

相对永久密封真空康普顿探测器伽马灵敏度研究

韩和同^{1,2}, 王群书^{1,2}, 夏良斌², 熊华², 管兴胤², 张子川², 张侃²

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

摘要: 针对强流脉冲 γ 射线探测, 研制了厚入射窗结构真空康普顿探测器, 并在 ^{60}Co 辐照装置上, 准直孔径为 40 mm 的条件下, 对 2 套样品探测器灵敏度进行了测量, 得到了 1.25 MeV 的 γ 射线灵敏度, 实验值分别为 4.65×10^{-22} C/MeV 和 4.59×10^{-22} C/MeV. 该实验值与蒙特卡罗程序 MCNP 的计算值 (4.70×10^{-22} C/MeV) 相比, 误差范围一致, 在 0.5~3.0 MeV 能量区间, 探测灵敏度的能量响应变化小于 20%. 实验证明: 该探测器比薄窗结构真空康普顿探测器的灵敏度提高了 60%, 克服了薄窗探测器封装加工和静态真空保持的困难; 保存使用期可达 2 年以上, 达到了相对永久密封的目的, 可应用于粒子注量率为 $10^{20} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强流脉冲 γ 射线测量.

关键词: 脉冲; 伽马射线; 康普顿探测器; 灵敏度; 蒙特卡罗程序

中图分类号: TL812.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0070-04

Gamma Sensitivities of Compton Detector with Relatively Permanent Vacuum Atmosphere

HAN Hetong^{1,2}, WANG Qunshu^{1,2}, XIA Liangbin², XIONG Hua²,
GUAN Xingyin², ZHANG Zichuan², ZHANG Kan²

(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 diode detector with a thick incident window was developed and experiment was conducted to measure the sensitivity of the two present detectors in this study. For 1.25 MeV Gamma ray and a collimating diameter of 40 mm, the absolute sensitivity measured was 4.65×10^{-22} C/MeV and 4.59×10^{-22} C/MeV, respectively, while the sensitivity calculated was 4.70×10^{-22} C/MeV using the MCNP code. In the energy range of 0.5-3.0 MeV, the variation of sensitivity was less than 20%. The sensitivity of the detector was about 60% higher than that of the vacuum Compton detector with a thin incident window. Our results indicate that the performance of the present detector will be steady in two years and it can be used in the detection of intense pulsed gamma with fluence of $10^{20} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Keywords: pulse; Gamma ray; Compton detector; sensitivity; MCNP

利用 γ 射线与物质相互作用产生电子发射进而形成电流的康普顿探测器, 具有灵敏度低、时间响应快、动态范围大、在较宽的 γ 射线能量范围内能量响应平坦的特点, 是强流脉冲 γ 射线探测领域广泛采用的探测器件^[1-5].

薄窗结构的真空康普顿探测器^[5-6]灵敏体积(或称收集极)设计在真空腔室内, 在 γ 射线的作用下,

用收集极与前后窗的康普顿电子数量差产生的净电荷, 来实现对 γ 射线的探测. 为减小探测器入射窗产生的康普顿电子对探测灵敏度和时间响应性能的影响, 窗材料的厚度通常在毫米量级以下, 薄窗结构探测器的加工和真空封装都很困难, 而且探测器性能难以长期保持稳定. 本文依据材料在 γ 射线作用下的电子发射特性, 采用一般导电材料(如 Fe、Al、

Ag、Ta等),研制了具有厚入射窗结构的真空康普顿探测器,克服了探测器封装加工和静态真空保持两大困难,并且可以较长时间保存和使用,达到相对永久密封的目的。

1 探测器结构

真空康普顿探测器一般由射线入射窗、电子收集极和出射窗构成,整个腔体内部抽真空,气压小于1 Pa,结构示意图见图1。

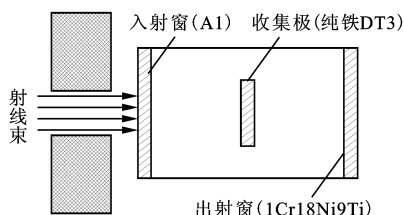


图1 真空康普顿探测器原理结构

经过良好准直的 γ 射线束由入射窗入射时,在光电效应、康普顿效应和电子对效应的作用下(关注的射线平均能量在1~1.5 MeV左右,在此能量范围内以康普顿效应为主),入射窗、收集极和出射窗分别有电子发射,导致收集极发射和接收电子不平衡,通过记录收集极的净电荷,达到测量 γ 辐射场强度的目的。传统的入射窗厚度小于0.5 mm,探测器加工成型并进行真空高温除气后,受大气压力的影响,探测器入射窗产生凹陷,破坏了探测器的整体结构。结构的破坏不仅影响探测器辐射探测的灵敏度,而且随着时间的推移,探测器的真空度下降,当进行高强度辐射场测量时,内部空气的电离会使探测器失效,因此如何实现真空长期保持成为薄窗结构的一大难题。本文研制了具有厚入射窗结构的真空康普顿探测器,可以满足真空除气和保持的要求,研制的探测器实物见图2。

根据导体物质在 γ 射线作用下的电子发射效率及分布情况,并考虑机械加工特性和真空封装的要求,选用不锈钢材料作主筒材料,探测器圆柱形筒体选用厚度为6 mm的不锈钢。为了减小入射窗的电子发射对收集极的影响,将入射窗内衬铝厚度选为4.5 mm。 $\varnothing 50$ mm的铁收集极封闭在探测器筒体内,收集极与入射窗、出射窗的距离相等。为了减小结构尺寸同时又要使入射窗和出射窗产生并到达收集极的电子尽量少,计算了出、入射窗的出射电子的角度分布,计算出从收集极到出、入射窗的距离约为48 mm。在筒体侧壁设置真空除气通道,收集极与筒

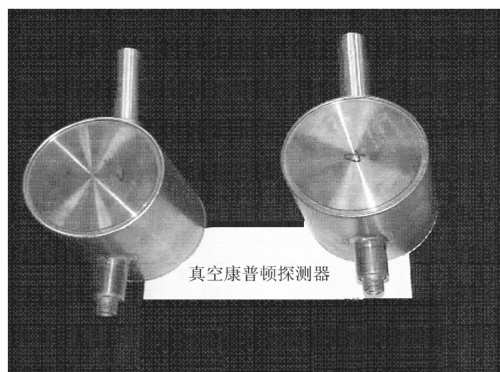


图2 厚窗探测器实物图

体之间使用陶瓷绝缘材料支撑,并设计了同轴信号引出结构。

2 探测器灵敏度及能量响应

2.1 前窗厚度对探测器灵敏度的影响

探测器的灵敏度可用光子-电子联合运输的蒙特卡罗程序 MCNP^[7] 进行模拟,以1.25 MeV的 γ 射线进行考察。考虑到射线经 $\varnothing 40$ mm的准直器入射到入射窗厚度为4.5 mm的探测器上,经前窗、收集极再从后窗射出,并考虑 γ 射线的吸收情况,因此灵敏度计算时需要计算从前后窗和收集极出射的电子产额、角分布、 γ 射线能量和吸收情况,以及电子在极间电场中的运动轨迹、极板间反射和次级电子发射时的电子收集等^[1-2,6]。

假定平行入射的 γ 射线能量为 E (MeV)、射线通量密度为 ϕ (cm^{-2}),探测器受照面积为 A (cm^2),收集极上产生的净电荷为 Q (C),则对单个射线入射时的灵敏度定义为

$$S(E) = \frac{Q}{E\phi A}$$

式中: $S(E)$ 的单位为C/MeV。当束流准直孔径小于收集极直径时,探测器筒壁发射和反射电子的影响可忽略,收集极上产生的净电荷 Q 主要与收集极向前和向后发射的电子总数 N_1 、入射窗向前发射且被收集极收集的电子数 N_2 、出射窗反向发射且被收集极收集的电子数 N_3 有关,可表示为

$$Q = e(N_1 - N_2 - N_3)$$

式中: e 为电子电荷。当一个1.25 MeV的 γ 射线入射时,由MCNP程序计算出收集极上的净电荷 $Q = 5.87 \times 10^{-22}$ C,即探测器灵敏度 $S(1.25) = 4.70 \times 10^{-22}$ C/MeV。

γ 射线与物质相互作用产生的电子数与作用的截面有关,但受电子射程的影响,表面出射的电子数

与物质厚度有关. 入射窗发射的电子输运到收集极, 使探测灵敏度降低. 在满足结构强度和灵敏度要求的前提下, 应选择最佳的入射窗厚度. 当入射窗厚度在 0.1~10 mm 之间变化时, 计算出的探测器灵敏度随入射窗厚度变化曲线见图 3.

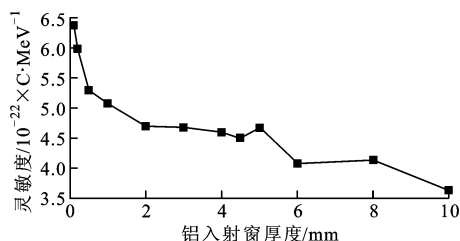


图3 探测灵敏度随入射窗厚度变化的曲线

由图3可以看出, 随着入射窗厚度的增加, 由入射窗发射、到达收集极的电子数 N_2 增加, 探测器的灵敏度逐渐降低. 在入射窗厚度小于 2 mm 时, 灵敏度降低较快, 而在 2 mm 以上时, 灵敏度降低较慢, 即入射窗厚度在 2~5 mm 范围内灵敏度变化小于 5%. 这是因为: 一方面, 由于入射窗的衰减作用, 收集极发射的电子数 N_1 随入射窗厚度的增加是逐渐减小的; 另一方面, 对于入射窗来说, 当厚度小于 γ 射线产生的电子的最大射程时, 从入射窗产生并到达收集极的电子数随入射窗厚度的增加而增加, 当厚度大于电子的最大射程时, 由于入射窗前面部分产生的电子无法到达后表面并从后表面出射, 前面的窗材料对射线反而起到衰减的作用, 因此继续增加入射窗厚度则发射电子的数目变化不大. 所以, 入射窗铝层厚度选择在 2~5 mm 之间是恰当的. 单纯的铝制入射窗不合适, 因为薄铝片较软, 窗体内无法承受一个大气压的压力. 为了克服真空保持的难题, 采用铝内衬的铁制入射窗, 其电子发射情况与单用铝的情况差别不大, 同时具有一定的结构强度.

由于电子发射主要集中在前向, 所以后窗反向发射对探测灵敏度的影响较小.

2.2 探测灵敏度的能量响应

由于 γ 射线与物质的相互作用产生次级电子的截面依赖于 γ 射线的能量, 因此探测器对不同能量的 γ 射线的灵敏度(即能量响应)是本文关心的问题. 裂变装置出射 γ 射线的能量范围为 0.2~14.1 MeV, 主能区集中在 0.5~3.0 MeV, 平均能量在 1.2 MeV 左右. 对于能量小于 1.02 MeV 的低能段 γ 射线, 其光电效应、康普顿效应产生的出射电子占主要成分; 在 1.02~1.02 MeV 的低能段 γ 射线, 其光电效应、康普顿效应产生的出射电子占主要成分; 在 1.02~1.02 MeV 的低能段 γ 射线, 其光电效应、康普顿效应产生的出射电子占主要成分.

效应产生的出射电子占主要成分. 图4给出了探测器灵敏度随 γ 射线能量变化的情况, 由图可以看出, 探测灵敏度随 γ 射线能量的增加而增加, 在 0.5~3.0 MeV 主能区, 探测灵敏度与 1.25 MeV 的 γ 射线灵敏度的偏差小于 20%, 能量响应较为平坦.

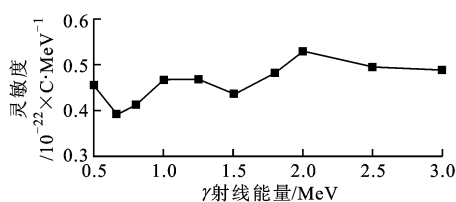


图4 0.5~3.0 MeV 探测灵敏度曲线

3 实验结果和结论

探测灵敏度及其能量响应的理论计算是在严格准直的理想条件下进行的, 并且计算中忽略了探测器筒壁、材料的纯度和剩余气体对探测器性能的影响, 其结果的可靠性需要实验验证. 在西北核技术研究所的⁶⁰Co 辐照装置上, 对样品探测器的灵敏度进行了实验测量. 实验中使用 $\varnothing 40 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的铅准直器, 探测器收集极到准直器后端的距离为 5.5 cm, 输出的信号采用低噪声电缆传输至微电流计进行记录. 实验装置示意图见图5.

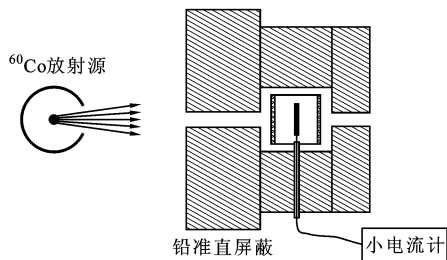


图5 探测器灵敏度实验测量示意图

表1给出了2只探测器灵敏度的实验测量结果. 2只探测器具有相同的结构和材料, 于2005年1月加工成型, 在真空工作室内完成静态除气, 并进行了120 d左右的动态烘烤除气, 探测器体内的气压测量值为 0.5 mPa.

用 UNIDOS 电离室测得探测器中心处的照射量率为 0.014 7 C/(kg · min), 据此可计算出该处的 γ 射线强度为 $1.94 \times 10^{13} \text{ MeV}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 根据探测器的输出电流和射线照射面积可计算得到探测器对单个粒子的灵敏度分别为 $4.65 \times 10^{-22} \text{ C/MeV}$ 和 $4.59 \times 10^{-22} \text{ C/MeV}$. MCNP 的计算值为 $4.70 \times 10^{-22} \text{ C/MeV}$, 实验值和计算值基本一致.

表 1 探测器灵敏度的实验测量结果

探测器	暗电流 /pA	信号电流 /pA	灵敏度 /C·m ² ·MeV ⁻¹
VCD-1	-0.07	+11.31	5.84×10^{-25}
VCD-2	-0.07	+11.19	5.77×10^{-25}

将探测器静置 2 年后,由于大气的渗透作用,上述 2 个探测器腔体内的气压监测值为 0.1 Pa,满足气压小于 1 Pa 的使用要求.此时,重新测量了探测器(VCD-1)的 γ 射线的灵敏度,其值为 4.72×10^{-22} C/MeV,与 2 年前相比,变化仅在 2% 以内,灵敏度一致性较好,达到了相对永久密封的目标.

在同样准直条件下,文献[5]介绍的 0.051 mm 的铁薄入射窗结构的真空康普顿探测器单位面积的灵敏度约为 2.9×10^{-22} C/MeV.本文设计的厚入射窗真空康普顿灵敏度比薄入射窗结构灵敏度提高了 60%.

理论计算和实验研究结果表明,采用易于真空除气和静态保持的厚入射窗材料,能够研制得到单位面积灵敏度达到 4.6×10^{-22} C/MeV 的真空型康普顿探测器,可用于强流脉冲 γ 射线的测量场合.探测器的保存使用期达到 2 年以上.理论计算表明,该探测器用于 γ 射线能注量测量时,能量响应因素引入的测量不确定度将小于 20%,是一种性能较好的强流脉冲 γ 射线探测器.

致谢 本项目得到西北核技术研究所伽马项目组全

体成员、⁶⁰Co 项目组成员、西安交通大学电子工程系卜忍安教授的热情帮助和指导,在此深表谢意.

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.

[2] STEVENS J. Design and characterization of an absolute gamma-ray detector, EGG1183-2288 [R]. Santa Barbara, California, USA: EG & G Inc. , 1972.

[3] EBERT P J, LAUZON A F. Vacuum diode detector for measuring high intensity gamma-ray flux [J]. Review of Scientific Instrument, 1967, 38 (12):1747-1752.

[4] OUYANG Xiaoping. ICI detector for measuring gamma-ray fluxes in mixed gamma-neutron fields[J]. HEP & NP, 2006, 30(3):228-231.

[5] MAY M T, CLANCY T, FITTINGHOFF D, et al. Reconstitution of low bandwidth reaction history, UCRL-TR-210578 [R]. Livermore, California, USA: LLNL, 2005.

[6] HSU H, LEE H. Monte Carlo calculations of the vacuum compton detectors sensitivities [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989,36(6):1926-1930.

[7] BRIESMEISTER J B. MCNP—a general Monte Carlo N-particle transport code, LA-12625-M-Manual [R]. Oak Ridge, Tennessee, USA: Radiation Safety Information Computational Center, 1998.

(编辑 王焕雪)