

RIBLL 束流诊断*

郭忠言 詹文龙 孙志宇 肖国青 江山红
李加兴 孟祥伟 王金川 张万生 秦礼军 王全进

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 描述了兰州放射性离子次级束流线(RIBLL)上研制并安装使用的放射性束流(RIB)诊断装置的种类、结构、性能及在RIBLL上的位置和功能。重点叙述了以光纤为基础的几种诊断元件,它们探测效率高、响应时间快、制作容易、性能稳定。给出了RIB ^{17}N 等高图,说明诊断装置辅助RIBLL得到RIB的水平。

关键词 放射性束流(RIB) 束流诊断 光纤 诊断元件

1 引言

80年代中期以来,随着加速器技术和粒子探测技术的发展,弹核碎裂型(PF)放射性核束流线先后在各大核物理实验室建成并投入运行。如LISE^[1], A1200^[2], RIPS^[3], FRS^[4]。兰州放射性离子次级束流线(RIBLL)于1997年7月成功地建成并顺利投入运行^[5]。这些装置采用磁刚度-降能器光学选择和反应运动学分析技术($B\rho-\Delta E-B\rho$ -TOF),在飞行中鉴别和分离放射性核束流。

在RIBLL设计和研制中,十分注意采用国际先进科学技术。二极偏转磁铁入口和出口设计为二次曲面端面,使之具有聚焦或发散功能;磁二极透镜和四极透镜磁场调节首次采用大功率开关电源;发展了多种以光纤为主体的束流诊断元件;粒子鉴别中,首次应用由位置灵敏光电倍增管读出的CsI(Tl)探测器装置,同时测量粒子的空间位置和能量。磁透镜电源调整,初级靶、次级靶、狭缝、降能器、束流元件和探测器望远镜位置,数据获取等都由计算机准确自动控制。这些特点保证了RIBLL提供的放射性核束的强度在很大范围变化,最大每秒 10^8 粒子(约 10^8 pps),最小每秒不到一个粒子(小于1pps)。这样大的跨度,传统的束流诊断元件不能很好使用。而以光纤为主体的束流诊断元件,以其快时间响应,高计数和耐辐照能力,在RIBLL的束流诊断上得到了广泛应用。

1998-03-03收稿

* 国家自然科学基金(19675055, 19505006)资助

2 RIBLL 的束流诊断

RIBLL 是双消色差(坐标和动量)放射性离子束流装置. 其结构为 $Q_{01}Q_{02}D_0-T_0-Q_1Q_2D_1Q_3Q_4-C_1-Q_5Q_6D_2Q_7Q_8-T_1-Q_9Q_{10}D_3Q_{11}Q_{12}-C_2-Q_{13}Q_{14}D_4Q_{15}Q_{16}-T_2$ 模式. Q_i ($i = 01, 02, 1-16$) 为四极透镜, D_j ($j = 0-4$) 为二极透镜, T_k ($k = 0-2$) 表示聚焦点, 而 C_n ($n = 1-2$) 表示色散点. T_0-T_1 段和 T_1-T_2 段是对称式双消色差结构. 而 T_0-T_1 及 T_1-T_2 两部分相对于聚焦点 T_1 是反对称结构. 图 1 是 RIBLL 的结构图.

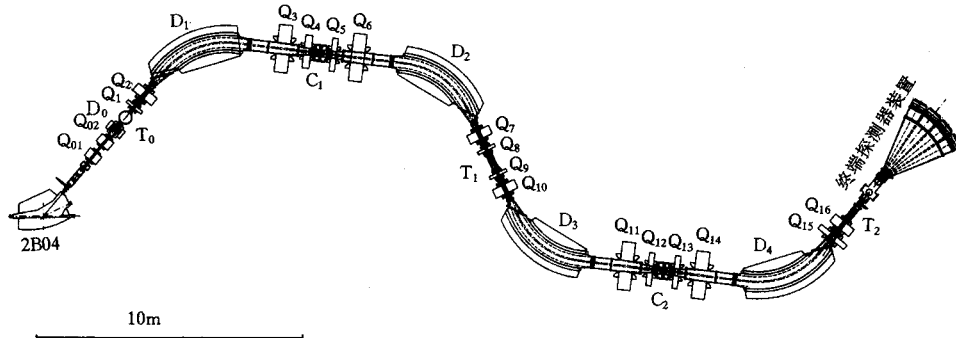


图1 RIBLL结构草图

RIBLL 全长(2B04 中 RIBLL 方向起点—探测器最远点)为 43.005m. T_0 —探测器最远点长度为 38.520m, T_0-T_2 长度为 33.690m. T_0-T_1 长度为 17.000m, T_1-T_2 长度为 16.690m. 表 1 列出了 RIBLL 的主要性能指标.

表1 RIBLL的主要技术指标

立体角接收度 (msr)	动量接收度 (%)	最大磁刚度 (Tm)	磁刚度分辨率 (6×10^{-4})	电荷态分辨 ($Q/\Delta Q$)	质量分辨 ($A/\Delta A$)	束流入射角 (5°)	最短RIB 分离时间 (μs)
6.5	10%	4.2	6×10^{-4}	150	300	5°	<1

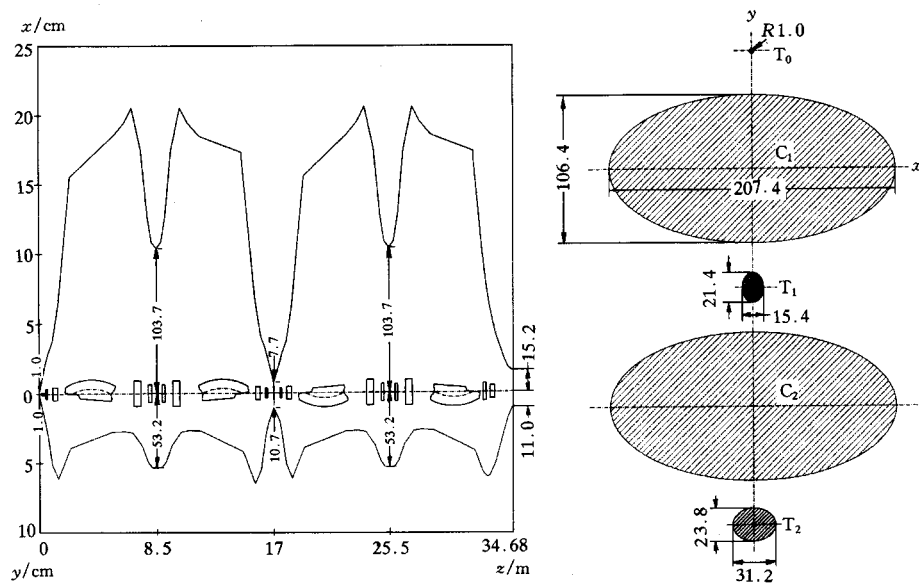
按照设计, 反对称式双消色差结构的 RIBLL 有 3 种运行模式: 1) 高分辨模式; 2) 中分辨高流强模式; 3) RIB+ 0° 磁谱仪模式.

束流诊断元件是指导动态调整 RIBLL 参数的有力工具. 它们实时显示 RIBLL 各个位置 RIB 产生、鉴别、分离、输运等状态和密度分布、空间位置、时间结构等信息, 指导 RIBLL 参数的调整, 使之在尽可能短的时间内, 达到 RIBLL 的最好设置, 分离出最佳 RIB.

RIBLL 的束流诊断元件主要分布于 5 个区域: 初级靶 T_0 区域, 色散点 C_1 和 C_2 区域, 焦点 T_1 和 T_2 区域. 图 2 示出了使用 TRANSPORT 程序计算 RIBLL 对 ^{11}Li 放射性束在一定初始条件下的束流包络和在 T_0 、 C_1 、 T_1 、 C_2 、 T_2 的剖面. 这是设计束流诊断元件尺寸的依据.

2.1 初级靶 T_0 区域

在初级靶室 T_0 中心, 除初级靶外, 还安放有石英玻璃荧光屏和法拉第筒. 计算机通过

图2 RIBLL束流包络和在 T_0 、 C_1 、 T_1 、 C_2 和 T_2 的剖面

驱动电源-步进电机遥控初级靶、石英玻璃和法拉第筒的位置。从连接到遥控摄像机的显示器可以观看石英玻璃上初级束流光点的位置和大小。电流积分器积分法拉第筒的电荷,给出初级束流的绝对数值。

在初级靶室的出口有两种类型束流监视器: a型是 Si 雪崩光二极管(S-5343) + 电荷灵敏前置放大器(142A) + 主放大器,经甄别成形到计数器; b型是光纤(BCF-12) + 光电倍增管(R-1213)读出,经甄别成形到计数器。

a型监视器简单结构在 $192\text{mm} \times 160\text{mm} \times 20\text{mm}$ 铝板上,开一 $\phi 70\text{mm}$ 的圆孔,孔中心与束流轴线重合,铝板平面与束流轴线垂直。4支 Si 光二极管上下左右 90° 对称分布于 $\phi 105\text{mm}$ 圆周上。S-5343的灵敏面积为 $\phi 1.0\text{mm}$ 。当初级束流轰击初级靶时,反应产物以靶点为中心向 4π 空间发射,光二极管被离子照射发光-光电转换雪崩,被电荷灵敏前置放大器放大,甄别器甄别、成形,定标器计数。4路光二极管-电子学线路经仔细调整一致。根据粒子空间发射的对称性,4支计数器的计数就反映出束流轴线的空间走向。

b型监视器如图 3(a)所示,在 $212\text{mm} \times 160\text{mm} \times 20\text{mm}$ 铝板上,开一 $\phi 40\text{mm}$ 的圆孔,孔中心与束流轴线重合,铝板平面与束流轴线垂直,4根截面 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ BCF-12光纤上下左右中心对称固定在铝板上。光纤一端突出圆周 5mm 。另一端耦合到光电倍增管R-1213的光阴极上。当初级束流轰击初级靶时,光纤深入的 5mm 部分被离子照射发光,经光电倍增管(PMT)倍增,甄别器甄别、成形,定标器计数。同样,根据4支计数器的计数确定束流轴线的位置。20mm厚的铝板起固定监视器作用,也为它们提供核子辐射的屏蔽。

两种监视器的区别是光纤监视器响应时间快,能承受很高计数率。光二极管响应时间慢一个量级,但工作电压低,易于操作。实验证明,这两种束流监视器都能在高辐射环境下正常工作。

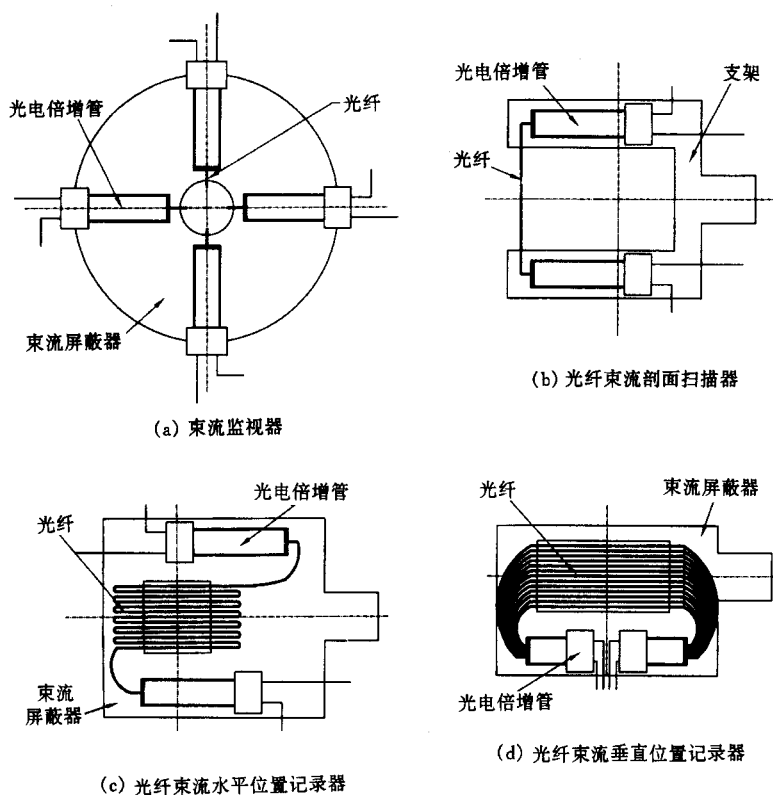


图3 RIBLL光纤束流诊断探测器

在初级靶室中接近 90° 方向, 安置 $\text{BaF}_2 + \text{XP2020Q}$ γ 探测器, 它也可以监视束流的轴线位置水平变化。

2.2 C_1 区域的束流诊断

C_1 是 RIBLL 的第一色散点。按设计 C_1 点 RIB 包络尺寸为长轴约 200mm、短轴约 100mm 的椭圆。

C_1 区域束流诊断元件有 Si 雪崩光二极管 (APD)、CsI(Tl) + Si 光二极管 (PD) 束流强度探测器和光纤束流剖面扫描器。APD S-5343 和 PD S-3590 设置在 C_1 降能器下边缘中心。当计算机通过驱动电源-步进电机控制降能器上下移动时, APD 和 PD 实时地测量了 C_1 中心区域 RIB 沿 y 方向的强度分布。与 APD 一样, CsI(Tl) + PD 信号也需由前放、主放大器放大, 甄别器甄别、成形, 定标器计数。

图 3(b) 是束流剖面扫描器的示意图。一根截面 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 光纤 (BCF-12) 固定在音叉形状 $170\text{mm} \times 160\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的合金铝板上, 光纤中间 100mm 部分直接暴露在 RIB 照射下, 两端耦合到 R1213 的光阴极上。当步进电机驱动音叉水平移动时, 光纤-光电倍增管-电子学系统就测出了 C_1 位置 RIB 的水平分布。光纤双端读出, 使用符合技术, 可以降低偶然事件干扰。这 2 个信号经恒分甄别器 (CFD) 甄别、成形, 送入 CAMAC TDC, 记录 RIB 沿竖直方向密度分布。

图 4 是该种 RIB 扫描器测量的一个 RIB 水平密度分布谱. 一目了然, RIB 沿水平方向有很宽分布, 其 ^{17}N 重心基本与 C_1 点系统几何中心重合.

2.3 T_1 区域的束流诊断

T_1 点的束流剖面尺寸较小, 长轴约为 15mm、短轴约 21mm 的椭圆. 束流诊断元件有法拉第筒、扁平螺旋形光纤束流水平密度分布探测器、CsI(Tl) + PD 束流垂直分布探测器. 法拉第筒内尺寸是 $\Phi 25\text{mm} \times 25\text{mm}$, 长度 100mm 铜制圆筒. CsI(Tl) + PD 束流诊断元件与 C_1 处的相同.

扁平螺旋形光纤束流剖面密度分布探测器如图 3(c) 所示. 截面为 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的光纤 BCF-12, 沿水平方向连续弯绕成扁平螺旋形, 中间部分平行排列成平面, 转弯部分的曲率半径为 5mm. 平面部分覆盖 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的 RIB 通道. 平面中心和法线与 RIB 轴线重合, 光纤两端直接耦合到 PMT R-1213 的光阴极. 2 个 PMT 的阳极信号分别经 CFD 甄别、成形、延迟, 送到 CAMAC TDC. 当粒子通过光纤平面某一位置时, 离子使光纤在此位置点火, 产生光信号, 该信号沿光纤传到两端的光阴极, 给出 2 个时间信号. 从 2 个信号时间差可以确定粒子在此平面的 x, y 位置.

在 T_1 区域还有 RIB 粒子时间拾取探测器 t_1 和 Si 能量损失探测器 ΔE_1 . 时间拾取探测器主体是 $45\text{mm} \times 45\text{mm}$, 厚度 50—100 μm 闪烁薄膜 (BC-400), 中心坐落于铝制内椭球面反射镜的一个焦点上, RIB 粒子垂直通过闪烁薄膜中心及临近区域, 使 BC-400 发光, 内椭球面反射镜将这些光子聚焦到它的另一焦点及临近区域, PMT R-2083 的光阴极刚好也位于此, PMT 便记录了 RIB 的时间信息 t_1 . 其内禀时间分辨好于 100ps. 能量损失探测器是 $45\text{mm} \times 45\text{mm}$, 300 μm 厚的双维位置灵敏 Si 光敏半导体全耗尽探测器 (PSD S-5378). 它的位置分辨约 1.5mm. 这两种探测器主要鉴别 RIB. 很明显, 它们也是有效的 RIB 诊断探测器.

2.4 C_2 区域的束流诊断

C_2 区域的束流诊断元件与 C_1 区域的唯一区别是光纤 RIB 剖面探测器. C_1 处是单丝扫描型, C_2 处是多丝并列型. 图 3(d) 给出了它的简单结构. 多根光纤 BCF-12 平行平面排列, 光纤截面为 $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$. RIB 轴线垂直通过光纤平面中心, 光纤排列方向与 x 方向一致. 光纤两端集束状耦合到光电倍增管 R-5600U 光阴极上, 2 个 PMT 的阳极信号分别经各自的 CFD 甄别、成形、延迟, 进入 CAMAC TDC, 信号时间差就表示 RIB 离子在该平面的 x 位置. 由图 2 看到, C_2 的 RIB 剖面与 C_1 一样, 是长轴约 200mm、短轴约 100mm 的椭圆. 因此, 该诊断元件光纤平面部分的尺寸要与之相当.

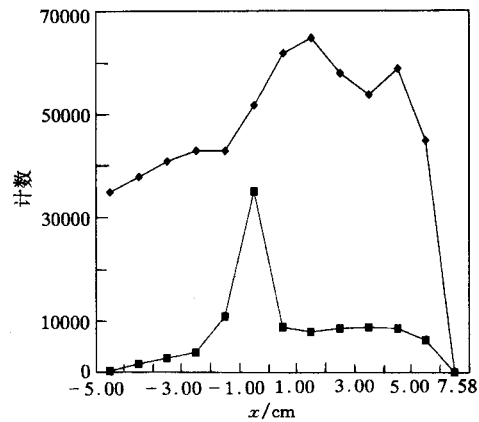


图 4 RIB 剖面扫描器测量的一个 RIB 水平密度分布谱

◆ 为对所有 RIB 成份求和, ■ 是 ^{17}N 的密度谱.

2.5 T_2 区域的束流诊断

T_2 区域没有专门的束流诊断元件, 各类 RIB 鉴别和探测装置都有束流诊断功能. 如 RIB 时间拾取探测器 t_2 , 粒子鉴别探测器 ΔE_2 , 剩余能量探测器 E_r 等. RIB 粒子从 T_1 到 T_2 的飞行时间 Δt 就是由 $t_2 - t_1$ 得到的. t_2 、 ΔE_2 探测器结构型号与 t_1 、 ΔE_1 相同. 剩余能量探测器 E_r 由面积 $70\text{mm} \times 70\text{mm}$, 厚度 10mm 的 CsI(Tl) 晶体, 直接耦合到双维位置灵敏光电倍增管 R-2487 (Hamamatsu) 光阴极构成. R-2487 光阴极有效面积为 $60\text{mm} \times 55\text{mm}$.

T_2 为 RIBLL 的最后聚焦点, 通常次级靶也坐落于该区域. 次级束引起的实验对 RIB 在次级靶上聚焦要求很高. 大面积双维位置灵敏光电倍增管读出的 CsI(Tl) 探测器能很好测量出 RIB 的束斑尺寸、位置和密度分布. 图 5(a) 显示出对于约 32MeV/u 的 ^{17}N 测量的二维散布图; 图 5(b) 是在 CsI(Tl) 加栅网测量的 RIB ^{17}N 二维散布图. 网孔直径 1.0mm , 间隔 5mm . 从该数据初步分析得到 x, y 位置分辨都好于 0.8mm .

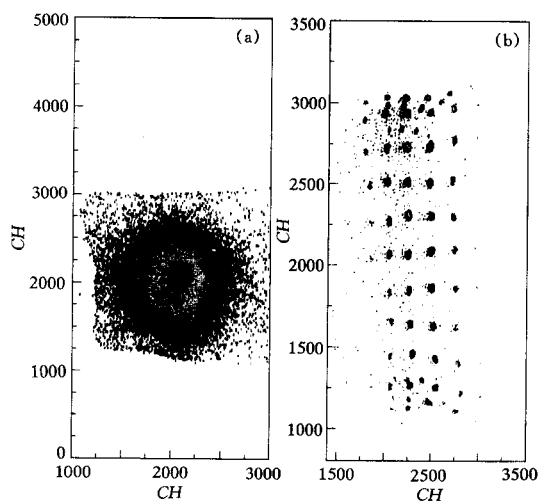


图 5 RIB ^{17}N 和位置灵敏探测器 CsI(Tl) 位置刻度的等高图

(a) 32MeV/u ^{17}N 测量的二维等高图; (b) CsI(Tl) 加栅网测量的 RIB ^{17}N 二维等高图.

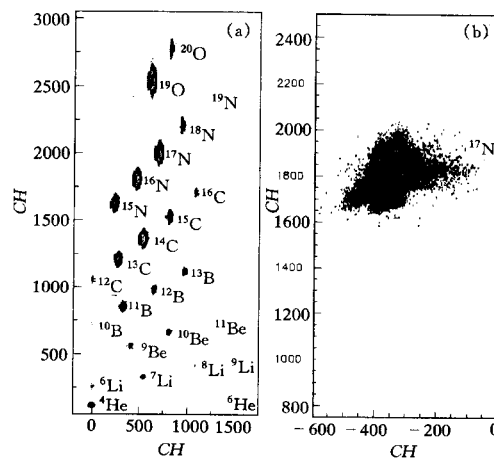


图 6 RIBLL 对 $^{18}\text{O} + \text{Be}$ 碎裂产物的同位素鉴别和分离图

(a) 60MeV/u $^{18}\text{O} + \text{Be}$ 仅经 RIBLL 的 $B\rho$ 选择, 在 T_2 测量的弹核碎片分布; (b) 经 RIBLL $B\rho - \Delta E - B\rho - \text{TOF}$ 选择的 RIB ^{17}N , 纯度 $> 99\%$.

3 结果和讨论

鉴于 RIBLL 鉴别、调整、分离放射性次级束流的质量是 RIBLL 束流诊断元件辅助调束功能的间接说明, 图 6 给出了在 T_2 得到的放射性次级束流 ^{17}N 的二维等高图. HIRFL-SSC 提供的 60MeV/u ^{18}O 初级束流, 在 T_0 处轰击 550mg/cm^2 Be 靶, 炮弹 ^{18}O 碎裂, 形成 O 元素以下核区域的各种同位素碎片 (如图 6(a)). 碎片和初级束 ^{18}O 一起进入 RIBLL 的始端, 经 RIBLL 的磁元件的 A/Q 选择、降能器的 Z 选择、运动学飞行时间 TOF 分析, 即 $B\rho - \Delta E - B\rho - \text{TOF}$ 选择, 在 T_2 处达到放射性次级 ^{17}N 的最佳分离 (如图 6(b) 所示). 经离线分析, ^{17}N 的纯度大于 99% . 总之, 为 RIBLL 研制的束流诊断元件完全满足了 RIBLL 调束的需要.

特别是以光纤为主体的多种束流诊断探测器,如束流监视器、一维和二维束流剖面探测器以及束流剖面扫描器,在 RIBLL 调试测试中证明是一种响应时间快、耐辐照、中等位置分辨、结构简单、性能稳定可靠、制作使用容易较理想的束流诊断装置. 它甚至可以在 10^8 pps 束流强度下正常工作. 这是气体探测器、半导体探测器无法比拟的.

在研制 RIBLL 束流诊断探测器初期,我们用光纤和单阳极光电倍增管耦合,使得探测器结构复杂. 现在,正在采用多阳极光电倍增管作为读出元件,与 $0.25\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ 光纤带耦合. 这样,诊断元件的位置分辨、探测效率等性能会明显提高,响应时间将更快,体积小结构紧凑. 使得 RIBLL 束流诊断装置更加完善.

参 考 文 献

- 1 Anne R, Bazin D, Muller A C et al. Nucl. Instr. Meth., 1987, **A257**:215
- 2 Sherrill B M, Morrissey D J, Nolen J A et al. Nucl. Instr. Meth., 1992, **B70**:298
- 3 Kubo T, Shihara M I, Inabe N et al. Nucl. Instr. Meth., 1992, **B70**:309
- 4 Geissel H, Armbruster P, Behr K H et al. Nucl. Instr. Meth., 1992, **B70**:286
- 5 Zhan Wenlong, Guo Zhongyan. Sciences (in Chinese), 1998, **50**:21
(詹文龙, 郭忠言. 科学杂志, 1998, **50**:21)

RIBLL Beam Diagnostics *

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

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

Abstract The design, structure and performances of RIB diagnostic devices for Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL) are described. Several RIB diagnostic devices based on fiber are shown in greater detail. The devices have high detection efficiency, faster time response, stable function and easy operation. The RIB ^{17}N intensity contours are given, which illustrates the functions of the diagnostic devices in tuning RIBLL parameters.

Key words Radioactive Ion Beam (RIB), beam diagnostic, fiber, diagnostic device

Received 3 March 1998

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