

# 掺铈钆镓铝石榴石闪烁晶体辐照效应研究

韩恒利<sup>1,2</sup>,王强<sup>1,2,3</sup>,万前银<sup>1,2</sup>,屈菁菁<sup>1,2,4</sup>,安康<sup>3</sup>,陈研<sup>3</sup>,  
肖雄<sup>1,2</sup>,任科静<sup>1,2</sup>,丁雨瞳<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060;2. 中电科芯片技术(集团)有限公司,重庆 401332;  
3. 重庆大学工业CT无损检测教育部工程研究中心,重庆 400044;4. 重庆大学航空航天学院,重庆 400044)

**摘要:**使用<sup>60</sup>Co放射源对掺铈钆镓铝石榴石(Ce:GAGG)闪烁晶体样品进行辐照,剂量率为 $3 \times 10^5$  Rad/h,辐照总剂量分别为 $10^6$  Rad、 $10^7$  Rad和 $10^8$  Rad。通过测试辐照前后Ce:GAGG闪烁晶体样品的透过率、相对光输出、能量分辨率及衰减时间来研究辐照效应。实验结果表明,经过 $10^8$  Rad辐照,晶体的透过率在450~900 nm波段无明显变化,在320 nm处降幅最大(为8.9%);晶体的光输出降低了1.47%,能量分辨率略有下降;晶体的相对光输出、能量分辨率及衰减时间等性能未发生明显改变。验证了该晶体具有良好的抗 $\gamma$ 辐照能力,在高剂量核辐射探测领域中具有广阔的应用前景。

**关键词:**透过率;相对光输出;能量分辨率;衰减时间;辐照损伤

**中图分类号:**TN256;TN36 **文献标识码:**A

## Effect of Irradiation on Ce:GAGG Scintillation Crystals

HAN Hengli<sup>1,2</sup>, WANG Qiang<sup>1,2,3</sup>, WAN Qianyin<sup>1,2</sup>, QU Jingjing<sup>1,2,4</sup>, AN Kang<sup>3</sup>,  
CHEN Yan<sup>3</sup>, XIAO Xiong<sup>1,2</sup>, REN Kejing<sup>1,2</sup>, DING Yuchong<sup>1,2</sup>

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;  
2. CETC Chip Technology (Group) Co., Ltd., Chongqing 401332, China;  
3. ICT-NOT Engineering Research Center of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
4. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Ce:GAGG scintillation crystal samples were irradiated using a <sup>60</sup>Co radiation source at a dose rate of  $3 \times 10^5$  Rad/h, and the total irradiation doses delivered to the samples were  $10^6$ ,  $10^7$ , and  $10^8$  Rad. The effects of irradiation were investigated by measuring the transmittance, relative light output, energy resolution, and decay time of the Ce:GAGG scintillation crystal samples before and after irradiation. The experimental results showed that after irradiation at a dose of  $10^8$  Rad, the transmittance of the crystal remained unchanged in the 450-900 nm, and the lowest transmittance (8.9%) was detected at 320 nm. The light output of the crystal decreased by 1.47%, whereas the energy resolution deteriorated only slightly. The relative light output, energy resolution, and decay time of the crystal did not change significantly. These results confirm the high resistance of the crystal to  $\gamma$ -ray irradiation and demonstrate its broad application prospects in high-dose nuclear radiation detection.

**Key words:** transmittance; relative light output; energy resolution; decay time; radiation damage

## 0 引言

掺铈钆镓铝石榴石闪烁晶体(Ce:GAGG)是近年来发现的一种新型无机闪烁晶体材料<sup>[1]</sup>,其综合了碘化钠(NaI)、碘化铯(CsI)、硅酸钆镓(LYSO)等晶体的诸多优点,密度和衰减时间与LYSO相近,光产额是LYSO的两倍;余辉性能比CsI好近两个

数量级;能量分辨率优于NaI;发光波长与电荷耦合器件(CCD)、光电二极管(PD)等光电转换器件波长匹配良好,且具有无自发放射性、不潮解、物化性能稳定等优点,是一种用于核辐射探测领域的理想材料<sup>[2]</sup>。在X线成像领域,基于CsI(Tl)或LYSO(Ce)晶体的探测器被大量使用,在经过一定剂量的辐照

收稿日期:2024-11-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFF0706400)

作者简介:韩恒利(1984-),男,陕西省蓝田人,硕士,高级工程师。

后,闪烁体的光输出性能会变差<sup>[3]</sup>,导致设备的成像质量下降。研究表明,CsI(Tl)晶体经过  $10^3$  Rad 辐照后,光输出下降了 28%<sup>[4]</sup>;LYSO 晶体经过  $10^6$  Rad 辐照后,光输出下降了 12%<sup>[5]</sup>。

国外对 Ce:GAGG 闪烁晶体的辐照效应研究较多。2015 年,Tyagi 等<sup>[6]</sup>研究了 Ce:GAGG 闪烁晶体损伤机理,结果表明,不同掺杂对 Ce:GAGG 闪烁晶体的抗辐照损伤能力有重要影响。2016 年, Lucchini 等<sup>[7]</sup>使用  $^{60}\text{Co}$  放射源辐照 Ce:GAGG 闪烁晶体(剂量达到 120 kGy),测试其辐照前后的透过率,发现高剂量  $\gamma$  射线照射下其光学透过率无明显变化。2019 年,Alenkov 等<sup>[8]</sup>使用能量为 24 GeV、通量为  $10^{15}$  P/cm<sup>2</sup> 的质子辐照 Ce,Ti:GAGG 闪烁晶体,在总剂量达到  $10^6$  Rad 时测量辐照后的透过率,发现在发射峰( $\sim 540$  nm)附近未产生较强的辐射诱导吸收。国内对 Ce:GAGG 闪烁晶体辐照效应研究的公开报道较少。

本文使用剂量率为  $3 \times 10^5$  Rad/h 的  $^{60}\text{Co}$  放射源照射 Ce:GAGG 闪烁晶体样品,研究辐照总剂量分别为  $10^6$  Rad、 $10^7$  Rad 和  $10^8$  Rad 时样品的透过率、光输出、能量分辨率及衰减时间 4 项性能指标的变化情况。

## 1 实验仪器及方法

闪烁晶体使用中国电子科技集团公司第二十六研究所生产的 Ce:GAGG 闪烁晶体,发射峰值波长为 540 nm,尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ,两个  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  面抛光(粗糙度  $Ra \leq 5\text{ nm}$ ),样品如图 1 所示。透过率测试采用铂金埃尔默公司的 Lambda1050 型分光光度计,透过率波动为  $\pm 0.5\%$ ,波长范围为 190~900 nm,步进为 0.5 nm。

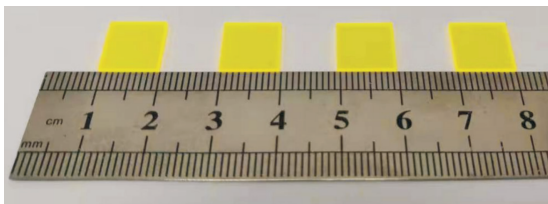


图 1 Ce:GAGG 闪烁晶体样品

晶体的光输出与伽玛射线全能峰峰位成正比,故采用相对测量法<sup>[9]</sup>,通过对比辐照前后 Ce:GAGG 晶体的全能峰峰位,分析出晶体光输出的辐照特性。将晶体的一个  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  面与 CR105 型光电倍增管(Phantomultiplier, PMT)耦

合,输出信号接入北京核仪器厂的 BH1324 一体化多道分析器,采用  $^{137}\text{Cs}$  放射源激发晶体,测量得到 662 keV  $\gamma$  射线对应的全能峰峰位和能量分辨率。

晶体的衰减时间采用平均示波器法测得。PMT 选用 Hamamatsu 的 XP20D0,上升时间为 1.2 ns,脉冲宽度为 2.2 ns;示波器选用 Tektronix DPO4104,带宽为 1 GHz,采样率为 5 GSa/s。将晶体的一个  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  面与 PMT 耦合,选择平均波形数量为 512,采用 Origin 的负指数函数对所测波形数据进行拟合,得出晶体的衰减时间。

测试完闪烁晶体的透过率、相对光输出、能量分辨率及衰减时间 4 项性能指标后,使用  $^{60}\text{Co}$  放射源(剂量率为  $3 \times 10^5$  Rad/h)对闪烁晶体进行照射。当晶体的总照射剂量分别达到  $10^6$  Rad、 $10^7$  Rad、 $10^8$  Rad 时,通过上述方法测量出晶体的透过率、光输出、能量分辨率及衰减时间性能参数。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 透过率

图 2 为 Ce:GAGG 晶体样品辐照前后的透过率对比曲线,由图可看出,在经过总剂量为  $10^6$  Rad、 $10^7$  Rad、 $10^8$  Rad 的辐照后,Ce:GAGG 晶体 X 线荧光光谱在主要发射谱段<sup>[10]</sup>(450~800 nm,发射峰值约为 540 nm)的透过率波动在  $\pm 0.5\%$  以内,表明该波段的透过率变化不明显。在 190~450 nm,随着晶体总辐照剂量的增加,晶体的透过率有所下降。在 320 nm 处,晶体辐照前后的透过率差异相对较大,辐照后透过率分别降低了 1.3% ( $10^6$  Rad)、3.2% ( $10^7$  Rad) 和 8.9% ( $10^8$  Rad)。

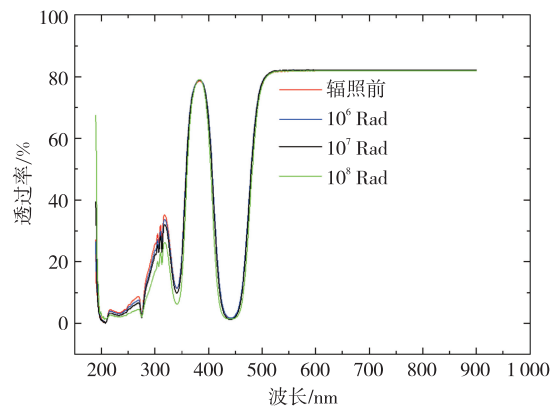


图 2 辐照前后透过率对比曲线

### 2.2 相对光输出和能量分辨率

图 3 为辐照前后 Ce:GAGG 晶体样品的  $^{137}\text{Cs}$  能谱。由图可看出,晶体在经过  $10^6$  Rad、 $10^7$  Rad、

$10^8$  Rad 总剂量辐照后,全能峰峰位道值逐步减小,表明 GAGG:Ce 晶体的光输出受到辐照后会降低。

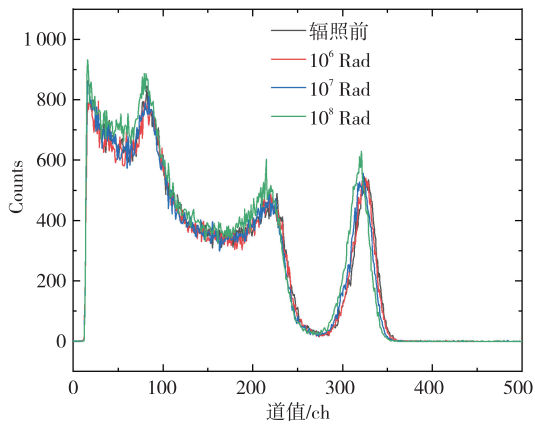


图3 辐照前后能谱对比曲线

通过高斯拟合计算出全能峰峰位道值及对应的能量分辨率,结果如表1所示。由表可看出,Ce:GAGG 晶体在经过总剂量为  $10^6$  Rad、 $10^7$  Rad 和  $10^8$  Rad 的辐照后,光输出分别降低了 0.16%、0.72% 和 1.47%,能量分辨率分别变差了 0.01%、0.11% 和 0.23%,表明 Ce:GAGG 晶体在  $10^8$  Rad 辐照后,光输出和能量分辨率略有降低。

表1 辐照前后光输出、能量分辨率测试结果

辐照量/Rad	峰值位置/ch	光输出变化率	能量分辨率/%
0	325.85	/	7.18
$10^6$	325.32	-0.16%	7.19
$10^7$	323.49	-0.72%	7.29
$10^8$	321.07	-1.47%	7.41

### 2.3 衰减时间

图4为辐照前后 Ce:GAGG 晶体的衰减时间对比曲线。衰减时间测试结果如表2所示,由表可看出,晶体在辐照前后的衰减时间曲线无明显变化。

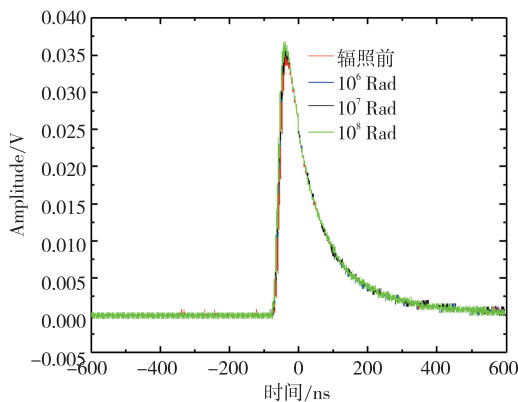


图4 辐照前后衰减时间对比曲线

表2 辐照前后衰减时间测试结果

辐照量/Rad	衰减时间/ns	衰减时间率
0	89.52	/
$10^6$	89.07	-0.5%
$10^7$	89.26	-0.3%
$10^8$	89.40	-0.1%

### 3 结束语

本文研究了 Ce:GAGG 闪烁晶体在  $^{60}\text{Co}$  放射源辐照下透过率、相对光输出、能量分辨率和衰减时间的辐照损伤效应。透过率性能测试结果表明,在 Ce:GAGG 发射谱段(450~800 nm)经  $10^8$  Rad 辐照后,晶体的透过率无明显变化,验证了其优异的光学稳定性;但在 320 nm 处,经  $10^8$  Rad 辐照后透过率下降了 8.9%,表明该波长区域可能产生新的色心或晶格缺陷。相对光输出、能量分辨率、衰减时间性能实验表明经  $10^8$  Rad 辐照后,Ce:GAGG 闪烁晶体的主要闪烁性能指标降低较少,体现了其优异的闪烁性能稳定性。研究结果表明,Ce:GAGG 闪烁晶体在抗辐照能力方面优于常用的 NaI(Tl)、CsI(Tl)、Ce:LYSO 等闪烁晶体。

本文研究为新型抗辐射探测器的开发提供了关键数据支撑,验证了 Ce:GAGG 闪烁晶体在高剂量辐照环境(如空间探测、核反应堆监测等)中的适用性,其无自发辐射、不潮解等特性进一步提升了在便携式核辐射探测中的应用价值。后续研究将深入探索高剂量辐照诱导 Ce:GAGG 闪烁晶体缺陷的微观机制和抗辐照极限,并通过掺杂和优化生长工艺进一步提升其抗辐照性能。

### 参考文献:

- [1] KAMADA K, YANAGIDA T, ENDO T, et al. 2 inch diameter single crystal growth and scintillation properties of Ce:  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  [J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 352(1): 88-90.
- [2] 王璐,王强,屈菁菁,等.一种新型 Ce:GAGG 闪烁探测器性能研究[J].压电与声光,2020,42(6):806-809.  
WANG Lu, WANG Qiang, QU Jingjing, et al. Study on the performance of a novel Ce:GAGG scintillation detector[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2020, 42(6): 806-809.
- [3] 李正国.闪烁晶体  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  的辐照损伤研究[D].杭州:中国计量学院,2014.
- [4] VENNINK R, KOPECKY J, ENDT P M, et al. In-

- vestigation of the  $^{56}\text{Fe}(n,\gamma)^{57}\text{Fe}$  and  $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$  reactions[J]. Nuclear Physics A, 1980, 344(3): 421-445.
- [5] MAO Rihua, ZHANG Liyuan, ZHU Renyuan. Gamma ray induced radiation damage in PWO and LSO/LYSO crystals[C]//Orlando, FL, USA: 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), 2009: 2045-2049.
- [6] TYAGI M, MENG Fang, KOSCHAN M, et al. Effect of co-doping on the radiation hardness of  $\text{Gd}_3\text{Ga}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}:\text{Ce}$  Scintillators [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015, 62(1): 336-339.
- [7] LUCCHINI M T, BABIN V, BOHACEK P, et al. Effect of  $\text{Mg}^{2+}$  ions co-doping on timing performance and radiation tolerance of Cerium doped  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  crystals [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 816: 176-183.
- [8] ALENKOV V, BUZANOV O, DOSOVITSKIY G, et al. Irradiation studies of a multi-doped  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 916: 226-229.
- [9] SYSOEVA E, TARASOV V, ZELENSKAYA O. Comparison of the methods for determination of scintillation light yield[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2002, 486(1/2): 67-73.
- [10] 万前银, 王强, 谢玉清, 等. GAGG:Ce 探测器封装技术研究[J]. 原子能科学技术, 2025, 59(1): 183-188.  
WAN Qianyin, WANG Qiang, XIE Yuqing, et al. Study on packaging technology of GAGG:Ce scintillation detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2025, 59(1): 183-188.
- 
- (上接第 103 页)
- [11] WANG Z, ZHANG L, LIU J, et al. A flexible bimodal sensor based on an electrospun nanofibrous structure for simultaneous pressure-temperature detection[J]. Nanoscale, 2019, 11(30): 14242-14249.
- [12] 薛兆康, 国旗, 刘善仁, 等. 油气井下光纤光栅温度压力传感器[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1224-1230.  
XUE Zhaokang, GUO Qi, LIU Shanren, et al. Fiber Bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1224-1230.
- [13] 刘坤林. 柔性温压一体化传感器设计与制备[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [14] 佟嘉程, 朴林华, 李备, 等. 高灵敏度热膨胀陀螺敏感机理研究[J]. 压电与声光, 2023, 45(2): 202-208.  
TONG Jiacheng, PIAO Linhua, LI Bei, et al. Study on sensitive mechanism of high-sensitivity thermal expansion gyroscopes[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023, 45(2): 202-208.
- [15] JIAO Kui, PARK J, LI Xianguo. Experimental investigations on liquid water removal from the gas diffusion layer by reactant flow in a PEM fuel cell[J]. Applied Energy, 2010, 87(9): 2770-2777.