

文章编号: 1000-7032(2026)04-0554-04

从摩擦到光子:界面摩擦电驱动的自供能自恢复 日盲紫外光致发光

巫燕婷, 王 凡, 汪路平*, 覃 弦*

(福建师范大学 福建省柔性电子重点实验室, 海峡柔性电子(未来科技)学院(研究院), 福建 福州 350117)

摘要: 柔性力致发光(ML)材料在可穿戴光电器件和智能感知领域具有重要应用前景,然而传统材料多局限于可见和近红外光发射且依赖预辐照激活,制约了其在复杂环境下稳定工作。Lv等近期率先报道了一种基于界面摩擦电驱动的兼具自供能、自恢复及高循环稳定性的日盲深紫外(UVC)力致发光弹性体($\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$)。该材料无需预辐照,在机械刺激下即可发射 272 nm 的日盲紫外光,经 10 000 次拉伸循环后仍保持优异的发光稳定性,且静置 24 h 后发光强度可恢复至初始值的 90.2%。该工作不仅将力致发光拓展至日盲紫外波段,还为无背景干扰光学标记、自供能消毒杀菌等应用提供了新思路。

关键词: 力致发光; UVC 发射; 摩擦电效应; 自恢复; 柔性弹性体

中图分类号: O482. 31

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20260056

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260056

From Friction to Photons: Interfacial Triboelectrification-driven Self-powered and Self-recovered Solar-blind Ultraviolet Mechanoluminescence

WU Yanting, WANG Fan, WANG Luping*, QIN Xian*

(Fujian Key Laboratory of Flexible Electronics, Strait Institute of Flexible Electronics (SIFE Future Technologies),
Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

* Corresponding Authors, E-mail: lpwang@fjnu.edu.cn; ifexqin@fjnu.edu.cn

Abstract: Flexible mechanoluminescent (ML) materials hold significant promise for applications in wearable optoelectronics and intelligent sensing. However, conventional materials are largely limited to visible and near-infrared emissions and often require pre-irradiation activation, which restricts their operational stability in complex environments. Recently, Lv *et al.* reported a pioneering development of a solar-blind deep-ultraviolet (UVC) ML elastomer ($\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$) driven by interfacial triboelectrification. This material integrates self-powering and self-recovery capabilities with exceptional cyclic stability. Without the necessity of pre-irradiation, the elastomer emits solar-blind UVC light peaked at 272 nm upon mechanical stimulation. The elastomer film exhibits excellent optical stability over 10 000 stretching cycles, and its luminescence intensity can recover to 90.2% of the initial value after a 24-hour resting period. This work not only extends the spectral range of ML into the solar-blind ultraviolet region but also provides new strategies for background-free optical tagging and self-powered microbial sterilization applications.

Keywords: mechanoluminescence; UVC emission; triboelectric effect; self-recovery; flexible elastomers

收稿日期: 2026-02-15; 修订日期: 2026-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(52302168); 福建省自然科学基金(2025J08159)

Supported by National Natural Science Foundation of China (52302168); Natural Science Foundation of Fujian Province (2025J08159)

力致发光(Mechanoluminescence, ML)材料能够将微小的机械刺激(如拉伸、弯曲、摩擦)直接转化为光子,被视为构建自供能传感与人机交互系统的理想载体^[1-8]。在众多ML材料体系中,有机-无机复合弹性体凭借制备工艺简便、力学柔韧性优异以及物理化学稳定性高等综合优势而备受关注。然而,ML领域长期面临两大核心挑战:一是发射波段大多局限于可见或近红外区,易受环境光干扰;二是高性能ML体系往往依赖于预先光辐照,且循环稳定性较差^[9-10]。

近期,来自山东大学、美国南佐治亚大学与中国科学院兰州化学物理研究所的研究团队在*Light: Science & Applications*期刊上合作发表了一项突破性研究^[11]。团队利用自主研发的 $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}(\text{SBO}:\text{Pr})$ 荧光颗粒与商用高分子聚二甲基硅氧烷(PDMS)弹性体复合,成功构建出一种无需预辐照即可产生强烈日盲深紫外(UVC, 272 nm)光的ML材料。这一发现将ML的应用场景从普通的视觉显示扩展到了对背景噪声免疫的日盲光学

标记与环境灭菌领域。

该材料UVC发光机制并非传统认知中的压电效应或应力诱导陷阱释放^[12-13],而是源于SBO:Pr荧光颗粒与PDMS基质界面的摩擦起电过程(图1(a))。研究团队系统对比不同聚合物基体,发现仅在能与荧光颗粒发生有效电子转移的聚合物体系中方可观测到显著UVC发射。进一步引入界面润滑剂以降低摩擦或削弱界面接触后,发光强度急剧衰减甚至完全消失,直接证明了界面电荷转移在机械激发中的主导作用。理论计算进一步揭示,在SBO:Pr与PDMS接触时,电子从荧光粉向聚合物转移,在界面处形成空间电荷分离与局域电场。在机械刺激下,界面发生接触与分离的周期性变化,促使电荷重新分布并诱发瞬态电场。该瞬态电场诱导电子发生回流,在界面处迅速发生电子-空穴复合,同时将SBO价带电子激发至导带,继而转移至 Pr^{3+} 离子的4f5d能级,最终经辐射跃迁发射出特征UVC光。由此可见,界面摩擦电场不仅是能量转换的核心媒介,更是整个发光过程的功能枢纽。

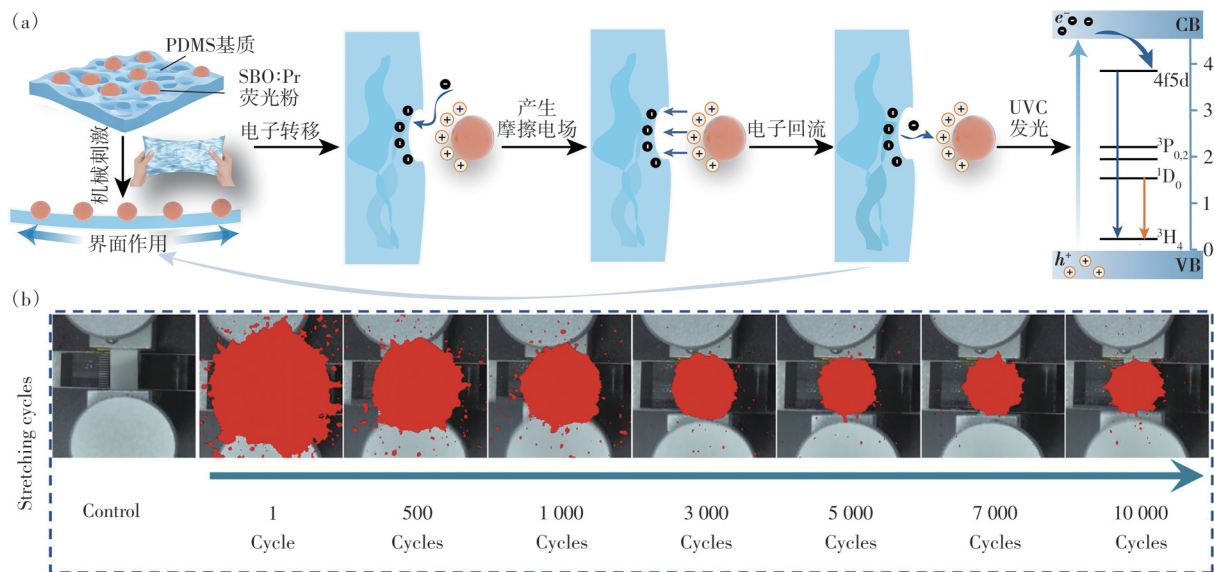


图1 (a)SBO:Pr/PDMS弹性体在机械刺激下的发光机理示意图;(b)不同拉伸次数下,SBO:Pr/PDMS弹性体UVC发光的光学图像^[11]

Fig.1 (a) Schematic illustration of the ML mechanism of the SBO:Pr/PDMS elastomer. (b) Optical images of UVC emission from the SBO:Pr/PDMS elastomer film under different stretching cycles^[11]

在性能表现上,SBO:Pr/PDMS复合弹性体展现出优异的自供能与自恢复特性。无需任何预充能处理,该材料即可在周期性拉伸或摩擦作用下持续稳定地输出UVC光。在40%应变、5 Hz条件下,其可耐受超过10 000次拉伸循环而保持发光稳定(图1(b))。尤为突出的是,发光信号衰减后,材料在静止状态下可快速恢复:静置1 s,发光

强度恢复率达43.2%;24 h后恢复至初始强度的90.2%。通过系统研究不同应变大小(40%、60%、80%)对ML性能的影响,发现这一自修复行为源于界面物理吸附与聚合物链段的可逆重构。当循环加载导致部分界面脱粘后,PDMS链段在静置过程中可重新接触并吸附于荧光颗粒表面,从而恢复界面电荷转移能力。这种可逆界面重构机制

为材料赋予了结构层面的自恢复基础,也奠定了其优异的循环寿命与恢复性能的物理根源。

外加力场在该体系中不仅作为能量输入源,同时也是发光强度的有效调控手段。研究表明,ML强度随应变幅度增加而增强,且随拉伸频率提高而提升,直接反映了机械输入功率与界面电荷积累程度之间的正相关关系。然而,较大应变虽能提升瞬时发光强度,却也会加速界面疲劳与颗粒脱落,进而影响长期循环稳定性。这种亮度与循环寿命之间的权衡,深刻揭示了界面结构在力学驱动ML中的关键作用。此外,摩擦刺激同样可触发强UVC发光,但过度摩擦会因界面磨损导致性能衰减,进一步强调了界面稳定性在材料设计中的核心作用。

依托SBO:Pr/PDMS弹性体自供能、自恢复的UVC发光特性,研究团队成功展示了其在光学标记与微生物灭菌两大应用场景中的潜力。基于UVC波段的日盲特性,即该波段几乎不被大气层吸收、背景干扰低,附着于模型机翼表面的弹性体在各种环境光照条件下均可通过机械刺激产生强烈UVC发光,实现高效、高对比度的光学标记与跟踪。与此同时,基于UVC光子的高能量特性,团队开展了一系列杀菌实验。结果显示,在连续拉伸作用下,该弹性体对大肠杆菌和耐药金黄色葡萄球菌的灭活率分别达到88.9%和70.1%,充分验

证了其作为自供能灭菌器的可行性与有效性。

值得强调的是,该材料体系的构建策略具备良好的普适性。基于稀土离子发光波长的可调谐特性,团队进一步开发了一系列SBO:Ln/PDMS($Ln=\text{Gd}^{3+}, \text{Dy}^{3+}, \text{Sm}^{3+}, \text{Tm}^{3+}, \text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Eu}^{3+}, \text{Eu}^{2+}$)复合弹性体。该系列弹性体在机械刺激下均表现出与相应稀土离子能级跃迁相匹配的特征发射,成功实现了从深紫外到可见光波段的多色可调ML,为该类材料的应用场景拓展提供了广阔空间。

综上所述,通过对界面电荷转移、力场调制及可逆结构重构的系统设计与精准调控,成功开发出一种兼具自供能、自恢复、抗干扰特性的高性能日盲紫外ML复合弹性体,实现了机械能向光能的高效、稳定转换。该研究不仅突破了柔性ML弹性体发射波长的局限性及传统硫化物体系循环稳定性差的技术瓶颈,更从根本上克服了该类发光依赖预辐照的关键难题。这一成果为UVC力致发光体系的设计提供了清晰的物理思路,有望进一步推动自供能ML复合体在柔性光电子等领域的应用进程。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260056>

参 考 文 献:

- [1] XIE Y J, LI Z. Triboluminescence: recalling interest and new aspects [J]. *Chem*, 2018, 4(5): 943-971.
- [2] 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.
- [3] DONG Y, AN W Z, WANG Z H, *et al.* An artificial intelligence-assisted flexible and wearable mechanoluminescent strain sensor system [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2024, 17(1): 62.
- [4] YUE Y H, PAN G C, WAN J, *et al.* Smart films based on semiconductor heterojunctions of mechanoluminescent sulfide and sulfur oxide for stress sensing and anti-counterfeiting applications [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 495: 153141.
- [5] CHEN D D, CUI R R, HUANG C W, *et al.* Wearable mechanoluminescent triboelectric sensors for real-time monitoring of nighttime sports activities [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025, 17(12): 18844-18851.
- [6] WANG W L, KEVIN TANG K W, PYATNITSKIY I, *et al.* Ultrasound-induced cascade amplification in a mechanoluminescent nanotransducer for enhanced sono-optogenetic deep brain stimulation [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(24): 24936-24946.
- [7] 杨苗, 高亚淋, 龙席, 等. 力致发光材料的发光机理及生物医学应用研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(8): 1352-1383.
YANG M, GAO Y L, LONG X, *et al.* Recent advances of luminescence mechanisms and biomedical applications of mechanoluminescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(8): 1352-1383. (in Chinese)
- [8] 贺慰, 潘鑫, 杨汝军, 等. 混合阴离子型化合物 $\text{Ba}_2\text{Gd}(\text{BO}_3)_2\text{Cl}: \text{Ln}$ 的力致发光性能 [J]. *发光学报*, 2023, 44(7):

1324-1333.

HE W, PAN X, YANG R J, *et al.* Mechanoluminescent properties of mixed-anion compounds: $\text{Ba}_2\text{Gd}(\text{BO}_3)_2\text{Cl}: \text{Ln}$ [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(7): 1324-1333. (in Chinese)

- [9] DOU C, LIANG T L, ZHAO M, *et al.* Self-recoverable and NIR- I to NIR- II tunable broadband mechanoluminescence of Cr^{3+} -doped antimonate double perovskites [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(14): 2419716.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] WU W B, DUAN Y K, LIU B. Mechanoluminescence: quantitative pressure-brightness relationship enables new applications [J]. *Matter*, 2020, 2(5): 291-293.
- [13] ZHANG N, TIAN B R, WANG Z F, *et al.* Intense mechanoluminescence in undoped LiGa_5O_8 with persistent and recoverable behaviors [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(13): 2100137.



巫燕婷(2001-),女,广东肇庆人,硕士研究生,2023年于东莞理工学院获得学士学位,主要从事稀土发光材料的研究。

E-mail: qsx20231477@student.fjnu.edu.cn



覃弦(1986-),女,贵州铜仁人,博士,教授,2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事新型光电材料及其在光电探测与成像领域的研究,以及量子力学计算与机器学习在新材料开发和工艺优化方面的应用。

E-mail: ifexqin@fjnu.edu.cn



汪路平(1998-),女,河南南阳人,博士,副教授,2024年于中国科学院福建物质结构研究所获得博士学位,主要从事稀土光功能材料的设计合成、光电子学及其应用研究。

E-mail: lpwang@fjnu.edu.cn