

## Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce 闪烁晶体的光学及闪烁性能

王晴晴<sup>1,2</sup>, 史 坚<sup>2</sup>, 李焕英<sup>2</sup>, 陈晓峰<sup>2</sup>, 潘尚可<sup>3</sup>, 卞建江<sup>1</sup>, 任国浩<sup>2</sup>

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 201800; 3. 宁波大学 材料科学与化学工程学院, 宁波 315211)

**摘 要:** 用坩埚下降法生长得到 Cs<sub>2</sub>LiY<sub>0.95</sub>Cl<sub>6</sub>:5%Ce(CYLC)闪烁晶体, 通过 X 射线衍射分析证明 Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce 的晶体结构属于钾冰晶石结构, 并与理论计算结果基本吻合。在吸收光谱中观测到源于 Ce<sup>3+</sup> 离子从 4f 向 5d<sub>1-5</sub> 电子跃迁的吸收峰和自陷激子吸收峰。X 射线和紫外激发和发射光谱测试表明, 位于 300 nm 的发光属于 Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce 晶体的本征芯价发光, 321 nm 的发光归因于自陷激子发光, 350~450 nm 范围的发光属于 Ce<sup>3+</sup> 离子 5d-4f 跃迁发光。在 <sup>137</sup>Cs 源伽马射线激发下, CYLC 晶体的能量分辨率达到 8.1%, 衰减时间分别为 58 ns 和 580 ns。综上所述可知, Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce 晶体将是一种在中子和伽马射线分辨领域具有广泛应用前景的闪烁晶体。

**关 键 词:** Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce 晶体; 坩埚下降法; 晶体结构; 闪烁性能

中图分类号: O734 文献标识码: A

## Optical and Scintillation Properties of Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce Crystal

WANG Qing-Qing<sup>1,2</sup>, SHI Jian<sup>2</sup>, LI Huan-Ying<sup>2</sup>, CHEN Xiao-Feng<sup>2</sup>, PAN Shang-Ke<sup>3</sup>,  
BIAN Jian-Jiang<sup>1</sup>, REN Guo-Hao<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 3. State Key Laboratory Base of Novel Function Materials and Preparation Science, School of Material Sciences and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Crystal structure of Cs<sub>2</sub>LiY<sub>0.95</sub>Cl<sub>6</sub>:5%Ce crystal (CYLC) grown by vertical Bridgeman method from polycrystal raw materials was measured by X-ray diffraction (XRD) and was proved to have elpasolite structure. The detected structure of Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce crystal was agreed well with theoretical structure. Six optical absorption bands which are suggested to originate from the transition of electron from 4f to 5d<sub>1-5</sub> of Ce ions and self-trapped excitation (STE), can be identified in the absorption spectra of the CYLC:Ce crystal. X-ray and ultraviolet excited luminescence spectra of Cs<sub>2</sub>LiY<sub>0.95</sub>Cl<sub>6</sub>:5%Ce crystal present an emission band from 350 nm to 450 nm corresponding to 5d-4f transitions of Ce<sup>3+</sup> ions. The peaks locating at 300 nm and 321 nm can be ascribed to core to valence luminescence and STE luminescence. Under the excitation of  $\gamma$ -rays from <sup>137</sup>Cs, Cs<sub>2</sub>LiY<sub>0.95</sub>Cl<sub>6</sub>:5%Ce crystal presents energy resolution of 8.1%, and scintillation decay time of 58 ns and 580 ns. All of these properties show that Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce crystal is a promising scintillator for neutron and gamma detection applications.

**Key words:** Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce crystal; vertical Bridgeman method; crystal structure; scintillation property

自从 1999 年 Combes 等<sup>[1]</sup>发现钾冰晶石闪烁晶体 Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce(CYLC)的闪烁性能以来, 研究者对

CYLC 闪烁晶体的生长和性能开展了广泛而深入的研究, 该晶体可望成为在中子和伽马射线甄别方面

收稿日期: 2016-05-10; 收到修改稿日期: 2016-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(51272263, 11475242) National Natural Science Foundation of China (51272263, 11475242)

作者简介: 王晴晴(1991-), 女, 硕士研究生. E-mail: 13120856938@163.com

通讯作者: 任国浩, 研究员. E-mail: rgh@mail.sic.ac.cn

最有应用前景的闪烁晶体。

与传统的伽马射线探测材料相比, CLYC 晶体的光产额并非很高(约为 20000 p.e./MeV)<sup>[2]</sup>, 甚至少于 NaI(Tl)晶体(约为 38000 p.e./MeV)<sup>[3]</sup>, 但 CLYC 晶体在不同放射源的伽马射线激发下表现出良好的线性响应, Glodo 等<sup>[4]</sup>报道 CLYC 晶体在不同的伽马射线源  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{22}\text{Na}$  激发下(数据经归一化之后), 其光产额的非线性偏差是 2.4%, 低能量处的线性偏差达到 1.6%, 显著优于 NaI(Tl)晶体的非线性偏差(20%)。Higgins 等<sup>[5]</sup>报道的 CLYC 晶体光产额非线性偏差达到 1%。而 Hawrami 等<sup>[6]</sup>在  $^{137}\text{Cs}$  源 662 keV 伽马射线激发下测得 CLYC 晶体的能量分辨率达到 3.6%, 明显优于 NaI(Tl)((6%~7%)@662keV), 在伽马射线探测方面显示出应用潜力。

CLYC 借助于中子与 CLYC 中的  $^6\text{Li}$  和  $^{35}\text{Cl}$  元素间发生的核反应对中子实现间接探测。 $^6\text{Li}$  同位素与热中子之间的核反应  $^6_3\text{Li} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^3_1\text{H} + \alpha + 4.8 \text{ MeV}$ , 产生的带电粒子激发闪烁体内的发光中心而产生光信号。Hawrami 等<sup>[6]</sup>测得直径 1 英寸样品在 Am/Be 源激发下中子的能量分辨率约为 2.6%。最近, Bubble Technology Industries 的研究者发现 CLYC 可以捕获高能中子(即能量在 0.1~20 MeV 的快中子), 通过核反应  $^{35}\text{Cl}(\text{n,p})^{35}\text{S}$  释放出与入射的快中子能量线性相关的质子, 实现对快中子的探测<sup>[7]</sup>。这使得 CLYC 能够同时探测和分辨热中子、快中子和  $\gamma$  射线。

经过近十几年的研究, CLYC 晶体的质量得到很大的提高, 但由于该晶体具有很强的潮解性, 几乎没有研究者对晶体的透过和吸收光谱进行实际测试, 即便是晶胞参数也缺乏实测数据, 只有 CLYC: V 的理论计算数据<sup>[8]</sup>。因此本工作采用坩埚下降法生长 CLYC 晶体, 并对其晶体结构, 晶体透过和吸收光谱, 发光性能和闪烁性能进行表征和研究。

## 1 实验方法

### 1.1 实验

原料采用实验室合成的  $\text{Cs}_2\text{LiY}_{0.95}\text{Cl}_6 \cdot 5\% \text{Ce}$  多晶粉料,  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂浓度为 5%。由于生长 CLYC 晶体的原料和生长出的 CLYC 晶体都易于潮解, 因此, 必须避免 CLYC 和水接触。同时, CLYC 熔体在高温下容易与氧发生反应, 生成氯氧化物, 所以装料过程须在手套箱内操作, 确保氧含量和水含量都小于  $0.1 \times 10^{-6}$ 。将按化学计量比合成的原料移入石英坩埚中。然后抽真空并用氢氧焰封口, 以确保晶体的

生长过程在无水无氧的条件下进行。用坩埚下降法进行晶体生长, 坩埚下降速度为 0.4 mm/h, 最终获得了  $\phi 25 \text{ mm}$  的 CLYC: Ce 晶体。将所得的晶体样品在干燥间内加工成  $\phi 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的晶体样品, 经过研磨、抛光后, 把晶体样品密封在铝制套管内, 出光面用石英玻璃窗密封。

### 1.2 测试

采用 D/Max2500 (Rigaku) X 射线衍射仪分析  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6 \cdot \text{Ce}$  粉末的结构, 测试条件为: 室温条件下 Cu K $\alpha$  辐射( $\lambda$  为 0.154056 nm), X 射线管的电压为 40 kV, 电流 10 mA, 扫描范围为  $10^\circ \sim 70^\circ$ , 步进为  $0.02^\circ$ 。为了避免粉末样品在测试过程中直接暴露在空气环境下潮解影响晶体的结构, 直接把粉末样品放置在聚酰亚胺样品盒内测试, 在手套箱内制样。X 射线激发发射光谱(XEL)的采集使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, X 射线管的电压为 65 kV, 电流为 3 mA, 光电倍增管的电压为 700 V。紫外可见光激发发射光谱的测试采用 Edinburgh Instrument 公司的 F-4600 FL 光谱仪, 激发源为 45 kW 的 Xe 灯, 光电倍增管电压是 700 V, 扫描速度为 1200 nm/min。使用岛津公司的 UV-2501PC 2501PC 型分光光谱仪测试常温下晶体在 200~800 nm 的透过和吸收光谱。多道能谱是用  $^{137}\text{Cs}$  源所发出的 622 keV 的伽马射线激发晶体, 晶体发出的光子被光电倍增管(PMT, R2059, Hamamatsu)接收、放大后转化成电信号, 经 Ortec 多道能谱仪处理得到多道能谱。伽马激发下的闪烁衰减时间的测试采用美国通用电气上海研发中心自主搭建的设备, 激发源为  $^{137}\text{Cs}$ , 利用示波器读取闪烁衰减时间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相分析

图 1 是所生长晶体毛坯的照片, 其中透明部分的晶体样品被研磨成粉末并进行 XRD 测试(图 2)。图 2 中  $2\theta=10^\circ \sim 20^\circ$  的峰包来自测试时为了避免样品潮解所用的样品盒的衍射峰, 两个衍射峰为包裹材料聚酰亚胺的非晶峰。图中的标准卡片是经过理论计算得出的晶体结构, 从图 2 可以看出样品的衍射峰和理论计算得出的标准卡片极为接近, 从而可以确定生长出的晶体具有钾冰晶石结构, 立方晶系, 空间群为  $\text{Fm} \bar{3} \text{m}$ , 计算得到晶胞参数:  $a=1.0481 \text{ nm}$ ,  $V=1.1515 \text{ nm}^3$ , 密度  $\rho=3.33 \text{ g/cm}^3$ , 这些参数与文献[8]对 CLYC: V 的理论计算结果:  $a=1.0486 \text{ nm}$ ,  $V=$



图1 生长的 $\phi 25$  mm的 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$ 晶体毛坯的照片  
Fig. 1 Photos of as-grown  $\phi 25$  mm  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  crystal

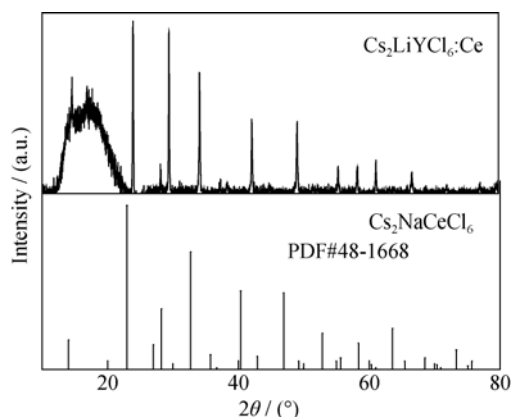


图2  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$ 粉末样品的XRD图谱  
Fig. 2 XRD pattern of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  powder

$1.1529 \text{ nm}^3$ ,  $\rho=3.31 \text{ g/cm}^3$  非常接近, 实验结果和理论计算吻合得很好, 微小的偏差可能是由掺杂离子Ce和V的不同以及实验结果和理论计算的误差造成的。图2不存在第二相的衍射峰, 这说明在晶体生长和降温阶段没有在CLYC中引入第二相物质, 也就是说目前的生长工艺参数基本适合CLYC晶体的生长。

## 2.2 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$ 光学透过率和吸收光谱

图3是室温下测得的 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$ 样品的透过和吸收光谱, 可以看出在212 nm和341 nm存在较强的吸收峰, 在238、253 nm处存在两个较弱的吸收峰, 这四个吸收峰归因于 $\text{Ce}^{3+}$ 离子从 $^2\text{F}_{5/2}$ 向 $5\text{d}_{1-5}$ 的电子跃迁。300~400 nm存在较宽的吸收带, 可能对应于电子跃迁到 $\text{Ce}^{3+}5\text{d}$ 轨道的两个激发能级, 与透过光谱的吸收谷和图4中激发光谱中的激发峰相对应。而271 nm处吸收峰归因于自陷激子吸收。从图3的透过光谱图中可以看到, 晶体在可见光区域的透过率大于60%。

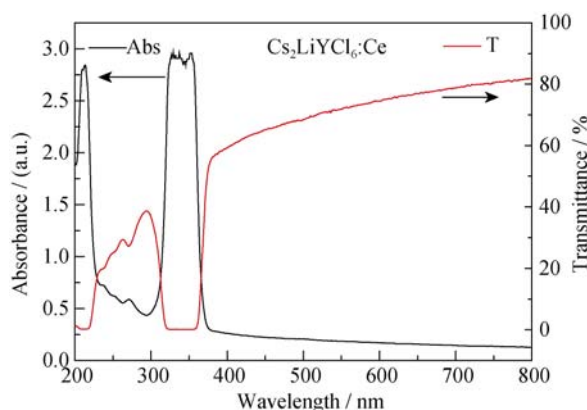


图3 室温下测试的 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$ 样品的透过和吸收光谱  
Fig. 3 Transmission and absorption spectra of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  at room temperature

## 2.3 紫外激发和发射光谱

图4是室温下 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$ 样品在监测发射峰分别位于321、374、402 nm处的激发光谱, 晶体样品尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。从图4可以看到六个激发峰, 激发峰分别位于215、238、252、271、307、341 nm, 位于341 nm的激发峰具有较宽的激发带, 激发谱中215、238、252、307、341 nm激发峰分别对应于 $^2\text{F}_{5/2}$ 向 $5\text{d}_{1-5}$ 的电子跃迁。一般情况下, $\text{Ce}^{3+}$ 的5d能级在八面体场中劈裂为五个次能级, 即低激发三重态 $\text{T}_{2g}$ , 以及由于低对称性造成的高级双重态 $\text{E}_g$ , 图中215、238、252 nm激发峰对应4f基态向低激发三重态 $\text{T}_{2g}$ 跃迁, 307、341 nm激发峰对应4f基态向 $\text{E}_g$ 轨道的跃迁<sup>[9-10]</sup>。271 nm处的激发峰具有较宽的激发带, 对应于自陷激子(STE)激发<sup>[11]</sup>。激发谱中的监控波长为321 nm时, 存在两个位于271和307 nm处的较弱的激发峰, 271 nm处的激发带对应于321 nm较强的STE发光。

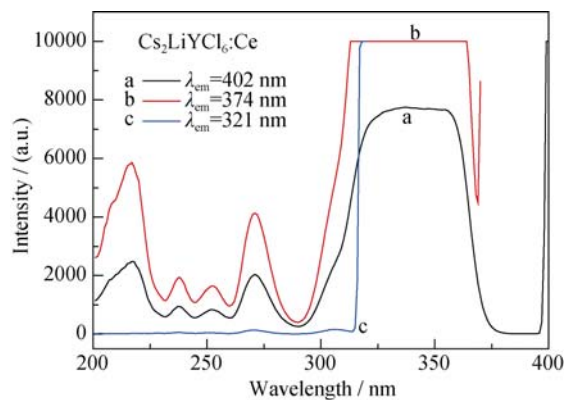


图4 室温下 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$ 样品监测发射峰分别为321、374、402 nm处的激发光谱  
Fig. 4 Photoluminescence excitation spectra of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  crystal monitored with 321 nm, 374 nm, and 402 nm at room temperature

图 5 是室温下  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  样品激发峰分别为 215、238、252、271、307、341 nm 的发射光谱, 插图为横坐标 300~340 nm 处的局部放大图。从图 5 可以看出, 所有的激发峰激发得到的发射光谱, 都存在 374 和 402 nm 的发光峰, 对应于  $\text{Ce}^{3+}5\text{d}_1$  能级向次能级  $^2\text{F}_{5/2}$  和  $^2\text{F}_{7/2}$  的跃迁发光, 只是发光强度稍有不同, 当用 271 nm 光激发样品时, STE 在晶格弛豫的过程中把能量传递给  $\text{Ce}^{3+}$ , 产生  $\text{Ce}^{3+}$  发光; 当激发光波长为 341 nm 时,  $\text{Ce}^{3+}$  发光强度最强, 且激发光波长为 341 和 215 nm 时, 只存在  $\text{Ce}^{3+}$  发光; 当激发光波长为 238、252、271、307 nm 时, 还存在位于 321 nm 处相对  $\text{Ce}^{3+}$  发光较弱的发光峰, 从 van Loef 等<sup>[12]</sup>报道来看, 可归因于 STE 发光, 该文报道了温度为 10 K、激发峰为 210 nm 时, 观察到位于 326 nm 处的 STE 发光。但由于测试条件的差异, 本实验室室温下激发光波长为 215 nm 时, 并未观察到位于 321 nm 处的发光峰。

## 2.4 X 射线激发下的发射光谱

图 6 是  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  晶体样品的 X 射线激发发射光谱, 晶体样品尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm。从图 6 可以看到 X 射线激发发射光谱有三个典型的发光峰, 其中 300 nm 处发光峰对应着芯价发光成分(CVL), 属于 CLYC 晶体的本征发光, 是 5pCs 的芯带上的空穴和 3pCl 的价带内的电子复合发光, Glodo 等<sup>[13]</sup>认为 CVL 发光与晶体尺寸、掺杂的浓度有关, 并且随着晶体尺寸的增大, CVL 发光强度下降, 在大尺寸晶体中可能直接被  $\text{Ce}^{3+}$  吸收而观察不到芯价发光成分。350~450 nm 的发光成分对应着  $\text{Ce}^{3+}$  发光, 由于  $\text{Ce}^{3+}$  离子 4f 能级劈裂为  $^2\text{F}_{5/2}$  和  $2\text{F}_{7/2}$  两个能级, 利用高斯拟合得到两个独立的发

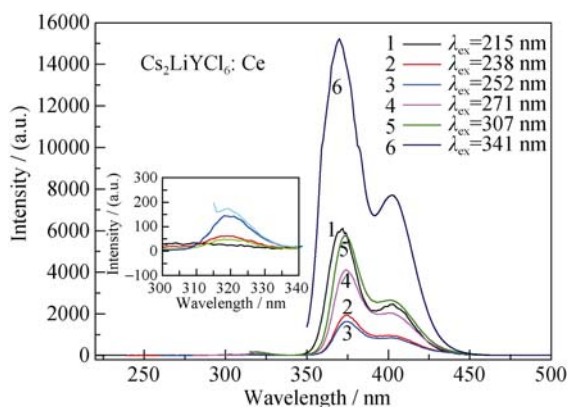


图 5 室温下  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  样品在激发光波长为 215、238、252、271、307、341 nm 时的发射光谱  
Fig. 5 Photoluminescence emission spectra of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  crystal monitored with 215 nm, 238 nm, 252 nm, 271 nm, 307 nm, and 341 nm at room temperature

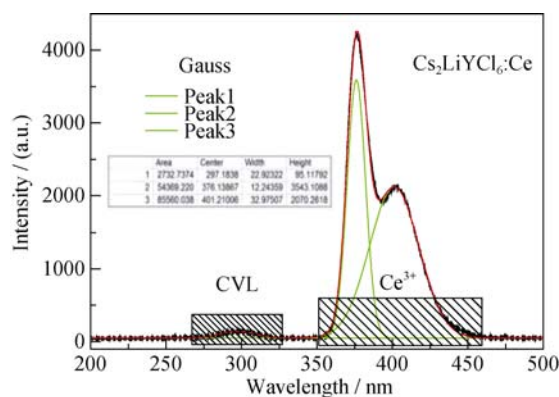


图 6  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  样品的 X 射线激发发射光谱图  
Fig. 6 X-ray excited luminescence spectra of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$

射峰, 位于 376 nm 处的发光峰对应着  $\text{Ce}^{3+}$  离子的  $5\text{d}_1$  向  $^2\text{F}_{5/2}$  能级跃迁, 而位于 401 nm 处的发光峰对应着  $\text{Ce}^{3+}$  离子的  $5\text{d}_1$  向  $^2\text{F}_{7/2}$  的能级跃迁。

## 2.5 伽马射线激发下的衰减时间分析

图 7 是尺寸为  $\phi 25\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  晶体样品在  $^{137}\text{Cs}$  源伽马射线激发下的衰减时间曲线。从实验结果曲线拟合出两个衰减时间 58.36 ns 和 580.56 ns, 前者为  $^{137}\text{Cs}$  伽马射线激发下的快分量, 对应于  $\text{Ce}^{3+}$  直接捕获电子空穴对发光; 后者为慢衰减成分, 归因于自陷激子(STE)和激活离子  $\text{Ce}^{3+}$  之间的能量传递发光<sup>[14-15]</sup>。图 7 中并未显示出此前文献报道的衰减时间在几纳秒的 CVL 衰减成分, 这可能与  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂浓度、样品的质量和尺寸, 测试条件有关。同时 CVL 发光为本征发光, 发光强度较弱, 可能会发生晶体内部缺陷的自吸收或被  $\text{Ce}^{3+}$  吸收的现象。

## 2.6 能量分辨率

图 8 是  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  样品和  $\text{NaI(Tl)}$  标样在

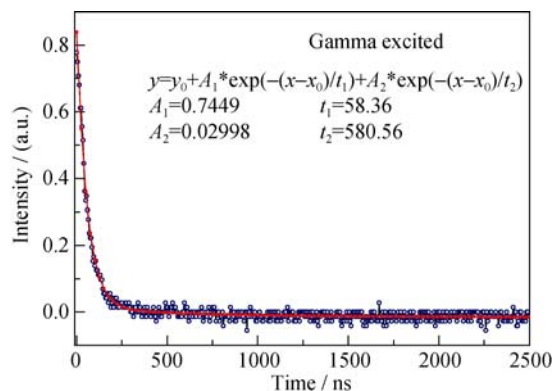


图 7 室温下  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  晶体在  $^{137}\text{Cs}$  源伽马射线激发下的衰减时间曲线  
Fig. 7 Decay curve and its fitted line of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:5\%\text{Ce}$  crystal excited by  $^{137}\text{Cs}$  Gamma-ray at room temperature

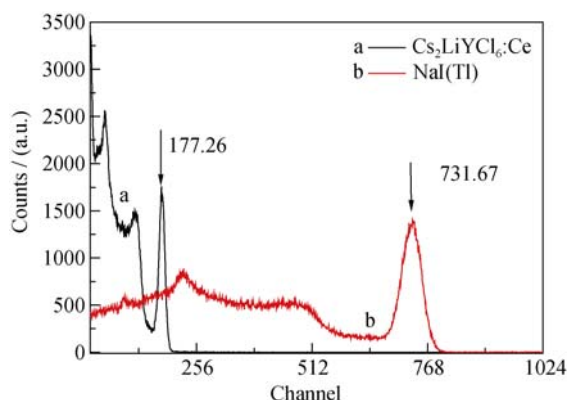


图8 室温下  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:5%Ce}$  样品和  $\text{NaI(Tl)}$  标样在  $^{137}\text{Cs}$  源激发下的多道能谱

Fig. 8 Multi-channel energy spectra of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:5%Ce}$  crystal and  $\text{CsI(Tl)}$  crystal excited by  $^{137}\text{Cs}$

$^{137}\text{Cs}$  源激发下的多道能谱, 晶体样品尺寸分别为  $\phi 25.4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  和  $\phi 25.4 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm}$ ,  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:5%Ce}$  晶体内部有少量的裂纹。由图8可以看出,  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:5%Ce}$  样品和  $\text{NaI(Tl)}$  标样的全能峰分别在 177 和 731 道, 能量分辨率分别为 8.1% 和 6.7%, 即  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:5%Ce}$  样品的能量分辨率已经接近于  $\text{NaI(Tl)}$  标样, 但与目前文献报道的直径 1 英寸样品在  $^{137}\text{Cs}$  源激发下的 3.6% 的能量分辨率还有很大的差距, 这可能与晶体内部有裂纹和包裹体等缺陷有关。这个差距可通过调整晶体生长工艺, 提高晶体质量来缩小。

### 3 结论

利用合成的多晶原料采用坩埚下降法生长出  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:5%Ce}$  晶体, 并对晶体的物相和发光性能进行了研究。实验结果表明:  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:5%Ce}$  的晶体结构属于钾冰晶石结构, 并且与理论计算结果基本吻合。 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:5%Ce}$  晶体在 X 射线和紫外激发下的激发和发射光谱表明,  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:5%Ce}$  晶体除了 Ce 离子位于 374 nm 和 402 nm 的特征发光外, 还存在位于 300 nm 的本征发光 CVL 以及 321 nm 的 STE 发光。结合透过率光谱可知, 除了 Ce 离子  $^2\text{F}_{5/2}$  向  $5\text{d}_{1-5}$  的电子跃迁存在的五个激发峰和吸收峰外, 还存在自陷激子吸收。实验测试得到  $^{137}\text{Cs}$  源伽马射线激发下, CLYC 晶体的能量分辨率达到 8.1%, 衰减时间分别为 58 ns 和 580 ns。综上所述可知, CLYC 晶体是一种属于钾冰晶石结构, 发光效率高, 衰减时间快, 能够应用于中子和伽马射线分辨的闪烁晶体。

### 参考文献:

- [1] COMBES C M, DORENBOS P, VAN EIJK C W E, *et al.* Optical and scintillation properties of pure and  $\text{Ce}^{3+}$ -doped  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$  and  $\text{Li}_3\text{YCl}_6\text{:Ce}^{3+}$  crystals. *J. Lumin.*, 1999, **82**: 299–305.
- [2] <http://rmdinc.com/clyc>
- [3] MENGESHA W, TAULBEE T D, ROONEY B D, *et al.* Light yield nonproportionality of  $\text{CsI(Tl)}$ ,  $\text{CsI(Na)}$ , and YAP. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, 1998, **45(3)**: 456–461.
- [4] GLODO J, HIGGINS W M, VAN LOEF E V D, *et al.* Scintillation properties of 1 inch  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:Ce}$  crystals. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, 2008, **55(3)**: 1206–1209.
- [5] HIGGINS W M, GLODO J, SHIRWADKAR U, *et al.* Bridgman growth of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:Ce}$  and  $^6\text{Li}$ -enriched  $\text{Cs}_2^6\text{LiYCl}_6\text{:Ce}$  crystals for high resolution gamma ray and neutron spectrometers. *J. Cryst. Growth*, 2010, **312**: 1216–1220.
- [6] HAWRAMI R, HINES C, ABSELEM I, *et al.* Latest advances in large diameter  $\text{SrI}_2\text{:Eu}$  & CLYC:Ce scintillators for isotope identification. *Proc. of SPIE*, 2012, **8507(16)**: 1–8.
- [7] SMITH M B, ACHTZEHN T, ANDREWS H R, *et al.* Fast neutron spectroscopy using  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:Ce}$  (CLYC) scintillator. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, 2013, **60(2)**: 855–859.
- [8] REBER C, GUDEL H U, MEYER G, *et al.* Optical spectroscopic and structural properties of  $\text{V}^{3+}$ -doped fluoride, chloride, and bromide elpasolite lattices. *Inorg. Chem.*, 1989, **28**: 3249–3258.
- [9] PAN SHANG-KE, WANG QING-QING, LI HUAN-YING, *et al.* Crystal growth, luminescence and scintillation properties of  $\text{Eu}^{2+}\text{:CeBr}_3$  crystals. *Radiat. Meas.*, 2016, **88**: 7–13.
- [10] WU YUN-TAO. Study on Phase Transition, Co-doping Modification and Scintillation Performance of the Novel  $\text{LuBO}_3\text{:Ce}$  Crystals. Shanghai: Shanghai Institute of Ceramic PHD Dissertations, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [11] WEI HUA, DU MAO-HUA, STAND L, *et al.* Scintillation properties and electronic structure of intrinsic and extrinsic mixed elpasolites  $\text{Cs}_2\text{NaREBr}_3\text{I}_3$  ( $\text{RE}=\text{La}, \text{Y}$ ). *Phys. Rev. Appl.*, 2016, **2**: 1–9.
- [12] VAN LOEF E V D, DORENBOS P, VAN EIJK C W E, *et al.* Scintillation and spectroscopy of the pure and  $\text{Ce}^{3+}$ -doped elpasolites:  $\text{Cs}_2\text{LiYX}_6$  ( $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}$ ). *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, 2002, **14**: 8481–8496.
- [13] GLODO J, HAWRAMI R, SHAH K S. Development of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$  scintillator. *J. Cryst. Growth*, 2013, **379**: 73–78.
- [14] DORENBOS P. Scintillation mechanisms in  $\text{Ce}^{3+}$  doped halide scintillators. *Phys. Stat. Solidi. A*, 2005, **202(2)**: 195–200.
- [15] BUDDEN B S, STONEHILL L C, TERRY J R, *et al.* Characterization and investigation of the thermal dependence of  $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6\text{:Ce}^{3+}$  (CLYC) waveforms. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, 2013, **60(2)**: 946–951.