

基于4晶体管像素结构的互补金属氧化物半导体图像传感器总剂量辐射效应研究

王帆 李豫东 郭旗 汪波 张兴尧 文林 何承发

Total ionizing dose radiation effects in four-transistor complementary metal oxide semiconductor image sensors

Wang Fan Li Yu-Dong Guo Qi Wang Bo Zhang Xing-Yao Wen Lin He Cheng-Fa

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024212 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024212

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

质子与中子辐照对电荷耦合器件暗信号参数的影响及其效应分析

[Effects of proton and neutron irradiation on dark signal of CCD](#)

物理学报.2015, 64(19): 194208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194208>

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 量子阱与体材料的 1 MeV 电子束辐照光致发光谱研究

[Photoluminescence spectra of 1 MeV electron beam irradiated \$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}\$ quantum well and bulk materials](#)

物理学报.2015, 64(15): 154217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154217>

电荷耦合器件在质子辐照下的粒子输运仿真与效应分析

[Particle transport simulation and effect analysis of CCD irradiated by protons](#)

物理学报.2015, 64(11): 114214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114214>

质子辐射下互补金属氧化物半导体有源像素传感器暗信号退化机理研究

[Dark signal degradation in proton-irradiated complementary metal oxide semiconductor active pixel sensor](#)

物理学报.2015, 64(8): 084209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084209>

质子辐照导致科学级电荷耦合器件电离效应和位移效应分析

[Analysis of ionizing and displacement damage mechanism in proton-irradiation-induced scientific charge-coupled device](#)

物理学报.2015, 64(2): 024220 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024220>

基于4晶体管像素结构的互补金属氧化物半导体图像传感器总剂量辐射效应研究

王帆¹⁾²⁾ 李豫东^{1)†} 郭旗¹⁾ 汪波¹⁾²⁾ 张兴尧¹⁾ 文林¹⁾ 何承发¹⁾

1) (中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 新疆电子信息材料与器件重点实验室,
中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2015年9月15日收到; 2015年9月27日收到修改稿)

对基于4晶体管像素结构互补金属氧化物半导体图像传感器的电离总剂量效应进行了研究, 着重分析了器件的满阱容量和暗电流随总剂量退化的物理机理. 实验的总剂量为200 krad(Si), 测试点分别为30 krad(Si), 100 krad(Si), 150 krad(Si)和200 krad(Si), 剂量率为50 rad(Si)/s. 实验结果发现随着辐照总剂量的增加, 器件的满阱容量下降并且暗电流显著增加. 其中辐照使得传输门沟道掺杂分布发生改变是满阱容量下降的主要原因, 而暗电流退化则主要来自于浅槽隔离界面缺陷产生电流和传输门-光电二极管交叠区产生电流. 实验还表明样品器件的转换增益在辐照前后未发生明显变化, 并且与3晶体管像素结构不同, 4晶体管像素结构的互补金属氧化物半导体图像传感器没有显著的总剂量辐照偏置效应.

关键词: 互补金属氧化物半导体图像传感器, 电离总剂量效应, 钳位二极管, 满阱容量

PACS: 42.88.+h, 85.60.Dw, 61.72.J-

DOI: 10.7498/aps.65.024212

1 引言

相比于电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)图像传感器, 互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)图像传感器有着低功耗、高集成度和价格低等优势^[1], 且近些年随着半导体工艺和CMOS图像传感器技术的发展, 尤其是4晶体管(transistor, T)像素结构的应用, CMOS图像传感器的成像性能已经达到甚至超过CCD图像传感器^[2]. CMOS图像传感器在空间领域的应用包括地球观测、遥感成像、星敏感器等星用图像采集功能, 其中以在星敏感器中的应用研究报道最多^[3]. 然而, 空间辐照环境对CMOS图像传感器造成的辐照损伤可能导致器件性能退化甚至失效^[4,5], 因此在空间应用中, 辐射损伤是我们最为关心的问题.

国外的一些小组较早开展了4T像素结构的

CMOS图像传感器的总剂量辐射效应研究. Chen等^[6]研究了使用埋沟源跟随器(buried-channel source follower, BSF)的4TCMOS图像传感器电离总剂量效应, 实验结果表明BSF可以大大降低辐照导致的随机电码(random telegraph signal, RTS)噪声并且可以提高图像传感器的输出摆幅和动态范围; Goiffon等^[7]对不同工艺条件的4TCMOS图像传感器进行了电离总剂量实验, 分析了器件RTS噪声、量子效率和暗电流随辐照总剂量的变化趋势, 结果表明暗电流仍是4T像素结构CMOS图像传感器的敏感参数; Tan等^[8]对4T CMOS图像传感器进行了X射线辐照实验, 结果表明辐照后浅槽隔离(shallow trench isolation, STI)漏电是器件退化的重要原因. 然而, 关于4T像素结构中钳位二极管(pinned photodiode, PPD)和传输门(transfer gate, TG)的电离辐射损伤机理和辐照导致的器件满阱容量(full well charge capacity, FWCC)下降

† 通信作者. E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn

至今仍未完全明白. 此外, 之前大部分的图像传感器辐射效应研究都是在器件未加偏置下进行的, 这样可能会忽视一些因局部电场所导致的增强效应.

国内仅对3T像素结构图像传感器开展了一些辐射效应研究工作, 汪波等^[3,9]对3T像素结构的CMOS图像传感器进行了电离总剂量和质子辐照实验, 着重分析了传感器暗信号退化机理. 目前尚未有关于更高性能的4T图像传感器辐射效应的文献报道. 本文通过4T图像传感器的电离总剂量辐照实验, 获得了器件的总剂量辐照效应规律, 分析了功能参数退化的物理机理, 深入揭示了4T像素结构的图像传感器电离损伤效应.

2 实验样品和实验过程

实验样品为某国产科学级CMOS图像传感器, 该器件制造工艺为0.18 μm专用CIS(CMOS Image Sensor)工艺. 它的分辨率为四百万像素, 读出噪声小于2个电子, 且具有高于96 dB的动态范围, 在零下20 °C时, 暗电流为0.15 e/s·pix. 它的像元尺寸为11 μm × 11 μm, 像元设计采用4T像素结构. 4T像素结构如图1所示. 在像素信号读出之前, 复位值先被采样. 这是因为在4T像素结构中, 信号电荷产生区和存储区分开, 分别在PPD和浮置扩散(floating diffusion, FD)区域进行, 因此在采样信号值后就可以实现电路真正意义上的相关双采样(correlated double sampling, CDS), 从而达到了消除像素复位噪声和固定模式噪声(fixed pattern noise, FPN)的目的, 从而大大提高了4T CMOS图像传感器的性能^[10].

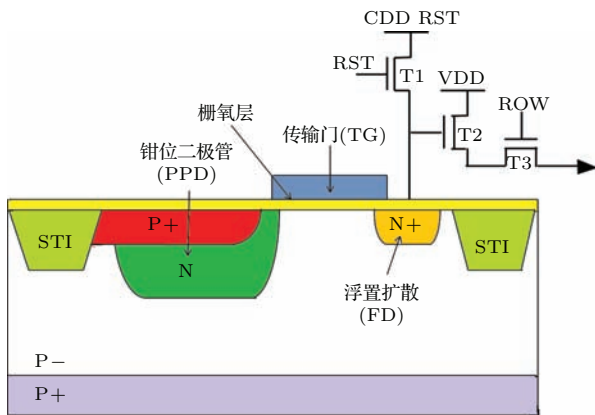


图1 4T像素单元结构

Fig. 1. Cross sectional view of a 4T pinned photodiode (PPD) pixel.

辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所的⁶⁰Co-γ射线辐照源上进行的. 实验的总剂量为200 krad(Si), 测试点分别为30 krad(Si), 100 krad(Si), 150 krad(Si)和200 krad(Si), 剂量率为50 rad(Si)/s. 为了考察不同偏置条件对器件辐射损伤的影响, 实验中采用了三种偏置状态, 1# 器件为静态偏置: 芯片像素阵列、模拟电路、输入输出电路处于正常供电状态, 其他如时序等电路接地; 2# 器件为动态偏置: 由驱动电路提供器件的驱动时序与偏压, 使器件处于正常工作状态; 3# 器件为零偏: 器件的所有引脚接地. 实验中为使驱动电路不受辐照影响, 以铅砖搭建屏蔽室对驱动偏置电路进行了屏蔽.

3 实验结果与讨论

3.1 转换增益随辐照总剂量的变化

转换增益的意义是每个有效光电子导致输出图像灰度值的增量, 它的单位为DN/e, 转换增益可由光子转移曲线(photo transfer curve, PTC)得到^[11]. 图2给出了样品器件的转换增益随辐照总剂量的变化情况, 从图中可以看出, 样品器件的转换增益在辐照前后并没有产生明显变化.

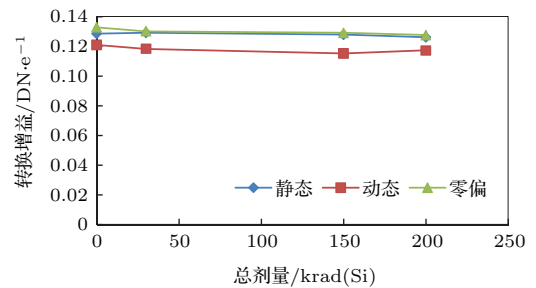


图2 不同剂量下的转换增益

Fig. 2. Change of conversion gain versus different dose.

CMOS图像传感器的工作原理是将光电二极管产生的光电子转换成电压经由放大器放大并在最后由模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)转换为一个数字信号(灰度值)^[11]. 我们可以知道转换增益主要是由后端的读出电路所决定, 由于样品器件为0.18 μm专用CIS工艺制造, 而总剂量辐照对深亚微米的薄栅MOSFET(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)器件造成的损伤几乎可以忽略(即使辐照总剂量达到1 Mrad), 因此样品器件上的模拟和数字电路几乎不会受到

电离损伤效应的影响^[12,13]. 所以样品器件的转换增益在辐照前后几乎没有变化.

3.2 满阱容量随辐照总剂量的变化

4T 像素的满阱容量即其钳位二极管 PPD 对光生电子的最大容纳能力. 其最大容量将由下式决定:

$$FWCC = (V_{pin} - V_{TG-PD}) \times C_{PPD}, \quad (1)$$

其中 V_{pin} 是 TG 开启时埋层 N 区内所能达到的最高电势, V_{TG-PD} 是 TG 关闭后 TG-PD (transfer gate-photo diode) 交叠区的最低电势, C_{PPD} 是 TG 关闭后电势居于上述最高和最低电势之间的耗尽区所形成等效电容. 由于满阱容量直接影响器件的动态范围, 因此满阱容量是图像传感器的重要参数.

如图 3 所示, 随着辐照总剂量的增加, 器件满阱容量下降且样品器件的不同偏置状态之间没有明显的退化差异. 由于此款器件采用 PPD 结构, 其表面 P 区的空穴浓度很高, 因此后道氧化介质层 (inter-level dielectric, ILD) 的电离损伤很难对 PPD 产生有效影响^[10,14], 即 (1) 式的 V_{pin} 和 C_{PPD} 不会受到总剂量辐射的影响产生明显变化. 辐射产生的满阱容量变化应主要归因于 TG 传输门沟道掺杂分布的变化. 当 TG 传输门周边的 STI 在电离总剂量效应条件下产生陷阱正电荷后, 将在 STI 的 Si-SiO₂ 表面产生感应的负电荷, 即此区域的电子浓度上升, 空穴浓度下降. 这些负电荷将使得 TG 的沟道电势势垒下降, 由于 4T 像素光电二极管 PD 结构设计上需要将占阱容量主要部分的浓掺杂 N 区放置在比较靠近 TG 和表面钳位 Pinned 层的位置上, 以便于电荷的转移读出, 因此 TG 沟道势垒下降后, 部分本来可以容纳光电子的掺杂区电势将高于沟道势垒, 这部分光电子不会积累在 PD 区域, 而是会经过 TG 流出 PD, 从而在一定程度上降低 PD 中可存储的电荷总容量.

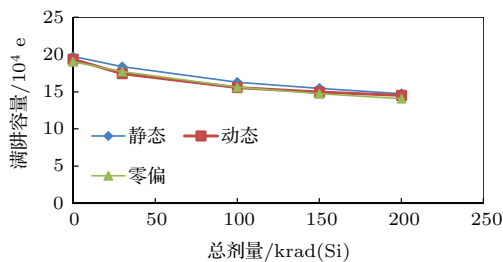


图 3 满阱容量随辐照总剂量的变化

Fig. 3. Change of full well charge capacity versus different dose.

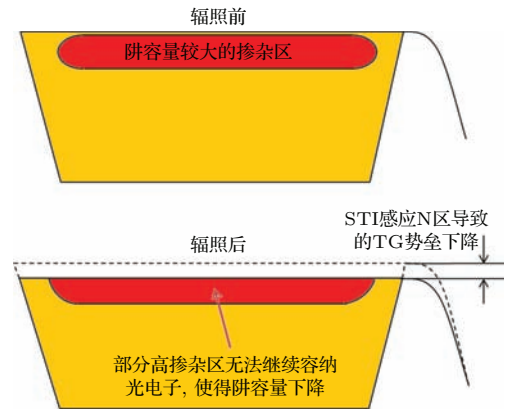


图 4 辐射导致满阱容量变化机理示意图

Fig. 4. Degradation mechanism of full well charge capacity induced by radiation.

3.3 暗电流随辐照总剂量的变化

像素暗电流即像素在未感光条件下由于各类缺陷 (界面缺陷和体缺陷) 的存在而自发产生且被耗尽区所吸收的电子所形成的电流, 像素暗电流的单位是 e/pixel·s.

如图 5 所示, 随着辐照总剂量的增加, 器件暗电流显著增大且样品器件的不同偏置状态之间没有明显的退化差异. 如图 6 所示, 4T 的像素暗电流主要产生机构包括: 体内 P-N 结本征反偏电流、STI 界面缺陷产生电流、PPD 表面缺陷产生电流、TG-PD 交叠区产生电流. 其中, 体内 P-N 结本征反偏电流主要受控于体缺陷的密度, 与衬底材料本身特性相关, 基本可以排除电离总剂量效应对衬底 Si 材料产生影响. 由于表面 P 区的高浓度基本可以完全将后道 ILD 本身以及电离损伤所产生的界面缺陷所钝化, 因此也可以排除辐射对 PPD 表面缺陷产生电流的影响.

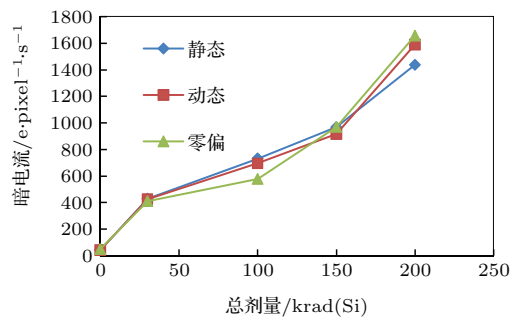


图 5 暗电流随辐照总剂量变化图

Fig. 5. Change of dark current versus different dose.

STI 界面产生电流的产生机理如下: 如图 7 所示, 埋层 N 区 (包含 PD 部分和 PD-TG 交叠部分) 的侧壁一般完全被浅沟槽隔离 STI 所包围, 以克服

器件之间的互扰。随着像素尺寸不断缩减, STI 距离N区越来越近, 其界面缺陷对N区的影响也就越来越无法忽略。首先, 随着像素尺寸的减小, STI 的区域同步缩小, 对其沟槽进行填充时越来越容易形成空洞, 为了保证填充的致密性, 一般采用高能高密度等离子体淀积 (high density plasma, HDP) SiO₂, 这样 Si-SiO₂ 界面就要承受比传统工艺更为严重的轰击, 更容易产生断裂的悬挂键, 形成界面缺陷。另一方面, 随着小尺寸工艺栅氧厚度逐渐减小, 硅和氧的不完全反应界面会生成一氧化硅等气态不稳定物质, 由于氧化层的厚度太薄, 这种不稳定的物质会在高温的情况下从氧化层中爆出, 从而在界面处留下位缺陷。在电离辐射过程中, 上述悬挂键和位缺陷的产生将在 γ 射线轰击作用下更加趋于活跃, 其密度会随着辐射总剂量的增加而持续上升, 因此会成为辐射后暗电流增加的主要来源之一。

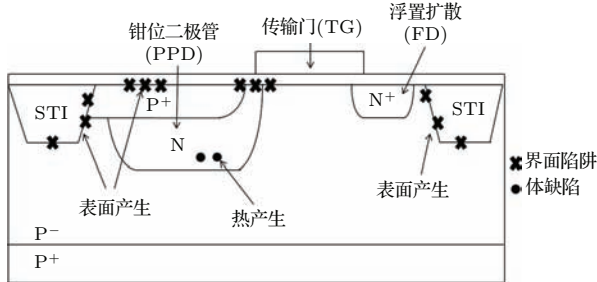


图6 4T暗电流主要产生机构示意图

Fig. 6. Main source of dark current in 4T pinned photodiode pixel.

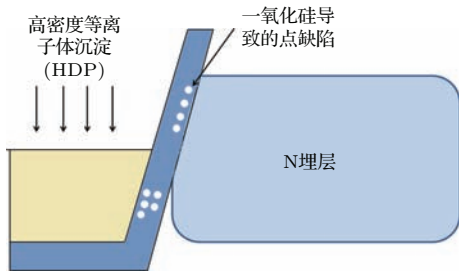


图7 STI Si-SiO₂ 界面缺陷

Fig. 7. Traps in STI Si-SiO₂ interface.

TG-PD 交叠区产生电流的产生机理如下: 在电荷传输期间, 由于高浓度的表面P区 (P+) 和TG传输门栅存在交叠, 即P+ 进入栅下, 由于P+ 层浓度过高, 将促使栅下部分N区耗尽出现夹断, 从FD到N区的电压将主要降落在这个狭小的区域上形成高电场 E 。在此电场的作用下, 部分光生载流子将达到速度饱和, 形成热载流子^[15]。这种热载流子

一方面将持续轰击 Si-SiO₂ 界面, 形成较多的表面快界面态, 造成界面缺陷水平和暗电流的上升。这种界面态导致的暗电流又在高电场的作用下与其他掺杂原子发生碰撞电离, 形成更多的热电子堆积在TG沟道中。如果TG沟道电势分布有利于热电子流入PD中, 那么暗电流水平就会陡然上升。在经过总剂量辐照后, TG 沟道栅氧化层界面将在电离损伤的作用下形成更多的悬挂键, 可供生成上述快界面态的缺陷密度相比于未辐照时有所上升, 因此会形成辐射产生暗电流的另一重要来源。

4 辐照过程中的偏置效应分析

该实验的另一个重要的结论就是对于4T像素结构的CMOS图像传感器而言, 辐照过程中器件的偏置状态不会对电离总剂量辐射效应产生影响, 这与一些3T像素结构图像传感器的辐射效应实验结果不同^[5]。就如上面所分析的, 深亚微米4T的CMOS图像传感器大部分的退化都来源于STI界面和TG-PD交叠区。由于STI是场氧区, 不管哪种偏置都不会对其造成影响, 因此STI界面造成的退化与偏置无关。

TG-PD 交叠区要分静态偏置和动态偏置来考虑。首先对于静态偏置而言, 由于此种偏置只在PPD上施加工作电压, 而TG上并无电压, 因此静态偏置不能对TG-PD交叠区产生很大影响; 对于动态偏置, 在器件正常工作时, TG传输电荷的过程只有大约1 μ s, 而读出整个像素阵列需要至少10 ms, 也就是说在传感器正常工作时, 99.99%的时间TG上并没有电压, 因此也就不会产生明显的偏置效应。

5 结论

经过 γ 射线辐照后, 4T像素结构图像传感器的满阱容量下降并且暗电流显著增加。通过分析辐射环境下氧化物陷阱电荷与界面态形成原因及其特性和图像传感器暗电流来源, 认为满阱容量变化主要是由于辐照导致的传输门沟道掺杂分布变化, 而暗电流则主要是由STI界面缺陷产生电流和传TG-PD交叠区产生电流所致。实验还表明4T像素结构的CMOS图像传感器没有显著的总剂量辐照偏置效应且传感器的转换增益对于电离总剂量效应不敏感。

参考文献

- [1] Furuta M, Nishikawa Y, Inoue T, Kawahito S 2007 *IEEE J. Solid State Circuits* **42** 766
- [2] Cao C, Zhang B, Wu L S, Li N, Wang J F 2014 *Chin. Phys. B* **23** 124215
- [3] Wang B, Li Y D, Guo Q, Liu C J, Wen L, Ma L Y, Sun J, Wang H J, Cong Z C, Ma W Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 056102 (in Chinese) [汪波, 李豫东, 郭旗, 刘昌举, 文林, 玛丽娅, 孙静, 王海娇, 丛忠超, 马武英 2014 物理学报 **63** 056102]
- [4] Claeys C, Simoen E (Translated by Liu Z L) 2008 *Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices* (Beijing: National Defence Industry Press) p20 (in Chinese) [Claeys C, Simoen E 著, (刘忠立 译) 2008 先进半导体材料及器件的辐射效应 (北京: 国防工业出版社) 第 20 页]
- [5] Hopkinson G 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2480
- [6] Chen Y, Tan J, Wang X Y, Mierop A J, Theuwissen A J P 2010 *Sensors*, 2010 *IEEE Kona, HI*, November 1–4, 2010 p1649
- [7] Goiffon V, Estribeau M, Marcelot O, Cervantes P, Magnan P, Marcandella C 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 2878
- [8] Tan J M, Bernhard Büttgen, Albert Theuwissens J P 2012 *IEEE Sensors Journal* **12** 2278
- [9] Wang B, Li Y D, Guo Q, Liu C J, Wen L, Ren D Y, Zeng J Z, Ma L Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 084209 (in Chinese) [汪波, 李豫东, 郭旗, 刘昌举, 文林, 任迪远, 曾骏哲, 玛丽娅 2015 物理学报 **64** 084209]
- [10] Wang X Y 2008 *Ph. D. Dissertation* (Delft: Technische Universiteit Delft)
- [11] EMVA 2012 *Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras* p5
- [12] Goiffon V, Cervantes P, Virriontois C 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 3076
- [13] Goiffon V, Magnan P, Saint-Pé O 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3494
- [14] Hopkinson G R, Mohammadzadeh A 2004 *International Journal of High Speed Electronics and Systems* **14** 419
- [15] Sze S M 2001 *Semiconductor Devices. Physics and Technology* (New York: John Wiley & Sons) p109

Total ionizing dose radiation effects in four-transistor complementary metal oxide semiconductor image sensors

Wang Fan¹⁾²⁾ Li Yu-Dong^{1)†} Guo Qi¹⁾ Wang Bo¹⁾²⁾ Zhang Xing-Yao¹⁾ Wen Lin¹⁾
He Cheng-Fa¹⁾

1) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices under Special Environments, CAS, Xinjiang Key Laboratory of Electric Information Materials and Devices, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Urumqi 830011, China)

2) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 15 September 2015; revised manuscript received 27 September 2015)

Abstract

Radiation effects on four-transistor (4T) active pixel sensor complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensor induced by γ -ray are presented. The samples are 4 megapixels resolution CMOS image sensor using 11 μm pitch high dynamic 4T pixels. They are manufactured with 0.18 μm specialized CMOS image sensor technology. Three samples have been exposed to 200 krad(Si) ^{60}Co γ -ray with different biasing condition (1[#] is static-biased, 2[#] dynamic-biased, and 3[#] is grounded during irradiation), and the dose rate is 50 rad(Si)/s. The influences of radiation on full well charge capacity, dark current, and conversion gain of the device are investigated. Experimental result shows that the conversion gain is not sensitive to the ionizing radiation, and it is mainly determined by the CMOS digital or analog circuits. It is known that the total ionizing dose for induced degradation in deep submicron MOSFET is negligible and so there is almost no radiation effect on the digital or analog circuits exposed to the ionizing radiation. Therefore, conversion gain does not have obvious degradation after irradiation. While full well charge capacity has a degradation after irradiation, which is due to the change of TG channel doping profile induced by the radiation. As the dose increases, dark current increases rapidly. The main source of dark current in 4T CMOS image sensor is the current from STI interface and TG-PD overlap region. Experimental result also shows that different from 3T CMOS image sensor, there is no biasing effect in 4T CMOS image sensor. This is because for the 4T CMOS image sensor most of the degradation come from STI interface and TG-PD overlap region, while biasing condition almost has no influence on both of them.

Keywords: complementary metal oxide semiconductor image sensor, total ionizing dose radiation effect, pinned photodiode, full well charge capacity

PACS: 42.88.+h, 85.60.Dw, 61.72.J-

DOI: 10.7498/aps.65.024212

† Corresponding author. E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn