

# 新型闪烁晶体 Ce 掺杂焦硅酸钇(YPS:Ce)的闪烁与热释光性能

冯 鹤, 丁栋舟, 李焕英, 杨 帆, 陆 晟, 潘尚可, 陈晓峰, 张卫东, 任国浩

(中国科学院 上海硅酸盐研究所 中试基地, 上海 201800)

**摘 要:** 通过区熔法获得了铈掺杂焦硅酸钇闪烁单晶( $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}^{3+}$ , 简称为 YPS), 并对其闪烁与热释光性能进行了研究. 对 YPS:Ce 闪烁晶体的透过、光输出和光衰减等光学和闪烁性能进行了表征, 并对其综合性能进行了评价. 其衰减时间为 30.16ns, 为目前铈掺杂焦硅酸盐闪烁晶体中最快的. 并采用热释光测试技术, 对 YPS:Ce 晶体中的缺陷进行了研究, 发现在 300~500K 温度区间内一共有三个热释光峰, 分别对应于三个缺陷, 通过对二维(温度-光强)的拟合, 确定了这三种缺陷的陷阱深度、振动频率等物理参数. 并结合三维(温度-波长-光强)热释光谱, 提出了 YPS:Ce 的热释光模型.

**关 键 词:** YPS:Ce 晶体; 闪烁性能; 热释光; 缺陷

中图分类号: O734

文献标识码: A

## Scintillation and Thermoluminescence Properties of a New Scintillator YPS:Ce

FENG He, DING Dong-Zhou, LI Huan-Ying, YANG Fan, LU Sheng, PAN Shang-Ke, CHEN Xiao-Feng, ZHANG Wei-Dong, REN Guo-Hao

(R&D Center of Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Cerium doped yttrium pyrosilicate  $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$ (YPS) single crystal was obtained through the floating zone method. The scintillation and thermoluminescence (TL) properties of YPS:Ce were studied. The scintillation and optical properties of YPS:Ce crystal were characterized by light output, decay time and transmittance. Its potential application prospect as scintillation material was also evaluated. It was noticed that the decay time of YPS:Ce was about 30.16 ns, which was the fastest value in the cerium doped silicate scintillators. The traps in YPS:Ce were studied through TL spectrum. Three traps were detected in the temperature range of 300–500 K, corresponding to three trap in YPS:Ce sample. The physical parameters of these traps (including energy level, frequency factor) were determined through fitting the 2D (temperature-luminescence intensity) TL curve. Combined with 3D (temperature-wavelength-luminescence intensity) TL spectra, the TL mode of YPS:Ce sample was proposed.

**Key words:** YPS:Ce crystal; scintillation properties; thermoluminescence; trap

闪烁晶体常被用来探测  $\gamma$  射线或 X 射线, 在核医学(CT、PET 等)、核物理和粒子物理实验以及地质勘探等领域有着广泛的应用. 为了获得较好的探测效率, 要求闪烁晶体应具有高密度和高原子序数(对  $\gamma$  射线形成高阻止本领)、高光输出(可精确地测量  $\gamma$  射线的能量)和衰减时间短(确保计数的稳定性

高)等特征<sup>[1]</sup>. 到目前为止, 铈掺杂硅酸盐闪烁体如硅酸镱(简称为 LSO:Ce)<sup>[2]</sup>、硅酸钆镱(简称为 LYSO:Ce)<sup>[3]</sup>、硅酸钆(简称为 GSO:Ce)<sup>[4]</sup>、硅酸钇(简称为 YSO:Ce)<sup>[5]</sup>作为一大类高密度, 高熔点和快衰减和较高光输出的闪烁晶体引起广泛的关注. 在这类闪烁体中, 稀土氧化物与  $\text{SiO}_2$  的化学计量比是

收稿日期: 2009-12-09, 收到修改稿日期: 2010-01-25

基金项目: 上海市自然科学基金(09ZR1435800); 国家“863”计划(2007AA03Z444); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(SCX200701, SCX200708)

作者简介: 冯 鹤(1983–), 男, 博士研究生. E-mail: fh117\_@126.com

通讯联系人: 任国浩, 研究员. E-mail: rgh@mail.sic.ac.cn

$n(\text{Re}_2\text{O}_3):n(\text{SiO}_2)=1:1$ , 在  $n(\text{Re}_2\text{O}_3):n(\text{SiO}_2)=1:2$  的稀土焦硅酸盐体系中, 人们也发现了具有优异闪烁性能的晶体, 如铈掺杂焦硅酸镨(简称为 LPS:Ce)晶体<sup>[6-7]</sup>. Kawamura 通过浮区法获得了铈掺杂焦硅酸钆单晶, 并发现其闪烁性能较 GSO:Ce 优异<sup>[8]</sup>. 而且与铈掺杂硅酸盐闪烁晶体相比, 焦硅酸盐中较便宜的  $\text{SiO}_2$  所含的比例更高, 其原料成本比硅酸盐闪烁晶体的低.

铈掺杂焦硅酸盐体系闪烁晶体的优异性能引起了研究者对于该体系其它闪烁晶体的兴趣. Karar 等获得了 YPS:Ce 的纳米晶体, 并对其光学性能进行了研究<sup>[9]</sup>. 本工作以一种铈掺杂焦硅酸盐、焦硅酸钪为研究对象, 通过区熔法获得 YPS:Ce 单晶, 并采用透过谱、UV 射线激发发射谱和 X 射线激发发射谱以及热释光谱, 研究并评估其闪烁和热释光特性.

## 1 实验

YPS:Ce 晶体通过浮区法获得, 熔体中 Ce 离子对应于总稀土格位的浓度为 0.5at%. YPS:Ce 是一种非一致熔融化合物, 且存在相变, 具体的生长过程见参考文献[10]. 晶体生长是在四镜光学浮区炉(FZ-T-4000-H; Crystal Systems Corporation)上进行的, 加热源为四个 1500W 的卤素灯. 生长气氛为空气, 晶体生长速率为 3~5mm/h, 上下棒的旋转速率为 15r/min. 当生长结束后, 3h 内降到室温. 获得无色透明、尺寸为 4 mm×5 mm×1 mm 的 YPS:Ce 单晶.

UV 射线激发发射谱是在 FLS-920 上测试的, X 射线激发发射谱(XEL)的测量是在自制的设备上进行的, 工作电压 55KV, 3mA, Cu 靶, 光电倍增管型号为 R1306. 光学透过谱是在 Shimadzu UV-2501 PC 光谱仪上进行测试的. 实验对 YPS:Ce 晶体进行了三维(波长、温度和强度)和二维(温度和强度)热释光的测试, 三维热释光的测试是采用 CCD 探头进行信号收集, 二维热释光的测试是采用光电倍增管进行信号收集. 每次测试前采用 X 射线辐照(55kV, 3mA)20s, 并避光保存, 升温速率为 1 K/s.

## 2 结果和讨论

对所获得的样品进行 XRD 测试, 表明 YPS 晶体为单斜晶系, 空间群为  $\text{Pna}_1$ . YPS 有相变<sup>[11]</sup>, 形成了高温相  $\delta$ -YPS 相, 密度为 4.04g/cm<sup>3</sup>.

### 2.1 UV 射线激发发射谱

如图 1 所示为室温下 YPS:Ce 的紫外激发发射

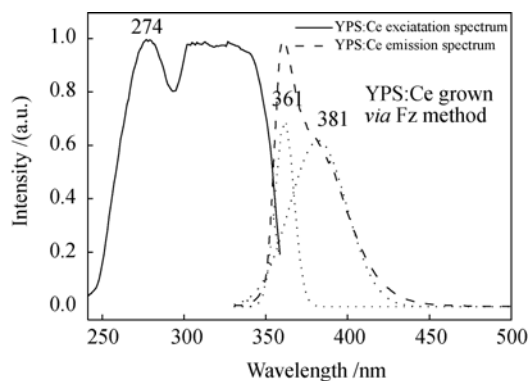


图 1 室温下 YPS:Ce 的 UV 射线激发发射谱

Fig. 1 Photoluminescence (PL) and photoluminescence excitation (PLE) spectra of YPS:Ce at room temperature

谱. 在 274 nm 处可以观察到一个激发峰, 在 300~350nm 的波长范围上却没有明显的峰, 就像峰被“平头”了一样. 考虑到样品是由浮区法制备的, 相比于区熔法生长的晶体, 在同样掺杂浓度, 同样生长速度和旋转速率的情况下, 提拉法的排杂效果相对较好, 在本实验中 Ce 离子就相当于杂质离子, 所以区熔法样品中的  $\text{Ce}^{3+}$  离子浓度相对提拉法制备的样品来说比较高, 自吸收较强, 造成相对复杂的激发谱. 一般来说, 当闪烁晶体中的实际  $\text{Ce}^{3+}$  浓度较低时, 各个发光中心之间的距离较远, 相互之间作用较弱, 在这种情况下, 自吸收较弱, 晶体的激发谱在低波长范围上是典型的双峰谱形. 而当晶体中的实际 Ce 离子浓度较高时, 发光中心  $\text{Ce}^{3+}$  之间会相互作用, 自吸收增强, 从而会导致在低波长范围上(300~350 nm)不同波长激发  $\text{Ce}^{3+}$  发光时激发效果相近, 出现激发谱“平头”的现象. 发射谱是在 274 nm 光的激发下形成的, 通过高斯拟合, 可以拟合出峰位分别位于 361 和 381 nm 的两个峰, 对应于最低 5d 能级向 4f 的  $4f^2f_{5/2}$  和  $4f^2f_{7/2}$  的跃迁. 由此可以得到室温下 4f 的两个子能级的能级劈裂值, 约为 1531 cm<sup>-1</sup>.

### 2.2 X 射线激发发射谱

如图 2 所示为室温下的 YPS:Ce 的 X 射线激发发射谱, 为了表征其光输出, 也列出了相同尺寸的 LPS:Ce 样品在相同测试条件下的 X 射线激发发射谱. YPS:Ce 的 X 射线激发发射谱的谱形与紫外射线激发发射谱的谱形基本一致. 可以拟合出 361 和 381nm 的两个峰. 已知 LPS:Ce 样品的光输出为 22400 ph/MeV, 则可以通过 X 射线激发发射谱的积分强度比较来估算 YPS:Ce 的光产额. 经估算, YPS:Ce 的光产额为 5800 ph/MeV.

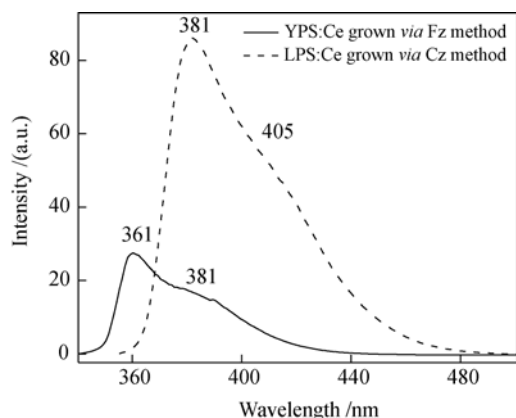


图2 室温时相同测试条件下的相同尺寸的YPS:Ce和LPS:Ce样品X射线激发发射谱

Fig. 2 X-ray excited luminescent (XEL) spectra of YPS:Ce and LPS:Ce on the same condition

### 2.3 YPS:Ce的透过谱

区熔法获得的YPS:Ce样品是无色透明的,可以通过透过谱来定量地表征样品的光学质量,如图3所示为210~500 nm范围内的透过谱,样品厚度为1 mm厚,双面抛光,YPS:Ce的X射线激发发射谱也列在了图中.在360~500 nm范围内,样品的透过率约为85%,没有明显的吸收峰,这表明YPS:Ce样品的光学质量比较好.在210~360 nm范围内的吸收峰则是属于 $\text{Ce}^{3+}$ 电子从4f基态向5d能级的跃迁.YPS:Ce的截止吸收边位于365 nm,从图上可以看出,截止吸收边与YPS:Ce的X射线激发发射谱左肩的谱形基本一致,表明左肩的不对称性是由于YPS:Ce的晶格吸收造成的.

### 2.4 YPS:Ce的衰减时间谱

Ce掺杂闪烁体以激发结束为 $t=0$ 的时间点,发光强度随着时间的衰减过程通常为单指数衰减,拟合公式为 $I(t)=I_0\exp(-t/\tau)$ ,其中 $I_0$ 为初始光强, $\tau$ 为衰减时间.需要说明的是一些衰减时间并不是单指数

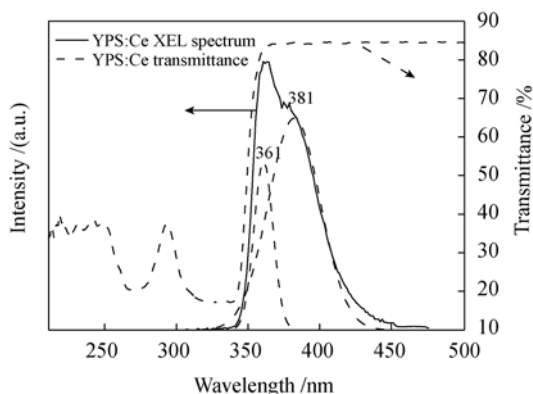


图3 室温下YPS:Ce晶体的透过谱和X射线激发发射谱  
Fig. 3 Transmittance spectrum and X-ray excited luminescence (XEL) spectrum of YPS:0.5%Ce crystals at room temperature

衰减曲线,这是由于它是几个单指数衰减的合成<sup>[12]</sup>.图4所示为YPS:Ce室温下的衰减时间曲线,激发波长为320 nm,发射波长为360 nm.经过单指数和两个单指数拟合的比较,确定YPS:Ce的衰减为单一的单指数衰减成分,衰减时间为 $(30.16 \pm 0.14)\text{ns}$ ,拟合结果的适合度 $\chi^2$ 为1.053,拟合曲线与实际曲线余差的绝对值小于3.3,表明拟合结果非常好.与其它所有的铈掺杂硅酸盐闪烁晶体相比,该衰减时间为目前为止发现的Ce掺杂的硅酸盐闪烁体中最快的<sup>[13]</sup>.这与其发光波长的位置偏紫外方向有关,因为衰减时间与发光波长呈正比例关系<sup>[14]</sup>,发光波长越短,衰减时间越快,而YPS:Ce的发光波长较短,所以其衰减时间会相对快.

以上获得的YPS:Ce的物理与闪烁性能数据,与目前常用的几种闪烁晶体LPS:Ce,LSO:Ce和BGO进行比较<sup>[7]</sup>,如表1所示.

从表中看出,YPS:Ce与目前几种常见的高性能闪烁晶体相比,密度较低,发光效率也不占优势,所以综合性能要比性能优异的闪烁晶体LSO:Ce等要差一些.但其衰减时间是最快的,有可能在一些需要快衰减闪烁体的领域有应用前景.

### 2.5 YPS:Ce的热释光性能

图5为YPS:Ce的二维(a)和三维(b)热释光谱,从图中可以看出热释光谱主要有两个峰,分别位于385和452 K.热释光谱可以考察研究晶体中存在的缺陷.通过对热释光谱的拟合,可以得到热释光峰对应缺陷的参数.通常热释光峰的强度 $I$ 与温度 $T$ 的关系可以用以下公式表示<sup>[15]</sup>:

$$I(T) = sn_0 \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T}\right) \times \left[ \frac{(l-1)s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T'}\right) dT' + 1 \right]^{-1/(l-1)} \quad (1)$$

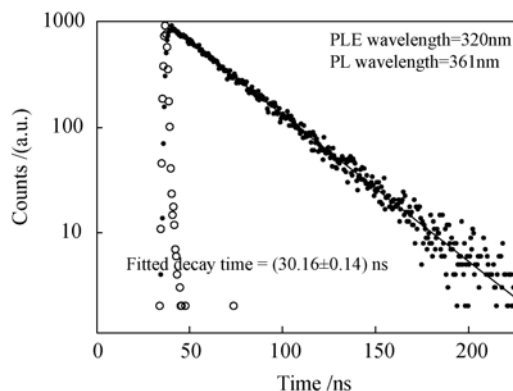


图4 室温下YPS:Ce的衰减时间谱

Fig. 4 The decay curve of YPS:Ce at room temperature  
Circles line is instrument response, dot line is the decay curve, line is fitted result

表 1 YPS:Ce 与其他几种常见闪烁晶体的物理与闪烁性能对比  
Table 1 Physical and scintillation properties of YPS:Ce and other three kinds of scintillator

	Density/(g•cm <sup>-3</sup> )	Melting point/°C	Light yield/(ph•MeV <sup>-1</sup> )	Emission wavelength/nm	Decay time /ns	Afterglow
YPS:Ce	4.04	1550	5800	361	30	No
LPS:Ce	6.70	1900	26300	385	38	No
LSO:Ce	7.40	2100	2500	420	40>2000	Yes
BGO:Ce	7.13	1050	8200	480	300	No

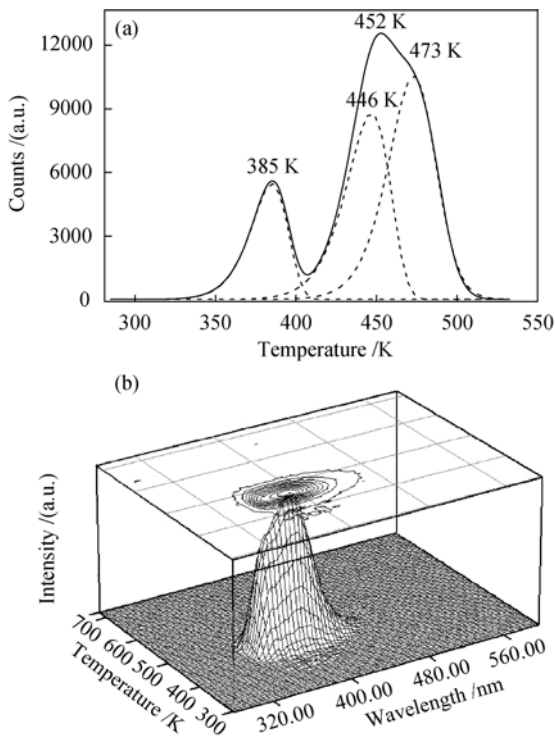


图 5 YPS:Ce 的二维热释光(a)和三维热释光谱(b)  
Fig. 5 2D-(a) and 3D-(b) thermoluminescence spectra of YPS:Ce

公式(1)是热释光强度的一般形式,当  $l \rightarrow 1$  时,可以得到一个简化的三参数公式<sup>[16]</sup>:

$$I(T) = sn_0 \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T}\right) \times \exp\left(-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T'}\right) dT'\right) \quad (2)$$

以上公式中,  $n_0$  是  $t=0$  时被缺陷束缚的载流子(空穴或电子)的数目,  $E_t$  是缺陷的能级位置,  $k_B$  为波尔兹曼常数,  $l$  是热释光峰的动力学级数,当载流子在热激发下从陷阱中脱嵌后不再被陷阱束缚,直接在复合中心复合(即与复合概率相比,再束缚概率可以忽略)时,  $l=1$ ;当陷阱对载流子的再束缚概率不能忽略时,  $l>1$ .  $s$  是频率因子,  $\beta$  为加热速率(本测试中为 1K/s). 公式中的积分在进行数据拟合时带来不便,通常采用的是 Chen<sup>[17]</sup>的近似处理方法.

$$\int_0^T \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T'}\right) dT' = \quad (3)$$

$$T \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T}\right) \sum_{j=1}^j \left(\frac{k_B T}{E_t}\right)^j (-1)^{j-1} j!$$

取  $j=3$ , 可以得到其近似形式:

$$\int_0^T \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T'}\right) dT' = T \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T}\right) \left[ \frac{k_B T}{E_t} - 2 \left(\frac{k_B T}{E_t}\right)^2 + 6 \left(\frac{k_B T}{E_t}\right)^3 \right] \quad (4)$$

把公式(4)代入(1)和(2)式,就可以用 origin 软件对热释光峰进行拟合,如图 5(a)中所示. 在 300~525K 的温度范围内,可以拟合出 3 个热释光峰,峰位分别位于 385、446 和 473 K,具体拟合参数结果如表 2 所示.

峰位对应的温度越高,其陷阱深度越大,分别为 1.108, 1.259 和 1.506eV. 其中峰 1(峰位位于 385K)的热释光峰为近似的一级动力学,这表明该陷阱中的载流子在热激发脱嵌后有很小一部分会被重新束缚. 峰 2(峰位位于 446K)为标准的一级动力学,这表明该陷阱中的载流子在脱嵌后会直接到复合中心复合(载流子重新被缺陷束缚的概率相对于复合概率可以忽略). 其中需要注意的是该陷阱与另外两个陷阱相比,束缚的载流子数目很少,但频率因子比较高. 峰 3(峰位位于 473K),其动力学级数为 1.369,这表明陷阱中的载流子在脱嵌后会有相对高的概率被重新束缚. 图 5(b)为 YPS:Ce 的三维热释光谱,可以考察热释光峰的发光波长,从而确定载流子的复合中心. 从图中可以看出 YPS:Ce 的热释光峰峰位也位于 452K,与二维热释光谱一致. 而其在 385 K 处的热释光峰则不太明显,这可能是由于三维与二维的热释光测试设备的灵敏度不同而造成的. 发光波长范围为 330~450 nm,这个发光波长即为 YPS:Ce 的 PL 谱发光范围,这表明 YPS:Ce 热释光的载流子复合中心为 Ce 离子.

表 2 YPS:Ce 晶体的热释光峰参数  
Table 2 Parameters of the TSL peaks of YPS:Ce crystal

	Peak temperature/K	E/eV	$n_0$	$s$	$l$
Peak1	385	1.108	1.676E5	2.8888E13	1.034
Peak2	446	1.259	704.674	5.3568E15	1.000
Peak3	473	1.506	4.200E5	8.5647E14	1.369

通过用不同能量的光的激发,发现只有经过 350 nm 能量以上的光辐照后的样品才能产生热释光谱. 而 350 nm 光能量以下的光辐照后的样品是不能够产生热释光的. 350 nm 在 YPS:Ce 的截止吸收边上,对应着激发  $\text{Ce}^{3+}$  离子中  $4f$  电子的阈值. 由此可知 YPS:Ce 中陷阱的电子来源于  $\text{Ce}^{3+}$  的  $4f$  电子,当  $\text{Ce}^{3+}$  离子的  $5d$  电子被激发后,其中一部分电子被附近的缺陷束缚,当样品被加热后,重新从缺陷中脱嵌,在  $\text{Ce}^{3+}$  复合中心发光. 由此我们提出了 YPS:Ce 热释光的模型:热释光陷阱中的电子来源为  $\text{Ce}^{3+}$  的  $4f$  电子,复合中心为  $\text{Ce}^{3+}$ ,缺陷为电子陷阱,在 高能射线的辐照下,  $\text{Ce}^{3+}$  的  $4f$  基态电子被激发进入  $5d$  能级( $\text{Ce}^{3+}$  失去电子转化为  $\text{Ce}^{4+}$ ),然后被缺陷束缚. 经过热激发后,陷阱中的电子获得能量脱嵌,在  $\text{Ce}^{4+}$  处与空穴复合,并跃迁回  $4f$  基态并发光,该晶体中的缺陷都为局域性的缺陷. 一共有三个缺陷,分别位于 YPS 禁带中,  $\text{Ce}^{3+}$  离子最低  $5d$  子能级下方 1.108、1.259 和 1.506eV 处. 以上三个缺陷可能是由于热应力形成的,或者是 YPS:Ce 的固有缺陷,更进一步确认还需要细致的退火等实验. 该模型与另外两种铈掺杂硅酸盐闪烁晶体 LSO:Ce<sup>[18]</sup>和 LPS:Ce<sup>[19]</sup>的热释光模型是类似的.

3 结论

对区熔法生长的新型闪烁晶体 YPS:Ce 的闪烁和热释光性能进行了研究. 该闪烁晶体的光产额较小,约为 5800 ph/MeV,其发光谱线表现为宽带  $\text{Ce}^{3+}$  发射,由 361 nm 处的峰和 381 nm 的肩组成. 在 YPS:Ce 中  $\text{Ce}^{3+}4f$  基态的两个子能级之间的能级劈裂大约为  $1531\text{ cm}^{-1}$ . YPS:Ce 的衰减时间为 30.16 ns,目前铈掺杂硅酸盐闪烁晶体中最快的. 但其综合闪烁性能与 LSO:Ce 等性能优异的闪烁晶体相比要稍差,在需要快衰减闪烁体的领域有一定的应用前景. 经过二维和三维热释光测试,在 300~500 K 范围内,有三个缺陷,分别位于禁带中最低  $\text{Ce}^{3+}5d$  子能级下方 1.108、1.259 和 1.506eV 处. 可能是 YPS:Ce 晶体中的热应力引起的,或者本征缺陷,都为局域陷阱,  $\text{Ce}^{3+}$  离子为复合中心.

参考文献:

[1] van Eijk C W E. Inorganic-scintillator development. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 2001, **460**(1): 1–14.

[2] Melcher C L, Schweitzer J S. A promising new scintillator: cerium-doped lutetium oxyorthosilicate. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 1992, **314**(1): 212–214.

[3] Qin L, Li H, Lu S, *et al.* Growth and characteristics of  $\text{LYSO}(\text{Lu}_{2(1-x-y)}\text{Y}_{2x}\text{SiO}_5:\text{Ce}_y)$  scintillation crystals. *J. Cryst. Growth*, 2005, **281**(2/3/4): 518–524.

[4] Takagi K, Fukazawa T. Cerium-activated  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  single crystal scintillator. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **42**(1): 43–45.

[5] Aitasalo T, Hölsä J, Lastusaari M, *et al.* Delayed luminescence of  $\text{Ce}^{3+}$  doped  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ . *Opt. Mater.*, 2004, **26**(2): 107–112.

[6] Pauwels D, Le Masson N, Viana B, *et al.* A novel inorganic scintillator:  $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}^{3+}$  (LPS). *IEEE T. Nucl. Sci.*, 2000, **47**(6): 1787–2102.

[7] Pidol L, Kahn-Harari A, Viana B, *et al.* Scintillation properties of  $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}^{3+}$ , a fast and efficient scintillator crystal. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2003, **15**(12): 2091–2102.

[8] Kawamura J, Higuchi M, Yamaguchi T, *et al.* Floating Zone Growth and Scintillation Characteristics of Cerium-doped Gadolinium Pyrosilicate Single Crystals. IEEE Nuclear Science Symposium Conference, 2006, **N30**(138): 1160–1163.

[9] Karar N, Chander H. Luminescence properties of cerium doped nanocrystalline yttrium silicate. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**(19): 3580–3583.

[10] Feng H, Ding D Z, Li H Y, *et al.* Growth and luminescence characteristics of cerium-doped yttrium pyrosilicate single crystal. *J. Alloy. Compd.*, 2010, **489**(2): 645–649.

[11] Parmentier J, Bodart P, Audoin L, *et al.* Phase transformations in gel-derived and mixed-powder-derived yttrium disilicate,  $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ , by X-ray diffraction and  $^{29}\text{Si}$  MAS NMR. *J. Solid State Chem.*, 2000, **149**(1): 16–20.

[12] Blasse G, Grabmaier B. Luminescent Materials. Berlin: Springer, 1994.

[13] Scintillation properties (EB/OL), <http://scintillator.lbl.gov/2010-02-02>.

[14] Pedrini C, Moine B, Gacon J. One-photon and 2-photon spectroscopy of  $\text{Ce}^{3+}$  ions in  $\text{LaF}_3\text{-CeF}_3$  mixed-crystals. *J. Phys.: Condens. Matter*, 1992, **4**(24): 5461–5470.

[15] Cooke D, Bennett B, Farnum E, *et al.* Thermally stimulated luminescence from X-irradiated porous silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(26): 3594–3596.

[16] McKeever S, Rhodes F, Mathur V, *et al.* Numerical-solutions to the rate-equations governing the simultaneous release of electrons and holes during thermo-luminescence and isothermal decay. *Phys. Rev. B*, 1985, **32**(6): 3835–3843.

[17] Chen R. Glow curves with general order kinetics. *J. Electrochem. Soc.*, 1969, **116**(9): 1254–1257.

[18] Dorenbos P, Eijk C, Bos A, *et al.* Afterglow and thermoluminescence properties of  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$  scintillation crystals. *J. Phys.: Condens. Matter*, 1994, **6**(22): 4167–4180.

[19] Feng H, Ding D Z, Li H Y, *et al.* Annealing effects on Czochralski grown  $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}^{3+}$  crystals under different atmospheres. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(8): 083109–1–7.