

# 位移损伤诱发 CMOS 图像传感器电荷转移损失退化的理论模拟研究

杨颀<sup>1</sup>, 霍勇刚<sup>1\*</sup>, 王祖军<sup>2\*\*</sup>, 尚爱国<sup>1</sup>, 薛院院<sup>2</sup>, 贾同轩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西安高科技研究所, 陕西 西安 710024;

<sup>2</sup>西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024;

<sup>3</sup>湘潭大学材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105

**摘要** 以 4T PPD(4 个晶体管的钳位光电二极管)型 CMOS 图像传感器为研究对象,开展注量为  $1 \times 10^{11}$ ,  $3 \times 10^{11}$ ,  $5 \times 10^{11}$ ,  $7 \times 10^{11}$ ,  $1 \times 10^{12}$  neutron/cm<sup>2</sup> 的中子辐照下损伤模拟的研究,建立 CMOS 图像传感器的器件模型和不同注量中子辐照后位移损伤的缺陷模型;采用相关双采样技术测量由亮到暗连续两帧时序脉冲下浮置节点(FD)的输出值,建立测量电荷转移损失(CTI)的模拟方法;获得 CTI 随中子辐照注量的变化关系,分析 CTI 随中子累积注量的变化规律,结合中子辐照效应实验验证中子辐照诱发 CTI 退化的理论模拟计算结果的有效性。研究结果表明,CMOS 图像传感器的位移损伤敏感区域为空间电荷区域,中子辐照后会在空间电荷区中引入位移损伤缺陷,这些缺陷通过不断俘获和发射载流子,使信号电荷不能快速转移到 FD 中,造成电荷转移损失;电荷转移损失随着中子辐照注量的增加而增大,二者在一定范围内呈线性关系。

**关键词** 光学器件; CMOS 图像传感器; 电荷转移损失; 位移损伤; 数值模拟; 实验验证

中图分类号 TN43

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0723002

## Theoretical Simulation of Charge Transfer Loss Degradation of CMOS Image Sensor Induced by Displacement Damage

Yang Xie<sup>1</sup>, Huo Yonggang<sup>1\*</sup>, Wang Zujun<sup>2\*\*</sup>, Shang Aiguo<sup>1</sup>, Xue Yuanyuan<sup>2</sup>, Jia Tongxuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Xi'an Research Institute of High-Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Intense Pulsed Irradiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China;

<sup>3</sup>School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China

**Abstract** Taking 4T PPD (4 transistor clamped photodiodes) type CMOS image sensor as the research object, the damage simulation of neutron irradiation fluence of  $1 \times 10^{11}$ ,  $3 \times 10^{11}$ ,  $5 \times 10^{11}$ ,  $7 \times 10^{11}$ ,  $1 \times 10^{12}$  neutron/cm<sup>2</sup> are carried out, and the device model of CMOS image sensor and the defect model of displacement damage after different neutron irradiation fluence are established. The correlation double sampling technique is used to measure the output value of floating diffusion (FD) under two continuous pulses from bright to dark, and a simulation method for measuring charge transfer loss (CTI) is established. The relationship between CTI and neutron irradiation fluence is obtained, and the variation of CTI with neutron cumulative fluence is analyzed. Combined with neutron irradiation effect experiments to verify the validity of the theoretical simulation results of neutron irradiation-induced CTI degradation. The results show that the sensitive region of displacement damage of CMOS image sensor is space charge region, and displacement damage defects will be introduced into space charge region

收稿日期: 2021-08-30; 修回日期: 2021-09-19; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(U2167208, 11875223, 11805155)、国家重点实验室基金(SKLIPR1803, SKLIPR1903Z, SKLIPR2012)

通信作者: \*huoarmy@163.com; \*\*wangzujun@nint.ac.cn

after neutron irradiation. Through continuous capture and emission of carriers, these defects make the signal charge can not be quickly transferred to FD, resulting in charge transfer loss, and the charge transfer loss increases with the increase of neutron irradiation fluence, and there is a linear relationship between them in a certain range.

**Key words** optical devices; CMOS image sensor; charge transfer inefficiency; displacement damage; numerical simulation; experimental validation

## 1 引言

CMOS 图像传感器具有体积小、质量轻、功耗低和集成度高等优良性能,被逐步应用于星敏感器、太阳敏感器和遥感卫星等,但其空间辐射损伤的问题日益突出<sup>[1-2]</sup>。尤其是高速图像传感器需在极短的时间内将高速运动的现象捕捉下来<sup>[3]</sup>,而辐照损伤会严重影响其电荷传输性能,导致电荷不完全传输,一部分电荷被滞留在耗尽区域,造成图像拖影。图像拖影是由信号电荷不完全转移,导致残留信号在下一帧图像输出时再现的现象<sup>[4]</sup>。电荷转移损失(CTI)或电荷转移效率(CTE)是评价 CMOS 图像传感器性能好坏的重要参数,其中  $x_{CTE} = 1 - x_{CTI}$ 。

目前,国内外均开展了关于 CMOS 图像传感器 CTI 的影响因素的研究。Han 等<sup>[5]</sup>对影响 CTI 的相关因素进行了分析,提出了电荷转移模型,预测了浮置节点(FD)电容和光电二极管面积对 CTI 的影响,并提出了电荷不完全转移的预测方法,但是该方法只能定性分析电荷是否完全转移<sup>[6]</sup>。Marcelot 等<sup>[7]</sup>提出了采用 TCAD 仿真软件优化结构设计来降低 CTI 的方法。Goiffon 等<sup>[8]</sup>分析了电离总剂量(TID)诱导 CMOS 图像传感器 CTI 退化的规律。西北核技术研究所 Wang 等<sup>[9-10]</sup>开展了 TID 诱发 CTI 退化的实验和模拟研究,发现了电离损伤诱导 CTI 退化的敏感区域。但是,关于 CMOS 图像传感器 CTI 的位移损伤敏感区域的甄别与退化机理的研究开展很少。

为了研究中子位移损伤诱发 CMOS 图像传感器 CTI 退化的规律以及甄别辐照损伤敏感区域,本文深入分析了 CTI 退化的机理。以 4T PPD(4 个晶体管的钳位光电二极管)型 CMOS 图像传感器为研究对象,开展了能量为 1 MeV 的中子辐照损伤的理论模拟研究,建立了 CMOS 图像传感器 CTI 的理论模拟方法,结合器件内部参数变化分析了器件中子辐照损伤机理,确定了位移损伤导致 CTI 退化的敏感区域,并开展反应堆中子辐照效应试验验证了理论模拟的有效性。所得的研究结果为 CMOS 图像传感器的位移辐照损伤评估及抗辐射加固技术提供了理论基础和试验技术支持。

## 2 理论模拟

### 2.1 CMOS 图像传感器的结构模型

4T PPD 型 CMOS 图像传感器中的像素单元结构主要由收集光信号的光电二极管(PPD)、将光生电荷转化为电信号的 FD、将 FD 复位到高电压的复位管(RST)、用于光生电荷传输的传输栅(TG)、隔离相邻两个像素的浅沟槽隔离区(STI)以及电源等构成,如图 1 所示,其中  $\Phi_{TG}$ 、 $\Phi_{RS}$  和  $\Phi_{SEL}$  分别为传输栅、复位管和行选管的电极接触, $V_{FD}$  和  $V_{dd}$  分别为浮置节点和电源的电压, $M_{TG}$ 、 $M_{RS}$  和  $M_{SF}$  分别为传输栅、复位管和行选管的栅极,P 和 P<sup>+</sup> 分别为 P 型掺杂注入层和 P<sup>+</sup> 型重掺杂注入层,N 和 N<sup>+</sup> 分别为 N 型掺杂注入层和 N<sup>+</sup> 型重掺杂注入层,P-epi 为硅衬底。利用 TCAD 软件对模型进行数值模拟,具体仿真流程如图 2 所示,其中 CIS 为 CMOS 图像传感器。4T PPD 型 CMOS 图像传感器中像素单元掺杂分布模型如图 3 所示。

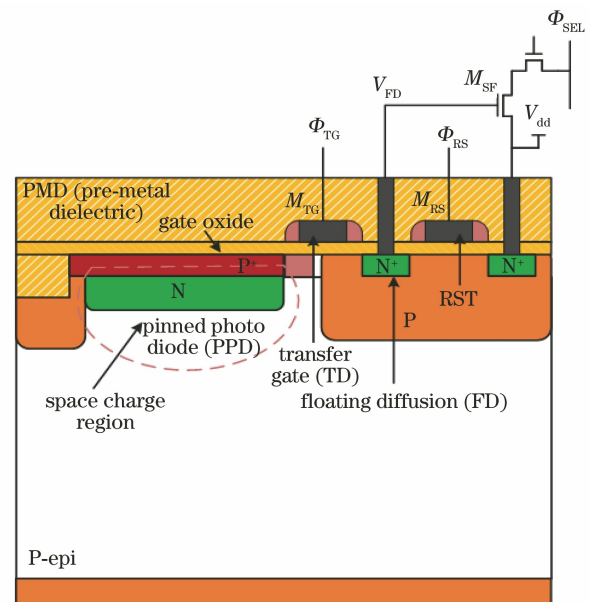


图 1 4T PPD 型 CMOS 图像传感器中的像素单元结构

Fig. 1 Pixel unit structure in 4T PPD type CMOS image sensor

### 2.2 CMOS 图像传感器的器件模型

器件的电学特性是基于 Poisson 方程、载流子连续性方程和漂移-扩散方程进行仿真的。载流子

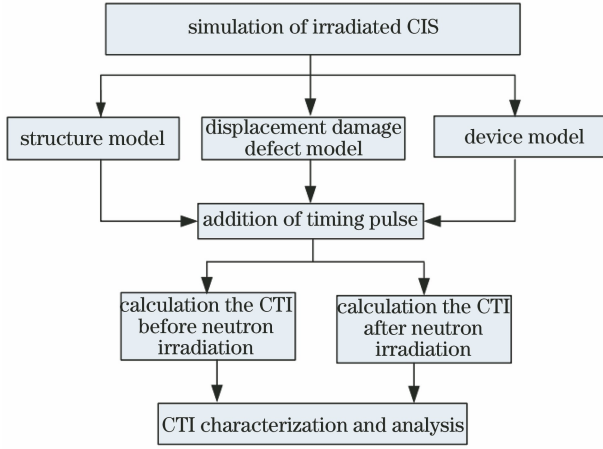


图 2 仿真模拟的流程

Fig. 2 Flowchart of simulation

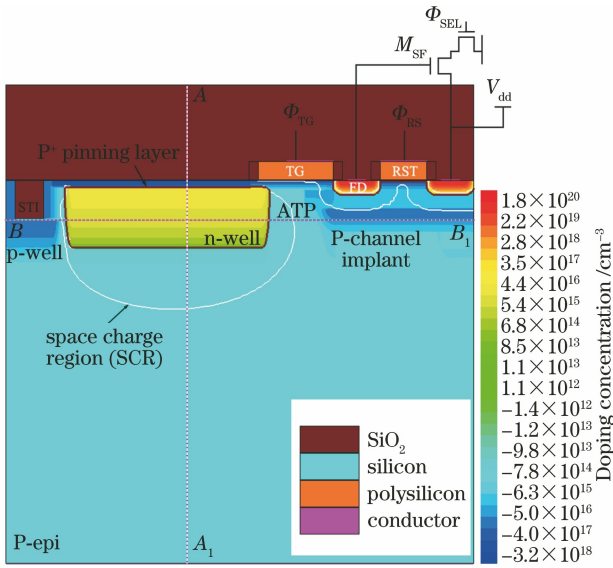


图 3 4T PPT 型 CMOS 图像传感器中像素单元掺杂分布图

Fig. 3 Doping distribution of pixel units in 4T PPT type CMOS image sensor

在电场的作用下进行迁移运动可以使原本平衡状态发生改变,进而影响器件的相关性能参数。器件内部电子-空穴运输<sup>[11]</sup>的表达式为

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = -\rho, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \text{div} \mathbf{J}_n, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p + \frac{1}{q} \text{div} \mathbf{J}_p, \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_n = -q\mu_n n \nabla E_n, \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_p = -q\mu_p p \nabla E_p, \quad (5)$$

式中:div 为求散度;∇为求梯度;ε 为介电常数;ψ 为静电势;ρ 为空间电荷密度;n 和 p 分别为电子和空穴浓度;G<sub>n</sub> 和 G<sub>p</sub> 分别为电子和空穴的产生率;R<sub>n</sub> 和 R<sub>p</sub> 分别为电子和空穴的复合速率;J<sub>n</sub> 和 J<sub>p</sub> 分别为电子和空穴的电流密度;q 为电子电荷常数;μ<sub>n</sub> 和 μ<sub>p</sub> 分别为电子和空穴的迁移率;E<sub>n</sub> 和 E<sub>p</sub> 分别为电子和空穴的准费米能级。

### 2.3 位移损伤缺陷模型

当 CMOS 图像传感器受到质子、中子或高能重离子等辐照时,器件会受到位移损伤<sup>[12-14]</sup>。位移损伤主要是在器件中产生了多种能级缺陷,缺陷作为复合中心会使载流子的寿命降低,进而导致器件性能的退化。为了模拟中子辐照所产生的位移损伤缺陷对 CMOS 器件的影响,可引入 Shockley-Read-Hall(SRH)复合模型,辐照缺陷模型中主要包含缺陷能级位置、缺陷类型、载流子捕获截面及缺陷产生率,如表 1 所示<sup>[15]</sup>,其中 E 表示缺陷能级,E<sub>c</sub> 和 E<sub>v</sub> 分别表示导带和价带,σ<sub>n</sub> 和 σ<sub>p</sub> 分别表示电子俘获截面和空穴俘获截面,η 表示缺陷引入率<sup>[16]</sup>。缺陷浓度 N<sub>T</sub> 与辐照注量 Φ 之间的关系可表示为 N<sub>T</sub> = ηΦ。结合载流子相关运输方程来分析位移损伤对 CMOS 图像传感器相关电学参数的影响,进而分析中子辐照诱发 CMOS 图像传感器 CTI 退化的机理。针对中子辐照产生的位移损伤缺陷,本文引入 SRH 复合模型进行分析<sup>[11]</sup>,表达式为

$$R_{\text{SRH}} = \sum_{\alpha=1}^m R_{\Lambda,\alpha} + \sum_{\beta=1}^n R_{\text{D},\beta}, \quad (6)$$

式中:R<sub>SRH</sub> 为缺陷总的复合率;R<sub>Λ</sub> 和 R<sub>D</sub> 分别为受主缺陷和施主缺陷的复合率;m 和 n 分别为受主缺陷和施主缺陷的数目。R<sub>Λ</sub> 和 R<sub>D</sub> 的表达式<sup>[11]</sup>为

$$R_{\Lambda} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p \left[ n + gn_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right] + \tau_n \left[ p + \frac{1}{g} n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right]}, \quad (7)$$

$$R_{\text{D}} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p \left[ n + \frac{1}{g} n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right] + \tau_n \left[ p + gn_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right]}, \quad (8)$$

式中:  $E_i$  为本征费米能级;  $E_d$  为缺陷能级;  $T$  为绝对温度;  $g$  为退化因子;  $n_i$  为本征载流子浓度;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $\tau_n$  和  $\tau_p$  分别为电子和空穴的寿命。

表 1 能量为 1 MeV 的中子辐照后 Si 衬底中的缺陷信息<sup>[15]</sup>

Table 1 Defect information in Si substrate after neutron irradiation with energy of 1 MeV<sup>[15]</sup>

$E / \text{eV}$	Defect type	$\sigma_n / (10^{-14} \text{ cm}^{-2})$	$\sigma_p / (10^{-14} \text{ cm}^{-2})$	$\eta / \text{cm}$
$E_c - 0.42$	$\text{VV}^{(-/0)}$	0.2	2.00	1.613
$E_c - 0.46$	$\text{VVV}^{(-/0)}$	0.5	5.00	0.900
$E_v + 0.36$	$\text{C}_i\text{O}_i$	2.5	0.25	0.900

### 3 结果讨论与分析

#### 3.1 电荷转移理论

辐照前电荷转移的影响机制如图 4 所示, CMOS 图像传感器在积分阶段将光生电荷收集到 PPD 中, 这个阶段 TG 处于关闭状态。TG 开启后 PPD 内收集到的光生电荷将被转移到 FD 中, 理想情况下 PPD 中的光生电荷将全部被转移到 FD 中。

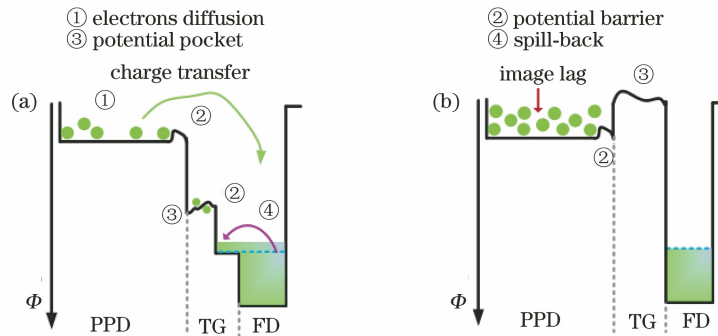


图 4 电荷转移的影响机制示意图。(a) TG 开启;(b) TG 关闭

Fig. 4 Schematic of influence mechanism of charge transfer. (a) TG open; (b) TG shut down

以上 4 个因素是由生产工艺水平限制以及时序设置不合理导致的, 这会造成光生电荷的不完全转移, 故本文采用非均匀 TG 沟道掺杂<sup>[21]</sup>, 其可以消除转移通道内由掺杂扩散作用产生的势阱和势垒, 优化时序设置, 确保 TG 开启时间内 PPD 中光生电荷能够被全部转移至 FD 中, 避免因转移时间不够造成的图像滞留。此外 FD 容量设计得足够大, 可以容纳满阱状态下 PPD 内的全部光生电荷, 这样设计的目的是将一些干扰电荷传输效率的外在因素排除, 针对性地分析因位移损伤造成电荷传输效率降低的机理, 进而确定由辐照损伤造成电荷传输效率退化的敏感区域。

#### 3.2 CTI 理论模拟方法

CTI 是评估 CMOS 图像传感器中电荷转移过程的重要参数, 为了分析位移损伤诱发 CTI 退化的

然而, 真实情况下有诸多因素影响光生电荷的传输, 导致部分光生电荷被滞留在 PPD 内, 造成第二帧图像内保留第一帧图像的信息。图 4(a) 给出了非理想情况下, TG 开启时 PPD 内光生电荷的转移过程; 图 4(b) 给出了光生电荷转移完成后, 因非理想因素造成光生电荷被滞留在 PPD 中。影响 PPD 内光生电荷传输的因素: 1) 大尺寸 CIS 中 PPD 的横向宽度被设计较长, 并且工作电压只有 3.3 V, 造成远离 FD 一侧的光生电荷主要发生扩散, 导致光生电荷不能被完全转移<sup>[17]</sup>; 2) TG 开启时间较短, 当 TG 开启时, PPD 内电子将被转移到 FD 中, 如果 TG 开启时间不够, 将导致一部分光生电荷被滞留在 PPD 中<sup>[18]</sup>; 3) 受到工艺水平的限制, 导致在 PPD 与 TG 的交界处以及在 TG 电荷转移通道上存在势阱或者势垒, 阻碍光生电荷的传输<sup>[19]</sup>; 4) 光生电荷溢出<sup>[20]</sup>, 当 FD 内收集的电荷达到饱和, 且 FD 电势低于  $V_{\text{pin}}$  (钳位电压) 时, TG 关闭后, 部分光生电荷回流到 PPD 内。

机理, 本文建立了一种 CTI 的理论模拟方法。4T PPD 型 CMOS 图像传感器采用相关双采样技术<sup>[22]</sup>, 通过测量复位前后 FD 节点的电压差值, 进而计算从 PPD 转移到 FD 中的光生电荷, 该技术有利于消除本底噪声的干扰。为了开展 CTI 的理论模拟, 取两段连续时序脉冲。在第一个积分时间内引入光源, 将积分结束后得到的输出值记为  $\Delta U_{1, \text{pulse}}$ 。第二个积分阶段移去光源, 使 CMOS 图像传感器处于暗场状态, 积分结束后得到的输出值源于上一帧脉冲结束后残留在 PPD 中的电子, 记为  $\Delta U_{2, \text{dark}}$ 。两个时序下的输出值之和就是曝光条件下 PPD 中收集到的总电子数。因此 CTI 可以表示为

$$x_{\text{CTI}} = \frac{\Delta U_{2, \text{dark}}}{\Delta U_{1, \text{pulse}} + \Delta U_{2, \text{dark}}}, \quad (9)$$

式中:  $\Delta U_{1, \text{pulse}}$  为光照条件下 FD 所输出的电压;



$\Delta U_{2,\text{dark}}$  为无光照条件下 FD 所输出的电压。为了避免光生电荷浓度对 CTI 的理论模拟过程造成影响,不同辐照累积剂量下在 CTI 的模拟过程中通过调整光照强度来保证 PPD 在积分阶段达到半饱和状态。

图 5 给出了 CMOS 图像传感器的时序脉冲,其中  $V_{\text{RST}}$  和  $V_{\text{TG}}$  分别为复位电压和传输栅电压。 $T_0$

时刻开启光源,使 CMOS 图像传感器处于曝光状态,PPD 开始收集光生电荷; $T_1$  时刻关闭光源开启 TG,PPD 收集的光生电荷被转移到 FD 中,第一帧时序脉冲结束; $T_2$  到  $T_3$  时刻,CMOS 图像传感器处于暗场环境, $T_3$  时刻 TG 开启,上一帧时序脉冲被滞留在 PPD 中,而光生电荷被转移到 FD 中; $T_4$  时刻 TG 关闭,第二帧时序脉冲结束。

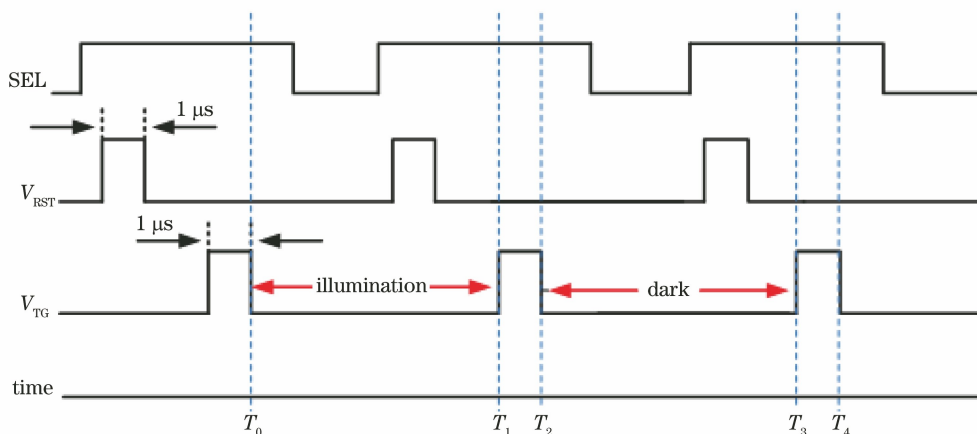


图 5 CTI 理论模拟过程中的驱动时序

Fig. 5 Driving timing in CTI theoretical simulation

CMOS 图像传感器在时序脉冲的驱动下完成光生电荷的转移和读出,期间器件内部的电子浓度分布会发生相应的变化。图 6 给出了光生电荷在形成和转移过程中的电子浓度分布。图 6(a)表示  $T_0$  时刻 CMOS 图像传感器中的像素单元结构未受到光照,PPD 处于完全耗尽状态,所以 PPD 内的电子

浓度很低。图 6(b)表示  $T_1 - T_0$  时间内通过光电转换使 PPD 收集到光生电荷,所以 PPD 内的电子浓度显著增高。图 6(c)表示  $T_1$  时刻 TG 传输管开启,PPD 收集到的光生电荷转移到 FD 后的电子浓度分布,由于电子转移速度很快,在较短时间内 PPD 中的电子浓度下降很明显。图 6(d)表示  $T_2$

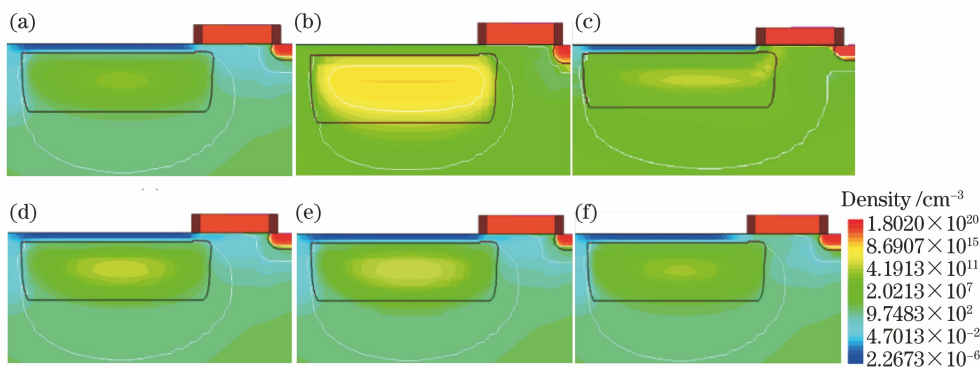


图 6 光生电荷在形成和转移过程中的电子浓度分布。(a)光照前 PPD 处于全耗尽状态;(b)光照后 PPD 内收集光生电荷;(c) TG 开启时 PPD 内光生电荷被转移到 FD 中;(d) TG 关闭后 PPD 内残余光生电荷;(e)暗场下 PPD 累积电荷;(f) TG 开启时 PPD 内残余的光生电荷被转移到 FD 中

Fig. 6 Electron concentration distribution of photogenerated charge in process of formation and transfer. (a) PPD is fully depleted before illumination; (b) photogenerated charge is collected in PPD after illumination; (c) photogenerated charge in PPD is transferred to FD when TG is turned on; (d) residual photogenerated charge in PPD after TG is turned off; (e) accumulated charge in PPD under dark field; (f) residual photogenerated charge in PPD is transferred to FD when TG is turned on

时刻 TG 关闭,第一帧时序脉冲结束,该时刻 PPD 内的电子浓度相比上一时刻有所上升,这是因为在电荷转移通道上存在势阱和势垒,故阻碍了光生电荷的传输,在 TG 关闭后部分被滞留的光生电荷又回流到 PPD 内。图 6(e)表示  $T_3 - T_2$  时间内 PPD 中累积了电子,故 PPD 内的电子浓度稍有上升。图 6(f)表示  $T_4$  时刻 TG 传输管开启,PPD 内残余的光生电荷被转移到 FD 中,故 PPD 中的电子浓度有所下降。

### 3.3 CTI 退化结果分析

为了研究位移损伤对 CMOS 图像传感器 CTI 的影响,本节通过分析中子辐照诱导 CMOS 图像传感器 CTI 退化的机理来确定辐照敏感区域,进而揭示 CTI 在不同注量中子辐照下的退化规律。文献[22]研究了 CTI 在总剂量效应下的退化机理,总剂量效应主要使  $\text{SiO}_2$  中生成了氧化物陷阱电荷以及界面态,导致电荷转移通道上产生了势阱和势垒,

为此在一定剂量范围内有利于提高 CTE,这归因于转移通道中势垒高度的降低,但超过一定剂量范围将会产生深势阱,从而造成 CTI 严重退化。然而位移效应与总剂量效应诱发 CTI 退化的机理有着本质不同,所以 CMOS 图像传感器的辐照敏感区域也不同。CMOS 图像传感器受到中子辐照后会在器件的空间电荷区产生大量的体缺陷,所以空间电荷区的光生电荷会被陷阱能级不断俘获和释放,TG 开启后空间电荷区的光生电荷被转移到 FD 中。如果被俘获的电荷在转移时间内没有被释放,那么该电荷将被滞留在 PPD 内。图 7 给出了中子辐照后,缺陷俘获的载流子分布情况。从图 7 可以看出,CMOS 图像传感器对于位移辐照损伤的敏感区域是 PPD 空间电荷区。图 8 给出了沿着  $BB_1$  界面截取,缺陷俘获的载流子的变化曲线。从图 8 可以看出,被缺陷俘获滞留在 PPD 内的载流子主要集中在空间电荷区的中心位置。

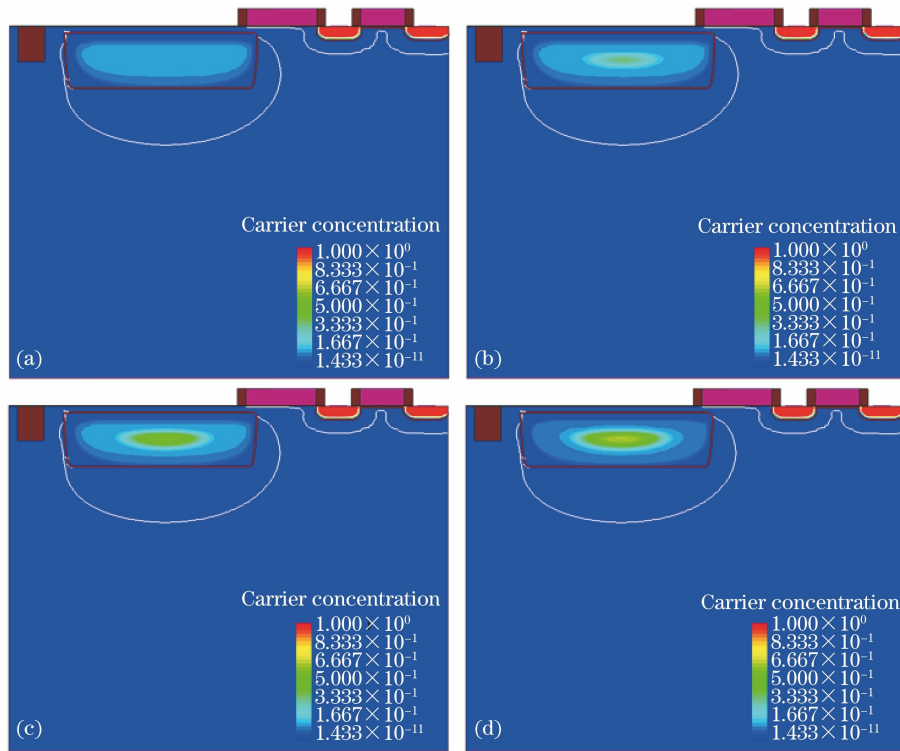


图 7 不同中子注量辐照后位移损伤缺陷捕获的载流子分布图。(a) 0; (b)  $1 \times 10^{11}$  neutron/cm<sup>2</sup>; (c)  $5 \times 10^{11}$  neutron/cm<sup>2</sup>; (d)  $1 \times 10^{12}$  neutron/cm<sup>2</sup>

Fig. 7 Distribution of carriers captured by displacement damage defects after irradiation with different neutron injection amounts. (a) 0; (b)  $1 \times 10^{11}$  neutron/cm<sup>2</sup>; (c)  $5 \times 10^{11}$  neutron/cm<sup>2</sup>; (d)  $1 \times 10^{12}$  neutron/cm<sup>2</sup>

位移损伤造成 CTI 增加的主要原因是空间电荷区中缺陷俘获的载流子不能及时被释放,导致光生载流子在 TG 开启阶段未转移到 FD 中。缺陷俘获的电荷量可表示为

$$Q_{\text{Trapped}} = -qN_tV_s \cdot \{1 - \exp[-(T_{\text{emit}} - \tau_e)]\}, \quad (10)$$

式中: $N_t$  为单位体积内的缺陷个数; $V_s$  为空间电荷区的信号电荷体积; $T_{\text{emit}} = T_2 - T_1$ 。同时,在  $T_2 \sim$

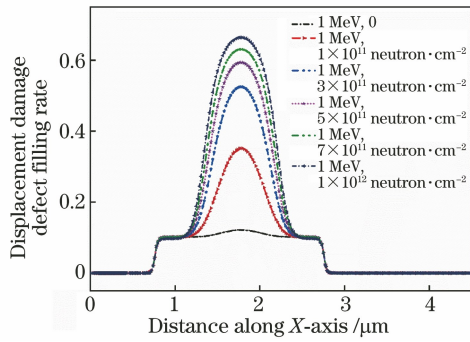


图 8 位移损伤缺陷占有率随中子辐照注量的变化曲线  
Fig. 8 Variation curves of displacement damage defect filling rate with neutron irradiation fluence

$T_3$  之间被缺陷能级释放的电荷  $Q_{\text{join}}$  将被当作信号电荷转移到 FD 中。 $Q_{\text{join}}$  可表示为

$$Q_{\text{join}} = -qN_t V_s \cdot \{1 - \exp[-(T_{\text{join}} - \tau_e)]\}, \quad (11)$$

式中: $T_{\text{join}} = T_2 - T_1$ 。由缺陷能级导致的电荷损失  $Q_{\text{loss}}$  可表示为

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{Trapped}} - Q_{\text{join}} = -qN_t V_s \cdot \{\exp[-(T_{\text{emit}} - \tau_e)] - \exp[-(T_{\text{join}} - \tau_e)]\}. \quad (12)$$

CMOS 图像传感器的图像滞留变化值 CTI 可表示为

$$x_{\text{CTI}} = \frac{Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{generate}}} \times 100\%, \quad (13)$$

式中: $Q_{\text{generate}}$  为光照条件下 PPD 内产生的光生电

荷。由于  $Q_{\text{generate}}$  远大于因缺陷能级俘获而损失的电荷量,所以 CTI 随着  $N_t$  的增大而增大,且二者呈线性关系。

图 9 给出了光生电荷转移( $T_2$  时刻)后,沿着图 3 中  $AA_1$  界面截取的电子浓度曲线。从图 9 可以看出,TG 开启后 PPD 内的电荷并未被全部转移到 FD 中,有一部分残留在 PPD 中并且 PPD 内残留的光生电荷随着辐照注量的增加而增多。表 2 给出了 CTI 随中子辐照注量增加的退化结果,其中  $U_1 \sim U_4$  分别为  $T_1 \sim T_4$  时刻 FD 处的电势。从表 2 可以看出:CMOS 图像传感器 CTI 退化的幅度随中子辐照注量的增加而增大;当中子辐照注量达到  $1 \times 10^{11}$  neutron/cm<sup>2</sup> 时,CTI 退化到了  $6.89 \times 10^{-5}$ ,当中子辐照注量达到  $1 \times 10^{12}$  neutron/cm<sup>2</sup> 时,CTI 退化到  $5 \times 10^{-4}$ 。

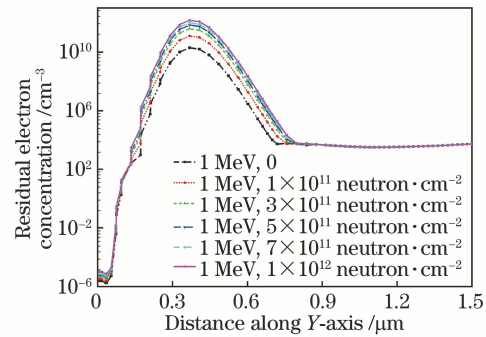


图 9 残留在 PPD 中的电子浓度随中子辐照注量的变化曲线  
Fig. 9 Variation curves of electron concentration in PPD with neutron irradiation fluence

表 2 电荷转移损失随中子注量的退化结果

Table 2 Degradation of charge transfer loss with neutron fluence

Fluence / (neutron · cm <sup>-2</sup> )	$U_1$ /V	$U_2$ /V	$\Delta U_{1,\text{pulse}}$ /V	$U_3$ /V	$U_4$ /V	$\Delta U_{2,\text{dark}}$ /V	CTI /%
0	2.64384	2.06389	0.57995	2.64356	2.64356	0	0
$1 \times 10^{11}$	2.64401	2.06405	0.57996	2.64366	2.64362	0.00005	$6.89 \times 10^{-5}$
$3 \times 10^{11}$	2.64366	2.06372	0.57994	2.64384	2.64375	0.00009	$1.50 \times 10^{-4}$
$5 \times 10^{11}$	2.64384	2.06388	0.57996	2.64413	2.64398	0.00015	$2.50 \times 10^{-4}$
$7 \times 10^{11}$	2.64365	2.06370	0.57995	2.64366	2.64345	0.00021	$3.60 \times 10^{-4}$
$1 \times 10^{12}$	2.64379	2.06383	0.57549	2.64429	2.64400	0.00029	$5.00 \times 10^{-4}$

为了验证理论计算模型及方法的有效性,在西安脉冲反应堆的中子辐照源上开展 CMOS 图像传感器的位移损伤实验。根据美国军用标准 883J 试验方法中的 1017.3 规定,当选用反应堆中的中子源开展位移效应实验时,要求其热中子注量和  $\gamma$  射线总剂量的比必须大于 Si 的  $2 \times 10^9$  neutron/(cm<sup>2</sup> · rad)。因此本实验装置的屏蔽材料采用铅包裹碳化硼结构,该结构屏蔽了大部分的热中子和  $\gamma$  射线以及较低的热中子通量密度,故其热中子注量和  $\gamma$  射线总剂量的比大于 Si 的  $4.19 \times 10^9$  neutron/(cm<sup>2</sup> · rad)。当能量为

1 MeV 的中子辐照注量达到  $1 \times 10^{11}$  neutron/cm<sup>2</sup> 时,对器件的 CTE 进行测试。图 10 给出了 CMOS 图像传感器的测试实物图。图 11 给出了 CTI 随中子辐照注量变化的实验与理论模拟计算结果曲线。从图 11 可以看出,理论模拟计算结果与实验结果相近,验证了理论模拟计算的有效性。

## 4 结 论

本文以 CMOS 图像传感器为研究对象:开展了不同注量的中子(能量为 1 MeV)辐照下位移损伤

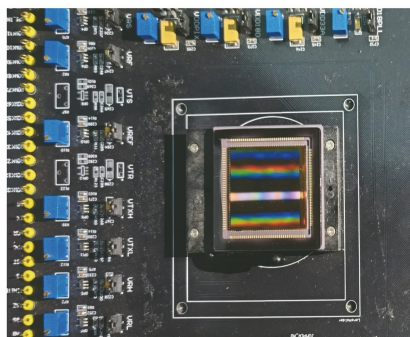


图 10 CMOS 图像传感器的测试实物图

Fig. 10 Test picture of CMOS image sensor

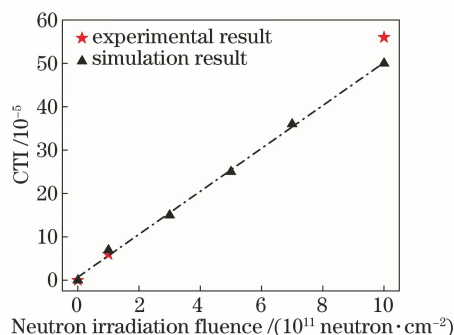


图 11 CTI 随中子辐照注量的变化曲线

Fig. 11 Variation curve of CTI with neutron irradiation fluence

模拟的研究,分析了 CMOS 图像传感器 CTI 随中子辐照注量的退化机理;采用相关双采样技术来测量由亮到暗连续两帧时序脉冲下的 FD 输出值,建立了 CTI 的理论模拟方法;针对性地开展反应堆的中子辐照效应实验,获得了中子辐照后 CTI 的退化值,验证了理论模拟结果的有效性。研究表明:中子辐照后会在 CMOS 图像传感器的空间电荷区内产生位移损伤缺陷,这些缺陷通过不断俘获和发射光生电荷,导致光生电荷不能及时转移到 FD 中被读出,从而造成图像滞留;辐照产生的缺陷浓度随着辐照注量的增加而增大,因此 CTI 随着中子辐照注量的增加而增大,且二者呈线性关系;CMOS 图像传感器受到位移损伤的敏感区域与电离损伤敏感区域不同,位移辐照损伤主要集中在 PPD 空间电荷区域。

### 参 考 文 献

- [1] Wang Z J, Liu J, Xue Y Y, et al. Progress of total ionizing dose radiation effects and hardening technology of CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(1): 5868-5875.  
王祖军, 刘静, 薛院院, 等. CMOS 图像传感器总剂
- [2] Wang Z J, Lin D S, Liu M B, et al. Radiation damage effects on the CMOS active pixel sensors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(6): 945-950, 982.  
王祖军, 林东生, 刘敏波, 等. CMOS 有源像素图像传感器的辐照损伤效应[J]. 半导体光电, 2014, 35(6): 945-950, 982.
- [3] Zhao W W, Fan C C, Wang Y, et al. Jitter detection method based on rolling shutter CMOS imaging for space cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0228001.  
赵薇薇, 范城城, 王艳, 等. 一种基于卷帘快门 CMOS 成像的空间相机颤振检测方法[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0228001.
- [4] Wang Z J, Tang B Q, Xiao Z G, et al. Experimental analysis of charge transfer efficiency degradation of charge coupled devices induced by proton irradiation [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6): 4136-4142.  
王祖军, 唐本奇, 肖志刚, 等. 质子辐照电荷耦合器件诱导电荷转移效率退化的实验分析[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 4136-4142.
- [5] Han L Q, Yao S Y, Theuwissen A J P. A charge transfer model for CMOS image sensors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(1): 32-41.
- [6] Han L Q, Yao S Y, Xu J T, et al. Analysis of incomplete charge transfer effects in a CMOS image sensor[J]. Journal of Semiconductors, 2013, 34(5): 054009.
- [7] Marcelot O, Molina R, Bouhier M, et al. Design impact on charge transfer inefficiency of surface CCD on CMOS devices: TCAD and characterization study [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(3): 1099-1104.
- [8] Goiffon V, Estriebeau M, Cervantes P, et al. Influence of transfer gate design and bias on the radiation hardness of pinned photodiode CMOS image sensors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(6): 3290-3301.
- [9] Xue Y Y, Wang Z J, Zhang F Q, et al. Measurement and investigation of proton irradiation-induced charge transfer inefficiency in PPD CIS at different integration times [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 886: 134-139.
- [10] Liu J, Chen W, Wang Z J, et al. Simulation and measurement of total ionizing dose radiation induced image lag increase in pinned photodiode CMOS image



- sensors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 856: 32-35.
- [11] Elahidoost A, Fathipour M, Mojab A. Modelling the effect of 1 MeV electron irradiation on the performance degradation of a single junction  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  solar cell [C] // 20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012), May 15-17, 2012, Tehran, Iran. New York: IEEE Press, 2012: 113-117.
- [12] Xu S L, Lin K C, Han Y C, et al. Study on  $\gamma$ -ray irradiation damage mode and characterization of CMOS APS camera [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1523002.  
徐守龙, 林奎成, 韩永超, 等. CMOS APS 摄像机的  $\gamma$  射线辐射损伤模式与损伤表征研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1523002.
- [13] Deng L, Liu G H, Deng H, et al.  $\gamma$ -ray noise removal based on video time series correlation [J]. Laser & Optoelectronics Progress. [2021-01-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210802.1706.034.html>.  
邓磊, 刘桂华, 邓豪, 等. 基于视频时序相关特性的  $\gamma$  射线噪声去除方法研究 [J/OL]. 激光与光电子学进展. [2021-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210802.1706.034.html>.
- [14] Wang Z J, Huang S Y, Liu M B, et al. Displacement damage effects on CMOS APS image sensors induced by neutron irradiation from a nuclear reactor [J]. AIP Advances, 2014, 4(7): 077108.
- [15] Petasecca M, Moscatelli F, Passeri D, et al. Numerical simulation of radiation damage effects in p-type and n-type FZ silicon detectors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(5): 2971-2976.
- [16] Moll M. Displacement damage in silicon detectors for high energy physics [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(8): 1561-1582.
- [17] Sun Y, Zhang P, Xu J T, et al. Full well capacity and quantum efficiency optimization for small size backside illuminated CMOS image pixels with a new photodiode structure [J]. Journal of Semiconductors, 2012, 33(12): 124006.
- [18] Carnes J E, Kosonocky W F, Ramberg E G. Free charge transfer in charge-coupled devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1972, 19(6): 798-808.
- [19] Cao C, Zhang B, Wang J F, et al. Measurement of charge transfer potential barrier in pinned photodiode CMOS image sensors [J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37(5): 054007.
- [20] Marcelot O, Goiffon V, Nallet F, et al. Pinned photodiode CMOS image sensor TCAD simulation: in-depth analysis of in-pixel pinning voltage measurement for a diagnostic tool [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(2): 455-462.
- [21] Xu C. Design and research on active pixels of TDI CMOS image sensor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.  
徐超. 面向 TDI 型 CMOS 图像传感器的有源像素设计与研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [22] Xu J T, Li B Q, Yao S Y, et al. Design and realization of low noise four transistor pixel CMOS image sensor [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(2): 149-152.  
徐江涛, 李斌桥, 姚素英, 等. 低噪声四管像素 CMOS 图像传感器设计与实现 [J]. 天津大学学报, 2009, 42(2): 149-152.