

文章编号: 1000-7032(2022)02-0201-08

# 有机锡化合物掺杂聚乙烯基甲苯基塑料闪烁体的制备、光学和闪烁性能

李 雯<sup>1,2</sup>, 李云云<sup>2\*</sup>, 秦来顺<sup>1\*</sup>, 吴泓澍<sup>2</sup>, 钱 森<sup>3</sup>, 吴云涛<sup>2</sup>(1. 中国计量大学 材料与化学学院, 浙江 杭州 310018; 2. 中国科学院上海硅酸盐研究所 人工晶体研究中心, 上海 201899;  
3. 中国科学院高能物理研究所 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

**摘要:** 传统的塑料闪烁体由于其低有效原子序数和密度, 不适用于能谱探测领域。有机重金属化合物掺杂塑料闪烁体的制备为塑料闪烁体实现能谱探测提供了一种有效途径。而有机锡化合物掺杂塑料闪烁体具有高光峰灵敏度, 并保留了塑料闪烁体的快衰减特性。本文通过自由基聚合的方法成功制备了不同浓度 2-(三丁基锡烷基)呋喃掺杂的聚乙烯基甲苯(PVT)基塑料闪烁体, 并对其光学和闪烁性能进行了测试和比较。其中掺杂 20% 2-(三丁基锡烷基)呋喃的 PVT 基塑料闪烁体的透光率可达 90%, X 射线激发发射光谱主峰位于 425 nm 处, 光产额为 6 700 ph/MeV, 能量分辨率为 15.8% @ 662 keV, 衰减时间为 4.3 ns。我们也制备了 1 英寸直径、掺杂 20% 2-(三丁基锡烷基)呋喃的塑料闪烁体, 具有 6 300 ph/MeV 的光产额和 15.8% @ 662 keV 的能量分辨率。

关键词: 塑料闪烁体; 有机锡化合物; 光学性能; 能量分辨率

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210347

## Preparation, Optical and Scintillation Properties of Organotin Compounds Doped Polyvinyltoluene-based Plastic Scintillators

LI Wen<sup>1,2</sup>, LI Yun-yun<sup>2\*</sup>, QIN Lai-shun<sup>1\*</sup>, WU Hong-shu<sup>2</sup>, QIAN Sen<sup>3</sup>, WU Yun-tao<sup>2</sup>(1. School of Materials and Chemistry, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;  
2. Artificial Crystals Research Center, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China;  
3. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Institute of High Energy Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: qinlaishun@cjlu.edu.cn; liyunyun225@163.com

**Abstract:** Traditional plastic scintillators are not suitable for energy spectroscopy detection due to their low effective atomic number and low density. The preparation of plastic scintillators doped with organic heavy metal compounds provides an effective avenue for energy spectroscopy detection for plastic scintillators. Organotin compounds doped plastic scintillators possess high photopeak sensitivity and retain fast decay characteristics of plastic scintillators. In this paper, polyvinyltoluene (PVT)-based plastic scintillators doped with different concentrations of 2-(tributylstannyl) furan were successfully prepared by free-radical polymerization, and their optical and scintillation properties were characterized and compared. The optical transmittance of 20% 2-(tributylstannyl) furan

收稿日期: 2021-11-04; 修订日期: 2021-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(12005288); 中国科学院高能物理研究所核探测与核电子学国家重点实验室(SKLPE-KF-202112); 上海硅酸盐研究所科技创新项目提前启动基金(2020); 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室(SKLIPR2119)资助项目  
Supported by National Natural Science Foundation of China(12005288); The State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics(SKLPE-KF-202112); The Advance Launch Fund of Science and Technology Innovation Project of Shanghai Institute of Ceramics(2020); The State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect(SKLIPR2119)

doped plastic scintillator based on PVT can be up to 90%. Under X-ray excitation, the radioluminescence spectrum of sample shows a broad band between 390 nm and 550 nm peaking at 425 nm. The sample demonstrates a light yield of 6 700 ph/MeV and an energy resolution of 15.8% @ 662 keV. The scintillation decay time is about 4.3 ns. 1 inch diameter plastic scintillator loaded with 20% 2-(tributylstannyl)furan was also prepared with a light yield of 6 300 ph/MeV and an energy resolution of 15.8% @ 662 keV.

**Key words:** plastic scintillators; organotin compounds; optical properties; energy resolution

## 1 引言

闪烁材料在核能、国土安全、医学成像、高能物理等领域至关重要<sup>[1]</sup>。塑料闪烁体是一种至少包含一种荧光物质的聚合物材料,当其受到粒子或电离辐射的刺激时,具有发射闪烁光子的能力<sup>[2-3]</sup>。由于其低成本、快衰减、易于大尺寸制备等优点<sup>[4]</sup>,目前广泛用于被动探测核材料,如辐射门户监控器。然而,传统的塑料闪烁体主要由碳、氢和氧元素组成,使得有效原子序数( $Z_{\text{eff}}$ )和密度均较低,不能有效检测和识别伽马射线,因此主要用于闪烁计数应用,而不适用于能谱探测<sup>[5-7]</sup>。近年来,具有高有效原子序数的有机金属化合物掺杂塑料闪烁体的成功制备为塑料闪烁体实现能谱探测提供了解决途径<sup>[8-10]</sup>。

目前,塑料闪烁体中掺杂的重金属主要有铅、铋和锡<sup>[11-14]</sup>。虽然负载1%~10%铅的塑料闪烁体EJ-256可以在市场上买到,但即使在最佳掺杂量(2%~5%)下,EJ-256仍在能量>100 keV时表现出较差的光峰灵敏度和能量分辨率。铋作为相对原子质量最大的非放射性元素,被认为是提高塑料闪烁体 $Z_{\text{eff}}$ 的理想选择<sup>[15-16]</sup>。Rupert等已经成功制备了40%三苯基铋Bi(Ph)<sub>3</sub>与铱化合物FIrpic协同作用的聚乙烯基咔唑(PVK)基塑料闪烁体<sup>[17]</sup>,在 $\beta$ 粒子辐照下的光产额为30 000 ph/MeV,<sup>137</sup>Cs辐照下拟合多道能谱得出的能量分辨率为6.8%。随后,Bertrand等<sup>[18]</sup>将PVK基质替换为更廉价的聚苯乙烯(PS),制备了不同浓度Bi(Ph)<sub>3</sub>单掺的塑料闪烁体,最高掺杂量可达23.4%。但在Patrick、Feng等的工作中,通过将基质为PS的6%锡掺杂样品与6.3%铋掺杂样品的多道能谱进行对比,发现前者具有更高的光峰灵敏度<sup>[18-19]</sup>。2016年,RMD公司成功制备了最高溶解50%

“魔力锡”的1英寸PS基塑料闪烁体<sup>[20]</sup>,能量分辨率可达9.8%@662 keV。此外,有机锡化合物的种类繁多,除了可以作为溶质在基质中溶解,还能与基质进行共聚。商用塑料闪烁体NE-140就选用了侧链上含有一个苯乙烯基团的有机锡化合物进行掺杂,以确保掺杂剂与PS基质更好地共聚<sup>[21]</sup>。基于以上所述,锡可能是一种更有潜力的可实现能谱探测的掺杂元素。

本文选用一种商业可得的液态有机锡化合物——2-(三丁基锡烷基)呋喃(以下简称“呋喃锡”)作为掺杂剂。以液态溶剂作为掺杂剂,可以和基质以任意比混溶,减少了溶解度的限制。通过自由基聚合的方法制备了不同浓度呋喃锡掺杂的PVT基塑料闪烁体,并对其光学和闪烁性能进行了对比研究。我们也成功制备出1英寸直径的呋喃锡掺杂塑料闪烁体,以评估尺寸效应对伽马能谱探测性能的影响。

## 2 实验

### 2.1 主要原料

乙烯基甲苯(VT,98%)从TCI获得;2,5-二苯基恶唑(PPO,99%)和1,4-双[2-(5-苯基恶唑基)]苯(POPON,99%)从Sigma-Aldrich获得,烘干后使用;2,2'-偶氮双异丁腈(AIBN,>98%)从Adamas获得,用乙醇多次重结晶后使用;2-(三丁基锡烷基)呋喃(97%)购自Aladdin,化学结构式如图1所示。

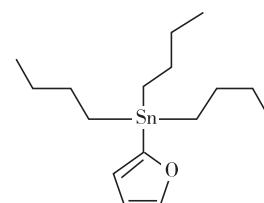


图1 2-(三丁基锡烷基)呋喃化学结构式

Fig. 1 The chemical structure formula of 2-(tributylstannyl)furan

## 2.2 样品表征

密度的测定是基于阿基米德浮力法, 使用 FA200C 型天平(分辨率:0.1 mg)称量, 选用水作为浮力介质。

吸收光谱和透射光谱使用 PerkinElmer-Lambda 950 型紫外-可见光分光光度计测试, 测试范围为 200~800 nm。

荧光发射光谱使用 Horiba Fluoro-Max + 型荧光光谱仪测试, 激发光源为氘灯。X 射线发射光谱采用 JF-10 型携带式诊断 X 射线机作为激发源(管电压:50 keV, 管电流:0.5 mA), 利用积分球收集发射光, 通过光纤将收集到的光导入 Horiba FluoroMax + 型荧光光谱仪并采集数据。

$^{137}\text{Cs}$  辐照下的光产额通过相对法测量, 选用相同尺寸的商用塑料闪烁体 EJ-200 作为参比样品。Hamamatsu R6233-100 PMT 检测到闪烁光, 再将信号输出到 Ortec 113 前置放大器和 Ortec 570 光谱放大器, 通过 Ortec Easy-MCA-8k 多道分析器将数据传输到电脑来测量脉冲高度谱。为了使光产额的损失最小化, 每个样品使用硅油与 PMT 窗口进行耦合, 并且包覆相同层数的特氟龙作为反射层。能量分辨率通过高斯函数拟合脉冲高度谱中的全能峰, 用半高峰宽计算得出。

闪烁衰减通过与光产率测量类似的方式记录, 使用 Hamamatsu R2059 PMT 输出信号, 并直接连接到 Tektronix DPO 5104 数字荧光示波器采集数据。

## 3 结果与讨论

### 3.1 塑料闪烁体制备

在氮气气氛保护下, 将一定量的初级荧光染料 PPO、移波剂 POPOP、自由基引发剂 AIBN 和掺杂量为 0~30% 的呋喃锡溶于 VT 中, 并密封装有混合溶液的容器。将混合溶液在室温下超声 5 min, 以保证混合均匀。然后将容器油浴加热至一定温度后恒温聚合一周。聚合完成后, 将玻璃容器缓慢冷却至室温, 以减小内应力。将瓶子打碎并取出样品, 经切割和抛光获得  $\Phi 15\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  和  $\Phi 25\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的样品, 用于光学性能和闪烁性能的表征。

呋喃锡是商业可得的有机锡化合物, 它是无色透明的液体, 虽然可以与基质以任意比混溶, 但在实验过程中发现, 在掺杂量大于 30% 时, 制备

的塑料闪烁体是软的或不透明的, 而且样品放置一段时间后表面会有液体浸出。除了掺杂 30% 呋喃锡的 PVT 基塑料闪烁体显淡黄色外, 制备的其他样品在自然光下是透明、无色的, 如图 2(a); 在 365 nm 紫外灯辐照下发蓝光, 如图 2(b)。样品的密度通过阿基米德浮力法测试,  $Z_{\text{eff}}$  通过公式(1)计算得出, 结果如表 1 所示。

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3]{f_1 \times Z_1^3 + f_2 \times Z_2^3 + \dots}, \quad (1)$$

其中,  $f_n$  是样品中  $n$  元素的电子总数的分数,  $Z_n$  是  $n$  元素的原子序数。

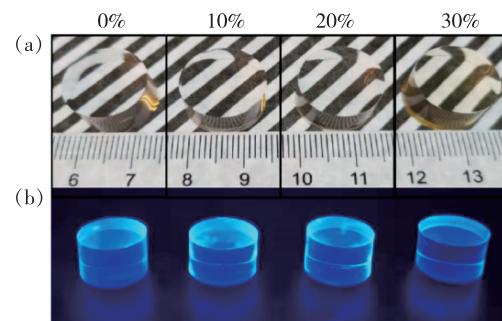


图 2 掺杂不同浓度呋喃锡的 PVT 基塑料闪烁体照片。  
(a) 在自然光下; (b) 在 365 nm 紫外灯辐照下。

Fig. 2 Photographs of PVT-based plastic scintillators loaded with different concentrations of 2-(tributylstannyl)furan. (a) Under daylight. (b) Under 365 nm UV light.

### 3.2 紫外-可见透射光谱

图 3 为制备的掺杂不同浓度呋喃锡的 PVT 基塑料闪烁体(掺杂浓度分别为 0, 10%, 20%, 30%)的透射光谱。除了掺杂 30% 呋喃锡的塑料闪烁体由于轻微显色使得透过率起始位置红移外, 其余样品的透过率起始位置均在 408 nm 处。

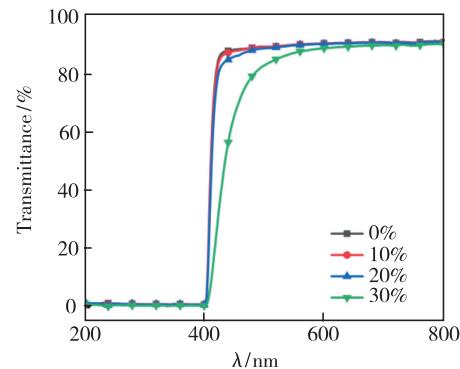


图 3 掺杂不同浓度呋喃锡的 PVT 基塑料闪烁体的透射光谱

Fig. 3 Optical transmission spectra of PVT-based plastic scintillators loaded with different concentrations of 2-(tributylstannyl)furan

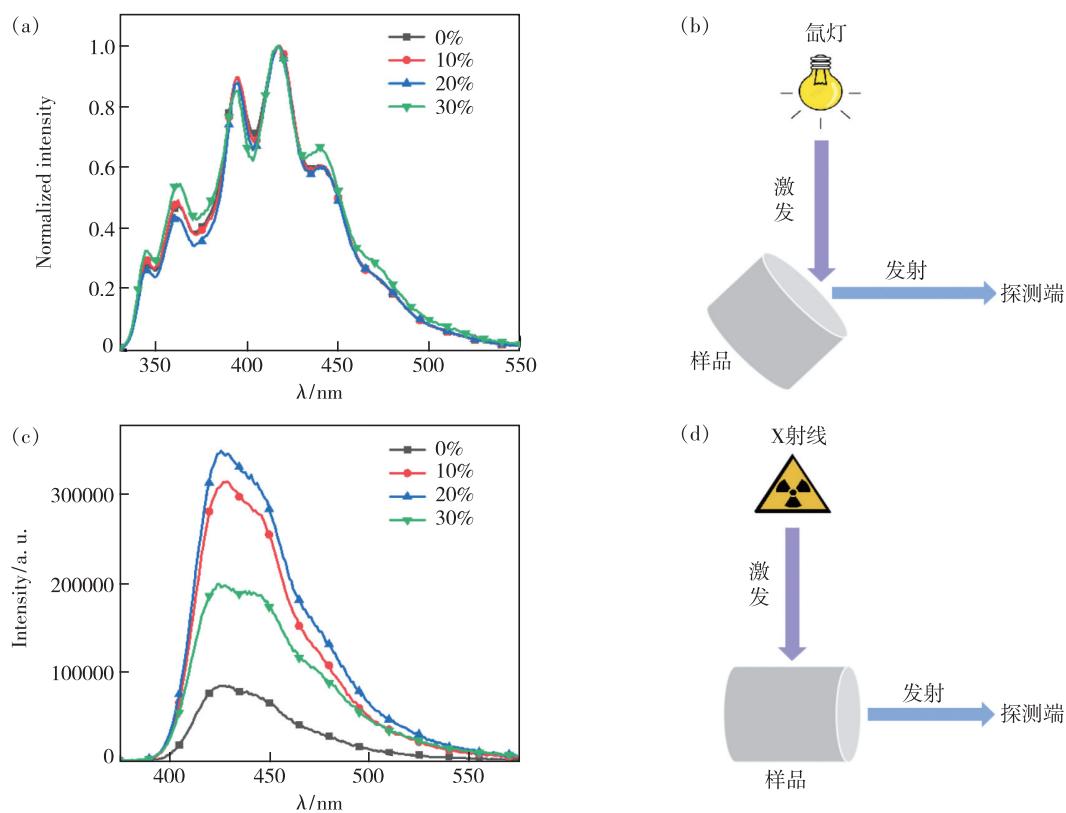


图 4 (a)掺杂不同浓度呋喃锡的 PVT 基塑料闪烁体的荧光发射光谱( $\lambda_{\text{ex}} = 320 \text{ nm}$ )；(b)表面模式下荧光光谱测量装置示意图；(c)掺杂不同浓度呋喃锡的 PVT 基塑料闪烁体的 X 射线激发发射光谱；(d)透射模式下 X 射线激发发射光谱测量装置示意图。

Fig. 4 (a) PL spectra of PVT-based plastic scintillators loaded with different concentrations of 2-(tributylstannyl)furan ( $\lambda_{\text{ex}} = 320 \text{ nm}$ ). (b) Schematic illustration of surface-mode PL measurement setups. (c) XEL of PVT-based plastic scintillators loaded with different concentrations of 2-(tributylstannyl)furan. (d) Schematic illustration of transmittance-mode XEL measurement setups.

移波剂 POPOP 使样品在紫外范围内不透明；未掺杂和掺呋喃锡的塑料闪烁体在波长  $> 500 \text{ nm}$  区域内都具有很好的透光率( $\sim 90\%$ )。

### 3.3 荧光光谱

图 4(a)为制备的不同浓度呋喃锡掺杂的 PVT 基塑料闪烁体的荧光发射光谱(PL)。在波长为 320 nm 的紫外光激发下,未掺杂和掺杂呋喃锡的样品都有一个宽发射带,且荧光发射峰的位置几乎相同,主峰位于 417 nm,其他肩峰分别位于 345,362,394,441,462 nm 处。其中 345 nm 和 362 nm 处的肩峰来自初级荧光染料 PPO, 主峰 417 nm 和其他肩峰来自于移波剂 POPOP<sup>[22-23]</sup>。由于荧光发射光谱的测试是在如图 4(b)所示的表面模式下进行的,因此 PPO 和 POPOP 的特征发射峰都可以被观察到。而呋喃锡的引入并未产生新的发光峰,塑料闪烁体的荧光发射仍主要来自于荧光染料。

### 3.4 X 射线激发发射光谱

不同浓度呋喃锡掺杂的 PVT 基塑料闪烁体的 X 射线激发发射光谱(XEL)如图 4(c)所示。所有样品具有从 390 ~ 550 nm 的宽发射带,主峰位于 425 nm,肩峰位于 442 nm 和 465 nm,都来源于移波剂 POPOP 的发射。不同于荧光发射谱的表面测试模式,X 射线激发发射光谱是在如图 4(d)所示的透射模式下测得的,发射的光子会在塑料闪烁体中经长距离传输后再被探测到。在这个过程中,从 PPO 到 POPOP 会发生能量转移,因此初级荧光染料 PPO 的发射没有被观测到<sup>[23]</sup>。相比于未掺杂的样品,掺杂不同浓度呋喃锡的塑料闪烁体的 X 射线激发发射强度均明显提高,这表明呋喃锡的掺杂有效提高了塑料闪烁体对低能 X 射线的响应能力。但随着呋喃锡掺杂量的增加,X 射线激发发射强度呈现出先增加后减小的趋势,其中 20% 呋喃锡掺杂 PVT 基塑料闪烁体的

发射强度最高, 约是未掺杂样品的4倍。

### 3.5 闪烁衰减时间

一般地, 塑料闪烁体有着几纳秒至几十纳秒的快衰减特性。图5为制备的20%呋喃锡掺杂PVT基塑料闪烁体在<sup>137</sup>Cs辐照下的闪烁衰减时间, 使用单指数函数拟合, 得到衰减时间为4.3 ns。R2059 PMT的仪器响应曲线也被展示在图中, 衰减时间为2.4 ns。可以明显看出, 20%呋喃锡掺杂塑料闪烁体的衰减曲线在20 ns左右出现的非指数型变化是由于PMT的脉冲响应造成的。并且由于PMT响应时间与样品的衰减时间很接近, 因此样品的衰减时间可能更短。

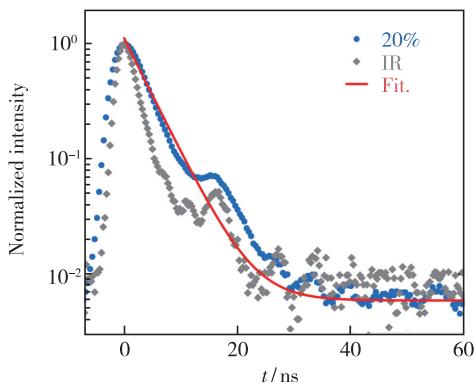


图5 掺杂20%呋喃锡PVT基塑料闪烁体的闪烁衰减时间曲线

Fig. 5 Scintillation decay profile of PVT-based plastic scintillator loaded with 20% 2-(tributylstannyl)furan

### 3.5 光产额和能量分辨率

图6为制备的不同浓度呋喃锡掺杂的PVT基塑料闪烁体在<sup>137</sup>Cs辐照下的脉冲高度谱。以相同尺寸的商用EJ-200塑料闪烁体作为参比样品, 由于测得的康普顿边几乎在同一水平, 因此选用了康普顿边的拐点来计算样品的相对光产额。表1给出了不同浓度呋喃锡掺杂塑料闪烁体的相

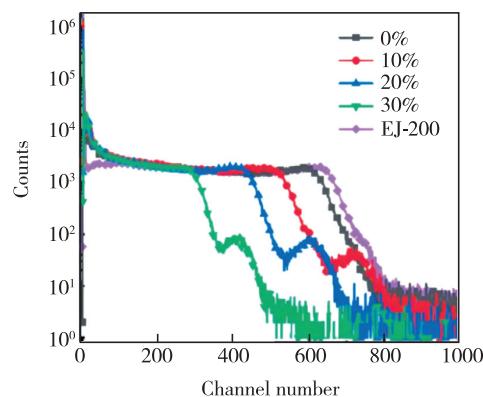


图6 掺杂不同浓度呋喃锡的PVT基塑料闪烁体的脉冲高度谱, 以EJ-200作为参比样品。

Fig. 6 Pulse height spectra of PVT-based plastic scintillators loaded with different concentrations of 2-(tributylstannyl)furan, and EJ-200 was used as reference sample.

对光产额。随着呋喃锡掺杂浓度的提高, 塑料闪烁体的光产额逐渐降低, 这可能是由于呋喃锡的掺杂影响了塑料闪烁体的能量传递过程; 或以其他方式, 如分子内振动等形式耗散它通过非辐射过程获得的能量<sup>[7,9,24]</sup>。但相比未掺杂的样品, 呋喃锡的掺杂提高了塑料闪烁体的 $Z_{\text{eff}}$ 和密度, 增加了对伽马射线的沉积能力, 因此掺杂呋喃锡样品可以观察到一个明显的<sup>137</sup>Cs全能峰。

通过高斯函数拟合全能峰, 用半高峰宽来计算能量分辨率。计算了不同浓度呋喃锡掺杂塑料闪烁体的能量分辨率, 如表1所示, 可以看出10%和20%呋喃锡掺杂塑闪的能量分辨率很接近, 但掺杂30%呋喃锡时能量分辨率显著变差。其中掺杂20%呋喃锡的塑料闪烁体的综合性能最好, 以EJ-200作为参比, 相对光产额约为6700 ph/MeV; 能量分辨率为15.8%@662 keV, 如图7所示。

表1 掺杂不同浓度呋喃锡的PVT基塑料闪烁体性能

Tab. 1 Properties of PVT-based plastic scintillators loaded with different concentrations of 2-(tributylstannyl)furan

呋喃锡含量/ %	$Z_{\text{eff}}$	锡含量/ %	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	衰减时间/ ns	光产额/ (ph · MeV <sup>-1</sup> )	能量分辨率 (@ 662 keV)
0	5.7	0	1.02	4.4	9 500	/
10	15.1	3.32	1.05	4.3	7 800	15.4
20	18.9	6.65	1.07	4.3	6 700	15.8
30	21.7	9.97	1.08	4.0	4 400	19.3

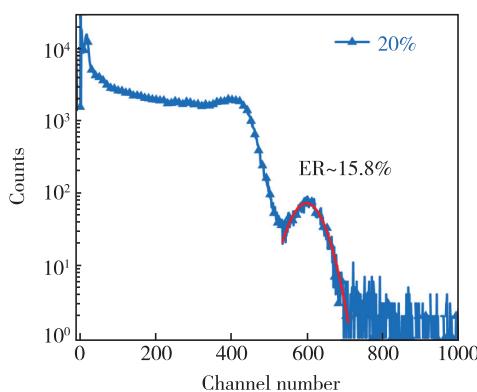


图 7 掺杂 20% 呋喃锡的 PVT 基塑料闪烁体的脉冲高度谱

Fig. 7 Pulse height spectra of PVT-based plastic scintillator loaded with 20% 2-(tributylstannyl)furan

### 3.6 1 英寸塑料闪烁体制备

为了评估尺寸效应对伽马能谱探测性能的影响,我们也制备了 1 英寸直径、厚度 10 mm 的未掺杂和掺杂 20% 呋喃锡的塑料闪烁体。在自然光和 365 nm 紫外灯照射下的样品照片如图 8 所示。以相同直径、厚度为 5 mm 的商用 EJ-200 塑料闪烁体作为参比,  $^{137}\text{Cs}$  辐照下的脉冲高度谱如图 9 所示。未掺杂和掺杂 20% 呋喃锡的塑料闪烁体的相对光产额分别为 9 200 ph/MeV 和 6 300 ph/MeV。掺杂 20% 呋喃锡的 1 英寸直径塑料闪

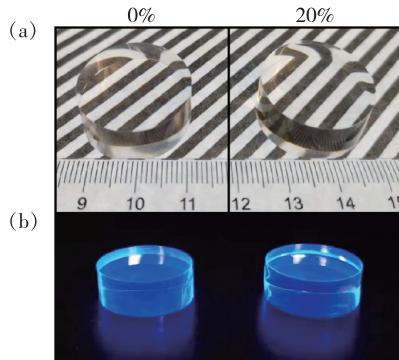


图 8 未掺杂和掺杂 20% 呋喃锡的 1 英寸直径 PVT 基塑料闪烁体照片。(a) 在自然光下;(b) 在 365 nm 紫外灯辐照下。

Fig. 8 Photographs of 1 inch diameter PVT-based plastic scintillators loaded without and with 20% 2-(tributylstannyl)furan. (a) Under daylight. (b) Under 365 nm UV light.

## 参考文献:

- [1] 陈向阳,张志军,赵景泰. 闪烁材料——探索科学世界的一扇窗 [J]. 自然杂志, 2015, 37(3): 165-174.

烁体的能量分辨率为 15.8% @ 662 keV。与小尺寸  $\Phi 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  样品相比,能量分辨率几乎没有改变,光产额稍有降低,这可能是由于样品尺寸增加、光散射也增加所致。

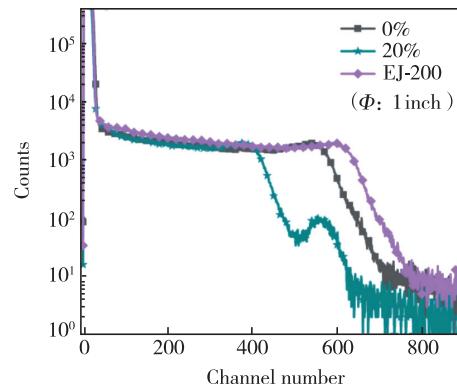


图 9 未掺杂和掺杂 20% 呋喃锡的 1 英寸塑料闪烁体的脉冲高度谱,以 EJ-200 作为参比样品。

Fig. 9 Pulse height spectra of 1 inch diameter plastic scintillators loaded without and with 20% 2-(tributylstannyl)furan, and EJ-200 was used as reference sample.

## 4 结论

本文以聚乙烯基甲苯为基质,成功制备了最高掺杂量可达 30% 呋喃锡的塑料闪烁体,所有样品的透光率均在 90% 左右。相比于未掺杂的样品,呋喃锡的掺杂对塑料闪烁体的荧光性能影响很小,但可以显著提高塑料闪烁体对低能 X 射线和伽马射线的探测灵敏度。其中,掺杂 20% 呋喃锡的塑料闪烁体的综合性能最好,光产额为 6 700 ph/MeV,能量分辨率为 15.8% @ 662 keV,闪烁衰减时间为 4.3 ns。我们也制备了 1 英寸直径的 20% 呋喃锡的塑料闪烁体,光产额稍有降低,但能量分辨率几乎没有改变。未来,本研究团队将对掺杂 2-(三丁基锡烷基)呋喃塑料闪烁体的能量传递机理进行深入研究,从而进一步优化其闪烁性能。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210347>.

- CHEN X Y,ZHANG Z J,ZHAO J T. Scintillator:a window to explore mysterious scientific world [J]. *Chin. J. Nat.* , 2015,37(3):165-174. (in Chinese)
- [ 2 ] RAHMANIFARD R,KATEBI F,ZAHEDI A R,*et al*. Synthesis and development of a vinyltoluene-based plastic scintillator [J]. *J. Lumin.* , 2018,194:456-460.
- [ 3 ] ZHU J,DENG C,JIANG H M,*et al*. The impact of fluorescent dyes on the performances of polystyrene-based plastic scintillators [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. , Sect. A* , 2016,835:136-141.
- [ 4 ] 曹琳,亢武,储诚胜,等. 大面积塑料闪烁体 $\gamma$ 探测技术研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2009,29(1):52-54.
- CAO L,KANG W,CHU C S,*et al*. A study of large area rectangular plastic scintillator for detecting  $\gamma$  with high detection efficiency [J]. *Nucl. Electron. Detect. Technol.* , 2009,29(1):52-54. (in Chinese)
- [ 5 ] VAN LOEF E,MARKOSYAN G,SHIRWADKAR U,*et al*. Gamma-ray spectroscopy and pulse shape discrimination with a plastic scintillator [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. , Sect. A* , 2015,788:71-72.
- [ 6 ] BERTRAND G H V,HAMEL M,SGUERRA F. Current status on plastic scintillators modifications [J]. *Chem. - Eur. J.* , 2014,20(48):15660-15685.
- [ 7 ] HAMEL M. *Plastic Scintillators: Chemistry and Applications* [M]. Cham:Springer, 2021.
- [ 8 ] GADEY,REDDY H. *Gamma Spectrum Enhancement in a Metal Loaded Plastic Scintillator Using PSD* [D]. Oregon:Oregon State University, 2017.
- [ 9 ] HYMAN M,RYAN J J. Heavy elements in plastic scintillators [J]. *IRE Trans. Nucl. Sci.* , 1958,5(3):87-90.
- [ 10 ] BERTRAND G H V,HAMEL M,NORMAND S,*et al*. Pulse shape discrimination between (fast or thermal) neutrons and gamma rays with plastic scintillators;state of the art [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. , Sect. A* , 2015,776:114-128.
- [ 11 ] HAJAGOS T J,LIU C,CHEREPY N J,*et al*. High-Z sensitized plastic scintillators:a review [J]. *Adv. Mater.* , 2018,30(27):1706956-1-13.
- [ 12 ] HAMEL M,TURK G,ROUSSEAU A,*et al*. Preparation and characterization of highly lead-loaded red plastic scintillators under low energy X-rays [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. , Sect. A* , 2011,660(1):57-63.
- [ 13 ] SANDLER S R,TSOU K C. Evaluation of organometallics in plastic scintillators toward  $\gamma$ -radiation [J]. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* , 1964,15(7):419-426.
- [ 14 ] SHIRWADKAR U,VAN LOEF E V D,MARKOSYAN G,*et al*. Metal-loaded plastic scintillators for nuclear non-proliferation [C]. *Proceedings of the 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference ( NSS/MIC ) , San Diego* , 2015:1-4.
- [ 15 ] KAGAMI K,KOSHIMIZU M,FUJIMOTO Y,*et al*. X-ray detection properties of Bi-loaded plastic scintillators synthesized via solvent evaporation [J]. *Radiat. Meas.* , 2020,135:106361.
- [ 16 ] CHEREPY N J,SANNER R D,TILLOTSON T M,*et al*. Bismuth-loaded plastic scintillators for gamma spectroscopy and neutron active interrogation [C]. *Proceedings of the 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record ( NSS/MIC ) , Anaheim* , 2012:1972-1973.
- [ 17 ] RUPERT B L,CHEREPY N J,STURM B W,*et al*. Bismuth-loaded plastic scintillators for gamma-ray spectroscopy [J]. *Europhys. Lett.* , 2012,97(2):22002-1-4.
- [ 18 ] BERTRAND G H V,SGUERRA F,DEHÉ-PITTANCE C,*et al*. Influence of bismuth loading in polystyrene-based plastic scintillators for low energy gamma spectroscopy [J]. *J. Mater. Chem. C* , 2014,2(35):7304-7312.
- [ 19 ] FENG P L,MENGESHA W,ANSTEY M R,*et al*. Distance dependent quenching and gamma-ray spectroscopy in tin-loaded polystyrene scintillators [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , 2016,63(1):407-415.
- [ 20 ] VAN LOEF E V,FENG P,MARKOSYAN G,*et al*. High energy resolution plastic scintillator [C]. *Proceedings of SPIE 9968 Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XVIII , San Diego* , 2016:996803.
- [ 21 ] BECKER J,ERIKSSON L,MOBERG L C,*et al*. On the use of tin-loaded plastic scintillators in Mössbauer spectroscopy [J]. *Nucl. Instrum. Methods* , 1975,123(1):199-201.
- [ 22 ] XU Y W,DENG H Y,LEI H,*et al*. Initiator-free preparation and properties of polystyrene-based plastic scintillators [J]. *J. Polym. Res.* , 2019,26(8):177-1-9.
- [ 23 ] ZHAO H X,YU H,REDDING C,*et al*. Scintillation liquids loaded with hafnium oxide nanoparticles for spectral resolution of  $\gamma$  rays [J]. *ACS Appl. Nano Mater.* , 2021,4(2):1220-1227.

[24] SANDLER S R, TSOU K C. Quenching of the scintillation process in plastics by organometallics [J]. *J. Phys. Chem.*, 1964, 68(2):300-304.



李雯(1996 - ),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,2019 年于西安科技大学获得学士学位,主要从事塑料闪烁体方向的研究。

E-mail: liwenLW1996@163.com



秦来顺(1978 - ),男,山西方山人,博士,教授,2006 年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得博士学位,主要从事闪烁晶体材料、发光材料等方向的研究。

E-mail: qinlaishun@cjlu.edu.cn



李云云(1993 - ),女,安徽淮北人,博士,博士后,2018 年于中国科学院大连化学物理研究所获得博士学位,主要从事重金属掺杂塑料闪烁体方向的研究。

E-mail: liyunyun225@163.com