

## 质子、中子、 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照对电荷耦合器件饱和输出电压的影响

汪波<sup>1,2</sup>, 文林<sup>1,2</sup>, 李豫东<sup>1</sup>, 郭旗<sup>1</sup>, 汪朝敏<sup>3</sup>, 王帆<sup>1,2</sup>, 任迪远<sup>1</sup>, 曾骏哲<sup>1,2</sup>, 武大猷<sup>1,2</sup>

- (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, 新疆 乌鲁木齐 830011;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

**摘要:** 对国产工艺的电荷耦合器件进行了质子、中子、 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照试验, 研究了不同粒子辐照对器件饱和输出电压的影响。试验结果显示在质子、 $\gamma$  射线辐照下, 电荷耦合器件的饱和输出电压显著退化, 而在 1 MeV 中子辐照下, 饱和输出电压基本保持不变, 表现出较好的抗中子能力。分析认为饱和输出电压的退化主要受电离总剂量效应影响, 一方面辐射感生界面态导致阈值电压正向漂移使耗尽层可存储最大电荷量下降; 另一方面电离辐射损伤使电荷耦合器件片上放大器增益减小导致饱和输出电压下降。

**关键词:** 电荷耦合器件; 高能粒子辐照; 饱和输出电压; 电离总剂量效应

**中图分类号:** TP212.14; TN386.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0035-06

## Degradation of saturation output of CCD induced by proton, neutron and cobalt-60 irradiation

Wang Bo<sup>1,2</sup>, Wen Lin<sup>1,2</sup>, Li Yudong<sup>1</sup>, Guo Qi<sup>1</sup>, Wang Chaomin<sup>3</sup>, Wang Fan<sup>1,2</sup>, Ren Diyuan<sup>1</sup>,  
Zeng Junzhe<sup>1,2</sup>, Wu Dayou<sup>1,2</sup>

- (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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** The key results of multiple saturation output characterization campaigns of charge coupled device (CCD) were presented. These characterizations encompassed proton, neutron and cobalt-60 irradiation tests at room temperature and annealing. This gives us the opportunity to discuss differences and similarities on CCDs of degradation of saturation output induced by proton, neutron and cobalt-60 radiation. The experiments show that the saturation output is degraded markedly induced by total ionizing dose, degradations of saturation output at different total dose and the recovery after annealing were compared, while no obvious degradation after neutron irradiation (neutron irradiation only induced displacement damage). Mechanisms for these saturation output changes were discussed, saturated output

收稿日期: 2015-10-13; 修订日期: 2015-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(11005152); 中国科学院“西部之光”人才培养计划重点项目“CCD 的空间位移损伤效应及评估技术研究”

作者简介: 汪波(1988-), 男, 博士生, 从事光电成像器件空间辐照效应方面的研究。Email: chenxing198889@163.com

导师简介: 郭旗(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事光电材料与器件空间辐照效应方面的研究。Email: guoqi@ms.xjb.ac.cn

degradation mainly caused by threshold voltage decreases of irradiation, resulting in full-well capacity decline. In addition, the gain of the output amplifier was decreased by total ionizing dose. Further insight on the underlying physical mechanisms could be gained by simulating the charged particle track influence on the pixel electric fields, along with the diffusion, drift, and recombination processes that occur between charge generation and collection.

**Key words:** charge coupled device; high-energy particle irradiation; saturation output voltage; total ionizing dose effects

## 0 引言

电荷耦合器件(CCD)是现代卫星与光学载荷的“眼睛”,被广泛应用于空间侦察、深空探索、气象观测等方面,其应用性能与可靠性往往决定卫星与载荷的空间应用性能。国外的高分辨率对地观测卫星、空间望远镜与空间探测卫星几乎全部采用 CCD 作为成像器件<sup>[1]</sup>。如欧洲的高分辨率卫星 SPOT-5 以及美国的 Quickbird 系列、KH-11、KH-12、EO-1、IKONOS-2 等 JY 及商业高分辨率遥感相机;NASA、ESA 等机构研制的哈勃望远镜、太阳与日冕探测卫星、GAIA 空间望远镜等都使用大量 CCD 来构建成像仪等多种光学载荷<sup>[2]</sup>。然而空间辐射环境是威胁星用 CCD 应用性能与可靠性最主要的因素之一,空间高能带电粒子的辐射作用可诱发 CCD 产生电离总剂量效应与位移效应,导致器件性能退化甚至失效<sup>[3-5]</sup>。

国外开展了大量的 CCD 辐射效应的研究,如质子、中子、 $\gamma$  射线、电子、重离子等不同粒子辐照下 CCD 关键参数的损伤效应研究,研究结果表明电离总剂量效应可导致 CCD 的表面势场、界面特性发生变化,辐射感生氧化层陷阱电荷和界面态促进了电子通过热运动由价带跃迁到导带,使表面暗信号增大;位移效应在 CCD 中引入空位-间隙缺陷,在耗尽层中形成新的产生-复合中心,使 CCD 体暗信号增大。此外,位移效率引入的体缺陷会不断发射和俘获在埋沟中转移的信号电荷,从而使电荷转移效率严重衰减。上述研究工作为 CCD 的空间辐射效应评估与加固技术提供了大量参考,但是关于 CCD 饱和和输出电压受粒子辐照后的变化规律国外的报道较少,而国内尚没有对此进行研究。为了全面获得 CCD 器件饱和和输出电压受不同粒子辐照后的变化规

律,揭示其辐射损伤机理,对国产工艺制造的 CCD 进行了质子、中子、 $\gamma$  射线等不同粒子辐照试验。

## 1 试验样品及辐照试验

### 1.1 试验样品

试验样品为国产埋沟结构 CCD,器件规模为  $64 \times 64$  像元,像元尺寸为  $48 \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$ 。器件栅结构为复合栅结构,即在 20 nm 厚的  $\text{SiO}_2$  层上覆盖一层 60 nm 厚的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 。试验样品从同一批次样品中挑选了 4 片参数一致性较好的器件,分别编号为 1#, 2#, 3#, 4#, 然后分别对样品进行质子、中子、 $\gamma$  射线等不同粒子的辐照试验,试验样品辐照粒子条件如表 1 所示,试验过程中器件管脚全部短接地,采用不加电偏置进行辐照。

表 1 CCD 辐照试验条件

Tab.1 CCD irradiation test conditions

Particle types	Device number	Irradiation fluence /dose	Irradiation bias
3 MeV proton	1#	$7.36 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$	Unbiased
23 MeV proton	2#	$2.89 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$	Unbiased
1 MeV neutron	3#	$1.5 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$	Unbiased
$^{60}\text{Co}-\gamma$ ray	4#	100 krad(Si)	Unbiased

### 1.2 高能粒子辐照试验

1# 和 2# 样品采用不同能量质子辐照,其中 1# 样品质子辐照能量为 3 MeV, 2# 样品质子辐照能量为 23 MeV。1# 样品 3 MeV 质子辐照试验在北京大学重离子物理研究所串列静电加速器上进行,该加速器能提供能量为 1~10 MeV 范围内的质子束流。用金硅面垒探测器、法拉第筒及热释光剂量仪对质子环境进行监测。辐照时,用一放在真空腔体中的金硅面垒探测器对质子束流进行实时监测,以便对

质子辐照注量进行修正。试验采用的注量率为  $5 \times 10^7 \text{ p/cm}^2/\text{s}$ , 总注量为  $7.36 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$ , 测试选取的注量点分别为  $7.36 \times 10^9$ 、 $2.21 \times 10^{10}$ 、 $3.68 \times 10^{10}$ 、 $5.15 \times 10^{10}$ 、 $7.36 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$ 。2# 样品在中国原子能科学研究院 HI-13 串列静电加速器上进行了 23 MeV 质子辐照试验。采用金箔散射法降低质子束流强度, 利用金硅面垒探测器监测束流。试验采用的注量率为  $4 \times 10^8 \text{ p/cm}^2/\text{s}$ , 总注量为  $2.89 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$ , 测试选取的注量点分别为  $5.72 \times 10^{10}$ 、 $1.48 \times 10^{11}$ 、 $2.89 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$ 。为消除 CCD 玻璃窗口对入射质子能量的吸收, 1# 和 2# 样品试验前去掉了 CCD 的光窗玻璃, 裸芯片接受辐照。

3# 试验样品采用中子辐照。中子辐照试验在西北核技术研究所的 TRIGA 型脉冲堆上进行, 该堆低功率稳态运行时大于 0.1 MeV 中子谱的平均能量为 1.05 MeV, 中子损伤等效系数为 1.02 MeV。中子  $\gamma$  比(辐射源在同一时间间隔内向辐射场某一点发射的中子注量与该点  $\gamma$  射线吸收剂量之比)大于  $5 \times 10^9 \text{ n/rad}$ 。因中子辐照器件存在活化问题, 所有测试均在辐照后一个月进行, 期间试验样品管脚短接常温放置。试验采用的注量率为  $7 \times 10^7 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ , 总注量为  $15 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ , 测试选取的注量点分别为  $1 \times 10^{10}$ 、 $2 \times 10^{10}$ 、 $5 \times 10^{10}$ 、 $10 \times 10^{10}$ 、 $15 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ 。

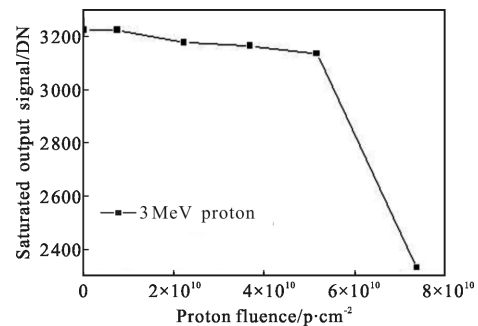
4# 试验样品采用  $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线辐照。 $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线辐照试验在中国科学院新疆理化技术研究所的  $2.6 \times 10^{16} \text{ Bq}$  的  $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线辐照源上进行的,  $\gamma$  光子平均能量为 1.25 MeV, 射线源为柱状结构, 通过到源棒距离的不同来调节辐照剂量率。辐照时待测器件放置于辐照源附近, 试验中辐照剂量率为  $25 \text{ rad(Si)/s}$ 。选取 10、20、30、50、70、100 krad(Si) 六个剂量测试点。在辐照剂量达到某个剂量点时, 降源作移位测试。

## 2 试验结果

饱和输出电压是指器件在正常工作状态下输出电压的最大值, 主要由器件耗尽层深度和 CCD 片上放大器增益决定, 耗尽层深度和放大器增益均与外加栅极电压有关, 因此可以通过开展 CCD 内部像素单元 MOS (metal oxide semiconductor, MOS) 单管和输出放大器单管辐照试验探究饱和输出电压的退化机理。器件光响应输出信号是曝光量和曝光时间的线性函数, 因此, 当光强一定时, 不同的积分时间对应不同的曝光量, 通过改变积分时间测试不同曝光

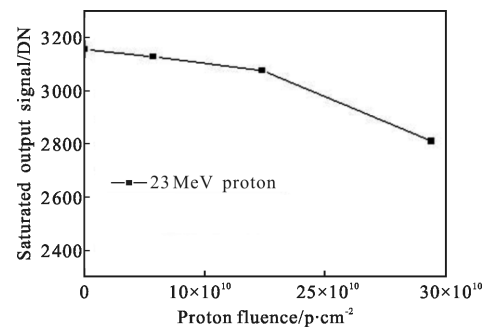
量的输出信号值。在二维坐标系中画出“曝光量——输出信号”曲线, 在线性区拟合出直线 L1、饱和区拟合出直线 L2, 直线 L1、L2 交点的纵坐标即为器件的饱和输出电压。

CCD 受质子辐照后饱和输出电压的变化关系如图 1 所示, 图 1(a) 试验结果显示器件受 3 MeV 质子辐照后, 随着累积辐照注量的增大饱和输出电压逐渐减小, 当累积辐照注量达到  $7.36 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$  时, 饱和输出电压迅速减小。图 1(b) 是器件受 23 MeV 质子辐照后的试验结果, 从图中可以看出饱和输出电压随着累积辐照注量增大逐渐减小。饱和输出电压的减小表明经放大器输出的信号电荷值减小, 导致 CCD 的动态范围和信噪比减小。此外, 由于每个像元内的放大器存在差异性, 其放大倍数退化存在一定的波动和随机性, 导致每个像元输出信号有所差异, 从而使光响应非均匀性和坏点数增大。



(a) 3 MeV 质子辐照

(a) 3 MeV proton irradiation



(b) 23 MeV 质子辐照

(b) 23 MeV proton irradiation

图 1 饱和输出电压随质子辐照累积注量的变化关系

Fig.1 Variation of saturated output signal of CCD with proton irradiation

质子是带电粒子, CCD 受质子辐照后既表现出明显的电离总剂量效应, 在栅氧化物、隔离场氧化物

中产生氧化物陷阱电荷、Si-SiO<sub>2</sub> 界面产生界面态,同时也表现出明显的位移效应,在 CCD 体硅内产生体缺陷。为了区分电离总剂量效应和位移效应在器件饱和和输出电压退化中起到的作用,揭示 CCD 在空间辐射环境中的损伤机理,开展了中子辐照试验。

图 2 给出了中子辐照后器件饱和输出电压随累积注量的变化关系,从图中可以看出,饱和输出信号的抗中子能力较好,当辐照注量累积到  $15 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$  时,其退化程度仍可以忽略。中子是不带电粒子,辐照器件后主要产生位移效应(由次级粒子产生的电离效应可以忽略不计),因此,饱和输出电压的退化主要来自于电离总剂量效应引起的辐射感生电荷的影响。为此又开展了仅引起电离总剂量效应  $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线的辐照试验。

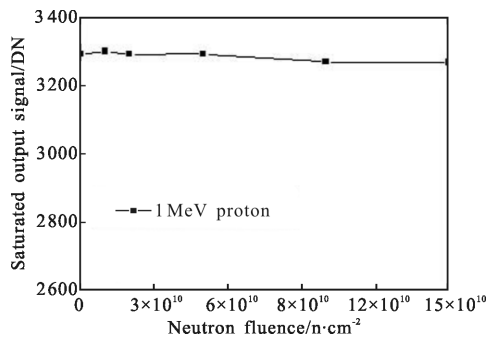


图 2 饱和和输出电压随中子辐照累积注量的变化关系

Fig.2 Variation of saturated output signal of CCD with neutron irradiation

图 3 给出了  $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线辐照 CCD 后饱和输出电压随总剂量的变化关系,从图中可以看出随辐照累积剂量的增加饱和输出电压逐渐减小。分析认为

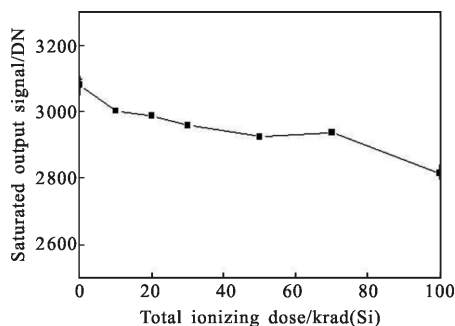


图 3 饱和和输出电压随总剂量的变化关系

Fig.3 Variation of saturated output signal of CCD with  $\gamma$  irradiation

$\gamma$  射线入射器件后在隔离氧化物和栅氧化物中形成辐射感生氧化物陷阱电荷和界面态,由于试验样品

采用较薄的二氧化硅( $\leq 20 \text{ nm}$ )工艺,受界面态造成的阈值电压正向漂移影响较大,受辐射感生氧化物陷阱电荷引起的阈值电压负向漂移影响较小,从而使阈值电压正向漂移引起耗尽区减小导致可存储最大信号电荷包减小。以上作用机理还需要进行退火试验和基本单管辐照试验验证。

为了进一步研究电荷耦合器件饱和输出电压的辐射损伤机理,区分辐射感生氧化物陷阱电荷和界面态对饱和输出电压退化的贡献,在  $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线辐照试验结束后,随即对器件进行了退火效应研究。图 4 给出了器件在室温 24 h 和 100 °C 高温条件下饱和输出电压随退火时间的变化关系。从图中可以看出饱和输出电压在室温退火过程中继续缓慢减小,高温退火前期迅速减小,之后变化趋于平缓。饱和输出电压受  $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线辐照与退火的变化趋势同辐射感生界面态变化规律相符合<sup>[6]</sup>。

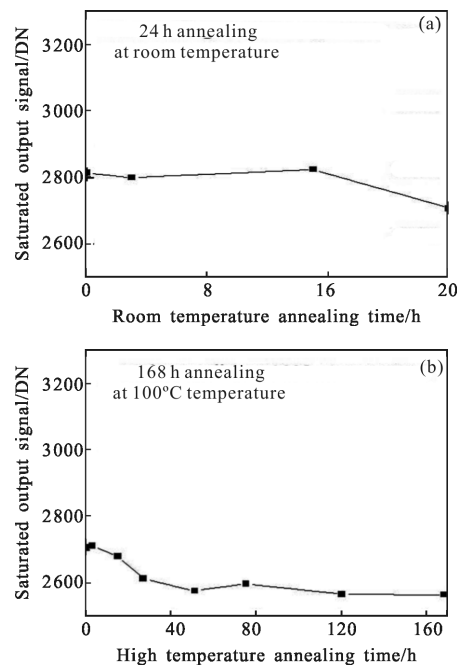


图 4 饱和和输出电压随室温、高温退火时间的变化关系

Fig.4 Variation of saturated output signal of CCD with room temperature & high temperature annealing time

### 3 辐射损伤机理分析

饱和输出电压主要由器件耗尽层深度和 CCD 片上放大器增益决定。CCD 片上放大器由不同的 MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 组成,包括厚栅氧的输出栅极、

薄栅氧的复位晶体管及大宽长比的放大电路,结构示意图如图 5 所示。它是一个三级源跟随器,由 MOS 管  $M_1, M_2, M_3$  和作为偏置作用的有源负载  $M_c, M_d$  组成,复位 MOS 管  $M_r$  的源极与节点电容、 $M_1$  的栅极三者相连。在复位管开通状态,节点的电压被复位到参考电平 VRD,信号被读出;在复位管关断状态,节点接受下一个像元的信号。MOSFET 是以多数载流子工作的器件,对中子辐照不灵敏,有较强的抗中子能力<sup>[7]</sup>,即使中子辐照注量高达  $10^{14} \sim 10^{15} \text{ n/cm}^2$ ,MOSFET 主要电参数变化很小,由于 CCD 片上放大器和像素单元均是 MOS 结构,且此次试验中子最大注量仅为  $15 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ ,因此器件受中子辐照后 CCD 饱和输出电压的退化基本可以忽略不计。

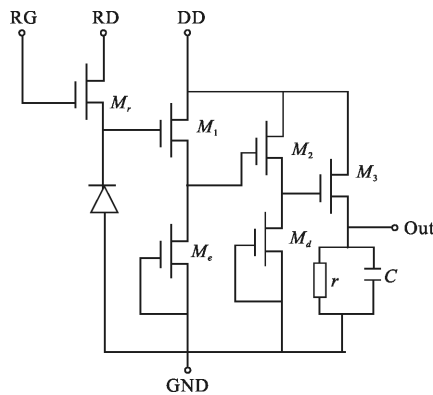


图 5 CCD 片上放大器结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of CCD on chip amplifier

中子辐照试验结果表明 CCD 饱和输出电压不是位移效应的敏感参数,其受高能粒子辐照后饱和输出电压退化主要来自于电离总剂量效应的影响。CCD 是基于 MOS 工艺的光电器件,质子辐照和 <sup>60</sup>Co-γ 射线辐照都造成电离辐射损伤,表现为在 SiO<sub>2</sub> 绝缘层中产生氧化物陷阱电荷以及在 Si-SiO<sub>2</sub> 界面处增加界面态<sup>[8-9]</sup>。

为深入揭示 CCD 饱和输出电压的辐射损伤机理,结合前期开展的单管 <sup>60</sup>Co-γ 射线辐照试验数据对比分析。由于 CCD 工艺中包含多种沟道宽长比的 MOS 单管,如起信号放大作用的单管需要小的宽长比,起驱动作用的单管需要大的宽长比以获得大的驱动电流,CCD 工艺覆盖的 MOS 管沟道长度和宽度范围大。前期开展的单管辐照试验采用与 CCD 工艺相同并一起流片的不同沟道宽长比的 MOS 单管作为基本单元试验样品,沟道宽长比分别为 51:15、

51:9、105:7、51:6、200:5、51:4。

图 6 为宽长比 51:9 的 MOS 管阈值电压随总剂量的变化关系,从图中可以看出随着辐照累积剂量的增加,器件的阈值电压逐渐增大,表现出正向漂移特性。

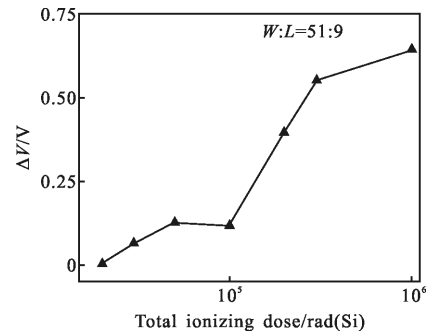


图 6 MOS 管阈值电压随总剂量的变化关系

Fig.6 Variation of threshold voltage of MOS with γ irradiation

图 7 为不同沟道宽长比的 MOS 管在辐照剂量达到 1 Mrad(Si)时阈值电压的漂移量。从图中可以看出沟道长度越大,阈值电压漂移越大。

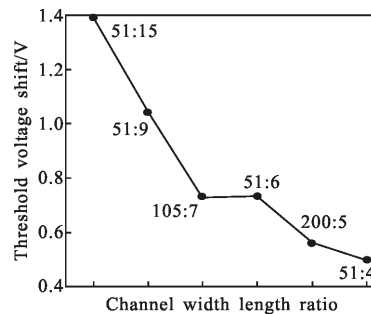


图 7 不同宽长比 MOS 管阈值电压的漂移量

Fig.7 Drift of threshold voltage of MOS with different W/L

MOSFET 辐照后阈值电压  $\Delta V_{th}$  与氧化层电容  $C_{ox}$ 、氧化层厚度  $t_{ox}$  以及辐照感生陷阱电荷分布  $\rho(x)$  的关系为:

$$\Delta V_{th} = \frac{1}{C_{ox} t_{ox}} \int_0^{t_m} \rho(x) x dx \quad (1)$$

式中:  $\rho(x)$  为包括氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷。对正电荷来说,阈电压漂移是负的;对负电荷来说,阈电压漂移是正的。CCD 采用 N 沟道工艺,  $\Delta V_{th}$  与  $\Delta V_{ox}$  互相补偿,阈电压正向漂移,表明界面态处于支配地位。

前面分析指出饱和输出电压主要由器件耗尽层深度和 CCD 片上放大器增益决定。器件受质子和 <sup>60</sup>Co-γ 射线辐照后,一方面电离辐射损伤产生了大量的界面态引起 MOS 电容阈值电压正向漂移,引

起像素单元耗尽层深度减小,导致可储存光生电荷减小,从而使饱和输出电压减小;另一方面电离辐射损伤导致 CCD 片上放大器增益减小。对于 CCD 片上输出放大器来说,源极跟随器的有效负载电阻值直接影响片上放大倍数,CCD 器件受质子和  $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线辐照后,由于电离辐射损伤会在隔离氧化层产生大量的氧化物陷阱电荷与界面陷阱电荷,这些电荷会在沟道宽度方向的两侧、沟道与隔离区接触的部位形成反型漏电通道,从而增加源漏泄电流,导致栅极电压和衬源电压对漏极电流的控制能力减弱,改变了源极和漏极之间的电阻值,使得等效输出电阻减小。片上放大器增益  $A_v$  正比于等效输出电阻  $r_{\text{out}}(A_v \propto r_{\text{out}})$ ,因此,随累积辐照剂量的增加等效输出电阻逐渐减小,引起 CCD 片上放大器增益退化,从而导致饱和输出电压下降。

CCD 的  $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线退火试验显示在室温退火过程中饱和输出电压继续缓慢减小,高温退火前期饱和输出电压迅速减小,之后变化趋于平缓。大量试验研究表明,氧化物陷阱电荷不稳定,室温条件下就会发生部分退火,温度升高后,氧化物陷阱电荷俘获的空穴从  $\text{SiO}_2$  的禁带向价带的热发射变快,从而使退火加速<sup>[6,10]</sup>。与此相反,界面态比较稳定,它跟器件的结构、生产工艺及缺陷密度等有关。一般而言,温度升高,辐射感生的空穴和  $H^+$  运动加快,从而使界面态随着温度的升高继续生长;参考文献[11]的研究表明当温度低于  $100\text{ }^\circ\text{C}$  时,界面态的退火基本可以忽略不计,只有温度达到  $175\text{ }^\circ\text{C}$  时,才会引发大量的界面态退火。所以,经室温 24 h 退火和  $100\text{ }^\circ\text{C}$  高温退火后,大部分氧化物陷阱电荷已退去,但仍有大量的界面态在增长,造成阈值电压继续正向漂移,导致饱和输出电压继续下降。

## 4 结 论

通过开展质子、中子、 $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线等不同粒子 CCD 辐照试验,获得了 CCD 饱和输出电压的退化规律,结合器件结构、工艺参数和半导体器件辐射效应理论,分析了参数退化物理机理。试验结果表明饱和输出电压是电离总剂量效应的敏感参数,同时表现出较好的抗位移效应能力, $^{60}\text{Co}-\gamma$  射线辐照退火试验表明饱和输出电压的退化趋势同辐射感生界面态生长规律一致。研究结果显示饱和输出电压的退化

一方面由辐射感生界面态引起 MOS 电容阈值电压正向漂移使像素单元耗尽层深度减小,导致可储存光生电荷减小,从而使饱和输出电压减小;另一方面由电离辐射损伤导致 CCD 片上放大器增益减小引起。研究结果能够为在工程应用中的 CCD 受粒子辐照后成像性能下降,定量考察器件是否满足应用要求提供有力的技术支撑。

## 参 考 文 献:

- [1] Hopkinson G R, Mohanmmadzadeh. Radiation effects in charge coupled device imagers and CMOS active pixel sensors[J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2004, 14(2): 419-443.
- [2] Wang Huaiyi, Gao Jun. Analysis and development on aerospace infrared optical remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(2): 1-5. (in Chinese)
- [3] Bai Yun, Shao Xiumei, Chen Liang, et al. Effect of electron ir radiation on the GaN-based p-i-n UV detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 270-273. (in Chinese)
- [4] Zhang Jinxing, Guo Hongxia, Wen Lin, et al. Influencing factors of SiGe heterojunction bipolar transistor single event effect in laser microbeam simulation test [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2433. (in Chinese)
- [5] Duan B, Hei D, Song G, et al. Study on transient noise of CCD camera induced by  $\gamma$ -ray[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, 2011: 81943D-81943D-10.
- [6] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, et al. Radiation effects in MOS oxides[J]. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 2008, 55(4): 1833-1853.
- [7] Chen Panxun. Radiation Effects on Semiconductor Devices and Integrated Circuits [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [8] Hopkinson G R. Comparison of CCD damage due to 10- and 60-MeV protons [J]. *IEEE Trans On Nuclear Science*, 2003, 50(6): 1960-1967.
- [9] Kuboyama S, Shindou H, Hirao T, et al. Consistency of bulk damage factor and NIEL for electrons, protons, and heavy ions in Si CCDs [J]. *IEEE Trans On Nuclear Science*, 2002, 49(6): 2684-2689.
- [10] Ma T P, Dressendorfer P V. Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits[M]. 1989.
- [11] Boch J, Saigne F, Schrimpf R, et al. Elevated temperature irradiation at high dose rate of commercial linear bipolar ICs [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2004, 51(5): 2903-2907.