

CMOS 图像传感器电子辐照实验的研究

周彦平, 谢小龙, 刘洋, 靳浩, 于思源

(哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 研究了电子辐射剂量对 CMOS 图像传感器性能的影响, 性能参数为平均暗电流输出和光强响应度。搭建了电子辐射场和光强响应度的测量系统, 在器件处于工作状态和非工作状态下分别对其辐射, 辐射剂量为: 5×10^3 rad、 1×10^4 rad、 7×10^4 rad、 1×10^5 rad、 5×10^5 rad。对于暗电流, 当辐射总剂量超过 7×10^4 rad~ 1×10^5 rad 之间的某一个阈值时, 暗电流随着辐射剂量的增长基本呈线性增加; 光强响应方面, 当器件处于非工作状态接受辐射时, 辐射剂量对光强响应影响不大; 当器件处于工作状态接受辐射时, 辐射剂量超过 7×10^4 rad, 光强响应曲线会下移, 斜率减小, 灵敏度降低。理论分析后, 得到了暗电流随电子辐射剂量的变化模型。研究表明: 长期工作于空间环境下的 CMOS 图像传感器, 容易受到辐射总剂量效应的影响, 需采取一定的防辐射措施。

关键词: CMOS 图像传感器; 辐射效应; 电子辐射实验; 平均暗电流输出; 光强响应度

中图分类号: TN929.13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0520006

Electron radiation experiment of CMOS image sensor

Zhou Yanping, Xie Xiaolong, Liu Yang, Jin Hao, Yu Siyuan

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The effect of electron irradiation on CMOS image sensor was studied, focusing on average dark current and light intensity response. The CMOS image sensors, some in operating mode and the others in non-operating mode, were radiated simultaneously. The data were collected when the total dose of radiation reached 5×10^3 rad, 1×10^4 rad, 7×10^4 rad, 1×10^5 rad, 5×10^5 rad, respectively. The results showed that, when the total dose of radiation exceed a threshold between 7×10^4 rad and 1×10^5 rad, dark current of the imager showed a basically linear relationship with the total dose of radiation. When concerning the light intensity response, for the imagers which were radiated in non-operating mode, radiation have no effect on the response; while for the imagers which were radiated in operating mode, with the total dose of radiation exceed a threshold, 7×10^4 rad, the response curves shifted down and the slopes decreased with the total dose of radiation increased. In other words, radiation reduced sensitivity of the imagers. At last, the model of dark current versus total dose of electron radiation was developed after theoretical analysis. It is shown that after working in the space for a long time, CMOS image sensors are easily affected by the total dose effect of radiation, thus reasonable protection measures against radiation are needed.

Key words: CMOS image sensor; radiation effect; electron radiation experiment; average dark current; light intensity response

收稿日期: 2015-09-11; 修订日期: 2015-10-20

基金项目: 青年科学基金项目(111404082)

作者简介: 周彦平(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光电信息探测技术和空间辐射环境及防护技术等方面的研究。

Email: ypzhou@hit.edu.cn

0 引言

随着航天技术的飞速发展,CMOS 图像传感器(CMOS image sensor)因其具有集成度高、抗辐射能力强、采样频率高、功耗低、尺寸小等优点,是空间和遥感成像的理想器件^[1]。

空间环境中存在着大量的高能粒子、电子、质子、中子、X 射线、 γ 射线、 α 粒子等辐射源^[2],长期辐射会使得器件瞬间失效或永久性损伤。随着空间应用的迫切需要,自 20 世纪中后期以来,国内外相关机构均开始对 CMOS 的辐射效应进行研究^[3-8]。由于空间辐射机理的复杂性及传感器结构的多样性,多数研究工作仅为对传感器分立器件的独立分析,很难得到系统级的辐射效应,并且相关的理论分析工作较少。

文中设计了 CMOS 图像传感器的电子辐射实验,得到了辐射前后的 CMOS 图像传感器的特性参数,如平均暗输出亮度和光强响应度。通过对实验数据的分析,得出电子辐射对 CMOS 图像传感器的影响规律,同时分析了辐射效应机理,建立了辐射总剂量对 CMOS 图像传感器暗电流影响的数学模型。

1 实验器件选择及方案

1.1 实验样品

由于该实验是通过辐射对 CMOS 图像传感器进行破坏实验来研究辐射总剂量对其的影响,对 CMOS 图像传感器自身的性能要求不高,因此,采用普通的商用 CMOS 图像传感器,型号是 OV9712-1D,像素结构采用有源像素结构,分辨率为 1280×800,读取电路采用的 ADC 为 10 位,精度为 $3.5156 \times 10^{-3} \text{V}$ 。

1.2 辐射源

地面模拟空间电子辐射实验在黑龙江科学院(哈尔滨)技术物理研究所进行。辐射试验场所用的主要设备为由上海先锋电机厂制造的 DD1.2 高压电子加速器和上海原子核研究所研制的具有高性能的 89 积分仪。电子能量为 1.0 MeV,束流为 1~2 μA ,测试板面积为 70 cm²,实验中 CMOS 图像传感器距电子加速器扫描盒 300 mm。电子加速器扫描的不均匀度小于 $\pm 5\%$,能量不稳定性小于 $\pm 5\%$,束流积分仪最

大测量误差 $\pm 2\%$ 。表 1 给出了该次实验具体辐射剂量点和辐射源参数。

表 1 电子辐射实验辐射源的控制参数

Tab.1 Controls parameters of radiation source in electronic radiation experiment

Expected dose /rad(Si)	Actual dose /rad(Si)	Charge/C	Time/s	Electron energy /MeV	Beam / μA	Dose rate /rad·s ⁻¹
5×10^3	5.09×10^3	23×10^{-7}	53	1	1	100
1×10^4	1.00×10^4	45×10^{-7}	107.7	1	1	100
7×10^4	7.00×10^4	316×10^{-7}	623.4	1	1	100
1×10^5	1.00×10^5	452×10^{-7}	955.4	1	1	100
5×10^5	5.04×10^5	$2\,277 \times 10^{-7}$	3\,074.5	1	2	200

1.3 器件测试方法

文中采用电子辐射源对 CMOS 图像传感器进行辐射模拟试验,试验分为辐射前本底测试阶段和辐射后测试阶段。

图 1 为此次辐射试验的布局图。由于辐射对人体健康会造成恶劣影响,所以该试验在辐射过程中需要进行隔离操作。同时辐射也会对测试仪器产生干扰,若不加防护会导致测量结果的误差和错误,因此对辐射场内的测量仪器和器件要进行屏蔽处理。实验一共进行 3 轮,每轮试验共采用 4 组 CMOS 图像传感器,其中两组加电辐射,两组断电辐射。达到预设剂量点时,先停止辐射源,然后再将试验样品取出快速测量。先测量暗电流输出,然后测量光强响应度,样品取出 1 h 后(包括测量时间),再次辐射至下一剂量点。由于 CMOS 图像传感器具有可视化功能,因此,辐照过程中可以通过视频数据线将加电辐射的 CMOS 图像传感器的图像实时传输到辐射场外,进行观测,以保证试验的可靠性和稳定性。

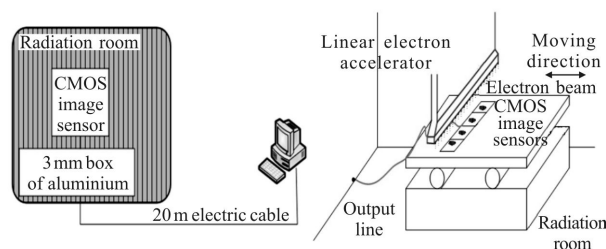


图 1 电子辐射试验辐射场布局

Fig.1 Layout of radiation field in electron radiation experiment

光强响应度的测试系统如图 2 所示。

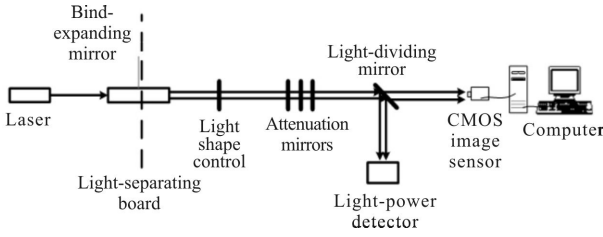


图 2 CMOS 图像传感器光强响应度测试系统示意图

Fig.2 Test system of light intensity response of CMOS image sensor

该系统用于对本底和经过辐照后的 CMOS 图像传感器样品进行光强响应度的测量。测试系统中的光源选择波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,激光束经过扩束镜和整形光阑进行调整,然后选用不同的衰减片对光强进行控制。通过分光镜对光束进行分割,分别测量两束光的光功率,以确定分光镜的分光比。在计算出分光镜分光比的基础上,对入射到 CMOS 图像传感器上的光功率进行计算。

2 实验结果

2.1 本底测试

测试 CMOS 图像传感器本底暗输出的特征参数,可以考察所选器件的性能状况,并为后续实验的对比工作进行数据储备。将 CMOS 图像传感器样品本底置于暗箱中,得到暗输出图像, MATLAB 处理后可知:该样品绝大多数像元暗输出为 0,暗输出灰度值相对较高的点位置比较稳定,是该样品的固有坏点。本底实验统计结果显示:所采用像感器具有较好的成像性能,最小灰度值为 0,最大灰度值为 12,暗输出平均灰度值为 2,暗输出不均匀度为 1.1533×10^{-6} 。

在带光学平台的暗箱中按照图 2 所示搭建光路,用于测试 CMOS 图像传感器的光强响应度。图 3

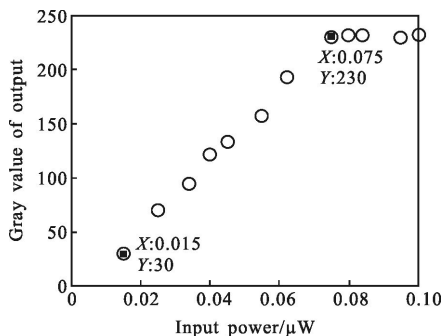


图 3 CMOS 图像传感器本底样品光强响应曲线

Fig.3 Light intensity response curve of nonradiative CMOS image sensor

为 CMOS 图像传感器样品本底的光强响应曲线。在入射光功率为 $0.015 \mu\text{W}$ 时,对应的输出图像平均灰度值为 30,当入射光功率为 $0.075 \mu\text{W}$ 时,输出图像平均灰度值为 230,此时 CMOS 图像传感器基本达到饱和,继续增加光功率,输出图像灰度值基本稳定。而在 CMOS 图像传感器输出的工作区域,线性响应度较好,满足此次实验的要求。

2.2 辐照后测试

2.2.1 辐照对暗输出影响结果

图 4 为 CMOS 图像传感器在工作状态和非工作状态下,分别接受辐射后得到的平均暗电流输出随辐射剂量的变化曲线。工作状态下接受辐射后, CMOS 图像传感器暗电流的平均灰度值在前 4 个辐射剂量值出现轻微的波动,并在 $5 \times 10^5 \text{ rad}$ 时迅速上升至 32,此时暗电流的平均灰度值约为本底时的 16 倍。而非工作状态接受辐射的 CMOS 图像传感器在 $1 \times 10^4 \text{ rad}$ 剂量点时,暗电流的平均灰度值为 8,累积注量达到 $5 \times 10^5 \text{ rad}$ 时暗电流的平均灰度值为 15,此时器件的暗电流的平均灰度值为本底实验测试时的 7.5 倍。

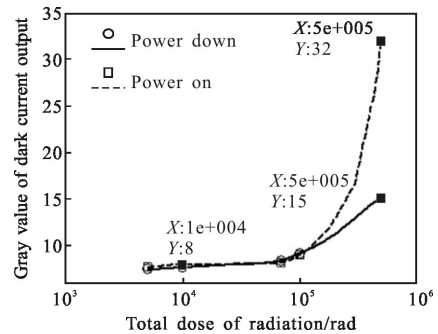


图 4 电子辐射对 CMOS 图像传感器暗电流输出变化影响

Fig.4 Effect of electron radiation on dark current output changes of CMOS image sensor

比较两条曲线可以发现: CMOS 图像传感器在吸收相同的辐射剂量后,工作状态下接受辐射的器件,暗电流增长幅度明显大于非工作状态下暗电流的增长幅度,即工作状态下接受辐射的器件比非工作状态下接受辐射的器件损伤更加严重。

2.2.2 辐照对光强响应度影响结果

图 5 为工作状态下接受辐射的 CMOS 图像传感器的光强响应与辐射累积剂量的关系曲线。辐射剂量从 $5 \times 10^3 \sim 7 \times 10^4 \text{ rad}$,光强响应曲线变化较小,且曲

线斜率几乎不变。当辐射累积剂量增加到 1×10^5 rad 时,光强响应曲线的变化幅度逐渐增大,辐射累积剂量达到 5×10^5 rad 时光强响应曲线的变化幅度更加明显,此时光强响应曲线的斜率明显减小,曲线整体呈向下偏移趋势,CMOS 图像传感器探测灵敏度降低,光强响应度降低。

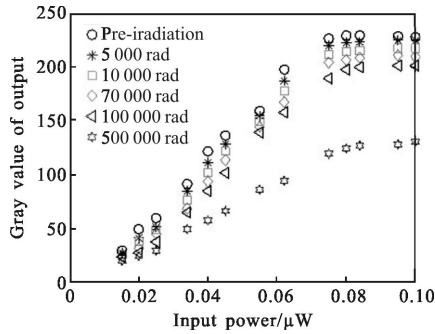


图 5 工作状态下接受不同剂量辐射的 CMOS 图像传感器的光强响应曲线

Fig.5 Light intensity response curve of different total dose of radiation when CMOS image sensor accepted radiation in operational mode

图 6 为非工作状态下接受辐射的 CMOS 图像传感器的光强响应与辐射累积剂量的关系曲线,随着辐射累积剂量的逐渐增加,光强响应曲线变化的趋势不大,整体向下略有偏移且斜率几乎不变,动态范围与辐射前大致相似。可见,非工作状态下接受辐射的 CMOS 图像传感器光强响应性能受辐射影响较小。

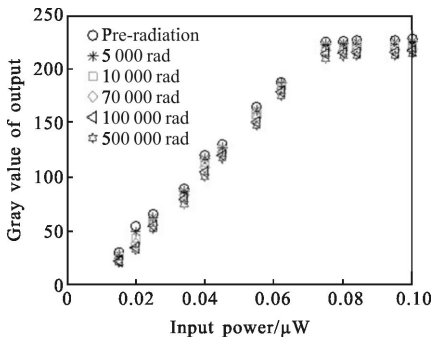


图 6 非工作状态下接受不同剂量辐射的 CMOS 图像传感器的光强响应曲线

Fig.6 Light intensity response curve of different total dose of radiation when CMOS image sensor accepted radiation with power down

3 分析与讨论

CMOS 图像传感器在辐射效应下性能有所下

降,使得暗电流增加,光强响应降低。同时,工作状态下接受辐射的 CMOS 图像传感器比非工作状态下接受辐射的 CMOS 图像传感器更容易受到辐射剂量的影响。

3.1 暗电流机理分析

对于暗电流来讲,高能粒子入射到像传感器的光敏区,电离辐射在器件的材料中产生电子-空穴对,光生电子作为信号电荷传输到输出电路。电子辐照还会产生陷阱电荷及界面态,一方面会导致电子与空穴结合而消失,另一方面,电子被陷阱电荷及界面态捕获。

工作状态下的器件,暗电流比非工作状态下的,主要因为在电场作用下,电场力会使更多的电子可以摆脱陷阱电荷的束缚,即电子释放率会有较大幅度提高,从而导致光电二极管势阱俘获更多的电子,宏观表现为器件的暗电流增大,高剂量时更为明显。

在温度不变的前提下,当辐射剂量低于一定值时,CMOS 图像传感器暗电流的增加并不明显,原因是辐射在图像传感器的光电材料中产生的电子-空穴对浓度与热生电子-空穴对浓度处于同一数量级,因此该过程中暗电流保持在初始暗电流附近,略显上升。当辐射剂量超过一定值时,辐射所致电子-空穴对浓度高出热生电子-空穴对浓度几个数量级,其暗电流输出呈现比较明显的线性增长。基于对辐射所致电子-空穴对浓度变化分析,结合实验数据,对 CMOS 图像传感器暗电流建立如下数学模型:

$$I_{\text{dark}} \cong \begin{cases} C(I_0 + K\Phi)e^{-E_a/k_B T}, & \Phi \geq \text{TID}_{\text{thres}} \\ I_0, & \Phi < \text{TID}_{\text{thres}} \end{cases}$$

式中: $\text{TID}_{\text{thres}}$ 为注量阈值,即传感器暗电流明显增长的辐射注量值; C 为辐射相关的常数; I_0 为器件初始的暗电流; K 为损伤因子; Φ 为辐射注量; E_a 为激活能量; k_B 为玻耳兹曼常数; T 为绝对温度。

从实验获得的数据中可以看出:阈值注量在 $7 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ rad 之间,为了获得辐射过程中的注量阈值,可以利用两端直线法计算出注量阈值,这与实验结果较为符合。

3.2 光强响应度机理分析

接受不同剂量辐射的 CMOS 图像传感器光强响应曲线显示,辐射会导致其探测灵敏度降低,输出灰度值减小,光强响应曲线斜率减小并且下移,工作状态下接受辐射比非工作状态下接受辐射的损伤更加

严重,这是由辐射在器件内部形成的界面态和陷阱电荷所致。

辐射导致半导体表面氧化层中产生大量的空穴-电子对,由于电子的迁移率大于空穴的迁移率,工作状态下,外电场使得电子向正极漂移,剩下大量空穴留在氧化层中,即在半导体表面氧化层中产生界面态。界面态产生的非辐射复合效应使器件的反向漏电流增大,电流增益降低,光强响应度降低。同时,陷阱电荷也会随着辐射剂量的增加而增加,使传感器内部 MOSFET 阈值电压发生偏移、亚阈值电流增加,使光电二极管空间电荷区厚度减小,导致更多电子进入其势阱,使其暗电流增加、漂移运动的光电流减小,从而影响 CMOS 图像传感器的光强响应能力。

在工作状态下由于外电场的存在,使得界面态的产生比较严重,同时随着辐射剂量的增加,陷阱电荷也逐渐增加,因此器件的光强响应度下降较为明显。而在非工作状态下虽然也存在界面态和陷阱电荷,由于没有外加电场,界面态的产生较少,因此光强响应度下降范围较小。

4 结 论

利用电子加速器模拟空间辐射环境,研究了电子辐射对 CMOS 图像传感器特性的影响。结果显示:当辐射总剂量超过 $7 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ rad 之间的某一个阈值时,暗电流会随着辐射剂量的增长几乎呈线性增加,并以此建立了 CMOS 图像传感器的暗电流模型。

工作状态下当辐射剂量超过 7×10^4 rad 时,光强响应曲线会下移,斜率减小,灵敏度降低,这是由于辐射在器件内部产生的电离效应和位移效应产生出界面态和陷阱电荷造成的。实验还发现:辐射期间不同的供电条件对 CMOS 图像传感器的损伤是不同的,工作状态下比非工作状态下的辐射损伤更加严

重。文中的实验结果可以为 CMOS 图像传感器的空间应用提供一定的理论和实验依据。

参考文献:

- [1] Luo B, Yang F, Yan L. Key technologies and research development of CMOS image sensors [C]//Geoscience and Remote Sensing(IITA-GRS), 2010 Second IITA International Conference on IEEE, 2010, 1: 322-325.
- [2] Zhou Yanping, Hao Na, Yang Rui, et al. Electron radiation of LED [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2013, 42(2): 454-485. (in Chinese)
周彦平,郝娜,杨瑞,等.发光二极管电子辐照效应的研究[J].红外与激光工程,2013,42(2):454-458.
- [3] Anelli G, Anghinolfi F, Rivetti A. A large dynamic range radiation-tolerant analog memory in a quarter-micron CMOS technology [J]. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 2001, 48(3): 435-439.
- [4] Johnston A H. Radiation damage of electronic and optoelectronic devices in space [C]//Proceedings of the 4th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application, 2000.
- [5] Bogaerts J, Dierickx B, Mertens R. Random telegraph signals in a radiation-hardened CMOS active pixel sensor[J]. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 2002, 49(1): 249-257.
- [6] Tan J, Buttgen B, Theuwissen A J P. Radiation effects on CMOS Image Sensors due to X-Rays [C]//Advanced Semiconductor Devices & Microsystems (ASDAM), 2010 8th International Conference on IEEE, 2010: 279-282.
- [7] Backhaus M. Radiation-hard active CMOS pixel sensors for HL-LHC detector upgrades [J]. *Journal of Instrumentation*, 2015, 10(2): C0203.
- [8] Zhou Yanping, Wang Xiaoming, Chang Guolong, et al. Radiation experiment of CMOS image sensor [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2011, 40(7): 1270-1273. (in Chinese)
周彦平,王小明,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.