

电荷耦合器件电离辐射损伤的模拟试验研究

唐本奇,王祖军,刘敏波,肖志刚,张 勇,黄绍艳

(西北核技术研究所,陕西西安 710024)

摘 要: 利用钴-60源,在不同工作与辐照条件下,开展电荷耦合器件电离辐射损伤模拟试验,分析高低剂量率、器件偏置对器件暗电流信号增大和哑元电压漂移的影响,比较电荷耦合器件光敏单元、输出放大器总剂量效应的敏感性,研究辐射敏感参数与失效模式的差异.为建立电荷耦合器件电离辐射效应规范化的模拟试验与加固评估方法,提供技术基础.

关键词: 电荷耦合器件; 电离辐射效应; 模拟试验

中图分类号: TN99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 05-1192-04

Cobalt-60 Experiment on Ionization Radiation Effects of Charge Coupled Devices

TANG Ben-qi, WANG Zu-jun, LIU Min-bo, XIAO Zhi-gang, ZHANG Yong, HUANG Shao-yan

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract: This paper describes the experiment on ionization radiation effects of device performance including the increase of dark current signal and the voltage shift of output amplifier of charge coupled devices (CCDs) by Cobalt-60 γ source under different ionizing dose rate and bias cases. It is analyzed about the ionization damage sensitivity of image sensor elements and output amplifier section. These studies have laid a good foundation for the development of standard experiment process and assessment method on ionization radiation effects of charge-coupled devices.

Key words: CCD (Charge Coupled Device); ionization radiation effect; simulation experiment

1 引言

电荷耦合器件(CCD, Charge Coupled Device)广泛应用于国防与航天图像系统,该器件抗空间电离辐射损伤的水平及评估,直接影响到空间图像系统的可靠性^[1,2].在此,利用钴-60源,通过地面模拟试验,在不同工作与辐照条件下,分析电荷耦合器件电离辐射损伤情况,研究器件的敏感参数和失效模式的差异,探讨能够正确表征电荷耦合器件在实际应用辐射环境中损伤规律的总剂量模拟试验方法,从而为建立电荷耦合器件电离辐射效应规范化的模拟试验与加固评估方法,提供技术基础.

2 模拟试验

模拟试验在西北核技术研究所辐照中心⁶⁰Co γ 辐射装置上进行,辐射剂量率采用 UNIDOS 通用剂量仪监测.被试验器件(DUT, Device Under Test)选用商用线阵电荷耦合器件,具有 2212 个像元,包括:28 个哑元、24 个遮光单元和2160个光敏元.像元尺寸 $14\mu\text{m} \times 14\mu\text{m} \times$

$14\mu\text{m}$.工作电压 5V.主时钟频率:0.15 ~ 1.0MHz,典型值 0.5MHz,复位时钟频率:0.3 ~ 2.0MHz,典型值 1.0MHz.自行研制了电荷耦合器件辐射敏感参数测试系统^[3,4],以及在⁶⁰Co γ 辐射装置上开展电荷耦合器件电离辐射损伤的模拟试验系统,如图 1 所示,包括:铅光阑、辐照板、CCD 驱动与数据采集系统,积分球光学系统、稳压电源,数字示波器等.采用铅光阑,对被试器件(DUT)辐照部位提供准直,非辐照部位实施屏蔽.CCD 驱动电路为辐照板上的被试器件提供偏置、驱动信号和接地等.CCD 器件参数采用自行研制的 CCD 辐射敏感参数离线测试系统获取,每次测量在辐照后 30min 内完成.

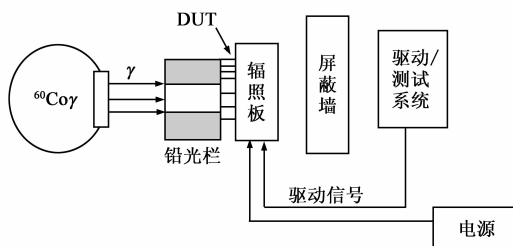


图1 电荷耦合器件Co-60 γ 模拟试验装置图

3 试验结果

3.1 CDD 光敏单元与输出放大器电离辐射损伤敏感性

通过铅屏蔽和光阑准直,分别辐照电荷耦合器件的光敏单元和输出放大器部分,屏蔽其它部分,器件处于非偏置状态,辐照剂量率:9.7rad(Si)/s.在累积到一定的辐照剂量后,测量器件的辐射敏感参数,比较光敏单元和输出放大器部分电离辐射引起的暗电流的差异,如图 2 所示.可以看出,在相同偏置状态与辐照剂量下,器件暗电流均增大,其中,输出放大器部分电离辐射引起的暗电流增加,大于光敏单元的暗电流变化.辐照总剂量 TID = 20krad(Si)时,光敏部分电离辐射引起的暗电流增大 $\delta J \approx 1.6\text{nA}/\text{cm}^2/\text{krad}(\text{Si})$;而同样辐照总剂量下,输出放大器部分电离辐射引起的暗电流增大 $\delta J \approx 4.6\text{nA}/\text{cm}^2/\text{krad}(\text{Si})$.

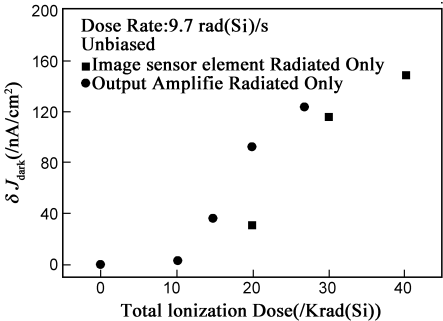


图2 光敏单元与输出放大器电离辐射暗电流比较

通过铅屏蔽和光阑准直,分别辐照光敏单元和输出放大器部分,屏蔽其它部分,器件处于偏置状态,辐照剂量率:9.7rad(Si)/s,每隔一定剂量,监测器件的辐射敏感参数,比较光敏单元和输出放大器部分电离辐射引起的哑元电压漂移,如图 3 示.可以看出,在相同偏置状态与辐照剂量下,器件的哑元电压均发生漂移;在辐照总剂量低于 20krad(Si)时,由器件光敏部分电离辐射效应引起的器件哑元电位变化不明显,总剂量 TID = 20krad(Si)时,哑元电压漂移 $\delta V = -0.2\text{V}$,单位剂量漂移量约:0.01V/krad(Si).而在同样情况下,输出放大器

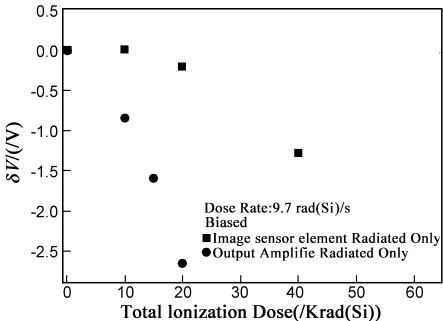


图3 光敏单元与输出放大器电离辐射哑元电压比较

部分电离辐射引起的哑元电压漂移非常严重,总剂量 TID = 10krad(Si)时,器件哑元电压漂移 $\delta V = -0.55\text{V}$,单位剂量漂移量约:0.055V/krad(Si);辐照总剂量 TID = 20krad(Si)时,哑元电压漂移 $\delta V = -2.65\text{V}$,单位剂量漂移量约:0.133V/krad(Si).由此可见,输出放大器部分电离辐射引起的哑元电压漂移,远远大于光敏单元的哑元电压变化.

3.2 CCD 光敏单元电离辐射总剂量效应

通过铅屏蔽和光阑准直,对放大器部分屏蔽,仅辐照光敏单元,器件处于非偏置状态,辐照剂量率:34.8 rad(Si)/s,监测器件输出的暗电压信号.开展了两组辐照试验,Group A 包括三只器件,Group B 包括两只器件.试验获得的暗电流增加随辐照剂量的变化如图 4 所示.可以看出,光敏单元暗电流随辐照剂量的增加而增大,在总剂量 TID ≤ 25krad(Si)时, $\delta J \approx 0.8\text{nA}/\text{cm}^2/\text{krad}(\text{Si})$.在 30 ≤ TID ≤ 40krad(Si)时, $\delta J \approx 3.8\text{nA}/\text{cm}^2/\text{krad}(\text{Si})$.即,随着辐照剂量的增加,光敏单元单位剂量暗电流效应越严重.

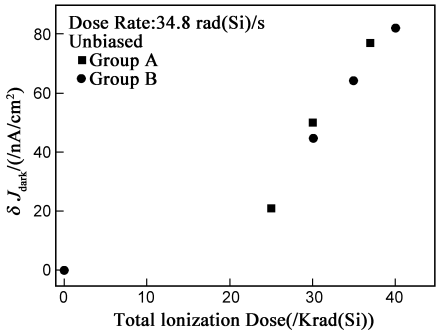


图4 光敏单元辐射暗电流密度随总剂量的变化

3.3 CCD 输出放大器电离辐射总剂量效应

通过铅屏蔽和光阑准直,屏蔽光敏单元,对输出放大器部分进行辐照,辐照剂量率:9.7rad(Si)/s,开展了两组被试器件的模拟试验,分别处于偏置和非偏置状态,监测器件的哑元电压漂移,如图 5 所示.可以看出,在偏置和非偏置工作状态下,随着辐照剂量的增加,器件的哑元电压漂移均增大,其中,非偏置状态下 $\delta V = -0.033\text{V}/\text{krad}(\text{Si})$,偏置状态下, $\delta V = -0.133\text{V}/\text{krad}(\text{Si})$.

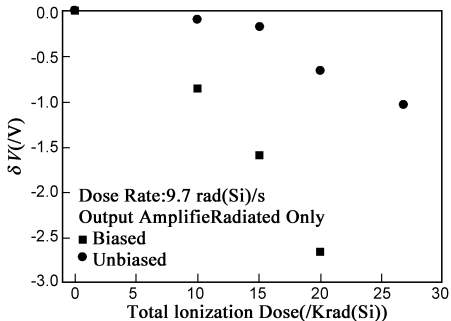


图5 输出放大器哑元电压漂移随总剂量的变化

(Si). 较之光敏单元的暗电流变化, 输出放大器哑元电压的漂移, 随辐照总剂量呈现出较好的线性关系.

3.4 偏置对 CCD 光敏单元电离辐射损伤的影响

通过铅屏蔽和光阑准直, 屏蔽放大器部分, 仅对光敏单元进行辐照, 辐照剂量率: $1.0 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$, 比较偏置状态对器件辐射暗电流的影响, 如图 6 所示. 在总剂量 $\text{TID} \leq 20 \text{ krad}(\text{Si})$ 之前, 器件辐射暗电流增加不明显, 偏置与非偏置状况下, 器件辐射暗电流几乎没有差异. 在总剂量 $\text{TID} \geq 20 \text{ krad}(\text{Si})$ 之后, 器件辐射暗电流显著增大, 而且, 非偏置下的暗电流信号, 明显高于偏置下的暗电流.

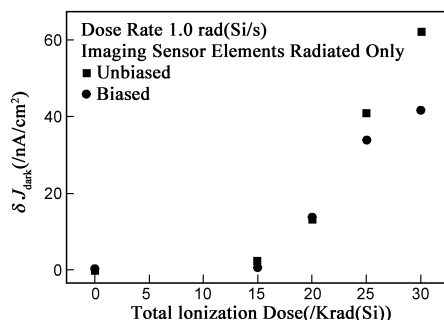


图6 偏置对光敏单元辐射暗电流的影响

3.5 偏置对 CCD 输出放大器电离辐射损伤的影响

通过铅屏蔽和光阑准直, 屏蔽光敏单元, 仅辐照输出放大器部分, 辐照剂量率: $3.89 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$, 比较偏置对器件哑元电压的影响, 如图 7 所示. 可以看出, 在非偏置状态下, 器件哑元电位变化不明显, 辐照总剂量 $20 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 哑元电压漂移 $\delta V \approx -0.008 \text{ V/krad}(\text{Si})$. 而在偏置状态下, 器件哑元电位下降严重, 辐照总剂量 $10 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 哑元电压漂移 $\delta V \approx -0.055 \text{ V/krad}(\text{Si})$; 辐照总剂量: $20 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 哑元电压漂移 $\delta V \approx -0.134 \text{ V/krad}(\text{Si})$.

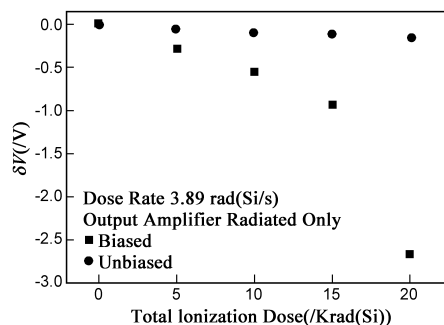


图7 偏置对器件哑元电压的影响

3.6 剂量率对 CCD 光敏单元电离辐射损伤的影响

通过铅屏蔽和光阑准直, 屏蔽放大器部分, 仅辐照光敏单元, 器件处于偏置状态, 在不同辐照剂量率: $0.1 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 、 $1.0 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 、 $10.2 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 下, 器件辐照到相同的总剂量, 监测器件输出的暗电压信号, 比较高、低剂量率的影响. 进行了四组辐照试验, 每组包含四只

同一批次器件, 暗电流变化取四只器件暗电流增大的平均值. 暗电流增加随辐照剂量率的变化如图 8 所示, 可以看出, 暗电流的变化存在明显的剂量率效应. 辐照剂量率在 $0.1 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s} \sim 10.2 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 范围内, 同样辐照剂量下, 暗电流随辐照剂量率的增加而变小, 即呈现出明显的低剂量率增强现象.

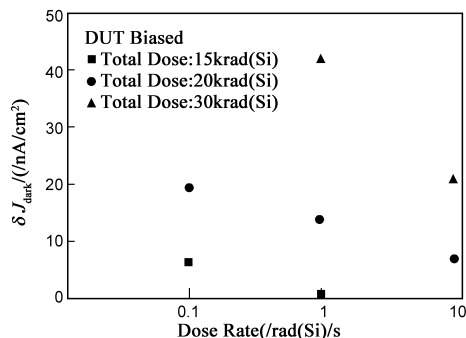


图8 偏置下高低剂量率对器件辐射暗电流的影响

器件处于非偏置状态下, 通过铅屏蔽和光阑准直, 屏蔽放大器部分, 仅辐照光敏单元, 在不同辐照剂量率: $0.1 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 、 $1.0 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 、 $10.2 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 、 $34.8 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 下, 器件辐照到相同的总剂量, 监测器件输出的暗电压信号, 比较高、低剂量率的影响. 也进行了四组辐照试验, 每组有同一批次的四只器件, 暗电流变化取四只器件暗电流增大的平均值. 不同剂量率情况下, 暗电流增加随辐照剂量率的变化如图 9 所示. 可以看出, 器件的电离辐射暗电流同样存在明显的剂量率效应. 辐照剂量率在 $0.1 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s} \sim 10.2 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 范围内, 同样辐照剂量下, 暗电流随辐照剂量率的增加而变小, 表现出明显的低剂量率增强现象. 而辐照剂量率为: $34.8 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 时, 暗电流明显增大, 较之前面低剂量率区间的损伤规律, 出现了比较大的差异.

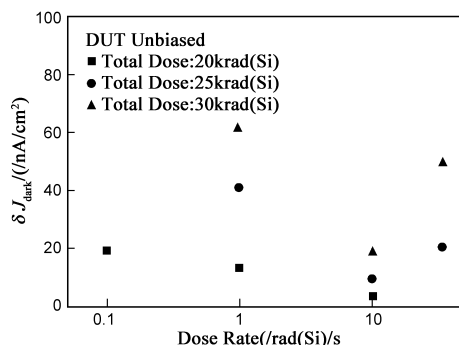


图9 非偏置下高低剂量率对器件辐射暗电流的影响

4 分析与结论

通过不同偏置与辐照条件下的模拟试验, 以及系统的分析, 可以看出: (1) 光敏单元与输出放大器单元呈现出不同的辐射敏感性, 光敏单元的电离辐射损伤表现为器件的暗电流增大, 放大器单元的电离辐

射损伤主要表现在亚元电压的漂移.电荷耦合器件的电离辐射损伤是光敏单元暗电流增大与输出放大器亚元电压漂移联合作用的结果.(2)随着辐照剂量的增加,器件亚元电位的变化,呈现出比较好的线性关系,而光敏单元暗电流增加,随着剂量的累积,显得日趋严重.(3)器件的偏置状态,对光敏单元与放大器单元的电流辐射损伤的影响,存在着明显的差异.对于光敏单元,非偏置状态下的暗电流增加,高于偏置下的器件暗电流;而在非偏置状态下,输出放大器的亚元电压漂移较小,在偏置状态下亚元电压漂移严重.(4)电荷耦合器件光敏单元的暗电流损伤,在偏置与非偏置状态下,均存在着明显的剂量率效应.从此次模拟试验结果,可以看出,在 $0.1\text{rad}(\text{Si})/\text{s} \sim 10.2\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$ 剂量率范围,暗电流增大存在着明显的低剂量增强效应,而在 $34.8\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$ 时,暗电流的损伤规律,出现了比较大的差异.CCD 器件包括光敏单元、电荷存储电容与转移栅、输出放大器三部分,电离辐射损伤机制比较复杂,尚无完整的物理模型进行阐释;只能根据相关的物理效应,开展损伤机理的定性分析^[5].电离辐射损伤,在 CCD 的内电极与栅氧之间,以及 Si/SiO_2 界面,引起陷阱和陷阱电荷的累积. Si/SiO_2 界面陷阱的能级处在 Si 的禁带间,与 Si 体内的载流子相互作用,引起电子—空穴对的热激发,导致暗电流信号的增大.

表面暗电流密度 J_s 可表示为^[6]:

$$J_s = (q\sigma_n\sigma_p)^{1/2}v_{th}kD_u\pi Tn_i/2 \quad (1)$$

其中: q 为单位电荷电量; σ_n 为 n 型电导率; σ_p 为 p 型电导率; k 为热导率; n_i 为本征浓度; T 为温度; D_u 为表面陷阱浓度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$); v_{th} 为热载流子速度,与 $T^{1/2}$ 、 n_i 及 $T^{3/2}\exp(-E_g/2kT)$ 成比例.

由能隙附近的体状态产生的暗电流可表示为^[6]:

$$j_b = (\sigma_n\sigma_p)^{1/2}v_{th}qn_iWn_i \quad (2)$$

其中: W 为耗尽层厚度; n_i 为深能级陷阱浓度.

辐照剂量越大,表面陷阱浓度 D_u 和深能级陷阱浓度 n_i 增高,根据表面暗电流和体暗电流的物理模型,可以推断出,导致器件的暗电流变大.

氧化物陷阱电荷和界面态的增加,诱导 MOS 器件阈值电压 ΔV_{th} 发生漂移,包括氧化物陷阱电荷 ΔN_{ot} 引起的漂移 (ΔV_{ot}) 和界面态 ΔN_{it} 引起的漂移 (ΔV_{it}),即:

$$\Delta V_{th} = c_1\Delta N_{ot} + c_2\Delta N_{it} \quad (3)$$

其中, c_1 、 c_2 为转换系数.

总剂量电离辐射引起的 MOS 器件阈值电压变化,导致 CCD 输出放大器工作点的变化与亚元电压的漂移.另外,总剂量电离辐射会引起 MOS 器件迁移率的变化,也会引起暗电流的变化.迁移率的变化与氧化物陷阱电荷密度和界面态电荷密度有关:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{1}{1 + c_1\Delta N_{ot} + c_2\Delta N_{it}} \quad (4)$$

其中, μ_0 、 μ 为辐照前后的载流子迁移率.

器件处于偏置状态下,在栅介质及体内存在比较强的电场,从而,影响到栅氧以及 Si/SiO_2 界面陷阱的产生与陷阱电荷的累积,引起 Si 体内的载流子相互作用的差异.因此,偏置与非偏置状态,对于器件的辐射效应,存在较大的影响.

参考文献:

- [1] Hopkinson D R. Radiation effects on CCDs for space borne acquisition and tracking applications [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1992, 38(6): 368 – 373.
- [2] Fleetwood D M. Hardness assurance for low-dose space applications [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1991, 38(6): 1552 – 1559.
- [3] 张勇,唐本奇,肖志刚,等.线阵 CCD 总剂量辐照效应离线测量系统设计[J].核电子学与探测技术,2004,24(5): 494 – 497.
Zhang Yong, Tang Ben-qi, Xiao Zhi-gang. Design of offline measure system for radiation damage effects on linear CCD [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(5): 494 – 497. (in Chinese)
- [4] 张勇,唐本奇,肖志刚.基于 CPLD 通用驱动电路的设计方法[J].核电子学与探测技术,2005,25(2): 214 – 217.
Zhang Yong, Tang Ben-qi, Xiao Zhi-gang. Design method of general-purpose driving circuit for CCD based on CPLD [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, 25(2): 214 – 217. (in Chinese)
- [5] 唐本奇,王祖军,张勇,肖志刚.电荷耦合器件辐射损伤机理分析[J].核电子学与探测技术,2004,24(6): 579 – 581.
Tang Ben-qi, Wang Zu-jun, Zhang Yong, Xiao Zhi-gang. Analysis of radiation damage mechanism of charge coupled devices [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(6): 579 – 581. (in Chinese)
- [6] Hopkins I H, Hopkinson G R. Random telegraph signals from proton irradiated CCDs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1993, 40(6): 1567 – 1574.

作者简介:



唐本奇 男,1966 年生于湖南常德.副研究员,硕士生导师.1987 年在武汉大学获理学学士学位,1990 年在西北核技术研究所获工学硕士学位,1997 年在西安交通大学获工学博士学位.2004 年至 2006 年,在防化研究院核科学与技术博士后流动站做博士后.主要研究方向为电子产品辐射效应及其模拟技术和加固性评估技术.发表论文 30 余篇,获部委级科技进步一、三等奖五项.

E-mail: tangbq@hotmail.com