

GdI₃:Ce 晶体的生长及其闪烁性能研究

叶 乐¹, 史 坚², 李焕英², 陈晓峰², 黄跃峰³, 徐家跃¹, 任国浩²

(1. 上海应用技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201418; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 201800; 3. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘 要: 通过坩埚下降法生长 GdI₃:2%Ce 及无掺杂 GdI₃ 闪烁晶体, 得到 $\phi 15\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的晶体毛坯, 从中加工出尺寸分别为 $12\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ 和 $11\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ 的无包裹体、无开裂的晶体样品, 封装后检测该晶体光学性能。XRD 分析结果表明: 掺杂晶体 GdI₃:2%Ce 与无掺杂 GdI₃ 晶体结构相同。X 射线激发发射(XEL)和紫外激发发射谱(PL)测试结果显示: GdI₃:2%Ce 晶体在 450~700 nm 有宽带发光峰, 发光峰位分别位于 520 nm 和 550 nm, 对应于 Ce³⁺ 的 5d-4f 跃迁发光。以 550 nm 为监控波长, 测得在紫外激发下存在三个激发峰, 分别位于 262、335 和 440 nm。GdI₃:2%Ce 晶体在 ¹³⁷Cs 源伽马射线(662 keV) 激发下能量分辨率为 3.4%, 通过高斯拟合得到的衰减时间为 $58 \pm 3\text{ ns}$ 。研究表明, GdI₃:2%Ce 晶体是一种良好的伽马和中子探测材料, 具有广泛的应用前景。

关 键 词: GdI₃:2%Ce 晶体; 坩埚下降法; 闪烁性能

中图分类号: TQ174

文献标识码: A

Growth and Scintillation Properties of GdI₃:Ce Crystal

YE Le^{1,2}, SHI Jian², LI Huan-Ying², CHEN Xiao-Feng², HUANG Yue-Feng³, XU Jia-Yue¹, REN Guo-Hao²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China ; 3. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Gadolinium iodide doped with Cerium (GdI₃:2%Ce) and undoped gadolinium iodide (GdI₃) crystals were grown by vertical Bridgman method with sealed quartz crucible. Crystal ingots with dimension of $\phi 15\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ were cut and polished to be plates of $12\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ and $11\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$. GdI₃:2%Ce without crack and inclusion were encapsulated for all the measurements. X-ray diffraction analysis shows that the Ce³⁺-doped GdI₃ and undoped GdI₃ crystal have the same structure. X-ray and ultraviolet excited luminescence spectra of GdI₃:2%Ce present broad emission bands peaking at 520 nm and 550 nm, respectively, which correspond to 5d-4f transition luminescence of Ce³⁺. Three peaks located at 262, 335 and 440 nm can be observed in excitation spectra when photoluminescence is monitored at 550 nm. The GdI₃:2%Ce crystal presents an excellent energy resolution of 3.4% and decay time of $(58 \pm 3)\text{ ns}$ under excitation of 662 keV gamma-rays from ¹³⁷Cs source. The results show the GdI₃:2%Ce crystal is a promising scintillator for gamma ray and neutron detection.

Key words: GdI₃:2%Ce crystal; Bridgman method; scintillation property

2004 年, 人们发现 LuI₃:Ce 晶体具有十分优异的闪烁性能, 如高密度, 高有效原子序数(60), 极高

收稿日期: 2016-06-16; 收到修改稿日期: 2016-10-18

基金项目: 青年科学基金(11305247); 国家自然科学基金(51372256)

National Science Foundation for Young Scientists of China (11305247); National Natural Science Foundation of China (51372256)

作者简介: 叶 乐(1990-), 男, 硕士研究生. E-mail: maxruin@sina.cn

通讯作者: 任国浩, 研究员. E-mail: rgh@mail.sic.ac.cn; 黄跃峰, 博士. E-mail: hyuefeng@sinap.ac.cn

的光输出($>100000\text{ph/MeV}$), 高能量分辨率($<4\%$, 662 keV), 短的衰减时间($\sim 30\text{ ns}$), 发光峰中心位于 480 nm (与光电倍增管光谱响应匹配良好)^[1-3]等等。因此, 研究人员对其同结构的 $\text{GdI}_3\text{:Ce}$ 晶体开展了相关研究。 $\text{GdI}_3\text{:Ce}$ 与 $\text{LuI}_3\text{:Ce}$ 均为 BiI_3 型晶体结构, 空间群为 $R\bar{3}(148)$, 用 Gd 替代 Lu 具有两种优势^[4]: 第一, Lu 元素中的 ^{176}Lu 是放射性元素, 在仪器检测过程中会产生本底噪声, 影响测试准确性, 而 Gd 基化合物中不存在这种现象; 第二, 稀土元素 Gd 的两种同位素 ^{157}Gd 、 ^{155}Gd 具有高达 10^5 量级的热中子反应截面, 是其它探测体如 ^3He 、 ^{10}B 、 ^7Li 的 20 倍以上, 因此 Gd 基化合物在中子探测上具有极大的应用潜力。

中子是一种中性高能粒子, 不能直接引起物质电离而被探测, 因此探测中子必须借助其与原子核发生作用而产生的次级带电粒子来实现。对中子探测材料主要要求有: 高的中子响应截面, 低的伽玛射线灵敏度, 短的衰减时间, 高的光输出和高的能量分辨率, 高的 α/β 比率, 较小的折射率, 高的抗辐照硬度等^[5]。目前主要研究并应用的是 ^6Li 基和 ^{10}B 基闪烁体, $\text{GdI}_3\text{:Ce}$ 晶体具有高的有效原子数 57, 高的热中子反应截面, 对热中子具有非常高的探测效率, $200\text{ }\mu\text{m}$ 的 $\text{GdI}_3\text{:Ce}$ 薄膜晶体对热中子的探测效率高达 95% ^[6]。

2006 年, 美国 RMD 公司通过下降法生长出了 $\phi 10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的 2% 掺杂的 GdI_3 晶体^[4]。2007 年, Birowosuto 等^[7]也报道了 Ce 掺杂的 GdI_3 晶体性能。但 GdI_3 原料和晶体都极易潮解, 晶体具有完全解理面, 生长无包裹体、无裂纹、大尺寸晶体十分困难, 加上晶体硬度很低, 切割抛光时难以得到光滑平整表面, 测试时还需防止样品接触空气而潮解, 这些问题给实验研究带了很大困难。RMD 公司研究报道的 Ce 掺杂 GdI_3 晶体文献^[4]中, 生长的 $\text{GdI}_3\text{:Ce}$ 晶体样品形状不规整且尺寸很小(仅有几毫米), 晶体表面质量差, 实验测得的光输出($\sim 58,000\text{ photons/}$

MeV)和能量分辨率(8.7%)与理论值($>100,000\text{ photons/MeV}$, $<4\%$)均相差较大, 甚至不同文献中报道的 $\text{GdI}_3\text{:Ce}$ 晶体的 X 射线激发和紫外激发图谱峰位和峰形数目均存在明显差异^[4,6-7]。

本工作通过下降法生长并制备了尺寸 $12\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$, $11\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ 等多个样品, 对封装后的晶体闪烁性能进行表征与分析。

1 实验方法

1.1 晶体生长与封装

采用纯度为 99.98% 的 GdI_3 和 99.99% 的 CeI_3 粉末为原料, 将原料按照化学计量比进行称量和配料, 再装入特殊形状的石英坩埚内。由于原料和生长出的晶体极易潮解, 因此晶体生长及加工封装过程均须避免与大气接触。实验装料在真空手套箱内进行, 箱内水和氧含量须低于 0.1×10^{-6} , 用真空泵抽真空并使用氢氧焰封口, 确保晶体生长过程是在无水无氧环境下进行(见图 1)。

采用中科院上海硅酸盐研究所自制的下降炉进行晶体生长, 坩埚下降速率为 0.6 mm/h ^[8]。生长出 $\phi 15\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的晶体毛坯经过切割加工、研磨、抛光后, 得到 $12\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$, $11\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ 多个不同尺寸的样品, 分别采用比色皿封装和铝制套管封装, 密封铝制套管出光面采用石英玻璃窗封口。

1.2 分析测试

采用 Bruker D8 ADVANCE X 射线衍射仪进行物相分析, 仪器参数: Cu 靶, 功率 3 kW , 陶瓷光管, LynxEye 阵列探测器, 角度分辨率为 0.037° , 衍射强度 10^8 cps , 仪器测试设定 X 射线管电压 40 kV , 电流 40 mA , 扫描范围 $10^\circ\sim 70^\circ$, 步进 0.02° , 扫描速度 $2^\circ/\text{min}$, 由于粉末试样极易潮解, 制样过程须在真空手套箱内完成, 测试时研磨的样品粉末放置在特

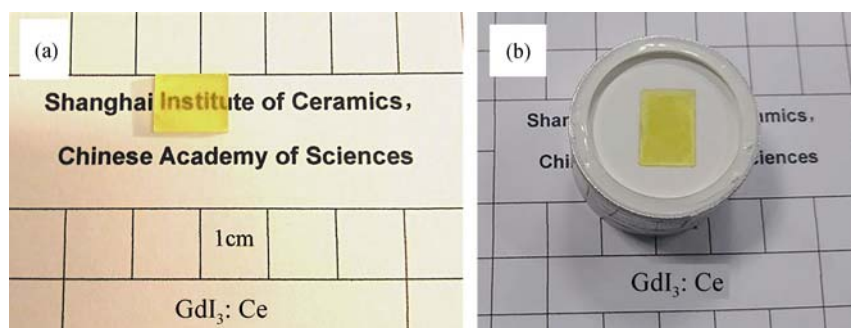


图 1 (a)未封装和(b)封装后 $\text{GdI}_3\text{:2\%Ce}$ 晶体样品的照片

Fig. 1 Photos of samples of $\text{GdI}_3\text{:2\%Ce}$ crystal (a) without encapsulation and (b) after encapsulation

殊密封样品盒内, 避免接触空气。

采用中科院上海硅酸盐研究所自主搭建的 X 射线激发光谱仪测试样品的 X 射线激发发射光谱(XEL)。实验设定 X 射线管电压 65 kV, 电流为 3 mA, 光电倍增管(PMT, R456, Hamamatsu)电压 700 V, 测试无掺杂 GdI_3 样品时 PMT 电压提高至 900 V。

采用英国爱丁堡仪器公司的 FLS980 光谱仪测试样品的荧光光谱(PL), 选用半导体制冷型 PMT 检测器, 激发源为 Xe 灯, 在室温条件下测试。

采用 ^{137}Cs 源激发产生的 662 keV 的伽马射线激发晶体测试多道能谱, 光子经光电倍增管(PMT, R594, Hamamatsu)接收、放大后转换成电信号, 经 Ortek 多道能谱仪处理得到能谱全能峰数据。

采用本课题组自主搭建设备测试伽马射线激发下衰减时间, 激发源 ^{137}Cs , 测试数据经 origin 软件拟合得到衰减时间分量。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

GdI_3 晶体为 BiI_3 型三方晶系结构, 可看作轻微扭曲的八面体, 每个 Gd^{3+} 配位 6 个 I^- , 晶格常数 $a=b=(0.755\pm0.001)$ nm, $c=(2.080\pm0.002)$ nm^[9]。对 GdI_3 原料、生长的 $\text{GdI}_3:2\%\text{Ce}$ 闪烁晶体中透明部分研磨成粉末试样进行 XRD 测试分析, 结果如图 2 所示。 $2\theta=10^\circ\sim20^\circ$ 区域处存在的大峰包为测试装样时所用样品盒的衍射峰, 对比纯 GdI_3 和 $\text{GdI}_3:2\%\text{Ce}$ 晶体粉末的 XRD 图谱可以看到, 两者的衍射峰形一致, Ce^{3+} 掺入晶体后引起晶体衍射峰向小角度略有偏移, 这是由于 Ce 离子半径(0.115 nm)大于 Gd 离子(0.1078 nm)^[9], 掺杂后使得晶面间距变大造成的。

2.2 X 射线激发发射(XEL)光谱

对纯 GdI_3 晶体和 $\text{GdI}_3:2\%\text{Ce}$ 闪烁体样品进行 X 射线激发发射光谱测试, 结果如图 3 所示。 GdI_3 :

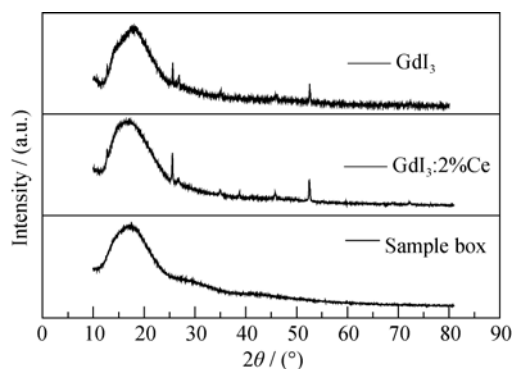


图 2 纯 GdI_3 和 $\text{GdI}_3:2\%\text{Ce}$ 晶体粉末的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of GdI_3 and $\text{GdI}_3:2\%\text{Ce}$ crystal powder

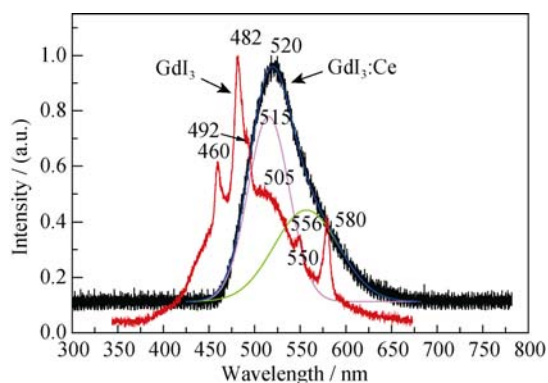


图 3 纯 GdI_3 晶体和 $\text{GdI}_3:2\%\text{Ce}$ 的 XEL 光谱
Fig. 3 XEL spectra of pure GdI_3 and $\text{GdI}_3:2\%\text{Ce}$ crystals

$2\%\text{Ce}$ 闪烁体在 450~650 nm 之间存在一个宽带发光峰, 这是 Ce^{3+} 的特征发光峰。 Ce^{3+} 的 $4f^1$ 能级在自旋-轨道耦合的作用下分裂出 $^2F_{5/2}$ 和 $^2F_{7/2}$ 两个子能级, 激发态 $5d^1$ 能级的最低子能级到 $4f^1$ 的基态跃迁有 $5d^1 \rightarrow ^2F_{5/2}$, $5d^1 \rightarrow ^2F_{7/2}$ 两种跃迁, 所以 Ce^{3+} 离子的荧光峰呈现出不对称的宽带发光。对 $\text{GdI}_3:2\%\text{Ce}$ 闪烁体宽带发光峰拟合可以得到两个发光分量 515 nm 和 556 nm, 分别对应 Ce^{3+} 离子激发态电子的 $5d^1 \rightarrow ^2F_{5/2}$, $5d^1 \rightarrow ^2F_{7/2}$ 跃迁^[7, 10-11]。纯 GdI_3 闪烁体在 350 nm 到 650 nm 间存在宽带发光, 在 460、482、492、505、550、580 nm 均有发光峰, 550 nm 处发光可能为原料中杂质 Tb^{3+} 离子发光所致, 对比可知掺杂后发光峰数目减少, 表明 Ce^{3+} 掺杂导致纯 GdI_3 中发光中心能量向 Ce^{3+} 发光转移。

2.3 紫外激发和发射光谱

图 4 为纯 GdI_3 晶体样品在紫外激发下的激发发射光谱, 从图中可看出, 存在两个激发谱带, 一个在 300~380 nm 之间, 另一个在 400~450 nm 之间。在 418 nm 紫外光激发下, 晶体在 450~700 nm 间有宽带发光; 在 332 nm 紫外光激发下, 所产生的发射谱

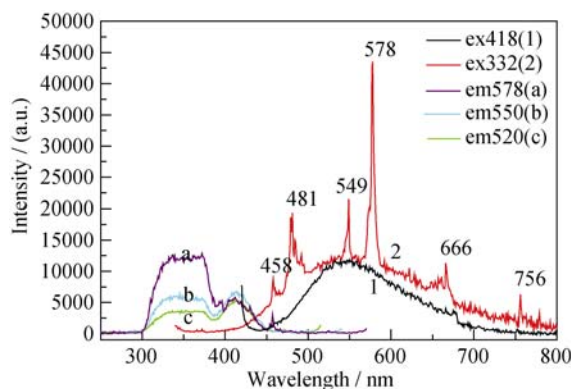


图 4 纯 GdI_3 样品激发和发射谱
Fig. 4 Photoluminescence excitation and emission spectra of pure GdI_3 crystal

由带谱和线谱两部分构成, 线谱的峰值波长分别为 458、481、549、578、666、756 nm。对比图 3、图 4 可以发现纯 GdI₃ 晶体 XEL 谱图和 332 nm 紫外光激发发射谱谱峰位置基本一致。

图 5 为 GdI₃: 2%Ce 样品紫外激发下的激发和发射谱, 从图中可以看出三个激发峰分别位于 262、335、440 nm 附近, 其中位于 335、440 nm 处的激发峰对应 Ce³⁺ 的吸收, 262 nm 处激发峰对应于带与带间的激子转移^[4]。在 335、450 nm 紫外激发光激发下, 晶体在 450~700 nm 间有一个宽的发光峰, 这是 Ce³⁺ 的特征发光峰, 对应着 Ce³⁺ 离子的 5d¹ 到 ²F_{5/2}, ²F_{7/2} 能级跃迁发光^[12-13]。

对比图 4、图 5 可以发现, 在 335 nm 紫外光激发下, GdI₃: 2%Ce 晶体发射谱仅有一个宽带发光峰, 而纯 GdI₃ 晶体在 332 nm 紫外光激发下的激发谱图则存在 458、481、549、578、666、756 nm 众多线状发光峰, 这表明 Ce³⁺ 掺杂后, 原发光中心能量向 Ce³⁺ 发光中心传递, 其中部分发光峰与 GdI₃: 2%Ce 晶体发射谱重叠而被掩盖。

2.4 多道能谱

图 6 是 GdI₃: 2%Ce 样品和 CsI: Tl 标样在 ¹³⁷Cs 激发源激发下的多道能谱, 晶体样品尺寸分别为 11 mm×8 mm×2.5 mm 和 ϕ25.4 mm×25.4 mm, 从图中可以计算出样品与标样的全能峰分别位于 303 道

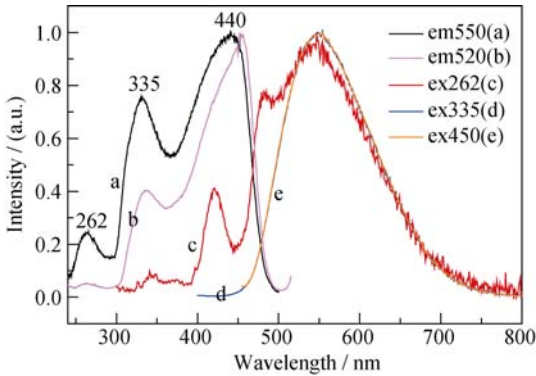


图 5 GdI₃: 2%Ce 样品激发(λ_{em} = 520、550 nm)和发射谱(λ_{ex} =262、335、450 nm)
Fig. 5 Photoluminescence excitation spectra monitored at 520、550 nm and emission spectra(λ_{ex} =262, 335, 450 nm) of GdI₃: 2%Ce crystal

和 489 道, 能量分辨率分别为 3.4%和 7.8%, 其中 GdI₃: 2%Ce 晶体能量分辨率 3.4%比文献[4,7,14]报道的 8.7%、5.7%改进了很多, 接近其理论预测值, 说明实验制备的样品质量比以往有大幅提高。表 1 为 GdI₃: 2%Ce 与 CsI: Tl 样品多道能谱测试数据对比, 其中样品测试时成形时间设置为 3 μ s。

2.5 伽马射线激发下的衰减时间

实验分别测试了在 ¹³⁷Cs 源伽马射线激发下, GdI₃: 2%Ce 晶体样品封装在比色皿和封装在铝盒中的衰减时间曲线, 数据显示, 不同封装条件下, 晶体衰减时间相同, 样品的这两种封装形式对晶体衰减时间并无影响。图 7 为铝盒封装样品在 ¹³⁷Cs 源伽马射线激发下衰减时间曲线, 从实验测试数据中拟合出的衰减时间为(58±3) ns, 对应 Ce³⁺ 直接捕获电子空穴对发光, 与文献[4]报道两个衰减时间分量(39 ns, 150 ns), 文献[7](GdI₃: 1%Ce)报道的三个衰减时间分量(45 ns, 250 ns, 2000 ns)存在明显不同。本研究样品的衰减分量数目少, 快分量(Ce³⁺ 衰减发光)时间稍慢, 但没有发现大于 100ns 的慢分量, 其原因有待进一步探究。

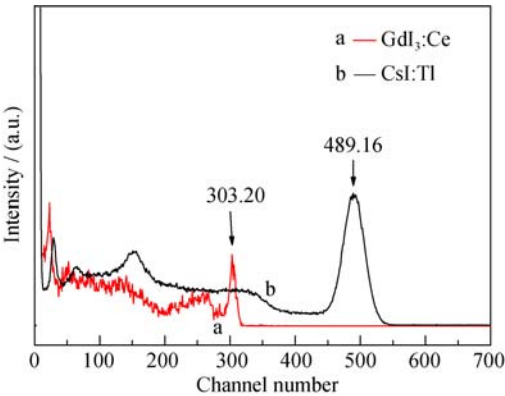


图 6 GdI₃: 2%Ce 样品和 CsI: Tl 标样在 ¹³⁷Cs 激发下的多道能谱
Fig. 6 Pulse height spectra of GdI₃: 2%Ce crystal and CsI: Tl crystal excited by ¹³⁷Cs

3 结论

采用石英坩埚真空下降法生长由内部无宏观缺陷的纯 GdI₃、GdI₃: 2%Ce 晶体, 加工得到无包裹

表 1 GdI₃: 2%Ce 与 CsI: Tl 样品多道能谱对比
Table1 Pulse height spectra of GdI₃: 2%Ce with CsI: Tl crystal for comparison

Sample	Size/mm	Shaping time/ μ s	Dead time	Peak/nm	FWHM	E.R./%
GdI ₃ : 2%Ce	11×8×2.5	3	≤4%	303.20	10.25	3.4
CsI: Tl	ϕ25.4×25.4	3	≤13%	489.16	38.25	7.8

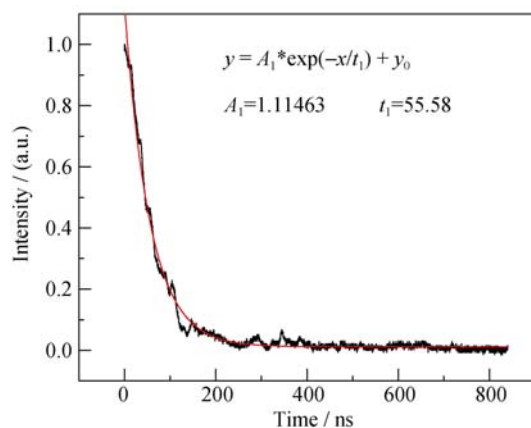


图 7 室温下 $\text{GdI}_3: 2\%\text{Ce}$ 晶体在 ^{137}Cs 源伽马射线激发下衰减时间曲线

Fig. 7 Decay curve and its fitted line of $\text{GdI}_3: 2\%\text{Ce}$ crystal excited by ^{137}Cs Gamma-ray at room temperature

体、无开裂的最大尺寸样品。理论分析 Ce^{3+} 半径大于 Gd^{3+} , 掺杂后晶面间距变大, 将会引起 XRD 衍射角变小, 这与实验测试 XRD 结果 $\text{GdI}_3: 2\%\text{Ce}$ 晶体衍射峰相对 GdI_3 晶体向小角度略有偏移相吻合。对比 XEL 和 PL 谱图发现, 在 X 射线和紫外光激发下, Ce^{3+} 掺杂晶体只存在一个宽带发光峰, 而纯 GdI_3 晶体中存在 6 个杂质线谱峰, 表明 Ce^{3+} 掺杂后, 原发光中心能量向 Ce^{3+} 发光中心发生传递。在 ^{137}Cs 源伽马射线激发下, $\text{GdI}_3: 2\%\text{Ce}$ 晶体的能量分辨率为 3.4%, 这是迄今为止得到的最佳能量分辨率。 $\text{GdI}_3: 2\%\text{Ce}$ 晶体样品在伽马射线激发下仅存在一个快衰减分量, 衰减时间为 $(58 \pm 3)\text{ns}$, 这与文献报道的两、三个分量明显不同, 其机理尚待确定。

综上所述, $\text{GdI}_3: 2\%\text{Ce}$ 闪烁晶体发光效率高, 衰减时间快, 且只有一个快衰减时间, 能量分辨率好, 是一种性能优异的中子和伽马射线探测材料, 具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] GLODO J, SHAH K S, KLUGERMAN M, *et al.* Scintillation properties of $\text{LuI}_3: \text{Ce}$. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 2005, **537**(1/2): 279–281.
- [2] SHAH K S, GLODO J, KLUGERMAN M, *et al.* $\text{LuI}_3: \text{Ce}$ -a new

scintillator for gamma ray spectroscopy. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, **51**(5): 2302–2305.

- [3] BIROWOSUTO M D, DORENBOS P, EIJK C W E V, *et al.* High-light-output scintillator for photodiode readout: $\text{LuI}_3: \text{Ce}^{3+}$. *Journal of Applied Physics*, 2006, **99**(12): 123520-1-4.
- [4] GLODO J, HIGGINS W H, VAN L E, *et al.* $\text{GdI}_3: \text{Ce}$ - A New Gamma and Neutron Scintillator. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*. San Diego, California, October 29-Nov. 4, 2006: 1574–1577.
- [5] YANG F, REN G H. Neutron detection scintillator development. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2009, **29**(4): 895–901.
- [6] BHANDARI H B, MILLER S R, GLODO J, *et al.* Structured $\text{GdI}_3: \text{Ce}$ Scintillators for X-ray and Neutron Imaging. *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)*. Seoul, South Korea, Oct. 27 2013–Nov. 2, 2013: 1–6.
- [7] DANANG BIROWOSUTO M, DORENBOS P, BIZARRI G, *et al.* Temperature dependent scintillation and luminescence characteristics of $\text{GdI}_3: \text{Ce}$. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, **55**(3): 1164–1169.
- [8] SHAH K S, HIGGINS W M, VAN LOEF E V, *et al.* Gadolinium Halide Scintillators: US. Patent 8, 153, 983. 2012–4–10.
- [9] CAMARDELLO S, COMANZOL H, SRIVASTAVA A M, *et al.* On the luminescence of Ce^{3+} in LnI_3 ($\text{Ln} = \text{Lu}^{3+}, \text{Y}^{3+}, \text{Gd}^{3+}$). *ECS Transactions*, 2009, **25**(9): 263–269.
- [10] GLODO J, VAN LOEF E, HOGGINS W H, *et al.* Mixed lutetium iodide compounds. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, **55**(3): 1496–1500.
- [11] NAGARKAR V V, OVECHKINA E E, BHANDARI H B, *et al.* New structured scintillators for neutron radiography. *Physics Procedia*, 2015, **69**: 161–168.
- [12] SRIVASTAVA A M, CAMARDELLO S J, COMANZO H A, *et al.* Explanation for the variance of the Ce^{3+} emission energy in LnI_3 , [$\text{Ln} = \text{Lu}^{3+}, \text{Y}^{3+}, \text{Gd}^{3+}$]. *Optical Materials*, 2010, **32**(9): 936–940.
- [13] CHAMINADE J P, VIRAPHONG O, GUILLEN F, *et al.* Crystal growth and optical properties of new neutron detectors $\text{Ce}^{3+}: \text{Li}_6\text{Gd}(\text{Y})(\text{BO}_3)_3$. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001, **48**(4): 1158–1161.
- [14] LOEF E V V, HIGGINS W M, GLODO J, *et al.* Crystal growth and characterization of rare earth iodides for scintillation detection. *Journal of Crystal Growth*, 2008, **310**(7/8/9): 2090–2093.