

陷阱调控光功能材料的多模式响应研究进展

侯 名, 张 健, 刘建君, 张君诚*

(中国海洋大学信息科学与工程学部物理与光电工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 陷阱调控光功能材料依托载流子捕获、存储及释放过程,可在热、光、力、超声等刺激下产生长余辉发光、热释光、光激励发光、应力发光、超声刺激发光及光致变色等多模式光学响应,在光学防伪、信息存储、应力检测、生物医学和神经形态等领域展现出重要应用潜力。本文首先梳理典型陷阱相关光学响应模式的分类与基本过程,阐述不同刺激条件下载流子脱陷、迁移、复合等缺陷态演化机制;随后重点综述多模式响应材料在静态/动态光学防伪、明暗场信息存储、实时与延时应力检测、超声触发生物医学应用以及全光学神经形态计算中的研究进展;最后,从陷阱结构精准调控与表征、多模式信号稳定性与信号解耦、生物医学安全性以及器件化和智能化平台构建等方面总结当前挑战,并展望其未来发展方向。本文旨在为陷阱调控光功能材料的多模式响应机制理解、性能优化和应用设计提供参考。

关键词: 陷阱调控; 光功能材料; 多模式响应; 载流子陷阱; 光学应用

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260216

CSTR: 32170.14.CJL.20260216

Research Progress in Multimodal Responses of Trap-Controlled Optical Functional Materials

HOU Ming, ZHANG Jian, LIU Jianjun, ZHANG Juncheng*

(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Faculty of Information Science and Engineering,
Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhangjuncheng@ouc.edu.cn

Abstract: Trap-engineered optical functional materials rely on charge-carrier capture, storage and release to generate multimodal optical responses under external stimuli such as heat, light, mechanical force, and ultrasound. These responses include persistent luminescence, thermoluminescence, optically stimulated luminescence, mechanoluminescence, ultrasound-stimulated luminescence, and photochromism, showing great potential in optical anti-counterfeiting, information storage, stress detection, biomedicine, and neuromorphic computing. This review first summarizes the classification and fundamental processes of typical trap-related optical response modes, with emphasis on carrier de-trapping, migration, and recombination under different stimuli. It then highlights recent progress in static and dynamic optical anti-counterfeiting, bright-field and dark-field information storage, real-time and delayed stress detection, ultrasound-triggered biomedical applications, and all-optical neuromorphic computing. Finally, current challenges are discussed in terms of precise trap-structure regulation and characterization, multimodal signal stability and decoupling, biomedical safety, and the construction of device-level and intelligent platforms. Future directions involving intelligent trap engineering, synergistic optimization of multimodal responses, and system-level integration are also outlined. This review aims to provide guidance for understanding multimodal response mechanisms, optimizing material performance, and designing applications of trap-engineered optical functional materials.

Keywords: trap engineering; optical functional materials; multimodal response; carrier traps; optical applications

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023MA075)

Supported by Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2023MA075)

1 引 言

陷阱调控光功能材料是一类依靠陷阱或缺陷能级实现载流子捕获、能量存储与外场刺激响应的功能材料^[1-4]。外界激发产生的电子或空穴可被材料内部陷阱捕获并存储,在热、光、应力、超声等刺激作用下发生脱陷、迁移、复合等相关光学状态变化,从而产生长余辉发光、刺激响应发光或光致变色等光学信号^[5-9]。与传统实时激发型发光材料相比,陷阱调控光功能材料具有能量预存储、延迟读出和多刺激响应等特点,并可通过调节陷阱深度、陷阱浓度、陷阱分布及发光中心能级结构,实现响应强度、响应时间、刺激阈值和光谱输出的多维调控^[10]。因此,该类材料已成为信息安全、智能传感、生物医学和神经形态计算等领域的重要研究对象^[11-14]。

近年来,随着陷阱能级构筑、载流子动力学调控与多物理场刺激响应研究的深入,陷阱调控光功能材料逐步形成了多种典型响应模式,包括长余辉发光、热释光、光激励发光、应力发光、超声刺激发光以及光致变色等。这些模式的刺激响应方式和读出信号不同,但在陷阱参与型体系中通常都与载流子的捕获、存储、释放、迁移或复合等过程密切相关。其中,长余辉发光主要依赖陷阱态载流子的缓慢释放实现延迟发光^[2];热释光和光激励发光分别通过热刺激和光刺激诱导陷阱态载流子释放^[6-7];应力发光和超声刺激发光则利用机械作用或超声场调控载流子脱陷与复合发光过程^[15-16];光致变色通常涉及光诱导载流子转移、缺陷态调控或吸收中心形成,可实现可逆颜色变化^[17]。上述模式共同构成了陷阱调控光功能材料的多模式响应基础。

多模式响应能力显著拓展了陷阱调控光功能材料的应用边界。通过耦合不同刺激方式和读出信号,该类材料可在同一体系中实现多维编码、延迟读取、明暗场差异化显示、应力信息记录以及深部组织光学调控等功能^[18-20]。不同应用场景对穿透深度、时空可控性、响应灵敏度、循环稳定性和生物安全性等指标的要求各异,而陷阱结构和刺激方式的可调性为材料功能适配提供了重要途径^[21-27]。然而,面向实际应用,该领域仍面临若干关键挑战:陷阱结构的精准调控与表征仍不完善;多模式响应之间可能存在信号串扰和稳定性不足;生物医学应用中的材料安全性和代谢行为仍

需系统评估;器件化、集成化和智能化平台构建仍处于基础阶段。这些问题限制了陷阱调控光功能材料从基础研究向实际应用的进一步转化。

本文围绕陷阱调控光功能材料的多模式响应研究进展展开综述。首先梳理长余辉发光、热释光、光激励发光、应力发光、超声刺激发光和光致变色等典型陷阱相关光学响应模式的分类、特点及基本过程;随后分析不同刺激条件下载流子脱陷、迁移、复合的相关光学响应机制;进而重点介绍该类材料在光学防伪、信息存储、应力检测、生物医学和神经形态计算等领域的应用进展;最后总结当前面临的主要挑战,并从陷阱精准调控、多模式信号解耦、生物安全性提升以及器件化和智能化平台构建等方面展望未来发展方向,以期对陷阱调控光功能材料的设计、优化与应用拓展提供参考。

2 陷阱调控光功能材料的多模式响应分类

在陷阱调控光功能材料中,不同外界刺激可诱导陷阱态载流子通过不同路径释放、迁移或复合,并产生相应的发光或颜色变化信号。根据刺激方式和读出方式的差异,其典型响应模式可分为长余辉发光、热释光、光激励发光、应力发光、超声刺激发光以及光致变色等。其中,长余辉发光、热释光、光激励发光、应力发光和超声刺激发光主要表现为陷阱态载流子释放后的辐射发光响应,而光致变色则主要表现为吸收光谱或者宏观颜色的可逆变化。图1概括了上述多模式响应中的典型载流子跃迁与读出过程^[28-33]。

如图1所示,对典型的陷阱参与型发光过程,其基本载流子过程通常包括激发、捕获、存储和外场诱导释放等环节。在外界激发作用下(过程①),材料中的电子或空穴可被激发至高能态、导带或缺陷相关能级,形成可参与迁移、复合或捕获的载流子。部分载流子直接发生辐射复合(过程②),并将能量传递(过程⑤)至发光中心产生发光(过程⑦);另一部分载流子则被材料内部陷阱能级捕获,完成载流子的存储过程(过程③)。

进入存储阶段后,被捕获的载流子受到陷阱势垒束缚,其自发脱陷过程受到抑制,从而实现一定时间尺度内的能量存储。陷阱深度、陷阱浓度和能级分布直接影响载流子的存储稳定性、释放

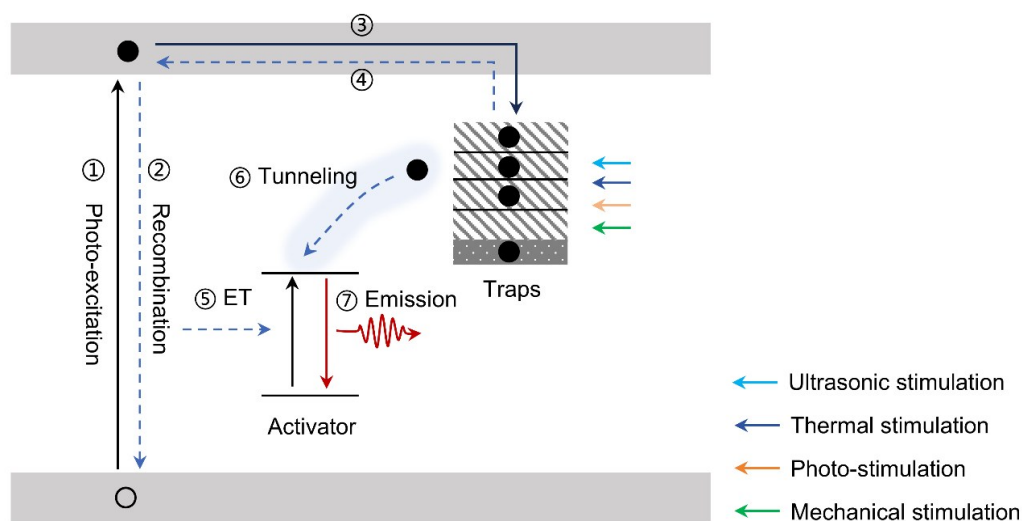


图1 陷阱调控光功能材料多模式响应中的载流子运输和跃迁示意图。

Fig. 1 Schematic diagram of carrier transport and transitions involved in the multimodal responses of trap-controlled optical functional materials.

速率和后续刺激响应特性。一般而言,浅陷阱中的载流子更容易在室温热扰动下释放,而深陷阱中的载流子具有更高的存储稳定性,其释放通常需要更强的外界刺激或特定读出方式,诱导载流子从陷阱释放至导带迁移到发光中心(过程④)。

在长余辉发光过程中,陷阱态载流子可在室温热扰动下缓慢释放,并经由导带运输或局域迁移过程到达发光中心,最终产生延迟发光。较浅或适中深度的陷阱通常有利于室温余辉的持续输出;部分深陷阱态载流子也可能通过热辅助或隧穿(过程⑥)等途径参与复合发光^[34]。由于载流子的释放速率与陷阱深度密切相关,长余辉发光的持续时间、发光强度和衰减行为通常受到陷阱结构的显著影响。

热释光是通过升温促进陷阱态载流子释放的发光过程。随着温度升高,被捕获载流子获得足够热能后脱离陷阱,并迁移至发光中心发生辐射复合。由于热释光峰位、峰形和强度与陷阱深度、陷阱浓度和载流子释放过程密切相关,热释光常被用于分析材料中的陷阱能级分布和载流子储能行为^[35]。

光激励发光是利用特定波长光刺激陷阱态载流子释放的读出方式。入射光为被捕获载流子提供脱陷能量,使其脱离陷阱并迁移至发光中心产生发光。与热刺激读出相比,光激励发光具有较好的空间选择性和光学可控性,可通过调节刺激光波长、功率和照射区域实现信息的选择性读取,因此

在光学存储和防伪加密中具有重要应用价值^[36]。

应力发光是机械刺激诱导的发光响应。在陷阱参与型应力发光体系中,机械作用可通过压电场、摩擦电场、局域电场扰动、缺陷能级调制或局部结构变化等方式促进陷阱态载流子释放,并驱动其迁移至发光中心发生复合。不同材料体系中主导机制可能不同,因此应力发光的响应强度、阈值和循环稳定性通常与材料晶体结构、缺陷类型、陷阱分布以及力学作用方式密切相关^[37]。

超声刺激发光是指材料在超声场作用下产生的发光响应,其具体机制取决于材料体系。本文主要讨论其中的陷阱调控体系。对于陷阱调控体系,超声可能通过局部热效应、声致机械应变、压电极化或缺陷环境扰动等途径诱导陷阱态载流子释放。由于超声具有较强的组织穿透能力和较好的空间聚焦特性,超声刺激发光为深部组织光激活、非侵入式光学调控和生物医学应用提供了新的刺激方式^[38-39]。

与上述辐射发光过程不同,光致变色主要表现为材料吸收特性的可逆变化。特定波长光辐照可诱导载流子转移、缺陷态占据变化、价态转变或吸收中心形成,从而改变材料对可见光的选择性吸收并产生宏观颜色变化^[40]。光致变色可与长余辉发光、热释光、光激励发光等陷阱相关发光过程协同作用,使同一材料在明场和暗场下呈现不同的光学信息,为多维防伪和信息存储提供更多编码维度。

尽管不同响应模态采用的外部刺激不同,但其微观过程通常共享陷阱态载流子的产生、俘获、储存等基本环节。陷阱在其中起到载流子储存作用,而非直接作为发光能量来源。热、光和机械刺激分别通过热扰动、光子激发以及局部应力场或电场等方式诱导载流子释放,因此不同模态之间既具有共同的缺陷物理基础,又表现出不同的跃迁路径、动力学过程和信号持续时间。对于光致变色,陷阱填充与释放可进一步引起缺陷色心或

离子价态变化等过程,并体现为吸收光谱及宏观颜色变化。

为进一步明确上述响应模式在刺激方式、陷阱特征、载流子释放与迁移路径、读出信号及应用层面的异同,表1对其主要优缺点和典型适用场景进行了横向比较。

需要指出的是,表中所列陷阱类型和脱陷路径为典型情况,具体陷阱类型仍取决于材料组成、晶体结构、缺陷状态及测试条件。

表 1 陷阱调控光功能材料六种典型响应模式的比较

Table 1 Comparison of six typical response modes of trap-controlled optical functional materials

响应模式	触发条件	载流子脱陷与迁移路径	读出信号	主要优点	主要局限	典型适用场景
长余辉发光	室温热扰动	热辅助自发脱陷,经导带输运到达发光中心;部分载流子可通过隧穿参与复合	激发停止后的延迟发光,包括发光强度、光谱、持续时间及衰减曲线	可实现能量存储和时间延迟读出;暗场识别能力较强	发光强度随时间衰减;输出对陷阱深度和浓度高度敏感;通常需要预充能	持续显示、延迟示踪、时间编码、防伪和信息存储
热释光	程序升温或特定温度刺激	载流子获得热能后越过陷阱势垒,经导带迁移至发光中心并发生辐射复合	随温度变化的热释光强度、峰位、峰形	对陷阱深度、浓度及能级分布敏感;适合研究储能和释光过程	需要加热装置;读出过程中可能消耗已存储载流子;空间选择性有限	陷阱参数分析、材料缺陷表征、热历史记录和辐射剂量检测
光激励发光	特定波长、功率的光刺激	陷阱态载流子吸收刺激光子后跃迁至导带随后迁移至发光中心复合	光刺激期间产生的发光强度、光谱响应	非接触读出;波长、功率和位置可调;具有较好的空间选择性和光学可控性	刺激光可能产生背景干扰;读出会逐步消耗存储信息;需避免刺激光与发射光谱重叠	光学信息存储、选择性读取、防伪标识和多级加密
应力发光	压缩、拉伸、弯曲、摩擦、冲击等机械刺激	机械作用产生的压电场、摩擦电场或局域结构变化降低脱陷势垒,促进载流子释放、迁移并在发光中心复合	与应力、应变或冲击相关的瞬时或延迟发光信号	可直接实现力-光转换;响应快速且具有空间定位能力	主导机制具有材料依赖性;响应受加载方式、阈值、循环稳定性和机械损伤影响	应力分布可视化、冲击记录、结构健康监测、压力传感和人机交互
超声刺激发光	连续或脉冲超声,尤其是聚焦超声	超声引起局部升温、机械应变、压电场或缺陷能级扰动,诱导载流子脱陷并向发光中心迁移复合	超声作用区域产生的发光强度、光谱及空间分布	组织穿透能力较强;可进行空间聚焦;具备非侵入式远程触发潜力	发光效率和机制受声场及材料性质影响;需控制局部升温、空化和声学安全性	深部组织光激活、非侵入式光学调控、生物成像和神经调控
光致变色	特定波长光	光激发引起载流子转移、陷阱占据变化,价态转变或吸收中心形成;特定波长刺激促进复合或颜色中心消除	吸收光谱、反射光谱或宏观颜色变化,而非以发光为主要读出	可在明场直接观察;通常具有可逆性;易与发光模式结合形成多维信息	存在光疲劳、环境光干扰、响应或恢复速度不足及颜色稳定性问题	可擦写光学存储、智能防伪、多维信息加密和明暗场双通道显示

注:长余辉发光、热释光、光激励发光、应力发光和超声刺激发光以陷阱态载流子释放后的辐射复合为主要读出机制;光致变色则主要通过陷阱占据变化、价态转变或颜色中心形成引起吸收特性改变。不同材料中可能同时存在导带输运和隧穿复合等多种载流子路径,表中仅列出其典型主导过程。

3 陷阱调控光功能材料的应用领域

陷阱调控光功能材料可响应热、光、力、超声等多种外界刺激,并通过长余辉发光、热释光、光激励发光、应力发光、超声刺激发光和光致变色等多种模式信号实现信息编码、刺激读出和功能调控。

因此,该类材料在光学防伪、信息存储、应力检测、生物医学和神经形态计算等领域受到广泛关注。多物理场调控的陷阱态载流子动力学过程赋予材料较高的信号可设计性和环境响应能力,为构建多维信息存储、高灵敏传感、深部组织光学调控和

光学神经形态器件提供了新的材料基础。

3.1 光学防伪

光学防伪材料的研究早期主要集中于单一发光模式的性能提升,但单一模式通常存在信息容量有限、识别维度较低和易被复制等局限。近年来,研究思路逐渐由单一发光模式向多模式耦合发展,通过将长余辉发光、应力发光、光激励发光等陷阱相关响应与光致发光、上转换发光等常规发光过程结合,可提升防伪信息的复杂性和识别难度^[41-43]。

基于上述思路,Zhang等人在压电基质 NaNbO_3 中通过 $\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 共掺杂,实现了长余辉发光、应力发光、光致发光和上转换发光的四模式发光集成^[44]。如图 2(a)所示,这种静态多模式策略提升了信息容量,但各模式在固定刺激下的输出相对恒定,防伪图案缺乏时间维度的变化。为进一步提高防伪信息的动态特征,研究者开始引入时间依赖的发光响应。如图 2(b)所示,Yu 等人在

$\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 中结合上转换发光与光激励发光响应,使材料在 980 nm 激光持续辐照下表现出红色光激励发光逐渐衰减而绿色上转换发射相对稳定的特征,诱导材料发射色彩由黄色逐渐演变为绿色。这种时间依赖的色彩变化突破了传统防伪图案的静态读取方式,使信息认证由单一色彩判别拓展为对色彩演变过程的识别^[45]。

针对多功能防伪需求,Zhang 等人在自激活 CaGa_4O_7 中通过痕量 Mn^{2+} 掺杂实现了多功能集成^[46]。如图 2(c)所示,该材料在连续紫外激发下,基质蓝色发射与 Mn^{2+} 黄色发射呈现相反的动力学趋势,发射色彩由黄色经棕色向冷白色演变。同时,该材料在连续紫外辐照下表现出热增强黄色发射,并在预充能后表现出弹性应力发光响应。该工作将静态多模式、动态多色和力学响应等功能集成于单一体系中,为构建多维度光学防伪材料提供了有益思路。

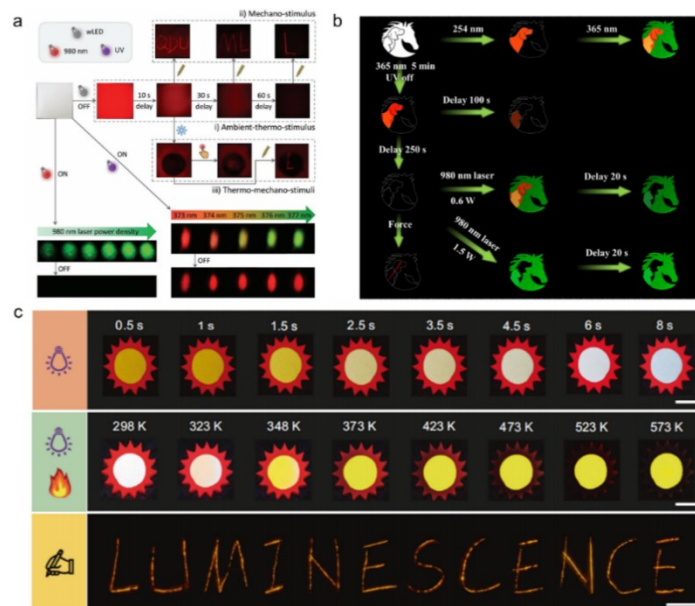


图2 光学防伪应用探索实例。(a)基于 $\text{NaNbO}_3:\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 实现静态多模式光学防伪^[44]; (b)基于 $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 实现动态多模式光学防伪^[45]; (c)基于 $\text{CaGa}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ 实现协同多模式光学防伪^[46]。

Fig. 2 Examples of exploratory applications in optical anti-counterfeiting. (a) Static multimodal optical anti-counterfeiting based on $\text{NaNbO}_3:\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$. (b) Dynamic multimodal optical anti-counterfeiting based on $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$. (c) Synergistic multimodal optical anti-counterfeiting based on $\text{CaGa}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$.

3.2 信息存储

陷阱调控光功能材料凭借载流子捕获、存储与释放过程,在光学信息存储领域展现出应用优势。通过结构设计、掺杂工程与陷阱调控,该类材料可在不同激发条件或外界刺激下呈现多样化光学响应,为实现多维信息存储和加密读出提供材料支撑^[47-49]。

如图 3(a)所示,Xie 等人通过构筑 $\text{NaYF}_4:\text{Ln}^{3+}@\text{NaYF}_4$ 核壳纳米颗粒,实现了X射线诱导的载流子俘获与多色长余辉输出。激发过程中产生的载流子被陷阱储存,撤去X射线后,陷阱态载流子逐渐释放并向 Ln^{3+} 发光中心迁移复合,由此产生覆盖可见至近红外区域的窄带长余辉。利用 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 和 Ho^{3+} 长余辉在发射波长上的差异,作者进一

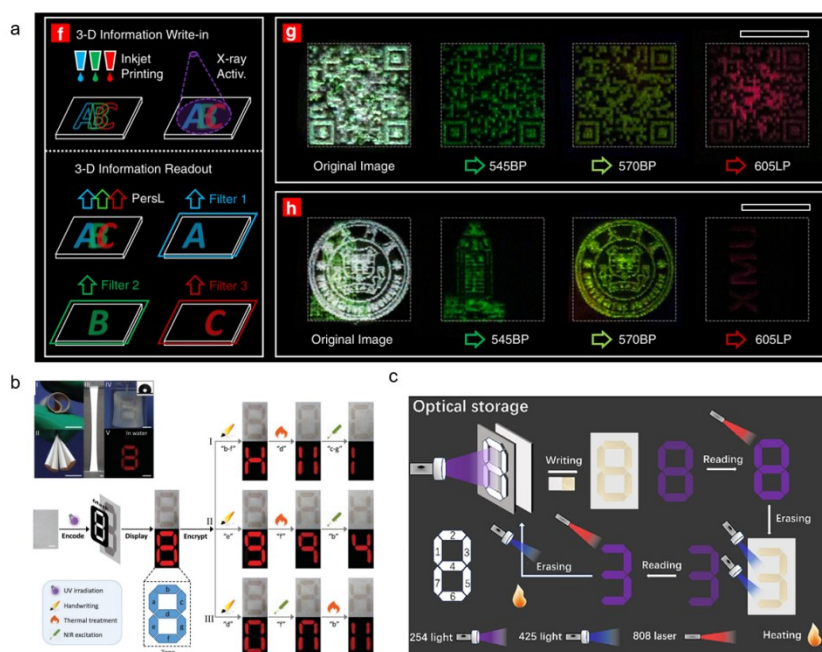


图3 信息存储应用探索实例。(a)基于 $\text{NaYF}_4:\text{Ln}^{3+}@\text{NaYF}_4$ ($\text{Ln} = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}$)的多色长余辉及多维二维码信息存储^[50]; (b)基于 $\text{La}_{1.95}\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ 实现的明暗场差异化信息加密^[51]; (c)基于 $\text{Na}_2\text{CaGe}_2\text{O}_6:\text{Bi}^{3+}$ 光致变色紫外长余辉双通道实现的可擦写光学信息存储^[52]。

Fig. 3 Examples of exploratory applications in information storage. (a) Multicolor persistent luminescent patterns and multidimensional QR-code information storage based on $\text{NaYF}_4:\text{Ln}^{3+}@\text{NaYF}_4$ ($\text{Ln} = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}$)^[50]. (b) Bright-field/dark-field differential information encryption based on $\text{La}_{1.95}\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ ^[51]. (c) Rewritable optical information storage based on dual-channel photochromism and UV persistent luminescence in $\text{Na}_2\text{CaGe}_2\text{O}_6:\text{Bi}^{3+}$ ^[52].

步将三种纳米颗粒墨水重叠打印于同一基底,实现了空间维度与光谱维度相结合的多维信息编码。如图所示,激发后不同信息首先以叠加形式呈现,而通过特定波段滤光片进行波长选择性读取,可进一步解码出相互独立的二维码、图形和文字信息,实现了基于陷阱储能和长余辉光谱复用的多通道信息存储与读取^[50]。

传统陷阱控制型发光材料通常主要在暗场中显示信息,限制了信息维度的拓展。为突破这一限制,Zhang等人在 $\text{La}_{1.95}\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}$ 中利用氧空位诱导的光致变色与长余辉发光功能,实现了明场与暗场下的差异化信息显示^[51]。如图3(b)所示,该材料在紫外充能后,呈现超过18 h的明场光致变色图案和超过6 h的暗场红色长余辉发光图案。由于两种功能分别由不同深度的陷阱主导,通过机械摩擦可选择性消除长余辉发光而保留光致变色,使同一信息图案在明场与暗场下承载不同加密信息,从而提升信息存储的层级和安全性。

如图3(c)所示,Wang等人通过 Bi^{3+} 对 $\text{Na}_2\text{CaGe}_2\text{O}_6$ 进行非等价取代,引入以氧空位为主

的缺陷陷阱,在单一材料中实现了光致变色与紫外长余辉的双通道光学响应。254 nm紫外光照射下,激发电子被氧空位等缺陷俘获,在形成色心并引起材料由白色转变为棕色的同时完成载流子储存;撤去激发后,浅陷阱中的电子逐渐释放并与 Bi^{3+} 发光中心复合,产生峰值位于358 nm、持续时间超过10 h的紫外长余辉。基于陷阱态载流子的可调控释放,研究者进一步构建了可擦写光学信息存储体系:利用254 nm紫外光完成信息写入,通过425 nm可见光选择性漂白实现局部擦除和信息重构,并可借助低能光刺激深陷阱态载流子释放以调控长余辉读取;例如,通过选择性擦除数字“8”中的特定区域,可将其重新编码为数字“3”,实现信息的写入、擦除与重写^[52]。

综上,陷阱调控光功能材料可使同一图案在不同时间、不同激发条件或不同观察环境下呈现差异化信息,有助于提升光学信息存储容量和读取维度。随着陷阱调控机制、能量传递路径以及材料稳定性和可加工性研究的深入,该类材料有望在光学存储领域获得进一步发展。

3.3 应力检测

陷阱调控发光材料为应力检测提供了区别于传统实时应力发光读出的新思路。通过整合应力发光、光激励发光、热释光等多种陷阱相关响应模式,研究人员发展了压力记忆效应、力致载流子存储等工作模式,实现了从开放区域到封闭构件、从实时诊断到历史追溯的多场景应力检测,为构建智能化应力检测系统提供了新的技术路径^[53-56]。

应力发光应用于结构健康检测的探索可追

溯到 1999 年前后, Xu 团队开发的 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 弹性应力发光材料为该技术的发展奠定了基础。这类材料依托陷阱态载流子的快速释放,可实现受力即时发光响应^[57]。如图 4(a)所示,该团队将 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 弹性应力发光材料制成可喷涂的柔性薄膜,通过建立应力发光强度与应变的关系,实现了大型基础设施中二维结构应力集中区的可视化诊断,并用于比较修复前后的应力分布变化。

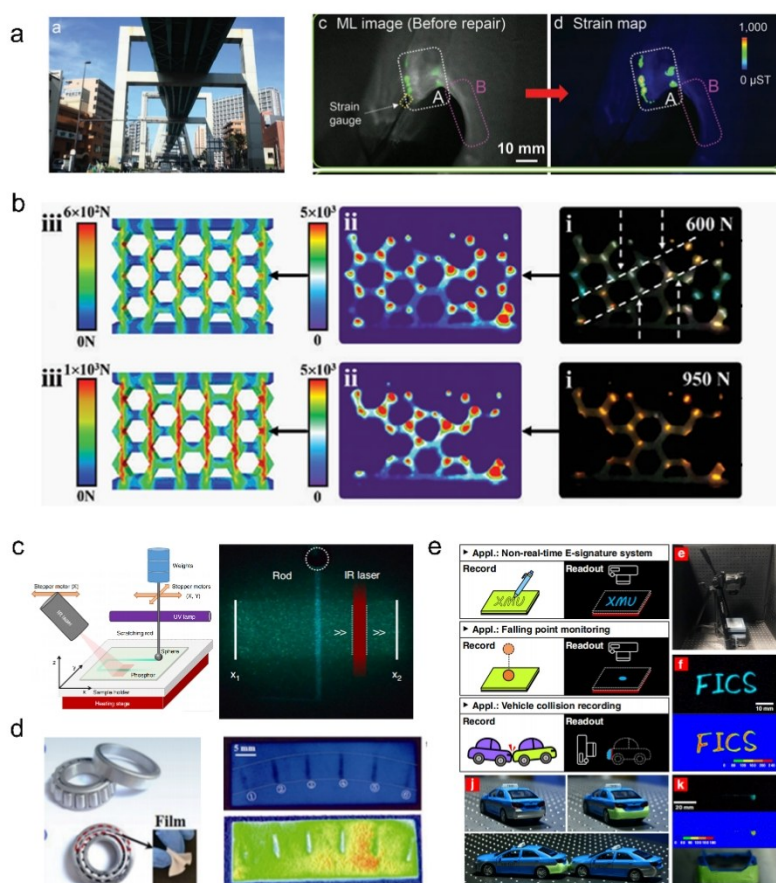


图 4 应力信息检测应用探索实例。(a) $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 柔性薄膜用于二维结构应力检测^[57]; (b) 基于 3D 打印 $\text{MgF}_2:\text{Yb}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 应力发光复合构件实现的三维应力分布可视化^[58]; (c) $\text{BaSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}$ 载流子重排用于延时应力检测^[59]; (d) $\text{CaAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Sm}^{3+}$ 载流子差异化释放用于延时应力检测^[60]; (e) $\text{SrSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 应力诱导载流子填充用于应力延时检测^[61]。

Fig. 4 Examples of exploratory applications in stress information detection. (a) $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ flexible film for stress detection in two-dimensional structures^[57]. (b) Three-dimensional stress distribution visualization based on 3D-printed $\text{MgF}_2:\text{Yb}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ mechanoluminescent composite structures^[58]. (c) Delayed stress detection based on carrier rearrangement in $\text{BaSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}$ ^[59]. (d) Delayed stress detection based on differential carrier release in $\text{CaAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Sm}^{3+}$ ^[60]. (e) Delayed stress detection based on stress-induced carrier filling in $\text{SrSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ ^[61].

如图 4(b)所示,为进一步将应力可视化由二维表面拓展至三维结构, Yu 等人将 $\text{MgF}_2:\text{Yb}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 应力发光材料与光固化树脂复合,并通过光固化 3D 打印直接构筑具有应力发光功能的立体构件,

使发光材料由附着于结构表面的传感层进一步转变为结构本体的一部分^[58]。在外载荷作用下,构件不同空间位置的局部应力可通过应力发光强度及颜色差异直接呈现,研究者在立体结构中实现

了应力集中区域、均匀变形及潜在破坏位置的可视化识别,并与有限元模拟结果取得良好一致性,从而为复杂三维构件中的空间应力分布提供了直观的光学表征手段。

上述平面薄膜和三维结构应力可视化方法主要依托实时检测机制,即需要在受力过程中记录发光信号。对于碰撞记录、落点检测等需要事后追溯的应用场景,实时检测模式仍存在局限。为此,研究人员基于不同发光模式对同一陷阱态载流子库的共享及其刺激选择性释放机制,发展载流子差异化释放策略。如图4(c)所示, Smet 等人在 $\text{BaSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}$ 中报道了压力记忆效应:在预充能后,机械刺激不仅产生即时应力发光,还促使部分载流子从浅陷阱向深陷阱重新分布;后续光激励读出时,深陷阱中的载流子优先释放,使受力位置在光学读出时呈现更亮的信号^[59]。Yu 等人则基于受力时机机械刺激释放部分载流子导致陷阱填充密度降低的机制,使材料受力区域在光激励发光读取时呈现更暗的信号,从而反演应力分布,进一步体现了陷阱调控在延时读出中的作用,如图4(d)所示^[60]。Zhuang 等人则提出了力致载流子存储效应,如图4(e)所示。机械刺激可诱导载流子产生并被深陷阱捕获,从而在无需预充能的条件下实现受力信息存储;结合热释光读出,可进一步拓展陷阱调控光功能材料在非实时应力检测中的适用范围。该工作展示了电子签名记录、落点检测及车辆碰撞记录等非实时应力记录场景,为事后追溯型应力检测提供了新的思路^[61]。

综上,陷阱调控光功能材料依托多模式能量转化和陷阱态载流子调控过程,正在推动结构健康检测由传统点式、接触式检测向跨尺度、立体化和可延时读出方向发展。这些研究拓展了应力检测在开放桥梁结构、封闭机械构件、实时损伤诊断和历史应力追溯等场景中的应用可能^[62-63]。

3.4 生物医学应用

近年来,具有长余辉储能和超声触发发光能力的陷阱调控光功能材料在生物医学领域受到关注。该类材料可在外部超声刺激下释放预存储能量,实现体内可控发光,为深部组织光学干预与成像提供了新的策略^[64-66]。

Hong 课题组提出了“声光遗传学”的概念,利用陷阱调控应力发光纳米材料实现深部脑区的非侵入性光遗传调控。如图5(a)所示,该团队合成

了 $\text{ZnS}:\text{Ag}^+, \text{Co}^{2+}$ 纳米颗粒,其中 Co^{2+} 作为电子陷阱,可在紫外光激发下存储电子,并在聚焦超声刺激下通过压电效应释放电子,产生蓝色可见光,实现深部脑区光发射的时空门控,为深部组织光学干预提供了新的技术途径^[67]。随后,该团队进一步发展了基于陷阱调控光功能材料的超声扫描体内光源,如图5(b)所示。通过将聚乙二醇修饰的 $\text{Sr}_4\text{Al}_4\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 纳米颗粒注入血液,聚焦超声可在脑、脊髓、肠道等多个器官的血管内诱导陷阱中存储的载流子释放,实现自由活动小鼠双侧脑区的靶向调控^[68]。结合即刻早期基因 c-Fos 编码蛋白免疫组化和电生理记录,该实验证实了光遗传神经元的功能激活,并在多巴胺 D1 受体-Cre 转基因小鼠和腺苷 A2a 受体-Cre 转基因小鼠中诱导出方向特异性旋转行为,展示了陷阱调控光功能材料在神经回路解析中的应用潜力。

为克服可见光在组织中的穿透限制,研究人员进一步将发光波段拓展至近红外窗口。如图5(c)所示, Zhu 团队构建了 $\text{Zn}_{1.2}\text{Ga}_{1.6}\text{Sn}_{0.2}\text{O}_4:\text{Cr}@\text{mSiO}_2$ 负载瑞喹莫德 R848 的纳米平台,并将其与巨噬细胞工程化结合。工程化巨噬细胞可利用其肿瘤趋向性富集于肿瘤部位^[69]。聚焦超声在同一过程中既可触发药物释放诱导巨噬细胞向 M1 型极化,又能产生应力发光提供反馈信号,从而提高肿瘤免疫治疗的空间可控性。如图5(d)所示,该团队进一步设计了 $\text{Zn}_2\text{Ga}_{2.96}\text{Ge}_{0.75}\text{O}_8:\text{Cr}, \text{Nd}@\text{mSiO}_2$ 复合纳米材料并将波段拓展到近红外二区^[70]。该材料在 405 nm 光激发下可存储能量,并在聚焦超声刺激下产生近红外二区发光以激活树突状细胞。该工作构建了从“超声触发”到“发光反馈”再到“免疫细胞调控”的闭环策略,为深部组织免疫治疗提供了可视化和可调控的新手段。

3.5 神经形态计算

除上述领域外,人工智能的快速发展也为陷阱调控光功能材料开辟了新的应用场景。传统的冯·诺依曼架构因计算与存储单元物理分离而面临功耗和数据传输瓶颈,难以满足日益增长的算力需求。陷阱调控光功能材料能够将外界刺激转化为光学信号,并可利用陷阱态载流子的存储与释放过程模拟突触权重变化,因而为构建低功耗、光学读出的神经形态器件提供了材料基础^[71-75]。

在神经形态计算领域,陷阱调控光功能材料依托载流子陷阱的储能与释能特性,成为构建全

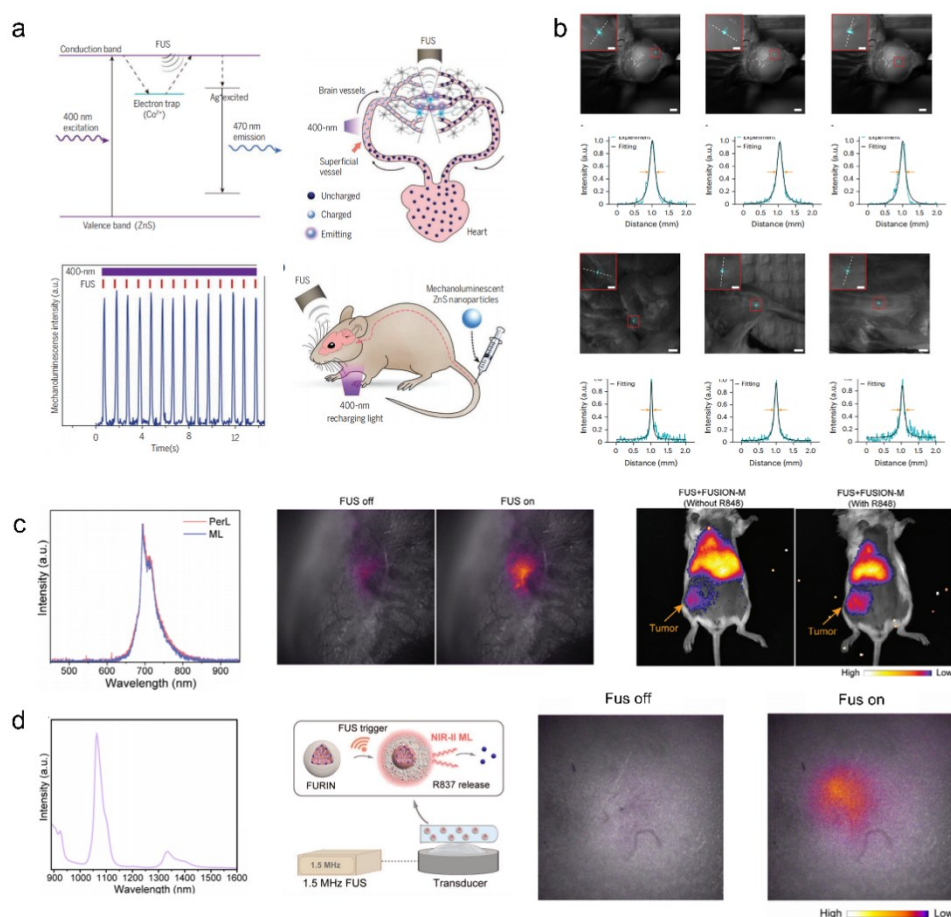


图5 生物医学应用探索实例。(a) $\text{ZnS:Ag}^+, \text{Co}^{2+}$ 用于超声触发光遗传调控^[67]; (b) $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 纳米颗粒用于超声触发神经元功能激活^[68]; (c) 近红外一区 $\text{Zn}_{1.2}\text{Ga}_{1.6}\text{Sn}_{0.2}\text{O}_4:\text{Cr@mSiO}_2$ 负载 R848 用于超声触发肿瘤免疫治疗^[69]; (d) 近红外二区 $\text{Zn}_2\text{Ga}_{2.96}\text{Ge}_{0.75}\text{O}_8:\text{Cr}, \text{Nd@mSiO}_2$ 用于超声触发树突状细胞激活^[70]。

Fig. 5 Examples of exploratory applications in biomedicine. (a) $\text{ZnS:Ag}^+, \text{Co}^{2+}$ for ultrasound-triggered optogenetic modulation^[67]. (b) $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ nanoparticles for ultrasound-triggered functional activation of neurons^[68]. (c) NIR-I $\text{Zn}_{1.2}\text{Ga}_{1.6}\text{Sn}_{0.2}\text{O}_4:\text{Cr@mSiO}_2$ loaded with R848 for ultrasound-triggered tumor immunotherapy^[69]. (d) NIR-II $\text{Zn}_2\text{Ga}_{2.96}\text{Ge}_{0.75}\text{O}_8:\text{Cr}, \text{Nd@mSiO}_2$ for ultrasound-triggered dendritic cell activation^[70].

光学人工突触的候选材料载体。如图 6(a) 所示, Dong 团队基于 $\text{Li}_{0.1}\text{Na}_{0.9}\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 压电发光基质, 构建了力-光-热三刺激响应的全光学突触器件^[76]。该体系依托陷阱能级对载流子的捕获与释放, 可模拟生物突触的短时程可塑性、长时程可塑性及双脉冲易化等行为。器件以紫外光作为预充能手段, 以机械力与热刺激手段调控陷阱态载流子释放速率; 高温环境加速载流子耗散, 对应短时记忆, 低温环境延缓载流子衰减, 对应长时记忆。通过温度调制突触可塑性, 该体系为触觉-视觉信息的光学处理提供了基础。同时, 该器件利用高亮度特征像素中载流子储量较高、衰减较慢, 而低亮度噪声像素中载流子较快耗尽的差异, 实现了硬件级图像去噪, 有助于降低后端神经网络计算负荷。在此基础上, 该团队进一步利用 $\text{Li}_{0.1}\text{Na}_{0.9}$

$\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 体系的力-热双模态响应特性, 搭建了多模态融合感知的全光学神经网络, 如图 6(b) 所示。针对单一模态识别信息不完整的问题, 研究者利用材料的差异化刺激响应特性: 热绝缘区域主要对机械力产生应力发光响应, 遮光区域主要对热刺激产生热释光响应; 单一模态只能获取局部信息, 而力、热双模态协同可还原完整的图像信息。通过力、热信号的互补耦合, 该体系构建了“触觉+视觉”融合感知通道, 实现多模态信息的并行处理与融合, 为抗干扰智能感知系统提供了新的方案。

Wang 等人围绕陷阱调控工程, 通过 $\text{Li}^+/\text{Dy}^{3+}$ 共掺杂改性 $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ 体系, 开发出 Pa 级超灵敏持久性发光材料, 并进一步用于全光学神经突触性能提升, 如图 6(c) 所示^[77]。该材料通过阳光充能

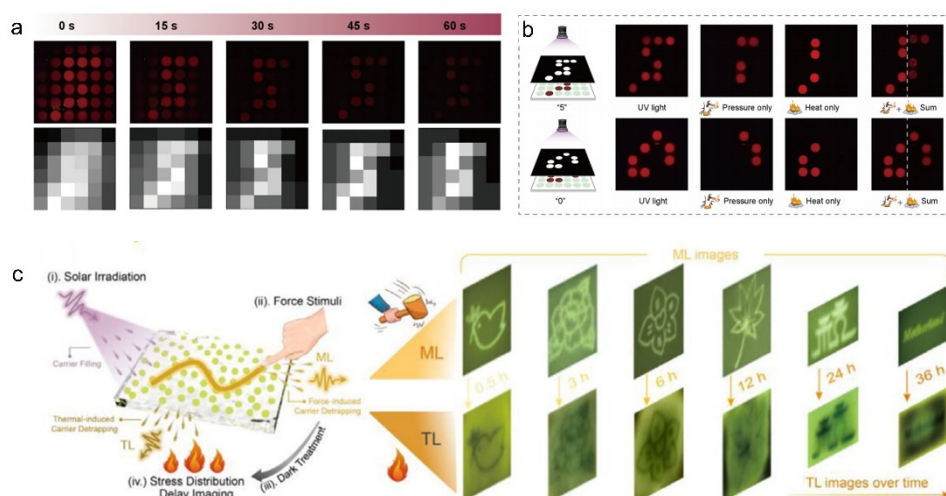


图6 神经形态计算应用探索实例。(a)基于 $\text{Li}_{0.1}\text{Na}_{0.9}\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 力-热响应实现硬件级图像去噪^[76];(b)基于 $\text{Li}_{0.1}\text{Na}_{0.9}\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 力-热响应实现智能感知系统^[76];(c)基于 $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ 体系模拟生物记忆形成、巩固及回忆过程^[77]。

Fig. 6 Examples of exploratory applications in neuromorphic computing. (a) Hardware-level image denoising based on the mechanical-thermal response of $\text{Li}_{0.1}\text{Na}_{0.9}\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$. (b) Intelligent perception system based on the mechanical-thermal response of $\text{Li}_{0.1}\text{Na}_{0.9}\text{NbO}_3:\text{Pr}^{3+}$. (c) Simulation of biological memory formation, consolidation, and recall processes based on the $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ system^[77].

即可完成载流子存储,减少了对外接电源的依赖,并实现了超低应力响应阈值。其持久性应力发光信噪比较商用 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ 明显提高,有助于降低长余辉背景干扰;同时,该材料具备长时间应力信息存储能力,并可通过热刺激唤醒存储信息。基于陷阱调控载流子捕获、存储与释放过程,该体系可模拟生物记忆的形成、巩固与回忆过程,为构建高信噪比、长记忆型全光学神经突触提供了材料支撑。

综上,陷阱调控光功能材料在神经形态计算领域具有重要发展潜力,相关研究正由单一突触功能模拟向多模态感知融合、硬件级去噪和长时记忆存储方向发展。现有成果以光子作为信息载体,依托陷阱能级调控载流子动力学过程构建全光学计算单元,契合下一代神经形态计算中“存算一体”和“多模融合”的发展需求,并进一步拓宽了多模式光学响应材料在人工智能和智能感知领域的应用边界。

4 总结与展望

陷阱调控光功能材料依托载流子捕获、存储、释放等相关光学响应调控过程,已成为智能光功能材料领域的重要研究方向。本文系统梳理了以长余辉发光、热释光、光激励发光、应力发光、超声刺激发光及光致变色为代表的多种陷阱相关光学

响应模式,分析了不同刺激条件下载流子脱陷、迁移、复合及吸收变化等基本过程,并重点介绍了该类材料在光学防伪、信息存储、应力检测、生物学及神经形态计算等领域的应用进展。总体来看,陷阱调控光功能材料通过多刺激响应与多模式信号输出,为构建高维信息编码、可延时读出、深部组织光学调控和光学神经形态器件提供了新的材料基础。

尽管近年来该领域取得了较快发展,但从基础研究走向实际应用仍面临若干挑战,主要体现在以下几个方面。

(1)陷阱结构的精准调控与表征仍需加强。当前对陷阱深度、密度及空间分布的调控仍较多依赖经验性掺杂或工艺优化,缺乏系统的理论指导与高通量筛选方法。陷阱能级表征仍主要依赖热释光等传统手段,难以实现原位、动态和高空间分辨的陷阱分布分析。发展基于第一性原理计算、材料基因工程和机器学习辅助的陷阱设计方法,并结合新型原位表征技术,将有助于实现陷阱结构的精准调控。

(2)多模式响应的稳定性与信号解耦有待提升。在多刺激响应体系中,不同发光模式之间可能存在能量竞争、陷阱共享或信号串扰,影响信息读取的准确性和可重复性。同时,长期循环使用过程中的性能衰减也会限制器件服役寿命。如何

在单一材料或复合体系中实现多模式响应的低串扰、高稳定和长循环,是后续研究需要重点解决的问题。

(3) 生物医学应用中的材料安全性仍需系统评估。超声刺激发光在深部组织光遗传调控和免疫治疗中展现出应用潜力,但纳米材料的长期生物相容性、体内代谢路径、组织蓄积行为及潜在免疫反应仍需深入研究。此外,如何在同一纳米平台中集成靶向递送、可控释药、光学反馈和治疗调

控等功能,并同时保持发光效率与生物安全性,是推动该类材料向生物医学应用发展的关键问题。

(4) 器件化与智能化平台构建仍处于发展阶段。当前多数研究仍集中于材料设计与功能验证,面向实际应用的柔性器件、可穿戴系统和智能传感网络研究仍相对不足。未来需要进一步推动陷阱调控光功能材料与微纳加工、柔性电子、光学读出和人工智能算法等技术融合,构建具有自供能、自适应和高稳定性的智能光电系统。

参 考 文 献:

- [1] DU J, WANG X, SUN S, *et al.* Pushing trap-controlled persistent luminescence materials toward multi-responsive smart platforms: recent advances, mechanism, and frontier applications[J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(37):2314083.
- [2] MATSUZAWA T, AOKI Y, TAKEUCHI N, *et al.* A new long phosphorescent phosphor with high brightness, $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1996, 143(8):2670-2673.
- [3] LI Y, GECEVICIUS M, QIU J. Long persistent phosphors—from fundamentals to applications[J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2016, 45(8):2090-2136.
- [4] LIANG L L, CHEN J Y, SHAO K, *et al.* Controlling persistent luminescence in nanocrystalline phosphors[J]. *Nat. Mater.*, 2023, 22(3):289-304.
- [5] VAN DEN EECKHOUT K, BOS A J J, POELMAN D, *et al.* Revealing trap depth distributions in persistent phosphors[J]. *Phys. Rev. B*, 2013, 87(4):045126.
- [6] FENG A, JOOS J J, DU J, *et al.* Revealing trap depth distributions in persistent phosphors with a thermal barrier for charging[J]. *Phys. Rev. B*, 2022, 105(20):205101.
- [7] YUAN L F, JIN Y H, SU Y, *et al.* Optically stimulated luminescence phosphors: principles, applications, and prospects[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2020, 14(12):2000123.
- [8] JIA C Y, YU J, HU Y Y, *et al.* Deep-trap persistent materials for future rewriteable optical information storage[J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2024, 26(29):19591-19605.
- [9] SHEN L Y, KUANG R Y, CAO Y Y, *et al.* Synergistic high-contrast photochromism and dynamic luminescence in defective ZnS enabling multilevel information storage and display[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, 36(49):e75877.
- [10] ZHUANG Y X, WANG L, LV Y, *et al.* Optical data storage and multicolor emission readout on flexible films using deep-trap persistent luminescence materials[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(8):1705769.
- [11] HUANG K, DOU X J, ZHANG Y F, *et al.* Enhancing light and X-ray charging in persistent luminescence nanocrystals for orthogonal afterglow anti-counterfeiting[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31:2009920.
- [12] 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.
- [13] ABDOLLAHI A, ROGHANI-MAMAQANI H, RAZAVI B, *et al.* Photoluminescent and chromic nanomaterials for anti-counterfeiting technologies: recent advances and future challenges[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(11):14417-14492.
- [14] JU Z Y, ANSARI A A, WANG H Y, *et al.* Rare-earth dopants for mechanoluminescence: from fundamentals to advanced applications[J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2026, 565:218145.
- [15] ZHANG J C, WANG X S, MARRIOTT G, *et al.* Trap-controlled mechanoluminescent materials[J]. *Prog. Mater. Sci.*, 2019, 103:678-742.
- [16] DING Y C, SO B J, CAO J K, *et al.* Ultrasound-induced mechanoluminescence and optical thermometry toward stimulus-responsive materials with simultaneous trigger response and read-out functions[J]. *Adv. Sci.*, 2022, 9(23):2201631.
- [17] WANG J X, LI C, TIAN H. Energy manipulation and metal-assisted photochromism in photochromic metal complex[J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2021, 427:213579.
- [18] 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.
- [19] ZHOU X Q, NING L X, QIAO J W, *et al.* Interplay of defect levels and rare earth emission centers in multimode luminescent phosphors[J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1):7589.
 - [20] LYU T S, DORENBOS P, WEI Z H. Versatile and high-performance $\text{LiTaO}_3\text{:Tb}^{3+}$, Gd^{3+} perovskite for multimode anti-counterfeiting, flexible X-ray imaging, continuous stress sensing, and non-real-time recording[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(11):2300323.
 - [21] YANG X X, WANG T, ZHAO L, *et al.* Recent progress in mechanoluminescence for multi-dimensional stress monitoring [J]. *Adv. Sci.*, 2026, 13(5):e19938.
 - [22] ZHANG X, LI S H, SUO H, *et al.* Near-infrared stress memory emitters enable delayed impact visualization in illuminated environments[J]. *Nat. Commun.*, 2026, 17:7950.
 - [23] YU S, PARK T H, JIANG W, *et al.* Soft human-machine interface sensing displays: materials and devices[J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(43):2204964.
 - [24] WANG W L, WU X, TANG K W K, *et al.* Ultrasound-triggered in situ photon emission for noninvasive optogenetics[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145(2):1097-1107.
 - [25] DING Y C, SO B J, CAO J K, *et al.* Light delivery, acoustic read-out, and optical thermometry using ultrasound-induced mechanoluminescence and the near-infrared persistent luminescence of CaZnOS:Nd^{3+} [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2023, 11(17):2300331.
 - [26] ZHAO Y F, LI M, WONG M C, *et al.* Smart phosphor with neuromorphic behaviors enabling full-photoluminescent Write and Read for all-optical physical reservoir computing[J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16:7516.
 - [27] LU W J, CHEN Q Z, ZENG H A, *et al.* All optical artificial synapses based on long-afterglow material for optical neural network[J]. *Nano Res.*, 2023, 16(7):10004-10010.
 - [28] DURAGKAR A, MULEY A, PAWAR N R, *et al.* Versatility of thermoluminescence materials and radiation dosimetry: a review[J]. *Luminescence*, 2019, 34(7):656-665.
 - [29] YANG L, GAI S L, DING H, *et al.* Recent progress in inorganic afterglow materials: mechanisms, persistent luminescent properties, modulating methods, and bioimaging applications[J]. *Adv. Optical Mater.*, 2023, 11(11):2202382.
 - [30] BØTTER-JENSEN L, THOMSEN K J, JAIN M. Review of optically stimulated luminescence (OSL) instrumental developments for retrospective dosimetry[J]. *Radiat. Meas.*, 2010, 45(3-6):253-257.
 - [31] ZHUANG Y X, XIE R J. Mechanoluminescence rebrightening the prospects of stress sensing: a review[J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(50):2005925.
 - [32] LI R J, MOU B Z, YAMADA M, *et al.* From visible to near-infrared light-triggered photochromism: negative photochromism[J]. *Molecules*, 2024, 29(1):155.
 - [33] WANG Y J, YI Z G, GUO J, *et al.* In vivo ultrasound-induced luminescence molecular imaging[J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(4):334-343.
 - [34] KAI H Y, WONG K L, TANNER P A. Tunneling in persistent luminescence[J]. *Adv. Optical Mater.*, 2025, 13(21):2500793.
 - [35] BOS A J J. Thermoluminescence as a research tool to investigate luminescence mechanisms[J]. *Materials*, 2017, 10(12):1357.
 - [36] WU S, WANG Y Z, XIONG P X. Forecasting mechanoluminescence self-recovery stability via optically-stimulated luminescence[J]. *Adv. Powder Mater.*, 2026, 5(4):100390.
 - [37] BARZOWSKA J, HAIDER S S, ZHENG T, *et al.* Turning sound and force into light with AlN:Mn^{2+} mechanoluminescence[J]. *Sci. Adv.*, 2026, 12(26):eae5469.
 - [38] XU C, HUANG J S, JIANG Y Y, *et al.* Nanoparticles with ultrasound-induced afterglow luminescence for tumour-specific theranostics[J]. *Nat. Biomed. Eng.*, 2023, 7(3):298-312.
 - [39] XU X Y, WANG Y J, LI Z, *et al.* In vivo ultrasound-induced luminescence imaging via trianthracene derivatives nanomaterials[J]. *Nat. Protoc.*, 2026, 21(4):1574-1596.
 - [40] BAI X, ZHANG Y T, ZHAO H P, *et al.* Flexible X-ray detector for cumulative dose monitoring through reversible photochromism and luminescence modulation[J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(6):2412986.
 - [41] ZHANG C Y, YIN Q X, GE S K, *et al.* Optical anti-counterfeiting and information storage based on rare-earth-doped lu-

- minescent materials[J]. *Mater. Res. Bull.*, 2024, 176:112801.
- [42] WANG J Z, CUI M J, DONG J N, *et al.* Recent progress of luminescent lanthanide-based metal-organic frameworks for anti-counterfeiting application[J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2025, 544:216976.
- [43] 庄逸熙, 陈敦榕, 解荣军. 面向光学信息存储应用的深陷阱长余辉发光材料[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(15):1516001.
- ZHUANG Y X, CHEN D R, XIE R J. Persistent luminescent materials with deep traps for optical information storage [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2021, 58(15):1516001. (in Chinese).
- [44] ZHANG J C, PAN C, ZHU Y F, *et al.* Achieving thermo-mechano-opto-responsive bitemporal colorful luminescence via multiplexing of dual lanthanides in piezoelectric particles and its multidimensional anticounterfeiting[J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(49):1804644.
- [45] ZHANG J, YOU X, WANG T, *et al.* Achieving dynamic quintuple-mode luminescence in $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Pr}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ phosphor for anti-counterfeiting applications[J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(40):13725-13732.
- [46] TANG Y Q, CAI Y Y, DOU K P, *et al.* Dynamic multicolor emissions of multimodal phosphors by Mn^{2+} trace doping in self-activated CaGa_4O_7 [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1):3209.
- [47] LV Y, MO R H, ZOU J F, *et al.* Emerging perovskite photochromic materials: recent advances, mechanisms, and applications[J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(33):16863-16903.
- [48] ZHANG X D, LIU Y F, HU P, *et al.* Hydrolytic-resistance long-persistent luminescence $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ ceramics for optical information storage[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(6):2414872.
- [49] SUN Y S, ZHOU X Q, LUN Z J, *et al.* Amorphous to crystalline phase transformation enables tunable persistent luminescence for multi-mode optical information storage[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(46):2406336.
- [50] ZHUANG Y, CHEN D R, CHEN W J, *et al.* X-ray-charged bright persistent luminescence in $\text{NaYF}_4:\text{Ln}^{3+}@\text{NaYF}_4$ nanoparticles for multidimensional optical information storage[J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10:132.
- [51] JIANG T, ZHU Y F, ZHANG J C, *et al.* Multistimuli-responsive display materials to encrypt differentiated information in bright and dark fields[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(51):1906068.
- [52] GUO H J, LIU L L, WANG L, *et al.* Defect-assisted dual-channel optical storage material with photochromism and concealed persistent luminescence[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19:2402308.
- [53] TIMILSINA S, KIM J S, KIM J, *et al.* Review of state-of-the-art sensor applications using mechanoluminescence microparticles[J]. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2016, 17(9):1237-1247.
- [54] QASEM A, XIONG P X, MA Z J, *et al.* Recent advances in mechanoluminescence of doped zinc sulfides[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2021, 15(12):2100276.
- [55] TIMILSINA S, JO C W, LEE K H, *et al.* Dual-modal sensing skin adaptive to daylight, darkness, and ultraviolet light for simultaneous full-field deformation measurement and mechanoluminescence responses[J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(2):2409384.
- [56] YANG H, TU D, WEI Y, *et al.* Ultrasensitive mechanoluminescence of Pr^{3+} -doped perovskite oxide for 3D strain sensing and visualization[J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(43):e10747.
- [57] LIU L S, XU C N, YOSHIDA A, *et al.* Scalable elasticoluminescent strain sensor for precise dynamic stress imaging and onsite infrastructure diagnosis[J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2019, 4(1):1800336.
- [58] GUO L C, XIA P, WANG T, *et al.* Visual representation of the stress distribution with a color-manipulated mechanoluminescence of fluoride for structural mechanics[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33:2306875.
- [59] PETIT R R, MICHELS S E, FENG A, *et al.* Adding memory to pressure-sensitive phosphors[J]. *Light Sci. Appl.*, 2019, 8(1):124.
- [60] CAI Y Y, LIU S B, ZHAO L, *et al.* Delayed stress memory by $\text{CaAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ mechanoluminescent phosphor with defect engineering regulation[J]. *J. Adv. Ceram.*, 2022, 11(8):1319-1329.
- [61] ZHUANG Y X, TU D, CHEN C J, *et al.* Force-induced charge carrier storage: a new route for stress recording[J]. *Light Sci. Appl.*, 2020, 9(1):182.
- [62] CAI Y Y, CHANG J Q, ZHANG J, *et al.* Dual-window broadband near-infrared mechanoluminescence in MgO-based phosphors[J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(13):e22739.
- [63] ZHANG P F, WU Y T, HAI O, *et al.* Thermally activated delayed mechano- and radioluminescence enabling long-term

- and time-delayed spatiotemporal stress and X-ray imaging[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, 36(32): e27248.
- [64] TSANG C Y, ZHANG Y. Nanomaterials for light-mediated therapeutics in deep tissue[J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2024, 53(6):2898-2931.
- [65] YANG M, GE X, ZHENG L Y, *et al.* Mechanoluminescent light sources based on nanostructured systems for biomedical applications: a review[J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2024, 7(23):26515-26533.
- [66] YANG F, KIM S J, WU X, *et al.* Principles and applications of sono-optogenetics[J]. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 2023, 194:114711.
- [67] HONG G S. Seeing the sound [J]. *Science*, 2020, 369(6504):638.
- [68] JIANG S, MALINAO M G, YANG F, *et al.* An ultrasound-scanning in vivo light source[J]. *Nat. Mater.*, 2026. DOI: 10.1038/s41563-026-02556-z.
- [69] XU S X, MENG L K, HU Q, *et al.* Closed-loop control of macrophage engineering enabled by focused-ultrasound responsive mechanoluminescence nanoplatfor for precise cancer immunotherapy[J]. *Small*, 2024, 20(46):2401398.
- [70] XU S X, LI X H, HU Q, *et al.* Focused ultrasound-responsive nanocomposite with near-infrared II mechanoluminescence for spatiotemporally selective immune activation in lymph nodes[J]. *Chem. Eur. J.*, 2024, 30(19):e202304066.
- [71] ZHU C, HUANG W, LI W, *et al.* Light-emitting artificial synapses for neuromorphic computing[J]. *Research*, 2022, 2022:9786023.
- [72] KAI C H, WANG Y, LIU X P, *et al.* AlGaIn/GaN-based optoelectronic synaptic devices for neuromorphic computing[J]. *Adv. Optical Mater.*, 2023, 11(7):2202105.
- [73] LI Y, SHEN G Z. Advances in optoelectronic artificial synapses[J]. *Cell Rep. Phys. Sci.*, 2022, 3(9):101037.
- [74] ILYAS N, WANG J Y, LI C M, *et al.* Nanostructured materials and architectures for advanced optoelectronic synaptic devices[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(15):2110976.
- [75] GENTILI P L. Photochromic and luminescent materials for the development of Chemical Artificial Intelligence[J]. *Dyes Pigments*, 2022, 205:110547.
- [76] PENG D N, LI H T, SUN J L, *et al.* All-optical synapses based on a mechanoluminescent material[J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(37):2503376.
- [77] YE Z J, FANG S Q, ZHANG T C, *et al.* Ultrasensitive Pa-level persistent mechanoluminescent material toward all-optical neural synapses for tactile-visual information recognition and memory[J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(3): e14909.



侯名(2001—),男,山东枣庄人,硕士研究生,2023 年于黑龙江大学获得学士学位,主要从事应力发光材料的制备和性能表征。

E-mail: houming@stu.ouc.edu.cn



张君诚(1982—),男,山东青岛人,博士,教授,博士研究生导师,2011 年于同济大学获得博士学位,主要从事应力发光材料的研发及其在应力分布可视化中的应用研究。

E-mail: zhangjuncheng@ouc.edu.cn