

星载偏振相机模拟前端单粒子锁定及损伤机理

姚萍萍^{1,2}, 涂碧海^{1,2}, 邹征宇^{1,2}, 许智龙^{1,2}, 张爱文^{1,2}, 孙亮^{1,2*}, 骆冬根^{1,2}, 洪津^{1,2}

1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽合肥 230031)

摘要: 单粒子锁定效应容易引起星载遥感仪器产生故障。针对空间高能粒子辐射环境诱发的偏振遥感相机性能退化问题, 利用高能重离子和皮秒脉冲激光对星载偏振成像仪选用的模拟前端信号处理器开展了试验研究, 获得了此类器件的单粒子锁定特点, 为工程设计及试验评估提供了参考。试验结果显示: 偏振成像仪选用的模拟前端信号处理器对重离子诱发的单粒子锁定比较敏感, 单粒子锁定 LET 阈值处于 4.4~13.4 MeV·cm²·mg⁻¹ 之间。针对模拟前端芯片 LET 阈值偏低的问题, 提出了一种模拟供电端和数字供电端串联大功率防闩锁限流电阻和在轨定时开关机的设计方法。试验结果表明, 该方法可有效避免器件单粒子锁定造成的器件过流烧毁及仪器失效等故障。研究结果可为星载偏振相机用模拟前端信号处理器抗辐射加固设计和单粒子地面模拟实验方法的建立提供技术基础与保障。

关键词: 偏振成像仪; 高能粒子; 脉冲激光; 单粒子锁定; 模拟前端

中图分类号: TN386.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210226

Single event latch-up and damage mechanism of analog front-end for satellite-borne polarization camera

Yao Pingping^{1,2}, Tu Bihai^{1,2}, Zou Zhengyu^{1,2}, Xu Zhilong^{1,2}, Zhang Aiwen^{1,2},
Sun Liang^{1,2*}, Luo Donggen^{1,2}, Hong Jin^{1,2}

1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Single event latch-up (SEL) effect is one of the major factors that induce the failure of space-borne remote sensing instrument. To clarify the mechanism associated with the deterioration of polarization remote sensing camera induced by space high-energy particle radiation environments, the experiments were performed on the analog front-end signal processor of the directional polarization camera with heavy-ion and pulsed laser, for the purpose of identifying the single event effects sensitivity and providing technical guarantee for engineering design and test evaluation. The experimental results indicate that the analog front-end signal processor is susceptible to the SEL effect induced by heavy-ion, the linear energy transfer (LET) threshold is around 4.4-13.4 MeV·cm²·mg⁻¹. Aiming at the low LET threshold, a design method of high power anti-latch up current

收稿日期:2021-03-31; 修订日期:2021-09-02

基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(30-Y20A19-9007-15/17); 高分专项(民用部分)卫星应用共性关键技术项目(50-Y20A38-0509-15/16)

作者简介:姚萍萍,女,副研究员,博士,主要从事偏振遥感相机成像技术与光电电子技术方面的研究。

通讯作者:孙亮,男,副研究员,硕士,主要从事光谱偏振遥感与航天遥感工程技术等方面的研究。

limiting resistors in series to the analog and digital power supply terminal and the timing power on and off scheme was proposed. The results reveal that this method can effectively avoid the over-current burnout of the device and instrument failure caused by SEL. These research results provide significant reference data for the radiation-proofing design of analog front-end signal processor for the satellite-borne polarization camera and the experimental methods for single-event simulation on the ground.

Key words: directional polarimetric camera; high-energy particles; pulsed laser; single event latch-up; analog front end

0 引言

科学级电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 具有超低的读出噪声、超高的光电耦合效率、较宽的光谱响应范围以及高分辨率等优点, 成为遥感领域广泛应用的光电成像器件^[1-2]。多角度偏振成像仪 (Directional Polarimetric Camera, DPC) 作为陆地生态系统碳监测卫星主载荷之一, 是由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的一种超广角、画幅式和低畸变成像的星载偏振传感器, 主要由成像物镜组件、装载偏振片和光谱滤光片的检偏滤光组件、面阵 CCD 探测器及电子学单机构成。探测器要获得高质量的图像信号输出, 需要精确的驱动时序、低噪声的偏置电压和高精度模拟前端性能的保证^[3-5]。

DPC 运行于 505 km 的太阳同步轨道, 在轨期间遭遇的捕获电子和捕获质子辐射环境将诱发电子器件产生单粒子效应, 影响星载偏振相机在轨工作安全, 其中单粒子锁定 (Single Event Latch-up, SEL) 现象发生时可在芯片的供电端和地平面之间形成低阻通道, 使器件的工作电流增加几倍并维持大电流状态, 导致器件功能丧失甚至烧毁^[6-7]。长期以来, 国内外对于电子器件的单粒子效应做了大量的研究。2002 年, 法国波尔大学的 F. Darracq 等首次利用激光从商用 SRAM 器件背面扫描照射方法测试了器件的 SEU 和 SEL 效应的阈值和截面, 突破激光无法正面穿透多层金属布线层的技术瓶颈^[8]; 日本的 Takahiro Tomioka 等针对纳米卫星上的微处理器使用钷-252(²⁵²Cf) 源进行单粒子锁定效应试验研究^[9]。2010 年, 美国 sandia 国家实验室使用 0.35 μm SOI 工艺设计了具有不同 SEU 阈值水平的 SRAM 阵列, 分别进行了脉冲激光和地面重离子试验, 初步建立了两者之间的定量关系^[10]。国内, 曹洲等针对新型商业器件大容量 NAND Flash 存储器, 利用皮秒脉冲激光和

高能重离子开展了单粒子试验研究^[11]; 汪波等针对 8T-CIS 图像传感器进行重离子辐照实验, 研究其单粒子翻转的敏感性及其损伤机理^[12]; 韩建伟等建立便捷、低成本的脉冲激光定量试验的手段, 针对多种数字器件及 DC/DC 电源模块进行了单粒子效应研究^[13]。目前, 针对微处理器、CMOS 图像传感器和现场可编程门阵列 (FPGA) 等器件的单粒子辐射效应机理及防护设计验证的报道较多, 而针对航天用模拟前端器件的单粒子效应试验研究报道较少。

模拟前端 (Analog Front-End, AFE) 是图像传感、工业控制和数码产品等电子系统中实现前端模拟输入信号到后端数字处理信号转换的关键环节^[14-15]。在星载偏振相机领域内, 模拟前端是面阵 CCD 成像系统的核心部分, 用于读出像元电荷并完成图像的采集、转换和传输, 将经过降噪和调幅处理的 CCD 图像信号量化成数字图像信号并传输至视频处理器。DPC 采用的模拟前端为 ADI 公司生产的宇航级器件, 是专门为 CCD/CIS 成像器件设计的高速 A/D 转换芯片, 其分辨率为 14 bit, 最大转换速度为 10 Msps^[16]。该器件已大量应用于多颗卫星型号的光学载荷中。典型的模拟前端一般由高速高精度模数转换单元、可变增益放大单元和相关双采样保持单元等对单粒子效应敏感的电路模块组成, 且 AFE 电路为数模混合电路, 电路设计上需考虑模拟电路和数字电路之间的相互影响, 模拟电路和数字电路分开布局, 并分别采用独立的电源和地平面使其保持紧密耦合, 以减小电源平面和地平面的阻抗。单粒子效应可能会引起模拟前端的非线性误差、输出噪声、动态功耗等性能退化甚至失效, 发生单粒子锁定后多个像素的图像数据对应的像元灰度值偏离正常范围, 显示黑条, 甚至没有图像输出, 且器件电源端工作电流发生明显增加, 从而威胁星载偏振相机在轨任务的正常运行。

文中针对多角度偏振成像仪选用的集成度高、工

艺复杂的宇航级模拟前端信号处理器,利用重离子地面模拟源和皮秒脉冲激光单粒子效应试验系统,开展 CCD 成像系统中模拟前端的单粒子锁定模拟试验与抗锁定加固防护研究,研究结果可为空间应用环境下的宇航型号模拟前端选型、抗辐加固设计及单粒子地面试验评估提供技术基础与保障。

1 问题引入

DPC 是以业务化运行为目标的大视场星载偏振传感器^[17-19],按结构可分为三个部分,功能如图 1 所示:光机头部为前端光学探测部分;信息处理箱为总控单元,负责载荷与卫星数管分系统的连接及信息交换;驱动控制箱实现步进电机运动控制及光机头部各部件的温度控制。信息处理箱和驱动控制箱安装于卫星舱内,光学头部安装于舱外且与卫星平台隔热安

装。光机头部中的探测器成像系统如图 2 所示,由面阵 CCD 探测器和头部电路盒组成,实现探测器的驱动与视频信号采集,完成光电转换后输出的数字信号传输至信息处理箱。

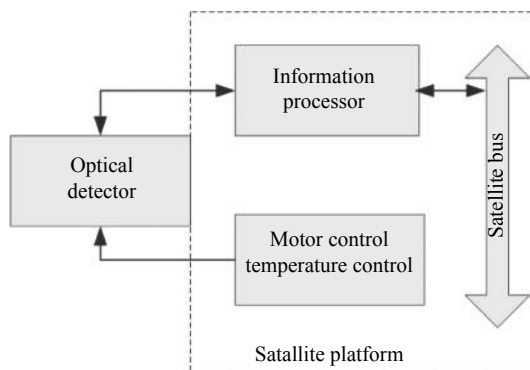


图 1 DPC 仪器组成结构框图

Fig.1 Structure diagram of DPC instrument

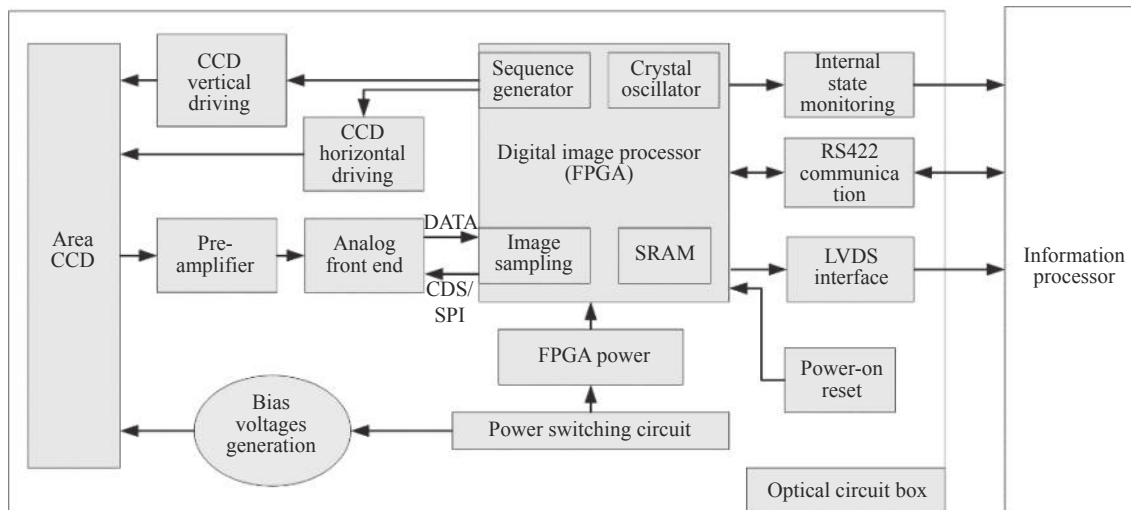


图 2 探测器成像系统框图

Fig.2 Structure of CCD image acquisition system

面阵 CCD 输出的图像模拟信号经预放大器放大后送入模拟前端进行隔直、降噪等处理,在相关双采样及控制脉冲的作用下经模数转换成相应的数字信号,然后送进 FPGA 内部按照科学数据包格式进行组织打包,通过 LVDS 接口将打包后的图像数据传送到信息处理箱。模拟前端位于信号流的起始阶段,其输出已经转变成数字信号,后续数字电路几乎不受干扰,因此模拟前端对探测器成像系统信噪比起重要作用^[20-21]。空间高能带电粒子入射至模拟前端器件敏

感区时可能触发寄生晶体管导通而产生单粒子锁定效应,从而造成器件的功能丧失,同时工作电流异常增加并维持此状态,对探测器成像系统造成严重威胁。

2 单粒子地面模拟试验与方法

2.1 重离子辐照试验

模拟前端的单粒子锁定试验测试系统如图 3 所示,包括辐照试验板、信号处理板、信号发生器、主控计算机和远程控制计算机等。辐照板用于焊装接受

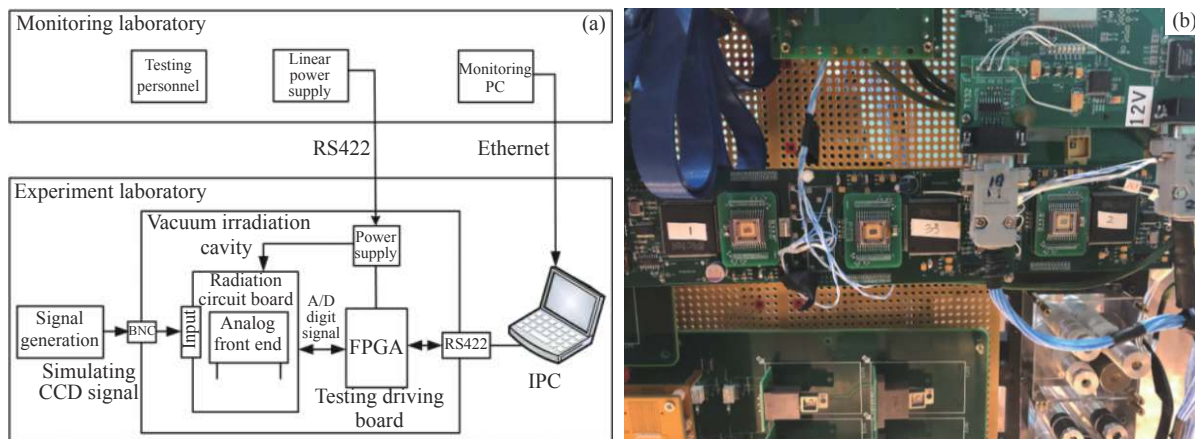


图 3 单粒子效应试验测试系统。(a) 系统框图; (b) 现场示意图

Fig.3 single-particle online detection system. (a) Principle block diagram; (b) Photo of AFE in radiation field

重离子辐照的受试器件,并通过插座安装在信号处理板上;信号处理板用于实现受试器件的供电控制、信号采集和实时无损传输等功能;信号发生器提供各通道的模拟信号输入;主控计算机放置于试验大厅,通过串口进行通信和数据传输,实现对信号处理电路的远程控制,通过地检软件控制线性电源,实现电流实时记录和限流保护功能;监控计算机放置于测试大厅,通过路由器与主控计算机通信,具有信号在线检测,改变器件增益、偏置参数和功能中断时在线重启等功能。

试验在中国原子能科学研究所的 HI-13 串列静电加速器上完成^[22],为确保重离子入射器件的灵敏区以诱发单粒子效应,试验前对被测器件进行专业开帽处理,重离子从器件正面入射,其束斑尺寸为 30 mm×30 mm,可覆盖被测芯片表面。选用不同线性能量传输 (Linear Energy Transfer, LET) 值的重离子进行试验,表 1 给出了重离子种类、LET(MeV·cm²·mg⁻¹) 值、射程(半导体材料硅中射程)、入射角度、注量率和试验所处环境等信息。

表 1 重离子辐照试验离子参数

Tab.1 Ion parameters of heavy ion irradiation test

Ion specie	Incident angle	LET/MeV·cm ² ·mg ⁻¹	Energy/MeV	medium range/μm	Flux/ion·cm ⁻² ·s ⁻¹	Experimental environment
Ge	Vertical	37.3	208	30.3	10900	Vacuum tank
Cl	Vertical	13.4	150	42.8	13500	Vacuum tank
F	Vertical	4.4	100	72.7	25400	Vacuum tank

试验过程中通过单粒子辐照测试软件获取单粒子事件信息,测试软件具备实时更改 AFE 内部的采样频率、增益和偏置参数的功能,实时对模拟信号进行图像采集。试验测试方法如下:在受试器件的任意一路模拟信号输入端施加不同频率的三角波信号,改变增益和偏置的组合,查看模拟前端输出的数字码信号是否正确,并在监控界面上实时显示。

2.2 不同 LET 值时重离子辐照诱发的单粒子锁定

单粒子锁定发生时,可观察到器件的输出码值出

现异常,表现为不同增益和内部偏置组合测试条件下受试器件的采样点和输出码出现不对应现象,即出现乱码。且器件电源端工作电流发生明显增大现象,工作电流从正常的 50 mA 增加到 297~371 mA。

不同重离子辐照试验下 AFE 器件产生单粒子锁定的试验情况如表 2 所示。试验结果表明:AFE 器件单粒子锁定 LET 阈值处于 4.4~13.4 MeV·cm²·mg⁻¹ 之间,发生锁定时器件的最大工作电流为 371 mA,锁定发生后通过断电后重新上电,芯片恢复正常工作。

表 2 模拟前端重离子辐照试验数据

Tab.2 AFE test data of heavy ion irradiation

Ion specie	LET/ MeV·cm ² ·mg ⁻¹	Flux/ Ion·cm ⁻² ·s ⁻¹	Working current of the device/mA	Limiting current of power supply/mA	Dynamic output signal	Qualified or not	Conclusion
Initial	0	0	49	500	Around 4B0H	Yes	The chip is normal
Ge	37.3	10900	371	500	Around FFFFH	No	SEL occurred
After Ge	0	0	49	500	Around 4B0H	Yes	The chip is not damaged
Cl	13.4	13500	297	500	Around FFFFH	No	SEL occurred
After Cl	0	0	49	500	Around 4B0H	Yes	The chip is not damaged
F	4.4	25400	49	500	Around 4B0H	Yes	The chip is normal
After F	0	0	49	500	Around 4B0H	Yes	The chip is normal

3 单粒子防护措施设计

空间应用环境下无法避免使用单粒子锁定敏感器件时,通常采用在器件电源输入端额外串联电阻限制锁定异常大电流,并保护器件和电路在短时间内不被烧毁,同时采取断电重新上电措施以消除锁定状态。限流电阻选取需要考虑三个因素:(1)限流电阻不宜过小,能够将高于十倍以上正常电流的锁定电流限定在较小范围;(2)限流电阻不宜过大,确保限流电阻分担的压降不影响器件正常工作;(3)当器件发生 SEL 时,限流电阻产生的更高压降也不会将整个系统的工作电压拉低至正常工作水平之下。

DPC 选用的 AFE 器件内部有模式、状态、增益和偏置配置等寄存器,卫星在轨期间遭遇的地球内辐射带电高能粒子辐射环境将诱发 AFE 器件产生单粒子锁定,导致内部寄存器状态发生变化,从而使得探测器图像无法正常输出。为确保模拟前端遭受空间高能粒子辐照后配置的数据准确可靠,可从以下方面对星载偏振相机空间应用过程中抗单粒子锁定进行加固防护设计。

(1) 芯片数字供电端和模拟供电端串联大功率防闪烁限流电阻。

AFE 电路为 5 V 供电的数模混合电路,由 CMOS 设计标准可知,CMOS 数字电路锁定效应的维持电流一般不小于 40 mA,因此回路总电阻应不小于 125 Ω。由重离子辐照试验结果可知,AFE 芯片发生单粒子锁定时,最大锁定电流约为 371 mA,计算可知 AFE 芯片内阻约为 14 Ω。数字端限流电阻的阻值应不小于 111 Ω。由器件使用手册可知,AFE 芯片数字端正常工作的电压范围为 3.00~5.25 V,正常工作电流约 1 mA,最大不超过 10 mA。为保证芯片正常工作,需要保证芯片工作电压不能低于 3.5 V (0.5 V 为降额设

计考虑),因此限流电阻上压降不能超过 1.5 V,计算可知串联电阻阻值不能超过 150 Ω。综上所述,数字供电端限流电阻的取值范围为 111~150 Ω,结合元器件库存情况,最终数字供电端选取 120 Ω 限流保护电阻,产生的压降为 0.12 V,此时芯片数字端供电电压为 4.88 V,满足芯片正常工作需求,也满足 IO 接口 TTL 电平的应用需求。

单路模拟供电端正常工作电流约 18 mA,最大不超过 40 mA,模拟供电端正常电压范围为 4.75~5.25 V,考虑 5 V 供电电压,则最大串联电阻阻值不能超过 14 Ω,结合元器件库存情况,最终两路模拟供电端分别串联 10 Ω 限流保护电阻,产生的压降为 0.18 V,此时芯片模拟端供电电压为 4.82 V,确保模拟前端芯片正常工作。

(2) 参数配置回读校验。光机头部上电工作后,信息处理箱通过 422 总线将模拟前端参数发送给 FPGA 芯片,使用 SPI 接口对模拟前端进行参数配置,然后每次成像前对模拟前端工作参数通过内存下卸进行校验判断。

(3) 输入端没有悬空。系统设计时将模拟前端未使用的引脚经电阻接电源或接地,减少输入端不定态,防止因输入异常诱发锁定。

(4) 设置在轨断电重启指令。在轨运行期间对 DPC 载荷设置定期开关机遥控指令的方案应对,采用每轨成像前对光机头部定时关机后重新上电方式解除单粒子状态,保证单机工作正常。

DPC 运行于 505 km 的轨道高度,在轨飞行时一轨运行周期为 95 min,以开始成像入光点指令为一个工作循环周期内部时刻的零时刻,信息处理箱收到入光点指令后,在每轨第 4 min 对光机头部进行断电,断电维持 5 s 后对光机头部重新上电,光机头部在第 5~55 min 进行图像数据采集,其他时间处于待机状

态。当模拟前端在一轨的任意时刻发生锁定,最坏情况是光机头部刚上电就发生锁定,则最长锁定时间为—轨运行时间 95 min。

4 单粒子锁定防护验证

4.1 脉冲激光试验

为了验证上述防护措施的有效性,开展了皮秒脉冲激光单粒子锁定防护验证试验,如图 4 所示。采用

激光模拟高能带电粒子, AFE 芯片尺寸 $2800\ \mu\text{m}\times 3850\ \mu\text{m}$, 激光光斑尺寸 $2\ \mu\text{m}$ 左右, 配合移动精度为 $1\ \mu\text{m}$ 的三维精密移动平台, 沿着“弓字形”扫描整个芯片区域。AFE 芯片的数字电源和模拟电源分别用线性电源供电。为了模拟 DPC 在轨实际运行状态, 当激光照射使芯片锁定后维持 95 min, 再对其进行断电重启。

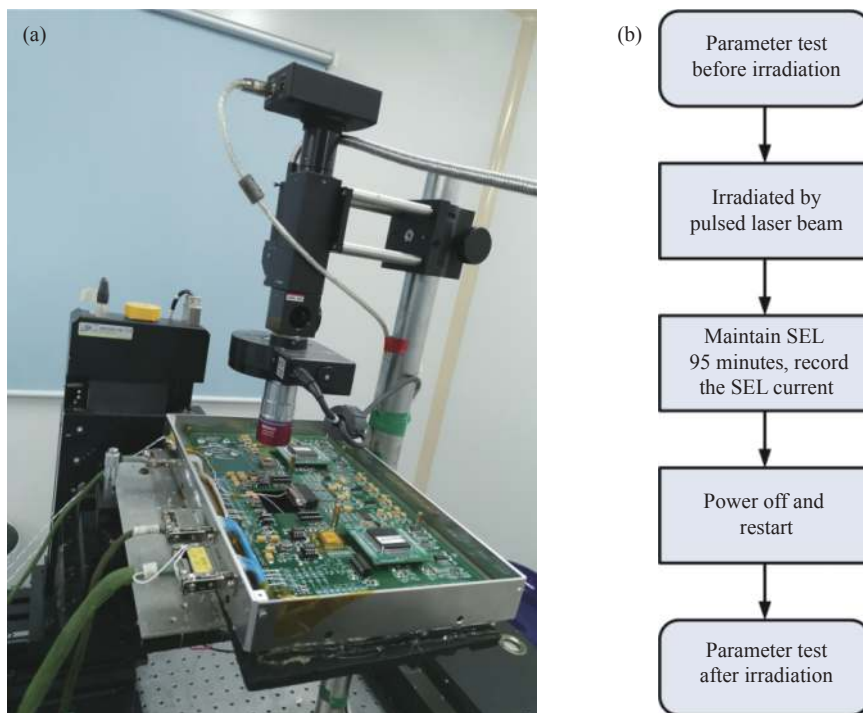


图 4 脉冲激光单粒子试验。(a) 试验现场; (b) 测试流程

Fig.4 Pulsed laser single event test. (a) Experimental site; (b) The processing flow

激光单粒子试验情况及结果如表 3 所示。由表 3 可知, 当 AFE 芯片发生锁定且锁定状态维持 95 min 后, 芯片没有出现烧毁现象, 对电路盒进行断电重启,

芯片能正常工作, 模拟前端寄存器通讯正常, 图像转换正常。数字端在限流保护电阻的情况下, 芯片发生锁定时有效降低锁定异常电流 (锁定电流维持在 11 mA),

表 3 激光单粒子试验数据

Tab.3 Test data of pulsed laser irradiation

LET by Laser simulation/ $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$	Number of tests	Digital power current/mA	Analog power current/mA	Internal register communication	Image output/DN	Conclusion
0	Before test	1	37	Normal	823	Normal
75	First	11	496	Abnormal	16383	SEL occurred
Maintain SEL 95 min	Laser stop	1	496	Abnormal	16383	SEL occurred
Power off and restart	After test	1	37	Normal	826	Back to normal
37	Second	11	510	Abnormal	16383	SEL occurred
Power off and restart	After test	1	37	Normal	826	Back to normal

避免器件的功能损伤。模拟端在限流保护电阻的情况下将锁定电流维持在 510 mA。

4.2 锁定后的影响分析

(1) 功耗影响分析

光机头部电路盒中模拟前端的供电如图 5 所示, 数字端电源由 DC5V 模块经防门锁限流电阻直接供电, DC5V 模块同时给数字信号处理器供电, 模拟端电源由 DC12V 模块经 LDO 转换后供出。AFE 芯片发生单粒子锁定后, 根据各供电电压及对应供电电流的变化, 可计算模拟前端芯片内部各部分功耗, 同时 DCDC 电源模块、LDO 线性稳压器和 FPGA 芯片的工作电流也会上升。计算结果如表 4 所示。

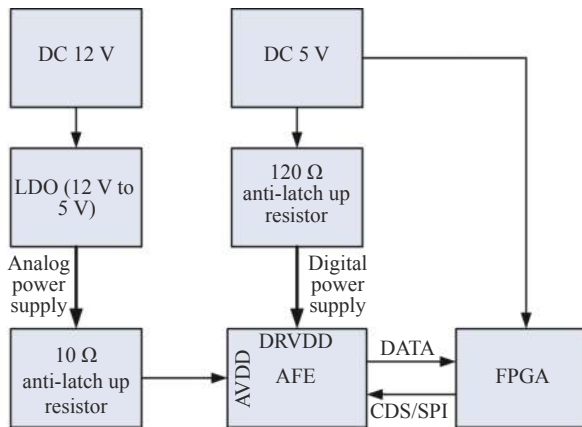


图 5 模拟前端供电框图

Fig.5 Structure diagram of power supply for AFE

表 4 模拟前端发生锁定后光机头部增加的总功耗

Tab.4 Increased power consumption of optical detector after SEL of the AFE

Item	Value
Increased power consumption of AFE after SEL/W	1.136
Increased power consumption of LDO after SEL/W	3.234
Increased power consumption of FPGA after SEL/W	0.5
Increased power consumption of DC12V after SEL/W	0.158
Increased power consumption of DC5V after SEL/W	0.301
Increased power consumption of circuit box after SEL/W	5.329
Increased current of primary power supply after SEL/A	0.175
Total current of primary power supply after SEL/A	0.529

由表 4 可知, AFE 发生锁定后, 其模拟供电端的 10 Ω 限流电阻的功耗分别为 0.698 W 和 0.511 W, 数字供电端 120 Ω 限流电阻的功耗为 0.015 W, AFE 芯片自身增加的功耗为 1.136 W。防门锁限流电阻均为

1206 封装, 其额定功耗为 0.25 W, 发生锁定后该电阻功耗高达 0.698 W, 已经为额定功率的 2.79 倍, 有发热烧毁的风险。

AFE 的模拟供电由 LDO 线性稳压器提供, 当 AFE 发生锁定后增加的电流全部由线性稳压器提供, 其增加的功耗为 3.234 W。

DCDC 模块额定功率为 15 W, 按一级降额因子 0.75 要求, 允许工作的最大功率为 11.25 W。发生锁定后 DC12V 模块输出功耗为 6.125 W, DC5V 模块输出功耗为 1.689 W, 均小于最大功率要求, 说明 AFE 发生锁定后对 DCDC 模块没有影响。

AFE 发生锁定后其数字输出端口被拉到高电平, 导致与数字端口连接的 FPGA 芯片工作电流上升 0.1 A, 发生锁定后 FPGA 功耗增加了 0.5 W。

由以上计算可知, AFE 发生锁定后光机头部电路盒增加的总功耗为 5.329 W, 光机头部一次母线供电电流增加 0.175 A, 一次母线总电流为 0.529 A。光机头部电路盒一次母线电源端选用的保险丝额定工作电流为 2.1 A, 按照一级降额因子 0.65 的要求, 允许工作的最大电流为 1.365 A。因此, 当 AFE 发生锁定后光机头部一次母线电源端保险丝处于正常工作范围, 没有烧断风险。AFE 芯片属于 DPC 载荷光机头部内部功能芯片, 对单机外部接口无任何影响, 当存在锁定风险时, 对其他单机无任何影响。

(2) 芯片工作温度影响分析

使用电子学热仿真分析软件对发生锁定状态的光机头部电路盒进行热分析, 边界条件为真空条件电路盒外壳温度 35 °C, 当模拟前端发生单粒子锁定后, 光机头部电路盒中的大功率发热器件有 LDO 线性稳压器、AFE 芯片和 FPGA 芯片。其中 LDO 线性稳压器贴壳散热, 通过结构件散热。FPGA 和 AFE 芯片贴焊在印制电路板上, 通过引脚散热。LDO 线性稳压器结壳热阻 $\theta_{jc} = 2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, 最大结温 150 °C, 考虑一级降额, 结温不能超过 85 °C, 发生锁定后功耗 3.57 W。AFE 结壳热阻 $\theta_{jc} = 22 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, 最大结温 150 °C, 考虑一级降额, 结温不能超过 85 °C, 发生锁定后功耗 1.38 W。FPGA 结壳热阻 $\theta_{jc} = 6.3 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, 最大结温 150 °C, 考虑一级降额, 结温不能超过 85 °C, 发生锁定后功耗为 0.8 W。热仿真结果如图 6 所示, 发生锁定后芯片工作温度计算结果如表 5 所示。

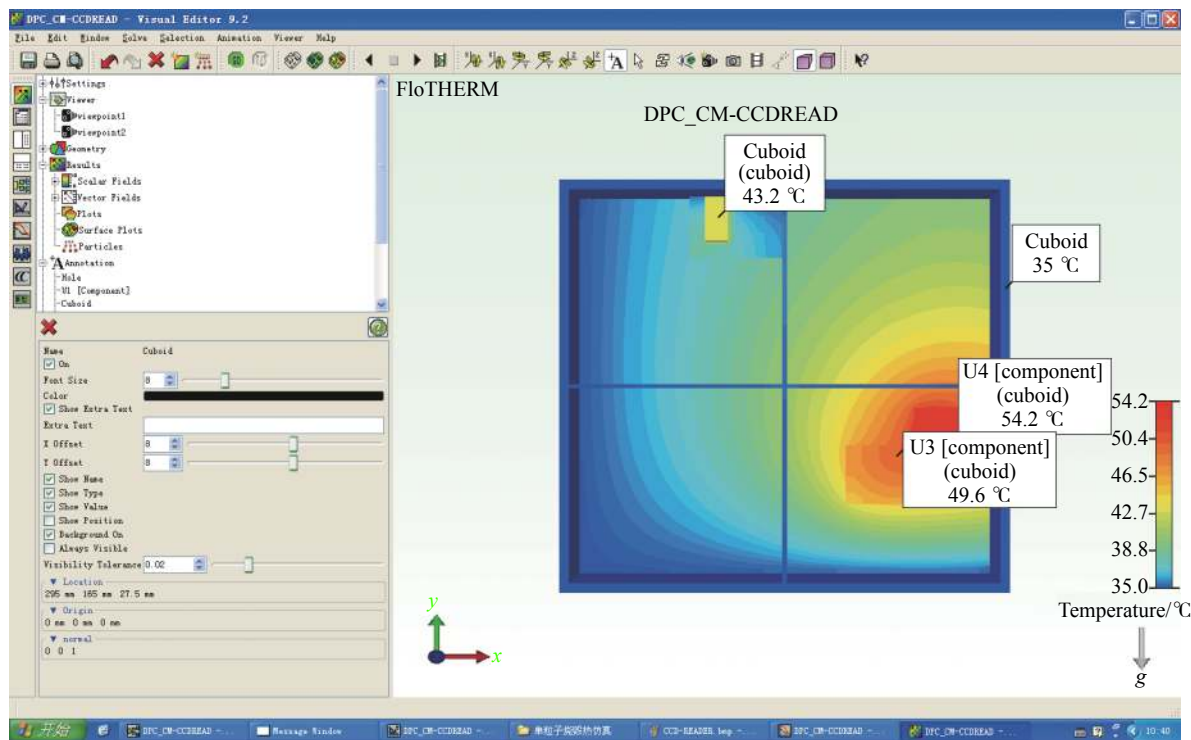


图 6 发生锁定后热仿真示意图

Fig.6 Schematic diagram of heat simulation after SEL

表 5 发生锁定后芯片工作温度计算结果

Tab.5 Calculation results of working temperature after SEL

Device	Heat consumption after SEL/W	Junction-to-case thermal resistance, $\theta_{JC}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$	Simulation case temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Max junction temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Level derating requirement/ $^{\circ}\text{C}$	Accordance
AFE	1.38	22	54.2	84.6	≤ 85	Yes
LDO	3.57	2	43.2	50.4	≤ 85	Yes
FPGA	0.8	6.3	49.6	54.6	≤ 85	Yes

由表 5 可知, 当 AFE 芯片发生锁定后, AFE 芯片壳温达到 54.2 $^{\circ}\text{C}$, 由计算可知对应结温为 84.6 $^{\circ}\text{C}$, 线性稳压器壳温达到 43.2 $^{\circ}\text{C}$, 对应结温为 50.4 $^{\circ}\text{C}$; FPGA 芯片壳温达到 49.6 $^{\circ}\text{C}$, 对应结温为 54.6 $^{\circ}\text{C}$, 所有芯片均满足一级降额要求, 发生锁定后 AFE 芯片没有烧毁风险。

综上所述, 激光单粒子锁定防护试验表明, 发生单粒子锁定时 AFE 芯片及其周围电路不会发生损坏且无烧毁风险, 但模拟供电端限流电阻的功率将达到 0.7 W, 高于 1206 封装电阻的额定功耗。为防止出现在轨锁定时限流电阻过流烧毁、起不到保护作用的情况, 工程设计时将模拟供电端限流电阻更换成相同阻值的 1 W 额定功率片式膜固定电阻器, 确保防门锁限流电阻如果发生锁定后不被烧毁, 以保障模拟前端芯

片工作正常。

5 结 论

多角度偏振成像仪在轨期间遭遇的空间高能粒子将诱发电子器件产生单粒子效应。重离子辐照试验结果表明, 多角度偏振成像仪选用的模拟前端信号处理器对重离子诱发的单粒子效应比较敏感, 单粒子锁定 LET 阈值处于 4.4~13.4 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 之间。脉冲激光单粒子防护试验结果表明, 当模拟前端发生锁定并且锁定状态维持 95 min 后, 芯片没有出现烧毁, 模拟端锁定电流为 510 mA, 数字端锁定电流为 11 mA。对模拟前端进行断电重启, 寄存器通讯和图像转换恢复正常, 芯片恢复正常工作。针对模拟前端芯片 LET 阈值偏低的状态, 采取模拟供电端和数字供

电端串联大功率防门锁限流电阻和在轨定时开关机的防护措施,可有效避免器件单粒子锁定造成的器件过流烧毁及仪器失效等故障。目前该防护措施已经应用于 CM、GF(02)、DQ 等多个卫星型号的偏振相机载荷中,这些型号的 DPC 载荷处于正样研制阶段,等待卫星发射后可通过在轨观测数据以验证单粒子防护措施的有效性。研究结果可为星载偏振遥感相机用模拟前端信号处理器单粒子效应危害评估和 AFE 电路加固设计提供重要参考。

参考文献:

- [1] Liang Shaolin, Wang Yongmei, Mao Jinghua, et al. Test for pixel non-uniformity of scientific optical CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0417004. (in Chinese)
- [2] Liu Yi, Shi Haodong, Jiang Huilin, et al. Infrared polarization properties of targets with rough surface [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 459-471. (in Chinese)
- [3] Ling Mingchun, Song Maoxin, Hong Jin, et al. Optical design for simultaneous polarization imager based on off-axis three-mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0518001. (in Chinese)
- [4] Zhang Weiguo. Application of polarization detection technology under the background of sun flare on sea surface [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 231-236. (in Chinese)
- [5] Yao P P, Tu B H, Xu S L, et al. Non-uniformity calibration method of space-borne area CCD for directional polarimetric camera [J]. *Optics Express*, 2021(29): 3309-3326.
- [6] Wang Zhongming. Techniques for evaluating single-event effect in SRAM-based FPGAs [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [7] Zhang Xuhui, Wang Yuanyuan, Dong Jianting, et al. Study on single event effect test of CCD video device [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(6): 72-79. (in Chinese)
- [8] Darracq F, Lapuyade H, Buard N, et al. Backside SEU laser testing for commercial off-the-shelf SRAMs [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 49(6): 2977-2985.
- [9] Takahiro Tomioka, Yuta Okumura, Hirokazu Masui, et al. Screening of nanosatellite microprocessors using californium single-event latch-up test results [J]. *Acta Astronautica*, 2016(126): 334-341.
- [10] Schwank J R, Shaneyfelt M R, McMorro D, et al. Estimation of heavy-ion LET thresholds in advanced SOI IC technologies from two-photon absorption laser measurements [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 57(4): 1827-1834.
- [11] Cao Zhou, Xue Yuxiong, Gao Xin, et al. Testing and research on single event effects of NAND flash memory [J]. *Space Electronic Technology*, 2019, 3: 81-86. (in Chinese)
- [12] Wang Bo, Wang Liheng, Liu Weixin, et al. Single-event upset and damage mechanism in 8T-global shutter CMOS image sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0504001. (in Chinese)
- [13] Han Jianwei, Shangguan Shipeng, Ma Yinqi, 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. (in Chinese)
- [14] Zhuang Haoyu. High-speed high-resolution CCD analog front end [D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [15] Zhang Xuhu, Li Qiang, Wang Dianzhong, et al. Design and test verification of SEL control circuit for photoelectric signal processing system [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(5): 503-520. (in Chinese)
- [16] Fang Lingli, Wang Yu, Qiu Xiaohan, et al. Application of integrated correlated double sampling A/D chip in satellite-borne devices [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(1): 15-22. (in Chinese)
- [17] Yao Pingping, Sun Liang, Xu Sunlong, et al. Design of a scientific-grade CCD refrigeration system and analysis of its temperature characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1112002. (in Chinese)
- [18] Hong Jin, Wang Zhengyun, Hu Yadong, et al. Research of life test and design of system for satellite-borne infrared detector assembly [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1148-1155. (in Chinese)
- [19] Yao Pingping, Xun Sunlong, Tu Bihai, et al. Design of a performance test system and analysis of the temperature dependence for a space-borne area CCD [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0910001. (in Chinese)
- [20] Xue Xuecheng, Li Yunfei, Guo Yongfei. Design of analog front end of CCD imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(8): 1191-1195. (in Chinese)
- [21] Yan Zhigang, Jiang Dezhong, Duan Ran. Analog front end design for high resolution CCD [J]. *Aerospace Control*, 2010, 28(2): 89-92. (in Chinese)
- [22] Li Xiaoliang, Mei Bo, Li Pengwei, et al. Experimental study of single event latch-up of SRAM device under high temperatures [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 589-593. (in Chinese)