脉冲阿尔法射线飞行时间探测器研制

李奎念[1]，陈 萍[1]，刘虎林[1]， 任洁茹[2]， 魏文青[2]，罗旭阳[2]，田进寿[1]， 赵永涛[2]

（1.中国科学院西安光学精密机械研究所 超快诊断技术重点实验室, 西安 710119；2.西安交通大学 物理学院, 西安 710049）

摘要：氢硼核反应是一种不产生中子的清洁聚变反应，聚变过程会生成大量的阿尔法粒子，而阿尔法粒子的产额是度量聚变程度的关键参数。为精确测量实验室条件下激光驱动强流质子束在硼等离子体中发生氢硼核反应的阿尔法粒子信息，研制了基于飞行时间法的脉冲阿尔法射线探测器。探测器主要由薄塑料闪烁体、传光束、门控型微通道板光电倍增管组成，将阿尔法粒子的能谱信息转换为时间谱信息，通过记录闪烁体的发光强度随时间的变化，获得阿尔法射线的强度随能量的变化。所研制的探测器在神光-III 装置上开展的氢硼核反应实验中得到了应用，实验结果表明，该探测器可在强干扰伽马射线本底下获得高信噪比的阿尔法粒子信号，与 CR-39 固体径迹探测器相比，具有快速数据获取、精确反演能谱信息的特点。

关键词：脉冲阿尔法射线；飞行时间；氢硼核反应；门控型微通道板光电倍增管；探测器

Development of Pulse Alpha-Ray Time-of-Flight Detector

LI Kuinian[1], CHEN Ping[1], LIU Hulin[1], REN Jieru[2], WEI Wenqing[2], LUO Xuyang[2], TIAN Jinshou[1] , ZHAO Yongtao[2]

(1. Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China；2. School of Physics, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China)

Abstract：The hydrogen-boron nuclear reaction is a clean fusion reaction that does not produce neutrons. During the fusion process, a large number of alpha particles are generated, and the yield of alpha particles is a key parameter for measuring the degree of fusion. In order to accurately measure the alpha particles of the hydrogen-boron nuclear reaction in boron plasma under laboratory conditions driven by laser-driven high-current proton beams, a pulsed alpha-ray detector based on the time-of-flight method was developed. The detector mainly consists of a thin plastic scintillator, an optical fiber bundle, and a gated MCP-PMT. It converts the energy

中国仪器仪表学会

spectrum of alpha particles into time spectrum. By recording the change in luminescence intensity of the scintillator, the intensity of the alpha rays as a function of energy is obtained. The developed detector has been applied in the hydrogen-boron nuclear reaction experiment conducted on the Shenguang-III device. The experimental results show that this detector can obtain high signal-to-noise ratio alpha particle signals under strong interference gamma rays. Compared with the CR-39 solid track detector, it has the characteristics of fast data acquisition and accurate inversion of energy spectrum information.

Keywords： Pulsed alpha-ray; Time of flight; hydrogen-boron nuclear reaction; Gated MCP-PMT; Detector

1 引言

氢硼（p-^{11}B）核反应[1]是一种特定类型的核聚变反应，其基本原理是在极高温度下，一个质子（氢原子核）与一个硼-11 原子核碰撞并融合，形成两个氦原子核（阿尔法粒子），并释放大量的能量。氢硼核反应过程几乎不产生中子，是一种清洁的聚变能源。近年来，氢硼核反应受到国际上越来越广泛的关注[2]，采用激光驱动的强流质子束在硼等离子体中诱导 p-^{11}B 核反应[3]是实验室条件下进行 p-^{11}B 聚变研究的主要途径之一。阿尔法粒子的产额是评估 p-^{11}B 核反应程度的重要度量，能够为实验设计提供最直接的反馈。因此，准确测量脉冲阿尔法粒子的能谱（能量-数量关系）是 p-^{11}B 核反应实验研究的重要手段。

CR-39 固体径迹探测器[4]是测量脉冲阿尔法粒子能谱的常规手段，但 CR-39 存在数据读取速度慢、鉴别饱和等诸多方面的问题。本方案研制了一种脉冲阿尔法射线探测器，基于飞行时间原理，采用快响应塑料闪烁体和门控型微通道板型光电倍增管（MCP-PMT）[5]，将阿尔法射线的能谱信息转换为时间谱信息，可获得强干扰本底下的阿尔法粒子信号。基于飞行时间法的脉冲阿尔法能谱探测器具有快速数据获取、精确反演能谱信息的优势，在脉冲阿尔法粒子测量方面具有重要应用前景。

2 基本原理

阿尔法粒子在真空中飞行，非相对论条件下，飞行时间与能量、飞行距离存在如下对应关系：

$$t=\sqrt{\frac{m}{2E}}l \tag{1}$$

中国仪器仪表学会

其中，t 为飞行时间，E 为阿尔法粒子的能量，l 为飞行距离，m 为阿尔法粒子的质量。若将阿尔法粒子的质量（6.64×10^{-27}kg）带入上式，取能量的单位为 MeV、飞行时间的单位为 ns、飞行距离的单位为 m，则有

$$t=\frac{144l}{\sqrt{E}} \tag{2}$$

在一定的飞行距离下，阿尔法粒子的飞行时间与能量一一对应。采用阿尔法射线探测器，通过记录阿尔法射线的强度随时间的变化，可以获得阿尔法射线能谱分布。当飞行距离为 1m，不同能量阿尔法射线所需的飞行时间如图 1 所示。由式（2）可知，阿尔法射线的能谱分辨与时间分辨具有如下关系：$\Delta E/E=2\Delta t/t$，即能谱分辨率取决于探测器的时间分辨率。对于 4MeV 能量的阿尔法粒子，飞行距离 1m 时，所需飞行时间为 72ns。若探测器的时间响应为 2ns，则阿尔法射线的能谱分辨 ΔE 为 222keV。

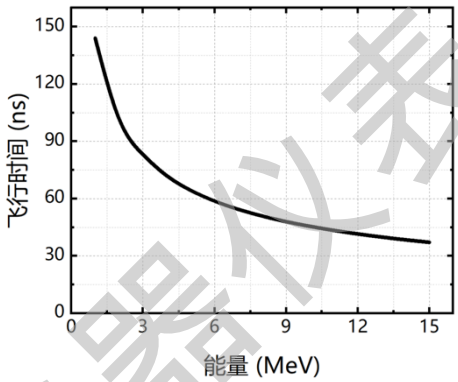

图 1 不同能量阿尔法射线飞行 1m 所需的飞行时间

3 探测器研制

3.1 总体设计

脉冲阿尔法飞行时间探测器的关键是记录下到达探测器处的阿尔法射线的强度随时间的变化，且探测器的时间响应越快，测到的阿尔法射线的能谱分辨越好。根据闪烁探测原理，可将探测器分为射线-荧光转换、荧光传输、光电转换及输出三个物理环节。根据三个探测环节需要考虑的因素，进行探测器的总体设计。

采用闪烁体将脉冲阿尔法射线转换为荧光，荧光的强度与阿尔法射线的强度相对应，荧光的时间信息对应了阿尔法射线的能量信息。闪烁体的时间响应越快，探测器对阿尔法射线的能谱分辨率越高。塑料闪烁体一般具有 1~2 ns 的时间响应，因此本案例中，采用薄塑料闪烁体作为射线-荧光转换部件。

中国仪器仪表学会

脉冲阿尔法粒子是在真空靶室内产生和运动的，闪烁体也置于真空靶室内。为了将靶室内闪烁体产生的荧光输送到靶室外，采用锥形光导和传光束的方式进行传输耦合。锥形光导的作用是将闪烁体的发光面积与传光束的有效面积进行匹配，以最大化将闪烁体发光接收和传输。

在光电转换及输出方面，采用具有快时间响应的 MCP-PMT 与传光束相耦合，以实现闪烁光的高速探测。MCP-PMT 可将闪烁光转换为电子，并进行倍增输出，以被后续示波器等数字化仪记录。考虑到脉冲阿尔法飞行时间探测器工作在具有强伽马本底的实验环境中，采用具有门控功能的 MCP-PMT，以实现对强伽马射线的抑制，提高阿尔法信号的信噪比。

3.2 具体实现

根据探测器的总体设计，在具体实现方面主要考虑两个端口的设计，一是与真空靶室相连并将荧光输送出来的端口，二是真空靶室外部的荧光接收和探测端口。

真空靶室端采用法兰转接、真空密封的方式进行，工程设计如图 2 所示，转接法兰和法兰盘用于将射线-荧光转换部件和真空靶室进行真空耦合。薄塑料闪烁体与锥形光导紧密贴合，并使用光学硅脂进行折射率匹配，以提高闪烁光的收集效率。锥形光导采用有机玻璃材质，可实现塑料闪烁体发光光谱范围的高效透射。采用真空硅脂涂覆锥形光导与转接法兰的接触面，实现探测器与真空靶室的密封。固定连接器用于将传光束与锥形光导的另一端耦合在一起，传光束采用石英光纤束，以实现闪烁光的高效传输，传光束的有效直径为 14mm。

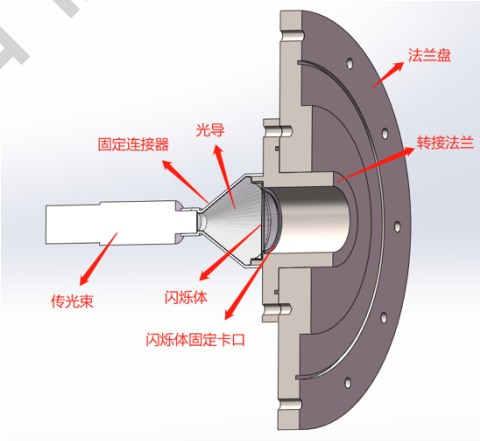

图 2 真空靶室端工程设计

中国仪器仪表学会

荧光接收和探测端采用传光束和门控型 MCP-PMT 直接耦合的方式，采用中国科学院西安光学精密机械研究所自主研制的门控型 MCP-PMT，其有效探测直径为 18mm，可高效接收传光束的出射荧光，表 1 列出了门控型 MCP-PMT 的关键技术参数。

表 1 门控型 MCP-PMT 的关键技术参数

类别	技术参数
光阴极有效直径	18mm
量子效率@400nm	＞15%
积分灵敏度	＞100 μA/lm
增益	＞1E6
消光比	＞1000:1
门控建立时间	＜5ns
门控耦合噪声	＜±5mV
开门宽度	10ns~2ms
门控脉冲输入	≥10V，输入阻抗 50Ω
信号输出	负信号，输出阻抗 50Ω
工作电压	负高压，＜-2300V
最大线性脉冲电流	＞300mA@20ns 脉宽

图 3 是根据上述设计所研制的脉冲阿尔法射线飞行时间探测器的实物，图 3 中，a 是门控型 MCP-PMT，b 是转接法兰，c 是装配后法兰端部件，d 是与光纤束耦合后的门控型 MCP-PMT，d 是与光纤束耦合后的锥形光导。

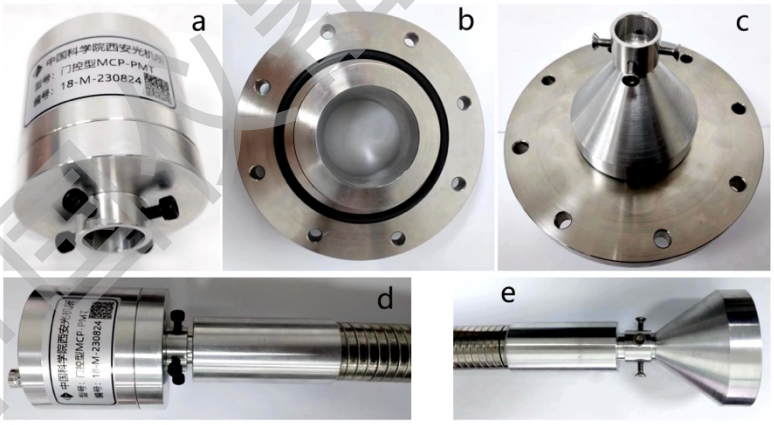

图 3 脉冲阿尔法射线飞行时间探测器的实物

3.3 数值计算

采用“阿尔法射线→闪烁体→光电倍增管→示波器”这一级联模型来分析探测器的各个环节的探测效率，对预期输出进行估算。

激光驱动质子束打靶，产生大量的近似 4π 空间发射的脉冲阿尔法射线，与闪烁体发生作用的阿尔法粒子数 N 可用下式表示：

中国仪器仪表学会

$$N = Y\frac{A}{4\pi l^2}\eta \tag{3}$$

其中，Y 是阿尔法的产额，取 3×10^8 个；A 是闪烁体的面积，闪烁体半径取 2cm；l 是闪烁体到靶的距离，取 1m。η 为阿尔法射线在塑料闪烁体中的能量沉积效率，阿尔法射线的射程很短，1mm 厚度的塑料闪烁体可将 15MeV 以内的阿尔法全部沉积，η 可近似取 1。

阿尔法射线入射到闪烁体上，与闪烁体作用，使闪烁体发光。闪烁体发的光经光导收集，通过光纤束入射到光电倍增管光阴极上，转换成光电子，倍增。光电倍增管输出的电子数 n_e 可用下式表示：

$$n_e = N\eta_1\eta_2\eta_3\eta_4 G \tag{4}$$

其中，η_1 是闪烁体的光产额，假设阿尔法射线的平均能量为 4MeV，则 η_1 取值 2000 光子/阿尔法射线；η_2 是光导收集效率，取值 0.1；η_3 是光纤束的透过率，取值 0.1；η_4 是光电倍增管光阴极在闪烁体中心波长处的量子效率，取值 0.1；G 是光电倍增管的增益，取值 1×10^5。

若光电倍增管电信号接示波器，用来记录阿尔法射线飞行时间谱。对于 1m 飞行距离，2MeV-12MeV 的阿尔法射线飞行时间跨度约 60ns，则示波器信号的平均幅度

$$V = \frac{en_e}{\tau}R \tag{5}$$

其中，e 为一个电子的电荷量；R 为匹配电阻，取 50Ω；τ 为阿尔法射线飞行时间谱时间宽度，取 60ns。

按照上述估算过程，若塑料闪烁体厚度取 1mm，阿尔法射线的飞行具体取 1m，则示波器输出的平均幅度为 0.8V。

4 典型应用

图 4 是在星光-III 装置上开展的氢硼核反应实验中，采用本方案脉冲阿尔法射线飞行时间探测器所获得的典型阿尔法射线飞行时间谱。实验中会产生大量的伽马射线，伽马射线先到达探测器。此时，门控型 MCP-PMT 工作在关门状态，伽马射线与闪烁体相互作用产生的荧光不会被倍增放大。当脉冲伽马射线的峰值强度降低到一定程度后，使 MCP-PMT 工作在开门状态，MCP-PMT 对闪烁体的发光进行光电转换和放大输出。由于伽马射线很强，尽管伽马射线的绝大部分能量会穿透薄塑料闪烁体，但其引起的闪烁体发光余辉仍然较强。因此，MCP-PMT 开门之后的信号表现为闪烁体的余辉效应，其强度呈指数式衰

中国仪器仪表学会

减。当脉冲阿尔法射线到达闪烁体后，使闪烁体发光，在信号上表现为叠加在闪烁体余辉本底上的阿尔法信号。

通过所获得的阿尔法射线的时间谱信息，通过飞行时间反演，可以获得阿尔法射线的能谱信息，进一步结合飞行时间探测器对不同能量阿尔法射线的标定灵敏度，可以得到氢硼核反应中不同能量阿尔法射线的产额。

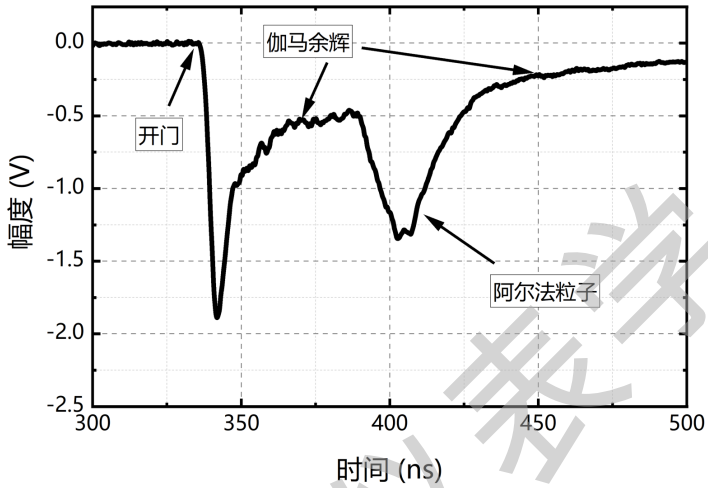

图 4 测得的典型阿尔法射线信号

5 总结

采用快响应塑料闪烁体和门控型 MCP-PMT，结合相应的工程设计实现，研制了一种脉冲阿尔法飞行时间探测器。探测器基于飞行时间原理，将阿尔法射线的能谱信息转换为时间谱信息，可获得强干扰本底下的阿尔法粒子信号。所研制的探测器具有快速数据获取、精确反演能谱信息的特点，在星光-III 装置上开展的氢硼核反应实验中获得了高信噪比的脉冲质子信号，在脉冲阿尔法射线测量方面具有重要应用前景。

参考文献：

[1] McKenzie, W., Batani, D., Mehlhorn, T.A. et al. HB11—Understanding Hydrogen-Boron Fusion as a New Clean Energy Source[J]. J Fusion Energ, 2023 (42): 17.

[2] Labaune, C., Baccou, C., Depierreux, S. et al. Fusion reactions initiated by laser-accelerated particle beams in a laser-produced plasma[J]. Nat Commun, 2013 (4): 2506.

中国仪器仪表学会

[3] Yongtao Zhao, Wenqing Wei, Shizheng Zhang et al. Proton-Boron Fusion: A Dark Horse in the Fusion Race Shows Yield Much Beyond Expectation[J], PREPRINT (Version 1) at Research Square, 2023 (9): 14.

[4] Jeong, T.W., Singh, P.K., Scullion, C. et al. CR-39 track detector for multi-MeV ion spectroscopy[J]. Sci Rep, 2017 (7): 2152.

[5] Kuinian Li, Ping Chen, Hulin Liu, et al. An enhanced gated MCP-PMT for neutron detection in laser fusion experiments[J]. NIMA, 2024 (1067): 169726

中国仪器仪表学会