

基于稀土能量传递的日盲光探测材料研究进展

霍 帅^{1,2}, 何依雯³, 张文林², 贾 红³(1. 郑州航空工业管理学院, 郑州 450046; 2. 信息工程大学, 郑州 450001;
3. 洛阳师范学院, 河南 洛阳 471934)

摘 要: 日盲紫外光电探测器凭借自身优良的抗干扰能力、高灵敏度以及快速响应属性, 在军事侦察、环境监测、生物医学等诸多领域显现重要应用价值。作为探测器的核心组件, 日盲光电探测材料的性能直接影响着器件的关键指标与实际应用效果, 传统探测材料受制于性能, 难以契合多元化需求。但最新研究发现, 稀土离子掺杂材料能借助独有的能量传递机制, 有效调控宽谱日盲紫外光, 突破传统材料性能的局限, 为日盲探测技术在多个领域的应用开拓新方向。本文对稀土离子掺杂材料在日盲光电探测领域的研究进展进行了系统综述, 深入剖析该类材料的能量传递机制、材料体系、器件结构与性能优化办法, 对典型器件案例及应用前景展开探讨, 分析当前面临的挑战并展望后续发展方向, 为促进日盲紫外探测技术的创新发展提供了关键参考。

关键词: 日盲光电探测; 稀土离子; 能量传递; 下转换

中图分类号: TN23 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)08-2935-14

网络出版时间: 2026-04-15



日盲波段是指波长介于 200~280 nm 的紫外光区域, 由于臭氧层对这一光谱范围存在强烈的吸收作用, 地面自然环境中几乎不存在该波段的背景辐射。这种特有的环境特性, 使日盲波段在光电探测领域确立了不可替代的重要地位^[1-2]。日盲波段光电探测技术的应用十分广泛, 涵盖军事与民用等多个领域^[3-7]。在军事上, 日盲波段探测器可用于导弹尾焰探测, 依靠导弹尾焰在该波段的特征辐射, 可达成远距离高精度目标捕捉; 在保密通信中, 其低背景噪声特性可降低信号干扰, 增强通信保密性与可靠性。在民用领域中, 火灾早期预警系统利用其检测火焰紫外辐射, 可实现快速预警; 在工业废气检测中, 利用该技术检测氮氧化物、硫化物等特定污染物。

稀土离子的 4f 电子被外层 5s 和 5p 电子屏蔽, 其能级受外界环境影响较小, 呈现出尖锐且丰富多样的能级跃迁, 体现出窄带发射、长荧光寿命等卓越的光学性能^[8-9]。在合适的基质材料如宽禁带氧化

物[AlO(OH)、Y₂O₃]、氟化物(SrF₂、NaYF₄)或氟氧化物玻璃陶瓷中, 稀土离子能通过共振/声子辅助能量传递、量子剪裁等高效的能量传递机制将日盲紫外光子转化为易探测的可见或近红外光子, 并参与载流子输运过程的调控, 显著提升了日盲光电探测器的响应度、探测率、响应速度及稳定性等关键性能指标, 为高性能器件的研发提供了核心理论基础与技术途径。本文将系统梳理总结稀土离子在日盲光电探测领域的材料设计、能量传递机制、器件结构优化及性能提升策略等方面的最新研究。

1 稀土能量传递与材料体系

1.1 稀土离子的能量传递机制与发光机制

1.1.1 稀土离子的能级结构与跃迁特性 稀土离子是指元素周期表中镧系元素(原子序数 57~71)以及钪(Sc)、钇(Y)等元素形成的离子, 其电子结构中存在未填满的 4f 电子亚层。由于 4f 电子受到外层

收稿日期: 2025-08-06。 修订日期: 2025-08-24。

基金项目: 河南省自然科学基金重点研发专项(231111222200); 国家自然科学基金面上项目(52473262); 大学生创新创业项目(202510482013); 河南省高等学校重点科研项目服务产业发展专项(25CY025)。

第一作者: 霍 帅(1989), 男, 硕士研究生。

通信作者: 贾 红(1980), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-08-06. Revised date: 2025-08-24.

First author: HUO Shuai (1989-), male, Master candidate.

E-mail: huoshuai3568vip@163.com

Correspondent author: JIA Hong (1980-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: jiahong517@aliyun.com

电子的屏蔽作用相对较弱,使得它们容易受到晶体场、自旋-轨道耦合等多种因素的影响,从而导致稀土离子的 4f 能级发生分裂,形成一系列能量相近但又不完全相同的能级^[10]。稀土离子的发光机制主要包括 4f-4f 和 4f-5d 2 种跃迁过程,二者选择定则和光学特性存在差异^[11]。稀土离子的 4f-4f 跃迁因外层电子屏蔽呈现出宇称禁戒特性,表现为窄线宽、长寿命的磁偶极或晶体场诱导电偶极跃迁。而 4f-5d 跃迁属于宇称允许过程,由于 5d 轨道与配体的强耦合作用,其具有宽谱带、短寿命特征。正是这些不同类型跃迁特性的存在,使得稀土离子在照明、显示、激光、光学传感等光学领域广泛应用^[12]。

1.1.2 能量传递机制 能量传递是稀土发光材料中普遍且关键的物理过程,当材料吸收光子能量后,内部能量状态发生改变,激发中心可将部分或全部激发能转移至另一中心,这一过程对实现高效发光至关重要,广泛存在于载流子运动、敏化剂敏化等行为中。从传递特性来看,能量传递可分为辐射传递与无辐射传递 2 类,具体包括共振辐射能量传递(RRET)、共振无辐射能量传递(RNRET)、多声子辅助无辐射传递(MPANRT)、交叉弛豫(CR) 4 种机制,共同支撑稀土离子在光电过程中的能量调控^[9]。

共振辐射传递(图 1a),施主离子(敏化剂 S)从激发态辐射跃迁回基态时释放光子,若受主离子(激活剂 A)的吸收光谱与该光子光谱匹配,光子会被受主离子吸收随后跃迁至激发态。此过程中施主与受主相互独立,要求施主发射光谱与受主吸收光谱重叠,然而稀土离子间完全匹配的共振能级较少,且 f-f 跃迁稀土离子存在吸收截面小、发光效率低的问题,所以实际应用中这种机制相对较少。共振无辐射传递(图 1b),是稀土离子间能量传递的主要方式。施主与受主能级差通过晶格振动(声子)释放且不需要光子参与,此过程也要求施主发射光谱与受主吸收光谱重叠,且为短距离传递。随着受主离子浓度增加,施主发光衰减寿命会改变,能量传递效率较高,而且因为能级匹配,能量可以在施主与受主之间可逆传递。多声子辅助无辐射传递(图 1c),当施主与受主能级差较大而无法直接匹配时,可以通过吸收或发射多个声子实现能量传递。交叉弛豫(图 1d),发生于 2 个相同稀土离子间的能量再分配过程。一个离子从高能级跃迁至中间能级,释放的能量使另一离子从中间能级跃迁至更高能级,该机制依赖高浓度掺杂实现离子间相互作用,是稀土离子内部能量再分配的重要方式。

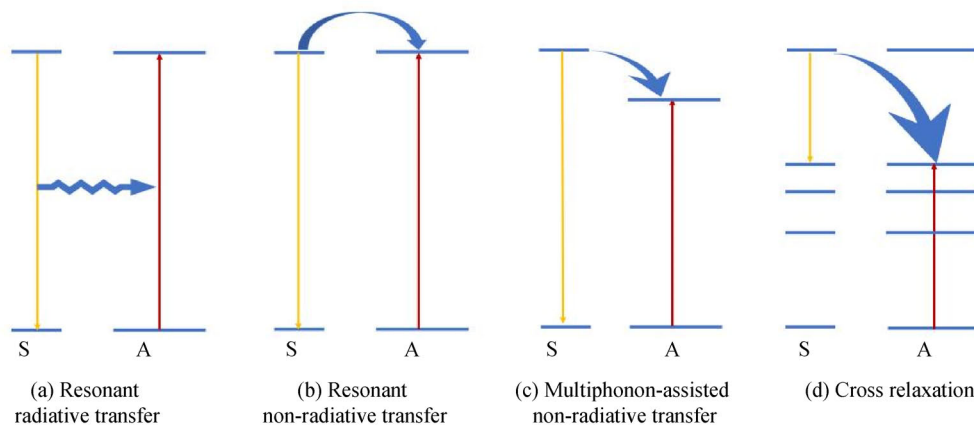


图 1 4 种能量传递机制示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of four energy transfer mechanisms

1.1.3 下转换发光 日盲紫外光电探测的核心目标是将难以被常规半导体探测器直接高效响应的深紫外光子(200~280 nm)的能量,通过稀土离子的吸收和传递,最终转化为易于探测的可见光或近红外光子,其中,下转换发光机制在这一过程中发挥关键作用。下转换发光^[13-15]遵循斯托克斯定律,本质是吸收高能光子并转化为低能光子发射,可分为下移和量子剪裁。下移是指高能光子转化为单个低能

光子,量子剪裁则能将高能光子转化为多个低能光子。量子剪裁过程中能产生多个光子,在理论上可实现超过 100%的量子效率,对于提升光电探测器的灵敏度具有更显著的优势,因此图 2 重点展示了量子剪裁的 3 种微观实现机制:1) 单一离子的能级跃迁;2) 离子对之间的能量传递;3) 基质与离子之间的能量传递。

图 2a 为单一离子的能级跃迁实现量子剪裁的

过程。电子吸收高能光子, 跃迁到高能激发态, 然后通过不同能级跃迁发射不同波长的光。在图 2b 中离子对通过共振能量传递和交叉弛豫实现量子剪裁。离子 I 首先被高能光子激发到高能激发态, 随后通过交叉弛豫将能量传递到离子 II 后跃迁到中间能级, 离子 II 被激发后发射第 1 个光子, 离子 I 将剩余能量通过共振能量传递到第 2 个离子 II, 使其激发后发射出第 2 个光子。在图 2c 为

离子对通过交叉弛豫实现量子剪裁的过程。离子 I 被激发到高能激发态后, 通过交叉弛豫过程将能量传递给离子 II, 随后 2 个离子都跃迁回基态, 发射 2 个低能光子。图 2d 为离子对通过共振能量传递实现量子剪裁的过程。被激发后的离子 I 跃迁到较低激发态发射 1 个低能光子, 随后通过共振能量传递将能量传递给离子 II 后, 离子 II 被激发后发射第 2 个光子。

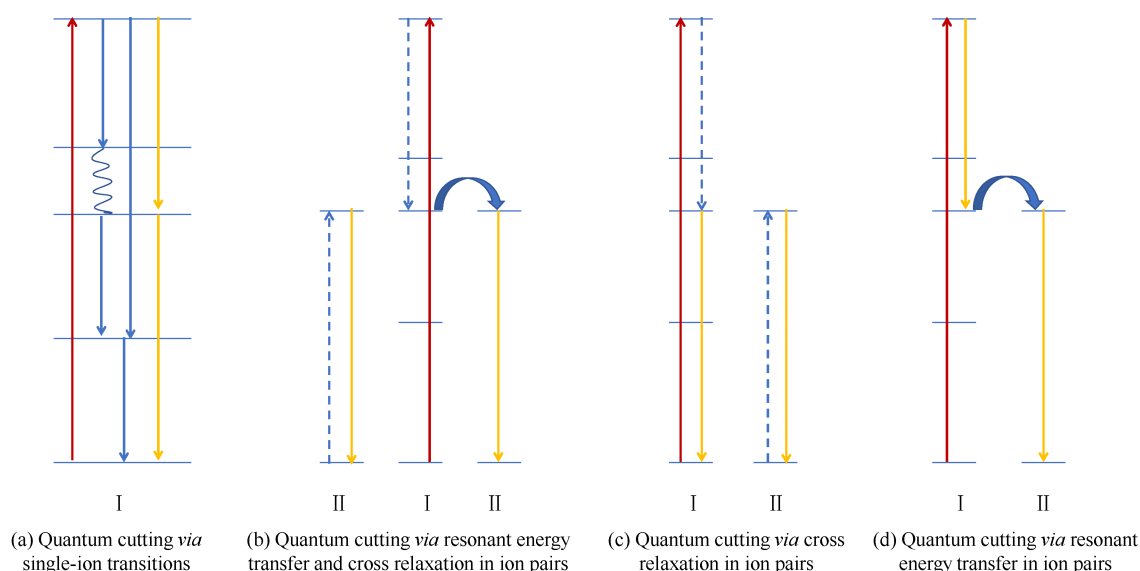


图 2 下转换发光机制

Fig. 2 Downconversion Luminescence Mechanisms

需要指出的是, 这 4 种能量传递机制不仅适用于本文所列的 Tb^{3+} - Eu^{3+} 、 Ce^{3+} - Yb^{3+} 典型组合, 在 Nd^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 等体系中同样被广泛验证, 表明该分类框架具备普适性, 可为不同离子对的光谱调控提供统一参考^[16-18]。

1.2 用于日盲光电探测的掺杂离子组合

在日盲光电探测领域, 稀土离子掺杂是对材料的光学和电学特性进行精细调控, 从而满足日盲响应特殊需求, 实现高效、精准地探测的一种关键调控策略。掺杂不同种类和数量的稀土离子, 可以将探测材料分为单掺杂体系、共掺杂体系以及多掺杂体系, 不同掺杂体系在日盲光电探测中采用的发光机制和能量传递过程各有特点, 本小节将针对这 3 种掺杂体系展开探讨。

1.2.1 单掺杂体系 单掺杂体系仅引入一种稀土离子, 其核心优势在于能级结构简单, 产生锐线发射, 利于高色纯度可见光输出。同时制备可控性高, 避免了多离子间能量传递干扰, 浓度猝灭效应易调控, 且组分单一, 适合大规模生产。然而, 其局限

性在于吸收带宽有限, 难以覆盖全日盲波段。

在日盲光电探测材料中, Eu^{3+} 和 Tb^{3+} 是常用的单掺杂稀土离子, 常采用下移发光机制。Jia 团队聚焦于稀土离子单掺杂体系的下转换发光材料, 开展了系统性研究。2020 年 Jia 等^[19] 将 Eu^{3+} 掺杂 $\text{AlO}(\text{OH})$ 纳米颗粒作为光谱转换器, 在 200~400 nm 宽带日盲紫外光激发下表现出强发光特性, Eu^{3+} 吸收 200~400 nm 日盲紫外光, 电子从基态跃迁至高能激发态, 经非辐射跃迁到 $^5\text{D}_0$ 能级, 再辐射跃迁回 $^7\text{F}_2$ 能级, 释放 616 nm 可见光, 是典型的下移发光过程。2023 年, Jia 等^[20] 制备了 Tb^{3+} 掺杂的氧氟化物玻璃陶瓷, Tb^{3+} 吸收 188~400 nm 日盲紫外光后, 电子从基态 $^7\text{F}_6$ 跃迁至高能激发态, 随后经非辐射跃迁弛豫至较低的 $^5\text{D}_4$ 能级, 最终通过辐射跃迁释放 488、544 (最强峰)、584、621 nm 可见光, 完成下移发光过程。此外, Ce^{3+} 的 4f 轨道具有强局域性的特点, 使 Ce^{3+} 掺杂的 CsPbCl_3 纳米晶具有高效吸收高能紫外光的能力, 在日盲紫外波段展现出高吸收截面。2024 年, Panchanan 等^[21] 研究了 Ce^{3+} 掺杂的 Cs_3CeBr_6 卤化物

钙钛矿衍生物, Ce^{3+} 吸收 280~370 nm 窄带日盲紫外光后, 电子从基态 $4f$ 跃迁至高能激发态, 经快速弛豫至 $5d^0$ 能级后, 通过辐射跃迁回基态, 释放 390 nm 和 421 nm 特征紫光, 属于典型的下移发光过程。

1.2.2 共掺杂体系 共掺杂体系通常涉及 2 种稀土离子组合, 借助量子剪裁实现高效探测。引入敏化剂 S 与激活剂 A 2 种稀土离子, 通过定向能量传递实现光谱展宽与效率提升, 常见的共掺杂稀土离子对有 Tb^{3+} - Eu^{3+} 、 Ce^{3+} - Yb^{3+} 、 Tb^{3+} - Yb^{3+} 等。Jia 等^[22]制备的 $\text{Tb}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ 共掺杂硼硅酸盐玻璃, 在 200~400 nm 紫外光激发下, 敏化剂 Tb^{3+} 先吸收能量并经过非辐射弛豫至 $^5\text{D}_4$ 能级, 其发射光谱与激活剂 Eu^{3+} 的吸收光谱重叠, 再通过共振非辐射传递将能量传递给 Eu^{3+} , 最终实现多色发光与宽带光电探测的效果; Zheng 等^[23]制备了 $\text{NaY}(\text{MoO}_4)_2$: Ce^{3+} , Yb^{3+} 荧光粉, 稀土离子对的能量传递机制以共振无辐射能量传递为主, 该体系中 MoO_4^{2-} 基团先吸收 200~350 nm 紫外光, 并通过能量传递激发敏化剂 Ce^{3+} 的 $4f$ 到 $5d$ 跃迁, 使其发射 400~700 nm 可见光, 引入激活剂 Yb^{3+} 后, Ce^{3+} 的 $5d$ 能级作为中间通道, 将能量传递给 Yb^{3+} , 使其跃迁并发射 1000 nm 近红外光, 实现量子剪裁。Bai 等^[24]制备的 CaMoO_4 : Tb^{3+} , Yb^{3+} 荧光粉, 在 306 nm 紫外光激发下敏化剂 Tb^{3+} 跃迁至 $^5\text{D}_4$ 能级并发射 545 nm 绿光, 同时通过合作能量传递将能量同步传递给 2 个激活剂 Yb^{3+} , 使其跃迁至并发射 997 nm 近红外光, 能量传递效率最高达 60.4%, 量子效率为 160.4%。

1.2.3 多掺杂体系 多掺杂体系引入 3 种及以上稀土离子, 构建级联能量传递网络, 通过量子剪裁发光机制实现紫外至可见光的高效转换。其优势包括光谱超宽覆盖、发射颜色可编程, 以及通过抑制效应提升目标发射纯度。Ding 等^[25]研究了 Cr^{3+} 、 Ce^{3+} 、 Yb^{3+} 三掺杂 CsPbCl_3 体系, 该体系的量子剪裁发光机制为紫外到近红外的高效转化, 光致发光量子产率(PLQY)达 188%。能量传递过程中, Cr^{3+}

掺杂增强了激子结合能、减少缺陷并提高结构稳定性, 为能量传递奠定基础。 Ce^{3+} 作为能量桥梁, 其 $5d$ 高能态显著增强紫外吸收, 同时填补钙钛矿量子点(PQDs)与 Yb^{3+} 之间的能量间隙, 加速能量从 PQDs 到 Yb^{3+} 的传递。最终, 能量通过 Ce^{3+} 介导传递给 Yb^{3+} , Yb^{3+} 发生 $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ 跃迁, 发射近红外光, 实现高效量子剪裁。随后, Song 等^[26]研究了 Cr^{3+} 、 Ce^{3+} 、 Mn^{2+} 三掺杂 CsPbCl_3 钙钛矿量子点, 能量传递过程中, Cr^{3+} 掺杂减少缺陷并提高稳定性, Ce^{3+} 的 $5d$ 态增强深紫外吸收, 促进能量从 PQDs 向 Mn^{2+} 传递。 Mn^{2+} 作为激活剂, 接收能量后发射可见光, 完成紫外到可见光的量子剪裁。两者均借助 Cr^{3+} 和 Ce^{3+} 来增强紫外吸收与结构稳定性, 分别服务于不同波段光探测的拓展需求。

1.3 稀土基光电响应材料类型

稀土离子掺杂光电响应材料的最终性能不仅取决于掺杂策略, 更受到所选基质材料的声子能量、晶体场环境、能量传递效率以及带隙特性等关键因素的制约。为了满足不同的应用需求, 研究者们开发了氧化物、氟化物、氟氧化物及纳米晶等材料体系, 不同材料体系的特性对比分析如表 1 所示。

1.3.1 氧化物基质 氧化物基质材料因其具备较高的热稳定性和化学稳定性, 且制备工艺相对简便, 在稀土离子掺杂体系中备受青睐。其中, 氧离子与稀土离子之间的键合作用可通过晶体场对 $4f$ 能级的劈裂效应, 实现对发光特性的调控^[27]。以 Jia 等^[19]研究的 $\text{AlO}(\text{OH})$: Eu^{3+} 为例(图 S1a~图 S1c, 电子补充材料), 基质通过 $\text{Al}-\text{O}-\text{Eu}$ 键合不仅稳定了 Eu^{3+} 的配位环境, 还对晶体场分布进行了优化。这一优化显著提升了材料对日盲紫外光的吸收效率和电荷分离性能, 具体表现为吸收光谱中吸收峰强度增强、位置红移, 最终实现了探测器性能的提升。Wang 等^[28]制备了 Y_2O_3 掺杂 Er^{3+} 及 $\text{Er}^{3+}-\text{K}^{+}$ 共掺杂的荧光粉(图 S1d~图 S1g)。选择 Y_2O_3 作为氧化物基质, 即便掺杂了 Er^{3+} 和 K^{+} , 晶体结构依然保持稳定, 这充分

表 1 稀土掺杂日盲光探测材料特性对比表

Table 1 Comparison of properties of rare-earth-doped solar-blind photodetection materials

Properties	Bandgap/eV	Phonon energy/ cm^{-1}	Core advantages	Main challenges	Representative systems	References
Oxides	5.0–8.0	600–900	Extreme environmental stability	Severe non-radiative loss	$\text{AlO}(\text{OH})$, Y_2O_3 , GeO_4	[19, 28–31]
Fluorides	>10	<500	Low phonon energy	Poor moisture/thermal stability	SrF_2 , NaYF_4 , CaF_2	[32–35]
Oxyfluorides	5.5–7.0	<550	Efficiency-stability balance	Anion order control	NaPO_3 - BaF_2 - AlF_3 - CaF_2 , 70SiO_2 - 15ZnF_2 - 15KF	[20, 36–37]
Nanocrystals	Tunable>4.4		Bandgap/morphology designability	Surface quenching effect	Y_2O_3 : Eu^{3+} @ SiO_2 , CsPbCl_2Br	[38–41]

证明了 Y_2O_3 良好的热稳定性和化学稳定性。氧离子与稀土离子的键合作用会对晶体的生长和微观结构的形成产生影响, 掺杂后粉体的微观结构改变。随着 K^+ 掺杂比例的变化, 发光强度和光谱特征也发生了改变。Raj 等^[29]对稀土金属离子掺杂 NiO 薄膜进行了研究(图 S1h~图 S1i)。纯 NiO 和掺杂薄膜均呈现面心立方结构且无杂质相, 体现出良好的化学稳定性。稀土离子掺杂后 PL 强度增加, 复合中心数量增多, 这一变化反映出稀土离子与氧离子相互作用对发光特性的影响。

氧化物基质如 $\text{AlO}(\text{OH})$ 、 Y_2O_3 、 NiO 等凭借其宽带隙($>5\text{ eV}$)和强 O^{2-} 到 RE^{3+} 电荷转移吸收带, 能有效捕获日盲紫外光子^[30-31]。氧化物基质核心优势在于优良的化学稳定性和热稳定性及成熟的制备工艺, 但氧化物基质具有较高的声子能量($>600\text{ cm}^{-1}$)导致非辐射弛豫显著, 限制了发光量子效率, 未来需通过优化宽带隙组分或增强电荷转移吸收来提升日盲响应性能。

1.3.2 氟化物基质 氟化物基质材料因声子能量较低, 在稀土离子能量传递过程中能有效抑制非辐射跃迁造成的能量损失, 进而提升发光效率^[42]。Cai 等^[32]以 Pr^{3+} 掺杂的 SrF_2 晶体为例(图 S2a~图 S2c), 其声子能量通过拉曼光谱测定约为 285 cm^{-1} , 远低于常见氧化物基质。高分辨率 TEM 照片中清晰的(200)晶格条纹($d=0.290\text{ nm}$)证实 SrF_2 晶体中 Pr^{3+} 通过取代 Sr^{2+} 位点形成稳定的 $[\text{PrF}_8]$ 配位结构, 这种局域对称性破缺的环境结合低声子能量基质, 使得 Pr^{3+} 的 $4f5d$ 向 $4f^2$ 跃迁能高效产生中心波长约为 222 nm 的远紫外 C 波段发光。Wei 等^[33]采用配体辅助共沉淀法在室温下合成了 $\text{NaYF}_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ 纳米晶体(图 S2d~图 S2e), 氟化物基质的低声子能量特性使得 Ce^{3+} 与 Tb^{3+} 之间的能量传递更高效, 随 Tb^{3+} 浓度的变化, Ce^{3+} 到 Tb^{3+} 的能量转移效率最高可达 81.8% , 这有效减少了非辐射跃迁造成的能量损失, 最终使该纳米晶体的光致发光量子产率(PLQY)达到 54.8% 。在 290 nm 激发下, $\text{NaY}_{1.0-0.2-x}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}_{0.2}, \text{Tb}^{3+}_x$ 纳米晶体呈现出 Tb^{3+} 的特征发射峰, 且随着 Tb^{3+} 掺杂浓度的变化, 发射强度呈现规律性变化, 在最佳掺杂浓度时发光强度达到最高, 体现了低非辐射跃迁损失下的高效发光特性。

氟化物基质如 SrF_2 和 NaYF_4 具有超宽带隙($>10\text{ eV}$)和极低声子能量($<500\text{ cm}^{-1}$), 可高效激发等稀土离子的 $4f-5d$ 跃迁, 吸收边可延伸至日盲区, 并大幅抑制非辐射能量损失, 是高性能日盲探测器

的理想候选, 但其化学稳定性和机械强度不足是主要应用瓶颈, 还需通过复合封装或氟氧化物设计解决该问题^[34-35]。

1.3.3 氟氧化物基质 氟氧化物通过协同氧/氟阴离子, 兼具低声子能量($<550\text{ cm}^{-1}$)与高稳定性, 是优化日盲响应的新兴平台^[43]。Tao 等^[36]制备了含氟化物成分的 Tb^{3+} 掺杂 $\text{NaPO}_3\text{-BaF}_2\text{-AlF}_3\text{-CaF}_2$ 氟磷酸盐玻璃(图 S3a~图 S3b)。其拉曼光谱中最大声子能量为 1160 cm^{-1} , 这一数值相对较低, 意味着 Tb^{3+} 能量传递时的非辐射跃迁损失会减少。通过 Judd-Ofelt 理论计算发现, 玻璃中 Judd-Ofelt 强度参数 Ω_2 值较高, 表明 Tb^{3+} 处于利于荧光发射的环境。此外, 其吸收光谱在日盲-近紫外波段呈现出对应 $\text{Tb}^{3+}f-f$ 能级跃迁的多个特征吸收峰。Zhao 等^[37]制备了含 KTb_2F_7 纳米晶体的氟硅酸盐玻璃陶瓷(图 S3c~图 S3f), 氟化物晶体为 Tb^{3+} 提供了低声子能量配位点。纳米晶体在基质中均匀分散, 为构建低声子环境奠定了结构基础; 在氟化物基质的低声子环境下, Tb^{3+} 非辐射跃迁损失减少, 发光效率提高。

氟氧化物如氟磷酸盐和氟硅酸盐玻璃基质融合氟化物基质的低声子能量特性与氧化物基质的稳定性, 可以高效激活稀土离子的 $4f-5d$ 跃迁。氟氧化物基质中 O 和 F 的比例可调特性有利于优化电荷转移带的位置, 然而如何精确调控阴离子的有序排布, 仍是合成过程中面临的一大挑战。

1.3.4 纳米晶材料 稀土掺杂纳米晶是宽带隙氧化物/氟化物材料的纳米尺度形态, 由于其独特的尺寸效应和量子限域效应, 表现出优异的光学性能^[11]。其中, 尺寸效应主要通过调控稀土离子局域配位环境显著改变其光学特性。而量子限域效应则通过增强载流子波函数的交叠程度来提升能量传递效率。以 Jia 等^[38]研究的 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}@\text{SiO}_2$ 为例(图 S4a~图 S4f), SiO_2 纳米晶核为 Eu^{3+} 提供了受限环境, 不仅稳定了发光中心, 还优化了能量传递路径。在 256 nm 日盲紫外光激发下, 发射峰强度显著增强, 展现出增强的可见光发射。Xie 等^[39]制备了 Nd^{3+} 掺杂 CsPbBr_3 钙钛矿纳米晶(图 S4g~图 S4m), 不同 Nd^{3+} 掺杂浓度下的 CsPbBr_3 纳米晶尺寸均匀, 而且分散性良好。小尺寸带来了高表面原子占比, 这会引发晶格畸变, 进而改变晶体场对称性与配位数。这种结构变化最终调整了稀土离子的 $4f$ 能级, 实现了对发光特性的有效调控。

宽带隙纳米晶通过量子限域效应可以进一步拓宽带隙来适配日盲波段吸收^[42-43]。核壳结构如

$\text{Y}_2\text{O}_3@\text{SiO}_2$ 能有效钝化表面缺陷, 减少非辐射猝灭。其溶液加工性有利于柔性器件开发, 但表面缺陷主导的猝灭效应仍是效率提升的核心挑战, 而且高性能体系纳米晶还面临着生长与掺杂难度大等问题。

2 日盲光电器件应用与性能优化

2.1 传统探测器结构与工作原理

在日盲光探测领域, 传统日盲探测器类型多样, 其工作原理各有特点。本小节分别介绍光电导探测器、光伏探测器和雪崩探测器的结构和工作原理^[44–49]。光电导探测器的工作依赖外场驱动光生载流子的迁移。当入射光照射材料时, 会激发产生电子–空穴对, 这些载流子在外加电场作用下定向运动, 进而引起材料电导率的变化, 通过这一过程实

现对光强的检测, 其结构示意图如图 3a 所示; 光伏探测器的工作原理基于 p–n 结的内建电场效应(图 3b)。在光的照射下, p–n 结区产生光生载流子, 这些载流子会在内建电场的作用下自发分离, 从而形成光电流。其特点是无须外源偏压, 即可完成光电转换过程。此外, 肖特基势垒光电二极管也是一种常见的光伏探测器, 它通过金属–半导体界面处的肖特基势垒来减少暗电流, 具有较高的响应速度, 图 3c 为其结构示意图; 雪崩探测器则是借助强反向偏压下的碰撞电离机制来工作。在强反向偏压条件下, 初始光生载流子会触发链式雪崩倍增效应, 使得微弱的光信号得以指数级放大, 这一机制显著提升了探测器的灵敏度, 其结构示意图如图 3d 所示。

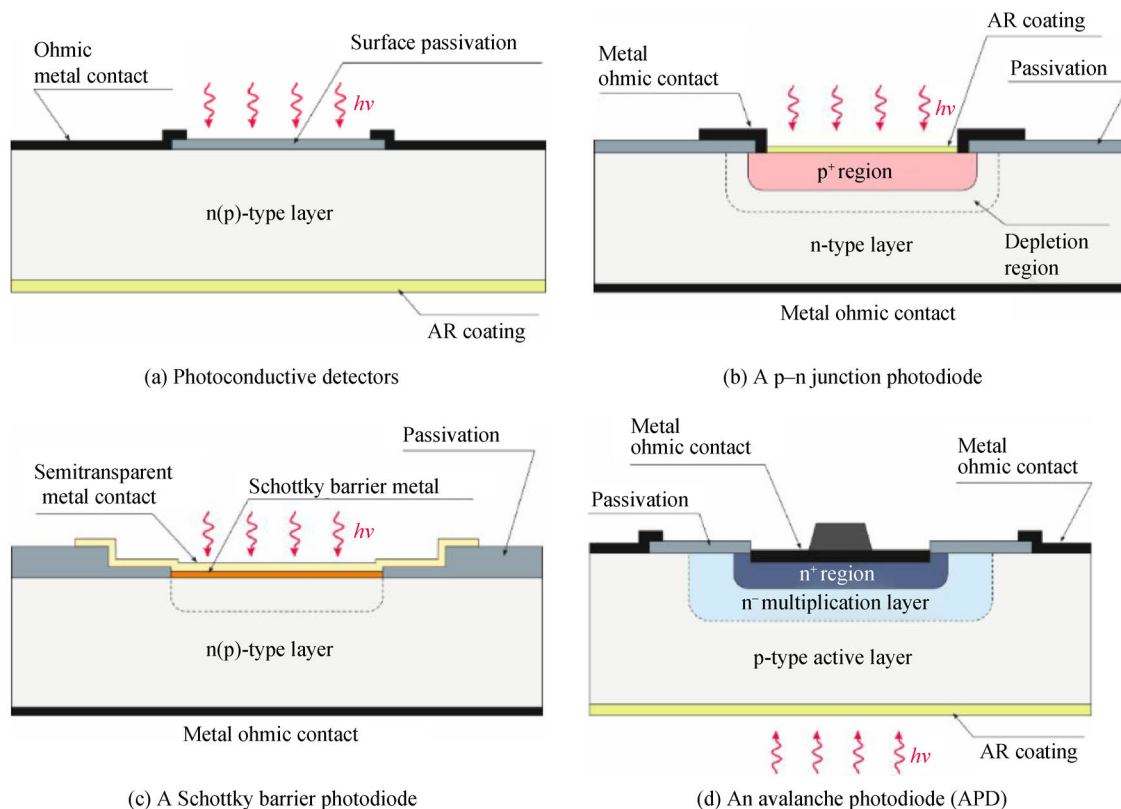


图 3 传统日盲探测器结构示意图^[49]

Fig. 3 Schematic diagram of the traditional solar-blind detector structure^[49]

许多研究致力于探索不同材料和结构的日盲光电探测器。2020 年, Li 等^[50]研发出高性能 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 日盲肖特基光电二极管, 这是一种光伏探测器。该器件凭借载流子倍增机制实现了性能突破, 而且结构简单、成本较低。2022 年, Liu 等^[51]通过化学气相沉积法合成 SnO_2 微丝, 构建了基于 n- SnO_2 微丝/p-InGaN 异质结的自驱动光电探测器。同年, Wu

等^[52]研究者制备了基于单个厚度为 52.1 nm 的 GaSe 纳米带的灵敏深紫外光电探测器。2023 年, Zhang 等^[53]首次设计了一种基于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 膜的嵌入式钢锡氧化物(ITO)电极的全透明 MSM 光电导探测器。同年, Zhang 等^[54]利用晶格和能带工程制备出 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{Nb:STO}$ 异质结构雪崩光电探测器, 该研究通过优化能带结构实现了器件性能的提升, 为高性能

Ga₂O₃基光电器件的开发提供了重要参考。

2.2 稀土能量传递多级增效机制

尽管传统日盲光电探测器在该领域已有一定应用，但随着技术进步，其在灵敏度、响应速度和稳定性等方面逐渐难以适应复杂多变的应用场景。为突破这些瓶颈，研究者们开始探索稀土离子掺杂的日盲紫外光电探测器。稀土离子独特的电子结构为探测器性能提升提供了新机制，通过 3 大增效机制显著优化器件性能，分别为光谱吸收与能量捕获机制、载流子全流程调控机制和材料稳定性与暗电流抑制机制^[55]。

1) 光谱吸收与能量捕获机制：稀土离子具有 4f-5d 跃迁的窄带吸收特性，这种特性能够直接与日盲紫外波段相匹配。通过对基质晶场环境进行调控，可以对稀土离子的吸收峰位置进行微调，从而更好地适应日盲紫外探测的需求。例如，Ce³⁺在不同基质晶场环境下的电子态密度分布具有差异(图 S5a~图 S5b)^[56]。同时，高价稀土离子与基质中的阴离子会形成电荷转移带，这一转移带能够有效扩展对光的吸收范围。在共掺体系中，敏化剂与激活剂之间会发生共振能量转移，如在 Yb³⁺-Pr³⁺共掺杂体系中，Pr³⁺作为敏化剂，可吸收能量并将其传递给作为激活剂的 Yb³⁺，二者间发生共振能量转移，能针对性捕获日盲紫外光，提升探测器对特定波段光的利用效率与选择性(图 S5c)^[57]。

2) 载流子全流程调控机制：该机制涉及载流子从生成到复合的整个过程，每个环节都有相应的调控方式。如在 p-Gr/i-Yb₂O₃n-Si 异质结中(图 S5d)^[58]，在载流子生成与分离阶段，Yb₂O₃ 中的 Yb³⁺引入的浅能级能够辅助载流子电离，同时 Yb₂O₃ 基质激子

会向 Yb³⁺转移能量，这 2 种作用共同促进电子-空穴对的分离；在载流子输运阶段，小半径的 Yb³⁺可以降低 Yb₂O₃ 晶格畸变程度，从而减少声子散射现象，提高载流子的迁移率，同时 Yb³⁺在 Yb₂O₃ 与 n-Si、Yb₂O₃ 与石墨烯的界面形成偶极层能够优化能带偏移，加快光电子的隧穿速度；在载流子复合阶段，Yb³⁺可以引入快速复合路径，以此缩短响应时间。此外，大半径的稀土离子能够抑制缺陷的产生，减少非辐射复合，延长载流子的寿命。通过对这些环节的综合调控，实现对载流子全流程的有效管理，提升探测器性能。

3) 材料稳定性与暗电流抑制机制：稀土离子通过 2 方面的作用来提升探测器的稳定性并降低暗电流。以 Er³⁺掺杂 CsPbI₃ 钙钛矿量子点材料为例^[26]，一方面，Er³⁺能够填充基质中的 Pb²⁺阳离子空位，并且在界面处与周围 I 形成稳定的化学键，这些作用可以对体相和界面的缺陷进行有效钝化。缺陷被钝化后，界面态密度会随之降低，进而使探测器的比探测率得到提升；另一方面，高电负性 Er³⁺可以增强 Pb-I 化学键的强度，减少氧原子的脱附现象，保证 CsPbI₃ 钙钛矿量子点材料结构的稳定性。同时，Er³⁺掺杂提高了 CsPbI₃ 的形成能(图 S5e~图 S5f)，能够稳定基质的高温相结构，使得器件在高温、湿热等复杂环境下依然能够保持长期稳定的工作状态，确保探测性能的可靠性。

相较于传统探测器，稀土掺杂器件展现出明显优势，为日盲光探测技术发展开辟了新路径。从表 2 中各类紫外探测器的性能对比可以清晰地看到，稀土离子掺杂的日盲紫外探测器在其中展现出更为出色的性能。

表 2 各种紫外检测器性能的比较^[59]

Table 2 Comparison of performance of various ultraviolet detectors^[59]

Main structure	Cutoff edge/nm	Type	Bias/V	Responsivity/ (mA·W ⁻¹)	Detectivity/ (cm·Hz ^{1/2} ·W ⁻¹)	Rise time/ ms	Decay time/ms	Reference
β-Ga ₂ O ₃	270	Photovoltaic	0	0.2	6.9×10 ⁹			[60]
ZnS	365	Photoconductive	10	0.089 4	6.51×10 ⁸	153	206	[61]
Ag/ZnMgO/ZnO	275	Photovoltaic	0	16	5×10 ⁹	0.024	0.3	[62]
GaN/Ga ₂ O ₃	254	Photovoltaic	0	28.44	6.2×10 ¹⁰	140	70	[63]
SnO ₂	290	Photovoltaic	0	1.55	9.8×10 ¹⁰	0.57	0.64	[51]
GaN/Sn:Ga ₂ O ₃	254	Photovoltaic	0	3.05×10 ³	1.69×10 ¹³	18		[64]
Sm ₂ O ₃	258	Photovoltaic	0	19.8	1.2×10 ¹¹	20	40	[59]
CsPbCl ₃ :Ce ³⁺ /Al	280	Photoconductive	3	4.6	4×10 ¹³	0.029	0.052	[56]
β-Ga ₂ O ₃ :Sn	274	Photoconductive	20	444 510		0.18	6.2	[65]

2.3 基于稀土能量传递的日盲光电器件性能优化

相较于传统日盲探测器, 稀土离子掺杂器件凭借其独特的能级结构与能量传递机制, 在性能优化方面展现出显著优势, 成为当前研究的核心方向。本小节将系统阐述针对响应特性、时间特性、稳定性及噪声特性 4 大核心性能指标的优化工作, 聚焦于如何通过精准调控稀土离子的掺杂策略来差异化地提升探测器的 4 大核心性能, 为推动基于稀土能量传递的日盲光电器件的发展与实际应用提供了重要的支撑。

2.3.1 响应特性 响应特性是器件的基础性能, 决定了其将入射紫外光子转换为可用电信号的效率, 核心指标包括响应度、外量子效率(EQE)和光谱响应范围。其优化策略核心在于利用稀土离子独特的能级结构和高效的能量传递过程(如下转换、量子剪裁), 通过精准调控掺杂离子种类、浓度及组合方式, 以实现对紫外光子的高效捕获、转换和利用, 从而提升器件的响应度和外量子效率。与未掺杂体系相比, 稀土离子掺杂日盲响应材料体系可以提高日盲光电器件的灵敏度^[66–67]。Ye 等^[68]通过将 Tb³⁺ 掺杂到 CsPbCl₂Br₁ 纳米晶玻璃(PNGs)中(图 S6a~图 S6c), 实现了激子能量向 Tb³⁺ 的高效转移, 使光致发光量子产率(PLQY)从 11.1% 大幅提升至 28.1%。这种能量转移过程不仅拓宽了材料对紫外光的光谱响应范围, 还增强了紫外光信号的捕获能力。此外, Tb³⁺ 掺杂的 CsPbCl₂Br₁ PNG 与硅光电探测器(Si PDs)集成后, 得益于 Tb³⁺ 的量子剪裁效应, 在 320 nm 波长处的响应度比未掺杂的器件提高了 5 倍, 同时外量子效率也显著提升。在稀土离子掺杂体系中, 不同掺杂浓度也是影响器件响应特性的重要因素。Li 等^[69]提出了一种基于 Y₂O₃:Eu³⁺/PMMA 杂化膜的荧光转换策略(图 S6d~图 S6e)。Eu³⁺ 通过 ⁵D₀ 到 ⁷F₂ 能级跃迁, 将 200~280 nm 宽带日盲紫外光高效转换为 612 nm 红光, 同时研究者还测试了 5%、10%、12%、15%、20% 等不同 Eu³⁺ 掺杂浓度的 Y₂O₃:Eu³⁺ 荧光粉的吸收和发光性能, 发现 15% 为最优掺杂比例, 此时下转换发光强度达到最大值, 光电转换效率最高, 若进一步提高掺杂浓度会因浓度猝灭效应而导致发光强度与下转换效率显著下降。此外, 稀土离子不同的掺杂方式, 如单掺杂或共掺杂, 对器件的响应特性也产生了巨大影响。Lin 等^[70]制备了 Eu³⁺ 和 Tb³⁺ 双掺杂的 NaPO₃-BaF₂-AlF₃-CaF₂ 氟磷酸盐玻璃(图 S6f~图 S6h), Eu³⁺ 单掺杂氟磷酸盐玻璃仅在 395 nm 处表现

出强吸收, 而 Tb³⁺ 的引入进一步扩展了 UVA 区域的吸收, 两者通过能量转移将短波紫外光转换为探测器更敏感的可见光。这种基于稀土离子间能量传递的下转换效应使硅基探测器在 320~440 nm 波段的响应率相对提升最高达 20%, 其中 Eu³⁺-Tb³⁺ 双掺杂体系在 320~380 nm 波段的敏化效果显著优于单一 Eu³⁺ 掺杂玻璃。综上, 响应特性的优化主要依赖于稀土离子丰富的能级结构及其下转换、量子剪裁效应, 这为提升器件灵敏度和光谱利用率提供了核心路径。

2.3.2 时间特性 在保障足够灵敏度的基础上, 缩短响应时间对于捕捉快速变化的日盲紫外信号至关重要, 其核心在于减少载流子的传输与复合时间。具体可通过以下策略实现: 调控稀土离子掺杂浓度并优化能量传递路径, 以降低载流子复合概率; 样品表面处理及其温度调控; 选用高迁移率的基质材料, 为载流子传输提供高效通道^[71]。Hu 等^[72]开发的 Pr_{0.7}Sm_{0.3}NiO₃/Nb:SrTiO₃ 异质结(图 S7a~图 S7b), 通过 Sm³⁺ 掺杂调控 Ni 3d-O 2p 轨道杂化, 优化载流子动力学, 同时研究者还对比了 Pr_xSm_{1-x}NiO₃ 中 x=1.0、x=0.9、x=0.7 的样品。结果显示, Sm 掺杂量为 0.3 时, 器件响应速度最优, 上升时间 0.44 μs、下降时间 0.60 μs, 显著快于纯 PrNiO₃ 及其他掺杂比例样品, 同时其自供电特性凸显了稀土掺杂在加速载流子分离与输运中的关键作用。同时, Panchanan 等^[21]的研究发现对日盲光电探测材料进行表面退火处理也可以提升器件的响应速度(图 S7c~图 S7e)。他们对比了原始未退火样品与经 200、230、250、270、300 °C 惰性气氛退火的 Ce³⁺ 掺杂 Cs₃CeBr₆ 钙钛矿衍生物样品, 结果显示, 通过 270 °C 的表面退火处理, 陷阱态密度从 2×10¹³ cm⁻²·eV⁻¹ 降至 8×10¹³ cm⁻²·eV⁻¹, 载流子迁移率提升至 10.11 cm²·V⁻¹·s⁻¹, 最终使器件响应速度提升至上升时间 93 μs、下降时间 345 μs, 实现了日盲紫外探测器载流子迁移率与复合时间的优化, Ce³⁺ 的 5d 到 4f 跃迁赋予材料 28.33 ns 的短光致发光衰减时间, 显著降低了非辐射复合损失。此外, 选用高迁移率的基质材料也是提升器件响应速度的重要途径。Huang 等^[59]在器件中引入石墨烯(Gr)作为上导电层, 利用其极高的载流子迁移率高效收集光生空穴, 减少载流子在传输过程中的损耗(图 S7f)。光生电子-空穴对在电场的驱动下快速分离, 电子和空穴分别向 SiC 和 Gr 迁移, 这样的过程实现了复合率的降低和传输效率的提升, 该器件的响应速度达到了

20/40 ms(上升/下降时间)。综上, 时间特性的优化关键在于通过稀土掺杂调控载流子动力学、表面工程以及选用高迁移率材料, 以实现载流子的快速生成、分离与输运。

2.3.3 稳定性 稳定性是影响器件长期工作的关键因素, 因此需要选择化学稳定性和热稳定性良好的材料, 并可通过以下两项针对性策略进一步提升其稳定性: 一是通过材料成分调控增强内在结构稳定性, 二是通过工艺优化提升抗环境干扰能力。Jia 等^[20]在研究中发现, 稀土离子 Tb^{3+} 掺杂显著提升了日盲紫外探测器的稳定性且掺杂浓度起到调控作用(图 S8a~图 S8c), 他们测试了 0.5%~6.0% Tb^{3+} 掺杂浓度的氧氟化物玻璃陶瓷(GC)的性能, 发现 5% 掺杂时, 样品具有较高的玻璃转变温度(510 °C)和结晶温度(580 °C), 显示出优异的热稳定性。此外, 对比未热处理的玻璃前驱体与经 540 °C 热处理 10 h 的 GC, 结果显示, 热处理后 Tb^{3+} 自发进入 KTb_2F_7 纳米晶结构, 形成稳定的晶相, 从而减少了晶格缺陷和非辐射复合, GC 的发光强度比玻璃前驱体提高 5.6 倍。GC 在可见光区的透光率高达 90%, 且在连续紫外照射(371 nm)100 h 后, 透光率仅下降 3%, 化学稳定性良好, 多次光电响应循环测试中光电流信号衰减率低于 5%, 展现出优异的循环稳定性与抗环境干扰能力。与 Jia 等聚焦单一材料的掺杂调控不同, Jin 等^[73]通过核壳异质结设计提升了器件稳定性, 他们对比了纯 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 器件与 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Lu}_2\text{O}_3$ 核壳异质结器件(图 S8d~图 S8f)。结果显示, 核壳结构中 Lu^{3+} 能够占据晶格位点并诱导形成稳定的核壳晶相, 进而抑制 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中的氧空位缺陷, 同时降低晶格畸变。XRD 谱证明异质结形成稳定晶格, 说明核壳结构可以增强结构稳定性。另外, Jin 等也在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Lu}_2\text{O}_3$ 核壳异质结器件的研究中发现不同浓度 Lu_2O_3 溶液制备的器件, 核壳结构稳定性不同, 证明优化 Lu^{3+} 浓度可提升异质结稳定性。 Lu_2O_3 的宽禁带和高介电常数为能量传递提供稳定环境, I - V 曲线呈现的整流行为证明异质结内建电场已建立, 促进载流子输运与分离, 从而减少非辐射复合劣化, 器件在 254 nm 紫外光连续照射 2000 s 后仍保持高响应性能。综上, 稳定性的提升主要得益于通过稀土掺杂诱导形成稳定晶相、核壳结构设计以及材料组分优化, 从而显著增强器件的热、化学及循环稳定性。

2.3.4 噪声特性 噪声特性是制约日盲光电器件探测极限的核心瓶颈, 主要源于暗电流噪声、产生-

复合噪声及 $1/f$ 噪声。优化稀土离子掺杂浓度、设计高效稀土离子掺杂组合及基质匹配、调控外界工作条件是影响日盲光电器件噪声特性的关键策略。Li 等^[56]研究的 $\text{CsPbCl}_3:\text{Ce}^{3+}/\text{Al}$ 杂化薄膜探测器中(图 S9a~图 S9b), Ce^{3+} 掺杂浓度是调控噪声的关键因素, 通过测试 0.41%~3.23%(摩尔分数)的掺杂梯度, 发现 2.86%时缺陷态密度从 $8.31 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 降至 $5.99 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 载流子迁移率提升, 暗电流噪声被有效抑制, 配合 Al 膜的等离子体效应与肖特基势垒形成, 使探测率达 4×10^{13} Jones, 这表明适宜的掺杂浓度可通过缺陷钝化与载流子输运优化降低噪声。除了单一离子的掺杂浓度, 稀土离子的掺杂组合及基质的能带匹配对噪声抑制同样重要。Zhou 等^[57]报道的 $\text{CsPbClBr}_2:\text{Yb}^{3+}, \text{Pr}^{3+}, \text{Ce}^{3+}$ 钙钛矿量子点中(图 S9c), 通过对比 Yb^{3+} 单掺杂、 $\text{Yb}^{3+}-\text{Pr}^{3+}$ 共掺杂与三掺杂体系, 发现 Pr^{3+} 和 Ce^{3+} 作为中间能级实现从钙钛矿基质到 Yb^{3+} 的高效能量传递, 使光致发光量子产率从 137%提升至 173%, 量子剪裁效应增强了信号幅度, 间接提升了信噪比。此外, 外界条件(如光功率密度和偏压)也会通过影响载流子输运过程作用于噪声特性。Yang 等^[58]在 $\text{p-Gr/i-Yb}_2\text{O}_3/\text{n-Si}$ 异质结探测器中发现(图 S9d), 在 255 nm 光照下, $4.6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的低光功率密度配合 -2 V 偏压时, 器件探测率达 5.9×10^{11} Jones, 且随光功率密度升高, 探测率下降趋势平缓, 说明低光强与适宜偏压可减少载流子随机俘获, 抑制产生-复合噪声。综上, 噪声特性的抑制依赖于精确的稀土掺杂浓度调控、多离子协同的能量传递优化以及合理的外部工作条件设置, 从而有效降低缺陷态密度并提升信噪比。

综上所述, 针对稀土离子掺杂体系响应特性、时间特性、稳定性和噪声特性的优化工作均以稀土离子的电子结构和能量传递机制为核心, 通过调控稀土离子的掺杂浓度、优化基质匹配度、调整稀土离子掺杂组合等手段, 实现日盲响应器件的性能优化。同时, 针对不同的性能指标, 优化工作的重点也有所不同。响应特性聚焦光电转换效率的提升, 时间特性侧重载流子输运与复合速率的优化, 稳定性关注材料结构与化学环境的长期可靠性, 噪声特性则致力于通过缺陷钝化与信号增强抑制干扰。由此, 稀土离子掺杂器件的性能优化可视作对光谱调控-载流子输运-结构稳定-缺陷钝化 4 个维度的系统统筹。本综述为未来面向特定应用需求的高性能日盲紫外探测器的材料设计与工艺开发提供了系统性的理论指导和实践参考。

3 结论与展望

3.1 结论

本文系统性综述了稀土离子在日盲波段光电探测领域的应用研究进展,重点围绕稀土离子的能量传递机制、材料体系构建、器件结构优化及性能提升策略进行了深入探讨,并分析了实际应用前景与未来发展方向。凭借独特的 4f 电子层结构与丰富的能级跃迁特性,稀土离子在 200~280 nm 日盲波段光电探测中展现出显著优势。依托下转换及共振能量传递等机制,稀土离子能够高效吸收日盲紫外光并将其转化为可探测信号。围绕氧化物、氟化物及纳米晶等多类型基质材料开展的体系设计,有效提升了材料的发光效率与稳定性。基于稀土离子掺杂的日盲光电探测器,凭借高灵敏度、低噪声及快速响应等性能优势,在军事侦察、环境监测、生物医学等领域展现出广阔的应用前景。尽管如此,稀土基日盲响应材料及光电器件在实际应用中仍面临诸多挑战,相关问题及应对策略概述如下:

3.1.1 挑战 在稀土基日盲响应类材料及器件中,常用提升能量传递效率的惯用手段,如提高稀土离子掺杂的浓度或者采取特殊的结构设计方法,多半会引发材料稳定性的问题,诸如浓度猝灭、热稳定性下降之类的情况。如今难以达成两者兼顾,在微观结构设计、掺杂离子的筛选和分布的优化、基质材料改性等范畴内,依旧未能找到最佳的平衡点。

3.1.2 应对策略 针对上述挑战,有以下 3 种应对策略: 1) 在理论研究方面,可凭借第一性原理计算、分子动力学模拟等计算模拟技术,构建稀土离子与基质原子作用模型,量化分析掺杂浓度、离子半径匹配度等参数的影响机制,再基于多目标优化算法建立预测模型,输入材料组分、晶体结构等参数,即可输出兼具高能量传递效率与高稳定性的理想材料体系配比范围及结构特征,实现对适宜体系的预测; 2) 在实验探索方面,采用高通量制备技术,合成含不同稀土离子掺杂浓度、基质成分比例的上百种材料样品阵列。结合自动化表征平台快速检测其能量传递效率和稳定性,经大数据分析筛选出较优材料组合,再对候选材料进行梯度掺杂实验,结合原位结构表征技术实时监测微观结构变化,实现精准优化; 3) 可探索新型复合材料以平衡能量传递效率与稳定性: 在基质中添加 Al_2O_3 、 ZrO_2 等纳米级氧化物稳定剂,抑制稀土离子团聚以缓解浓度猝

灭效应,并借其高热导特性提升热稳定性; 研发三维网络结构复合基质,通过空间限域作用调控离子分布,兼顾能量传递与结构稳定; 探寻高晶格匹配度新型基质,调节阳离子空位浓度平衡掺杂环境,实现两者协同提升。

3.2 未来展望

3.2.1 应用前景分析 在高精度、高可靠性日盲光探测需求日益增长的背景下,稀土基日盲光电器件凭借其独特性能,在众多领域体现出广阔的应用前景。在军事领域,它能显著提升导弹制导的精准度,助力目标的精准识别与锁定,同时在战场环境监测中,可快速捕捉敌方隐蔽光源或特定光学信号,为作战决策提供关键情报支持。民用领域的应用同样广泛,在食品安全检测中,借助其对特定波长光的敏感特质,可高效识别出食品中的有害物^[74–75]; 在生物医学范畴,经由标记特定生物分子途径,凭借器件的高灵敏度可达成生物分子的精准检测,为疾病早期的诊断与治疗给予技术方面的支持^[76–77]。此外,随着物联网技术的蓬勃发展,小型化、低功耗的稀土基日盲光电器件成为传感器节点的理想选择,无论是实时监测城市空气质量中的特定污染物光学信号,还是追踪农业生产中植物生长的光照条件,都能发挥重要作用^[78]。可以预见,若能在性能优化与成本控制上不断取得突破,稀土基日盲光电器件的应用边界将持续拓展,为各行业的发展贡献更大力量。

3.2.2 未来发展方向 尽管稀土基日盲光电器件已实现阶段性的突破,但面对逐步升级的技术需求以及激烈的市场比拼,该领域仍要在创新摸索中谋求突破。从材料体系的融合到器件结构的优化,再到工程化应用的实施,各个环节都存有显著的发展潜力,以下几个方向会是推动稀土基日盲光电器件不断发展的关键: 1) 二维材料如石墨烯、二硫化钼与稀土基材料复合体现出显著优势。石墨烯的大比表面积连同高载流子迁移率可推动能量传递加速,同时把载流子复合的概率降低; 二硫化钼能凭借调节能带结构优化光电响应表现,钙钛矿材料与稀土材料结合起来可进一步对能量传递路径进行优化,尤其在日盲波段性能改善方面潜力显著,相关纳米复合材料的应用前景广阔。2) 随着科技成果的涌现,器件朝着多功能集成及小型化发展势在必行,在日盲光电探测的范畴内,多种传感功能集成后可实现复杂环境下的综合监测,微纳日盲光电器件运用微纳加工技术构造特殊结构以提高性能,若与微

机电系统(MEMS)技术深度融合, 会推动其往小型化、集成化和智能化方向加速拓展。3) 未来需开发高效、低成本又稳定的制备工艺, 解决大规模生产的障碍; 经由制定统一行业标准提升器件的标准化及兼容程度, 减少系统集成时的成本与难度; 同时促进产学研用的协同配合, 认真挖掘潜在的市场需求, 引导技术成果完成转化, 搭建全面的产业链条, 达成从实验室研发阶段到产业化应用阶段的跨越。

补充材料

本文的电子补充材料见网络版(<https://link.cnki.net/urlid/11.2310.TQ.20260415.1045.003>)。

参考文献:

- [1] CHEN S, SONG W H, CAO J K, et al. Highly sensitive optical thermometer based on FIR technique of transparent $\text{NaY}_2\text{F}_7: \text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ glass ceramic[J]. *J Alloys Compd*, 2020, 825: 154011.
- [2] HOU X H, ZOU Y N, DING M F, et al. Review of polymorphous Ga_2O_3 materials and their solar-blind photodetector applications[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2021, 54(4): 043001.
- [3] LU J, LIU X, ZHAO M, et al. Discovery of NLO semioorganic $(\text{C}_5\text{H}_6\text{ON})^+(\text{H}_2\text{PO}_4)^-$: Dipole moment modulation and superior synergy in solar-blind UV region[J]. *J Am Chem Soc*, 2021, 143(9): 3647–3654.
- [4] CHEN J X, OUYANG W X, YANG W, et al. Recent progress of heterojunction ultraviolet photodetectors: Materials, integrations, and applications[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(16): 1909909.
- [5] WANG D H, LIU X, FANG S, et al. Pt/AlGaIn nanoarchitecture: Toward high responsivity, self-powered ultraviolet-sensitive photodetection[J]. *Nano Lett*, 2021, 21(1): 120–129.
- [6] HOU X H, ZHAO X L, ZHANG Y, et al. High-performance harsh-environment-resistant GaOX solar-blind photodetectors via defect and doping engineering[J]. *Adv Mater*, 2022, 34(1): 2270009.
- [7] YANG W F, LEI Y T, JIN Z W. Recent progress on solar blind deep ultraviolet photodetectors based on metal halide perovskites[J]. *J Mater Chem C*, 2024, 12(21): 7497–7512.
- [8] ZHANG G D, DANG P P, LIAN H Z, et al. Tailoring the highly efficient upconversion luminescence of all-inorganic Er^{3+} -based halide double perovskites by introducing various energy trapping centers[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, 10(20): 2201220.
- [9] 贾松, 王雪飞, 史祎诗. 稀土掺杂上转换发光材料的研究进展[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2024, 16(2): 114–136.
JIA Song, WANG Xuefei, SHI Yishi. *J Eng Stud*, 2024, 16(2): 114–136.
- [10] ZHANG H X, CHEN Z H, LIU X, et al. A mini-review on recent progress of new sensitizers for luminescence of lanthanide doped nanomaterials[J]. *Nano Res*, 2020, 13(7): 1795–1809.
- [11] ZHENG B Z, FAN J Y, CHEN B, et al. Rare-earth doping in nanostructured inorganic materials[J]. *Chem Rev*, 2022, 122(6): 5519–5603.
- [12] ZHANG H, ZHANG H Q, PAN A Z, et al. Rare earth-free luminescent materials for WLEDs: Recent progress and perspectives[J]. *Adv Mater Technol*, 2021, 6(1): 2000648.
- [13] KADAM A R, MISHRA G C, DESHMUKH A D, et al. Enhancement of blue emission in Ce^{3+} , Eu^{2+} activated BaSiF_6 downconversion phosphor by energy transfer mechanism: A photochromic phosphor[J]. *J Lumin*, 2021, 229: 117676.
- [14] ZHANG Z, MA N N, KANG X N, et al. Switchable up and down-conversion luminescent properties of Nd(III)-nanopaper for visible and near-infrared anti-counterfeiting[J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 252: 117134.
- [15] CHEN Z Y, ZHU H, QIAN J J, et al. Rare earth ion doped luminescent materials: A review of up/down conversion luminescent mechanism, synthesis, and anti-counterfeiting application[J]. *Photonics*, 2023, 10(9): 1014.
- [16] RYABOCHKINA P A, BALASHOV V V, VOLKOVA T V, et al. Nonradiative energy transfer between Yb^{3+} and Tm^{3+} ions in Y_2O_3 : Tm, Yb ceramics[J]. *J Lumin*, 2023, 253: 119485.
- [17] HAN Q, YAN T P, SONG Y L, et al. Up-conversion luminescence enhancement and tunable emission color of Y_2O_3 : Tm/Yb@ Y_2O_3 : Yb@ Y_2O_3 : Er/Yb multilayer thin films[J]. *J Alloys Compd*, 2021, 877: 160151.
- [18] JI Y N, ZHOU D L, WANG N, et al. Flexible double narrowband near-infrared photodetector based on PMMA/core-shell upconversion nanoparticle composites[J]. *J Rare Earths*, 2022, 40(2): 211–217.
- [19] JIA H, ZHENG H R, LI C, et al. Eu^{3+} -doped $\text{AlO}(\text{OH})$ as a spectral converter for broadband solar-blind UV photodetection[J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2020, 205: 110242.
- [20] JIA H, ZHANG R, NIU X Y, et al. Enabling broadband solar-blind UV photodetection by a rare-earth doped oxyfluoride transparent glass-ceramic[J]. *Adv Sci*, 2024, 11(12): 2309433.
- [21] PANCHANAN S, DASTGEER G, DUTTA S, et al. Cerium-based halide perovskite derivatives: A promising alternative for lead-free narrowband UV photodetection[J]. *Matter*, 2024, 7(11): 3949–3969.
- [22] JIA H, WANG Y Y, LONG Y, et al. Fabrication of Tb/Eu Co-doped borosilicate glasses for white-light LED and broadband photodetection[J]. *J Rare Earths*, 2025, 43(7): 1355–1363.
- [23] ZHENG J J, SHEN H L, LI Y F, et al. Structural and down-conversion luminescence of Ce^{3+} and Yb^{3+} doped $\text{NaY}(\text{MoO}_4)_2$ phosphor[J]. *J Mater Sci Mater Electron*, 2024, 35(18): 1251.
- [24] BAI W X, LIU Y H, WANG Y P, et al. Cooperative down-conversion and near-infrared luminescence of Tb^{3+} - Yb^{3+} co-doped CaMoO_4 broadband phosphor[J]. *Ceram Int*, 2015, 41(10): 12896–12900.
- [25] DING N, XU W, ZHOU D L, et al. Extremely efficient quantum-cutting Cr^{3+} , Ce^{3+} , Yb^{3+} tridoped perovskite quantum dots for highly enhancing the ultraviolet response of Silicon photodetectors with external quantum efficiency exceeding 70%[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105278.
- [26] DING N, WU Y J, XU W, et al. A novel approach for designing efficient broadband photodetectors expanding from deep ultraviolet to near infrared[J]. *Light Sci Appl*, 2022, 11(1): 91.
- [27] 王淑欣, 宋振, 刘泉林. $\text{Ce}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ 掺杂无机发光材料构效关系与唯象理论[J]. 发光学报, 2022, 43(9): 1319–1339.
WANG Shuxin, SONG Zhen, LIU Quanlin. *Chin J Lumin*, 2022, 43(9): 1319–1339.
- [28] WANG Y Y, ZHU Y B, LI X W, et al. Near-infrared photo-responsive Er^{3+} - K^+ co-doped Y_2O_3 phosphors with enhanced UC luminescence[J]. *Ceram Int*, 2023, 49(20): 33316–33323.
- [29] RAJ I L P, VALANARASU S, VINOTH S, et al. Highly sensitive ultraviolet photodetectors fabricated from rare earth metal ions doped NiO thin films via nebulizer spray pyrolysis method[J]. *Sens Actuat A Phys*, 2022, 333: 113242.
- [30] DIEGO-RUCABADO A, CANDELA M T, AGUADO F, et al. A comparative study on luminescence properties of Y_2O_3 : Pr^{3+}

- nanocrystals prepared by different synthesis methods[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(8): 1574.
- [31] LYU T S, DORENBOS P. Charge carrier trapping management in Bi³⁺ and lanthanides doped Li(Sc, Lu)GeO₄ for X-ray imaging, anti-counterfeiting, and force recording[J]. *Appl Phys Rev*, 2024, 11: 011415.
- [32] 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.
- [33] WEI J J, LIU M X, SHI X N, et al. A room-temperature strategy to synthesize Ce/Tb-codoped NaYF₄ nanoparticles with a photoluminescence quantum yield exceeding 50%[J]. *Inorg Chem*, 2024, 63(14): 6408–6417.
- [34] LI L P, LI P, LV X H, et al. Ultraviolet-C mechanoluminescence from NaYF₄: Pr³⁺[J]. *Appl Phys Lett*, 2024, 124(10): 101108.
- [35] WANG W X, WANG S W, GU Y, et al. Contact-separation-induced self-recoverable mechanoluminescence of CaF₂: Tb³⁺/PDMS elastomer[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 2014.
- [36] TAO K Y, YE Y M, BAI H Z, et al. Synthesis and luminescence characteristics of Tb³⁺-doped fluorophosphate glass for UV detection[J]. *J Non Cryst Solids*, 2021, 572: 121012.
- [37] ZHAO Z G, ZHANG X, NIU X Y, et al. Photoelectric properties of glass-ceramics containing KTb2F7 nanocrystals for UV detection[J]. *RSC Adv*, 2023, 13(42): 29419–29426.
- [38] JIA H, ZHANG X, FENG Z Y, et al. Y₂O₃: Eu³⁺@SiO₂ nanocomposites as a convertor for a broadband solar-blind UV photodetector[J]. *J Am Ceram Soc*, 2022, 105(8): 5252–5261.
- [39] XIE Y J, PENG B, BRAVIĆ I, et al. Highly efficient blue-emitting CsPbBr₃ perovskite nanocrystals through neodymium doping[J]. *Adv Sci*, 2020, 7(20): 2001698.
- [40] HE Z Y, ZHOU Y F, WANG Y, et al. Enhancing the ultraviolet response of silicon photodetectors using Yb³⁺-doped CsPbCl₂Br nanocrystals glass with self-crystallization inhibited by ZnO[J]. *Appl Phys Lett*, 2021, 119(14): 141905.
- [41] YANG G, ZHENG C B, ZHU Y S, et al. Efficient quantum cutting of lanthanum and ytterbium ions Co-doped perovskite quantum dots towards improving the ultraviolet response of silicon-based photodetectors[J]. *J Alloys Compd*, 2022, 921: 166097.
- [42] CRUZ M E, SEDANO M, CASTRO Y, et al. Rare-earth doped transparent oxyfluoride glass-ceramics: Processing is the key[J]. *Opt Mater Express*, 2022, 12(9): 3493.
- [43] 温婷, 姜德泉, 姜自敏, 等. 稀土氟氧化物的多形性与上转换发光研究进展[J]. *中国稀土学报*, 2020, 38(3): 278–291.
- WEN Ting, JIANG Dequan, JIANG Zimin, et al. *J Chin Soc Rare Earths*, 2020, 38(3): 278–291.
- [44] 王江, 罗林保. 基于氧化镱日盲紫外光电探测器的研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1100001.
- WANG Jiang, LUO Linbao. *Chin J Lasers*, 2021, 48(11): 1100001.
- [45] 郭道友, 李培刚, 陈政委, 等. 超宽禁带半导体 β-Ga₂O₃ 及深紫外透明电极、日盲探测器的研究进展[J]. *物理学报*, 2019, 68(7): 1–36.
- GUO Daoyou, LI Peigang, CHEN Zhengwei, et al. *Acta Phys Sin*, 2019, 68(7): 1–36.
- [46] 王丹, 王晓丹, 马海, 等. Ga₂O₃ 材料的掺杂研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(15): 306–312.
- WANG Dan, WANG Xiaodan, MA Hai, et al. *Laser Optoelectron Prog*, 2021, 58(15): 306–312.
- [47] KALRA A, MUZZAM U U, MURALIDHARAN R, et al. The road ahead for ultrawide bandgap solar-blind UV photodetectors[J]. *J Appl Phys*, 2022, 131(15): 150901.
- [48] YOU H F, WANG H P, LUO W K, et al. Al_{0.1}Ga_{0.9}N p–i–n ultraviolet avalanche photodiodes with avalanche gain over 106[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2022, 43(9): 1479–1482.
- [49] BIELECKI Z, ACHTENBERG K, KOPYTKO M, et al. Review of photodetectors characterization methods[J]. *Bull Pol Acad Sci Tech Sci*, 2022: 140534.
- [50] LI Z, CHENG Y N, XU Y, et al. High-performance β-Ga₂O₃ solar-blind Schottky barrier photodiode with record detectivity and ultrahigh gain via carrier multiplication process[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2020, 41(12): 1794–1797.
- [51] LIU B H, LI M K, FU W, et al. High-performance self-driven ultraviolet photodetector based on SnO₂ p-n homojunction[J]. *Opt Mater*, 2022, 129: 112571.
- [52] WU C Y, WANG M, LI J Y, et al. Non-ultrawide bandgap semiconductor GaSe nanobelts for sensitive deep ultraviolet light photodetector application[J]. *Small*, 2022, 18(24): 2200594.
- [53] ZHANG C, LIU K W, AI Q, et al. High-performance fully transparent Ga₂O₃ solar-blind UV photodetector with the embedded indium–tin–oxide electrodes[J]. *Mater Today Phys*, 2023, 33: 101034.
- [54] ZHANG Q Y, LI N, ZHANG T, et al. Enhanced gain and detectivity of unipolar barrier solar blind avalanche photodetector via lattice and band engineering[J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 418.
- [55] 宋宏伟, 周东磊, 白雪, 等. 稀土掺杂铅卤钙钛矿发光、光电材料与器件研究进展[J]. *发光学报*, 2023, 44(3): 387–412.
- SONG Hongwei, ZHOU Donglei, BAI Xue, et al. *Chin J Lumin*, 2023, 44(3): 387–412.
- [56] LI D Y, XU W, ZHOU D L, et al. Cerium-doped perovskite nanocrystals for extremely high-performance deep-ultraviolet photoelectric detection[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, 9(22): 2100423.
- [57] ZHOU D L, SUN R, XU W, et al. Impact of host composition, codoping, or tridoping on quantum-cutting emission of ytterbium in halide perovskite quantum dots and solar cell applications[J]. *Nano Lett*, 2019, 19(10): 6904–6913.
- [58] YANG X L, LIN J, HUANG S Y, et al. Semiconductor applications of Yb₂O₃: Constructing heterojunction solar-blind UV photodetectors with graphene[J]. *Appl Phys Lett*, 2023, 123(8): 081103.
- [59] HUANG S Y, LIN J, LIN X Y, et al. Application of graphene-combined rare-earth oxide (Sm₂O₃) in solar-blind ultraviolet photodetection[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(31): 37649–37657.
- [60] HU Q C, ZHENG W, LIN R C, et al. Oxides/graphene heterostructure for deep-ultraviolet photovoltaic photodetector[J]. *Carbon*, 2019, 147: 427–433.
- [61] CHEN Y C, LU Y J, LIN C N, et al. Self-powered diamond/β-Ga₂O₃ photodetectors for solar-blind imaging[J]. *J Mater Chem C*, 2018, 6(21): 5727–5732.
- [62] LIU Y T, JIA R X, WANG Y C, et al. Inhibition of zero drift in perovskite-based photodetector devices via [6, 6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester doping[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(18): 15638–15643.
- [63] GUO D Y, LIU H, LI P G, et al. Zero-power-consumption solar-blind photodetector based on β-Ga₂O₃/NSTO heterojunction[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(2): 1619–1628.
- [64] GUO D Y, SU Y L, SHI H Z, et al. Self-powered ultraviolet photodetector with superhigh photoresponsivity (3.05 A/W) based on the GaN/Sn: Ga₂O₃ pn junction[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(12): 12827–12835.

- [65] 侯爽, 刘庆, 邢志阳, 等. Sn 掺杂对 Ga_2O_3 基日盲紫外探测器性能的影响研究[J]. 光电工程, 2019, 46(10): 73–79.
HOU Shuang, LIU Qing, XING Zhiyang, et al. Opto Electron Eng, 2019, 46(10): 73–79.
- [66] 刘红刚, 陈健豪, 肖子凡, 等. 稀土离子掺杂微纳激光器研究进展[J]. 发光学报, 2022, 43(11): 1663–1677.
LIU Honggang, CHEN Jianhao, XIAO Zifan, et al. Chin J Lumin, 2022, 43(11): 1663–1677.
- [67] 王增将, 王孝秋, 朱剑锋, 等. 基于石墨电极的硅基金刚石日盲紫外探测器[J]. 发光学报, 2024, 45(4): 630–636.
WANG Zengjiang, WANG Xiaoqi, ZHU Jianfeng, et al. Chin J Lumin, 2024, 45(4): 630–636.
- [68] YE H T, WANG Q, HE Z Y, et al. Tb^{3+} -doped $\text{CsPbCl}_2\text{Br}_1$ nanocrystal glasses for high-performance silicon photodetectors[J]. ACS Appl Nano Mater, 2022, 5(5): 6447–6454.
- [69] LI X, LI C, GAO L H, et al. Y_2O_3 : Eu^{3+} /PMMA hybrid film as a converter for enhanced harvesting of broadband solar-blind UV light[J]. Appl Opt, 2020, 59(27): 8205–8210.
- [70] LIN Y X, MA Y J, TAO K Y, et al. Study on the luminescence properties of the Eu^{3+} and Tb^{3+} dual-doped fluorophosphate glasses for UV sensitization detection[J]. J Non Cryst Solids, 2023, 619: 122557.
- [71] 张格, 杨向飞, 王晓勇, 等. 稀土纳米晶的上转换发光调控研究进展[J]. 发光学报, 2023, 44(7): 1149–1166.
ZHANG Ge, YANG Xiangfei, WANG Xiaoyong, et al. Chin J Lumin, 2023, 44(7): 1149–1166.
- [72] HU J B, WANG X J, ZHANG L L, et al. High-performance solar-blind photodetector based on Sm-doped perovskite rare-earth nickelate heterojunctions[J]. Appl Phys Lett, 2023, 123(4): 042108.
- [73] JIN R J, LIU J S, CHEN S W, et al. Self-powered solar-blind UV photodetector based on core-shell heterojunction with Lu_2O_3 nanolayer modified $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ microwire[J]. ACS Appl Nano Mater, 2024, 7(20): 24141–24147.
- [74] WU W J. Photoelectric sensors constructed based on nanomaterials and their applications[J]. E3S Web Conf, 2024, 553: 02028.
- [75] LI J Z, LIU X, XI J W, et al. Recent development of polymer nanofibers in the field of optical sensing[J]. Polymers, 2023, 15(17): 3616.
- [76] GUO Y Y, SHAO S, GU R N, et al. Application of nanomaterials in early diagnosis of cancer[J]. Nanotechnol Rev, 2023, 12: 20230116.
- [77] LEI Z L, GUO B. 2D material-based optical biosensor: Status and prospect[J]. Adv Sci, 2022, 9(4): 2102924.
- [78] NI J, ZHANG J C, WU R S, et al. Development of an apparatus for crop-growth monitoring and diagnosis[J]. Sensors, 2018, 18(9): 3129.

作者贡献声明:

霍 帅: 设计论文框架、撰写论文
何依雯: 绘制图表、参与数据分析与论文撰写
张文林: 参与数据分析、完善论文框架
贾 红: 提出研究方向、完善论文框架、修订论文

Research Progress on Solar-Blind Light Detection Materials Based on Energy Transfer of Rare-Earth Elements

HUO Shuai^{1,2}, HE Yiwen³, ZHANG Wenlin², JIA Hong³

(1. Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 2. Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Physics and Electronic Information, Luoyang Normal University, Luoyang 471934, Henan, China)

Extended Abstract

Solar-blind ultraviolet photodetectors operating in the waveband of 200–280 nm become critical components in modern optoelectronic systems due to their near-zero background interference, strong environmental adaptability, high sensitivity, fast response speed, and strong anti-jamming capability. These advantages enable their widespread use in high-value applications such as military reconnaissance, missile tail-flame detection, early fire warning, industrial pollutant monitoring, secure optical communication, and biomedical detection. As the core functional layer of photodetectors, the intrinsic properties of photosensitive materials directly determine the overall performance of optoelectronic devices, including responsivity, external quantum efficiency, detectivity, response time, dark current, and long-term stability. However, conventional semiconductor and inorganic photoelectric materials used in solar-blind detection suffer from inherent limitations, such as narrow spectral absorption range, low photon-to-electron conversion efficiency, poor structural stability under continuous light irradiation, high dark current noise, and incompatibility with low-cost fabrication. These drawbacks severely restrict their further application in high-performance and multi-scenario solar-blind photodetection systems.

Rare-earth ion-doped optoelectronic materials have attracted recent attention as next-generation solar-blind detection media due to their unique electronic structure and excellent optical controllability. Benefiting from the shielded 4f electron configuration, rare-earth ions exhibit abundant and sharp energy levels, long fluorescence lifetime, and characteristic narrow-band emission. Through various efficient energy transfer pathways, including resonant radiative energy transfer, resonant non-radiative energy transfer, multi-phonon assisted energy transfer, and cross relaxation, rare-earth-doped materials can efficiently capture, convert, and modulate high-energy solar-blind UV photons. In particular, the down-conversion and quantum-cutting luminescence mechanisms allow one high-energy UV photon to be converted into one or more low-energy photons in the visible or near-infrared region, which can be easily detected by conventional silicon-based photodetectors. This photophysical conversion process significantly improves photon utilization efficiency, enhances optoelectronic response, and breaks through the performance bottlenecks of conventional solar-blind materials.

This review represents recent research progress on rare-earth-doped materials for high-performance solar-blind photodetection

based on energy transfer. First, the fundamental photophysical properties of rare-earth ions are introduced, including their energy level structure, electron transition characteristics, and classification of energy transfer mechanisms, with a special emphasis on the down-conversion and quantum-cutting processes that dominate efficient UV-to-visible conversion. Second, rare-earth doping systems are categorized into single-doping, co-doping, and multi-doping architectures, and the photoelectric characteristics, energy transfer paths, and performance differences among various ion combinations are discussed. In addition, four major matrix material systems, *i.e.*, oxides, fluorides, oxyfluorides, and nanocrystals, are comprehensively evaluated, focusing on their bandgap width, phonon energy, structural stability, defect regulation ability, and compatibility with rare-earth ion doping.

Furthermore, the typical structures and working principles of traditional solar-blind photodetectors are introduced, including photoconductive detectors, photovoltaic detectors, and avalanche photodiodes. On this basis, three major efficiency-enhancement mechanisms introduced by rare-earth energy transfer are revealed, *i.e.*, spectral absorption expansion and efficient photon capture, full-process carrier dynamic regulation including separation, transport and recombination, and material stability reinforcement and dark current suppression through defect passivation and interface optimization. Combined with representative device cases reported in recent years, this review further elaborates performance optimization strategies from four key dimensions, *i.e.*, photoelectric response characteristics, response time and dynamic performance, long-term structural and environmental stability, and noise suppression and detectivity improvement.

Summary and Prospects Rare-earth ion-doped materials demonstrate outstanding advantages in solar-blind photodetection due to their unique energy level structure, efficient energy transfer, and controllable luminescence properties. Remarkable progress is made in material design, energy transfer mechanism clarification, matrix modification, defect engineering, nanostructure construction, and device performance optimization. The optimized devices exhibit enhanced responsivity, widened spectral response, faster response speed, lower dark current, and improved stability, showing broad application prospects in military, civil, environmental, and biomedical fields. Nevertheless, several critical scientific and technical challenges still hinder their practical deployment. For instance, the trade-off between high energy transfer efficiency and long-term structural stability remains difficult to balance. The excessive rare-earth doping often causes concentration quenching and luminescence attenuation. A precise control over microstructures, interfaces, and defect states remains challenging, and the dynamic photophysical evolution under operating conditions requires a further in-depth verification *via in-situ* characterization techniques.

Future research directions of rare-earth-based solar-blind photodetection will focus on the development of novel composite material systems *via* integrating rare-earth dopants with two-dimensional materials, perovskites, and other emerging functional media to construct high-efficiency energy transfer channels. In the device level, developing miniaturized, integrated, and intelligent micro-/nano-solar-blind photodetectors combined with MEMS technology becomes a major trend. Meanwhile, theoretical simulations based on first-principles calculations, high-throughput material screening, and low-cost scalable fabrication processes should be strengthened to accelerate the industrial translation of laboratory achievements. This review provides a systematic and valuable reference for the rational design, performance optimization, and practical innovation of high-efficiency rare-earth-doped solar-blind photodetection materials and devices.

Keywords solar-blind photodetection; rare-earth ions; energy transfer; down-conversion