光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250324003

空间应用CMOS图像传感器寿命评估方法研究

程甘霖*，张芮萌，王　丹，牟帅臣，范　唯
（北京空间机电研究所，北京 100094）

摘　要： 随着遥感卫星设计寿命需求逐步提升，图像传感器作为遥感载荷的核心器件，其寿命直接决定了卫星的整体寿命。目前，CMOS图像传感器已成为遥感载荷中可见光探测的主要器件，但现有寿命评估方法仍以质量保证试验为主，缺乏定量化分析。文章提出一种基于任务需求的CMOS图像传感器寿命评估方法，以虚拟的遥感任务为例，在设计阶段对CMOS图像传感器进行可靠性设计分析，并在试验阶段制定质量保证方案。通过辐照试验重点研究器件受辐照后的性能退化规律，结合任务环境中的累积辐照量预测，定量评估遥感相机寿命末期CMOS图像传感器的成像信噪比等关键指标。结果表明，在8年设计寿命内，器件性能退化可控，信噪比满足任务需求。该方法可为长寿命遥感相机的可靠性设计与验证提供理论支撑。

关键词： CMOS图像传感器；空间应用；辐照性能退化；定量化寿命评估
中图分类号： TN407　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0248－07

Life-Evaluation Method of CMOS Image Sensor for Space Application

CHENG Ganlin, ZHANG Ruimeng, WANG Dan, MU Shuaichen, FAN Wei
(**Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, CHN**)

Abstract: The reliability of image sensors, as core components of remote-sensing payloads, directly determines the overall lifespan of remote-sensing satellites. CMOS image sensors have become the primary visible-light detectors for remote-sensing payloads. However, the existing lifetime-evaluation methods rely primarily on quality-assurance tests, which are devoid of quantitative analysis. This study proposes a mission requirement-based lifetime-evaluation method for space-applied CMOS image sensors. Based on a virtual remote-sensing satellite mission as a case study, a reliability analysis of the device (including failure mechanisms such as the time-dependent dielectric breakdown (TDDB)) was conducted at the design stage, and a quality-assurance scheme was formulated during the test phase. Through irradiation experiments focusing on the performance degradation caused by the total ionizing dose, displacement damage, and TDDB effects as well as predictions of cumulative irradiation levels in the mission environment, key indicators such as the imaging signal-to-noise ratio (SNR) of the CMOS image sensor at the end of the camera's lifespan were quantitatively evaluated. Experimental results indicate that the performance degradation of the device remains controllable within the 8-year design lifetime, with the SNR satisfying the mission requirements. This method provides theoretical support for the reliability design and verification of long-life remote-sensing cameras.

Key words: CMOS image sensor; space applications; irradiation degradation; quantified lifetime evaluation

收稿日期：2025－03－24.
*通信作者：程甘霖

0　引言

随着我国遥感卫星技术的进步，用户对遥感卫星的设计寿命要求逐步提高。尤其是高分系列卫星，从早期的5年寿命提升至8年。GF-3卫星作为国内首个低轨长寿命对地观测卫星，设计寿命长达8年，是长寿命卫星遥感卫星发展的重要里程碑[1]。后续对造价较高的高轨遥感卫星，寿命要求对标欧美延长至10年以上。图像传感器作为遥感卫星的核心器件，其使用寿命直接影响卫星寿命。随着CMOS工艺的进步，CMOS图像传感器已在绝大多数空间应用领域取代CCD成为遥感卫星的主力可见光探测器，对其进行寿命评估可有效预测在遥感卫星寿命末期成像功能和性能能否满足任务需求。

目前，现有的评估方法主要以质量保证试验为主，规定试验条件和试验通过判据，尚未有对空间应用CMOS图像传感器进行定量化寿命评估的方法。本文提出一种空间应用CMOS图像传感器的寿命评估方法。该方法基于任务需求，从设计、质量保证、试验数据定量化分析评估器件的寿命，为遥感相机论证阶段的长寿命设计提供支撑。

1　空间应用CMOS图像传感器特点

考虑到长寿命可靠性要求，CMOS图像传感器的结构在空间和地面应用有一定的区别，主要体现在以下方面：

（1）管芯：考虑遥感卫星的幅宽，为减少器件的拼接，传感器的像元尺寸和阵列规模较大，从而造成整个芯片的面积较大，在设计上必要时需采用光学缝合拼接工艺，另外在电路设计上要采用抗辐照加固设计，制造上选用如180或55 nm等较为成熟的工艺节点；

（2）管壳：考虑到热膨胀系数、机械强度、可维修性等因素，通常选用氧化铝陶瓷材料的PGA封装形式；

（3）光窗：主要采用机械强度较高的蓝宝石晶体基材。

空间应用CMOS图像传感器在整个生命周期内会经历质量保证、地面测试、发射和在轨工作四个阶段，其中质量保证阶段为后续三个阶段器件能满足载荷研制方、卫星总体、卫星用户的质量要求提供验证。器件在每个阶段的外部环境都不同，如地面阶段主要受电应力（如静电）、热应力的影响，发射阶段则以机械应力为主，在轨阶段，电应力、热应力和宇宙辐射为主要的外部因素。

空间应用图像传感器的失效可从管芯失效和封装失效两个方面考虑，管芯失效的应力主要源于电应力和宇宙辐射，封装失效主要受到电应力、机械应力和热应力的共同影响，具体如图1所示。制定质量保证方案的主要目的是验证是否发生图中所列出的失效模式。

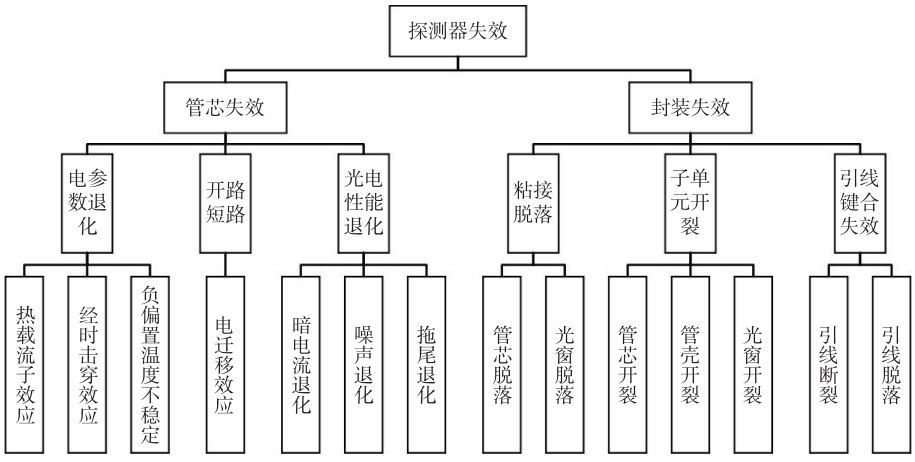


图1　图像传感器失效模式树

2　基于任务需求的CMOS图像传感器寿命评估方法

现有空间应用CMOS图像传感器可靠性评估主要以试验验证为主，国内以“GJB 5968-2007电荷耦合成像器件通用规范”为代表，主要规定了质量保证相关要求，包括筛选试验，质量保证试验的试验条件、方法和程序等，国外以ESCC通用规范

“No. 9020用于密封与非密封封装的感光CCD和CMOS成像传感器”为代表，规定了芯片制造过程的过程控制、剔除早期失效的筛选试验项以及批次性的质量保证试验，筛选试验和批次质量保证试验都会对器件施加机械应力、热应力、电应力，其中质量保证试验的试验量级更高[2-3]。上述规范具有一定的通用性，试验后的结果判断还需要其他方法验证。

结合空间应用CMOS图像传感器的实际应用情况，提出一种基于任务需求的CMOS图像传感寿命评估方法。首先对遥感器的任务剖面进行分析，提出器件的寿命要求，根据载荷设计，约束器件的工作温度、在轨辐照环境和重要光电性能指标。然后对器件开展可靠性设计，通过对产品开展质量保证试验以综合验证管芯、封装材料和封装工艺的可靠性，最后对质量保证试验数据进行分析，综合评估器件的寿命。具体流程如图2所示。

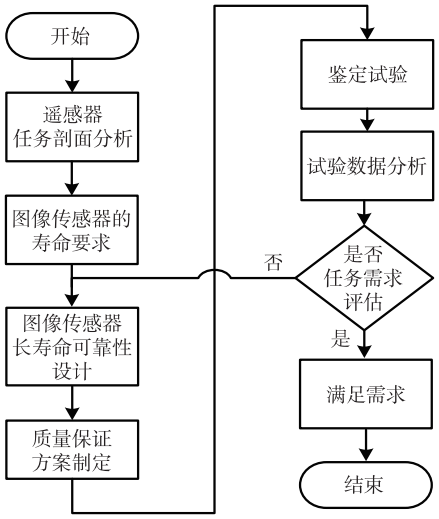


图2 基于任务需求的CMOS图像传感器寿命评估流程

3 空间应用CMOS图像传感器寿命评估案例

3.1 任务剖面分析

假定一个虚拟的遥感卫星系统，系统轨道为太阳同步轨道，设计工作寿命为8年，图像传感器在轨温度控制在－10℃，典型积分时间为150 ms，任务要求图像成像信噪比大于等于3。

太阳同步轨道通常位于600～800 km高度范围内，宇宙辐射主要包括地球辐射带（范艾伦带）粒子、太阳宇宙射线和银河宇宙射线，这些宇宙辐射会造成器件性能衰退。为满足信噪比要求，遥感相机对图像传感器进行温控以降低暗电流影响，需要通过预测器件在寿命末期的成像能力以及其性能是否能够满足信噪比要求，判断整个遥感卫星能否满足设计寿命[4]。

3.2 传感器可靠性设计分析

所设计的抗辐照CMOS图像传感器像元为4T结构，模拟电路采用抗辐照加固设计，包括增加衬底接触、保护环，数字电路采取抗辐照标准单元库、三模冗余等措施，综合提升器件的抗电离总剂量和抗单粒子锁定能力。

在封装材料选择上，管壳选择高可靠性的陶瓷管壳，具有低热膨胀系数、高气密性、高绝缘性、高硬度的优点；光窗选择蓝宝石基底材料，保证高稳定性、高硬度以及良好的光学性能。

在封装工艺过程控制上，全程在百级洁净间内进行，避免多余物污染感光面。通过控制Au-Al键合工艺参数，减少脆性金属间化合物（IMC）和空洞形成。封光窗过程充氮气保护，工艺过程首件进行键合拉力和芯片粘接推力试验[5]。

3.3 传感器质量保证方案

根据任务剖面分析以及元器件的质量保证要求，主要鉴定试验包括力学、热学、高温寿命以及辐照试验。力热试验验证封装工艺和封装材料的可靠性，辐照试验验证管芯的辐照退化性能，高温寿命综合验证全芯片可靠性，主要试验条件如下：

（1）机械冲击试验：峰值加速度为500 g，脉冲宽度为1.0 ms，不加电；

（2）扫频振动试验：峰值加速度为20 g，不加电；

（3）温度循环试验：－40～80℃，循环100次，停留时间为10 min，转换时间小于1 min，不加电；

（4）高温寿命试验：2 000 h，80℃，加电；

（5）电离总剂量（TID）试验：辐照源为钴60，剂量率为50 rad（Si）/s，累计总剂量大于等于100 krad（Si），不加电和加电两种状态；

（6）位移损伤试验：辐照源为中子，注量率为1×10^{7}（n/cm^2）/s，中子辐照注量大于等于1.0×10^{11} n/cm^2，不加电；

（7）单粒子锁定试验：线性能量转移（LET）阈值为大于等于75 MeV·cm^2/mg，加电。

所有试验结果未出现失效情况，机械冲击和扫频振动的试验量级选择超过器件全生命周期的外应力，温度循环试验通过两个加速因子（试验温度

变化量和试验温变率）考核在不同材料的互联界面处互联工艺寿命，寿命试验综合评估管芯和封装的可靠性。试验结果表明管壳、管芯和光窗的材料以及封装工艺抗力学、热学、电应力、抗辐照均能满足设计要求。

CMOS图像传感器的管芯属于产品的核心部件，主要由硅基大规模CMOS晶体管、金属和过孔、介质层等组成，在轨工作主要受到电应力、温度应力和宇宙辐照，失效模式分为以下三大类：电参数退化、金属互连线开路、辐照光电性能退化。电参数退化模式包括热载流子注入（HCI）、时间相关电介质击穿（TDDB）、负偏置度不稳定性（NBTI），其中HCI在低温时更严重，可在性能允许的情况下提高传感器的工作温度，TDDB温度越高击穿时间越短，为保证器件性能，在轨都会对传感器进行温控，减小温度波动，NBTI主要发生在负栅压高温条件下的PMOS，一般CMOS图像传感器无需负电压。金属互连线开路主要由电迁移效应（EM）造成，EM失效一般在满足代工厂的设计规则条件下，都能保证长寿命。为保证遥感相机的成像质量需为图像传感器提供良好的热控措施和稳定的供电。以上两大类失效模式在寿命周期内一般不会出现，而应重点关注辐射对成像质量的影响，即光电性能的退化[4]。

3.4　辐照试验与性能退化分析

CMOS图像传感器由于其芯片内集成了大量的数模混合电路，在考虑电离总剂量效应和位移损伤效应的同时，也需要考虑单粒子效应。当单粒子效应发生时，高能粒子撞击光电二极管或传输管，会导致像素输出信号异常，若撞击读出电路的ADC、行列驱动逻辑，会引发行列数据错误，若撞击控制寄存器则可能导致配置参数异常，进而影响成像参数。以上情况出现后可对图像传感器进行复位操作，即可恢复正常，但在任务周期内，不允许发生会对器件造成破坏性损伤的单粒子锁定（SEL）。在评估单粒子效应时，重点关注瞬态事件，如单粒子翻转（SEU）或SEL。这些对长寿命下的光电性能影响不大，所以在评估光电性能退化时，只考虑电离总剂量和位移损伤效应，暂不考虑单粒子效应。

电离总剂量和位移损伤效应会影响载流子寿命以及载流子在材料中的扩散长度、浓度和迁移率，直接导致暗电流与读出噪声增加、输出非均匀性增大。输出非均匀性可以通过算法进行校正，而暗电流与读出噪声增加则导致动态范围下降，图像信噪比下降，影响任务。

试验样品为4T像元结构的CMOS图像传感器，像元的暗电流来源主要是体硅的扩散电流、传输管（TX）界面处的复合电流以及PPD耗尽区的复合电流，采用钳位光电二极管设计有效降低界面态对暗电流的影响，暗电流还与版图形状、工艺参数密切相关。随着辐射的累积，TX管下方栅氧层中由辐射产生的氧化物陷阱电荷随辐照累计剂量而变化，氧化物陷阱电荷随剂量增大呈线性正增大，多篇文献中的仿真结果和试验结果均表明辐照对暗电流影响近似为线性[6-8]。中子位移损伤诱发空间电荷区产生大量体缺陷，体暗电流主要由体硅中出现晶格缺陷引起，暗信号退化幅度与中子辐照注量近似呈线性关系[9]。

3.4.1　电离总剂量辐照试验分析

对样品采用^{60}Co-γ射线辐照源进行TID试验。为对比传感器在不同偏置条件下的辐照退化情况，试验采用加电和不加电两种偏置状态。为保证测试电路的其他外围电路不受辐照影响，用铅砖阻挡射线，保护非传感器元器件。

TID试验1∶1个样品不加电，剂量率为50 rad（Si）/s，总剂量为100 krad（Si），关键参数对比如表1。

表1　TID试验前后关键参数对比（不加电）

参数	辐照前	辐照后
噪声/e^-	1.08	2.96
暗电流/(e^-/p/s)@25℃	1.18	87.9
满阱容量/ke^-	167.2	173
动态范围/dB	103.80	95.33

根据TID测试结果，在室温下，不加电电离总剂量D对暗电流I_{dark}影响如图3中曲线斜率，即0.867 2（e^-/p/s）/krad（Si）。

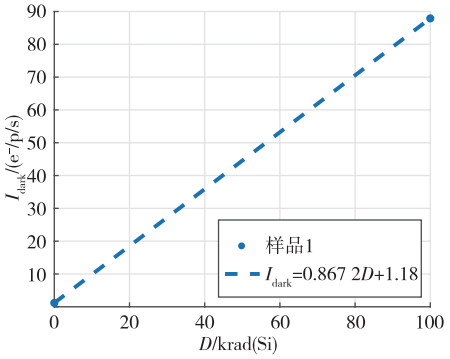


图3　暗电流随电离总剂量变化曲线（不加电）

TID试验2:2个样品处于正常工作状态,剂量率为50 rad(Si)/s,总剂量为100 krad(Si),辐照后加电40℃退火168 h,关键参数对比如表2。

表2 TID试验前后关键参数对比(加电)

样品	参数	辐照前	辐照后	退火后
样品1	噪声/e^-	1.06	4.06	3.67
	暗电流/(e^-/p/s)@25℃	2.5	237.89	169.77
	满阱容量/ke^-	182.3	197	196
	动态范围/dB	104.7	93.7	94.5
样品2	噪声/e^-	1.07	3.96	3.57
	暗电流/(e^-/p/s)@25℃	2.7	241.27	137.94
	满阱容量/ke^-	184.3	201	198
	动态范围/dB	104.7	94.1	94.9

根据TID测试结果,在室温下加电辐照对暗电流影响为图4中曲线的斜率,取斜率最大值:2.385 7(e^-/p/s)/krad(Si)。可据此暗电流变化率评估寿命过程中器件受电离总剂量的暗电流退化情况。

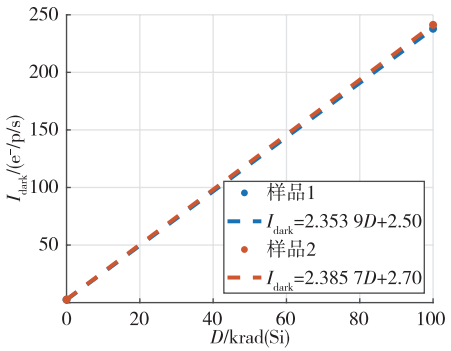


图4 暗电流随电离总剂量变化曲线(加电)

图像传感器在加工作偏置条件下的表现与未加相比存在显著差异,总剂量辐照对暗电流影响显著,加工作偏置条件下暗电流变化率为不加情况变化率的2.75倍。加工作偏置暗电流更大的理论依据是:在电场力的作用下更多的电子可以摆脱陷阱电荷的束缚,即电子释放率会较大幅度提高,因而会导致光电二极管势阱俘获更多的电子,宏观表现为器件的暗电流增大。

电离总剂量辐照后器件的满阱容量没有退化反而增加,需要从影响满阱容量的因素分析。一方面随着辐照剂量增加,氧化物中陷阱电荷浓度增加,导致光电二极管的耗尽区宽度增加,可存储电荷的体积增大,满阱容量小幅提升。另一方面,满阱容量的增加只是特定剂量范围内的现象,高剂量辐射会降低电荷转移效率,最终仍会导致性能全面退化。

经过辐照后加电40℃退火168 h,读出噪声减小约10%,暗电流减小约30%,退火可以一定程度上修复辐照造成的某些缺陷。电离总剂量辐照后器件能正常成像,说明电离总剂量辐照对器件功能无影响[10-12]。

3.4.2 位移损伤辐照试验分析

针对样品用中子辐照源进行位移损伤试验,注量率为1×10^7 (n/cm^2)/s,中子辐照注量为1.0×10^{11} n/cm^2,两个样品,关键参数对比如表3所示。

表3 位移损伤辐照试验前后参数变化

样品	参数	辐照前	辐照后
样品1	噪声/e^-	0.86	1.02
	暗电流/(e^-/p/s)@25℃	1.635	227.94
	满阱容量/ke^-	176.90	176.50
	动态范围/dB	106.25	104.73
样品2	噪声/e^-	0.91	1.07
	暗电流/(e^-/p/s)@25℃	1.45	247.85
	满阱容量/ke^-	176.78	177.98
	动态范围/dB	105.83	104.45

根据文献[6],位移损伤会导致部分像元受损,造成暗电流增加,而非整体偏移。具体表现为出现热像元,平均暗电流增加。位移试验采用粒子源为中子,参考文献[6]指出中子相对质子对暗电流的影响更小,而宇宙中更多的是带电的质子,实际情况可能会更恶劣。根据该文献的位移试验数据,可得暗电流与辐照注量是线性关系。如图5所示,根据位移损伤测试结果,在室温下位移辐照注量Φ_d对暗电流I_{dark}影响为:2×10^{-9} (e^-/p/s)/(n/cm^2)。可依据此暗电流变化率值评估寿命过程中器件受位移损伤的暗电流退化情况。位移辐照后器件能正常成像,证明位移辐照对器件功能无影响。

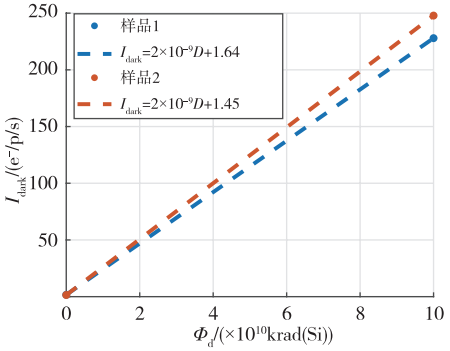


图5 位移损伤试验前后暗电流变化曲线

3.5 任务寿命末期性能评估

3.5.1 相机估算寿命末期辐照剂量

根据卫星轨道和图像传感器所在卫星舱内位

置的等效铝厚度，计算8年电离总剂量和位移辐照注量如表4。考虑到辐射环境、测试数据的不确定性，以及电离效应和位移损伤带来的叠加效应，将预估辐射条件乘以工程系数2.5，以保证结果覆盖实际情况。

表4　图像传感器8年等效预估辐照

预估辐照条件	等效电离总剂量/krad(Si)	等效位移辐照注量/($\times10^{10}$ n/cm^2)
图像传感器预估辐照(工程系数=1)	2.5	3.89
图像传感器预估辐照(工程系数=2.5)	7.5	9.72

3.5.2　图像传感器寿命末期性能退化评估

经电离总剂量和位移损伤试验后器件能正常成像，说明两种辐照对器件功能无影响。影响图像信噪比的噪声主要来源于图像传感器读出噪声和暗噪声，而暗噪声来源于暗电流。根据辐照试验结果，读出噪声和暗电流受电离总剂量和位移损伤影响。读出噪声方面，由于没有预测曲线，最终结果取试验结束时的数据。对于暗电流，需要考虑以下两点：一是图像传感器工作温度对暗电流影响，每升高8℃，暗电流翻一倍(经验值)；二是根据暗电流与电离总剂量、中子位移注量关系，预测在轨寿命末期情况。具体情况如表5所示。

表5　任务关键指标8年退化评估

指标	未接受辐照	寿命末期(仅考虑TID效应)	寿命末期(仅考虑位移效应)	寿命末期(综合TID和位移应)
读出噪声/e$^-$	1	4.2(100 krad结果)	1.2(1×10^{11}结果)	4.2(100 krad结果)
暗电流/(e$^-$/p/s)@25℃	2.5	20.1(曲线预估)	195(曲线预估)	195(曲线预估)
暗电流/(e$^-$/p/s)@−10℃	0.57	4.59	44.56	44.56
积分时间/s	0.15	0.15	0.15	0.15
背景噪声/e$^-$	8.79×10^{-10}	8.79×10^{-10}	8.79×10^{-10}	8.79×10^{-10}
图像总噪声/e$^-$	6.12	7.39	6.64	7.79
目标能量/e$^-$	36.35	36.35	36.35	36.35
SNR	5.94	4.92	5.48	4.67
是否满足*SNR*≥3	是	是	是	是

寿命评估结论：

(1)综合考虑电离总剂量和位移损伤效应：总剂量影响读出噪声更大，取100 krad剂量结果4.2 e$^-$，位移辐照影响暗电流更大，取44.56 e$^-$/p/s@−10℃，计算信噪比为4.67，满足*SNR*≥3要求；

(2)根据辐照结果，在不需要工作情况下适时切断图像传感器供电，或者考虑增加图像传感器的在轨退火方案，以减缓寿命末期的暗电流增加趋势。

4　结论

本文针对遥感卫星对空间应用图像传感器长寿命的需求，结合空间应用传感器的特点以及任务环境，提出一种系统性、定量化的寿命评估方法。以虚拟遥感卫星任务为背景，分析图像传感器的封装、管芯可靠性和性能退化。根据辐照试验结果，预测图像传感器在相机寿命末期是否满足系统成像任务要求。该方法可以有效利用辐照试验数据，助力相机设计阶段的寿命评估。

参考文献：

[1] 朱　炜，张国斌，陈凤熹，等. 中型敏捷遥感卫星公用平台寿命工作研究与实践[J]. 航天器工程，2021，30(3)：102-107.
Zhu Wei, Zhang Guobin, Chen Fengxi, et al. Research and practice on lifetime of ZY2000 remote sensing satellite platform [J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(3): 102-107.

[2] 电荷耦合成像器件通用规范：GJB 5968—2007[S].
General specification for imaging charge coupled devices: GJB 5968—2007[S].

[3] European Space Agency. ESCC generic specification No. 9020 photosensitive charge coupled devices and CMOS imaging sensors with hermetic and non-hermetic packages[S] European Space Agency, 2017.

[4] 沈竞宇. 深亚微米CMOS集成电路可靠性评价与设计技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2019.
Shen Jingyu. Research on reliability evaluation and design technology of deep submicron CMOS VLSI[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

[5] 严钦云. Au-Al键合可靠性及其失效机理研究[D]. 长沙：中南大学，2006.
Yan Qinyun. Reliability and failure mechanisms of Au-Al wire bonding[D]. Changsha: Central South University, 2006.

[6] Lofthouse-Smith D D. Characterising the CMOS image sensor for the JANUS camera on ESA's juice mission to Jupiter[D]. Milton Keynes: Open University, 2021.

[7] 魏 莹, 文 林, 李豫东, 等. 电离总剂量效应对4T CMOS图像传感器暗电流影响的数值仿真[J]. 数值计算与计算机应用, 2020, 41(2): 143-150.
Wei Ying, Wen Lin, Li Yudong, et al. Simulations of the total ionization dose effect on 4T CMOS image sensor dark current [J]. Journal on Numerical Methods and Computer Applications, 2020, 41(2): 143-150.

[8] 聂 栩, 王祖军, 王百川, 等. 不同偏置条件下CMOS图像传感器质子辐照损伤效应的实验与分析[J]. 光学学报, 2023, 43(19): 288-296.
Nie Xu, Wang Zujun, Wang Baichuan, et al. Experiment and analysis of damage of CMOS image sensor induced by proton irradiation with different bias conditions [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(19): 288-296.

[9] 王祖军, 赖善坤, 杨 勰, 等. CMOS图像传感器辐照损伤效应仿真模拟研究进展[J]. 半导体光电, 2022, 43(5): 839-847.
Wang Zujun, Lai Shankun, Yang Xie, et al. Simulation research progress of radiation damage effects on CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(5): 839-847.

[10] 宋辰昱. 总剂量效应对CIS钳位电压影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Song Chenyu. Research on the influence of TID effect on CIS pinning voltage [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.

[11] 宋辰昱, 申人升, 曲 杨, 等. 总剂量效应对CMOS图像传感器中光电二极管钳位电压的影响[J]. 半导体光电, 2021, 42(3): 321-326.
Song Chenyu, Shen Rensheng, Qu Yang, et al. Influence of TID effect on pinning voltage of CIS [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(3): 321-326.

[12] 傅 婧. CMOS图像传感器像素单元累积辐射效应仿真研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
Fu Jing. Simulation study on cumulative radiation effect of pixel unit of CMOS image sensor[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.

作者简介:

程甘霖(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事CMOS图像传感器设计及可靠性相关研究。