

文章编号: 1000-7032(2025)07-1221-11

零维杂化锑基金属卤化物材料在 X 射线探测领域的研究进展

余佳福, 范英豪, 李心怡, 王洪权, 高玉婷*

(中国地质大学(武汉)材料与化学学院, 纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: X 射线探测与成像技术的高灵敏度、低剂量化发展亟需开发兼具高效发光性能和环境友好性的新型闪烁体材料。零维杂化锑基金属卤化物凭借其独特的 $5s^2$ 电子构型与自陷激子(STEs)辐射机制, 展现出高光致发光量子产率(PLQY)、大斯托克斯位移及优异的结构可调性, 成为极具潜力的无铅闪烁体候选体系。本文系统综述了零维杂化锑基金属卤化物的发光机理、设计策略及其在 X 射线探测与成像中的研究进展。研究表明, 该类材料在 X 射线激发下表现出优异的光产额和低检测限, 同时在 X 射线成像应用中实现了高空间分辨率的成像效果。最后, 我们指出了零维杂化锑基金属卤化物目前面临的主要挑战, 并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 零维杂化锑基金属卤化物; X 射线探测与成像; 闪烁体; 研究现状

中图分类号: O482.31 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250108 CSTR: 32170.14.CJL.20250108

Recent Progress of Zero-dimensional Hybrid Antimony-based Metal Halide Materials in X-ray Detection

YU Jiafu, FAN Yinghao, LI Xinyi, WANG Hongquan, GAO Yuting*

(Engineering Research Centre for Nano Mineral Materials and Applications, Ministry of Education, School of Materials and Chemistry, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

* Corresponding Author, E-mail: gaoyt@cug.edu.cn

Abstract: The development of new scintillator materials with both high luminescence performance and environmental friendliness is urgently needed for the high-sensitivity and low-dose development of X-ray detection and imaging technologies. Zero-dimensional antimony-based metal halides exhibit high photoluminescence quantum yield (PLQY), large Stokes shifts, and excellent structural tunability by virtue of their unique $5s^2$ electronic configurations and self-trapped excitons (STEs) radiation mechanisms, which make them promising candidates for lead-free scintillators. In this paper, we systematically review the luminescence mechanism and design strategy of zero-dimensional antimony-based hybrid metal halides and their research progress in X-ray detection and imaging. It is shown that such materials exhibit excellent light yield and low detection limit under X-ray excitation, while high spatial resolution imaging is achieved in X-ray imaging applications. Finally, we point out the main challenges currently faced by zero-dimensional hybridised antimony-based metal halides and provide an outlook on their future directions.

Key words: zero-dimensional hybrid antimony-based metal halides; X-ray detection and imaging; scintillators; current status of research

收稿日期: 2025-04-03; 修订日期: 2025-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(22175156)

Supported by National Natural Science Foundation of China (22175156)

1 引 言

X 射线是一种波长范围为 0.01~10 nm 的电磁波,因其具有强大的穿透能力而被广泛运用于医疗诊断^[1]、高能物理、无损检测^[2-3]及安全监控^[4]等领域。作为辐射-光转换的核心材料,闪烁体通过电离激发效应将高能 X 射线光子转换为低能紫外-可见-近红外(UV-Vis-NIR)光子^[5-8]。基于闪烁体的 X 射线探测方法由于其响应速度快、制造简单、适用性广泛和成本低廉而受到广泛关注和应用^[9]。

辐射探测闪烁体的研发可以追溯到 19 世纪末,早期以钨酸钙(CaWO_4)和硫化锌(ZnS)等多晶粉末体系为代表,这些材料能够有效地将 X 射线转化为可见光^[10-11]。几十年来,闪烁体领域取得了重大进展。典型无机闪烁体如 CsI:Tl 、 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)以及 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ ($\text{LuAG}:\text{Ce}$)等,因其优异的光输出特性和高原子序数带来的强 X 射线吸收能力,已在工业检测领域实现规模化应用,而蒽、芪等有机晶体则凭借快速响应特性拓展了时间分辨测量的应用场景^[12-18]。然而,现有材料体系仍面临核心挑战:无机闪烁体受限于苛刻的制备条件和本征脆性,难以实现柔性器件集成;有机体系则因分子排列各向异性和辐射发光效率不足,限制了其性能提升空间^[19-22]。随着 X 射线成像技术向高分辨率和低剂量方向快速发展,开发兼具可溶液加工性、高探测效率和低余辉特性的新型闪烁体已成为亟待解决的关键科学问题。

近年来,有机-无机杂化金属卤化物凭借其生产工艺简单、可调节性强、光物理性能优异、稳定性良好等优点,已成为极具应用潜力的 X 射线探测闪烁材料。其中,铅基卤化物是最具代表性的杂化金属卤化物,其闪烁性能和成像性能可以与传统的商用闪烁体相媲美^[23]。然而,铅基卤化物因铅元素的毒性问题、显著的自吸收效应、室温光产额较低,以及稳定性欠佳等因素,严重阻碍了其在实际应用中的发展。因此,开发环保、高效且成本低廉的非铅金属卤化物闪烁体已成为当前 X 射线探测技术领域的一个关键研究课题。

近年来,得益于杂化金属卤化物在结构多样性和可调控性方面的独特优势,基于 Mn^{2+} 、 Cu^+ 、 Sb^{3+} 等无铅杂化金属卤化物的研究相继涌现^[24-25]。其中,具有 ns^2 电子构型的铋基卤化物因其优异的光物理特性而受到广泛关注。研究表明, Sb^{3+} 的

$5s^2$ 孤对电子不仅诱导形成独特的零维限域结构,还能显著增强体系的电子-声子耦合效应,从而促进自陷激子(STEs)的高效产生。这导致其不仅具有超宽带发射、高光致发光量子产率(PLQY)、长载流子寿命,还通过增大斯托克斯位移,有效抑制了自吸收现象,进而降低了自吸收效应^[26-29]。基于这些优势,有机-无机杂化铋基金属卤化物被认为是极具发展前景的新型闪烁体材料,并在辐射探测和成像等领域展现出广阔的应用前景。

本文首先详细阐述了零维铋基杂化金属卤化物的闪烁机理,而后详细介绍了零维铋基闪烁体的设计策略,此外,针对 X 射线探测和成像应用,综述了近年来铋基杂化金属卤化物的研究进展,最后讨论了铋基杂化金属卤化物在 X 射线成像中的机遇与挑战,并展望未来可能的发展方向。

2 探测原理

一般闪烁体的发光机制可解构为三个物理阶段:能量转换、载流子输运和辐射复合(图 1(a))。在初始能量转换阶段,入射 X 射线通过光电效应和康普顿散射与晶格原子相互作用,产生大量热电子和深空穴。这些初始载流子通过库仑散射引发次级电子倍增效应,直至其动能降至晶格电离阈值以下。随后进入载流子输运阶段,高能载流子通过电子-声子耦合作用进行能量弛豫,在该过程中部分载流子被缺陷态(如离子空位、晶界等)捕获,导致非辐射复合损失。最终,未被猝灭的载流子在发光中心发生辐射复合,产生紫外-可见-近红外波段的特征光子发射,这些光子经光电探测器转化为电信号完成检测和成像。值得注意的是,上述闪烁过程机理主要适用于无机闪烁体,而有机闪烁体或非晶态材料的发光过程往往涉及更复杂的激子行为和分子轨道跃迁^[23,30]。不同金属配合物(Mn^{2+} 、 Sb^{3+} 、 Sn^{2+} 、 Eu^{3+} 等)表现出多样的发光机制,如 Sb^{3+} 基配合物的 $5s^2$ 孤对电子驱动的 STEs 发射、 Mn^{2+} 基配合物的 d-d 跃迁等。

基于 $5s^2$ 电子构型的 Sb^{3+} 在低维金属卤化物中表现出独特的发光特性,这一现象源于 $5s^2$ 孤对电子的立体化学活性及其诱导的 STEs 辐射复合过程^[31]。 Sb^{3+} 的外层孤对电子在卤素配位场中表现出显著的立体化学活性, $5s^2$ 孤对电子独特的稳定性与构型表达特性使其处于动态($6s^2$ 阳离子)与静态($4s^2$ 阳离子)畸变的临界状态。在零维结构中,这种协同畸变效应最为显著,诱导的晶格畸变

能够实现高效的激子局域化,从而产生优异的发光性能。而类似结构的 $4s^2$ 或 $6s^2$ 体系则因激子局域性不足导致微弱甚至无辐射复合^[32-37]。当高能X射线或紫外光激发时,基态激子(1S_0)首先跃迁至激发态(1P_1 或 3P_1),随后无机晶格因电子-声子强耦合发生瞬态畸变,导致激子自陷形成STEs。

在该过程中,激子能量通过多声子散射耗散,部分载流子被缺陷态俘获发生非辐射复合,而未被猝灭的激子在发光中心(如 $[SbX_5]^{2-}$ 或 $[SbX_6]^{3-}$ 单元)通过辐射复合跃迁释放,完成发光,如图1(b)。该过程倾向于产生具有较大斯托克斯位移的宽带发射,这有利于闪烁体的光输出^[38-40]。

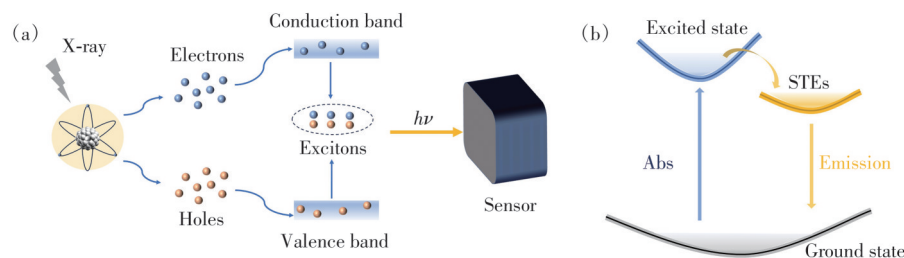


图1 间接X射线探测器的工作机理(a)和杂化锑基闪烁体发光原理(b)

Fig.1 Mechanism of operation of an indirect X-ray detector (a) and the principle of luminescence of a hybridised antimony-based scintillator (b)

3 零维杂化锑基闪烁体设计策略

零维杂化锑基闪烁体中的STEs发射展现出卓越的物理稳定性,其发光特性对晶粒尺寸、表面态及常见结构缺陷不敏感^[23,41-42]。这种内在稳定性源于STEs的强局域化电子-声子耦合机制,使材料即便在溶液法或室温结晶等非严格控制的合成条件下,仍能保持优异的性能。此外,零维锑基杂化闪烁体具有出色的可调节性,可通过调控有机阳离子的种类实现多样化的闪烁体设计,并结合合理的结构优化策略进一步提升其性能^[43-44]。

研究表明,通过系统调控有机阳离子结构,可制备出结构各异的零维锑基杂化闪烁体^[45-47]。例如,Xie等^[48]采用反溶剂蒸气扩散法,以四乙基氯化铵(TTAC)和苄基三乙基氯化铵(TEBAC)作为有机阳离子,成功合成了 $(TTA)_2SbCl_5$ 和 $(TEBA)_2SbCl_5$ 单晶。然而,该方法获得的晶体尺寸相对较小,限制了其实际应用。为突破这一瓶颈,Yang等^[49]创新性地选用EPT作为有机阳离子,通过熔融法制备出了大尺寸的 $(EPT)_2SbCl_5$ 非晶片(图2(b)),并成功实现了大面积和高分辨率的X射线成像,显著提升了材料的实际应用潜力。

此外,溶剂工程策略也被证明是一种调控晶体结构的重要手段。Xing等^[50]分别在DMF、ACN、DCM三种溶剂中成功生长出具有不同晶体结构的 $(TMS)_2SbCl_5$ 单晶(图2(c))。研究发现,三种不同结构的晶体表现出显著差异的光致发光特性,其中立方相 $(TMS)_2SbCl_5$ 晶体因其高度对称性晶

体结构、较大的晶格体积、强电子-声子耦合效应以及优异的光学性能和稳定性,在生长用于X射线探测与成像的 Sb^{3+} 基金属卤化物时,可通过调控晶体生长溶剂,实现更优异的晶体结构,从而提升材料的整体性能。

目前,杂化锑卤化物材料实现较高PLQY的研究主要依赖于有机组分的随机筛选,而通过系统性的结构优化策略来提升发射效率的研究相对匮乏。Lin等^[51]通过将水分子引入 $(C_6N_2H_{16})SbCl_5$ 晶格中,成功将其PLQY提升了57%(图2(d))。这一显著的提升归因于水分子与有机阳离子之间形成的氢键作用,增大了无机多面体之间的间距,有效降低了相邻多面体间的相互作用,从而增强了光生电子的局域化程度,抑制了非辐射复合过程。此外,已有研究表明,降低无机骨架维度是提升PLQY的有效策略^[52]。在此基础上,Lei等^[53]通过将一维结构的 $[DMPZ]SbCl_5 \cdot H_2O$ (DP- $SbCl_5$)转化为零维结构的 $[DMPZ]_2SbCl_6 \cdot Cl \cdot (H_2O)_2$ (DP- $SbCl_6$),实现了从无限延伸的 $[SbCl_5]^{2-}$ 链到离散 $[SbCl_6]^{3-}$ 八面体的维度调控(图2(e))。这种从高维(1D)到低维(0D)的结构转变,通过量子限制效应和能带结构调控,显著增强了光电子局域化和自陷激子的形成,从而提高了材料的光致发光效率^[54-56]。在设计 Sb^{3+} 基金属卤化物时,可通过引入小分子对其结构进行精细调控,从而实现更优异的光学性能,满足其在X射线探测与成像领域的应用需求。

通过上述策略,零维杂化锑基闪烁体材料的

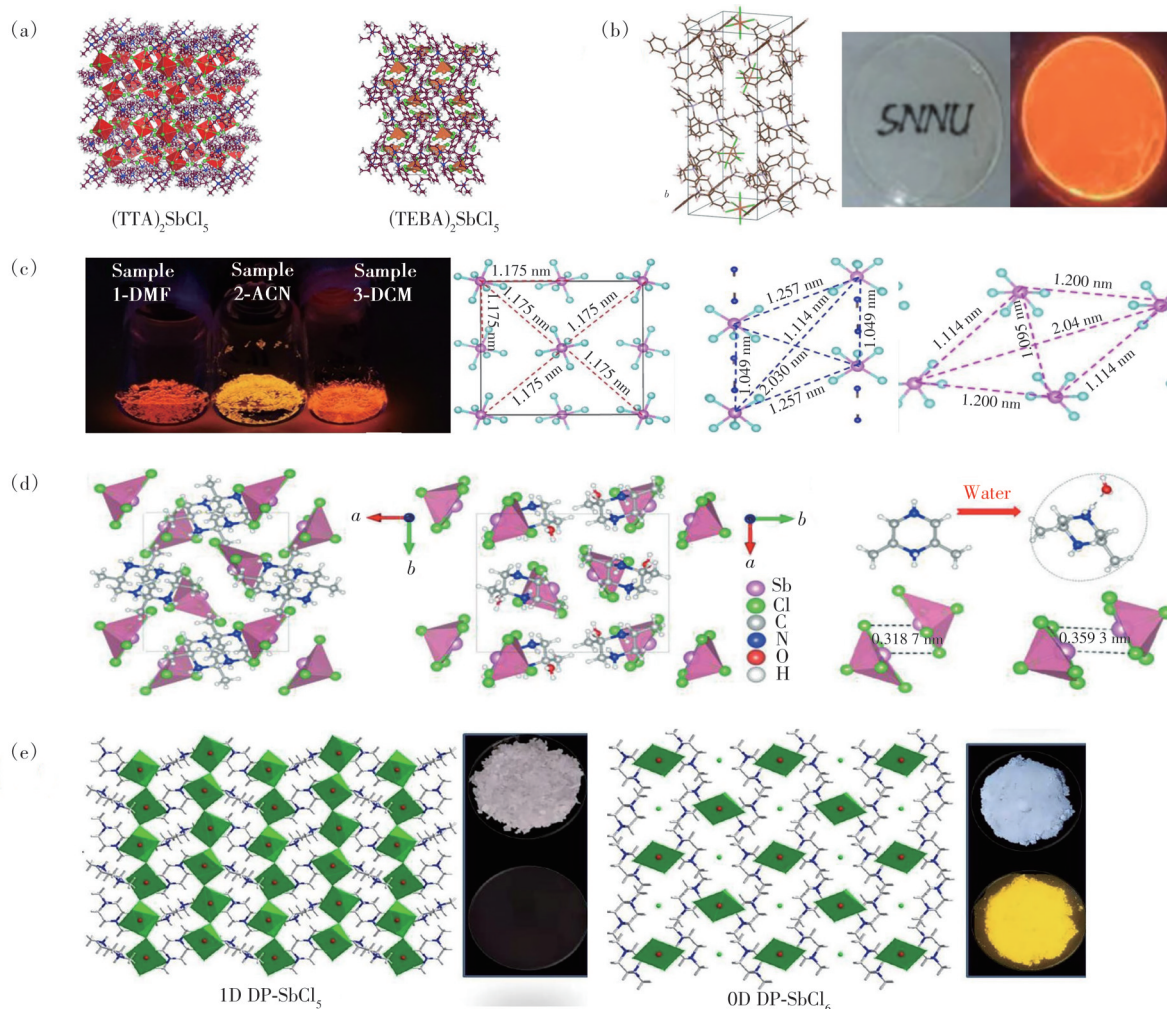


图2 (a) $(\text{TTA})_2\text{SbCl}_5$ 和 $(\text{TEBA})_2\text{SbCl}_5$ 的晶体结构图^[48]; (b) $(\text{EPT})_2\text{SbCl}_5$ 的晶体结构图以及实物图^[49]; (c) 不同构型的 $(\text{TMS})_2\text{SbCl}_5$ 的实物图以及晶体结构图^[50]; (d) 引入水分子后 $(\text{C}_6\text{N}_2\text{H}_{16})\text{SbCl}_5$ 的晶体结构变化^[51]; (e) DP-SbCl₅ 与 DP-SbCl₆ 的晶体结构与实物发光对比图^[53]

Fig.2 (a) Crystal structure of $(\text{TTA})_2\text{SbCl}_5$ and $(\text{TEBA})_2\text{SbCl}_5$ ^[48]. (b) Diagram of the crystal structure of $(\text{EPT})_2\text{SbCl}_5$ as well as the physical picture^[49]. (c) Physical as well as crystal structure diagrams of $(\text{TMS})_2\text{SbCl}_5$ in different configurations^[50]. (d) Crystal structure change of $(\text{C}_6\text{N}_2\text{H}_{16})\text{SbCl}_5$ after introduction of water molecules^[51]. (e) Crystal structure of DP-SbCl₅ versus DP-SbCl₆ with physical luminescence^[53]

设计可依据特定应用需求进行系统性优化。在用于X射线探测与成像等领域时,该基于结构-性能关系的定向设计方法显著增强了材料的功能特性,展现出广阔的应用前景^[23,31,57-59]。

4 零维杂化锑基闪烁体在X射线探测和成像中的应用

作为用于X射线探测的闪烁体,零维杂化锑基闪烁体引起了广泛关注,主要因为它们能够高效地将X射线能量转化为可见光。与传统闪烁体相比,这些材料具有更高的PLQY、更低的检测限,并展现出显著的竞争优势。最新的研究进展进一步证实了它们在提升X射线探测能力和推动

辐射成像技术发展方面的巨大潜力。在接下来的章节中,我们将重点讨论基于零维杂化锑基闪烁体的主要研究进展,并突出其在该领域的创新性贡献。

4.1 X射线检测

2020年, Ma等^[60]首次将杂化锑基闪烁体应用于X射线探测领域,成功制备了具有橙红光发射的零维 $(\text{PPN})_2\text{SbCl}_5$ 单晶。如图3(a)所示,该闪烁体展现出 $49\,000\text{ photons}\cdot\text{MeV}^{-1}$ 的高光产额,与商用 CsI(Tl) 闪烁体 ($54\,000\text{ photons}\cdot\text{MeV}^{-1}$) 性能相当。特别值得注意的是,在 $90\text{ nGy}_{\text{air}}\cdot\text{s}^{-1}\sim 90\text{ }\mu\text{Gy}_{\text{air}}\cdot\text{s}^{-1}$ 的宽剂量率范围内,材料呈现出近乎理想的线性响应,且在超低剂量条件下仍保持优异的线性特性

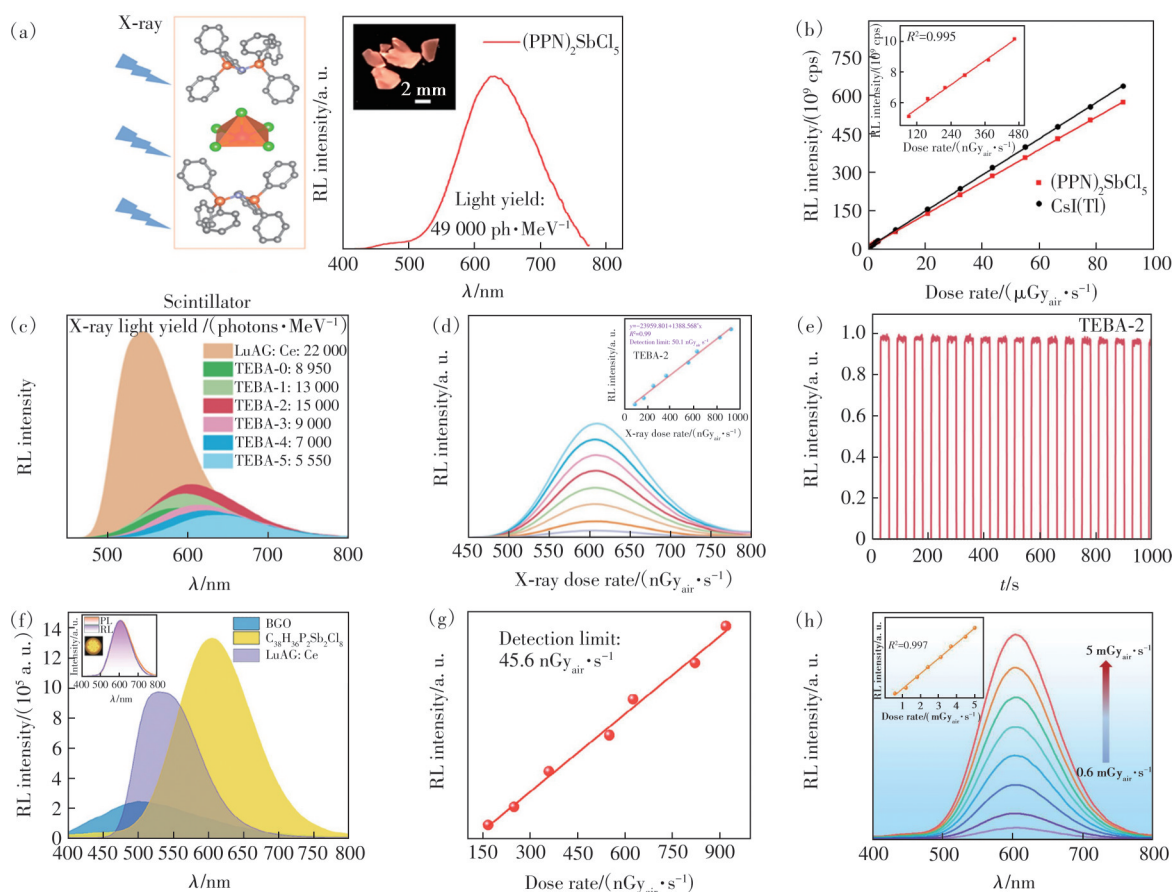


图3 (a)X射线激发下 $(\text{PPN})_2\text{SbCl}_5$ 单晶的辐射发光(RL)光谱与光产额性能;(b) $(\text{PPN})_2\text{SbCl}_5$ 和 CsI(Tl) 闪烁体的剂量率和RL强度之间的线性关系,插图显示了在低剂量率下测量的 $(\text{PPN})_2\text{SbCl}_5$ 的数据^[60];(c) $(\text{TEBA})_2\text{SbCl}_{5-x}\text{Br}_x$ 与 LuAG:Ce 的辐射发光(RL)强度光谱;(d)TEBA-2的检测限;(e)TEBA-2的X射线辐照稳定性^[61];(f) BGO 、 LuAG:Ce 和 $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{Sb}_2\text{Cl}_8$ 晶体在X射线照射下的RL光谱;(g)RL强度与X射线剂量率之间的功能相关性;(h) $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{Sb}_2\text{Cl}_8$ 晶体在不同X射线剂量率下的RL光谱^[62]

Fig.3 (a) Radioluminescence (RL) spectra and optical yield properties of $(\text{PPN})_2\text{SbCl}_5$ single crystals under X-ray excitation. (b) Linear relationship between dose rate and RL intensity for $(\text{PPN})_2\text{SbCl}_5$ and CsI(Tl) scintillators. The inset shows data for $(\text{PPN})_2\text{SbCl}_5$ measured at low dose rates^[60]. (c) Radioluminescence (RL) intensity spectra of $(\text{TEBA})_2\text{SbCl}_{5-x}\text{Br}_x$ with LuAG:Ce . (d) Detection limit of TEBA-2. (e) X-ray irradiation stability of TEBA-2^[61]. (f) RL spectra of BGO , LuAG:Ce and $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{Sb}_2\text{Cl}_8$ crystals under X-ray irradiation. (g) Functional correlation between RL intensity and X-ray dose rate. (h) RL spectra of $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{Sb}_2\text{Cl}_8$ crystals under different X-ray dose rates^[62]

(图3(b))。其检测限低至 $191.4 \text{ nGy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$,较医疗诊断标准($5.5 \mu\text{Gy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$)降低约28.7倍,这一突破为高灵敏度辐射探测应用提供了新的材料解决方案。

X射线探测的效果在很大程度上受到所用材料原子成分的影响。通常,原子序数较高的材料具有更强的X射线吸收以及衰减能力。为提升零维杂化锑基闪烁体的X射线吸收能力与发光强度,Zhao等^[61]通过调控卤素比例(Cl/Br),成功合成了一系列基于 Sb^{3+} 的 $(\text{TEBA})_2\text{SbCl}_{5-x}\text{Br}_x$ ($x=0,1,2,3,4,5$)金属卤化物。如图3(c)所示,随着 Br^- 掺杂量增加,材料光产额呈现显著变化,其

中 $(\text{TEBA})_2\text{SbCl}_3\text{Br}_2$ 获得最高光产额及最优X射线探测性能。该材料检测限达 $50.1 \text{ nGy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3(d)),仅为医学诊断标准($5.5 \mu\text{Gy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$)的1/110。经16次X射线开关循环测试(图3(e)),其发光强度保持稳定,证实了其良好的辐照稳定性,凸显了在X射线检测领域的应用潜力。

Shen等^[62]采用不同的方法,通过增加高Z金属的比例,采用反溶剂扩散法成功制备了含 $[\text{Sb}_2\text{Cl}_8]^{2-}$ 二聚体结构的 $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{Sb}_2\text{Cl}_8$ 单晶。该晶体展现出99.8%的超高PLQY及 $41\,300 \text{ photons} \cdot \text{MeV}^{-1}$ 的光产额(图3(f)),其检测限低至 $45.6 \text{ nGy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3(g))。更为重要的是,在 $1.7 \text{ nGy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$

至 $5 \text{ mGy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$ 的宽剂量率范围内,材料的辐射响应强度与剂量率呈现良好的线性关系 ($R^2 > 0.997$),且响应灵敏度随剂量率增加而单调增强(图 3(h))。该研究基于结构调控策略实现了材料性能的突破性提升,为新型高灵敏度 0D 杂化锑基闪烁体材料的理性设计提供了重要的理论依据和技术路径。

4.2 X 射线成像

X 射线成像技术通过利用 X 射线穿透物体并探测其内部结构,能够生成高分辨率的物体内部图像^[63-65]。该技术在医疗诊断、工业检测、安全检查和科学研究等领域得到了广泛应用^[66-69]。近年来,零维杂化锑基材料因其合成工艺简单、PLQY

高以及斯托克斯位移大等优异特性而备受关注。这些特性显著增强了成像信号强度,从而大幅提升了成像质量。因此,零维杂化锑基材料在辐射成像技术领域展现出巨大的应用潜力,有望推动该技术的进一步发展与创新。

尽管零维杂化锑基闪烁体单晶在 X 射线探测领域展现出优异性能,但其小尺寸特性严重制约了实际成像应用。针对这一技术瓶颈,Zhao 等^[70]将 $\text{C}_{50}\text{H}_{44}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ 晶体粉末均匀分散于聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)聚合物基质中,成功制备了大面积柔性闪烁屏(图 4(a))。实验结果表明,该复合闪烁屏在 X 射线激发下呈现出明亮且空间分布均匀的黄光发射。更为重要的

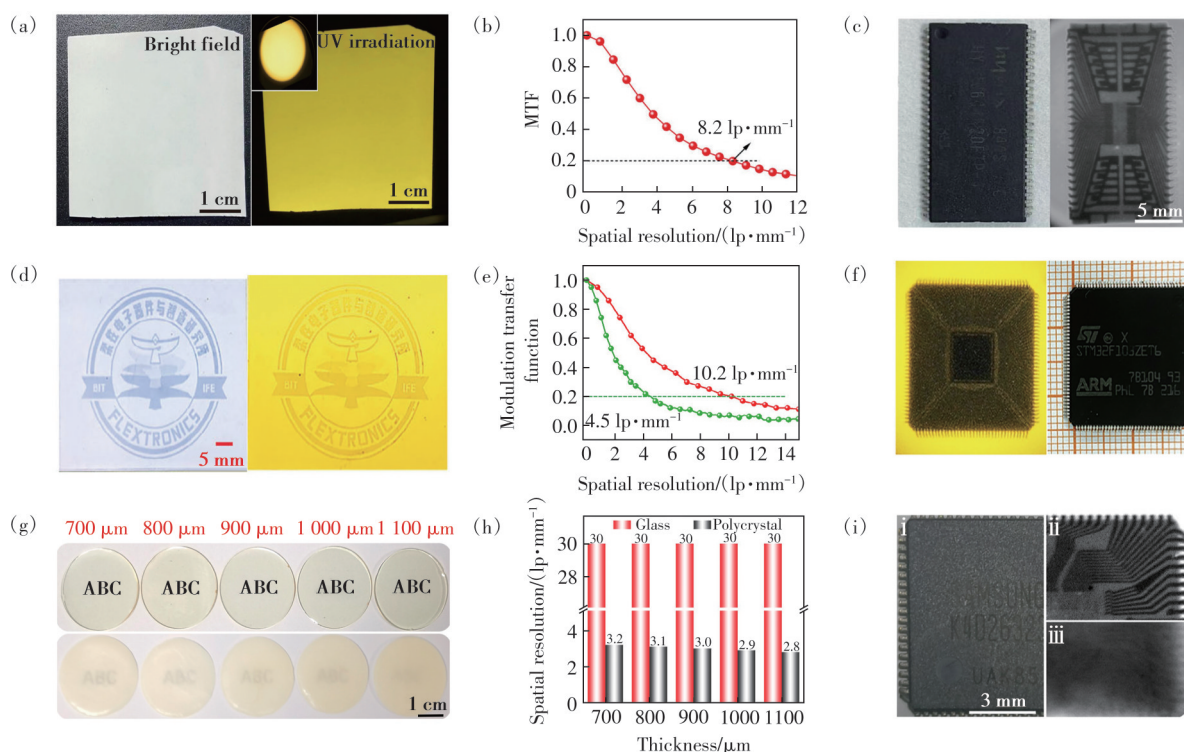


图 4 (a) $\text{C}_{50}\text{H}_{44}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ 在日光及紫外线照射下闪烁屏的照片,插图: X 射线照射下 $\text{C}_{50}\text{H}_{44}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ 闪烁屏的照片(X 射线剂量率: $179.6 \mu\text{Gy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) $\text{C}_{50}\text{H}_{44}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ 闪烁屏的 MTF 曲线; (c) 电路板的明场照片和 X 射线图像^[70]; (d) $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ 薄膜在日光和 X 射线照射下的图像; (e) 基于粉末基薄膜和原位薄膜制备的闪烁体薄膜的 MTF 曲线; (f) 用 $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ 薄膜对芯片进行 X 射线成像^[71]; (g) 不同厚度(700~1100 μm)的透明屏幕和多晶屏幕的照片; (h) 不同厚度的透明屏和多晶屏的空间分辨率结果; (i) (i) 芯片的照片, (ii) 基于透明屏的清晰 X 射线图像, (iii) 基于多晶屏的芯片的模糊 X 射线图像^[72]

Fig.4 (a) Photographs of $\text{C}_{50}\text{H}_{44}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ scintillation screen under sunlight and UV irradiation. Inset: photograph of $\text{C}_{50}\text{H}_{44}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ scintillation screen under X-ray irradiation (X-ray dose rate: $179.6 \mu\text{Gy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$). (b) MTF curve of $\text{C}_{50}\text{H}_{44}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ scintillation screen. (c) Bright field photograph and X-ray image of the circuit board^[70]. (d) Images of $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ film under sunlight and X-ray irradiation. (e) MTF curves of scintillator films prepared based on powder-based and *in-situ* films. (f) X-ray imaging of the chip with $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ film^[71]. (g) Photographs of transparent and polycrystalline screens with different thicknesses (700~1100 μm). (h) Spatial resolution results of transparent and polycrystalline screens of different thicknesses. (i) (i) Photographs of the chip, (ii) clear X-ray images based on transparent screens, and (iii) blurred X-ray images of the chip based on polycrystalline screens^[72]

是,基于该材料制备的薄膜实现了 $8.2\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的优异空间分辨率(图 4(b)),使其成为 X 射线摄影和安检的理想候选材料。此外, $\text{C}_{50}\text{H}_{44}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ 闪烁器屏幕还能清楚地分辨印刷电路板内部结构(图 4(c)),进一步验证了其在实际应用中的优越性。然而,传统的直接共混法将金属卤化物粉末直接分散于聚合物基体中,容易导致严重的光散射,从而显著降低材料的透明度。较低的透明度会导致光子在闪烁体内部发生多次散射或被吸收,进而造成光产额降低和空间分辨率下降等问题。为解决这一问题,Shen 等^[71]提出了一种原位成膜法,在聚偏二氟乙烯(PVDF)基体中原位生长 $\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{SbCl}_5$ 晶体,成功制备出一种低光散射的柔性闪烁体薄膜(图 4(d))。与采用直接共混法制备的不透明闪烁体膜相比,该材料的空间分辨率由 $4.5\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 提升至 $10.2\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ (图 4(e)),显示出显著的成像性能优势。此外,在对芯片内部结构进行成像测试时,该低光散射闪烁体能够清晰地辨识芯片的内部细节结构(图 4(f)),充分体现了其在实际应用中的优越性能和成像能力。

闪烁体的无色透明性是实现高效 X 射线-可见光转换和高分辨率成像的关键物理基础。无色透明性表明材料在可见光波段($400\sim700\text{ nm}$)具有极低的吸收系数,同时散射中心(如晶界、缺陷)极少,从而确保闪烁光几乎无损耗地穿透闪烁体并到达探测器。Sun 等^[72]采用一种简单高效的无溶剂熔融淬火方法,成功制备了大面积零维锑基钙钛矿透明介质 $(\text{C}_{20}\text{H}_{20}\text{P})_2\text{SbCl}_5$,如图 4(g)所示。其透明性源于 $\text{C}_{20}\text{H}_{20}\text{P}^+$ 的空间位阻效应,有效抑制了淬火过程中晶体的形成,从而获得了折射率低、

结构均匀的玻璃态材料。该介质在 $450\sim800\text{ nm}$ 波长范围内表现出超过 80% 的高透射率,并展现出 245 nm 的大斯托克斯位移,显著减少了光散射和自吸收效应。如图 4(h)所示,随着厚度的增加,多晶屏的空间分辨率逐渐降低,而透明屏始终保持着 $30\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的优异空间分辨率。在对印刷电路板内部结构进行成像时,透明屏的成像能力明显优于不透明的多晶屏(图 4(i)),充分展现了其在 X 射线成像中的巨大潜力。

柔性 X 射线闪烁屏具有制备简便、成本较低、可大规模生产的优势,并能够适应复杂或弯曲的表面,因此特别适用于便携式和可穿戴的 X 射线检测设备。然而,柔性屏的光学透明度和分辨率易受到影响,但采用原位成膜方法能够较好地解决透明度问题。此外,柔性闪烁屏在热稳定性和长期使用的稳定性方面相对较差。与之相比,刚性 X 射线闪烁屏在空间分辨率和稳定性上通常表现更优,适用于需要高分辨率的精密成像应用。然而,刚性屏的易碎性和较差的机械性能使其难以适应复杂曲面和轻便设备的需求。综合来看,选择刚性或柔性 X 射线闪烁屏应根据具体应用需求进行权衡。如果应用场景对高空间分辨率和长期稳定性有较高要求,刚性屏更为适合;若需求侧重于灵活性和适应不规则物体的成像,柔性屏则是更优的选择。

为更全面地显示近年来杂化 Sb^{3+} 基金属卤化物在 X 射线探测与成像中的发展,特对部分代表材料构建的探测器性能进行了总结。表 1 总结了杂化 Sb^{3+} 基金属卤化物在 X 射线探测与成像中的关键参数,如荧光衰减时间、光产额、检测限、以及 X 射线成像空间分辨率等。

表 1 杂化 Sb^{3+} 基金属卤化物闪烁体在 X 射线探测与成像中的关键参数汇总

Tab. 1 Summary of key parameters of hybridised Sb^{3+} -based metal halide scintillators for X-ray detection and imaging

Material	Fluorescence decay time/ μs	Light yield/ (photons $\cdot\text{MeV}^{-1}$)	Detection limit/ ($\text{nGy}_{\text{air}}\cdot\text{s}^{-1}$)	Spatial resolution/ ($\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$)	Ref.
$(\text{ETP})_2\text{SbCl}_5$	1.074	8 500	—	19	[49]
$(\text{PPN})_2\text{SbCl}_5$	4.1	49 000	191.4	—	[60]
$(\text{TEBA})_2\text{SbCl}_3\text{Br}_2$	2.04	15 000	50.1	10.4	[61]
$\text{C}_{38}\text{H}_{36}\text{P}_2\text{Sb}_2\text{Cl}_8$	3.59	41 300	45.6	8.15	[62]
$\text{C}_{50}\text{H}_{44}\text{P}_2\text{SbCl}_5$	2.67	44 460	16.92	8.2	[70]
$\text{MTP}_2\text{SbCl}_5$	3.16	39 800	78.4	10.2	[71]
$(\text{C}_{20}\text{H}_{20}\text{P})_2\text{SbCl}_5$	3.58	12 535	3 160	30	[72]
$[\text{Bmmim}]_2\text{SbCl}_5$	8.9	9 987	3 210	12.5	[73]
$[\text{FPPP}]_2\text{SbCl}_7$	6.49	46 927	710	13	[74]
$(\text{NYP})_2\text{SbCl}_5$	0.001 18	21 500	757.51	7.77	[75]

5 总结及展望

基于独特 $5s^2$ 电子构型的零维杂化铋基卤化物闪烁体因其优异的光致发光量子产率、大斯托克斯位移以及突出的环境稳定性,已成为新一代低剂量、高分辨率 X 射线探测与成像材料的理想候选体系。此外,零维杂化无铅金属卤化物在组分和结构上的多样性特征,为进一步设计开发综合性能更优异的 X 射线闪烁体材料提供了广阔的研究空间。然而,从技术成熟度来看,零维铋基材料的研发目前仍处于实验室阶段,其商业化应用面临诸多挑战。具体而言,由于 STEs 辐射机制的存在,该类材

料通常表现出较长的辐射衰减寿命(微秒量级),这一特性限制了其在动态 X 射线成像领域的应用潜力。同时,X 射线成像屏的制备工艺仍需进一步优化,特别是在大面积、高透明度以及优异稳定性的柔性闪烁屏的制备技术方面仍存在诸多亟待解决的科学问题。未来研究需进一步优化材料衰减动力学、开发低成本规模化合成技术,以推动其在医疗诊断与工业检测等领域的实用化进程。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250108>

参 考 文 献:

- [1] DUDIPALA K R, LE T H, NIE W Y, *et al.* Halide perovskites and their derivatives for efficient, high-resolution direct radiation detection: design strategies and applications [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(8): 2304523.
- [2] 吕时超,周时风,唐俊州,等. 玻璃闪烁体的研究进展 [J]. 光子学报, 2019, 48(10): 1148011.
LV S C, ZHOU S F, TANG J Z, *et al.* Research progress in development of glass scintillator [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2019, 48(10): 1148011. (in Chinese)
- [3] SILVA M I, MALITCKII E, SANTOS T G, *et al.* Review of conventional and advanced non-destructive testing techniques for detection and characterization of small-scale defects [J]. *Prog. Mater Sci.*, 2023, 138: 101155.
- [4] HØIAAS I, GRUJIC K, IMENES A G, *et al.* Inspection and condition monitoring of large-scale photovoltaic power plants: a review of imaging technologies [J]. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2022, 161: 112353.
- [5] HAJAGOS T J, LIU C, CHEREPY N J, *et al.* High-Z sensitized plastic scintillators: a review [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(27): 1706956.
- [6] 马文博,匡翠方,刘旭,等. 基于新型金属卤化物半导体和闪烁体的 X 射线探测与成像研究进展 [J]. 光学学报, 2022, 42(17): 1704002.
MA W B, KUANG C F, LIU X, *et al.* Research progress of X-ray detection and imaging based on emerging metal halide semiconductors and scintillators [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2022, 42(17): 1704002. (in Chinese)
- [7] GAN N, ZOU X, DONG M Y, *et al.* Organic phosphorescent scintillation from copolymers by X-ray irradiation [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 3995.
- [8] LIU J, LIU P L, SHI T L, *et al.* Flexible and broadband colloidal quantum dots photodiode array for pixel-level X-ray to near-infrared image fusion [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 5352.
- [9] OLIVEIRA J, CORREIA V, COSTA P, *et al.* Stretchable scintillator composites for indirect X-ray detectors [J]. *Compos Part B*, 2018, 133: 226-231.
- [10] ZDESENKO Y G, AVIGNONE III F T, BRUDANIN V B, *et al.* Scintillation properties and radioactive contamination of CaWO_4 crystal scintillators [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, 2005, 538(1-3): 657-667.
- [11] YAMAMOTO S, TOMITA H. Comparison of light outputs, decay times, and imaging performance of a $\text{ZnS}(\text{Ag})$ scintillator for alpha particles, beta particles, and gamma photons [J]. *Appl. Radiat. Isot.*, 2021, 168: 109527.
- [12] XIANG W J, SHEN D P, ZHANG X Z, *et al.* Transparent and planar $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{Cl}_5$ crystals for micrometer-resolution X-ray imaging screen [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(4): 4918-4924.
- [13] KOSHIMIZU M. Fundamental processes and recent development of organic scintillators [J]. *J. Lumin.*, 2025, 278: 121008.
- [14] ZHANG M Y, WANG X M, YANG B, *et al.* Metal halide scintillators with fast and self-absorption-free defect-bound excitonic radioluminescence for dynamic X-ray imaging [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(9): 2007921.
- [15] ZHU W J, MA W B, SU Y R, *et al.* Low-dose real-time X-ray imaging with nontoxic double perovskite scintillators [J].

- Light: Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 112.
- [16] YANAGIDA T. Inorganic scintillating materials and scintillation detectors [J]. *Proc. Jpn. Acad. Ser. B*, 2018, 94(2): 75-97.
- [17] CAO J T, GUO Z, ZHU S, *et al.* Preparation of lead-free two-dimensional-layered $(\text{C}_8\text{H}_{17}\text{NH}_3)_2\text{SnBr}_4$ perovskite scintillators and their application in X-ray imaging [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(17): 19797-19804.
- [18] NAGARKAR V V, TIPNIS S V, GUPTA T K, *et al.* High speed X-ray imaging camera using a structured CsI(Tl) scintillator [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1999, 46(3): 232-236.
- [19] NIKL M, YOSHIKAWA A. Recent R&D trends in inorganic single-crystal scintillator materials for radiation detection [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2015, 3(4): 463-481.
- [20] HAN K, QIAO J W, ZHANG S, *et al.* Band alignment engineering in ns^2 electrons doped metal halide perovskites [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(1): 2200458.
- [21] ZHAO J J, ZHAO L, DENG Y H, *et al.* Perovskite-filled membranes for flexible and large-area direct-conversion X-ray detector arrays [J]. *Nat. Photonics*, 2020, 14(10): 612-617.
- [22] THIRIMANNE H M, JAYAWARDENA K D G I, PARNELL A J, *et al.* High sensitivity organic inorganic hybrid X-ray detectors with direct transduction and broadband response [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9(1): 2926.
- [23] CUI H X, ZHU W J, DENG Y J, *et al.* Lead-free organic-inorganic hybrid scintillators for X-ray detection [J]. *Aggregate*, 2024, 5(2): e454.
- [24] PENG Q C, SI Y B, YUAN J W, *et al.* High performance dynamic X-ray flexible imaging realized using a copper iodide cluster-based MOF microcrystal scintillator [J]. *Angew. Chem.*, 2023, 135(40): e202308194.
- [25] 李雯, 李云云, 迟晓慧, 等. X射线成像用零维无铅杂化卤化物闪烁体研究进展(特邀) [J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(3): 0334001.
- LI W, LI Y Y, CHI X H, *et al.* Research progresses of zero-dimensional lead-free hybrid halides scintillators for X-ray imaging (Invited) [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2024, 61(3): 0334001. (in Chinese)
- [26] LIAN L Y, ZHANG P, ZHANG X W, *et al.* Realizing near-unity quantum efficiency of zero-dimensional antimony halides through metal halide structural modulation [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(49): 58908-58915.
- [27] ZHANG R Q, XIE H D, ZHAO Q Y, *et al.* Zero-dimensional hybrid antimony chloride with near-unity broad-band orange-red emission toward solid-state lighting [J]. *Inorg. Chem.*, 2023, 62(48): 19771-19779.
- [28] LI D Y, SONG J H, XU Z Y, *et al.* Reversible triple-mode switching in photoluminescence from 0D hybrid antimony halides [J]. *Chem. Mater.*, 2022, 34(15): 6985-6995.
- [29] DENG Y J, LIANG X, LI F Y, *et al.* Large cation engineering in organic antimony halides for low-loss active waveguide [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(8): 2300043.
- [30] 王鲁凯, 林宏健, 吴坤, 等. 金属卤化物闪烁体薄膜的X射线成像研究进展 [J]. *发光学报*, 2024, 45(8): 1266-1280.
- WANG L K, LIN H J, WU K, *et al.* Research progress in X-ray imaging of metal halide scintillator films [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(8): 1266-1280. (in Chinese)
- [31] MCCALL K M, MORAD V, BENIN B M, *et al.* Efficient lone-pair-driven luminescence: structure-property relationships in emissive $5s^2$ metal halides [J]. *ACS Mater. Lett.*, 2020, 2(9): 1218-1232.
- [32] PYYKKO P. Relativistic effects in structural chemistry [J]. *Chem. Rev.*, 1988, 88(3): 563-594.
- [33] STOUMPOS C C, FRAZER L, CLARK D J, *et al.* Hybrid germanium iodide perovskite semiconductors: active lone pairs, structural distortions, direct and indirect energy gaps, and strong nonlinear optical properties [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, 137(21): 6804-6819.
- [34] SWAINSON I, CHI L S, HER J H, *et al.* Orientational ordering, tilting and lone-pair activity in the perovskite methylammonium tin bromide, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ [J]. *Acta Crystallogr. B*, 2010, 66(Pt 4): 422-429.
- [35] SCHUELLER E C, LAURITA G, FABINI D H, *et al.* Crystal structure evolution and notable thermal expansion in hybrid perovskites formamidinium tin iodide and formamidinium lead bromide [J]. *Inorg. Chem.*, 2018, 57(2): 695-701.
- [36] FABINI D H, LAURITA G, BECHTEL J S, *et al.* Dynamic stereochemical activity of the Sn^{2+} lone pair in perovskite CsSnBr_3 [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2016, 138(36): 11820-11832.
- [37] LAURITA G, FABINI D H, STOUMPOS C C, *et al.* Chemical tuning of dynamic cation off-centering in the cubic phases

- of hybrid tin and lead halide perovskites [J]. *Chem. Sci.*, 2017, 8(8): 5628-5635.
- [38] MCCALL K M, STOUMPOS C C, KOSTINA S S, *et al.* Strong electron-phonon coupling and self-trapped excitons in the defect halide perovskites $A_3M_2I_9$ ($A = \text{Cs, Rb}$; $M = \text{Bi, Sb}$) [J]. *Chem. Mater.*, 2017, 29(9): 4129-4145.
- [39] LI S R, LUO J J, LIU J, *et al.* Self-trapped excitons in all-inorganic halide perovskites: fundamentals, status, and potential applications [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2019, 10(8): 1999-2007.
- [40] PENG H, TIAN Y, WANG X X, *et al.* Bulk assembly of a 0D organic antimony chloride hybrid with highly efficient orange dual emission by self-trapped states [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(36): 12184-12190.
- [41] WANG J, DONG J C, LU F F, *et al.* Two-dimensional lead-free halide perovskite materials and devices [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2019, 7(41): 23563-23576.
- [42] WEI W J, JIANG X X, DONG L Y, *et al.* Regulating second-harmonic generation by van der Waals interactions in two-dimensional lead halide perovskite nanosheets [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019, 141(23): 9134-9139.
- [43] SAPAROV B, MITZI D B. Organic-inorganic perovskites: structural versatility for functional materials design [J]. *Chem. Rev.*, 2016, 116(7): 4558-4596.
- [44] ZHOU Y Y, CHEN W. Hybrid organic-inorganic halide perovskites [J]. *J. Appl. Phys.*, 2020, 128(20): 200401.
- [45] WANG Z P, ZHANG Z Z, TAO L Q, *et al.* Hybrid chloroantimonates (III): thermally induced triple-mode reversible luminescent switching and laser-printable rewritable luminescent paper [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2019, 58(29): 9974-9978.
- [46] ZHOU C K, LIN H R, TIAN Y, *et al.* Luminescent zero-dimensional organic metal halide hybrids with near-unity quantum efficiency [J]. *Chem. Sci.*, 2018, 9(3): 586-593.
- [47] ZAFFALON M L, WU Y, COVA F, *et al.* Zero-dimensional Ga_3SbCl_6 crystals as intrinsically reabsorption-free scintillators for radiation detection [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(48): 2305564.
- [48] LI Z Y, LI Y, LIANG P, *et al.* Dual-band luminescent lead-free antimony chloride halides with near-unity photoluminescence quantum efficiency [J]. *Chem. Mater.*, 2019, 31(22): 9363-9371.
- [49] XU Z W, LI N, YAN X Y, *et al.* Transparent 0D antimony halides glassy wafer with near-unity photoluminescence quantum yield for high spatial resolution X-ray imaging [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(3): 2301477.
- [50] LIAO J F, ZHANG Z P, ZHOU L, *et al.* Achieving near-unity red light photoluminescence in antimony halide crystals via polyhedron regulation [J]. *Angew. Chem.*, 2024, 136(24): e202404100.
- [51] SONG G M, LI M Z, ZHANG S Z, *et al.* Enhancing photoluminescence quantum yield in 0D metal halides by introducing water molecules [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(32): 2002468.
- [52] ZHOU L, LIAO J F, KUANG D B. An overview for zero-dimensional broadband emissive metal-halide single crystals [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(17): 2100544.
- [53] ZHAO J Q, HAN M F, ZHAO X J, *et al.* Structural dimensionality modulation toward enhanced photoluminescence efficiencies of hybrid lead-free antimony halides [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(19): 2100556.
- [54] MENG H X, ZHU W J, ZHOU Z J, *et al.* High-efficiency luminescent organic-inorganic hybrid manganese (II) halides applied to X-ray imaging [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(34): 12286-12291.
- [55] LU J, GAO J, WANG S H, *et al.* Improving X-ray scintillating merits of zero-dimensional organic-manganese (II) halide hybrids via enhancing the ligand polarizability for high-resolution imaging [J]. *Nano Lett.*, 2023, 23(10): 4351-4358.
- [56] ZHANG Z Z, WEI J H, LUO J B, *et al.* Large-area laminar TEA_2MnI_4 Single-crystal scintillator for X-ray imaging with impressive high resolution [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(42): 47913-47921.
- [57] WEI Q L, CHANG T, ZENG R S, *et al.* Self-trapped exciton emission in a zero-dimensional $(\text{TMA})_2\text{SbCl}_5 \cdot \text{DMF}$ single crystal and molecular dynamics simulation of structural stability [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2021, 12(30): 7091-7099.
- [58] SUN S Q, LU M, GAO X F, *et al.* 0D perovskites: unique properties, synthesis, and their applications [J]. *Adv. Sci.*, 2021, 8(24): 2102689.
- [59] SMITH M D, CONNOR B A, KARUNADASA H I. Tuning the luminescence of layered halide perovskites [J]. *Chem. Rev.*, 2019, 119(5): 3104-3139.
- [60] HE Q Q, ZHOU C K, XU L J, *et al.* Highly stable organic antimony halide crystals for X-ray scintillation [J]. *ACS Mater. Lett.*, 2020, 2(6): 633-638.

- [61] CHEN H Y, CUI H X, JIANG T X, *et al.* Highly luminescent antimony-based organic-inorganic hybrid halides for X-ray imaging and detection [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(32): 12325-12331.
- [62] MENG H X, LI Y, ZHANG F, *et al.* Stable organic-inorganic hybrid Sb(Ⅲ) halide scintillator for nonplanar ultra-flexible X-ray imaging [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(2): 2412597.
- [63] ISKANDRIAN A E, HAGE F G. *Nuclear Cardiac Imaging: Principles and Applications* [M]. 6th ed. Oxford: Oxford University Press, 2024.
- [64] SAKHATSKYI K, TUREDI B, MATT G J, *et al.* Stable perovskite single-crystal X-ray imaging detectors with single-photon sensitivity [J]. *Nat. Photonics*, 2023, 17(6): 510-517.
- [65] WANG J X, GUTIÉRREZ-ARZALUZ L, WANG X J, *et al.* Nearly 100% energy transfer at the interface of metal-organic frameworks for X-ray imaging scintillators [J]. *Matter*, 2022, 5(1): 253-265.
- [66] WANG J X, GUTIÉRREZ-ARZALUZ L, WANG X J, *et al.* Heavy-atom engineering of thermally activated delayed fluorophores for high-performance X-ray imaging scintillators [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(12): 869-875.
- [67] TREISTER N S, BRENNAN M T, SOLLECITO T P, *et al.* Exposed bone in patients with head and neck cancer treated with radiation therapy: an analysis of the observational study of dental outcomes in head and neck cancer patients (Ora-Rad) [J]. *Cancer*, 2022, 128(3): 487-496.
- [68] BOOI R, KÄMMERLING N F, OEI E H G, *et al.* Assessment of visibility of bone structures in the wrist using normal and half of the radiation dose with photon-counting detector CT [J]. *Eur. J. Radiol.*, 2023, 159: 110662.
- [69] DOLATI S S K, MALLA P, ORTIZ J D, *et al.* Identifying NDT methods for damage detection in concrete elements reinforced or strengthened with FRP [J]. *Eng. Struct.*, 2023, 287: 116155.
- [70] MENG H X, CHEN B, ZHU W J, *et al.* Stable organic antimony halides with near-unity photoluminescence quantum yield for X-ray imaging [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(7): 2201007.
- [71] MENG H X, LI Y, WANG Y, *et al.* Highly efficient flexible antimony halide scintillator films with *in situ* preparation for high-resolution X-ray imaging [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(4): 2401703.
- [72] FENG T, ZHOU Z, AN Y, *et al.* Large-area transparent antimony-based perovskite glass for high-resolution X-ray imaging [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(26): 16715-16725.
- [73] LI H, TENG Z W, ZHOU M, *et al.* A thermoplastic organic metal halide scintillator [J]. *ACS Mater. Lett.*, 2023, 5(9): 2481-2487.
- [74] WANG Y Y, JIA G H, HUO M R, *et al.* A lead-free zero-dimensional hybrid antimony halide perovskite X-ray scintillator with exceptional emission efficiency and excellent stability as a highly sensitive fluorescent probe [J]. *Inorg. Chem. Front.*, 2024, 11(16): 5034-5042.
- [75] CAO S J, WANG Y J, LAI J A, *et al.* Tunable luminescence based on structural regulation in organic antimony halides for X-ray scintillation [J]. *Inorg. Chem. Front.*, 2024, 11(16): 5221-5232.



余佳福(2002-),男,湖北孝感人,硕士研究生,2024年于长江大学获得学士学位,主要从事用于X射线探测与成像的闪烁体的研究。

E-mail: yu1263625569@163.com



高玉婷(1989-),女,湖北荆州人,博士,研究员,博士生导师,2016年于华东理工大学获得博士学位,主要从事光电功能材料的研究。

E-mail: gaoyt@cug.edu.cn