

文章编号: 1007-4627(2017)03-0591-07

基于 LC 延迟电路的双层多丝正比室的研制

张兴^{1, 2}, 胡荣江^{1, †}, 鲁辰桂¹, 杨贺润¹, 马朋^{1, 3}, 张俊伟^{1, 3}, 关远帆^{1, 3},
魏向伦^{1, 3}, 段利敏¹, 王建松¹, 郑勇¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 描述了为兰州放射性粒子束流线(RIBLL II)上测量束流径迹而研制的一种基于 LC 延迟电路的双层多丝正比室(MWPC)。该探测器的探测灵敏面积为 100 mm×80 mm, 位置信号由阴极丝引出并通过 LC 延迟电路读出。探测器由两套完整的多丝正比室组成, 每套的阳极丝夹在两层平行的阴极丝之间, 阳极丝和阴极丝相互垂直。两套阴极丝相互垂直给出入射粒子的二维位置信息。为了增大感应信号以提高探测效率, 将每套位置对应的阴极丝合并成一路接入 LC 延迟电路。用 ⁵⁵Fe-5.9 keV X 射线源均匀照射探测器的灵敏区域, 测试表明其具有良好的位置灵敏一致性。用 X 射线源通过准直狭缝扫描整个探测器的灵敏区域, 得到 X, Y 层的位置线性度均好于 0.999; 其位置分辨(σ)分别为 199.9 μm 和 154.0 μm , 目前, 该探测器已成功用于 RIBLL II 的实验中。

关键词: 双层多丝正比室; LC 延迟电路; 位置灵敏一致性; 位置线性度; 位置分辨

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.591

1 引言

放射性离子束的产生为核科学实验研究开辟了广阔的领域, 在核物理实验中在靶前对束流包络、径迹以及靶后反应产物粒子飞行角度的测量通常会用到多丝正比室(MWPC)^[1-5]。多丝正比室的信号读出通常会用到以下两种方法: 逐丝信号读出和延迟信号读出^[6-8]。逐丝信号读出方法的优点是能很好地保持探测器的定时性能和高的计数率, 但是此方法每根丝需要一路电子学, 使得所需的电子学路数庞大, 电子学设备复杂。为了减少多丝正比室信号读出所需电子学的路数, 我们多采用延迟信号读出的方式, 用时间数字转换器(TDC)^[9]记录延迟电路两端信号的时间, 位置由两端信号的时间差值确定。之前我们研制的多丝正比室的信号多采用 Date Delay Device (3D) 公司的商用延迟块^[10]进行延迟。但是经过使用后我们发现 2 个 3D 延迟块的连接处延迟时间不均匀, 造成此现象的主要原因是连接处缺少一个和 3D 延迟块中匹配的电感器, 如果增加一个电感器就必须考虑与 3D 集成延迟块中电感器之间的互感效应, 这在延迟电路的制作工艺上也存在着困难。为了解决此问题我们重新设计了 LC 延迟电路^[11, 12] (见图 1)

来替代原来所用的 3D 延迟块进行信号延迟读出。LC 延迟电路采用的是 95 nH 的铁氧体芯绕线贴片电感器^[13]和 39 pF 的多层陶瓷电容器^[14]焊接在设计电路板上。每个延迟单元的特征阻抗为 49.35 Ω , 接近 50 Ω , 延迟时间的计算值为 1.925 ns, 实验测试值为 2.070 ns。



图 1 (在线彩图) 设计的 LC 延迟电路实物图

本文在第二部分具体描述探测器的结构和工作原理; 第三部分呈现探测器测试的结果并对测试结果进行分析, 其中包括实验设置、电子学获取系统、时间和位置信号、测量灵敏度的一致性、X、Y 层各自的位置分辨、测量位置线性度等方面的内容; 第四部分给出总结。

2 探测器的结构和工作原理

基于 LC 延迟电路的双层多丝正比室置于一个大小

收稿日期: 2016-12-08; 修改日期: 2017-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11375246, 11405223, 11375238), 国家重点基础研究计划(973 计划)(2014CB845405)

作者简介: 张兴(1988-), 男, 甘肃庄浪人, 硕士, 从事气体探测器的研制; E-mail: gslxyzx@126.com

† 通信作者: 胡荣江, E-mail: hurj@impcas.ac.cn.

为 230 mm×175 mm×60 mm 的铝合金屏蔽壳内。入射窗和出射窗均为 12.5 μm 厚的双面镀铝的 kaptom 膜，盖板与壳体之间通过橡胶 O 圈密封。探测器信号由壳体上的 6 个 Lemo 插座(用于时间信号 T_x 、 T_y 和位置信号 x_1 、 x_2 、 y_1 和 y_2) 引出， T_x 、 T_y 取自 X、Y 层的阳极层， x_1 、 x_2 取自 X 层阴极， y_1 、 y_2 取自 Y 层阴极。X、Y 层的阳极丝上的高压通过 SHV 高压头施加。

双层多丝正比室的芯体结构如图 2 所示，上、下是 X、Y 两套独立的多丝正比室。每套由两个阴极丝面和一个阳极丝面组成，两层阴极丝平行放置，阳极丝与阴极丝垂直并夹在阴极丝面之间，阳极丝平面与阴极丝平面的间距为 4 mm，X、Y 层的阴极丝相互垂直。X、Y 层之间垫两张 2 mm 厚的环氧树脂垫片以减少彼此电场对电子-正离子对漂移的影响。阳极是由丝径为 15 μm 的镀金钨丝加 35 g 张力布成，丝距为 3 mm，通过滤波电路给阳极丝提供高压，同时通过耦合电路引出时间信号。阳极给出的时间信号主要用作符合测量信号和数据获取系统的触发信号。阴极丝面是由丝径为 30 μm 的不锈钢丝加 35 g 张力布成，丝距为 0.5 mm。每四根丝并成一路焊接在阴极丝框架上，为了增大感应信号，我们将上下位置对应的阴极丝(8 根) 合并成一路后接入 LC 延迟电路板上的一个延迟单元。

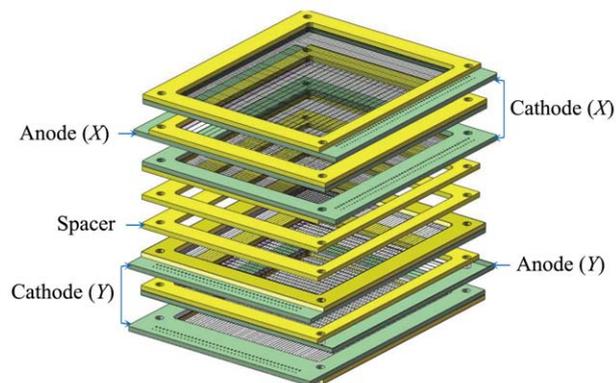


图 2 (在线彩图) 基于 LC 延迟电路的双层 MWPC 内部整个丝框摆放情况示意图

阴极丝是否均匀直接决定了 MWPC 位置测量的准确性^[15]，为此我们对阴极丝分布的均匀性做了测量，测量的结果如图 3 所示。图 3(a) 是阴极丝的丝距相对于理论值 0.5 mm 的偏差，从图中我们可以看出除少量阴极丝外，大部分的阴极丝丝距的主要偏差范围分布在 -40 ~ 40 μm 之间。图 3(b) 是测到的丝距偏差的分布，通过高斯拟合得到偏差分布的半高宽 (FWHM) 为 52.4 μm，其中包括了测试者的操作误差。总之，所布阴极丝的丝距是相对比较均匀的。

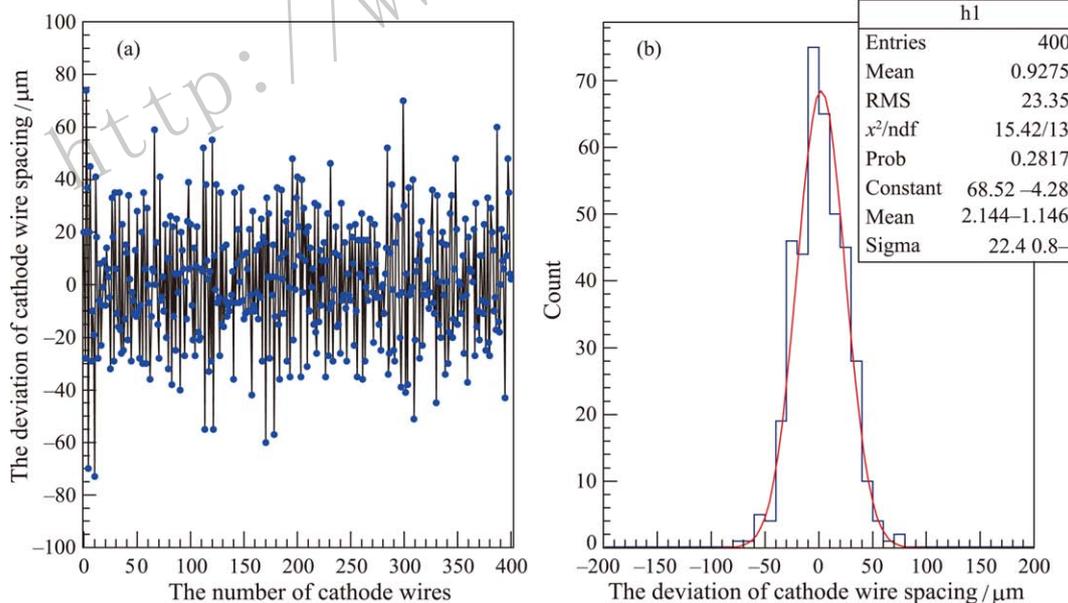


图 3 (在线彩图) 阴极丝的丝距的偏差 (a) 及所测丝距偏差的分布情况 (b)

3 探测器的性能测试

3.1 性能测试的实验设置

我们对组装好的基于 LC 延迟电路的 MWPC 进行系统的性能测试，测试时的实验设置具体情况如图 4 所

示。⁵⁵Fe-5.9 keV X 射线源通过宽度为 200 μm，高度为 35 mm 的狭缝照射到探测器上，X 射线到探测器丝平面的平均距离如图所示，红色点画线表示 X 射线到探测器丝平面的角度范围(Ω)，源照射立体角与狭缝的宽度相关。下半部分是探测器的放置情况，具体尺寸已

在图中标出。测试时, MWPC在流气方式下工作, 所用的工作气体是按照体积 4:1 比例配制的氩气 (Ar) 和二氧化碳 (CO₂) 混合气体, 通过自动稳压控制系统进行输送。

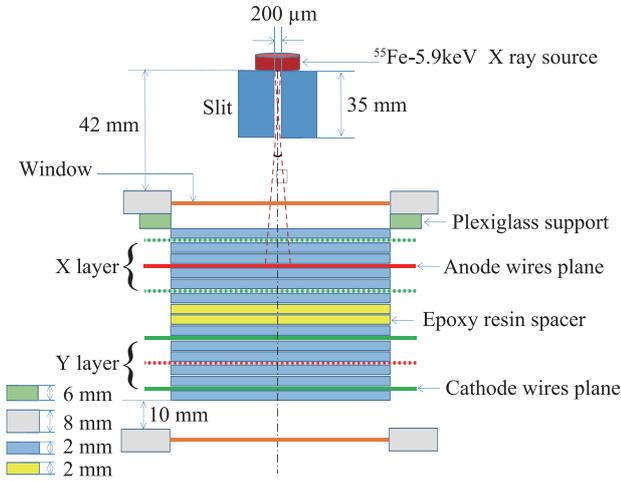


图 4 (在线彩图) 基于 LC 延迟电路的 MWPC 测试实验装置示意图(为了呈现清楚测试时实验设置的具体情况, 没有按照实验装置尺寸的实际比例绘制)

3.2 电子学及获取系统

MWPC 信号电子学电路及获取系统如图 5 所示。由高压插件 (HV CAEN Mod. N472) 给 X、Y 层阳极丝提供相应的高压。两层阳极丝分别引出的时间信号通过快时间放大器 (FTA810) 放大, 紧接着被恒比甄别器 (CF8000) 甄别产生逻辑信号, 然后通过逻辑单元 (CO4020) 逻辑符合作为 16 通道 TDC 的触发信号。从 X、Y 层延迟电路两端引出的位置信号先通过 FTA810 放大, 然后被 CF8000 甄别产生逻辑信号, 连同两路时间信号经过逻辑延迟 (DL8000) 做延迟调整后一并送入 TDC 通过 CAMAC 机箱来获取数据。

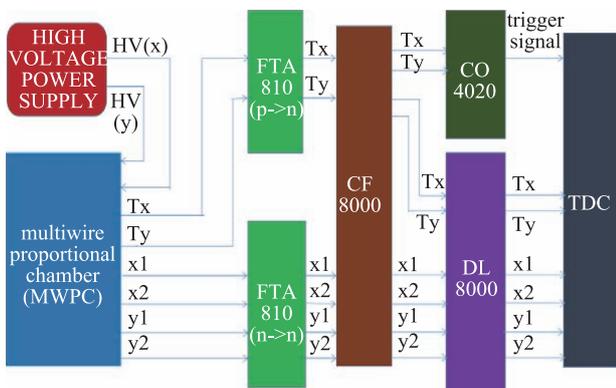


图 5 (在线彩图) LC 延迟电路位置信号读出对应的电子学示意图

3.3 时间信号和位置信号

搭建好电子学获取系统后, 给 X、Y 层阳极丝分别加相应的高压。在没有狭缝的情况下让 X 射线源均匀照射探测器的整个灵敏区域, 信号经过快时间放大器 FTA810 放大后, X、Y 层对应的时间信号和位置信号分别在示波器上的信号如图 6 所示。左图中的信号从上到下分别表示 X 层阳极丝引出的时间信号 T_x , 阴极丝对应的延迟电路两端引出的位置信号 x_1, x_2 。右图中的信号从上到下分别表示 Y 层阳极丝引出的时间信号 T_y , 阴极丝对应的延迟电路两端引出的位置信号 y_1, y_2 。两图中的时间信号 (T_x, T_y) 的信号上升沿时间小于 5 ns, 幅度约为 500 mV, 位置信号 (x_1, x_2, y_1, y_2) 的信号上升沿时间小于 15 ns, 幅度接近 200 mV。

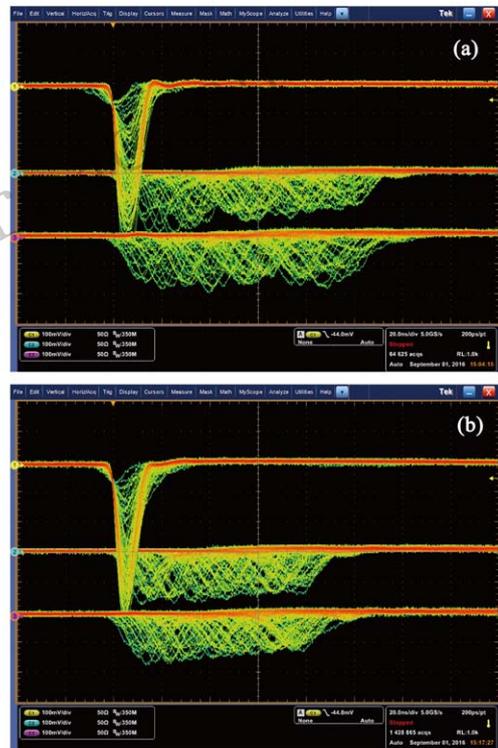


图 6 (在线彩图) X 层对应的时间信号 (T_x) 和位置信号 (x_1, x_2)(a) 和 Y 层延相应的时间信号 (T_y) 和位置信号 (y_1, y_2)(b)

3.4 位置灵敏一致性

为了便于比较, 在相同的条件下, 我们用 X 射线源分别均匀照射基于 LC 延迟电路和 3D 延迟块电路的两个双层 MWPC 的灵敏区, 得到两个探测器的位置谱分别如图 7, 8 所示。可以看出, 基于 LC 延迟电路 MWPC 的位置灵敏一致性明显好于基于 3D 延迟块电路的 MWPC。图 8 中探测器位置灵敏的不均匀性, 明显

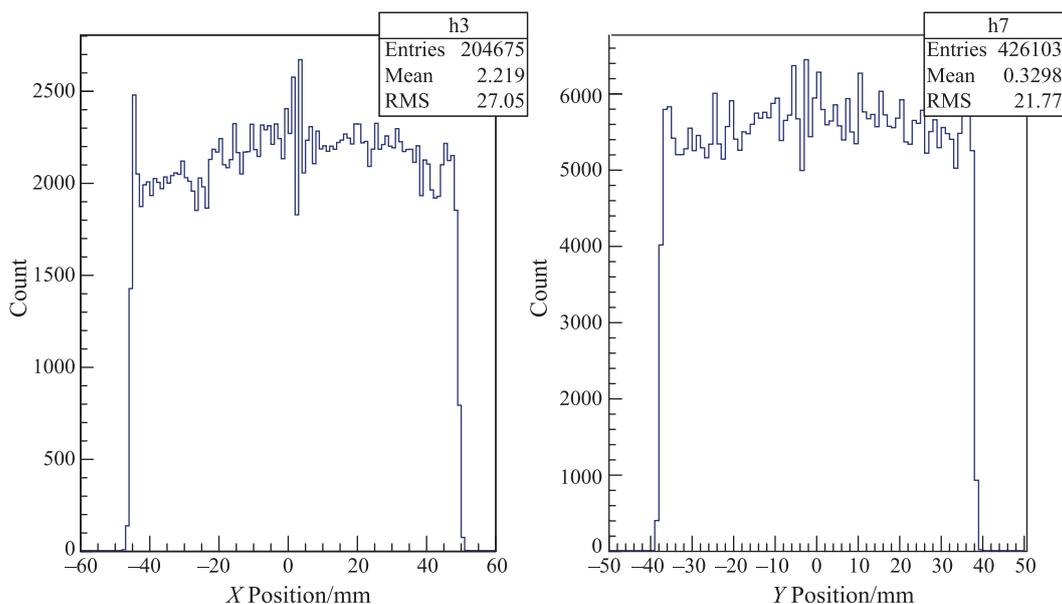


图 7 基于 LC 延迟电路双层 MWPC 对应 X, Y 层位置谱

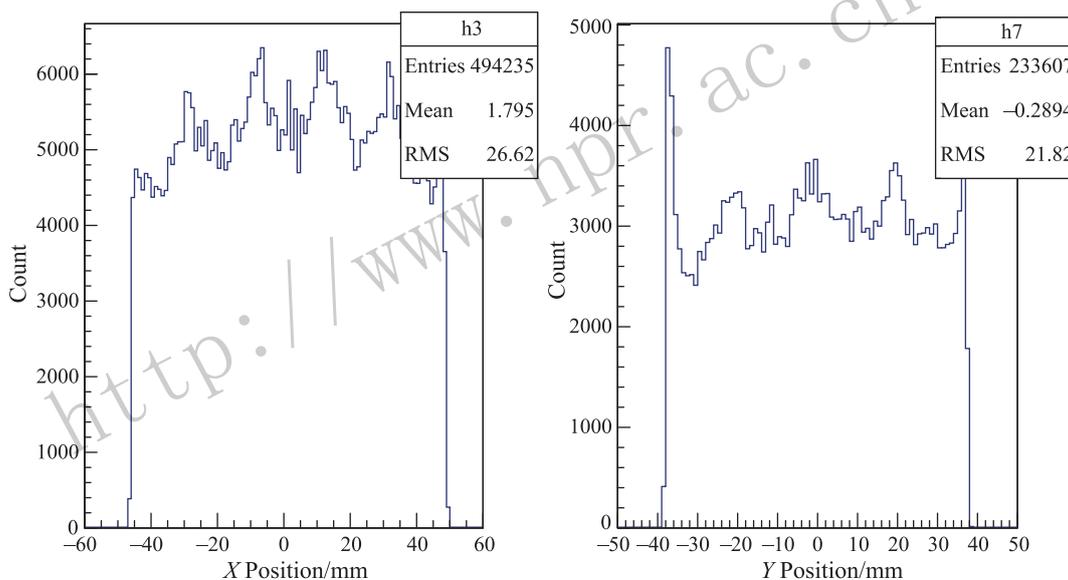


图 8 以 3D 延迟块做信号延迟读出的双层 MWPC 对应 X, Y 层位置谱

反映了两个 3D 延迟块连接处电容、电感不匹配的问题，而我们研制的 LC 延迟电路很好地解决了此问题。

3.5 X 和 Y 方向的位置分辨

位置分辨和位置线性度是多丝正比室的性能测试的重要方面。为了测量探测器的位置分辨^[16]和位置线性度，我们用源通过 200 μm 的狭缝扫描探测器。设定狭缝移动的步长为 1.20 mm，分别扫描 X 和 Y 层对应的整个灵敏面积，X 层的扫描范围为 -50~50 mm，Y 层的扫描范围为 -40~40 mm。每扫描一步停留时间设定

为 200 s。得到 X 和 Y 层的扫描位置谱^[6]如图 9, 10 所示，从图 9 和 10 中可以很清楚分辨扫描的每一步的位置谱。扫描谱的本底有些高的主要原因是由于扫描设置的步长小，狭缝宽度只有 200 μm，单位时间计数少，每步停留时间 (200 s) 相对较长，要扫描整个灵敏区域所需时间长，宇宙射线等其他噪声长时间内叠加所致。对 X, Y 层所测位置进行线性拟合得到 X, Y 层测量位置的线性度^[3](如图 11, 12 所示)皆好于 0.999。X, Y 层测量位置残差分别主要分布在 ±0.3 mm, ±0.2 mm 范围内。

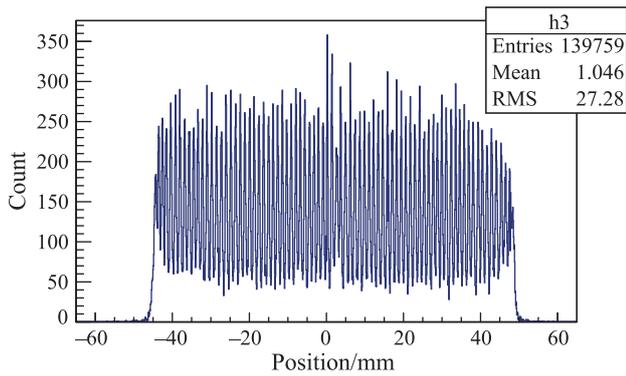


图 9 基于 LC 延迟电路的双层 MWPC 的 X 层扫描位置谱

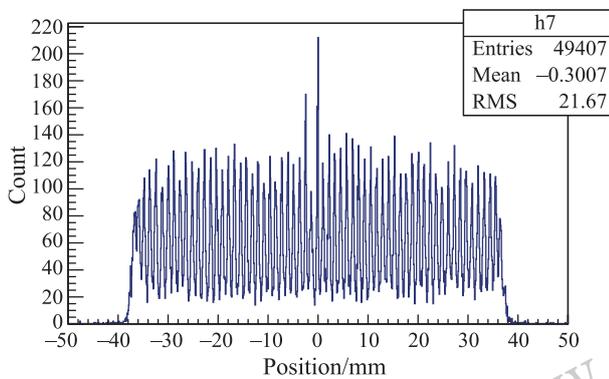


图 10 基于 LC 延迟电路的双层 MWPC 的 Y 层扫描位置谱

在 X 层扫描位置谱中任意选取一个峰(如图 13 (a)所示)对其进行高斯拟合得到位置分辨(σ_{det})为 225.9 μm 。应用蒙特卡罗方法模拟狭缝对探测器位置分辨的影响(如图 13 (b)所示),扣除狭缝宽度、高度等几何布局对位置分辨的贡献(σ_{slit})为 105.2 μm ,得到 X 层的本征位置分辨(σ_{int})为

$$\sigma_{int} = \sqrt{\sigma_{det}^2 - \sigma_{slit}^2} \doteq 199.9 (\mu\text{m})。 \quad (1)$$

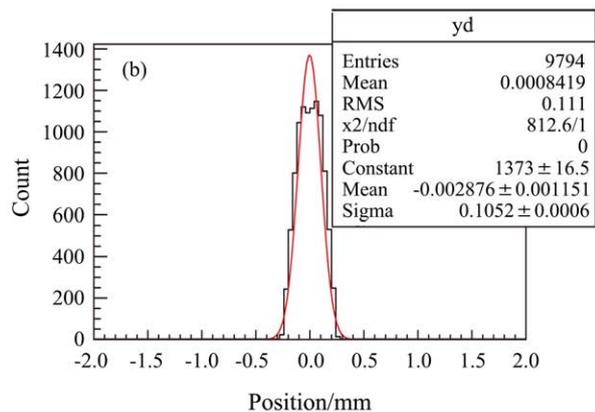
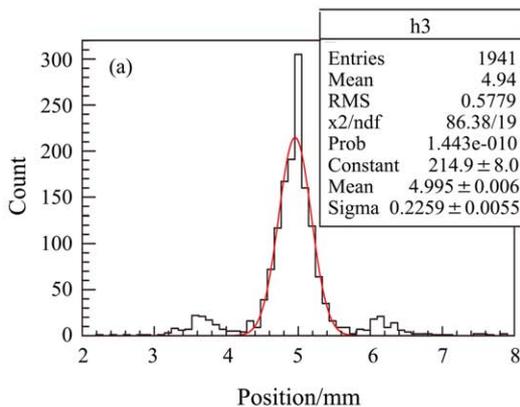


图 13 (在线彩图) X 层扫描位置谱中任意选取一个峰 (a) 和模拟得到宽度为 200 μm 狭缝对 X 层位置分辨的影响 (b)

同样地在 Y 层扫描位置谱中任意选取一个峰(如图 14 (a)所示)得到位置分辨(σ_{det})为 201.2 μm ,模拟狭缝对位置分辨的影响(σ_{slit})为 129.5 μm (如图 14 (b)所示)得到 Y 层的本征位置分辨(σ_{int})为 154.0 μm 。

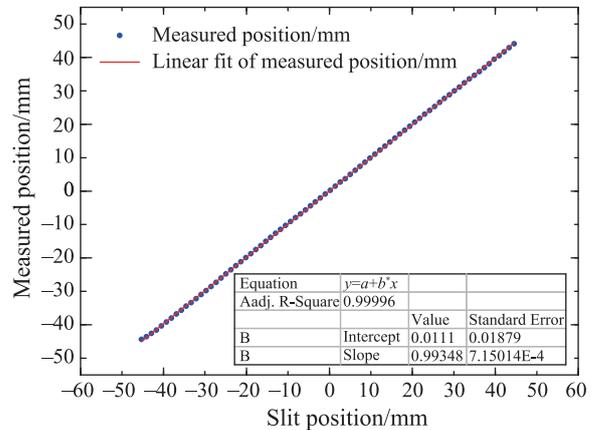


图 11 (在线彩图) 基于 LC 延迟电路双层 MWPC 对应 X 层测量位置线性度

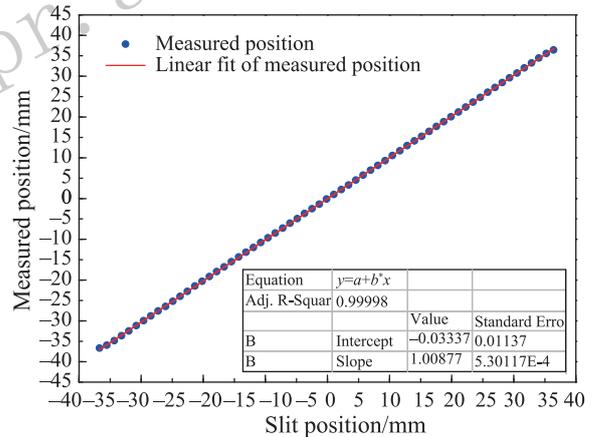


图 12 (在线彩图) 基于 LC 延迟电路双层 MWPC 对应 Y 层测量位置线性度

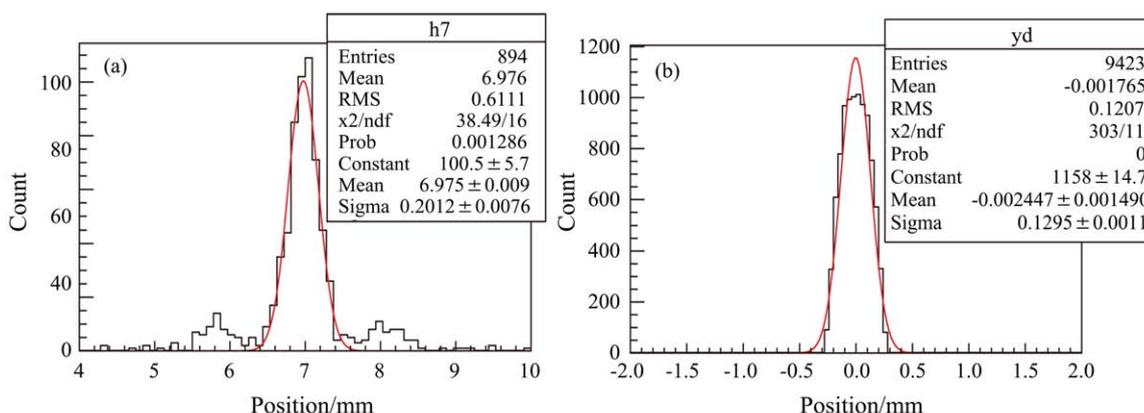


图 14 (在线彩图) Y 层扫描位置谱中任意选取一个峰 (a) 和模拟得到宽度为 $200\ \mu\text{m}$ 狭缝对 Y 层位置分辨的影响 (b)

4 结论

以上具体描述了基于 LC 延迟电路双层 MWPC 的研制和性能测试的内容, 研制的探测器灵敏面积为 $100\ \text{mm} \times 80\ \text{mm}$, 采用 LC 延迟电路作为延迟读出方法。之所以称双层多丝正比室是因为由两套完整的 MWPC 组装而成, 每套的阳极丝平面夹在两层阴极丝中间, 阳极丝和对应的阴极丝相互垂直。为了提高探测器的探测效率, 每套上下两层阴极丝平面对应位置的阴极丝相互连接以增强感应信号。通过以上测试得到基于 LC 电路延迟电路双层 MWPC 的测量位置灵敏一致性明显好于用 3D 延迟块做信号读出的 MWPC。在 X , Y 方向利用狭缝扫描得到测量位置的线性度皆好于 0.999, 探测器的 X , Y 方向对应的位置分辨分别为 199.9 , $154.0\ \mu\text{m}$ 。目前, 该探测器已用于 $350\ \text{MeV/u}$ $^{40}\text{Ar} + \text{Be}$ 实验中, 成功地对靶后产生的次级粒子进行了径迹测量, 数据分析正在进行中。

参考文献:

- [1] CHARPAK G, BOUCLIER R, BRESSANI T, *et al.* Nucl Instr Meth, 1968, **62**: 262.
- [2] BRESKIN A. Nucl Instr Meth, 1982, **196**: 11.
- [3] TANG Shuwen, XU Hushan, MA Peng, *et al.* Chinese Physics C, 2013, **37**(6): 066002.
- [4] ZHANG Junwei, LU Chengui, DUAN Limin, *et al.* Chinese Physics C, 2014, **38**(2): 026004.
- [5] MORRIS C L, BOWLES T J, GONZALES J, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2009, **599**: 248.
- [6] HAN Liying, LI Qite, FAISAL Q, *et al.* Chinese Physics C, 2009, **33**(5): 364.
- [7] KUMAGAI H, OHNISHI T, FUKUDA N, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2013, **317**: 717.
- [8] Kumagai H, Ozawa A, Fukuda N, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2001, **470**: 562.
- [9] Available on the web <http://phillipsscscientific.com/pdf/7186ds.pdf>
- [10] Available on the web <http://www.datadelay.com>
- [11] ZHOU Yi, LI Cheng, SUN Yongjie. Nucl Instr Meth A, 2009, **604**: 71.
- [12] GUEDES G P, BRESKIN A, CHECHIK R. Nucl Instr Meth A, 2003, **513**: 473.
- [13] Available on the web <http://uk.rs-online.com/web/p/wire-wound-surface-mount-inductors/4811911P/>
- [14] Available on the web <http://au.rs-online.com/web/p/ceramic-multilayer-capacitors/7235903P/>
- [15] SMITH G C, YU B. IEEE Trans on Nucl Sci, 1995, **42**(4): 541.
- [16] CHARPAK G, SAULI F. Nucl Instr Meth, 1979, **162**: 405.

Study of Double-Layer Multi-Wire Proportional Chamber Based on LC Delay Circuit

ZHANG Xing^{1,2}, HU Rongjiang^{1,†}, LU Chengui¹, YANG Herun¹, MA Peng^{1,3}, ZHANG Junwei^{1,3}, GUAN Yuanfan^{1,3}, WEI Xianglun^{1,3}, DUAN Limin¹, WANG Jiansong¹, ZHENG Yong¹

- (1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A double-layer Multi-Wire Proportional Chamber (MWPC) with 100 mm × 80 mm active area has been developed for Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou(RIBLL II). The position information has been obtained by a LC delay circuit readout method. Being called of double-layer MWPC, it is composed of two full MWPCs, each consists of an anode plane sandwiched between two parallel cathode planes, anode wires and cathode wires are perpendicular to each other. In order to improve the detection efficiency, the cathode wires of corresponding position are combined to enhance inductive signal. The cathode wires of two full MWPCs are orthogonally placed to give two coordinates of the incident particles. The sensitivity uniformity is also found to be relatively good and the position resolution of X, Y direction are measured to be 199.9 and 154.0 μm using a ⁵⁵Fe-5.9 keV X ray, respectively. The position linearity of X, Y direction are as good as 0.999 for whole sensitive area of the detector. The detector has been used successfully on the experiment at RIBLL II.

Key words: Double-Layer Multi-Wire Proportional Chamber; LC delay circuit; position sensitivity uniformity; position linearity; position resolution

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 8 Dec. 2016; **Revised date:** 23 Apr. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11375246, 11405223, 11375238); National Basic Research Program of China (973 Program) (2014CB845405)

† **Corresponding author:** HU Rongjiang, E-mail: hurj@impcas.ac.cn.