

封面文章

稀土掺杂钙钛矿超快闪烁体探测器实现亚纳秒
时间分辨与吉赫兹级重频探测能力*陆彦宇¹⁾²⁾³⁾ 陈振华^{2)†} 张增艳^{2)‡} 郭智²⁾³⁾ 邹鹰²⁾ 刘海岗²⁾³⁾
杨帆⁴⁾ 丁栋舟⁵⁾ 王勇²⁾³⁾ 邵仁忠²⁾³⁾

1) (中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

2) (中国科学院上海高等研究院, 上海同步辐射光源, 上海 201210)

3) (中国科学院大学, 北京 101408)

4) (南开大学物理科学学院, 天津 300071)

5) (中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899)

(2025 年 12 月 7 日收到; 2025 年 12 月 14 日收到修改稿)

本文成功研制了一种基于稀土掺杂铯铅氯 (CsPbCl_3) 无机闪烁晶体的新型高性能探测器. 该晶体具备亚纳秒量级的荧光上升时间、纳秒级衰减时间及通过掺杂优化的高荧光产额. 通过将其与具有亚纳秒级渡越时间的微通道板光电倍增管 (MCP-PMT) 及自研的 2.5 GHz 高速采集系统集成, 构建了一套完整的超快探测系统. 基于光学分频的等效 GHz 激光脉冲测试表明, 该系统能够清晰分辨平均峰值间隔仅 0.79 ns 的连续荧光脉冲, 成功实现了 1.26 GHz 量级的高重频探测能力, 在高速辐射探测领域展现出显著优势. 在上海光源软 X 射线自由电子激光 (SXFEL) 装置中的实地应用表明, 其 X 射线脉冲响应宽度窄至 4 ns 以下, 远优于 LYSO 对比晶体, 为超快时间分辨探测提供了可靠的技术方案.

关键词: CsPbCl_3 晶体, GHz, 时间分辨率, 光产额

DOI: 10.7498/aps.75.20251683

CSTR: 32037.14.aps.75.20251683

1 引言

闪烁体作为将高能射线 (如 X 射线、 γ 射线) 转换为可见光或紫外光的功能晶体, 是间接型辐射探测器的核心部件, 广泛应用于高能物理、核医学成像、工业无损检测及安全筛查等领域^[1]. 当前, 闪烁晶体发展的主要推动力在继续深化核科学和高能物理等传统领域应用的同时, 已显著拓展至核医学安全检测、工业制造等诸多新兴领域^[2]. 随着对闪烁晶体性能要求的不断提高, 设计、开发和

生长具有高密度、高光产额、快衰减、高稳定性、低成本等综合性能优良的闪烁晶体成为未来的研究方向^[3]. 闪烁晶体的性能直接决定了辐射探测器的关键指标. 随着同步辐射光源与 X 射线自由电子激光 (XFEL) 等大科学装置的飞速发展, 对探测器的性能提出了前所未有的超高要求: 不仅需要高的光产额和灵敏度, 还需具备高时间分辨率与高重频探测能力, 以满足超快动力学研究、逐脉冲诊断等前沿需求^[4-8].

为适应这些日益增长的需求, 闪烁体材料体系持续演进. 从早期的卤化物, 到近代广泛研究的稀

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3503900) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenzhenhua@sari.ac.cn‡ 通信作者. E-mail: zhangzy@sari.ac.cn

土掺杂 (如 Ce^{3+} , Pr^{3+}) 晶体, 研究工作始终致力于在光产额、衰减速度、稳定性等关键参数之间寻求最佳平衡^[9]. 然而, 传统闪烁体材料 (如 $\text{LYSO}:\text{Ce}$) 的发光衰减时间通常处于数十纳秒量级, 难以突破 GHz 级高重频探测的技术瓶颈. 此外, 虽灵敏度较高, 直接型 X 射线探测材料 (如卤化物钙钛矿) 普遍面临稳定性差与辐照易降解等问题; 而间接型探测方式则受限于材料灵敏度与时间分辨率之间的固有权衡关系^[10,11]. 因此, 开发兼具超快响应特性与高稳定性的新型闪烁体已成为该领域的迫切需求.

在众多新材料中, 全无机钙钛矿 CsPbCl_3 凭借其高密度、宽禁带的直接带隙半导体特性, 在超快闪烁探测领域展现出显著潜力. CsPbCl_3 晶体属于正交相钙钛矿结构, 具有较高的密度 (约 4.21 g/cm^3) 和熔点 (约 $610 \text{ }^\circ\text{C}$), 其带隙宽度约为 3.0 eV , 是一种性能优异的半导体闪烁体. 在高能辐射如 X 射线或 γ 射线激发下, CsPbCl_3 不仅表现出快速的闪烁响应, 还在辐照后出现位于约 580 nm 的新发光带, 其衰减时间约为 $12 \text{ } \mu\text{s}$, 这一现象与辐照诱导的氯空位相关色心发光有关^[12]. 近年来, 钙钛矿闪烁体的综合性能评估与机制研究取得了显著进展. 金属卤化物钙钛矿在辐射探测中的独特优势, 其通过组分与维度工程可同时实现高光产额 ($>40000 \text{ photons/MeV}$) 与快衰减 (亚纳秒至微秒量级) 的特性, 并强调了 CsPbCl_3 在快时间响应方面的突出潜力^[13,14].

通过缺陷工程对材料性能进行优化是当前国际研究热点之一. 尽管本征 CsPbCl_3 的光产额相对较低, 制约了其探测灵敏度, 但通过引入 Ce^{3+} , Eu^{3+} 等稀土离子进行掺杂, 成为打破该性能瓶颈的关键途径^[15,16]. 精准的“缺陷工程”可调控晶体发光中心与能级结构, 既能建立新的高效发光通道以提高光产额, 又能抑制非辐射复合与本征缺陷俘获, 从而在保持超快衰减特性的同时协同优化光产额性能. 因此, 掺杂是充分发挥 CsPbCl_3 超快特性、实现高灵敏度探测, 并最终满足同步辐射及 XFEL 等领域 GHz 级高重频探测需求的核心策略.

基于上述背景, 本研究成功研制了一套以 Y^{3+} 掺杂 CsPbCl_3 晶体为核心闪烁体, 结合渡越时间亚纳秒级的微通道板光电倍增管与自研 2.5 GHz 采样带宽高速采集系统的吉赫兹超快探测器. 通过使用波长 355 nm 、脉宽 10 ps 的紫外皮秒脉冲激

光, 以及基于光学四分频技术构建的等效 1.26 GHz 高重频脉冲序列 (相邻脉冲平均间隔 0.79 ns) 进行实验室系统验证, 结合在上海软 X 射线自由电子激光 (SXFEL) 装置上的实地测试, 全面评估了该探测器的时间响应性能. 结果表明, 该探测系统在脉冲激光测试中可清晰分辨 0.79 ns 间隔的连续荧光脉冲, 在 SXFEL 测试中其对单束 X 射线脉冲的响应宽度窄于 4 ns , 显著优于传统 LYSO 晶体 (响应宽度 $>24 \text{ ns}$), 成功实现了亚纳秒级时间分辨与 GHz 级重频探测能力.

2 实验方法

2.1 晶体生长与制备

为制备高质量、大尺寸的稀土掺杂 CsPbCl_3 单晶, 本研究采用真空下降法^[12], 以高纯度 CsCl (4N 级)、 PbCl_2 (4N 级) 及掺杂剂 YCl_3 (4N 级) 为原料, 按化学计量比称量, 其中 Y^{3+} 的掺杂浓度设置为 0.5% 与 5% (摩尔百分比). 原料密封于石英坩埚中, 置于真空下降炉内, 在高纯 Ar 惰性气氛保护下升温至约 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 使其完全熔化, 控制温度梯度为 $15\text{--}20 \text{ }^\circ\text{C/cm}$, 生长速率约为 2 mm/h . 晶体生长完成后, 以约 $10 \text{ }^\circ\text{C/h}$ 的速率缓慢冷却至室温, 全程历时约 120 h , 最终将所得晶锭切割、抛光, 制备成尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的光学级样品. 样品制备在南开大学完成.

2.2 时间分辨光致发光 (TR-PL) 测试

为精确表征 CsPbCl_3 晶体的超快发光动力学 (包括上升时间与衰减时间), 本研究采用时间相关单光子计数系统. 该系统的激发光源为波长 355 nm 、脉宽约 10 ps 、重复频率 1 MHz 的皮秒脉冲激光器; 探测器采用微通道板光电倍增管, 其单光子时间抖动 $\leq 15 \text{ ps}$, 系统整体时间分辨率优于 50 ps . 仪器响应函数通过将样品替换为散射体并在相同光路下测量激光脉冲的直接散射信号进行标定. 实验过程中, 激光功率调整至单光子计数率低于重复频率的 1% , 以避免脉冲堆积效应, 每个样品累计采集超过 10^4 个光子以保证统计可靠性.

2.3 其他表征手段

X 射线衍射 (XRD): 使用高精度 XRD 衍射仪 ($\text{Cu K}\alpha$ 辐射, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), 扫描范围 $5^\circ\text{--}80^\circ$, 步长 0.016° , 用于物相分析与晶体结构确认.

稳态光致发光 (PL) 光谱: 采用 Princeton Instrument (SpectraPro HRS-300) 光谱仪, 以 355 nm 连续激光为激发源, 记录发射光谱.

3 CsPbCl₃ 晶体的制备与表征

本研究以提升探测器时间分辨率为核心目标, 选取并深入研究了两种具有代表性的闪烁晶体: 一种是综合性能优异的 LYSO:Ce 晶体, 作为性能评估的基准; 另一种则是极具超快闪烁潜力的全无机钙钛矿 CsPbCl₃ 及其通过缺陷工程优化的稀土离子 (Y³⁺) 掺杂晶体.

3.1 晶体生长与制备工艺

为满足 XFEL 装置对大尺寸、高性能超快闪烁晶体的需求, 本研究采用真空下降法制备了稀土掺杂 CsPbCl₃ 晶体. 该方法在高真空或惰性保护气氛下进行, 首先将高纯原料 CsCl、PbCl₂ 及掺杂剂 (如 YCl₃) 按化学计量比密封于坩埚中, 通过精密控制的温度梯度驱动熔体定向凝固, 生长出直径为 25 mm 的高质量单晶. 通过引入 Y³⁺ 掺杂进行缺陷工程调控, 显著优化了晶体性能, 提升光产额. 实物图片如图 1(a) 插图所示. 为进一步确认晶体的结晶质量与取向, 对 CsPbCl₃ 单晶进行劳厄衍射测试, 结果见图 1(b). 劳厄斑点清晰、锐利且呈现典型的对称分布, 表明所生长晶体为高质量单晶, 结晶完整性好, 无明显的镶嵌结构或宏观缺陷. 该结果为后续光电性能测试提供了可靠的晶体结构基础.

3.2 晶体结构表征与相分析

采用配备 Cu K α 辐射源 ($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$) 的 X 射线粉末衍射仪对生长出的 CsPbCl₃ 基晶体进

行物相与结构分析. 扫描范围设定为 $2\theta = 5^\circ - 80^\circ$, 步长 0.016° . 如图 1(a) 所示, CsPbCl₃ 样品的 XRD 图谱在 $2\theta = 21.73^\circ, 43.90^\circ, 68.16^\circ$ 等处呈现出一系列尖锐的衍射峰. 所有衍射峰均能与正交相钙钛矿结构 (空间群 $Pnam$) 的标准卡片匹配, 无杂相峰出现, 且与文献 [17] 报道吻合, 证实所获晶体为纯相. 正交相 CsPbCl₃ 在其 [PbCl₆]⁴⁻ 八面体网络中存在显著的扭曲, 这种结构特性对其光电性质有重要影响.

3.3 发光物理机制探讨

CsPbCl₃ 作为一种直接带隙半导体 (室温下 $E_g \approx 3.0 \text{ eV}$), 其闪烁发光过程根植于高效的激子物理, 与传统稀土离子掺杂型闪烁体 (如 LYSO:Ce) 的“能量传递-发光中心辐射”机制有本质区别. 图 2(a) 示意了其受激发光过程. 首先, 当高能 X 射线或带电粒子入射时, 其能量通过光电效应、康普顿散射等过程被晶体吸收, 导致大量电子从价带激发到导带, 同时在价带留下空穴, 形成高密度的非平衡电子-空穴对; 其次, 这些高能载流子在极短时间内 ($<1 \text{ ps}$) 通过发射声子将多余能量耗散, 弛豫到各自能带的底部 (热化过程). 随后, 在强大的晶格库仑相互作用下, 电子和空穴迅速被束缚在一起, 形成中性激子. 由于 CsPbCl₃ 的激子结合能较大 (数十 meV), 激子在室温下能够稳定存在. 最后, 束缚激子可通过辐射复合方式衰变, 即电子从导带底跃迁至价带顶与空穴复合, 释放出一个能量接近带隙的光子. 这对应于其光致发光 (PL) 和放射发光 (RL) 光谱中位于 415 nm 附近的窄带、高强度发射峰. 这一过程直接从激发态到基态, 路径简洁, 理论上可实现皮秒量级的超快发光.

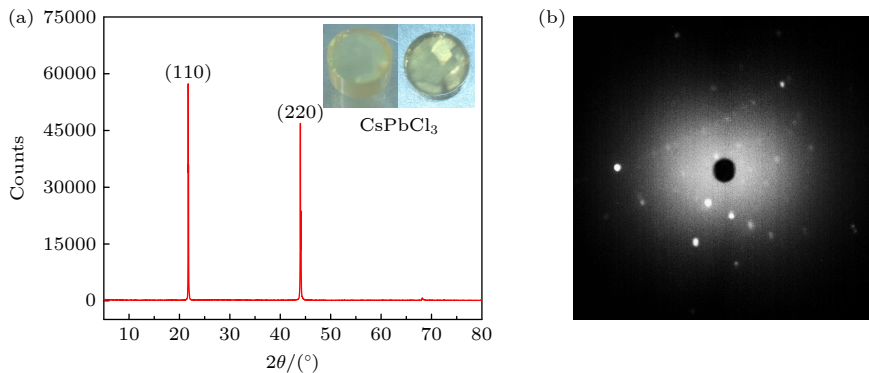


图 1 (a) CsPbCl₃ 单晶的 XRD 测试图; (b) CsPbCl₃ 单晶的劳厄衍射测试图

Fig. 1. (a) XRD pattern and (b) Laue diffraction pattern of the CsPbCl₃ single crystal.

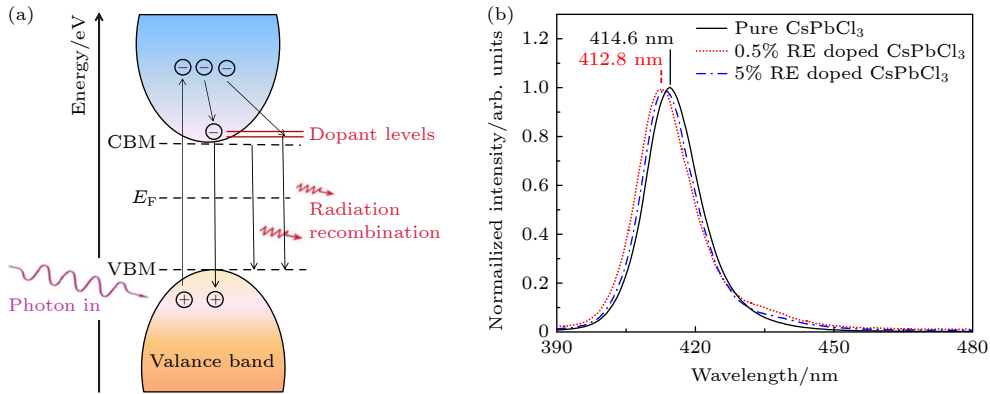


图 2 (a) CsPbCl₃ 晶体受激发光机制示意图; (b) 3 种不同掺杂 (Y³⁺: 0%, 0.5%, 5%) 的晶体的 PL 光谱测试结果图, 激发波长为 355 nm

Fig. 2. (a) Schematic diagram of the excitation-luminescence mechanism in CsPbCl₃; (b) photoluminescence (PL) spectra of CsPbCl₃ crystals with different doping concentrations (Y³⁺: 0%, 0.5%, 5%), excitation wavelength is 355 nm.

与辐射复合竞争的是非辐射复合过程, 主要通过晶体中的本征缺陷 (如卤素空位 V_{-Cl}、铅空位 V_{-Pb})、间隙原子或杂质形成的深能级陷阱发生. 载流子被这些陷阱俘获后, 能量以多声子发射 (热能) 的形式耗散, 导致发光效率 (光产额) 下降. 此外, 浅能级陷阱可能暂时俘获载流子, 延迟其辐射复合, 表现为发光衰减曲线中的慢成分.

3.4 光谱特性与掺杂效应分析

图 2(b) 展示了纯 CsPbCl₃ 及不同浓度 Y³⁺ 掺杂晶体的室温光致发光 (PL) 光谱. 所有样品在 415 nm 附近均表现出一个主导的发射峰, 这源于前述的激子辐射复合. 掺杂显著改变了光谱特征. 随着 Y³⁺ 掺杂浓度 (0.5%, 5%) 的增大, PL 发射峰峰位向短波方向发生系统性蓝移. 这一现象主要归因于两种效应. 1) 晶格收缩效应. Y³⁺ 的离子半径 (0.09 Å, 配位数 6) 小于 Pb²⁺ (1.19 Å, 配位数 6), 当 Y³⁺ 部分取代 Pb²⁺ 位点时, 会引起八面体收缩, 增强 Pb—Cl 键的共价性, 进而增大带隙宽度 (带隙展宽). 2) 量子限制效应 (次要). 在掺杂浓度较高时, Y³⁺ 的引入可能在一定程度上破坏长程有序, 产生局域的纳米尺度成分起伏, 形成类似量子点的受限环境, 从而轻微增大有效带隙.

掺杂后, 发射峰半高全宽 (FWHM) 略有变化, 可能与晶格畸变引入的能量状态分布变化有关. 更重要的是, 适量的 Y³⁺ 掺杂 (如 0.5%) 通常能显著提升 PL 强度, 这归功于 Y³⁺ 对非辐射复合中心 (如卤素空位) 的钝化作用. 然而, 过高的掺杂浓度 (如 5%) 可能引入新的缺陷或导致严重的晶格失

配, 反而可能引起浓度猝灭, 使发光效率下降.

4 CsPbCl₃ 晶体的衰减动力学

闪烁体的时间性能由其衰减动力学决定, 这直接关系到探测器的时间分辨率与最高工作重频. 其中, 发光信号的上升沿反映了载流子从被激发到发生辐射复合的初始弛豫过程, 是衡量闪烁体本征响应速度的关键参数. 为准确表征 CsPbCl₃ 晶体亚纳秒乃至皮秒量级的超快上升与衰减过程, 本研究采用了具有皮秒级时间分辨率的时间相关单光子计数技术.

4.1 上升沿的物理内涵与技术挑战

闪烁发光是一个涉及多通道、多时标的复杂动力学过程. 上升沿本质上刻画了载流子从高能激发态弛豫至可发生辐射复合的发光态所经历的全部路径, 通常包括能量传递、载流子迁移与最终辐射复合 3 个阶段 [18]. 以传统 Ce³⁺ 激活的闪烁体 (如 LYSO:Ce) 为例, 其上升过程虽常近似为单指数, 实则多级串联: 热化电子首先被晶格中的陷阱态俘获 (~10⁻¹²—10⁻⁹ s), 随后电子-空穴对向发光中心 (Ce³⁺) 扩散迁移 (~10⁻¹⁰—10⁻⁹ s), 最后发生 4f—5d 允许跃迁而发光 (~10⁻⁹—10⁻⁶ s) [19,20]. 对于 CsPbCl₃ 等直接带隙钙钛矿半导体, 其发光源于激子的直接辐射复合, 物理机制与上述过程截然不同. 然而, 晶体中本征缺陷 (如卤素空位) 或掺杂引入的浅能级陷阱仍可能俘获载流子, 改变其弛豫通道, 从而影响上升沿的形态与时长. 文献中关

于 CsPbCl₃ 上升及衰减时间的报道存在显著分散性^[19-21], 尤其对于亚纳秒尺度的快速上升沿, 测量差异主要源于传统表征手段 (如宽带示波器) 的固有局限: 其时间抖动 (通常 ≥ 50 ps) 与有限带宽 (一般 < 1 GHz) 会严重展宽快速信号, 难以解析材料的本征动力学.

4.2 动力学测试与分析

研究关注了闪烁体的上升沿时间. 业界通常将上升沿时间定义为信号强度从峰值的 10% 上升至 90% 所需的时间, 该定义直观且便于不同体系间比较. 具体分析流程如下: 首先, 通过反卷积拟合得到最佳的真实衰减动力学函数 $F(t)$; 随后, 从 $F(t)$ 曲线上数值计算出 10% 和 90% 峰值强度对应的时间点 t_{10} 和 t_{90} ; 最终, 上升沿时间 $T_{\text{rise}} = t_{90} - t_{10}$. 衰减时间则定义为发光强度从峰值衰减至其 $1/e$ (约 36.8%) 所需的时间^[21].

为确保测量精度, 实验前通过优化 355 nm 皮秒脉冲激光的功率, 将单光子计数率严格控制在激光重复频率的 1% 以下, 以消除脉冲堆积效应带来的系统性偏差. 每个样品的总收集光子数均超过 10^4 , 以保证统计可靠性. 通过精密调节光学延迟位移台 (步进 10 mm, 对应 33 ps 时间延迟), 精确校准系统的时间零点, 消除光程差引入的误差.

对于闪烁衰减过程, 其强度衰减曲线 $I(t)$ 通常可用多指数函数模型描述. 本研究采用三指数函数进行拟合:

$$I(t) = A_1 e^{-t/t_1} + A_2 e^{-t/t_2} + A_3 e^{-t/t_3},$$

其中, A_1, A_2, A_3 为各衰减分量的幅值因子, 与激发效率、量子产率等相关; t_1, t_2, t_3 为相应的衰减时间常数, 代表晶体中可能存在的多种复合路径 (如自由激子复合、浅陷阱辅助复合、深缺陷复合等).

对于上升沿的形态, 采用玻尔兹曼函数进行描述性拟合:

$$y = \frac{A_4 - A_5}{1 + e^{-\frac{t-t_0}{dx}}} + A_5,$$

t_0 为曲线中心位置 (对应最快上升点), A_4, A_5 和 dx 为拟合参数, 刻画上升过程的快慢与对称性.

我们对拟合得到的真实动力学函数 $F(t)$ 进行了计算, 从而得出了 CsPbCl₃ 单晶的 10%—90% 上升沿时间, 具体数据如表 1 所示. 经过多次测量后, 其平均值为 (0.2096 ± 0.0067) ns.

表 1 纯 CsPbCl₃, 0.5% Y³⁺ 掺杂 CsPbCl₃, 和 5% Y³⁺ 掺杂 CsPbCl₃ 的动力学拟合参数

Table 1. Dynamic fitting parameters of pure CsPbCl₃, 0.5% Y³⁺ doped CsPbCl₃, and 5% Y³⁺ doped CsPbCl₃.

	Pure CsPbCl ₃	0.5% Y ³⁺ doped CsPbCl ₃	5% Y ³⁺ doped CsPbCl ₃
A_1	1.46	2.61	3.85
A_2	3.3	6.31	2.96
A_3	2.13×10^6	3.41×10^6	1.99×10^4
t_1	0.23	0.17	0.215
t_2	1.2	1.05	0.87
t_3	5	4.8	7
A_4	9.64	80.99	63.06
A_5	6518.4	17651.96	18079.02
t_0	486.6	481.51	481.53
拟合度	0.99553	0.99487	0.99591

通过对纯 CsPbCl₃, 0.5% Y³⁺ 掺杂及 5% Y³⁺ 掺杂 3 种晶体的系统测量与拟合分析, 获得了其关键动力学参数 (详见表 1 及图 3(a)), 衰减时间的拟合度均接近 1, 表明了拟合的可信度. 纯 CsPbCl₃ 晶体的 10%—90% 上升沿时间平均值为 (209.6 ± 6.7) ps, 如图 3(b) 所示. 与性能卓越的 LYSO:Ce 晶体 (上升时间通常在百皮秒至纳秒量级) 相比, CsPbCl₃ 展现出明显更快的上升响应, 充分证实了全无机钙钛矿在超快时间性能方面的潜力.

这一超快上升过程的物理根源在于 CsPbCl₃ 的直接带隙半导体特性. 高能辐射激发产生的电子-空穴对在强大的库仑相互作用下可迅速 (皮秒量级) 形成束缚激子, 随后激子通过辐射复合直接发光. 这一“激发-激子形成-辐射复合”链条极为高效, 几乎不存在传统掺杂型闪烁体中必需的、耗时的级联能量传递过程, 因此其超快闪烁响应主要来源于本征材料特性. CsPbCl₃ 中 Pb 的 5d 电子构型导致激子结合能较低 (约 10 meV), 载流子复合以自由激子辐射为主, 具有短寿命 (< 1 ns), 这与传统闪烁体 (如 NaI:Tl 的微秒级衰减) 形成显著差异, 是实现高时间分辨率的核心机制. 此外, 辐照会诱导 Cl 空位色心, 产生源于缺陷能级的束缚激子复合, 表现为慢分量荧光, 属于非本征过程; 该过程仅在辐照后出现, 且强度随剂量增加. 未辐照的 CsPbCl₃ 以本征快发光为主, 缺陷辅助过程不会改变其“超快”的本征特性, 仅在辐射损伤后可能引入慢分量^[12]. 相关测量结果为此物理图像提供了直接实验证据. 尽管测得的上升时间可能包含激子

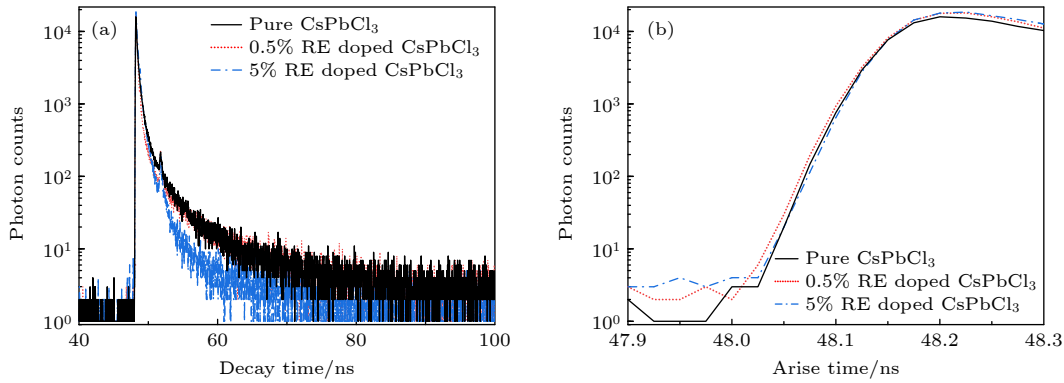


图 3 (a) 3 种不同掺杂浓度的 CsPbCl₃ 晶体的衰减动力学测试结果; (b) 3 种晶体的上升时间测试结果

Fig. 3. (a) Decay kinetics and (b) rise time of CsPbCl₃ crystals with different Y³⁺ doping concentrations (0%, 0.5%, and 5%).

从高能态热化到带边发光态的初始弛豫过程,但其总体速度仍远超传统闪烁体的复杂能量传递过程。

稀土离子掺杂对上升时间的影响并非单调变化,可能源于掺杂浓度对晶体中缺陷态密度与载流子动力学的复杂调控. 适量 Y³⁺掺杂 (如 0.5%) 可有效钝化卤素空位等非辐射复合中心,减少载流子陷阱俘获,从而优化激子形成与复合路径,缩短上升时间. 然而,当掺杂浓度过高 (如 5%) 时, Y³⁺的引入可能导致晶格畸变加剧、局域应力增强,甚至形成新的浅能级缺陷或载流子散射中心. 这些因素可能延缓激子热化或增加非辐射通道,部分抵消了缺陷钝化的正面效应,从而使得上升时间略有延长. 此外,掺杂还可能影响激子结合能与波函数重叠,进一步调节辐射复合速率. 因此,上升时间的非单调变化反映了掺杂浓度在“缺陷钝化”与“新缺陷引入”之间的权衡,以及其对载流子俘获、迁移与复合动力学的综合影响。

掺杂效应对动力学的影响尤为显著. 如表 1 及衰减拟合图 3 所示. Y³⁺的引入显著改变了晶体的衰减行为. 对于衰减过程,5% Y³⁺掺杂的晶体表现出最短的衰减时间常数和明显减弱的拖尾效应,表明适量的 Y³⁺掺杂能有效钝化非辐射复合中心,促进载流子的快速辐射复合. 然而,对于上升沿时间,不同掺杂浓度的影响相对复杂. 实验测得 0.5% Y³⁺掺杂晶体的上升沿约为 50 ps,5% 掺杂约为 75 ps,均优于纯晶体 (125 ps),但并非单调变化. 这可能源于掺杂对晶体场、缺陷态密度以及激子形成动力学的综合影响: 适量掺杂优化了载流子弛豫路径,而过高掺杂可能引入新的散射或局域化中心. 综上所述,TCSPC 测量揭示了 CsPbCl₃ 晶体亚纳秒级的超快上升沿特性,其物理本质源于激子

的直接辐射复合机制. Y³⁺掺杂能有效调控衰减动力学,优化闪烁性能. 本研究观测到的亚纳秒级上升时间 (~209.6 ps) 与纳秒级衰减时间 ($t_1, t_2 < 1.2$ ns) 表明, CsPbCl₃ 晶体的超快响应主要源于其直接带隙半导体特性所主导的本征激子辐射复合. 与传统稀土掺杂闪烁体 (如 LYSO:Ce) 依赖于稀土离子 5d—4f 能级跃迁的发光机制 (通常为数十纳秒) 不同, CsPbCl₃ 中高能激发产生的电子-空穴对可迅速形成束缚激子并直接复合发光,该过程理论上可达皮秒量级,是材料实现 <0.5 ns 超快寿命的物理本质. 尽管晶体中存在的本征缺陷 (如卤素空位) 或掺杂引入的浅陷阱可能通过暂时俘获载流子,贡献衰减曲线中的慢分量 (如 $t_3 \approx 5-7$ ns),但适量 Y³⁺掺杂可有效钝化非辐射中心,在提升光产额的同时保持以激子直接复合为主体的超快特性,而非依赖缺陷辅助过程。

5 超快探测器的组成与亚纳秒分辨

为严格验证探测器是否具备亚纳秒级时间分辨率及实现吉赫兹 (GHz) 以上高重复探测能力,本研究设计并实施了基于光学分频技术的系统性测试. 该测试旨在模拟探测器在应对极高重复频率、极短间隔脉冲序列时的响应特性,这是评估其在同步辐射光源及 X 射线自由电子激光 (XFEL) 等超快科学装置中适用性的关键依据。

测试系统通过构建等效超过 1 GHz 的脉冲激发环境来实现上述目标. 以重复频率 1 MHz 的脉冲激光器 (波长 355 nm, 脉宽 10 ps) 作为初始光源,并搭建了一套精密的四分光延时系统 (光路设计参见补充材料图 S1 (online)). 该系统利用分光

镜与反射镜组合,将单束激光分为四路,通过精确调节各光路的光程长度,使四束光在时间上依次延迟,最终在待测晶体表面的同一微小区域形成4个紧密相邻的激发脉冲.通过将相邻脉冲的时间间隔控制在1 ns以内,成功将激发频率从1 MHz等效提升至1 GHz以上.整个光路与样品均置于暗室中,以最大限度地降低背景噪声干扰.

探测器核心由微通道板光电倍增管(FT-18MCP-PMT)及配套的45°荧光收集反射镜组成(结构示意图见补充材料图S2(online)).该MCP-PMT采用18 mm直径的光电阴极,具有优良的时间特性:其上升时间约为130 ps,脉冲半高宽小于250 ps,在单光子激发下的时间抖动(TTS)为15 ps(标准差),系统整体时间分辨率均方根(RMS)优于50 ps^[22].MCP-PMT工作于-1.8—-2.2 kV电压,其输出的高速电信号由自研的GHz带宽电子学系统进行采集与处理.

本文自研高速电子学系统(其模块组成示意图见补充材料图S3(online))的核心性能经过专门设计与标定,以确保对亚纳秒级荧光脉冲的完整、低噪声采集.自研电子学系统的GHz分辨能力测试如图4所示.系统模拟前端具备2.5 GHz的-3 dB带宽,足以覆盖探测器输出的快速瞬态信号主要频谱成分,避免信号高频分量的失真.模数转换器(ADC)的采样率为2.5 GS/s,配合短时窗触发与实时基线恢复算法,有效抑制了低频噪声漂移对脉冲幅度和定时提取的影响.实测系统在典型工作条件下的等效输入噪声电平低于2 mV RMS(在50 Ω输入阻抗下),确保了在高增益下对微弱荧光信号的信噪比(SNR > 10).此外,系统通道间的采样偏

差经校准后小于10 ps,为多脉冲时间间隔的精确测量提供了硬件基础.这些性能指标的综合保障,使得电子学系统本身的时间展宽和噪声引入远小于探测器整体响应时间(约250 ps),从而确保了实验平台在GHz重频探测中的可靠性与数据准确性.

在MCP-PMT施加-2150 V工作电压的条件下,355 nm四分频脉冲序列激发CsPbCl₃晶体.为排除激发光干扰,我们在晶体输出端放置了滤光片,仅允许约420 nm的特征荧光通过.355 nm激光器辐照的脉冲间隔为1100—1300 ns,如图5(a),采集到的典型时域信号如图5(b)所示,波形中清晰呈现出4个可区分的信号峰.经精确测量,第1个与第4个脉冲峰值的时间戳分别为818.95 ns和821.33 ns,计算得出平均脉冲间隔约为0.79 ns,对应等效脉冲分辨能力达1.26 GHz.这一结果直接证实了该探测器系统具备优异的亚纳秒时间分辨与GHz级脉冲序列分辨能力.

为凸显CsPbCl₃晶体在超快响应方面的优势,在完全相同的测试条件下对传统快闪烁晶体LYSO:Ce进行对比实验.为定量评估系统对极高重频脉冲的分辨极限,实验中对四分频光脉冲的关键参数进行精确控制与标定.原始脉冲激光器(波长355 nm,脉宽≈10 ps)的重复频率为1 MHz,对应脉冲间隔1000 ns.通过精密调节四分频光路中各支路的光程差,使四路脉冲在时间上依次延迟,形成时间间隔均匀分布的脉冲序列.在本实验中,设置的时间延迟分别为0, 0.75, 1.5, 2.25 ns(以第1路为参考),因此相邻脉冲的平均间隔为0.75 ns,对应等效重复频率约为1.33 GHz.各分束脉冲的峰值功率经衰减片调节后约为原始脉冲的

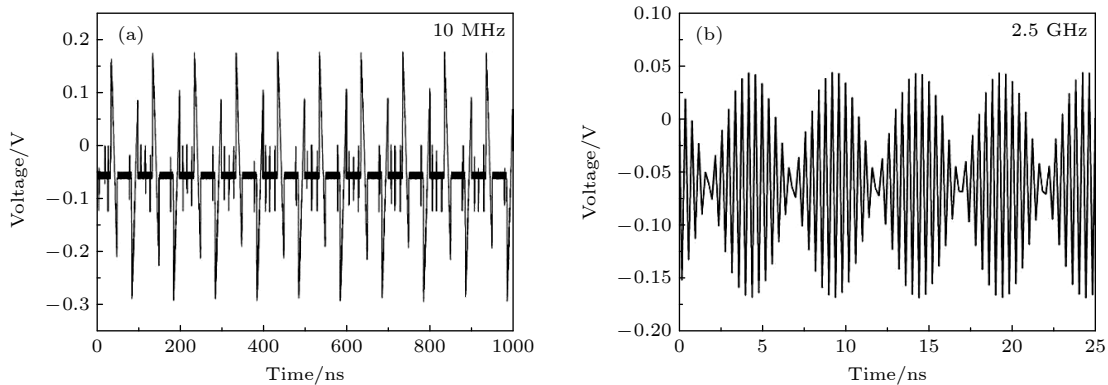


图4 自研电子学系统的GHz分辨能力测试 (a)对10 MHz输入脉冲的响应;(b)对2.5 GHz输入脉冲的响应

Fig. 4. Test of the GHz-resolution capability of the custom-built electronics system: (a) Response to a 10 MHz input pulse; (b) response to a 2.5 GHz input pulse.

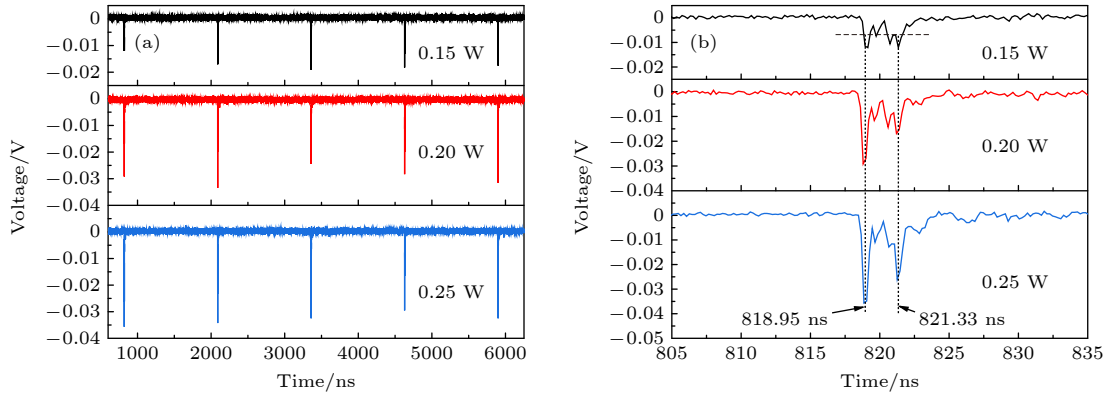


图 5 (a) 在 1 MHz, 355 nm 脉冲激光作用下, 不同脉冲强度对应的信号采集图; (b) 四分频荧光响应信号示意图

Fig. 5. (a) Signal acquisition results under 1 MHz, 355 nm pulsed laser irradiation at different pulse intensities; (b) schematic diagram of the frequency-divided fluorescence response signal.

1/4, 且通过功率稳定器确保脉冲间能量波动低于 2%, 从而在激发晶体时保持信号的一致性。

实验中采用的脉冲能量密度经过优化, 以避免晶体响应饱和并确保荧光信号处于线性响应区间。典型条件下, 每个分束脉冲在晶体表面的能量密度约为 $10 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, 对应光子通量每个脉冲约 $2 \times 10^{13} \text{ photons}/\text{cm}^2$ 。通过监测无样品时散射信号的时序分布, 确认各脉冲的半高宽 (FWHM) 保持约 10 ps, 且脉冲间串扰低于 -30 dB, 从而保证激发源本身不引入额外的时间展宽。该参数设置为后续评估探测器在 GHz 重频下的时间分辨能力提供了可控且可重复的激发条件。结果显示, LYSO 探测器完全无法分辨间隔约 0.75 ns 的 4 个脉冲, 其输出信号融合为一个半高全宽达 16.5 ns 的宽脉冲 (参见补充材料图 S4(a), (b) (online))。这一鲜明对比源于两者截然不同的衰减动力学: CsPbCl₃ 基于激子直接辐射复合的机制赋予其纳秒甚至亚纳秒量级的超快衰减, 而 LYSO:Ce 数十纳秒量级的衰减时间导致在高重频脉冲下产生严重的信号堆积, 难以实现 GHz 分辨能力。

综上所述, 通过构建基于光学四分频的 GHz 测试平台并结合高速采集电子学, 本研究成功验证了所研制的 CsPbCl₃ 基超快探测器具备亚纳秒级时间分辨率与 1.26 GHz 的脉冲序列分辨能力。与传统 LYSO 闪烁体的对比, 充分证明了该探测器在超快时间响应方面的显著优势。需要指出的是, 钙钛矿材料中可能存在的离子迁移现象 (尤其是卤素空位在高重频激发下的移动) 在长期、极高重频 (如连续 GHz 模式) 工作时, 可能引发局部极化或缺陷积累, 进而潜在引入慢发光分量或导致基线漂移, 影响时间分辨率与信号完整性。本研究在等效

1.26 GHz 脉冲序列的短时测试中未观察到显著信号退化, 表明在瞬时高重频激发下, 离子迁移效应不明显。然而, 在未来应用于更高平均功率或连续高频的极端场景时, 需通过材料封装、界面钝化或元素替换等方式进一步抑制离子迁移, 保障探测器长期工作的稳定性。

6 XFEL 单脉冲应用验证

随着 X 射线自由电子激光 (XFEL) 向着更高亮度与更高重复频率的方向发展, 束线元件所面临的热负荷与误照射风险急剧增大。传统的、主要针对“粒子束”损失的监测与机器保护策略已难以满足光子束线, 特别是高强度 XFEL 束线的安全防护需求。为此, 发展基于超快闪烁体的“光子束损失监测器 (photon beam loss monitor, PBLM)”成为一种至关重要的技术路径^[23]。PBLM 的核心原理是在名义光路周围的关键位置放置闪烁转换屏 (如 YAG:Ce 或 CVD 金刚石), 当误入的强 X 射线脉冲照射到转换屏时, 会被转换为可见光荧光信号。该信号由高速光电探测器 (如光电倍增管 PMT) 拾取, 并直接联入机器保护系统 (machine protection system, MPS)。得益于闪烁体的超快响应, 系统能在单个误照射脉冲期间内迅速识别异常并触发连锁切断, 从而实现束线设备的在线、快速、可编程保护。这为 XFEL 等高重频大科学装置提供了一条可复制、高可靠性的新型设备保护方案, 能显著降低因误照射导致的束线损伤与计划外停机风险。

为验证本研究研制的 CsPbCl₃ 基超快探测器在此类前沿应用中的实际潜力, 我们将其集成于上

海软 X 射线自由电子激光 (SXFEL) 装置的束团切割与诊断单元中进行实地测试, 并与常规商用 LYSO 闪烁体进行直接对比. 测试中, 利用该装置的束流偏转器, 将连续的电子束精确切割为一系列具有明确纳秒级间隔的独立束团, 以此模拟高重频脉冲序列及潜在的“丢束”场景. 探测器的核心是尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的 0.5% Y^{3+} 掺杂 CsPbCl_3 晶体及作为对比的同等尺寸 LYSO 晶体. 两者在完全相同的条件下接受能量为 600 eV 的 XFEL 脉冲激发. 整个测试系统 (装置原理及实物参见补充材料图 S5 (online)) 在室温 (24 °C) 环境下运行, 包含了超快探测器本体、高速 MCP-PMT、自研 GHz 电子学采集系统以及安全联锁接口, 构成了一个完整的原型 PBLM 验证平台.

实验结果 (如补充材料图 S6 所示 (online)) 清晰地揭示了两种材料在时间响应性能上的本质差异. LYSO 晶体受激后产生的荧光脉冲衰减缓慢, 信号脉冲的全宽半高 (FWHM) 超过 24 ns, 且衰减尾部拖曳严重. 这种较慢的响应特性, 在应对 MHz 乃至 GHz 重频的 XFEL 脉冲时, 会导致连续脉冲信号的严重堆积, 不仅会降低信号幅度测量的准确性, 更会极大地延缓异常信号的识别与判断时间, 从而压缩安全系统做出保护动作的宝贵时间窗口. 相比之下, CsPbCl_3 晶体展现出了卓越的超快响应特性. 其受激荧光脉冲迅速上升并衰减, 脉冲宽度显著收窄至 4 ns 以内, 且信号基线在脉冲后能够快速恢复至本底水平, 几乎没有观察到明显的拖尾效应. 这一结果与第 4 节的 GHz 激光测试结论高度一致, 直接证明了 CsPbCl_3 晶体具备应对 XFEL 极端时间结构的能力.

基于 CsPbCl_3 晶体的超快时间分辨率, 其构成的 PBLM 系统能够实现近乎“实时”的丢束诊断. 当发生误照射时, 系统可在纳秒量级内生成并传递一个清晰的故障标志信号. 相比于使用 LYSO 等传统闪烁体的方案, 这将为下游的 MPS 联锁电路提供数倍乃至数十倍更长的决策与执行时间余量. 这段额外的时间冗余对于确保复杂保护逻辑的可靠执行、避免误触发, 以及最终保障价值数亿装置的核心部件安全具有不可估量的工程价值. 本次在线测试 (现场调试场景见补充材料图 S5 (online)) 成功验证了该超快探测器在真实 XFEL 环境中的稳定工作能力与性能优势.

综上所述, 将 CsPbCl_3 超快闪烁体应用于 XFEL 光子束损失监测, 不仅是对其基础性能

的验证, 更是解决下一代光源关键安全需求的有效方案. 本研究证实了该探测器能够将丢束诊断的响应时间缩短至纳秒级, 极大地提升了机器保护系统的响应速度和可靠性, 为未来更高重频、更高功率的 XFEL 及同步辐射装置的安全运行提供了创新的技术手段和坚实的器件基础.

7 总结

本研究成功研制并系统验证了一套基于稀土离子掺杂 CsPbCl_3 钙钛矿单晶的超快闪烁体探测器. 该探测器通过集成具有亚纳秒级渡越时间的微通道板光电倍增管 (MCP-PMT) 与自研的 2.5 GHz 采样率高速电子学系统, 构建了完整的 GHz 级探测器件. 关键材料的表征证实了晶体优异的超快发光特性, 其荧光上升时间达亚纳秒量级 (纯晶体平均 209.6 ps). 为定量评估其极限性能, 本研究创新性地构建了基于光学四分频原理的测试平台, 成功将 1 MHz 激光脉冲转化为等效频率超过 1 GHz 的紧密脉冲序列. 测试结果表明, 该系统能够清晰分辨平均间隔仅 0.79 ns (对应 1.26 GHz) 的连续荧光脉冲, 实现了亚纳秒时间分辨率与 GHz 重频探测能力, 其性能显著优于传统 LYSO 闪烁体. 进一步地, 在上海软 X 射线自由电子激光 (SXFEL) 装置中的实地应用表明, 该探测器作为光子束损失监测器 (PBLM) 的核心部件, 对 XFEL 脉冲的响应宽度窄至 4 ns 以下, 且基线恢复迅速, 为下一代大科学装置实现纳秒级在线束线安全保护提供了可靠的技术方案. 本研究从材料制备、系统集成到最终应用, 完整地验证了 CsPbCl_3 基探测器解决超快辐射探测核心挑战的潜力, 为相关领域的发展提供了新的器件基础与技术路径.

作者感谢上海硅酸盐研究所丁栋舟研究员和南开大学的杨帆教授的样品制备和讨论. 同时感谢上海光源 BL20U2 线站的瞬态稳态 XEOL 研究平台所提供的测试支持, 以及上海光源辅助实验室的 XRD 表征支持.

参考文献

- [1] Chen Q S, Wu J, Ou X Y, et al. 2018 *Nature* **561** 88
- [2] Ren G H 2019 *J. Synth. Cryst.* **48** 1373 (in Chinese) [任国浩 2019 人工晶体学报 **48** 1373]
- [3] Yao Q, Li J M, Li X S, Ma Y S, Song H H, Li Z Y, Wang Z G, Tao X T 2023 *Adv. Mater.* **35** e2304938
- [4] Wang Q, Wang C E, Shi H L, et al. 2024 *Light Sci. Appl.* **13** 190

- [5] Mi Z H, Bian H Y, Yang C Y, Dou Y X, Bettiol A A, Liu X G 2024 *Nat. Mater.* **23** 803
- [6] Pandey S, Bean R, Sato T, et al. 2020 *Nat. Methods* **17** 73
- [7] Liang M L, Gang K, Li L, Liu K, Yan D, Wang S S, Liu S, Liu X M, Zhao Q, Zheng K B 2025 *Angew. Chem. Int. Ed.* **64** e202512471
- [8] Wang D X, Zhang R, Yu D K, Na H, Yao Z H, Wu L H, Zhang S, Liang T R, Huang M R, Wang Z L, Bai Y, Huang Y S, Yang X, Zhang J W, Liu M D, Ma Q, Yu J, Ji X Y, Yu Y, Shao X P 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 059201 (in Chinese) [王德鑫, 张蕊, 尉德康, 那蕙, 姚张浩, 吴凌赫, 张苏雅拉吐, 梁泰然, 黄美容, 王志龙, 白宇, 黄永顺, 杨雪, 张嘉文, 刘梦迪, 马蔷, 于静, 纪秀艳, 于伊丽琦, 邵学鹏 2025 物理学报 **74** 059201]
- [9] Zhang Y Y, Zhao T Y, Chen G Y 2024 *J. Rare Earths* **42** 237
- [10] Wu X L, Li A F, Yang M M, Hao X, Wu L L, Su R, Zhang J Q 2024 *J. Mater. Chem. C* **12** 8647
- [11] Ma W B, Kuang C F, Liu X, Yang Y 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 1704002 (in Chinese) [马文博, 匡翠方, 刘旭, 杨旸 2022 光学学报 **42** 1704002]
- [12] Yan X L, Peng C, He W M, Duan W H, Lu Y, Zhang K, Jia Y Z, Wang R C, Yang W H, Liu S G, Han H T, Song Z H, Yang F 2025 *J. Lumin.* **281** 121162
- [13] Yi L Y, Hou B, Zhao H, Tan H Q, Liu X G 2023 *Nat. Photon.* **17** 494
- [14] Yang Z, Yao J S, Xu L M, Fan W X, Song J Z 2024 *Nat. Commun.* **15** 8870
- [15] Hu M Z, Wang F C, Yang B B, Zhang C Y, Kong J F, Li L, Chen J, Sun Y 2025 *Physica B* **718** 417922
- [16] Li D Y, Xu W, Zhou D L, et al. 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2100423
- [17] Yu H Q, Gao X, Huang C C, et al. 2023 *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **34** 1582
- [18] Li Z H, He J X, Lv X H, et al. 2022 *Nat. Commun.* **13** 6346
- [19] Jensen M L, Nyemann J S, Muren L P, Julsgaard B, Balling P, Turtos R M 2022 *Sci. Rep.* **12** 8301
- [20] Guan W M, Wang P G, Zheng L, Zhou Y, Gu P 2021 *J. Synth. Cryst.* **50** 1858 (in Chinese) [官伟明, 王鹏刚, 郑丽, 周燕, 顾鹏 2021 人工晶体学报 **50** 1858]
- [21] Mykhaylyk V B, Rudko M, Kraus H, Kapustianyk V, Kolomiets V, Vitoratou N, Chornodolskyy Y, Voloshinovskii A S, Vasylechko L 2023 *J. Mater. Chem. C* **11** 656
- [22] Orlov D A, Glazenberg R, Ortega R, Kernen E 2019 *CEAS Space J.* **11** 405
- [23] Guo J J, Decking W, Guetg M, Liu S, Potter A, Qin W L, Zagorodnov I, Gu Q 2022 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1034** 166780

COVER ARTICLE

Sub-nanometer time resolution and gigahertz-level repetition frequency detection capability achieved by rare-earth-doped perovskite ultrafast scintillation detectors^{*}

LU Yanyu¹⁾²⁾³⁾ CHEN Zhenhua^{2)†} ZHANG Zengyan^{2)‡} GUO Zhi²⁾³⁾
 ZOU Ying²⁾ LIU Haigang²⁾³⁾ YANG Fan⁴⁾ DING Dongzhou⁵⁾
 WANG Yong²⁾³⁾ TAI Renzhong²⁾³⁾

1) (*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China*)

4) (*School of Physical Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

5) (*Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China*)

(Received 7 December 2025; revised manuscript received 14 December 2025)

Abstract

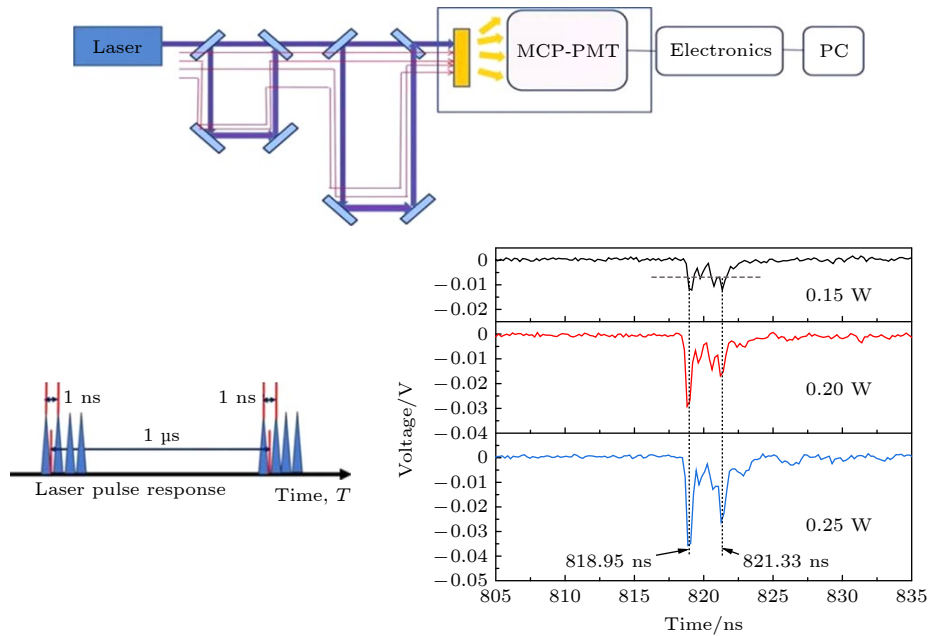
This study successfully develops a novel high-performance detector using rare-earth-doped cesium lead chloride (CsPbCl₃) inorganic scintillation crystals, targeting the critical requirement for GHz-rate capabilities in

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFB3503900).

[†] Corresponding author. E-mail: chenzhenhua@sari.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zhangzy@sari.ac.cn

ultrafast radiation detection at advanced light sources. The Y^{3+} -doped $CsPbCl_3$ crystals, grown by the vertical Bridgman method, exhibit sub-nanosecond fluorescence rise times, with the measured average rise time from 10% to 90% of pure crystal being ~ 209.6 ps and that of optimized doped crystals achieving ~ 50 – 75 ps. The crystals also exhibits nanosecond-scale decay times and enhanced light yield, achieved through defect engineering. By integrating this core scintillator with a microchannel plate photomultiplier tube (MCP-PMT) that features sub-nanosecond transit time and a self-developed 2.5 GHz high-speed acquisition system, a complete ultrafast detection system is constructed. Rigorous testing with the use of an optically generated equivalent GHz pulse train demonstrates that the system can clearly resolve consecutive fluorescence pulses with an average peak interval of only 0.79 ns, successfully achieving a high-repetition-rate detection capability of 1.26 GHz. The field application at the Shanghai soft X-ray free-electron laser (SXFEL) facility demonstrates that its X-ray pulse response width is narrower than 4 ns, far superior to the >24 ns response of a reference $LYSO:Ce$ crystal. These results validate the detector's exceptional sub-nanosecond time resolution and GHz-rate pulse discrimination, providing a reliable technical solution for ultrafast time-resolved diagnostics and photon beam loss monitoring in next-generation scientific facilities. The following figure shows a novel rare-earth-doped $CsPbCl_3$ perovskite ultrafast scintillator detector and its achieving sub-nanosecond time resolution and GHz-rate pulse discrimination (1.26 GHz).



Keywords: $CsPbCl_3$ crystal, GHz, time resolution, light yield

DOI: [10.7498/aps.75.20251683](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251683)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251683](https://cstr.net.cn/32037.14.aps.75.20251683)

稀土掺杂钙钛矿超快闪烁体探测器实现亚纳秒时间分辨与吉赫兹级重频探测能力

陆彦宇 陈振华 张增艳 郭智 邹鹰 刘海岗 杨帆 丁栋舟 王勇 邵仁忠

Sub-nanometer time resolution and gigahertz-level repetition frequency detection capability achieved by rare-earth-doped perovskite ultrafast scintillation detectors

LU Yanyu CHEN Zhenhua ZHANG Zengyan GUO Zhi ZOU Ying LIU Haigang YANG Fan DING Dongzhou WANG Yong TAI Renzhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 050803 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251683

CSTR: 32037.14.aps.75.20251683

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251683>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光电倍增管时间测量误差补偿方法研究

Method of compensating for time measurement error of photomultiplier tube

物理学报. 2022, 71(22): 222901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221193>

基于各向异性及后加速技术的百飞秒时间分辨条纹管设计

100-fs time-resolved streak tube design based on anisotropy and post-acceleration technology

物理学报. 2023, 72(24): 248502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231382>

基于太赫兹脉冲加速及扫描电子束的高时间分辨探测器

High time-resolution detector based on THz pulse accelerating and scanning electron beam

物理学报. 2022, 71(2): 028501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210871>

基于小波变换的多频静电力显微镜动态过程测量方法

Wavelet transform based method of measuring multi-frequency electrostatic force microscopy dynamic process

物理学报. 2022, 71(9): 096801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212095>

波长编码的单次高时空分辨全光学探针

Wavelength encoded single-shot high-spatiotemporal resolution all-optical probe

物理学报. 2023, 72(22): 220602 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230727>

纳米成核点辅助结晶对钙钛矿光电探测器性能的影响

Effect of nano-nucleation sites assisted crystallization on performance of perovskite photodetector

物理学报. 2022, 71(17): 178102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220189>