

ASO-S HXI 量能器电荷测量 ASIC 的 抗辐照性能研究

万 强^{1,2} 郭建华^{1,2} 张 岩¹ 张永强¹ 胡一鸣¹

1(中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

2(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 先进天基太阳天文台卫星(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)是我国科学家提出的专用于观测太阳的科学卫星。硬 X 射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI)是 ASO-S 的三个科学载荷之一, HXI 的量能器由 99 个溴化镧晶体-光电倍增管探测单元构成。量能器的前端电子学采用了一种型号为 IDE3381 的高集成度电荷测量 ASIC(Application-specific Integrated Circuit), 利用它在空间和功率受限的卫星平台上实现了对 99 路探测单元信号的处理。为了评估 IDE3381 在空间辐射环境中的抗辐照性能, 设计了一套自动化测试系统, 用重离子束流和⁶⁰Co γ 源分别进行了单粒子效应(包括单粒子翻转和单粒子门锁)和总剂量辐照效应试验。测试结果表明: ASIC IDE3381 的抗辐照性能满足 HXI 飞行件的要求。

关键词 空间电子学, 辐照效应, 高集成度电荷测量 ASIC

中图分类号 TL817⁺.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030203

Radiation tolerance of the charge measurement ASIC for the ASO-S HXI spectrometer

WAN Qiang^{1,2} GUO Jianhua^{1,2} ZHANG Yan¹ ZHANG Yongqiang¹ HU Yiming¹

1(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China)

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract [Background] Hard X-ray Imager (HXI) is one of the three scientific payloads onboard of the advanced space-based solar observatory (ASO-S). The calorimeter of HXI consists of 99 LaBr₃ crystal and photomultiplier tube (PMT) detection units. A highly integrated charge-measurement application-specific integrated circuit (ASIC) with model IDE3381 is adopted in the front-end electronics of the calorimeter to process the signals from the 99 detection units on the space-limited and power-limited satellite platform. [Purpose] This study aims to evaluate the radiation tolerance of model IDE3381 ASIC in a space radiation environment. [Methods] A test bench with a flexible structure was designed by separating the device undergoing testing from the data acquisition (DAQ) system, hence shielding DAQ from the radiation environment. The performance of ASIC was automatically tested and monitored in the test bench during radiation tests. Both single-event effect (SEE), including single-event upset and single-event latch-up,

中国科学院空间科学战略先导专项(No.XDA15320104)、国家自然科学基金(No.U1831206、No.12227805、No.11921003、No.11973097)、中国科学院青年创新促进会(No.2022321、No.2021316)、中国科学院科学仪器发展项目(No.GJJSTD20210009)资助

第一作者: 万强, 男, 1994年出生, 2017年毕业于西安电子科技大学, 现为博士研究生, 研究领域为高能粒子探测技术

通信作者: 郭建华, E-mail: jhguo@pmo.ac.cn

收稿日期: 2022-09-01, 修回日期: 2023-01-18

Supported by Strategic Priority Research Program on Space Science, Chinese Academy of Sciences (No.XDA15320104), National Natural Science Foundation of China (No.U1831206, No.12227805, No.11921003, No.11973097), Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No.2022321, No.2021316), Scientific Instrument Developing Project of Chinese Academy of Sciences (No.GJJSTD20210009)

First author: WAN Qiang, male, born in 1994, graduated from Xidian University in 2017, doctoral student, focusing on high energy particle detection technology

Corresponding author: GUO Jianhua, E-mail: jhguo@pmo.ac.cn

Received date: 2022-09-01, revised date: 2023-01-18

and total ionizing dose (TID) tests were carried out by using a heavy ion beam and ^{60}Co gamma-ray, respectively.

[Results] The test results show that the SEE threshold of model IDE3381 ASIC is greater than $75 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, and the TID capacity is greater than 30 krad(Si). **[Conclusions]** The radiation tolerance of the charge measurement ASIC (model IDE 3381) meets the requirements of ASO-S HXI flight model.

Key words Space electronics, Radiation effects, Application-specific integrated circuit (ASIC)

先进天基太阳天文台(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)是一颗由中国科学院“空间科学(二期)”先导专项支持的科学卫星,已于2022年10月9日发射,其主要科学目标是在第25个太阳活动峰年对太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射进行观测和研究^[1-2]。硬X射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI)是ASO-S的三个科学载荷之一, HXI利用空间傅里叶调制成像技术,在硬X射线波段对太阳耀斑进行成像观测^[3]。

HXI量能器由 9×11 个探测单元构成一个探测阵列,每个探测单元由一个溴化镧(LaBr₃)闪烁晶体和一个光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)组成。99个探测单元分别测量经过准直器光栅调制后不同傅里叶分量的X射线通量和能量^[4-5]。为了实现高密度低功耗的前端电子学,在HXI量能器的前端电子学中采用了一款定制的ASIC(Application-specific Integrated Circuit),型号为IDE3381,实现并行地处理来自99个探测单元的信号^[6]。

IDE3381是HXI量能器前端电子学的核心器件,它的抗辐照能力将直接影响到量能器的可靠性和寿命。本文针对单粒子效应(Single Event Effects, SEE)和总剂量效应(Total Ionizing Dose, TID),介绍IDE3381抗辐照性能测试系统的设计和辐照评估实验的结果,为HXI量能器的辐射防护设计提供依据。

1 ASO-S的空间辐射环境

ASO-S卫星运行在高度720 km左右的太阳同步轨道上,轨道倾角约 98° ,预期工作4年以上。其轨道空间辐射主要来自地球辐射带、银河宇宙射线和太阳质子事件。来自地球辐射带中的高能电子和质子,以及来自宇宙射线和太阳爆发的质子和重离子是诱发电子学异常或故障的主要原因。

在卫星载荷中,受空间环境中高能粒子影响的器件主要是半导体器件,其主要影响是单粒子效应和总剂量效应^[7-8]。单粒子效应是高能粒子在半导体中沉积能量,产生电子-空穴对,这些电子-空穴对被电极收集后,造成器件的逻辑状态错误或永久性损坏。根据发生机理的不同,单粒子效应可以分为多种类型,如单粒子翻转(Single Event Upset, SEU)

和单粒子门锁(Single Event Latch-up, SEL)等。图1是利用CREME模型计算得到ASO-S轨道上不同空间环境状况下的宇宙线重离子线性能量传输(Linear Energy Transfer, LET)能谱^[9-10]。根据轨道环境模拟结果,ASO-S任务要求其元器件抗SEE的LET阈值应大于 $75 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$,以降低SEE出现的概率。

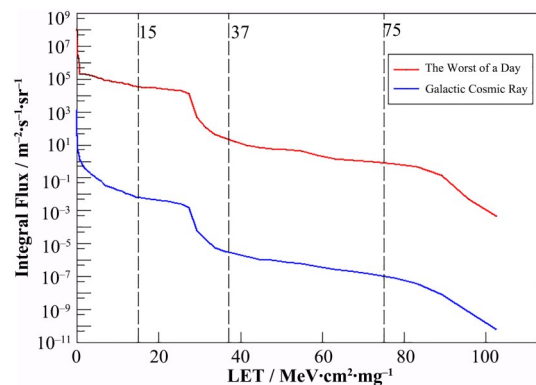


图1 ASO-S轨道宇宙线重离子LET积分谱
Fig.1 LET integral spectrum of cosmic ray heavy ions in ASO-S orbit

总剂量效应是由辐射诱生电荷引起器件电参数的变化,累积剂量引起半导体器件性能的逐渐劣化直至损坏,是一种电离辐射损伤效应。使用SHIELDOSE-2模型可以计算在一定几何屏蔽下的吸收剂量随屏蔽层厚度的变化关系,得到ASO-S轨道上总剂量-屏蔽厚度曲线,如图2所示^[9-10]。

在厚度3 mm的铝合金屏蔽下,ASO-S卫星在4 a寿命期内的总吸收剂量为9.47 krad(Si),考虑到

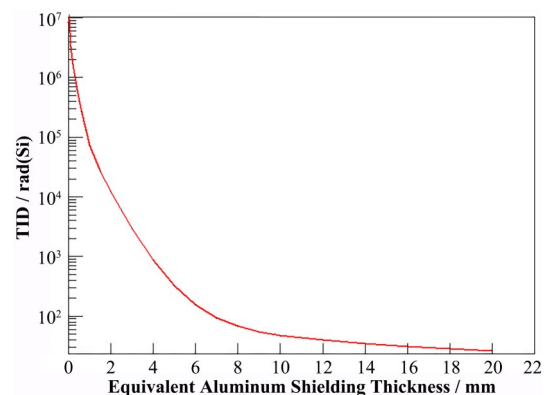


图2 ASO-S轨道上的总剂量-屏蔽厚度关系曲线
Fig.2 Relationship curve between total dose and shield thickness in ASO-S orbit

2~3 倍的裕量,要求元器件的抗辐照总剂量能力不低于 30 krad(Si)。

2 IDE3381 概述

IDE3381 是为 ASO-S HXI 量能器的应用而设计的 ASIC,用于读出 LaBr₃-PMT 探测单元。一片 IDE3381 集成了 16 路电荷测量通道,可以对 16 路 PMT 的输出信号进行积分、放大和成形。HXI 量能器共有 99 个探测单元,在前端电子学中使用 8 片 IDE3381 就可以处理所有 99 个探测单元的信号。

IDE3381 是模拟数字混合器件,其结构如图 3 所示^[11]。芯片的模拟部分主要是 16 路完全相同且独立的电荷测量通道。每个通道由 CMIS (Current-Mode Input Stage)、电荷灵敏放大器 (Charge

Sensitive Amplifier, CSA)、慢成形电路、峰值保持电路、快成形电路和计数器等组成。CMIS 对输入电荷脉冲按一定比例衰减后再经过 CSA 积分放大,CMIS 的衰减倍数和 CSA 的放大倍数都是可编程调节的。CSA 输出信号分成两路分别进入慢成形电路和快成形电路。慢成形电路进行准高斯成形,由峰值保持电路将峰值信息保持并输出,成形时间和保持时间都是可配置的。快成形电路具有 4 对阈值比较器和计数器,用于产生触发信号和对过阈值信号进行计数。4 对比较器和计数器可以设置不同的阈值用于记录不同能量范围的信号。此外,利用 IDE3381 的标定电路,可以对 16 路电荷测量通道进行刻度。芯片的数字部分除了 16 个通道的阈值计数器,还有用于设置各部分工作参数的配置寄存器。

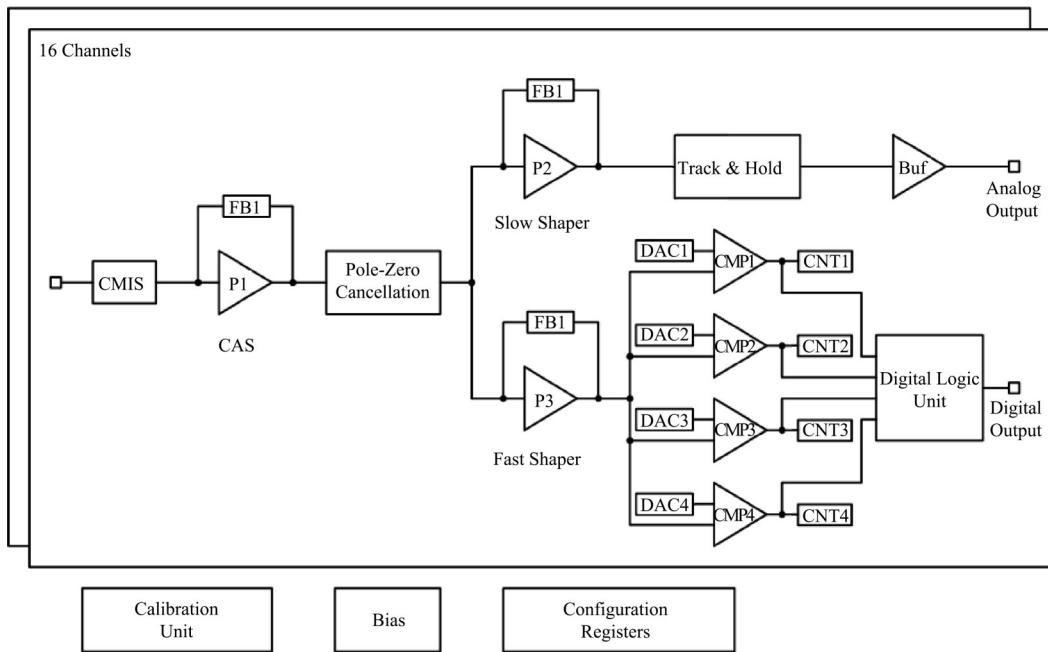


图3 IDE3381 原理框图
Fig.3 Schematic diagram of IDE3381

IDE3381 由挪威 IDEAS 公司在 IDE3380 的基础上而设计,IDEAS 公司系列的 ASIC 都具有类似的辐射加固设计,其中大多数已经在各种空间实验中应用,如 VA32 用于 AMS-02 的 TRD 探测器,VA140、VA160 和 VATA160 用于 DAMPE 卫星的 STK、PSD 和 BGO 探测器^[12-13]。

IDE3381 采用了 0.35 μm 带外延层的 CMOS 工艺,并且使用保护环(Guard ring)和 SOI(Silicon-On-Insulator)技术对整个布局进行了辐射加固,提高了器件的抗 SEL 能力。IDE3381 还对所有的计数器和配置寄存器增加了三模冗余和自动纠错的设计,可以降低 SEU 的影响。虽然 IDE3381 在设计上增加了

一些辐射防护措施,但是具体的电路结构和版图设计也会影响器件抗辐照性能。器件的具体抗辐照能力,决定了它能否在空间应用,也决定了辐照防护的设计,因此进行辐照评估实验是必要的。

3 试验系统

辐照实验主要包括 SEE 实验和 TID 实验,在每次实验前后需要对 IDE3381 的功能和性能进行测试,在实验过程中还需要监控 IDE3381 的工作状态。为了适应 SEE 和 TID 实验不同的辐照设施,采用 DUT (Device Under Test) -DAQ (Data Acquisition) -PC 结构构建测试系统,图 4 是辐照实验系统的结构

框图。除被测试器件 IDE3381 外, DUT 板上只包含 对辐射不敏感的无源器件与连接器。

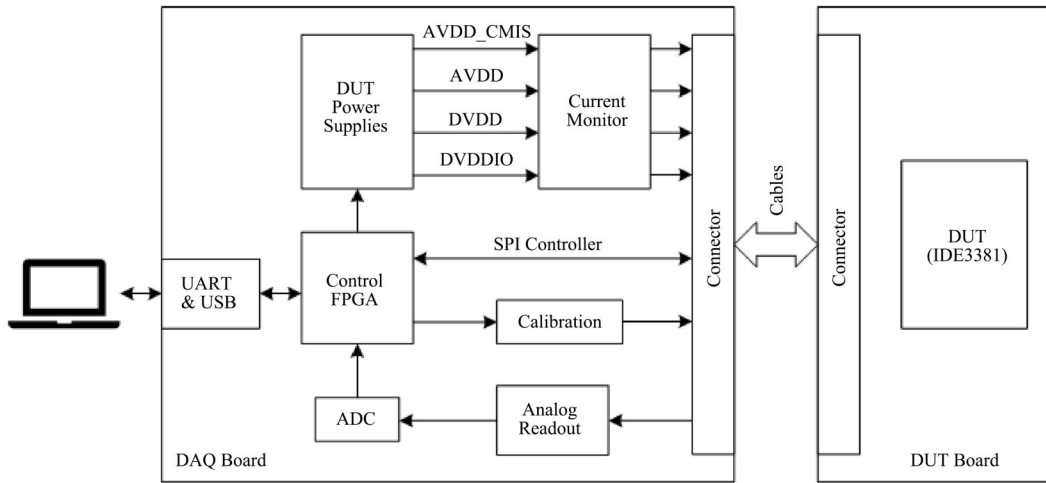


图4 IDE3381 测试系统框图
Fig.4 Schematic of IDE3381 test bench

DAQ 板用于对 DUT 板的供电、控制和性能测试。DUT 板和 DAQ 板之间可以直接板对板连接,也可以使用长电缆连接,这使得 DAQ 板可以被充分屏蔽,并放置在远离辐射源的地方,从而可以使用普通商业器件来搭建 DAQ 板。DAQ 板由标定电路(Calibration)、模拟读出电路(Analog readout)、电流监控电路(Current Monitor)和现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)控制电路(Control FPGA)组成。

控制计算机 PC 与 DAQ 板之间使用 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 和 USB 协议进行通信。计算机运行控制分析程序,可以设置 DUT 工作模式,自动化地测试器件性能,在辐照实验中监控 DUT 运行状态并记录异常情况。

3.1 标定电路

标定电路用来产生标定电荷脉冲信号,其结构如图 5 所示。在模拟开关闭合的瞬间,会产生一个阶跃电压,阶跃电压幅度由一个模数转换器(Digital-to-Analog Converter, DAC)来设定。阶跃电压通过一个电容就可以产生电流脉冲,其电荷量等于阶跃电压幅度与电容值的乘积。

IDE3381 内部标定单元具有一个模拟多路选择器,可以选择需要标定的通道。但是通过多路选择

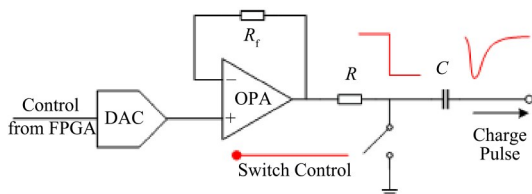


图5 标定电路原理框图
Fig.5 Block diagram of calibration circuit

器是将标定电荷直接注入到 CSA,为了能够测试包括 CMIS 在内的整个读出通道的性能,在 DAQ 板上设计了 16 路标定电路分别连接 16 路电荷测量通道的输入。由于 CMIS 是为负的输入信号而设计,标定电路采用模拟开关切换到地的方式,这样不需要运算放大器具有很大的带宽和摆率,就可以产生近似 PMT 输出的前沿较快的电流脉冲信号。16 路标定电路共用一个 DAC,扫描调节 DAC 的电压值就可以同时标定 16 路通道的线性度。

在辐照实验中需要使用长线缆连接 DUT 与 DAQ,考虑到长线缆寄生参数对标定脉冲信号的影响,在实验过程中,标定电路仅用于模拟产生探测器信号,使 DUT 处于正常工作状态。

3.2 电流监控电路

当发生单粒子锁定时,会导致芯片工作电流的激增,因此,电流监控电路不仅需要测量芯片电流,还需要及时发现 SEL,以采取措施保护芯片。

图 6 是电流监控电路的结构框图,通过测量采样电阻两端的电压就可以实现对芯片工作电流的监测。IDE3381 的电源由单独的低压差线性稳压器(Low DropOut regulator, LDO)提供,其电源分为模拟电源和数字电源,测试系统也分别对模拟电流和数字电流进行监控。IDE3381 的模拟工作电源电流在 300 mA 左右,数字电源工作电流则为几 mA,为了能够灵敏地检测到电流的变化,采样电阻分别选取 0.5 Ω 和 10 Ω ,同时采样电阻也可以起到限流的作用。

电路中的运算放大器使用的是集成仪表放大器,仪表放大器具有高输入阻抗和高共模抑制比的特点,在精确测量电压的同时又能够降低对被测量

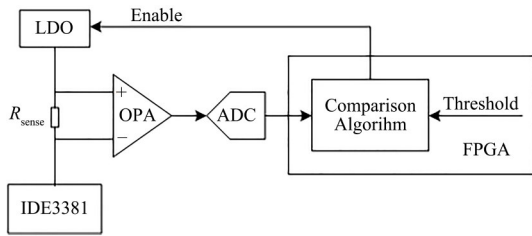


图6 电流监控模块框图

Fig.6 Block diagram of current monitor module

电路的影响。

为了及时监测电流的变化,系统控制数模转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 以 1 KSPS (kilo samples per second) 的采样率进行采样,然后将数据与预设的阈值比较,当连续三次采集到的电流超过阈值,会立即关闭 LDO,切断 DUT 供电电源。

连续三次采样和比较使得系统反应时间约为 3 ms,这样不仅可以降低干扰带来的误判断,又可以避免芯片在闩锁电流下发热损毁。

3.3 系统控制模块

整个测试系统有两种工作模式:性能测试模式和辐照实验模式。性能测试模式用于辐照实验前后测试 DUT 的性能;辐照实验模式则是在辐照实验过程中监控 DUT 的状态,报告记录异常状态信息,并采取相应的措施。

系统控制模块由 FPGA 中的逻辑控制电路和运行在计算机上控软件共同实现对整个测试系统的控制,其中 FPGA 逻辑结构如图 7 所示,主要包括刻度/读出控制模块、寄存器控制模块和电流监测控制模块。

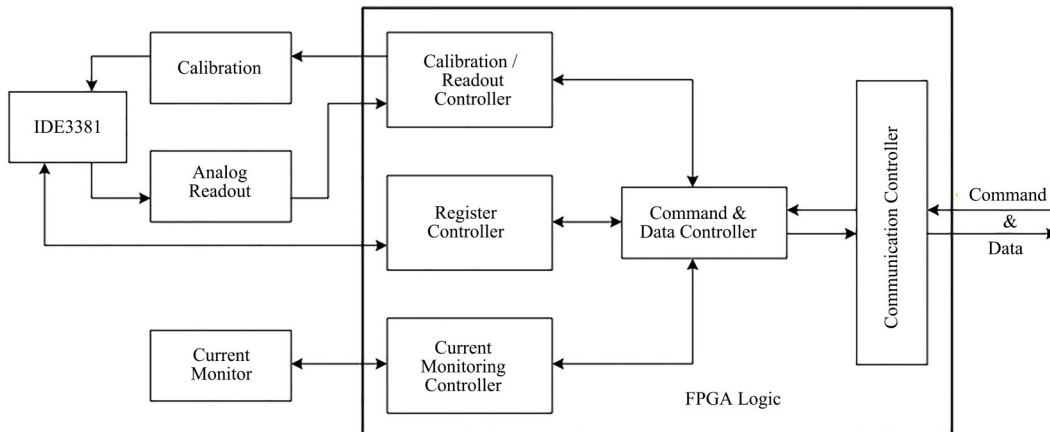


图7 FPGA 逻辑功能框图

Fig.7 Functional block diagram of FPGA logic

电流监测控制模块负责控制电流监控电路。刻度/读出控制模块则是控制刻度电路和模拟读出电路,对 IDE3381 各通道的基线和线性进行测试。

寄存器控制模块用于读写 IDE3381 的寄存器和计数器。在辐照过程中,需要循环读出并比较配置寄存器的内容,通过它们是否发生变化来判断 SEU 事件,IDE3381 的寄存器和计数器都具有奇偶校验位。由于 IDE3381 的计数器数目较多,并且如果计数器发生翻转,只会对一帧数据造成影响,因此对于计数器则采用检测奇偶校验位的方式。

4 SEE 试验与结果

在兰州重离子加速器 (Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL) 上分别用 Kr 离子和 Ta 离子进行了 SEE 试验。辐照是在空气中进行的,重离子通过真空-空气过渡箔,通过改变空气厚度,可以调节重离子的 LET 值^[13]。实验选择在 30 μm 厚度的硅中,LET 值为 37 MeV·cm²·mg⁻¹ 的 Kr 离子和

79 MeV·cm²·mg⁻¹ 的 Ta 离子。

重离子束流直接照射在未封装的裸芯片上。在束流照射前后,分别进行功能测试。在辐照过程中,SEU 和 SEL 监控一直在运行。当重离子总注量达到 10⁷ ions·cm⁻² 时停止束流^[14],在整个辐照实验中,未观察到 SEU 和 SEL 发生。

本次实验为辐照验证实验,验证了 IDE3381 抗 SEE 的 LET 阈值至少不低于 79 MeV·cm²·mg⁻¹。根据 ASO-S 轨道空间辐射环境的模拟结果可以得到,IDE3381 在飞行过程中发生 SEE 事件的概率不超过每个器件 8.73×10⁻¹¹ d⁻¹。在 HXI 量能器的前端电子学中共使用 8 片 IDE3381 芯片,在 4 年的寿命期内,8 片 IDE3381 发生 SEE 事件的总概率极小,小于 1×10⁻⁶,因此可以认为 IDE3381 对 SEU 和 SEL 是免疫的。

5 TID 试验与结果

在北京师范大学用 ⁶⁰Co γ 源进行了 TID 试验,实

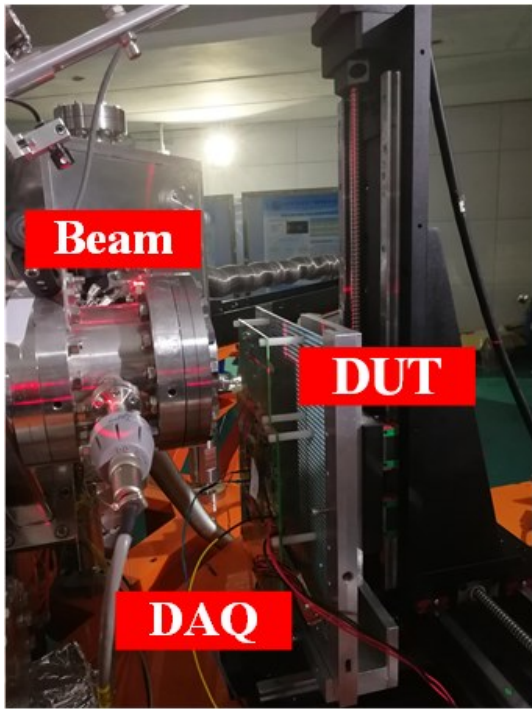


图8 SEE 试验现场
Fig.8 Snapshot of SEE test site at HIRFL

验装置结构如图9所示。DUT和DAQ处于辐照室中,其中DAQ被铅板屏蔽。

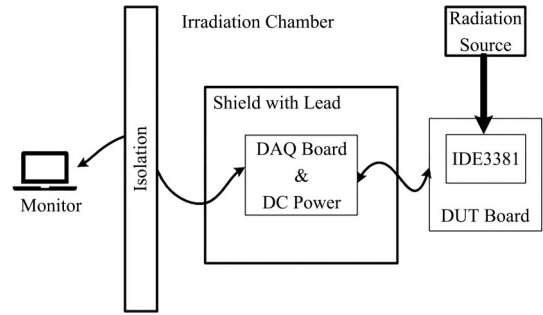


图9 TID 试验平台示意图
Fig.9 Block diagram of TID test platform

以 $10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 的剂量率辐照3个IDE3381芯片,辐照总剂量达到45 krad(Si),包括50%过辐照。辐照后再经过 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温退火 168 h^[15]。在辐照剂量到达 6 krad、12 krad、18 krad、24 krad、30 krad、45 krad,以及高温退火后,分别测试了各个芯片的性能。

测试过程中测量了16个模拟通道的基线和基线噪声。对于一个芯片上的16个模拟通道完全相同的电路,它们的辐照变化趋势基本相似。图10(a、b)分别显示了一个芯片上第1、第9、第11通道基线和基线噪声变化。每次测得的基线的等效噪声电荷小于500 fC,这意味着噪声水平没有明显的变化。

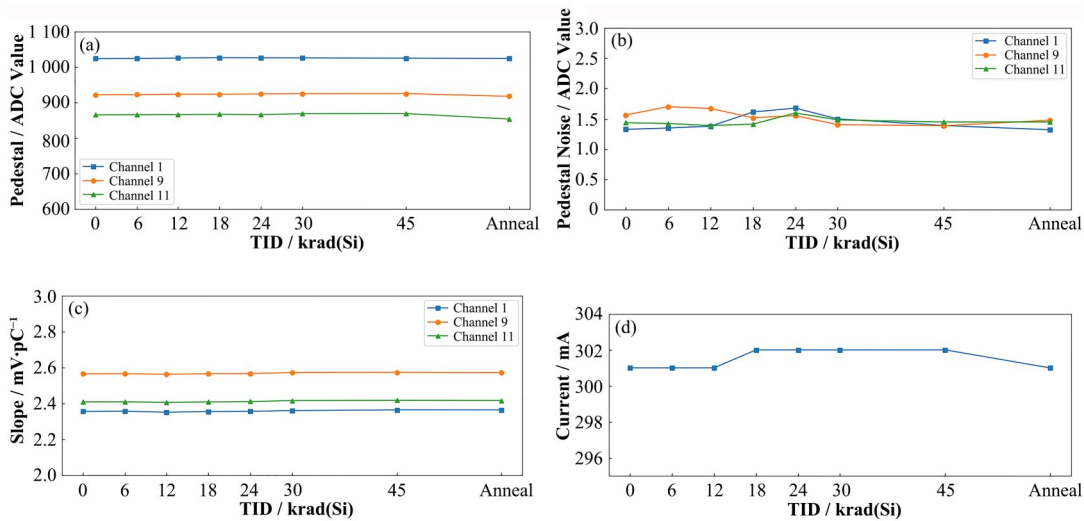


图10 TID 试验中IDE3381的性能变化 (a) 基线,(b) 基线噪声,(c) 增益斜率,(d) 工作电流
Fig.10 Performance degradation of IDE3381 in TID test (a) Pedestal, (b) Pedestal noise, (c) Slope, (d) Current

用标定电荷测量IDE3381各个通道的增益,在0~800 pC范围对增益进行线性拟合。TID试验过程中增益变化如图10(c)所示,在45 krad(Si)剂量内,各通道增益几乎未发生变化。图10(d)是一片芯片电源电流的变化,其电流在TID试验中也未发生明显变化。

6 结语

IDE3381是用于读出光电探测器(如光电倍增管、硅光电倍增器等)的ASIC,也是ASO-S HXI量能器前端电子学的核心器件。本文针对IDE3381设计了一套测试系统,进行了SEE和TID辐照试验,两个实验均为辐照验证实验,验证了该芯片的抗辐照性能。实验表明,IDE3381抗SEE的LET阈值大于

75 MeV·cm²·mg⁻¹,抗辐照总剂量能力大于30 krad (Si),符合ASO-S任务的要求。本实验为HXI的辐射防护设计提供依据,同时也为IDE3381在其他类似辐射环境的应用提供参考。

致谢 感谢兰州重离子加速器对本工作提供的支持和帮助。

作者贡献声明 万强:负责硬件研制和论文起草;郭建华:负责实验设计、协调,论文策划及修改;张岩、张永强、胡一鸣:负责实验测试。

参考文献

- Gan W Q, Ding M D, Huang Y, *et al.* Preface: advanced space-based solar observatory (ASO-S) [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, **19**(11): 155. DOI: [10.1088/1674-4527/19/11/155](https://doi.org/10.1088/1674-4527/19/11/155).
- Gan W Q. Progress report on ASO-S[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 565 - 567. DOI: [10.11728/cjss2022.04.yg07](https://doi.org/10.11728/cjss2022.04.yg07).
- Zhang Z, Chen D Y, Wu J, *et al.* Hard X-ray imager (HXI) onboard the ASO-S mission[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, **19**(11): 51 - 64.
- Zhang Y, Guo J H, Zhang Z, *et al.* Spectrometer of hard X-ray imager payload onboard the ASO-S mission[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, **30**(8): 128. DOI: [10.1007/s41365-019-0642-y](https://doi.org/10.1007/s41365-019-0642-y).
- 张岩, 郭建华, 张永强. 空间太阳硬X射线成像仪量能器读出电子学设计[J]. *天文学报*, 2019, **60**(5): 86 - 98. DOI: [10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.05.008](https://doi.org/10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.05.008).
ZHANG Yan, GUO Jianhua, ZHANG Yongqiang. Design of the readout electronics for solar hard X-ray imager[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2019, **60**(5): 86 - 98. DOI: [10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.05.008](https://doi.org/10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.05.008).
- Wan Q, Zhang Y, Guo J H, *et al.* Design of front-end electronics for HXI spectrometer flight model on-board ASO-S satellite[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, **17**(2): P02020. DOI: [10.1088/1748-0221/17/02/p02020](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/p02020).
- Baker D N. Effects of hostile space weather on satellite operations[C]//2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. USA, Aug. 14-19, 2011. DOI: [10.1109/ISEMC.2011.6038327](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2011.6038327).
- 冯轲. MOSFET器件抗辐照仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
FENG Ke. Simulation research on radiation resistance of MOSFET devices[D]. Chendu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- Liu W, Chen D Y, Jiang X K, *et al.* Research on the on-orbit background of the hard X-ray imager onboard ASO-S[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2022, **22**(9): 118 - 133. DOI: [10.1088/1674-4527/ac7ea0](https://doi.org/10.1088/1674-4527/ac7ea0)
- 刘伟鑫, 汪波, 马林东, 等. 低成本和商业卫星元器件抗辐照保证流程研究[J]. *微电子学*, 2020, **50**(1): 78 - 83. DOI: [10.13911/j.cnki.1004-3365.190635](https://doi.org/10.13911/j.cnki.1004-3365.190635).
LIU Weixin, WANG Bo, MA Lindong, *et al.* Process study of electronics radiation hardened assurance for low cost and commercial satellite[J]. *Microelectronics*, 2020, **50**(1): 78 - 83. DOI: [10.13911/j.cnki.1004-3365.190635](https://doi.org/10.13911/j.cnki.1004-3365.190635).
- IDEAS Inc. IDE3381 APOCAT[EB/OL]. [2021-03-05]. <https://ideas.no/products/ide3381/>.
- Gao S S, Jiang D, Feng C Q, *et al.* Single event effect hardness for the front-end ASICs in the DAMPE satellite BGO calorimeter[J]. *Chinese Physics C*, 2016, **40**(1): 016102. DOI: [10.1088/1674-1137/40/1/016102](https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/1/016102).
- Gao S S, Feng C Q, Jiang D, *et al.* Radiation tolerance studies on the VA32 ASIC for DAMPE BGO calorimeter [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2014, **25**(1): 010402. DOI: [10.13538/j.1001-8042/nst.25.010402](https://doi.org/10.13538/j.1001-8042/nst.25.010402).
- 宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验指南: QJ 10005—2008[S]. 2008.
Test guidelines of single event effects induced by heavy ions of semiconductor devices for space applications: QJ 10005—2008[S]. 2008.
- 宇航用半导体器件总剂量辐照试验方法: QJ 10004—2008[S]. 2008.
Total dose radiation testing method of semiconductor devices for space applications: QJ 10004—2008[S]. 2008.