

多丝正比室 W-S 阴极条二维 读出方法研究*

李澄 陈宏芳 乐毅 郑海 王箐

(中国科技大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 对一种简便的多丝室楔形-条形(W-S)阴极的感应电荷分布进行了详细的计算,制作了 $100 \times 100\text{mm}^2$ 的丝室模型,用 ^{55}Fe X射线测量丝室的定位精度,并获得入射X射线的二维图像.

关键词 多丝正比室 W-S(楔形-条形)电极 二维读出

1 引言

多丝正比室作为一种位置灵敏粒子探测器,以其定位精度高,时间分辨好的特点,不仅在核与粒子物理实验中,而且在X射线天文学,生物物理学,医学射线成像等领域有重要的应用.通常用多丝室测量带电粒子和X射线的空间位置多采用阴极感应电荷重心定位方法:将多丝室上下阴极面做成与阳极丝平行(x 方向)和垂直(y 方向)的阻条阴极,测量每根阴极条上的感应电荷,根据电荷分布计算获得两个方向的位置.人们对这种条状结构的电极作了大量的研究,并取得了很好的实验结果^[1].采用这种方法的缺点是读出电子学路数很多,探测系统体积和重量增加,造价太高,在许多实际应用中是不可行的.因此许多研究人员提出并制作了不同形式的阴极条,以减小读出电子学的数目^[2].其中W-S阴极条由于只需要三路读出电子学,就可以在一个阴极面上获得二维图像信息,具有明显的优点,特别是在一些计数率不太高的粒子定位和射线成像方面,具有广泛的应用价值.因此我们制作了一个具有W-S阴极条的多丝正比室,进行了有关的计算和分析,并用 ^{55}Fe 5.9keV的X射线对它的定位性能进行了测量,通过实验进一步确定W-S电极用于丝室定位及X射线成像的可行性.

2 测量原理

根据多丝室工作原理,阴极感应信号主要是由于电子雪崩形成的正离子向阴极漂移

1998-05-04收稿

* 国家自然科学基金资助(19755001)

过程产生的. 在多丝室的工作条件下可近似认为正离子的分布是不随时间改变的. 按照静电学中镜象法原理, 在空间某一位置 (x_p, y_p, h) , 电量为 Q_e 的点电荷在阴极面上任一点 (x, y) 产生的感应电荷密度 σ 可近似为:

$$\sigma = \frac{Q_e \cdot h}{2\pi[(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + h^2]^{3/2}},$$

式中 h 相当于雪崩点到阴极面的垂直距离. 则在阴极面上某一区域内的感应电荷量 Q 为:

$$Q = \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} \sigma(x, y) dy = \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} \frac{Q_e \cdot h}{2\pi[(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + h^2]^{3/2}} dy.$$

上式表明感应电荷的大小与雪崩点的位置即入射粒子原初电离的位置 (x_p, y_p) 有着对应关系. 如果适当选取阴极电极的形状, 使得在一定区域内的电荷量正比于雪崩点在阴极面上投影的立体角, 则通过测量感应电荷的分布就可以获得入射粒子的空间位置.

基于以上原理 H. O. Auger 等人^[3]最早提出了一种楔形-条形电极 (Wedge-Strip cathode) 电荷信号定位方法, 可以原则上毫无形变的给出一个区域内 (x, y) 点的粒子影像, 并且通过实验证明收集电极能够线性分割收集电荷的数目. 因此 Auger 电极 (见图 1) 在 y 方向上楔形条的宽度线性增加, 从而 y 方向上感应电荷的重心位置正比于 $A / (A + B)$. 而 x 方向上矩形条宽度的线性增加使 x 方向的感应电荷重心位置正比于 $C / (C + D)$. 这里 A, B, C, D 表示阴极面被线性分割后的四组电极收集到的电荷量.

在 Auger 研究的基础上, 研究人员作了一定的改进, 将电极数目由四个减小到三个, 以这种 W-S 结构电极作为微通道板 (MCP) 的电荷收集电极获得很好的位置分辨和实验结果^[4]. 在多丝室的工作条件, 是否可以获得好的定位精度, 首先制作了几种不同尺寸的齿状阴极, 在一维方向上进行了检验, 理论和实验结果符合的很好^[5]. 以此基础上进一步对 W-S 电极的定位性能进行了实验研究.

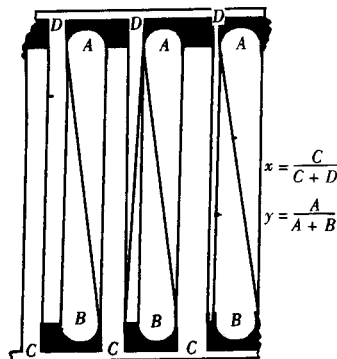


图1 Auger电极示意图

3 理论计算

如图 2 所示, 边长为 a 的正方形 W-S 电极上的感应电荷被 S, W, Z 三个电极分割, 其每组电极上的电荷 Q 为:

$$Q_s = \sum_{i=1}^m Q_{s_i} = \sum_{i=1}^m \int_0^a dx \int_{y_i}^{y_i'} \sigma(x, y) dy,$$

$$Q_w = \sum_{j=1}^m Q_{w_j} = \sum_{j=1}^m \int_0^a dx \int_{y_j}^{y_j'} \sigma(x, y) dy,$$

$$Q_{\Sigma} = \int_0^a dx \int_0^a \sigma(x, y) dy,$$

$$Q_Z = Q_{\Sigma} - Q_S - Q_W,$$

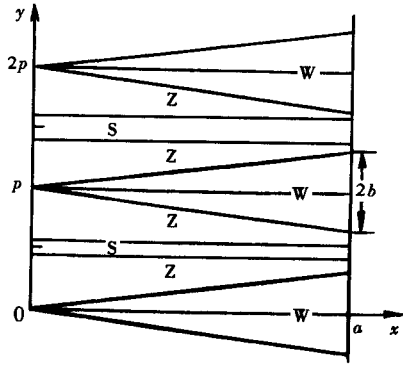


图2 W-S阴极示意图

其中 Q_S 为每个矩形条的电荷, Q_W 为每个楔形条的电荷, Q_Z 为整个 W-S 电极上的总电荷. 设楔形底宽为 $2b$, 阴极条每一单元宽度为 p , 矩形条最大宽度为 C_{\max} , 最小宽度为 C_{\min} , 则整个 W-S 阴极面含有 $[a/p]$ 个单元, 并且在每根楔形条的边界: $y = \pm \frac{b}{a}x + np$, 每根矩形条的边界为:

$$y = p \left(n + \frac{1}{2} \right) \mp \left[C_{\min} + n \cdot \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2[a/p]} \right] / 2;$$

其中 $n = 0, 1, 2, \dots, [a/p] - 1$.

将电荷密度 σ 的公式代入上面的积分公式, 采用辛普森 (Simpson) 数值积分法, 对 Q_S, Q_W, Q_Z 进行积分, 图 3 给出了在 $p = 8\text{mm}$, $f_{\min} = 0.1$, $f_{\max} = 0.5$, $b = 1\text{mm}$ 情况下, 分别取 $x_p = 50\text{mm}$, $y_p = 50\text{mm}$, 计算得到的 $y_p \sim F_Q(y_p)$ (图 3(a)) 及 $x_p \sim F_Q(x_p)$ (图 3(b)) 曲线.

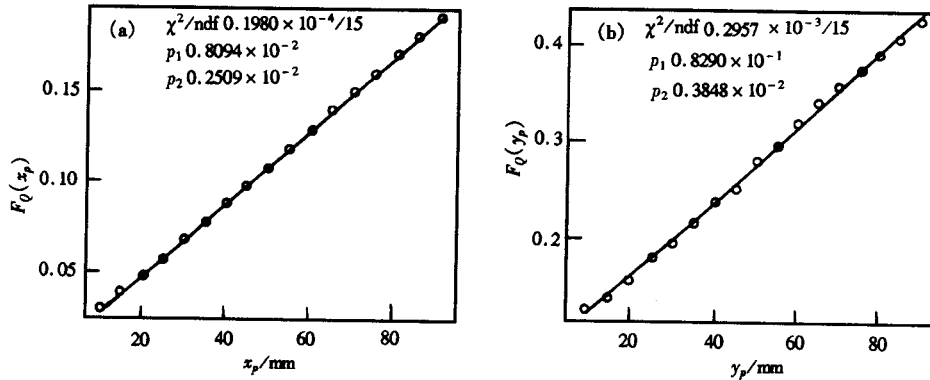


图3 W-S阴极面x方向, y方向定位理论曲线

这里 $F_Q(y) = Q_S / Q_{\Sigma}$, $F_Q(x) = Q_W / Q_{\Sigma}$, f_{\max} 为矩形条最大宽度与单元宽度 p 之比, f_{\min} 为矩形条最小宽度与单元宽度 p 之比. 考虑假定的边界条件的影响, 只计算了 10—90mm 区域的 (x_p, y_p) 位置随电荷比 F_Q 的变化.

计算结果显示在 10—90mm 丝室的有效体积内, 雪崩点 x 方向, y 方向的位置与相应的电荷比有近似的线性关系. 对 x 方向原则上楔形条张角越大定位精度越高, 即要求底宽尽量大, y 方向要求宽度增加的梯度越大, y 方向定位的灵敏性越好, 即要求 $f_{\max} - f_{\min}$ 尽可能的大, 由于单元宽度的限制, 这两方面的要求显然是相互制约的.

为了选择最佳的 W-S 阴极面的几何参数, 分别对不同的 $p, f_{\max} - f_{\min}$ 及 b 进行了计算.

表 1 给出了部分计算结果, 拟合精度 χ_x^2 , χ_y^2 对 b 及 $f_{\max} - f_{\min}$ 的依赖关系明显可见.

表 1

p/mm	f_{\min}	f_{\max}	b/mm	χ_x^2	χ_y^2
16	0.10	0.50	3.5	0.266	4.940
16	0.05	0.70	1.9	0.290	3.350
10	0.10	0.50	2.0	0.783	1.984
10	0.10	0.60	1.0	0.934	1.639
10	0.10	0.46	1.5	0.895	2.134
8	0.10	0.50	1.0	0.770	4.785
8	0.10	0.40	1.4	0.721	5.460
8	0.10	0.60	0.6	1.174	4.423

根据计算结果, 并考虑到制作技术的限制, 选择 $p = 10\text{mm}$, $f_{\min} = 0.1$, $f_{\max} = 0.46$, $b = 1.5\text{mm}$, 作为 W-S 电极的几何参数. 图 4 是实验制作的 W-S 阴极照片, 图中白色表示导体, 黑色表示绝缘体.

4 实验装置

实验装置如图 5 所示, 多丝室的有效面积为 $100 \times 100\text{mm}^2$, 上阴极面由 $100\mu\text{m}$ 镀金钨丝构成, 阳极丝直径 $25\mu\text{m}$, 丝距 4.24mm , 下阴极面 (即 W-S 阴极) 用 2mm 厚的印刷线路板制作. 它的气隙 8mm , 工作气体是 $\text{Ar}(82\%) + \text{CO}_2(18\%)$, 整个丝室安装在一个金属导轨上, 测量用的 X 射线 ($^{55}\text{Fe} 5.92\text{keV}$) 源和准直器固定在阿贝比长仪上. 准直器缝宽 1.5mm , 高度 23mm , 距离阳极丝面 21mm . 位置读出电子学由两部分组成. 阳极信号经快放大甄别并延迟后, 与加和甄别后的总阴极信号进行符合, 送入门产生器, 产生 ADC 的开门信号. 三路阴极信号分别经电灵前放, 成形放大, 并延迟后送入 ADC 进行测量. 测量前用精密脉冲发生器对 ADC 刻度.

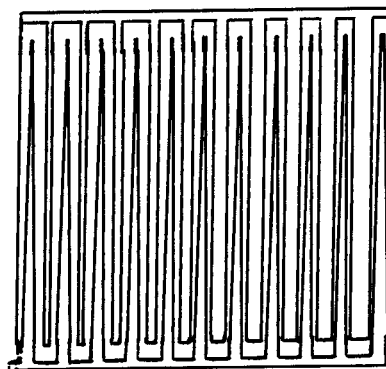


图 4 缩小后的 W-S 阴极面照片

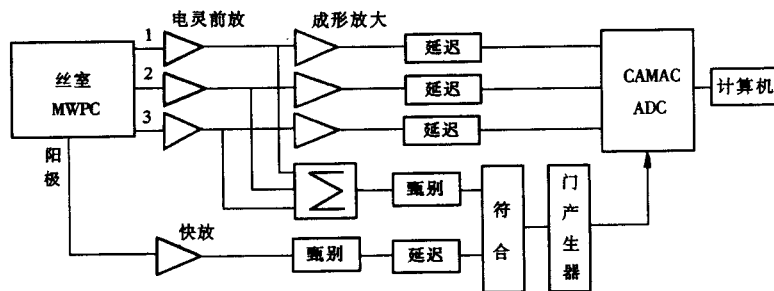


图 5 二维读出电子学系统

5 实验结果

实验为了同时获得两个方向的位置信息, 将准直缝与阳极丝成一角度, 测量时等间隔垂直于准直缝移动放射源, 每次移动 8mm, 每个位置测量 10000 次.

图 6 为间隔 16mm 的 3 个点的电荷分布图, 图 6(a) 为各点 Q_w (即 x 方向) 的分布图,

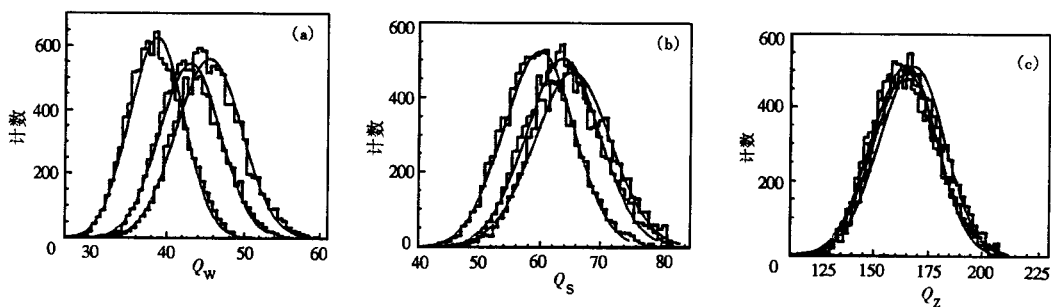


图6 间隔16mm的3个位置的电荷分布图

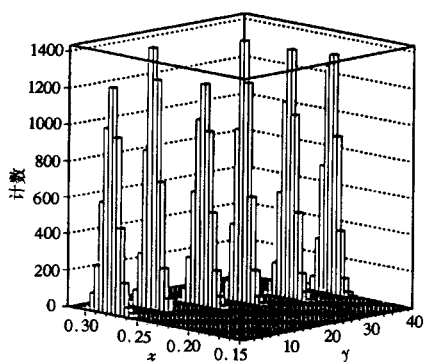


图7 电荷分布的 x , y 方向二维示意图

图 6(b) 为各点 Q_s (即 y 方向) 的分布图, 图 6(c) 为各点总电荷 Q_z 的分布图, 从图上可以看出在 x, y 方向电荷分布随位置而变化, 而总电荷 ($Q_z = Q_w + Q_s + Q_z$) 则基本上保持不变. 图 7 表示的是当放射源沿 y 方向移动时, x 方向的电荷分布. 图 8(a), (b) 分别是准直缝相对阳极丝方向倾角为 80° 时, x 和 y 方向测量得到的相对位置 ($Q_w / Q_s, Q_s / Q_z$) 与实际位置的关系, 两者之间有很好的线性关系, 图 9 给出测量得到的二维位置分布图, 图中坐标均为相对值.

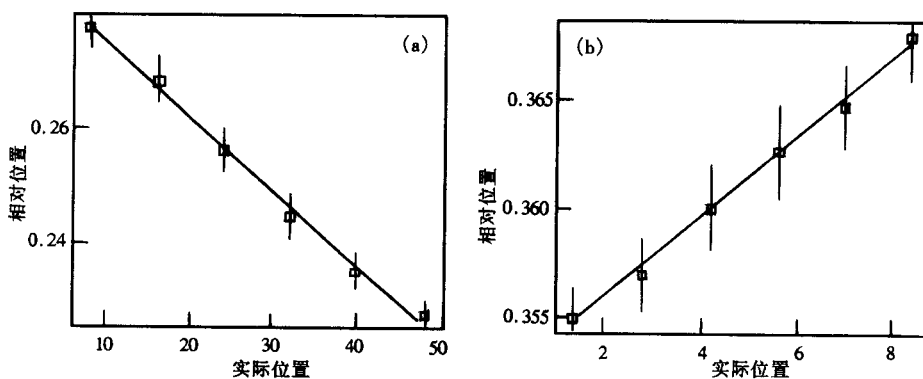


图8 x 和 y 方向测量位置与实际位置关系曲线

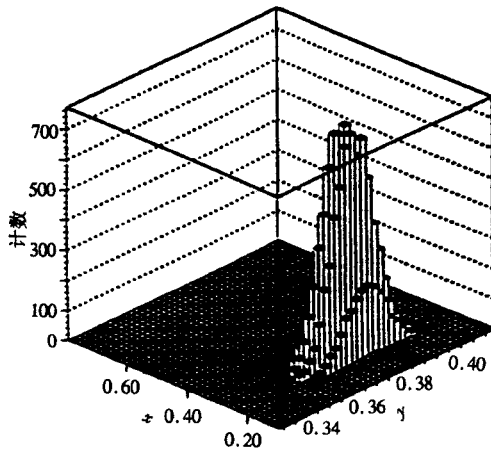


图9. 实验所测单缝的两维位置分布

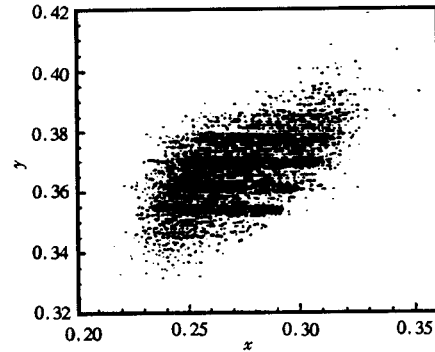


图10 四个单缝的两维图象

为了准确得到 x 和 y 方向的定位精度, 测量时先将准直后的放射源沿 x 方向移动(准直缝平行 y 方向), 在每个位置重复测量 10000 次, 得到 x 方向各个相对位置的平均值 \bar{x} 见表 2.

表 2

放射源位置(mm)	\bar{x}	$\sigma_{\text{Gauss}}/\text{mm}$	$\bar{\sigma}_{\text{Gauss}}/\text{mm}$	σ_x/mm
0	0.2773	1.21		
8	0.2689	1.23		
16	0.2569	1.25	1.28	0.61
24	0.2456	1.30		
32	0.2353	1.33		
40	0.2283	1.34		

其中, σ_{Gauss} 为高斯拟合得到的定位精度, $\bar{\sigma}_{\text{Gauss}}$ 为 6 个位置定位精度的平均值.

为了测量电子学噪声对定位精度的影响, 实验通过不加放射源, 将信号发生器产生的脉冲信号直接输入三路电荷前放的检验端, 重复测量 10000 次, 得到整个电子学噪声在 x 和 y 方向定位精度的贡献, 其中 $\sigma_{\text{电子学}}(x \text{ 方向}) = 0.65\text{mm}$, $\sigma_{\text{电子学}}(y \text{ 方向}) = 0.46\text{mm}$.

放射源缝宽对定位精度的影响是根据放射源到阳极丝面投影的几何分布计算得到, 用梯形分布计算得到 $\sigma_{\text{源宽}} = 0.92\text{mm}$. 最后获得 x 方向的定位精度是:

$$\sigma_x = \sqrt{\bar{\sigma}_{\text{Gauss}}^2 - \sigma_{\text{电子学}}^2 - \sigma_{\text{源宽}}^2} = 0.61\text{mm}$$

将放射源沿 y 方向移动(准直缝平行 x 方向), 用上面同样的方法可以得到 $\bar{\sigma}_{\text{Gauss}} = 1.40\text{mm}$, 并且 $\sigma_y = 0.95\text{mm}$.

图 10 给出了沿 y 方向每 3mm 移动一次放射源, 移动 4 个位置, 测量得出的 4 个单缝图象.

6 结论

理论计算和实验结果显示: W-S 阴极条定位方法的应用于多丝正比室不仅简便可行, 而且这种方法可以对入射粒子在丝室中产生雪崩点位置同时提供二维信息. 在我们的实验条件下, 对放射源自身的几何分布以及电子学噪声带来的误差进行修正后, x 方向定位精度可达 0.61mm, y 方向的定位精度可达 0.95mm. 实验发现由于 W-S 阴极具较大的分布电容, 以及 x 方向与 y 方向的定位存在一定的关联, 限制了定位精度的提高.

参 考 文 献

- 1 Charpak G et al. Nucl Instr Meth, 1979, 167:455
- 2 Lapington J S, Schwarz H E et al. IEEE T. Nucl. Sci, 1986, 33:288
- 3 Anger H O, Martin C et al. Rev. Sci. Instrum, 1981, 52:1067
- 4 Lapington J S, Smith A D et al. IEEE T. Nucl. Sci, 1987, 34:431
- 5 李澄, 陈宏芳等. 第 7 届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集. 1994. 259

Two Dimension Readout Method for MWPC With W-S Cathode Strip*

Li Cheng Chen Hongfang Le Yi Zheng Hai Wang Qing

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract The distribution of induced charge of MWPC's W-S cathode was calculated in detail. A $100 \times 100\text{mm}^2$ MWPC prototype with W-S cathode was made. The localization resolution of MWPC was measured with ^{55}Fe X ray and the two-dimension image of incident X ray was obtained.

Key words MWPC, W-S (Wedge-Strip) cathode, two-dimension readout

Received 4 May 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19755001)