不同偏置状态下 4T-CMOS 图像传感器的总剂量辐射效应

马林东[1,2,3],李豫东[1,2],郭 旗[1,2],文 林[1,2],周 东[1,2],冯 婕[1,2]

(1. 中国科学院新疆理化技术研究所 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室,
新疆 乌鲁木齐 830011;2. 新疆电子信息材料与器件重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:对不同偏置状态下的国产科学级 0.18 μm 工艺掩埋型 4T-CMOS 有源像素图像传感器进行钴-60γ射线辐照和退火实验,研究总剂量效应对图像传感器的性能影响,并观察是否存在总剂量偏置效应。着重分析暗电流、满阱容量等参数随累积剂量的变化规律。实验结果表明随着辐照总剂量累加,暗电流前期缓慢增长,之后退化明显加剧,这主要是由于辐照致界面态和氧化物陷阱电荷密度增加。4T-CMOS 图像传感器的暗电流主要由来源于 STI 界面,而辐照导致耗尽区展宽与 STI 接触使得暗电流增长加剧,同时,辐照导致的耗尽区展宽也引起满阱容量的下降。并且在 4T-CMOS 图像传感器的实验中没有发现明显的总剂量偏置效应。

关键词:CMOS 有源像素传感器; 总剂量效应; 暗电流
中图分类号:TN386.5 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1017002

Total ionizing dose radiation effects in 4T-CMOS image sensors at different biased conditions

Ma Lindong[1,2,3], Li Yudong[1,2], Guo Qi[1,2], Wen Lin[1,2], Zhou Dong[1,2], Feng Jie[1,2]

(1. Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments of Chinese Academy of Sciences,
Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences,Urumqi 830011, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi 830011, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To study the effect of total dose effect and biasing effect on image sensor performance, Cobalt-60 gamma ray irradiation and annealing experiments were carried out on 0.18 μm process buried 4T- CMOS active pixel image sensor under different bias conditions. Emphasis was placed on the variation of parameters such as dark current and full well capacity with cumulative dose. The experimental results show that with the accumulation of total dose of irradiation, the dark current increases slowly in the early stage, and then the degradation is obviously aggravated. The main source of dark current in 4T -CMOS image sensor currents from STI interface and depletion width increase touching to STI, which aggravates degradation of dark current. Full well capacities have a drop after

收稿日期:2018-05-05; **修订日期**:2018-06-03
基金项目:国家自然科学基金(11675259);中国科学院青年创新促进会和新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程(qn2015yx035)
作者简介:马林东(1990-),男,博士生,主要从事光电成像器件空间辐照效应方面的研究。Email:malindong14@mails.ucas.ac.cn
导师简介:李豫东(1982-),男,研究员,博士,主要从事光电材料与器件空间辐射效应方面的研究。Email:lydong@ms.xjb.ac.cn

irradiation, which was due to the the photodiode capacitance decreases when the depletion width increases induced by radiation. And there is no remarkable biasing effect at 4T-CMOS image sensor. degradation of dark current.

Key words: CMOS active pixel sensor; total ionizing dose radiation effect; dark current

0 引 言

随着微电子制造工艺的不断进步,CMOS 图像传感器的在光电性能上,比如暗电流、量子效率、噪声等方面取得巨大进步,并且凭借高集成度、低功耗、高集成度等优势,CMOS 图像传感器已经成为图像传感器领域的主流技术,得到广泛应用,其中文中的研究对象掩埋型 4 晶体管(4transistor,4T)CMOS 图像传感器最为成功[1]。除了传统的消费市场,4T-CMOS 图像传感器在辐射空间领域的应用也越来越广泛,涉及对地观测、遥感成像和星敏感器等功能。因此如今对于辐射环境下 4T-CMOS 图像传感器参数变化及机理分析已经成为国外的热点,且已经有一定成果。1997 年,B.R.Hancock 等最早开始了对 CMOS 图像传感器辐射效应的研究,发现暗电流退化主要来自光电二极管周边[2];V.Goiffon 研究小组以结构为出发点,设计不同结构的 4T-CMOS 图像传感器,总剂量辐照试验发现浅槽隔离(Shallow Trench Isolation,STI)与光电二极管耗尽区的距离会对暗电流的退化产生重要影响[3];Tan 等研究 4T-CMOS 图像传感器 X 射线电离效应,实验结果表明,STI 是暗电流的主要来源,并且发现电离辐射损伤会使量子效率降低[4-5]。然而没有对于暗电流退化的前后差异作解释,对于电离辐射损伤导致的电荷滞留机理至今仍未明确。国内对于 4T-CMOS 图像传感器的电离总剂量效应的研究也非常有限。2015 年,王帆等对 4T-CMOS 图像传感器展开总剂量辐照实验,研究结果表明辐射损伤未对外围电路产生显著影响[6]。文中通过不同偏置下的 4T-CMOS 图像传感器电离辐照实验,分析暗电流退化的不同阶段,解释辐射损伤导致电荷滞留数量增加的机理。

1 实验过程

文中科学级4T-CMOS 图像传感器采用商用 0.18 μm 工艺,像素尺寸 11 μm×11 μm,分辨率为 2 048(V)×2 040(H),图 1 所示为 4T 像素结构示意图,包括掩埋型光电二极管(Pinned photodiode,PPD)、传输栅 (Transfer gate,TG),浮置扩散区(Floating diffustion,FD)和读出电路。可以看到一个高浓度的 P+层将光电二极管与表面隔离开,这有效的降低了表面暗电流,并增大了空间电荷区,增加满阱容量。传输栅将光电二极管与浮置扩散区隔离开,通过时序控制实现相关双采样,有效降低固定图像噪声。在曝光期间,光生电子在 PPD 产生并收集。在 PPD 中光生电子通过传输栅转移到 FD 之前,需要对 FD 进行第一次复位一遍将残余电子移除,此时 FD 电势低于 PD,之后传输栅开启,电子流向 FD,同时 PDD 复位并为下一次曝光做准备。文中,以钴-60γ 射线为辐射源,进行不同工作状态下的总剂量效应辐照实验,总剂量最高达到 350 krad(Si)。重点研究传感器的暗电流、满阱容量以及电子滞留等参数的退化机理,深入揭示 4T-CMOS 图像传感器的电离损伤效应。

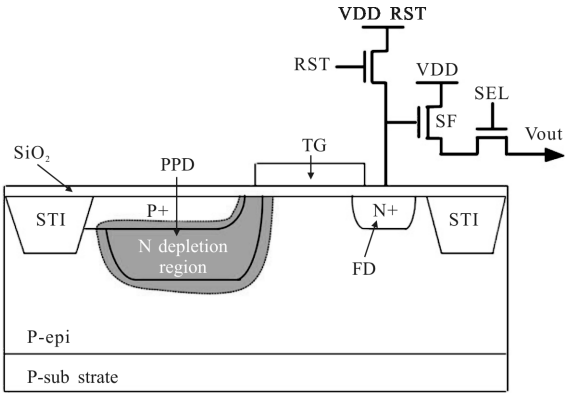

图 1 4T PPD 像素结构示意图

Fig.1 Structure diagram of a 4T PPD pixel

为了考察不同偏置对器件辐射损伤的影响,深入揭示器件受辐射后的损伤机理,如表 1 所示,实验中共采用了五种偏置状态:(1) 1# 器件加动态偏置:由驱动偏置电路提供器件的驱动时序与偏压,使器件处于工作状态;(2) 2#、3# 和 4# 器件加静态偏置:

除给器件电源管脚提供工作偏压和 TX 转移栅加不同静态电压外,其余时序管脚也接固定偏压(偏压值选择驱动脉冲的高电平),其中 TX 加 3.3、1.8、0 V 三种静态偏压;(3) 5# 器件不加电:器件的所有管脚全部短接并接地(GND)。退火过程采用与辐照时相同的偏置条件。

表 1 不同的辐照条件

Tab.1 Different irradiation conditions

Devices	Source	Biased condition	Dose/ rad(Si)·s^{-1}	TID/ krad(Si)
1#	γ	Dynamic	50	350
2#	γ	TX=3.3 V	50	350
3#	γ	TX=1.8 V	50	350
4#	γ	TX=0 V	50	350
5#	γ	GND	50	350

辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所 60Co-γ 射线辐照源上进行的,γ 光子平均能量为 1.25 MeV,射线源为柱状结构,通过距源棒距离的不同来调节辐照剂量率。辐照时待测器件放置于辐照源附近。为了使驱动偏置电路不受辐照环境影响,需要采用铅砖对电路板进行屏蔽。实验中辐照剂量率为 50 rad(Si)/s。测试点选取 10、30、50、100、150、200、350 krad(Si)。为了使驱动偏置电路不受辐照影响,以铅块进行了屏蔽,只有 CMOS 图像传感器器件接受辐照。在辐照剂量达到某个剂量时,降源作移位测试,且测试和辐照均在室温(23 ℃)下进行。

2 实验结果与分析

像素将收集到的光子转换成电子后, 再转变成电压信号,经过可编程增益放大器(PGA)将该电压信号放大,最终经模数转化器(ADC)转换成数字信号 DN 输出。累积剂量达到最大 350 krad(Si)时,所有模块的功能正常,由于采用的是 0.18 μm 工艺,MOS 管没有出现明显的阈值电压漂移[7],输出电路上没有产生明显的退化,对电荷-电压转化增益也不会产生明显的影响[5],因此主要关注电离效应对像素单元处的影响。

2.1 暗电流

暗电流是 CMOS 图像传感器像素在未受光照条件下存在于反偏状态光电二极管中的本底电流,其主要是由器件本身的热生成载流子产生,暗电流的存在对 CIS 的诸多特性指标均存在较大影响,其中最具典型性的是动态范围、信噪比和固定模式噪声。如图 2 所示为暗电流随着累积总剂量和常温退火时间的变化曲线。明显可以看出,在辐照过程中,暗电流随着电离剂量的累积而逐渐增大。从图中可以看出,不同辐照条件下暗信号退化并未表现出较大差异,偏置效应对参数退化的影响较小。

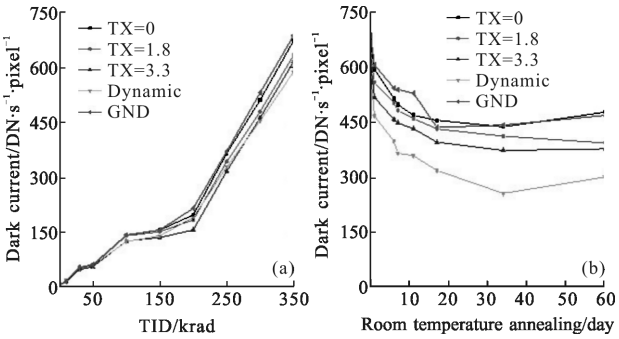

图 2 暗电流随着累积总剂量和室温退火时间变化

Fig.2 Variation of dark current with cumulative TID and annealing time at room temperature

4T-CMOS 图像传感器暗电流生成机制较为复杂,图 3 中,暗电流主要产生机制包括:体内 P-N 结

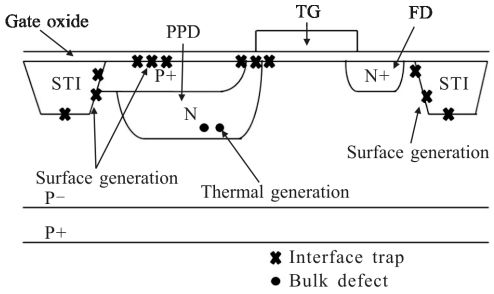

图 3 辐照前暗电流主要产生机制

Fig.3 Dark current generation mechanism before irradiation

热产生电流、STI 界面缺陷产生表面电流、PPD 表面缺陷产生表面电流[8]。其中,体内 P-N 结本征热产生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。同时,由于表面 P 区的高浓度掺杂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填充,因此辐射对 PPD 表面缺陷产生电流对整体暗电流的影响较小。因此辐射后,STI 界面缺陷

主要来源。

γ 辐照所致电离效应为表面暗信号的产生原因：在 STI 处，Si 与 SiO_2 界面处 Si 原本连续的周期晶格被打断形成界面态，在禁带中引入密度较高的能级。这些界面态在表面有很高的热电子激发率，其过程与体缺陷相同。与体缺陷的分离能级不同，界面态的能级在禁带中为连续分布，在导带及价带附近分布最高，其分布曲线类似 U 型[9]。设某能级为 E_t 的界面陷阱密度为 $D(E_t)$，则禁带中所有界面陷阱的电子空穴对产生率 G[10]：

$$G=\int_{E_v}^{E_c}\frac{\sigma_n\sigma_p v_{th}n_i D(E_t)}{\sigma_n n_i e^{(E_t-E_i)/kT}+\sigma_p n_i e^{(E_t-E_i)/kT}}\mathrm{d}E_t \tag{1}$$

式中：σ_n 和 σ_p 分别表示电子和空穴的俘获界面；E_i 代表本征费米能级；n_i 为本征载流子浓度；k 表示玻耳兹曼常数；T 为绝对温度。可见产生率 G 与 E_t 与 E_i 差值呈现指数关系，即在禁带中央能级几个 kT 范围内的 E_t 占据主导作用。而 $D(E_t)$在禁带中的分布为 U 型，为精简计算可以近似地认为 $D(E_t)$对于 G的贡献为常数 D_t。σ_n 和 σ_p 分别由于 $\sigma=\sqrt{\sigma_n\sigma_p}$，公式(1)可以进一步精简为：

$$G=\frac{\pi}{2}\sigma v_{th}D(E_t)kTn_i \tag{2}$$

因此，表面暗电流 J_s(单位 nA/cm²)为：

$$J_s=q\frac{\pi}{2}\sigma v_{th}D(E_t)kTn_i \tag{3}$$

另外，耗尽区暗电流产生公式可以表示为：

$$J_g=\frac{qwn_i}{2}D(E_t)\sigma v_{th} \tag{4}$$

式中：w 为耗尽区宽度。总的暗电流为：

$$J=J_s+J_g \tag{5}$$

如图 3 所示，在累积电离剂量达到 200 krad 前，暗电流随着电离剂量的增加而缓慢线性增大，此时主要是 STI 处辐射致界面态产生表面暗电流 J_s。而在累积电离剂量达到 200 krad 后，出现拐点，暗电流迅速增加。很明显，此时暗电流的上升并不完全取决于界面态密度的增加。分析认为，尽管辐射致氧化物陷阱电荷不能直接参与产生载流子，但是氧化物陷阱电荷带正电使得耗尽区展宽[11]，导致 STI 与空间电荷区接触，如图 4 所示，大量辐射致界面态进入耗尽区。此时耗尽区暗电流 J_g 对总暗电流起到了主导作用，导致了暗电流的迅速退化。

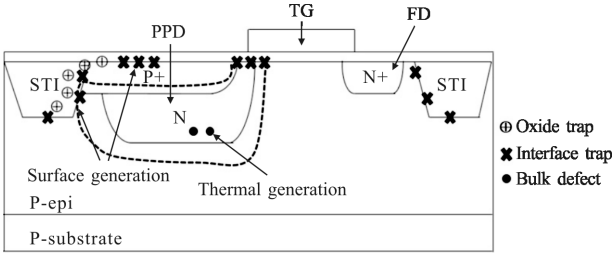

图 4 γ 辐照后暗电流产生示意图

Fig.4 Dark current generation mechanism after being irradiated by γ-ray

2.2 满阱容量

满阱即像素所能容纳的电子个数的极限，在它决定了图像传感器所能响应的信号的最大值，提高满阱容量，可以根本上提升 CMOS 图像传感器的动态范围、信噪比、灵敏度等像素单元关键性能指标[12]。由于 PDD 不能通过外加电压增大电容，满阱容量变化对 4T-CMOS 图像传感器的性能影响尤为严重，尤其是在恶劣的空间辐照环境下。PDD 以 P-N 结为基础感光并且收集光生载流子。很明显，光电二极管存在最大容量，所能容纳最大的电子数可以表示为：

$$Q=V_{pin}\times C_D \tag{6}$$

式中：V_{pin} 为 TG 关闭后，PPD 在平衡状态下所能达到的最大电势差，大小由 PPD 的结构和工艺决定；C_D 为 PPD 耗尽区电容，与耗尽区宽度成反比例关系。

如图 5 所示，不同偏置状态下的样品随着累积电离剂量的增加，饱和输出逐渐下降，而且下降趋势没有明显的差异，没有表现出偏置效应。电离效应未对外围电路参数产生有效的影响，因此，饱和输出的下降直接体现了 PPD 满阱容量的退化。

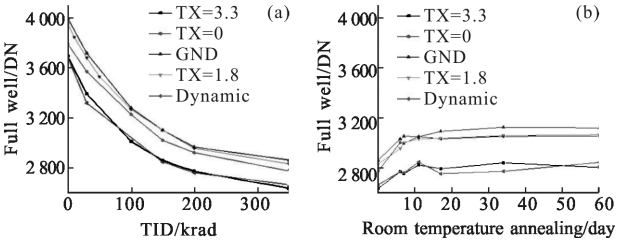

图 5 室温下满阱容量随总剂量及退火时间的变化关系

Fig.5 Variation of full well capacities with cumulative TID and annealing time at room temperature

前文提到，由于电离导致氧化物陷阱正电荷的产生，使得 PPD 耗尽区展宽，因此，耗尽区电容 C_D 下降。同时，研究表明，电离效应会略微增大 V_{pin}[14]，但是 C_D

退化则更为严重。容纳的光生载流子随累积电离剂量的增加而下降,最终体现在饱和输出值的下降。

另外一个引起满阱容量下降的重要因素是传输栅下沟道侧壁泄露电流的上升。由于采用的标准 0.18 μm CMOS 工艺,传输栅下的氧化层厚度大约为 7 nm, 电离辐射产生的氧化物陷阱电荷在栅氧中可以忽略, 而 STI 与沟道侧壁接触面将产生大量不可忽略的氧化物陷阱电荷。氧化物陷阱带正电,使得沟道侧壁处于反型, 即使在传输栅上未加电压的情况下, 部分 PD 内信号电荷也可以通过沟道侧壁转移到 FD 内, 而且 PD 内存储的信号电荷越多,PD 与 FD 之间的电势也就越大, 泄露电荷也就会随之增加,始终无法达到满阱。因此,传输栅下沟道侧壁漏电流随这电离辐射剂量的增加而增大, 是满阱容量下降不可忽略的因素。

从图 5 中可以看出, 在常温退火初期满阱容量部分恢复,然后趋于稳定。这主要由于常温下氧化物陷阱电荷部分退去,PPD 电容有一定程度恢复。

2.3 偏置效应分析

实验结果显示,4T-CMOS 图像传感器在电离辐射下没有表现出明显的偏置效应。电离总剂量效应对 0.18 μm 工艺 MOSFET 退化影响是可以忽略的,与偏置状态无关,因此,外围电路在电离环境下不会受到影响。绝大部分的退化均来自光电二极管与 STI 的接触处, 而不同偏置电压对于光电二极管周边 STI 场强的改变很小。因此不同偏置状态对 CMOS 图像传感器的整体影响基本一致, 没有表现出电离辐射偏置效应。

3 结 论

经过 γ 射线辐照后, 电离总剂量最终达到 350 krad, 不同偏置状态下的 PPD CMOS 图像传感器功能正常,几个关键参数退化明显。实验结果表明电离效应导致 STI 处产生大量界面态对于暗电流的增加起到了主导作用, 同时由于氧化物陷阱正电荷密度的增加展宽了 PD 耗尽区宽度与 STI 接触,界面态进入耗尽区, 使得暗电流在总剂量达到 200 krad 后进一步加速退化。另外,耗尽区展宽导致暗电流加速退化的同时也使得 PD 满阱容量的下降, 饱和输出降低。试验还表明 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。

参考文献:

[1] Yan Jin yun, Jiang Jie, Zhuang Guangjun. Photoelectric response of ICMOS on total dose irradiation [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2014, 22(12): 3153-3159. (in Chinese)

[2] Furuta M, Nishikawa Y, Inoue T, et al. A high-speed, high-sensitivity digital CMOS image sensor with a global shutter and 12-bit column-parallel cyclic A/D converters [J]. ***IEEE Journal of Solid-State Circuits***, 2007, 42(4): 766-774.

[3] Shoushun C, Boussaid F, Bermak A. Robust intermediate read-out for deep submicron technology CMOS image sensors[J]. ***IEEE Sensors Journal***, 2008, 8(3): 286-294.

[4] Wang Bo, Li Yudong, Guo Qi, et al. Total dose effects in 0.5 μm CMOS active pixel image sensor[J], ***Chinese Journal of Luminescence***, 2015,36 (2): 242-248. (in Chinese)

[5] Wang Bo, Wen Lin, Li Yudong, et al. Degradation of saturation output of CCD induced by proton, neutron and cobalt-60 irradiation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(S1): 35-40. (in Chinese)

[6] Bogaerts J, Dierickx B, Mertens R. Random telegraph signals in a radiation-hardened CMOS active pixel sensor [J]. ***IEEE Transactions on Nuclear Science***, 2002, 49(1): 249-257.

[7] Goiffon V, Hopkinson G R, Magnan P, et al. Multilevel RTS in proton irradiated CMOS image sensors manufactured in a deep submicron technology [J]. ***IEEE Transactions on Nuclear Science***, 2009, 56(4): 2132-2141.

[8] Wang X Y. Noise in submicron CMOS image sensors [D]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2008.

[9] Hopkins I H, Hopkinson G R. Random telegraph signals from proton-irradiated CCDs [J]. ***IEEE Transactions on Nuclear Science***, 1993, 40(6): 1567-1574.

[10] Hopkins I H, Hopkinson G R. Further measurements of random telegraph signals in proton irradiated CCDs [J]. ***IEEE Transactions on Nuclear Science***, 1995, 42(6): 2074-2081.

[11] Bogaerts J, Dierickx B, Meynants G, et al. Total dose and displacement damage effects in a radiation-hardened CMOS APS[J]. ***IEEE Transactions on Electron Devices***, 2003, 50(1): 84-90.

[12] Nuns T, Quadri G, David J P, et al. Measurements of random telegraph signal in CCDs irradiated with protons and neutrons [J]. ***IEEE Transactions on Nuclear Science***, 2006, 53(4): 1764-1771.