

CMOS 图像传感器辐射损伤导致星敏感器性能退化机理

冯 婕, 李豫东, 文 林, 郭 旗

(中国科学院新疆理化技术研究所 固体辐射物理研究室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 为了分析恶劣空间辐射环境导致星敏感器性能退化、姿态测量精度降低的原因, 深入研究了辐射环境下互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 图像传感器辐射损伤对星敏感器性能退化的影响。该方法通过建立空间辐射和 CMOS 图像传感器辐射损伤敏感参数、星敏感器性能参数之间的相关性, 揭示了 CMOS 图像传感器器件参数退化到星敏感器系统参数退化的传递机制。 ^{60}Co - γ 辐照试验表明: 辐照后, 系统信噪比的降低导致星敏感器星等探测灵敏度的降低, 信噪比是联系 CMOS 图像传感器和星敏感器系统之间的桥梁。质子辐照试验表明: 当辐照注量大于 $3.68 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$ 时, 已无法正确提取星点质心。该研究结果为星敏感器在轨姿态测量误差预测和修正技术的研究奠定了一定的基础, 更可以为高精度星敏感器的设计提供一定的理论依据。

关键词: 星敏感器; CMOS 图像传感器; 辐射损伤; 性能退化

中图分类号: O536 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190555

Degradation mechanism of star sensor performance caused by radiation damage of CMOS image sensor

Feng Jie, Li Yudong, Wen Lin, Guo Qi

(Laboratory of Solid State Radiation Physics, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry of Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: In order to analyze the reasons for star sensor performance degradation and the decrease of attitude measurement accuracy, performance degradation mechanisms of star sensor caused by Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) image sensor radiation damage were mainly studied. By establishing the correlation among the spatial radiation, radiation sensitive parameters of CMOS image sensor and the performance parameters of star sensor, the transmission mechanism from CMOS image sensor device parameters degradation to star sensor system parameters degradation was revealed. The ^{60}Co - γ irradiation test showed that the decrease of signal-to-noise ratio led to the decrease of star sensor detection sensitivity after irradiation, and the signal-to-noise ratio was the bridge between the CMOS image sensor and the star sensor system. The proton irradiation test showed that when the irradiation fluence was more than $3.68 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$, the star point centroid could not be extracted correctly. The results lay a certain foundation for the research of star sensor attitude measurement error and correction technology, and also provide some theoretical basis for the design of high-precision star sensor.

收稿日期: 2020-02-02; 修订日期: 2020-03-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (11805269); 中国科学院西部之光西部青年学者 B 类项目 (2016-QNXZ-B-2); 自治区天池百人计划项目 (新人社函 [2017]699 号)

作者简介: 冯婕 (1985-), 女, 助理研究员, 主要从事光电成像器件辐射效应与损伤机理研究、光学系统辐射效应研究。

Email: fengjie@ms.xjb.ac.cn

Key words: star sensor; CMOS image sensor; radiation damage; performance degradation

0 引言

星敏传感器是一种以恒星为参照系,以星空为工作对象的高精度的空间姿态测量装置,其因精度高、可靠性强及自主性好等优势在各类航天飞行器中得到广泛应用^[1-2]。星敏传感器一般由光学系统、成像系统、数据处理系统和数据交换系统组成。其中成像系统是星敏传感器的重要组成部分,它的性能决定了星敏传感器探测能力。星敏传感器的成像系统主要由电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 或 CMOS 图像传感器组成以拍摄星空图像为主要目标的相机实现。与 CCD 相比,CMOS 图像传感器具有集成度高、功耗低、电学功能全面、可实现窗口选择及随机读出等优势,更加符合空间设备小型化、轻量化、低功耗等要求^[3-7],近年来 CMOS 图像传感器作为星敏传感器星光探测器的设计已成为国内外研究的热点^[8]。目前大多数星敏传感器产品已采用基于 CMOS 图像传感器的成像系统。

与其它硅基半导体器件类似,应用于空间的 CMOS 图像传感器必然面临天然空间辐射环境的威胁,空间辐射环境中的高能带电粒子作用于器件可产生累积辐射效应(电离总剂量效应、位移损伤效应)和单粒子效应^[9-10],导致器件的暗电流、暗信号非均匀性噪声、光响应非均匀性噪声等性能参数退化,甚至功能失效。国内外研究发现,CMOS 图像传感器的空间辐射损伤又会导致基于图像传感器的星敏传感器在太空工作经辐照后出现星图数据信噪比变小、星点质心定位精度降低、星等探测灵敏度降低等性能退化现象,影响到星敏传感器的工作精度和有效寿命^[11-12],但未深入研究造成退化现象的机理,也未定量评估辐射对星敏传感器性能参数的影响。

在实际应用中,由于 CMOS 图像传感器的空间辐射损伤导致星敏传感器性能退化甚至出现故障的实例很多。例如:国内风云三号气象卫星和创新五号遥感卫星在经过南大西洋异常区 (South Atlantic Anomaly, SAA) 时,辐射导致星敏传感器的成像器件性能衰退,从而使星敏传感器在轨导航时出现无效数据,无法给出姿态信息,因此卫星被迫依靠陀螺仪的数据进行暂时姿态定位。2016 年 Nature 杂志上曾报道日本 Hitomi 天文卫星在经过 SAA 区时,星敏传感器由于成像系统的辐射损伤出现故障,卫星紧急启用陀螺仪取代星敏

传感器来计算空间方位,但陀螺仪报告的空间方位又出现了错误,因此导致卫星最终任务失败。虽然 SAA 区高能粒子本身不应该是致命的,但其导致的星敏传感器问题造成了 Hitomi 卫星一系列连锁故障^[13]。

为了保障星敏传感器的工作精度与可靠性,文中深入分析了 CMOS 图像传感器辐照后暗电流噪声、暗信号非均匀性噪声的变化对星敏传感器星等探测灵敏度的退化机理,定量评估了辐射对星敏传感器性能参数的影响,为星敏传感器在轨姿态测量误差预测和修正技术的研究奠定了一定基础。

1 ⁶⁰Co- γ 射线辐照试验

1.1 CMOS 图像传感器辐射损伤机理分析

试验样品选用国产 4T-CMOS 科学级图像传感器,其分辨率为 2 048×2 048,像素结构为 4T-APS,像素尺寸为 11×11 μm 。样品像素横截面示意图如图 1 所示,整个像素单元主要包括实现光电转换功能的掩埋型光电二极管 (pinned photodiode, PPD)、实现电荷转移的传输栅 (transfer gate, TG)、用于电荷储存的浮置扩散区 (floating diffusion, FD) 以及对起到信号放大作用的源级跟随器 (source follower, SF)。

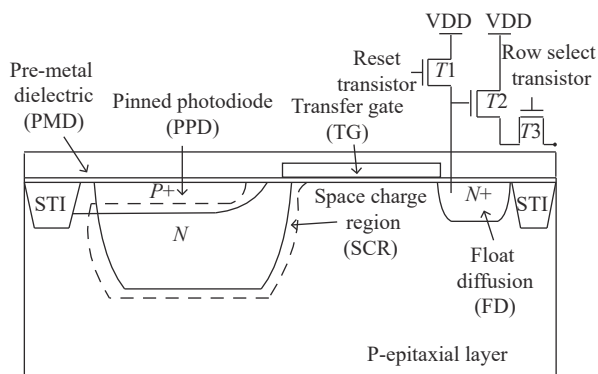


图 1 4T 像素横截面示意图

Fig.1 Schematic diagram of 4T pixel cross section

γ 辐照试验是在中国科学院新疆理化技术研究所的⁶⁰Co- γ 射线辐照源上进行,剂量率为 50 rad(Si)/s,测试点选取 0.5 krad(Si)、5 krad(Si)、20 krad(Si)、60 krad(Si)。为了使驱动偏置电路不受辐照影响,以铅块进行了屏蔽,只有 CMOS 图像传感器器件接受辐照。在辐照剂量达到某个剂量时,降源作移位测试,

且测试和辐照均在室温 (23 °C) 下进行。试验结果如图 2 和图 3 所示, 随着累积总剂量的增加, 暗电流逐渐增大, 暗信号非均匀性噪声也逐渐增大。

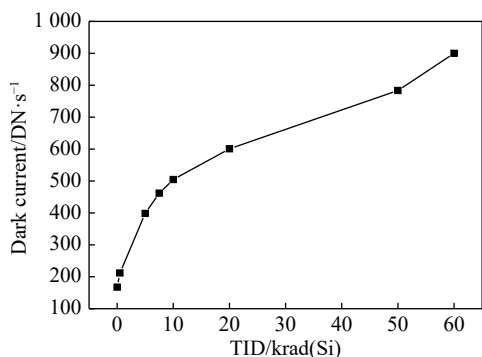


图 2 暗电流随电离总剂量的变化

Fig.2 Change of dark current versus the total ionizing dose

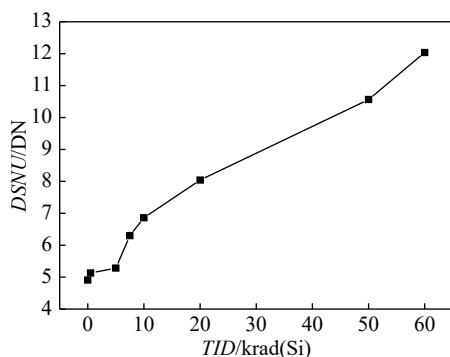


图 3 DSNU 随电离总剂量的变化

Fig.3 Change of DSNU versus the total ionizing dose

器件暗电流增大的机制: 当 CMOS APS 受到伽马射线辐照时, 其引起的位移损伤可以忽略不计, 因此体暗电流保持不变。暗电流随着累积剂量增加而上升, 在正常工作模式下, 像素内暗电流是 CMOS 图像传感器暗电流信号的主要来源, 且产生机制较为复杂。电离辐射导致 Si-SiO₂ 界面处产生大量界面陷阱电荷, 主要分布在 STI 外围、传输栅氧层以及 PPD 上表面, 如图 4 所示。这会导致光电二极管耗尽区附近的产生电流上升。捕获的氧化物陷阱电荷会改变电场分布, 从而改变 Si/SiO₂ 界面电势。除了界面陷阱电荷, 电离辐射引入的正氧化物陷阱电荷, 主要分布在 STI 以及 PPD 上表面的 PMD 上, 正氧化物陷阱电荷无法作为复合中心能级直接产生暗电流, 但是其附加电场与 TG 施加正电压效果类似, 同样能够使得 Si-SiO₂ 界面处反型从而形成场感应结, 表面耗尽区的

形成增强界面处界面陷阱电荷的表面电流产生率, 当氧化物陷阱电荷诱发的表面耗尽区与 PPD 耗尽区接触, 界面陷阱电荷产生的电子-空穴对将通过漂移运动进入 PPD 耗尽区而非扩散运动, 载流子收集效率明显提高。因此, 氧化物陷阱电荷同样是导致暗电流增长的重要因素。

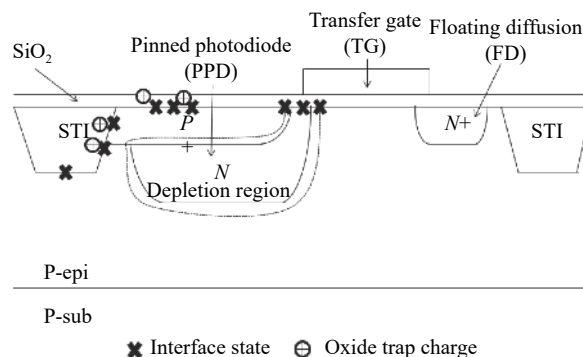


图 4 电离损伤缺陷分布

Fig.4 Ionizing damage defect distribution

器件暗电流非均匀性噪声 (DSNU) 增大的机制: DSNU 是长曝光时间、暗场条件下固定模式噪声 (FPN) 的一种表述。电离辐射在 PPD 周围 Si-SiO₂ 界面处引入界面陷阱电荷, 界面陷阱电荷在每个像素单元中的分布区域以及载流子产生率并不相同, 在整个 CMOS 图像传感器上表现出 DSNU 的增长, 可以认为 DSNU 与暗电流的产生机制具有一定关联。电离损伤引起像素之间暗电流产生率差异性增大, 导致暗信号非均匀性噪声的增加。

1.2 CMOS 图像传感器辐射损伤对星敏感器性能的影响

星敏感器一般由光学系统、成像系统、数据处理系统和数据交换系统组成。其中成像系统 (CMOS 图像传感器) 是星敏感器的重要组成部分, 它的性能决定了星敏感器探测能力。

星敏感器在设计和研制中涉及多种因素, 但星等探测灵敏度这个性能参数决定星敏感器能否探测恒星发出的光, 是星敏感器有效工作的前提。通常利用信噪比来评价恒星目标的探测能力, 计算公式如下:

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{(\sqrt{S})^2 + (\sqrt{B})^2 + N_D^2}} \quad (1)$$

式中: \sqrt{S} 为目标散粒噪声; \sqrt{B} 为背景散粒噪声; N_D 为 CMOS 图像传感器的噪声。

$$N_D^2 = N_{DC}^2 + N_{FPN}^2 + N_{read}^2 + N_{pmu}^2 + N_{DSNU}^2 \quad (2)$$

式中： N_{DC} 是暗电流噪声； N_{FPN} 是固定模式噪声； N_{read} 是读出噪声； N_{pmu} 是光响应非均匀性噪声； N_{DSNU} 是暗信号非均匀性噪声。

信噪比是光电系统噪声受限情况下检测目标能力的常用判据，通常情况下，若要求探测率大于等于 99%，虚警率小于等于 1%，则信噪比应大于 5^[14]。

文中用经 γ 辐照后累积到不同剂量点的 CMOS 图像传感器在中国科学院光电技术研究所做了星敏感器静态单星模拟器成像试验，试验装置如图 5 所示。

试验中在每个剂量点分别采集了暗场图像和光场图像各 50 帧，然后从采集到的图像中解算出在不同累积剂量、不同星等下 CMOS 图像传感器的总噪声 N_D ，如表 1 所示。背景散粒噪声 \sqrt{B} 测试结果为 1.28e⁻，不同星等单个星点信号目标散粒噪声 \sqrt{S} 测试结果如表 2 所示。将上述计算结果代入公式 (1) 就得



图 5 试验装置图

Fig.5 Schematic of test device

到了 G0 恒星在不同剂量点的信噪比，G0 恒星的中心波长为 0.55 μm ，工作波段在可见光波段。根据噪声信号检测理论和最佳信噪比阈值检测原理，建立了检测灵敏度模型，得到了不同剂量点的星敏感器星等探测灵敏度。

表 1 在不同累积剂量、不同星等下 CMOS 图像传感器的总噪声

Tab.1 Total noise of CMOS image sensor at different dose points and different detection magnitudes

Detection magnitude	0 krad(Si) N_D	0.5 krad(Si) N_D	5 krad(Si) N_D	20 krad(Si) $N_{Dd}(\text{Si})N_D$	60 krad(Si) N_D
5	741.03	760.88	786.40	1007.52	1 328.28
5.8	726.41	746.26	771.77	992.90	1 313.65
5.9	725.67	745.52	771.03	992.16	1 312.92
6	725.06	744.91	770.42	991.55	1 312.31
6.1	724.55	744.41	769.92	991.04	1 311.80
6.2	724.13	743.98	769.49	990.62	1 311.38
6.3	723.78	743.63	769.14	990.27	1 311.02
6.4	723.48	743.34	768.85	989.97	1 310.73
6.5	723.24	743.09	768.60	989.73	1 310.49

表 2 不同星等单个星点信号目标散粒噪声

Tab.2 Target shot noise of single star at different detection magnitudes

Detection magnitude	Target shot noise \sqrt{S}/e^-
5	20.84
5.8	14.42
5.9	13.77
6	13.15
6.1	12.56
6.2	11.99
6.3	11.45
6.4	10.94
6.5	10.45

表 3 给出了 G0 恒星在不同累积剂量、不同星等的 SNR 值。如表 3 所示，对于任一星等，随着辐照剂量的增加，信噪比逐渐减小。一般认为，当某一星等的信噪比小于 5 时，星敏感器无法检测到该星等的恒星。从表中可以看出，当辐照剂量较小时 (0~5 krad(Si))，星敏感器的星等探测灵敏度极限可达 6.1 等。当辐照剂量达到 20 krad(Si) 时，星敏感器的星等探测灵敏度极限降低到 6 等。当辐照剂量达到 60 krad(Si) 时，星敏感器的星等探测灵敏度极限进一步降低到 5.8 等。可见，辐射对星敏感器的星等探测灵敏度有很大的影响。根据上述分析，在不同星等探测灵敏度极限下，信噪比随电离总剂量的变化如图 6 所示。从图中可

表 3 G0 恒星在不同累积剂量、不同星等的 SNR 值

Tab.3 SNR of G0 star at different dose points and different detection magnitudes

Detection magnitude	0 krad(Si) SNR	0.5 krad(Si)SNR	5 krad(Si) SNR	20 krad(Si) SNR	60 krad(Si) SNR
5	12.66	12.56	12.43	11.44	10.34
5.8	6.80	6.73	6.64	6.00	5.33
5.9	6.26	6.20	6.11	5.51	4.89
6	5.77	5.70	5.63	5.06	4.49
6.1	5.31	5.25	5.17	4.65	4.11
6.2	4.88	4.82	4.76	4.27	3.77
6.3	4.48	4.43	4.37	3.92	3.45
6.4	4.12	4.07	4.01	3.59	3.16
6.5	3.78	3.73	3.68	3.29	2.89

可以看出,任一星等的信噪比都随 TID 的增加而减小;对于 5.8 等星,在 0~60 krad(Si) 范围内的五个剂量点均可识别。对于 6 等星,在 0~60 krad(Si) 范围内只有累积剂量达到 60 krad(Si) 时无法识别恒星 G0。对于 6.1 等星,在累积剂量分别达到 20 krad(Si) 和 60 krad(Si) 时无法识别恒星 G0。

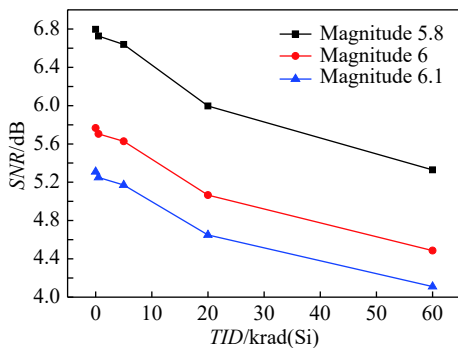


图 6 在不同极限探测星等下 SNR 随不同电离总剂量的变化

Fig.6 Change of SNR versus the total ionizing dose at different detection magnitudes

1.3 试验结果分析

星敏器星等探测灵敏度主要受光学系统、探测器噪声、信噪比阈值和积分时间的影响^[15]。在静态单星模拟器试验中,每次只更换辐照到不同电离总剂量的 CMOS 图像传感器,光学系统、信噪比阈值和积分时间这几个因素都保持不变,因此,影响星敏器星等探测灵敏度的主要影响因素就是探测器噪声(CMOS 图像传感器噪声),从公式(2)可以看出,探测器噪声包括暗电流噪声、固定模式噪声、读出噪声、光响应非均匀性噪声和暗信号非均匀性噪声。试验全程是在暗场条件下进行,因此光响应非均匀性噪声

可以忽略不计。读出噪声属于暂态噪声,是由于电路通道中各种噪声源(列放大器、可编程增益放大器和模数转换器)引起的信号电平的随机波动,试验中电路通道保持不变,因此读出噪声的影响也可以忽略不计。固定模式噪声是像素与像素之间输出差异导致,在固定积分时间下,固定模式噪声基本是一个常数,其主要来源于两个方面:一方面是制造过程中像素内晶体管或者列级晶体管失配,对于 4T CMOS 图像传感器来说,传输栅晶体管和源级跟随器晶体管影响较大;另一方面是像素内暗电流。由于晶体管失配导致的固定模式噪声可以通过相关双采样(CDS)消除,而暗电流的来源多种多样,产生机制各不相同,由暗电流导致固定图像噪声则无法完全消除。在无光照条件下,固定模式噪声可以用暗信号非均匀性噪声(DSNU)来表征;在光照条件下,通过光响应非均匀性噪声(PRNU)来评估。通过分析可知:星敏器星等探测灵敏度主要受 CMOS 图像传感器暗电流噪声和暗信号非均匀性噪声的影响,随着辐照累积总剂量的增加,CMOS 图像传感器暗电流噪声和暗信号非均匀性噪声的增大,星敏器信噪比 SNR 减小,从而导致星等探测灵敏度逐渐降低。

根据图 2 计算出的 CMOS 图像传感器的暗电流噪声,通过计算信噪比,得到星敏器极限探测星等随暗电流噪声的变化,如图 7 所示,随着暗电流噪声的增大,星敏器的极限探测星等逐渐减小。根据图 3 计算出的 CMOS 图像传感器的暗信号非均匀性噪声,通过计算信噪比,得到星敏器极限探测星等随暗电流信号非均匀性噪声的变化,如图 8 所示,随着暗信

号非均匀性噪声的增大,星敏感器的极限探测星等逐渐减小。结合图 7 和图 8,发现暗电流噪声对星敏感器的极限探测星等影响程度更大。

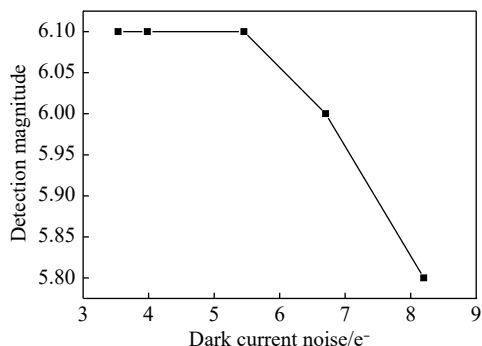


图 7 不同极限探测星等 CMOS 图像传感器暗电流噪声的变化

Fig.7 Change of dark current noise of CMOS image sensor versus the detection magnitude

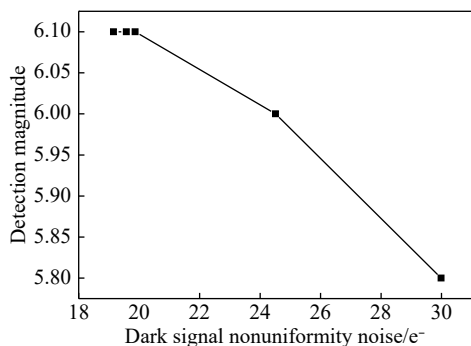


图 8 不同极限探测星等 CMOS 图像传感器暗信号非均匀性噪声的变化

Fig.8 Change of dark signal nonuniformity noise of CMOS image sensor versus the detection magnitude

2 质子辐照试验

试验样品选用国产 4T-CMOS 科学级图像传感器,其分辨率为 2 048×2 048,像素结构为 4T-APS,像素尺寸为 11×11 μm,质子辐照在北京大学重离子物理研究所 2×6 MeV EN 串列静电加速器上进行,质子束流能量为 3.0 MeV,辐照注量为 0~7.36×10¹⁰ p/cm²(等效累积吸收剂量为 100 krad(Si))。质子辐照后的样品拿到中国科学院光电技术研究所做了星敏感器静态多星模拟器成像试验。

图 9 为不同质子辐照注量的 CMOS 拍摄的静态多星模拟器成像图像。该静态多星模拟器包含 8 颗不同星等恒星的星图,图 9 为截取的其中两颗星的成

像图像。从图中可以看出,随着辐照注量增加,星点逐渐模糊,背景暗噪声逐渐增加。

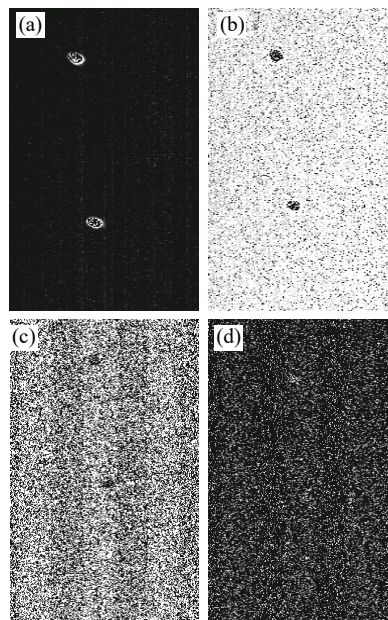


图 9 3 MeV 质子辐照不同注量下,CMOS 图像传感器对静态星模成像图像。(a) 注量为 0,即未接受质子辐照的初值;(b) 注量为 1.47×10¹⁰ p/cm²; (c) 注量为 3.68×10¹⁰ p/cm²; (d) 注量为 7.36×10¹⁰ p/cm²

Fig.9 Static star simulator imaging pictures taken by CMOS with different proton radiation fluence (proton energy: 3 MeV). (a) Proton radiation fluence is 0; (b) proton radiation fluence is 1.47×10¹⁰ p/cm²; (c) proton radiation fluence is 3.68×10¹⁰ p/cm²; (d) proton radiation fluence is 7.36×10¹⁰ p/cm²

在质子辐照注量较大时,CMOS 图像传感器噪声水平急剧增加,辐照注量大于 3.68×10¹⁰ p/cm²时,大部分噪点的暗电流噪声水平已经很高,超过了很多有光响应的像元的有效信号,星点质心提取难度增加,因此严重影响了星点的有效信号识别和星等探测灵敏度。质子辐照导致 CMOS 图像传感器噪声退化是电离效应与位移效应共同作用的结果。对比⁶⁰Co-γ射线辐照试验,发现对星敏感器性能退化影响较为严重的是 CMOS 图像传感器的质子位移损伤,但具体的机理分析还有待进一步深入探究,也是下一步亟需开展的工作。

3 结论

文中提出了基于信噪比的星敏感器辐照后系统

性能定量评估方法,该方法的创新性在于建立了空间辐射和 CMOS 图像传感器辐射损伤敏感参数、星敏传感器性能参数之间的相关性。CMOS 图像传感器暗电流噪声和暗信号非均匀性噪声是导致星敏传感器性能退化的主要因素,通过系统信噪比,将 CMOS 图像传感器噪声和星敏传感器星等探测灵敏度之间建立联系,最终获得星敏传感器受辐照后性能参数衰退预测方法。试验结果表明 CMOS 图像传感器噪声(暗电流噪声和暗信号非均匀性噪声)的增大导致系统信噪比的减小,然而系统信噪比的降低又会导致星敏传感器星等探测灵敏度的降低。质子辐照试验发现当辐照注量大于 3.68×10^{10} p/cm² 时,已无法正确提取星点质心,CMOS 图像传感器的质子位移损伤对星敏传感器性能退化影响更为严重,但相关机理分析还有待进一步开展。已开展的研究从系统级的角度分析了空间辐射对星敏传感器性能参数的影响,为星敏传感器在轨姿态测量误差预测和修正技术的研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] Wang Jun, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Fast star identification algorithm based on multi-feature matching [J]. *Optics Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1870–1879. (in Chinese)
- [2] Wang Jun, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Restoration method for blurred star images based on region filters [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 146–156. (in Chinese)
- [3] Feng Jie, Li Yudong, Wen Lin, et al. Degradation mechanism for photon transfer curve of CMOS image sensor after irradiation [J]. *Optics Precision Engineering*, 2017, 25(10): 141–146. (in Chinese)
- [4] Ma Lindong, Li Yudong, Guo Qi, et al. Total ionizing dose radiation effects in 4T-CMOS image sensors at different biased conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1017002. (in Chinese)
- [5] Zhou Xuanfeng, Chen Qianrong, Wang Yanbin, et al. Image interrupt effect and mechanism of pulse laser irradiated CMOS camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0306002. (in Chinese)
- [6] Yang Chengcai, Ju Guohao, Chen Yongping. Study on the photo response of a CMOS sensor integrated with PIN photodiodes [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1076–1089. (in Chinese)
- [7] Li Jinhong, Zou Mei. Design and realization of low-light-level CMOS image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0720002. (in Chinese)
- [8] Shi Shaolong, Yin Da. CMOS APS noise effect on position accuracy of star tracker [J]. *Opto-Electronics Engineering*, 2013, 40(6): 11–16. (in Chinese)
- [9] Wang Tianhui, Li Yudong, Wen Lin, et al. Generation and annealing of hot pixels of CMOS image sensor induced by proton [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(12): 55–62. (in Chinese)
- [10] Wen Lin, Li Yudong, Guo Qi, et al. Mechanism of spectrum response degradation in CCD's exposed to γ -ray and proton [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(2): 244–250. (in Chinese)
- [11] Benton E R, Benton E V. Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2001, 184(1): 255–294.
- [12] Flynn D J, Fowski W J, Kis T. Flight performance of TOPEX/POSEIDON star trackers [C]//SPIE, 1993, 1949(149): 149–163.
- [13] Witze A. Software error doomed Japanese Hitomi spacecraft [J]. *Nature*, 2016, 533(1): 17.
- [14] Yuan Jiahu, Zhang Jianrong, He Shanjin. A study on detection sensitivity of navigation star sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999(6): 2–7. (in Chinese)
- [15] Liu Jinguo, Li Jie, Hao Zhihang. Study on detection sensitivity of APS star tracker [J]. *Optics Precision Engineering*, 2006, 14(4): 553–557. (in Chinese)