

文章编号: 1000-7032(2026)02-0243-15

非稀土激活的无机玻璃闪烁体研究进展

牛璐玥^{1,2}, 樊超¹, 任晶², 钱森³, 李良^{1*}

(1. 澳门科技大学 创新工程学院, 中国 澳门 999078;

2. 哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 闪烁体作为高能辐射探测与成像的核心转换材料,在医学影像、安全检查、工业无损探伤及高能物理等领域具有不可替代的作用。传统稀土离子(如 Tb^{3+} 、 Eu^{3+})掺杂的闪烁体虽性能优异,但面临原料成本高昂、发射谱带窄等挑战。非稀土激活无机玻璃闪烁体凭借激活源广泛、宽带发射、环境适应性强等优势成为新一代辐射探测材料的研究焦点。本文系统综述了该类材料的发光机理与最新研究进展,并深入探讨了包括过渡金属离子掺杂(如 Mn^{2+} 、 Cu^+ 、 Sn^{2+})、氧化物纳米晶复合玻璃以及新型钙钛矿玻璃(铅基、锰基、铜基)等在内的主要材料体系。详细介绍了各类体系在敏化能量传递、原位析晶调控、卤素配位工程及光纤阵列化制备等方面的创新策略,及其在光产额提升(最高达 BGO 的 425%)、空间分辨率突破及抗热淬灭性能(573 K 保持 63% 强度)等关键性能指标上的显著进展。同时,指出当前光产额与理论预期差距、高晶化率与光学均匀性矛盾、长期辐照稳定性不足及铅毒性替代等挑战。未来研究应聚焦于多尺度结构调控、缺陷工程、无铅化设计及器件集成技术,推动非稀土玻璃闪烁体在高端医疗影像、工业无损检测及极端环境探测等领域的实用化进程。

关键词: 玻璃闪烁体; 非稀土离子; 氧化物纳米晶复合玻璃; 过渡金属; 钙钛矿

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250257

CSTR: 32170.14.CJL.20250257

Research Progress in Non-rare-earth-activated Inorganic Glass Scintillators

NIU Luyue^{1,2}, FAN Chao¹, REN Jing², QIAN Sen³, LI Liang^{1*}

(1. Faculty of Innovation Engineering, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China;

2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: lli@must.edu.mo

Abstract: Scintillators, serving as core conversion materials for high-energy radiation detection and imaging, play an indispensable role in medical imaging, security inspection, industrial non-destructive testing, and high-energy physics. Although traditional rare-earth ion-doped scintillators (e.g., Tb^{3+} , Eu^{3+}) exhibit excellent performance, they face challenges such as high raw material costs and narrow emission bands. Non-rare-earth-activated inorganic glass scintillators have emerged as a research focus for the next generation of radiation detection materials, owing to their wide range of activators, broadband emission, and strong environmental adaptability. This article systematically reviews the luminescence mechanisms and recent advancements in such materials, with an in-depth discussion of major material systems, including transition metal ion doping (e.g., Mn^{2+} , Cu^+ , Sn^{2+}), oxide nanocrystal-embedded

收稿日期: 2025-11-26; 修订日期: 2025-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(52502015, 52372003); 国家重点研发计划(2023YFF0721700); 黑龙江省自然科学基金(ZD2023E004); 澳门科技发展基金(FDCT-0005/2022/AKP, FDCT-0021/2024/RIB1); 粤澳科技合作项目(FDCT-0017/2022/AGJ)

Supported by National Natural Science Foundation of China(52502015, 52372003); National Key Research and Development Program of China(2023YFF0721700); Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China(ZD2023E004); Macau Science and Technology Development Fund(FDCT-0005/2022/AKP, FDCT-0021/2024/RIB1); Guangdong-Macao Science and Technology Project(FDCT-0017/2022/AGJ)

glass, and novel perovskite glass (lead-based, manganese-based, copper-based). Innovative strategies in sensitized energy transfer, *in-situ* crystallization control, halogen coordination engineering, and fiber array fabrication are detailed, along with significant improvements in key performance indicators such as light yield (up to 425% of BGO), spatial resolution, and thermal quenching resistance (63% intensity retention at 573 K). The review also highlights existing challenges, including the gap between achieved and theoretical light yields, the trade-off between high crystallization rates and optical homogeneity, insufficient long-term radiation stability, and the need for lead-free alternatives. Future research should focus on multi-scale structural modulation, defect engineering, lead-free design, and device integration technologies to facilitate the practical application of non-rare-earth glass scintillators in advanced medical imaging, industrial non-destructive testing, and extreme environment detection.

Keywords: glass scintillators; non-rare-earth ions; oxide nanocrystal-embedded glass; transition metals; perovskites

1 引 言

闪烁体是一类可以吸收高能射线(X射线、 γ 射线)或粒子(中子、电子),并将其能量转化为紫外-可见-近红外光的功能材料。作为辐射探测器的核心部件,其在医学成像、安全检查、环境监测、高能物理研究及国防安全等领域发挥着不可替代的作用,该材料的性能可以决定探测器的灵敏度、分辨率和稳定性^[1-4]。例如,当前医学影像设备主要采用晶体作为核心闪烁材料,但因其高昂的制造成本和技术壁垒导致整套PET/CT高端设备价格居高不下,严重制约了我国基层医疗机构的设备配置水平。因此,发展具有自主知识产权的新型高效闪烁体材料体系,突破关键材料“卡脖子”技术瓶颈,对实现高端医疗影像设备国产化替代、推动健康中国战略实施具有重大科学价值和社会意义。长期以来,闪烁晶体占据着市场主导地位。然而,这类材料,特别是稀土掺杂型,存在几个固有瓶颈:(1)稀土元素储量稀缺、价格波动大,导致材料成本高昂;(2)由4f-4f跃迁主导的发光通常为窄带发射^[5-6],与大面积硅基光电探测器(如CMOS、CCD)的宽谱响应匹配度不佳^[6-7];(3)单晶生长工艺复杂,难以制备大尺寸、异形构件^[8]。为克服这些挑战,研究人员将目光投向非稀土激活的无机闪烁玻璃。玻璃基质具有组成可调、制备工艺成熟、易于加工成各种形状(如光纤、平板)、成本低廉等突出优点^[9]。其中,非稀土激活的玻璃闪烁体更是凭借其激活离子来源广泛、价格低廉、通常具有宽带发射性能等优势,展现出巨大的发展潜力。

本文旨在对非稀土激活无机玻璃闪烁体的研究现状进行系统梳理(本文仅梳理了X射线激发玻璃闪烁体)。首先概述其发光机理,随后重点评述三大类材料体系的研究进展:(1)过渡金属离子

(如 Mn^{2+} 、 Cu^{+} 、 Sn^{2+})掺杂玻璃;(2)氧化物纳米晶复合玻璃闪烁体;(3)新型钙钛矿玻璃闪烁体(铅基、锰基、铜基)。最后,总结当前面临的关键科学问题与技术挑战,并展望未来发展趋势。

2 闪烁玻璃的发光机理

玻璃闪烁体通过对入射X射线高能光子进行能量转换,将其转变为紫外或可见光范围内的低能光子,再由PMT、SiPM或CCD等光电器件探测并转换为电信号,最终实现图像输出^[10]。该过程的核心在于X射线与闪烁体之间的相互作用机制^[11-12]。X射线光子主要通过光电效应和康普顿散射与玻璃基质组成原子及激活剂发生作用。当X射线能量足够高时,其光子可从原子最内层(如K壳层)激发出光电子(图1(a)),其能量可表示为 $E_e=h\nu-E_b$,其中 E_b 为电子在该壳层中的结合能。光电子逃逸后会产生电离空位,该空位可捕获自由电子。随后原子中剩余的壳层电子进行重组并可能被快速填充,从而产生一个或多个特征X射线光子。这些射线通常进一步通过光电效应被吸收。光电效应是低能X射线(低于数百千电子伏特)与吸收材料相互作用的主要过程,其作用强度与吸收材料的有效原子序数成正比。吸收材料对X射线的吸收系数(α)满足关系式 $\alpha \propto Z^4/E^3$,其中 Z 为原子序数, E 为辐射能量^[8]。图1(b)中X射线与玻璃闪烁体相互作用时,会通过光电效应或康普顿散射产生光电子或散射电子。这些带电粒子穿越材料时会进一步激发更多热电子和空穴,形成类似“雪崩效应”的现象。随着持续弛豫,它们最终会降低至某一阈值,不再引发电离和激发。大量电子和空穴积聚在玻璃基质导带底部和价带顶部,最终向激活剂迁移^[11]。

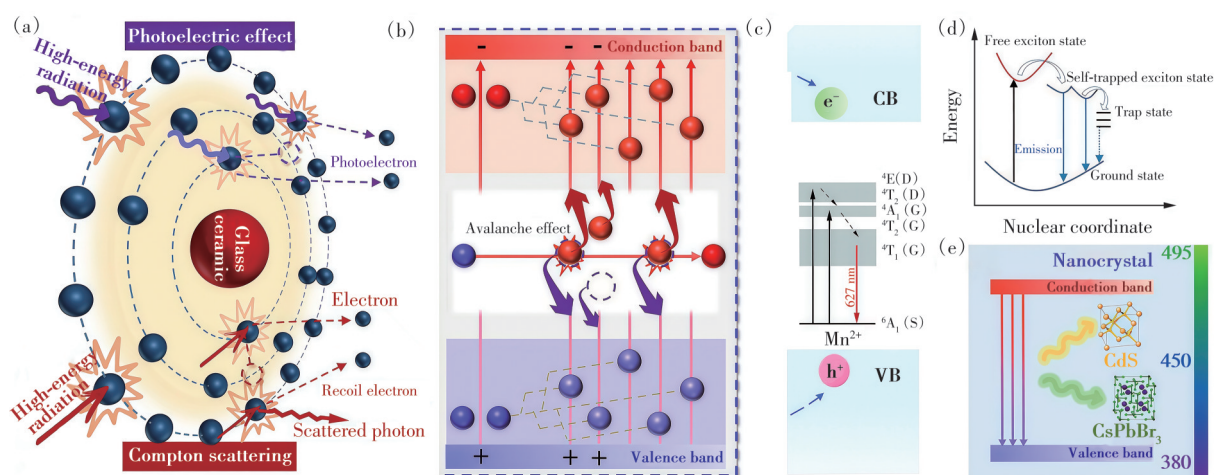


图1 玻璃闪烁体的闪烁机理。(a)高能射线(X射线)通过光电效应、康普顿散射和电离作用使原子激发产生高能电子^[11];(b)被激发的高能电子穿过材料,进一步激发出更多热电子与空穴,类似“雪崩效应”^[11];发射过程:大量热电子与空穴经历弛豫过程,富集至玻璃基质导带底与价带顶,最终迁移至(c)过渡金属(锰基)元素^[13]或(d)无铅钙钛矿(Cs₃Cu₂X₅)^[14]或(e)纳米晶体^[11]引入的能级,在此发生快速辐射复合,产生特征能量发光

Fig.1 Scintillation mechanism of glass scintillators. (a) High-energy rays (X-ray) eject high-energy electrons from atoms through photoelectric effect, Compton scattering and ionization^[11]. (b) The ejected high-energy electrons pass through the material, further stimulating more hot electrons and holes, similar to the “avalanche effect”^[11]. Emission: a large number of hot electrons and holes then undergo relaxation, enrich to the bottom of the conduction band and the top of the valence band of the glass matrix, and finally migrate to the energy level introduced by (c) transition metal (Mn-based) elements^[13] or (d) lead-free perovskite (Cs₃Cu₂X₅)^[14] or (e) the nanocrystal^[11], where rapid radiative recombination occurs to generate luminescence of characteristic energy

对于过渡金属离子掺杂的玻璃闪烁体,它的X射线激发发光为复杂的级联能量转换过程:玻璃基质(尤其含Gd、La等重元素)高效吸收X射线,通过光电效应与康普顿散射产生大量高能电子-空穴对;载流子热化后在玻璃网络中迁移,能量主要通过两种途径传递至发光中心——直接被激活离子(Mn²⁺、Cu⁺、Sn²⁺)俘获,或经基质或敏化剂(如Gd³⁺)间接转移^[13]。激发态的离子经非辐射弛豫后发生辐射跃迁,发射特征可见光:Cu⁺基于3d⁹4s¹→3d¹⁰跃迁产生蓝绿宽带发射^[16];图1(c)展示的Mn²⁺ ⁴T₁→⁶A₁的d-d跃迁发射红光^[17];Sn²⁺则经由³P₁-¹S₀跃迁通常发出蓝光^[18]。该过程的效率受基质组成(如低声子能量的氟氧化物玻璃可以提升效率)、离子浓度及玻璃中缺陷与陷阱的显著影响,后者在特定条件下甚至可通过能量释放补偿热猝灭,赋予材料优异的热稳定性^[19-20]。

在钙钛矿掺杂玻璃闪烁体中,X射线激发下玻璃基质与钙钛矿纳米晶共同吸收高能光子并产生电子-空穴对,而后续能量传递路径与发光中心因材料类型而异。铅基钙钛矿(如CsPbBr₃)主要是通过光电效应所产生的高能量载流子(即热电子和空穴),通过与晶格中的声子相互作用耗散能

量(热化),热化的电子(导带底)与空穴(价带顶)重新结合,发出依赖于带隙能量的特征荧光^[21]。图1(d)显示无铅钙钛矿(铜基和锰基)的发射来源于自陷激子(Self-trapped exciton, STE)发射——即激子在晶格中自发局域化并伴随晶格畸变,形成束缚态电子-空穴对,激子的强约束效应和局域晶格畸变导致了多个自陷激子的产生^[14-23]。这些激子进一步定位在晶格中,难以解离成自由电子和空穴,从而提高了电子-空穴对的辐射复合概率和发光效率。STE独特的非自吸收特性、纳米晶体(如Cs₃Cu₂X₅)的零维结构以及它们在玻璃基体内原位沉淀而产生的优异结晶度共同促成了室温下的高效率^[22]。整个过程中,玻璃网络不仅为钙钛矿纳米晶提供稳定包覆与高透明度,其固有缺陷与陷阱还可通过存储与释放载流子调控发光动力学,并在一定条件下赋予材料反热猝灭等特殊性能。

化学合成纳米晶体展现出卓越的发光特性,包括高光致发光量子产率(PLQY≈100%)和短发射寿命(约纳秒量级)^[24-25],使其成为闪烁体应用的理想选择。纳米晶体掺杂玻璃闪烁体有效解决了纳米晶体在溶液中团聚的问题,在保持稳定性的

同时提供了优异的光学性能。图 1(e)展示了当 X 射线入射至纳米晶体激活玻璃闪烁体时,能量被吸收并转移至纳米晶体。随之产生的高能电子-空穴对会快速热化至导带底和价带顶。可见光发射源自纳米晶体导带与价带边缘的电子-空穴复合。与稀土的固定轨道跃迁不同,通过调控带隙能量可实现纳米晶体激活玻璃发光颜色的可控调节^[11-21]。纳米晶闪烁体的发光过程主要受三重激发态主导,这种纳米晶体特有的态具有大吸收截面和快速辐射输出特性^[15-27],从而驱动整个闪烁过程。

3 玻璃组成的设计思路

玻璃闪烁体作为辐射探测与成像领域的核心功能材料,其性能优劣高度依赖于玻璃基质中各组分的协同设计与精准调控。基于玻璃网络结构理论,可将玻璃组分系统性地划分为网络形成体、网络中间体与网络外体三大类,三者过渡金属离子掺杂玻璃、氧化物纳米晶复合玻璃及新型钙钛矿玻璃闪烁体中各司其职,通过调控玻璃网络拓扑结构、结晶动力学、离子迁移行为及发光中心微环境,共同决定了材料的成核生长机制、发光量子效率(PLQY)、辐射响应特性与环境稳定性。具体而言,网络形成体如 SiO_2 、 B_2O_3 、 TeO_2 、 P_2O_5 、 GeO_2 等作为玻璃骨架的构建单元^[28-29],能够独立形成连续的三维或二维非晶网络结构,为发光中心提供刚性环境。玻璃基质体系复杂多样,通常以质量占比最高的网络形成体命名,可分为单一网络形成体体系与多网络形成体体系。单一体系主要包括硅酸盐、硼酸盐、磷酸盐、碲酸盐和锗酸盐等;多网络形成体体系则包括硅硼酸盐、硼磷酸盐、锗硼酸盐等,通过组分互补优化性能。其中,硅酸盐玻璃具有高熔点、低声子能量的特点,但 SiO_2 转变温度极高,需引入辅助添加剂。例如,通过 $[\text{SiO}_4]$ 四面体与 $[\text{BO}_3]/[\text{BO}_4]$ 结构单元的交联,精准调控玻璃转变温度。值得注意的是, B_2O_3 的引入不仅降低了体系黏度,更重要的是通过 B/Si 量比的提升促使玻璃网络拓扑结构由致密三维向疏松二维转变^[29-30],弱化了玻璃对迁移离子的束缚能,从而加速热处理后纳米晶的成核与生长动力学。火花等离子体烧结制备技术(SPS)同样借助 B_2O_3 - SiO_2 网络的低熔点特性,在低温烧结条件下实现纳米晶的快速致密化封装,有效抑制晶体结构的分解。硼酸盐玻璃熔点较低,声子能量较高;

硅硼酸盐体系介于两者之间,综合性能优良,具备良好的物化稳定性、较高的发光中心溶解能力及较低的成本,因此发展迅速、应用广泛。磷酸盐与碲酸盐玻璃熔融温度更低,但磷酸盐稳定性较差,碲酸盐玻璃虽密度较高但成本昂贵,限制了其应用。锗酸盐玻璃密度较高,但熔融温度偏高,也影响了其推广。

网络外体(网络修饰体)如 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Cs^+ 等阳离子,虽无法独立成玻,却通过破坏桥氧键或提供电荷补偿,可根据离子场强($\text{IFS}=\text{Z}/r^2$)深刻影响着玻璃网络的解聚程度与活化体积,进而调控功能相的结晶行为与发光中心的局域对称性^[29]。高 IFS 阳离子(Mg^{2+})进入四面体配位,强化网络并降低离子迁移率。低 IFS 阳离子(Ca^{2+} 和 Sr^{2+})破坏 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 桥氧结构,形成弱键,破坏致密网络并促进结晶。然而, Ba^{2+} 虽 IFS 低,但离子势过低无法相分离,抑制结晶^[31-32]。

网络中间体如 MgO 、 ZnO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 SnO 等兼具网络修饰与网络形成的双重属性,其配位环境的可变性(四配位时作为网络形成体,六配位时充当网络外体)使其成为调控玻璃结构刚柔性及结晶动力学的“智能开关”。例如,低浓度时 Mg^{2+} 以 $[\text{MgO}_6]$ 八面体形式存在于网络间隙,通过断裂 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键引入非桥氧,促进晶体形成;当浓度达到某个特定阈值后,部分 Mg^{2+} 转为四配位 $[\text{MgO}_4]$ 进入硅氧网络,重新连接断裂的 $[\text{SiO}_4]$ 单元,导致网络刚性增强、离子迁移率下降,反而不利于晶体生长^[33-34]。

网络形成体通过构建刚性骨架与调控拓扑维度,决定了闪烁体的基础热稳定性与结晶窗口;网络外体通过解聚网络、提供活化体积及调控价态,主导了功能晶相的成核密度与析出速率;网络中间体则凭借配位灵活性,在优化离子迁移路径、稳定晶体微区及提升光提取效率方面发挥精细调控作用。三者协同作用为新一代高分辨、柔性、智能化辐射探测技术奠定了坚实的材料科学基础。

4 氧化物纳米晶复合无机玻璃闪烁体

氧化物纳米晶掺杂玻璃闪烁体通过将高发光效率的纳米晶体原位析出于透明玻璃基体中,兼具晶体材料优异的发光性能与玻璃材料良好的可加工性,近年来在 X 射线探测与成像领域展现出

重要的应用潜力。以下从材料体系发展、制备工艺创新及关键科学问题等方面系统阐述其研究进展。表 1 总结了近年来氧化物纳米晶玻璃闪烁体的性能对比。

表 1 氧化物纳米晶玻璃闪烁体性能对比

Tab. 1 Performance comparison of oxide nanocrystal glass scintillators

Glass composition(mol)/%	Luminescent center	Density/(g·cm ⁻¹)	Decay time/ms	Transmittance/%	XEL integral intensity (BGO)/%	Ref.
Li ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -Gd ₂ O ₃ -Ta ₂ O ₅	Gd ₃ TaO ₇ , M'-type GdTaO ₄		1.93(μs)	—	—	[35]
40Bi ₂ O ₃ -60GeO ₂	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	6.87	—	75	—	[36]
30BaO-(70-x)TiO ₂ -xGeO ₂ (x=50,55,60)	Ba ₂ TiGe ₂ O ₈		4, 67, 865	40	10	[37-38]
40BaO-20TiO ₂ -40SiO ₂	Ba ₂ TiSi ₂ O ₈		(130±50) μs	—	10	[39]
20SrO-20BaO-40Nb ₂ O ₅ -20P ₂ O ₅	Sr _{0.5} Ba _{0.5} Nb ₂ O ₆		—	—	10	[40]
13TiO ₂ -xZnO-17Al ₂ O ₃ -(70-x)B ₂ O ₃ (x=17,26,35)	anatase and rutile		12(μs)	—	10	[41]
64SiO ₂ -23Ga ₂ O ₃ -13Li ₂ CO ₃	LiGa ₅ O ₈					[42]

锆酸盐体系因重金属 Bi、Ge 元素赋予的高密度特性而备受关注。2009 年,罗马尼亚国家材料物理研究所 Polosan 等采用熔融淬冷法制备 Bi₄Ge₃O₁₂(BGO)微晶玻璃,发现其在紫外激发下荧光强度较 Bi₂O₃-GeO₂玻璃体系提升一个数量级,晶粒尺寸约 70 nm,首次在紫外光激发下观测到纳米晶复合玻璃的光致发光现象,验证了锆酸盐玻璃可控析晶的可行性^[43]。该工作为后续研究奠定了重要基础,表明通过热处理调控可实现纳米晶在玻璃基体中的弥散分布,为纳米晶化增强发光提供了早期证据。2017 年,华南理工大学周时凤团队提出“过冷态原位相变调控”新策略,制

备了 Gd₃TaO₇ 及 M' 型 GdTaO₄ 纳米晶复合玻璃光纤^[35],解决了传统方法中过渡金属掺杂易偏析的难题,为开发高紧凑性和宽带光子采集能力(从 X 射线到紫外光)的稳健光学检测单元提供了新机会。在此基础上,该团队通过多相转变机制构筑无色 BGO 玻璃光纤,将 483 nm 处透过率从 11.65% 提升至 73.17%(提高 6.28 倍),归因于低价态 Bi 元素的溶解与纳米晶化协同作用(图 2(a)、(b)),该材料密度高达 6.87 g/cm³。Eu³⁺掺杂后,光纤在 X 射线激发下灵敏度提升 19.48 倍,且发射强度与 X 射线功率呈优异线性关系^[36]。日本学界在无稀土闪烁体方向持续深入探索。奈良科学技术

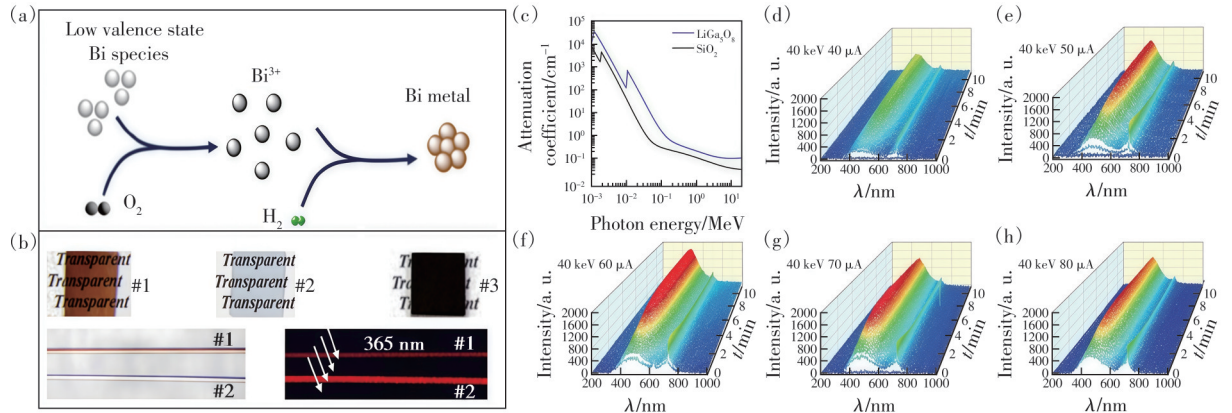


图 2 (a)BGO 玻璃颜色变化物理机制示意图;(b)照片展示了原始态、纳米结构态及还原态 BGO 玻璃样品的颜色,在自然光和 365 nm 激发下对成品和无色 BGO 玻璃纤维进行光学显微镜成像^[36];(c)LiGa₅O₈ 晶体与二氧化硅玻璃衰减系数;(d)~(h)由不同管电流的连续 X 射线源激发的照射时变强化光谱,X 射线的能量固定在 40 keV^[42]

Fig.2 (a)Schematic illustration of the physical mechanism of the color change of BGO glass samples. (b)Photographs exhibit the color of as-made, nanostructured and reduced BGO glass samples, optical microscopy image of as-made and colorless BGO glass fiber under natural light and excitation with 365 nm light. (c)Attenuation coefficient of LiGa₅O₈ crystal and SiO₂ glass. (d)–(h)Irradiation time-dependent RL spectra excited by continuous X-ray source with different tube current, the energy of X-ray is fixed at 40 keV^[42]

大学 Yanagida 团队通过熔融温度调控(1 250 °C 与 1 550 °C 对比)和热处理后析出 $\text{Ba}_2\text{TiGe}_2\text{O}_8$ 晶相,使 X 射线激发闪烁效率增强数十倍,研制的 $\text{Ba}_2\text{TiGe}_2\text{O}_8$ 纳米晶复合玻璃在脉冲 X 射线激发下表现出独特的发光动力学行为,其衰减过程包含快成分(15~42 ns)与慢成分(182~603 ns)两个时间尺度,为时间分辨探测提供了可能^[37]。同期,该团队还研究了 $\text{BaO-TiO}_2\text{-SiO}_2$ 体系,证实 $\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ 晶相体积分数与闪烁强度直接相关,样品因体相结晶而表现出最显著的增强效应;随着玻璃中 SiO_2 含量降低,析晶由表面析晶向体相析晶转变,晶化率及 PLQY 随之提升,X 射线激发发光(XEL)强度与晶化率呈正相关关系,且对 X 射线剂量保持优异线性响应,实验过程中未观测到辐照诱发新色心,表明其良好的辐射稳定性^[38-39]。此外,该小组制备了含 $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ 纳米晶的 SBNP 玻璃陶瓷,发现其在 T_g+20 °C 至 T_p 温度区间热处理后,X 射线激发的闪烁与热释光强度均显著优于玻璃基体,且热释光峰位高于 250 °C,有效避免了室温余辉干扰。但指出其存在 XEL 强度较弱及过度析晶导致失透的技术瓶颈^[40]。除上述体系外,研究人员对多元氧化物纳米晶玻璃闪烁体进行了广泛探索。Usui 等通过精确调控硼酸盐玻璃组成,成功诱导析出金红石相与锐钛矿相 TiO_2 纳米晶,并检测到寿命达数十微秒的 XEL 信号,揭示了晶体结构对发光动力学的调控作用^[41]。2021 年,周时凤团队在玻璃基体中原位析出 LiGa_5O_8 纳米晶,利用氧空位(V_O)与 GaLi 反位缺陷的辐射跃迁比(I_{496}/I_{718})与 X 射线剂量率的线性关系(图 2(c)~(h)),首次实现了 40 keV X 射线的自校准剂量率检测, $I_{\text{blue}}/I_{\text{red}}$ 比值随剂量率从 1.91 mSv/h 增至 3.30 mSv/h 单调上升,突破了传统探测器需外部标定的限制,并通过“熔芯法”制备具有蓝、红双色发光特性的闪烁光纤^[42]。基于该特性构建的自校准辐射探测装置成功实现在线监测功能演示,但研究同时揭示材料存在“亮烧(Bright burn)”与辐照着色等稳定性问题,这归因于 Ga^{3+} 离子在辐照环境下易发生变价及氧空位缺陷积累。氧化物纳米晶复合玻璃的闪烁性能强烈依赖于其中析出纳米晶的种类与含量。提高晶化率通常有助于增强 XEL 强度,然而受限于晶体本身较低的光产额,该类材料的综合性能仍有待提升。对于铋锗酸盐体系,需关注热处理中 Bi 离子变价及团簇导致的玻

璃失透现象。此外,部分材料存在老化与辐照着色等行为,其机理尚不明确,亟需从理论与实验层面深入研究,以提升材料的辐照稳定性。

5 过渡金属离子掺杂无机玻璃闪烁体

过渡金属离子掺杂无机玻璃闪烁体是一类具有重要应用前景的辐射探测与成像材料,通过引入 Mn^{2+} 、 Cu^+ 、 Sn^{2+} 等发光中心,结合玻璃基质可调、易成型、成本低等优势,在 X 射线成像、高能物理探测及极端环境传感等领域展现出独特潜力。表 2 归纳了已报道的过渡金属离子掺杂玻璃闪烁体的关键性能参数。

5.1 锰掺杂玻璃闪烁体

近年来, Mn^{2+} 掺杂玻璃闪烁体凭借宽带发射、成本低廉及大尺寸制备优势成为辐射探测领域的研究热点。 Mn^{2+} 的 $3d^5$ 电子组态发生 ${}^4\text{T}_1({}^4\text{G}) \rightarrow {}^6\text{A}_1({}^6\text{S})$ 跃迁,可产生 500~650 nm 的可调宽带发射,与硅探测器匹配良好。在空气中熔制,Mn 常以 $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}$ 共存, Mn^{3+} 的宽带吸收会降低透过率和发光效率。引入 Al、SnO 等还原剂,可将 Mn^{3+} 有效还原为 Mn^{2+} ,使 XEL 强度提升数倍。2022 年,浙江师范大学郭海团队率先在铝硼酸盐玻璃体系中取得突破,通过传统熔融淬火法制备了 Mn^{2+} 激活铝硼酸盐玻璃闪烁体^[13]。该工作创新性地引入 Gd^{3+} 作为敏化剂,构建了高效的 $\text{Gd}^{3+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ 能量传递通道(传递效率达 96.4%),并采用 Al 粉还原法在空气气氛下将 Mn^{3+} 有效还原为 Mn^{2+} ,使内量子产率从 3.4% 大幅提升至 35.9%,XEL 强度达到商业化 BGO 单晶的 42.2%。该研究首次证实了 Mn^{2+} 激活玻璃闪烁体的应用潜力,但其光产额和高温稳定性仍有较大提升空间。针对上述瓶颈,2025 年,兰州大学靳志文课题组提出锰卤化物多面体诱导原位析晶的新策略(图 3(a)),成功开发出 $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9:3\%\text{MnBr}_2$ 微晶玻璃闪烁体^[44]。该工作通过构建 $[\text{MnBr}_4]^{2-}$ 四面体和 $[\text{MnBr}_6]^{4-}$ 八面体发光中心(图 3(a)),显著降低了晶格畸变与缺陷密度,使声子能量降至 66.59 meV,热猝灭激活能达到 52.75 meV,从而在 400 °C 极端高温下仍保持可探测的 X 射线响应能力。相比传统 Mn^{2+} 掺杂玻璃,该微晶玻璃的光产额提升 12.7 倍(3 271 photons/MeV),空间分辨率高达 11.2 lp/mm,且自吸收效应显著抑制(斯托克斯位移 258 nm),成像均匀性大幅改善。该体系在 100% 湿度、>100 Gy 辐照及 60 mW 强光照等极端条件下表现出优异的

表 2 过渡金属离子掺杂无机玻璃闪烁体性能对比

Tab. 2 Performance comparison of transition metal ion-doped inorganic glass scintillators

Glass composition(mol)/%	Luminescent center	Decay time/ms	Transmittance/%	Light yield/(ph·MeV ⁻¹)	Spatial resolution/(lp·mm ⁻¹)	XEL integral intensity (BGO)/%	Ref.
60B ₂ O ₃ -(20-y/2)Al ₂ O ₃ -yAl-(20-x/2)Gd ₂ O ₃ -xMnCO ₃	Mn ²⁺	8.54	75~80			42.2	[13]
42B ₂ O ₃ -16Al ₂ O ₃ -10CaO-1Na ₂ CO ₃ -xMnBr ₂ -15NaBr-1SnO(X=0,0.5,1.0,3.0,5.0,7.0)		2.54	86.4	3 271	11.2	—	[44]
SiO ₂ -CaF ₂ -NaF-Al ₂ O ₃ -yMnCO ₃ -xAl		14.4	87.6		>20	83.6	[17]
25Na ₂ O-25Al ₂ O ₃ -10B ₂ O ₃ -40SiO ₂							[45]
5SiO ₂ -35B ₂ O ₃ -30La ₂ O ₃ +xCuO(x=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5)							[20]
70SiO ₂ -7Al ₂ O ₃ -16SrF ₂ -7GdF ₃ -xCu ₂ O-yAl(x=0.05,0.1,0.15,0.2,0.25,0.3;y=0.5,0.55,0.58,0.60)	Cu ⁺	2.69	80.4@547 nm		20	176	[46]
55SiO ₂ -(20-y)Al ₂ O ₃ -15CaF ₂ -10NaF-xCuO _{1/2} -yAl		42.9(μs)	90		20	141	[47]
GS-0.3Cu-0.75Al		43.7(μs)	89.9		20	425	[16]
xSnO-(60-x)ZnO-40B ₂ O ₃		2.9~4.2(μs)					[48]
1.0SnO-xZnO-(100-x)P ₂ O ₅ (x=58,60,65,70)	Sn ²⁺	(Pulse X-ray induced)					[49]
Sn ²⁺ -doped high-density gadolinium glasses		11(μs)	85		14	34.4	[18]

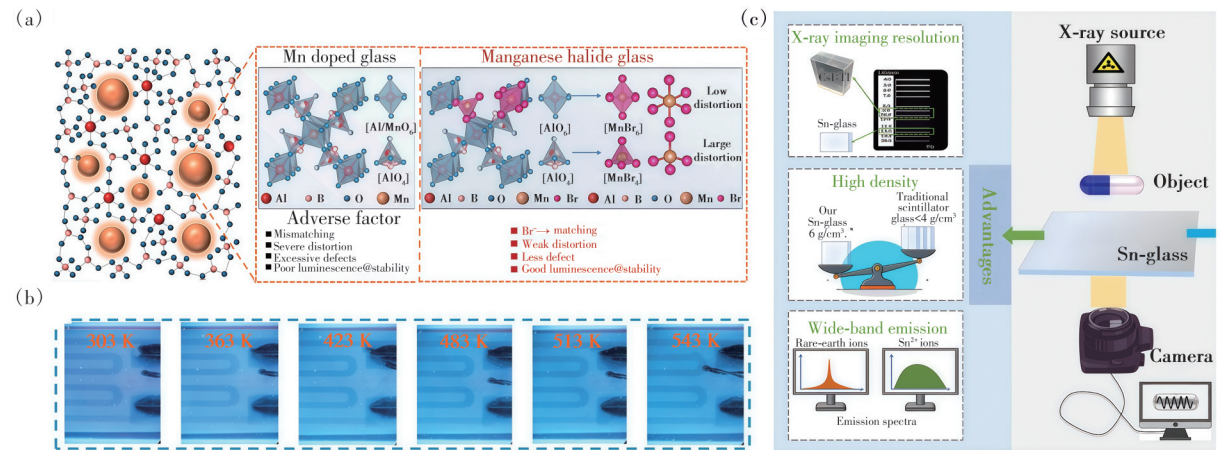


图 3 (a) 锰掺杂玻璃及卤化锰玻璃的性能示意图^[44]; (b) 加热芯片在不同温度(303~543 K)下的 X 射线图像(Cu 掺杂玻璃)^[16]; (c) 用于 X 射线成像的高密度 Sn²⁺ 掺杂玻璃闪烁体示意图^[18]

Fig.3 (a)Schematic diagram illustration of the properties for Mn doped glass , and manganese halide glass^[44]. (b)The X-ray images of the heating chip at different temperatures (303~543 K) (Cu doped glass scintillators)^[16]. (c)Schematic diagram of the high-density Sn²⁺ doped glass scintillators for X-ray imaging^[18]

环境稳定性。同年,郭海团队进一步聚焦高温 X 射线成像需求,在氟铝硅酸盐玻璃中实现了反常热猝灭效应^[17](即发光强度随温度升高不降反升的独特现象)。通过优化 MnCO₃与还原剂 Al 的共掺浓度,样品的 XEL 强度提升至 BGO 的 83.6%,并在 393 K 时展现出“热增强”现象(强度为 303 K

时的 104%),573 K 时仍维持初始强度的 61%,远优于 BGO(19%)和传统 Mn²⁺掺杂体系。该研究揭示了陷阱能级的热补偿效应是抗热猝灭的关键机制,并实现 20 lp/mm 的超高成像分辨率。此外,该玻璃闪烁体具有良好的辐照可恢复性与循环稳定性,经 165 min X 射线照射后通过热处理即可恢复

光学性能。

综上所述,锰掺杂玻璃闪烁体研究从初期的发光效率提升,发展到通过卤素配位工程与微晶玻璃化实现极端环境适应性,再到利用热补偿效应突破高温稳定性瓶颈,逐步构建起涵盖材料设计、性能优化与多功能集成的完整研究体系,为高分辨辐射探测与极端环境成像提供了新的材料范式。

5.2 铜掺杂玻璃闪烁体

铜掺杂玻璃闪烁体作为辐射探测材料的研究近年来取得显著进展。该体系利用 Cu^+ 离子的 $3\text{d}^9 4\text{s}^1 \rightarrow 3\text{d}^{10}$ 宽带发射 (400~550 nm 的蓝绿宽带发射) 特性,具备荧光寿命短 (微秒级)、无毒、成本低等优势,在 X 射线成像与高能粒子探测领域显示出应用潜力。早期研究主要集中于发光机理探索。2018 年,日本京都工艺纤维大学 Hashikawa 等首次报道了 Cu 掺杂铝硼硅酸盐玻璃的辐射光致发光 (RPL) 现象,发现 0.005% (mol) Cu 玻璃在 γ 射线辐照后 Cu^+ 发光强度增强约 4 倍,剂量线性响应达 0.5 kGy,但 XEL 强度较弱^[45]。2019 年,中国科学院上海光机所陈丹平团队采用 Si 粉末作为还原剂,在高温熔融过程中将 Cu^{2+} 还原为发光的 Cu^+ 离子,发现 Cu^+ 单体与 Cu^+-Cu^+ 离子对共存并存在能量传递:随着 CuO 浓度增加,能量从孤立 Cu^+ 向 Cu^+-Cu^+ 离子对转移,显著影响了光致发光和射线发光^[20]。该研究为铜掺杂玻璃的发光机理提供了重要的理论基础,证实了其作为闪烁体的可行性,但闪烁性能尚未与商用晶体进行量化对比。2021 年,日本奈良先端科学技术大学院大学采用 SPS 技术制备 Cu 掺杂石英玻璃^[50],虽 XEL 强度较低,但热释光 (TSL) 剂量响应线性范围达 0.1~1 000 mGy,检测限 0.1 mGy,为个人剂量计应用提供了新思路。2023 年起,浙江师范大学郭海课题组采用 Si_3N_4 作为还原剂,在空气氛围中成功制备了 Cu⁺ 掺杂的玻璃,其 X 射线激发发光强度达到商用 BGO 晶体的 37.8%,研究发现低温热处理 (450 °C) 可显著增强其发光强度,并将内量子效率提升至 74.2%;在 573 K 高温下,其发光强度仍能保持室温下的 62.5%,展现了优异的热稳定性^[47-51]。2024 年,郭海团队进一步引入 Gd^{3+} 敏化剂和 Al 还原剂,更有效地抑制了 Cu^{2+} 的生成,开发出 Cu⁺ 掺杂氟铝硅酸盐玻璃。利用 Gd^{3+} 到 Cu^+ 的能量转移^[46],XEL 强度提升至 BGO 的 176%,空间分辨率达 20 lp/mm,2 mm

厚度下 X 射线衰减效率达 99.99%,标志着 Cu^+ 玻璃综合性能接近商用水平。2025 年,该团队取得突破性进展^[16-19],通过氧氟玻璃体系设计,结合重元素 Ba 增强射线吸收与陷阱能级调控,实现 XEL 强度达 BGO 的 425%。样品呈现反常热猝灭特性 (图 3(b)),423 K 时 XEL 强度提升至 303 K 的 155%,573 K 仍保持 63%,显著优于 BGO (1.5%) 和 CsI:Tl (0.6%),同时实现 24 lp/mm 高分辨 X 射线成像,并展示出水下成像能力。

纵观研究脉络,Cu 掺杂玻璃闪烁体的发展呈现三大趋势:(1) 还原剂优化:从 CO 气氛、Si 粉到 Al/ Si_3N_4 ,实现 Cu^+ 高效稳定掺杂;(2) 能量传递机制:通过 Gd^{3+} 敏化与陷阱能级调控,光输出提升 8 倍以上;(3) 抗热猝灭设计:利用氧氟玻璃低声子能与陷阱补偿效应,突破高温应用瓶颈。未来研究需在提升光输出效率、优化制备工艺及长期稳定性方面持续深入,推动实用化进程。

5.3 锡掺杂玻璃闪烁体

Sn^{2+} 的 $5\text{s}^2 \rightarrow 5\text{s}^1 5\text{p}^1$ 跃迁可提供 330~670 nm 的可调宽带发光,寿命较短,锡掺杂玻璃闪烁体作为新型辐射探测材料,近年来取得了显著研究进展。2015 年,日本京都大学 Masai 课题组系统研究了 Sn^{2+} 掺杂锌硼酸盐玻璃的发光特性^[48],首次揭示了熔制气氛对 Sn^{2+} 价态的关键影响,发现在氩气气氛下熔制可将 Sn^{2+} 保留率提升至 45% (空气气氛仅 14%),相应的 PLQY 达 60%。该研究通过 ^{119}Sn 穆斯堡尔谱证实玻璃中存在多种 Sn^{2+} 配位环境,其光学吸收边红移与 Sn^{2+} 浓度直接相关。X 射线激发闪烁研究表明,闪烁强度与 Sn^{2+} 含量呈线性关系,为后续开发奠定了基础。2017 年,Torimoto 与 Masai 等进一步深入探究了 Sn^{2+} 掺杂磷酸锌玻璃中化学组成对发光性能的作用机制,研究发现 $\text{ZnO}/\text{P}_2\text{O}_5$ 比例显著影响闪烁效率: P_2O_5 富集玻璃因磷酸盐亚网络结构提供更丰富的 Sn^{2+} 占位环境,表现出更宽的发射带和更高的 PLQY;而 ZnO 富集玻璃虽密度增大,但非辐射弛豫增强导致闪烁强度降低。该工作明确了玻璃网络结构通过调控 Sn^{2+} 局域配位场和能量传递路径来主导发光特性,为优化玻璃组分提供了理论指导^[49]。2025 年,哈尔滨工程大学任晶团队在 Sn^{2+} 掺杂高密度玻璃领域取得突破性进展 (图 3(c))^[18],该团队开发的 Sn^{2+} 掺杂钨硼硅酸盐玻璃实现了高密度 ($\approx 6.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),X 射线吸收系数与 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 、CsI:Tl 等传统晶体相

当, 600 μm 厚度即可衰减 99% 的 50 keV 光子。该材料通过 $\text{Gd}^{3+} \rightarrow \text{Sn}^{2+}$ 能量传递机制, 获得 75.1% 的 PL 量子产率和 410 nm 宽带发射 (330~670 nm), PL 衰减时间仅 11 μs , 更关键的是实现了 14 lp/mm 的 X 射线成像空间分辨率, 达到高密度玻璃中最高纪录, 同时兼具优异辐射稳定性 (循环 10 次衰减 < 5%) 和防水性能, 其制备成本仅为 2.90 美元/ cm^3 , 展现出显著的产业化优势。

系列研究表明, Sn^{2+} 掺杂玻璃闪烁体的性能提升主要依赖于三个核心策略: 一是通过惰性气氛熔制和还原性原料抑制 Sn^{4+} 生成, 提高 Sn^{2+} 保留率; 二是利用 Gd^{3+} 等重元素增强 X 射线吸收并构建高效能量传递通道; 三是优化玻璃网络结构 (硼硅酸盐/磷酸盐比例) 以调控 Sn^{2+} 局域环境, 平衡发光效率与衰减特性。当前研究已从基础发光机理探索迈向高性能器件应用, 在医疗 CT、安检成像等领域展现出替代传统晶体闪烁体的巨大潜力。

此外, 过渡金属离子掺杂闪烁体的衰减寿命长 (微秒级) 是固有物理属性, 在 MHz 级高频探测

中难以规避, 无法与 Ce^{3+} 等纳秒级快闪烁体竞争。针对该短板, 其应用策略在于“扬长避短”: 聚焦于对响应速度不敏感, 但需要宽带发射 (匹配硅探测器)、高稳定性、低成本及易加工的大面积静态或积分成像领域, 如部分工业无损检测与安检, 通过精准定位应用场景来发挥其独特优势。

6 新型钙钛矿玻璃闪烁体

钙钛矿材料因其高 PLQY、高 X 射线吸收系数、发光波长可调及超快衰减等优异性能, 被视为新一代高性能闪烁体材料的有力候选。然而, 其本征稳定性较差限制了实际应用。将其与无机玻璃复合, 在玻璃基质中原位生长钙钛矿结构纳米晶作为发光中心, 可显著提升材料的稳定性, 并兼具钙钛矿优异的光电特性与玻璃良好的机械与化学稳定性。表 3 给出了新型钙钛矿玻璃闪烁体的性能参数对比。

2018 年, 刘小钢团队在 *Nature* 上报道了钙钛矿量子点闪烁体, 实现了 13 nGy/s 的极低检测限与小于 100 ns 的超快衰减, 展现出其在低剂量、快

表 3 新型钙钛矿玻璃闪烁体性能对比
Tab. 3 Performance comparison of novel perovskite-based glass scintillators

Glass composition (mol)/%	Luminescent center	Decay time/ ns	Light yield/ (ph·MeV ⁻¹)	Spatial resolution/ (lp·mm ⁻¹)	XEL integral intensity (BG0)/%	Ref.
50B ₂ O ₃ -10CaO-5K ₂ O-10ZnO-5Cs ₂ O-10(PbBr ₂ /PbCl ₂)-10(NaCl/NaBr)	CsPb(Br/Cl) ₃ (425~530 nm)	40.8	460		0.17 (XEL intensity)	[21]
74.8TeO ₂ -4.4M ₂ O ₃ -8.8ZnO-4CsBr-8PbBr ₂	CsPbBr ₃ (516~540 nm)	29			10 (XEL intensity)	[52]
0.5AgCl (M=B, Al, Ga, In)	CsPbBr ₃ (520 nm)	15.2	4 100		50	[54]
40SiO ₂ -35B ₂ O ₃ -3Na ₂ CO ₃ -9ZnO-6Cs ₂ CO ₃ -5PbBr ₂ -2NaBr	CsPbBr ₃ :Eu ³⁺ (525 nm)	49.17				[55]
75(B ₂ O ₃ -SiO ₂ -ZnO-Al ₂ O ₃ -MgO)-25(Cs ₂ CO ₃ -PbBr ₂ -NaBr)-0.6Eu ₂ O ₃	CsPbBr ₃ :Eu ³⁺ (530 nm)	6.78	10 100	15		[56]
35B ₂ O ₃ -35SiO ₂ -12ZnO-9Cs ₂ CO ₃ -6PbBr ₂ -3NaBr-1.5Eu ₂ O ₃	CsPbBr ₃ :Lu ³⁺ (520 nm)	27		16.8		[57]
35B ₂ O ₃ -35SiO ₂ -12ZnO-9Cs ₂ CO ₃ -6PbBr ₂ -3NaBr-1.5Lu ₂ O ₃	CsPbBr ₃ (≈520 nm)	—		12.7	9	[58]
(35-X)SiO ₂ -28B ₂ O ₃ -22ZnO-2K ₂ O-XGd ₂ O ₃ -10CsBr-3PbBr ₂ (X=0, 2, 4, 6)	CsPbBr ₃ (490~520 nm)	21.43		17.5		[59]
B ₂ O ₃ -SiO ₂ -ZnO-Cs ₂ CO ₃ -PbBr ₂ -NaBr	CsMnCl ₃ (540/650 nm)	370.3 (μs)	13 400	4		[23]
40B ₂ O ₃ -19Al ₂ O ₃ -10CaO-5Cs ₂ O-15NaCl-10MnCl ₂ -1SnO	Cs ₃ MnBr ₅ (523/650 nm)	366.2/ 3 850 (μs)	5 200	19.1		[22]
37GeO ₂ -31B ₂ O ₃ -3CaO-2ZnO-3MnO-6Cs ₂ O-18NaBr	Cs ₃ Cu ₂ I ₅ (446 nm)	47 (μs)		9		[14]

速成像方面的潜力^[15]。目前,闪烁体相关研究仍主要集中在含铅 CsPbX_3 ($X=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) 钙钛矿纳米晶玻璃体系。2020 年,福建物构所首次报道了 $\text{CsPb}(\text{Cl}/\text{Br})_3$ 硼酸盐玻璃闪烁体并证明了辐照损伤可修复(图 4(b)),但其荧光量子产率(PLQY)仅为 20%,XEL 强度仅为 BGO 晶体的 1/570^[21]。为提高 X 射线吸收效率,哈尔滨工程大学任晶团队选用高密度($\rho=5.5 \text{ g/cm}^3$)、低熔点的碲酸盐玻璃作为基质,通过引入 AgCl 作为晶核剂,实现了 CsPbBr_3 纳米晶的均匀可控生长^[52],将 XEL 强度提升至 BGO 的 1/10,并成功研制出纳秒级响应的光纤剂量计^[53]。然而,受限于较低的晶化率,该类材料的整体闪烁性能仍有较大提升空间。武汉理工大学许银生团队将 CsPbBr_3 纳米晶嵌入硼硅酸盐玻璃中,使其 XEL 积分强度提升至 BGO 晶体的

50%,同时衰减时间缩短至 BGO 的 1/20 (15.2 ns),且成本显著降低^[54](图 4(a))。为进一步优化性能,稀土离子掺杂策略被广泛采用。2021 年,温州大学向卫东^[55]与昆明理工大学徐旭辉团队分别在 CsPbBr_3 玻璃中引入 Eu^{3+} ^[56],有效优化了纳米晶的尺寸与空间分布,减少光散射与自吸收,从而提升了成像对比度与空间分辨率,使 X 射线空间分辨率提升至 15 lp/mm。引入大原子质量的 Lu^{3+} 也可将空间分辨率进一步提高至 16.8 lp/mm^[57]。此外, Gd^{3+} 的能量传递效应、结晶控制工程及光纤化探测等技术也被应用于铅基钙钛矿玻璃闪烁体中,以拓展其应用潜力。2024 年,Niu 等^[58]在 CsPbBr_3 硼硅酸盐玻璃中引入 Gd^{3+} ,在显著降低原料成本(Gd_2O_3 价格仅为 Lu_2O_3 的 1/15)的同时,获得 12.7 lp/mm 的空间分辨率,且未引入额外发光中

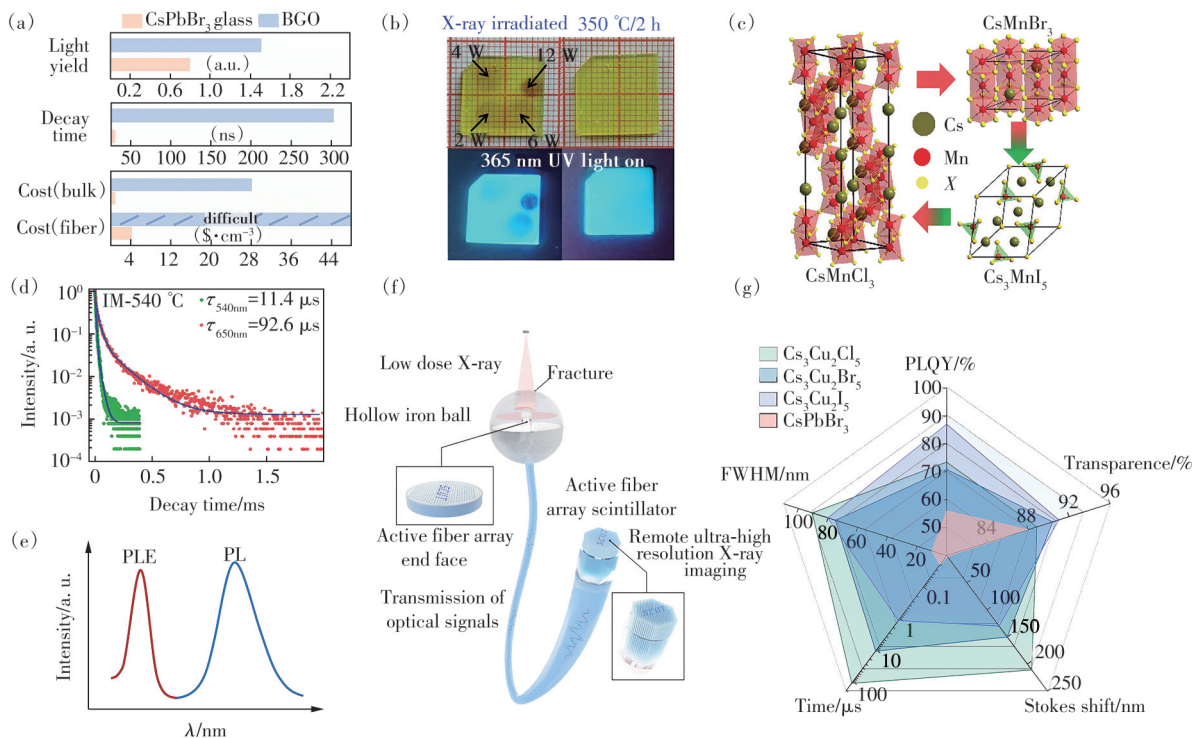


图 4 (a) CsPbBr_3 玻璃与商业 BGO 单晶的比较^[54]; (b) 钙钛矿玻璃在不同功率的 X 射线照射后和重新热处理后的照片和发光照片^[21]; (c) CsMnCl_3 、 CsMnBr_3 以及 Cs_3MnI_5 晶体的结构示意图^[23]; (d) 锰基钙钛矿玻璃在 540 nm (绿点) 和 650 nm (红点) 监控下的 PL 衰减曲线, 蓝色线代表双指数函数拟合^[23]; (e) $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ 玻璃的 PLE 和 PL 光谱; (f) 主动光纤阵列闪烁体(如空心铁球体)的多种成像模式^[64]; (g) $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{X}_5$ 玻璃的 PLQY、透过率、斯托克斯位移、荧光寿命、半高宽 (FWHM) 构成的卫星图^[64]

Fig. 4 (a) Comparison of perovskite glass-ceramic and commercial BGO single crystal. (b) Physical photos and luminescent photos of the perovskite glass-ceramic after X-ray irradiation with different powers and then re-heating. (c) Schematic structures of CsMnCl_3 , CsMnBr_3 , and Cs_3MnI_5 crystals. (d) PL decay curves recorded at 540 nm (green points) and 650 nm (red points) from manganese-based perovskite glass. The blue lines represent the biexponential function fitting. (e) PLE and PL spectra of $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ NCs glass. The inset is a picture of the glass samples after heat treated under 254 nm ultraviolet light. (f) Active fiber array scintillators inside the confined space (e. g., hollow iron spheres). (g) PLQY, transparency, Stokes shift, fluorescence lifetime, FWHM compose the satellite map of $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{X}_5$ NC glass

心。同年,武汉理工大学夏梦玲团队^[59]通过表面电偶极矩工程实现玻璃中纳米晶的定点结晶,使空间分辨率达到17.5 lp/mm。华南理工大学董国平团队^[60]则成功将CsPbBr₃硼钼酸盐玻璃拉制成5×5光纤阵列,利用其导光特性实现了远程像素化X射线成像。尽管已取得显著进展,当前钙钛矿量子点复合玻璃的光产额仍远低于理论预期。如何在实现高晶化率的同时,兼顾低自吸收效应与高抗辐照性能,是该领域未来研究的核心挑战。

CsPbX₃微晶玻璃作为最早被广泛研究的钙钛矿闪烁体系,具备超快衰减寿命与高X射线吸收截面等突出优势,但其产业化进程受限于铅毒性问题。典型器件中铅含量高达333 600 ppm,远超欧盟RoHS指令规定的1 000 ppm上限,因此,开发低毒或无铅替代材料已成为该领域的重要研究方向^[61]。在该背景下,无铅钙钛矿纳米晶玻璃闪烁体的研究逐渐兴起,其中锰基和铜基体系因环境友好性与独特光学特性而备受关注。

锰基钙钛矿玻璃闪烁体以低毒性的锰元素替代铅,有效降低了材料的环境与健康风险。其发光来源于Mn²⁺的d-d跃迁,该类材料不仅具有宽的发光带宽、大的斯托克斯位移(有助于抑制自吸收),还表现出较高的光产额。武汉理工大学刘超课题组率先开发了无铅CsMnX₃^[23](X=Cl, Br, I)及Cs₃Cd_{1-x}Mn_xBr₅^[62]钙钛矿玻璃,通过卤素组成调控改变Mn²⁺的配位结构(图4(c)),实现了从红光到绿光区域的可调发光,推动了高性能无铅金属卤化物闪烁玻璃的发展。作为一种过渡金属,Mn²⁺的发光行为强烈依赖于其配位环境:在晶体场较弱的四面体中通常发射绿光,而在晶体场较强的八面体中则发射红光,这种双发射中心的特性使得通过调控热处理条件(如时间与温度)可实现发光颜色的可调谐。例如,随着退火时间延长,四面体配位逐渐占主导,辐射发光可由浅黄色调谐至黄绿色。基于此,华南理工大学董国平课题组开发了Cs₃MnBr₅反钙钛矿纳米晶玻璃闪烁体^[22]。该材料光学透过率高、光学性能可调、稳定性优良,X射线检测限达767 nGy_{air}/s,空间分辨率高达19.1 lp/mm,并在高剂量辐照下仍保持良好的性能稳定性。通过结合像素化双锥光纤阵列结构,其成像性能与分辨率得到进一步提升,实现了在高温高湿等恶劣环境下的高分辨X射线成像。该研究不仅为极端条件下的稳定X射线探测提供了

新方案,也拓展了无铅反钙钛矿材料在先进成像领域的应用前景。

尽管Mn基钙钛矿闪烁体优势明显,但其较长的衰减时间(微秒至毫秒量级,图4(d))仍难以满足快速动态成像的需求^[23-62]。Cs₃Cu₂I₅是另一种重要的无铅钙钛矿,其发光源于STE,具有非常大的斯托克斯位移(图4(e)),彻底解决了自吸收问题,挑战在于Cu⁺在高温熔制过程中极易被氧化。通过在玻璃组分中加入SnO作为还原剂,铜基钙钛矿玻璃闪烁体研究在解决稳定性与提升成像性能方面取得重要突破。2023年,温州大学向卫东课题组在硼硅酸盐玻璃中原位析出Cs₃Cu₂I₅纳米晶^[14],实现63.3%的光致发光量子产率(PLQY)和9 lp/mm的X射线成像分辨率。该研究揭示了Cu⁺离子在硼氧网络和硅氧网络间的迁移机制,玻璃基质的封装使材料在水中浸泡30天后荧光强度基本不变,显著提升了环境稳定性。然而,传统块体材料的横向光子散射仍限制分辨率进一步提升。2024年,中国计量大学徐时清团队发展了火花等离子烧结(SPS)“自下而上”策略,将预制Cs₃Cu₂I₅微晶与硼硅酸盐玻璃粉末在598 K、18.7 MPa条件下快速烧结,获得Cs₃Cu₂I₅复合硼硅酸盐玻璃材料^[63],该材料在保持445 nm蓝光发射(PLQY约80%)的同时,将耐极性溶剂稳定性从数小时延长至数月,并实现7 lp/mm成像分辨率。SPS技术的低温快速成型特性有效避免了Cs₃Cu₂I₅热分解(熔点662 K),为异质材料复合提供了新途径。2025年,华南理工大学董国平团队突破性地实现Cs₃Cu₂X₅(X=Cl, Br, I)纳米晶玻璃光纤阵列^[64](图4(f)、(g)),该光纤阵列实现了48 lp/mm的像素化成像分辨率(此为阵列器件分辨率,受光纤芯径制约;材料本征空间分辨率理论上可达更高水平)。该研究采用“管中熔融拉丝法”,在850 °C下拉制出芯径69 μm、包层125 μm的光纤,通过470~500 °C热处理诱导纳米晶可控析出,光纤损耗低至0.075 dB/cm。所构建的约1 600像素光纤阵列不仅实现了5 m远程信号传输,还成功应用于空心铁球内壁裂纹检测,解决了传统平板闪烁体无法深入复杂结构的难题。该工作利用零维钙钛矿的STE发光特性消除自吸收,并结合波导结构抑制光学串扰,为远距离高分辨X射线成像建立了新范式,为医学影像、工业无损检测等领域提供了极具竞争力的新型探测材料。

7 总结与展望

非稀土激活无机玻璃闪烁体作为新一代辐射探测材料,在克服传统稀土闪烁体瓶颈方面展现出巨大潜力,其性能由玻璃网络结构(网络形成体/中间体/修饰体)与发光中心协同调控。近年来,该领域在过渡金属离子掺杂、氧化物纳米晶复合及钙钛矿玻璃三大体系取得显著进展: Mn^{2+} 掺杂玻璃通过 Gd^{3+} 敏化与卤素配位工程将光产额提升至 3 271 photons/MeV,并揭示陷阱热补偿机制实现 573 K 下强度保持 61%; Cu^+ 体系采用氧氟玻璃设计与 Gd^{3+} 能量传递,光输出达 BGO 的 425%,兼具反常猝灭特性; Sn^{2+} 高密度玻璃实现 14 lp/mm 分辨率与优异辐照稳定性。氧化物纳米晶复合玻璃中,BGO、 GdTaO_4 、 $\text{Ba}_2\text{TiGe}_2\text{O}_8$ 等晶相可控析出显著提升发光效率,但受限于晶体本征光产额与析晶致失透问题。钙钛矿玻璃方面,Pb基 CsPbX_3 体系通过晶核剂与稀土掺杂优化,XEL强度从BGO的 1/570 提升至 50%,衰减时间缩短至 15.2 ns;无铅化进程中,铜基钙钛矿 $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ 凭借STE发光实现 48 lp/mm 超高分辨率,光纤阵列突破传统平板结构限制。当前研究仍面临光产额理论差距、高晶化率-低自吸收矛盾、长期辐照着色机理不明及铅毒性等挑战,需要区分材料本征空间分辨率与

器件阵列分辨率,后者受光纤几何结构限制,前者取决于材料光学均匀性和发光特性。

未来需聚焦于多尺度结构调控、缺陷工程、无铅化设计及智能化器件集成,以推动其在高端医疗影像与极端环境探测中的实用化进程。此外,针对玻璃闪烁体复杂的“组分-结构-性能”关联,目前仍缺乏系统化的材料数据库支撑,制约了数据驱动设计的精度与泛化能力。构建涵盖组分、工艺、结构及光电性能的标准化数据库已成为当务之急。在此基础上,机器学习可构建高精度预测模型,通过主动学习策略高效筛选高光产额组分区间,将传统试错研发周期缩短 10 倍以上;分子动力学模拟能动态揭示玻璃网络解聚、离子迁移及纳米晶原位析晶动力学机制,指导热处理工艺精准优化;第一性原理计算可预测激活离子能级结构与缺陷俘获截面,为陷阱工程调控提供理论依据。未来应建立“高通量计算预测-关键实验验证-数据驱动优化”闭环研究模式,突破传统经验设计瓶颈,加速高性能闪烁材料的定向开发。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250257>

参 考 文 献:

- [1] LI Y M, LEI Y T, WANG H X, *et al.* Two-dimensional metal halides for X-ray detection applications [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2023, 15(1): 128.
- [2] MU D D, WANG T C, YUAN J H, *et al.* X-ray real-time imaging and delayed imaging from lead-free perovskite scintillators [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(36): 2401455.
- [3] WU J J, XU X H, YANG J Y. Object detection and X-ray security imaging: a survey [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 45416-45441.
- [4] FISHMAN M D C, REHANI M M. Monochromatic X-rays: the future of breast imaging [J]. *Eur. J. Radiol.*, 2021, 144: 109961.
- [5] SUN X Y, GU M, HUANG S M, *et al.* Luminescence behavior of Tb^{3+} ions in transparent glass and glass-ceramics containing CaF_2 nanocrystals [J]. *J. Lumin.*, 2009, 129(8): 773-777.
- [6] OKADA G, UEDA J, TANABE S, *et al.* Samarium-doped oxyfluoride glass-ceramic as a new fast erasable dosimetric detector material for microbeam radiation cancer therapy applications at the canadian synchrotron [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2014, 97(7): 2147-2153.
- [7] DWARAKA VISWANATH C S, JAYASANKAR C K. Photoluminescence, γ -irradiation and X-ray induced luminescence studies of Sm^{3+} -doped oxyfluorosilicate glasses and glass-ceramics [J]. *Ceram. Int.*, 2018, 44(6): 6104-6114.
- [8] 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.
- [9] 孙博超,隋泽莹,王慈,等. 纳米晶复合玻璃闪烁体: 机遇与挑战 [J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(4): 1143-1159.

- SUN B C, SUI Z X, WANG C, *et al.* Nano-glass composite scintillators: opportunities and challenges [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2022, 50(4): 1143-1159. (in Chinese)
- [10] 邓玉杰, 钱程昱, 张嘉恒, 等. X射线探测成像玻璃闪烁体研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(7): 1182-1208.
- DENG Y J, QIAN C Y, ZHANG J H, *et al.* Research progress of glass scintillators based on X-ray detection and imaging [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(7): 1182-1208. (in Chinese)
- [11] LIU J Q, ZHAO X D, XU Y S, *et al.* All-inorganic glass scintillators: scintillation mechanism, materials, and applications [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(7): 2300006.
- [12] GUO H, WEI R F, LIU X Y. Tunable white luminescence and energy transfer in $(\text{Cu}^+)_2$, Eu^{3+} codoped sodium silicate glasses [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(10): 1670-1672.
- [13] CHEN S Y Z, GONG Y J, HUANG W J, *et al.* Intense broadband radioluminescence from an Mn^{2+} -doped aluminoborate glass scintillator [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(28): 10382-10388.
- [14] HUANG L J, YE H T, XIANG W D, *et al.* *In situ* precipitation of $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ nanocrystals in inorganic glass with long-term water stability for X-ray imaging [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(25): 8524-8532.
- [15] CHEN Q S, WU J, OU X Y, *et al.* All-inorganic perovskite nanocrystal scintillators [J]. *Nature*, 2018, 561(7721): 88-93.
- [16] HE G L, LI L J, CHEN J Y, *et al.* A thermal stable multi-functional Cu^+ -doped glass for high-resolution X-ray imaging and full-spectra lighting [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(20): e00396.
- [17] LI L J, SU Q Q, CHEN J Y, *et al.* Mn^{2+} -doped glass scintillators with anti-thermal quenching for high-temperature X-ray imaging [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2025, 23(11): 111602.
- [18] LIU C, LIU H, HUA C S, *et al.* Sn^{2+} -doped high-density gadolinium borosilicate glass scintillator for X-ray imaging [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(20): 2403243.
- [19] HE G L, CHEN J Y, LI L J, *et al.* Cu^+ -doped oxyfluoride glass with anti-thermal-quenching luminescence for X-ray imaging and WLED [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2025, 14(8): 9221116.
- [20] DU Y, YUAN J, HAN S, *et al.* Luminescence and scintillation properties of CuO -doped $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3$ glass [J]. *Opt. Mater.*, 2019, 96: 109363.
- [21] WANG C Y, LIN H, ZHANG Z J, *et al.* X-ray excited $\text{CsPb}(\text{Cl}, \text{Br})_3$ perovskite quantum dots-glass composite with long-lifetime [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2020, 40(5): 2234-2238.
- [22] LE Y K, HUANG X J, ZHANG H, *et al.* Transparent glassy composites incorporating lead-free anti-perovskite halide nanocrystals enable tunable emission and ultrastable X-ray imaging [J]. *Adv. Photonics*, 2023, 5(4): 046002.
- [23] LI K, ZHANG W C, NIU L Y, *et al.* Lead-free cesium manganese halide nanocrystals embedded glasses for X-ray imaging [J]. *Adv. Sci.*, 2023, 10(4): 2204843.
- [24] ZHOU S F, LI C Y, YANG G, *et al.* Self-limited nanocrystallization-mediated activation of semiconductor nanocrystal in an amorphous solid [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2013, 23(43): 5436-5443.
- [25] CAO J K, CHEN W P, CHEN L P, *et al.* Synthesis and characterization of $\text{BaLuF}_3\text{:Tb}^{3+}$ oxyfluoride glass ceramics as nanocomposite scintillator for X-ray imaging [J]. *Ceram. Int.*, 2016, 42(15): 17834-17838.
- [26] HU F R, ZHANG H C, SUN C, *et al.* Superior optical properties of perovskite nanocrystals as single photon emitters [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(12): 12410-12416.
- [27] LIU J, ZHENG X P, YAN L, *et al.* Bismuth sulfide nanorods as a precision nanomedicine for *in vivo* multimodal imaging-guided photothermal therapy of tumor [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(1): 696-707.
- [28] PANG X L, SI S C, XIE L Q, *et al.* Regulating the morphology and luminescence properties of CsPbBr_3 perovskite quantum dots through the rigidity of glass network structure [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(48): 17374-17382.
- [29] DIETZEL A. Die Kationenfeldstärken und ihre Beziehungen zu Entglasungsvorgängen, zur verbindungsbildung und zu den schmelzpunkten von silicaten [J]. *Z. Elektrochem. Angew. Phys. Chem.*, 1942, 48(1): 9-23.
- [30] ZHANG K, ZHOU D C, QIU J B, *et al.* Effect of topological structure on photoluminescence of CsPbBr_3 quantum dot doped glasses [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020, 826: 154111.
- [31] INGRAM M D, IMRIE C T, KONIDAKIS I, *et al.* Significance of activation volumes for cation transport in glassy electrolytes [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2004, 6(13): 3659-3662.
- [32] SI S C, YU J B, LOU S Q, *et al.* Engineering the crystallization behavior of CsPbBr_3 quantum dots in borosilicate glass

- through modulating the glass network modifiers for wide-color-gamut displays [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2022, 42(8): 3586-3594.
- [33] YANG M T, WANG Q, TONG Y, *et al.* CsPbBr₃ nanocrystals glass with finely adjustable wavelength and color coordinate by MgO modulation for wide-color-gamut backlight displays [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2022, 604: 154529.
- [34] SAMIEI S, LIN J D, SOHEYLI E, *et al.* Recent advances in CsPbX₃ (X=Cl, Br, I) perovskite NCs@glass: structures, characterizations, and applications [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(16): 2500162.
- [35] LV S C, CAO M Q, LI C Y, *et al.* In-situ phase transition control in the supercooled state for robust active glass fiber [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(24): 20664-20670.
- [36] SHI Z G, LV S C, TANG G W, *et al.* Multiphase transition toward colorless bismuth-germanate scintillating glass and fiber for radiation detection [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(15): 17752-17759.
- [37] YANAGIDA T, MASAI H, OKADA G, *et al.* Optical and scintillation properties of 30BaO-(70-x)TiO₂-xGeO₂ (x=50, 55, 60) glass-ceramics [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2018, 501: 106-110.
- [38] KATO T, OKADA G, KAWAGUCHI N, *et al.* Scintillation properties of BaO-TiO₂-GeO₂-SiO₂ glass-ceramics [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2018, 501: 116-120.
- [39] MASAI H, OKADA G, KAWAGUCHI N, *et al.* Photoluminescence and X-ray-induced scintillation of BaO-TiO₂-SiO₂ glasses and the glass-ceramics [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2018, 501: 131-135.
- [40] KAWAGUCHI N, MASAI H, KIMURA H, *et al.* Scintillation and thermoluminescence properties of transparent glass-ceramics containing Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb₂O₆ nanocrystallites [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2018, 501: 126-130.
- [41] USUI Y, OKADA G, KAWAGUCHI N, *et al.* Scintillation and optical properties of TiO₂-ZnO-Al₂O₃-B₂O₃ glasses and glass-ceramics [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2018, 57(4): 046203.
- [42] LIN L T, LV S C, XIE W Q, *et al.* Nanostructured glass composite for self-calibrated radiation dose rate detection [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(20): 2100751.
- [43] POLOSAN S. Characterization of BGO glass-ceramic materials [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2009, 355(37-42): 1900-1903.
- [44] DENG Y J, XU Y K, QIAN C Y, *et al.* Manganese halide-based glass-ceramic scintillator for ultra-stable and multi-functional X-ray imaging in extreme environments [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(24): e01178.
- [45] HASHIKAWA R, FUJII Y, KINOMURA A, *et al.* Radiophotoluminescence phenomenon in copper-doped aluminoborosilicate glass [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2019, 102(4): 1642-1651.
- [46] HE G L, LI L J, CHEN J Y, *et al.* An efficient Cu⁺ doped Gd-based fluoroaluminosilicate scintillator glass for X-ray detectors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(3): 1325-1331.
- [47] WEN Z X, XU S J, LI L J, *et al.* Design and elaboration of highly resolved and efficient Cu⁺-doped oxyfluoride glass scintillators for X-ray image based on response surface methodology [J]. *J. Lumin.*, 2023, 263: 120086.
- [48] MASAI H, SUZUKI Y, YANAGIDA T, *et al.* Luminescence of Sn²⁺ center in ZnO-B₂O₃ glasses melted in air and Ar conditions [J]. *Bull. Chem. Soc. Japan*, 2015, 88(8): 1047-1053.
- [49] TORIMOTO A, MASAI H, OKADA G, *et al.* X-ray induced luminescence of Sn²⁺-centers in zinc phosphate glasses [J]. *Radiat. Meas.*, 2017, 106: 175-179.
- [50] HASHIMOTO K, SHIRATORI D, KATO T, *et al.* Dosimetric properties in Cu-doped silica glasses synthesized by the spark plasma sintering method [J]. *J. Ceram. Soc. Japan*, 2021, 129(3): 154-158.
- [51] WANG L, LU F M, LI X M, *et al.* A novel scintillating material based on Cu⁺ doped borate glass [J]. *J. Lumin.*, 2023, 257: 119751.
- [52] NIU L Y, WANG S K, SUI Z, *et al.* Highly stable CsPbBr₃ perovskite quantum dot-doped tellurite glass nanocomposite scintillator [J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(14): 3448-3451.
- [53] XIE Y Q, JING Y, NIU L Y, *et al.* Perovskite-quantum-dots activated silica fiber X-ray dosimeter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2022, 20(6): 063401.
- [54] XU Y S, ZHAO X D, XIA M L, *et al.* Perovskite nanocrystal doped all-inorganic glass for X-ray scintillators [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(16): 5452-5459.
- [55] TONG Y, WANG Q, YANG H, *et al.* Enhanced multimodal luminescence and ultrahigh stability Eu³⁺-doped CsPbBr₃ glasses for X-ray detection and imaging [J]. *Photonics Res.*, 2021, 9(12): 2369-2380.

- [56] MA W B, JIANG T M, YANG Z, *et al.* Highly resolved and robust dynamic X-ray imaging using perovskite glass-ceramic scintillator with reduced light scattering [J]. *Adv. Sci.*, 2021, 8(15): 2003728.
- [57] ZHANG H, YANG Z, ZHOU M, *et al.* Reproducible X-ray imaging with a perovskite nanocrystal scintillator embedded in a transparent amorphous network structure [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(40): 2102529.
- [58] NIU L Y, WANG L, LI W C, *et al.* Enhanced luminescence and high stability in Gd^{3+} -doped $CsPbBr_3$ perovskite quantum dots glasses for X-ray detection [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(1): 1303-1308.
- [59] LIU X Q, XU Y S, ZHANG X H, *et al.* Surface electric dipole moment engineering of all-inorganic transparent solid matrix for information encryption and X-ray imaging [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(13): 2418032.
- [60] HUANG X J, LE Y K, ZHANG H, *et al.* Scintillating glass fiber arrays enable remote radiation detection and pixelated imaging [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(6): 2405499.
- [61] SIDDIQUE H. Evidence and engineering of X-ray luminescence in lead free perovskite $Cs_2AgInCl_6$ with Bi substitutions [J]. *APL Mater.*, 2024, 12(10): 101101.
- [62] YE Y, LI K, NIU L Y, *et al.* 0D $Cs_3Cd_{1-x}Mn_xBr_3$ nanocrystals embedded in glass for optical thermometry [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(6): 2301886.
- [63] WANG P Y, MENG M M, NIE M, *et al.* Fabrication of highly stable $Cs_3Cu_2I_5$ -in-glass composite for X-ray imaging by SPS technique [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(21): 2400813.
- [64] ZHANG H, HUANG X J, WAN T Z, *et al.* Integrated copper-halide activated scintillator fiber array for remote high-resolution X-ray imaging [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 5973.



牛璐玥(1994-),女,山东聊城人,博士,2024年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事光功能玻璃及器件的研究。

E-mail: luyueniu@hrbeu.edu.cn



李良(1975-),男,上海人,博士,教授,博士生导师,2006年于上海交通大学获得博士学位,主要从事光功能材料及器件的研究。

E-mail: lli@must.edu.mo