

# 多类图像传感器模组电离辐射损伤对比研究

徐守龙<sup>1,2</sup>, 邹树梁<sup>1,2</sup>, 武钊<sup>1,2</sup>, 罗志平<sup>3</sup>, 黄有骏<sup>4</sup>, 蔡祥鸣<sup>1,2</sup>

(1. 南华大学 核设施应急安全作业技术与装备湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001;

2. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 3. 湖南省核农学与航天育种研究所, 湖南 长沙 410125;

4. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213)

**摘要:**为选择能用于 $\gamma$ 射线辐照环境且最具有加固潜力的图像传感器模组,对比分析了7类传感器模组辐照前后实时采集明、暗图像的参数,研究了不同类型的模拟图像传感器模组及数字图像传感器模组的抗辐射性能,并讨论了辐射损伤机理。实验结果表明: $\gamma$ 射线对图像传感器模组的损伤及干扰程度与模组类型、图像传感器制作工艺、辐照剂量率及总剂量相关;剂量率造成的干扰与剂量率并非呈单纯的线性关系;镜头透镜的透光率随累积剂量的增大而下降;入射 $\gamma$ 射线对采集画面质量的干扰与环境光线强度相关,较弱的真实信号更易被入射光子引入的噪声淹没。以上结果提示,入射 $\gamma$ 射线对图像传感器的损伤及干扰主要是由各像素单元内暗电流以及正向脉冲颗粒噪声引起的。经实验分析,采用互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺的数字摄像机更适用于 $\gamma$ 射线辐射环境中的实时监测,但仍需通过加固手段提高其在辐射环境中工作的可靠性和使用寿命。

**关键词:**图像传感器;电离辐射损伤;总剂量效应;剂量率效应

**中图分类号:** TN946.1; TN65; TL99

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2016)11-2092-09

**doi:** 10.7538/yzk.2016.50.11.2092

## Comparative Study on Ionizing Radiation Damage of Different Types of Image Sensor Modules

XU Shou-long<sup>1,2</sup>, ZOU Shu-liang<sup>1,2</sup>, WU Zhao<sup>1,2</sup>, LUO Zhi-ping<sup>3</sup>,  
HUANG You-jun<sup>4</sup>, CAI Xiang-ming<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Emergency Safety Technology and Equipment for Nuclear Facilities, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;

3. Institute of Nuclear Agricultural Science & Space Mutation Breeding, Changsha 410125, China;

4. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract:** In order to select the type of image sensor module which is suitable for  $\gamma$ -ray irradiation environment and has the most potential ability for radiation hardening, seven types of image sensor modules were studied by analyzing the parameters of bright and dark images before and after irradiation. The radiation resistance of different types of analog and digital image sensor modules was studied, and the radiation damage mecha-

nism was also discussed. The experimental results show that the damage and interference degree of the image sensor module is related to the module type, the process of the image sensor, the irradiation dose rate and the total dose. The radiation damage does not show simple linear relationship with the dose rate. The light transmittance of the camera lens decreases with the increase of the total dose. The interference by the incident  $\gamma$ -ray on the quality of the collected pictures is related to the intensity of the ambient light, and the weaker real signals are more likely to be flooded by noises induced by the incident  $\gamma$ -ray. As a conclusion, the primary damage and interference of the incident  $\gamma$ -ray on the image sensor are caused by the dark current and positive pulse noise in each pixel. According to the experimental analysis, digital module using CMOS technology is more suitable for online monitoring in radiation environment, but it is still necessary to improve the reliability and service life by means of radiation hardening.

**Key words:** image sensor; ionizing radiation damage; total ionizing dose effect; dose rate effect

视频监控系统能在核泄漏事故发生时直接反映事故现场环境信息,帮助应急人员快速、准确地制定应急预案,采取应急措施<sup>[1]</sup>。图像传感器及数字处理芯片是视频监控系统中的核心元器件,均为电离辐射损伤敏感单元<sup>[2-9]</sup>。目前对电子元器件的电离辐射损伤研究大都利用高剂量率来模拟低剂量率环境,但辐射损伤及干扰效应与剂量率相关,且由于退火效应的存在,元器件的损伤并不完全符合线性变化规律<sup>[10-11]</sup>。此外,数字图像处理技术也能对入射光子造成的干扰进行一定程度的修复<sup>[12]</sup>。因此,不能单纯地将图像传感器芯片的辐射干扰及损伤效应作为整个模组的受损情况进行分析,也不应将某一类型模组的电离辐射损伤结论应用到所有类型的模组中。

随着工艺的发展,互补金属氧化物半导体(CMOS)的性能逐渐趋近电荷耦合元件(CCD)。目前,CMOS数字高清图像传感器模组(简称数字模组)直接对图像信号进行处理,并利用网线代替同轴电缆进行传输,大幅提高了图像质量以及信号传输效率<sup>[13]</sup>。同时,数字模组可实现将传感器模块与主板模块分离,并用挠性印刷电路板(FPC)排线连接,从而更有利于抗辐射加固。然而,数字模组虽能捕获更清晰的图像,但当数字信号受到干扰时将会完全失去图像信号,而模拟模组具有较强的抗干扰能力,但画面质量的提升潜力较小<sup>[14]</sup>。因此,需对CCD和CMOS图像传感器的性能以

及模拟模组和数字模组的性能进行对比分析。

大量文献证明, $\gamma$ 射线对这两种图像传感器结构以及数字处理芯片的损伤主要是由电离辐射总剂量效应造成的<sup>[3-4,9]</sup>。辐射将导致暗电流的变化,并且辐射感生电子-空穴对会使局部像素电荷收集达到饱和产生噪点<sup>[5]</sup>。本文通过分析不同剂量率 $\gamma$ 射线电离辐射条件下,多类图像传感器系统输出实时暗图像平均灰度、彩色图像色彩通道强度及亮度等参数的变化程度,对比各类模拟及数字模组的实际抗辐射能力并分析其辐射损伤机理,从而挑选出具有更大加固潜力的模组类型。

## 1 实验方案及数据处理方法

### 1.1 实验样品与实验过程

#### 1) 实验样品

采用7类商用图像传感器模组作为样品,分组进行实验,每组样品均包含7类商用图像传感器模组各1个。选取2组样品,分别在标准光源照射及遮光材料遮盖2种条件下同时进行辐照实验,实验样品编号、类型及参数如表1所列。

#### 2) 实验方案

采用<sup>60</sup>Co单栅板 $\gamma$ 放射源,光子能量为1.17、1.33 MeV,放射源平均活度为680 kBq。初始状态时,放射源处于栅板下源库中,便于待辐照实验样品及剂量计的放置。源板从初始位上升到预定位共需50 s。剂量率采用重铬酸银

表 1 实验样品参数  
Table 1 Parameter of experimental sample

样品编号	板机类型	图像传感器工艺	图像传感器型号	分辨率	核心方案
1#	数字	CMOS	OV9712	1 280×800	HI3518C
2#		CMOS	AR0130	1 280×960	HI3518C
3#		CMOS	SONYIMX 222LQJ	1 984×1 225	HI3516
4#	模拟	CCD	SONY811	976×582	EFFIO 4140
5#		CCD	SONY673	976×582	EFFIO 4140
6#		CMOS	SONYIMX238	976×582	FH8520
7#		CMOS	MT9V139	1 305×1 049	FH8510

剂量计测量实验点的累积剂量,再除以辐照时间后计算获得,所选实验点剂量率在栅源板上升到稳定位置时分别为 16.63、20.20、58.30 Gy/h ( $\text{SiO}_2$ )。实验样品放置于自制实验箱内,实验箱具有隔绝外界光线的作用。图像传感器模组镜头采用 4 mm 定焦定光圈高清镜头,保证各类样品入射光强度一致且实验期间不发生变化,且镜头组件配有滤镜(IR-CUT)。第 1 组实验样品实时记录图像信号测试卡画面内容,使画面输出彩色图像;第 2 组实验样品利用遮光材料遮盖,使画面输出暗图像,视频采集率为 25 Hz。每组的 3 个样品依次放置于稳定剂量率为 16.63、20.20、58.30 Gy/h ( $\text{SiO}_2$ ) 的 3 个实验点,并计算累积剂量。为避免退火效应对总剂量效应的影响,实验点位置更换时间不超过 30 min,保证获得较为准确的总剂量辐射损伤效应影响结果。实验方案及参数如表 2 所列。

表 2 实验方案及参数

Table 2 Experimental scheme and parameter

实验组	剂量率/ (Gy · h <sup>-1</sup> ( $\text{SiO}_2$ ))	辐照 时间/h	累积 剂量/Gy
彩色图像	16.63	0.35	5.82
	20.20	1.00	26.02
	58.30	1.07	88.40
暗图像	16.63	0.35	5.82
	20.20	1.00	26.02
	58.30	1.07	88.40
无偏压	20.20	50.00	1 010.00

## 1.2 数据处理方法

采用标准 C 光源,色温为 6 774 K 的透光率/雾都测定仪对辐照前后镜头及滤镜(IR-

CUT)的透光率进行检测。通过测试并分析辐照前后镜头及滤镜的透光率衰减倍数( $\Delta T$ ),其计算公式如下:

$$\Delta T = \frac{T}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $T$ 为辐照后透光率; $T_0$ 为辐照前透光率。

将所采集的视频信号导入计算机进行软件分析,分析参数包括:暗图像的平均亮度( $V_{\text{md}}$ )、彩色图像的通道平均强度( $I_{\text{md}}$ )、彩色图像亮度( $R_{\text{id}}$ )<sup>[5]</sup>。

读取视频画面每个像素的灰度值并计算平均数即得  $V_{\text{md}}$ :

$$V_{\text{md}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{\text{id}} \quad (2)$$

式中: $V_{\text{id}}$ 为彩色图像中第  $i$  个像素单元的灰度值; $N$ 为像素阵列的像素单元总数。

$I_{\text{md}}$ 为传感器所采集视频画面中所有像素 R、G、B 3 种色彩通道各通道的平均强度,由下式计算:

$$I_{\text{md}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{\text{id}} \quad (3)$$

式中, $I_{\text{id}}$ 为彩色图像中第  $i$  个像素单元的色彩通道强度。

通过分析不同色彩通道强度与整体画面亮度的关系,研究辐照引起的画面偏色问题,采用 D65 标准光源的 PAL 电视制式亮度方程计算  $R_{\text{id}}$ :

$$R_{\text{id}} = 0.222I_{\text{R}} + 0.707I_{\text{G}} + 0.071I_{\text{B}} \quad (4)$$

式中, $I_{\text{R}}$ 、 $I_{\text{G}}$ 和  $I_{\text{B}}$ 分别为 R、G、B 3 原色色彩通道的通道强度。

## 2 性能对比与辐射损伤分析

### 2.1 采集画面质量对比分析

辐照前采集的各类样品暗图像的平均灰

度如图 1 所示。由图 1 可知,数字模组(1#~3#样品)较模拟模组(4#~7#样品)的本底噪声更低,CCD 模拟模组(4#、5#样品)较 CMOS 模拟模组(6#、7#样品)本底噪声低。CMOS 和 CCD 的光信号采集均基于 MOS 结构的光电转换效应,将光转化为电荷,再进行储存、处理和传输,但它们对转换后的电荷处理方式不同。然而,CCD 的芯片结构保证了从电荷耦合、转移到输出几乎没有噪声,但 CMOS 器件集成了大量的片上放大器、寻址电路等,易产生寄生电容,导致器件噪声增大。这使得目前工艺生产的 CMOS 无法达到 CCD 的动态范围以及画面质量。

## 2.2 辐射损伤分析

### 1) 镜头及滤镜辐射损伤

镜头透镜材料为玻璃材质,滤镜为塑胶材质。辐照前后镜头透光率列于表 3。由表 3 可

表 3 辐照前后镜头透光率

Table 3 Camera light transmittance before and after irradiation

类型	累积剂量 $D/\text{Gy}$	辐照前透光率 $T_0/\%$	辐照后透光率 $T/\%$	透光率衰减倍数 $\Delta T/\%$
滤镜 1	88.4	23.73	23.01	96.97
滤镜 2	1 010.0	23.73	22.98	96.84
3.6 mm 镜头	88.4	10.20	9.1	89.22
4 mm 镜头 1	88.4	11.41	10.29	90.18
4 mm 镜头 2	1 010.0	11.41	2.74	24.01

由表 3 可知,镜头透光率下降程度与镜头焦距关系不大,当累积剂量达到 88.4 Gy 时,镜头透光率下降约 10%,这一程度的透光率衰减并不会对画面质量造成明显的影响;而当累积剂量达到 1 010.0 Gy 时,镜头透光率下降约 75%,此时,采集画面出现拖影、模糊、噪点增多等现象。镜头透镜受到辐射后透光率下降,是由于  $\gamma$  射线电离辐射在镜头透镜的晶体结构中辐射诱导产生色心,色心能俘获可见光,使透镜呈咖色<sup>[15]</sup>。这一现象与在低照度环境下的监控画面相似。

### 2) 辐照前后损伤对比分析

分别截取辐照前及累积剂量达 5.82、26.2、88.4 Gy 后,各类图像传感器模组的输出暗图像视频。截取视频长度均为 1 min,计算采集的所有图像的平均灰度如图 2 所示。由

知,滤镜具有较强的抗辐射损伤性能,辐照环境中可不考虑滤镜性能下降对采集图像信号质量的影响;3.6 mm 与 4 mm 镜头在同一累积剂量条件下,透光率衰减倍数相近。

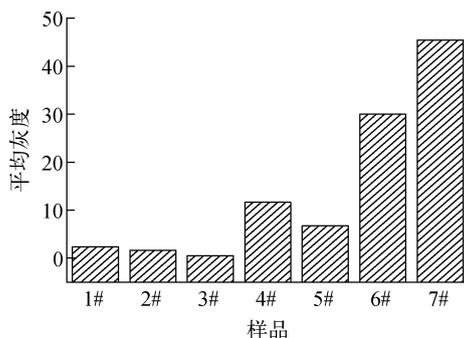


图 1 辐照前各样品的暗图像平均灰度

Fig. 1 Dark image average gray level of each sample before irradiation

图 2 可知,累积剂量 88.4 Gy 及以下的  $\gamma$  射线电离辐射对各类图像传感器的性能无明显影响,造成这一结果有两种可能:(1) 由于自然退火效应的存在,陷阱电荷的产生速率和消散速

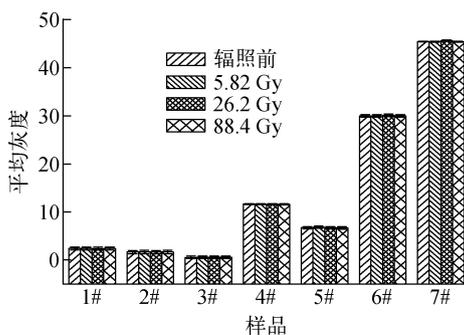


图 2 辐照前后各样品暗图像平均灰度

Fig. 2 Dark image average gray level of each sample before and after irradiation

率近似相等,器件功能参数未发生变化;(2) 辐射初期,图像传感器浅沟道隔离结构中辐射产生的氧化物陷阱电荷及界面态电荷量非常小,信号处理过程能消除这一因素的干扰。

### 3) 暗图像辐射损伤

截取7类样品在最大剂量率为16.63 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )实验点处降源再升源过程中采集的实时图像,并通过数据处理获得所截取视频每一帧暗图像画面的平均灰度,如图3所示。随剂量率的逐渐减小,各样品所采集画面平均灰度均先下降后回升,随着剂量率继续下降直至为0,暗图像平均灰度回降至本底。随着剂量率的增大,平均灰度急剧上升,并在极短的时间内出现大幅度震荡,之后趋于稳定并达到平衡。从图3可看出,数字模组对辐射的敏感程度较模拟模组滞后,且在数字模组所采

集的某些帧画面中,平均灰度会出现突然升高的情况。

图4、5分别为最大剂量率为20.20 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )和58.30 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )实验点处,升源过程中暗图像平均灰度的变化。由图4、5可知,随着剂量率的增大,所有样品采集暗图像的平均灰度都在急剧增大的过程中出现至少1次的短暂“下降-回升”过程,并最终趋于稳定,且数字模组平均灰度出现变化的时间相较于模拟模组滞后约5~10 s。

不同剂量率环境下暗图像的平均灰度如图6所示。由图6可见,除7#样品外,其他样品所采集暗图像平均灰度随剂量率的增大总体呈上升趋势,但实验数据表明,20.20 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )剂量率环境下所采集暗图像平均灰度较16.63 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )的更低,说明图像传感器模

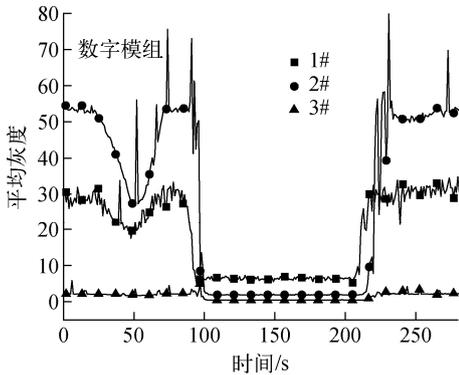


图3 最大剂量率为16.63 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )时降源再升源过程中暗图像的平均灰度变化

Fig. 3 Variation of average gray level of dark image during resource declining & rising process with maximum dose rate of 16.63 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )

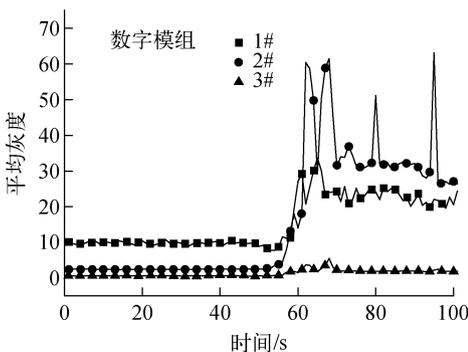
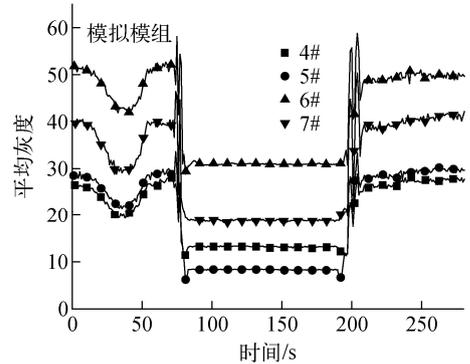
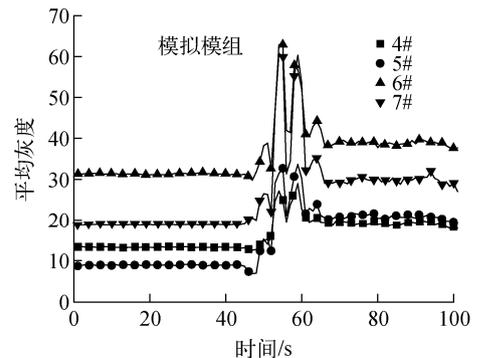


图4 最大剂量率为20.20 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )时升源过程中暗图像的平均灰度变化

Fig. 4 Variation of average gray level of dark image during resource rising process with maximum dose rate of 20.20 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )



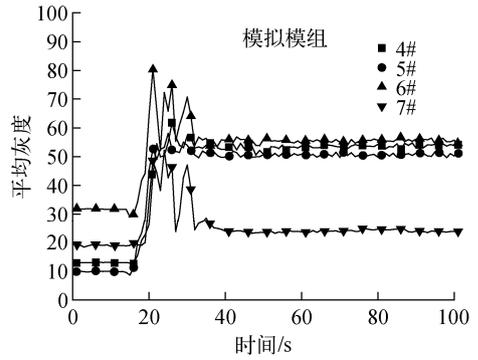
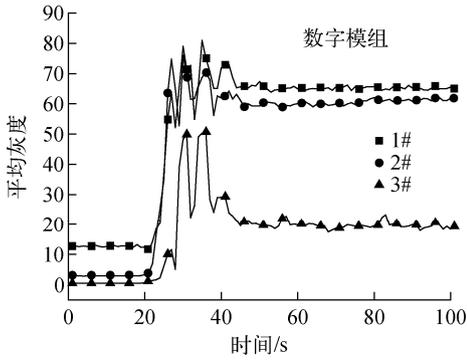


图 5 最大剂量率为 58.30 Gy/h(SiO<sub>2</sub>)时升源过程中暗图像的平均灰度变化  
Fig. 5 Variation of average gray level of dark image during resource rising process with maximum dose rate of 58.30 Gy/h(SiO<sub>2</sub>)

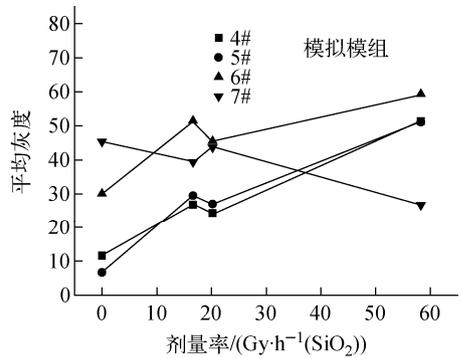
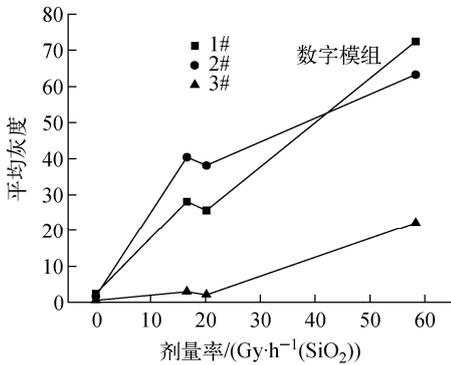


图 6 不同剂量率环境下暗图像的平均灰度  
Fig. 6 Average gray level of dark image at different dose rates

组所采集暗图像平均灰度的增长与剂量率的提高并非单纯地呈线性关系。7#样品固有其本底噪声较高,参数随剂量率增长的变化趋势与其他样品相反,但画面质量并未有所改善,只是提高了画面的整体对比度。

4) 彩色图像辐射损伤

图 7~9 分别为最大剂量率为 16.63、20.20、58.30 Gy/h(SiO<sub>2</sub>)时 7 种类型的样品所采集彩色图像的亮度。由图 7~9 可知,当光线充足时,较低剂量率的  $\gamma$  射线电离辐射对传感器所造成的损伤极其微弱。当模组受到 16.63 Gy/h(SiO<sub>2</sub>)及 20.20 Gy/h(SiO<sub>2</sub>)剂量率  $\gamma$  射线辐照时,亮度几乎无变化;当剂量率达到 58.30 Gy/h(SiO<sub>2</sub>)时,所有板机样品所采集彩色图像的亮度略有提升,这一程度的损伤并不会影响彩色图像的画面质量,所表现出的宏观现象为出现少量噪点。

5) 损伤机理分析与讨论

通过以上实验结果及分析可知,低剂量率、短时间  $\gamma$  射线辐射对图像传感器模组的损伤及干扰影响主要表现在,辐照期间传感器捕获画面出现白点且画面平均亮度上升。这一现象是由于传感器像素单元内暗电流增大以及入射  $\gamma$  光子产生的正向脉冲颗粒噪声而导致的。

图像传感器暗电流的增大分为两种,即各像素点暗电流整体增大,以及部分像素点出现暗电流尖峰。CMOS 及 CCD 图像传感器的光电转换部分均为光电二极管, $\gamma$  射线电离辐射诱生的氧化物陷阱电荷以及界面态陷阱电荷是辐射感生暗电流产生的主要因素,这部分暗电流在整个传感器感光元件中属于泊松分布的随机过程,表现为白噪声信号并形成了暗电流的背景噪声。在低剂量率、短时间  $\gamma$  射线辐照过程中,这一类型的辐射感生暗电流对画面质量的影响并不明显,但在各像素点积分时间相同

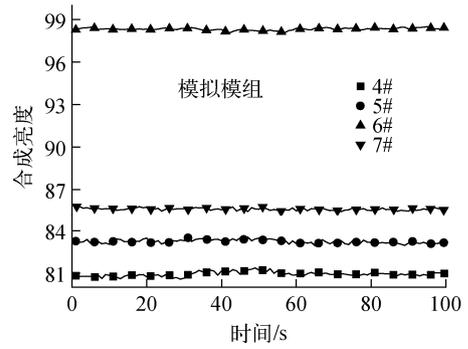
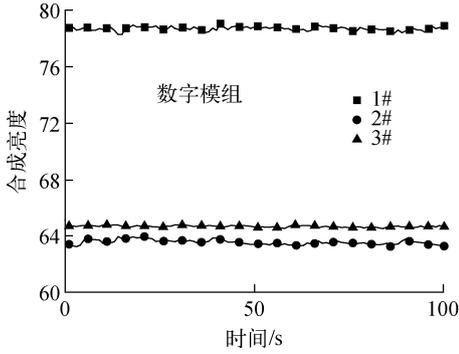


图 7 最大剂量率为 16.63 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )时降源再升源过程中彩色图像的亮度变化

Fig. 7 Brightness variation curve of color image during resource declining & rising process with maximum dose rate of 16.63 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )

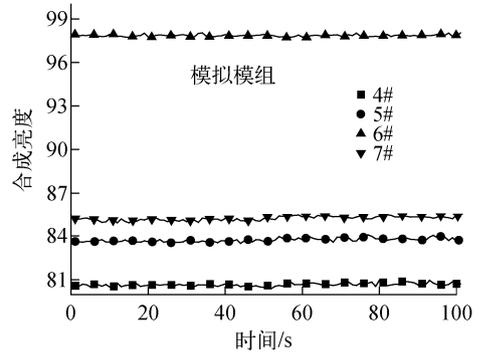
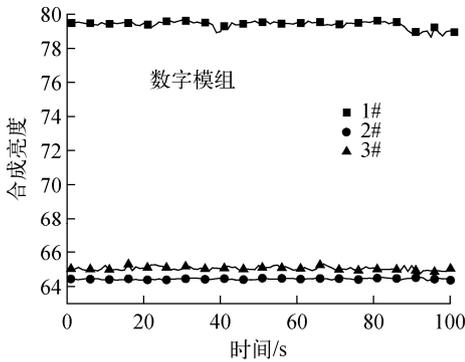


图 8 最大剂量率为 20.20 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )时升源过程中彩色图像的亮度变化

Fig. 8 Brightness variation curve of color image during resource rising process with maximum dose rate of 20.20 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )

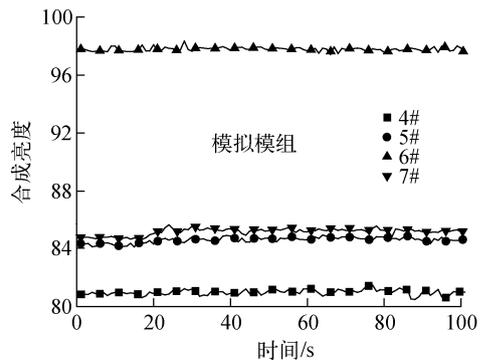
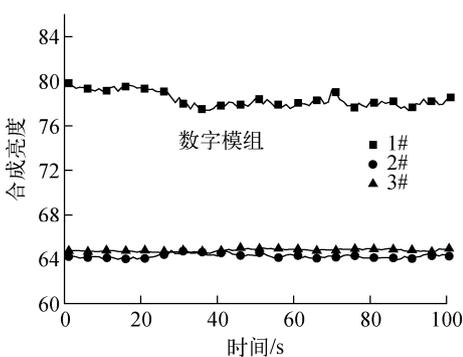


图 9 最大剂量率为 58.30 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )时升源过程中彩色图像的亮度变化

Fig. 9 Brightness variation of color image during resource rising process with maximum dose rate of 58.30 Gy/h( $\text{SiO}_2$ )

的条件下,会提高画面整体亮度。同时,由于生产工艺的影响,在部分像素单元内会产生缺陷,当区域范围内含有缺陷的像素单元聚集时,在这一区域将形成暗电流尖峰,这部分暗电流在

整个传感器光元件中的分布是固定的,表现为图像上出现白色区域以及光响应不均匀。随着累积剂量的增大,这一现象可在辐射环境下所采集的监控画面中观察到。

另一种损伤及干扰的原因是由于 $\gamma$ 射线对图像传感器的直接或间接作用。具体表现为 $\gamma$ 光子本身或康普顿散射产生的次级 $\gamma$ 光子在图像传感器内电离产生电子空穴对,从而将 $\gamma$ 光子所具有的能量转化为载流子,这些载流子流入图像传感器内光电二极管的耗尽区,并被收集形成脉冲噪声。虽然用于制造光电二极管的半导体材料对 $\gamma$ 射线的响应较可见光差,但由于 $\gamma$ 光子能量较可见光大得多,从而造成正向增幅,形成正向脉冲噪声。由于 $\gamma$ 光子入射是随机的,到达某一个或某一区域像素单元内的概率也是随机的,因此,可将入射 $\gamma$ 光子造成的正向脉冲颗粒噪声看成是在感光元件平面上随机分布,宏观现象表现为所采集图像上产生随机亮点噪声。

暗电流及脉冲颗粒噪声对画面的影响程度与传感器积分时间直接相关,通常情况下自然光环境照度大于0.3 lux,图像传感器对入射光的积分时间约为 $1/50\sim 1/2\ 000$  s,暗电流影响不大;而当传感器处于照度为 $0.001\sim 0.02$  lux之间的黑暗环境中时,传感器积分时间明显延长,暗电流的影响较为明显,这可以解释图6~8相较于图2~4平均灰度变化不明显的原因,宏观现象表现为:相同剂量率及累积剂量条件下,照度较大时,所采集图像受 $\gamma$ 射线辐射干扰较暗图像小得多。因此,长时间或高剂量率的辐照环境中,在考虑图像传感器及其电子电路部分所受到的辐射损伤的同时,还应考虑镜头透镜受辐射影响透光率下降的问题。

### 3 结论

对比了7类模拟及数字模组在不同剂量率 $\gamma$ 射线电离辐射环境下参数的变化情况,研究了各类模拟及数字模组受电离辐射的影响程度与抗干扰能力,得出以下结论:

1) 模拟图像传感器类型中,CCD较CMOS具有更优异的画面采集质量以及更低的暗电流;

2)  $\gamma$ 射线电离辐射在镜头透镜晶体结构中产生的色心将导致镜头透光率下降;

3)  $\gamma$ 射线电离辐射对监控系统采集画面质量的影响与剂量率并非呈单纯线性关系;

4) 充足的光线能有效地提高信噪比,降低

$\gamma$ 射线引入噪声对采集信号的影响;

5) 采用CMOS工艺的数字模组更适用于 $\gamma$ 射线辐射环境中的实时监测,但仍需通过加固手段提高其在辐射环境中工作的可靠性和使用寿命。

### 参考文献:

- [1] 黄晓萍,王斌,吕建友,等. 数字视频监控技术在核事故应急中的应用[J]. 原子能科学技术, 2003,37(2):182-184.  
HUANG Xiaoping, WANG Bin, LU Jianyou, et al. Application of the technology of digital video supervision in the nuclear emergency[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(2): 182-184(in Chinese).
- [2] 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):945-950,982.  
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, 982(in Chinese).
- [3] 汪波,李豫东,郭旗,等.  $0.5\ \mu\text{m}$ 工艺CMOS有源像素传感器的总剂量辐射效应[J]. 发光学报, 2015,36(2):242-248.  
WANG Bo, LI Yudong, GUO Qi, et al. Total dose effects in  $0.5\ \mu\text{m}$  CMOS active pixel image sensor[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(2): 242-248(in Chinese).
- [4] GOIFFON V, ESTRIBEAU M, MARCELOT O, et al. Radiation effects in pinned photodiode CMOS image sensors: Pixel performance degradation due to total ionizing dose [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6): 2 878-2 887.
- [5] 马绍阳. 辐射剂量率效应对CMOS图像传感器工作性能的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [6] GAILLARDIN M, GOIFFON V, MARCANDELLA C, et al. Radiation effects in CMOS isolation oxides: Differences and similarities with thermal oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(4): 2 623-2 629.
- [7] NÁFRÁDI G, KOVÁCSIK Á, PÓR G, et al. Radiation damage of the PCO pixelfly VGA CCD camera of the BES system on KSTAR Tokamak

- [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 770: 21-28.
- [8] PLACE S, CARRERE J, MAGNAN P, et al. Radiation effects on CMOS image sensors with sub-2  $\mu\text{m}$  pinned photodiodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(4): 909-917.
- [9] 汪波,李豫东,郭旗,等.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照 CMOS 有源像素传感器诱发暗信号退化的机理研究[J]. 物理学报,2014,63(5):313-319.  
WANG Bo, LI Yudong, GUO Qi, et al. Research on dark signal degradation in  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray-irradiated CMOS active pixel sensor [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5): 313-319 (in Chinese).
- [10] 李鹏伟,郭旗,任迪远,等. 电荷耦合器件的 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线和电子辐射损伤效应[J]. 原子能科学技术,2010,44(1):124-128.  
LI Pengwei, GUO Qi, REN Diyuan, et al. Radiation damage effect on charge-coupled devices during  $^{60}\text{Co}$  gamma ray and electron irradiation [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(1): 124-128(in Chinese).
- [11] 李鹏伟,郭旗,任迪远,等. 电荷耦合器件的 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线辐照损伤退火效应[J]. 原子能科学技术,2010,44(5):603-607.  
LI Pengwei, GUO Qi, REN Diyuan, et al. Annealing effects of charge coupled devices after  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  irradiation[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(5): 603-607(in Chinese).
- [12] 袁梅,赵坚彬,崔磊.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线对视频质量的影响与消噪方法的初步研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2011,29(1):53-57.  
YUAN Mei, ZHAO Jianbin, CUI Lei. Preliminary study on effects of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation on video quality and the image de-noising methods[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2011, 29(1): 53-57(in Chinese).
- [13] 徐占武,高梨莉. 浅谈视频监控系统的研究现状与应用发展[J]. 盐业与化工,2013,42(8):6-8.  
XU Zhanwu, GAO Lili. Research and application development of the video surveillance system[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2013, 42(8): 6-8(in Chinese).
- [14] 孟伟,郭海涛,许彦涛,等. 硫系红外玻璃材料耐辐射性能研究进展[J]. 硅酸盐学报,2012,40(8):1 229-1 234.  
MENG Wei, GUO Haitao, XU Yantao, et al. Recent developments on radiation resistance properties of chalcogenide infrared glass materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(8): 1 229-1 234(in Chinese).
- [15] VIRMONTAIS C, GOIFFON V, ROBBINS M S, et al. Dark current random telegraph signals in solid state image sensors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(6): 4 323-4 331.