

用位置灵敏光电倍增管读出的 CsI(Tl)探测器*

秦礼军 詹文龙 郭忠言 肖国青 孙志宇
李加兴 孟祥伟 江山红 王金川 王全进

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 报道了用二维位置灵敏光电倍增管读出的 CsI(Tl)探测器。其 CsI(Tl)晶体厚度为 10mm, 灵敏面积为 60mm × 60mm。探测器的空间位置分辨为 0.81mm(FWHM)。用蒙特卡罗的方法对该探测器作了进一步模拟研究, 其结果与实际测试的结果很好地一致。

关键词 CsI(Tl)闪烁探测器 位置灵敏光电倍增管 位置分辨 蒙特卡罗模拟

1 引言

近年来,位置灵敏探测器在原子核物理学、粒子物理学、天文学、核医学和无损材料检测等学科中得到了广泛的应用。随着这些学科的飞速发展,对位置灵敏探测器的性能要求越来越高,根据在这些学科中具体的要求和相应的应用特点,发展了多种测量位置信息的技术和探测器件,如光电倍增管阵列闪烁探测器^[1,2],位置灵敏多丝正比室、雪崩室和漂移室^[3-5],位置灵敏半导体探测器及半导体探测器阵列^[6,7],微条结构半导体探测器^[8],闪烁探测器阵列^[9],光纤排阵探测器^[10]等。通常光电倍增管阵列闪烁探测器的空间分辨最好可以达到几个毫米,多丝正比室和雪崩室的空间分辨率可以小于 0.5mm,位置灵敏半导体探测器位置分辨率好于 1mm,光纤矩阵探测器空间分辨率约 0.25mm,而漂移室和微条结构半导体探测器的位置分辨可以达到几十微米。半导体探测器阵列和闪烁探测器阵列的能量分辨率很好,但其空间分辨却受到探测器阵列中单个探测单元的尺度限制。并且与之相连的复杂电子学系统,给构造和运行这类探测器带来了较大的困难。位置灵敏半导体探测器和微条结构半导体探测器的几何尺寸较小,不能胜任较大面积位置探测。气体探测器需要价格昂贵的工作气体和稳压稳流系统,操作也较复杂。近十几年来,随着光电倍增管技术的巨大进步,已研制出可测量位置信息的位置灵敏光电倍增管(PSPMT)和多

1998-06-26收稿

* 国家自然科学基金资助(19675055, 19505006)

阳极光电倍增管. 这就使人们能研制出结构简单, 且具有较好的能量分辨和优异的位置分辨的闪烁探测器^[11-14].

本文报道了由 CsI(Tl) + PSPMT 构成的双维位置灵敏闪烁探测器. 它是兰州重离子加速器放射性次级束流线装置(RIBLL)上探测器系统的一部分, 放在 RIBLL 的最后聚焦点上. 因为次级束(RIB)引起的实验对 RIB 在次级靶上的聚焦要求很高, 利用该种探测器的优异的空间位置分辨能力, 可以很好地测出 RIB 束斑的尺寸、位置和密度分布. 同时, 它也可以作为 RIBLL 在最后焦点上的剩余能量探测器 E_r 和能量损失探测器 ΔE , 利用原理 $\Delta E \times E \propto MZ^2$ 鉴别 RIB 离子.

2 探测器的结构和原理

双维位置灵敏闪烁体探测器主要有一块面积为 $70\text{mm} \times 70\text{mm}$, 厚度为 10mm 的

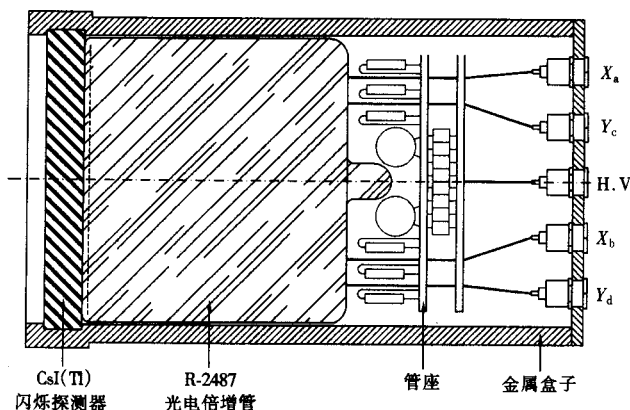


图1 位置灵敏CsI(Tl)的结构示意图

H·V表示高压电源

CsI(Tl)闪烁体, 闪烁体的前表面和后表面被仔细抛光, 前表面和侧面用 $6\mu\text{m}$ 的铝箔包裹, 以便提高光收集效率; 后面被直接耦合到双维位置灵敏光电倍增管 R-2487 (Hamamatsu) 的光阴极上, R-2487光阴极的有效面积为 $60\text{mm} \times 55\text{mm}$. 该探测器的结构如图 1 所示; CsI(Tl)闪烁体和光电倍增管放在具有 $65\text{mm} \times 60\text{mm}$ 前窗的金属盒子中.

PSPMT的阳极由 18×17 根丝矩阵构成, 其中 X 方向有 18 根丝, Y 方向有 17 根丝. 每个方向的丝都与一个外接电阻链连接起来, 从两端分别引出信号 X_a, X_b, Y_c, Y_d . 阳极收集到的电荷在每根电阻链的两端被分配, 电子云团的重心就表示了闪烁事件所产生的光子的重心, 即入射离子的位置. 因此入射离子的位置和能量 (X, Y, E) 可由阳极输出的 4 个信号按如下公式推得¹⁾

1) Position-Sensitive Photomultiplier Tube Type R2487 ($3'' \times 3''$), Technical Information (R2487-02), Hamamatsu Photonics K. K.

$$X = \frac{X_a - X_b}{X_a + X_b}, \quad Y = \frac{Y_c - Y_d}{Y_c + Y_d}, \quad E = X_a + X_b + Y_c + Y_d.$$

在实际工作中, 我们采用的电子学线路如图 2 所示.

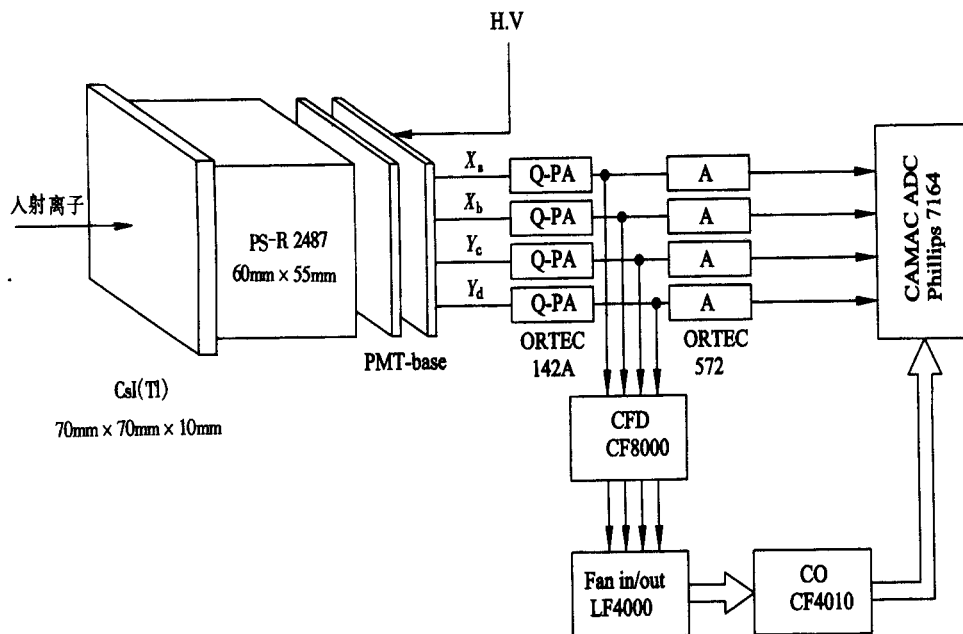


图 2 二维位置灵敏光电倍增管读出的 CsI(Tl) 闪烁探测器及电子学框图

CsI(Tl) 碘化铯(铊)闪烁探测器,

Q-PA 电荷灵敏前置放大器,

A 主放大器,

CFD 恒分甄别器,

Fan in/out 扇入/扇出,

PS-R2487 二维位置灵敏光电倍增管,

CO 成形线路,

ADC 幅度-数字变换器.

3 探测器的位置分辨测量测试结果

我们在 RIBLL 上用 $50\text{MeV}/u^{18}\text{O}+\text{Be}$ 反应, 产生并分离出次级放射性核束 ^{17}N . ^{17}N 的能量为 $32\text{MeV}/u$. 用 ^{17}N 对探测器的性能进行了测量. 图 3(a) 和图 3(b) 分别为用 CsI(Tl) 在 RIBLL 最后焦点 T_2 测量得到的 ^{17}N 束斑二维等高图和一维密度分布图.

为了精确得知其位置分辨率, 在 CsI(Tl) 晶体前面加栅网状准直器, 网孔的直径为 1.0mm , 两个网孔的中心距为 5mm . 测量得到的 RIB ^{17}N 的二维分布图如图 4(a) 所示, 向 X 轴投影得到图 4(b) 所示的一维位置分布谱, 最后得到 X 和 Y 方向的位置分辨均为 0.81mm .

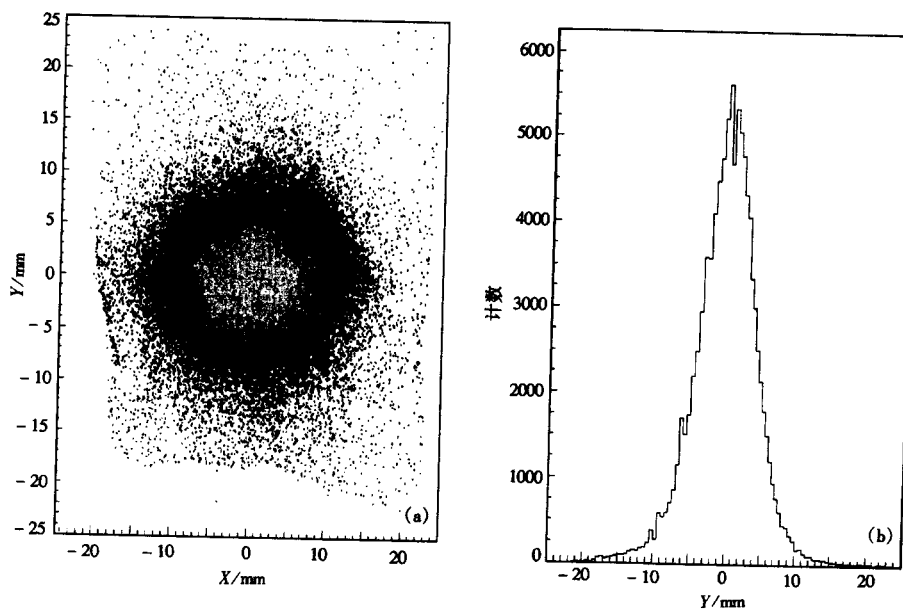


图 3 PS-PMT读出的 CsI(Tl)闪烁探测器在 RIBLL 的焦点 T_2 测量的 ^{17}N 束流分布
(a) ^{17}N 的二维等高图; (b) ^{17}N 的一维密度分布谱.

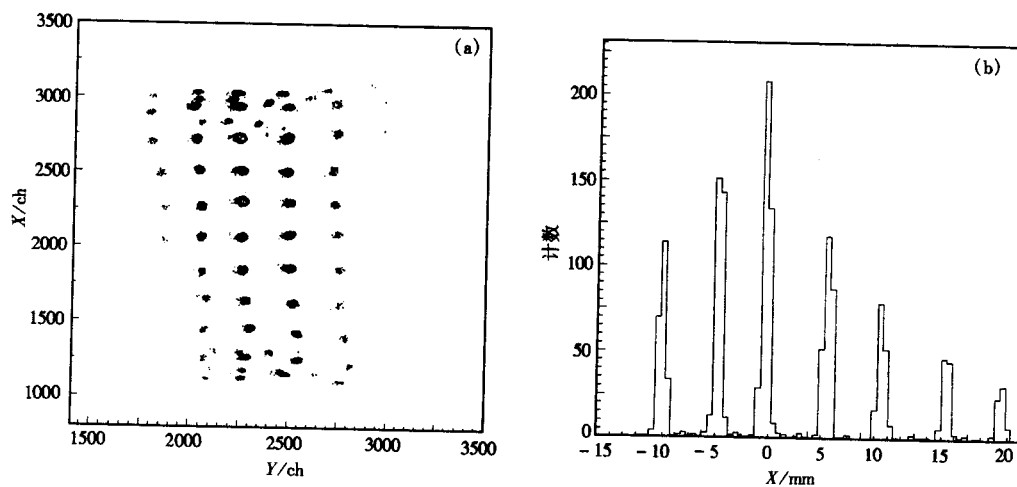


图 4 加网孔后位置灵敏 CsI(Tl)测量的 ^{17}N 的位置图谱
(a) RIB ^{17}N 的二维等高图; (b) 在一排小孔加窗、向 X 轴投影图的位置谱.

4 Monte-Carlo模拟计算

针对 CsI(Tl)探测器具体情况,我们编写了 Monte-Carlo程序,目的是模拟计算并与实验结果进行对比,也为以后探测器的改进工作提供一些依据.

模拟方法如下: 首先对 ^{17}N 在直径为 1.0mm 的准直孔内的人射位置作均匀抽样, 假设粒子在径迹上产生的光子数目正比于粒子的能损率. 把 ^{17}N 粒子的径迹分割为若干小段, 以每段的中心为发光点, 对该点发射的每个光子进行跟踪, 判断光子能否打在 PSPMT 光阴极的有效面积上, 如果能, 则记录下光子的 X, Y 坐标, 然后通过重心法, 计算出粒子的人射坐标. 对小孔内粒子作 20 万次模拟, 用重心法计算出每个粒子的人射位置, 最后对位置谱进行 GAUSS 拟合, 得出该探测器的位置分辨率.

模拟得到的空间分辨率 ($FWHM$) 为 0.78mm. 实验测量结果为 0.81mm. 模拟计算和实验测量结果仅相差 0.03mm, 可以说符合得很好. 分析 0.03mm 差别原因如下:

(1) 光在 CsI(Tl) 晶体内传输, 除了发射角小于全反射角的光子可能直接打在光阴极的有效面积上外, 经过多次反射和漫反射的光子也有可能打在光阴极的有效面积上. 但在模拟时没有考虑这样的情况. 实际上 CsI(Tl) 晶体表面有意钝化处理, 表面包的铝箔作为反射材料, 其反射性能也较差, 其中模拟时认为光子经一次反射就被 CsI(Tl) 晶体吸收的几率约为 0.5, 且全是镜面反射, 这一假定与实际有差异.

(2) 模拟时, 没有考虑阳极电流放大倍数的变化对 PSPMT 位置分辨的影响, 将典型的放大倍数 1.0×10^5 看成不变常数. 实际实验中它会有有一定的波动.

(3) 模拟时也认为 RIB ^{17}N 的能量都为 32MeV/u. 实际上 ^{17}N 的能量有一定的离散, 这样在 CsI(Tl) 晶体内发光的路径长度上也会有一些离散.

(4) 模拟时认为准直孔的直径为 1.0mm, 没有考虑到由于加工时公差对准直孔径的影响.

这些因素都可能影响 PSPMT 的位置分辨, 引入某些偏差, 导致实验值大于计算值.

5 结果与讨论

总的来说, 我们研制的双维位置灵敏闪烁探测器 CsI(Tl) + PSPMT, 有较高的位置分辨率 ($FWHM = 0.81\text{mm}$), 较大的面积 ($60\text{mm} \times 55\text{mm}$), 较强的抗辐射能力, 且电子学和运行操作相对简单, 性能稳定. 为 RIBLL 的高效率运行发挥了积极的作用.

与双维位置灵敏半导体探测器相比, 它的体积和重量都大许多, 时间响应明显地慢, 因此对于有限空间和较高计数率环境, 不能很好使用.

CsI(Tl) 与 PSPMT 的耦合方式决定了它不能作为穿透型位置灵敏探测器, 只能作为全阻止型探测器.

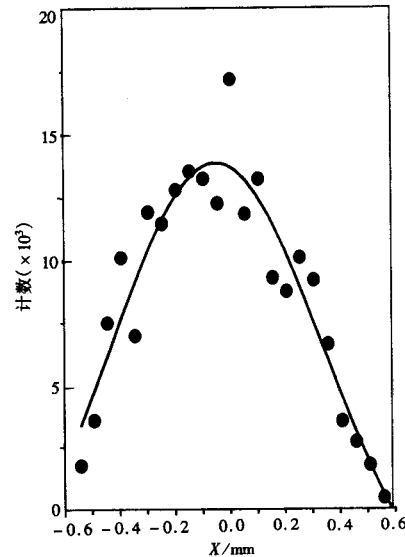


图5 用蒙特卡罗方法模拟得到的位置谱

就灵敏面积和时间性能而言,气体探测器和光纤探测器灵敏面积可以很大,时间特性很好;CsI(Tl) + PSPMT 探测器灵敏面积受 PMT 光阴极尺寸限制,不能制作很大,CsI(Tl) 慢的发光衰减时间决定它的时间响应较差。但它比半导体探测器大得多,便宜得多。

目前,我们正在研制以光纤为闪烁体,利用多阳极光电倍增管读出、穿透型、大面积、双维位置灵敏探测器。这种探测器有大的灵敏面积、快的时间响应、高位置分辨、高计数能力。这样,它们相互补充,使得 RIBLL 的束流诊断和探测系统日臻完善。

参 考 文 献

- 1 Anton G, Arends J, Beutertz W et al. Nucl. Instr. Meth., 1991, A310:631
- 2 Roche C T, Strauss M G, Brenner R. IEEE Trans. On Nucl. Sci., 1985, NS-32:373
- 3 Stelzer H. Nucl. Instr. Meth., 1991, A310:103
- 4 Baker O K, Beaufait J, Carlini R et al. Nucl. Instr. Meth., 1995, A367:92
- 5 Sustavov A F, Golovanv L B, Palarakin O O et al Nucl. Instr. Meth., 1995, A367:159
- 6 Wang jinchuan, Zhan Wenlong, Guo Zhongyan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1996, 22:204
(王金川, 詹文龙, 郭忠言等. 高能物理与核物理, 1996, 22:204)
- 7 Garcia M R, Grinalay J E, Burg R et al. IEEE Tran. on Nucl. Sci., 1986, NS-33:735
- 8 Antici T, Barnett B, Blumenfeld B et al. Nuc. Instr. Meth., 1995, A365:70
- 9 Bird A J, Dean A J, Grant K J. et al. Nucl. Instr. Meth., 1991, A310:323
- 10 Gordon J. S, McGaann W, Daley K et al. IEEE. Trans. On Nucl. Sci., 1992, NS-39:1485
- 11 Bird A J, He Z, Ramsdam D. Nucl. Instr. Meth., 1991, A310:332
- 12 Haily C J. Nucl. Instr. Meth., 1989, A276:340
- 13 Poulsene J M, Verben R, Frontera F et al. Nucl. Instr. Meth., 1991, A310:398
- 14 Yasillo N J, Beck R N, Cooper M et al. IEEE. Trans. On Nucl. Sci., 1990, NS-37:609

CsI(Tl) Detector With Position-Sensitive Photomultiplier Readout*

Qin Lijun Zhan Wenlong Guo Zhongyan Xiao Guoqing Sun Zhiyu
Li Jiaying Meng Xiangwei Jiang Shanhong Wang Jinchuan Wang Quanjin

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract A CsI(Tl) detector with a two-dimension positional sensitive photomultiplier readout at Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL) is reported. The Cs(Tl) scintillator is 10 mm in thickness and 60mm × 60mm in active area. Its spatial resolution of 0.81mm (FWHM) is achieved. Finally the Monte-Carlo method is employed to simulate its spatial resolution whose result is in good agreement with the tested.

Key words CsI(Tl) scintillator, position-sensitive photomultiplier, spatial resolution, Monte-Carlo simulation

Received 26 June 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19675055, 19505006)