

辐射环境下 CMOS 图像传感器的暗电流幅值分布预测方法

郑 然, 刘 超, 刘 晗, 惠祥力
(西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 在空间卫星系统中, CMOS 图像传感器也成为了首选的成像器件. 然而, 空间中存在的各种辐射粒子所引起的辐射效应, 会使 CMOS 图像传感器暗电流均值增加、不一致性增强, 导致图像信噪比降低, 影响成像质量. 基于半导体器件的辐射效应原理, 分析了 γ 射线和质子辐射对 CMOS 图像传感器的总剂量和位移损伤效应, 提出了一种混合辐射环境下暗电流分布建模方法. 仿真结果表明, 提出的方法能够准确预测 γ 射线和质子混合辐射环境下 CMOS 图像传感器的暗电流幅值分布情况.

关键词: 暗电流幅值分布; 预测; 质子; γ 射线; 辐射环境

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2018)04—0144—05

Methods for Prediction Dark-Current Distribution of CMOS Image Sensor in Radiation Environment

ZHENG Ran, LIU Chao, LIU Han, HUI Xiang-li

(School of Computer Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Nowadays, CMOS image sensors are more and more used in a wide variety of applications, especially in satellite systems, where they are exposed to space radiation environment. In-orbit sensors suffer from radiation induced dark-current degradation that the dark-current mean value and non-uniformity increase, which results in the signal-to-noise-ratio decrease affecting the image quality. Based on the principle of radiation effects on semiconductor devices, this paper analyzes the ionizing and displacement damage effects in CMOS image sensors due to γ -rays and protons radiation, and proposes a method for dark-current distribution modeling in the mixed radiation environment. Simulation results proves that the proposed method is well adapted to predict the dark-current distributions for a device which is exposed to both rays and protons radiation at the same time.

Key words: dark-current amplitudes distribution; prediction; protons, γ -rays; radiation environment

1 引言

CMOS 图像传感器(CIS)被广泛应用于不同的场合,如手机设备、医学成像和安全监控等^[1]. 在空间应用中, CIS 也以体积小、重量轻、功耗低及良好的抗辐射性能成为各种空间任务首选的成像器件^[2]. 但是,在空间环境中,受到空间高能粒子辐射的影响, CIS 的暗电流会发生严重退化,表现为暗电流均值增加,非一致性(Dark Current Non-Uniformity, DCNU)增强,导致输出图像信噪比(SNR)

降低. 随着在轨时间的增加,暗电流会发生持续退化,最终导致芯片失效. 采用不同的工艺、不同设计方法的 CIS 器件,其暗电流对于粒子辐射的响应也不尽相同. 因此, CIS 被用于特定的空间应用之前,评估 CIS 在辐射环境中可能的暗电流退化情况关系到 CIS 能否在完整的任务期内提供符合信噪比要求的输出图像.

近些年,部分文献已经提出了几种估计电荷耦合器件(CCD)和 CIS 的辐射致暗电流分布的方法^[3-6]. 文献[7]提出一种基于实验数据的经验拟合

的方法. 该方法不需要知道传感器的具体的设计及制造细节, 可以估计质子辐射下的暗电流尖峰分布. 然而, 在通常的辐射环境, 如空间环境、高能物理实验环境、核电站环境中, 成像设备往往会受到多种高能粒子的辐射. 基于这种情况, 本文提出了一种可以应用于混合辐射环境下 CIS 暗电流分布预测方法.

2 辐射致暗电流幅值分布建模

2.1 γ 射线致暗电流幅值分布建模

辐射对半导体器件和电路的影响可以从两方面来解释: 电离效应和位移损伤效应. 电离效应会产生电子-空穴对, 在 SiO_2 和 Si/SiO_2 界面处分别产生陷阱电荷和界面态. 这样的激发中心是非表面反型器件中暗电流的重要来源. 在 Multi-Phased-Pinned (MPP) 和 Pinned-Photo Diode (PPD) 器件结构中, Si/SiO_2 表面是反相的, 在积分过程中空穴充满界面, 有助于抑制界面态的产生. 因此, 表面暗电流可以大大地抑制^[8]. 文献[9-10]分析了总剂量效应对 PPD CIS 的影响. 在这些 CIS 器件中, 暗电流的主要来源似乎是位于光电二极管 (PD) 和传输门 (TG) 周围的浅沟隔离 (STI) 中的界面态. 此外, 高总剂量 (超过 150 krad(Si)) 辐射可能产生一个新的暗电流来源, 总剂量效应将 Si/SiO_2 表面耗尽区延伸到顶部氧化物界面^[11]. 之前的报道证明带电陷阱密度与电离剂量是相关的^[10]. 假设像素阵列接受 γ 射线 (剂量为 D_γ) 辐照, 如果光电二极管的物理结构确定, 第 i 个像素的暗电流增加值 $\Delta J_{\gamma,i}$ 可以用式(1)表示.

$$\Delta J_{\gamma,i} = k_i \cdot D_\gamma (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中, N 是像素的总数量; k_i 与光电二极管的周长以及制造工艺有关. 不同像素 k_i 值会略有不同, 因此而导致整个像素阵列 DCNU 增强. 通过测量所有像素的 $\Delta J_{\gamma,i}$, 可以确定每个像素的 k_i . 如果能够确定像素阵列中所有像素对应的 $k_1, k_2, \dots, k_N$, 这些参数就能预测总剂量效应下整个像素阵列的暗电流分布. 另外, 由于具有相同光电二极管和像素结构的器件 k_i 的统计属性相同, $k_1, k_2, \dots, k_N$ 也可以用于预测它们的暗电流分布.

2.2 质子辐射致暗电流幅值分布建模

当带质入射粒子 (如质子) 与半导体晶格中的原子发生碰撞, 晶格中的原子核发生位移, 器件就会产生位移损伤. 位移损伤效应涉及的作用包括弹性散射和非弹性散射. 在位移损伤效应下, 没有复合的间隙/空位对, 在光电二极管耗尽区内或者附近重新排列成缺陷, 成为了非平衡载流子的激发中心^[13]. 文

献研究表明, 位移损伤效应引起的硅基光电器件暗电流与非电离能量损失 (Non-Ionizing Energy Loss, NIEL) 有关^[14]. 由于质子带质带电, 其辐射不仅能产生位移损伤效应, 还会通过库伦散射产生总剂量效应. 质子辐射产生的总剂量效应与线性能量转移 (Linear Energy Transfer, LET) 有关. 如图 1 所示, 文献[15]阐述了质子辐照下, 二氧化硅中的 LET 和硅中的 NIEL 是满足关于质子能量 E 的幂函数. 假设与 NIEL 和 LET 曲线的相关斜率分别是 k_N 和 k_L , 那么质子辐射诱发的 NIEL 和 LET 可以分别写成 E^{k_N} 和 E^{k_L} . 其中, k_N 和 k_L 是统计值, 并且像素之间可能不同. 另外, 考虑到电离和位移损伤效应与粒子注量 Φ_p 成正比, 则像素阵列接受质子 (能量为 E) 辐照后, 第 i 个像素的暗电流增加值可以用式(2)表示.

$$\Delta J_{p,i} = k_{1,i} \cdot E^{(k_{N,i} + k_{L,i})} \Phi_p (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式中, $k_{1,i}$ 是每个像素上与辐射能量沉积相关的线性系数. 若令 $k_{2,i} = k_{N,i} + k_{L,i}$, 式(2)可以改写为式(3).

$$\Delta J_{p,i} = k_{1,i} E^{k_{2,i}} \cdot \Phi_p (i = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

对于能量为 E 和注量为 Φ_p 的质子辐照, 通过计算暗电流的增加值 ΔJ , 可以确定每个像素 $k_{1,i}$ 和 $k_{2,i}$. 为了精确求解这两个参数, 可以采用在三种不同的质子注量和能量辐照条件下进行实验, 获取三组数据, 并建立超定方程组进行求解. 超定方程组可以通过式(3)进行线性化得到, 即方程组(4):

$$\begin{cases} \ln(\Delta J_{p1,i}) - \ln(\varphi_{p1}) = \ln(k_{1,i}) + k_{2,i} \cdot \ln(E_1) \\ \ln(\Delta J_{p2,i}) - \ln(\varphi_{p2}) = \ln(k_{1,i}) + k_{2,i} \cdot \ln(E_2) \\ \ln(\Delta J_{p3,i}) - \ln(\varphi_{p3}) = \ln(k_{1,i}) + k_{2,i} \cdot \ln(E_3) \end{cases} \quad (4)$$

对于像素 i , 未知量是 $\ln(k_{1,i})$ 和 $k_{2,i}$. 方程组(4)可以通过标准的最小二乘法求解. 进而我们可以得到所有像素的 $k_{1,i}$ 和 $k_{2,i}$, 然后利用 k_1 和 k_2 的分布, 来预测某种质子辐射条件下, 具有同样设计和制造参数的图像传感器暗电流幅值分布情况.

2.3 γ 射线和质子辐射致暗电流幅值分布建模

如文献[16]所述, γ 射线在器件上产生总剂量效应, 所有像素暗电流均值增加, DCNU 增强. 图 1(a) 是 γ 射线辐照下 CIS 像素阵列的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 示意图. 质子辐射产生电离效应和位移损伤效应, 器件的平均暗电流增加, DCNU 增强, 如图 1(b) 所示. 此外, 质子辐射引起的移位损伤效应, 会使对应的 PDF 有一个

长的热像素拖尾。

使用第 2.1 和 2.2 节提出的建模方法,可以很容易地分别建立 γ 射线和质子辐射下 CIS 暗电流变化的 PDF 图。若假设 γ 射线和质子辐射对于图像传感器器件来说是不相关的随机过程,那么对于单个像素来说, γ 射线入射事件和质子入射事件所引起

的暗电流增量可以认为是两种单独辐射事件所引起的暗电流增量的和。进而有暗电流增量的和的概率分布满足两种辐射事件各自所引起的暗电流幅值概率分布的卷积,也即两种辐射情况下 PDF 的卷积。图 1 对这一概率计算方法进行了示意。

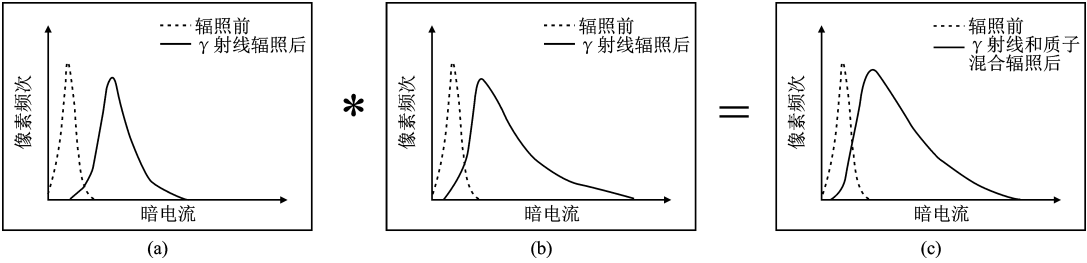


图 1 γ 射线和质子辐射下暗电流幅值分布建模方法示意图

3 仿真结果

为了验证本文所提出的辐射致暗电流幅值分布建模方法的有效性,本小节采用图像传感器的辐射致暗图像数据对其进行了仿真。图 2 是图像传感器在不同辐射条件下获得的暗图像。其中(a)图中的辐射条件为 γ 射线,剂量为 10 Krad(Si);其余辐照条件为质子,通量为 10^{10} p/cm²,能量分别是 (b) 60 MeV, (c) 40 MeV, (d) 30 MeV。所有的暗图像设定

在 -30°C 实验条件下获得,图像的像素阵列为 250×250 。利用第 2.1 和 2.2 节中提出的方法,结合图像数据,可以对暗电流分布进行建模。为了更具可比性,建模结果在图 3(a)~(d)中与根据原始数据所绘制的暗电流分布进行了对比。可以看出,建模结果与数据计算所得到的 DCNU 基本一致。说明所提出的建模方法可以比较精确地预测 γ 射线和质子辐射下暗电流分布。

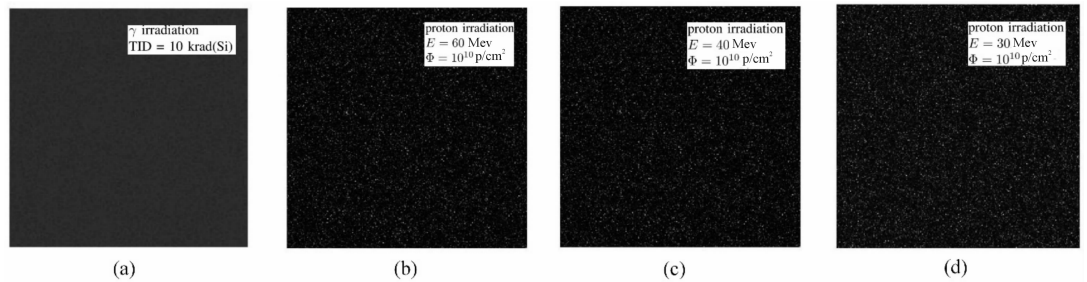


图 2 不同辐射条件下(γ 射线和不同能量质子)获得的暗图像

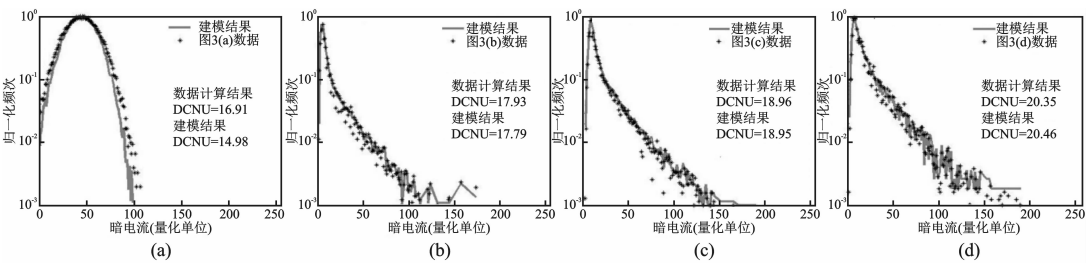


图 3 暗电流峰值分布建模结果与图像数据点分布对比图

图 4 所示的暗图像是在辐照条件为 γ 射线及质子混合辐照下获得的。其中 γ 射线剂量为 10 Krad(Si),质子,通量为 10^{10} p/cm²,能量为 40MeV。根据

第 2.3 节提出的方法,通过卷积图 3(a)和(c)的建模结果,可以得到图 4 中的暗电流分布模型。从图 4 可以看出,建模结果与从图 4 数据中提取的 PDF 图

具有很好的一致性. 通过图 4 中的数据计算出的 DCNU 和利用建模方法获得的分布函数所计算的 DCNU 分别为 24.04 和 25.35 (量化单位),说明建模方法是有效和准确的.

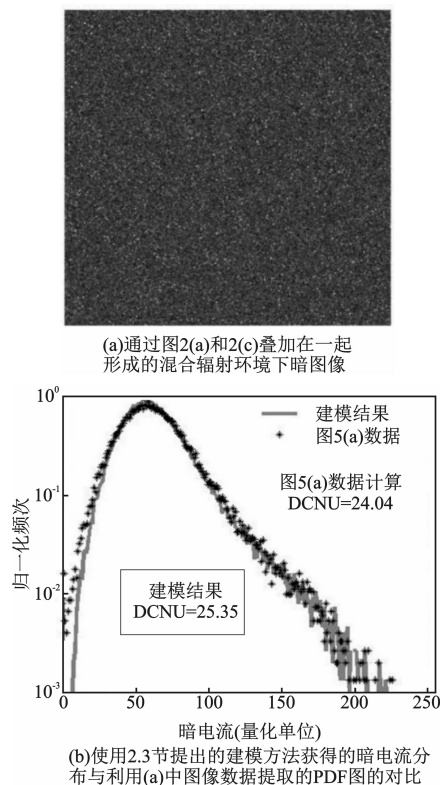


图5 暗图像与对比图

4 讨论

由于本文提出的建模方法是基于实验数据开展的,因此对于本文没有涉及到的电子、中子或其他粒子辐射导致的 CMOS 图像传感器的暗电流分布建模也是适用的. 如,对于电子来说,其引起的电离效应与 γ 射线相似,而中子引起的位移损伤效应,同样可借由非电离能量损失这一参数进行建模. 因此,式(1)和式(3)分别在描述总剂量和移位损伤效应引起的暗电流增量方面具有一定的通用性. 所提出方法的应用意义在于,它能够用于提取图像传感器暗电流对于辐射效应响应的关键描述参数. 进一步的,基于对器件待应用环境(空间辐射环境、地面核环境)关键辐射粒子能谱的分析,借由本文所提出的方法就能够预测成像器件的暗电流辐射进程退化的情况,为成像芯片的选型和设计提供评估方案.

5 结束语

在辐射环境下粒子入射(如 γ 射线、质子等)会

导致 CIS 暗电流发生退化. 本文提出了一种在混合辐射环境下(γ 射线和质子辐射),图像传感器暗电流幅值分布的建模方法. 仿真结果表明模型预测结果与图像数据提取结果具有很高的一致性,说明了所提出建模理论的正确性及建模方法的有效性.

致谢

感谢西北工业大学微电子研究所 CMOS 图像传感器项目组成员.

参考文献:

- [1] El Gamal A, Eltoukhy H. Cmos image sensors[J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 2005, 21(3): 6-20.
- [2] 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.
- [3] Hopkinson G R, Chlebek C. Proton damage effects in an eev ccd imager[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989, 36(6): 1865-1871.
- [4] Marshall P W, Dale C J, Burke E A, et al. Displacement damage extremes in silicon depletion regions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989, 36(6): 1831-1839.
- [5] Srour J R, Hartmann R A, Kitazaki K S. Permanent damage produced by single proton interactions in silicon devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1986, 33(6): 1597-1604.
- [6] Virmondois C, Goiffon V, Magnan P, et al. Similarities between proton and neutron induced dark current distribution in cmos image sensors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(4): 927-936.
- [7] Gilard O, Boutillier M, Quadri G, et al. New approach for the prediction of ccd dark current distribution in a space radiation environment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(6): 3626-3632.
- [8] Hopkinson G R. Radiation-induced dark current increases in ccds[C]//Radiation and its Effects on Components and Systems, 1993. RADECS, 1993: 401-408.
- [9] Goiffon V, Virmondois C, Magnan P, et al. Identification of radiation induced dark current sources in pinned photodiode cmos image sensors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(4): 918-926.
- [10] Goiffon V, Virmondois C, Magnan P, et al. Radiation damages in cmos image sensors: Testing and hardening challenges brought by deep sub-micrometer cis processes[C]//SPIE Remote Sens. IEEE, 2010.

- [11] Goiffon V, Estribeau M, Marcelot O, et al. Radiation effects in pinned photodiode cmos image sensors: Pixel performance degradation due to total ionizing dose[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6): 2878-2887.
- [12] Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U. The stopping and range of ions in solids[C]//PC Version Developed. Yorktown, NY. Oxford, U.K.: Pergamon.
- [13] Srour J R, Marshall C J, Marshall P W. Review of displacement damage effects in silicon devices [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 653-670.
- [14] Hopkinson G. Displacement damage analysis and characterization of effects on devices [C]//Space Radiation Environment and its Effects on Spacecraft Components and Systems. Toulouse: Cepadues, 2004.
- [15] Hopkinson G R, Dale C J, Marshall P W. Proton effects in charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2): 614-627.
- [16] Beaumel M, Herve D, Aken D Van. Cobalt-60, proton and electron irradiation of a radiation-hardened active pixel sensor[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(4): 2056-2065.
- [17] Gilard O, Boatella-Polo C, Dolado-Perez J C, et al. Corot satellite: Analysis of the in-orbit dark current degradation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(3): 1644-1653.

作者简介:

郑然男, (1981-), 博士, 副教授. 研究方向为模拟与混合信号集成电路设计、集成电路辐射效应, 低噪声图像传感器设计等. E-mail: zhengran@nwpu.edu.cn.

刘超男, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为图像传感器辐射效应建模.

刘晗女, (1994-), 硕士研究生. 研究方向为图像传感器.

(上接第 143 页)

- [2] 白乐强, 孙晶晶, 杨晰. 基于邻居表的 ZigBee 网络树路由改进算法[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(5): 1156-1160.
- [3] 周鑫, 林勇. 一种基于 ZigBee 树状路由协议的改进算法 ATSPF[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(11): 8722-8729.
- [4] Taehong Kim, Seong Hoon Kim, Jinyoung Yang, et al. Neighbor table based shortcut tree routing in ZigBee wireless networks[J]. IEEE transactions on parallel and distributed systems, 2014, 25(3): 706-716.
- [5] Zijng Lin, Max Q H Meng, Huawei Liang. A route discovery method based on limited flooding in ZigBee networks[C]//IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2008. United States: IEEE, 2008: 3039-3044.
- [6] 谢川. 基于 ZigBee 的 AODVjr 算法研究[J]. 计算机工程, 2011, 37(5): 87-89.
- [7] 杜力凯, 张灵, 陈云华. 一种改进的 ZigBee 路由优化算法[J]. 计算机科学, 2015, 32(5): 153-168.
- [8] 钱志鸿, 朱爽, 王雪. 基于分簇机制的 ZigBee 混合路由能量优化算法[J]. 计算机学报, 2013, 18(3): 485-493.
- [9] 李岩, 袁安娜, 柳培新, 等. 一种改进的 ZigBee 网络能量均衡簇树路由算法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 53(10): 50-60.
- [10] 谈佳. ZigBee 网络节能方案[D]. 广州: 华南理工大学出版社, 2011.

作者简介:

朱尚聪男, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络. E-mail: 276941535@qq.com.

吕红芳女, (1978-), 副教授、硕士生导师. 研究方向为无线传感器网络和现代工业控制技术.

吉书瑶女, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络.