

文章编号: 1007-4627(2008)03-0259-06

RIBLL 终端大面积光纤阵列探测器研制*

杨彦云^{1,2}, 王建松¹, 肖国青¹, 高 启^{1,2}, 高 辉^{1,2}, 黄美容^{1,2},
姚向武^{1,2}, 李 琛¹, 徐瑚珊¹, 郭忠言¹, 胡正国¹,
章学恒^{1,2}, 黄天衡^{1,2}, 余玉洪^{1,2}, 仇 浩^{1,2}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 描述了 RIBLL 终端大型探测器之一的大面积闪烁光纤阵列探测器(LASFA)的工作原理和结构特点, 报道了 LASFA 的研制以及单元性能的改进与测试。LASFA 具有很高的时间分辨和空间分辨能力, 可以很好地测量 RIBLL 终端各种轻带电粒子的信息。

关键词: 大面积光纤阵列; 轻带电粒子; 时间分辨; 位置分辨; 粒子鉴别

中图分类号: O571

文献标识码: A

1 引言

闪烁光纤是近 30 年来物理实验发展的技术产物, 是一种兼有粒子探测和光信号传输的功能组件。闪烁光纤由芯层和表面包层两部分构成, 芯层的折射率要大于包层的折射率。闪烁体虽然在 4π 立体角内都发光, 但只有在芯层与包层的界面上发生全反射的闪烁光才能在闪烁光纤中传播, 这只占芯层所产生的闪烁光的很小一部分^[1, 2]。与普通相同尺寸的闪烁体相比, 闪烁光纤具有探测效率高, 响应时间快的特点, 闪烁光纤光收集角很小, 光程短且涨落小, 因此具有很小的传播时间涨落, 有着很好的时间性能。此外, 闪烁光纤还具有探测单元颗粒度小、可塑性强、易于使用、封闭性好的突出优点。近年来, 闪烁光纤的种类和特性有了很大的发展和提高, 同时, 由于各类光电器件的研究和发展, 光纤探测器在探测效率、单光子灵敏度、定位精度、信噪比、时间响应、长期稳定性等方面都有很大的提高, 同时价格也达到了可以实用的水平。这些都使得闪烁光纤探测器在粒子物理、核物理、天体物理和成像医学中得到广泛的应用^[3-8]。

为了开展对放射性核束物理的研究, 国际上绝大多数重离子核物理实验室都相继建成了放射性核

次级束流线^[9-12], 兰州重离子加速器放射性次级束流线(RIBLL)^[13]于 1997 年 7 月建成并投入运行。为了在 RIBLL 上开展放射性束引起的次级反应研究, 对反应系统进行完全运动学测量, 如带电粒子之间及其与中性粒子的符合测量等, RIBLL 需要有良好的时间分辨和位置分辨系统。所以在 RIBLL 的第 2 聚焦点 T₂ 之后设置了由光纤阵列(LASFA)和闪烁晶体阵列(LASCAR)构成的大型实验终端^[14-16]。本文描述了 RIBLL 终端大型探测器之一的大面积闪烁光纤阵列探测器(LASFA)的工作原理和结构特点, 报道了 LASFA 的研制以及单元性能的部分测试结果及探测器研制最新结果。目前的测试结果表明 LASFA 具有很高的时间分辨和空间分辨能力, 结合其他探测器可以很好地测量 RIBLL 终端各种轻带电粒子的信息。

2 LASFA 结构及原理

RIBLL 终端大面积光纤阵列探测器(LASFA)分为 4 组(如图 1 所示), 每组 23 个单元, 每个单元由 4 根 1 000 mm 长, 截面为 5 mm×5 mm 的光纤(BCF-12)共 368 根并排构成。单元两端各通过一支 Hamamatsu R4124 光电倍增管(PMT)读出信号,

* 收稿日期: 2007-11-21; 修改日期: 2008-01-28

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10205019, 10105011); 国家创新研究群体自然科学基金资助项目(10221003); 中国科学院百人计划资助项目(O501080BR0)

作者简介: 杨彦云(1984-), 男(汉族), 宁夏盐池人, 硕士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: yangyanyun@impcas.ac.cn

其中光纤和 PMT 之间配有 90°航空有机玻璃光导，光导和 PMT 之间用 BC-634 光学耦合片耦合，光导和闪烁光纤之间用 BC-600 光学耦合胶粘结，以减小光子在光导与 PMT 之间和光导与闪烁光纤之间的损失。每组光纤有效面积为 1 000 mm×460 mm，恰好与后续的两块闪烁晶体面积相匹配。每组光纤阵列前表面距次级反应靶中心 3 088 mm，覆盖 θ 角 19.5°， ϕ 角 9.68°。4 组光纤阵列覆盖 ϕ 角是 44.5°，有效区域 38.72°。与光纤阵列探测器对应，后续的闪烁探测器阵列是由 8 块 500 mm×500 mm×100 mm 的塑料闪烁晶体 BC-400 组成。晶体直接与 500 mm×1 060 mm×100 mm 光导耦合，对于每块晶体，由光导后面的 7×7 只 PMT 阵列读出^[16]。光纤主要由核心部分(芯层)和表面涂层(包层)两部分组成^[8]，LASFA 所用的光纤是 Bicron 公司的 BCF-12，其芯层由聚苯乙烯(Polystyrene)制成，折射率为 $n=1.6$ ，包层是由折射率为 $n=1.49$ 的 PMMA 材料构成，包层厚度约为芯层厚度的 4%。BCF-12 光纤的发射光谱的峰值为 435 nm，而在 LASFA 中使用的 PMT 型号为 R4124，其波长响应范围为 300—650 nm，峰值约为 420 nm，因此光纤和 PMT 有着较好的匹配。光纤所发光子在光纤中的衰减时间为 2.7 ns，光纤的衰减长度约为 2.2 m，光在光纤中传播速度为 0.16 m/ns^[17]。

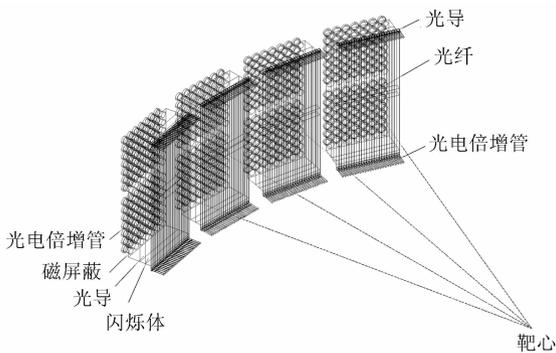


图 1 RIBLL 实验终端大面积光纤探测器阵列和闪烁探测器阵列

大面积光纤阵列探测器主要用于测量次级反应中出射的各种轻带电粒子的能量、位置和时间。结合靶附近时间探测器可以测量带电粒子的飞行时间(TOF)，清楚地鉴别出射粒子^[15, 17]。光纤两端读出信号的时间差 ΔT 与放射源距两端 PMT 光阴极的距离差 ΔL 存在线性关系，即有^[8]：

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{V} \tag{1}$$

V 为光子在光纤中的传输速度，在大面积光纤阵列探测器中， $\Delta L = 1.0 \text{ m} - 2 Z$ ， Z 为粒子入射位置距一端的距离。由两个 PMT 信号的时间差 ΔT 便可确定粒子入射的位置，即得到粒子的纵向位置，而粒子的横向位置由光纤单元决定。横向位置分辨为光纤单元的宽度 2 cm，纵向位置分辨是由时间分辨决定的，根据误差传递关系，两端读出系统的位置分辨为^[5]

$$\sigma_z = \frac{V}{2} \sqrt{(\sigma_{T_1}^2 + \sigma_{T_2}^2)} \tag{2}$$

3 LASFA 单元优化改进

3.1 光导的改进

对于闪烁体探测器，当闪烁体的尺寸不适合直接与 PMT 耦合时，中间需要加一段光导过渡，一般情况采用高透明度固体材料(有机玻璃、石英)作为光导，其折射率与闪烁体或是光学器件的窗口接近^[2]。光子从闪烁体进入光导后主要是依靠反射来传播，而每一次反射都会损失一部分光子，反射的次数越少就越有利于光的收集，也即光导有高的传输效率。由于实验空间的限制，LASFA 探测单元的信号必须经过一个折角为 90°的光导(见图 2)引

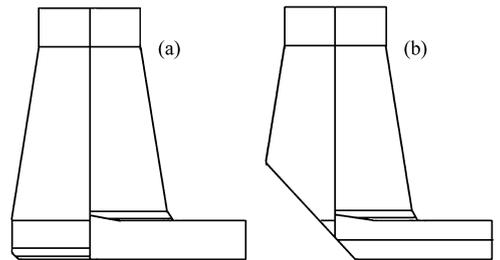


图 2 LASFA 的光导示意图

出，而光导的传输效率会直接影响到探测器单元的时间分辨和位置分辨，从而影响整个阵列探测器的性能。因此，研制光传输效率尽可能高的光导在整个探测器的研制过程中显得至关重要。人们知道，光导的材料、形状、表面状况和包裹的反射材料等光学性能都会直接影响光导的传输效率。图 2 给出了 LASFA 准备采用的两种形状的光导，第 1 种光导(如图 2(a)所示)，直径 10 mm 圆柱端与 PMT 耦

合, 5 mm×20 mm 矩形与光纤耦合, 中间通过圆锥转换。第 2 种光导(如图 2(b)所示)是在第 1 种光导的基础上, 沿光导与光纤接触的平面中心的轴线和过光导与 PMT 接触面中心的轴线的交点切一个与底面成 45°角的平面。每种形状的光导分别用普通有机玻璃和航空有机玻璃制作, 选择黑胶布、Teflon 和铝膜 3 种包裹材料, 共 12 种情况。使用 β 源对各种光导的传输效率进行测试, 以确定 LASFA 所选用的最佳光导。使用长度为 1 110 mm 的光纤单元进行测试的结果表明, 包裹材料为黑胶布的光导传输效率最差。在用未切割过的光导测试时包裹材料为黑胶布时几乎看不到信号, 而包 Teflon 和铝膜的光导则能看到信号, 而且信号会随着放射源的位置移动而表现出明显的变化。所以首先排除使用黑胶布为光导的包裹材料。之后对剩下的 6 种光导进行系统的测试(见图 3), 发现没有切割的光导的传输效率只有切割 45°的光导的 30%左右, 航空有机玻璃要好于普通有机玻璃, 包铝膜的光导更优于包 Teflon 的光导。因此最终确定切割 45°角、包铝膜、本身材料为航空有机玻璃的光导为 LASFA 单元所使用的光导^[5]。

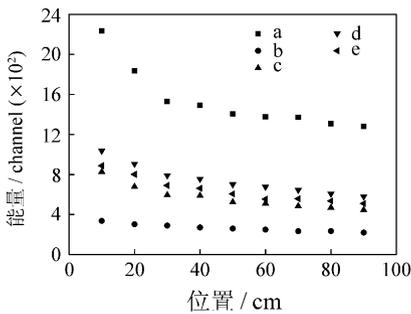


图 3 加不同光导的探测单元能谱随放射源位置变化曲线

a 不加光导探测单元的能谱, b 加未切割、包铝膜的普通有机玻璃光导的探测单元, c 加切割 45°包铝膜普通有机玻璃光导的探测单元, d 加切割 45°包铝膜的航空有机玻璃光导的探测单元, e 加切割 45°加包 Teflon 航空有机玻璃光导的探测单元。

3.2 分压器的改进

在核物理实验中, 从微弱光到强光都要同时探测。因此, 对 PMT 的主要要求包括: 能量分辨好、脉冲线性好、时间响应快、磁屏蔽性好、使用寿命长和性能稳定等^[2, 18-20]。考虑到以上因素和大规模光纤阵列探测器的整体构型和电子学因素, 我们选定日本滨松公司生产的 R4124 型 PMT。使用

中发现, 信号的幅度虽然比较满意, 但信号存在明显的震荡, 震荡的幅度比较大, 而且会持续一段时间。探测器的电子学系统很难将震荡信号与正常信号区别开来。经过分析, 发现造成这一现象的原因是信号比较快(上升时间在 10 ns 以下)的时候阻尼振荡比较明显。这一问题可以通过在最后 3 个打拿极上增加阻尼电阻得到有效的改善。测试结果显示(见图 4): 加入阻尼电阻对 PMT 输出信号的上升时间基本没有影响, PMT 增益变化也不大, 信号的幅度只比改进前有少许增加, 但是信号的形状明显改善, 信号后面的震荡有明显的减小, 震荡持续的时间明显缩短。在单元测试中能谱的形状有明显的改善, 能谱的半高全宽只有不加阻尼电阻时的 2/3 左右。这将会明显地改善大面积闪烁光纤阵列的能量分辨和鉴别粒子的能力。闪烁光纤阵列的时间谱也得到明显的改善, 不再有一个入射粒子在同一位置时在时间谱上出现多个峰的现象^[18]。

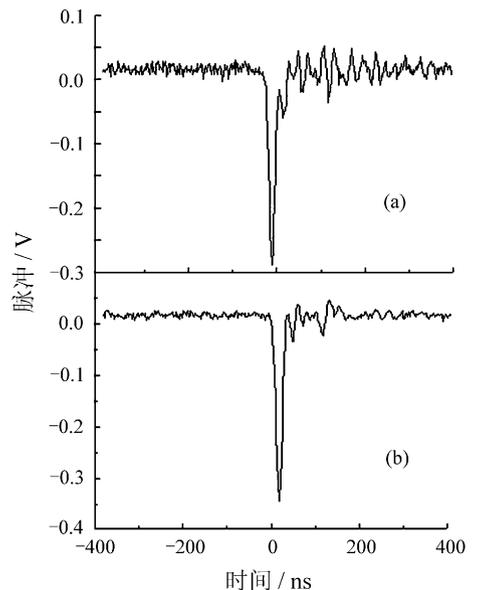


图 4 示波器上观察到的信号

a 使用改造前的分压器, b 使用改造后的分压器。

4 LASFA 性能测试

4.1 放射源测试

对于大面积闪烁光纤阵列探测器, 光纤单元的时间分辨和空间分辨能力直接影响着整个探测器的性能。使用 β 源对光纤的时间性能进行测试, 两端经过仔细抛光的 BCF-12 光纤通过 45°切割、铝膜包装、航空有机玻璃制作的光导与 PMT 耦合, 光纤、

光导和 PMT 之间使用适量的硅油耦合。加了光阑的 β 源放在光纤单元之上, 正对着在光纤下方放置一块较短的快塑料闪烁探测器给出 Trigger 信号。测试时间谱如图 5 所示, 最终得到的时间分辨为 $\sigma_T \approx 710$ ps, 对应的位置分辨为 $\sigma_z \approx 57.0$ mm^[5]。

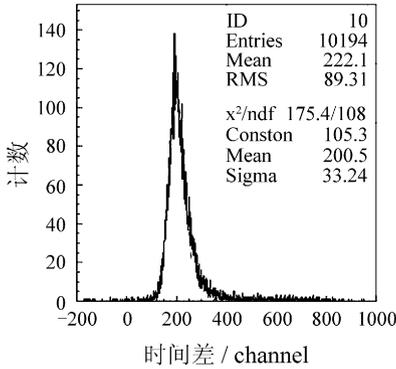


图 5 LASFA 单元 $T_1 - T_2$ 时间谱

4.2 在束测试

利用兰州重离子加速器提供的 70 MeV/u ^{26}Mg 初级束流, 轰击初级靶 ^9Be , 产生的次级束碎片在 RIBLL 的 T_2 靶室对 LASFA 单元性能进行了实验测量。所使用的探测单元为 4 根长 20 cm 的 BCF-12 光纤并排构成。测试结果为: 闪烁光纤测量初级束 70 MeV/u ^{26}Mg 时达到的时间分辨为 $\sigma_T \approx 128$ ps, 对应的位置分辨 σ_z 为 10 mm。对 70 MeV/u ^{26}Mg 初级束流轰击 ^9Be 靶以后的次级束碎片达到的时间分辨为 $\sigma_T \approx 158$ ps, 对应的位置分辨 σ_z 为 13 mm。此外, 利用 RIBLL 位于 T_2 靶室 ΔE_{Si} 探测器对光纤单元的粒子鉴别能力进行了测试。大面积闪烁光纤阵列作为轻带电粒子的飞行时间终止探测器, 主要提供粒子飞行时间的终止信号。粒子飞行时间的起始信号由位于 RIBLL 线上 T_1 靶室的时间拾取探测器提供。大面积闪烁光纤阵列作为 TOF 系统时, 对于 70 MeV/u ^{26}Mg 初级束流轰击 ^9Be 靶后的次级束碎片 TOF 系统的最好时间分辨 $\sigma_{\text{TOF}} \approx 0.52$ ns, 而 T_2 靶室的时间拾取探测器作为粒子飞行终止时间的 TOF 系统时间分辨 $\sigma_{\text{TOF}} \approx 0.83$ ns, 大面积闪烁光纤阵列探测器探测单元作为带电粒子飞行时间终止探测器, 整个 TOF 系统的时间分辨好于 RIBLL 粒子飞行时间拾取系统。图 6 给出了粒子鉴别的 $\Delta E_{\text{Si}} - \text{TOF}$ 二维谱。图 6(a) 是 T_2 靶室的时间拾取探测器作为轻带电粒子的飞行时间终止探测器时

的 $\Delta E_{\text{Si}} - \text{TOF}$ 二维谱; 图 6(b) 是闪烁光纤作为粒子飞行终止时间的 $\Delta E_{\text{Si}} - \text{TOF}$ 二维谱。可以看出, 闪烁光纤作为轻带电粒子的飞行时间终止探测器可更清楚地鉴别出次级束碎片^[21]。

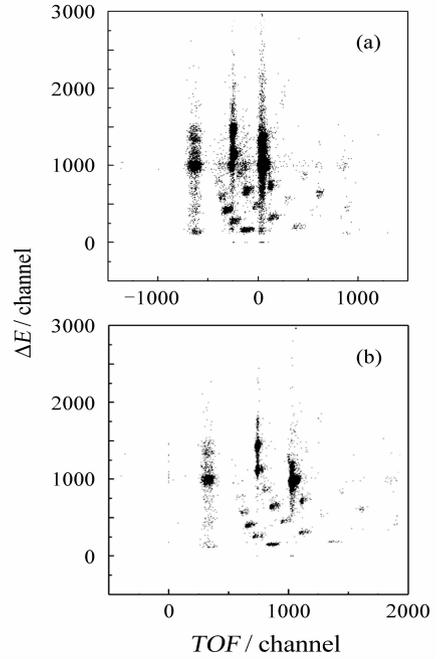


图 6 $\Delta E_{\text{Si}} - \text{TOF}$ 二维谱

5 总结

大面积光纤阵列探测器主要用于测量次级反应中出射的各种轻带电粒子的能量、位置和时间信号。结合靶附近时间探测器可以测量带电粒子的 TOF, 清楚地鉴别出射粒子。通过对不同制作材料、不同形状以及不同包裹材料制成的光导进行比较测试, 给出了大面积闪烁光纤阵列所用的最佳的光导为 45° 切割、铝膜包装、航空有机玻璃制作的光导。对所使用的分压器提出了合理的改进方案, 以提高探测单元的性能, 最终完成光纤单元的选材和设计。利用放射源和 RIBLL 提供的束流对光纤单元的性能进行了测试, 大面积闪烁光纤阵列具有很高的时间分辨和空间分辨能力, 结合靶附近时间探测器可以更好地鉴别出粒子。截至目前, LASFA 已经完成了单元的研制和组装, 并且组装完成了 2 组 46 个单元, 随着安装的继续进行, LASFA 的建成将为 RIBLL 终端提供更有效的实验探测手段。

参考文献 (References):

[1] Wu Zhihua, Zhao Guoqing, Lu Fuquan, et al. Experimental

- Methods of Nuclear Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1996, 99—100(in Chinese).
(吴治华, 赵国庆, 陆福全等. 原子核物理实验方法. 北京: 原子能出版社, 1996, 99—100.)
- [2] Xie Yigang, Chen Chang, Wang Man, *et al.* Particle Detector and Data Acquisition. Beijing: Science Press, 2003, 210—211 (in Chinese).
(谢一冈, 陈 昌, 王 曼等. 粒子探测器与数据获取. 北京: 科学出版社, 2003, 210—211.)
- [3] Liu Shumei, Wang Yanheng. Trends in Nuclear Physics, 1993, **10**(4): 43(in Chinese).
(刘淑美, 王延恒. 核物理动态, 1993, **10**(4): 43.)
- [4] Wang Zhaomin, Wang Xiaolian, Xu Zizong, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 1999, **19**(1): 70(in Chinese).
(汪兆民, 汪晓莲, 许咨宗. 核电子学与探测技术, 1999, **19**(1): 70.)
- [5] Gao Qi, Gao Hui, Xiao Guoqing, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2007, **41**(6): 125(in Chinese).
(高 启, 高 辉, 肖国青等. 原子能科学与技术, 2007, **41**(6): 125.)
- [6] Kirkby J. CERN-EP, Geneva: CERN, 1987, 60.
- [7] Ambrosio C, Gys T, Leutz H, *et al.* CERN-PPE, Geneva: CERN, 1996, 65.
- [8] Chi Shaopeng, Xia Xiaomi, Zhou Li, *et al.* High Energy Phys and Nucl Phys, 2003, **27**(3): 257(in Chinese).
(迟少鹏, 夏小米, 周 莉等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(3): 257.)
- [9] Anne R, Bazin D, Mueller A C, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1987, **A257**(2): 215.
- [10] Sherrill B M, Morrissey D J, Nolen J A, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1991, **B56/ 57**: 1 106.
- [11] Kubo T, Ishihara M, Inabe N, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1992, **B70**(1—4): 309.
- [12] Geissel H, Armbruster H, Behr K H, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1992, **B70**(1—4): 286.
- [13] Sun Z, Zhan W L, Guo Z Y, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **A503**: 496.
- [14] Guo Zhongyan, Zhan Wenlong, Liu Guanhua, *et al.* Acta Physica Sinica (Overseas Edition), 1999, **8**(1): 21.
- [15] Li Jiaying, Zhan Wenlong, Guo Zhongyan, *et al.* High Energy Phys and Nucl Phys, 1999, **23**(3): 231(in Chinese).
(李加兴, 詹文龙, 郭忠言等. 高能物理与核物理. 1999, **23**(3): 231.)
- [16] Wang Jinchuan, Xiao Guoqing, Guo Zhongyan, *et al.* Nuclear Physics Review, 2005, **22**(1): 84(in Chinese).
(王金川, 肖国青, 郭忠言等. 原子核物理评论, 2005, **22**(1): 84.)
- [17] Li Chen, Xiao Guoqing, Zhan Wenlong, *et al.* Nuclear Techniques, 2005, **28**(10): 799(in Chinese).
(李 琛, 詹文龙, 肖国青等. 核技术, 2005, **28**(10): 799.)
- [18] Gao Qi, Xiao Guoqing, Wang Jiansong, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, Accepted(in Chinese).
(高 启, 肖国青, 王建松等. 核电子学与探测器技术, 已接受.)
- [19] Qi Huirong, Wang Jinchuan, Xiao Guoqing, *et al.* Nuclear Techniques, 2005, **28**(6): 472(in Chinese).
(祁辉荣, 王金川, 肖国青等. 核技术, 2005, **28**(6): 472.)
- [20] Ding Xianli, Wang Jinchuan, Qi Huirong, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, **25**(4): 395(in Chinese).
(丁先利, 王金川, 祁辉荣等. 核电子学与探测器技术, 2005, **25**(4): 395.)
- [21] Gao Qi, Xiao Guoqing, Wang Jiansong, *et al.* Atomic Energy Science and Technology. Accepted(in Chinese).
(高 启, 肖国青, 王建松等. 原子核科学与技术, 已接受.)

Development of LASFA at RIBLL Terminal*

YANG Yan-yun^{1, 2, 1)}, WANG Jian-song¹, XIAO Guo-qing¹, GAO Qi^{1, 2}, GAO Hui^{1, 2}, Huang Mei-rong^{1, 2},
YAO Xiang-wu^{1, 2}, LI Chen¹, XU Hu-shan¹, GUO Zhong-yan¹, HU Zheng-guo¹,
ZHANG Xue-heng^{1, 2}, HUANG Tian-heng^{1, 2}, YU Yu-hong^{1, 2}, QIU Hao^{1, 2}

(1 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The principles and structure characteristics of Large Area Scintillating Fiber Array(LASFA)

* Received date: 21 Nov. 2007; Revised date: 28 Jan. 2008

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10205019, 10105011); National Natural Science Foundation of China for Innovative Research Group(10221003); Century Program of Chinese Academy of Sciences (O501080BR0)

1) E-mail: yangyanyun@impcas.ac.cn

detector at RIBLL (Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou) are described. The development of LASFA and the characteristics of the scintillating fibers unit are reported. LASFA can be used to detect the light charged particles at RIBLL terminal due to its good time and spatial resolutions.

Key words: LASFA; light charged particle; time resolution; spatial resolution; particle identification