

用于空间天文的硅微条探测器原型样机研制

韦家驹^{1,2}

1 (中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

2 (中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210008)

摘要 γ 射线的天文观测是目前天文观测的前沿课题,通过观测高能 γ 射线的能谱和空间分布,可以研究宇宙中暗物质的分布及其物理特性。在众多 γ 射线探测器中,硅微条探测器具有很高的位置分辨率和能量分辨率,并且可以拼接组成大探测面,非常适合探测粒子的径迹和能量。为了解决硅微条探测器的关键技术,包括探测器微组装、前端读出电子学、数据采集电路,实验室自主研制了探测器样机并进行一系列测试。该样机的384个通道在0~180 fC的输入动态范围内具有很好的线性(积分非线性小于5%),同时具有很低的噪声(等效输入噪声电荷小于0.16 fC)。样机的宇宙线能谱曲线可以清晰分辨出最小电离粒子的峰位约2.8 fC,并且可以用朗道卷积高斯函数精确拟合。

关键词 暗物质, 射线, 硅微条探测器

中图分类号 TL8

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120402

A prototype silicon strip detector for space astronomy

WEI Jiaju^{1,2}

1(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

2(Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract [Background] One of the most attractive subjects in the astronomical observation is the γ -ray detection in space astronomy. Recent research shows that the spectrum and distribution of the high-energy γ -ray can be utilized to explore the dark matter's distribution and physical characteristics. Several detectors can be utilized to detect high energy γ -ray, and one of the most suitable candidates is the silicon strip detector which possesses very high position and energy resolution. Silicon strip detector can be used to accurately detect the traversing particle's track and energy, and can be easily assembled together to form a large detecting plane. [Purpose] This study aims to explore key technologies of the silicon strip detector, including high-precision assembly techniques, front-end electronics design and data acquisition board design. [Methods] First of all, a test system with a low leakage current was built to inspect the silicon strip sensor. Then, an automatic wire-bonder was employed to connect the wires of sensors and front-end electronics. The automatic bond-tester was used to test wires' firmness. Finally, a readout scheme based on the characteristics of the sensor was design, and the printed circuit board (PCB) layout of the front-end electronics was optimized. In order to design the data acquisition board, the logics in the key component field programmable gate array (FPGA) and the automatic data acquisition software in the host computer were implemented. [Results] A prototype silicon strip detector has been fabricated and tested. All 384 channels show a good linearity in the range of 0~180 fC and the non-linearity is less than 5%. The prototype's input equivalent noise is less than 0.16 fC. The

国家自然科学基金(No.11503095)、中国科学院空间科学战略性先导科技专项(No.XDA15010200)资助

第一作者: 韦家驹, 男, 1983年出生, 2012年于东南大学获博士学位, 研究领域为半导体探测器技术

收稿日期: 2018-07-20, 修回日期: 2018-10-20

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11503095), Strategic Pioneer Program on Space Science of Chinese Academy of Sciences (No.XDA15010200)

First author: WEI Jiaju, male, born in 1983, graduated from Southeast University with a doctoral degree in 2012, focusing on semiconductor detector technology

Received date: 2018-07-20, revised date: 2018-10-20

cosmic ray test result shows a clear peak of the minimum ionizing particle of 2.8 fC and the spectrum matches the convoluted Landau and Gaussian fitting function. [Conclusion] The well behaved prototype demonstrates the validity and feasibility of the key technologies, and these technologies can be applied to the practical silicon strip detector for space astronomy.

Key words Dark matter, γ -ray, Silicon strip detector

γ 射线的空间观测是目前天文观测的前沿课题。研究表明,暗物质粒子可能通过湮灭或衰变产生高能宇宙射线和 γ 射线,因而通过观测高能 γ 射线的能谱和空间分布,可以间接地探测暗物质分布及其物理特性。如果发现暗物质粒子,将有望驱散笼罩在物理学天空中一朵“乌云”,同样会引起物理学的一次革命。因此,高能 γ 射线的空间探测对天文学和物理学的研究具有十分重要的价值。

γ 射线的入射角测量是通过射线在探测器中的击中位置计算出来的,因此需要一个高位置分辨率的探测器来提升 γ 射线的观测能力。另一方面,空间中的高能 γ 射线流量很低,为了高灵敏地探测这些低流量射线,要求探测器具备大的有效探测面积。为了寻找合适的探测器,首先想到的是气体探测器,该探测器成本低,但真空下容易漏气,应用在空间探测中难度大;闪烁体探测器也对位置敏感,但其位置分辨率比较低;位置分辨率高的常温半导体探测器是一个较好的选择,经常使用的是硅微条探测器(Silicon Strip Detector, SSD)和硅像素探测器。相比于硅像素探测器,硅微条探测器在工艺上更容易实现大面积,同时电子学通道数较少,能够在保证位置分辨率的前提下大大节省珍贵的星上能源,因而更适合大面积、高分辨率的 γ 射线探测。

在国际上,硅微条径迹探测器已经应用在多个空间高能粒子探测实验中,比较有代表性的如下: PAMELA^[1-2] (Payload for Antimatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)、AGILE^[3-4] (Light Imager for γ -ray Astrophysics)、Fermi-GLAST^[5-6] (γ -ray Large Area Space Telescope)、AMS-02^[7-8] (Alpha Magnetic Spectrometer)等。

在国内,目前所知的大型物理实验中只有 DAMPE^[9-11] (Dark Matter Particle Explorer)大规模使用硅微条探测器来测量粒子径迹。实际上, DAMPE 中的硅微条探测器前端硬件部分是通过国际合作的方式由外方完成,到目前为止硅微条探测器的一系列关键技术在国内还处于空白或者刚起步阶段,急需在这方面进行研究和实践。本研究自主研制了硅微条探测器样机,在探测器的微组装技术、前端读出电子学设计、数据采集电路设计等关键技术方面进行了实践和研究。

1 硅微条探测器的原理和结构

硅微条传感器(图1)是在N型掺杂的高阻衬底硅(3~8 k Ω ·cm)上离子注入众多条状P⁺型微条构成。因而类似于形成众多结面积为条状的PN结。通过对微条施加一定的反偏电压使其进入部分耗尽或全耗尽状态,此时耗尽区的自由电荷很少,电场近似呈线性分布,从而形成众多固体“电离室”。高能 γ 射线与转换层(一般使用钨板)发生相互作用,会产生正负电子对。当产生的次级带电粒子穿越探测器的耗尽区,沉积的能量将发生电离产生电子-空穴对,电子-空穴对在电场的作用下向两极漂移引起脉冲电流的产生,通过对该电流的积分从而得到电荷信息(可反推粒子的能量信息)。

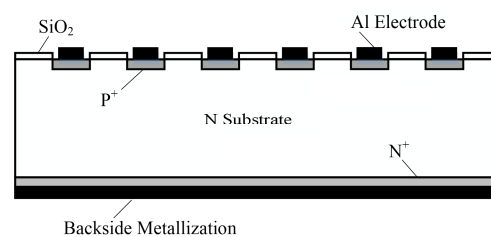


图1 硅微条传感器剖面图
Fig.1 Cross-section of SSD sensor

硅微条探测器的系统结构如图2所示,主要包含硅微条传感器、前端电子学(Front End Electronics, FEE)和数据采集电路(Data Acquisition, DAQ)三部分。考虑到硅微条传感器上的微条呈条状平行分布,实际使用时为了扩大探测面积,一般会把多片硅微条传感器拼接起来粘贴到前端电子学板上,并使用键合丝连接相邻的微条,从而构成一个阶梯状的探测模块(Ladder)。多个Ladder又可以拼接成一个探测面,从击中的微条及相邻微条上采集的电荷信息可以获得入射粒子在该二维平面上的一个坐标位置。多个探测面上下交错放置就可以构成探测阵列,在径迹重建算法的帮助下,根据每个探测面的击中信息可以精确计算出入射粒子的径迹信息。FEE板作为硅微条传感器的载体,为传感器提供反偏工作电压,并具备多通道、低噪声、大动态范围的读出电路,能够按照一定的控制节拍将微条上的电荷信息依次读出并转变为电压信号。DAQ采集FEE输

出的模拟电压信号，并通过数模转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 转变为数字信号后进行后续的传输、处理和存储。

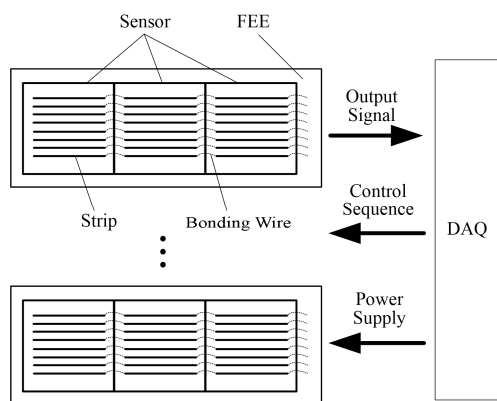


图2 硅微条探测器的示意图
Fig.2 Diagram of the SSD

2 探测器的微组装技术

硅微条传感器一般具有晶圆尺寸 (约 100 mm、150 mm 等)，厚度约几百微米，上面具有数量众多的微条结构 (几百至上千)，微条的宽度和间距均是微米量级。本文研制的原理样机采用了 DAMPE 中同一批次的硅微条传感器，其尺寸为 95 mm×95 mm×320 μm，微条数量为 768，微条宽度为 48 μm，微条间距为 121 μm。

2.1 传感器的检测

传感器上的微条数目很大，其加工工艺无法保证每个微条的性能，加之传感器在运输、存储、拾取等过程中均存在污染的可能性，而传感器性能下降的一个主要指标就是漏电流变大，因此需要检测硅微条传感器在全耗尽状态下的漏电流是否符合要求，如果漏电流过大则应该剔除该传感器。

在测试过程中存在以下挑战：传感器在测试时需要避光，否则光电效应会显著增加漏电流；传感器上的焊盘尺寸较小 (几十微米量级)，需要使用探针精确引出并连接测试设备；传感器的漏电流很小 (nA 量级)，需要整个测试系统的漏电流非常小 (达到 pA 量级)。该原理样机研制过程联合使用探针台和半导体参数分析仪来搭建测试平台。探针台 (美国 Cascade Microtech 公司的 Summit 12000B-M 型号) 负责承载传感器并提供探针连接，其机械精度 1 μm，可以精确定位到传感器上的任意焊盘，并且自带的屏蔽腔可屏蔽可见光干扰。半导体分析仪 (美国 Tektronix 公司的 Keithley 4200A-SCS 型号) 输出电压范围能达到 200 V，覆盖传感器的耗尽电压；

其电流分辨率达到 0.1 fA，可以精确测量微小电流。如图 3 所示，该检测平台的系统漏电流小于 40 fA，硅微条传感器 (包含 768 个微条) 的总漏电流约为 100 nA@120 V，满足传感器的性能要求。

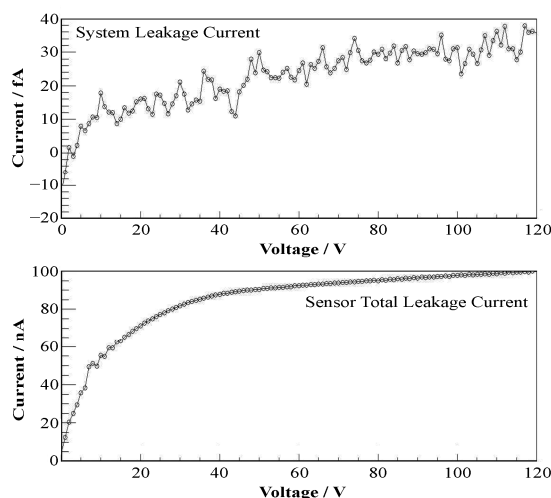


图3 测试系统及传感器的漏电流
Fig.3 Leakage currents of testing system and sensor

2.2 引线键合

硅微条传感器之间以及传感器与读出电子学之间的电连接一般是通过引线键合方式完成。传统的 COB (Chip on Board) 工艺常使用金丝球焊键合，但这种键合方式需要将样品底部加热到约 150 °C，一般情况下这种加热快慢是无法控制的，这可能会导致大面积的传感器因热应力而碎裂。为了保证传感器的安全，原理样机使用铝丝楔焊键合。该键合方式通过超声波压焊形成楔形焊点，不需要加热，同时具有键合点间距小的优势。

键合铝丝的丝径选择 25 μm，过细的键合丝会导致键合牢固度变差，引线易断裂；过粗的键合丝需要提供更大的超声能量以及键合力，容易损伤传感器。

由于硅微条传感器上大量的微条需要引线键合，为了提高工作效率同时保证键合性能的一致性，原理样机使用了全自动键合机 (德国 F&K Delvotec 公司的 64000 G5-HS 型号) 编程键合所有的引线。通过一系列键合参数 (如键合力、超声功率、超声作用时间等) 的调试和设置，键合机能够以 0.5 根/秒的速度键合出高质量的键合丝。

2.3 引线拉力测试

引线键合牢固度的一个重要指标是引线拉力，即在引线中间用一个钩子去拉扯引线而测力。由于引线数量大，原理样机使用全自动拉力测试机 (英

国 Nordson Dage 公司的 4000 Plus 型号) 来精确而高效地测量引线的拉力值。

在键合机参数的调试阶段, 精确测出的引线拉力值可以作为检验标准来不断调整键合机的参数直至最优。在此阶段, 一般使用拉力机的破坏性测试选项, 即拉断引线测试最大拉力。

原理样机键合过程同样需要检测拉力, 原因在于: 传感器和 FEE 上键合焊盘的表面电镀层存在一定程度的不均匀, 同时这些焊盘暴露在空气中会发生氧化, 因而键合机调好的参数只在大部分区域或某个时间段内是最优的, 不具有普适性, 在某些局部需要进一步调整。确定这些有缺陷引线的位置可以使用拉力机的非破坏性测试选项, 即按照国家标准(如国军标 GJB 548B-2005) 设置检验阈值, 超过该阈值没有拉断的引线判定为合格, 否则不合格。原理样机的检验阈值设置为国军标^[12]规定的最小引线拉力(即 2.5 gf) 的两倍, 所有引线均通过非破坏性测试。

为了研究引线键合技术的可靠性, 使用相同表面镀金工艺制作的测试板来代替 FEE 和传感器进行引线键合操作, 并使用拉力机的破坏性测试选项, 即拉断引线测出每根引线的最大拉力。由图 4 可知, 引线拉力的平均值为 9.5 gf, 大大超过了国军标规定的 2.5 gf, 且离散性较好, 标准差仅为 1.1 gf。

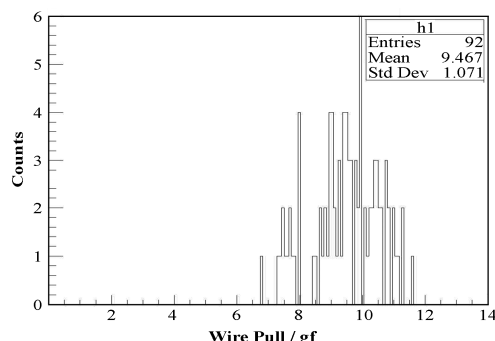


图 4 引线拉力
Fig.4 Pull of wires

3 前端读出电子学设计

3.1 读出方案设计

前端读出电子学主要用于采集硅微条传感器产生的电荷信号, 并对信号进行前置放大、滤波成形、采样保持等。在电子学设计中, 为充分利用传感器的有效面积, 采用了隔行读出方式, 但电子学通道数仍然高达 384, 采用分立元器件设计是不现实的, 因而前端读出电子学采用多片 ASIC 芯片级联的方式。

IDE1140 是挪威 IDEAS 公司专门针对硅微条探

测器设计的一款 ASIC 芯片。该芯片输入动态范围较大 ($-200 \text{ fC} \sim +200 \text{ fC}$)、噪声较低 ($\text{ENC} = 139\text{e} + 5\text{e/pF}$), 并具有 64 个电子学读出通道。FEE 采用 6 片 IDE1140 级联的方式形成 384 个电子学通道与传感器上的微条连接, 每个通道采集一个微条上的电荷, 经过电荷灵敏放大器、滤波成形电路、采样保持电路, 通过一个多路开关以差分电流的形式依次顺序输出。芯片的输出电流再经过电流—电压转换后最终以差分电压的形式输出至 FEE 的对外接口, 供 DAQ 板读取。

3.2 电路板设计

FEE 电路板设计中, 6 片 ASIC 芯片的布局及印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)上的布线需要折中考虑 PCB 加工难易度和键合牢固度两方面的矛盾。鉴于 ASIC 芯片的噪声与输入电容的线性关系(每 pF 的输入电容增加至少 5e 的 ENC), 6 片 IDE1140 芯片在布局时应该尽量靠近传感器, 以减小分布电容, 如图 5 所示。由于传感器的宽度为 95 mm, 而 6 片 ASIC 芯片的宽度仅为 39 mm (即 $6 \times 6.5 \text{ mm}$), 如果直接用键合丝连接会导致键合丝过长而塌落, 因而只有通过 PCB 布线作为中介分别连接传感器和 ASIC 芯片。该 PCB 布线在 ASIC 芯片的输入端处具有很大的设计挑战, 原因在于: 如果布线聚集在 6.5 mm 的芯片宽度之内, 相邻两线的线宽加线间距之和将小于 $100 \mu\text{m}$, 这个加工精度几乎是目前 PCB 行业内的极限, 成品率极低; 如果线宽或线间距略微增加(设增加量为 ΔS), 则 64 条布线的总宽度将增加 $64 \times \Delta S$, 这会导致边缘通道的键合线长度大大增加, 带来引线键合方面的风险。原理样机中 FEE 电路板的经过折中优化设计, 既满足了键合牢固度的需求, 又能兼容国内 PCB 厂小规模生产的制程能力。

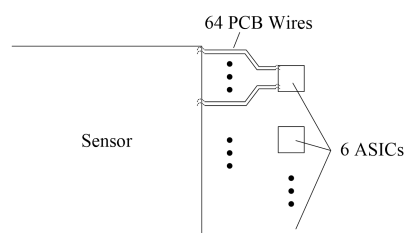


图 5 FEE 的布局布线示意图
Fig.5 Layout and wiring diagram of FEE

3.3 组装后的探测模块

考虑到传感器的成本较高, 硅微条探测器样机只选用了一片传感器粘贴在前端读出电子学板上, 构成了一个探测器模块。如图 6 所示, 该探测模块

左侧粘贴的大块硅片即为传感器，右侧紧靠传感器的位置依次排列粘贴了 6 片读出 ASIC 芯片。后续只需在该探测器模块的基础上，将左侧 PCB 板长度简单延长，就可以粘贴更多的传感器，相邻传感器之间的微条用键合线连接，从而扩展成大面积的探测模块(Ladder)。



图 6 探测器模块
Fig.6 Detector module

4 数据采集电路设计

数据采集电路的核心元器件是现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)。FPGA 负责对 ADC 和 FEE 板上的 IDE1140 进行驱动控制。FEE 板上的 IDE1140 的输出模拟电压信号在调理后，通过 12 位的 ADC 转变为数字信号，再通过 FPGA 存储和转发。

图 7 是 FPGA 的逻辑块示意图，上位机(PC)发送的指令帧通过串口接收模块(uart rx)接受后发送给指令解析模块(cmd parser)。指令解析模块对指令帧进行解析，去掉帧头帧尾、奇偶校验，确认无误后将指令中解析出的有效信息（如工作模式、滤波成形时间等）发送到控制模块(ctrl module)进行相关配置。控制模块在外触发信号的作用下，一方面驱动 FEE 板上的 IDE1140 芯片采集电荷，另一方面驱动 DAQ 板上的 ADC 芯片数模转换。采集模块(daq module)在控制模块输出的 ADC 片选信号的协助下，采集 ADC 芯片输出的数字信号，并按照一定格式组成数据帧，发送到 FIFO (First Input First Output)中缓存。如果 FIFO 非空，串口发送模块(uart tx)将读取 FIFO 中的数据帧，发送上位机进行存储、处理。

上位机软件基于 NI LabWindows/CVI 开发平台，使用 C 语言进行设计，软件主界面如图 8 所示。该 DAQ 软件可以发送各种命令，如设置 ASIC 芯片的工作模式（刻度模式、基线模式、采集模式）、检测高压芯片的电压、电流等。在数据接收上，可以选择 1 个端口或 2 个端口工作，并具备数据的实时显示和简单分析功能。

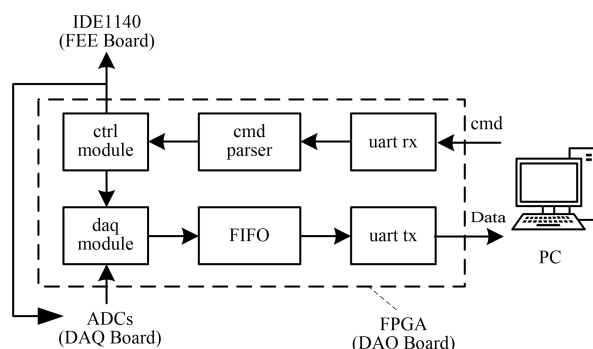


图 7 FPGA 内部的逻辑块示意图
Fig.7 Logic block diagram in FPGA

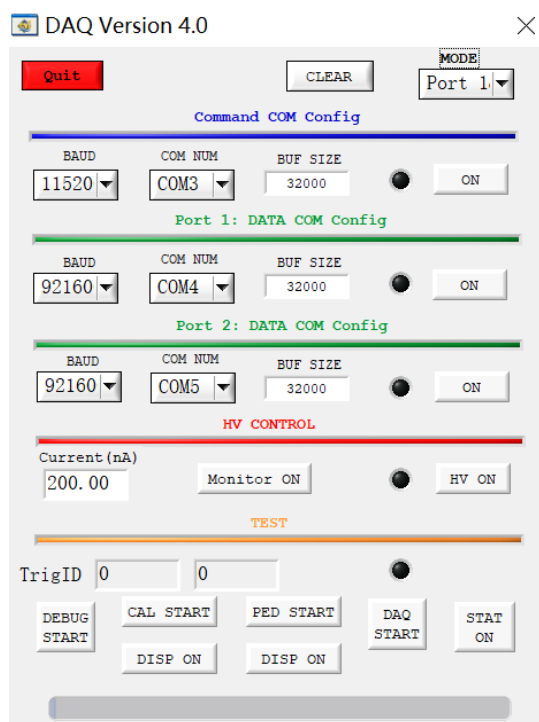


图 8 上位机上的 DAQ 软件主界面
Fig.8 Main interface of DAQ software in host computer

5 硅微条探测器样机的测试

5.1 样机线性测试

硅微条传感器将高能带电粒子的沉积能量转换为一系列幅度大小不等、间隔疏密不匀的随机电流脉冲序列。这些脉冲通过电容积累电荷，则电容上的电压幅度分布能反映入射粒子的能谱。为了不失真地还原该能谱，一般情况下探测器系统在输入动态范围内近似为一个线性系统，系统线性好坏决定入射粒子能谱是否准确，因而有必要对系统线性进行测试。

线性测试过程使用 DAC 芯片和开关芯片产生指定幅度的电压脉冲，该电压脉冲通过 ASIC 芯片

内部的刻度电容后产生脉冲电流。该脉冲电流用来模拟硅微条传感器的输出，最终加在 ASIC 芯片的输入端上。由于电压脉冲的幅度可以通过 DAC 芯片任意设定，因而可以在 ASIC 芯片的输入动态范围内进行多点测试。通过最小二乘法对这些测试点进行最佳线性拟合，得到 384 个电子学通道的拟合直线，并将这些拟合直线的斜率统计在图 9 中，由图 9 可知均值约为 15 ADC/fC，该斜率就是系统的平均增益，即传感器内沉积 1 fC 的电荷将得到约 15 ADC 的输出响应。

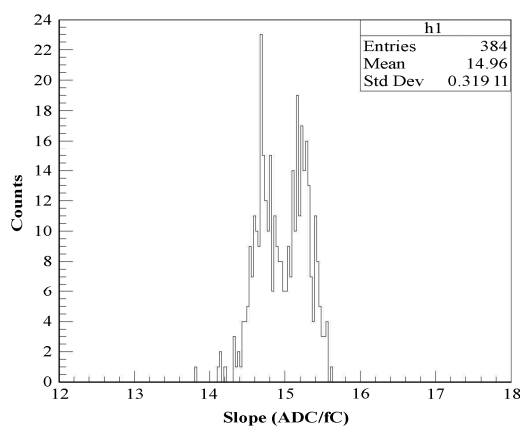


图 9 拟合直线的斜率
Fig.9 Slopes of fitted lines

为了考察各通道线性拟合的好坏，测试引入了积分非线性概念^[13]，即：

$$INL = \frac{|y_i - (ax_i + b)|_{\max}}{ax_{\max} + b} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $x_{\max}$ 是积分非线性计算范围内的 x 的最大值。

图 10 是原理样机 384 个电子学通道在 0~180 fC 输入动态范围内的积分非线性统计图，由图 10 可知所有通道的积分非线性在 5% 以内，均值约为 2%。

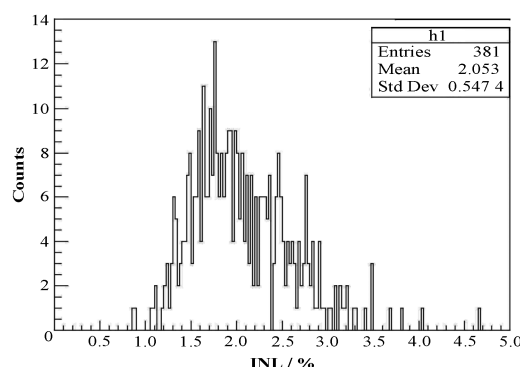


图 10 积分非线性
Fig.10 Integral non-linearity

5.2 样机噪声测试

传感器本身会产生噪声。首先传感器上的每个微条可以等效为一个反向偏置的 PN 结，即使在全耗尽情况下，P 区和 N 区中的少数载流子也会因为扩散或热激发而形成反向漏电流，该漏电流的大小存在随机涨落效应（即散粒噪声）。其次传感器非灵敏区的材料体电阻和引线电阻会产生电阻热噪声。

读出电子学也会产生噪声，其中前置放大器的噪声起决定作用，其噪声特性可以用两项之和给出，一项是前置放大器的固有噪声，即不带探测器的噪声；另一项是噪声斜率，定义为输入端增加 1 pF 的电容器噪声增加多少^[13]。IDE1140 的芯片资料表明该芯片内的前置放大器的噪声^[14]为 $139e+5e/pF$ 。

为了验证样机的系统噪声水平，测试使用低频率的触发信号(10 Hz)控制样机采集数据。经过多次测量（如 1000 次），并对测试的结果使用文献中的方法^[15]进行处理，原理样机 384 个电子学通道的系统噪声情况如图 11 所示，由图 11 可知该样机各通道的系统等效输入噪声电荷小于 0.16 fC，个别通道噪声偏高可能是因为传感器表面吸附原子（如灰尘之类）形成的表面电荷会引起漏电流，这种漏电流会产生显著的低频噪声^[13]。

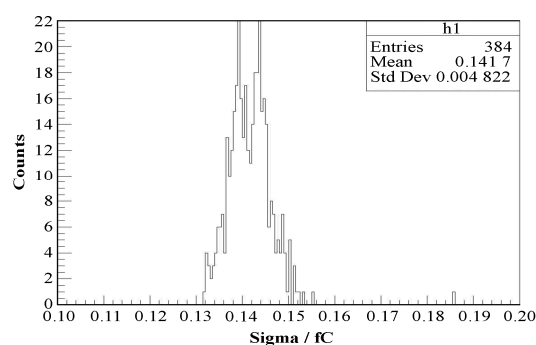


图 11 所有通道的噪声
Fig.11 Noise of all channels

5.3 宇宙线测试

为了考察硅微条样机探测最小电离粒子 (Minimum Ionizing Particle, MIP) 的性能，实验室搭建了宇宙线 μ 子测试系统。如图 12 所示，在硅微条传感器的上下空间平行放置两块塑料闪烁体探测器 (Plastic Scintillator Detector, PSD)，并使用高压模块 (CAEN N1470) 给 PSD 供电。正常工作的 PSD 会探测穿越的 μ 子，输出一系列电压脉冲。甄别器 (CAEN N841) 通过设置一定的阈值，将电压脉冲转变为数字信号。符合逻辑模块 (CAEN N455) 把来自上下两块 PSD 的数字信号进行“与”操作并输出。

“与”信号脉冲宽度非常窄，需要使用脉冲产生模块(CAEN N93B)将脉冲展宽后输出。由于脉冲产生模块输出的信号是 NIM 标准电平，而 DAQ 板上设计的输入是 TTL 标准电平，因此还需要通过一个电平转换器(CAEN N89)后提供触发信号给 DAQ 板。

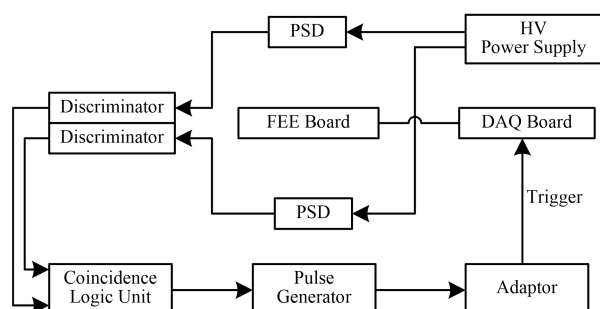


图 12 宇宙线测试系统
Fig.12 Block diagram of cosmic ray test system

穿越的宇宙线 μ 子会在击中的微条上直接产生电荷信号，而电容耦合效应使得相邻微条上也具有一定的电荷信号，从而形成了多个相邻微条的信号簇(Cluster)，该信号簇的脉冲幅度之和近似与宇宙线 μ 子沉积能量产生的电荷相当。图 13 是连续测试 8 h 积累的宇宙线 μ 子在探测器中的能谱图（即信号簇脉冲幅度的统计），该能谱图上 MIP 峰清晰可见。根据探测器理论^[16]可知，对于很薄的吸收层实际测量的能损分布比朗道分布更宽，图 13 成功使用朗道卷积高斯函数对宇宙线能谱进行拟合，拟合的峰位为 42 ADC（约 2.8 fC）。

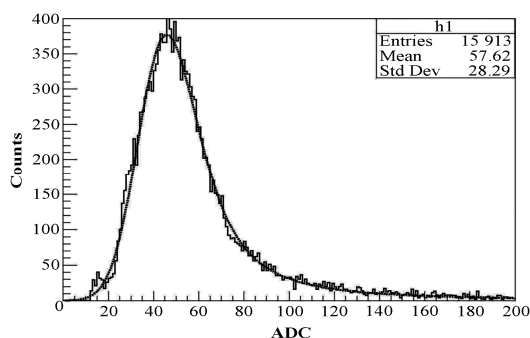


图 13 信号簇脉冲高度拟合
Fig.13 Cluster pulse height fitting

6 结语

为探测高能 γ 射线，本文成功研制了硅微条探测器样机，并对各关键技术进行了研究，同时对样机进行了一系列测试。

1) 在探测器的微组装技术中，本文搭建了系统漏电流小于 40 fA 的检测平台对硅微条传感器精确检测；为连接传感器与读出电子学，本文对引线键

合工艺进行摸索，能够实现 0.5 根/秒的速度键合出平均拉力为 9.5 gf 的键合丝。

2) 在前端读出电子学中，本文根据硅微条传感器的特点对读出方案进行设计，同时折中考虑多方面因素对电路板进行优化设计。

3) 在数据采集电路中，本文对关键器件 FPGA 内部控制逻辑进行详细设计与综合实现，并编写上位机软件进行自动化数据采集。

4) 本文对硅微条样机进行一系列测试。线性测试显示所有通道在 0~180 fC 的动态范围内具有很好的线性，积分非线性在 5%以内；噪声测试显示样机具有低噪声的性能，其等效输入噪声电荷小于 0.16 fC；宇宙线测试可以清晰分辨出 MIP 峰，并使用朗道卷积高斯函数拟合宇宙线能谱得到的 MIP 峰位约为 2.8 fC。

参考文献

- 1 Ricciarini S. PAMELA silicon tracking system: experience and operation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, **582**(3): 892–897. DOI: 10.1016/j.nima.2007.07.116.
- 2 Straulino S, Adriani O, Bonechi L, *et al.* The PAMELA silicon tracker[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004, **530**(1–2): 168–172. DOI: 10.1016/j.nima.2004.05.067.
- 3 Barbiellini G, Fedel G, Liello F, *et al.* The AGILE silicon tracker: testbeam results of the prototype silicon detector[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2002, **490**(1–2): 146–158. DOI: 10.1016/S0168-9002(02)01062-8.
- 4 Vallazza E, Barbiellini G, Basset M, *et al.* The AGILE gamma ray satellite: the construction and performance of the silicon tracker[C]. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE, 2004, **1**(1): 176–180. DOI: 10.1109/nssmic.2004.1462176.
- 5 Latronico L, Spandre G. The GLAST large area telescope: design, construction, test and calibration[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, **581**(1–2): 160–163. DOI: 10.1016/j.nima.2007.07.051.
- 6 Tajima H. GLAST tracker[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators,

- Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, **569**(1): 140–143. DOI: 10.1016/j.nima.2006.08.063.
- 7 Alcaraz J, Alpat B, Ambrosi G, *et al.* The alpha magnetic spectrometer silicon tracker: performance results with protons and helium nuclei[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2008, **593**(3): 376–398. DOI: 10.1016/j.nima.2008.05.015.
 - 8 Zuccon P. The AMS silicon tracker: construction and performance[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2008, **596**(1): 74–78. DOI: 10.1016/j.nima.2008.07.116.
 - 9 Chang J, Ambrosi G, An Q, *et al.* The DArk matter particle explorer mission[J]. Astroparticle Physics, 2017, **95**: 6–24. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2017.08.005.
 - 10 Azzarello P, Ambrosi G, Asfandiyarov R, *et al.* The DAMPE silicon-tungsten tracker[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, **831**: 378–384. DOI: 10.1016/j.nima.2016.02.077.
 - 11 Qiao R, Peng W X, Guo D Y, *et al.* Charge reconstruction of the DAMPE silicon-tungsten tracker: a preliminary study with ion beams[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **886**: 48–52. DOI: 10.1016/j.nima.2018.01.007.
 - 12 GJB 548B-2005: 微电子器件实验方法和程序[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2007.
GJB 548B-2005: Test methods and procedures for the microelectronic device[S]. Beijing: General Armament Department, 2007.
 - 13 王经瑾. 核电子学[M]. 北京: 原子能出版社, 1983: 92.
WANG Jingjin. Nuclear electronics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1983: 92.
 - 14 IDEAS. IDE1140 documentation (Rev. 4.0)[R]. Norway: Integrated Detector Electronics AS, 2016.
 - 15 Dong Y F, Zhang F, Qiao R, *et al.* DAMPE silicon tracker on-board data compression algorithm[J]. Chinese Physics C, 2015, **39**(11): 87–92. DOI: 10.1088/1674-1137/39/11/116202.
 - 16 汪晓莲. 粒子探测技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 19.
WANG Xiaolian. Particle detection technology[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009: 19.