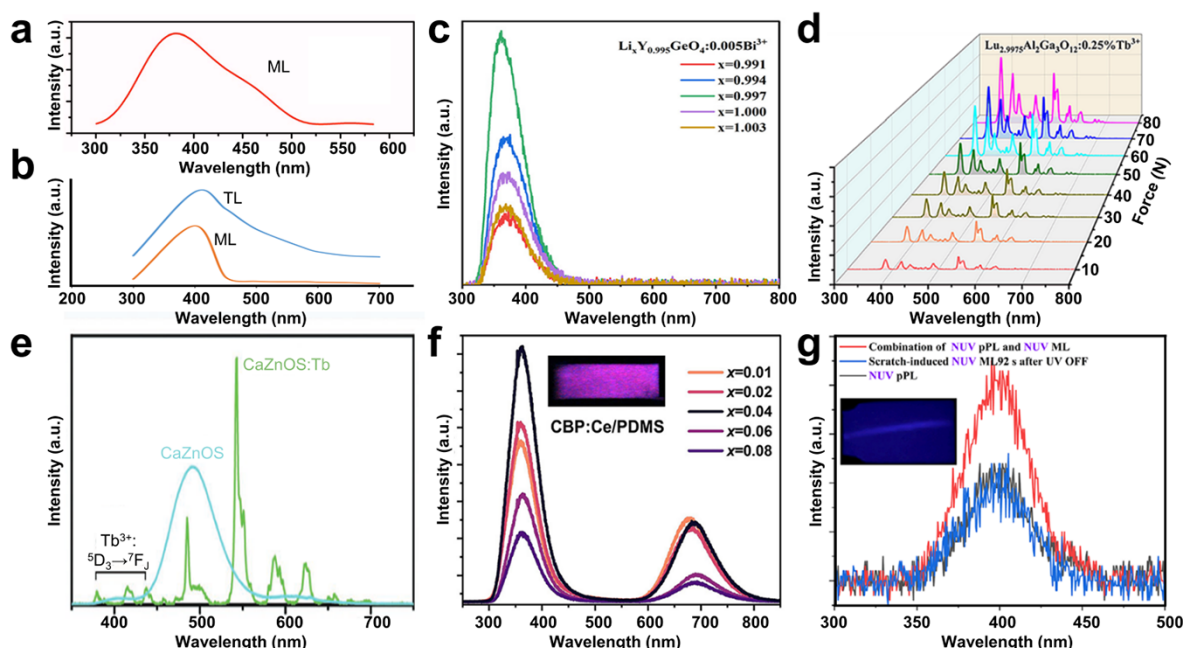


图4 UVA 力致发光材料。(a) $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ 的力致发光光谱^[56]; (b) $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7:\text{Ce}^{3+}$ 荧光粉经 15 分钟紫外灯辐照后的力致发光和热释光发射光谱^[58]; (c) 经 254 nm 紫外灯预辐照 1 分钟后的 $\text{LiYGeO}_4:\text{Bi}^{3+}$ 粉末的力致发光光谱^[71]; (d) $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:0.25\%\text{Tb}^{3+}$ 的力致发光光谱(经 254 nm 紫外灯预照射 2 分钟后)^[67]; (e) 未掺杂 CaZnOS 的缺陷发光与 Tb^{3+} 掺杂 CaZnOS 的力致发光的比较^[68]; (f) 拉伸刺激下 $\text{Ca}_9\text{Bi}(\text{PO}_4)_7:x\text{Ce}^{3+}/\text{PDMS}$ 的力致发光光谱^[37]; (g) 经 254 nm 紫外灯照射 1 分钟后, $\text{CaY}_2\text{Ge}_4\text{O}_{12}:\text{Bi}^{3+}$ 样品在 92 s 时的余辉发射光谱、余辉发射与划痕诱导力致发光的组合光谱以及划痕诱导力致发光光谱(插图显示了划痕诱导力致发光的照片)^[72]

Fig.4 UVA mechanoluminescent materials. (a) ML spectrum of $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$; ^[56] (b) ML and TL emission spectra of the $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7:\text{Ce}^{3+}$ after 15 min UV irradiation; ^[58] (c) ML spectra of the $\text{LiYGeO}_4:\text{Bi}^{3+}$ powders pre-irradiated with a 254 nm UV lamp for 1 min; ^[71] (d) ML spectra of $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:0.25\%\text{Tb}^{3+}$ after 2 min pre-irradiation with a 254 nm UV lamp; ^[67] (e) comparison between intrinsic defect emission of undoped CaZnOS and ML emission of Tb^{3+} -doped CaZnOS ; ^[68] (f) ML spectra of $\text{Ca}_9\text{Bi}(\text{PO}_4)_7:x\text{Ce}^{3+}/\text{PDMS}$ under the stretching stimulus; ^[37] (g) persistent luminescence, combined persistent luminescence and scratch-induced ML, and scratch-induced ML spectra of $\text{CaY}_2\text{Ge}_4\text{O}_{12}:\text{Bi}^{3+}$ recorded at 92 s after 1 min irradiation with a 254 nm UV lamp, the inset shows a photograph of scratch-induced ML. ^[72]

近年来,随着自恢复机制的引入,UVA研究范式正在由“传统储能释放”向“无需预激发的自恢复体系”转变。2019年,王锋团队通过Li辅助调控获得CaZnOS:Tb³⁺材料,实现了源于⁵D₃→⁷F₆跃迁、位于385 nm的自恢复紫外光致发光(图4e),确证了压电驱动机制在构筑自供能实时UVA光源中的可行性^[68]。随后,王赵锋团队基于界面摩擦起电效应设计合成了Ca₉Bi(PO₄)₇:Ce³⁺/PDMS复合体系,实现了长循环稳定的自恢复UVA发射(图4f)^[37]。与此同时,Lothar Wondraczek团队在CaY₂Ge₄O₁₂:Bi³⁺体系中亦实现了约400 nm的弹性自恢复UVA发光(图4g)^[72]。尽管如此,与陷阱控制型材料相比,当前自恢复体系在瞬时发光强度和循环稳定性方面仍有提升空间。如何兼顾高亮度与无衰减连续输出,仍是UVA力致发光走向实用化需要解决的关键问题。

3.2 UVB力致发光

相比之下,UVB波段(280-320 nm)力致发光

材料研究明显滞后。其根本瓶颈在于:光子能量进一步提高,对发光中心能级匹配和基质抑制紫外区非辐射弛豫的能力提出了双重挑战。目前,已报道的UVB力致发光中心主要集中于Gd³⁺和Tm³⁺离子,其中Gd³⁺的⁶P_{7/2}→⁸S_{7/2}窄带跃迁(约310-313 nm)具有较高功能应用价值。2023年,王元生团队在Y₃Al₂Ga₃O₁₂:Gd³⁺石榴石体系中实现了313 nm UVB特征发射,率先将力致发光拓宽至UVB区域(图5a)。在此基础上,该团队进一步引入Pr³⁺离子,构建Pr³⁺→Gd³⁺能量传递通道,使Gd³⁺力致发光强度提升近4倍(图5b)^[74]。同时,Bi³⁺共掺杂也可以使材料的紫外光致发光强度提升近2倍^[74]。随后,徐旭辉团队在Lu₃Al₂Ga₃O₁₂:Gd³⁺,Pr³⁺体系中进一步优化了材料的弹性恢复动力学(图5c),该材料在机械刺激停止后,仅需在暗室中静置90 s即可恢复至初始状态的90%以上,表现出良好的自恢复特性(图5d)^[75]。除Gd³⁺体系外,

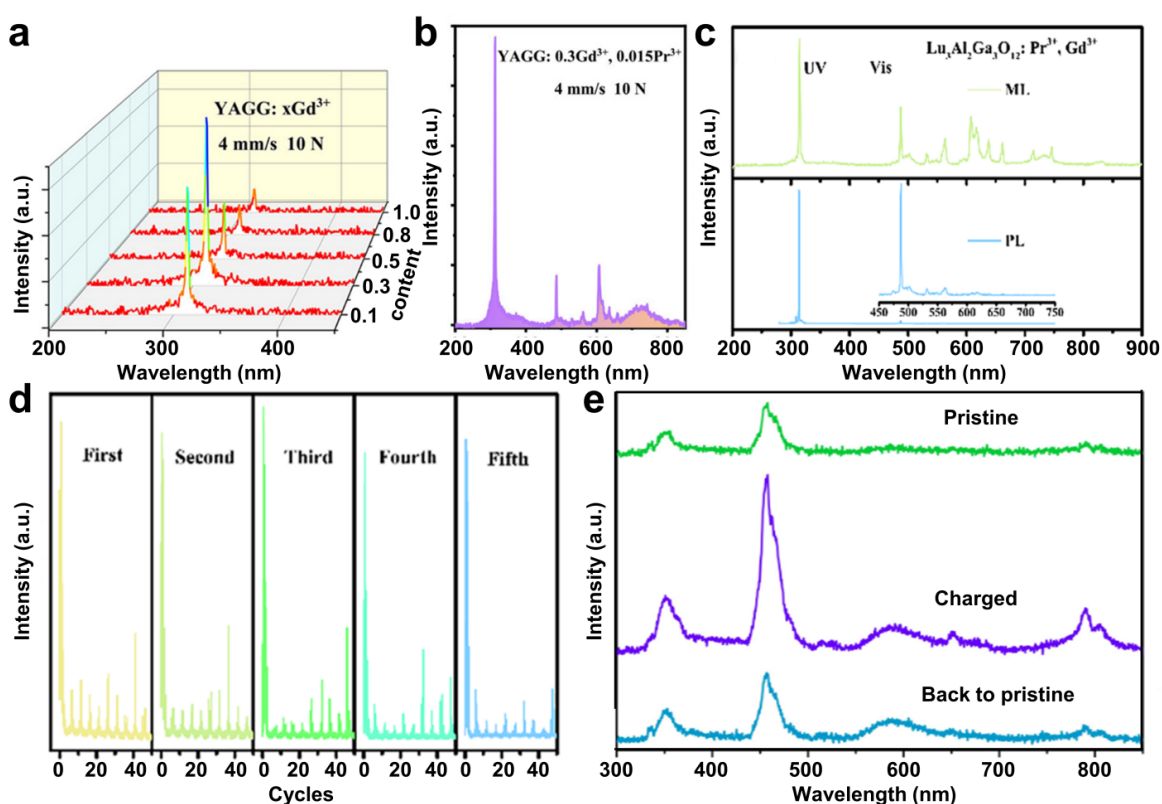


图5 UVB力致发光材料。(a) Y₃Al₂Ga₃O₁₂:xGd³⁺/PDMS的力致发光光谱^[74]; (b) Y₃Al₂Ga₃O₁₂:0.30Gd³⁺, 0.15Pr³⁺/PDMS的力致发光光谱^[74]; (c) Lu₃Al₂Ga₃O₁₂:Pr³⁺, Gd³⁺/PDMS的力致发光和光致发光光谱对比^[75]; (d) Lu₃Al₂Ga₃O₁₂:Pr³⁺, Gd³⁺/PDMS经90 s后的循环情况^[75]; (e) MgF₂:Tm³⁺在不同条件下的力致发光光谱^[76]

Fig.5 UVB mechanoluminescent materials. (a) ML spectra of Y₃Al₂Ga₃O₁₂:xGd³⁺/PDMS; ^[74] (b) ML spectrum of Y₃Al₂Ga₃O₁₂:0.30Gd³⁺, 0.15Pr³⁺/PDMS; ^[74] (c) comparison between ML and PL spectra of Lu₃Al₂Ga₃O₁₂:Pr³⁺, Gd³⁺/PDMS; ^[75] (d) cyclic ML response of Lu₃Al₂Ga₃O₁₂:Pr³⁺, Gd³⁺/PDMS after 90 s recovery; ^[75] (e) ML spectra of MgF₂:Tm³⁺ under different conditions. ^[76]

Tm^{3+} 离子也被证实可作为UVB力致发光的有效发光中心。杨艳民团队在 $\text{MgF}_2:\text{Tm}^{3+}$ 体系中观察到源于 Tm^{3+} 的 $^1\text{I}_6 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 跃迁、位于292 nm的自恢复型紫外光致发光,并发现该发射经X射线预辐照充能后可显著增强(图5e)^[76]。总体来看,UVB力致发光仍处于发展初期,发光中心种类有限以及微观电荷转移路径认识不足,限制了新型UVB力致发光材料的理性设计。未来亟需拓展宽带隙基质体系,并深化对其缺陷物理与能量迁移机制的理解。

3.3 UVC力致发光

UVC区域(200-280 nm)具有最高的辐射光子能量,是目前力致发光物理领域最具挑战性、也最具前沿探索价值的研究方向之一。实现高效UVC力致发光面临极为苛刻的物理条件:首先,基质材料必须具备足够宽的禁带宽度,以消除对深紫外光子的本征自吸收限制;其次,激活离子需在极宽的能级跨度下拥有宇称允许且高辐射跃迁机率的路径。目前,已报道的UVC力致发光材料的发射中心主要集中于 Pr^{3+} 离子,其4f5d能级结构可提供覆盖200-280 nm范围的宇称允许跃迁,因而成为构筑高效UVC力致发光的重要选择^[41]。与之匹配的基质主要为具有较高深紫外透过率和结构刚性的宽带隙氟化物、磷酸盐和硼酸盐体系。

早期UVC力致发光体系仍主要沿缺陷陷阱控制的策略。杨艳民团队在X射线充能后的 $\text{NaYF}_4:\text{Pr}^{3+}$ 中实现了源于 Pr^{3+} 的 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{F}_4, ^1\text{G}_4$ 跃迁、位于250 nm窄带UVC力致发光(图6a)^[77]。随后,该团队在X射线预辐照的 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ 体系中观测到峰值位于230 nm的深紫外光致发光,并系统研究了辐照剂量与力致发光强度之间的关系(图6b)^[78]。这些前期工作确立了“力致深紫外发光”的物理可行性,但缺陷储能体系本质上受限于载流子库的逐步枯竭,导致ML信号随机循环次数的增加而快速衰减,难以支撑长周期的应用。

为了突破这一科学瓶颈,近年来研究重点正加速向“无需预充能的自恢复型UVC体系”演进。蔡重阳等在 $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ 体系中实现了兼具缺陷控制与自恢复驱动双模态特征的222 nm远紫外光致发光(图6c)^[79]。然而,实验结果揭示,无预激发条件下的UVC力致发光强度相对微弱,而预充能后的陷阱控制型力致发光强度可增强约90倍。该现象深刻表明,如何在摆脱预激发的条件下大幅提升自恢复深紫外光致发光强度,仍是当前该领域面临的难题。

针对这一瓶颈,摩擦起电驱动策略为构筑高强度、自恢复UVC力致发光体系开辟了新路径。近期,梁延杰团队通过将宽带隙紫外发光材料与高度可形变的弹性体基质进行异质构筑,取得了系列进展。首先,该团队设计了 $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 柔性复合薄膜,利用动态形变过程中的界面摩擦起电,在无需预充能的条件下,成功激发出峰值位于264 nm的深紫外光致发光(图6d)。该柔性薄膜在10000次连续拉伸过程中保持稳定输出,且静置24 h后力致发光强度可恢复至初始值的59.1%^[80]。为进一步提升深紫外光致发光强度与恢复速率,该团队通过优化荧光粉组成和界面摩擦起电特性,构筑了 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 柔性复合弹性体,实现了强度更高、循环稳定性更优的深紫外光致发光^[81]。该体系不仅能够在10000次拉伸循环过程中保持稳定日盲紫外光输出(图6e),而且静置1 s后即可恢复至初始强度的43.2%,24 h后恢复至90.2%(图6f)。更重要的是,其力致发光信号在10000次循环过程中始终可被日盲紫外相机清晰捕获(图6g),表明该体系兼具良好的循环稳定性和自恢复性。这些结果表明,摩擦起电介导的弹性力致发光体系能够在规避传统储能型深紫外发光寿命限制的同时,打通“机械能输入-深紫外自供能发射-日盲探测”的技术路线,为构筑柔性深紫外光功能系统提供了参考。

总体而言,UVC力致发光经历了由陷阱控制型向自恢复型逐步演进的过程。 Pr^{3+} 仍然是目前最有效的深紫外发光中心之一,宽带隙氟化物、磷酸盐和硼酸盐则构成主要基质体系。尽管近年来该方向取得重要突破,但整体仍处于起步阶段,力致发光效率、循环稳定性以及力-电-光耦合机制仍需要进一步提升和深入理解。

3.4 小结

综上,紫外ML正由“可被观察的近紫外现象”发展为“可被设计的深紫外功能光源”;从机制演进看,其核心驱动力也正由预承载流子的释放转向机械刺激下界面电荷的实时生成与复合。目前,UVA波段已建立相对成熟的材料网络与构效认识, Ce^{3+} 、 Tb^{3+} 和 Bi^{3+} 等离子的能级设计具有较高自由度;UVB波段研究仍处起步阶段,材料体系较少,主要依赖 Gd^{3+} 等窄带发光中心;UVC波段对基质带隙和发光中心要求最高,现有研究主要集中于 Pr^{3+} 掺杂体系。这种明显的波段差异与紫外发射所需的能级条件密切相关。总体而言,UVA发射能量相对较低,许

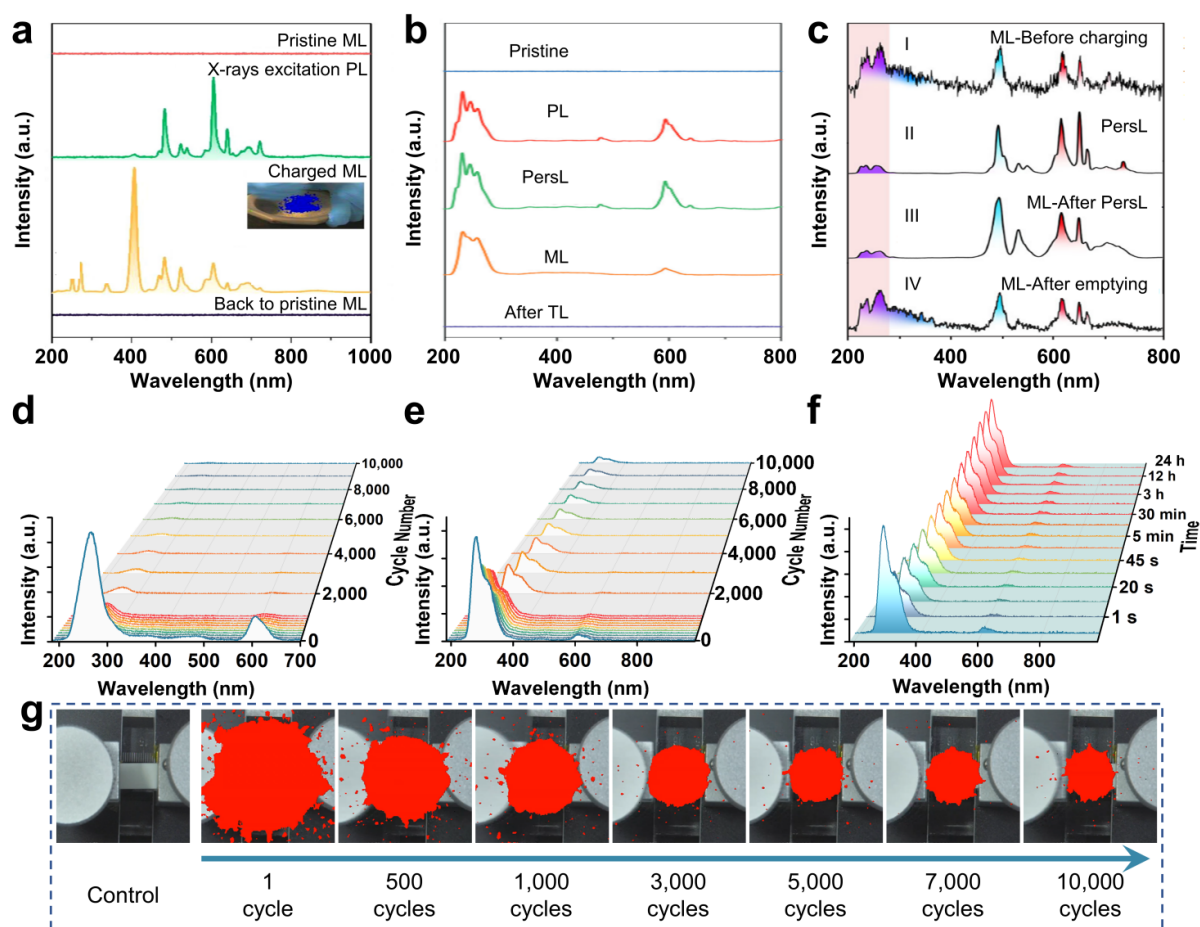


图6 UVC力致发光材料。(a) 不同条件下 $\text{NaYF}_4:\text{Pr}^{3+}$ 光谱比较;插图为日盲紫外相机拍摄的样品发光图像^[77]; (b) 不同条件下 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ 光谱比较^[78]; (c) 不同条件下 $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ 光谱的比较^[79]; (d) $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 弹性体薄膜经10000次连续拉伸循环时的力致发光光谱^[80]; (e) $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 弹性体薄膜经10000次连续拉伸循环时的力致发光光谱^[81]; (f) $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 弹性体薄膜在室温下自然放置1秒至24小时后的力致发光光谱^[81]; (g) 10000次拉伸循环过程中记录的 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 薄膜的UVC力致发光照片^[81]

Fig.6 UVC mechanoluminescent materials. (a) Spectral comparison of $\text{NaYF}_4:\text{Pr}^{3+}$ under different conditions; inset: luminescence image captured by a solar-blind camera; ^[77] (b) spectral comparison of $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ under different conditions; ^[78] (c) spectral comparison of $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ under different conditions; ^[79] (d) UVC ML emission spectra of the $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ elastomer film over 10,000 continuous stretching cycles; ^[80] (e) UVC ML emission spectra of the $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ elastomer film over 10,000 continuous stretching cycles; ^[81] (f) UVC ML emission spectra of the $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ elastomer film after natural storage at room temperature for different durations from 1 s to 24 h; ^[81] (g) UVC ML images of the $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ film recorded throughout the 10,000 stretching cycles. ^[81]

多稀土离子的允许或准允许能级跃迁能够自然落入UVA区域,且相关激发态通常具有较好的稳定性,因而更易实现有效的辐射跃迁。相比之下,UVB尤其是UVC发射需要更高能量的激发态,而高能级态更容易受到多声子非辐射弛豫以及基质能带、缺陷态等竞争过程的影响。因此,实现高效UVB/UVC发射不仅需要合适的发光中心能级结构,还需要对基质带隙、局域晶场及缺陷环境进行协同调控,这也是目前高效UVB/UVC力致发光体系相对有限的重要原因。值得注意的是,自恢复型机制(包括压电驱动与

摩擦起电复合体系)的出现,改变了传统紫外光致发光对外部预充能的依赖,使紫外波段力致发光具备了可循环、连续输出的可能。这一发展不仅拓展了深紫外光源与柔性传感的应用潜力,也为全波段紫外光致发光材料的理性设计提供了更多思路。尽管现阶段紫外光致发光材料仍受制于发射效率偏低、发光中心种类有限以及多场耦合下的界面动力学机制尚不明晰等问题,但其高能光子输出特性,使其在信息安全、生物医学、结构健康监测及特种深紫外器件等领域展现出良好的发展前景。

4 紫外光致发光应用

紫外光致发光兼具机械响应与高能紫外光子输出的双重特征,能够实现机械能向高能光子的直接转换,在自供能器件中既可作为力学信号转换器,也可作为独立紫外光源。与传统可见光致发光相比,紫外光致发光具有光子能量高及光谱选择性强等核心优势。因此,它不仅可以作为力学刺激的光学读出信号,还能直接参与光催化、

生物调控、信息安全和微生物灭活等功能过程。由于不同波段紫外光对应不同光物理和光化学效应,紫外光致发光在应用端表现出显著的波长依赖性:UVA波段更适合作为紫外激发源与高隐蔽性信息载体;UVB波段兼具特异性生物活性和室内环境高信噪比传感优势;UVC波段则在深紫外自供能结构监测、高安全防伪及自供能微生物灭活等前沿领域展现出独特潜力(图7和图8)。

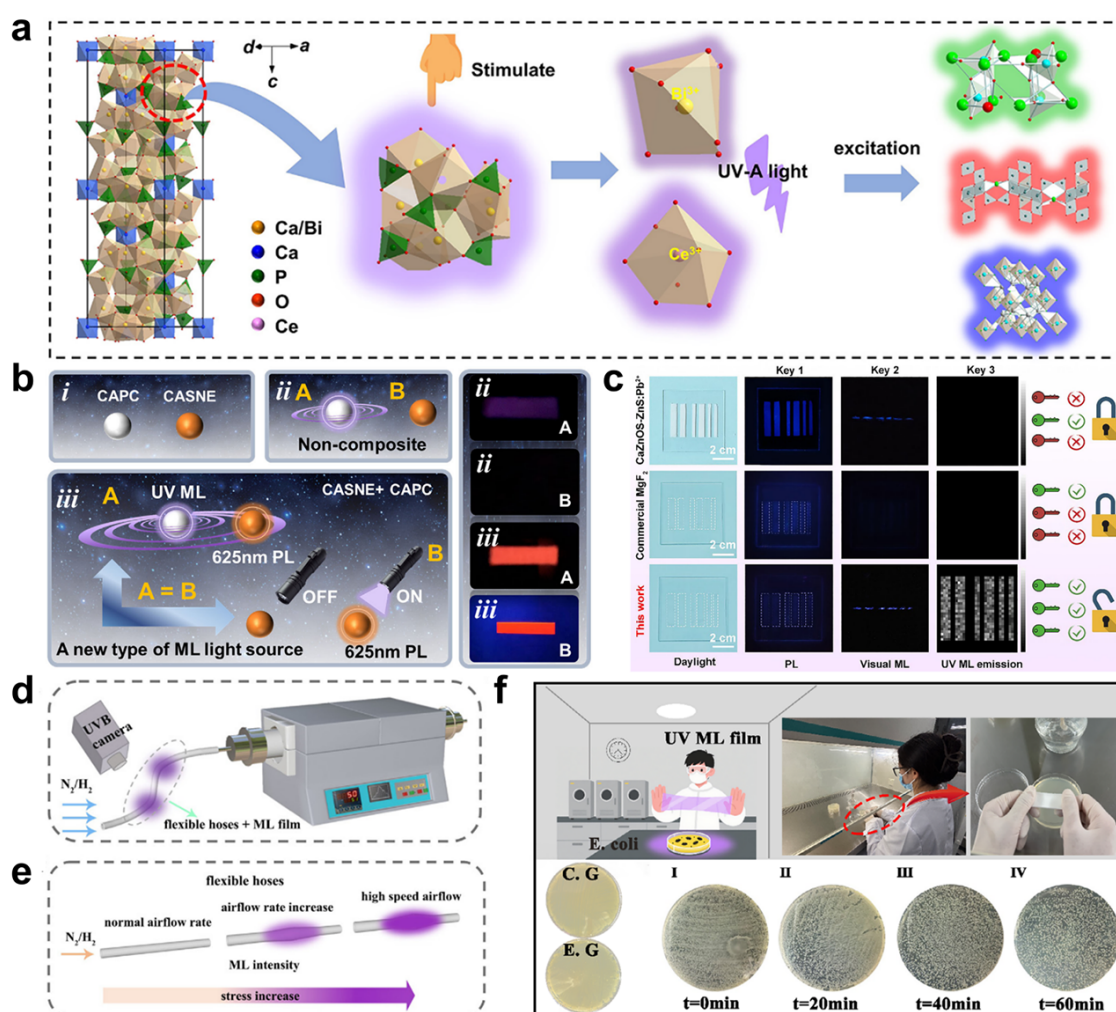


图7 UVA力致发光的光转换与信息安全应用,以及UVB力致发光的柔性传感与生物响应应用。(a) 基于近紫外激发的 $\text{Ca}_9\text{Bi}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}$ 力致发光调控策略示意图^[37]; (b) 能量供体($\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}$)与能量受体($\text{CaAlSi}_3\text{N}_3:\text{Eu}^{2+}$)之间的辐射能量传递示意图^[63]; (c) 蓝色力致发光器件、商用 MgF_2 以及实验室合成 MgF_2 的解码过程^[73]; (d) 管式炉通气过程中应力检测示意图^[74]; (e) 不同气流速率下柔性软管的示意图^[74]; (f) $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+}, \text{Gd}^{3+}/\text{PDMS}$ 力致发光薄膜在连续拉伸条件下产生紫外光致发光并灭活大肠杆菌的示意图、实验照片及灭菌效果图^[75]

Fig.7 UVA ML for light conversion and information security, and UVB ML for flexible sensing and biological response applications. (a) Schematic illustration of the NUV-excitation-based ML manipulation strategy of $\text{Ca}_9\text{Bi}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}$; ^[37] (b) radiative energy transfer between the energy donor $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}$ and the acceptor $\text{CaAlSi}_3\text{N}_3:\text{Eu}^{2+}$; ^[63] (c) Decoding processes of the blue ML device, commercial MgF_2 , and laboratory-synthesized MgF_2 ; ^[73] (d) Schematic illustration of stress detection during gas flow in a tube furnace; ^[74] (e) schematic diagrams of flexible hoses under different airflow rates; ^[74] (f) schematic illustration, experimental photograph, and sterilization results for $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+}, \text{Gd}^{3+}/\text{PDMS}$ ML films under continuous stretching. ^[75]

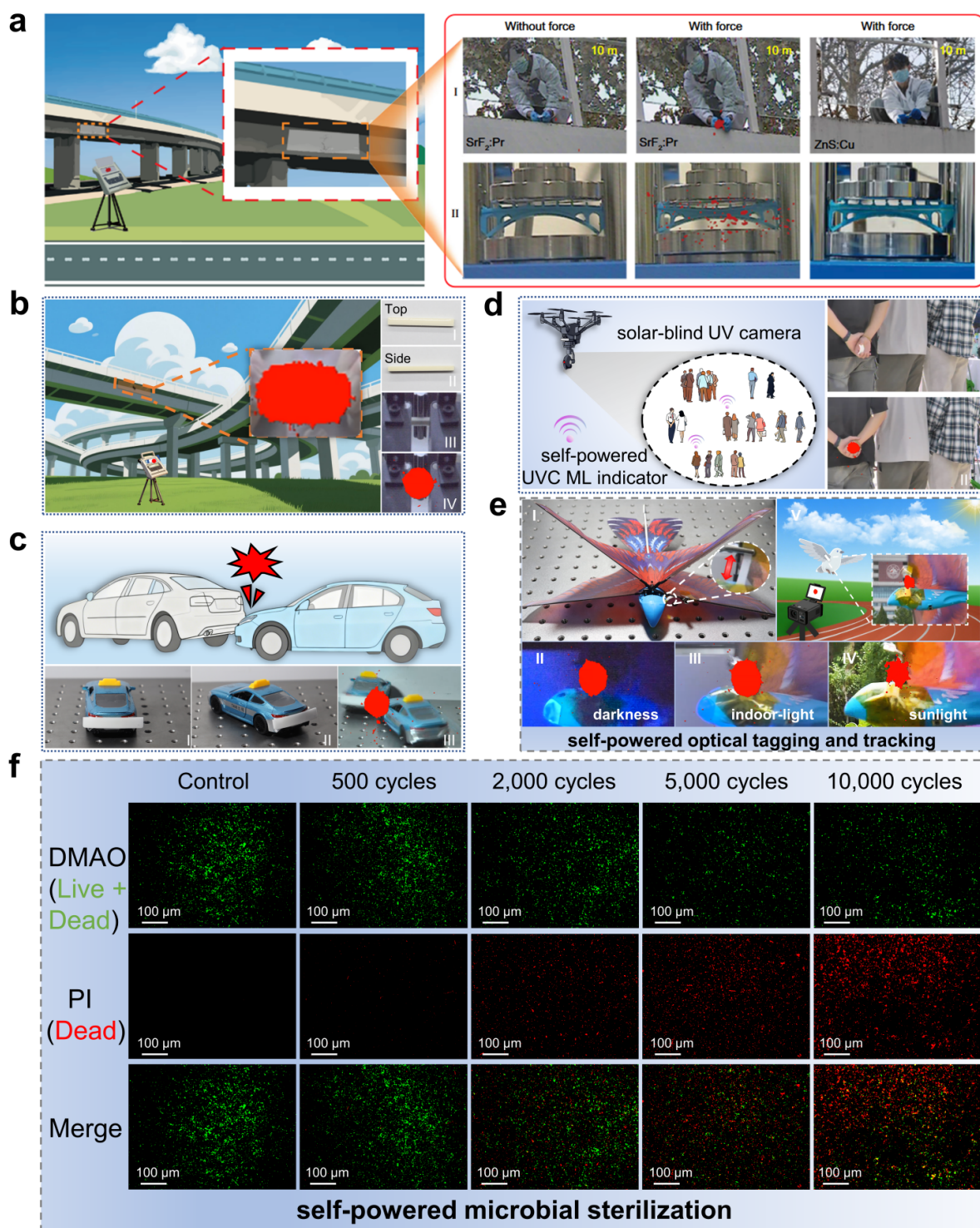


图8 UVC力致发光的多功能应用。(a) 基于SrF₂:Pr³⁺的结构健康监测^[79];(b) Sr₃(PO₄)₂:Pr³⁺/PDMS深紫外光致发光弹性体用于结构失效监测^[80];(c) Sr₃(PO₄)₂:Pr³⁺/PDMS深紫外光致发光弹性体用于碰撞检测^[80];(d) Sr₃(PO₄)₂:Pr³⁺/PDMS深紫外光致发光弹性体用于隐蔽光学标记与追踪^[80];(e) Sr₃(BO₃)₂:Pr³⁺/PDMS深紫外光致发光弹性体用于自供能光学标记与追踪^[81];(f) Sr₃(BO₃)₂:Pr³⁺/PDMS深紫外光致发光弹性体用于微生物灭活^[81]

Fig.8 UVC ML for multifunctional applications. (a) Structural health monitoring based on SrF₂:Pr³⁺; ^[79] (b) Demonstration of structural failure monitoring via Sr₃(PO₄)₂:Pr³⁺/PDMS UVC ML elastomer; ^[80] (c) Demonstration of collision detection via Sr₃(PO₄)₂:Pr³⁺/PDMS UVC ML elastomer; ^[80] (d) Demonstration of covert optical tagging and tracking via Sr₃(PO₄)₂:Pr³⁺/PDMS UVC ML elastomer; ^[80] (e) Demonstration of self-powered optical tagging and tracking via Sr₃(BO₃)₂:Pr³⁺/PDMS UVC ML elastomer; ^[81] (f) Demonstration of microbial sterilization via Sr₃(BO₃)₂:Pr³⁺/PDMS UVC ML elastomer. ^[81]

4.1 UVA 力致发光: 光转换与信息安全

UVA 波段是目前研究最成熟、应用开发最广泛的紫外光致发光区域。由于 UVA 光在介质中传输损耗相对较低, 且能够高效激发多种发光中心, 其重要应用之一是作为机械触发的“原位近紫外激发源”, 驱动多色光转换体系。近年来, 研究者通过将 UVA 力致发光材料与多色荧光粉进行复合, 成功构建了“力致紫外激发-可见荧光发射”的级联光转换平台。王赵锋团队利用 $\text{Ca}_9\text{Bi}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}/\text{PDMS}^{[37]}$ 及 $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Ce}^{3+}/\text{PDMS}^{[63]}$ 体系产生的 UVA 力致发光作为激发源, 通过与不同荧光粉复合, 将能量传递给不同发光中心, 实现了由不可见紫外发射向蓝、绿、红等多色可见发光的动态调控(图 7a,b)。在机械刺激过程中, 该复合材料能够输出非连续、多色化可见光信号, 实现力致发光颜色的按需调控和多级力学响应可视化。该策略突破了传统力致发光材料发光颜色单一的限制, 为机械触发的多色光学读出和动态防伪显示提供了新思路。

除力光转换应用外, UVA 力致发光在信息安全与先进防伪领域同样具有重要价值。近紫外发射无法被人眼直接察觉, 但可被特定仪器或紫外相机捕获, 因此天然具备隐蔽读出通道。基于这一特点, 研究者构建了多种机械触发的信息加密系统。例如, 董林团队利用 MgF_2 紫外光致发光材料设计了多级信息加密平台, 使隐藏信息仅在机械刺激和特定读出条件下显现, 从而提高信息存储与传输的安全性(图 7c)^[73]。

4.2 UVB 力致发光: 生物响应与柔性传感

相比 UVA 区域, UVB 力致发光研究仍处于起步阶段。然而, 由于 UVB 光子具有更高的光子能量和特定生物学效应, 其在柔性力学传感与自供能生物医学应用领域展现出独特探索价值。

在柔性力学传感方面, 王元生团队基于 $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Gd}^{3+}, \text{Pr}^{3+}$ 材料演示了柔性力学传感系统, 实现了机械应力输入与 UVB 发射输出之间的实时响应关系(图 7d,e)^[74]。由于 Gd^{3+} 发射位于 310-313 nm 窄带 UVB 区域, 具有较高的信噪比和良好的抗背景干扰能力, 因此在高灵敏应力探测和结构健康监测方面展现出应用潜力。

另一方面, UVB 波段高能光子能够与生物组织产生特定的光化学相互作用。例如, 310 - 313 nm 窄带 UVB 是银屑病、白癜风等皮肤疾病治疗

中常用且有效的光疗波段之一。因此, UVB 力致发光有望将机械运动转化为局域光疗或消毒所需的光能输入。徐旭辉团队利用 $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Gd}^{3+}, \text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 体系产生的 UVB 发射实现了对大肠杆菌的有效灭活(图 7f), 证明了力致发光驱动 UVB 微生物灭活的可行性^[75]。该研究表明, 外加机械能不仅能够转化为被动检测的光学信号, 还可进一步转化为主动干预的生物学效应, 为未来开发机械触发的局域光疗或消毒概念器件提供了启示。

4.3 UVC 力致发光: 深紫外多功能应用

UVC 波段具有最高光子能量, 是当前最具技术特色和应用潜力的前沿方向之一。由于太阳辐射中的 UVC 光子在穿透地球大气层时几乎被臭氧层完全吸收, 地表环境呈现天然的“日盲”背景; 同时, 该波段光子对应核酸及蛋白质的强吸收区, 具有较强的广谱灭菌能力。这些独特物理特性使 UVC 力致发光在重大工程结构监测、先进防伪标记和自供能微生物灭活等领域展现出独特优势。

在结构健康监测方面, 研究者利用深紫外发射与机械刺激之间的直接耦合关系, 实现了无需外部供电的自供能传感。杨艳民团队基于 $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 复合体系构建了深紫外光致发光监测系统, 演示了桥梁安全监测应用场景(图 8a)^[79]。与此同时, 梁延杰团队利用自恢复 $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 柔性复合体系, 实现了面向大型桥梁结构损伤监测、高速碰撞位置定位及应力过载预警的应用验证(图 8b,c)^[80]。由于该 UVC 信号完全由局域力学刺激激发, 不依赖任何外接电源与导线连接, 因而可有效规避恶劣户外环境下电气器件易老化、易受电磁干扰等问题, 为重大工程基础设施和大型柔性机电设备的长期健康监测提供新的无源光学方案。

在信息安全与隐蔽光学标记领域, UVC 发射的不可见性为紫外光致发光提供了独特的隐蔽信息载体。与传统可见光标记截然不同, UVC 力致发光信号在日常自然光或夜视环境下均保持“隐形”, 仅能通过特定的日盲紫外成像设备识别, 从而形成“隐形可控、机械激活、日盲读出”的先进信息加密与防伪体系(图 8d)^[81]。例如, 梁延杰团队利用 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 体系, 构建了全天候深紫外光学标记平台(图 8e)^[80], 展示了其在无源光学标记、隐蔽防伪及安全信息传输等方面的应用潜力。

除传感与安全防伪外,UVC力致发光最具特色的应用探索之一是机械驱动的自供能微生物灭活。UVC光能够直接破坏微生物DNA和RNA结构,是高效紫外灭菌波段之一。基于 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ 优异的自恢复UVC力致发光特性,梁延杰团队首次实现了力致发光驱动的深紫外微生物灭活应用。实验结果表明,在连续机械刺激后,该自供能UVC力致发光弹性体对大肠杆菌和耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的灭活率分别达到了88.9%和70.1%,证明环境中的机械能可以直接转化为具有强生物效应的深紫外辐射(图7f)^[81]。这一结果成功开辟了“机械驱动-深紫外发射-微生物灭活”的能量转换路径,为未来自供能医疗防护装备提供了概念验证。不过,当前UVC ML微生物灭活仍处于实验室概念验证阶段,实际应用还需进一步解决紫外剂量定量、照射均匀性、长期机械耐久性、生物安全性以及复杂环境下灭活效率衰减等问题。

综上,紫外光致发光应用呈现鲜明波段依赖特征,涵盖从被动可视化显示到主动生物功能干预的广阔场景。随着自恢复驱动机制(如摩擦起电诱导)的引入、柔性异质界面工程的成熟以及发光中心网络的拓展,紫外光致发光正在由“机械刺激-紫外发射”加速迈向“机械刺激-紫外发射-功能响应”的转变。尽管该领域在实际产业化推进中仍面临发光效率偏低、衰减较快和大面积柔性器件集成工艺有待优化等瓶颈,但其自供能、低背景干扰和高光子能量的独特物理属性,已使力致发光材料在智能传感、隐蔽标记、环境净化和精准医疗等领域显示出不可替代的技术优势。未来,通过多学科交叉解决界面电荷转移效率和微观构效关系等关键问题,紫外光致发光材料有望为新一代柔性智能光功能器件开辟新的技术维度。

5 结论与展望

紫外光致发光作为力致发光领域的重要新兴方向,实现了机械能向高能紫外光子的直接转换,突破了传统力致发光主要集中于可见光和近红外波段的研究格局。自2007年首个UVA力致发光体系被报道以来,该领域已逐步形成覆盖UVA、UVB和UVC三个波段的材料体系,并发展出陷阱控制型和自恢复型两条主要技术路线。其中,UVA波段研究最为成熟,材料体系和应用设计相对完善;UVB波段依托 Gd^{3+} 和 Tm^{3+} 等发光中心的

窄带跃迁,实现了高信噪比的非可见光输出;而UVC波段则借助 Pr^{3+} 激活的宽禁带基质和自恢复驱动策略,推动深紫外光致发光逐步迈向连续化与柔性集成化。目前,紫外光致发光已在力学传感、结构健康监测、信息安全、隐蔽光学标记和微生物灭活等领域展现出独特优势,显示出广阔应用前景。然而,与可见光力致发光相比,紫外光致发光仍处于发展初期,材料体系相对有限,发光效率和循环稳定性有待提升,力-电-光耦合机制尚未形成统一理论框架。未来研究可重点围绕以下几个方向展开:

(1)建立紫外光致发光的标准化测试与评价体系:当前不同研究在样品尺寸、发光材料负载量、机械刺激条件及光信号采集方式等方面存在较大差异,限制了不同体系之间发光性能的定量比较。未来应建立统一的测试与报告规范,明确样品几何参数、发光材料含量、机械加载方式及力、频率和输入能量等关键条件,并尽可能采用绝对辐射功率或光子产额等定量指标。同时,规范光信号采集距离、探测器校准以及温度和湿度等测试环境,从而提高研究结果的可重复性和可比性,推动紫外光致发光由现象表征向标准化、量化研究发展。

(2)新材料体系开发:探索更多紫外发光中心(如 Bi^{3+} 、 Pb^{2+} 、自陷激子和缺陷发光中心等)以及超宽带隙基质(氟化物、磷酸盐、硼酸盐和超宽带隙氧化物等),拓展发射波长范围并提升力致发光效率,推动从长波UVA到深紫外UVC的全波段覆盖。发光中心的选择应重点考虑其能级结构与目标发射波段的匹配性,而基质则需兼具合适的带隙、晶体场环境和紫外透过性能,以促进有效能量传递并抑制非辐射弛豫。

(3)载流子动力学研究:深入理解陷阱控制型和自恢复型体系中载流子的俘获、释放、迁移与复合规律,解析压电效应、摩擦起电效应和界面电荷转移的协同作用。同时,结合原位光谱、电学表征和理论计算,建立统一的力-电-光耦合机制模型,为材料设计提供理论指导。

(4)高性能自恢复深紫外光致发光材料构建:通过压电效应、摩擦起电效应与陷阱工程的协同调控,优化发光中心的局域配位环境及缺陷结构,并强化发光颗粒与聚合物基体之间的界面电荷调控与能量传递,构建兼具高亮度、高稳定性和快速

恢复能力的深紫外光致发光材料体系, 突破能量耗散和循环衰减等关键瓶颈。

(5) 器件化与应用拓展: 推动紫外光致发光与柔性电子、智能传感、光催化、生物医学和日盲紫外通信等领域融合, 构建机械驱动深紫外光源、自供能微生物灭活器件、柔性日盲紫外传感器以及高安全等级信息加密平台等功能器件, 实现从材料研究向系统化应用的跨越。

总之, 紫外光致发光正处于由现象发现向机制调控、由单一材料发光向系统功能器件演进的关键阶段。未来, 该领域的突破将不仅依赖于新型紫外

发光中心和超宽带隙基质的发现, 更取决于对陷阱释放、压电极化、摩擦起电和界面电荷转移等多场耦合过程的定量理解。通过建立统一的力-电-光耦合模型、发展力致发光性能评价标准, 并推动柔性封装和器件集成, 紫外光致发光有望由实验室光谱现象进一步发展为面向日盲紫外传感、隐蔽信息识别和自供能微生物灭活的智能紫外光功能技术。

本文(补充文件及)专家审稿意见和作者回复内容
下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260248>

参 考 文 献:

- [1] JIANG S, WU X, YANG F, *et al.* Activation of mechanoluminescent nanotransducers by focused ultrasound enables light delivery to deep-seated tissue in vivo[J]. *Nat. Protoc.*, 2023, 18(12): 3787-3820.
- [2] 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.
- [3] ZHANG Q Y, XU M X, ZHOU L M, *et al.* A flexible organic mechanoluminophore device[J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 1257.
- [4] ZHUANG Y X, XIE R J. Mechanoluminescence rebrightening the prospects of stress sensing: a review[J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(50): 2005925.
- [5] HONG G S. Seeing the sound[J]. *Science*, 2020, 369(6504): 638-638.
- [6] DENG Y, PENG D N, SHEN C L, *et al.* Energy transfer-assisted color conversion of persistent mechanoluminescence in RhB@SiO₂/SrAl₂O₄: Eu, Dy system for multilevel information encryption [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(8): 2400251.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] WU S, ZHOU G Y, WU Y F, *et al.* Multiple defect-induced high-resolution near-infrared mechanoluminescent materials for non-destructive detection of blood glucose and lipids[J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(50): 2408508.
- [10] SU L, KUANG S Y, ZHAO Y, *et al.* Self-powered visualized tactile-acoustic sensor for accurate artificial perception with high brightness and record-low detection limit[J]. *Sci. Adv.*, 2024, 10(44): eadq8989.
- [11] QIN S Y, WEI W Y, TIAN B R, *et al.* Self-recoverable, highly repeatable, and thermally stable mechanoluminescence for dual-mode information storage and photonic skin applications[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(32): 2401535.
- [12] YU S G, PARK T H, JIANG W, *et al.* Soft human-machine interface sensing displays: materials and devices[J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(43): 2204964.
- [13] 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.
- [14] TERASAKI N, XU C N. Mechanoluminescence recording device integrated with photosensitive material and europium-doped SrAl₂O₄[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2009, 48(4S): 04C150.
- [15] ZHANG J C, WANG X S, MARRIOTT G, *et al.* Trap-controlled mechanoluminescent materials[J]. *Prog. Mater. Sci.*, 2019, 103: 678-742.
- [16] JHA P, CHANDRA B P. Survey of the literature on mechanoluminescence from 1605 to 2013[J]. *Luminescence*, 2014, 29(8): 977-993.
- [17] YANG J H, WU X H, SHI J B, *et al.* Achieving efficient phosphorescence and mechanoluminescence in organic host-guest

- system by energy transfer[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(52): 2108072.
- [18] YANG L, LI L, CHENG L X, *et al.* Intense and recoverable piezoluminescence in Pr^{3+} -activated CaTiO_3 with centrosymmetric structure[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 118(5): 053901.
- [19] ZHAN L S, CHEN Z X, GONG S L, *et al.* A simple organic molecule realizing simultaneous TADF, RTP, AIE, and mechanoluminescence: understanding the mechanism behind the multifunctional emitter[J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2019, 58(49): 17651-17655.
- [20] 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.
- [21] WONG M C, CHEN L, BAI G X, *et al.* Temporal and remote tuning of piezophotonic-effect-induced luminescence and color gamut via modulating magnetic field[J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(43): 1701945.
- [22] 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.
- [23] CHANG K, GU J Q, YUAN L K, *et al.* Achieving ultrasound-excited emission with organic mechanoluminescent materials[J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(38): 2407875.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] FENG A, SMET P F. A review of mechanoluminescence in inorganic solids: compounds, mechanisms, models and applications[J]. *Materials*, 2018, 11(4): 484.
- [27] WANG W X, WANG S W, GU Y, *et al.* Contact-separation-induced self-recoverable mechanoluminescence of $\text{CaF}_2:\text{Tb}^{3+}/\text{PDMS}$ elastomer[J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 2014.
- [28] 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.*, 2024, 35(2): 2412911.
- [29] MA Z D, FANG S F, BAI Y Q, *et al.* Efficient blue mechanoluminescence in Eu^{2+} -activated $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ for advanced anti-counterfeiting with mildew-resistant behavior[J]. *Mater. Today Chem.*, 2024, 36: 101917.
- [30] MOON JEONG S, SONG S, LEE S K, *et al.* Mechanically driven light-generator with high durability[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(5): 051110.
- [31] LEE Y H, CHUNG I J, OH M H. Possible degradation mechanism in $\text{ZnS}:\text{Mn}$ alternating current thin-film electroluminescent display[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(9): 962-964.
- [32] CHANDRA V K, CHANDRA B P, JHA P. Self-recovery of mechanoluminescence in $\text{ZnS}:\text{Cu}$ and $\text{ZnS}:\text{Mn}$ phosphors by trapping of drifting charge carriers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(16): 161113.
- [33] WANG Z X, JIN L, TIUKALOVA E, *et al.* Size and structural control of mechanoluminescent $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ nanocrystals for optogenetic neuromodulation[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(20): 19340-19352.
- [34] 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.
- [35] WANG W X, WANG Z B, ZHANG J C, *et al.* Contact electrification induced mechanoluminescence[J]. *Nano Energy*, 2022, 94: 106920.
- [36] MA Z D, ZHOU J Y, ZHANG J C, *et al.* Mechanics-induced triple-mode anticounterfeiting and moving tactile sensing by simultaneously utilizing instantaneous and persistent mechanoluminescence[J]. *Mater. Horiz.*, 2019, 6(10): 2003-2008.
- [37] MA Z D, HAN Y, BAI Y Q, *et al.* Near-ultraviolet and deep red dual-band mechanoluminescence for color manipulation and biomechanics detection[J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 456: 141122.
- [38] ZHANG W X, CHENG Y, LIN H, *et al.* Ratiometric mechanoluminescence in $\text{LiSrPO}_4:\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ for stress sensing: dopant concentration dependent sensitivity[J]. *Mater. Res. Bull.*, 2023, 163: 112219.
- [39] SHAO P S, XIONG P X, XIAO Y, *et al.* Self-recoverable NIR mechanoluminescence from Cr^{3+} doped perovskite type aluminate[J]. *Adv. Powder Mater.*, 2024, 3(2): 100165.
- [40] 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.
- [41] ZHANG Y, LIANG Y J, LIU F, *et al.* Beyond the visible: metal-ion-doped inorganic UV phosphors for advanced photonics [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2026, 15(1): 220.
- [42] DENG M X, LIANG Y J, SHI Y, *et al.* Ultraviolet photoluminescent materials from traditional ion-activated phosphors to emerging carbon dots and perovskites[J]. *Mater. Sci. Eng. : R: Rep.*, 2024, 159: 100803.
- [43] LV X L, LIANG Y J, ZHANG Y, *et al.* Deep-trap ultraviolet persistent phosphor for advanced optical storage application in bright environments[J]. *Light: Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 253.
- [44] WANG X L, CHEN Y F, LIU F, *et al.* Solar-blind ultraviolet-C persistent luminescence phosphors[J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 2040.
- [45] SHAN X H, ZHANG Y, LV X L, *et al.* Long-lasting far-UVC persistent luminescence for solar-blind optical tagging[J]. *Inorg. Chem. Front.*, 2025, 12(8): 3118-3125.
- [46] ZHANG Y, SHAN X H, LV X L, *et al.* Multimodal luminescence in Pr^{3+} single-doped $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4$ phosphor for optical information storage and anti-counterfeiting applications[J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 474: 145886.
- [47] SHAN X H, YING X, LIANG Y J, *et al.* Narrowband ultraviolet-B persistent luminescence in an indoor-lighting environment through energy transfer from host excitons to Gd^{3+} Emitters in ScPO_4 [J]. *Inorg. Chem.*, 2023, 62(30): 12050-12057.
- [48] SHAN X H, LV X L, CHEN D X, *et al.* Synergistic integration of NB-UVB persistent luminescence and concentration-dependent photochromism in a phosphate phosphor for multifunctional applications[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(26): e01335.
- [49] MIAO S H, LV X L, SHAN X H, *et al.* Ultraviolet-B and near-infrared dual-band luminescence in $\text{Bi}^{3+}/\text{Bi}^{2+}$ codoped persistent phosphor for optical storage application[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(18): 23585-23595.
- [50] GUO Q, ZHOU C Y, MA Z B, *et al.* Fundamentals of TiO_2 photocatalysis: concepts, mechanisms, and challenges[J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(50): 1901997.
- [51] YUAN Y, DMITRIEVA A P, POZDNIAKOV S, *et al.* Heterostructured perovskite nanocrystals for water stable plasmon-enhanced photoelectrocatalysis[J]. *Light: Adv. Manuf.*, 2025, 6(4): 856-869.
- [52] GAMBICHLER T, BREUCKMANN F, BOMS S, *et al.* Narrowband UVB phototherapy in skin conditions beyond psoriasis [J]. *J. Am. Acad. Dermatol.*, 2005, 52(4): 660-670.
- [53] LERCHE C M, PHILIPSEN P A, WULF H C. UVR: sun, lamps, pigmentation and vitamin D[J]. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2020, 16(3): 291-301.
- [54] LV X L, SHAN X H, ZHANG Y, *et al.* Ambient light stimulation enabling intense and long-lasting ultraviolet-C persistent luminescence from Pr^{3+} -doped YBO_3 in bright environments[J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(13): 4492-4499.
- [55] SHARMA V K, DEMIR H V. Bright future of deep-ultraviolet photonics: emerging UVC chip-scale light-source technology platforms, benchmarking, challenges, and outlook for UV disinfection[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(5): 1513-1521.
- [56] ZHANG H W, 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.
- [57] 付晓燕, 房立均, 付海霞, 等. 紫外应力发光材料 $\text{SrMgSi}_2\text{O}_6:\text{Ce}$ 的制备与光谱性质研究[J]. *发光学报*, 2013, 34(8): 1006-1010.
- FU X Y, FANG L J, FU H X, *et al.* Ultraviolet Mechanoluminescence from $\text{SrMgSi}_2\text{O}_6:\text{Ce}$ [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(8): 1006-1010. (in Chinese)
- [58] TIWARI G, BRAHME N, SHARMA R, *et al.* $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7:\text{Ce}^{3+}$ phosphors for mechanoluminescence dosimetry[J]. *Luminescence*, 2016, 31(8): 1479-1487.
- [59] TIGGA S, BRAHME N, BISEN D P. Photoluminescence and mechanoluminescence investigation of bluish-green afterglow $\text{SrMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Ce}^{3+}$ phosphor[J]. *J. Mater. Sci. :Mater. Electron.*, 2016, 28(6): 4750-4757.
- [60] WANG Q K, HUANG X R, YANG H, *et al.* Trap-controllable near-ultraviolet elastico-mechanoluminescence of Ce^{3+} doped phyllosilicate with melilite-type structure[J]. *Opt. Express*, 2024, 32(13)
- [61] 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.

- [62] 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)
- [63] 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.
- [64] ZHANG P F, GUO Z Y, WEI Z T, *et al.* Multicolor mechanoluminescence for integrated dual-mode stress and temperature sensing[J]. *Inorg. Chem. Front.*, 2025, 12(6): 2315-2324.
- [65] WANG Z, LI K, DENG C X, *et al.* Self-recovering multicolor calcium phosphate mechanoluminescent materials for wearable skin and biomedical applications[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(14): 2500439.
- [66] LIANG X Y, YANG D Y, CHENG Y, *et al.* Color-resolved stress sensing visualization based on ratiometric mechanoluminescence: a universal strategy via radiative energy transfer[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2026; e71178.
- [67] WU S, XIONG P X, JIANG D L, *et al.* Single Tb^{3+} ion doped ratiometric mechanoluminescence for tunable stress visualization[J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 469: 143961.
- [68] DU Y Y, JIANG Y, SUN T Y, *et al.* Mechanically excited multicolor luminescence in lanthanide ions[J]. *Adv. Mater.*, 2018, 31(7): 1807062.
- [69] YANG X X, CHENG Y, LIU Z C, *et al.* Designing ratiometric mechanoluminescence via threshold manipulation in sandwich structures[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 18(3): 2301004.
- [70] FENG L, ZHOU Y P, CHENG K G, *et al.* Mechanically charged and self-recoverable green-emitting long-persistent mechanoluminescence in $\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7:\text{Tb}^{3+}$ [J]. *Inorg. Chem.*, 2024, 63(51): 24342-24350.
- [71] SHAO P S, XIONG P X, XIAO Y, *et al.* Novel spectral band: ultraviolet A mechanoluminescence from Bi^{3+} -doped LiY-GeO_4 [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(44): 16670-16678.
- [72] EBRAHIM HOSSEINI H, CAO J K, GHADAMYARI M, *et al.* UV/NUV and BW-I mechanoluminescence from Bi-activated $\text{CaY}_2\text{Ge}_4\text{O}_{12}$ polycrystals[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(30): e01673.
- [73] LIU W J, CHANG S L, DENG Y, *et al.* Self-recoverable ultraviolet mechanoluminescence in doping-free MgF_2 for stealth anti-counterfeiting[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 20(3): e01306.
- [74] 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.
- [75] 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, 36(32): e29517.
- [76] LI P, LI L P, LI T, *et al.* Mechanically induced photons from ultraviolet-C to near-infrared in Tm^{3+} -doped MgF_2 [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(14): 22396-22404.
- [77] 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.
- [78] LI H M, YANG Y M, LI P, *et al.* Force-induced ultraviolet C luminescence of Pr^{3+} -doped $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$ for X-ray dosimetry[J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(50): 2411804.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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)
- [83] 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): 3148-3164.
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)
- [84] WANG X, XU C N, YAMADA H, *et al.* Electro-mechano-optical conversions in Pr^{3+} -doped $\text{BaTiO}_3 - \text{CaTiO}_3$ Ceramics

- [J]. *Adv. Mater.*, 2005, 17(10): 1254-1258.
- [85] CHANDRA B P. Mechanoluminescence induced by elastic deformation of coloured alkali halide crystals using pressure steps[J]. *J. Lumin.*, 2008, 128(7): 1217-1224.
- [86] FAN X H, ZHANG J C, ZHANG M, *et al.* Piezoluminescence from ferroelectric $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ long-persistent phosphor [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(13): 14238-14246.
- [87] WANG W X, WANG S W, ZHANG J W, *et al.* Predicting and achieving self-recoverable mechanoluminescence based on contact electrification[J]. *Nat. Commun.*, 2026, 17: 5434.
- [88] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328-334.
- [89] WANG Z L, WANG A C. On the origin of contact-electrification[J]. *Mater. Today*, 2019, 30: 34-51.
- [90] ZOU H Y, ZHANG Y, GUO L T, *et al.* Quantifying the triboelectric series[J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 1427.
- [91] 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.



吕旭龙(2000-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 2022年于山东大学获得学士学位, 主要从事紫外光致发光材料研究。
Email: lx11076980379@gmail.com



梁延杰(1986-), 男, 山东泰安人, 博士, 教授, 博士生导师, 2016年于山东大学获得博士学位, 2012-2016年在美国佐治亚大学进行博士研究生联合培养, 2017-2018年在加拿大康考迪亚大学做博士后研究, 2018年在山东大学材料科学与工程学院工作至今。主要从事深紫外无机固体发光材料研究。
Email: yanjie.liang@sdu.edu.cn



王笑军(1958-), 男, 吉林舒兰人, 博士, 教授, 1992年于美国佐治亚大学获得博士学位, 1992-1995年在美国俄克拉荷马州立大学及加州大学尔湾分校做博士后研究, 1995年在美国南佐治亚大学物理系工作至今。主要从事发光物理和发光材料研究。
Email: xwang@georgiasouthern.edu