

文章编号 1004-924X(2013)11-2778-07

CCD 与 CMOS 图像传感器辐射效应测试系统

李豫东^{1,2*}, 汪波^{1,2,3}, 郭旗^{1,2}, 玛丽娅^{1,2,3}, 任建伟⁴

- (1. 中国科学院新疆理化技术研究所, 新疆乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要:研制了中荷耦合器件(CCD)与互补金属氧化物半导体有源像素图像传感器(CMOS APS)辐射效应测试系统,用于研究 CCD、CMOS APS 图像传感器的辐射效应并准确评估器件的空间辐射环境适应性。该系统采用光机电一体化结构设计,包括光电响应性能检测、光谱检测、控制及数据处理 3 个分系统,可对器件的光电响应性能、光谱特性进行全面的定量测试与分析。系统的光谱分辨率为 1 nm,工作波段为 0.38~1.1 μm 。目前,该系统与新疆理化所现有的辐照装置结合,构成了光电成像器件辐射效应模拟试验与抗辐射性能评估平台,已为国产宇航 CCD 与 CMOS APS 图像传感器的研制、空间应用部门的成像器件选型工作提供了多次考核评估试验。应用情况表明,该系统可定量检测与评价 CCD、CMOS APS 图像传感器的辐射效应与抗辐射性能,为深入开展光电成像器件的辐射效应研究提供了完善的试验研究条件。

关键词: CCD; CMOS APS; 辐射效应; 抗辐射性能

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2778

Testing system for radiation effects of CCD and CMOS image sensors

LI Yu-dong^{1,2*}, WANG Bo^{1,2,3}, GUO Qi^{1,2}, MA Li-ya^{1,2,3}, REN Jian-wei⁴

- (1. *Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*; 2. *Key Laboratory of Functional Materials and Devices under Special Environments, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*;
4. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)
* *Corresponding author, E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn*

Abstract: A radiation effect test system for Charge Coupled Device(CCD) and Complementary Metal Oxide Semiconductor Transistor Active Pixel Sensor(CMOS APS) image sensors was developed to further study the space radiation effects of these devices and to accurately evaluate their space radiation adaptability. The system is an integrated optic-mechanical-electric equipment, and contains three

收稿日期: 2013-05-03; **修订日期:** 2013-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 11005152); 中国科学院西部之光西部博士科研基金资助项目(No. XBBS200911)

subsystems for testing photoelectric responses, spectrum response and processing output data. It is able to comprehensively and quantitatively test and analyze the photoelectric response and spectral characteristics of the devices. The system shows its spectrum range and spectrum resolution to be 0.38 to 1.1 μm and 1 nm, respectively. The system has been combined with the irradiation facilities in Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry to constitute a platform for radiation effect simulation experiments and anti-radiation performance evaluation of photo-electronic imaging devices. Currently, the system has provided a strong support for the research & development of domestic anti-radiation CCD and CMOS APS devices, including type-selection, examination and evaluation of imaging devices of space sectors. The results show that this system can satisfy the requirements of radiation effect research on CCD and CMOS devices.

Key words: CCD; CMOS APS; radiation effect; anti-radiation performance

1 引言

电荷耦合器件(CCD)、互补金属氧化物半导体有源像素图像传感器(CMOS APS)等光电成像器件是卫星与空间光学载荷的核心器件,其空间应用可靠性直接关系卫星与载荷的在轨性能与运行寿命^[1-3]。然而,空间辐射环境会对上述光电成像器件产生辐射损伤,从而导致器件性能退化甚至功能失效^[4-7]。因此,上述器件的空间辐射效应研究、抗辐射加固设计与抗辐射性能评估,是保证卫星与载荷在轨性能与运行寿命必须解决的关键问题。而器件的辐射效应的测试分析、抗辐射性能检测评估是解决问题的关键。

目前,美国、西欧研制与应用的宇航 CCD、CMOS APS 的抗辐射性能达到了很高的水平,一方面得益于其先进的器件工艺与制造技术,另一方面还得益于器件辐射效应的测试分析与检测评估工作的深入开展^[6-10]。在国外,美国国家航空航天局(NASA)、喷气推进实验室(JPL)、UNISYS 等航天机构均有专用于该类器件的检测设备与试验测试条件,并在此基础上形成了试验评估规范,用于器件的空间应用选型及考核评估试验。Advantest、Teradyne、Pulse Instruments 等国际知名测试设备制造商也都有针对光电成像器件测试分析的自动测试设备(ATE)。近几年,国内也越来越重视抗辐射加固 CCD、CMOS APS 技术及其在空间中的应用,但是器件的研制能力与空间应用水平与国外相比还有较大差距。主要制约因素之一就是缺乏相应的试验测试条件。目前,国内还没有国产的此类专用试验设备,如果引

进国外设备不仅需要消耗巨额费用,而且还需要进行光机电系统集成才能满足试验要求,不能保证系统的适应性与易用性。为突破以上制约,本文研制了光电成像器件抗辐射性能检测系统。系统的方案设计融合了辐射效应试验技术、光机系统设计与制造技术、计算机软硬件设计技术,具有测试功能全面、通用性强和测量范围宽等特点。它适用于不同种类的 CCD 与 CMOS APS 的辐射效应测试评价。

2 检测系统概述

检测系统的研制广泛且深入地参考了国内外光电成像器件的测试评价技术^[11-23],该系统可对器件的暗信号、电荷转移效率(CCD)、饱和输出电压、响应度、噪声、非均匀性、动态范围、信噪比、传递函数、光谱响应等主要参数进行定量测试。检测系统如图 1 所示。



图 1 检测系统实物图

Fig. 1 Photo of testing system

器件的辐射效应试验与测试流程如图 2 所示。试验部分主要包括辐照过程与退火过程,试验测试包括辐照前、辐照后与退火后的测试。在器件受辐射前,先利用检测系统测试器件的初值;然后,当器件受辐射达到某一辐照剂量或退火达到某一时间时,再对器件性能参数进行测试;对比和分析受辐射前后、退火前后器件的性能参数,即可获得器件的辐射效应规律,最终准确评价器件的抗辐射性能。

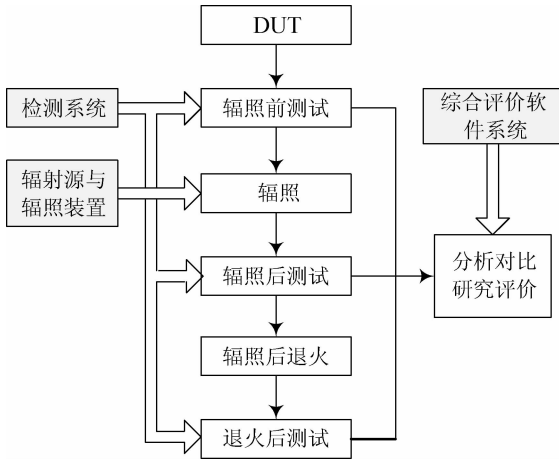


图 2 光电成像器件辐射效应试验与测试流程框图
Fig. 2 Flow chart of experiment and test for radiation effect of photo-electronic imaging devices

图 3 为系统的组成框图。整套系统按照功能可划分为光电响应性能检测、光谱检测、控制及数据处理(简称控制分系统)3 个分系统。测试时,先将被测器件安装在驱动及信号处理电路组件上;然后将电路组件放置在高精度光学导轨上,控制分系统可控制多维精密调整机构,使被测器件与各测试分系统光学对准;被测器件输出的视频信号经信号处理电路转换为数字信号,最终通过计算机处理,获得器件的性能参数。CCD 与 CMOS APS 受辐照后,辐射可导致器件的响应度、非均匀性、光谱响应等多项特性参数在较大范围内变化。因此,系统的光源必须在较大范围内连续可调,电路需具备良好的适应性,检测装置具有较高的精度和良好的稳定性。根据项目验收测试结果,系统达到的技术指标如下:工作波段为 $0.38\sim 1.1\ \mu\text{m}$;光谱分辨率为 $1\ \text{nm}$;A/D 量化等级为 14 位;均匀光动态范围为 80 dB;重复性误差 $\leq 0.54\%$;测量绝对值不确定度 $\leq 6.03\%$;光源

稳定性 $\leq 1\%/h$ 。

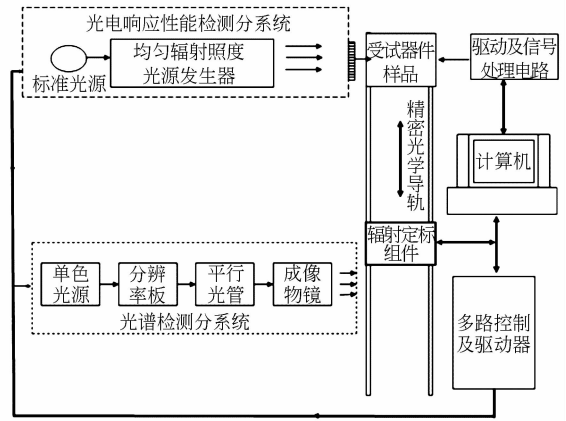


图 3 测试系统的组成框图
Fig. 3 Constitution of testing system

3 分系统的组成与具体设计

3.1 光电响应性能测试分系统

光电响应性能测试分系统为试验器件提供宽动态范围、高均匀度和高稳定度的光辐射照度,其框图与实物图如图 4 所示。该分系统主要包括标准辐射光源和照明灯组、均匀辐射照度光源发生器,此外还有连续辐射照度调节机构、监视探测器等单元组件。

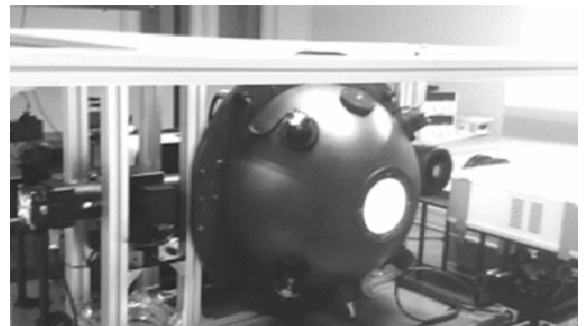
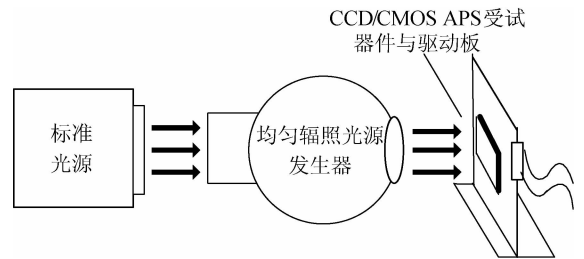


图 4 光电响应性能检测分系统框图与实物图
Fig. 4 Frame and photo of photo-electric response performance testing subsystem

各单元组件的功能为:标准辐射光源和照明灯组通过照明光路为受试器件提供照明光源;均匀辐射照度光源发生器为试验器件提供均匀光辐射照度,其均匀性优于 3%,并适用于光辐射照度渐变的情况;连续辐射照度调节机构为试验器件提供连续变化的辐射照度,并实现高动态范围;控制电机组通过控制及数据处理分系统控制实现照明光源的位置和照度调整;监视探测器实时监测光源的稳定性和绝对辐射照度值。

该分系统结合控制及数据处理分系统实现对器件暗信号、电荷转移效率(CTE)、饱和输出电压、电荷电压转换因子(CVF)、固定图像噪声、响应线性度、响应非均匀性、动态范围、信噪比等性能参数的测试。

3.2 光谱检测分系统

光谱检测分系统用于光电成像器件光谱响应度、对比度传递函数(CTF)的测试,其组成框图与实物图如图 5 所示。该分系统由单色(窄带)照明光源、分辨率板、平行光管、成像物镜以及精密六维光机调整机构组成。

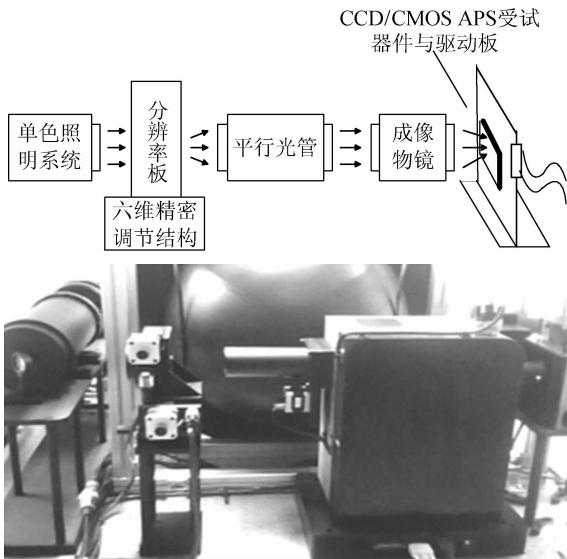


图 5 光谱检测分系统框图与实物图

Fig. 5 Frame and photo of spectral performance testing subsystem

各组件功能如下:单色照明光源由卤素灯与干涉滤光片组合而成,为受试器件的对比度传递函数、光谱响应测试提供单色照明光源;分辨率板是按照器件像元尺寸和成像物镜光学参数设计加工的具有一定对比度的黑白透射光栅图靶,分辨

率板的空间频率与成像器件的截止频率匹配。为适应不同像元尺寸的 CCD、CMOS APS,设计了一系列不同空间频率的分辨率板;平行光管使分辨率板成像在无穷远处,为被测器件模拟一个无穷远的物像关系;成像物镜将分辨率板通过平行光管所成的无穷远像作为目标,成像在待测器件的光敏像元上;分辨率板安装在六维精密调整机构上,通过三维角度空间和三维位置空间的调整,精密调整分辨率板线条与器件像元的光学共轭关系。此外该分系统还包括精密电机组件及控制开关组件等。

3.3 控制与数据处理分系统

该分系统主要包括驱动和信号提取电路、控制计算机和多路控制及驱动器、辐射定标组件等,用于对系统的控制、数据的采集和处理等,通过对测试数据分析处理完成对器件的性能评价。该分系统还包括各种电源组、控制器以及数据通讯传输接口等。

驱动和信号提取电路组件是该分系统中最关键的部分,其原理如图 6 所示。为使测试系统适用于多种 CCD、CMOS APS 的测试,需要提供与各种规格的图像传感器相匹配的驱动与信号处理模块,该模块包括模拟前端与视频信号处理电路。对于不同封装形式的待测器件,采用不同的模拟前端电路与之进行匹配。模拟前端电路上安装有与待测器件适配的接插件和相应的视频信号前置放大器。经放大的初级视频信号通过视频电缆输入至视频信号处理电路;对不同器件的时序驱动信号,设备可在系统计算机控制下通过现场可编程门阵列(FPGA)在线编程,经多功能连接器输出到模拟前端电路上,为待测器件提供规定的时序驱动信号。视频信号处理电路包括信号放大、滤波、相关双采样和模/数转换(ADC)电路。该单元电路能够有效抑制电路噪声,提高系统测试精度。该电路输出的数字图像信号经 FPGA 整

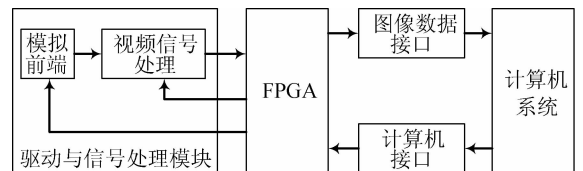


图 6 驱动和信号提取电路组件框图

Fig. 6 Components of drive & signal-extraction circuit

合、预处理后输入至计算机系统中进行分析和处理。上述方案可在最大程度上解决目前光电成像器件光电性能测试设备通用性的问题。

辐射标定组件用于校准每个分系统输出的绝对光辐射照度,它包括积分球、辐射探测组件、微弱信号检测器等。软件包括测试任务管理、调整机构的动作控制、数据采集与存储、数据处理与算法应用、结果显示等功能。测试任务管理包括相对光谱响应曲线、对比度传递函数、辐射响应性能测试等选项。调整机构的动作控制根据选项指令进行光机电定位调整控制或状态提示,并记录相应的参量;采集控制是指采集成像器件的 DN 数码,控制采集像元数、行(帧)数或控制积分时间;原始数据存储将采集到的原始数据按约定的格式、路径、文件名保留在计算机硬盘上,以便于后续处理时的识别和区分。数据处理与算法应用是按照各项参数的定义和算法读取原始数据进行的。整套软件采用 Visual C++、Visual Basic、MATLAB 语言混合编程实现。

4 检测系统的应用

该系统与新疆理化所现有的辐照装置(大型⁶⁰Co-γ源、电子加速器、低剂量率⁶⁰Co-γ源)结合,构成了光电成像器件辐射效应模拟试验和抗辐射性能评估平台。目前,该平台已面向航科集团、中科院、电子科技集团的空间应用部门及器件研制单位开展了多次元器件辐射效应与抗辐射性能评估试验。

图 7 是某国产 TDI CCD 的⁶⁰Coγ源辐照与退火试验结果。由图可较容易判断出暗信号对 γ 辐照造成的电离损伤敏感,而光谱响应在辐照前后没有明显变化,不是电离损伤敏感参数。

图 8 是某国产 CMOS APS 的 1.8 MeV 电子辐照与⁶⁰Coγ源辐照的对比试验结果。由图可看出,饱和输出电压对 γ 辐照造成的电离损伤敏感,且 1.8 MeV 电子辐照也造成了电离辐射损伤;而 1.8 MeV 电子辐照下器件光谱响应的变化,则是由于 1.8 MeV 电子辐照不仅产生电离损伤,还产

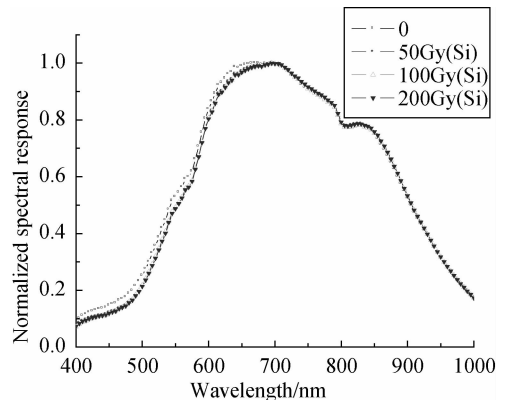
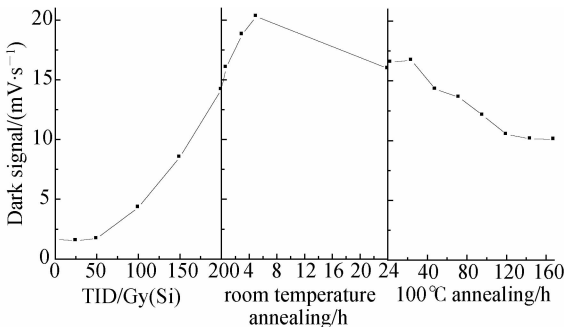


图 7 TDI CCD 的暗信号、光谱响应随 γ 辐照和退火的变化

Fig. 7 Variation of dark signal and spectral response of TDI CCD with γ-irradiation and annealing

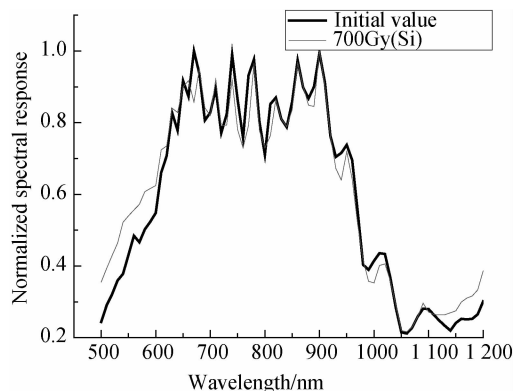
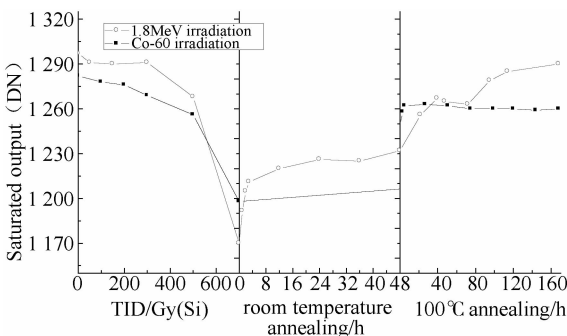


图 8 CMOS APS 的饱和输出电压、光谱响应随 γ 电子辐照的变化

Fig. 8 Variation of saturation output voltage and spectral response of CMOS APS with γ&electron irradiation

生了位移损伤。

图 9 为国内某遥感卫星应用的进口 $4\ 096 \times 96$ TDI CCD ^{60}Co γ 辐照试验数据。辐照总剂量达到 80 krad(Si), 器件的光响应灵敏度下降了 9%, 而

动态范围随辐射剂量增加几乎呈线性下降, 最终下降了近 20%。将该测试结果结合卫星的轨道辐射环境估算及运行寿命要求, 即可判断器件是否能满足卫星的设计要求。

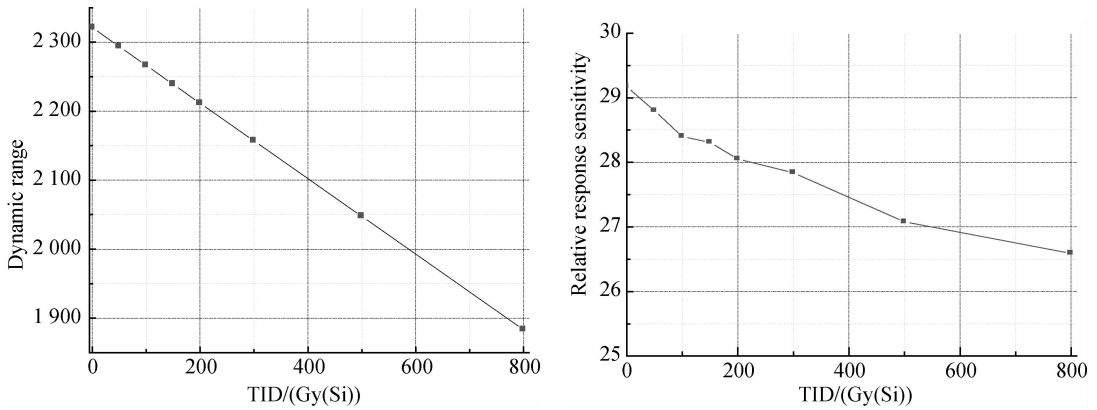


图 9 TDI CCD 的动态范围、相对响应度随 γ 辐照的变化

Fig. 9 Variation of dynamic range and relative responsivity of TDI CDD with γ -irradiation

5 结 论

本文设计的测试系统可全面获得 CCD、CMOS APS 的辐射效应规律, 定量评价器件的抗辐射性能, 为深入开展空间应用光电成像器件的辐射效应研究提供完善的试验研究条件。如果更换

红外、紫外光源, 并在光机结构方面略作改动, 也适用于部分红外或紫外成像器件的辐射效应测试与评估。该系统可资源共享、降低成本, 并逐步实现成像器件辐射效应模拟试验的标准化和规范化, 并面向全国航天部门和光电器件研制单位提供试验服务, 为我国航天光电产品抗辐射能力的整体提高提供有效保障, 并促进国产宇航级光电成像器件的发展。

参考文献:

- [1] 薛旭成, 李洪法, 郭永飞. 高速 CCD 成像电路抗串扰技术[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 611-616.
XUE X CH, LI H F, GUO Y F. Anti-crosstalk techniques for hing-speed CCD imaging circuit [J]. *Chinese optics*, 2011, 4(6): 611-616. (in Chinese)
- [2] 郭敬明, 魏仲慧, 何昕, 等. CCD 星图模拟器的设计及验证[J]. 中国光学, 2010, 3(5): 486-493.
GUO J M, WEI ZH H, HE X, *et al.*. Design of CCD star map simulator and its validation [J]. *Chinese optics*, 2010, 3(5): 486-493. (in Chinese)
- [3] 孙宏海, 刘艳滢. 两种高速 CMOS 图像传感器的应用与测试[J]. 中国光学, 2011, 4(5): 453-460.
SUN H H, LIU Y Y. Application and test of two different hing-speed digital CMOS image sensors [J]. *Chinese optics*, 2011, 4(5): 453-460. (in Chinese)
- [4] HOPKINSON G R. Radiation effects on solid-state imaging devices[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 1994, 43(1-2): 79-91.
- [5] KONSTANTIN D S. *Radiation damage effects in CCD sensor for tracking application in high energy physics*[D]. Japan: Division of Energy and Materials Science Graduate School of Science and Engineering Saga University, 2001: 11-19.
- [6] PICKEL J C, KALMA A H, HOPKINSON G R, *et al.*. Radiation effects on photonic imagers-a historical perspective [J]. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 2003, 50(3): 671-688.
- [7] SMITH D R. *Radiation damage in charge coupled devices*[D]. Leicester: The degree of Doctor of Philosophy at the University of Leicester, 2003: 38-52.
- [8] HOPKINSON G R. Radiation effects on CCDs for space borne acquisition and tracking applications [J]. *Radiation and its Effects on Devices and Systems*, 1991. RADECS 91., *First European Conference on. Sep*, 1991: 368-372.
- [9] HOPKINSON G R. Cobalt60 and proton radiation effects on large eormat, 2-D, CCD arrays for an earth imaging application[J]. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 1992, 39(6): 2018-2025.
- [10] HOPKINSON G R. Proton effects in charge-coupled devices [J]. *IEEE Trans. on Nuclear Sci-*

ence, 1996, 43(2): 614-627.

- [11] FELTZ J C. Development of the modulation transfer function and contrast transfer function for discrete systems, particularly charger-coupled devices [J]. *Opt. Eng.*, 1990, 29(8): 893-904.
- [12] HONG W, JOHNSTON E, BINNIE D T. Experimental approach for measuring resolution of complementary metal oxide semiconductor imaging systems [J]. *IEEE; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1998, 37(9): 2565-2573.
- [13] CHERYL J M, PAUL W M. CCD radiation effects and test issues for satellite designers [J]. *NASA-GSFC Multi-Engineering Disciplinary Support Contract Task*, 2003, 1058: 1-43.
- [14] 张立国, 李豫东, 刘则洵, 等. TDI CCD 的总剂量效应及测试 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 2924-2930.
ZHANG L G, LI Y D, LIU Z X, *et al.*. Influence of total dose effects on TDI-CCD and corresponding test methods [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2924-2930. (in Chinese)
- [15] 任建伟, 王志, 李宪圣, 等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1186-1190.
REN J W, WAN ZH, LI X SH, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1186-1190. (in Chinese)
- [16] 王德江, 董斌, 李文明, 等. TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2500-2506.
WANG D J, DONG B, LI W M, *et al.*. Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2500-2506. (in Chinese)
- [17] HOLST G C. *CMOS/CCD Sensor and Camera System* [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2007.
- [18] HOLST G C. *Electro-Optical Imaging* [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2008.
- [19] IRE K. A technique for evaluation of CCD video-camera noise [J]. *IEEE Transaction on Circuits and System for Video Technology*, 2008, 18(2): 280-283.
- [20] MAGNAN P, ESTRIBEAU M, ROLLAND G, *et al.*. Theoretical evaluation of MTF and charge collection efficiency in CCD and CMOS image sensors [J]. *SPIE*, 2009, 7427: 23-34.
- [21] LAMBERT B M, HARBOLD J M. Experimental methods for measurement of the modulation transfer function (MTF) for time delay and integrate (TDI) charge coupled device (CCD) image sensors [J]. *SPIE*, 2009, 7405: 75-83.

作者简介:



李豫东(1982—),男,新疆伊犁人,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事光电成像器件空间辐射效应方面的研究。E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn



玛丽娅(1987—),女,新疆库尔勒人,硕士研究生,主要从事光电材料与器件空间辐射效应的研究。E-mail: mari-axjipc@gmail.com



汪波(1988—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事 CCD, CMOS 图像传感器的空间辐射效应研究。E-mail: chenxing198889@163.com



任建伟(1956—),男,吉林长春人,高级工程师,研究生导师,主要从事光谱辐射测试设备的开发研制和光学遥感辐射校正方面的研究。E-mail: Renjw@ciomp.ac.cn



郭旗(1964—),男,新疆乌鲁木齐人,研究员,博士生导师,主要从事光电材料与器件空间辐射效应方面的研究。E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn