

中子辐照对彩色 CMOS 图像传感器性能的影响*

孟祥提[†] 康爱国 黄强

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 对一种彩色互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器芯片进行了反应堆中子的辐照实验研究,利用图像分析软件分析了辐照前后芯片的暗输出图像的平均暗输出、暗输出不均匀性和动态范围等参数;与 γ 射线辐照很不相同,中子辐照器件的暗输出图像上出现许多大而密的斑点和条纹,图像上有很多白点和白点串;经过长时间室温退火后的图像质量没有明显改善.文章初步探讨了 CMOS 图像传感器的辐照损伤机理.

关键词: 彩色 CMOS 图像传感器; 中子辐照; γ 射线辐照; 输出特性; 辐照损伤

PACC: 6180; 7800

中图分类号: TN306

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0583-05

1 引言

互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器是一种新型器件,它将光敏二极管阵列和图像处理控制部分,如微处理器和存储器等都集成在同一 CMOS 硅衬底上.当光学图像聚焦在图像传感器芯片上时,通过芯片上的光敏元对光像进行光电转换,输出光生电子流,经数字化处理后被读出.与电荷耦合器件(CCD)相比,CMOS 摄像器件集成度高,简化了 A/D 转换器,数字信号输出方便,光电转换效率高,暗电流小,图像质量好,体积小,质量轻,功耗低,易批量生产,并具有优良的性能价格比,具有广泛的应用和前景.

CMOS 图像传感器可以作为卫星高速相机的关键部件.它也可以作为相机,用于其他核辐射环境.空间辐射环境中充斥着高能粒子,包括一些中子.粒子的辐照效应会影响半导体光电器件的性能,甚至会导致器件失效,因此,研究 CMOS 图像传感器粒子的辐照效应及抗辐射加固十分必要.我们已经研究了 CMOS 图像传感器的 γ 射线和电子的辐照效应^[1,2].

本工作进行了 CMOS 图像传感器的中子辐照效应的研究,通过与 γ 射线辐照结果的比较,探讨了该器件中子辐照的特点和辐照损伤机理.

2 实验

本实验选用的样品是美国 OmniVision 公司生

产的 OV7620 彩色数字 CMOS 图像传感器,像素阵列为 664×492 ,像素尺寸为 $7.6\mu\text{m} \times 7.6\mu\text{m}$,像素阵列面积为 $4.86\text{mm} \times 3.64\text{mm}$,其为内部集彩色滤光阵列、时钟、自动曝光和白平衡控制、A/D 转换器、寄存器、信号处理等为一体的单芯片系统(SOC)类光电传感器器件,单电源 5V DC,正常工作时功耗小于 120mW.

中子辐照实验在清华大学核能与新能源技术研究院的游泳池式轻水反应堆上进行,辐照温度为 30°C .辐照注量分别为 1.3×10^{13} , 3.2×10^{13} 和 $1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$. γ 射线辐照实验在清华大学核能与新能源技术研究院的 Co^{60} γ 射线源上进行,剂量率为 11.5Gy/min .

采用 1/3 英寸的镜头,用计算机捕获了样品在辐照前后的暗输出图像和自然光下的输出图像.采用自编的图像分析软件,利用计算机对捕获的暗输出图像进行平均暗输出、暗输出不均匀性和动态范围等性能参数变化的分析^[1].对其暗输出图像中每个像素的红、绿、蓝三色信号分别进行提取,也对辐照后经过室温退火后的样品的暗输出图像进行了性能参数变化的分析.

3 结果

图 1 和 2 分别给出在不同中子注量辐照后 CMOS 数字图像传感器自然光下的捕获图像和暗输出图像的变化.为了比较,图 2 也给出了 γ 射线辐照后暗输出图像的变化.

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:10375034)

[†] 通信作者, Email: Mengxt@mail. tsinghua. edu. cn

2006-12-12 收到

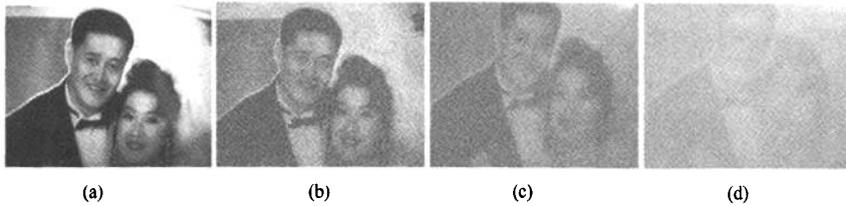


图 1 在不同中子注量辐照后捕获的图像 (a)0; (b) $1.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$; (c) $3.2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$; (d) $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$
Fig. 1 Change of captured pictures with neutron dose

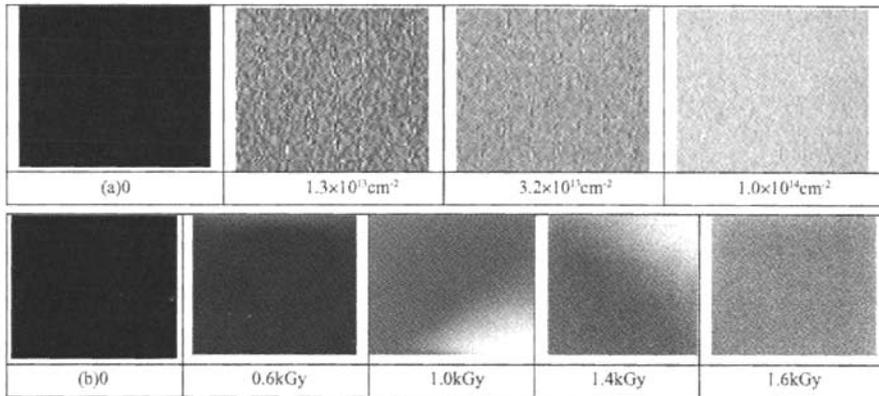


图 2 暗图像随辐照注量的变化 (a) 中子辐照; (b) γ 射线辐照
Fig. 2 Change of dark output images with neutron dose (a) and γ -ray dose (b)

从图 1 可见,从未辐照样品捕获的图像是非常清晰的.在注量为 $1.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 中子辐照后,捕获的图像变得模糊;随着注量增大,图像变得更加模糊; $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 时,从图像上难以区分所拍摄人的眼睛、鼻子和嘴等主要部位,表明器件性能严重退化,不能再正常工作.

从图 1 可见,中子辐照后的芯片,其中子注量为 $1.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 时,暗图像上出现很多大斑点和条纹,在捕获的图像上有很多白点和白点串, $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 时,暗输出亮度很大.这与 γ 射线辐照很不相同.

图 3 和 4 分别给出中子辐照后和经过 20 天室温退火后的 CMOS 图像传感器的暗输出图像平均暗输出亮度和暗输出的不均匀性特征参数随注量的变化.为了比较,图 5 给出了 γ 射线辐照和室温退火后其暗输出图像参数.

从图 3~5 可以看到:经中子辐照后的 CMOS 数字图像传感器,其中子注量为 $1.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 时的红、绿、蓝三色平均暗输出已经比辐照前有了很大增加(灰度级从辐照前的 50 左右增加到 130 左右);与 γ 射线辐照实验结果比较可以发现,其已经相当于 1.0~1.4kGy 的 γ 射线辐照的情况.此后一直到中子注量为 $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 时变化较小而趋向饱

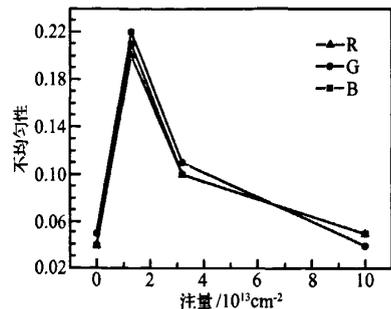
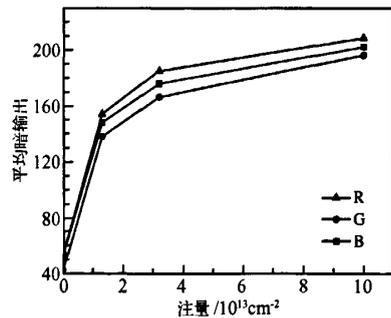


图 3 器件中子辐照后的三色平均暗输出和不均匀性
Fig. 3 Average brightness and nonuniformity of dark output images as a function of neutron dose

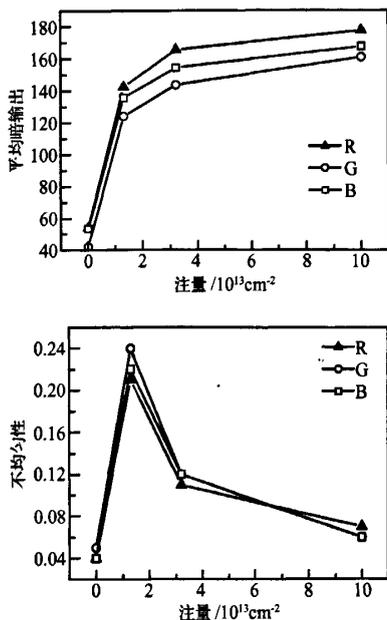


图 4 器件中子辐照后经室温 20 天退火的平均暗输出和不均匀性

Fig. 4 Average brightness and nonuniformity of dark output images as a function of neutron dose after annealing 20 days at room temperature

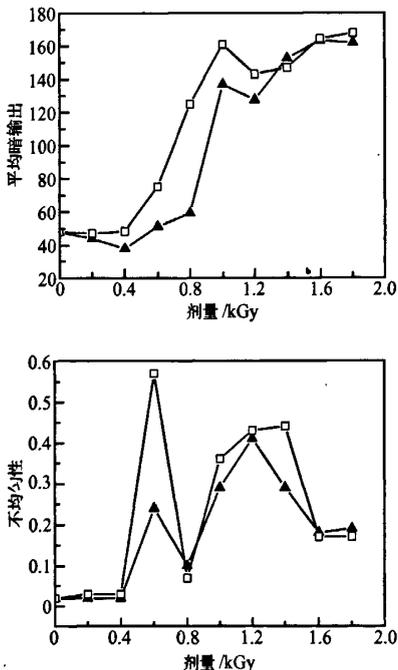


图 5 器件 γ 射线辐照 (\blacktriangle) 和室温 7 天退火后 (\square) 的暗输出图像参数.

Fig. 5 Average brightness and nonuniformity of dark output images as a function of γ -ray dose after annealing 20 days at room temperature

和;同时暗输出的不均匀性也随辐照剂量的增加而减小,这与高剂量 γ 射线辐照后的情况也一致.另外,动态范围大幅度减少,从初始的约 50dB 降低到 $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 时的约 37dB.

中子辐照的芯片经 20 天室温退火后,其各性能参数与退火前相比,变化趋势几乎相同,数值上也变化很小,表明并没有展现出明显的室温退火效应,这也与 γ 射线辐照的情况有显著差异.

4 讨论

本工作所用的 CMOS 数字图像传感器是一种有源像素传感器,它是在一个 CMOS 衬底上集成了光敏二极管图像阵列和图像处理控制电路.其光电转换单元即像素元是光电二极管,是由 n^+ 区和 p-Si 外延层构成 pn 结.光敏区被 SiO_2 所覆盖.光敏二极管捕获光子后产生光生电流.在每个像素元中有几个晶体管放大器,用于把离散的电荷信息包转换成电压输出.高分辨图像由许多像素组成.

当入射光子进入像素时,除了热生电荷外,一些光生电荷即电子-空穴对在 pn 结和 Si 外延层的耗尽区产生.在反向偏置下,自由电子向光敏二极管的势阱运动而变成信号电荷.传输晶体管的传输阱与光敏二极管连接,传输门能够控制信号电荷从光敏二极管的势阱通过传输门在其下面的运动,输出阱与传输门连接以接受信号电荷,并将其送到输出电路.

辐照效应是导致光电器件性能退化甚至失效的主要原因之一.入射粒子的损伤效应有位移损伤、电离辐射和表面界面效应.

γ 射线辐照在半导体器件中产生一些点缺陷,但主要损伤是由电离引起的表面界面损伤. CMOS 器件是多数载流子器件,对 γ 射线辐射引起的体损伤不灵敏,但因电离损伤产生正电荷及界面态对 SiO_2/Si 界面状态的影响很大,可能改变器件的工作状态,首先反映在阈值电压向负方向漂移以及静态功耗电流增大^[3].

通常,CMOS 图像传感器中对粒子辐照损伤最为敏感的是像素阵列. γ 射线辐照与 Si 材料发生相互作用是通过康普顿次级电子对 Si 材料产生电离辐射.电离辐射在 CMOS 图像传感器中 CMOS 器件的 SiO_2 中产生电子-空穴对.在测量时,光生电子作为信号电荷传输到输出电路,并在测量后消失.但是 γ 射线辐照还产生一些电子陷阱和空穴陷阱,在光敏二极管的 pn 结耗尽层中引入的产生-复合中心,在 SiO_2 层内产生一些氧化物陷阱电荷(固定正电荷),在 Si/ SiO_2 界面处产生一些“界面陷阱”.我们的深能级瞬态谱测量表明,在 n 型 Si 中, γ 射线

辐照能产生一些氧空位($E_c - 0.16\text{eV}$)、双空位($E_c - 0.24\text{eV}$)和磷空位($E_c - 0.44\text{eV}$)等电子陷阱^[4]. 在辐照时,一些辐照致电子同空穴结合而消失,一些由电子陷阱捕获.在反向偏置下,从电子陷阱释放的自由电子能够向光敏二极管的势阱运动并输出.辐照导致电子-空穴对的浓度随 γ 射线的注量的增加而增加.固定正电荷能使 CMOS 图像传感器中 MOS 器件的阈值电压向负偏压方向漂移,从而改变器件的正常工作偏置.因此导致暗电流和漏电流增大,暗图像的平均暗输出亮度随注量的增加而增加,导致暗电流增大,所以 CMOS 图像传感器的暗输出图像的亮度变大.对辐照前暗电流密度为 $2\text{nA}/\text{cm}^2$ 的 CCD 器件,在 γ 射线剂量为 1.0kGy 辐照后,暗电流密度可增加到 $1000\text{nA}/\text{cm}^2$ ^[5].

当 γ 射线辐照剂量较大时,产生的电子-空穴对足够多,能够超过光敏二极管的电荷容量时,过量的光电电荷将溢出光敏二极管并被相邻的像素收集,就会出现图像模糊现象.对于中子辐照,在 Si 中除了像 γ 射线辐照一样产生一些点缺陷外,还产生一些缺陷团和有序区.中子辐照在 Si 材料内的能量沉积主要是位移损伤,因为弹性散射其最主要的反应产物初级反冲原子(PKA),碰撞形成空位-间隙对其缺陷团,引起多数载流子去除和载流子迁移率减小,电阻率增加,少数载流子寿命降低.中子辐照缺陷会成为载流子的散射中心,从而使载流子迁移率降低,这相应地增加了耗尽区的宽度,少子寿命随辐照注量的增加而减少,这都造成了像素暗电流的增加,导致器件的平均暗输出增加.载流子去除效应能使半导体材料趋于本征化.位移损伤难以在室温下退火消除.我们的深能级瞬态谱测量表明,在中子辐照 p 型直拉 Si 中,有 4 个空穴陷阱,其能级分别为 $E_v + 0.20\text{eV}$, $E_v + 0.22\text{eV}$, $E_v + 0.25\text{eV}$ 和 $E_v + 0.33\text{eV}$,并且已经将 $E_v + 0.20\text{eV}$ 和 $E_v + 0.22\text{eV}$ 的缺陷识别为四空位(V_4^+)和双空位(V_2^+)^[6].我们的正电子寿命谱研究也测量了 V_1, V_2, V_4 缺陷^[7].

快中子辐照时,还会形成大的缺陷团(杂质、空位形成各种形式的缺陷复合体)和高缺陷密度的局部区域即有序区.我们用红外吸收谱已经测量到沉积有氢的有序区的宽 Si-H 吸收峰,其退火温度约 600°C ^[8].这些大的缺陷团和有序区的掺杂能够解释在捕获的图像上有很多白点和白点串的出现.显然,这些缺陷在室温下是很难消失的,这是造成中子辐照的芯片没有明显退火效应的主要原因.

在中子辐照 CCD 图像传感器的研究中发现辐照后出现不可恢复的斑点,即“热像素”(hot pix-

el),它是由于暗电流随时间的波动.“热像素”的出现是由于中子辐照缺陷在半导体材料中形成局部高电场区,由于 Poole-Frenkel 效应引起场增强发射导致像素暗电流的显著增加,因此,使得器件的平均暗输出增加^[9].

5 结 论

γ 射线和中子辐照 CMOS 图像传感器的性能比较表明,辐照都使芯片像素的暗电流密度增加,图像质量都随中子辐照注量增加而变差.但是中子辐照后,器件的暗输出图像上出现许多大而密的斑点和条纹,图像上有很多白点和白点串.经过长时室温退火后的图像质量没有明显改善.这与 γ 射线辐照很不相同.这表明 γ 射线辐照主要是由电离引起的表面界面损伤,而中子辐照形成大的缺陷团和有序区是主要的损伤.

参 考 文 献

- [1] Meng Xiangti, Kang Aiguo, Wang Xingyu, et al. Gamma-ray radiation and annealing effects on colour CMOS image sensors. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 18(1): L1
- [2] Meng Xiangti, Kang Aiguo, Li Jihong, et al. Effects of electron and gamma-ray irradiation on CMOS analog image sensors. *Microelectronics Reliability*, 2003, 43(7): 1151
- [3] Lai Z W, Bao Z M. Radiation hardening electronics: radiation effects and hardening techniques. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1998; 290 (in Chinese) [赖祖武, 包宗明. 抗辐射电子学: 辐射效应及加固原理. 北京: 国防工业出版社, 1998; 290]
- [4] Du Y C, Zhang Y F, Meng X T, et al. Infrared absorption bands of γ -ray irradiated FZ Si grown in hydrogen atmosphere and their identification. *Scientia Sinica A*, 1987, 30(2): 176
- [5] Roy T, Watts S J, Wright D. Rad damage effects on imaging charge coupled devices. *Nucl Instr Meth A*, 1989, 27: 545
- [6] Du Y C, Zhang Y F, Meng X T. Semiconductor processing ASTM STP 850. American Society for Testing and Materials, 1984; 566
- [7] Meng Xiangti. Identification of defects in neutron transmutation doped Si by positrons. *Science in China A*, 1994, 37(10): 1262
- [8] Meng X T, Du Y C, Zhang Y F, et al. IR bands of Si-H centers related to disorder region produced by neutron irradiation. *J Appl Phys*, 1988, 63(11): 5606
- [9] Stefanov K D, Tsukamoto T, Miyamoto A, et al. A study of the radiation hardness of a two-phase CCD sensor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2000, 453: 136

Influence of Neutron Radiation on Performance of Color CMOS Image Sensors*

Meng Xiangti[†], Kang Aiguo, and Huang Qiang

(*Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Quality of captured pictures and change of dark output characteristic for the color CMOS image sensors with different neutron doses are studied for the first time. After neutron radiation, a lot of spots and stripes on dark output images, and white spots as well as bunches of white spots on captured pictures appear, respectively. Quality of captured pictures can not be obviously improved after annealing at room temperature for a long time. This is very different from those by γ -ray radiation. The mechanism of radiation damage for CMOS image sensors is discussed.

Key words: color CMOS image sensors; neutron radiation; γ -ray radiation; output characteristic; radiation damage

PACC: 6180; 7800

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0583-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 10375034)

[†] Corresponding author. Email: Mengxt@mail.tsinghua.edu.cn

Received 12 December 2006