

# 质子辐照对CMOS图像传感器传输栅损伤效应的实验与分析

唐宁<sup>1</sup>, 王祖军<sup>1,2\*</sup>, 晏石兴<sup>1</sup>, 李传洲<sup>1</sup>, 蒋镛羽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>湘潭大学材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105;

<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

**摘要** 互补金属氧化物半导体图像传感器(CIS)是一种当前应用非常广泛的光电图像传感器,其应用在空间辐射环境中时遭受的质子辐照损伤问题一直备受关注。为了分析CIS内部重要结构受辐射损伤影响及辐照损失机理,开展了关于CIS传输栅的质子辐照实验,通过测试辐照前后转移特性曲线并提取阈值电压和饱和输出电流,总结CIS传输栅的辐照损伤实验规律。对常温下经过辐照后的CIS开展了退火测试,分析相关特征参数的变化情况。应用TCAD(Technology computer aided design)仿真模拟探究了传输栅的辐照损伤规律及损伤机理。辐照实验在西安200 MeV质子应用装置上进行,质子能量为60 MeV,注量分别为 $1 \times 10^{10}$ 、 $1 \times 10^{11}$ 、 $1 \times 10^{12}$   $\text{cm}^{-2}$ 。实验结果表明:CIS传输栅的性能参数对质子辐照产生的电离损伤和位移损伤较为敏感,辐照后出现阈值电压正向漂移增加和饱和输出电流下降的现象,经退火后出现不同程度的恢复。分析了质子辐照CIS传输栅单管诱发的电离损伤和位移损伤效应,给出了CIS传输栅退化与质子辐照注量的变化关系曲线,并与TCAD仿真结果对比,总结了质子辐照损伤效应规律。

**关键词** 遥感与传感器; 光学器件; CMOS图像传感器; 质子辐照; 辐照注量; 退火测试

中图分类号 TN43 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS240439

## 1 引言

美国喷气推进实验室(JPL)的Fossum等<sup>[1]</sup>在1993年提出具有像素内电荷转移的互补金属氧化物半导体(CMOS)有源像素传感器(APS),从此行业内针对CMOS图像传感器(CIS)的研究力度逐渐加大。由于CIS具有低成本、低功耗和高集成度等优点<sup>[2]</sup>,研究目标也从最初的性能比肩电荷耦合器件(CCD)图像传感器,到追求更好的性能以满足更多应用领域的需求,如探测器、显微镜、卫星、激光雷达等<sup>[3-8]</sup>。CIS是一种光电传感器,其作用就是将外界环境的光信号转换为电信号,再由读出电路转换为数字信号。CIS芯片由感光像素单元和逻辑处理单元组成,前者将外部光信号转换为电信号,后者将电信号转换为数字信号。

CIS的发展离不开感光像素单元结构的进步,如今工业界绝大部分技术革新仍然使用经典的钳位光电二极管(PPD)以及像素内集成信号放大器的架构,在此基础上的革新大多围绕像素内结构细节的调动或者在外围电路模块上增加新的功能,如应用相关多次采

样(CMS)技术来降低噪声<sup>[9]</sup>。PPD、传输栅(TG)及浮置扩散区(FD)是有源像素的关键区域,其结构直接影响CIS的性能指标,如满阱容量、最大信噪比、灵敏度等重要光电图像传感器指标<sup>[10]</sup>。

应用于空间辐射环境的CIS会受到空间粒子辐射损伤的影响,器件性能参数退化,成像质量下降。CIS辐照损伤效应主要分为位移损伤效应、单粒子效应和总剂量效应<sup>[11-12]</sup>。不同辐照源辐射下CIS的性能参数会发生变化,如<sup>60</sup>Co  $\gamma$ 射线辐照CIS引起暗电流、饱和电压和读出增益改变、重离子辐照导致模块寄存器出现单粒子翻转<sup>[13-14]</sup>。

国内外研究主要集中在质子辐照损伤效应对芯片整体性能的影响或是像素中局部结构的仿真模拟研究,Virmontois等<sup>[15-16]</sup>比较分析不同能量中子和质子诱导CIS暗电流的非均匀性和暗电流分布的相似性及损伤机理,提出了暗电流分布的预测拟合模型,退火实验结果表明暗电流退火行为与点缺陷退火行为不一致,而与缺陷簇退火行为相似;王祖军研究团队<sup>[17]</sup>在不同偏置条件下对CIS质子辐照损伤效应进行了实验与机理分析,实验获得了单粒子瞬态响应的典型特征和暗

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-02-20; 录用日期: 2024-02-26; 网络首发日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(U2167208, 11875223)、陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2024JC-JCQN-10)、国家重点实验室基金(NKLIPR1803, 2012, 2113)

通信作者: \*wzj029@qq.com

信号、暗信号分布、暗信号尖峰及随机电码信号 (RTS) 等敏感参数的退化规律, 探究不同偏置条件和不同注量下 CIS 高能质子辐照损伤的物理机制; 傅婧等<sup>[18-19]</sup>开展了关于正照式和背照式图像传感器以及 8T CIS 质子辐照效应研究, 实验结果表明质子经正照式和背照式 CIS 像素阵列辐照后, 存在不同形状的单粒子瞬态亮斑, 在 8T CIS 质子辐照效应实验得到的结果中, 出现暗电流退化和光谱响应退化现象。然而, 相关研究均围绕像素单元整体电路研究, 针对像素单元中某一具体结构如传输管、复位管的辐照损伤效应研究较少, 如果仅测试像素单元整体的电学性能, 很难对像素单元内的敏感区域进行甄别。因此, 本文主要基于西安 200 MeV 质子应用装置 (XiPAF), 以国产的  $0.18\ \mu\text{m}$  工艺 CIS 制造的 6T CIS 像素中的传输栅单管为研究对象, 在设计 CIS 版图时, 将传输栅 TG 的四端分别连接到四个 pad 上并引出, 既保证传输管仍存在于像素单元电路内, 其工作状态不变, 又可以针对像素电路局部结构——传输晶体管开展辐照前后电学性能测试, 避免受到像素电路中其他晶体管的退化干扰。通过对电学参数进行表征, 深入揭示了不同注量下高能质子辐照诱导 6T CIS 传输栅单管退化损伤机制以及退火机制, 为 CIS 的传输栅单管仿真模拟和抗辐射加固提供数据支持。

## 2 辐照试验

### 2.1 辐照实验条件与样品

本次辐照实验选择能量为 60 MeV 的质子, 注量分别为  $1 \times 10^{10}$ 、 $1 \times 10^{11}$ 、 $1 \times 10^{12}\ \text{cm}^{-2}$ 。进行质子辐照时, 将样品固定在防静电海绵上不加电压偏置, 如图 1 所示。实验样品为  $0.18\ \mu\text{m}$  工艺的 CIS, 采用 6T 像素结构。其结构图如图 2 所示, 包括 PPD、传输管 ( $M_{\text{TG}}$ )、FD 节点、复位管 ( $M_{\text{RST}}$ )、源跟随器 (SF)、选择管 ( $M_{\text{SEL}}$ )、HDR (High dynamic range) 开关, 以及全局快门控制栅 GS。在图 2 中,  $V_{\text{dd}}$  为像素电源电压,  $V_{\text{boost}}$  为 boost 电路电压,  $C_{\text{boost}}$  为 boost 电路电容,  $C_{\text{PN}}$  为光电二极管电容。传输栅单管版图设计时, 传输栅 TG 的

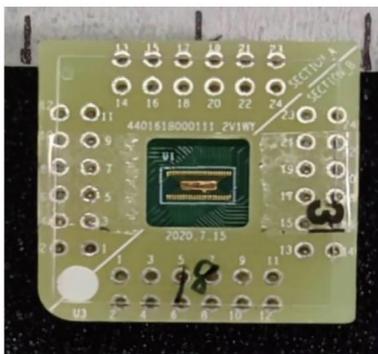


图 1 6T CIS 传输栅单管器件图

Fig. 1 6T CIS transmission grating single-tube device diagram

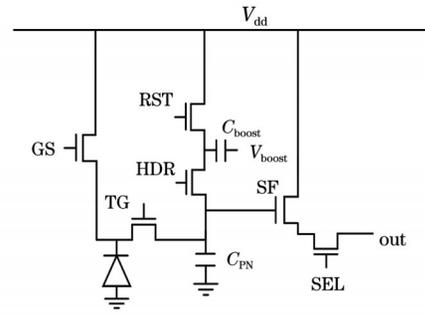


图 2 6T CIS 像素结构电路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pixel structure circuit of 6T CIS

四端分别连接到四个 pad 上, 通过引线键合的方式将四个 pad 引出至管脚, 对传输栅单管性能进行测试。在 B1500A 半导体参数分析仪上, 对引出的传输栅单管开展辐照前后电学参数测试。

像素中光电子的产生及传输过程: 首先在外界光照射像素感光区域, 在 PPD 中进行光电转换, 累积光电子状态, 在这个阶段  $M_{\text{TG}}$ 、 $M_{\text{RST}}$ 、 $M_{\text{SEL}}$  都是关断状态; 下一个阶段, 通过复位信号开启  $M_{\text{RST}}$ , 进行晶体管的复位, 让 FD 节点中上一次信号传输残留的电子传导出去, 避免对这一次信号传输产生干扰; 随后关断  $M_{\text{RST}}$ , 完成 FD 节点的重置工作, 打开  $M_{\text{TG}}$ , 把 PPD 中的光电子传输到 FD 节点中, 传输完毕后关闭  $M_{\text{TG}}$ , 避免后续 PPD 中光电转换对 FD 节点产生影响, 同时 FD 节点因光电子而产生电压, 即在 FD 节点中完成电荷到电压的转换; 最后由  $M_{\text{SF}}$  放大 FD 节点的电压信号, 再由  $M_{\text{SEL}}$  选通, 输出信号从列总线读出。质子辐照后会导致传输栅  $M_{\text{TG}}$  的阈值电压产生漂移, 进而影响光电子的传输过程, 使像素的暗电流增加, 满阱容量降低, 进而造成 CIS 暗电流增加、输出图像均匀性下降、量子效率降低, 出现图像滞留现象。

### 2.2 实验结果与分析

采用离线测试的方法对 6T CIS 传输栅单管开展 60 MeV 质子辐照效应研究。器件辐照前后阈值电压变化值和饱和电流变化值随质子注量变化的关系曲线如图 3 所示。从图 3(a) 中可以看出, 随着质子注量的增加, 阈值电压的正向漂移程度不断增加, 阈值电压变化值由  $1 \times 10^{10}\ \text{cm}^{-2}$  注量下的 0.24 V 增加到  $1 \times 10^{11}\ \text{cm}^{-2}$  注量下的 0.25 V, 阈值电压变化值随质子注量增加的幅度仅为 0.01 V。而如图 3(b) 所示, 饱和电流变化值则由  $-0.041\ \mu\text{A}$  变化到  $-0.075\ \mu\text{A}$ , 随着质子注量增加, 饱和电流变化值的减小幅度为  $0.034\ \mu\text{A}$ 。当质子注量由  $1 \times 10^{11}\ \text{cm}^{-2}$  增加到  $1 \times 10^{12}\ \text{cm}^{-2}$  时, 阈值电压变化值达到 0.44 V, 饱和电流变化值达到  $-0.194\ \mu\text{A}$ 。随着质子注量的增加, 阈值电压变化值的增加幅度为 0.19 V, 饱和电流变化值的减小幅度为  $0.153\ \mu\text{A}$ , 变化幅度都大于质子在较低辐照注量中的测试结果。

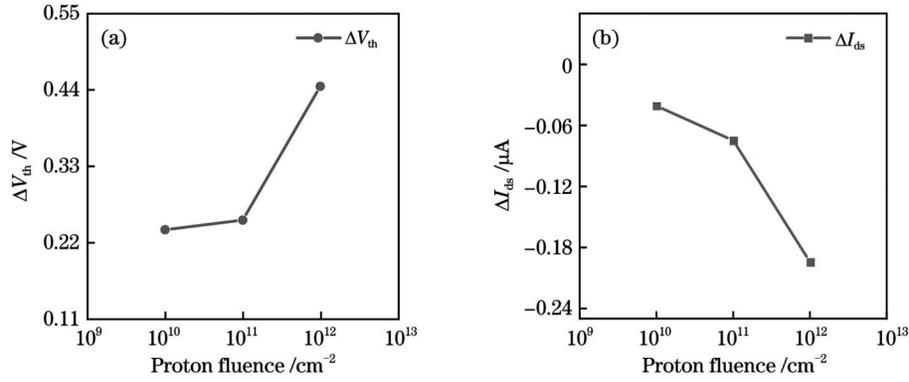


图3 60 MeV质子辐照后电学参数测试结果。(a)阈值电压变化值( $\Delta V_{th}$ )随质子注量的变化曲线;(b)饱和电流变化值( $\Delta I_{ds}$ )随质子注量的变化曲线

Fig. 3 Test results of electrical parameters after 60 MeV proton irradiation. (a) Variation curve of threshold voltage change value ( $\Delta V_{th}$ ) with proton fluence; (b) variation curve of saturation current variation value ( $\Delta I_{ds}$ ) with proton fluence

N 沟道 MOSFET (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) 的阈值电压  $V_{th}$  数学模型<sup>[20]</sup>可以描述为

$$V_{th} = \frac{q}{C_{OX}}(N_{it} - N_{ot}) + C_{OX}(4\epsilon_s q N_A \phi_{Fp})^{\frac{1}{2}} + 2\phi_{Fp} + \phi_{MS}, \quad (1)$$

$$\phi_{Fp} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}, \quad (2)$$

式中:  $C_{OX}$  为氧化层特征电容;  $N_{ot}$  为氧化层陷阱电荷面密度;  $N_{it}$  为界面态陷阱电荷面密度;  $\epsilon_s$  为 Si 的介电常数;  $N_A$  为 P 型基区的有效掺杂浓度;  $\phi_{Fp}$  为准费米势;  $\phi_{MS}$  为金属-半导体的功函数差;  $q$  为电荷量;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $n_i$  为 Si 的本征载流子浓度。

质子辐照引起的电离总剂量损伤效应和位移损伤效应会在 MOS(Metal-oxide-semiconductor) 结构的氧化层中引入氧化物陷阱电荷, 在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面引入界面态陷阱电荷<sup>[21-23]</sup>。质子辐照后传输栅单管阈值电压漂移和饱和电流下降的实验现象主要是辐照诱发的氧化物陷阱电荷及界面态共同作用的耦合结果。阈值电压

变化值随质子辐照注量的增加而增大, 这是由于随着注量的不断增加, 辐照感生缺陷不断增加, 辐照损伤对器件的辐照敏感参数的影响也不断增强。在低质子注量辐照条件下, 阈值电压有正向漂移的趋势, 但幅度较小, 饱和电流下降, 且下降的幅度较大。阈值电压的正向漂移受传输栅单管氧化层中产生的氧化物陷阱电荷和界面缺陷电荷影响。在辐照初期, 辐照感生的氧化物陷阱电荷形成时间较短, 对传输栅特性参数的影响较小, 随着注量的不断增加, 界面态陷阱电荷面密度  $N_{it}$  不断增加, 导致阈值电压变化量不断增大, 阈值漂移愈发明显。阈值电压的正向漂移会导致器件 Si/SiO<sub>2</sub> 界面处的 P 型基区更难形成反型层, 在较高的栅压下器件才能开启, 这也说明器件辐照后输出电流的特征曲线会出现下降的趋势。

开展关于传输栅单管辐照后室温退火测试, 得到辐照后 0、24、72 h 的相关敏感参数并绘制其随退火时间的变化曲线图。如图 4(a) 所示, 对于阈值电压变化值来说, 在 0 到 24 h 的时间段内, 阈值电压变化值减小并不是十分明显, 而在 72 h 时, 阈值电压变化值下降得

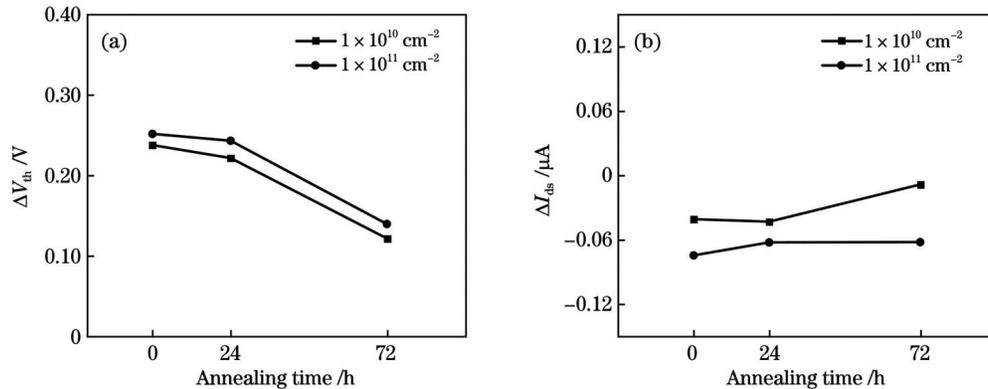


图4 60 MeV质子辐照后电学参数退火测试结果。(a)阈值电压变化值随退火时间的变化曲线;(b)饱和电流变化值随退火时间的变化曲线

Fig. 4 Annealing test results of electrical parameters after 60 MeV proton irradiation. (a) Variation curves of threshold voltage change value with annealing time; (b) variation curves of saturation current change value with annealing time

较为明显。从图 4(b)中可以看出辐照后饱和电流减小的程度随退火时间增加而降低。

辐照后退火测试实验结果表明:随着退火时间的增加,饱和电流变化值逐渐减小,这主要是因为辐照诱发的氧化层内的固定电荷和界面陷阱电荷出现退火。由于退火时电子与空穴逐步复合,栅氧层中的空穴运输至界面处并被界面处深层空穴陷阱捕获以及陷阱电荷出现退火,阈值电压出现一定程度的恢复。由于空穴在氧化物中输运较慢,会引起阈值电压短期的瞬态恢复,但影响不是很明显,随着退火时间的延长,空穴逐渐到达 Si/SiO<sub>2</sub> 界面,部分空穴被界面处的深层陷阱俘获,导致阈值电压漂移明显减小。

### 3 TCAD 建模与仿真模拟

#### 3.1 传输栅单管建模仿真

根据 CIS 标准工艺流程,栅极是由相对较厚的多晶硅层覆盖在 SiO<sub>2</sub> 层上,在源漏区离子注入时,充当掩膜作用,阻碍杂质离子注入,所以栅极下的调整层在栅极形成前完成离子注入。在 Si 中掺入粒子数浓度为  $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  的硼元素得到 P 型 Si 衬底, Si 衬底厚度为  $5 \mu\text{m}$ , 随后淀积  $5 \text{ nm}$  的栅氧层。分别用粒子数浓度为  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、能量为  $100 \text{ keV}$  和粒子数浓度为  $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 、能量为  $120 \text{ keV}$  的硼元素进行栅极下注入,其中调整层长度为  $0.6 \mu\text{m}$ 。在栅氧层上方淀积  $0.4 \mu\text{m}$  的多晶硅层,继续淀积氧化层和金属 Ni,将多晶硅刻蚀与氧化层刻蚀,制作出侧壁,去除掉源漏区域的氧化层。在栅极形成后利用粒子数浓度为  $5.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 、能量为  $25 \text{ keV}$  的磷元素进行源漏区域注入和多晶硅注入,在多个退火温度和退火时间下进行热退火,最终得到如图 5 所示的 MOS 管工艺仿真模型。在进行二维结构仿真的过程中,利用包括和掺杂相关的 SRH (Shockley-Read-Hall) 复合模型、俄歇复合模型和迁移率模型等<sup>[24]</sup>以及建立缺陷模型模拟质子辐照诱发传输栅单管相关敏感参数退化。



图 5 6T CIS 传输栅单管 MOS 结构仿真模型

Fig. 5 Simulation model of MOS structure of 6T CIS transmission single-tube

图 6 为辐照前仿真模型与实际器件的转移特性曲线拟合结果,横坐标  $V_{gs}$  为栅源电压,其中仿真器件阈值电压为  $0.676 \text{ V}$ ,饱和电流为  $20.27 \mu\text{A}$ ,与实际器件  $0.791 \text{ V}$  的阈值电压和  $20.23 \mu\text{A}$  的饱和电流基本吻合。

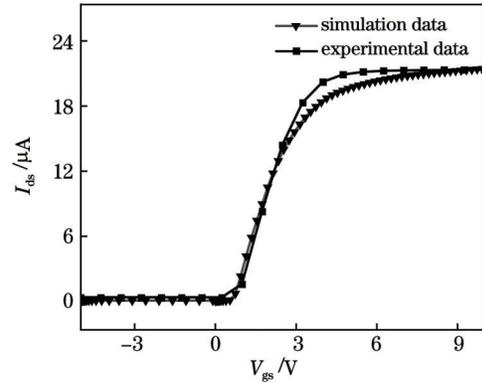


图 6 辐照前仿真模型与实际器件的  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  曲线拟合示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  curves fitting between simulation model and actual device before irradiation

高能入射粒子在氧化层(栅氧)中因电离作用产生电子-空穴对。氧化层中空穴的移动速度比电子慢,由于空穴的扩散作用,空穴会向 Si/SiO<sub>2</sub> 界面处迁移。界面处的晶格缺陷及氧化层中氧的扩散,接近界面处存在大量的氧空位。当未被复合的空穴向界面迁移时,一部分空穴被俘获,形成氧化物陷阱电荷。而同时由于高能电子或空穴在注入时打破了 Si—Si 和 Si—O 键,或打破 Si—H 键,释放出 H 原子,在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面形成界面态。因此通过在仿真模型的氧化层中引入固定正电荷以及在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面处引入界面态缺陷电荷来模拟质子辐照损伤效应。图 7 为辐照后仿真模型与实际器件的转移特性曲线拟合结果,可以看出器件阈值电压为  $0.900 \text{ V}$ ,饱和电流为  $20.26 \mu\text{A}$ ,与实际器件  $1.028 \text{ V}$  的阈值电压和  $20.19 \mu\text{A}$  的饱和电流大致吻合。

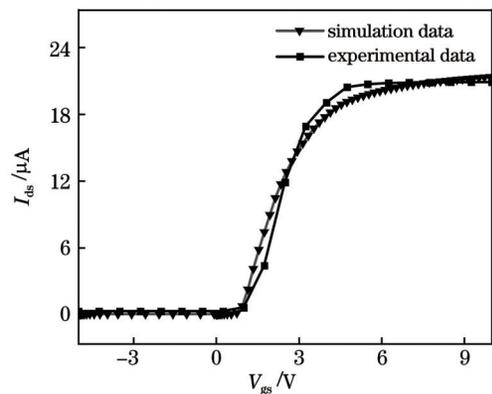


图 7 辐照后仿真模型与实际器件的  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  曲线拟合示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  curves fitting between simulation model and actual device after irradiation

### 3.2 辐照效应仿真模拟结果分析及机理分析

图 8 为辐照后仿真器件与实际实验的阈值电压变化值和饱和电流变化值随质子注量增加的对比曲线。随着辐照注量的增加, 阈值电压漂移增大, 饱和电流减小, 如图 8(a) 所示阈值电压变化值由  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  注量下的 0.223 V 增加至  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

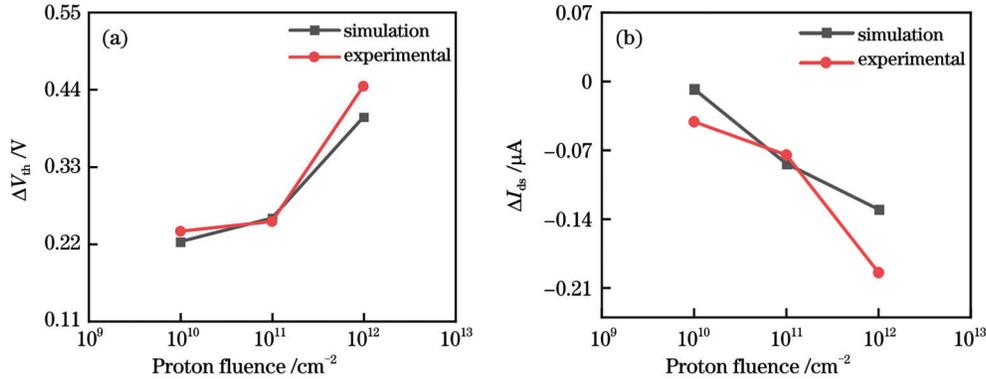


图 8 辐照后仿真与实验结果对比曲线。(a) 阈值电压变化值随质子注量变化曲线; (b) 饱和电流变化值随质子注量变化曲线  
Fig. 8 Comparison curves between simulation and experimental results after irradiation. (a) Variation curves of threshold voltage change value with proton fluence; (b) variation curves of saturation current variation value with proton fluence

当质子穿过半导体材料时, 会通过电离和非电离过程损失能量。电离过程会在半导体内产生电子-空穴对, 而非电离过程会使原子位移。高能入射粒子在氧化层(栅氧)中因电离作用产生电子-空穴对。在半导体材料中, 当质子穿过 CIS 传输栅单管时, 原子核外电子从卢瑟福(库伦)散射中获得能量而被激发和释放。质子还会和原子核发生碰撞, 产生初级反冲原子, 反冲原子能电离晶格并使原子移位。在 60 MeV 能量的质子辐照下, 质子和 Si 材料相互作用产生非弹性核反应。晶格原子一旦获得大于位移损伤阈能的能量后, 就会离开原位并产生空位间隙原子对, 形成弗伦克尔缺陷。质子辐照后会诱发 Si 禁带中产生稳定的体缺陷, 并最终形成新的复合产生中心。

因此, 仿真结果验证了质子辐照产生的损伤效应是电离总剂量损伤效应与位移损伤效应耦合作用的结果, 会在传输栅单管 MOS 结构的氧化层中引入氧化物陷阱电荷, 在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面引入界面态陷阱电荷, 且随着质子辐照注量的增加, 氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷也随之增加, 并导致阈值电压的漂移增大以及饱和电流下降幅度变大。

## 4 结 论

介绍了在 XiPAF 上开展的 60 MeV 高能质子辐照实验, 研究了质子辐照诱发 CIS 传输栅性能退化的实验规律。在质子辐照后, CIS 传输栅单管的阈值电压、饱和电流都产生明显变化, 变化量随着注量的增加而增大, 进而影响整个像素的正常功能。随后开展 72 h 退火测试, 测试结果表明: 室温退火可以使辐照损伤导致的传输栅单管电学参数变化在一定程度上

注量下的 0.401 V, 如图 8(b) 所示饱和电流下降幅度由  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  注量下的 0.008  $\mu\text{A}$  增加至  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  注量下的 0.130  $\mu\text{A}$ 。辐照效应仿真模拟中, 不同注量辐照后阈值电压与饱和电流的变化趋势、变化量大小与辐照实验后实际测试结果趋势基本吻合。

得到恢复。结合 TCAD 仿真模拟分析, 质子辐照会导致 CIS 传输栅单管出现退化现象。辐照后 CIS 传输栅单管的阈值电压与饱和电流的变化主要由氧化层陷阱电荷与界面态陷阱电荷引起, 辐照感生陷阱电荷量随辐照注量增加而增加, 其中界面态陷阱电荷不断增加, 阈值电压正向漂移加剧, 会导致 Si/SiO<sub>2</sub> 界面处的 P 型基区难形成反型层, 饱和电流减小。在像素进行光信号转换为电信号的过程中, 辐照导致器件阈值电压增大和饱和电流减小, 且在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面处产生界面态陷阱, 这些辐照损伤结果都会对电荷转移产生影响, 使得信号电荷很难实现全部转移, 在关闭传输栅后, 仍有信号电荷残留在光电二极管内, 残留在光电二极管中的信号电荷将会以图像拖影的形式在下一帧图像中出现, 此外还会减小 CIS 的输出信号。相关实验可以为传输栅辐射效应及其加固提供数据参考。下一步将继续深入开展相关 CIS 芯片的辐照实验, 进一步探究辐照后 CIS 传输栅的退化规律和损伤机理。

## 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] 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.
- [3] Oh T H, Lee S H. Single-chip CMOS CCD camera interface based on digitally controlled capacitor-segment combination[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 2000, 47(11): 1338-1343.
- [4] Shen S H, Du E, Zhang M, et al. Confocal rescanned structured

- illumination microscopy for real-time deep tissue imaging with superresolution[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(1): 016009.
- [5] Rizzolo S, Goiffon V, Estribeau M, et al. Influence of pixel design on charge transfer performances in CMOS image sensors[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(3): 1048-1055.
- [6] NASA Science. The Camera on the Mars 2020 mission perseverance rover[EB/OL]. (2020-06-25)[2022-11-11]. <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/cameras/>.
- [7] 王军, 李国宏. CMOS 图像传感器在航天遥感中的应用[J]. *航天返回与遥感*, 2008, 29(2): 42-47.  
Wang J, Li G H. The application of CMOS image sensor in space remote sensing[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(2): 42-47.
- [8] 刘子凡, 车昊, 宫振峰, 等. 沙氏激光雷达探测水体衰减系数[J]. *中国激光*, 2022, 49(12): 1210003.  
Liu Z F, Che H, Gong Z F, et al. Development of scheimpflug lidar technique for measuring attenuation coefficient of water body[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(12): 1210003.
- [9] 李少蒙, 聂凯明, 徐江涛. 用于微光 CMOS 图像传感器的相关多采样技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(12): 1228005.  
Li S M, Nie K M, Xu J T. Correlated multiple sampling technique for low-light CMOS image sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(12): 1228005.
- [10] 徐文静, 陈杰, 旷章曲, 等. 低压 4T-PPD 有源像素的设计与测试[J]. *光子学报*, 2022, 51(5): 0523001.  
Xu W J, Chen J, Kuang Z Q, et al. Design and experiment of low-voltage 4T-PPD active pixel[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(5): 0523001.
- [11] 王祖军, 刘静, 薛院院, 等. CMOS 图像传感器总剂量辐照效应及加固技术研究进展[J]. *半导体光电*, 2017, 38(1): 1-7.  
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): 1-7.
- [12] 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.  
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.
- [13] Goiffon V, Estribeau M, Magnan P. Overview of ionizing radiation effects in image sensors fabricated in a deep-submicrometer CMOS imaging technology[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(11): 2594-2601.
- [14] Yang Z K, Wen L, Li Y D, et al. Heavy ion single event effects in CMOS image sensors: set and SEU[J]. *Electronics*, 2023, 12(13): 2833.
- [15] Virmontois C, Goiffon V, Magnan P, et al. Displacement damage effects due to neutron and proton irradiations on CMOS image sensors manufactured in deep submicron technology[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 57(6): 3101-3108.
- [16] Virmontois 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.
- [17] 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): 1928001.  
Nie X, Wang Z J, Wang B C, 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): 1928001.
- [18] 傅婧, 蔡毓龙, 李豫东, 等. 质子辐照下正照式和背照式图像传感器的单粒子瞬态效应[J]. *物理学报*, 2022, 71(5): 054206.  
Fu J, Cai Y L, Li Y D, et al. Single event transient effect of frontside and backside illumination image sensors under proton irradiation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(5): 054206.
- [19] 傅婧, 李豫东, 冯婕, 等. 8T CMOS 图像传感器质子辐照效应研究[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(12): 2128-2134.  
Fu J, Li Y D, Feng J, et al. Degradation characteristic of proton irradiated 8T CMOS image sensor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, 55(12): 2128-2134.
- [20] Sze S M, Ng K K. *Physics of semiconductor devices*[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007.
- [21] 杨懿, 王祖军, 尚爱国, 等. 质子辐照下 4T CMOS 图像传感器满阱容量退化模拟研究[J]. *现代应用物理*, 2021, 12(3): 131-139.  
Yang X, Wang Z J, Shang A G, et al. Simulation of full well capacity degradation of 4T CMOS image sensor irradiated by proton[J]. *Modern Applied Physics*, 2021, 12(3): 131-139.
- [22] Robbins M S. High-energy proton-induced dark signal in silicon charge coupled devices[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, 47(6): 2473-2479.
- [23] 龚建成, 罗尹虹, 郭红霞, 等. MOS 器件脉冲总剂量效应时间关联响应的模拟计算[J]. *核电子学与探测技术*, 2008, 28(4): 835-840, 816.  
Gong J C, Luo Y H, Guo H X, et al. Simulation of MOS devices on time-dependent response of pulse total dose effects[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, 28(4): 835-840, 816.
- [24] 王祖军, 杨懿, 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): 150-157.  
Wang Z J, Yang X, Lai S K, et al. Simulation of displacement damage of CMOS image sensors irradiated by neutron[J]. *Modern Applied Physics*, 2022, 13(3): 150-157.

# Experiment and Analysis of Damage Effect of Proton Irradiation on Transmission Transistor of CMOS Image Sensor

Tang Ning<sup>1</sup>, Wang Zujun<sup>1,2\*</sup>, Yan Shixing<sup>1</sup>, Li Chuanzhou<sup>1</sup>, Jiang Rongyu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;*

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

## Abstract

**Objective** The image sensor is a device that converts optical signals into electrical signals. It is often employed in digital image information acquisition and plays an important role in daily production and life. In the 1960s, the complementary metal oxide semiconductor (CMOS) image sensor (CIS) was discovered. In 1993, the CMOS active pixel image sensor (APS) with intra-pixel charge transfer was proposed. The development of the photosensitive pixel unit structure has greatly improved the overall performance of CIS. Meanwhile, its superior performance has gradually replaced the charge coupled device (CCD) image sensor and quickly become a research hotspot. However, in some specific application fields, such as aerospace, medicine, and nuclear energy, CMOS image sensors are not immune to the influence of radiation. Radiation particles often have strong penetration ability and can interact with the electronic devices inside the CIS. For a single electronic device, radiation will change the electrical parameters of the device, and for the entire image sensor, radiation will cause a series of problems such as increased dark current and noise, thus greatly reducing the image quality of the image sensor, and bringing great uncertainty to scientific research, medical diagnosis, and industrial production. Thus, we report the experiment and analysis of proton irradiation on the damage effect of the 6T CIS transmission gate. The transmission gate is introduced in the form of transmission transistors and irradiated with a proton with energy of 60 MeV. The effect of proton irradiation on the electrical performance of the transmission transistor can be carried out for the local structure of the pixel circuit. By characterizing the electrical parameters, we reveal the degradation and annealing mechanism of the 6T CIS transmission transistor induced by high-energy proton irradiation at different fluences, providing data support for the simulation and radiation-resistant reinforcement of the CIS transmission transistor.

**Methods** First, in the layout design of the single tube of the transmission gate, the four ends of the transmission gate (TG) are connected to four pads respectively and are introduced to the pins by lead bonding, with the electrical performance of the transmission transistor tested. Then, in Xi'an 200 MeV Proton Application Facility (XiPAF), the proton irradiation energy is 60 MeV, and the fluences are  $1 \times 10^{10}$ ,  $1 \times 10^{11}$ , and  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , respectively. During the irradiation, the sample is fixed on the anti-static sponge without voltage bias. After irradiation, the electrical parameters of the single tube of the transmission gate are tested before and after irradiation on the B1500A semiconductor parameter analyzer to study the changes of the electrical sensitive parameters before and after irradiation and the annealing after irradiation.

**Results and Discussions** The electrical performance of the transmission transistor is tested after irradiation. The experimental results show that, with the increasing proton flux, the forward bias degree of the threshold voltage is increasing [Fig. 3(a)], and Fig. 3(b) indicates that the decrease in saturation current is also increasing. As shown in Fig. 4(a), for the change value of the threshold voltage, the decrease in the threshold voltage change value is not very obvious from 0 to 24 h, and at 72 h, the threshold voltage change value decreases obviously. As shown in Fig. 4(b), the decrease in saturation current after irradiation reduces with the increasing annealing time. Combined with TCAD simulation analysis, proton irradiation will generate oxidation layer trap charge and interface state trap charge, degrading the single tube of the CIS transmission gate. As shown in Fig. 8(a), the change trend of the threshold voltage change value is similar to the test results, and Fig. 8(b) reveals that the decrease in saturation output current increases, which is similar to the test results.

**Conclusions** After proton irradiation, the threshold voltage and saturation current of the single tube of the CIS transmission gate have significant changes, and the changes increase with the rising flux and then affect the normal function of the whole pixel. Then the 72 h annealing experiment is carried out, and the experiment shows that the electrical parameters of the single tube of the transmission gate caused by irradiation damage can be restored to a certain extent by room temperature annealing. The changes in threshold voltage and saturation current of the single tube of the transmission gate of CIS after irradiation are mainly caused by the trap charge of the oxide layer and the interface state. The amount of irradiation-induced trap charge increases with the rising irradiation fluence, among which the trap charge of the interface state increases continuously, and the forward drift of threshold voltage intensifies. This will make it difficult to form an inversion layer in the P-type base region at the Si/SiO<sub>2</sub> interface, with decreased saturation current.

**Key words** remote sensing and sensors; optical device; CMOS image sensor; proton irradiation; irradiation fluence; annealing test