

高密度多丝室中性粒子探测器的研究

王德武 楼家恕 李志刚 尧宗元

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

本文描述了一种位置灵敏多丝正比室,其有效面积为 $200 \times 200\text{mm}^2$, 多丝室与多层铅 γ 射线转换体相配合, 组成了高密度多丝室 γ 射线探测器. 铅转换体做成均匀排布的 0.9mm 圆孔、孔心距 1.1mm 的阵列花样. 探测器对 511keV 光子的探测效率为 5.6% , 空间分辨 1mm . 这种探测器已经被用在正电子相机研究工作中,也可以用于探测 X 射线.

一、引 言

多丝正比室作为位置灵敏探测器具有许多突出的优点:毫米甚至亚毫米的空间分辨;快的时间分辨 ($\sim 20\text{ns}$); 高计数本领 ($\sim 10^6$ 粒子/秒·厘米²); 以及大的探测面积和低廉的造价. 因此,在高能物理实验中建造了各种结构和不同大小的多丝室,用来探测带电粒子,事实已经证明它是非常有用的实验工具^[1].

多丝正比室除了在高能物理实验中获得广泛的应用之外. 近几年,科学家们力图把它用于医学 X 射线成像或 γ 射线成像^[2], 材料科学研究领域中的 X 射线衍射晶体学; 天文学研究中的硬 X 射线或 γ 射线探测. 对多丝室而言,要做到有效地探测中性粒子,必须先把它们转换成带电粒子,这些带电粒子无散射地进入探测器的灵敏体积,从一个室上同时读出粒子的两个坐标 x 、 y . 多丝室二维坐标有很多读出方法: 脉冲上升时间读出法^[3]; 延迟线读出法^[4]; 电荷分配法^[5]; 脉冲分布重心法^[6]; 阴极感应脉冲串中心法^[7]等. 在权衡造价、精度和计数率的基础上,我们的工作采用了阴极丝分组编群脉冲串中心法读出技术,获得了较好的结果.

多丝正比室用于探测几千电子伏 X 射线时具有很高的探测效率 (90% 以上),随着光子能量增加,光电俘获截面迅速下降,光电子射程增大,多丝室工作气体对光子的转换效率变得越来越低. 所以探测效率和空间分辨率都随之下降. 当然,通过增加工作气体的气压,使用高原子序数的惰性气体 (如 Xe) 作为工作气体等措施,可以提高探测效率和空间分辨率. 但是氙气太昂贵了,毫无疑问提高了探测器的造价. 我们设计了一种高密度铅 γ 射线转换体,把它和多丝正比室结合起来,组成高密度多丝室 γ 射线探测器,对 511

keV 光子有较好的探测效率和空间分辨率。本文对高密度多丝室的结构和性能给予描述。这种多丝室已经作为 γ 光子探测器应用于正电子相机的研究中。

二、探测器的结构

我们设计的探测器由多丝正比室和 γ 射线转换体组成,如图 1 所示。多丝正比室有三个丝平面、中心平面是阳极,两个阴极丝平面等间距位于阳极面的两侧,一个阴极面的丝与阳极丝平行,能给出 x 坐标;另一个阴极面的丝与阳极丝垂直,可提供 y 坐标。阳极是由直径 $20\mu\text{m}$ 的镀金钨丝平行焊接而成,丝的张力 50 克,丝间距为 2mm。阴极由直径 $100\mu\text{m}$ 的铍铜丝制成,丝间距为 1mm,阳极和阴极间距为 3.5mm。多丝正比室的一侧装有厚 6mm 的多层铅板 γ 射线转换体,转换体的有效面积为 $200 \times 200\text{mm}^2$,由 16 层 0.2 mm 厚的铅铋合金 (95% 铅 + 5% 铋)薄板和 16 层环氧玻璃布板粘压而成。在 400cm^2 的面积上用数控钻床均匀地打 40,000 个孔,孔的直径为 0.9mm,孔心距 1.1mm。转换体钻孔后层间短路是必然要发生的,因此要对转换体进行化学清洗,以便除去残留在孔里的金属屑,对个别化学方法清除不掉而使相邻两层铅板短路的金属屑,采用低电压大电流烧熔方法解决短路问题。经过处理后的转换体层间绝缘好于 7kV/cm 。

转换体远离多丝室的一侧用一块 $200\mu\text{m}$ 厚的铅板粘在有机玻璃上,复盖着转换体。

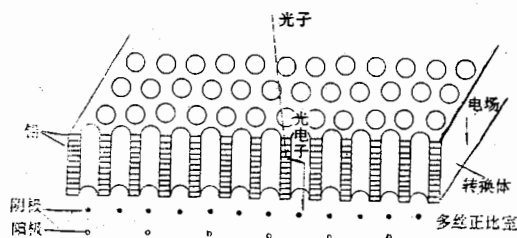


图 1 高密度多丝室 γ 射线探测器的工作原理

铅板和转换体之间留有适当的距离,以便工作气体能自由地流过转换体。转换体的盖板上加一负高压,使背离多丝室方向飞出的光电子回到多丝室灵敏体积里。

正电子相机探测正电子湮灭发射的 γ 光子对,每个光子的能量为 511keV 。7mm 厚的多丝正比室对 511keV 光子的探测效率是可以忽略不计的。要想有效地探测高能光子,必须先将它们转换成电子。我们选择铅充当 γ 射线转换体。每一厘米厚的铅 (原子序数为 82, 密度为 11.2克/cm^3) 对 511keV 光子的穿透率约为 20%。不同能量的光子与物质的作用过程是不同的,在 511keV 能量范围,入射光子与铅转换体的作用过程主要是通过光电效应和康普顿效应产生光电子,光电子的动能为 425keV 。这些光电子只能穿过 $100\mu\text{m}$ 厚的铅。如果使用更厚的铅作转换体的话,也只有 $100\mu\text{m}$ 厚的铅里产生的光电子才能逃出转换体,在深的部位产生的光电子,由于不具有足够大的动能而被铅吸收了。因此,在设计高密度多丝室时,在机械加工可能做到的情况下, γ 射线转换体的设计制造应该遵循的原则是:在入射光子的方向上铅转换体要有尽量大的质量厚度,通过光电效应

和康普顿散射把光子转换成电子才会有大的几率。转换体中产生的快电子有很大的几率逃到紧靠近的孔里, 而不再进入第二个孔。进入孔里的电子使气体电离产生自由电子, 这些自由电子被一个强的漂移电场从孔里拖到多丝室的灵敏区, 从而被记录下来, 可以认为光电子的位置代表了入射光子的座标。

多丝室的信号读出是这样的: 我们把多丝室的阳极丝分为五组, 每组包括 20 根丝, 各组并行输出。当带电粒子穿过多丝室灵敏体积时, 产生电离——雪崩过程, 在雪崩最靠近的阳极丝上产生负脉冲。在多丝室所有其它的丝上产生感应正脉冲。两个相互垂直的阴极丝上脉冲分布的中心定义了雪崩的 x 、 y 坐标。为了从一个多丝室的两个阴极上同时确定入射粒子的 x 、 y 坐标, 常用的方法是重心法——确定阴极感应脉冲串分布的重心。这种方法定位精度高, 可是, 由于要测定每个信号的幅度, 所以提高了读出电子学的费用。我们采用了阴极感应脉冲串中心法读出技术, 为了节省经费, 在满足实验测量精度的条件下, 研究了阴极信号丝分组编群读出技术, 其编码原理如图 2 所示: 把每个阴极的信号丝等分成若干组, 每组都包括相等数目的序号为偶数和奇数的丝, 将每组中偶数序号的丝连接在一起, 作为组的输出信号通道; 各组中相对应的序号为奇数的丝连接在一起, 称之为群。每个组或群都独立地和一个电荷灵敏前级放大器耦合输出。每个信号道再经过放大甄别输送到带有门控信号的符合寄存器, CAMAC 机箱控制器把记录下来的信号读到计算机的内存。通常, 对应一个入射粒子, 每个阴极面上给出组的脉冲串只有一个脉冲, 至多两个脉冲。而群的脉冲串可能有多个脉冲。根据记录脉冲所在的组号和群号, 可以计算出感应脉冲串究竟是哪些丝输出的:

$$n_i = 2 \cdot [(G_i - 1) \cdot N + Q_i].$$

其中 G_i 表示记录输出脉冲的组号; N 是每个组里所含的丝数; Q_i 是记录输出脉冲的群号。由此可以求得感应脉冲串分布的中心所在的丝号:

$$n_c = \sum_i n_i / m.$$

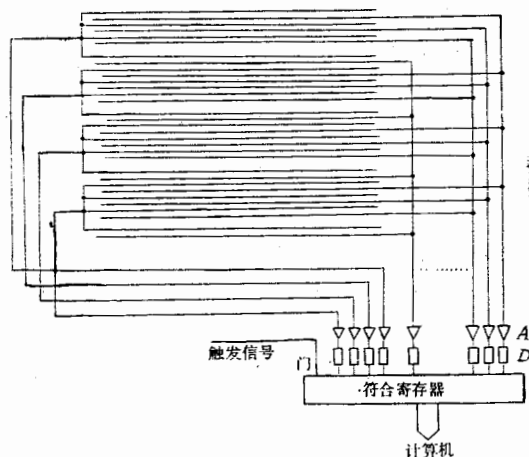


图 2 感应脉冲串中心读出技术的阴极丝分组编群原理
这里给出 4 组 24 群编码方法。A 是放大器, D 是甄别成形器

这里 n_i 由上式给出, m 是求权重的丝数, 从而可以确定入射粒子的坐标.

三、探测器的性能

I. 探测效率的估计

高密度多丝室对 γ 射线的探测效率归结为光子与铅相互作用产生的快电子逃出转换体的几率. 我们应用 Jeavons 等人所作的理论分析^[6], 估计了本工作条件下的探测效率.

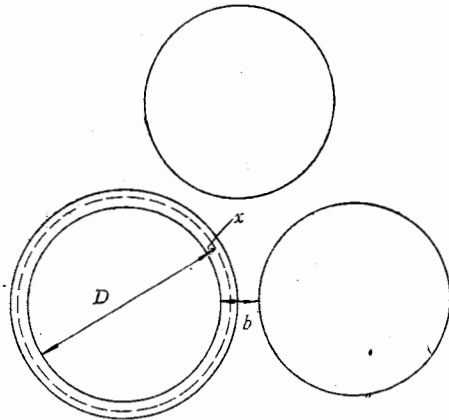


图 3 转换体探测效率理论分析参量图 面积上产生能量为 E 的电子的几率. $P_d(x, E)$ 是光生电子穿过 x 路程逃到孔里并被探测的几率, $P_d(x, E)$ 趋近零的 x 值代表着电子在转换体中的剩余射程 $R(E)$. 假设电子只能逃到最靠近的孔里, 即 $R(E) < b/2$, F 是光子与铅相互作用产生的电子并被探测到的部分:

$$F = \frac{4}{(D+b)^2} \int_0^{E_1} P_c(E) \int_0^{R(E)} (D+2x) P_d(x, E) dx dE$$

这里积分限 E_1 是光电子或康普顿散射边缘电子的能量, $R(E)$ 是电子的剩余射程.

在考虑了光电效应, 康普顿散射和逃逸峰的贡献之后, 可以根据下式计算总效率:

$$\varepsilon = [1 - \exp(-\sigma_T \rho N t)] \sum_i \frac{\sigma_i}{\sigma_T} \cdot F_i$$

这里 $\sigma_T = \sum_i \sigma_i$ 是光子总作用截面, ρ 是转换体材料的密度, t 是转换体每层铅板的厚度, F_i 是光子与铅作用产生的光电子并被探测到的部分.

在我们的工作条件下, 计算出探测效率为 5%. 从图 3 不难看出, 在估算探测效率时做了某些近似, 尤其是三个孔之间的那部分铅被忽略了, 因此导致计算值偏低.

II. 探测器性能测量

我们对高密度多丝室的探测效率进行了实验研究. 转换体分压电阻串每级阻值为

图 3 为放大后的转换体钻孔阵列花样. 设孔的直径为 D , 孔与孔之间的最小距离为 b , 考虑沿半径方向离孔内壁为 x , 宽度为 dx 的一个圆环, 圆环的面积为 $2\pi \left(\frac{D}{2} + x\right) dx$, 而直径为 $(D+b)$ 圆的面积为 $\pi \left(\frac{D+b}{2}\right)^2$, 前者与后者之比是 x 的函数:

$$4 \cdot [(D+2x)/(D+b)^2] dx.$$

设 $P_c(E)$ 是一个光子打在 $2\pi \left(\frac{D}{2} + x\right) dx$

面积上产生能量为 E 的电子的几率. $P_d(x, E)$

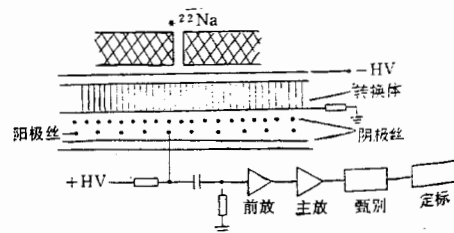


图 4 测量探测效率的实验安排

300k Ω , 为了产生一个聚焦的漂移场, 转换体最后五级的分压比依次增加 10%, 末级对地的场强是第一级场强的 2.8 倍。这就保证了从转换体孔里拉出来的电子能顺利地漂向多丝室的灵敏区。实验安排示于图 4。

经过准直的 ^{22}Na γ 射线源放在室体上方, 准直器为 50mm 厚的铅, 多丝室工作气体为 80% Ar + 20% CO_2 混合气体, 从 20 根并联的阳极丝输出信号。当转换体的漂移电场固定时, 计数率作为多丝室工作电压的函数曲线示于图 5。多丝室工作电压加到 2.5kV 时出现饱和, 表明探测器达到能记录一个离子对的水平。当多丝室的工作电压固定在 2.5kV 时, 计数率作为转换体漂移电压的函数曲线示于图 6。从图 6(a) 可以看出, 随着向前漂移电压(负电压)的增加, 计数率迅速上升, 当漂移电压达到一定值时, 计数率曲线趋近一个饱和值; 当向前漂移电压为零时的计数率对应于表面散射和多丝室本身的探测效率; 当向后漂移电压(正电压)加在转换体上时, 计数率近于常数值, 此时转换体内产生的光电子几乎都背离多丝室接收方向。我们测得的探测效率为 5.6%, 这与理论估算相符。

当多丝室的工作电压固定在 2.5kV 时, 从多丝室阴极的一个群输出信号, 测得转换体漂移电压作为计数率的函数曲线, 见图 6(b)。

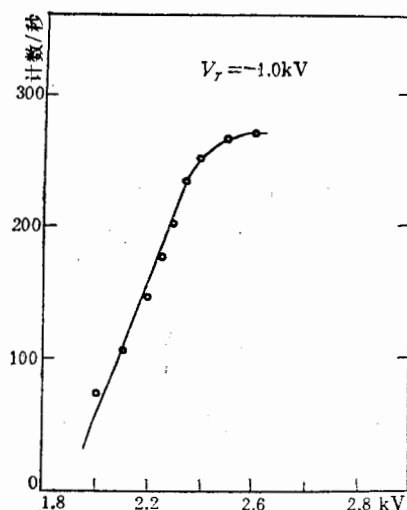


图 5 高密度多丝室探测 511keV 光子, 阳极计数率作为多丝室阳极电压的函数。

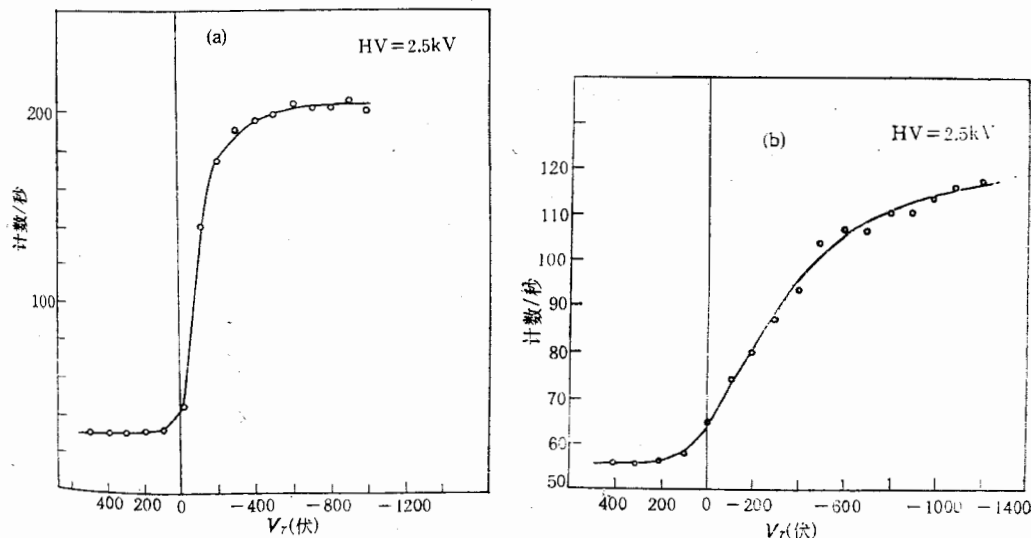


图 6 探测器的计数率随转换体漂移电场变化曲线

(a) 高密度多丝室探测 511keV 光子阳极计数率作为转换体漂移电压的函数

(b) 高密度多丝室探测 511keV 光子阴极的计数率作为转换体漂移电压的函数

我们对高密度多丝室的空间分辨率进行了计算机在线测量。测量装置同图 4, 铅准直狭缝宽 0.5mm, ^{22}Na 源距阳极丝 80mm. 用计算机 LSI-11/23 在线测量阴极面每根丝的计数, 在计数峰值附近的脉冲分布示于图 7. 从计数分布的直方图可以得到探测器对 511keV 光子的空间分辨率为 1mm.

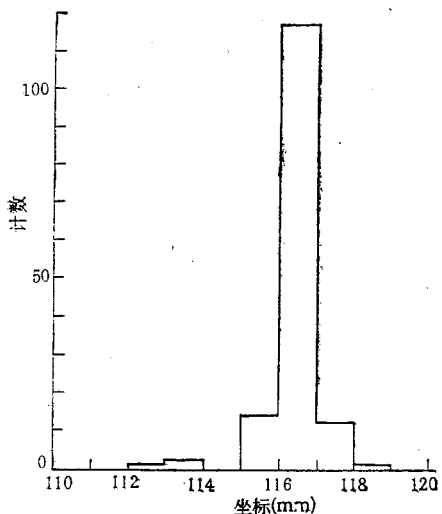


图 7 高密度多丝室对 511keV 光子空间分辨率

四、结 束 语

我们研制的高密度多丝室既可以作 X 射线探测器, 又可以充当正电子湮灭产生的 511keV γ 射线探测器, 它对该能阈 γ 射线有较好的探测效率 $\sim 5.6\%$ 和令人满意的空间分辨率 1mm.

由于我们只在多丝室的一侧装了转换体, 当带电粒子或低能 X 射线从室的另一侧入射时, 探测器仍具有较好的能量分辨率。但是, 当高密度多丝室作为 γ 射线探测器时, 由于 γ 射线转换体在起作用, 多丝室间接测量光子, 所以探测器失去了能量分辨的能力。

高密度多丝室已经被用到正电子相机的研究中, 经过几个月的运行, 证明工作稳定可靠。除此之外, 该探测器还可以应用到正电子湮灭技术的研究中。

李云山、赵海泉、徐蓉芬等同志参加过部分工作, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] C. W. Fabjan and H. G. Fischer et al., *Rep. Prog. Phys.*, 1980. 43: 1003.
- [2] Yu. S. Anisimov et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, 176(1980), 67.
- [3] C. J. Borkowski and M. K. Kopp, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-17(1970), 340.
- [4] V. Perez-Mendez and S. I. Parker, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-21(1974), 45.
- [5] W. R. Kuhlmann et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, 40(1966), 118.
- [6] G. Charpak and F. Sauli et al., CERN 73-11(1973).
- [7] 王德武、李云山等, “窄间隙多丝正比室”全国第二届核电子学与核探测器会议, 1984年10月 昆明; 王德武等, “二维读出多丝正比室”〈核电子学与探测技术〉1986 年待发表。
- [8] A. P. Jeavons, G. Charpak and R. J. Stubbs. *Nucl. Instr. and Meth.*, 124(1975), 491.

THE INVESTIGATION OF THE HIGH DENSITY MULTIWIRE
PROPORTIONAL CHAMBER AS A DETECTOR
FOR NEUTRAL PARTICLES

WANG DE-WU LOU JIA-SHU LI ZHI-GANG YAO ZONG-YUAN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing*)

ABSTRACT

This paper describes a position sensitive multiwire proportional chamber with effective area of $200 \times 200 \text{ mm}^2$. The chamber combining with multi-layer lead γ -ray converter form a high density multiwire proportional chamber γ -ray detector. The lead converter is made in a uniformly arranged matrix of 0.9 mm diameter holes on a 1.1 mm pitch. For 511keV photons the detection efficiency is 5.6%, and the spatial resolution is 1 mm. The detector has been used in the investigation of positron camera, it also offers possibility for X-ray detection.

准
m.
根
于
器

射
的
有
间
换
但
量

可

德武