

文章编号 1004-924X(2014)12-3153-07

## 像增强型图像传感器在总剂量辐照下的光响应度

闫劲云\*, 江 洁, 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要:**采用 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线对像增强型图像传感器进行了总剂量辐照实验,以便评估该器件在空间总剂量辐照下的微光探测性能。当总剂量达到预定剂量点时,采用离线测试的方法定量测试了器件的光响应度变化情况。实验结果表明,随着辐照总剂量的增加,器件的光响应度迅速下降;当总剂量达 60 krad(Si)时,相对光响应度降低至辐照前的 6%。根据像增强型图像传感器的构成,分析了光响应度下降的原因,并推导了光响应度随辐照剂量变化的经验公式。实验显示,提高像增强型图像传感器的增益电压可补偿光响应度的衰减,总剂量达 25 krad(Si)时,增益提高 0.23 V 其光响应度即可恢复至未接受辐照前的 100%,并保持良好的微光探测能力。研究表明,像增强型图像传感器可承受 25 krad(Si)的总剂量辐射。

**关键词:**像增强型图像传感器;互补金属氧化物半导体(CMOS);总剂量辐射效应;光响应度;增益补偿

**中图分类号:** TN386.5; TN144 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3153

## Photoelectric response of ICMOS on total dose irradiation

YAN Jin-yun\*, JIANG Jie, ZHANG Guang-jun

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology of the Ministry of Education, School of Instrumental Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

\* Corresponding author, E-mail: 2032606@163.com

**Abstract:** An irradiation experiment for an image-intensified sensor (Intensified Complementary Metal-oxide Semiconductor, ICMOS) was performed with a  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray source to evaluate its weak-light-detecting ability under the total dose irradiation. When the total dose of irradiation reached the predetermined point, the change of photoelectric response capability of the sensor was measured quantitatively by an off line method. The experiment results show that as the total dose of irradiation increases, the photoelectric response capability decreases rapidly. When the total dose of irradiation reaches 60 krad (Si), the photoelectric response capability is reduced to 6%. The causes of decline of the photoelectric response capability were analyzed according to the components of the image-intensified sensor and empirical equations of the decline of the photoelectric response capability were also derived. The experiments demonstrate that the decline of the photoelectric response capability is compensated by improving the voltage gain of the image-intensified sensor. When the total dose of irradiation reaches 25 krad (Si), the photoelectric response capability still maintains 100% by improving the voltage gain of the image-intensified sensor of 0.23 V meanwhile maintaining a good weak-light-detecting ability. These findings show

收稿日期:2014-01-24;修订日期:2014-03-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61222304);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20121102110032)

that the image-intensified sensor is able to withstand 25 krad(Si) of the total dose irradiation.

**Key words:** image-intensified sensor; Intensified Complementary Metal Oxide Semiconductor (ICMOS); total dose effect; photoelectric response; gain compensation

## 1 引言

像增强型图像传感器是在微弱光照条件下,实现光与电子图像信息之间相互转换、增强、处理、显示的一种器件,如增强型电荷耦合器件(Intensified Charged Coupled Device, ICCD)和增强型互补金属氧化物半导体(Intensified Complementary Metal-oxide Semiconductor, ICMOS)。这种器件能将可见光、X光、极紫外光、极微弱星光、近红外辐射和几千亿分之一秒内瞬变的景物图像进行光谱和光电转换、图像增强,变成易于观测的、亮度被增强的可见光图像,因此在微光夜视、天文观测、X射线( $\gamma$ 射线)图像增强和高速电子摄影快门等技术中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。同时它们还具有体积小、重量轻、无需制冷等优点<sup>[2]</sup>,故越来越多地应用在太空任务中。例如搭载于 SOHO 飞船上的日冕光谱分析仪(Coronal Diagnostic Spectrometer, CDS)、2001年6月发射的可调X光成像仪(TXI)以及2010年美国国家航空航天局(NASA)发射的 RAISE 光谱仪<sup>[3]</sup>。但是空间高能辐射产生的辐射效应会使像增强型图像传感器的性能下降,表现为光响应度降低、暗电流增大、固定模式噪声增加等<sup>[4]</sup>。因此,这类器件抗辐射性能的研究备受关注。

目前,国内学者对 CCD 光电耦合器件和 CMOS 图像传感器的抗辐射性能进行了大量研究,并取得了许多有价值的成果<sup>[5-7]</sup>。张立国等研究了应用于某空间相机的 TDI-CCD 光电响应性能及对比度传递函数受辐照前后的变化情况<sup>[8]</sup>。郭永飞等分析了空间辐射对遥感相机 CCD、现场可编程门阵列(FPGA)和集成电路的损伤机理,并提出了相应的抗辐射措施<sup>[9]</sup>。周彦平等考察了商用 CMOS 图像传感器应用于空间的可行性<sup>[10]</sup>。李豫东等建立了 CCD 辐射损伤参数的测试方法,为 CCD 抗辐射评估提供了良好的技术支撑<sup>[11]</sup>。

但是国内外关于 ICCD 和 ICMOS 的抗辐射性能研究较少。Katake 等使用<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线对 IC-

MOS 进行了总剂量辐照实验的评估。实验得到,ICMOS 的暗电流和固定模式噪声在总剂量小于 10 krad(Si)时基本保持不变;在总剂量大于 10 krad(Si)时呈线性增加。暗电流由初始值 0.193 nA/cm<sup>2</sup> 增加到 100 krad(Si)下的 2.568 nA/cm<sup>2</sup>。测试靶标的成像实验表明,当总剂量大于 10 krad(Si)时,输出图像变暗,说明辐照后 ICMOS 的光响应度下降。由于文献只给出了定性说明,未做定量分析,而光响应度是表示像增强型图像传感器微光探测能力的关键参数,因此本文着重研究了空间辐射效应对像增强型图像传感器光响应度的影响。文中定量分析了光响应度随总剂量辐照的变化,为像增强型传感器在空间环境的应用提供更准确的评估。

## 2 辐照实验样品及条件

### 2.1 辐照实验样品

实验样品为 ICMOS 传感器,其结构示意图见图 1。它由微通道板式图像增强器(简称像增强器)与 CMOS 有源像素图像传感器(CMOS Active Pixel Sensor, CMOS APS)耦合而成。其中,像增强器由输入窗、光阴极、微通道板(Micro-Channel Plane, MCP)、荧光屏、锥形光纤面板和高压电源构成。输入窗材质为光纤面板,内表面镀有多碱光阴极薄层,入射光子因光电效应在光阴极激发产生光电子。MCP 是一块微细空心通

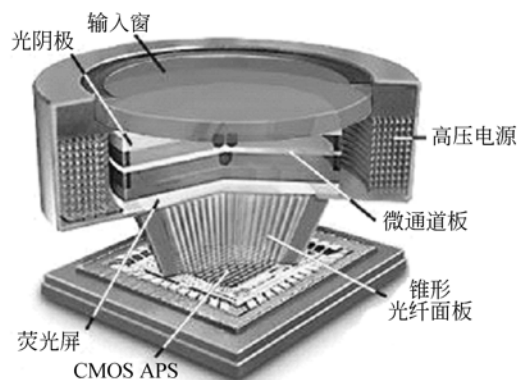


图 1 像增强型图像传感器结构

Fig. 1 Framework of image-intensified sensor

道的(孔径为  $6\ \mu\text{m}$ )玻璃纤维面板,光电子在此完成电子倍增。荧光屏为表面依次镀荧光粉层和铝膜的光纤面板,倍增后的电子在荧光层重新激发出光子。最后光子图像经锥形光纤面板耦合到图像传感器进行成像。

## 2.2 辐照实验条件

本文采用中科院新疆理化所  $5.18 \times 10^{15}\ \text{Bq}$  的  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线源进行总剂量辐照实验。辐照前,采集 ICMOS 的各项参数初始值。实验中仅 ICMOS 接受辐照,ICMOS 通过 30 cm 线缆与偏置电路连接,搭建铅砖屏蔽室对偏置电路进行防护。辐照中样品加正常工作电压作为偏置。剂量率为  $4\ \text{rad}(\text{Si})/\text{s}$ ,当累积剂量达到 5, 10, 15, 20, 25 和 30 krad(Si)时,分别进行移位测量。然后以  $16\ \text{rad}(\text{Si})/\text{s}$  的剂量率,在达到预定剂量点 40, 60, 80, 100 和 120 krad(Si)时,再分别进行移位测量,直到所有辐照剂量点完成测量。移位测试时间小于 30 min,其中当累积辐照剂量达 25 krad(Si)后,对样品常温退火 14 h。

## 3 光响应度测试及结果

当 ICMOS 的增益电压和曝光时间一定时,入射光照度与 ICMOS 输出信号存在以下关系<sup>[8]</sup>:

$$\mu_y - \mu_{\text{dark}} = R_V E, \quad (1)$$

式中: $\mu_y$  为 ICMOS 输出图像的灰度平均值; $\mu_{\text{dark}}$  为暗信号(暗场下 ICMOS 输出图像的灰度平均值); $E$  为光照度; $R_V$  为 ICMOS 在增益电压  $V$  下的光响应度,它表征了 ICMOS 的光电转换能力。在一定的增益电压范围内,ICMOS 的光响应度与像增强器的增益电压呈指数关系。

由于测试系统中积分球光源的光强值为相对值,所以本文所指的光响应度均为相对光响应度。设置 ICMOS 的增益电压为 3.0 V,曝光时间为 2 ms,调节积分球光阑,逐渐增加积分球辐照亮度,计算对应辐照亮度下 ICMOS 输出图像的灰度平均值,由此绘制出 ICMOS 输出图像灰度平均值与暗信号之差随积分球相对光强变化的曲线,如图 2 所示。曲线近似为一直线,通过线性拟合求得直线的斜率即为相对光响应度。从图 2 中可以看出,随着辐照剂量的增大,相对光响应度下降。

相对光响应度随辐照总剂量的变化曲线见

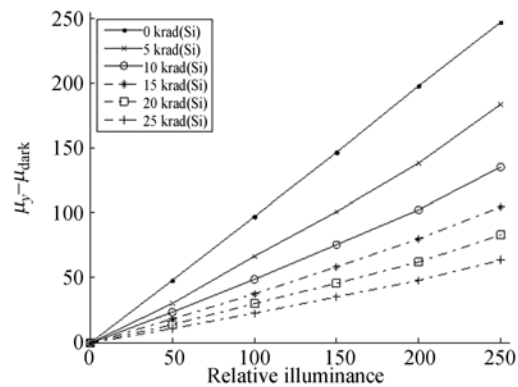


图 2 ICMOS 输出信号随积分球相对光强的变化

Fig. 2 ICMOS output versus relative illuminance

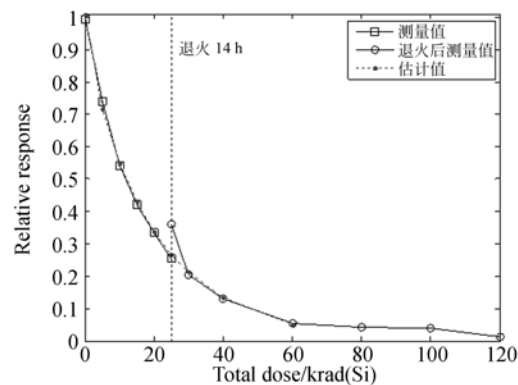


图 3 ICMOS 相对光响应度随总剂量的变化关系

Fig. 3 Relative response of ICMOS as a function of total dose

图 3。理想状态下,辐照前的相对光响应度为 100%。由图可知,随总剂量的增加,ICMOS 的相对光响应度迅速衰减。其中在 25 krad(Si) 剂量点下,经过 14 h 退火后,相对光响应度有一定程度的恢复。当总剂量达 60 krad(Si)时,相对光响应度降至辐照前的 6%。

在  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线的辐射下,像增强器和 CMOS APS 的相对光响应度均产生下降。由像增强器的结构可知,辐照对两者的影响是独立的,因此 ICMOS 的光响应度为:

$$R_{\text{ICMOS}} = R_I R_{\text{APS}}, \quad (2)$$

其中: $R_I$  为像增强器的光响应度, $R_{\text{APS}}$  为 CMOS APS 的光响应度。

同一型号 CMOS APS 单独的抗辐照测试表明,其相对光响应度随辐照总剂量的增加近似呈线性衰减,如图 4 所示。

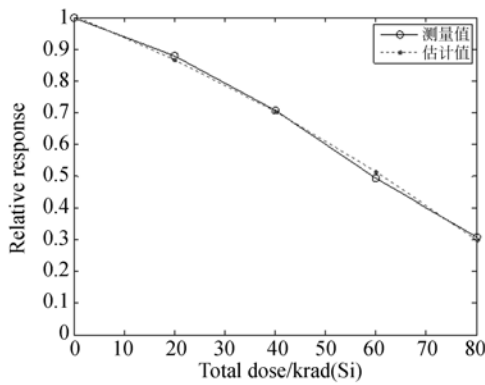


图 4 CMOS APS 相对光响应度随总剂量的变化关系  
Fig. 4 Relative response of CMOS APS as a function of total dose

为了更准确地描述 CMOS APS 的相对光响应度随辐照总剂量的变化,本文对图 4 中的相对光响应度测量值进行二阶多项式拟合,拟合后的公式为:

$$R_{\text{APS}} = -3.01 \times 10^{-5} D^2 - 6.43 \times 10^{-3} D + 1.01, \quad (3)$$

其中:  $D$  为辐照总剂量。由式(3)计算可得相对光响应度的估计值,如图 4 所示。对比图 3 和图 4 可知,当总剂量达 60 krad(Si)时,CMOS APS 的相对光响应度降低至 49.3%,而 ICMOS 已衰减至 6%,因此导致 ICMOS 光响应度下降的主要因素是像增强器的辐射损耗。像增强器内含有多个级光纤元件,而光纤元件对电离辐射非常敏感。在  $\gamma$  射线的辐射作用下,这些光纤元件会发生变色、变硬、变脆、分解、破坏等一系列物理和化学变化,从而产生点缺陷、位错和色心等各种缺陷<sup>[12]</sup>。其中,色心对可见光范围内的传导光有强烈的吸收作用,是导致光纤元件衰减的主要原因。辐射产生的色心不稳定,存在退火效应,光纤辐射损耗是色心产生和退化共同作用的结果<sup>[13]</sup>。大量研究表明幂律模型可较好地描述光纤辐射损耗  $A_{\text{RIA}}$ ,再结合 RIA 的定义有<sup>[13-15]</sup>:

$$A_{\text{RIA}} = \frac{1}{l} \ln \left( \frac{T_0}{T_1} \right) = \alpha_0 D^\beta, \quad (4)$$

其中: $l$  为样品厚度,  $T_0$  和  $T_1$  分别为辐照前后光纤的透过率,  $D$  为辐照总剂量,  $\alpha_0$  和  $\beta$  为经验常数。定义像增强器的相对光响应度为:

$$R_1 = \frac{R_0}{R_1} = \frac{GT_1}{GT_0}, \quad (5)$$

其中:  $R_0$  和  $R_1$  分别为辐照前后像增强器的光响应度;  $G$  为像增强器的增益因子,它包括光阴极的量子效率、MCP 的电子倍增增益和荧光屏的发光效率,这些参数对  $\gamma$  射线的辐射不敏感。由式(4)和式(5)推导得到像增强器的相对光响应度辐照损伤的经验公式为:

$$R_1 = e^{-\alpha D^\beta}, \quad (6)$$

其中:  $\alpha$  和  $\beta$  为经验常数。最后由式(2)和式(6)可得 ICMOS 的相对光响应度的经验公式:

$$R_{\text{ICMOS}} = e^{-\alpha D^\beta} R_{\text{APS}}. \quad (7)$$

按式(6)拟合图 3 中 ICMOS 相对光响应度的测量值,图 3 中虚线为拟合后的相对光响应度 ( $\alpha=0.8084$ ,  $\beta=0.0837$ )。拟合结果与实验数据相吻合,说明构成像增强器的光纤元件受辐照后产生衰减,像增强器灵敏度下降,最终加剧了 ICMOS 相对光响应度的衰减。

ICMOS 异于其它固态成像器件的一个特点是其光响应度受增益电压控制。令曝光时间为 2 ms,增益为 3.0 V,辐照前的相对光响应度为 100%,不同辐照总剂量下 ICMOS 的相对光响应度随增益电压的变化曲线见图 5。

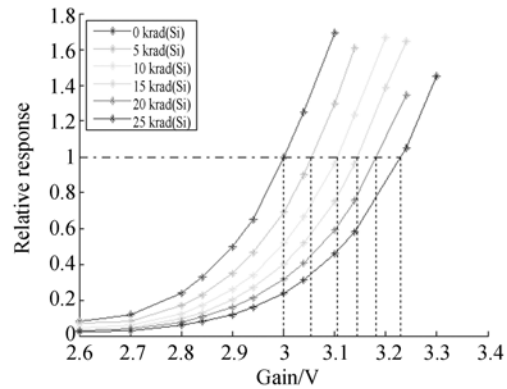


图 5 ICMOS 相对光响应度随增益的变化关系  
Fig. 5 Relative response of ICMOS as a function of gain

由图 5 可知,ICMOS 的相对光响应度受辐照总剂量和增益电压的双重影响,它一方面随总剂量的增加而下降;另一方面则随增益电压的增加而提高,因此可以通过提高增益电压来补偿 ICMOS 光响应度的辐照损失。图 6 为相对光响应度恢复至辐照前水平所需的补偿电压。对补偿电压的测量值进行线性拟合,得到不同总剂量下的

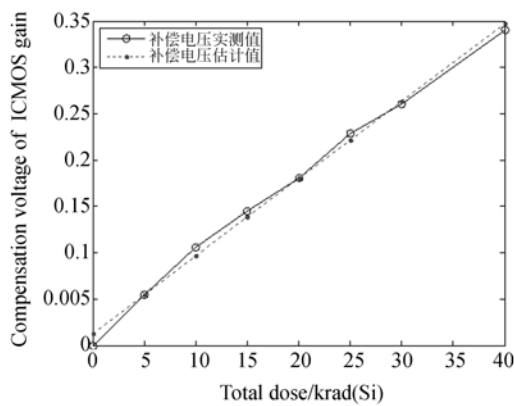


图 6 各剂量点下的补偿电压

Fig. 6 Compensation voltages as a function of total dose

补偿电压公式为:

$$V_{\text{com}} = 0.0083D + 0.0133 \quad (8)$$

图 6 中绘制出了由式(8)计算得到的补偿电压估计值。通过以上分析本文得出了 ICMOS 光响应度随辐照总剂量的一般规律。ICMOS 为微光探测器件,为考察其微光探测能力随辐照总剂量的变化,调节积分球光阑至最小,此时积分球输出微弱光强。在不同总剂量下,ICMOS 输出信号随增益电压的变化见图 7。

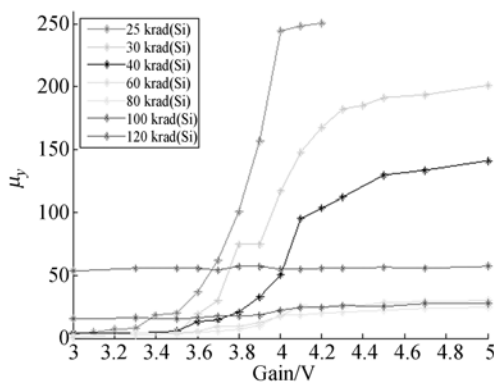


图 7 微光中不同辐照总剂量下 ICMOS 输出随增益的变化关系

Fig. 7 ICMOS output as a function of gain in weak light

在辐照总剂量为 25 krad(Si)状态下,当增益电压提高至 4.0 V 时,输出接近饱和,说明此时器件仍有较好的微光探测能力。在辐照总剂量为 30 和 40 krad(Si)状态下,当增益电压提高至 4.3 V 时,增益接近饱和,继续提高增益,输出趋于平缓,此时器件的微光探测能力下降。当辐照总剂

量为 60 和 80 krad(Si)时,提高增益电压,ICMOS 输出增加不明显,此时器件失去微光探测能力。当辐照总剂量为 100 和 120 krad(Si)时,曲线近似为一条直线,增益对 ICMOS 光响应度的补偿失效,同时 CMOS APS 的暗信号显著增大,分别为 13.7 和 53.4,此时器件的微光探测能力完全失效。当辐照总剂量为 120 krad(Si)时,虽然器件失去了微光探测能力,但在室内正常照明条件下,器件功能并未失效,所得图像如图 8 所示。

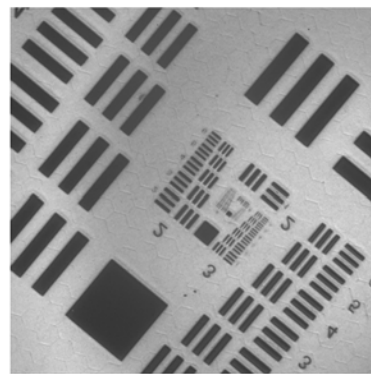


图 8 总剂量为 120 krad(Si)室内灯光明照下 ICMOS 得到的图像

Fig. 8 Image captured by ICMOS under room light with 120 krad(Si) total dose

当 ICMOS 应用于星敏感器时,它要具有良好的微光探测能力,其增益电压一般位于 3.6~3.9 V;当总剂量达 25 krad(Si)时,ICMOS 增益电压提高 0.23 V,其光响应度仍可恢复至辐照前的 100%。虽然进一步提高 ICMOS 增益电压可以补偿更大辐照总剂量造成的光响应度衰减;但当增益电压大于 4.0 V 时,图像噪声增加,同时像增强器的增益接近饱和,因此不宜无限制提高增益电压去补偿辐射导致的光响应度衰减。当 ICMOS 对微光探测能力要求不高时,可以通过适当提高增益电压来补偿辐射导致的光响应度衰减。

## 4 结 论

ICMOS 受辐照影响最显著的变化为光响应度下降。本文推导了光响应度受辐射后衰减的经验公式,以及通过适当提高增益电压进行衰减补偿的

公式。实验结果表明,ICMOS 可以承受 25 krad (Si)的总剂量辐照,通过将增益电压提高至 4.0 V,可以使器件恢复原有的微光探测能力;当总剂量达 60 krad(Si)时,相对光响应度降低至辐照前的 6%,微光探测能力失效。本文的实验和分析对 ICMOS 器件在空间应用具有重要的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 史继芳,杨斌,韩占锁,等. 基于双重模型客观评价微光像增强器的分辨力[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(9): 2260-2265.  
SHI J F, YANG B, HAN ZH S, *et al.*. Objective evaluation of resolution for low-light-level image intensifier based on dual-model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2260-2265. (in Chinese)
- [2] 章明朝,周跃,闫丰,等. “日盲”紫外增强型 CCD 的自动增益控制[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(2): 496-502.  
ZHANG M CH, ZHOU Y, YAN F, *et al.*. Automatic gain control of SBUV-ICCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 496-502. (in Chinese)
- [3] HUBER M C E, PAULUHN A, TIMOTHY J G, *et al.*. *Observing Photons in Space* [M]. New York:Springer, 2010.
- [4] KATAKE A B, OCHOA J, ZBRANEK J, *et al.*. Development and testing of the starcam sg100: A stellar gyroscope [C]. *AIAA Guidance and Control Conference Exhibit*. 2008.
- [5] BOGAERT J, DIERICKX B. Total dose effects on CMOS active pixel sensors [C]. *Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics*, 2000: 157-167.
- [6] 何宝平,陈伟,王桂珍. CMOS 器件<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线,电子和质子电离辐射损伤比较[J]. 物理学报, 2006, 55(7):3546-3551.  
HE B P, CHEN W, WANG G ZH. A comparison of ionizing radiation damage in CMOS devices from <sup>60</sup>Co gamma rays, electrons and protons[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(7): 3546-3551. (in Chinese)
- [7] 王祖军,唐本奇,肖志刚,等. CCD 电离辐射效应损伤机理分析[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(3): 565-570.  
WANG Z J, TANG B Q, XIAO ZH G, *et al.*. The Analysis of mechanism on ionization radiation damage effects on CCD[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2009, 29(3): 565-570. (in Chinese)
- [8] 张立国,李豫东,刘则洵,等. TDI-CCD 总剂量辐射效应及测试[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(12): 2925-2930.  
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): 2925-2930. (in Chinese)
- [9] 郭永飞. 遥感 CCD 相机的抗辐射策略研究[J]. 中国光学, 2010,3(6): 534-545.  
GUO Y F. Anti-radiation techniques for CCD remote sensing cameras[J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(6):534-545. (in Chinese)
- [10] 周彦平,王晓明,常国龙,等. CMOS 图像传感器的辐射实验[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1270-1273.  
ZHOU Y P, WANG X M, CHANG G L, *et al.*. Radiation experiment of CMOS image sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1270-1273. (in Chinese)
- [11] 李豫东,张乐情,郭旗,等. CCD 的辐射损伤参数测试方法[C]. 第十六届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 中国绵阳,2012:135-140.  
LI Y D, ZHANG L Q, GUO Q, *et al.*. Parameter test method for radiation damage of CCDs [C]. *Proceedings of 16th National Annual Conference on Nuclear Electronics & Detection Technology, Mianyang, China*, 2012:135-140. (in Chinese)
- [12] 李荣玉,殷宗敏,王建华,等. 石英光纤抗辐射加固的研究[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(2): 215-217.

## 5 致 谢

感谢中国科学院新疆理化所李豫东老师在实验中给予的帮助,同时对汪波、玛丽娅和王嘉在实验中的大力协助表示感谢。

- LI R Y, YIN Z M, WANG J H, *et al.*. Research on anti-radiation of silica fiber [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(2):215-217. (in Chinese)
- [13] 宋镜明, 郭建华, 王学勤, 等. 光纤辐射致衰减效应[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 58-64.
- SONG J M, GUO J H, WANG X Q, *et al.*. Radiation induced attenuation effect for optical fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 58-64. (in Chinese)
- [14] GRISCOM D L, GINGERICH M E, FRIEBELE E J. Radiation-induced defects in glasses: origin of power-law dependence of concentration on dose [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(7): 1019-1022.
- [15] 盛于邦, 杨旅云, 栾怀训, 等.  $\gamma$  辐照对掺 Er 硅酸盐玻璃吸收和发光特性的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61(11): 116301-1-6.
- SHENG Y B, YANG L Y, LUAN H X, *et al.*. Gamma radiation effects on absorption and emission properties of erbium-doped silicate glasses [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(11):116301-1-6. (in Chinese)

#### 作者简介:



闫劲云(1986—),男,山西朔州人,博士研究生,2008年于哈尔滨工业大学(威海)获得学士学位,2010年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,目前主要从事星敏感器技术的研究。E-mail: 2032606@163.com

#### 导师简介:



江洁(1973—),女,福建莆田人,博士,教授,2000年于天津大学获得博士学位,目前主要研究方向是实时图像处理和天体敏感器技术。E-mail: jiangjie@buaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)