

THGEM 位置灵敏探测器读出系统

赵亚飞, 华仁军, 冀伟田, 陈子瑜, 沈 激

(中国科学技术大学物理学院近代物理系, 安徽合肥 230026)

摘要:采用专用集成芯片设计了基于厚气体电子倍增器 THGEM 的热中子位置灵敏探测器读出电子学系统, 实现电荷信号的放大、整形, 采用高速模数转换芯片 AD9220 进行采集, 采用 USB 通信实现数据传输, 采用 FPGA 作为读出系统的总控制器, 实现了探测器的阵列电荷信号读出; 得到读出系统通道输入输出线性响应关系, 在 ± 15 fc 之间线性关系良好; 实现了位置信息重心读出; 探测器最高计数率达 1×10^5 /s.

关键词:气体电子倍增器; 厚气体电子倍增器; 中子; 探测; 重心读出

中图分类号: TP335+.1 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2017.06.004

引用格式: 赵亚飞, 华仁军, 冀伟田, 等. THGEM 位置灵敏探测器读出系统[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(6): 474-478.

ZHAO Yafei, HUA Renjun, JI Weitian, et al. Readout system of THGEM position-sensitive detector [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(6): 474-478.

Readout system of THGEM position-sensitive detector

ZHAO Yafei, HUA Renjun, JI Weitian, CHEN Ziyu, SHEN Ji

(Department of Modern Physics, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Based on THGEM thermal neutron position sensitive detector, a readout electronics system was designed with a specific integrated chip VA64TA2 to realize charge integration, amplification and conversion. Using high-speed analog-to-digital conversion chip AD9220 to realize data sampling, USB communication to realize data transmission, and FPGA as the main controller, the system was constructed. The array charge signal readout of the detector was realized. The channel input-output linear responses of the system are good, between ± 15 fc. The centre-of-gravity read-out of position information was realized. The maximum counting rate of the detector could reach 1×10^5 /s.

Key words: gaseous electron multiplier; thick gaseous electron multiplier; neutron; detect; centre-of-gravity read-out

0 引言

随着世界新一代中子源的建成, 如美国橡树岭

国家实验室散裂中子源 SNS, 日本散裂中子源 JSNS, 英国散裂中子源 ISIS, 欧盟散裂中子源 ESS 等^[1], 大面积热中子位置灵敏探测器已成为一个重

收稿日期: 2016-10-14; 修回日期: 2016-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(10775129)资助.

作者简介: 赵亚飞, 男, 1988 年出生, 硕士, 研究方向: 探测技术. E-mail: zhyafei@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 沈激, 教授. E-mail: shenji@ustc.edu.cn

要的研究领域.二维气体多丝室^[2-5]因良好的位置分辨和可以大面积制造而得到重视和应用.20 世纪末,Sauli 等^[6]提出气体电子倍增器(gaseous electron multiplier,GEM)探测器,与气体多丝室探测器相比拥有很多优点,比如完全解决断丝报废的缺点,计数率高,位置分辨率好并且信号读出模式多^[7-8].基于 GEM 制造工艺的复杂性,实验室提出了厚气体电子倍增器(thick gaseous electron multiplier,THGEM)方案^[9]并设计制造了这种探测器.我们基于 Pad 阵列读出的方式设计读出板,收集 THGEM 探测器电荷信号.选择了挪威 IDEAL 公司 VA 系列的集成芯片 VA64TA2^[10]来进行读出电子学系统设计,采用高速模数转换芯片 AD9220 进行采集,采用 USB 通信实现数据传输,采用 LABVIEW 编写上位机程序实现数据读取、重心读出、保存以及显示.

1 THGEM 探测器的原理

THGEM 探测器基本原理如图 1 所示.入射中子和硼-10 转换体^[11]作用发生核反应,产生的次级带电粒子进入漂移区,致使工作气体发生电离产生电子,电子在漂移区电场 E_D 的作用下到达 THGEM 板,经过 THGEM 雪崩放大,在传输区电场 E_T 的作用下最终到达读出板被收集读出.

读出板(收集板)是一块印刷电路板,上面密集分布水平和垂直连接的圆盘电极(pads),实物图如图 2 所示,灵敏区是图中灰色的区域,pads 水平和垂直连接形成正交阵列读出条,每个方向上有 64 个读出条,条中心间距为 1.59 mm.采集各路电荷信号得到二维平面电荷分布,由电荷重心读出法^[3]得到入射中子的位置信息.

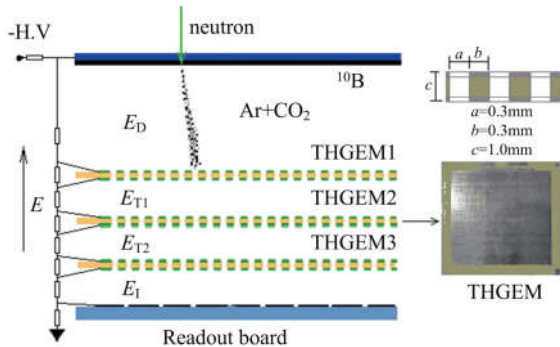


图 1 探测器的原理图

Fig.1 Schematic diagram of detector

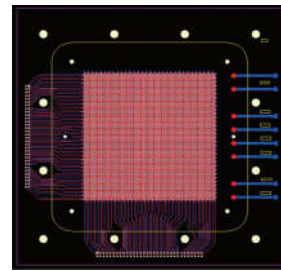


图 2 读出板的 PCB 图

Fig.2 PCB diagram of readout board

2 读出电子学设计

读出电子学设计如图 3 所示.采用 FPGA 作为读出电子学系统的总控制器.前端电子学负责电荷收集、信号处理和多路输出,后端电子学完成数据采集、处理、保存和输出.两个方向前端电子学相同.与 64 个读出条相连的专用集成芯片 VA64TA2,低功耗、低噪声、多通道,具有金属外延层防电磁辐射干扰.当有电荷信号输入时,VA64TA2 产生触发信号 ta ,FPGA 接收 ta 后发给 VA64TA2 控制信号和读出时钟,电荷信号经过 VA64TA2 作用后多路串行差分输出,再由差分放大器进一步放大,得到模拟电压信号,经过高速模数转换芯片 AD9220 进行采集,通过 USB 接口通信将数据上传到计算机上.

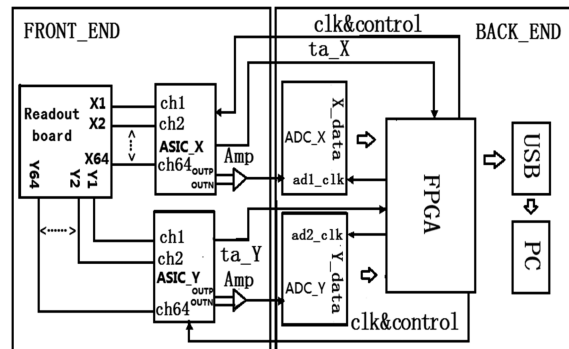


图 3 读出电子学系统框图

Fig.3 Diagram of readout electronics system

3 数据采集和传输测试

测试原理框图如图 4 所示.采用外部信号源提供频率 1MHz、脉宽 5 μ s、幅度 5V 的脉冲作为触发信号 ta ,分别给 X 方向和 Y 方向 ADC(AD9220)输入电平信号,两路 AD9220 采集的 12 bit 二进制数据同时送到 FPGA 进行处理,再经过异步 FIFO 缓冲后通过 USB 上传到计算机.选择 FPGA 自带 4 kB 异步 FIFO 作为缓冲,采用相同频率读写时钟,保证

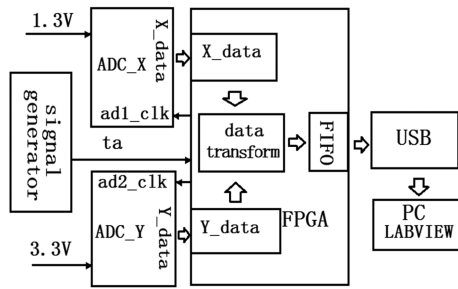


图 4 后端电子学测试框图

Fig.4 Diagram of back-end electronics test

数据传输的稳定性.在探测器计数率为 $1 \times 10^5/s$ 时,两路 ADC 采集的数据经 FPGA 处理整合后数据流最高约为 220 Mbps,基于通用可编程接口 (general programmable interface, GPIF) 高速数据传输模式,USB(CY7C68013)接口实际数据传输可高达 416 Mbps^[12],可实现数据的实时采集和传输.在 FPGA 内部数据整合时序如图 5 所示,在时钟 all_clk 上升沿作用下, all_clk_en 为高电平时传输 X 方向数据, all_clk_en 为低电平时传输 Y 方向数据, X 和 Y 方向的数据交替传输,数据宽度为 16 bit,高 4 位为方向标志, X 和 Y 方向分别标志为“1110”和“1101”即十六进制的“E”和“D”.每次 ta 触发采集的数据段前添加标志数据“FFFF/FFFF”,每次触发得到 130 个 16 bit 的数据.采用 LABVIEW 读取标志后的 128 个 16 bit 的数据.实验结果和预期一致, X、Y 方向数据大小与输入电平相对应,说明正确实现了数据采集和传输.

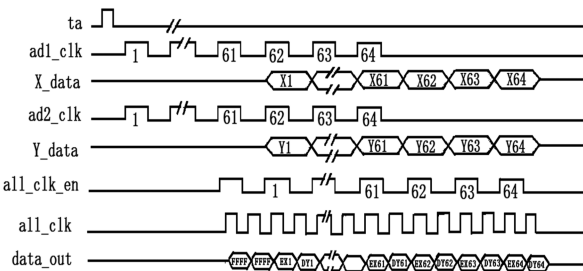


图 5 数据整合时序图

Fig.5 Timing diagram of data integration

4 读出电子学系统输入输出响应测试

4.1 输入输出响应测试

如图 6 所示,信号源输出脉冲信号,经过衰减和跟随,得到稳定脉冲小信号,与 1 pf 电容耦合送入 VA64TA2 待测试的通道(其余通道接地).电荷信号经 VA64TA2 作用、AD9220 数字化采样以及

USB 数据传输后,采用 LABVIEW 程序进行数据读取、转化和保存.选择不同通道做实验,可以得到各通道输出模拟电压信号值.

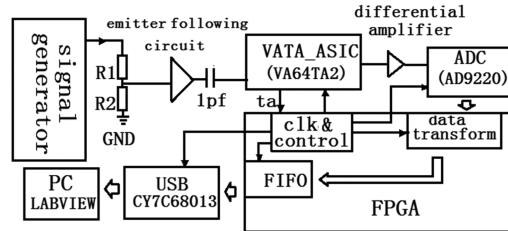


图 6 输入输出响应测试框图

Fig.6 Diagram of input-output response test

4.2 VA64TA2 读出时序

如图 7 所示,当有电荷信号输入时,触发信号 ta 产生,各通道同时进行采样.ta 上升沿到来后延迟 t_p ($1 \mu s$), holdb 置低,保持各通道信号.在读出时钟 ckb 下降沿作用下将 shift_inb 低电平写入 64 位移位寄存器,依次打开多路复用器开关,进行 64 通道串行读出,结束时 dreset 置高进行数字逻辑复位, holdb 置高,等待下一次触发 ta 到来. ad_clk 是 AD9220 采样时钟, AD9220 采用三级差分流水线设计,在第 4 个采样时钟上升沿到来后延迟 13 ns 输出第一个数据. VA64TA2 最高工作时钟为 10 MHz,完成一次读出需要约 $6.4 \mu s$,决定探测器计数率最高略大于 $1 \times 10^5/s$.

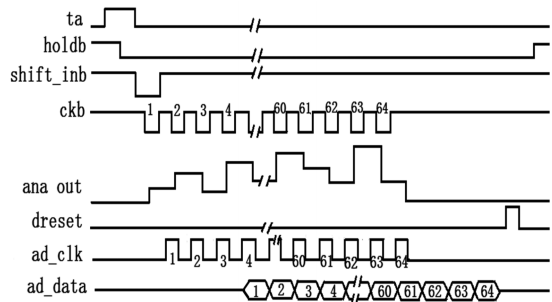


图 7 VA64TA2 读出时序图

Fig.7 Timing diagram for readout of VA64TA2

4.3 输入输出响应测试结果

选择 20 fc 大小的电荷信号作为输入信号,发现测试的 VA64TA2 板中的 30 个通道有信号读出,为有效通道;其他通道无信号输出,分析原因是裸片封装时打线质量有问题.如果选择工艺更好的厂家进行裸片封装,可以减少或避免出现质量问题,增加有效通道的数量.对有效通道进行响应测试,如图 8 所示,是通道 5 输入输出响应关系,其余通道相似.分

析各个通道输入输出响应关系可知各通道动态线性响应范围为 ± 15 fc, 超出 ± 15 fc 范围快速进入饱和, 各通道线性拟合优度都在 98% 之上。

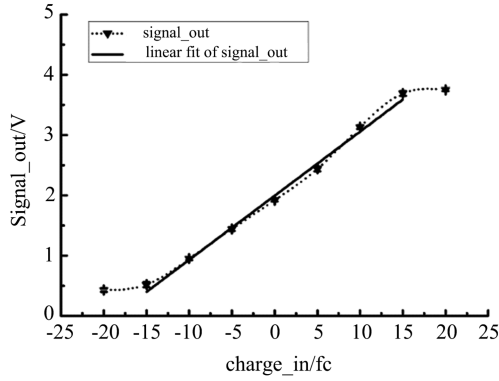


图 8 通道 5 输入输出响应
Fig.8 Input-output response of Channel 5

5 位置信息读出测试

30 个有效通道中, 定义前 15 个为 X 方向读出通道, 后 15 个为 Y 方向读出通道. 位置信息重心读出测试, 采用图 9 所示电荷输入的方式对有效通道输入表 1 中对应的电荷, 频率为 1 MHz、脉宽为 $5 \mu\text{s}$ 的信号经过衰减和射随电路, 得到幅度为 10 mV 脉冲信号, 与不同大小电容 (由若干 1 pf 和 2.2 pf 串并联组合得到) 耦合, 同时对其中 14 个通道输入电荷, 其余通道接地输入 0 fc 电荷. 电荷分布高斯拟合曲线如图 10 所示. 理论上电荷分布重心位置 XY 应在 (6, 9); 实验时使用 LABVIEW 程序进行实时数据读取、重心读出算法处理和显示, 采集 1000 个位置信息点, 如图 11 所示, 三维直方图上所有 XY 点集中在 (6, 9) 的位置, 实验结果和预期吻合。

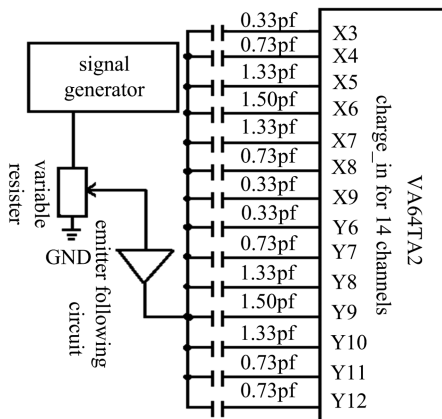


图 9 14 个通道电荷输入
Fig.9 Diagram of charge-input for 14 channels

表 1 X、Y 方向电荷输入和信号输出

Table 1 Input-output of X/Y direction

X	charge /fc	X_OUT /V	Y	charge /fc	Y_OUT /V
X1	0.0	1.94	Y1	0.0	1.94
X2	0.0	1.92	Y2	0.0	1.93
X3	3.3	2.37	Y3	0.0	1.93
X4	7.3	2.76	Y4	0.0	1.92
X5	13.3	3.47	Y5	0.0	1.95
X6	15.0	3.67	Y6	3.3	2.35
X7	13.3	3.44	Y7	7.3	2.79
X8	7.3	2.78	Y8	13.3	3.45
X9	3.3	2.34	Y9	15.0	3.65
X10	0.0	1.93	Y10	13.3	3.47
X11	0.0	1.95	Y11	7.3	2.77
X12	0.0	1.90	Y12	3.3	2.38
X13	0.0	1.91	Y13	0.0	1.91
X14	0.0	1.96	Y14	0.0	1.93
X15	0.0	1.95	Y15	0.0	1.96

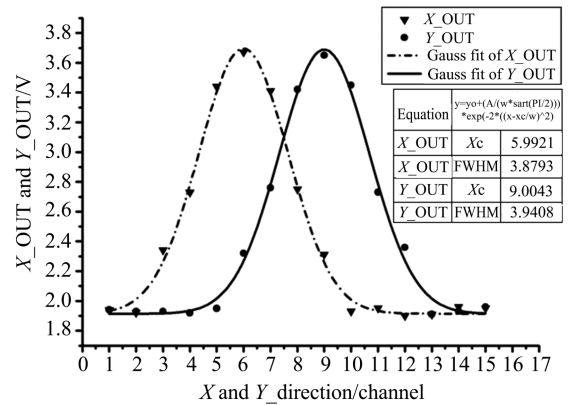


图 10 X/Y 方向输出高斯拟合图

Fig.10 Gauss fit of X/Y direction output

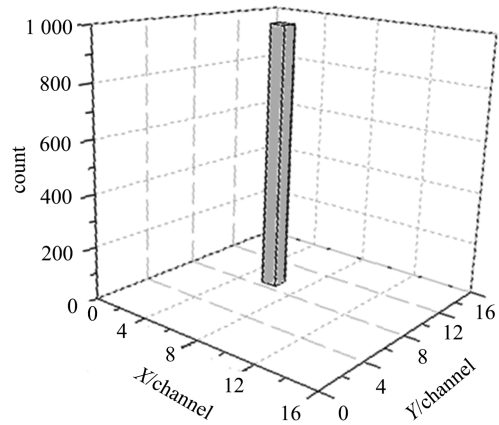


图 11 位置信息显示

Fig.11 Display of position information

6 结论

本文介绍了 THGEM 探测器的原理,基于此探测器围绕集成芯片 VA64TA2 设计读出电子学系统.数据采集和传输测试实验结果表明该系统正确实现了 AD9220 数字化采样以及 USB 数据传输.进行了读出电子学系统输入输出响应测试实验,电荷信号由 VA64TA2 进行放大、整形,经过数据采集和传输后,使用 LABVIEW 程序简单地、直观地、实时地进行数据读取、处理和显示,实验结果表明读出系统线性响应范围 ± 15 fc,同时可以满足探测器计数率最高达到 1×10^5 /s,可以用于探测器的读出.位置信息读出测试实验结果表明读出系统可以用来实现位置信息重心读出.

近几年,随着芯片制造和封装技术水平的进步,挪威 IDEAL 公司 VA 系列集成芯片性能也在不断地提高和改善,例如 VA1、VA162 等的电荷动态范围更大,采用它们可以进一步优化探测器读出系统.

参考文献(References)

- [1] GEBAUER B. Towards detectors for next generation spallation neutron sources[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 535: 65-78.
- [2] 沈激, 陈子瑜, 叶震宇, 等. BEPC 试验束描述多丝正比室[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(6): 616-619. SHEN Ji, CHEN Ziyu, YE Zhenyu, et al. MWPC for the test beam on BEPC-LINAC[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(6): 616-619.
- [3] 沈激, 陈子瑜, 叶云秀, 等. 多丝室在北京试验束中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(4): 663-666. SHEN Ji, CHEN Ziyu, YE Yunxiu, et al. Application of multiwire proportional chamber in BEPC test beam [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(4): 663-666.
- [4] 张健, 卫小乐, 刘士兴, 等. 阴极适应多丝室电荷灵敏放大器的研制[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 677-680. ZHANG Jian, WEI Xiaole, LIU Shixing, et al. Sensitive charge amplifier for MWPC in particle track system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(5): 677-680.
- [5] 王小胡, 蓝朝晖, 龙继东, 等. 多丝正比室视差效应改善方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2906-2910. WANG Xiaohu, LAN Chaohui, LONG Jidong, et al. A method to reduce the parallax error of multiwire proportional chambers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(12): 2906-2910.
- [6] SAULI F. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1997, 386: 531-534.
- [7] 李澄, 孙勇杰, 周意, 等. 一台高计数率 GEM X 射线成像装置原型[J]. 高能物理与核物理, 2005, 29(1): 68-71. LI Cheng, SUN Yongjie, ZHOU Yi, et al. A prototype of X-ray imaging device based on the GEM detector [J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, 29(1): 68-71.
- [8] 郑晓翠, 李玉兰, 来永芳, 等. 气体电子倍增膜(GEM)探测器的读出方式[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(1): 89-92. ZHEN Xiaocui, LI Yulan, LAI Yongfang, et al. The readout methods of gas electron multiplier detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(1): 89-92.
- [9] 金久强. LEM 的模拟研究[C]// 2006 年暑期大学生研究计划. 合肥: 中国科学技术大学, 2006. JIN Jiuqiang. Study of LEM simulation [C]// 2006 Summer Undergraduate Research Program. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [10] 冀伟田, 华仁军, 徐凯, 等. 2 维位置灵敏中子探测器读出[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(10): 2791-2794. JI Weitian, HUA Renjun, XU Kai, et al. Readout of two-dimensional position-sensitive neutron detector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(10): 2791-2794.
- [11] 宋仔峰, 叶树蓁, 陈子瑜, 等. GEM 热中子探测器中硼转换体研制[J]. 核技术, 2010, 33(9): 701-704. SONG Zifeng, YE Shuzhen, CHEN Ziyu, et al. Development of the convertor of boron-10 for GEM-based thermal neutron detector [J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(9): 701-704.
- [12] 焦斌亮, 韩志学. 基于 EZ-USB FX2 实现的高速数据采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2005(7): 21-22. JIAO Binliang, HAN Zhixue. High-speed data acquisition and processing system based on EZ-USB FX2[J]. Instrument Technique and Sensor, 2005(7): 21-22.