

# $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照 CMOS 有源像素传感器诱发暗信号退化的机理研究\*

汪波<sup>1)2)3)4)</sup> 李豫东<sup>1)2)3)</sup> 郭旗<sup>1)2)3)</sup>† 刘昌举<sup>5)</sup> 文林<sup>1)2)3)4)</sup> 玛丽娅<sup>1)2)3)4)</sup>  
孙静<sup>1)2)3)4)</sup> 王海娇<sup>1)2)3)4)</sup> 丛忠超<sup>1)2)3)4)</sup> 马武英<sup>1)2)3)4)</sup>

1) (中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

2) (中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

3) (新疆电子信息材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

4) (中国科学院大学, 北京 100049)

5) (重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

(2013年10月8日收到; 2013年11月13日收到修改稿)

对某国产 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor, 互补金属氧化物半导体) N 阱工艺 CMOS 有源像素传感器的电离总剂量效应进行了研究, 通过  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照试验, 着重分析了对辐射最敏感的暗信号和暗信号非均匀性随总剂量退化的物理机理. 实验发现, 随着辐照剂量的增加, 暗信号和暗信号非均匀性显著退化, 并且静态偏置条件下器件的辐射损伤最大. 暗信号退化的主要原因是光电二极管 pn 结和复位晶体管源端  $\text{N}^+/\text{P}_{\text{sub}}$  结表面边界周围的  $\text{SiO}_2$  产生了大量的界面态; 暗信号非均匀性显著退化是由于光电二极管的暗信号增大引起. 上述工作可为深入研究 CMOS 有源像素传感器的抗辐射加固及其辐射损伤评估提供参考.

**关键词:** CMOS 有源像素传感器, 暗信号,  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线, 损伤机理

**PACS:** 61.80.Ed, 61.82.Fk, 61.80.-x, 07.85.-m

**DOI:** 10.7498/aps.63.056102

## 1 引言

随着小卫星以及微纳卫星的发展, 对其姿态控制的精度要求越来越高, 基于电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 的星敏传感器因重量、功耗方面的原因难以应用在微纳卫星上<sup>[1,2]</sup>. CMOS 有源像素传感器 (CMOS active pixel sensor, CMOS APS) 以其集成度高、体积小、功耗低等优点<sup>[3,4]</sup>, 成为在轨星敏传感器设计中 CCD 的有力竞争对手. 虽然目前 CMOS APS 的动态范围、灵敏度及噪声等指标与 CCD 相比较差, 在高质量成像方面不及 CCD, 但随着 CMOS APS 技术的不断发展, 其各方面性能正在逐渐达到并赶超 CCD<sup>[5,6]</sup>,

使得 CMOS APS 在空间光学载荷中有着良好的应用前景.

宇宙空间存在银河宇宙线粒子、太阳宇宙线粒子和被地磁场捕获的高能带电粒子 (主要为质子、电子), 形成了天然空间辐射环境<sup>[7-11]</sup>, 卫星及航天器必然要受辐射环境影响, 辐射损伤诱发 CMOS APS 暗信号增大, 导致成像质量变差, 严重的会使 CMOS APS 功能失效. 为了实现器件在恶劣空间环境下的应用, 有必要对器件进行辐射效应研究. 国外较早开展了 CMOS APS 的辐射效应模拟实验研究, 由于暗信号是对辐射最为敏感的参数之一, 所以大量工作集中于不同粒子辐照导致器件暗信号退化的机理研究. Bogaerts 等<sup>[12]</sup> 通过不同能量

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11005152) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn

不同注量的质子辐照实验, 定量研究了质子的能量和能量密度对 CMOS APS 暗信号和暗信号非均匀性的影响. 结果表明, 若考虑辐射引起的场增强发射, 可以准确预测暗电流密度的增加. Cohen 等<sup>[13]</sup>进行了 CMOS APS 的  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  和质子辐照实验, 分析了电路的暗信号、灵敏度、图像噪声等应用参数随辐照总剂量、质子能量、质子注量的变化趋势. 结果表明暗信号是最敏感的辐照参数. Goiffon 等<sup>[14]</sup>进行了 CMOS APS 的  $\gamma$  辐照实验, 定量区分了氧化物陷阱电荷、界面态对暗电流增大的影响, 结果表明, 辐射引起的氧化物陷阱电荷通过增大硅-二氧化硅界面处的空间电荷区使暗电流增大, 界面态则起产生中心作用从而导致暗电流增大.

而在国内, CMOS APS 的辐射效应的相关研究报道较少, 文献<sup>[15]</sup>通过  $\gamma$  辐照实验考查了 CMOS APS 的图像噪声及暗场输出图像受辐照后的变化趋势, 定性分析了 CMOS APS 的  $\gamma$  总剂量辐照损伤机理. 可见, 国内对 CMOS APS 的辐射效应研究尚处于探索阶段. 为了获得 CMOS APS 暗信号随  $\gamma$  总剂量变化规律, 揭示暗信号退化的辐射损伤机理. 本文对某国产 CMOS APS 进行了不同偏置  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  辐照实验, 并在辐照后考察了器件的退火特性, 分析了器件暗信号的失效机理.

## 2 器件结构及辐照实验

实验样品选用某国产  $0.5\ \mu\text{m}$  CMOS N 阱工艺制造的  $256\times 256$  元 CMOS APS, 像元尺寸为  $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$ . 器件集成了像素单元、垂直移位与水平移位暂存器、时序控制等模拟与数字部分, 曝光时间通过改变时序进行控制. 像素单元中除含有 N 阱/P 衬底的光敏二极管外, 还包括复位管、源极跟随器及行选通管等 MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, 金属-氧化物-半导体场效应晶体管) 组成的有源电路, 其栅氧厚度为  $12.5\ \text{nm}$ , 场氧厚度约为  $500\ \text{nm}$ .

像素单元结构如图 1 所示. 当复位脉冲到来时,  $M_1$  导通, 光电二极管被瞬时复位, 复位脉冲消失后  $M_1$  截止, 光电二极管开始积分光信号.  $M_2$  是源极跟随器, 对电流放大, 经过一定的积分时间后, 选通脉冲到来,  $M_3$  导通, 使被放大的光信号输送到列总线上<sup>[16]</sup>.

辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所的  $2.6\times 10^{16}\ \text{Bq}$  的  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照源上进行的,  $\gamma$  光子平均能量为  $1.25\ \text{MeV}$ , 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. 在同型号同批次的器件样品中随机抽取了两只器件作为实验样品, 分别编为 1#, 2#. 为了考察不同偏置条件对器件辐射损伤的影响, 实验中采用了两种偏置状态, 1# 器件为动态偏置: 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# 器件为静态偏置: 除给器件电源管脚提供工作偏压外, 其余驱动时序管脚也接固定偏压 (偏压值选择驱动脉冲的高电平). 辐照实验示意图如图 2 所示. 为使驱动偏置电路不受辐照影响, 以铅砖搭建成屏蔽室对驱动偏置电路进行了屏蔽. 辐照实验完成后, 对器件进行了  $24\ \text{h}$  室温退火以及  $168\ \text{h}$  的  $100\ ^\circ\text{C}$  高温退火, 样品的退火偏置与辐照偏置保持一致. 实验过程中测试了器件暗信号、暗信号非均匀性等参数, 测试工作均在  $20\ \text{min}$  之内完成.

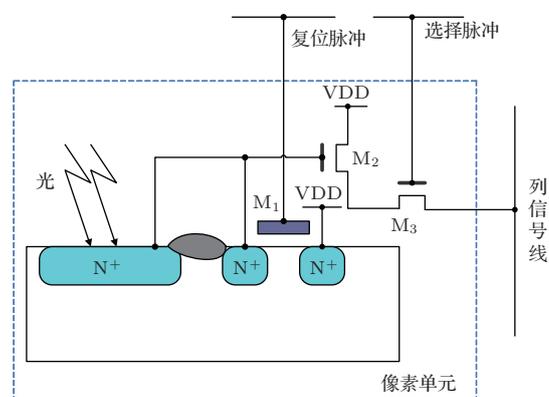


图1 像素单元结构

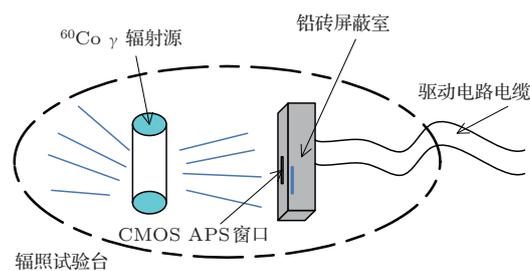


图2 CMOS APS 的辐照实验示意图

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 暗信号、暗信号非均匀性随辐照的变化

#### 3.1.1 暗信号随辐照的变化

暗信号随总剂量的变化曲线如图 3 所示. 从图可以看出, 动态偏置条件下器件暗信号随总剂量增加而线性增大. 静态偏置条件下, 器件在总剂量较

小时, 暗信号缓慢增大, 当总剂量大于 30 krad(Si) 时, 暗信号迅速增大, 且退化程度明显大于动态偏置.

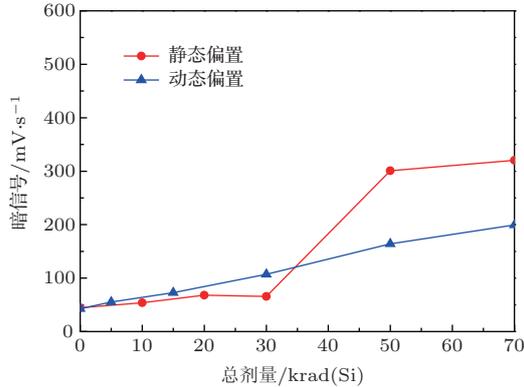


图3 暗信号随总剂量变化关系

由文献 [17,18] 工作可知, CMOS APS 暗电流主要由光电二极管暗电流、寄生场氧晶体管漏电流以及器件间的互连缺陷造成. 硅 pn 结在室温下的反向电流中, 扩散电流微不足道, 主要是由耗尽区复合-产生中心的作用而产生的电子-空穴对所引起的 [19]. 因此, 光电二极管的暗电流主要为反向产生电流.

根据 Shockley-Read-Hall 理论, 假设界面态能级  $E_i = E_t$  [20], 复合率公式为

$$U = \frac{N_{it}\sigma v_{th}(np - n_i^2)}{n + p + 2n_i}, \quad (1)$$

式中,  $U$  为复合率;  $N_{it}$  为界面态密度;  $\sigma$  为陷阱俘获截面;  $v_{th}$  为载流子热速度;  $n, p$  分别为电子和空穴的浓度;  $n_i$  为本征载流子浓度.

当 pn 结加反向偏压  $V_R$  时,  $np = n_i^2 \exp(qV_R/kT) \ll n_i^2$  ( $q$  为单位电子电荷,  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为热力学温度), 复合率  $U$  为负值, 它实际上表示电子-空穴对的产生率 [19]. 用  $G$  表示产生率, 则  $G$  为正值. 因此

$$G = -U = \frac{N_{it}\sigma v_{th}(n_i^2 - np)}{n + p + 2n_i}. \quad (2)$$

由文献 [21] 知,  $G$  的最大值由下式给出:

$$G_{max} = \frac{1}{2}N_{it}\sigma v_{th}n_i. \quad (3)$$

因为产生电流  $I_{rev} = qW\Delta x G_{max}$  [22] ( $W$  为 pn 结耗尽层宽度,  $\Delta x$  为场致耗尽层的宽度), 于是有

$$I_{rev} = qW\Delta x G_{max} = \frac{1}{2}qW\Delta x N_{it}\sigma v_{th}n_i. \quad (4)$$

因此, 产生电流取决于场致耗尽层的宽度  $\Delta x$  和界面态  $N_{it}$ . 当  $\gamma$  射线辐射到光电二极管时, 在

pn 结表面边界周围的  $SiO_2$  里 (即用于器件隔离的 LOCOS, Local Oxidation of Silicon, 硅的局部氧化; 如图 4 所示) 产生大量的氧化物陷阱电荷  $N_{ot}$ , 这些正的氧化物陷阱电荷在光电二极管 pn 结边缘形成一个表面厚度为  $\Delta x$  ( $\Delta x$  的大小与氧化物陷阱电荷量成正比) 的耗尽层, 即 (4) 式中的场致耗尽层, 如图 4(b) 所示. 当它和 pn 结耗尽区连在一起时便扩大了总的耗尽区体积, 增加了耗尽区内产生-复合中心的总数, 也即增加了单位时间在耗尽区内少数载流子总的产生率, 从而增大了反向电流.  $\gamma$  射线还在硅和二氧化硅边界处产生界面态  $N_{it}$ , 界面态位于靠近硅和二氧化硅界面一至二个原子键的距离 (约 0.5 nm) 范围内, 可以较快的与硅导带和价带交换电荷, 因此界面态充当产生中心, 增加了表面产生中心密度, 使表面漏电流增大. 因此, 随着辐照总剂量的增大, 场致耗尽层的宽度  $\Delta x$  和界面态  $N_{it}$  不断增大, 由 (4) 式可知, 光电二极管的反向产生电流不断增大, 即暗电流不断增大.

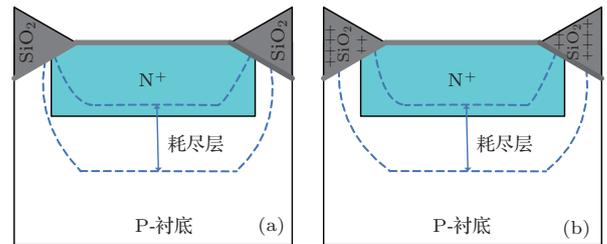


图4 光电二极管耗尽区辐照前后截面图

复位晶体管的源端  $N^+/P$  衬底结, 受辐照后的变化机理和光电二极管 pn 结相似 (如图 1 所示), 因此随着辐照总剂量的增大, 复位晶体管源端  $N^+/P_{sub}$  结反向产生电流  $I_{revN^+}$  亦不断增大. 为了便于比对光电二极管 pn 结和复位晶体管的源端  $N^+/P$  衬底结, 图 1 使用了截面图与电路符号结合的示意图.

随着辐照总剂量的增大, 在场氧中将产生大量的氧化物陷阱电荷, 使寄生场氧晶体管亚阈值导通, 在厚的场氧化物区 (实验样品的场氧厚度约为 500 nm) 与半导体区相接的表面区形成低阻电流泄漏通道, 导致器件寄生场氧晶体管的漏电流  $I_{FOXFET}$  增大 [23]. 随着总剂量的增大, 由于栅氧结构的 N 沟管阈值电压负向漂移而引起的 N 沟道截止时的亚阈值泄漏电流  $I_{Rst}$  也逐渐增大. 由以上分析可知  $I_{rev}, I_{revN^+}, I_{FOXFET}, I_{Rst}$  均随总剂量增大而增大, 因此, 像素单元的暗电流  $I_D$  随总剂量增大而增大.

### 3.1.2 暗信号非均匀性随辐照的变化

实验过程中还测试了 CMOS APS 的暗信号非均匀性, 如图 5 所示, 动态偏置条件下器件暗信号非均匀性随总剂量线性增大, 静态偏置条件下器件暗信号非均匀性先缓慢增大, 在剂量累积到 30 krad(Si) 后, 随总剂量迅速增大.

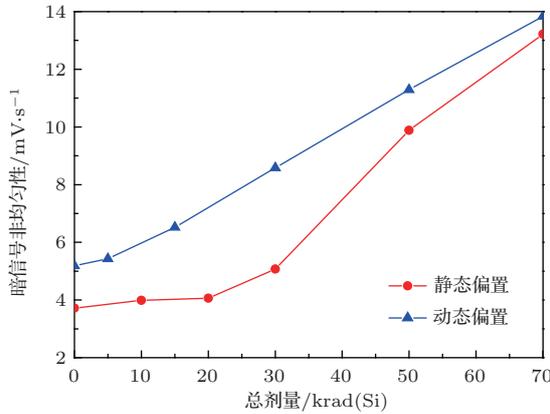


图 5 暗信号非均匀性随总剂量的变化关系

对比图 3 可以看出其变化趋势和暗信号随总剂量变化趋势类似, 与文献 [17] 报道相符. 从图中还可以看出整个辐照过程中, 动态偏置的辐射损伤大于静态偏置, 这可能与在辐射剂量较小时 (30 krad(Si) ) 动态偏置的暗信号辐射损伤更大一点 (如图 3 所示) 有关. 暗信号非均匀性主要是由像素放大器的偏差和光电二极管的暗电流引起. 本实验样品在像素后端输出中采用了相关双采样技术, 去除了像素放大器偏差的影响, 因此暗信号非均匀性的增大主要是由光电二极管的暗电流增大引起.

## 3.2 暗信号、暗信号非均匀性的退火特性

### 3.2.1 暗信号的退火特性

为了进一步研究暗信号增大的辐射损伤机理, 区分氧化物陷阱电荷和界面态对暗信号增大的贡献, 确定 CMOS APS 暗信号的来源, 在辐照实验结束后, 随即对器件进行了退火效应研究. 图 6 给出了器件在室温条件下暗信号随退火时间的变化关系.

从图 6 中可以看出暗信号在室温退火前期继续增大, 暗信号的退化表现出明显的滞后效应, 随着室温退火时间的增大, 暗信号变化缓慢, 逐渐趋于平稳.

在辐照中, 氧化物陷阱电荷的产生速度很快, 并且在辐照停止之后很快就不再增长; 然而, 对于

界面态, 氢离子在电场的作用下通过跳跃运输的方式到达界面处与钝化的硅悬键作用而产生界面态, 由于氢离子的跳跃运输具有时间离散性, 所以界面态在辐照停止后的一段时间内继续增长 [24,25]. 图 6 中所示的暗信号在停止辐照后的一段时间内继续增加的趋势同界面态变化规律相符合.

在室温退火结束后, 随即对器件进行了 168 h, 100 °C 的高温退火. 暗信号随高温退火时间的变化关系如图 7 所示. 由图可知高温退火前期, 暗信号继续增大, 20 h 后趋于稳定, 在其后的退火时间里, 暗信号虽缓慢下降但仍远大于初始值.

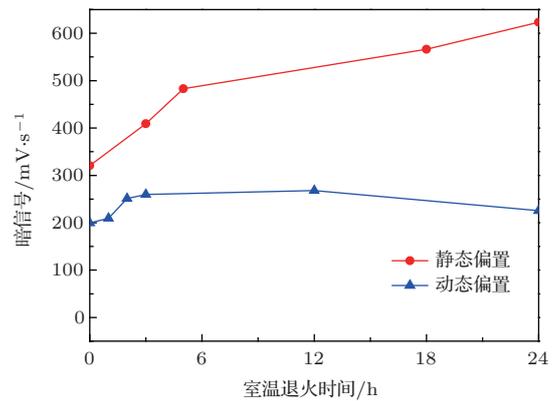


图 6 暗信号随室温退火时间的变化关系

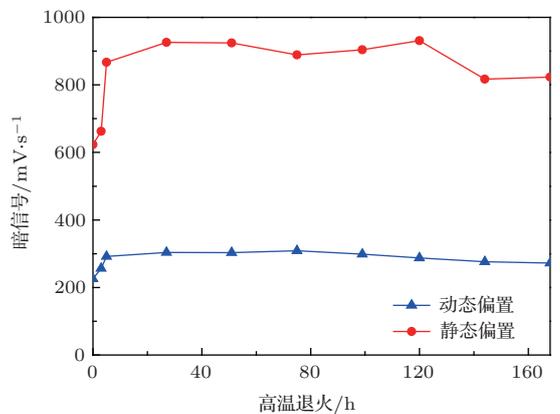


图 7 暗信号随高温退火时间的变化关系

氧化物陷阱电荷不稳定, 在常温下可以退火, 100 °C 高温下退火速度更快; 常温下界面态非常稳定, 不易退火, 100 °C 下也只有部分退火 [26]. 所以, 经常温 24 h 退火和高温退火后, 主要由氧化物陷阱电荷引起的寄生场氧晶体管的漏电流  $I_{FOXPET}$  和亚阈值泄漏电流  $I_{Rst}$  基本消失, 光电二极管 pn 结和复位晶体管源端  $N^+/P_{sub}$  结表面边界周围的  $SiO_2$  里仍有大量的界面态, 因此  $I_{rev}$  和  $I_{revN^+}$  在常

温和高温退前期火过程中不断增大. 随着高温退火时间的延长, 界面态不再增大, 与此同时氧化物陷阱电荷不断减小, 因此暗信号在高温退火后期缓慢减小, 但仍远大于初始值. 由以上分析可知, CMOS APS 受辐照后, 暗信号的退化主要是由于光电二极管 pn 结和复位晶体管源端  $N^+/P_{sub}$  结表面边界周围的  $SiO_2$  产生了大量的界面态引起  $I_{rev}$  和  $I_{revN^+}$  增大的缘故. 从图 1 中可以看出光电二极管 pn 结表面边界周长远大于复位晶体管源端  $N^+/P_{sub}$  结表面边界周长, 因此暗信号的变化大部分是由  $I_{rev}$  增大引起, 其次是  $I_{revN^+}$ .

### 3.2.2 暗信号非均匀性的退火特性

为进一步研究暗信号非均匀性的辐射损伤机理, 在辐照实验结束后, 同样对暗信号非均匀性进行了退火效应研究. 图 8 是暗信号非均匀性随室温退火时间的变化关系, 从图中可以看出, 静态偏置条件下暗信号非均匀性迅速增大, 其值在室温退火 3 h 后便大于 1# 器件(动态偏置). 表现出室温退火与暗信号室温退火类似的特性.

由前面 3.2.1 分析可知, 随着室温退火时间的增大, 界面态逐渐积累, 增加了表面产生中心的密度, 使表面漏电流增大. 特别是靠近禁带中心的辐射感生缺陷, 在场致耗尽区的电子-空穴对产生率非常高, 这种缺陷会增大热载流子生成率, 对于 CMOS APS 这种包含大量像素单元的器件, 像素间的辐射感生缺陷引入的暗电流差异很明显, 因此

光电二极管的暗电流越大像素间的差异就越大, 即暗信号非均匀性越大. 暗信号的变化大部分又是因为光电二极管的暗电流增大引起, 所以暗信号非均匀性的变化跟随暗信号变化, 与其变化趋势基本相同.

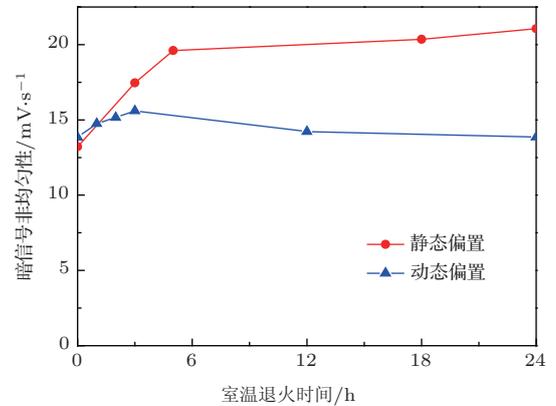


图 8 暗信号非均匀性随室温退火时间的变化关系

### 3.3 偏置条件对器件辐射损伤的影响

表 1 给出了动态偏置和静态偏置条件下暗信号相对于初值的增大倍数. 从表中可以看出 2# 器件(静态偏置)在辐照总剂量大于 30 krad(Si) 后以及辐照后进行的室温退火和高温退火过程中, 暗信号相对于初值的增大倍数均远大于 1# 器件(动态偏置). 由此可以看出静态偏置条件下器件的辐射损伤明显大于动态偏置.

表 1 1# 器件、2# 器件不同偏置条件下暗信号相对于初值的增大倍数

	1# 器件		2# 器件	
	暗信号/(mV/s)	增大倍数	暗信号/(mV/s)	增大倍数
辐照前	42.72	1	44.42	1
总剂量 30 krad(Si)	107.14	2.51	65.79	1.48
总剂量 50 krad(Si)	164.16	3.84	300.77	6.77
总剂量 70 krad(Si)	199.6	4.67	320.5	7.22
室温退火 3 h	259.64	6.08	409.22	9.21
室温退火 24 h	225.68	5.28	623.45	14.03
高温退火 5 h	292.1	6.84	867.1	19.52
高温退火 99 h	298.88	7	903.99	20.35
高温退火 168 h	272.18	6.37	823.24	18.53

文献 [27—31] 中的工作也得出, 静态偏置条件为器件辐照最劣偏置. 辐照过程中, 器件的表面电势、内部电场在动态偏置情况下是随工作脉冲频率不断变化的, 当栅极是高电平时, 有利于电子的收

集和空穴的反向迁移, 加剧辐射引入电荷的作用; 随后, 栅极变为低电平, 载流子反向运动及复合会削弱之前的作用. 静态偏置条件下器件的表面电势、内部电场是固定的, 电场始终加剧电子与空穴

的分离, 削弱复合的作用, 在器件中引入更多的有效辐射感生电荷, 造成更大程度的辐射损伤. 因此静态偏置条件下器件的暗信号退化明显大于动态偏置.

## 4 结 论

经过 $\gamma$ 射线辐照后, CMOS APS的暗信号显著增大, 在随后的退火实验中, 暗信号的变化趋势与界面态生长规律类似, 通过分析CMOS APS暗信号的来源及辐射环境下氧化物陷阱电荷与界面态形成原因及其特性, 认为暗信号的退化主要是由于光电二极管pn结和复位晶体管源端 $N^+/P_{\text{sub}}$ 结表面边界周围的 $\text{SiO}_2$ 产生了大量的界面态引起 $I_{\text{rev}}$ 和 $I_{\text{rev}N^+}$ 增大的缘故, 因此可以通过减少光电二极管和复位晶体管LOCOS隔离Si-SiO<sub>2</sub>界面处的缺陷数量, 提高界面性能, 抑制暗信号的退化, 从而提高CMOS APS的抗辐射能力. 不同偏置对器件的电离损伤程度不同, 静态偏置对器件的辐射损伤明显大于动态偏置, 分析认为静态偏置条件下在器件中引入更多的有效辐射感生电荷, 从而造成更大程度的辐射损伤. 通过分析暗信号非均匀性的形成原因, 发现其增大主要是由光电二极管的暗电流增大引起, 因此其变化趋势与暗信号变化趋势类似.

## 参考文献

- [1] Ogiers W, Uwaerts D, Dierickx B, Scheffer D, Meynants G, Truzzi C 1997 *Second Round Table on Micro-Nano Technologies for Space* Noordwijk, the Netherlands, October 15–17, 1997
- [2] Robert C S, Bedabrata P, Thomas J C, Bruce R H, Guang Y, Julie B H, Christopher J W 2002 *Proc. SPIE* **4547** 1
- [3] Stevanovic N, Hillegr, M, Hostica B J, Teuner A 2000 *ISSCC Tech. Dig.* **43** 104
- [4] Graaf G, Wolffenbuttel R F 2004 *Sensors and Actuators A* **110** 78
- [5] Furuta M, Nishikawa Y, Inoue T, Kawahito S 2007 *IEEE J. Solid State Circuits* **42** 766
- [6] Shoushun C, Boussaid F, Bermak A 2008 *IEEE Sensors Journal* **8** 286
- [7] 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]
- [8] Lv L, Zhang J C, Li L, Ma X H, Cao Y R, Hao Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 057202 (in Chinese)[吕玲, 张进成, 李亮, 马晓华, 曹艳荣, 郝跃 2012 物理学报 **61** 057202]
- [9] Gao B, Liu G, Wang L X, Han Z S, Zhang Y F, Wang C L, Wen J C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 176107 (in Chinese)[高博, 刘刚, 王立新, 韩郑生, 张彦飞, 王春林, 温景超 2012 物理学报 **61** 176107]
- [10] Zhang X F, Li Y D, Guo Q, Luo M C, He C F, Yu X, Shen Z H, Zhang X Y, Deng W, Wu Z X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 076106 (in Chinese)[张孝富, 李豫东, 郭旗, 罗木昌, 何承发, 于新, 申志辉, 张兴尧, 邓伟, 吴正新 2013 物理学报 **62** 076106]
- [11] Zhang X F, Li Y D, Guo Q, Lu W 2013 *Chinese Physics Letters* **30** 076102
- [12] Bogaerts J, Dierickx B, Mertens R 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 1513
- [13] Cohen M, David J P 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2485
- [14] Goiffon V, Virmontois C, Magnan P, Girard S, Paillet P 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3087
- [15] Meng X T, Kang A G, Hang Q 2004 *Atomic Energy Science and Technology* **38** 231 (in Chinese)[孟祥提, 康爱国, 黄强 2004 原子能科学技术 **38** 231]
- [16] Gamal A E, Eltoukhy H 2005 *IEEE Circuits and Devices Mag.* **21** 6
- [17] Goiffon V, Magnan P, Bernard F, Roll, G, Saint P O, Huger N, Corbiere F 2008 *Proc. SPIE* **686** 1
- [18] Loukianova N V, Folkerts H O, Maas J P V, Verbugt D W E, Mierop A J, Hoekstra W, Roks E, Theuwissen A J P 2003 *IEEE Trans. Electron Devices* **50** 77
- [19] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 2003 *Semiconductor Physics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p57, 194 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋升 2003 半导体物理学 (北京: 电子工业出版社) 第57, 194页]
- [20] Hopkinson G R 1993 *Radiation and its Effects on Components and Systems* Saint-Malo, France, Sep13–16, 1993 p401
- [21] Hu H F 2008 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [陈海峰 2008 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [22] Guo W L 1989 *Silicon-silicon dioxide interface physics* (Beijing: National Defence Industry Press) p25 (in Chinese) [郭维廉 1989 硅-二氧化硅界面物理 (北京: 国防工业出版社) 第25页]
- [23] Li M, Yu X F, Xue Y G, Lu J, Cui J W, Gao B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 106103 (in Chinese)[李明, 余学峰, 薛耀国, 卢健, 崔江维, 高博 2012 物理学报 **61** 106103]
- [24] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, Felix J A, Dodd P E, Paillet P, V Ferlet-Cavrois V 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1842
- [25] Torres A, Flament O 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 1462
- [26] Gao B, Yu X F, Ren D Y, Cui J W, Lan B, Li M, Wang Y Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068702 (in Chinese)[高博, 余学峰, 任迪远, 崔江维, 兰博, 李明, 王义元 2011 物理学报 **60** 068702]
- [27] Winokur P S, McGarrity J M, Boesch H E 1976 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **23** 1580

- [28] Shang H C, Liu H X, Zhuo Q Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 246101 (in Chinese)[商怀超, 刘红侠, 卓青青 2012 物理学报 **61** 246101]
- [29] Winokur P S, Boesch H E, McGarrity J M, McLean F B 1977 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **24** 2113
- [30] McLean F B 1980 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **27** 1651
- [31] Saks N S, Ancona M G, Modolo J A 1986 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **33** 1185

## Research on dark signal degradation in $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -ray-irradiated CMOS active pixel sensor\*

Wang Bo<sup>1)2)3)4)</sup> Li Yu-Dong<sup>1)2)3)</sup> Guo Qi<sup>1)2)3)†</sup> Liu Chang-Ju<sup>5)</sup> Wen Lin<sup>1)2)3)4)</sup>  
 Ma Li-Ya<sup>1)2)3)4)</sup> Sun Jing<sup>1)2)3)4)</sup> Wang Hai-Jiao<sup>1)2)3)4)</sup> Cong Zhong-Chao<sup>1)2)3)4)</sup>  
 Ma Wu-Ying<sup>1)2)3)4)</sup>

1) (Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS., Urumqi 830011, China)

2) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices under Special Environments, CAS., Urumqi 830011, China)

3) (Xinjiang Key Laboratory of Electric Information Materials and Devices, Urumqi 830011, China)

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

5) (Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China)

( Received 8 October 2013; revised manuscript received 13 November 2013 )

### Abstract

A study of ionizing radiation effects is presented for CMOS active pixel sensors manufactured in a 0.5- $\mu\text{m}$  CMOS (complementary metal oxide semiconductor) by n-well technology. The basic mechanisms that may cause failure are also presented. After exposure in  $\gamma$ -rays, the most sensitive parts to radiation-dark signals and dark signal non-uniformity are discussed, i.e. the physical mechanism of the degradation by irradiation. One can see from the experiment that the mean dark signals are dramatically increased with total dose for both operated and static devices. Static device seems more affected by irradiation than operated device. We find that most part of the total dark signal in a pixel comes from the depletion of the photodiode edge at the surface and the rest part is caused by the leakage of the source region of the reset transistor. Dark signal non-uniformity follows the dark current evolution with total dose. Further study of photodiode and LOCOS (local oxidation of silicon) isolation behaviors under irradiation should be done so as to correctly use this qualification techniques on MOS sensors manufactured in CMOS n-well technology process.

**Keywords:** CMOS APS, dark signal,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -rays, damage mechanism

**PACS:** 61.80.Ed, 61.82.Fk, 61.80.-x, 07.85.-m

**DOI:** 10.7498/aps.63.056102

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11005152).

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