

基于 ASIC 芯片的多探测单元设计与验证

张鑫¹ 徐婉秋^{1,2} 白超平¹ 孙越强¹ 王文静^{1,2}
张帅¹ 韩建伟¹ 陈睿¹ 朱翔¹ 李悦¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 以空间辐射环境中的粒子为研究目标,研制了用硅微条传感器作为探头、用集成芯片 IDE3160 进行信号处理的空间粒子探测系统. 该系统采用两片硅微条传感器组成的硅微条探测阵列作为前端探头,并应用数字化的信号处理方法,获取空间粒子入射的位置及在硅微条内单位长度沉积的能量(线性能量传递, LET). 从诱发单粒子效应的物理机制角度,对比重离子和脉冲激光在硅半导体中所产生物理效应的不同. 采用 1.064 μm 脉冲激光开展系统测试,获得良好的 LET 线性结果: 该系统数据采集所需时间为 2.47 ms,可探测到的 LET 阈值约为 0.1 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$,皮尔逊相关系数(PCC)达 0.998,表明系统测量结果与理论设计符合性良好. 该系统动态范围宽、线性度好,具有较高的集成度、可拓展性及可移植性,可以搭载在各种空间探测卫星上.

关键词 空间环境, 带电粒子, 探测系统, 硅微条传感器, 线性能量传递

中图分类号 TL8, V443

Design and Verification of Multi-detection Unit Based on ASIC Chip

ZHANG Xin¹ XU Wanqiu^{1,2} BAI Chaoping¹ SUN Yueqiang¹
WANG Wenjing^{1,2} ZHANG Shuai¹ HAN Jianwei¹
CHEN Rui¹ ZHU Xiang¹ LI Yue¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Taking particles in space radiation environment as the research background, the space particle detection system using silicon micro-strip sensor as the probe and integrated chip IDE3160 for signal processing is developed. The system is designed by using silicon micro-strip detection array, which is composed of two silicon micro-strip sensors as the front-end probe, and using digital signal processing method to obtain the position of space particle incident and the energy deposited in the unit length (Lin-

2023-02-08 收到原稿, 2023-04-12 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ear Energy Transfer, LET) in the silicon micro-strip. From the perspective of the physical mechanism inducing single particle effects, the physical effects produced by contrasting heavy ions and pulsed lasers in silicon semiconductors are different. Pulsed laser of $1.064\text{ }\mu\text{m}$ was used to test the system, and good LET linearity results were obtained: The time required for data acquisition is 2.47 ms , the detectable LET threshold is about $0.1\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ and the Pearson correlation coefficient is about 0.998 , indicating that the system measurement is in good agreement with the theoretical design. The system has a wide dynamic range, good linearity, high integration, scalability and portability, and can be mounted on a variety of space exploration satellites.

Key words Space environment, Charged particles, Detection system, Silicon micro-strip detector, Linear Energy Transfer (LET)

0 引言

空间环境中含有大量的高能带电粒子, 例如质子、重离子、 α 粒子等^[1], 这些粒子会穿透航天器蒙皮, 轰击设备内部电路而造成故障, 因此空间粒子探测对于空间科学和空间工程技术具有重要意义^[2]. 在粒子探测领域有多种探测器^[3], 其中半导体探测器以其体积小、重量轻、能量分辨率高的特点, 广泛应用于核物理实验、天体物理实验中^[4].

随着集成电路技术的发展, 应用于核探测器的专用集成电路 ASIC(Application Specific Integrated Circuit) 芯片被研制出来并得到应用^[5], 例如 SVX 芯片应用于美国质子-反质子对撞机系统, APV25 芯片应用于欧洲核子研究中心 (CERN) 大型强子对撞机, ABCD3 TA 芯片应用于 ATLAS 实验等^[6-11].

在很多综合气象卫星和深空科学探索卫星上均搭载了空间粒子探测器, 与其他空间环境探测装备共同探索和探测地外空间^[12,13]. 本文设计了一套基于硅

微条的小型化探测系统, 并进行了初步测试. 相比输出通道为 $n\times n$ 路的硅像素探测器, 该系统只需 $2n$ 路即可实现空间粒子入射的定位及 LET(带电粒子在材料内单位长度沉积的能量) 测量.

1 硅微条探测系统设计

单独的硅微条探测器只能获取入射粒子的一维坐标, 因此, 探测系统的探头结构采用两块硅微条探测器上下纵横交叉叠放的方法, 获得入射粒子位置的二维坐标. 信号处理部分采用专用集成电路 IDE3160 芯片, 可同时采集多路硅探测器信号, 获取入射粒子的能量信息. 多路硅微条探测系统如图 1 所示.

该系统由硅微条探测阵列和信号处理两部分组成. 硅微条探测阵列包括两片厚 $150\text{ }\mu\text{m}$ 的硅微条探测器; 信号处理部分包括前端电子学模块和数据采集模块. 硅微条探测阵列输出的 10 路脉冲信号经过前端电子学模块放大、成形、滤波等一系列操作后, 得

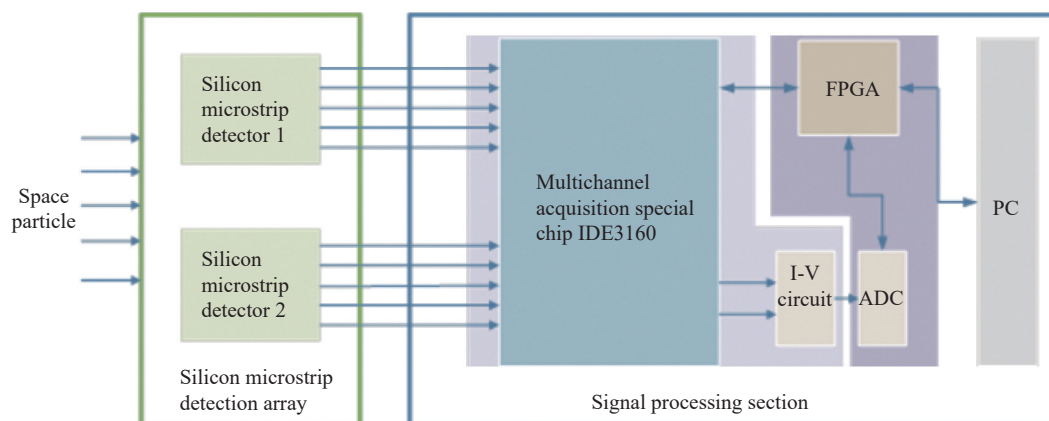


图 1 探测系统整体结构

Fig. 1 Overall structure of the detection system

到一定幅度最佳信噪比的差分脉冲电流, 之后经电流-电压转换电路得到单端脉冲电压, 再将其输入模拟-数字转换器进行模数转换; 将转换后的信号输入数据采集模块进行串并转换, 并将 10 路信号的幅度信息送入上位 PC 机处理, 进一步判断空间粒子的入射位置并得到其 LET.

1.1 硅微条探测阵列

1.1.1 结构设计

硅微条探测阵列的结构如图 2 所示. 每片硅微条传感器有 5 个探测单元, 每个探测单元尺寸为 $2\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 且可以独立输出信号; 将两片硅微条传感器采用上下横纵交叉的方式组成一个 5×5 的微条阵列, 每个阵列尺寸为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 由上向下依次是硅微条传感器 1 和硅微条传感器 2, 二者垂直交叉布局, 其中硅微条传感器 1 实现 x 方向上的定位, 硅微条传感器 2 实现 y 方向上的定位, 二者结合可实现空间粒子的定位^[14-15]. 这种硅微条探测阵列被广泛

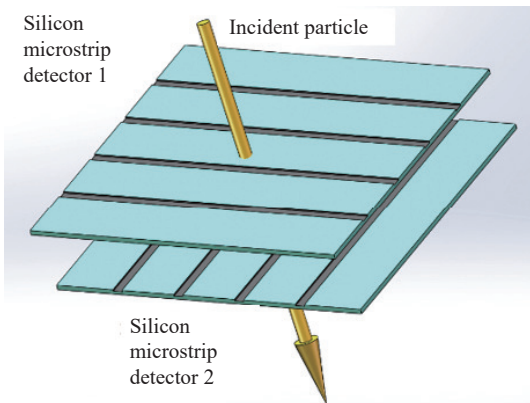


图 2 硅微条探测阵列结构

Fig. 2 Structure of silicon strip detection array

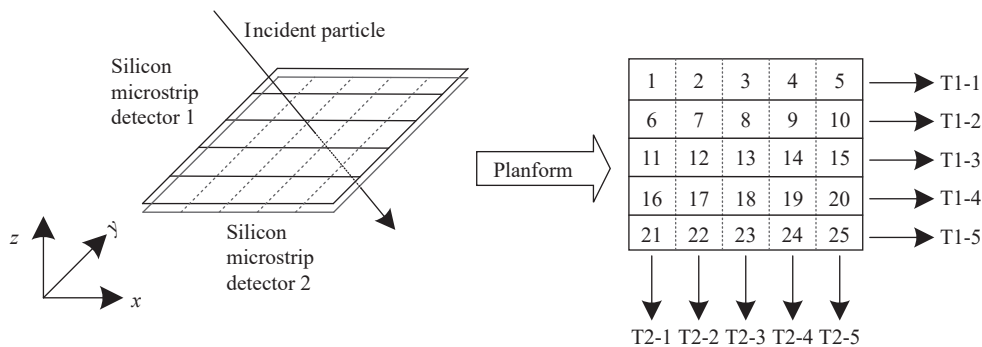


图 3 硅微条探测阵列定位原理

Fig. 3 Positioning schematic diagram of silicon strip detection array

应用于高能粒子探测中, 例如 SOHO 飞船的高能及相对论核与电子 (ERNE) 探测器的高能探测器 (HED) 探头, ACE 卫星的太阳同位素谱仪 (SIS) 和宇宙线同位素谱仪 (CRIS), SAMPEX 卫星的质谱仪望远镜 (MAST)^[16-19].

1.1.2 定位原理

记硅微条传感器 1 的 5 路输出通道分别为 T1-1, T1-2, T1-3, T1-4, T1-5, 硅微条传感器 2 的 5 路输出通道分别为 T2-1, T2-2, T2-3, T2-4, T2-5, 入射的空间粒子在上下两片传感器上各触发一个脉冲信号. 硅微条探测阵列定位原理如图 3 所示. 如果 T1-1 和 T2-1 有信号输出, 粒子入射在区域 1; 如果 T1-3 和 T2-3 有信号输出, 粒子入射在区域 13; 以此类推.

1.2 信号处理部分

1.2.1 前端电子学模块

前端电子学模块由一片多通道、高集成度电荷测量芯片 IDE3160 及电流-电压转换电路组成, 实现电荷信号前置放大、成形滤波、产生触发信号以及电流信号转电压信号等功能.

IDE3160 是一个具有 32 个前端电子学读出通道的高集成度 ASIC 芯片, 其主要参数列于表 1.

IDE3160 每个通道均由 VA 和 TA 两部分组成. 其中 VA 部分包括电荷灵敏前置放大器、慢成形电路、采样保持电路和多路复用器, 主要作用是将电荷成形放大, 并提供入射粒子的能量信息; TA 部分包括快成形电路和比较器, 主要作用是接收电荷灵敏前置放大器的信号并产生触发信号, 同时提供粒子击中的时间信息. 其单通道结构原理如图 4 所示.

粒子击中硅微条探测器, 当超过设定的阈值时, 会在 TA 部分产生触发信号, 在 VA 部分滤波成形,

并产生准高斯信号. 当准高斯信号到达峰值时, 将峰值采样保持, 最后串行输出 32 路采样保持信号.

IDE3160 芯片的输出为差分电流, 在 AD 变换之前需要先对 IDE3160 输出信号进行模拟调理, 主要是电流-电压转换, 以及必要的放大、滤波等. 为了抑制共模噪声, 上下支路应尽可能对称, 如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 当 $R_3 = R_4$, $R_5 = R_6$, $R_9/R_7 = R_{10}/R_8$ 时, 其输出电压

$$V_{\text{out}} = \frac{R_9}{R_7} R_3 (I_{\text{outp}} - I_{\text{outm}}).$$

其中, I_{outp} 和 I_{outm} 为 IDE3160 输出的差分电流.

1.2.2 数据采集模块

数据采集模块由 FPGA 芯片及其外围电路 ADC 和串口通信组成, 主要实现以下三个功能: 实现对前端电子学芯片 IDE3160 的控制和配置; 实现对数字信号的采集和缓存; 实现与上位 PC 机间的通信. 数据采集模块通过串口接收上位 PC 机传输来的数据流, 解析后对 IDE3160 芯片进行内部寄存器配置;

FPGA 收到 IDE3160 产生的触发信号之后, 为 IDE3160 芯片和 AD976 A 提供使能信号, 并采集缓存数字信号; 最后通过串口向上位 PC 机传输.

数据采集模块的逻辑控制是由 FPGA 实现的, 其整体架构如图 6 所示. 其中指令解析模块接收上位 PC 机下发指令并解析; 数据返回模块将前端电子学模块采集到的 10 路脉冲信号传输到上位 PC 机; 状态控制模块实现对 IDE3160 和 ADC 的控制.

状态控制模块首先根据解析到的上位 PC 机发送指令, 实现不同模式的选择以及 IDE3160 寄存器初始化的配置; 空间粒子入射后, 调用 ADC 功能模块实现对硅微条探测阵列模块输出电荷的采样转换; 最后通过数据返回模块、串口模块向上位 PC 机传输数据. 状态控制模块的工作流程如图 7 所示.

2 测试结果

常用的粒子定标设备是粒子加速器, 受控的高能粒子束在真空环境下辐照微电子器件, 获取器件与粒子能量、通量相关参数^[20]. 相对于粒子加速器, 脉冲激光系统也可模拟粒子与物质相互作用, 具有对硅半导体器件测试功能, 其优点是定位精度高、操作简便. 本探测系统测试采用脉冲激光系统模拟单粒子效应.

2.1 测试方法

在诱发单粒子效应的物理机制方面, 粒子加速器产生的重离子和脉冲激光在硅半导体中产生的物理效应不同^[21-23], 主要表现如下.

表 1 IDE3160 主要参数	
Table 1 Parameters of the IDE3160	
参数	典型值
通道数	32
动态范围/pC	-5 ~ +13
等效噪声电荷/pF ⁻¹	3516+7.6
差分输出增益/($\mu\text{A}\cdot\text{Fc}^{-1}$)	0.14
功耗/mW	203

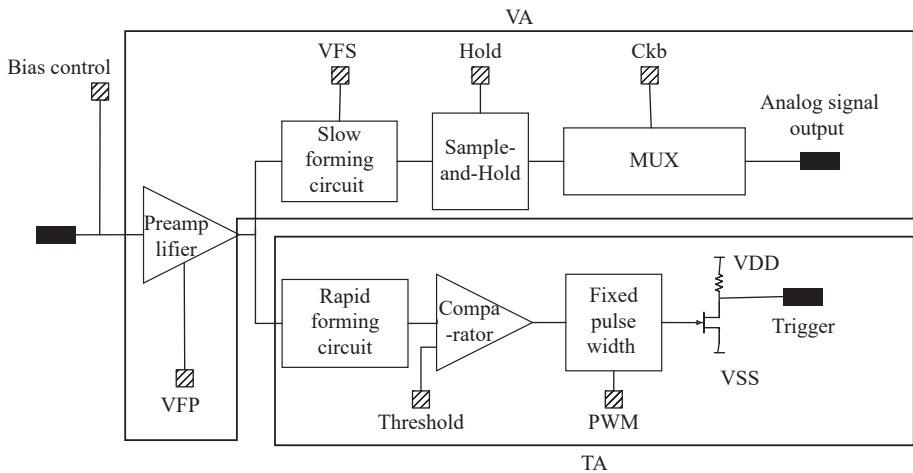


图 4 IDE3160 单通道结构

Fig. 4 IDE3160 single-channel structure

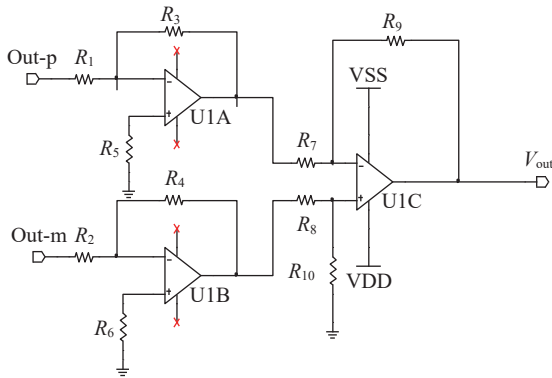


图5 电流-电压转换电路

Fig. 5 Current-voltage conversion circuit

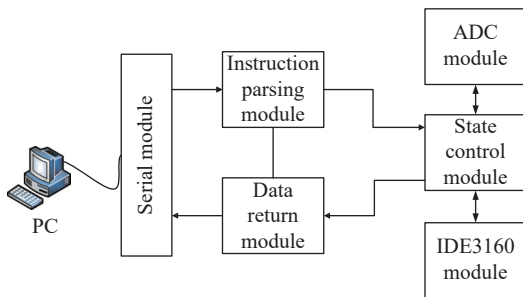


图6 数据采集模块逻辑设计

Fig. 6 Logical design of data acquisition module

(1) 碰撞电离与光致电离的不同. 碰撞电离是指半导体材料的原子或者靶分子受到重离子直接碰撞, 损失电子形成离子; 光致电离是指原子吸收的光子能量超过电离能, 释放电子形成离子. 加速器诱发的单粒子效应属于碰撞电离, 脉冲激光诱发的单粒子效应属于光致电离.

(2) 径向电荷浓度变化不同. 当重离子引起电离时, 半导体内电荷浓度随中心半径增加而快速衰减, 具有中心区峰化剧烈的特点. 当半导体受到 GeV 量级宇宙线重离子轰击时, 电荷径迹宽度约 $3\ \mu\text{m}$, 而低能离子仅导致约 $0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 的径迹宽度. 电荷浓度在中心区可达到 $10^{23}\ \text{cm}^{-3}$, 远大于典型半导体器件掺杂区的载流子浓度; 聚焦后的激光光斑与高能重离子相当, 电荷径迹宽度可以达到 $1\sim 2\ \mu\text{m}$, 远大于低能离子引起的径迹宽度, 电荷浓度按照高斯 (Gauss) 分布沿径向衰减.

从微观层面观察, 重离子和脉冲激光引起的电荷, 在 PN 结中收集与扩散机理一致. 重离子在半导体中引起的扩散电荷和漏斗效应在激光模拟实验中

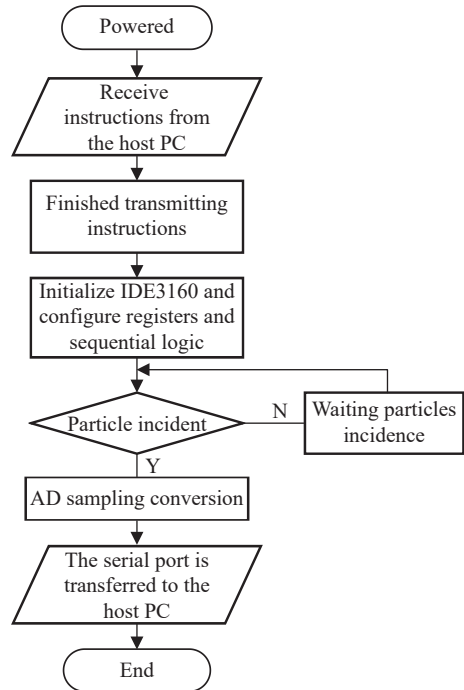


图7 状态控制模块工作流程

Fig. 7 Work flow of status control module

也同样存在. 但是相同 LET 值脉冲激光比重离子引起的电荷浓度低, 径迹半径大, 不容易在背景电荷浓度较高的器件中形成漏斗效应. 高掺杂半导体具有较高浓度背景电荷, 所以脉冲激光在高掺杂半导体器件中电离的电荷数量应当高于一定阈值, 才能很好地模拟重离子的单粒子效应. 该阈值与器件掺杂浓度相关.

2.2 激光参数选择

2.2.1 波长选择

在半导体中沉积电荷 (能量) 的前提条件是半导体禁带宽度必须小于激光光子能量. 建立硅器件的禁带宽度与波长之间关系, 可以得出激光波长必须小于 $1.13\ \mu\text{m}$, 即

$$\lambda = h \frac{c}{E}.$$

其中, λ 为波长, h 为普朗克常数, c 为光速; E 为能量, 取硅器件的禁带宽度 $1.1\ \text{eV}$.

另外, 这里所有硅微条探测器半导体表面均有保护层 (死层), 厚度约为 $2\ \mu\text{m}$. 激光需要穿透该保护层才能在灵敏层电离出电荷. 从图 8 可知对应的波长约为 $0.5\ \mu\text{m}$. 因此激光波长应在 $0.5\sim 1.13\ \mu\text{m}$.

测试方案使用 Nd:YAG 激光, 其具有较大的穿

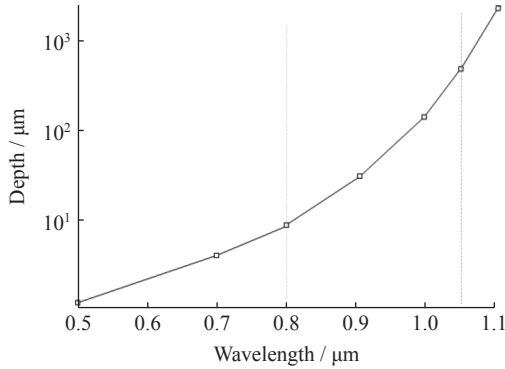


图 8 激光穿透深度与波长关系

Fig. 8 Relation between laser penetration depth and wavelength

透深度, 可达 500 μm , 波长为 1.064 μm , 属于红外波段, 可用于任何器件的测试.

2.2.2 激光脉冲能量选择

为了将一个激光脉冲与一个重离子之间进行等效, 需要假设二者在半导体材料中线性能量传递 (Linear Energy Transfer, LET, 定义符号 E_{LET}) 值相等, 即假设二者在单位长度半导体材料中电离的电荷数相等. 根据等效 LET 值范围选择激光脉冲能量. 基于线性吸收机制, 激光脉冲 LET 值表示如下^[23]:

$$E_{\text{LET}}(x) = E_0 e^{-ax}.$$

$$E_0 = \eta \times \frac{E_{\text{ion}} \lambda \alpha}{ch\rho} E_{\text{laser}}.$$

其中, E_0 为半导体表面处线性能量传递值, 单位 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$; E_{ion} 为激发能, 单位 eV; η 为激光在探测器里的转换效率; λ 为激光波长, 单位 cm; α 为吸收系数, 单位 cm^{-1} ; c 为光速; h 为普朗克常数; ρ 为半导体密度, 单位 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$; E_{laser} 为激光脉冲能量, 单位 pJ.

选取硅半导体为被测材料, 激光波长为 1.064 μm , 相关参数列于表 2. 1.064 μm 激光在硅半导体中产生线性能量传递值为 $E_{0,1.064 \mu\text{m}} = 0.022 E_{\text{laser}}$. 假如 LET 范围为 0.1~80 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 则激光的脉冲能量范围 $E_{\text{laser},1.064 \mu\text{m}}$ 应为 4.5 pJ~3.6 nJ.

2.3 实验测试

测试使用皮秒脉冲激光单粒子效应装置, 其由皮秒脉冲激光器、光路调节和物镜、三维移动台、CCD 摄像机和控制计算机等仪器设备组成.

对不同激光能量下采集的数据取均值, 得到入射

表 2 硅半导体和激光脉冲的参量

Table 2 Parameters for calculating the equivalent LET value of the laser pulse

$\lambda/\mu\text{m}$	η	α/cm^{-1}	E_{ion}/eV	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3})$
1.064	0.2675	10	3.6	2330

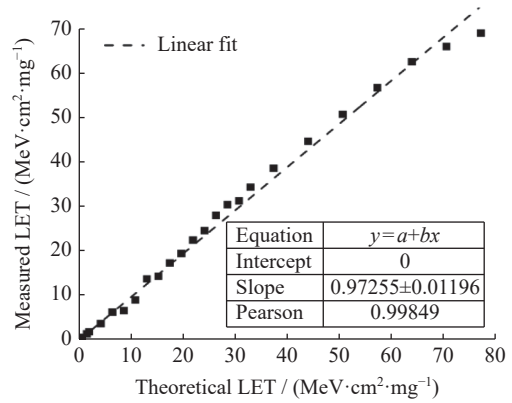


图 9 系统线性测试结果

Fig. 9 Linear test results of the system

激光能量的 LET 实测值. 图 9 为线性测试结果. 由测试结果可知, 该系统在 0.1~80 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 范围内线性度较好, 皮尔逊相关系数 (PCC) 达 0.998, 表明系统测量与理论设计符合性良好.

3 结论

设计研制了包括硅微条探测阵列、前端电子学模块、数据采集模块在内的探测系统原理样机. 使用该系统可以获得空间粒子的入射位置及 LET 值. 通过实验及测试可知, 该系统数据采集时间约 2.47 ms, 可探测到的 LET 阈值约 0.1 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, 皮尔逊相关系数 (PCC) 达 0.998. 在空间粒子探测系统原理样机中, 该系统动态范围宽、线性度好, 满足空间环境下工程应用的要求, 并且具有较好的可移植性.

参考文献

- [1] HOLMES-SIEDLE A, ADAMS L. Handbook of Radiation Effects[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993
- [2] WANG Xiaohai. Development status and trend of space environment detection technology[J]. *Satellite & Network*, 2015(8): 60-65
- [3] YE Zonghai. Space Particle Radiation Detection Technology[M]. Beijing: Science Press, 1986
- [4] CHENG Yumin, LAN Xiaofei, SHI Zongren, et al. Devel-

- opment of space charged particle detection system of telescope style[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2016, **33**(4): 364-369
- [5] SPIELER H. Front-end electronics and trigger systems—Status and challenges[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, **581**(1/2): 65-79
- [6] FRIEDL M, IRMLER C, PERNICKA M. Readout of silicon strip detectors with position and timing information[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, **598**(1): 82-83
- [7] CAMPABADAL F, FLETA C, KEY M, *et al.* Design and performance of the ABCD3 TA ASIC for readout of silicon strip detectors in the ATLAS semiconductor tracker[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, **552**(3): 292-328
- [8] TENG Yang. The Design and Implementation of Space Particle Detection System[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015
- [9] YANG Chuibai, ZHANG Kunyi, WANG Yue, *et al.* On overview of utilization of semiconductor detector in space particles measurements[C]//Proceedings of the 26 th National Conference on Space Exploration, Space Exploration Committee of Chinese Society for Space Science. Qionghai: Chinese Society of Space Science, 2013: 562-567
- [10] REN Yiwen, GUO Jianhua, WANG Shen. Design and realization of charge measurement system based on VA32 TA5[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, **36**(3): 395-400 (任益文, 郭建华, 汪慎. 基于VA32 TA5电荷测量系统的设计和实现[J]. *空间科学学报*, 2016, **36**(3): 395-400)
- [11] ZHAO Hongyun. The Research and Implementation of the Readout System for A New Plastic Scintillator Array Detector[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015
- [12] YANG Haibo. Signals Reading Method and Circuit Design for Multiple Detection Unit Based on the Advanced ASIC Chips[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015
- [13] ARAKCHEEV A, AULCHENKO V, KUDRYAVTSEV V, *et al.* Operation of silicon microstrip detector with integrating readout for fast time-resolved experiments[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, **15**(6): C05065
- [14] ZHANG Xin, XU Wanqiu, BAI Chaoping, *et al.* The invention relates to a silicon micro-strip detector reading circuit and reading method: China, 112649833 B[P]. 2023-02-17
- [15] XU Wanqiu. Design and Implementation of Silicon Micro-Strip Detection System[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2021
- [16] TORSTI J, VALTONEN E, LUMME M, *et al.* Energetic particle experiment ERNE[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**(1/2): 505-531
- [17] WIEDENBECK M E, CHRISTIAN E R, COOK III W R, *et al.* Two-dimensional position-sensitive silicon detectors for the ACE solar isotope spectrometer[C]//Proceedings of SPIE 2806, Gamma-Ray and Cosmic-Ray Detectors, Techniques, and Missions. Denver: SPIE, 1996
- [18] STONE E, COHEN C M S, COOK W R, *et al.* The cosmic-ray isotope spectrometer for the advanced composition explorer[J]. *Space Science Reviews*, 1998, **86**(1/2/3/4): 285-356
- [19] COOK W R, CUMMINGS A C, CUMMINGS J R, *et al.* MAST: a mass spectrometer telescope for studies of the isotopic composition of solar, anomalous, and galactic cosmic ray nuclei[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, **31**(3): 557-564
- [20] HAN Jianwei, SHANGGUAN Shipeng, MA Yingqi, *et al.* Research progress for single event effects of space payloads by pulsed laser simulation[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(6): 577-584
- [21] HUANG Jianguo, HAN Jianwei. The mechanism for SEU simulation by pulsed laser[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2004, **47**(5): 540-549
- [22] QIAO Kai, GAO Chao, GAO Xiujuan, *et al.* Discussion on the laser threat and protection system for optical remote sensing satellites[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, **42**(2): 59-67
- [23] XUE Yuxiong, TIAN Kai, CAO Zhou, *et al.* An overview of pulsed laser simulation facility for single event effects and testing[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, **27**(3): 304-312

作者简介



张鑫男, 1977年3月出生于河北省邢台市, 现为中国科学院国家空间科学中心特聘研究员, 空间环境探测总体技术室主任, 主要研究方向为空间天气探测技术研究以及神经网络在空间探测技术中的应用研究等。

E-mail: xinzhang@nssc.ac.cn