光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023100501

CMOS图像传感器辐射敏感参数测试电路设计及试验验证

王祖军[1,2*]，聂　栩[2]，唐　宁[2]，王兴鸿[3]，尹利元[4]，晏石兴[2]，李传洲[2]

（1. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室，西安 710024；
2. 湘潭大学 材料科学与工程学院，湖南 湘潭 411105；
3. 西安高科技研究所，西安 710024；4. 兰州大学 核科学与技术学院，兰州 730000）

摘　要： 以航天领域广泛应用的CMV4000型CMOS图像传感器(CIS)为研究对象，通过开展CIS辐射敏感参数测试电路设计，将CIS辐照电路板与测试电路板中FPGA数据采集及传输板分离，辐照电路板与测试电路板通过接插口通信，从而实现开展辐照试验时对FPGA数据采集部分进行辐射屏蔽防护，避免FPGA数据采集板受到辐射影响。开展了CIS测试电路中的电源模块、数据采集、存储模块、外围电路等设计及PCB版图的布局布线设计。采用Verilog HDL硬件描述语言对各个功能模块进行驱动时序设计，实现CIS辐射敏感参数测试功能。通过开展CMV4000型CIS ^{60}Co γ射线辐照试验，分析了平均暗信号、暗信号非均匀性、暗信号分布等辐射敏感参数随总剂量增大的退化规律，验证了CIS辐射敏感参数测试系统的可靠性。

关键词： CMOS图像传感器；测试电路设计；辐照试验；辐照损伤效应；辐射敏感参数

中图分类号： TN386.5；O605　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0216－06

Test Circuit Design and Radiation Experiment Verification of CMOS Image Sensors

WANG Zujun[1,2], NIE Xu[2], TANG Ning[2], WANG Xinghong[3],
YIN Liyuan[4], YAN Shixing[2], LI Chuanzhou[2]

(1 State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect (Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, CHN; 2. Xiangtan University, School of Materials Science and Engineering, Xiangtan 411105, CHN;
3 Xi'an Research Institute of High-Technology, Xi'an 710024, CHN;
4. Lanzhou University, School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou 730000, CHN)

Abstract: This study investigated the CMV4000 CMOS image sensor (CIS), which is widely used in the space domain. When designing the test circuit, the CIS radiation circuit board was separated from the FPGA data acquisition and transmission board, and the radiation circuit board and test circuit board communicated through a communication interface to realize radiation shielding protection of the FPGA data acquisition part during a radiation test. This prevented the FPGA data acquisition board from being affected by radiation. The power supply module, data acquisition, memory module, peripheral circuit, and the layout and wiring of the PCB were designed. The Verilog HDL hardware description language was used to drive the timing design of each function module to realize the CIS radiation-sensitive parameter test function. A ^{60}Co γ ray

收稿日期：2023－10－05.
基金项目：国家自然科学基金项目（U2167208，11875223）；陕西省自然科学基础研究计划项目(2024JC－JCQN－10)；全国重点实验室基金项目(NKLIPR1803，NKLIPR2012，NKLIPR2113)..
* **通信作者：**王祖军

radiation test of the CMV4000 CIS was used to analyze the degradation of radiation-sensitive parameters such as the mean dark signal, dark signal uniformity, and dark signal distribution versus total ionizing dose, and the reliability of the CIS radiation-sensitive parameter test system was verified.

Key words: CMOS image sensor; test circuit design; radiation experiment; radiation damage effect; radiation sensitive parameter

0　引言

CMOS 图像传感器(CIS)具有体积小、重量轻、功耗低、片上集成度高等优良性能，在航天航空、粒子探测、医学、核工业等领域的探测和成像系统中被广泛应用[1-4]。然而，应用在空间辐射环境、核辐射环境、加速器及粒子探测辐射环境中的 CIS 会受到辐照损伤的影响，并导致器件性能退化，严重时甚至出现功能失效[3-5]。鉴于 CIS 为核心器件的成像系统在辐射环境中的可靠性问题备受关注，近年来，国内外均开展了大量的 CIS 辐照效应实验研究[5-10]。然而，针对 CIS 辐射敏感参数测试电路系统设计的文献报道较少，为提高 CIS 辐照试验数据的可信性，需要针对性设计 CIS 辐射敏感参数测试电路系统，提升辐照试验测试技术。

本文主要以航天领域广泛应用的 CMV4000 型 CIS 为研究对象，通过开展 CIS 辐射敏感参数测试电路设计，将 CIS 辐照电路板与测试电路板中 FPGA 数据采集及传输板分离，辐照电路板与测试电路板通过接插口通信，研制了一款应用于辐照试验的辐射敏感参数测试系统，并基于该测试系统开展了 CMV4000 型 CIS ^{60}Co γ 射线辐照效应试验测试，获得了 CIS 辐射敏感参数随总剂量增大的退化规律，验证了 CIS 辐射敏感参数测试系统的适用性和可靠性。

1　测试电路设计

CIS 辐射效应测试系统以 FPGA 为核心控制器，提供 CIS 驱动信号、SPI 寄存器配置时序、LVDS 数据接收时序、DDR2 SDRAM 初始化及数据读写操作时序，以此来控制整个系统完成数据处理及传输。CIS 辐射效应测试系统硬件主要包括：CIS 辐照板、电源模块、FPGA 数据采集模块、DDR2 SDRAM 数据缓存模块、USB 传输模块等。在 CIS 辐射效应测试系统中，CIS 输出的数字信号被送入到 DDR2 SDRAM 缓存芯片中，进行数据缓冲存储，最后通过串口方式传送给上位机，在上位机上作进一步分析处理和大容量的存储。图 1 给出了 CIS 辐射效应测试系统总体框图。

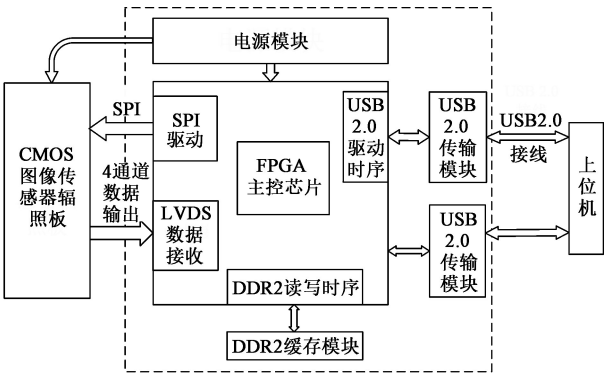


图 1　CIS 辐照效应测试系统总体框图

FPGA 主控芯片对 CIS 的配置来实现目标图像的采集；对 DDR2 SDRAM 缓存器的配置，完成数据的缓存；对 USB2.0 芯片配置，实现采集图像的传输。FPGA 内部主要分为数字图像数据采集模块、SPI 总线配置模块、DDR2 SDRAM 读写控制模块、图像处理模块和 USB2.0 控制模块。本设计系统电源选用 LDO 稳压芯片，将＋5 V 直流电压转换成各芯片所需的工作电压，保障了系统输出的稳定性。根据图像数据传输的特点以及速度需求，采用 USB 2.0 芯片实现图像数据向上位机传输。由于 FPGA 内部资源有限，不足以缓存数据量大的原始图像数据，主要采用 DDR2 SDRAM 缓存电路外部存储器实时存储 CIS 的图像数据。由于 FPGA 内部随机动态存储器(RAM)具有易失性，因此采用外接 FLASH 芯片来存储系统程序，以保障系统重新上电时不需要重新加载程序。此外，系统还需要 USB-Blaster 作为 FPGA 配置数据线，将编译好的代码文件(.sof)通过 JTAG 接口下载到 SPI FLASH 中，完成 FPGA 的配置。

CIS 的外围电路设计主要包括电源接口设计、SPI 配置接口设计以及 4 通道 LVDS 输出接口设计，CMV4000 外围电路图如图 2 所示。为保证整机信噪比和图像质量，设计时在 CIS 的每个电源引

脚上均放置一组滤波电容。本设计使用外部+5 V的直流供电电源，基于+5 V电压再转换成各引脚所需电压，CMV4000需要2.1，3.3和3.0 V三种电压。为保证成像质量，在电源设计时，本系统采用LDO电源转换芯片来得到各个模块所需的不同电压值。

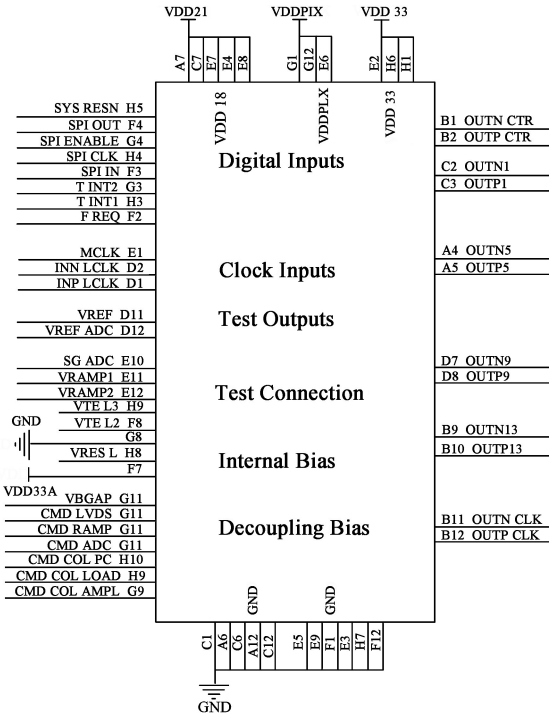


图2 CIS的外围电路图

2 PCB版图设计

CIS辐射效应测试系统采用CIS辐照板和FPGA数据采集板分离的电路结构，CIS辐照板通过40 pin的接插口与信号处理板相连。为满足辐照试验与测试需求，在CIS辐照板PCB版图设计时增加了CIS插座，可满足CIS芯片进行插拔更换。CIS辐照板包括CIS插座、所需电源芯片、外围电路等。CIS辐照板的PCB设置为4层板，分别为Top，L_2，L_3，Bottom，接插件放在Bottom层，其中TOP，L_3和Bottom为信号层，使用的是正片；L_2设置成GND，使用的是负片，大小为50 mm×70 mm，PCB布局时将CIS插座放在Top层；CIS数据采集板包括系统总电源模块、FPGA采集模块、数据存储模块以及USB传输模块；数据采集板叠层设置为8层，Top和Bottom放置器件，L_2和L_5为GND，L_4和L_7为VCC，L_3和L_6对电压进行分割。CIS辐照效应测试系统的辐照板和数据采集板PCB版图设计分别见图3和图4所示。

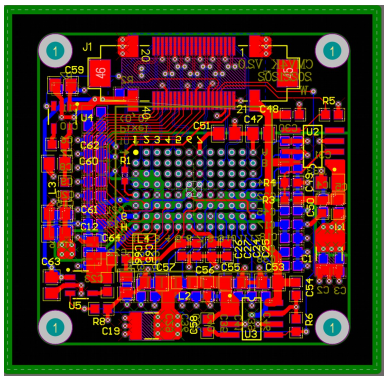


图3 CMV4000辐照板PCB版图设计

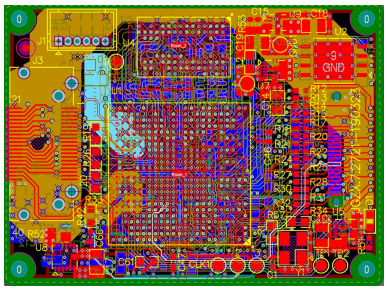


图4 FPGA数据采集板PCB版图设计

3 测试系统时序设计

CIS辐射效应测试系统采用Quartus Ⅱ软件对各模块驱动时序进行设计，选择Verilog HDL语言输入方式对各模块时序进行描述；使用第三方工具ModelSim SE对时序设计进行仿真验证，保证设计的准确性；使用第三方工具synplify pro对设计综合，实现硬件功能，生成网表；最后把生成的烧录文件烧录进FPGA配置芯片EPCQ64中，上电后FPGA芯片就可按照配置程序工作，实现整个测试系统的稳定运行。

CIS辐射效应测试系统的总体程序设计包括数据采集、存储、传输三个模块，这些模块共同构成了整个系统的核心架构。CIS的LVDS数据接收时序，是数据采集模块的核心组成部分；对SPI程序进行配置，以控制曝光时间和上电顺序，并将所采集的数据缓存至DDR2 SDRAM存储器中；数据传输模块主要利用串口通信完成数据的收发工作。DDR2 SDRAM存储芯片的数据缓存模块，集成了FPGA复位、数据写入和数据读出程序等功能，实现了数据的双向写入，从而实现了数据缓冲功能。数据传输模块由数据缓冲区读取数据和发送数据程序组成，该程序能够并行地重新组合和排列数据，并将其传输至USB传输接口，从而实现串行数据的传输。

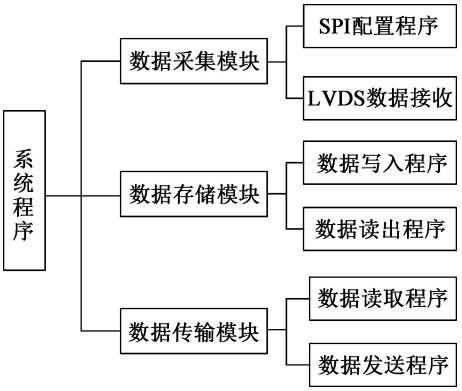


图 5　系统程序设计总体框图

本测试系统时序设计中，CMV4000 型 CIS 选择 12 bit 输出模式，遵循图 6 所示的上电时序。在供电电源稳定后 1 μs，复位信号 SYS_RES_N 变为高电平，表示开始对系统进行复位操作，在上升沿后 1 μs 的时间通过 SPI 接口开始配置内部寄存器，帧脉冲信号 FRAME_REQ 必须在 SPI 配置完成，且等待 Setting time 后进行帧请求的发送。Setting time 是为了确保 SPI 配置的寄存器数据在捕获图像之前生效。

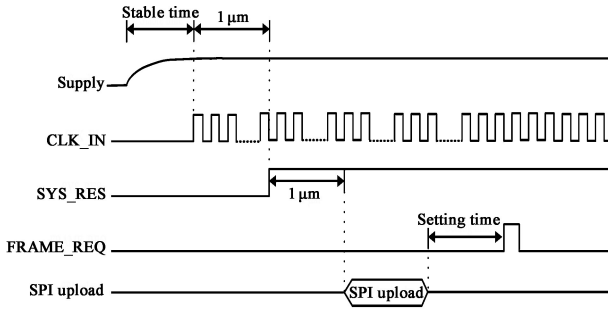


图 6　上电与复位时序图

4　辐照试验

为了验证设计的 CIS 辐射敏感参数测试系统的适用性和可靠性，在西北核技术研究所的抗辐射加固专用 ^{60}Co γ 射线源上开展了总剂量辐照效应试验。^{60}Co γ 射线源的光子能量为 1.25 MeV，源的不确定度为 2.5%。辐照剂量率为 50.0 rad(Si)/s，分别在总剂量为 50，100，150 和 200 krad(Si)时进行辐照后的测试，测试时间在 10 min 内完成，每个测试点分别采集 50 f 图像。辐照试验完成后，依次进行 24，48，96，144 及 168 h 室温退火测试。本次试验样品为 CMOSIS 公司的 CMV4000 型 CIS，该器件为 95 μPGA 封装，有效像素单元阵列为 2 048×2 048，像元尺寸为 5.5 μm×5.5 μm，能够输出 4 通道 12 bit 位宽的差分数字信号。

CIS 的暗信号是指在既无光注入，又无其他方式注入信号电荷的情况下，CIS 的输出信号。CIS 的暗信号对电离总剂量辐照损伤很敏感。按照 EMVA1288 国际标准，暗电流的计算公式为[4]：

$$\mu_d = \mu_{d0} + \mu_I t_{exp} \tag{1}$$

式中，μ_I 为暗电流，t_{exp} 为积分时间，μ_{d0} 为积分时间为零时无光照条件下的平均暗信号，μ_d 为积分时间为 t_{exp} 时无光照条件下的暗信号。

图 7 给出了 CIS 平均暗信号随总剂量的变化关系。从图 7 可以看出，辐照前平均暗信号为 22 DN，随辐照总剂量的增加 CIS 平均暗信号近似呈线性增大，与公式(1)的变化关系相符合。总剂量诱发暗信号增大源于在 CIS 像元中的 PMD，STI，TG 等区域产生的氧化层陷阱电荷和界面态。总剂量诱发 CIS 平均暗信号增大的损伤物理机制为：1)总剂量辐照诱发产生的氧化层陷阱电荷导致 PPD 像元中的空间电荷区延伸到 PMD 氧化层；2)总剂量辐照诱发产生的界面态的扩散电流大于像元中性区产生的电流[11]。

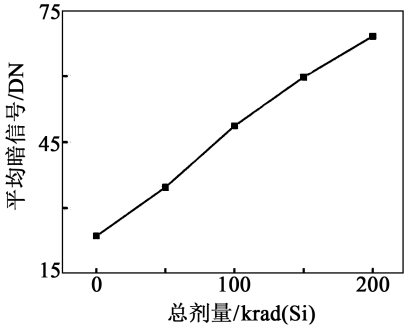


图 7　CIS 的平均暗信号随总剂量变化关系

图 8 给出了 CIS 的平均暗信号随退火时间的变化关系。在室温下，随着退火时间的增加，CIS 的平均暗信号呈缓慢下降趋势，得到一定的恢复，当退火时间较大时平均暗信号恢复缓慢，最终趋于稳定，这主要是由于短时间内室温退火对总剂量效应影响较大，总剂量诱发的氧化物陷阱电荷在室温下发生部分退火。

图 9 给出了不同总剂量下，对应暗信号值的像素单元数分布图。从图 9 可以看出，^{60}Co γ 射线辐照后暗信号分布曲线近似呈高斯分布，随着总剂量的增大，CIS 平均暗信号不断增大。辐照后 ^{60}Coγ 射线辐照引起的电离损伤使得暗信号以像素单元为单位呈现高斯分布且随辐照注量增加分布曲线总体向右偏移。暗信号高斯分布曲线右移主要是随着总剂

量增加，之前受辐照影响较小的像素单元暗信号进一步增加，导致器件像素单元整体暗信号增大。图10给出了暗信号分布随退火时间的变化关系。从图10可以看出，随着退火时间的增加，暗信号分布曲线整体左移，当退火时间达到168 h时，分布曲线基本趋于稳定。图11给出了CIS暗信号非均匀性与总剂量的变化关系曲线。暗信号非均匀性随着辐照注量的增大而增大。辐照试验测试结果表明，设计的CIS辐射敏感参数测试系统能满足辐照试验测试要求。

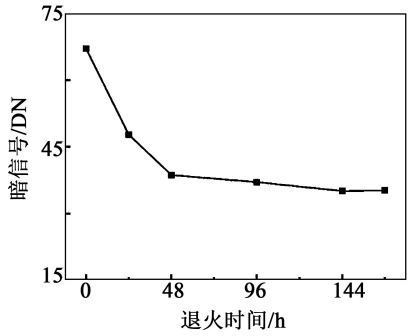


图8 CIS的平均暗信号随退火时间的变化关系

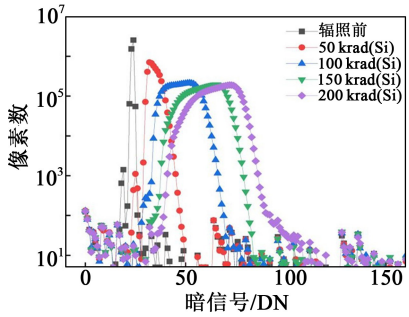


图9 对应暗信号值的像素单元数分布图

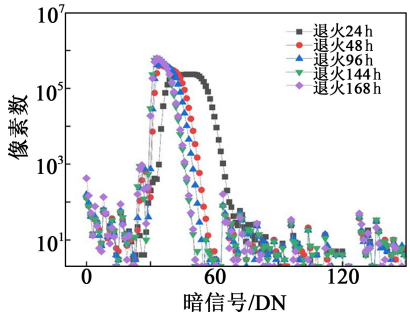


图10 暗信号值的像素单元数分布与退火时间的变化关系

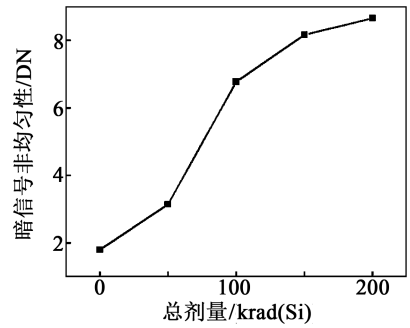


图11 暗信号非均匀性与总剂量的变化曲线

5 总结

通过开展CIS辐射敏感参数测试电路设计，将CIS辐照电路板与测试电路板中FPGA数据采集及传输板分离，辐照电路板与测试电路板通过接插口通讯，实现了开展辐照试验时对FPGA数据采集部分进行辐射屏蔽防护，避免FPGA数据采集板受到辐射影响。开展了CIS测试电路中的电源模块、数据采集、存储模块、外围电路等设计及PCB版图的布局布线设计。采用Verilog HDL硬件描述语言对各个功能模块进行驱动时序设计，实现CIS辐射敏感参数测试功能。通过开展CMV4000型^{60}Co γ射线辐照试验，获得了平均暗信号、暗信号非均匀性、暗信号分布等辐射敏感参数随总剂量增大的退化规律，验证了CIS辐射敏感参数测试系统的适用性和可靠性。本文研究结果为开展CIS辐照效应研究提供了试验测试技术支持。

参考文献：

[1] 岳 涛，张宏伟，黄长宁，等. “嫦娥二号”卫星CMOS相机技术及应用[J]. 航天返回与遥感，2011，32(2)：12-17.
Yue Tao，Zhang Hongwei，Huang Changning，et al. The application of Chang'E-2 CMOS camera technologies [J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing，2011，32(2)：12-17.

[2] 王 军，李国宏. CIS在航天遥感中的应用[J]. 航天返回与遥感，2008，29(2)：42-47.
Wang Jun，Li Guohong. The application of CMOS image sensor in space remote sensing[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing，2008，29(2)：42-47.

[3] 王祖军，刘 静，薛院院，等. CMOS图像传感器总剂量辐照效应及加固技术研究进展[J]. 半导体光电，2017，38(1)：1-7.
Wang Zujun，Liu Jing，Xue Yuanyuan，et al. Progress of total ionizing dose radiation effects and hardening technology on the CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics，2017，38(1)：1-7.

[4] 王祖军，林东生，刘敏波，等. CMOS有源像素图像传感器的辐照损伤效应[J]. 半导体光电，2014，35(6)：945-950.
Wang Zujun，Lin Dongsheng，Liu Minbo，et al. Radiation damage effects on the CMOS active pixel sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics，2014，35(6)：945-950.

[5] 王祖军，薛院院，马武英，等. 电离总剂量效应诱发PPD CMOS图像传感器性能退化的实验研究[C]// 中国核科学技术进展报告(第五卷)，2017年学术年会论文集第6册，2017，5：376-384.

Wang Zujun, Xue Yuanyuan, Ma Wuying, et al. The experimental research of the performance degradation in PPD CMOS image sensors induced by total ionizing dose radiation effects [C]// Progress Report of Nuclear Science and Technology in China (Volume 5), Volume 6 of the 2017 Academic Annual Conference Proceedings, 2017, 5: 376-384.

[6] Goiffon V, Estribeau M, Cervantes P, et al. Influence of transfer gate design and bias on the radiation hardness of pinned photodiode CMOS image sensors[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2014, 61(6): 3290-3301.

[7] Virmontois C, Goiffon V, Magnan P, et al. Displacement damage effects due to neutron and proton irradiations on CMOS image sensors manufactured in deep submicron technology[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2010, 57(6): 3101-3108.

[8] Wang Z, Liu C, Ma Y, et al. Degradation of CMOS APS image sensors induced by total ionizing dose radiation at different dose rates and biased conditions[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2015, 62(2): 2124-2131.

[9] Wang Z, Ma W, Liu J, et al. Degradation and annealing studies on gamma rays irradiated COTS PPD CISs at different dose rates[J]. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 2016, 820: 89-94.

[10] Wang Z, Xue Y, Guo X. Measurement and analysis of the conversion gain degradation of the CIS detectors in harsh radiation environments[J]. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 2018, 886: 134-139.

[11] Goiffon V, Virmontois C, Magnan P, et al. Identification of radiation induced dark current sources in pinned photodiode CMOS image sensors[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2012, 59(4): 918-926.

[12] European Machine Vision Association (EMVA), EMVA Standard 1288[S], 2021, (4): 1-44.

作者简介：

王祖军(1979—)，男，湖北省汉川市人，博士，研究员，从事光电器件及系统的辐照损伤效应研究。