

ZnS 量子点微晶玻璃用于 X 射线高分辨率成像

彭庆朋^{1,2}, 季涛¹, 王玮¹, 唐海涛¹, 李鑫¹, 肖建强¹, 张鹏^{1,2}, 余雪³, 邱建备¹, 徐旭辉¹

(1. 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南省新材料制备与加工重点实验室, 昆明 650093; 2. 云南阿飞皮纳科技有限公司, 昆明 650093; 3. 成都大学机械工程学院, 高等研究院, 先进材料多尺度变形及破坏力学研究所, 成都 610106)

摘 要: 闪烁体是 X 射线成像技术中的核心器件, 它能将吸收的高能射线(X 射线或其他高能带电粒子)转化为可见光, 已被广泛应用于医疗诊断、辐射剂量测定和安全检查等领域。目前大多数的商用闪烁体为单晶或薄膜材料, 不仅制备工艺复杂、生长周期长、成本高, 并且辐照稳定性差, 成像效果不佳。通过在透明玻璃基体内原位析出 ZnS 量子点, 探索 ZnS 量子点微晶玻璃(GC)作为一种成本低、耐候性强的闪烁体在 X 射线间接成像领域的应用。实验结果表明, 在 X 射线辐照下 ZnS GC 的发射峰位于 518 nm, 并利用 X 成像系统对鱼骨骼和芯片进行成像, 由于 ZnS 量子点在玻璃基体中的均匀分布, 结果显示图像轮廓清晰、物体内部结构分明, 并且成像分辨率达到 18.0 lp/mm。此外, 在累积剂量高达 288 J/kg 的情况下, 损坏的 ZnS GC 闪烁体可通过简单的热处理完全恢复成像性能。ZnS GC 作为闪烁体在高分辨 X 射线成像领域表现出广泛的应用前景。

关键词: 硫化锌量子点; 微晶玻璃; X 射线成像; 透明闪烁体; 高剂量可恢复

中图分类号: TQ171.1 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)11-2934-07

网络出版时间: 2022-09-30



Transparent Medium Embedded with ZnS Quantum Dots for X-Ray Imaging

PENG Qingpeng^{1,2}, JI Tao¹, WANG Wei¹, TANG Haitao¹, LI Xin¹, XIAO Jianqiang¹, ZHANG Peng^{1,2},
YU Xue³, QIU Jianbei¹, XU Xuhui¹

(1. Faculty of Materials Science and Engineering, Key Laboratory of Advanced Materials of Yunnan Province, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yunnan AFPN Technology Company Limited, Kunming 650093, China; 3. School of Mechanical Engineering, Institute for Advanced Study, Institute for Advanced Materials Deformation and Damage from Multi-Scale, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: Scintillator is a core device in X-ray imaging technology. It can convert absorbed X-ray or other high-energy charged particles into visible light, and it is widely used in medical diagnosis, radiation dose measurement and safety inspection. At present, most commercial scintillators are single crystal or thin film materials, which have complex preparation process, long growth cycle, high cost, as well as poor irradiation stability and imaging effect. In this paper, ZnS quantum dots glass-ceramics (GC) as a low cost and weather resistance scintillator for X-ray indirect imaging was prepared through *in-situ* precipitation of ZnS quantum dots (QDs) into transparent glass matrix. The experimental results show that the emission peak of ZnS GC is located at 518 nm under X-ray irradiation, and the fish bone and chip are imaged by X-ray imaging system. The image contour is clear, the internal structure of the object is clear, and the imaging resolution reaches 18.0 lp/mm due to the uniform distribution of ZnS quantum dots in the glass matrix. Also, the damaged ZnS GC scintillator can completely recover its imaging performance by simple heat treatment at a

收稿日期: 2022-06-07。 修订日期: 2022-06-28。

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC) (61965012); 云南省科技重大专项 (202102AG050006); 云南省自然科学基金项目 (202001AS070008, 202101AT070126); 云南省中小企业科技创新基金项目 (202104AP080068); 云南省万人计划青年拔尖人才项目 (YNWR-QNBJ-2018-295)。

第一作者: 彭庆朋(1999—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 徐旭辉(1986—), 男, 博士, 教授;

邱建备(1970—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-06-07. Revised date: 2022-06-28.

First author: PENG Qingpeng (1999—), male, Master candidate.

E-mail: 13755505607@126.com

Correspondent author: XU Xuhui (1986—), male, Ph.D., Professor;
QIU Jianbei (1970—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: xuxuh07@126.com;

qiu@kmust.edu.cn

cumulative dose of 288 J/kg. It is indicated that ZnS GC as a scintillator has a broad application prospect in the field of high resolution X-ray imaging.

Keywords: zinc sulfide quantum dot; glass-ceramics; X-ray imaging; transparent scintillators; high-dose recoverable

X 射线探测和成像技术在医学诊断、国防工业和辐射安全检测等众多领域发挥着重要的作用^[1-2]。X 射线成像技术可分为直接型与间接型^[3-4],前者是在 X 射线辐照下,直接通过半导体产生电信号,或通过薄膜产生化学信号^[5-8]。间接型是利用闪烁体将 X 射线转换为可见光,然后由阵列光电探测器记录^[9-12]。基于闪烁体的间接探测具有响应时间快、便于与薄膜晶体管面板或互补金属氧化物半导体阵列集成的优势,是市场上的主流产品^[13-14]。其中,闪烁体性能是决定 X 射线成像质量的关键。

CsI:Tl 和 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) 由于其出色的光产率、高空间分辨率(8~10 lp/mm)和优异的力学性能^[15],已成功应用于商用 X 射线探测器^[16-17]。然而,BGO 等单晶闪烁体材料的制备过程复杂、生长周期长、成本造价高等缺点,也对其实际应用提出了挑战。金属卤化物钙钛矿闪烁体(CsPbBr_3 ^[18], $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ ^[19], $\text{Cs}_2\text{Ag}_{0.6}\text{Na}_{0.4}\text{In}_{0.85}\text{Bi}_{0.15}\text{Cl}_6$ ^[20]等)因其易于溶液处理和超灵敏的 X 射线探测,可用于大面积、灵活的间接 X 射线成像而备受关注^[21-22]。虽然金属卤化物钙钛矿作为闪烁体在 X 射线探测中取得了重大进展^[23-25],但其低的稳定性、严重的自吸收以及铅毒性等问题导致了其距离实际应用存在一定差距。因此,无论是在基础科学还是在实际应用中,对易合成、在环境中具有稳定性、可长期运行的闪烁体的探索一直是引人关注的焦点。

在本工作中,通过在稳定的玻璃基体内原位生长出 ZnS 量子点,制备了在 X 射线照射下呈现出优异辐射发光性能的 ZnS GC 闪烁体。此外,ZnS 量子点在透明的玻璃基体中均匀分布,保证其具有高透明度和发光均匀性。因此,本工作研究的 ZnS GC 闪烁体 X 射线成像空间分辨率能够达到 18.0 lp/mm。同时,由于玻璃三维网络结构对 ZnS 量子点的限域效应,在长时间高剂量辐照下,损伤的 ZnS 量子点可以完全恢复,为闪烁体的长期使用提供了保障。ZnS GC 闪烁体具有优异的辐射发光(RL)性能、稳定性,作为低成本的闪烁体在 X 射线成像领域具有广阔的应用前景。

1 实验

1.1 样品制备

以 $50\text{SiO}_2-10\text{B}_2\text{O}_3-13\text{ZnO}-13\text{Na}_2\text{O}-8\text{K}_2\text{O}-6\text{ZnS}$ 为玻璃组分(摩尔分数)制备 ZnS 量子点玻璃样品。用玛瑙研钵和研磨棒将原料研磨成均匀粉末。然后将经过充分研磨的混合粉末放入氧化铝坩埚中,在 1300 °C 熔化 60 min 之后,将熔体倒入 350 °C 预热的铜模具中,自然冷却,形成前驱体玻璃(PG)。随后,将 PG 样品在 580 °C 热处理 6 h,通过玻璃结晶形成 ZnS GC。最后,这些 GC 样品经过抛光或研磨成粉末,以待进一步表征和使用。

1.2 相结构和光致发光性能

采用粉末衍射仪(D8ADVANCE/Germany Bruker X-ray diffractometer),利用 Cu-K_α 辐射($\lambda=0.154\ 05\ \text{nm}$)对玻璃基体中的结晶相进行了 X 射线衍射(XRD)分析。利用 JEOL F200 在 200 kV 下的透射电镜(TEM)和高分辨率场透射电镜(HRTEM)对 GC 的微观结构进行了分析。用 HITACHI F-7000 荧光分光光度计记录激发光谱(PLE)、光致发光光谱(PL),激励源为 150 W Xe 灯。ZnS GC 的衰减曲线由时间分辨荧光分光光度计(FLS980,爱丁堡仪器有限公司,爱丁堡,英国)记录。X 射线下的 RL 光谱由荧光分光光度计(海洋光学,USB2000+XR1-ES)测量。

1.3 X 射线成像

为了评估所制备的闪烁材料的可行性,我们使用了带有 Cu-K_α 辐射($\lambda=0.154\ 05\ \text{nm}$)的 TDF-3000 Focus 衍射仪以及商业上可用的小型化 X 射线管(Amptek)进行 X 射线成像。在 X 射线管中,铜靶的最大输出功率为 1200 W。通过调节 X 射线源的电流和电压,施加 $5\times 10^{-8}\sim 8\times 10^{-3}\ \text{J/kg}$ 范围内的 X 射线剂量率。在 X 射线辐照进行物体成像中,X 射线管电压保持在 40 kV 和 30 mA。成像照片用数码相机(尼康 D7100 AF-S Micro-Nikkor 105 mm f/2.8G IF-ED)进行拍摄。

1.4 调制传递函数(MTF)测量

MTF 决定了成像系统的空间分辨率,代表了将空间频率的输入信号调制相对于其输出的能力。MTF 值为 1 表示对给定空间频率的完美检测。利用斜边法计算 MTF,取厚度为~2 mm 的铝片锋利边

缘的 X 射线图像。然后根据边缘轮廓线推导出边缘扩展函数(ESF), 通过计算导数可以推导出线扩展函数(LSF)。最后, LSF 的傅里叶变换定义了 MTF, 即 MTF 曲线可以通过以下公式计算:

$$\text{MTF}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{LSF}(x) \times e^{-2\pi\nu x} dx \quad (1)$$

其中: ν 为空间频率; x 为像素点的位置。由于使用不同的光学系统, x 的位置由下式定义:

$$x = \frac{N \times d}{\beta} \quad (2)$$

式中, N 为 X 射线边缘图像中像素的序数; d 为像素尺寸(11 μm); β 为光学倍率。

2 结果与讨论

图 1a 中 PG 样品的 XRD 谱中没有观察到衍射峰, 只观察到非晶峰, 这是典型的非晶玻璃相。此外, 580 $^{\circ}\text{C}$ 退火后的 ZnS GC 样品 XRD 谱上有明显的衍射峰出现, 衍射峰对应的 2θ 位置与 ZnS 的标

准卡片(JCPDS No. 36–1450)相吻合, 证明 ZnS 量子点在非晶基体中成功析出。图 1b 中 ZnS GC 样品的 TEM 照片显示, 嵌入玻璃基体的 ZnS 量子点分布均匀, 平均粒径为 11 nm。此外, HRTEM 照片清晰地显示了 ZnS 纳米颗粒的晶格条纹, 并确定 2 个相邻晶面的距离为 0.191 nm, 即 ZnS 的(110)晶面。相应的快速 Fourier 变换(FFT)进一步证明了 ZnS 量子点的形成。图 1c 中为 ZnS 量子点的室温 PLE、PL 显示了 ZnS GC 的最佳激发和发射, 其最佳激发峰位于 330 nm, 同时在 330 nm 激发下, ZnS GC 的 PL 表现出宽的发射范围, 其发射峰中心位于 518 nm, 其中 537 nm 处的峰是由单质硫引起的缺陷发光, 类似地, 450 nm 和 486 nm 的峰属于 Zn 型空位(V_{Zn}), 而 417 nm 的峰与 S 空位(V_{S})有关, 与之前文章报道的结果一致^[26–27]。图 1d 中测试了 518 nm 处监测到的发光衰减曲线可以用双指数衰减动力学很好地拟合, 计算出平均发光衰减寿命为 2.55 μs 。

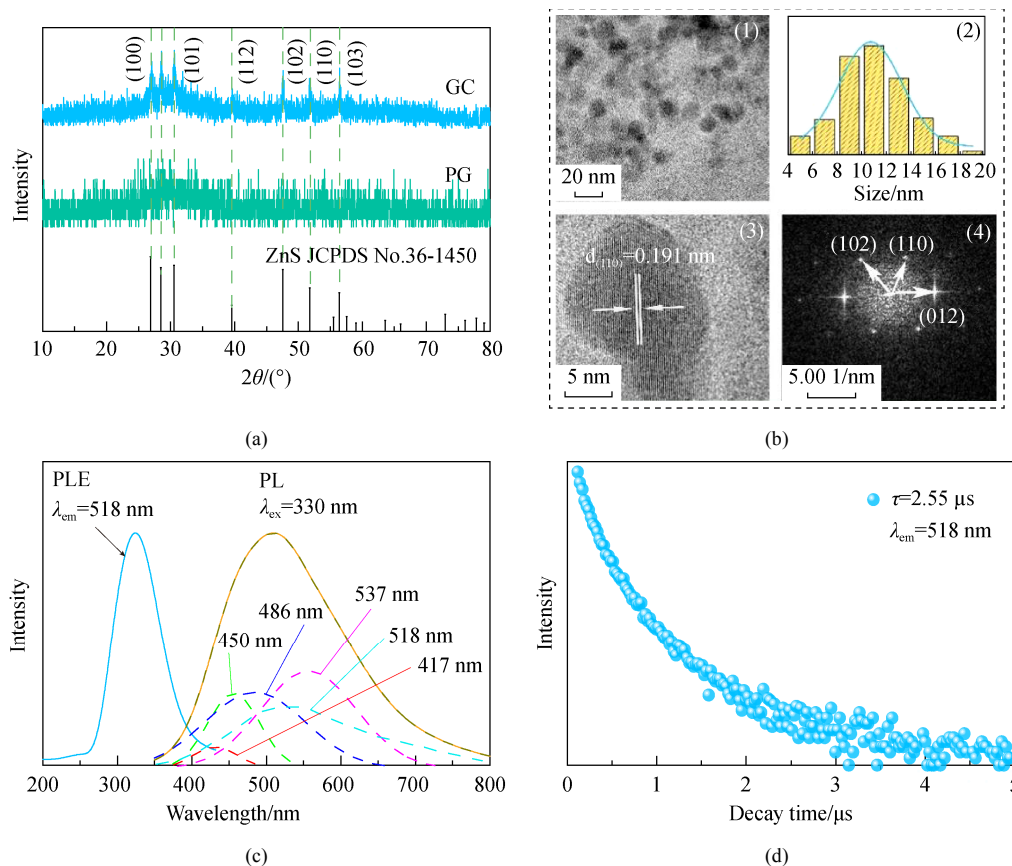


图 1 (a) PG 和 ZnS GC 的 XRD 谱。(b) ZnS GC 样品的 TEM 照片、粒径分布、HRTEM 照片和相应的 Fourier 变换图像。(c) ZnS GC 样品的激发光谱(PLE) ($\lambda_{\text{em}}=518 \text{ nm}$)和光致发光光谱(PL) ($\lambda_{\text{ex}}=330 \text{ nm}$)光谱。(d) ZnS GC 样品的衰减曲线

Fig. 1 (a) XRD patterns of PG and ZnS GC. (b) TEM Pictures, particle size distribution, HRTEM Pictures and corresponding Fourier transform images of ZnS GC samples. (c) Photoluminescence excitation spectrum (PLE) ($\lambda_{\text{em}}=518 \text{ nm}$) and Photoluminescence spectrum (PL) ($\lambda_{\text{ex}}=330 \text{ nm}$) spectra of ZnS GC samples. (d) The decay curve of ZnS GC samples

CsI:Tl 和 ZnS 闪烁体在 X 射线光子能量范围 (0~100 keV) 的吸收光谱如图 2a 所示。可以看出, ZnS GC 在 0~16 keV 范围内表现出高的吸收系数, 与商用 CsI:Tl 的吸收系数相当。图 2b 显示了 8 keV X 射线激发的 ZnS GC 的 RL 光谱。可以看到, ZnS GC 有 1 个位于 518 nm 的宽发射, 与 PL 光谱一致, 表明其来源于相同的辐射重组过程。图 2c 为 ZnS GC 的剂量率依赖性响应曲线, 表明其对 X 射线剂

量率的线性响应。图 2d 为 ZnS GC 样品在 X 射线照射下的 RL 机理, ZnS 量子点有效地吸收了入射的高能 X 射线, 由于光电效应和非弹性 Compton 散射产生大量的电子和空穴对, 二次热电子在导带内被热化, 然后电子和空穴在机体内部迁移, 随后电子被 V_S 捕获, 空穴被 V_{Zn} 捕获, 进一步的电子空穴对复合产生 ZnS 量子点以 518 nm 为中心的高效辐射发光。

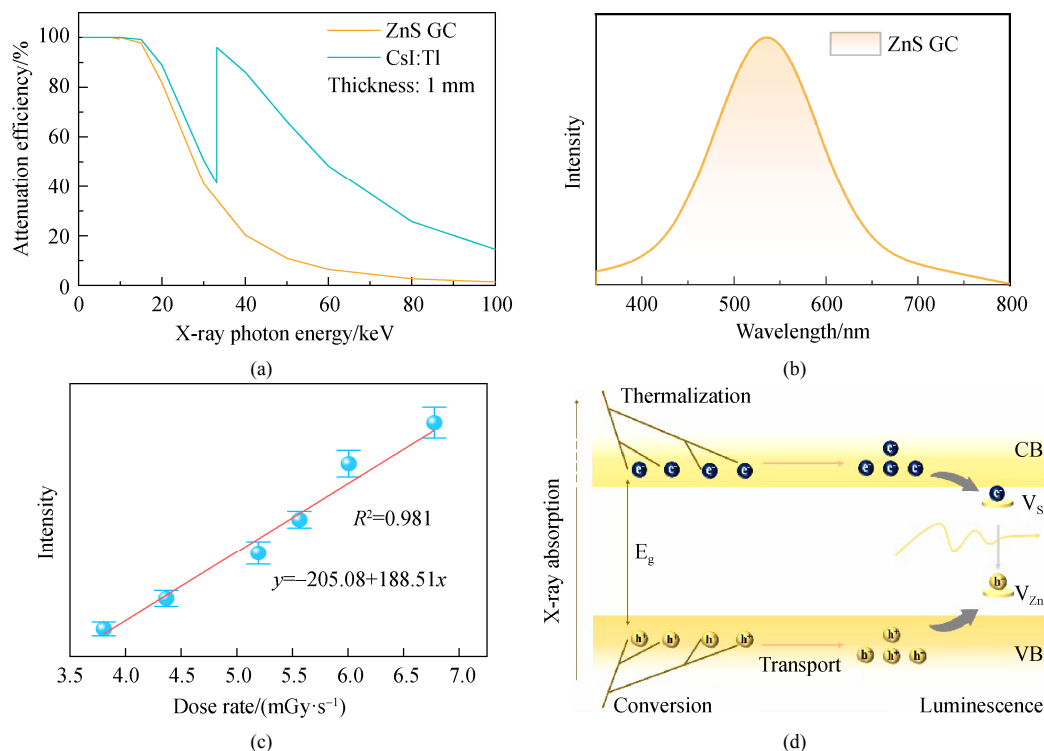


图 2 (a) ZnS GC 和商用 CsI:Tl 的 X 射线衰减效率曲线。(b) ZnS GC (电压 40 kV, 电流 10 mA) 的辐射发光(RL)光谱。(c) ZnS GC 的 RL 强度与 X 射线剂量率的线性关系。(d) ZnS GC 闪烁体 X 射线闪烁机理

Fig. 2 (a) X-ray attenuation efficiency curves of ZnS GC and commercial CsI:Tl. (b) Radioluminescence (RL) spectra of ZnS GC (voltage: 40 kV, current: 10 mA). (c) Linear relationship between RL intensity of ZnS GC and X-ray dose rate. (d) X-ray scintillation mechanism of ZnS GC scintillator

为了验证 ZnS GC 闪烁体在 X 射线成像应用中的性能, 本课题组自主构建了间接 X 射线成像系统, 该系统使用尼康数码相机和 TDF-3000 聚焦衍射仪 X 射线源进行搭建, 示意图如图 3a 所示。图 3b 为鱼的内部骨骼结构和芯片内部结构的 X 射线成像图像, 从图 3b 可以清晰的分辨其内部结构, 说明了 ZnS GC 闪烁体优异的成像性能。图 3c 显示了 ZnS GC 在 400~800 nm 范围内 90% 以上的透过率, 为高的成像分辨提供保障。通过计算每毫米可分辨线对的最大数目来评估闪烁体的成像性能, 如图 3d 所示, 左图显示了在 X 射线下标准线对卡的成像, 右图显示了分辨率测试样板图像中沿黄色线

的强度变化, ZnS GC 闪烁体的可探测值至少为 16.6 lp/mm。另外, 根据斜边法计算得到 ZnS GC 闪烁体的调制传递后的函数, 得到分辨率可达 18.0 lp/mm, 如图 3e 所示。这种高分辨率得益于嵌入玻璃基体内均匀原位析出的 ZnS 量子点。因此, ZnS GC 闪烁体有望成为高性能、低成本的 X 射线闪烁体候选产品。

在工业探伤和无损检测应用中通常面临相对较大的辐照剂量, 长期高剂量辐照下的不稳定性成为闪烁体应用的一个阻碍。ZnS GC 被 8×10^{-3} J/kg 剂量下 X 射线连续辐照后, 在紫外照射下的发光照片如图 4a 所示。可以看出, 高剂量 X 射线对闪烁体

造成了严重损害。为此, 本工作提出了一种简单可行的热处理策略, 实现受损 ZnS GC 闪烁体的发光和成像恢复, 图 4a 给出了 X 射线辐照损伤及退火策略恢复的示意图。X 射线辐照的过度曝光会导致闪烁体的损坏, 从根本上导致闪烁体 X 射线成像效果的恶化。值得注意的是, 在 350 °C 对 ZnS GC 闪烁体进行 2 h 热处理后, 恢复了其初始的闪烁性能。这得益于具有无规则三维网络结构的透明玻璃介质

对量子点的保护^[28]。此外, 利用 PL 性能验证了 ZnS GC 闪烁体的可恢复性。图 5b~图 5e 中的 PL 和 RL 光谱进一步说明了 ZnS GC 闪烁体的损伤情况以及热处理后恢复的性能。为了证明样品的可重复性, 进行了多次损伤恢复循环实验。很明显, 该 ZnS GC 样品的 PL 和 RL 强度在 15 次损伤及热处理恢复后依然能够达到初始值, 证实了 ZnS GC 闪烁体用于 X 射线成像的低成本特性。

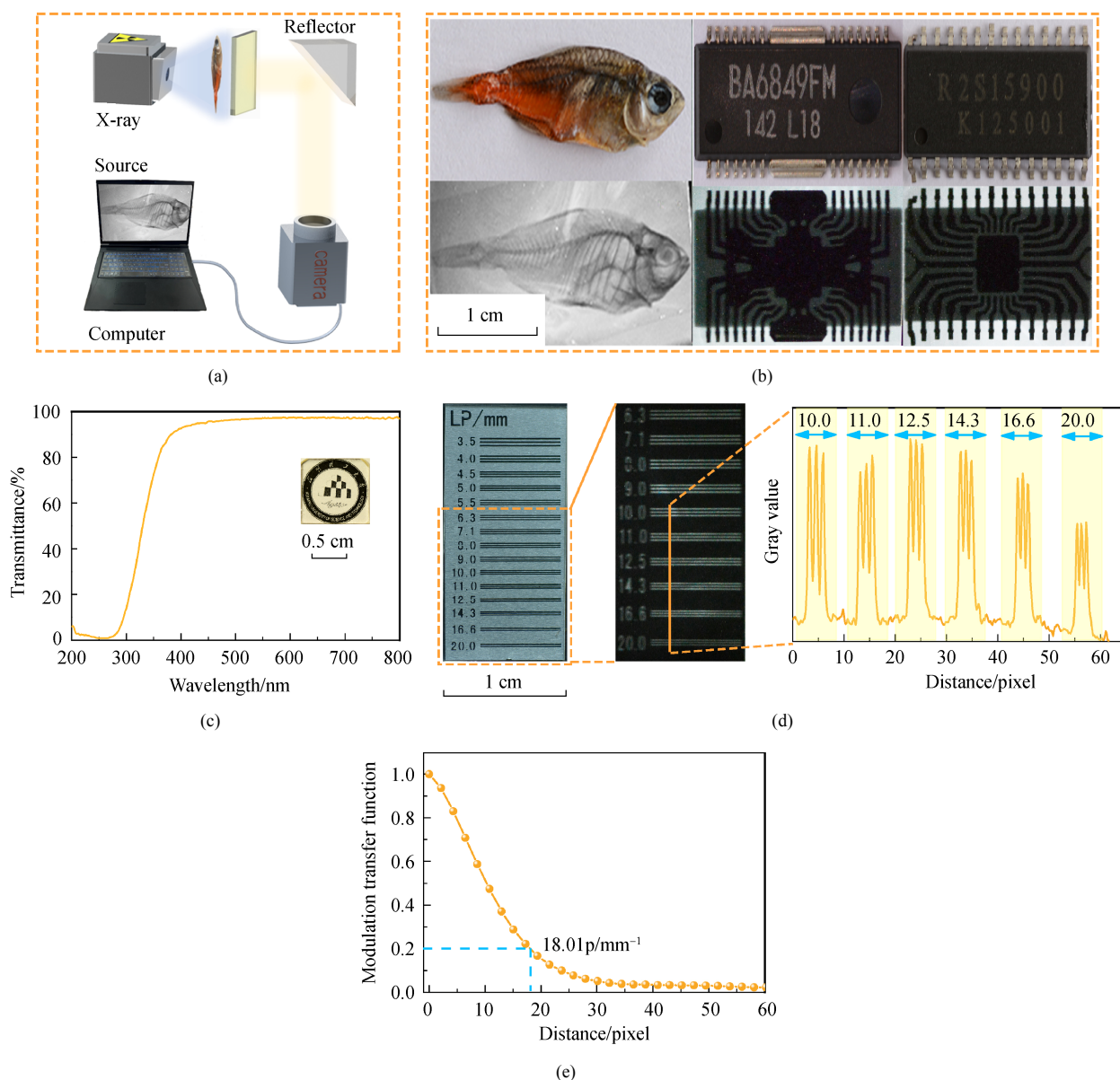


图3 (a) X射线成像系统示意图。(b)鱼和带有封装金属芯片板在日光下的照片及其X射线成像图像(剂量率为 654×10^{-4} J/kg, 电压为40 kV), 成像样品厚度为1 mm。(c) ZnS GC 的透过光谱, 插图中为GC样品实物照片。(d) X射线分辨率测试样板的照片和对应的X射线图像, 调制后灰度值沿黄线变化的图形。(e) ZnS GC 闪烁体的调制传递函数曲线

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the X-ray imaging system. (b) Photographs of fish and chip plates with encapsulated metal under sunlight and their X-ray imaging images (dose rate of 654×10^{-4} J/kg, voltage of 40 kV), imaging sample thickness of 1 mm. (c) Transmittance spectrum of ZnS GC, and the illustration is photo of GC sample. (d) Photographs of X-ray resolution test sample plates and corresponding X-ray images, graphs of gray value changing along the yellow line after modulation. (e) Modulation transfer function curve of ZnS GC scintillator

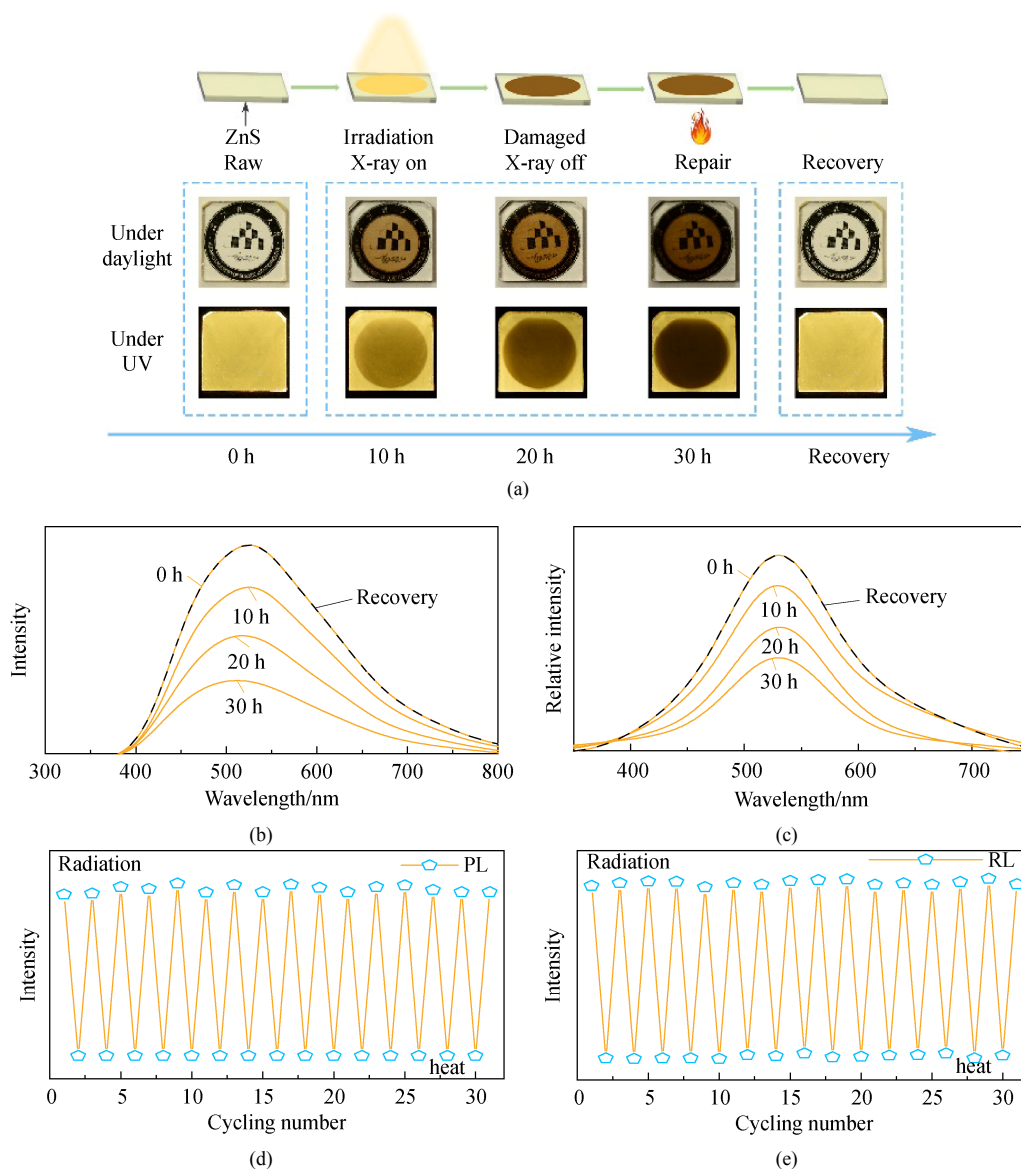


图 4 (a) ZnS GC 在 X 射线连续辐照后的照片和热处理恢复示意图。(b) ZnS GC 初始、损坏和恢复后的 PL 光谱。(c) RL 光谱。(d) ZnS GC 经历 15 次损坏和恢复后 PL。(e) RL 强度的变化

Fig. 4 (a) Photographs of continuous irradiation damage and heat treatment recovery of ZnS GC under X-ray. (b) PL spectra. (c) RL spectra of initial, damaged and restored ZnS GC. (d) intensity changes of PL. (e) RL after 15 times of damage and recovery of ZnS GC

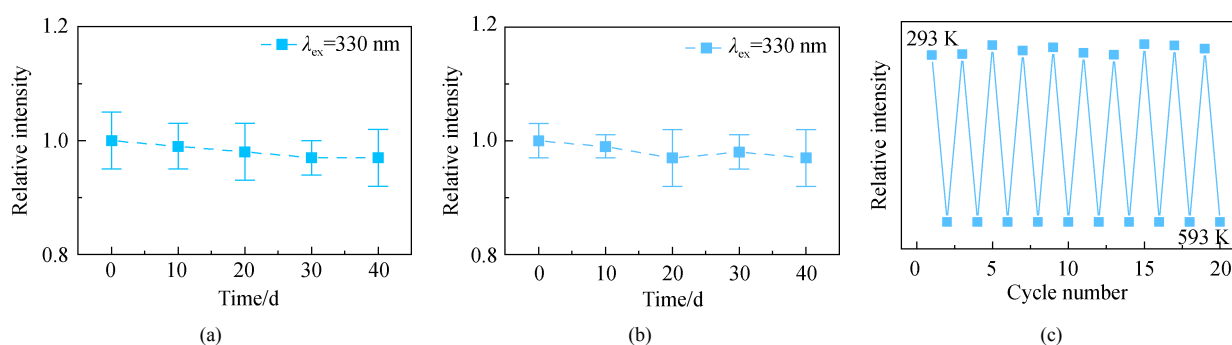


图 5 (a) ZnS GC 浸泡在水中不同时间的 PL 强度。(b) ZnS GC 在 254+365 nm 照射下不同时间后的 PL 强度。(c) ZnS GC 在 293 K 至 593 K 的温度范围内加热—冷却 10 次循环的 PL 强度

Fig. 5 (a) PL intensity of ZnS GC soaked in water for different time. (b) PL intensity of ZnS GC irradiated at 254+365 nm for different time. (c) PL intensity of ZnS GC heated-cooling 10 cycles in the temperature range of 293 K to 593 K

为了评估 ZnS GC 的耐候性, 将 ZnS GC 完全浸没在去离子水中, 以及在 254~365 nm 同时辐照下, 每隔 10 d 进行 1 次 PL 强度的测试, 得益于玻璃基体对内部量子点的保护, 一直持续 40 d, 其发光强度都维持在初始强度的 95% 以上(图 5a), 并且在 293 K 至 593 K 的温度范围内加热—冷却循环 10 次, 其发光强度依然可以回到初始强度, 进一步说明了玻璃基体对量子点的保护作用。这意味着 ZnS GC 闪烁体具备优异的环境稳定性, 是潜在可实际应用的闪烁体。

3 结论

ZnS 量子点在透明玻璃基体中原位析出并均匀分散, 在可见光范围内透过率达到 90% 以上, 使其能获得高空间分辨的 X 射线成像信息(18.0 lp/mm)。并且, 在水中放置以及被紫外灯照射 40 d 后依然具有稳定的发光性能。此外, 通过低温热处理退火的简单方式, 可以短时间内完全恢复高剂量 X 射线对 ZnS GC 闪烁体的损伤, 使闪烁体达到长期使用的目标。ZnS GC 闪烁体具有高的空间分辨率、优异的稳定性, 在医疗或工业 X 射线成像应用中具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] GUO P Y, SUN C, ZHANG N N, et al. An inorganic–organic hybrid photochromic material with fast response to hard and soft X-rays at room temperature[J]. *Chem Commun*, 2018, 54(36): 4525–4528.
- [2] BÜCHELE P, RICHTER M, TEDDE S F, et al. X-ray imaging with scintillator-sensitized hybrid organic photodetectors[J]. *Nat Photon*, 2015, 9(12): 843–848.
- [3] HORMOZAN Y, SYCHUGOV I, LINNROS J. High-resolution X-ray imaging using a structured scintillator[J]. *Medical Phys*, 2016, 43(2): 696–701.
- [4] ROWLANDS J A. Material change for X-ray detectors[J]. *Nature*, 2017, 550(7674): 47–48.
- [5] YANG B, PAN W, WU H, et al. Heteroepitaxial passivation of $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ wafers with suppressed ionic migration for X-ray imaging[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 1–10.
- [6] YE F, LIN H, WU H, et al. High-quality cuboid $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ single crystals for high performance X-ray and photon detectors[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, 29(6): 1806984.
- [7] TEMIÑO I, BASIRICÒ L, FRATELLI I, et al. Morphology and mobility as tools to control and unprecedentedly enhance X-ray sensitivity in organic thin-films[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 1–10.
- [8] THIRIMANNE H M, JAYAWARDENA K, 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): 1–10.
- [9] OU X, QIN X, HUANG B, et al. High-resolution X-ray luminescence extension imaging[J]. *Nature*, 2021, 590(7846): 410–415.
- [10] LI L, CHEN H, FANG Z, et al. An electrically modulated single - color/dual - color imaging photodetector[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(24): 1907257.
- [11] WEI H, HUANG J. Halide lead perovskites for ionizing radiation detection[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 1–12.
- [12] 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.
- [13] TEMIÑO I, BASIRICÒ L, FRATELLI I, et al. Morphology and mobility as tools to control and unprecedentedly enhance X-ray sensitivity in organic thin-films[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 1–10.
- [14] THIRIMANNE H M, JAYAWARDENA K, 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): 1–10.
- [15] WANG Z, FU R, LI F, et al. One-step polymeric melt encapsulation method to prepare CsPbBr_3 perovskite quantum dots/polymethyl methacrylate composite with high performance[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 31(22): 2010009.
- [16] CAO F, YU D, MA W, et al. Shining emitter in a stable host: Design of halide perovskite scintillators for X-ray imaging from commercial concept[J]. *ACS Nano*, 2019, 14(5): 5183–5193.
- [17] ZHANG Y, SUN R, OU X, et al. Metal halide perovskite nanosheet for X-ray high-resolution scintillation imaging screens[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(2): 2520–2525.
- [18] WANG B, PENG J, YANG X, et al. Template assembled large-size CsPbBr_3 nanocomposite films toward flexible, stable, and high-performance X-ray scintillators[J]. *Laser Photon Rev*, 2022: 2100736.
- [19] ZHOU J, AN K, HE P, et al. Solution-processed lead-free perovskite nanocrystal scintillators for high-resolution X-ray CT imaging[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, 9(11): 2002144.
- [20] ZHU W, MA W, SU Y, et al. Low-dose real-time X-ray imaging with nontoxic double perovskite scintillators[J]. *Light: Sci Appl*, 2020, 9(1): 1–10.
- [21] MA W, JIANG T, 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.
- [22] ZHANG Y, SUN R, OU X, et al. Metal halide perovskite nanosheet for X-ray high-resolution scintillation imaging screens[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(2): 2520–2525.
- [23] ZHOU Y, CHEN J, BAKR O M, et al. Metal halide perovskites for X-ray imaging scintillators and detectors[J]. *ACS Energy Lett*, 2021, 6(2): 739–768.
- [24] ZHOU F, LI Z, LAN W, et al. Halide perovskite, a potential scintillator for X-ray detection[J]. *Small Methods*, 2020, 4(10): 2000506.
- [25] WU H, GE Y, NIU G, et al. Metal halide perovskites for X-ray detection and imaging[J]. *Matter*, 2021, 4(1): 144–163.
- [26] JUINE R N, AMIRTHAPANDIAN S, DHARA S, et al. Nano-molar to milli-molar level Ag (I) determination using absorption of light by ZnS QDs without organic ligand[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 273: 1687–1693.
- [27] JUINE R N, SAHU B K, DAS A. Correlation with surface defects and maiden observation of disorder activated phonon in cubic ZnS QDs[J]. *Spectrochim Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 243: 118782.
- [28] 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.