

特约专栏

# 闪烁晶体材料的研究进展

赵景泰<sup>1</sup>, 王 红<sup>1,2</sup>, 金滕滕<sup>1,2</sup>, 王晨阳<sup>1,2</sup>, 胡关钦<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海硅酸盐研究所 透明光功能重点实验室, 上海 200050)

(2. 中国科学院研究生院, 北京 100864)

**摘 要:** 闪烁晶体用于X射线和 $\gamma$ 射线等高能粒子探测, 在分子医学成像、高能物理、核物理、安全检查、材料无损探伤和地质探矿等领域有着广泛的应用。随着人们对闪烁晶体的更加深入的认识以及晶体生长技术的发展, 许多已开发的闪烁晶体的性能得到优化和提高, 应用范围也随之扩大, 随着应用的更高要求, 对闪烁晶体的综合性能要求越来越高, 进一步设计、发现、开发和生长具有高密度、优良光学均匀性、高能束粒子阻止本领、高光产额、快衰减、高稳定性、低成本等综合优良性能的闪烁晶体仍然是闪烁材料研究的重点。简要综述了近年来卤化物、钨酸盐、锆(硅)酸盐、铝酸盐和硼(磷)酸盐等重要闪烁晶体材料的研究进展及其闪烁性能和应用前景。

**关键词:** 闪烁晶体; 研究进展;

中图分类号: TV42<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2010)10-0040-09

## Research Development of Inorganic Scintillating Crystals

ZHAO Jingtai<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>1,2</sup>, JIN Tengting<sup>1,2</sup>,  
WANG Chenyang<sup>1,2</sup>, HU Guanqin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Transparent Opto-Functional Inorganic Materials,  
Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

**Abstract:** Inorganic scintillators as ideal candidates for detection of X-ray,  $\gamma$ -ray, neutron and high energy particles have been widely applied in molecular medical imaging, high energy physics, nuclear physics, security inspection, non-destructive materials flaw detection and geological survey. With the development of crystal growth techniques and the deeper understanding of the scintillation materials, many known scintillators have been optimized with respect to their properties and the application were greatly broaden. New and sophisticated applications have higher demands for scintillation properties of the crystals. Design, discover, develop and produce scintillation materials with better properties such as high density with high stopping powder of energetic particles, good optical homogeneity, high light yield, fast decay, high stability and low cost are still the main tasks. This micro-review introduced the recent research development of inorganic scintillation crystals in the halide, tungstate, germanate, silicate, aluminate, borate, phosphate systems.

**Key words:** scintillation crystal; research progress

## 1 前 言

当高能射线(如X射线, $\gamma$ 射线)或其它放射性粒子通过某些晶体时,因射线或粒子的激发,该类晶体会发出荧光脉冲(闪烁光),具有这种性质的晶体称为闪烁晶体。闪烁晶体一般对自己发出的荧光是透明的,因而如果将闪烁晶体与光接收器件如CCD成像板或光电倍增管耦合,便可制成晶体闪烁探测计数器。闪烁晶体可用于X射线、 $\gamma$ 射线、中子及其他高能粒子的探测,经

过100年的发展,以闪烁晶体为核心的探测和成像技术已经在核医学、高能物理、安全检查、工业无损探伤、空间物理及核探矿等方面得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。例如,在医学领域,以闪烁探测器为核心的医疗成像设备肿瘤诊断,代表了目前的最高医学诊断水平(如PET/CT),在 $\gamma$ 手术刀应用中,也是采用闪烁体监测 $\gamma$ 射线;在地球物理探矿中,可以通过 $\text{Co}^{60}$ 放出的 $\gamma$ 射线通过矿床后的闪烁信号分析矿床分布等情况;在大型航空航天部件以及其它大型工业部件等无损探伤方面闪烁体起着关键作用;在机场地铁等各种安全检查地点以及货运集装箱的检查中也广泛采用闪烁体作为探测器<sup>[2]</sup>。

根据应用领域的不同对闪烁体的要求也不尽相同,

收稿日期: 2010-07-21

通信作者: 赵景泰,男,1962年生,研究员

但一般情况下闪烁晶体应具备下列特性: 密度较大, 对带电粒子阻止本领大, 对射线有很高的吸收系数、发光效率高、发光强度与入射线的能量有良好的线性关系、荧光衰减快、光学均匀性好以及对产生的荧光透明性好等, 在中子探测中还要求含有对 neutron 敏感的元素等。常用的闪烁晶体有: 碘化钠 ( $\text{NaI:Tl}$ ), 碘化铯 ( $\text{CsI:Tl}$ ), 氟化钡 ( $\text{BaF}_2$ ), 铈酸铋 ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ), 钨酸铅 ( $\text{PbWO}_4$ ), 铝酸钇 ( $\text{YAlO}_3\text{:Ce}$ ) 等。表 1 列出了部分闪烁晶体及其主要性能参数。随着分子医学成像技术、高能物理工程

以及各种极端条件下射线探测技术的发展, 寻找和研究具有高阻挡射线本领、高发光效率、高分辨率、高响应速度和高耐辐射的新型闪烁体的研究正方兴未艾, 如  $\text{Tm:K}_2\text{NaLuF}_6$  [3],  $\text{Lu}_x(\text{RE}^{3+})_{1-x}\text{AlO}_3\text{:Ce}$  [4],  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$  [5] 等晶体, 都具有优良的闪烁性能, 在正电子湮灭成像 PET 等核医学、中子探测和核物理领域有潜在应用。本文主要从不同闪烁晶体组成类型出发, 分别简要介绍了近年来卤化物、锗(硅)酸盐、钨酸盐、硼(磷)酸盐等闪烁晶体的研究进展和应用以及新型闪烁

表 1 部分闪烁晶体及其主要性能参数

Table 1 Physical and scintillation properties of several scintillation crystals

Crystals	Density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Melting point / $^{\circ}\text{C}$	Emission wavelength / $\text{nm}$	LY/Photons $\cdot (\text{MeV})^{-1}$	Decay times / $\text{ns}$
$\text{NaI:Tl}$	3.67	651	410	40 000	230
$\text{BaF}_2$	4.89	1 354	220/310	10 400 ~ 11, 800	0.6/620
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	7.13	1 050	480	9 000	300
$\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$	6.80	1 030	480	1 800	100
$\text{PbWO}_4$	8.28	1 123	420/490/520	220	10
$\text{CdWO}_4$	7.9	1 289	500	280 000	3/17
$\text{YSO:Ce}$	4.54	1 980	420	10 000	37
$\text{GSO:Ce}$	6.71	1 950	450	8 000	60/600
$\text{LSO:Ce}$	7.41	2 050	420	25 000	40 / > 2 000
$\text{LuAP:Ce}$	8.34	1 960	365	20 500	18
$\text{YAP:Ce}$	5.37	1 875	365	20 100	24
$\text{LuAG:Ce}$	6.73	—	300/510	3 000/11 000	100
$\text{Lu}_{0.3}\text{Y}_{0.7}\text{AlO}_3$	6.2	~ 1 875	360	~ 12 000	27
$\text{Li}_3\text{Lu}(\text{PO}_4)_2\text{:Ce}$	3.20	—	336/360	< 5 300	18.8
$\text{K}_3\text{Lu}(\text{PO}_4)_2\text{:Ce}$	3.90	—	390	~ 23 600	34.0
$\text{R}_3\text{Lu}(\text{PO}_4)_2\text{:Ce}$	4.68	—	415	~ 14 800	~ 36.8
$\text{Cs}_3\text{Lu}(\text{PO}_4)_2\text{:Ce}$	4.89	—	430	~ 13 500	~ 49.0

晶体的生长和性能研究。

## 2 闪烁晶体研究进展

### 2.1 卤化物

常见的卤化物闪烁晶体有  $\text{NaI:Tl}$ ,  $\text{CsI:Tl}$ ,  $\text{BaF}_2$  和稀土卤化物晶体。 $\text{NaI:Tl}$  晶体具有光产额高, 光电转换效率高, 化学性能稳定和易生长等优点, 是综合性能优良的闪烁体 [6], 自 1948 年问世以来, 一直是探测 X 射线、 $\gamma$  射线和  $\alpha$  射线最重要的闪烁体, 已广泛应用于石油勘测、环境监测、核医学、高能物理和工业 CT 等领域, 但由于其易潮解、辐照长度较短、阻止射线能力稍差等缺点, 在高能物理领域逐渐被铈酸铋 ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) 晶体取代。近年来,  $\text{NaI:Tl}$  晶体在瞬发  $\gamma$  射线中子活化分析 (PGNAA) 装置中也取得了广泛应用 [7]。目前法国圣戈班 (Sanit-Gobain) 公司的产品和技术据领先地位,

采用提拉法可以生长  $\phi 300 \text{ mm}$  以上的  $\text{NaI:Tl}$  大晶体, 几乎垄断了国际市场, 而国内高质量大尺寸  $\text{NaI:Tl}$  晶体的研制和生产则处于空白, 主要依赖于进口 [8]。 $\text{CsI:Tl}$  晶体虽然衰减时间较长 (约 1000 ns), 但具有非常高的光输出, 且发射波长为 560 nm 左右, 与半导体光电二极管匹配很好, 可以应用于安全检查、中微子探测、元素分析、核技术和高能物理领域, 已被日本高能物理研究所 (KEK) 和美国的斯坦福线性加速器中心 (SLAC) 选作为电磁量能器的探测器, 我国北京的正负电子对撞机 (BEPC) 进行升级改造也选用了  $\text{CsI:Tl}$  晶体 [9]。图 1 是基于  $^{241}\text{Am-Be}$  源的 PGNAA 安装示意图。

$\text{BaF}_2$  晶体具有从真空紫外至红外的高透光能力, 由于  $\text{BaF}_2$  晶体的半导体发光机理, 其发光衰减时间很短, 3 个发光峰 (195, 220, 310 nm) 对应的衰减时间分别为 0.87, 0.88, 600 ns, 是迄今为止衰减速度最快的闪烁

晶体,因而成为材料科学、高能粒子物理和医学应用中进行正电子湮灭研究的极佳材料。由于其光产额较低,快成分发光峰值在远紫外区而需采用造价较高的透紫外光电倍增管,限制了  $\text{BaF}_2$  晶体在大型粒子加速器中探测器上的应用<sup>[10]</sup>。近年来, Benemanshaya 等通过采用  $\text{AlGaIn}$  等作为光电倍增管,扩展了  $\text{BiF}_2$  晶体在 PET 扫描仪中的光电探测器等核医学和高能物理领域的应用<sup>[11]</sup>,同时因具有高折射率且在很宽的温度范围内性能稳定以及屈服应力较大等特点,又是一种品质优良的激光窗口材料。然而,目前研究发现,  $\text{BiF}_2$  晶体虽然具有抗 X 射线和电子辐照的能力,但是光辐照(真空紫外辐照)却很容易诱导晶体内部形成缺陷,影响其在光学窗口和光学镜头等方面的应用<sup>[12]</sup>。此外,与  $\text{BiF}_2$  相比,  $\text{CeF}_3$  晶体具有更高的密度,发光产额高,对  $\gamma$  辐射灵敏而对中子辐射相对不灵敏,是一种抗中子干扰的高效快响应闪烁晶体,适用作  $n, \gamma$  混合辐射场中测量  $\gamma$  辐射的闪烁体<sup>[13]</sup>。

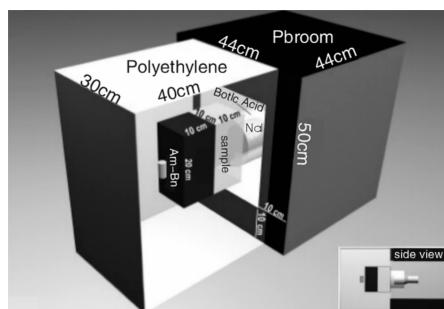


图 1 基于  $^{241}\text{Am}$ -Be 源的 PGNA 安装示意图

Fig. 1 Installation schematic diagram of the Am-Be source-based PGNA setup

掺 Ce 的卤化镧系  $\text{LaCl}_3$ ,  $\text{LaBr}_3$ ,  $\text{LuBr}_3$ ,  $\text{RbGd}_2\text{Br}_7$  和  $\text{LuI}_3$  等闪烁晶体具有比  $\text{NaI:Tl}$  还高的发光效率、更短的衰减时间、较大的密度和较低生长温度等特点,在医学成像技术 SPECT 和 PET 中有巨大的潜在应用前景<sup>[14]</sup>。氟化物材料一般用作固体激光器和闪烁体,而由于透明氟化物晶体中容易掺入三价稀土离子或过渡金属离子,展现出优异性能以取代前者在这些领域的应用,引起了对镧系氟化物晶体的新一轮研究热潮。 $\text{PrF}_3$  和  $\text{NdF}_3$  等卤化镧系晶体相继被生长出来,并研究了其闪烁性能,发现  $\text{PrF}_3$  晶体主要发射峰 395 nm 处的衰减时间为 510 ns,光产额约为 BGO 的 1/7,该窄带发射能充分使标准探测器展现出最大效率,在特殊应用领域具有发展前景<sup>[15]</sup>;而  $\text{NdF}_3$  晶体在 170 nm 内的透过率为 60% ~ 80%,其宽带发光中心位于 175 nm,衰减时间为 6.9 ns,在 5.5 MeV  $\alpha$  射线激发( $^{241}\text{Am}$ )下的光产额为  $60 \pm 6$  [Ph/5.5 MeV $\alpha$ ],具有较好的闪烁性能<sup>[16]</sup>。基于

实际应用中对闪烁性能的较高要求,研究者在简单氟化物的基础上,进一步生长和研究复杂氟化物晶体,以扩大其应用范围。如可应用于热中子检测和核医学的  $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6:10\% \text{Ce}^{3+}$  晶体<sup>[17]</sup> 和应用于真空紫外发射材料领域的  $\text{Tm}:\text{K}_2\text{NaLuF}_6$ <sup>[3]</sup>,  $\text{Nd}:\text{K}_3\text{YF}_6$  等<sup>[18]</sup> 氟化物晶体,其闪烁性能都取得了显著改进。此外,为了实现荧光器件的小型化,研究者利用含有不同浓度激活离子的化学计量比荧光化合物来减少晶体中荧光猝灭,实现高发光效率。例如 Kushnirenko 等采用下降法生长了 5 mm  $\times$  5 mm  $\times$  1 mm 的  $\text{Tb}_{0.957}\text{Sm}_{0.038}\text{Ho}_{0.003}\text{Pr}_{0.002}\text{F}_3$  (TSHPF) 晶体,并研究了其光致发光光谱,发现  $\text{Tb}^{3+}$  与  $\text{Sm}^{3+}$  间存在非常高效的能量传递,为 La 系离子组合改性的氟化物晶体的研究提供了重要研究基础<sup>[19]</sup>。

## 2.2 锆(硅)酸盐

锆酸铋晶体( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , BGO)密度为 7.13 g/cm<sup>3</sup>,发射波长在 480 nm,易于与光电倍增管匹配, $\gamma$  射线吸收系数高,抗辐照能力强,不潮解,是重要的闪烁体。中科院上海硅酸盐所 BGO 研究曾获国家发明一等奖,是我国晶体产业走向国际化的里程碑。目前,BGO 晶体主要应用于高能物理和核医学成像(PET)装置,西欧核子研究中心(CERN)建造的大型正负电子对撞机的 L3 电磁量能器中 BGO 晶体的用量高达 12 000 根(1.5 m<sup>3</sup>);在医学成像方面,BGO 晶体已经占领了整个 PET 市场份额的 50% 以上<sup>[20]</sup>。同时,BGO 晶体也是一种优良的光电晶体,被大量应用于光学电压传感器,此外,通过研究该晶体作为光纤电流传感器材料时的磁光特性,结果表明,BGO 晶体是一种优良的磁光材料,在传感器领域具有实用化前景<sup>[21]</sup>。作为传统的闪烁晶体,BGO 晶体也存在一些问题,如衰减时间较长和原料中  $\text{GeO}_2$  组分价格昂贵等,制约了该材料的生产和使用。因此,无论从性能还是成本上考虑,人们都在积极寻求 BGO 晶体的替代产品。Ge 与 Si 在周期表中同属 IV<sub>A</sub> 族,以  $\text{SiO}_2$  替代  $\text{GeO}_2$ ,可形成新的化合物硅酸铋( $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ , BSO)。研究表明,BSO 晶体具有良好的机械和化学稳定性以及光电和热释特性<sup>[22]</sup>,虽然其光输出只有 BGO 的 20%,但衰减时间为 100 ns,比 BGO 快得多(BGO 为 300 ns),是一种很有发展前途的新型快记时闪烁晶体,有希望对 BGO 晶体形成补充。目前日本东北大学的高能物理学家正在积极筹划采用 BSO 晶体建造大型高能粒子探测器,显示出该晶体在电磁量能器中潜在的广泛应用<sup>[23]</sup>。

被称为第 3 代闪烁体的二元  $\text{RE}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (其中  $\text{RE} = \text{Lu}^{3+}, \text{Y}^{3+}, \text{Gd}^{3+}$ ) 稀土硅酸盐体系中的 Ce 掺杂稀土正硅酸盐相系列晶体  $\text{RE}_2\text{SiO}_5$  具有优良的闪烁性能,如

$\text{Lu}_2\text{SiO}_5$  (LSO),  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  (GSO),  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$  (YSO) 等。这些晶体具有较快的衰减时间、较大的光输出、好的稳定性等优良闪烁特性, 决定了它们在高能物理, 核医学, 石油勘探等领域的良好应用前景<sup>[24]</sup>。 $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$  (LSO:Ce) 晶体的密度为  $7.4 \text{ g/cm}^3$ , 与 BGO 晶体相当, 光输出为 BGO 的 4~5 倍, 衰减时间为 40 ns, 发光波长 420 nm, 特别适合用于高能  $\gamma$  射线的快速探测。美国的 CTI 公司、Texas 大学西南医学中心、俄罗斯 Lebedev 物理研究所和上海光机所等先后开展了 LSO 晶体的生长实验和性能研究。上海硅酸盐研究所秦来顺等已能采用提拉法成功生长出尺寸为  $\phi 40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  的 LSO:Ce 晶体<sup>[25]</sup>。为降低成本和放射性 Lu 的含量, 具有优良闪烁性能的正硅酸盐晶体  $\text{Lu}_{2(1-x)}\text{Y}_{2x}\text{SiO}_5$  (LYSO) 和  $\text{Lu}_{1.8}\text{Gd}_{0.2}\text{SiO}_5:\text{Ce}$  (LGSO-90% Lu:Ce) 等也进一步发展起来。H. Alva-Sánchez 等将 LYSO 晶体阵列放入小型动物(老鼠)PET 中进行实验, 能够清楚得到老鼠的二维图像, 验证了该晶体的实际应用可行性(图 2 所示)。在此基础上, 通过优化工艺参数实现三维立体图像重建和小型动物 PET 系统的集成化具有较大发展空间<sup>[26]</sup>。Ce 掺杂的 LGSO-90% Lu 晶体的光输出为 BGO 晶体的 3.5~4.8 倍, 内衰减时间短, 且可通过调节 Ce 含量改变其衰减时间, 掺入 0.025 mol% 和 0.75 mol% Ce 时, 衰减时间分别为 34.2 ns 和 44.8 ns, 可用作 PET 成像系统中的相互作用深度分辨率高的探测器<sup>[27]</sup>。

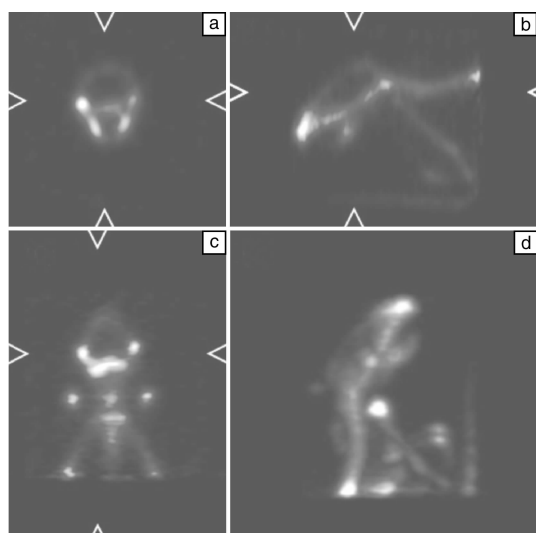


图 2 1 只 30 g 老鼠的  $\text{Na}^{18}\text{F}$  骨头的 PET 扫描照片: (a) 横剖面, (b) 纵剖面, (c) 冠状面, (d) 最大密度投影

Fig. 2 PET scanning photos of  $\text{Na}^{18}\text{F}$  bone scan of a 30 g mouse: (a) transverse section, (b) longitudinal section, (c) coronal planes, and (d) maximum density projection.

作为二元  $\text{RE}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  体系中另一个非常重要的焦

硅酸盐稳定相系列材料  $\text{RE}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ , 也同样具有很好的特性和用途, 与传统的闪烁晶体 NaI:TI 和 BGO, 甚至近年内发展起来的第 3 代闪烁晶体掺 Ce 稀土正硅酸盐相比, 掺 Ce 稀土焦硅酸盐的快衰减时间和高光输出等重要闪烁性能也体现出明显的优势。但目前对此类晶体作为闪烁材料的研究还较少, 仅限于少数几种晶体, 如  $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$  (LPS:Ce) 和  $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$  (YPS:Ce) 等晶体。LPS:Ce 晶体具有密度高 ( $6.23 \text{ g/cm}^3$ ), 与 LSO:Ce 晶体相比成本较低, 光输出高 ( $26\ 300 \text{ p/MeV}$ ) 能量分辨率高 (10%), 衰减时间短 (38 ns) 以及在温度升高到 450 K 时仍能保持高的发光效率等特性<sup>[28]</sup>, 在 PET 和石油测井中具有很好的应用前景。法国 L.Pidol 等采用提拉法已成功生长出大尺寸、高质量的  $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  单晶。而 YPS:Ce 晶体为不一致熔融合合物, 目前还没有生长出大尺寸单晶, 进一步的研究和应用受到了很大的限制<sup>[29]</sup>。

### 2.3 钨酸盐

常用的钨酸盐闪烁晶体主要有  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{GdWO}_4$ ,  $\text{CaWO}_4$  等。由于  $\text{PbWO}_4$  (PWO) 晶体具有密度高 (约  $8.3 \text{ g/cm}^3$ )、短的辐照长度 (约 0.89 cm) 和快的衰减时间 (90% 的发光衰减时间小于 20 ns) 和价格低廉等特点而被欧洲核子研究中心 (CERN) 选择作为大型强子对撞机 (LHC) 中电磁量能器 (ECAL) 用的闪烁材料。随后, PWO 晶体也成为德国 GSI 未来加速器装置中用于反质子存贮环中 PANDA 探测器中的电磁量能器<sup>[30]</sup>的候选晶体。然而, PWO 晶体光产额低的缺点限制了它的高能物理领域以外的应用, 如果 PWO 晶体的光输出能得到大幅提高 (如达到 BGO 的 8% 或以上), 将可用于诸如 PET 等核医学成像装置, 将产生巨大的社会和经济效益<sup>[31]</sup>。 $\text{CdWO}_4$  (CWO) 晶体具有密度高 ( $7.90 \text{ g/cm}^3$ )、辐射长度短 (1.06 cm)、发光效率与能量分辨率高、对 X 射线吸收系数大、抗辐照损伤性能强等特点, 是一种优良的闪烁探测器材料, 因此也是用于安全检查和医学成像上的首选材料。但由于 CdO 与  $\text{WO}_3$  易挥发导致组分偏离和晶体易沿 (010) 解理面开裂, CWO 晶体较难生长。目前, 采用下降法能成功生长  $\phi 40 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$  的  $\text{CdWO}_4$  晶体, 使高质量、大尺寸晶体生长成为可能<sup>[32]</sup>。钨酸钙 ( $\text{CaWO}_4$ ) 晶体具有较高的能量分辨率和低温光产额, 所以在低温探测方面,  $\text{CaWO}_4$  晶体被选作证实宇宙中存在弱相互作用的重粒子 (WIMP) 的目标材料以及探索暗物质的低温量热器材料<sup>[33]</sup>, 应用前景非常广阔。实验室通过提拉法生长的  $\text{CaWO}_4$  晶体常含有杂质离子, 严重影响了晶体的闪烁性能, 晶体生长有待进一步改进<sup>[34]</sup>。钨酸锌 ( $\text{ZnWO}_4$ ) 单晶具有发光效率高、能

量分辨率高、密度大、抗辐照损伤强等优点,在检测  $2\beta$  衰变、暗物质和  $\alpha$ 、 $\beta$  衰变等方面有潜在应用。通过优化生长工艺和闪烁性能,  $\text{ZnWO}_4$  晶体生长尺寸已可达  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 为在检测实验领域提供所需的应用条件。目前,在 CRESST 低温暗物质搜寻实验装置中的测试结果表明,  $\text{ZnWO}_4$  晶体在  $^{137}\text{Cs}$  的 662 keV  $\gamma$  射线作用下能量分辨率可达 10.7%, 在 (7 ~ 300) K 范围内光输出和衰减时间与  $\text{CaWO}_4$  相同, 而放射性污染不超过 (0.1 ~ 10) mBq/kg, 具有非常好的实用价值<sup>[35-36]</sup>。

## 2.4 铝酸盐

铝酸盐晶体主要包括  $\text{LnAlO}_3$  ( $\text{LnAP}$ , 畸变的钙钛矿结构)和  $\text{Ln}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ( $\text{LnAG}$ , 石榴石结构) ( $\text{Ln} = \text{La}, \text{Y}, \text{Gd}, \text{Lu}$ ) 两个体系, 目前研究较多的闪烁晶体为  $\text{YAG:Ce}$ ,  $\text{LuAP:Ce}$ ,  $\text{GdAP:Ce}$ ,  $\text{YAG:Ce}$  等晶体<sup>[37-38]</sup>。

$\text{YAlO}_3:\text{Ce}$  ( $\text{YAP:Ce}$ ) 是 1 种密度约为  $5.4 \text{ g/cm}^3$ , 不易潮解, 化学性能稳定和易加工的新型闪烁晶体, 其发光产额高, 约为  $\text{NaI:Tl}$  晶体的 40%, 是  $\text{BGO}$  晶体的 4 倍, 衰减时间短, 一般不大于 27 ns, 比  $\text{NaI}$  晶体的衰减时间快了 1 个量级, 主发光峰值在 366 nm 附近, 能与一般的光电探测器相匹配, 对  $\gamma$  的探测效率很高, 但由于有效原子序数很小 ( $Z_{\text{eff}} = 39$ ), 主要应用于低能  $\gamma$  探测和软 X 射线探测, 目前已应用于小动物 PET 成像<sup>[39-40]</sup>。 $\text{YAP:Ce}$  晶体的光输出随温度变化非常小, 可适用于石油测井和高温极端条件应用领域。此外, 由于  $\text{YAP:Ce}$  晶体的衰减时间非常快, 在高时间分辨医学设备中的质子探测器中有较大应用前景<sup>[44]</sup>。主要缺点是光折射率低, 导致晶体发光耦合处的能量损失较大。近年法国圣戈班 (Saint-Gobain)、美国 Bicron 和捷克 Crys-tur 公司已经能够长出高质量的  $\text{YAP:Ce}$  闪烁晶体, 而国内上海光机所在 2009 年采用提拉法已生长出  $\phi 30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  大尺寸高质量  $\text{YAP}$  晶体<sup>[45]</sup>。

$\text{LuAlO}_3:\text{Ce}$  ( $\text{LuAP:Ce}$ ) 晶体具有密度大, 光衰减时间短和光输出高等特性, 使其特别适合于 PET 器件使用<sup>[46-47]</sup>。此外,  $\text{LuAP:Ce}$  晶体物理化学性能稳定, 特别是机械强度高, 其莫氏硬度高达 8.5 mho, 使它有望应用于温度变化比较大的环境, 如石油测井等<sup>[48-49]</sup>。2000 年, CERN 的 CCC (Crystal Clear Collaboration) 研究小组与俄罗斯的 BTCP (Bogoroditsk Techno Chemical Plant) 公司联合开始对  $\text{LuAP:Ce}$  晶体进行研究。由于该晶体在生长过程中容易发生相分解, 研究者向其中掺入 Y 或 Gd 等元素, 以发展固溶型  $\text{Lu}_x(\text{RE}^{3+})_{1-x}\text{AlO}_3:\text{Ce}$  晶体<sup>[50]</sup>, 据报道, 他们采用提拉法成功长出了  $\phi 25 \text{ mm} \times (180 \sim 210) \text{ mm}$  的  $\text{Lu}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{AlO}_3$  晶体并可以满足工业生产要求 (图 3 和图 4 所示), 有望应用于小型动物或人

体 PET<sup>[51]</sup>。在我国, 到目前为止还未见到该晶体的相关研究报道。

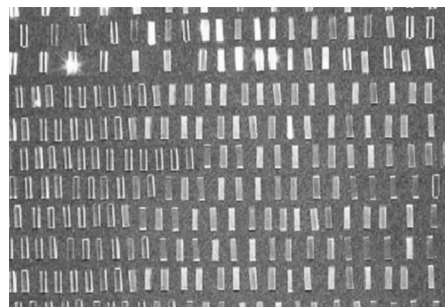


图 3 PET 测试模块所用的  $\text{Lu}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{AlO}_3$  闪烁元件照片

Fig. 3 Photo of  $\text{Lu}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{AlO}_3:\text{Ce}$  scintillation element used for PET testing module

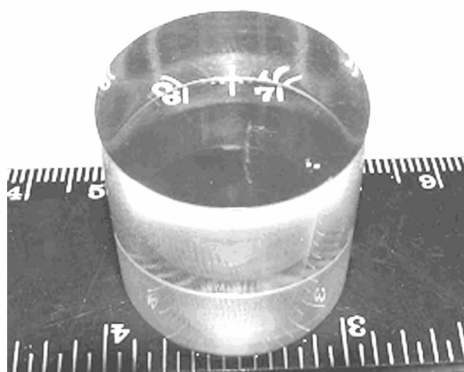


图 4 用于电离辐射光谱测定的  $\text{Lu}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{AlO}_3$  闪烁元件照片

Fig. 4 Photo of  $\text{Lu}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{AlO}_3$  scintillation element used for electro-ionizing radiation spectrum determination

$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  ( $\text{YAG:Ce}$ ) 晶体具有光产额高 (20 000 photons/MeV), 衰减时间短, 两组闪烁发光分量的衰减时间分别为 85 ns 和 300 ns, 发射峰位于 550 nm, 能够很好的与硅光电二极管和 CCD 探测器组合, 对  $\gamma$  射线和  $\alpha$  粒子的响应脉冲信号有很大不同。该晶体可被应用于轻带电粒子的检测, 医学成像,  $\gamma$  照相, 正电子发射断层扫描 (PET) 和电脑断层扫描仪 (CTS)<sup>[52]</sup>。目前,  $\text{YAG:Ce}$  晶体已被应用于 SEM (Scanning Electron Microscopes) 和辐射闪烁体中的电子成像传感器。由于在提拉法生长中, 该晶体的凸生长界面导致晶体中有较多包裹和缺陷, 杨新波等采用温度梯度法生长出约  $\phi 100 \text{ mm}$  高质量  $\text{YAG:Ce}$  晶体, 很可能在轻电子检测方面取代  $\text{CsI:Tl}$  和  $\text{BGO}$  晶体<sup>[53]</sup>。图 5 示出了  $\phi 4$  英寸  $\text{YAG:Ce}$  晶体的横向切片的照片。此外, 由于物理学家对太阳中微子的关注, 而且  $\text{Yb}^{3+}$  的能级结构与  $\text{Ce}^{3+}$  相似, 因此掺  $\text{Yb}^{3+}$  闪烁晶体可能是 1 种可应用于中微子探测的快衰减闪烁体。杨培志等研究了不同  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂 (5% ~ 30%) 的

Yb:YAG 晶体的闪烁性能,发现在阴极射线激发下,该晶体的发光波长位于(330 ~ 350) nm。在  $\alpha$  射线激发下,Yb:YAG 晶体的发光衰减时间小于 50 ns,由于存在温度依赖关系,Yb:YAG 晶体在低温下可望用于医学成像装置<sup>[54]</sup>。

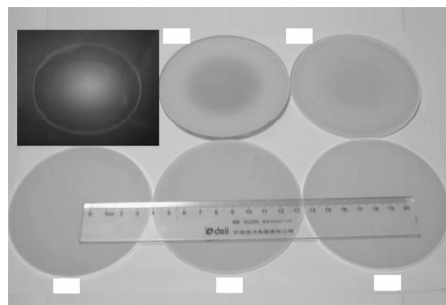


图 5  $\phi 4$  英寸 YAG:Ce 晶体的横向切片,左上角图为该晶体的应力分布图

Fig. 5 Transverse pieces of the as-grown  $\phi 4$  inch Ce:YAG crystal. The inset at the top left corner is the stress distribution image of the as-grown crystal

## 2.5 硼(磷)酸盐

硼酸盐晶体主要应用于非线性光学材料和激光材料,具有巨大实用价值,如用于紫外倍频的 BBO ( $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 低温相偏硼酸钡)、LBO (LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>), CLBO (CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>) 等晶体<sup>[55]</sup>。而对于 Ce<sup>3+</sup> 激活的硼酸盐晶体,由于 <sup>10</sup>B, <sup>6</sup>Li, <sup>157</sup>Gd 对热中子的俘获截面大,因此,低密度的含有 <sup>6</sup>Li 或 <sup>157</sup>Gd 的硼酸盐是较好的中子探测材料,如 LnBO<sub>3</sub>:Ce (Ln = Y, Gd, Lu), Li<sub>6</sub>Ln(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Ce (Ln = Y, Gd, Lu) 等<sup>[56]</sup>。其中,高密度的 LuBO<sub>3</sub>:Ce 光输出很高而衰减时间很短,是 1 种极具应用潜力的  $\gamma$  射线探测材料。但由于 LnBO<sub>3</sub> 类晶体生长较困难,其高质量、大尺寸的晶体未见报道,在闪烁晶体材料中的应用还有待进一步研究发展。Li<sub>6</sub>Gd(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Ce (LGBO:Ce) 含有 3 种对中子有较大俘获截面的原子(Li, Gd, B),探测效率是 <sup>6</sup>Li 玻璃的 6 倍;其密度(3.5 g/cm<sup>3</sup>)较小,探测中子时可以有效地抑制  $\gamma$  射线背景,其发射波长为(360 ~ 500) nm,可与价格相对低廉的光电倍增管匹配,是 1 种性能优异的中子探测用新型闪烁晶体<sup>[57]</sup>。此外,由于 Li<sub>6</sub>Gd(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Eu 晶体的有效原子序数比 Li<sub>6</sub>Y(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 晶体的高出很多,能有效降低  $\gamma$  背景,该晶体在固体放射量测定上具有潜在应用<sup>[58]</sup>。近几年出现的新型硼酸盐体系闪烁化合物和晶体如 REBa<sub>3</sub>B<sub>9</sub>O<sub>18</sub> (RE = Y, Lu), LuBa<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 亦具有潜在的应用前景<sup>[59-60]</sup>。

磷酸盐也是一类在光学材料方面得到非常广泛应用的化合物,如作为荧光材料的 (Y, Gd) PO<sub>4</sub>:Eu (红), LaPO<sub>4</sub>:Tm (蓝) 等及作为非线性光学材料的 KDP, KTP

等。但目前作为闪烁晶体应用的只有 Rb<sub>3</sub>Lu(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Ce<sup>3+</sup> 和 K<sub>3</sub>Lu(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Ce 等晶体。D.Wisniewski 等研究了 Ce 掺杂 A<sub>3</sub>RE(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (A 为碱金属,如 Li, K, Rb 或 Cs) 晶体的闪烁性能,发现这类磷酸盐晶体具有适当的密度,较高光输出和快的衰减时间,可作为 X 射线、低能  $\gamma$  光子和含 <sup>6</sup>Li 材料的探测器,并在集成中子/ $\gamma$  探测器方面有较大发展前景<sup>[61]</sup>。袁军林等报道了一系列具有优良闪烁性能的磷酸盐化合物<sup>[62]</sup>,硼酸盐和磷酸盐在光学方面的广泛应用主要归因于这两类化合物中含有的硼氧和磷氧基团,在此基础上,硼磷酸盐化合物发展起来成为一类新化合物体系。目前,硼磷酸盐的研究主要集中在对其化合物的合成、结构及性能表征方面,在晶体生长以及应用方面的工作还相当匮乏,有待进一步发展。吴以成等生长了 BaBPO<sub>5</sub> 晶体,并研究了其闪烁性能<sup>[63]</sup>;段成军等发现 Ba<sub>3</sub>BP<sub>3</sub>O<sub>12</sub>:Eu 粉体具有(400 ~ 650) nm 的宽带发射,光产额高,与 BGO 晶体相当,衰减时间快(20 ns)等特性,是性能优异的闪烁材料<sup>[64-65]</sup>。张志军等采用顶晶法首次生长出 10 mm × 8 mm × 2 mm 的晶体,并对其闪烁性能进行了初步研究,为其在闪烁材料领域的潜在应用提供了重要基础<sup>[66]</sup>。

## 3 结 语

闪烁晶体的研究和发展日新月异,随着人们对闪烁晶体的更加深入的认识以及晶体生长技术的发展,许多已开发的闪烁晶体的性能得到优化和提高,应用范围也随之扩大。然而随着核医学、核物理、安全检查、极端条件应用以及工业无损探伤发展的更高要求,对闪烁晶体的综合性能要求越来越高,进一步设计、发现、开发和生长具有高密度、优良光学均匀性、高带电粒子阻止本领、高光产额、快衰减、高稳定性、低成本等综合优良性能的闪烁晶体仍然是闪烁材料研究的重点。

## 参考文献 References

- [1] Yao Nianzeng (姚年增). *Foundation for Crystal Growing* (晶体生长基础) [M]. Hefei: Chinese University of Science and Technology press, 1994: 7-8.
- [2] Zang Jingcun (臧竞存), Liu Yanxing (刘燕行). 闪烁发光与闪烁晶体研究动态[J]. *Journal of Synthetic Crystals* (人工晶体学报), 2004, 33(2): 266-271.
- [3] Naoto Abe, Takayuki Yanagida, Yuui Yokota, et al. Crystal Growth and Scintillation Properties of Tm:K<sub>2</sub>NaLuF<sub>6</sub>[J]. *Optical Materials*, 2010, 32(5): 589-594.
- [4] Winicjusz Drozdowski, Andrzej J. Wojtowicz, et al. Scintillation Properties of LuAP and LuYAP crystals activated with Cerium and Molybdenum[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2006, 562(1): 254-261.

- [5] Ogorodnikov I N, Poryvay N E, Pustovarov V A, *et al.* Short – Living Defects and Recombination Processes in  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$  crystals[J]. *Radiation Measurements*, 2010, 45(3–6): 336–339.
- [6] Lv Haijing(吕海江), Cai Kangsong(蔡康松), Jiao Zheng(焦铮), *et al.* NaI(Tl) 晶体的性能研究[J]. *Journal of Anhui Normal University*(安徽师范大学学报), 2006, 29(5): 432–434.
- [7] Hashem Miri Hakimabad, Hamed Panjeh. Evaluation Nonlinear Response Function of a  $3 \times 3$  in NaI Scintillation Detector for PGNA Applications[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2007, 65(8): 918–926.
- [8] Li Ruilong(李瑞龙), Zhang Yongcun(张永春), Li Qi(李琦). 无机闪烁晶体碘化钠 NaI(Tl) 的现状与发展趋势[J]. *New Material Industry*(新材料产业), 2007(9): 68–71.
- [9] Guo Yajun(郭亚军), Yang Chunhui(杨春晖). CsI(Tl) 闪烁晶体研究进展[J]. *Journal of Synthetic Crystals*(人工晶体学报), 2004, 33(1): 77–80.
- [10] Wang Zhengtao(王震涛), Zhang Jianguo(张建国), Yang Yifang(杨翔方). *et al.* 无机闪烁探测器的发展和应用[J]. *New Material Industry*(新材料产业), 2008, 17(4): 505–507.
- [11] Benemanskaya G, Garibin E, Gusev Y. *et al.* Photosensors for PET Scanner on the Base of  $\text{BaF}_2$  Crystals[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2009, 610(1): 335–337.
- [12] Arimoto O, Watanabe M, Tsujibayashi T, *et al.* Photostimulated Detection of Radiation Defects Produced by VUV Light in  $\text{BaF}_2$  [J]. *Radiation Measurement*, 2010, 45(3–6): 356–358.
- [13] Marrone S, Berthomieux E, Becvar F, *et al.* Pulse Shape Analysis of Signals from  $\text{BaF}_2$  and  $\text{CeF}_3$  Scintillators for Neutron Capture Experiments[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2006, 568(2): 904–911.
- [14] Xie Jianjun(谢建军), Yang Peizhi(杨培志), Liao Jingying(廖晶莹), *et al.* 卤化镧系  $\text{LnX}_3$  (Ce) 闪烁晶体的研究进展[J]. *Journal of Inorganic Materials*(无机材料学报), 2005, 20(3): 522–528.
- [15] Kiyoshi Shimamura, Encarnacion Villora, Satoshi Nakakita. Growth and Scintillation Characteristics of  $\text{CeF}_3$ ,  $\text{PrF}_3$  and  $\text{NdF}_3$  Single Crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 264(1–3): 208–215.
- [16] Yuki Furuya, Noriaki Kawaguchi, Naoto Abe, *et al.* Crystal Growth and Scintillation Properties of  $\text{NdF}_3$  Single Crystal[J]. *Optical Materials*, 2010, 32(9): 878–881.
- [17] Rooh Gul, Kim H J, Kim Sunghwan, *et al.* Scintillation Properties of  $\text{Cs}_2\text{LiGdCl}_6: \text{Ce}^{3+}$  [J]. *Radiation Measurements*, 2010, 45(3–6): 412–414.
- [18] Naoto Abe, Takayuki Yanagida, Yuui Yokota, *et al.* Crystal Growth and Scintillation Properties of Tm:  $\text{K}_2\text{NaLuF}_6$  [J]. *Optical Materials*, 2010, 32(5): 589–594.
- [19] Kushnirenko V I, Sopinskyy M V, Manoilov E G, *et al.* Luminescent Spectroscopy of  $\text{TbF}_3$  and  $\text{TbF}_3\text{-SmF}_3\text{-HoF}_3\text{-PrF}_3$  Crystal [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 451(1–2): 209–211.
- [20] Liao Jingying(廖晶莹), Yi Chongzhi(叶崇志), Yang Peizhi(杨培志) *et al.* 锆酸铋闪烁晶体的研究综述[J]. *Chemical Research*(化学研究), 2004, 15(4): 52–58.
- [21] Wang Meirong(王美蓉), Zhou Wangming(周王民), Zhao Jianlin(赵建林). 基于 BGO 晶体的反射型法拉第光纤电流传感器[J]. *Photon Journal*(光子学报), 2008, 37(6): 1186–1190.
- [22] Zhang Zhengguang(张争光), Wang Xiufeng(王秀峰). 硅酸铋(BSO)闪烁晶体的研究综述[J]. *Ceramics*(陶瓷), 2009(9): 33–38.
- [23] Xu Jiayue(徐家跃), Wang Hong(王红), He Qingbo(何庆波), *et al.* 坩埚下降法生长硅酸铋闪烁晶体[J]. *Journal of Chinese Society*(硅酸盐学报), 2009, 37(2): 295–298.
- [24] Zhou Juan(周娟), Hua Wangxiang(华王祥), Xu Jiayue(徐家跃), *et al.* 新型闪烁晶体  $\text{Ln}_2\text{SiO}_5$  的研究进展[J]. *Journal Inorganic Materials*(无机材料学报), 2002, 17(6): 1105–1111.
- [25] Qin Laishun, Lu Shen, Ding Dongzhou, *et al.* Color Center and Radiation Center in  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$  Crystal [J]. *Journal of Rare Earths*, 2008, 26(5): 678–680.
- [26] Alva-Sánchez H, Murrieta T. A Small-Animal PET System Based on LYSO Crystal Arrays, PS-PMTs and a PCDAQ Board[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 57(1): 85–93.
- [27] Shigenori Shimizu, Catherine M Pepin. Characteristics of  $\text{Lu}_{1.8}\text{Gd}_{0.2}\text{SiO}_5:\text{Ce}$  (LGSO) for APD-Based PET Detector[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 57: 55–62.
- [28] Pidol, Kahn Harari L, Viana A, *et al.* High Efficiency of Lutetium Silicate Scintillators, Ce-doped LPS, and LYSO Crystals [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(3): 1084–1087.
- [29] Yan Chengfeng(严成锋), Zhao Guangjun(赵广军), Hang Ying(杭寅), *et al.* 稀土焦硅酸盐  $\text{Re}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  闪烁晶体的研究进展[J]. *Journal of Synthetic Crystals*(人工晶体学报), 2005, 34(1): 144–148.
- [30] Borisevich A, Fedorov A, Hofstaetter A, *et al.* Lead Tungstate Scintillation Crystal with Increased Light Yield for the PANDA Electromagnetic Calorimeter[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2005, 537(1–2): 101–104.
- [31] Xie Jianjun, Shi Ying, Yuan Hui, *et al.* Influence of Negative Ions ( $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{I}^-$  and  $\text{S}^{2-}$ ) Doping on Scintillation Properties of  $\text{PbWO}_4$  Crystals[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 604(3): 527–530.
- [32] Xiao Huaping, Chen Hongbing, Xu Fang, *et al.* Bridgman Growth of  $\text{CdWO}_4$  Single Crystals [J]. *Journal of Crystal*

- Growth*, 2008, 310(3): 521–524.
- [33] Michael Kiefer, Franz Pröbst, Godehard Angloher, *et al.* Glued  $\text{CaWO}_4$  Detectors for the CRESST – II Experiment[J]. *Optical Materials*, 2009, 31(10): 1 410–1 414.
- [34] Huang Shanying (黄善营), Ma xiaohong (马晓红), Yang kaihua (杨凯华). *et al.*  $\text{Pb}^{2+}:\text{CaWO}_4$  晶体电子结构研究[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics* (原子与分子物理学报), 2008, 25(6): 1 503–1 506.
- [35] Kraus H, Danevich F A, Henry S, *et al.*  $\text{ZnWO}_4$  Scintillators for Cryogenic Dark Matter Experiments[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 600(3): 594–598.
- [36] Belli P, Bernabei R, Cappella F, *et al.* Search for Double Beta Decay of Zinc and Tungsten with Low Background  $\text{ZnWO}_4$  Crystal Scintillators[J]. *Nuclear Physics A*, 2009, 826(3–4): 256–273.
- [37] Zhang Mingrong (张明荣), Wei Jing (韦 瑾). 高密度快衰减闪烁晶体及其研究开发现状[J]. *Journal of Chinese Ceramic Society* (硅酸盐学报), 2004, 32(3): 384–391.
- [38] Dimitrios Nikolopoulos, Ioannis Kandarakis, Xenophon Tsantilas, *et al.* Comparative Study Using Monte Carlo Methods of the Radiation Detection Efficiency of LSO, LuAP, GSO and YAP Scintillators for Use in Positron Emission imaging (PET) [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2006, 569(2): 350–354.
- [39] Moszynski M. Properties of the YAP: Ce Scintillator[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1998, 404(1): 157–165.
- [40] Vilaridi I, Braem A, Chesi E, *et al.* Optimization of the Effective Light Attenuation Length of YAP: Ce and LYSO: Ce Crystals for a Novel Geometrical PET Concept[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2006, 564(1): 506–514.
- [41] Belogurov S, Bressi G, Camgno G. Properties of Yb – Doped Scintillators; YAG, YAP, LuAG [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, 516(1): 58–67.
- [42] Hu Mengchun (胡孟春), Li Zhongbao (李忠宝), Zhou Gang (周 刚) *et al.* 国产 YAG:Ce 闪烁晶体的相对探测能量测量 [J]. *Journal of Synthetic Crystals* (人工晶体学报), 2008, 37(6): 1 458–1 461.
- [43] Randazzo N, Sipala V, Aiello S, *et al.* YAP(Ce) Crystal Characterization with Proton Beam Up to 60 MeV [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2008, 586(2): 295–299.
- [44] Chen Jianyu, Zhao Guangjun, Cao Dunhua, *et al.* Color Center of  $\text{YAlO}_3$  with Cation Vacancies [J]. *Current Applied Physics*, 2010, 10(2): 468–470.
- [45] Petrosyan A G, Derdzian M, Ovanesyan K, *et al.* Properties of LuAP: Ce Scintillator Containing Intentional Impurities[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, 571(1–2): 325–328.
- [46] Trummer J, Auffray E, Lecoq P, *et al.* Depth of Interaction Resolution of LuAP and LYSO Crystals[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 599(2–3): 264–269.
- [47] Andrei Fedorov, Mikhail Korzhik, Alexander Lobko, *et al.* Light Yield Temperature Dependence of Lutetium-Based Scintillation Crystals[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2005, 537(1–2): 276–278.
- [48] Ding Dongzhou (丁栋舟), Ren Guohao (任国浩).  $\text{LuAlO}_3$ : Ce 闪烁晶体的研究进展[J]. *Journal of Synthetic Crystals* (人工晶体学报), 2006, 35(2): 237–243.
- [49] Kuntner C, Auffray E, Bellotto D, *et al.* Advances in the Scintillation Performance of LuYAG: Ce Single Crystals [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2005, 537(1–2): 295–301.
- [50] Alexander Annenkov, Andrei Fedorov, Mikhail Korzhik, *et al.* Industrial Growth of LuYAP Scintillation Crystals [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2005, 537(1–2): 182–184.
- [51] Moszynski M, Ludziejewski T, Wolski D, *et al.* Properties of the YAG: Ce scintillator [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1994, 345(1): 461–467.
- [52] Yang Xinbo, Li Hongjun, Bi Qunyu, *et al.* Growth of large – sized  $\text{Ce:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (Ce:YAG) Scintillation Crystal by the Temperature Gradient Technique (TGT) [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311(14): 3 692–2 696.
- [53] Yang Peizhi (杨培志), Deng Peizhen (邓佩珍), Xu Jun (徐 军), *et al.* Yb:YAG 晶体的闪烁特性[J]. *Journal for Luminescence* (发光学报), 2005, 26(6): 723–726.
- [54] Wang Bailiang (王佰亮), Wang Guosheng (王国胜), Wang Hongxing (王红心), *et al.* 多金属硼酸盐的研究进展[J]. *Liaoning Chemical Engineering* (辽宁化工), 2008, 37(7): 481–483.
- [55] Van Eijk C W E. New Scintillators, New Light Sensors, New Applications[C]. *Proceedings of the International Conference on Inorganic Scintillators and Their Application*, Shanghai, Shanghai Science press, 1997, 3–12.
- [56] Cheng Junfeng (陈俊峰), Li Zan (李 赞), Shong Guilan (宋桂兰) *et al.*  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ :Ce 晶体的提拉法生长和闪烁性能[J]. *Journal for Inorganic Materials* (无机材料学报), 2006, 21(5): 1 053–1 059.
- [57] Yavetskiy R P, Tolmachev A V, Dolzhenkova E F, *et al.* Thermally Stimulated Luminescence Mechanism of  $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ :  $\text{Eu}^{3+}$  Single Crystals [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 429(1–2): 77–81.
- [58] He M, Chen X L, Sun Y P, *et al.*  $\text{YBa}_3\text{B}_9\text{O}_{18}$ : A Promising Scintillation Crystal[J]. *J Cryst Growth & Design.*, 2007(7): 199–201.
- [59] Duan C J, Yuan J L, Zhao J T. Luminescence Properties of Efficient X-Ray Phosphors of  $\text{YBa}_3\text{B}_9\text{O}_{18}$ ,  $\text{LuBa}_3(\text{BO}_3)_3$ ,



a-YBa<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> and LuBO<sub>3</sub> [J]. *J Solid State Chem*, 2005, 178: 3 698 – 3 702.

[60] Wisniewski D , Wojtowicz AJ , Boatner L A. Properties of Ce – Activated Alkali – Lutetium Double Phosphate Scintillators [J]. *Radiation Measurements*, 2010, 45(3 – 6): 400 – 402.

[61] Yuan J L , Wang X J, Zhang Z J, *et al.* Synthesis, Structure and X-Ray Excited Luminescence of Ce<sup>3+</sup> -Doped AREP<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-Type Alkali Rare Earth Diphosphates (A = Na, K, Rb, Cs; RE = Y, Lu) [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2007, 180: 3 381 – 3 387.

[62] Li W F , Feng X Q, Duan C J, *et al.* Optical and Luminescence Properties of BaBPO<sub>5</sub> Single Crystal [J]. *J Phys D: Appl, Phys*, 2005, 38: 385 – 388.

[63] Duan C J , Li W F, Wu X Y, *et al.* Ba<sub>3</sub>BP<sub>3</sub>O<sub>12</sub>: Eu<sup>2+</sup>, A Potential Scintillator [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 201 917.

[64] Zhao J T, Duan C J. *Inorganic Chemistry in Focus III* [M]. New York: Wiley-VCH, 2006.

[65] Zhang Zhijun, Wang Hong, Hu Guanhui, *et al.* Crystal Growth of Ba<sub>3</sub>BP<sub>3</sub>O<sub>12</sub> with BPO<sub>4</sub>-NaF flux [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2010, 312(9): 1 577 – 1 580.

[66] Carel W E, Van Eijk. *Inorganic-Scintillator Development* [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2001, 460(1): 1 – 14.

科技部批准 2011 年国家 973 和重大科学研究计划项目

国家重点基础研究发展计划(973 计划)2010 年度项目申报评审工作已经结束。为贯彻落实《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006 – 2020 年)》，加强面向国家战略需求的基础研究，根据我国经济、社会及科技发展的需求和专家评审结果，科技部日前发布决定批准“轻质高温 TiAl 金属间化合物合金及其制备加工的科学技术基础”等 113 个项目立项，这批项目将于 2011 年初启动实施。下表列出了 2011 年材料领域中 13 个 973 计划项目。

2011 年材料领域中 13 个 973 计划项目

项目首席科学家	项目依托承担单位	项目名称
熊 翔	中南大学	高性能炭/炭复合材料高效制备与服役基础研究
闻海虎	中国科学院物理研究所	高温超导材料与物理研究
李伯耿	浙江大学	高性能热塑性弹性体制备及加工应用中的科学问题
林均品	北京科技大学	轻质高温 TiAl 金属间化合物合金及其制备加工的科学技术基础
徐 坚	中国科学院化学研究所	超高性能与低成本聚丙烯腈碳纤维的科学基础及共性问题研究
杨玉良	复旦大学	高性能碳纤维相关重大问题的基础研究
杨 锐	中国科学院金属研究所	基于集成计算的材料设计基础科学问题
卢天健	西安交通大学	超轻多孔材料及其构成结构多功能化应用的基础研究
介万奇	西北工业大学	多组元合金及其结构件铸造过程的凝固基础研究
韩恩厚	中国科学院金属研究所	核电关键材料及焊接部位在微纳米尺度下的环境行为与失效机理
余木火	东华大学	高性能芳纶纤维制备过程中的关键科学问题
顾忠伟	四川大学	生物医用材料组织诱导作用的分子机制与设计原理
谢建新	北京科技大学	高性能金属材料控制凝固与控制成形的科学基础

(本刊通讯员)