

ICF 中子飞行时间测量电路设计与实现

魏凌峰 周 荣 杨朝文

(四川大学 物理科学与技术学院 成都 610065)

摘要 在惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)实验中,为诊断等离子体区域温度信息,需要通过中子飞行时间法测量中子的能谱,即转化为对探测器的输出信号相对于激光同步脉冲的延迟时间进行精确测量。本文介绍了一种对中子飞行时间进行高精度测量的设计方案,该方案采用恒比定时方法(Constant Fraction Discriminator, CFD)对探测器输出信号进行定时,并利用德国 ACAM 公司生产的 TDC-GP21 芯片进行精确时间测量。基于该方案完成的测量电路电子学分辨时间在 1 500 ns 量程内均优于 200 ps。同时,其电子学分辨时间加上探测器分辨时间典型测量结果为 217.5 ps。

关键词 惯性约束聚变,核诊断,中子飞行时间,时间数字变换

中图分类号 TL824

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.070403

在惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究中,需要通过测量聚变产生的中子能谱对内爆热斑离子温度进行诊断,而能谱的测量通常是通过中子飞行时间法转换成时间间隔的测量。1977年,美国劳伦斯利福摩尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)首次在 Argus 装置上通过中子飞行时间法诊断了内爆离子温度。随后,该实验室于 1984 年建成的 Nova 装置和 LLNL 的协作单位——美国 Rochester 大学制造的 Omega 激光驱动器,以及现今世界上最大的美国激光聚变装置 NIF (National Ignition Facility)上都使用了这项技术诊断离子温度^[1-6]。在国内的核物理实验中,中子飞行时间法的应用也十分广泛,兰州重离子加速器冷储存环(Heavy Ion Research Facility Laboratory Cooler-Storage-Ring, HIRFL-CSR)以及北京谱仪 III (Beijing Spectrometer III, BESIII)等大型科研装置均是利用该方法来进行粒子鉴别^[7-9]。而在激光聚变领域,高功率激光物理国家实验室研制的“神光 II”装置上也使用过这种方法诊断直接驱动内爆的离子温度。中国工程物理研究院研制的“神光 III”原型装置是目前国内最大的 ICF 装置,该装置同样使用中子飞行时间法进行离子温度诊断^[10-12],安徽省物理电子学重点实验室的张岳华等^[13]针对“神光 III”大阵列中子探测器系统的应用做了初步研究,采用 TDC-GP2 (Time Digital Conversion)芯片设计中子飞行时间测量插件,其时数转换部分的精度达 61 ps。

目前时间间隔测量常用的测量方法有:电子计数法、模拟内插法、时间幅度转换法、脉冲波形数字化方法^[14-15]。但是,以上方法却存在下述问题:电子计数法时间测量精度较低;模拟内插法电路实现困难,且连续测量能力较差;时间幅度转换测量范围较小;脉冲波形数字化方法精度虽高,但需对波形进行全采样,实现成本较高,不利于大规模系统使用。

于是,对于 ICF 大阵列中子探测,测量的中子飞行时间量程为 1 500 ns,测量精度要达到百皮秒量级,同时考虑到大规模集成时的成本和技术难度,方案采用了时间数字转换方法,即选用高精度的 TDC 芯片进行中子飞行时间测量^[16-17]。本文介绍了基于德国 ACAM 公司生产的 TDC-GP21 芯片的时间测量方案设计,以及利用“神光 III”原型装置所使用的探测器进行精度测试实验的结果。

1 时间测量方案设计

1.1 方案设计目的及要求

在“神光 III”原型装置 ICF 反应中,其探测器出来的信号可能包括激光打在靶上产生的 X 光、初级 DD 中子打在靶室壁上产生的 γ 射线、次级 DT 中子信号和初级 DD 中子信号等。在次级中子出现前有较强的 X、 γ 射线出现,中子引起的活化也可能产生瞬发 γ 射线。各信号可能出现的位置如图 1 所示。

国家自然科学基金(No.11475121、No.11205108)资助

第一作者:魏凌峰,男,1989 年出生,2015 年于四川大学获硕士学位,研究领域为核电子学仪器研制

通讯作者:周荣, E-mail: zhourong@scu.edu.cn

收稿日期:2015-03-04, 修回日期:2015-04-01

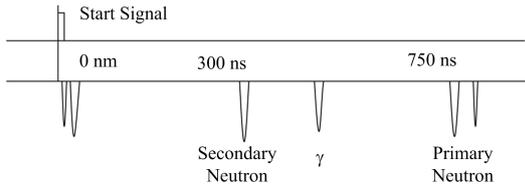


图1 ICF 实验各信号可能出现的时刻
Fig.1 Time points of each signal in ICF experiment.

时间测量方案设计的目的是准确测量中子出现时刻相对于激光同步脉冲的相对延迟时间。也就是说,当激光打靶时,会输出一个激光同步脉冲信号,即开始信号,以此作为时间起点,需要测量后续的次级中子以及初级中子的出现时刻。

根据上述探测器可能出现的信号特征,在设计时间测量方案时其记录能力需满足以下几个要求:(1)能够同时记录多个探测器信号相对于同步信号的发生时刻;(2)能够分辨并记录两个相隔较短的信号;(3)需要满足较大的时间量程。

1.2 定时方法

根据方案设计要求,时间测量功能实现的基本框图如图2所示。开始信号由靶场激光同步信号提供,同时探测器输出的停止信号经定时电路定时后,接入到时数转换芯片的输入管脚,通过现场可编程门阵列芯片(Field Programmable Gate Array, FPGA)对该芯片进行配置可测量出开始信号与停止信号之间的时间差,即聚变产生中子的飞行时间。

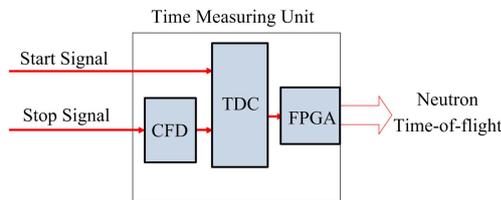


图2 测量单元基本框图
Fig.2 Basic block diagram of the measuring unit.

由于时数转换芯片输入管脚只能接收数字信号,因此在进行时间测量时,需要对探测器输出模拟信号进行精确定时,故精确的定时方法是该方案实现的关键技术之一。核电子学中,常用的定时方法有前沿定时、过零定时、恒比定时等。在该时间测量方案中,选择了具有最高定时精度的恒比定时方法(Constant Fraction Discriminator, CFD),其实现的原理框图如图3所示。

在该恒比定时功能模块中,探测器输入的停止信号将分为三路:第一路信号通过过阈甄别去掉噪声;第二路输入信号经过延时后输入到高速比较器 A_2 的正相输入端;第三路信号经过衰减后输入到高速比较器 A_2 的反相输入端。当延时信号和衰减信号的相对大小发生改变时,比较器 A_2 的输出电平

将发生翻转,并且翻转的时刻点不会受到原始输入信号幅值变化的影响,始终保持于原始信号达到其某一固定高度比例时发生,这样就可以保证时刻鉴别的准确度,比较器 A_2 的输出即为定时信号输入到后端的D触发器。D触发器先接收到来自预触发的开门信号,并在随之而来的定时信号的上升沿处,Q端输出发生翻转,输出为高,该输出信号会被接入RST引脚的单稳态延时信号复位。D触发器的输出信号经电平转换芯片转换后,即为需要测量的停止信号,输入到后端的TDC芯片进行测量。

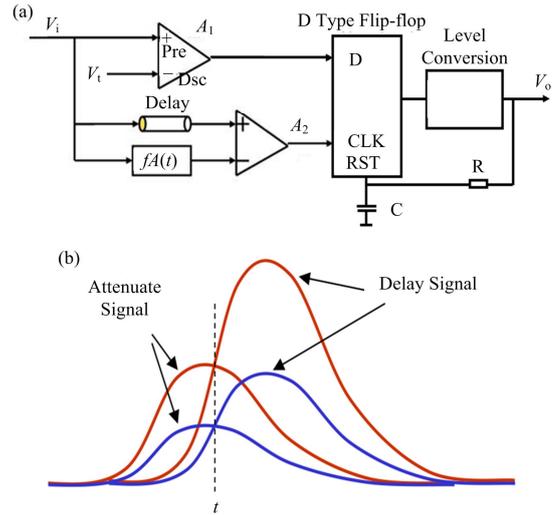


图3 恒比定时方案
(a) 恒比定时原理框图, (b) 定时时刻
Fig.3 Scheme of constant fraction discriminator.
(a) The block diagram of constant fraction discriminator,
(b) The time of constant fraction discriminator

1.3 时间测量方法

保证时间测量的精度是该测量方案实现的另一个技术关键。在该时间测量电路的设计中,使用ACAM公司的时间测量芯片TDC-GP21。该芯片主要由TDC测量模块、16位算术逻辑模块(Arithmetic Logic Unit, ALU)、温度测量模块以及4线SPI串行数据接口组成^[18]。具有两个测量范围,其精度均达到90 ps。在该时间测量方案中,配置芯片时间量程为0–1500 ns,最多可测量8个脉冲到达时刻,且相邻两脉冲的最小间隔小于40 ns。在进行时间测量时,将开始脉冲信号和停止脉冲信号接入TDC芯片的Start和Stop端,并通过FPGA配置芯片的内部寄存器完成测量。其测量流程如图4所示。首先,FPGA需要对TDC的寄存器进行配置和初始化,配置和初始化完成后TDC开始等待开始信号和停止信号进行时间间隔的测量。根据配置,当TDC芯片接收到一个开始信号后,会连续测量其后的8个停止信号的时间间隔,测量完成后通过SPI协议读取结果。

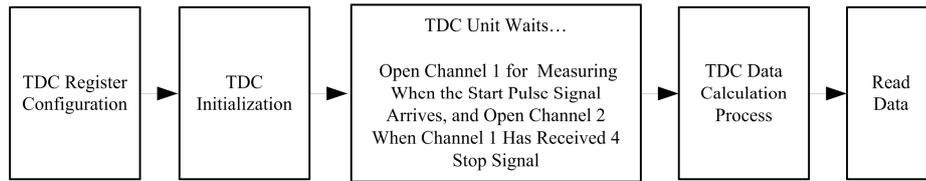


图 4 TDC 测量流程
Fig.4 Measuring process of TDC.

若 TDC 在开始信号之后未测量满 8 个停止信号，会出现测量超时，输出结果异常的情况。而在 ICF 实验中，平均每个探测器只有约 0.5 个击中，因而有些 TDC 芯片会出现只接收到开始信号而没有停止信号，以及停止信号不足 8 个的情况。因此，在 FPGA 的程序设计中，当检测到开始信号后，1 500 ns 时通过 FPGA 连续产生一串停止信号序列，输入到时间测量芯片的 Stop 引脚中，就可以保证 TDC 芯片始终能测量满 8 个停止信号，而不会出现超时情况。同时在处理数据时丢弃 1 500 ns 以上的数据结果即可。

2 记录能力及时间测量精度实验

为测试该时间测量电路的记录能力及测量精度，进行了以下两个实验：(1) 利用信号发生器输出开始及停止信号，测试该电路的记录能力和在全量程范围内的测量精度；(2) 利用探测器信号作为输入，测试该电路的时间测量精度。

2.1 信号发生器输出信号停止时间测量

2.1.1 记录能力测试

由信号发生器产生开始信号和 8 个连续停止脉冲，模拟探测器的实际输出，用该时间测量电路进行记录能力实验(图 5)。其中，第一个脉冲信号为大 幅度信号，后续脉冲为小幅度信号，两者幅度比大于 3，第 8 个脉冲与开始信号间隔大于 1 500 ns，前两个停止信号之间时间间隔约为 35 ns，小于 40 ns，如图 6 所示。

测试结果如表 1 所示，该电路能成功记录 8 个脉冲信号，分辨出时间间隔小于 40 ns 相邻信号，如表 1 中脉冲 1 和脉冲 2 所示。成功记录下 1 500 ns 量程处信号，如表 1 中脉冲 8 所示。

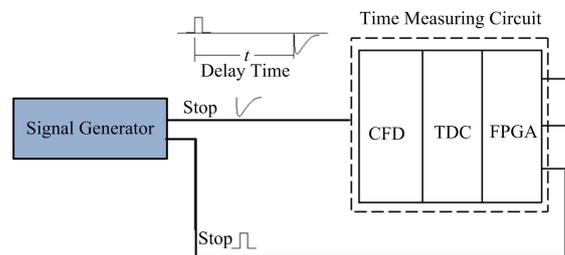


图 5 测试方法
Fig.5 Test method.

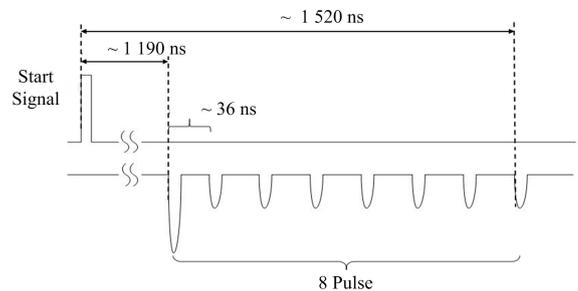


图 6 开始信号与停止信号序列
Fig.6 Sequence of start signal and stop signal.

表 1 8 个脉冲时间序列
Table 1 Time sequence of eight pulse.

脉冲序列 Sequence of pulse	脉冲 1 Pulse 1	脉冲 2 Pulse 2	脉冲 3 Pulse 3	脉冲 4 Pulse 4	脉冲 5 Pulse 5	脉冲 6 Pulse 6	脉冲 7 Pulse 7	脉冲 8 Pulse 8
时间 Time / ns	1 188.42	1 223.75	1 273.86	1 323.73	1 373.32	1 423.22	1 473.30	1 523.28

2.1.2 测量精度测试

为测试该时间测量电路在全量程内的测量精度, 利用图 5 所示实验平台, 用信号发生器产生开始和停止信号, 使两者时间间隔在 100–1 500 ns 变化, 分别进行测量。

实验条件: 开始信号的方波 $T=2\ \mu\text{s}$, 占空比为 20%。停止信号: 脉冲波 $T=200\ \text{ns}$, 脉宽为 20 ns, 上升沿为 9 ns。

据实验结果, 绘制该电路时间测量标准差在全量程内的变化, 结果如图 7 所示。

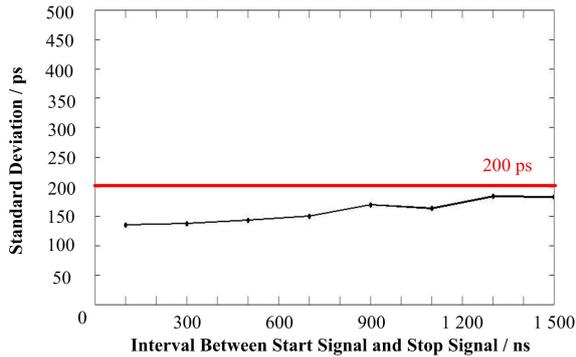


图 7 全量程内时间测量标准差变化
Fig.7 Standard deviation range at the full scale.

其中, 信号发生器输出信号时间间隔为 900 ns 时的典型测试结果分布如图 8 所示, 其标准偏差为 172.8 ps。

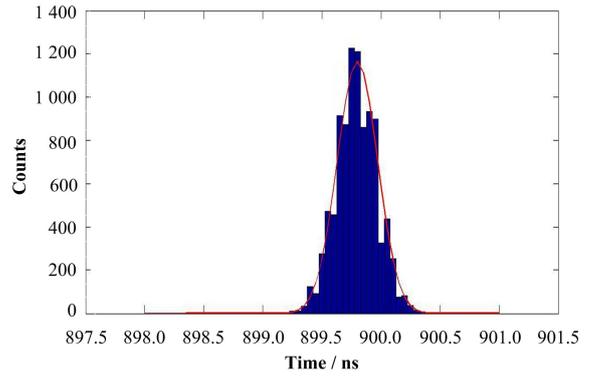


图 8 信号间隔 900 ns 时典型通道测试结果
Fig.8 Typical channel test results at 900 ns signal delay.

结果表明, 在 1 500 ns 时间量程内, 在包含信号源本身的时间晃动的情况下, 测量结果的标准偏差均优于 200 ps。

2.1.3 测量误差

为测试该时间测量电路在全量程内的测量误差情况, 利用上述相同的实验平台和实验条件, 记录下信号发生器的输出时间间隔, 测量的平均时间以及计算得到的测量误差结果如表 2 所示。

其中, 信号发生器输出信号时间间隔为 1 100 ns 时, 实际测得的时间分布如图 9 所示, 其平均值为 1 099.54 ns。结果表明, 在全量程范围内, 时间测量的误差均小于 0.06%, 可见该电路的时间测量结果是非常准确的。

表 2 全量程内时间测量误差
Table 2 Time measurement deviation at the full scale.

信号发生器输出信号时间间隔 Interval of pulse produced by signal generator / ns	100	300	500	700	900	1 100	1 300	1 500
测量平均值 Measurement average values / ns	99.99	299.98	499.88	699.79	899.72	1 099.54	1 299.35	1 499.14
测量误差 Measurement deviation / %	0.010	0.007	0.024	0.030	0.031	0.042	0.050	0.057

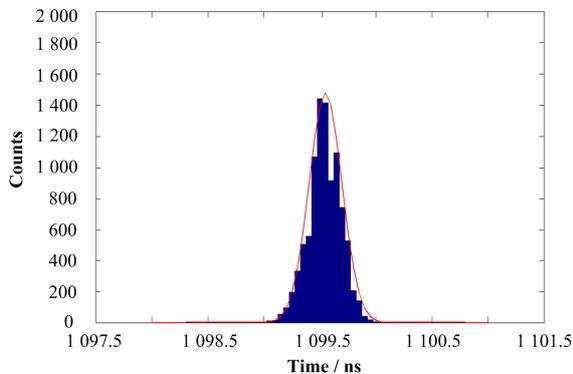


图 9 信号间隔 1 100 ns 时测得时间分布
Fig.9 Time distribution measurements at 1 100 ns signal delay.

2.2 探测器输出信号停止时间测量

按照图 10 所示方法连接设备。利用双端输出塑料闪烁体探测器产生的同时快信号 (信号上升时间 1–5 ns, 半高宽 5–25 ns), 一路经过恒比定时作为开始信号, 另一路经过延时线作为停止信号, 分别输入到时间测量电路的开始信号和停止信号输入端, 对两个信号之间的时间差进行测量, 获得测量时间间隔及其标准偏差, 该实验采用 Am-Be 中子源, 其活度为 $4.6 \times 10^6\ \text{Bq}$ 。测量结果如图 11 所示, 标准偏差仅为 217.5 ps。

上述测量结果还包含了探测器信号本身的时间晃动, 因此电子学测量系统本身的测量精度应该大大优于该测量结果。

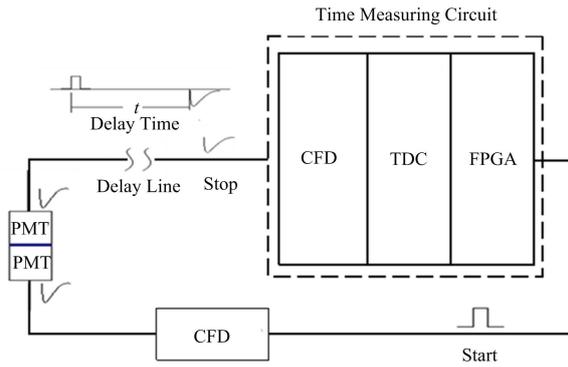


图 10 时间测量精度测试连接图
Fig.10 Connection of time measuring accuracy test.

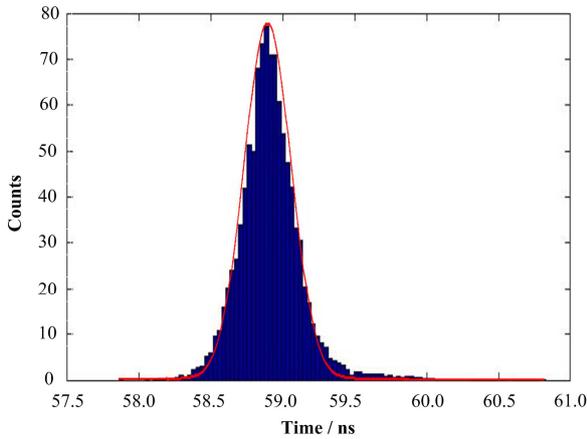


图 11 时间分辨测试结果
Fig.11 Typical time-resolution test results.

3 结语

在 ICF 实验中，聚变等离子体温度和密度是其重要的参数，对这两个参数的实验诊断非常重要。利用中子飞行时间法实现中子能谱测量从而进行离子温度诊断是目前世界上研究最为成熟的方法。本文介绍了针对“神光III”原型装置设计的中子飞行时间测量方案，并对基于该方案研制的时间测量电路的记录能力和测量精度作了测试。在使用信号发生器产生开始信号及停止信号的测试方法下，测得其记录量程大于 1 500 ns，能测量 8 个停止信号的到达时刻，且相邻两信号的最小时间间隔小于 40 ns。同时，其电子学分辨时间在 1 500 ns 量程内均优于 200 ps，时间测量的误差在全量程范围内均小于 0.06%。另外，实验将“神光III”原型大阵列中子探测器系统使用到的塑料闪烁体探测器接入电子学系统作了进一步测试，实验测得其电子学分辨时间加上探测器分辨时间的典型测量结果仅为 217.5 ps，故该时间测量电路的记录能力和测量精度均满足“神光III”原型装置的使用需求。

参考文献

- Andersson P U, Holmlid L. Ultra-dense deuterium: a possible nuclear fuel for inertial confinement fusion (ICF)[J]. *Physics Letters A*, 2009, **373**(34): 3067–3070. DOI: 10.1016/j.physleta.2009.06.046
- Bartos D, Caragheorghopol G, Dohrmann F. Time resolution of radiation hard resistive plate chambers for the CBM experiment at FAIR[C]. *IEEE Nuclear Symposium Conference Record*, 2008: 2658–2660. DOI: 10.1109/NSSMIC.2008.4774924
- Lerche R A, Coleman L W, Houghton J W, *et al.* Laser fusion ion temperature determined by neutron time-of-flight techniques[J]. *Applied Physics Letters*, 1977, **31**(10): 645–647. DOI: 10.1063/1.89509
- Remington B A, Lerche R A, Cable M D. Ion temperature analysis of implosions of DT-filled capsules[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1990, **61**(10): 3128–3130. DOI: 10.1063/1.1141703
- Murphy T J, Chrien R E, Klare K A. Interpretation of neutron time-of-flight signals from current-mode detectors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, **68**(1): 610–613. DOI: 10.1063/1.1147763
- Murphy T J, Jimerson J L, Berggren R R, *et al.* Neutron time-of-flight and emission time diagnostics for the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, **72**(1): 850–853. DOI: 10.1063/1.1321001
- Qian S, Ning Z, Fu Z W, *et al.* The control and monitor system for the BESIII ETOF/MRPC beam test[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2015, **26**: 010201. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.010201
- Zhao L, Kang L F, Zhou J W, *et al.* A 16-channel high-resolution time and charge measurement module for the external target experiment in the CSR of HIRFL[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2014, **25**: 010401. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.010401
- 安琪. 精密时间间隔测量及其在大科学工程中的应用[J]. *中国科学技术大学学报*, 2008, **38**(7): 758–764
AN Qi. Methods and techniques of precise time interval measurements and their applications in great scale national scientific engineering projects[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2008, **38**(7): 758–764
- 唐琦, 宋仔峰, 陈家斌, 等. 基于中子飞行时间法的 ICF 内爆热斑粒子温度诊断技术[J]. *强激光与离子束*, 2013, **25**(12): 3153–3157. DOI: 10.3788/HPLPB20132512.3153
TANG Qi, SONG Zifeng, CHEN Jiabin, *et al.* ICF

- implosion hotspot ion temperature diagnostic techniques based on neutron time-of-flight method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, **25**(12): 3153–3157. DOI: 10.3788/HPLPB20132512.3153
- 11 唐琦, 陈家斌, 邓才波, 等. ICF 中子发射时间诊断[J]. 强激光与离子束, 2011, **23**(6): 1533–1537. DOI: 10.3788/HPLPB20112306.1533
TANG Qi, CHEN Jiabin, DENG Caibo, *et al.* ICF neutron emission time diagnostic[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, **23**(6): 1533–1537. DOI: 10.3788/HPLPB20112306.1533
- 12 詹夏宇, 陈家斌, 邓才波, 等. “神光 III 原型”装置首轮实验中子产额诊断[J]. 核电子学与探测技术, 2010, **30**(8): 1120–1122. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.08.028
ZHAN Xiayu, CHEN Jiabin, DENG Caibo, *et al.* The neutron yield diagnostic for the first experiment performed on Shenguang III laser facility[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, **30**(8): 1120–1122. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.08.028
- 13 张岳华, 李锋, 金革, 等. 惯性约束核聚变实验中子飞行时间谱仪的时间测量插件[J]. 核技术, 2007, **30**(3): 227–230
ZHANG Yuehua, LI Feng, JIN Ge, *et al.* A TDC module used in nToF of ICF[J]. Nuclear Techniques, 2007, **30**(3): 227–230
- 14 乔晓峰, 康敏, 周荣华. 一种高精度时间间隔测量方法的研究[J]. 科学技术与工程, 2010, **10**(1): 65–68. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2010.01.015
QIAO Xiaofeng, KANG Min, ZHOU Ronghua. Research for a method about the high precision time measurement[J]. Science Technology and Engineering, 2010, **10**(1): 65–68. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2010.01.015
- 15 潘继飞, 姜秋喜, 毕大平. 基于内插采样技术的高精度时间间隔测量方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, **28**(11): 1633–1636. DOI: 10.3321/j.issn:1001-506X.2006.11.007
PAN Jifei, JIANG Qiuxi, BI Daping. High precision time interval measurement method based on interpolating sampling technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, **28**(11): 1633–1636. DOI: 10.3321/j.issn:1001-506X.2006.11.007
- 16 杨佩, 徐军, 王菲. 基于 TDC-GP2 的高精度时差测量系统[J]. 电子科技, 2010, **23**(7): 77–81. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7820.2010.07.024
YANG Pei, XU Jun, WANG Fei. Design of the high-precision time difference measurement system based on TDC-GP2[J]. Electronic Science and Techniques, 2010, **23**(7): 77–81. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7820.2010.07.024
- 17 祁迹, 邓智, 刘以农. 一种基于 FPGA 的高精度单周期 TDC 设计[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(4): 378–385. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2011.04.002
QI Ji, DENG Zhi, LIU Yinong. A design of high resolution one-clock-cycle TDC based on FPGA[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, **31**(4): 378–385. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2011.04.002
- 18 ACAM Company. Time-to-digital converter target specification[DB/OL]. http://www.acam.de/fileadmin/Download/pdf/TDC/English/DB_GP2_en.Pdf, 2010

Design and realization of the ICF neutron time-of-flight measurement circuit

WEI Lingfeng ZHOU Rong YANG Chaowen

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract Background: In inertial confinement fusion (ICF) experiments, the temperature and density of fusion plasma zone are extremely important parameters requiring to diagnose. **Purpose:** The aim is to design a circuit for diagnosing the temperature information of the plasma zone. **Methods:** In order to diagnose the temperature information of plasma zone, neutron time-of-flight method was adopted to measure the neutron energy spectrum, i.e., to measure the delay time between the signal of the detector and start signal. We designed a program to accurately measure the time-of-flight with constant fraction discrimination (CFD) method, and used the TDC-GP21 (Time Digital Conversion) produced by ACAM Company (Germany) to complete accurate time measurement. **Results:** Based on the program, the electronics time-resolution of the measurement circuit within 1 500 ns range is higher than 200 ps, and the measurement deviation is smaller than 0.06%. At the same time, the typical result of electronics time-resolution included detector time-resolution is 217.5 ps. **Conclusion:** The recording capability and measurement accuracy of the circuit designed can meet the needs of practical applications, which could be used in neutron diagnosing.

Key words ICF, Nuclear diagnostic, Neutron time-of-flight, TDC

CLC TL824