

YAP:Ce 闪烁探测器 γ 射线能量响应研究

张建华,张传飞,彭太平,李如荣,王振通,胡孟春

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:使用新型 YAP:Ce 无机晶体配大线性电流光电倍增管组成闪烁探测系统,采用散射法将 ^{60}Co 源(约 2.2×10^{14} Bq)散射为单能 γ 射线,实验测量探测器系统的 γ 射线灵敏度,并结合计算机数值模拟计算对数据进行分析处理。新型 YAP:Ce 无机晶体对 γ 射线的灵敏度相对较高,是同体积 CeF_3 晶体的 10 倍多。采用 YAP:Ce 无机晶体比 CeF_3 晶体更有利于 γ 射线测量。

关键词:YAP:Ce 无机晶体; γ 射线能量响应;康普顿散射

中图分类号:TL814

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2006)04-0447-03

Study on γ -ray Sensitivities of YAP:Ce Scintillator Detector

ZHANG Jian-hua, ZHANG Chuan-fei, PENG Tai-ping, LI Ru-rong,

WANG Zhen-tong, HU Meng-chun

(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-212, Mianyang 621900, China)

Abstract: The γ -rays from ^{60}Co radioactive source (about 2.2×10^{14} Bq) are transferred into a series of single-energy γ -rays by a Cu scattering target. With these single-energy γ -rays the sensitivity of YAP:Ce scintillator detector was studied. The results indicate that the γ -ray sensitivity of YAP:Ce scintillator is more than 10 times of that of CeF_3 scintillator with the same volume, and YAP:Ce scintillator could be regarded as an alternative solution for γ -ray detecting.

Key words: YAP:Ce inorganic scintillator; γ -ray sensitivity; Compton scattering

近年来,人们一直在寻找一些有较高发光产额、衰减时间短、对核辐射具有较高探测效率、辐射硬度高以及化学稳定性好的闪烁材料。在所提出的几种新型无机闪烁体中,掺有 Ce^{3+} 的 YAP:Ce 晶体引起人们广泛关注。

YAP:Ce (yttrium aluminum perovskite doped with cerium, 化学分子式为 $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$) 是一种不潮解、外观似玻璃状的晶体。该晶体的有效原子序数相对较低, $Z=36$; 密度高, $\rho=$

5.37 g/cm^3 ; 能量分辨率可与 NaI(Tl) 相比; 发光产额大, 约为 NaI(Tl) 的 40%~50%, 能显著提高探测器效率; 发光衰减时间短, 为 25~30 ns, 是一种较好的快响应晶体; 最大发射波长为 350 nm, 因此, 作为闪烁晶体, YAP:Ce 与光电倍增管的接收范围基本匹配。

1 测量原理

康普顿效应是入射 γ 光子与原子核外电子

之间发生的非弹性碰撞过程。在该过程中,入射光子的部分能量转移给电子,使它脱离原子成为反冲电子,而光子的运动方向和能量则发生变化。入射光子的能量和动量在反冲电子和散射光子两者间进行分配,并满足能量和动量守恒定理。散射光子的能量为:

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

其中: E_{γ} 和 $E_{\gamma'}$ 分别为入射和散射光子能量; θ 为散射光子与入射光子方向间的夹角,称为散射角; m_0 为电子静止质量; c 为光速。

^{60}Co 源发射的 γ 射线经铅墙屏蔽准直后照射在 Cu 散射靶上,经康普顿散射后,在散射角为 θ 的方向上探测能量为 $E_{\gamma'}$ 的散射光子,用美国 KEITHLEY6517A 型微电流仪测量探测器的输出电流 $I(E_{\gamma'})$,同时,用热释光剂量片监测测点处的剂量,并换算成光子注量率 $\psi(E_{\gamma'})$,则探测系统对能量为 $E_{\gamma'}$ 的 γ 射线灵敏度为:

$$S(E_{\gamma'}) = \frac{I(E_{\gamma'})}{\psi(E_{\gamma'})} \quad (2)$$

测量原理示意图示于图 1。

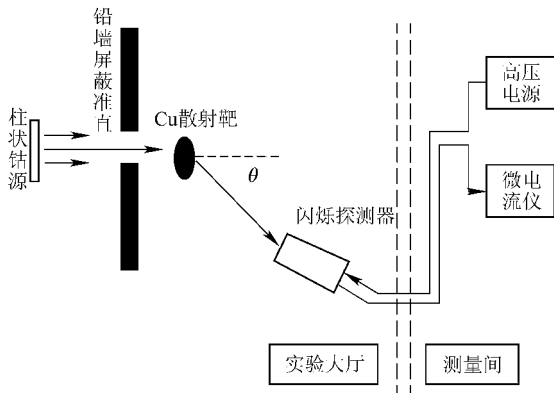


图1 测量原理示意图

Fig.1 Sketch of measurement principle

实验中,屏蔽铅墙尺寸足够大,厚度足够厚(50 cm),以避免 ^{60}Co 源放射出来的 γ 射线直接打到探测器上。屏蔽体后壁设计了1个斜喇叭口(图2),以避免 γ 射线经后壁反射到散射靶上而形成干扰。准直器前喇叭口直径为8 cm,中段直径为4 cm,准直器后喇叭口直径为10 cm。探测器周围环境空间宽敞,环境散射产生的影响很小。另外,入射 γ 光子与靶物

质作用产生散射 γ 光子的同时还产生康普顿电子,因此,在探测器前放置Fe吸收片以降低康普顿电子射线的影响。

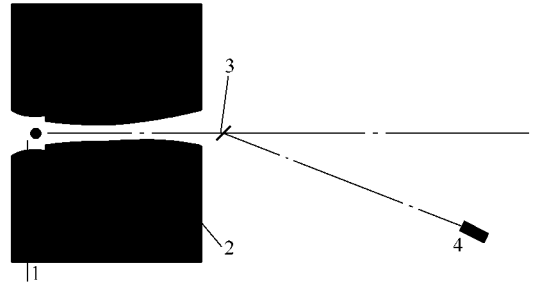


图2 铅墙屏蔽体剖面示意图

Fig.2 Sketch of Pb-shielding section plane

1——放射源;2——准直器;3——散射靶;4——探测器

实验中,探测器对Cu散射靶以及散射靶对辐射源均有一定的张角,所以,散射光子的能量不是严格单能的。为此,用MCNP程序进行实验条件下的模拟计算,得到在测点处的散射光子的能量弥散(图3)。经计算,在4个散射角 35° 、 50° 、 64° 、 87° 方向上测点处的能量弥散度分别为8.8%、8.4%、7.2%、4.9%。可见,散射角 θ 越大,能量弥散越小; θ 越小,能量弥散则越大,但能量弥散总量较小。

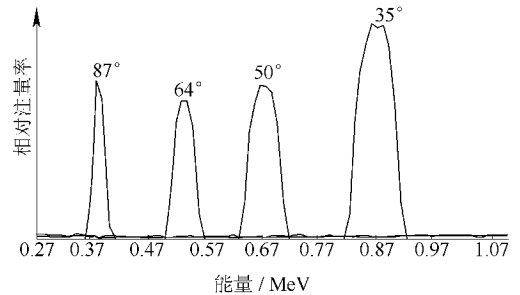


图3 MCNP程序模拟计算测点处散射光子的能谱分布

Fig.3 Energy spectrum of scattering photon

in measuring points simulated with MCNP program

2 测量结果分析与讨论

实验测量结果列于表1。

从表1所列实验数据可以看出,新型YAP:Ce无机晶体对 ^{60}Co γ 射线能区的 γ 射线灵敏度相对较高,是同体积 CeF_3 晶体的10倍多。采用YAP:Ce晶体比 CeF_3 晶体更利于 γ 射线测量。

表 1 实验测量结果及其比较
Table 1 Comparison of experiment data

晶体类型及尺寸	散射角/ $^\circ$	能量/MeV	注量率/ $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	γ 射线灵敏度/ $(\text{C} \cdot \text{cm}^2)$	γ 射线相对灵敏度
$\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ YAP:Ce	35	0.867	1.29×10^5	6.84×10^{-16}	1.522
	50	0.667	8.54×10^4	6.08×10^{-16}	1.354
	64	0.527	5.60×10^4	5.67×10^{-16}	1.263
	87	0.377	3.74×10^4	4.49×10^{-16}	1.000
$\phi 45 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ CeF ₃	35	0.867	1.29×10^5	5.22×10^{-17}	1.278
	50	0.667	8.54×10^4	4.71×10^{-17}	1.154
	64	0.527	5.60×10^4	4.62×10^{-17}	1.131
	87	0.377	3.74×10^4	4.08×10^{-17}	1.000

图 4 所示为用 YAP:Ce 晶体的 4 个实验能点连成的能量响应曲线和用质能吸收系数进行的计算机数值计算的结果比较(用质能吸收系数进行数值计算只能得到相对值,这里用 0.667 MeV 能点予以归一校正)。

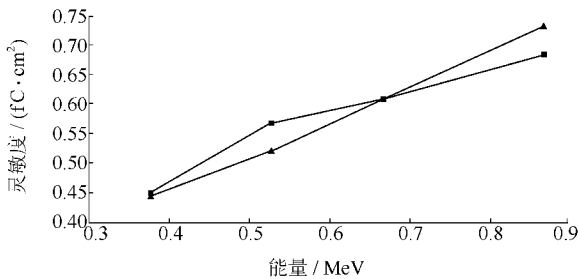


图 4 YAP:Ce 晶体的灵敏度

Fig. 4 Sensitivities of YAP: Ce scintillator

■——实验值; ▲——计算值

由图 4 可看出, YAP:Ce 闪烁体的灵敏度实验值与计算值随能量的变化趋势基本一致, 两者间的最大偏差在 10% 以内, 表明实验结果是可信的。

3 结论

新型 YAP:Ce 无机晶体对 ⁶⁰Co 能区的 γ 射线灵敏度相对较高, 是同体积 CeF₃ 晶体的 10 倍多, 采用 YAP:Ce 晶体比 CeF₃ 晶体更有利于 γ 射线测量。利用康普顿散射原理获得单能 γ 射线辐射源, 以标定探测系统 γ 射线能量响应的实验方法是可行的。

参考文献:

[1] 刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 158-164.

[2] BACCARO S, CECILIA A, BLAZE K, et al. Refractive index and absorption length of Ce: YAP scintillation crystal and reflectance of the coating used in Ce: YAP single-crystal matrix [J]. Nucl Instrum Methods, 1998, A317: 406-479.

[3] KAPUSTA M, PAWELKE J, BALCERZYK M, et al. Comparison of YAP and BGO for high resolution PET detector[J]. Nucl Instrum Methods, 1998, A317: 404-413.