光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250614001

CMOS图像传感器不同时序节点的单粒子瞬态仿真模拟

李传洲[1]，王祖军[1,2*]，蒋镕羽[1]，杨　鑫[1]，尹利元[3]

（1. 湘潭大学 材料科学与工程学院，湖南 湘潭 411105；2. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室，西安 710024；3. 中国船舶集团有限公司第七一八研究所，河北 邯郸 05600）

摘　要： 基于技术计算机辅助设计仿真平台，建立了具有针扎光电二极管（PPD）像素结构的CMOS图像传感器的器件物理模型，并结合重离子辐射模型，系统研究了像素单元在单粒子辐照下的损伤效应。通过模拟复位、光生电荷的转移与存储等关键时序节点下不同线性能量传递的重离子对各区域诱导的单粒子瞬态效应，深入分析了像素单元中电势、电子电流及电子浓度随时间的变化规律。仿真结果显示，相较于其他工作阶段，当转移栅开启时，PPD区域中电荷转移至漂移扩散区域的过程中，电子密度的瞬态变化最为显著，对单粒子入射的敏感性最高。相较于像素单元的其他区域，PPD区域对单粒子辐射表现出较强的敏感性。该仿真结果为深入揭示PPD CMOS图像传感器的单粒子辐照损伤机制提供了理论支持，对辐射环境下的图像传感器可靠性设计具有指导意义。

关键词： CMOS图像传感器；辐照效应；时序节点；单粒子瞬态；电子浓度

中图分类号： TN386.5；TL11　**文章编号：** 1001－5868（2025）05－0943－08

Simulation of Single-Event Transients at Different Timing Nodes of CMOS Image Sensor

LI Chuanzhou[1], WANG Zujun[1,2], JIANG Rongyu[1], YANG Xin[1], YIN Liyuan[3]

（1. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, CHN; 2. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, CHN; 3. The 718th Research Institute of CSSC, Handan 056000, CHN）

Abstract: Pinned photodiode（PPD）complementary metal-oxide semiconductor（CMOS）image sensors are widely used in aerospace applications. However, space radiation readily induces performance degradation or even device failure. Although current research on single-event effects relies heavily on experimental tests, numerical simulation-based studies, which play a critical role in mechanistic exploration, remain relatively limited. In this study, a device physics model of a CMOS image sensor with a PPD pixel structure was established based on the technology computer-aided design simulation platform and further integrated with a heavy-ion radiation model to systematically investigate single-event irradiation-induced damage effects in pixel units. By simulating the single-event transient induced by heavy ions with different linear energy transfer values in various pixel regions under key operational timing nodes, the temporal evolution laws of the electric potential, electron current, and electron concentration were thoroughly analyzed in pixel units . The simulation

收稿日期：2025－06－14.

基金项目：国家自然科学基金（U2167208）；陕西省自然科学基础研究计划（2024JC-JCQN-10）；全国重点实验室基金（NKLIPR2320）.

* 通信作者：王祖军

results indicate that compared with other operating stages, the transient change in electron density is most pronounced, and the sensitivity to single-particle incidence is maximized when the transfer gate is activated to transfer charges from the PPD to the floating diffusion region. The PPD region exhibited stronger susceptibility to single-event radiation than other sub-regions of the pixel unit. The results of this study provide theoretical support for uncovering the single-event irradiation damage mechanism of PPD CMOS image sensors, offering valuable guidance for the reliable design of such sensors in radiation-intensive environments.

Key words: CMOS image sensor; radiation effect; timing nodes; single-event transient; electron density

0 引言

针扎型光电二极管互补金属氧化物半导体(PPD CMOS)图像传感器首次报道于1994年[1],因其低功耗、小尺寸、高集成度和经济实用等优点,被广泛应用于星敏感器、遥感成像及对地观测等空间相关领域[2-4]。然而,在地球大气层外复杂的空间环境中,高能粒子(如质子、重离子等)会引发位移损伤、总剂量效应及单粒子效应等辐照损伤,这些效应可能导致PPD CMOS图像传感器成像性能退化,严重时甚至导致功能失效[5]。不同于常规CMOS集成器件,PPD CMOS图像传感器的像素单元专为光电电荷收集设计,其对单粒子效应(如单粒子瞬态扰动)表现出更高的敏感性。

PPD CMOS图像传感器的像素单元包含栅氧化层、浅槽隔离(STI)和预金属电介质(PMD)层。当单个高能空间粒子入射至器件时,以上各部分易于生成电子-空穴对。若在单位路径长度上沉积足够数量的电子-空穴对,则可能导致器件出现软错误[6-7]。在施加一定偏压的条件下,生成的电子-空穴对会在短时间内分离并向不同区域转移,造成电子浓度和电势的突变[8],从而影响PPD CMOS图像传感器正常的信号电荷转移过程。

目前,国内外对PPD CMOS图像传感器单粒子效应的研究主要依赖于辐射实验[9-10],而仿真模拟研究较为有限。2013年,Lalucaa等对CMOS图像传感器进行了重离子辐照实验,并使用STARDUST软件模拟重离子产生的亮斑,结果表明外延层能够有效降低缺陷的扩散和电荷收集,从而减小亮斑尺寸[11]。王祖军等自2019年起研究中子辐照导致的CIS单粒子瞬态响应和位移损伤规律[12-13],发现中子位移损伤会引起暗信号增强、DSUN增加、暗信号尖峰及RTS现象[14-15]。2022年,张冰等结合SPICE电路模型与TCAD软件模拟,确定重掺杂非均匀掺杂的转移栅有助于防止光生电子回注至光电二极管,从而消除图像滞后,为混合光电过程的模拟提供了有效评估机制[16]。

然而,目前针对单粒子入射时刻与像素单元电子浓度瞬态响应的关联机制仍缺乏系统性研究。本研究聚焦4T PPD CMOS图像传感器,通过分析不同时序节点单粒子入射各敏感区域的瞬态响应特性,揭示电势分布变化与电子浓度突变的规律。

1 PPD CMOS图像传感器的单粒子效应模拟仿真

TCAD仿真是研究器件单粒子效应的重要工具。采用TCAD仿真方法,对4T PPD CMOS图像传感器的单粒子效应进行模拟分析。通过构建像素单元的器件结构模型及重离子辐照模型[17],并设置辐射源,系统研究了不同LET条件下的重离子轰击像素单元各敏感区域时的器件响应特性。

1.1 重离子模型

当重离子穿过CMOS图像传感器时,其能量会不断损失并在器件内部产生大量电子-空穴对。这些非平衡载流子可能形成显著的瞬态电流,进而干扰传感器的正常工作。重离子模型用于模拟重离子轰击器件的过程,由重离子引起的电子-空穴对生成速率通过下式计算:

$$G(l,w,t)=G_{\mathrm{LET}}(l)R(w,l)T(t) \tag{1}$$

式中,$G_{\mathrm{LET}}(l)$为电子-空穴对产生密度,l为重粒子入射轨迹长度,$R(w,l)$表示重离子能量扩散的空间分布。

$$R(w,l)=\exp\left[-\frac{w}{w_t(l)}\right] \tag{2}$$

$$R(w,l)=\exp\left[-\left(\frac{w}{w_t(l)}\right)^2\right] \tag{3}$$

公式(2)为空间指数分布，公式(3)为空间高斯分布。其中，$T(t)$为重离子能量扩散的时间分布，通常采用高斯分布函数表示：

$$T(t)=\frac{2\cdot\exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\sqrt{2}\cdot s_{\mathrm{hi}}}\right)^2\right]}{\sqrt{2}\cdot s_{\mathrm{hi}}\sqrt{\pi}\left[1+\mathrm{erf}\left(\frac{t_0}{\sqrt{2}\cdot s_{\mathrm{hi}}}\right)\right]} \tag{4}$$

式中，t_0为重离子的入射时刻；s_{hi}为高斯本征值，代表入射粒子的脉冲宽度[18]。代入公式(1)计算出载流子生成率后，通过求解泊松方程和连续性方程，可获得电流和电荷收集随时间变化的关系。

1.2　电子电流密度

输运方程(电流密度方程)用于描述载流子在电场、浓度梯度和温度梯度等外部因素影响下的运动规律[19]，该方程综合了载流子的漂移、扩散以及复合等过程引起的多种运动机制。其中，最基本的线性输运模型是玻尔兹曼输运方程，它描述了载流子在电场(漂移)和浓度梯度(扩散)共同作用下的输运特性。该方程以微分形式表示，能够从微观角度反映载流子随空间和时间变化的运动规律。通过求解该方程，可获知载流子浓度分布，并进一步计算电导率、扩散系数等关键物理量。

电子电流密度矢量和空穴电流密度矢量的表达式如下：

$$\boldsymbol{J}_n=q\mu_n n\boldsymbol{E}+qD_n\nabla\boldsymbol{n} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{J}_p=q\mu_p n\boldsymbol{E}-qD_p\nabla\boldsymbol{n} \tag{6}$$

在确定载流子的迁移率和扩散系数后，漂移电流依赖于载流子浓度和电场强度两个变量，而扩散电流则仅依赖于载流子浓度梯度。总电流密度可表示为：

$$\boldsymbol{J}=\boldsymbol{J}_n+\boldsymbol{J}_p=q(\mu_n n+\mu_p p)\boldsymbol{E}+q(D_n\nabla\boldsymbol{n}-D_p\nabla\boldsymbol{p}) \tag{7}$$

式中，J_{n}和J_{p}分别为电子和空穴电流密度矢量，q为电子电荷量，μ_{n}和μ_{p}分别为电子和空穴迁移率；n为电子浓度；p为空穴浓度，$\boldsymbol{E}$为电场强度，D_{n}和D_{p}分别为电子和空穴扩散系数，$\nabla\boldsymbol{n}$和$\nabla\boldsymbol{p}$分别为电子和空穴浓度梯度。

1.3　单粒子效应模拟方法

通过对器件各区域尺寸和掺杂分布的优化，最终获得能够正常工作并具备良好像素单元性能的4T PPD CMOS图像传感器像素单元结构，其截面示意图及掺杂分布如图1所示。在传感器正常工作过程中，关键时序节点如图2所示，包括：光电二极管复位前、复位完成时、传输栅(TG)开启前以及浮动扩散(FD)复位阶段。重离子在这些不同时间点入射后，将对比辐照前后像素单元区域内各处的电子密度和静电势的分布，并分析入射时刻和位置的影响规律。

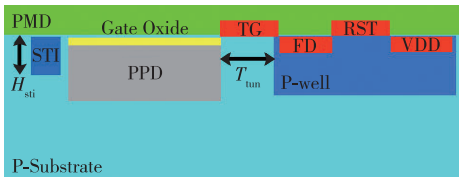


图1　4T PPD CMOS图像传感器像素单元示意图

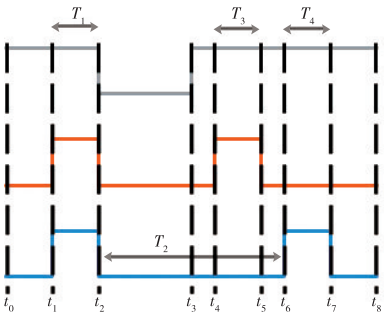


图2　4T PPD CMOS图像传感器像素单元时序设计

T_1阶段为复位阶段。在时刻t_1时，复位管、转移栅和电源均接入高电平，PPD内的本征电子和残余电荷转移至电势较高的复位管中，使得PPD感光区处于全耗尽状态，以便能够收集到更多的光电子。在时刻t_2时，复位管、传输管和电源切换至低电平。T_2阶段为积分阶段，此时转移栅接入低电平，光线进入CMOS图像传感器像素单元内部，光电效应产生的光生电荷被PPD空间电荷区域收集。T_3阶段为FD区域复位阶段。在时刻t_3和t_4时，分别将电源和复位管接入高电平，FD区域中的残余电荷转移至电势较高的复位管中，并将FD区域复位至高电压。在转移栅开启后，PPD中的光电子能够顺利转移至FD区域，记录此时FD节点的复位电压V_{FD1}。T_4阶段为电荷转移阶段。在时刻t_6时，转移栅接入高电平，使其开启，此时PPD空间电荷区收集到的光生电荷在电场作用下转移至FD区域中。随后，在时刻t_7时，关闭转移栅，记录此时FD节点的输出电压V_{FD2}。通过相关的双采样技术，将FD两次采集到的电压相减，得到最终的输出信号$\Delta V=V_{\mathrm{FD2}}-V_{\mathrm{FD1}}$，经由这种方式可消除固定模式噪声和复位噪声。

在选择 T_2, T_3 和 T_4 时间区间内，使用 *LET* 为 0.1 MeV cm²/mg，C（1 MeV cm²/mg），F（4 MeV cm²/mg），Cl（10 MeV cm²/mg）和 Ta（85 MeV cm²/mg）的单个重离子对CMOS图像传感器的不同坐标点进行入射，包括STI左侧、PPD区域和FD区域。在入射后10 ps，20 ps，30 ps等一系列时间节点，观察瞬态变化[20]。

2 仿真结果与讨论

重离子沿入射轨迹产生大量电子-空穴对，形成漏斗区和电场区。漏斗区扩大了电荷的收集范围，而电场则向衬底区延伸。在PN结中的电场与外部电场的共同作用下，电子和空穴迅速漂移。随着重离子能量的逐渐损失，硅材料中不断电离，产生更多的电子-空穴对。电子和空穴的漂移运动使电场得以继续向其他区域扩展。随着漂移过程的进行，器件中的空间电荷数量逐渐减少，电场区域开始衰减。同时，电子和空穴的扩散过程使得电场状态逐渐恢复。经过漂移和扩散，电子与空穴逐渐复合，静电势和空间电荷分布最终恢复至辐照前的状态。

移动到敏感节点的电荷相当于该节点上流过的电流，这将改变节点的电压。电流瞬态表现出快速（漂移）和慢速（扩散）两种分量，其中快速成分优于电路的响应速度。因此，需讨论在短时间内电子电流密度和电子浓度的变化。单像素单元电荷收集的敏感区域即为将电荷收集到积分电容中的PPD区域，该敏感区域由PN结的耗尽层及外延层部分构成。在电场的作用下，PPD通过漂移收集耗尽层中产生的电子-空穴对。在耗尽区外的外延层中产生的电子-空穴对中，一部分通过热扩散随机扩散至相邻的PPD中被收集，其余部分则可能被复合或捕获。

2.1 模型验证

（1）PPD掺杂验证：在完成器件结构模型和物理模型的建立后，得到的4T PPD CMOS图像传感器像素单元的掺杂浓度分布沿PPD从表面到衬底的变化如图3所示。

（2）复位管验证：CMOS像素单元正常工作的一个关键因素是复位管的阈值电压。对于4T像素单元而言，复位管控制着像素信号的输出，通过对复位管的开启与关闭，实现电压信号的输出。复位管的阈值电压对CMOS性能具有重要影响，直接关系到FD的电势高低。当开启复位管时，FD中的电子会被转移出去，从而使FD电势升高并保持在该状态。当复位管关闭后，其漏电流必须较小，以确保复位管的正常工作，进而保证4T像素单元能够正常进行电荷转移和读出。因此，需要对复位管的漏电情况进行评估。为了评估复位管的漏电性能，将复位管从外部接入0 V电压以模拟其关断状态，同时FD也接入外部电压，电压值从0 V逐渐升高至3.3 V，具体过程如图4所示。

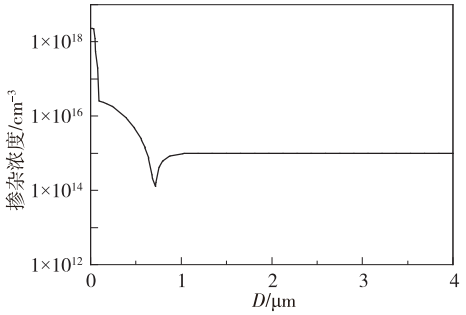


图3 PPD区域掺杂浓度分布图

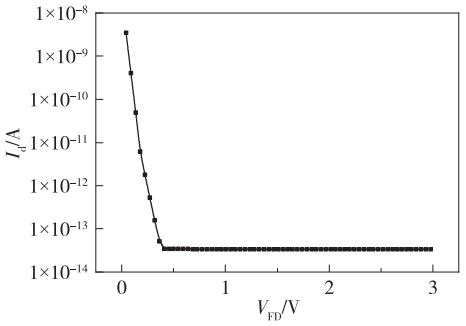


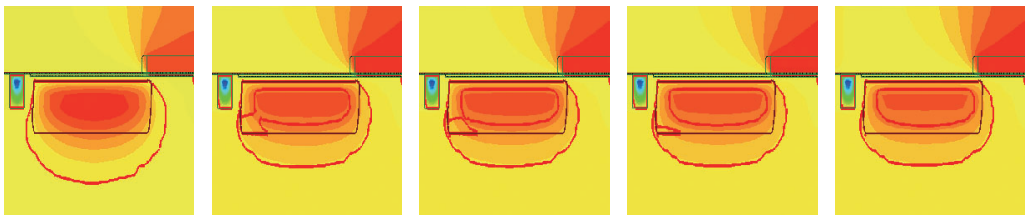
图4 漏电流随FD电压的变化曲线图

2.2 在不同时序节点受单粒子的影响

2.2.1 在 T_2 时间节点受到单粒子效应损伤影响

此时，转移管、复位管和电源均处于关闭状态，PPD区域正处于电荷收集阶段。图5展示了 *LET* 为0.1 MeV cm²/mg的重离子入射STI左侧后不同时刻的静电势分布，其中图(a)、(b)、(c)、(d)和(e)分别对应重离子入射前，入射后20 ps、50 ps、100 ps和5 ns后的静电势分布变化。静电势的变化过程与理论电荷收集机制一致，电子和空穴向衬底的漂移运动使得电场得以持续向体相区域扩展。经过5 ns的漂移和扩散后，电子和空穴逐渐复合，静电势和空间电荷分布最终恢复至辐照前的状态。

从图6中可以看出，单粒子在STI左侧入射后，在50 ps时PPD区域内的电子浓度达到最高点，并在5 ns后保持稳定。这表明，单粒子入射产生的电子-空穴对占据了原本用于收集信号电荷的PPD区域，导致信号



（a）入射前　（b）20 ps　（c）50 ps　（d）100 ps　（e）5 ns

图 5　PPD 区域内的静电势变化示意图

电荷无法正确收集。经过转移电路后，宏观表现为一帧白点。当重离子能量足够大时，影响到多个相邻像素，形成在单粒子辐照损伤实验中的亮斑现象。

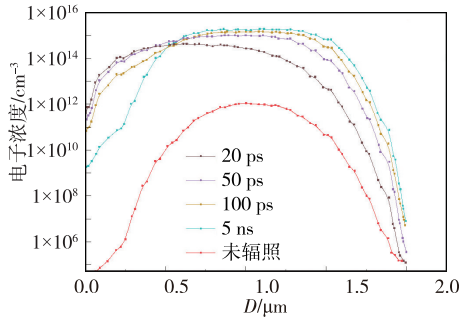
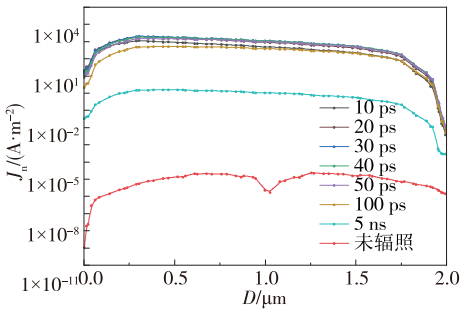


图 6　PPD 区域内的电子浓度分布

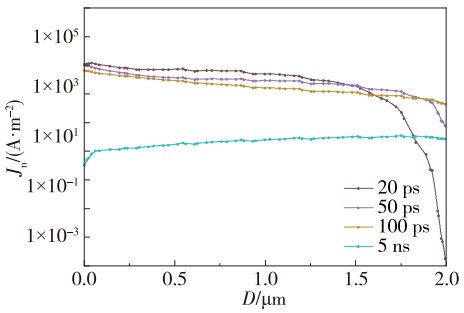
在正常情况下，非电荷转移过程未产生显著电流，图中的红线 1×10^{-8} 的电流密度可视为除内生电子-空穴的移动外，无电流产生。在单粒子入射后 20 ps，PPD 区域内产生电流密度，并迅速升至最大值，随后稳定至 100 ps。经过 5 ns 后，电流密度逐渐接近于 0，逐步回归至未辐照前的状态。尽管入射位置、角度和时刻相同，但图 7(b)后半部分的曲线与图 7(a)相比未出现下降趋势。这是因为 LET 与电子-空穴对的产生存在线性关系：LET 越大，产生的电子-空穴对数量越多。因此，在图 7(b)中收集到的电子数量显著高于图 7(a)。

图 8 展示了 *LET* 为 0.1 MeV cm²/mg 的粒子在(1.49，−1)位置入射时的电流密度分布图。与图 7(a)相比，电子电流密度的最大值保持不变，但其下降速度快于图 7。在图 7 中，电流密度在 100 ps 内稳定在最大值，而图 8 中，在 100 ps 后电流密度的数值降至小于 1。这表明，入射位置的改变对单粒子效应具有一定影响，进一步说明 STI 在一定程度上具有防护作用。

图 9 展示了在 T_2 时间节点，入射 STI 左侧的单粒子引起的电流密度变化。在 20～50 ps 间，电流密度变化最大，而在 5 ns 后基本保持不变。将入射 PPD 位置进行比较，入射位置的改变对单粒子效应具有一定影响，这进一步说明 STI 在一定程度上具有防护作用。此外，入射 FD 区域对耗尽区的影响并不明显。



(a) LET=0.1 MeV cm²/mg



(b) LET=4 MeV cm²/mg

图 7　PPD 区域内的电子电流密度

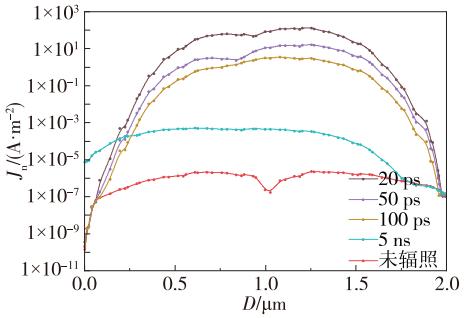
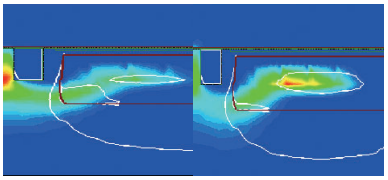


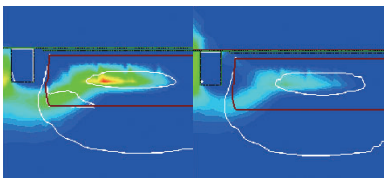
图 8　PPD 区域内的电子电流密度图

2.2.2　在 T_3 时间节点受到单粒子效应损伤影响

此时，转移栅关闭，复位管和电源处于开启状态，FD 区域处于复位状态。图 10 展示了 *LET* 为 0.1 MeV cm²/mg 的粒子在(0.04，−1)位置的入射



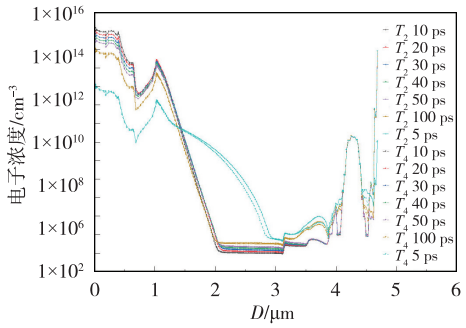
（a） 20 ps （b） 50 ps



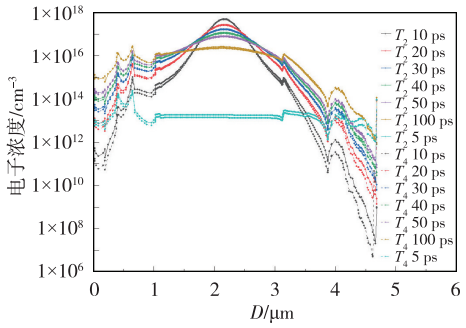
（c） 100 ps （d） 5 ns

图9 PPD区域内的电子电流密度分布示意图

情况。实线代表T_2时间节点的电流密度，虚线代表T_3时间节点的电流密度。可以看出，敏感区域的电子浓度在不同时刻没有显著差别，这表明复位管在关态或开态下，对单粒子效应的影响不明显。



（a）STI左侧，LET=0.1 MeV cm²/mg



（b）PPD，LET=4 MeV cm²/mg

图10 T_2时刻与T_3时刻的截线处的电子浓度对比图

2.2.3 在T_4时间节点受到单粒子效应损伤影响

此时，转移管和电源处于开启状态，而复位管关闭，电荷从PPD区域转移至FD区域。对于LET为4 MeV cm²/mg（F）的粒子在（0.04，−1）位置的入射，观察到耗尽区在30 ps时刻受到破坏，并在100 ps后恢复正常。这表明耗尽区在单粒子入射后30 ps内遭受破坏，但很快恢复至原状。如图11所示，与T_2时刻相比，在其他条件相同的情况下，T_4时刻PPD区域内的电子浓度更高，而体区域保持不变。由于入射的单粒子LET相同，产生的总电子-空穴对也相应一致，这说明T_4时刻PPD区域收集电子的能力强于T_2时刻，进一步表明在相同的LET条件下，T_4时刻更易受到影响。

从图12中可以看出，当F离子（LET为4 MeV cm²/mg）入射PPD后，转移栅下的耗尽区被扩宽，干扰了原有的电荷转移通道。经过30 ps，耗尽区逐渐收窄，并在100 ps后恢复正常工作状态。然而，在5 ns后，由于产生的电子-空穴对向体相扩散，TG通道受到破坏，失去正常工作的能力。在图13中，实线表示T_2时间节点，虚线表示T_4时间节点。从整体截线来看，T_4时间节点在相同时间段内各区域的电子浓度均高于T_2时间节点，其中在20 ps时刻的差距最大。经过5 ns后，电子浓度变化趋于平缓，短时间内的突变消失。值得注意的是，单粒子入射后FD区域的电势变化并不明显，而PPD感光区的电势则有轻微变化。这是因为FD区域本身的电子浓度较高（在10^{19}数量级），而辐射产生的电子浓度仅为10^{15}数量级，所以在FD区域中，电子浓度的变化并未显著体现。

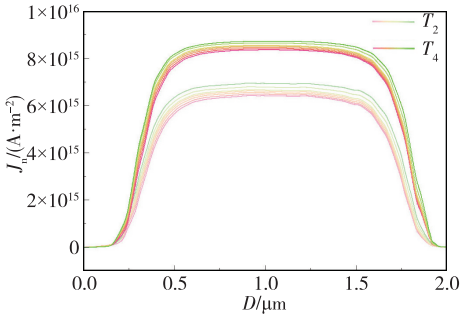
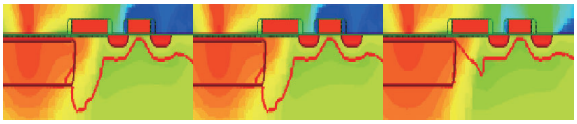
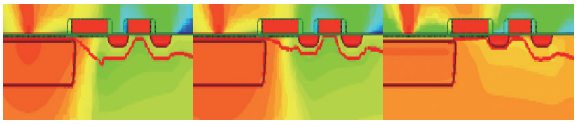


图11 T_2时刻与T_4时刻的PPD内电子电流密度对比图



（a） 10 ps （b） 20 ps （c） 30 ps



（d） 40 ps （e） 100 ps （f） 5 ps

图12 像素单元内的电子浓度及耗尽区变化

3 结论

本工作基于TCAD仿真平台，构建了PPD

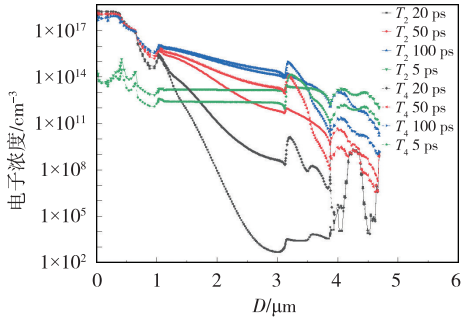


图13　T_2时间节点与T_4时间节点的截线处的电子浓度对比图

CMOS图像传感器像素单元的二维仿真模型，通过重离子辐照模型模拟了器件在不同工作阶段的电子浓度、静电势及电子电流密度分布特性。结果表明：在单粒子入射过程中，沿径迹会产生大量电子-空穴对，这些载流子在电场作用下漂移形成瞬时额外电流，表现为暗电流的瞬态尖峰，其中电荷转移（T_4）阶段因电子浓度突变最显著，暗电流的瞬态扰动最大；同时，这些额外电子-空穴对会被PPD区域误收集并与光生电荷叠加，导致输出信号中噪声占比升高、有效光响应信号被稀释，使灵敏度瞬态下降，且由于T_4阶段PPD的电子收集能力强于复位（T_2）和电荷收集（T_3）阶段，该阶段单粒子对灵敏度的干扰更显著；此外，单粒子产生的载流子会占据满阱部分容量，导致实际可收集的光生电荷减少，且随着LET增加，PPD区域的耗尽区扩大，对满阱电荷的挤占更严重。整体而言，单粒子辐射对像素参数的影响以瞬态干扰为主，与PPD电荷收集直接相关的参数对单粒子辐射更为敏感，且在T_4阶段敏感度达到峰值。值得注意的是，单粒子入射并未破坏PPD结构，仅影响其对光生电子的吸收，经重新复位后像素可正常工作，不受前一周期单粒子辐射的影响。本研究为揭示单粒子效应的辐射损伤机制及PPD CMOS图像传感器的抗辐照技术研究提供了理论基础。

参考文献：

[1] Fossum E R, Hondongwa D B. A review of the pinned photodiode for CCD and CMOS image sensors[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2014, 2(3): 33-43.

[2] 王祖军，薛院院，贾同轩，等. 不同剂量率伽马射线辐照PPD CMOS图像传感器的瞬态效应实验研究[C]//中国核科学技术进展报告（第七卷）——中国核学会2021年学术年会论文集第6册，2021：124-132.
Wang Zujun, Xue Yuanyuan, Jia Tongxuan, et al. The experimental research of transient effects in PPD CMOS image sensors irradiated by gamma rays at different dose rates[C]// Progress Report of Nuclear Science and Technology in China (Volume 7)——Volume 6 of the 2021 Academic Annual Conference Proceedings, Chinese Nuclear Society, 2021: 124-132.

[3] 王祖军，薛院院，刘卧龙，等. CMOS图像传感器西安200 MeV质子应用装置H^+辐照效应实验研究[J]. 现代应用物理，2021，12(3)：128-132，141.
Wang Zujun, Xue Yuanyuan, Liu Wolong, et al. H^+ beams irradiation effect of CMOS image sensor at Xi'an 200 MeV proton application facility[J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(3): 128-132, 141.

[4] Wang Z, Xue Y, Chen W, et al. Comparison of the dark signal degradation induced by Gamma ray, proton, and neutron radiation in pinned photodiode CMOS image sensors[J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(6): 69403.

[5] 李　钰，文　林，郭　旗. 不同能量质子辐照CMOS图像传感器的单粒子瞬态效应研究[J]. 现代应用物理，2024，15(3)：114-121.
Li Yu, Wen Lin, Guo Qi. Single event transient effect of CMOS image sensor irradiated by protons with different energies[J]. Modern Applied Physics, 2024, 15(3): 114-121.

[6] Dodd P E, Shaneyfelt M R, Schwank J R, et al. Current and future challenges in radiation effects on CMOS electronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(4): 1747-1763.

[7] Fleetwood D M. Evolution of total ionizing dose effects in MOS devices with Moore's law scaling[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(8): 1465-1481.

[8] 聂　栩，王祖军，王百川，等. 不同偏置条件下CMOS图像传感器质子辐照损伤效应的实验与分析[J]. 光学学报，2023，43(19)：288-296.
Nie Xu, Wang Zujun, Wang Baichuan, et al. Experiment and analysis of damage of CMOS image sensor induced by proton irradiation with different bias conditions[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(19): 288-296.

[9] Beaumel M, Hervé D, Van Aken D, et al. Proton, electron, and heavy ion single event effects on the HAS2 CMOS image sensor[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(4): 1909-1917.

[10] Cai Y L, Guo Q, Li Y D, et al. Heavy ion-induced single event effects in active pixel sensor array[J]. Solid-State Electronics, 2019, 152: 93-99.

[11] Lalucaa V, Goiffon V, Magnan P, et al. Single-event effects in CMOS image sensors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(4): 2494-2502.

[12] Wang Z, Xue Y, Chen W, et al. Single particle transient response and displacement damage in CMOS image sensors induced by high energy neutrons at Back-n in CSNS facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated

Equipment, 2019, 920: 68-72.

[13] 王祖军, 杨 勰, 赖善坤, 等. CMOS图像传感器中子位移辐照损伤效应仿真模拟研究[J]. 现代应用物理, 2022, 13(3): 152-159.
Wang Zujun, Yang Xie, Lai Shankun, et al. Simulation of displacement damage of CMOS image sensors irradiated by neutron [J]. Modern Applied Physics, 2022, 13 (3): 152-159.

[14] Wang Z, Xue Y, Liu M, et al. Transient response in PPD CMOS image sensors irradiated by gamma rays: variation of dose rates and integration times[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(6): 880-885.

[15] 王祖军, 薛院院, 陈 伟, 等. 中国散裂中子源白光中子辐照诱发CIS单粒子瞬态响应和位移损伤的实验研究[C]//中国核科学技术进展报告(第六卷)——中国核学会2019年学术年会论文集第7册, 2019: 253-259.
Wang Zujun, Xue Yuanyuan, Chen Wei, et al. The experimental research of single particle transient response and displacement damage in CISs induced by Back-n in China spallation neutron source [C]//Progress Report of Nuclear Science and Technology in China (Volume 6)——Volume 7 of the 2019 Academic Annual Conference Proceedings, Chinese Nuclear Society, 2019: 253-259.

[16] Zhang B, Hu C, Xin Y, et al. MOS-based model of four-transistor CMOS image sensor pixels for photoelectric simulation[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(5): 058503.

[17] 陈南心, 丁李利, 陈 伟, 等. P型阱接触布局对于单粒子瞬态脉冲宽度的影响[J]. 现代应用物理, 2023, 14(3): 214-220.
Chen Nanxin, Ding Lili, Chen Wei, et al. Influence of P-well contact layout on single event transients pulse width[J]. Modern Applied Physics, 2023, 14(3): 214-220.

[18] Li K, Hao J, Zhao Q, et al. Simulation of heavy ion irradiation effect on 3D MOSFET[J]. AIP Advances, 2023, 13(2): 025143.

[19] 刘涵勋, 汪柯佳, 曹荣幸, 等. 栅场板型Ga_2O_3MOSFET器件单粒子烧毁仿真研究[J]. 现代应用物理, 2024, 15(3): 122-133.
Liu Hanxun, Wang Kejia, Cao Rongxing, et al. Simulation of single event burnout in gate-field-plated Ga_2O_3 MOSFET devices[J]. Modern Applied Physics, 2024, 15(3): 122-133.

[20] Cohen Y H, Weizman Y, Simhony Y, et al. Toward a monolithic pixel sensor for heavy ion spectroscopy—pixel structure design and optimization[J]. IEEE Access, 2023, 11: 18620-18630.

作者简介:

李传洲(1999—),男,湖南省株洲市人,硕士,主要从事光电器件的抗辐射仿真模拟研究;

王祖军(1978—),男,湖北省汉川市人,博士,研究员,主要从事光电器件及系统的辐照损伤效应研究。