

# 复合金属发射极真空康普顿 探测器结构设计

韩和同<sup>1,2</sup>, 王群书<sup>1,2</sup>, 夏良斌<sup>2</sup>, 管兴胤<sup>2</sup>, 谭新建<sup>2</sup>, 张子川<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 采用 Ta—Al 复合金属电子转换靶设计了一种厚窗真空型康普顿探测器, 其对 1.25 MeV  $\gamma$  射线的探测效率达到  $7.85 \times 10^{-3} \text{ e}/\gamma$ , 比 Fe 发射极探测器的探测效率高出约 2.5 倍。探测器具有良好的封装加工和静态真空保持特性, 可用于强流脉冲  $\gamma$  射线测量场合。

[关键词] 脉冲  $\gamma$  射线; 电子发射极; 康普顿探测器

[中图分类号] TL812.6 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)11-0088-04

## 1 前言

强流脉冲  $\gamma$  辐射场诊断技术领域, 主要使用两类电流型探测器, 测量射线的强度及其随时间变化的特性。一种类型是能量沉积型的闪烁探测系统, 通过辐射转换体, 将沉积的射线能量转换为可见光, 配合不同放大倍数的光电转换器件(如光电倍增管和光电管等), 输出电信号, 对射线进行探测。受辐射转换体的辐射硬度和探测器最大线性电流的限制, 当探测点的  $\gamma$  辐射能注量率在  $10^{20} \text{ MeV}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$  以上时, 电流型的闪烁探测器难以实现辐射场绝对测量的目的。另一种类型是电荷收集型的康普顿探测器, 直接收集  $\gamma$  射线与物质相互作用产生电流, 结构简洁, 对辐射场影响小, 并且具有较大的线性动态范围, 是强流脉冲  $\gamma$  辐射场测量的主要探测元件<sup>[1-3]</sup>。

真空康普顿探测器由射线入射窗、电子发射极、出射窗和真空密封腔体构成。经过准直的  $\gamma$  射线束由入射窗入射时, 由于光电效应、康普顿效应和电子对效应, 入射窗、发射极、出射窗分别有电子出射, 通过记录发射极出射的净电荷, 测量  $\gamma$  辐射场的特性参数。电子发射极的种类、结构和材料特性影响

着探测效率。Hsiao - Hua Hsu 等人介绍了探测效率为  $4.68 \times 10^{-3} \text{ e}/\gamma$  的薄前窗结构真空康普顿探测器<sup>[4]</sup>。文献[1]介绍了探测效率为  $3.16 \times 10^{-3} \text{ e}/\gamma$  的 Fe 发射极厚前窗结构的真空康普顿探测器。薄窗结构的探测器探测效率高, 但其真空不易保持, 灵敏度不稳定。后窗结构探测器探测效率较低, 但性能稳定。

文章以提高真空康普顿探测器的  $\gamma$  射线探测效率为目的, 依据物质在  $\gamma$  射线作用下的电子发射特性, 选用同时具有高前向和反向电子发射效率的复合金属电子发射极, 设计厚前窗结构的真空型康普顿探测器。

## 2 金属物质的电子发射特性

物质表面出射电子数决定着康普顿探测器对  $\gamma$  射线的探测效率。 $\gamma$  射线垂直入射到具有一定厚度的物质表面时, 产生电子(包括光电子、康普顿电子和电子对电子)的概率与物质材料的密度、原子量、原子序数和作用截面有关, 经电子输运后在表面出射的电子数、角分布和能谱与物质材料的厚度、电子在物质中的平均射程、入射  $\gamma$  射线能量有关<sup>[3,4]</sup>。

考虑  $\phi 40 \text{ mm}$  能量为 1.25 MeV 的准直  $\gamma$  射线

[收稿日期] 2008-12-20

[作者简介] 韩和同(1967-), 男, 陕西华县人, 西安交通大学能动学院博士研究生, 西北核技术研究所研究员, 从事核辐射脉冲测量技术研究工作; E-mail: hht2003123@163.com

束,垂直入射到  $\phi 50$  mm 的几种导电物质上,厚度范围为 0.1 ~ 6 mm,采用光子 - 电子耦合运输的 MCNP 4C 蒙特卡罗程序<sup>[5]</sup>,计算得到的靶物质表面前向和反向出射的电子产额,如图 1 和图 2 所示。

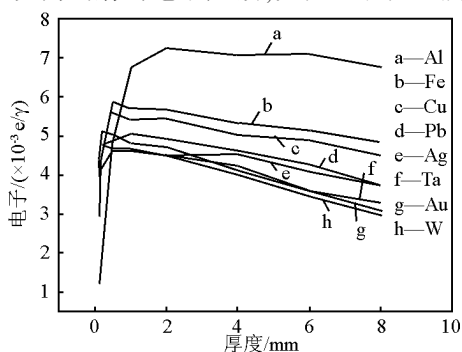


图 1 物质表面前向电子发射效率

Fig. 1 The forward emitting efficiency of secondary electron

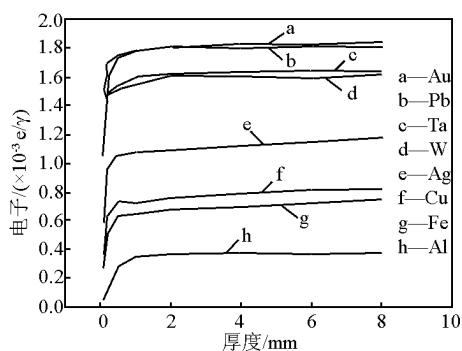


图 2 物质表面反向电子发射效率

Fig. 2 The backward emitting efficiency of secondary electron

在  $\gamma$  射线作用下,物质原子产生原生电子发射的概率与原子中的电子密度有关,原子序数较高的物质将产生更多的原生电子。但是,受电子射程影响,物质表面出射的电子数与材料厚度有关。当物质厚度小于原生电子在该种物质中的最大射程时,出射电子数随厚度增加而显著增加;大于该厚度时,前端产生的原生电子受到后端物质的阻止,不能从物质表面脱出,出射电子数逐渐稳定。厚度继续增加时,由于前端物质对伽马射线的衰减,出射的电子数目逐渐降低。由图 1 和图 2 可以看出,对于所考虑的几种材料,当厚度大于 1 mm 时,低原子序数的材料具有较高的前向电子出射效率,而高原子序数物质则具有较高的反向电子出射效率。

### 3 电子发射极

康普顿探测器的灵敏单元是封闭于真空腔室内的电子发射极,在不考虑封装物质前后窗出射电子的抵消作用时,选用低原子序数的 Al 作为发射极,可以得到较高的电子发射效率。但是, $\gamma$  射线与前窗物质作用同样会产生电子,输运到发射极,使发射极上的净电荷减小,从而使探测效率降低。发射极需具有较强的反向电子发射能力,以抵消前窗电子的影响。Al 材料的前向电子发射效率可以达到  $7.3 \times 10^{-3} e/\gamma$ ,但其反向电子发射效率仅在  $10^{-4}$  量级,难以抵消这种影响。根据图 2 的计算结果,W, Au, Ta 和 Pb 等高 Z 物质具有较强的反向电子发射能力。如果以 Al 板为基板,在其前表面附加一层高 Z 物质,形成复合金属板,此时,发射极将同时具有高的前向和反向电子发射本领。这些高 Z 物质具有较高的物质密度,属于重物质材料,为减小重物质对  $\gamma$  射线的衰减,复合层的厚度应选在反向发射曲线坪区的低端。

当只有  $\gamma$  射线入射时,从图 2 的结果看,反向电子发射效率曲线在 1 mm 附近达到最大值。对于实际结构的康普顿探测器,发射极表面不仅有  $\gamma$  射线入射,前窗电子也会入射到发射极表面,其中一部分电子会被复合层反射掉,反向效率曲线将产生变化。为模拟探测器实际结构,在复合金属发射极前 30 mm 处,设置 1.5 mm Ag 板作为前窗的替代物,计算出的反向出射效率随复合层厚度变化的情况见图 3。

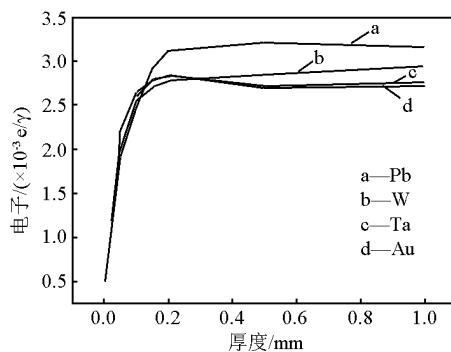


图 3 反向出射效率随复合层厚度变化曲线

Fig. 3 Backward emitting efficiency varies as the thickness of clad - metal

考虑电子入射时,反向效率曲线的坪区发生前移,在 200  $\mu\text{m}$  附近达到最大值。当复合层厚度大

于 200  $\mu\text{m}$  时,反向出射电子的效率基本不变。这种厚度的复合层,对伽马射线的衰减可忽略不计,Al 基板仍然具有较高的前向电子出射效率。

Pb 的反向发射效率最高,但它的熔点较低,不足 400  $^{\circ}\text{C}$ ,不能采取高温烘烤方法进行真空除气处理。W, Ta 和 Au 具有稳定的物理和化学性能,且在 200  $\mu\text{m}$  附近反向发射效率对厚度变化不敏感。进一步的计算结果表明,这种复合金属发射极总的电子出射效率接近  $10^{-2}$  量级,在相同条件下,比 Fe 发射极的出射效率约高 60 %。

#### 4 探测器结构及探测效率

探测器整体结构设计时主要考虑发射极物质材料类型、厚度、各极板的空间间距以及与外屏蔽壳体的配合情况。根据图 1 和图 3 的结果,考虑金属加工时的机械特性和复合效果,发射极选用 2 mm 的 Al 材料为基板,与 200  $\mu\text{m}$  的 Ta 金属复合,形成复合金属板作为电子发射极。由于发射极在真空腔室内,腔室与发射极构成电信号输出回路,对射线进行测量。在进行探测器整体结构设计时,需考虑腔室侧壁、前窗和后窗出射电子对探测效率的影响,以及材料的机械特性、静态加工以及高温除气工艺对探测器封装、引出线结构和真空保持性能的影响。

腔室侧壁和前后窗对探测效率的贡献是负向的。当  $\gamma$  射线准直良好时,可以忽略侧壁出射电子对灵敏度的贡献。伽马射线与后窗作用时,主要是后窗反向电子对灵敏度产生贡献。根据图 2 的结果,选用加工性能良好的 Fe 作为探测器后窗时,反向电子对探测效率的最大贡献小于  $7 \times 10^{-4} e/\gamma$ 。因此,侧壁和后窗可使用同一材料,组成圆柱形外壳,将发射极封闭。前窗选用具有低前向电子发射效率的物质材料 Ag,并根据出射电子的角分布和能谱情况,设计其与发射极之间的间距。图 4 和图 5 给出了在 1.25 MeV  $\gamma$  射线作用下,1.5 mm Ag 板前向发射电子的角分布和能谱情况。

前板出射的电子主要是能量较高的电子,平均能量约 0.63 MeV,0.1 MeV 以上的电子占总数的 98 % 以上。出射角集中在  $10^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ,对于  $\phi 50 \text{ mm}$  的发射极,当前窗与发射极间距达到 30 mm 时,仅有 50 % 左右的前窗电子能到达发射极。

使用绝缘陶瓷材料将发射极支撑,保持发射极

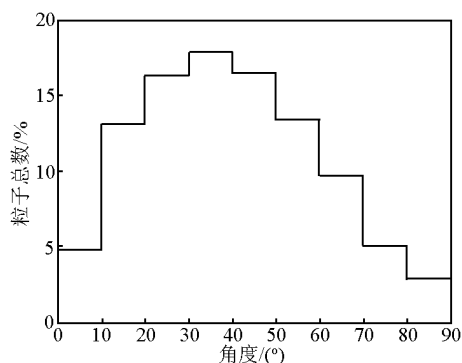


图 4 1.5 mm Ag 前向发射电子角分布

Fig. 4 Angle spectrum of forward electrons for 1.5 mm Ag

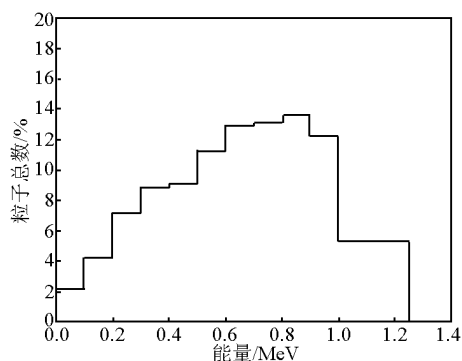


图 5 1.5 mm Ag 前向发射能谱

Fig. 5 Energy spectrum of forward electrons for 1.5 mm Ag

轴线与探测器轴线一致,与外不锈钢壳体连接。在陶瓷材料内部设计 Cu 导线,将信号从外壳的径向引出,探测器设计结构见图 6。

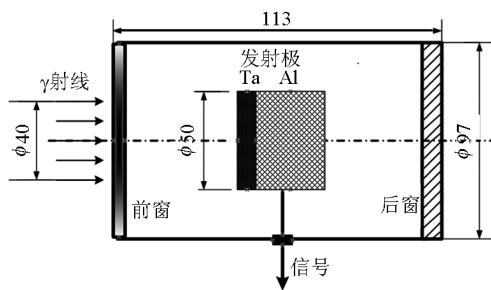


图 6 探测器设计结构

Fig. 6 Schematic diagram of the detector

考虑真空保持性能,Ag 板的厚度取 1.5 mm,与不锈钢外壳进行焊接封装。最终探测器结构设计结果见表 1。

表1 探测器结构

Table 1 Structure of the detector

结构名称	材料	直径/mm	厚度/mm
入射窗	Ag	97	1.5
发射极复合层	Ta	50	0.2
发射极基板	Al	50	2.0
出射窗	Fe	97	4.0
筒体	Fe	100	3.0

注:发射极距入射窗 50 mm,距出射窗 55 mm

用 MCNP 程序计算此结构下探测器发射极前后表面出射和吸收的电子数以及净电荷,结果见表 2。

表2 探测器发射极前后表面出射和吸收电子数计算结果

Table 2 The efficiency of electron emitting and absorbing from the front and rear surface of converter plate

1.25 MeV - $\gamma$	发射极出射	发射极入射
	电子数	电子数
前表面	2.26E - 03	1.19E - 03
后表面	7.08E - 03	3.00E - 04

由表 2 可见,发射极的入射电子主要来自前窗,后窗影响较小。探测器对伽马射线的探测效率为:

$$S = (2.26 + 7.08 - 1.19 - 0.30) \times 10^{-3} \\ = 7.85 \times 10^{-3} \text{ e}/\gamma$$

由于探测器的极板间距较小, $\gamma$ 射线飞行时间小于 0.5 ns。前窗出射电子的能量较高,其到达发射极的渡越时间将小于 1 ns。当进行时间行为在纳秒量级以上  $\gamma$ 射线测量时,可以忽略这种效应对探测器时间性能的影响。

## 5 结语

根据物质材料在  $\gamma$ 射线作用下发射电子的特性,选取适当的物质组合和结构,可以得到具有较高电子发射效率的发射极板,提高真空康普顿探测器的探测效率。选用 Ta—Al 复合金属作为电子发射极,探测效率可以达到  $7.85 \times 10^{-3} \text{ e}/\gamma$ ,即使采用易于静态加工和真空除气保持的厚前窗设计,其探测效率也比 Fe 发射极探测器的探测效率高出 2.5 倍。设计中忽略了探测器筒壁、前后窗电子渡越时间、以及物质材料的纯度和剩余气体对探测器性能的影响,探测器的探测效率可在高活度的放射源上进行实验验证。当应用于具有能谱结构的伽马射线测量时,需进一步研究探测效率的能量响应情况。

## 参考文献

- [1] 吕敏,王奎禄.核试验脉冲射线测量技术[M].北京:国防工业出版社,2006.53-173
- [2] May M, Clancy T, Fittinghoff D, et al. Reconstitution of Low Bandwidth Reaction History[R]. UCRL - TR - 210578, 2005
- [3] 刘庆兆.脉冲辐射场诊断技术[M].北京:科学出版社,1994.186-205
- [4] Hsiao - Hua Hsu, Huan Lee. Monte carlo calculations of the vacuum compton detectors sensitivities[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989,36(6):1926-1930
- [5] Briesmeister J B. MCNP - A General Monte Carlo N - Particle Transport Code[R]. LA - 12625 - M - Manual,1997

## Design of a new vacuum Compton gamma-ray detector with clad metal electron-converter plate

Han Hetong<sup>1,2</sup>, Wang Qunshu<sup>1,2</sup>, Xia Liangbin<sup>2</sup>, Guan Xingyin<sup>2</sup>,  
Tan Xinjian<sup>2</sup>, Zhang Zichuan<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[Abstract] A newly designed vacuum Compton gamma-ray detector with Ta - Al clad-metal electron converter plate is described. The detecting efficiency for 1.25 MeV gamma-ray is  $7.85 \times 10^{-3} \text{ e}/\gamma$ , which is 2.5 times higher than that with Fe converter plate. The designed detector has the merits of well processed and static vacuum keeping and can be used for intense pulsed gamma ray detecting.

[Key words] pulsed gamma ray; electron converter; Compton detector