

瞬态脉冲辐射特性物理诊断

刘庆兆

(核物理与化学研究所 成都 610003)

摘要 本文简要综述了 CAEP 核物理与化学研究所长期进行的瞬态脉冲中子、 γ 、X 辐射的时间、能谱、能量与时间联合谱及其相关特征量的物理诊断技术及发展水平。

关键词 瞬态脉冲核辐射, 物理诊断技术, 探测系统, 脉冲中子, 脉冲 γ 辐射, 脉冲 X 辐射。

1 引言

回顾核物理学的发展史, 不难发现, 由于稳态或准稳态核辐射源在单位时间内产生的辐射粒子(量子)数(下称辐射强度)较低, 越来越不能适应核物理学与核技术应用领域研究的需求。于是, 各种类型的高功率、高强度脉冲辐射源(诸如脉冲反应堆、脉冲电子加速器、脉冲激光器及其打靶产生的脉冲 X 辐射和脉冲中子、同步辐射等)相继问世, 并迅速发展。当代最强的脉冲辐射源当属核爆炸, 中子、 γ 辐射强度可达 10^{32}s^{-1} 量级, 这是稳态或准稳态辐射源无法比拟的。

高强度脉冲核辐射源是经济、军事、工业、农业以及进行材料分析、新能源、新材料、化学反应动力学、核医疗等现代科学研究中更具有吸引力、更有效的研究工具。

当利用脉冲核辐射源作为研究和使用时, 首先必需通过实验诊断, 以掌握脉冲核辐射源及其形成的脉冲辐射场的特性和有关特征量; 当了解并认识脉冲核辐射源产生脉冲辐射的物理机制、物理过程和物理规律, 再利用这些物理规律的再现, 以达到研究目的时, 更需要知道脉冲核辐射源及其辐射场特性和有关的特征量。于是, 脉冲核辐射源及其辐射场特性的诊断理论和物理诊断技术也随之发展, 并逐步形成了实验核物理学中一个新兴实验学科分支——脉冲辐射诊断学。

我所开展脉冲核辐射特征物理诊断技术的研究起步较早, 已逐步形成了一整套脉冲核辐射场和混合辐射场特性的物理诊断技术

与方法, 为脉冲核辐射源的物理研究与应用研究提供了一批极为重要的实验诊断数据, 取得了一批学术界有重大影响的研究成果。中国科学院院士胡仁宇、唐孝威、王乃彦等教授都曾先后直接领导过这一工作。

2 瞬态脉冲核辐射特性诊断系统概述

瞬态脉冲核辐射特性物理诊断系统由种类电流型探测器、信号传输线、记录终端和时间关联设备组成。诊断中使用的探测器有: 快闪烁探测器、契伦柯夫探测器、PIN 半导体探测器、中子辐照改性的 GaAs:Cr 和 InP:Fe 光电导探测器、真空和介质型康普顿二极管、法拉第筒及其它特殊类型的探测器。这些探测器输出的脉冲线性电流为 $0.3\sim 100\text{A}$; 灵敏度为 $10^{-8}\sim 10^{-24}\text{A}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s}/\text{MeV}$, 经适当组合, 可覆盖的脉冲辐射场辐射粒子(量子)能通量密度为 $10^8\sim 10^{25}\text{MeV}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$; 时间响应已达 ns 或亚 ns 的水平。有的探测器的时间响应可达几十 ps。

信号传输线主要用同轴电缆和光缆。通过微带元器件及由其组成的四级零对非匹配补偿网络和五级零对非匹配网络, 在幅度衰减约 40dB 时, 1km 长的同轴电缆时间响应带宽达 470MHz, 能达到电缆补偿上限频带宽度——500MHz/km; 1km 长有源光纤系统频带宽度已达 450MHz, 实验室系统已达 1GHz。

线性显示和数字式智能记录系统的带宽已达 $1\sim 5\text{GHz}$ 。作为脉冲辐射信号时间关联的数字式和时标-游标式时间关联系统, 时间

关联精度等于或小于1ns.

通过实验测定和理论计算,可以得到诊断系统的时间能量响应函数 $g(E,t)$,当诊断系统测量出的结果为 $h(E,t)$ 时,则由式

$$h(E,t) = \int g(E,t')\varphi(E,t-t')dt' \quad (1)$$

的逆褶积,可得输入诊断系统瞬态脉冲核辐射场辐射粒子(量子)通量密度 $\varphi(E,t)$,再由

$\varphi(E,t)$ 推出源的脉冲特性和有关特征量.

3 瞬态脉冲中子特性诊断

通常,在脉冲中子、 γ 辐射混合场中进行脉冲中子特性诊断.图1简要示出了典型的瞬态脉冲中子特性探测系统.

中子准直器输出端采用锥型设计,防止

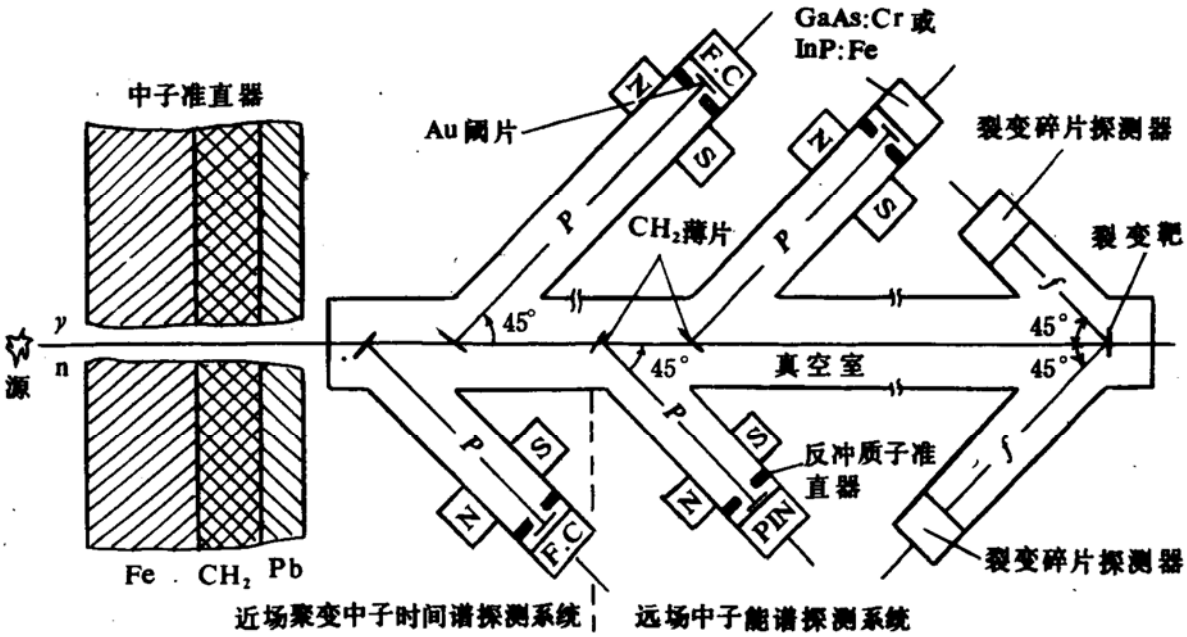


图1 瞬态脉冲中子特性探测系统

散射 γ 辐射进入探测器灵敏部位,从而提高信噪比.探测系统由机翼型真空室、聚乙烯(CH₂)转换靶、弱磁场、反冲质子准直器、Au吸收片和探测器组成.在近源处的探测系统用于脉冲中子时间谱测量;利用中子飞行时间原理,在远源处测量脉冲中子能谱及中子总数;Au吸收片用于阈上脉冲中子时间谱和能谱特性诊断.通过 Doppler 高能中子能谱展宽测量,还可给出 D-T 反应的温度 T_i ;

$$\Gamma_{1/2}(\text{MeV}) = 0.177[T_i(\text{keV})]^{1/2} \quad (2)$$

式中, $\Gamma_{1/2}$ 为 Doppler 展宽中子能谱半高宽.也可由 D-T 反应中子能谱 Doppler 展宽引起的中子飞行时间展宽 Δt_n 确定 D-T 反应温度

$$\Delta t_n(\text{ns}) = 0.121L[T_i(\text{keV})]^{1/2} \quad (3)$$

式中, L 为中子飞行距离.通过中子总数测量

还可推算出脉冲中子辐射场的中子总剂量.

在混合辐射场情况下,在约凡十厘米的近源处放置散射靶测量高能中子与散射靶产生的非弹高能散射 γ 辐射时间谱,可更好地诊断 D-T 反应的时间特性.

目前,正在研制几十 ps 至几百 ps 级快时间响应的 ICF 聚变中子时间特性和中子总数的精密智能诊断系统.

4 瞬态脉冲 γ 辐射特性诊断

瞬态脉冲 γ 辐射特性诊断主要是对裂变诱发 γ 辐射强度随时间变化及其能谱、聚变反应高能 γ 辐射时间谱及其非弹 γ 辐射时间特性的诊断,利用前述不同类型、不同灵敏度探测器组成的探测器系统实施探测.图2示出

了一种探测系统.

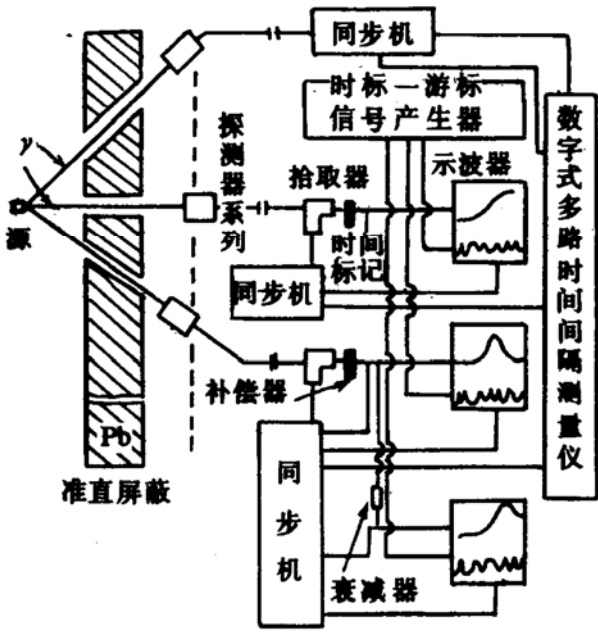


图2 一种脉冲γ辐射时间特性探测系统

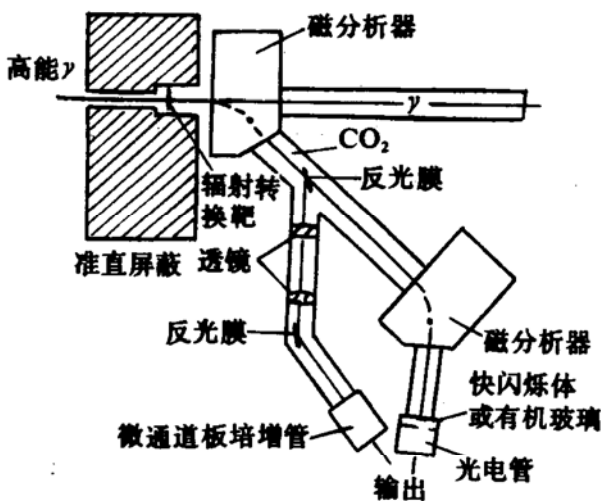


图3 高能脉冲γ辐射时间谱探测系统

实验测量时所诊断的各种参数通过多路数字化时间关联仪进行时间关联. 某些参数需要时间关联精度较高时,可采用时标-游标进行时间关联.

对 $\exp[\int a(t)dt]$ 这种特殊的指数型脉冲γ辐射时间特性精细结构特征量 $a(t)$ 的诊断,既采用示波器线性显示和数字式智能示波器获取记录结果和时标-游标关联方法,同时也采用始端或终端脉冲取样与数码传输智能快

速化方法,而测量精确度好于前者.

通过 D-T 反应产生的 16.7MeV 高能γ辐射时间谱测量,可直接诊断 D-T 反应速率. 图3示出了一种典型的探测系统.

该探测系统可在低能脉冲γ辐射本底比待测高能γ辐射强度高 10^5 倍的情况下,鉴别并测出 D-T 反应高能脉冲辐射的时间谱.

对亚 ns 级瞬态脉冲γ辐射的时间特性的诊断,通过有源光纤系统实现,其发射端采用内调制激光器或外调制 LiNbO₃晶体,接收端采用 PIN/FET 或 PIN 加放大器,系统具有较高的带宽,实验室达1GHz.

5 瞬态脉冲 X 辐射特性诊断

瞬态脉冲 X 辐射的时间谱、能谱、能量时间联合谱等特性,反映高温下物质的状态及其变化过程、X 辐射场温度及有关特征量. 测量的 X 辐射能量范围为几~几十 keV.

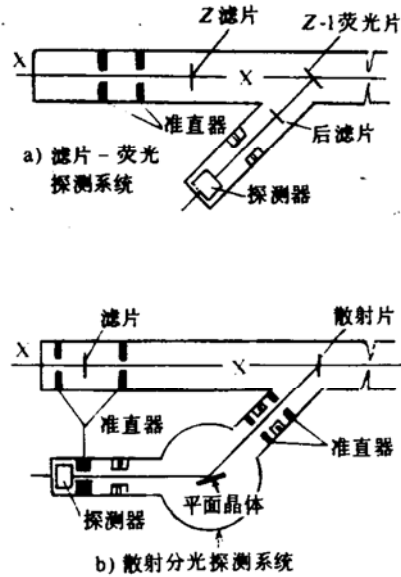


图4 瞬态脉冲 X 辐射特性探测系统

使用的诊断方法主要有:滤波-荧光法、散射-晶体分光法等. 图4为两种用于瞬态脉冲 X 辐射特性诊断的探测系统的示意图.

滤波-荧光法用于平衡谱测量,诊断色温;散射-晶体分光法用于非平衡谱测量. 散射方法,即可降低 X 辐射强度, (下转26页)

上为我们的研究工作付出智慧和辛勤劳动的全体科技人员和工人。

参 考 文 献

1 郑志坚,胡仁宇. 强激光与粒子束 1990,2(1): 1
 2 丁耀南等. 强激光与粒子束,1989,1(3): 248

3 孙可煦等. 强激光与粒子束,1992,4(3): 401
 4 丁耀南等. 强激光与粒子束,1994,6(1): 147
 5 祁兰英等. 强激光与粒子束,1993,5(3): 415
 6 梅启庸等. 强激光与粒子束,1994,6(1): 5
 7 李三伟等. 强激光与粒子束,1994,6(3): 400
 8 丁永坤等. 强激光与粒子束,1994,6(1): 85
 9 郑志坚等. 强激光与粒子束,1989,1(2): 139
 10 陈晓峰等. 强激光与粒子束,1992,4(2): 291

Current State of Experimental Study of Laser Fusion in China

Ding Yaonan

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract The diagnostic instruments and some physical results about laser fusion experiments in our laboratory are briefly described. The achievements in direct and indirect driven impulsion performed in China are also given here.

Key Words laser fusion, diagnostic instrument, neutron yield.

(上接 43 页)

又不会使 X 辐射谱形过度变硬;而晶体分光法分光能区宽、对 X 辐射谱形适应性强。

核物理与化学研究所脉冲辐射诊断研究室的同行们都先后参加了本工作。

Physical diagnosis of Characteristics of Transient Pulse Nuclear Radiations

Liu Qingzhao

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract For more than 30 years physical diagnostic techniques of transient pulse nuclear radiations have been made in CAEP. In this paper the physical diagnostic techniques and their progress in characteristics of time, energy spectrum and time-energy spectrum of transient pulse neutrons, γ and X-rays are summarized.

Key Words transient pulse nuclear radiations, physical diagnostic techniques, detective systems, pulse neutron, pulse γ radiation, pulse X radiation.