

质子辐射下互补金属氧化物半导体有源像素传感器暗信号退化机理研究

汪波 李豫东 郭旗 刘昌举 文林 任迪远 曾骏哲 玛丽娅

Dark signal degradation in proton-irradiated complementary metal oxide semiconductor active pixel sensor

Wang Bo Li Yu-Dong Guo Qi Liu Chang-Ju Wen Lin Ren Di-Yuan Zeng Jun-Zhe Ma Li-Ya

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 084209 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

质子辐照导致科学级电荷耦合器件电离效应和位移效应分析

[Analysis of ionizing and department damage mechanism in proton-irradiation-induced scientific charge-coupled device](#)

物理学报.2015, 64(2): 024220 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024220>

溢油海水双向反射分布函数的建模及仿真

[Modeling the bidirectional reflectance distribution function of seawater with spilled oil](#)

物理学报.2014, 63(13): 134211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134211>

位移效应对量子点激光器的性能影响

[Displacement damage effects on the characteristics of quantum dot lasers](#)

物理学报.2013, 62(9): 094219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094219>

位移辐射效应对量子阱激光器性能的影响

[Displacement damage effect on the characteristics of quantum well laser](#)

物理学报.2012, 61(21): 214211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.214211>

光纤布拉格光栅 γ 辐射损伤及其对光谱特性的影响

[\$\gamma\$ -radiation damage of fiber Bragg grating and its effects on reflected spectrum characteristics](#)

物理学报.2012, 61(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.064201>

质子辐射下互补金属氧化物半导体有源像素 传感器暗信号退化机理研究*

汪波¹⁾²⁾ 李豫东¹⁾ 郭旗^{1)†} 刘昌举³⁾ 文林¹⁾²⁾ 任迪远¹⁾
曾骏哲¹⁾²⁾ 玛丽娅¹⁾²⁾

1)(中国科学院新疆理化技术研究所, 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 新疆电子信息材料与器件重点实验室,
乌鲁木齐 830011)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

(2014年7月30日收到; 2014年11月7日收到修改稿)

对某国产0.5 μm 工艺制造的互补金属氧化物半导体有源像素传感器进行了10 MeV 质子辐射试验, 当辐射剂量达到预定剂量点时, 采用离线的测试方法, 定量测试了器件暗信号的变化情况. 试验结果表明, 随着辐射剂量的增加暗信号迅速增大. 采用MULASSIS (multi-layered shielding simulation software) 软件计算了电离损伤剂量和位移损伤剂量, 在与 γ 辐射试验数据对比的基础上, 结合器件结构和工艺参数, 建立了分离质子辐射引起的电离效应和位移效应理论模型, 深入分析了器件暗信号的退化机理. 研究表明, 对该国产器件而言, 电离效应导致的表面暗信号和位移效应导致的体暗信号对整个器件暗信号退化的贡献大致相当.

关键词: 互补金属氧化物半导体有源像素传感器, 暗信号, 质子辐射, 位移效应

PACS: 42.88.+h, 85.60.Dw, 61.72.J-, 61.80.-x

DOI: 10.7498/aps.64.084209

1 引言

随着集成电路技术的发展, 近几年互补金属氧化物半导体有源像素传感器 (complementary metal oxide semiconductor active pixel sensors, CMOS APS) 发展十分迅速, 以其在系统功耗、体积、重量、成本、功能性以及可靠性等方面的优势, 在数字图像采集与信号处理等方面得到广泛应用, 在星敏感器和太阳敏感器、遥感成像等卫星图像采集处理方面正逐步取代电荷耦合器件. 2013年12月2日, 嫦娥三号卫星从西昌卫星发射中心发射, 12月14日成功实施软着陆, 并通过降落相机传回图像. 嫦娥三号配置的降落相机、地形地貌相机、全景相机等有效载荷, 都安装了CMOS APS相机, 分别对着陆器降落过程、着陆点周围区域的月表地

形地貌、着陆区和巡视区域周围的月表地形地貌等进行监测和成像. 获取的初步结果表明, 有效载荷状态能够支持开展后续的科学探测任务^[1]. 随着我国航天事业的发展, CMOS APS必将在深空探测、载人航天、交汇对接等领域发挥重要作用.

然而, CMOS APS在空间应用时会受到空间辐射环境的影响. 空间辐射环境包括电子、质子和少量的高能量宇宙射线粒子^[2-5]. 质子入射CMOS APS后, 在器件内同时产生电离效应和位移效应, 两种辐射效应的综合作用严重影响器件成像质量甚至导致功能失效. 为了实现器件在空间辐射环境下的应用, 有必要对器件进行质子辐射效应研究. 由于暗信号是对辐射最为敏感的参数之一, 所以大量工作集中于器件暗信号辐射损伤机理的研究上. Bogaerts等^[6]通过不同能量、不同剂量的质子辐射试验, 定量研究了质子的能量和能量

* 国家自然科学基金 (批准号: 11005152) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn

密度对 CMOS APS 暗信号和暗信号非均匀性的影响. Beaumel 等^[7]研究了质子、电子、 γ 等不同粒子辐射下 HAS2 加固型 APS 的退化情况, 着重分析了质子、电子辐射后暗电流和暗电流尖峰的退化机理. Virmontois 等^[8]通过质子和中子辐射试验, 研究了两种粒子辐射下 CMOS 图像传感器暗电流的退化情况, 试验发现器件的平均暗电流随位移损伤剂量增大而线性增大, 因此可以用位移损伤因子估算不同注量下 CMOS 图像传感器的退化情况.

目前, 国内关于质子辐射 CMOS APS 的研究工作尚未见报道. 本文通过开展 10 MeV 质子辐射 CMOS APS 试验, 对 CMOS APS 暗信号的退化规律和损伤机理进行了深入研究和分析. 在与 γ 辐射试验数据对比的基础上, 结合器件结构和工艺参数, 提出了分离质子辐射引起电离效应、位移效应导致器件暗信号退化的方法, 并用高温退火试验验证了该方法的正确性. 研究结果可为星载 CMOS APS 的辐射损伤评估和抗质子辐射加固技术研究提供理论基础和试验支持.

2 试验方案

试验样品选用某国产 0.5 μm CMOS N 阱工艺制造的 256×256 元 CMOS APS, 像元尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$. 像素单元中除含有 N 阱/P 衬底的光敏二极管外, 还包括复位管 M1、源极跟随器 M2 及行选通管 M3 等金属氧化物半导体场效应晶体管组成的有源电路, 各有源区采用硅的局部氧化 (local oxidation of silicon, LOCOS) 技术进行隔离, 栅氧厚度为 12.5 nm, 场氧厚度约为 500 nm. 图 1(a) 和图 1(b) 分别给出了像素单元俯视图和截面图.

辐射试验在北京大学重离子物理研究所 $2 \times 6 \text{ MV}$ EN 串列静电加速器上进行, 该加速器能提供能量为 1—10 MeV 范围内的质子束流. 本次试验选取能量为 10 MeV 的质子辐射, 通量为 $5 \times 10^7 \text{ p}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 试验时在 CMOS APS 样品旁放置法拉第筒对质子束流进行计数, 试验测试注量点分别为 2×10^{10} , 5×10^{10} , 7×10^{10} , $10 \times 10^{10} \text{ p}/\text{cm}^2$. 本次试验采用的偏置方式是器件所有管脚短接的不加电偏置. 为消除 CMOS APS 玻璃窗口对入射质子能量的吸收, 试验前去掉了 CMOS APS 的光窗玻璃, 裸芯片接受辐射.

CMOS APS 参数提取采用新疆理化技术所自主研发的“光电成像器件辐射效应测试系统”, 测试

系统的实物图如图 2 所示. 该系统采用光机一体化结构设计, 包括光电响应性能检测、光谱检测、控制及数据处理 3 个分系统, 可对器件的光电响应性能、光谱特性进行全面的定量测试与分析^[9].

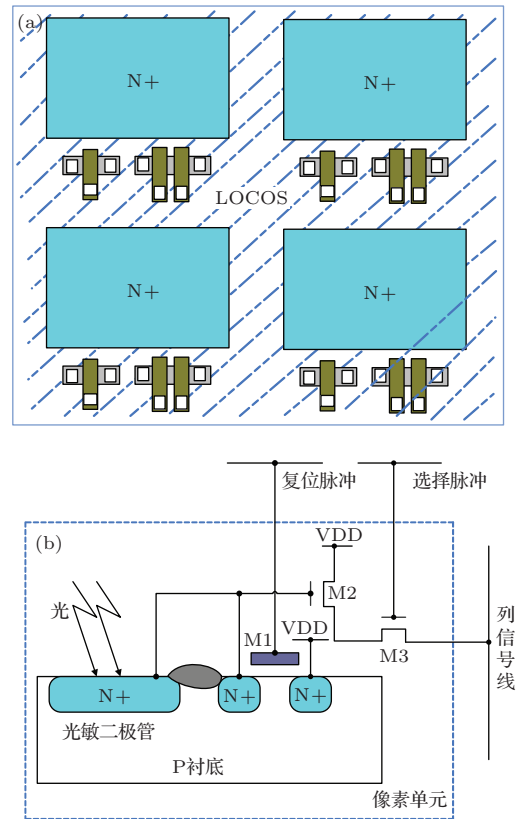


图 1 (a) 像素单元俯视图; (b) 像素单元截面图
Fig. 1. (a) Pixel unit plan view; (b) pixel unit cross section diagram.



图 2 测试系统的实物图

Fig. 2. Physical map of test system.

CMOS APS 的暗信号是指在无光照条件下 CMOS APS 像元产生的输出信号. 在无光照条件下, 器件的输出信号会随积分时间线性增加, 通过改变器件的积分时间, 测试对应积分时间下的输出信号, 然后以积分时间为横坐标, 输出信号为纵坐

标,由测试数据给出散点图,并按最小二乘法,拟合出一条直线,该直线的斜率即为器件的单位时间暗信号.

3 试验结果与损伤机理分析

3.1 暗信号随质子辐射注量的变化关系

图3给出了暗信号随质子辐射注量的变化.从图3可以看出,随着辐射注量的增加,暗信号逐渐增大.当质子注量达到 $10 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$ 时,器件的暗信号由辐射前的 58.54 mV/s 退化到 562.6 mV/s ,增大了近10倍.

质子是带电粒子,CMOS APS受10 MeV质子辐射后不但在栅氧化物、LOCOS隔离氧化物中产

生氧化物陷阱电荷,在Si-SiO₂界面产生界面态,同时在像素单元体耗尽层产生体缺陷,图4给出了质子辐射器件后产生的缺陷示意图.

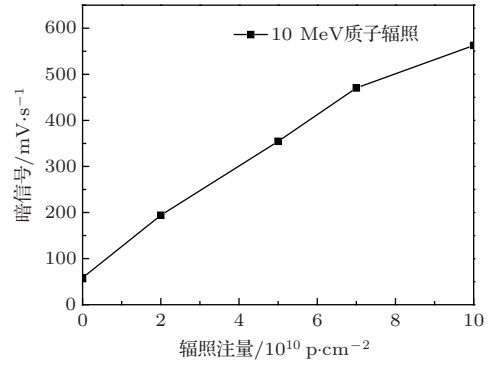


图3 暗信号随质子辐射注量的变化

Fig. 3. Variation of dark signal with proton fluence.

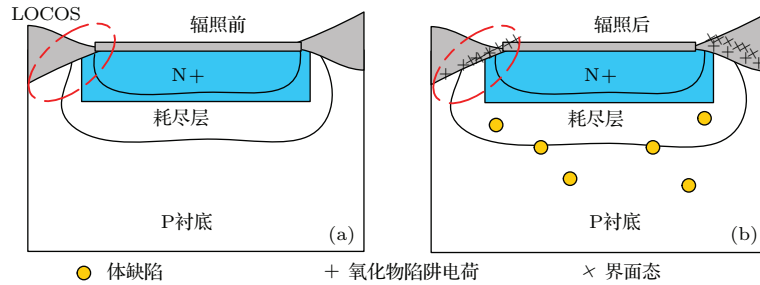


图4 质子辐射器件后产生的缺陷示意图

Fig. 4. Schematic diagram of defects after proton radiation device.

质子辐射产生的电离效应,在Si-SiO₂界面处产生了大量的界面态,这些界面态的能级位于禁带中,起到产生中心的作用.根据Shockley-Read-Hall理论^[10],表面产生率 G 由下式给出:

$$G(E_{it}) = \sigma_n \sigma_p v_{th} D_{it}(E_{it}) n_i \times \{ \sigma_n \exp[(E_{it} - E_i)/kT] + \sigma_p \exp[-(E_{it} - E_i)/kT] \}^{-1}, \quad (1)$$

式中, $G(E_{it})$ 为表面产生率; σ_n, σ_p 分别为电子和空穴的俘获截面; v_{th} 为载流子速率; D_{it} 为界面态密度; E_{it} 为界面态能级; n_i 为本征载流子浓度; E_i 为本征费米能级; k 是玻尔兹曼常数; T 是热力学温度.

表面产生电流密度包括位于禁带中的所有界面态能级的贡献,在禁带中的界面态能级与能量有关,可在整个禁带中积分得到表面产生电流密度^[11]:

$$J_{\text{surface}} = \int_{E_V}^{E_C} qG(E_{it})dE_{it}$$

$$= \frac{qn_i}{2} (\sigma_n \sigma_p)^{1/2} v_{th} D_{it} \pi kT, \quad (2)$$

式中, J_{surface} 为表面产生电流密度, E_C 为导带底能级, E_V 为价带顶能级, q 为电子电荷.

定义 s_e 为表面有效产生速度,并由下式表示:

$$s_e = \frac{1}{\tau_s} = \frac{(\sigma_n \sigma_p)^{1/2} v_{th} D_{it} \pi kT}{2}, \quad (3)$$

式中, τ_s 为表面载流子的寿命.因此(2)式可以简化成

$$J_{\text{surface}} = \frac{qn_i}{\tau_s} = qs_e n_i. \quad (4)$$

界面态位于靠近硅和二氧化硅界面一至两个原子键的距离(约0.5 nm)范围内,可以较快地与硅导带和价带交换电荷,因此辐射感生界面态增加了表面产生中心密度,促进了电子通过热运动由价带跃迁到导带,导致表面有效产生速度 s_e 增大^[12-14],由(4)式可知 J_{surface} 将增大.

另一方面LOCOS隔离氧化物中由于辐射感生的氧化物陷阱电荷带正电,在光电二极管PN结边缘形成一个表面厚度为 Δx 的耗尽层(图4(b)),当

它和PN结耗尽区连在一起时便扩大了总的耗尽区体积,增加了单位时间在耗尽区内载流子总的产生率,这也将导致 J_{surface} 增大.

位移效应在像素单元体耗尽区中产生大量的体缺陷(图4(b)),这些体缺陷在耗尽区中形成新的产生-复合中心,促进了电子-空穴对的产生,使CMOS APS体暗信号增大.由Shockley-Read-Hall理论可知,耗尽区的产生率^[10]可由下式给出:

$$G(E_t) = \sigma_n \sigma_p v_{th} N_t n_i \times \{ \sigma_n \exp[(E_t - E_i)/kT] + \sigma_p \exp[-(E_t - E_i)/kT] \}^{-1}, \quad (5)$$

式中, $G(E_t)$ 为耗尽区的产生率, E_t 为缺陷能级, N_t 为体缺陷密度. 从(5)式可以看出,产生率以指数的形式依赖于缺陷能级 E_t , 当 $E_t = E_i$, 即位于禁带中心时其值最大,因此产生电流大部分来自位于禁带中心的缺陷的贡献. 耗尽区中载流子的有效产生寿命 $\tau_g = \frac{\sigma_n + \sigma_p}{\sigma_p \sigma_p} \frac{1}{v_{th} N_t}$, 当 $E_t = E_i$ 时, (5)式可简化为

$$G = \frac{n_i}{\tau_g}. \quad (6)$$

则体暗电流密度(单位为nA/cm²)可由下式给出^[11]:

$$J_{\text{generation}} = \int_0^W qGdx \approx qGW = \frac{qn_i W}{\tau_g}, \quad (7)$$

式中, $J_{\text{generation}}$ 为体暗电流密度, W 为耗尽区宽度.

质子辐射引起的位移效应在像素单元体耗尽区内产生大量的体缺陷,这些缺陷能级在禁带中起到产生-复合中心的作用,使耗尽区载流子的产生寿命 τ_g 显著减小,由(7)式可知,体暗流将显著增大.

3.2 分离电离效应与位移效应的理论模型

质子辐射 CMOS APS 既产生电离效应又产生位移效应. 为了进一步研究暗信号退化的辐射损伤机理,分离出两种效应对暗信号增大的贡献,确定 CMOS APS 暗信号退化的来源,运用 MULASSIS 模拟计算了 10 MeV 质子辐射器件后,在器件内部沉积的电离损伤剂量和位移损伤剂量. MULASSIS 是运用 Geant4 工具包模拟空间粒子的运动,其原理是运用蒙特卡罗方法模拟跟踪一大批入射粒子的运动,粒子的位置、能量损失以及次级粒子的各

种参数都在跟踪过程中存储下来,最后得到各种所需物理量的期望值和相应的统计误差, MULASSIS 程序更好地处理了粒子与屏蔽材料互相作用产生的次级粒子^[15]. 图5给出了 CMOS APS 像素单元各层的简化模型,各层参数的典型值如表1所列.



图5 CMOS APS 像素单元各层的简化模型

Fig. 5. Simple model of each layer of CMOS APS pixel unit.

表1 像素单元各层的材料和厚度

Table 1. Material and thickness of each layer of pixel unit.

层数	材料	典型厚度/nm
第一层	原硅酸四乙酯	1000
第二层	SiO ₂	12.5
第三层	原硅酸四乙酯	1000
第四层	N型硅	2700
第五层	P型硅	5000

考虑到北京大学质子加速器在真空辐射靶室前增加了束流磁扫描装置,可在 3 cm × 14 cm 面积内均匀辐射,因此在仿真计算时质子入射采用平行入射,物理作用模型选用 St-em(标准电磁相互作用). 以 1 万个质子为一份,模拟了 100 万个质子入射 CMOS APS,模拟计算了不同注量下 10 MeV 质子在器件敏感层沉积的电离损伤剂量和位移损伤剂量(电离效应的敏感层在氧化层中,位移效应敏感层在体硅中),结果如表2所列.

表2 不同注量下器件敏感层沉积的电离损伤剂量和位移损伤剂量

Table 2. Ionization damage dose and displacement damage dose in sensitive layer after different proton fluence deposition.

注量/p·cm ⁻²	电离损伤剂量/rad	位移损伤剂量/MeV·g ⁻¹
2 × 10 ¹⁰	1.11 × 10 ⁴	1.58 × 10 ⁸
5 × 10 ¹⁰	2.78 × 10 ⁴	3.95 × 10 ⁸
7 × 10 ¹⁰	3.9 × 10 ⁴	5.53 × 10 ⁸
10 × 10 ¹⁰	5.569 × 10 ⁴	7.895 × 10 ⁸

大量试验表明质子和 γ 引起的电离效应具有等效性,因此可以用 γ 辐射引起的电离效应分离出

质子辐射引起的电离效应^[16]. 将本次试验结果与前期开展的 γ 辐射试验进行对比. 从表2可以看出, 注量为 $10 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$ 时, 在器件敏感层中沉积的电离损伤剂量约为55.7 krad, 因此在与 γ 试验数据对比时选用总剂量为50 krad. 图6给出了两种粒子辐射下暗信号的退化情况.

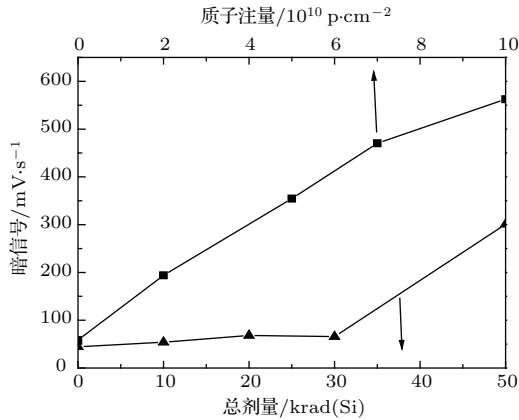


图6 质子和 γ 射线辐射下器件暗信号的退化情况
Fig. 6. Variation of dark signal of CMOS APS with proton and γ irradiation.

从图6可以看出, γ 射线辐射后器件暗信号的退化程度占质子辐射的53%. 因此, 我们可以粗略地认为质子辐射器件引起的表面暗信号增大对整个器件暗信号退化的贡献约占一半.

3.3 高温退火试验对理论模型的验证

为了验证上述理论模型的正确性, 在辐射试验结束后, 对器件进行了退火效应研究. 图7给出了器件在室温条件下和150 °C高温条件下暗信号随退火时间的变化. 从图7可以看出, 在室温退火前期, 暗信号有一定程度的恢复, 随着室温退火时间的延长, 暗信号不再变化. 在室温退火2个月后, 对器件进行了45 d的150 °C高温退火, 从图7可以看出, 整个退火过程中暗信号相对于刚辐射结束时恢

复了48.8%. 室温退火过程中, 暗信号恢复较小, 分析认为在表面暗信号退化中, 氧化物陷阱电荷引起的暗信号增大所占比例较小, 大部分退化来自于界面态的贡献.

质子辐射诱发的电离效应表现为在栅氧化物和LOCOS隔离氧化物中产生氧化物陷阱电荷, 在Si-SiO₂界面处产生界面态. 辐射感生的这些氧化物陷阱电荷和界面态的退火与温度有较强的依赖关系. 研究发现, 氧化物陷阱电荷的产生速度很快并且不稳定, 在室温下可退火, 在加温条件下退火速度更快. 与此相反, 界面态的产生和退火与温度有较强的依赖关系, 它随器件的工艺、时间及陷阱密度的不同而变化. 文献^[17]报道指出, 界面态在室温条件下较为稳定, 当温度达到175 °C时将全面退火; 文献^[18]报道指出, 由于工艺的不同, 界面态在温度低于100 °C时也会发生退火. 为了确定该国产工艺器件界面态的退火温度, 对前期开展的 γ 辐射试验样品进行了45 d的150 °C高温退火, 退火数据显示暗信号恢复了92%, 这表明大部分电离辐射感生缺陷在150 °C高温下因热激发而退火.

质子辐射诱发的位移效应主要通过弹性碰撞过程(包括卢瑟福散射和核弹性散射)将能量传递给材料, 晶格原子一旦获得大于位移损伤阈能的足够能量后, 就会使该初级反冲原子离开原位在晶格中移动, 成为晶格中的间隙原子, 空缺原子的晶格称为空位, 间隙原子和空位形成Frenkel缺陷对, 称之为点缺陷, 如果初级反冲原子具有两倍以上位移损伤阈能, 那么在它停下来之前能使第二个原子位移, 形成双空位缺陷, 当初级反冲原子的能量更高时, 产生级联缺陷, 这些缺陷部分被复合, 部分在体内迁移, 与其他杂质、缺陷、掺杂原子形成稳定的缺陷团^[19,20], 这些体缺陷非常稳定, 150 °C引起的退火可以忽略不计.

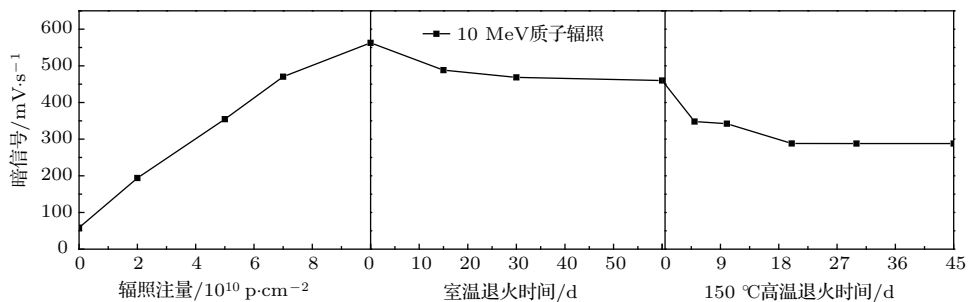


图7 暗信号随室温退火时间和150 °C高温退火时间的变化

Fig. 7. Variation of dark signal of CMOS APS with different annealing time at room temperature and 150 °C.

综合以上分析可知, 经过 150 °C 高温退火后电离效应大部分已退火, 而位移效应没有发生退火. 在整个退火试验中, 暗信号较辐射结束初期恢复了 48.8%, 因此可以认为电离效应导致表面暗信号增大部分约占整个暗信号退化的一半, 这与运用上一节分离两种效应的理论模型得出的结果符合得较好.

4 结 论

10 MeV 质子辐射器件后, CMOS APS 的暗信号显著增大, 本文分析认为暗信号退化主要原因是: 1) 通过电离辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面态引起表面暗信号增大; 2) 通过位移效应诱发的体缺陷在耗尽层中充当载流子产生中心使体暗信号增大. 通过与 γ 辐射试验数据对比, 结合器件结构和工艺参数, 提出了分离质子辐射引起的电离效应和位移效应的方法, 并初步建立了该方法的理论模型. 通过高温退火试验验证了该理论模型的正确性. 由于退火试验中电离损伤没有彻底退火, 因此该理论模型忽略了少量尚未退火的电离损伤的影响. 下一步将通过器件辐射效应仿真技术量化分离辐射导致的电离效应和位移效应, 进一步完善该理论模型.

参考文献

- [1] Dai S W, Jia Y Z, Zhang B M, Wu J, Sun H X, Liu E H, Wei J Y, Chen B, Huang C N, Xue C B, Yang J F, Fang G Y, Wang J Y, Wang H Y, An J S 2014 *Sci. China Technol. Sin.* **44** 361 (in Chinese) [代树武, 贾瑛卓, 张宝明, 吴季, 孙辉先, 刘恩海, 魏建彦, 陈波, 黄长宁, 薛长斌, 杨建峰, 方广有, 王建宇, 王焕玉, 安军社 2014 中国科学技术科学 **44** 361]
- [2] Wang B, Li Y D, Guo Q, Liu C J, Wen L, Ma L Y, Sun J, Wang H J, Cong Z C, Ma W Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 056102 (in Chinese) [汪波, 李豫东, 郭旗, 刘昌举, 文林, 玛丽娅, 孙静, 王海娇, 丛志超, 马武英 2014 物理学报 **63** 056102]
- [3] Zhang X F, Li Y D, Guo Q, Luo M C, He C F, Yu X, Shen Z H, Zhang X Y, Deng W, Wu Z X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 076106 (in Chinese) [张孝富, 李豫东, 郭旗, 罗木昌, 何承发, 于新, 申志辉, 张兴尧, 邓伟, 吴正新 2013 物理学报 **62** 076106]
- [4] Holmes S, Adams L 1993 *Handbook of Radiation Effects* (New York: Oxford University Press) pp16–45
- [5] Goiffon V, Magnan P, Saint O, Bernard F, Rolland G 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3494
- [6] Bogaerts J, Dierickx B, Mertens R 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 1513
- [7] Beaumel M, Herve D, van Aken D 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 2056
- [8] Virmontois C, Goiffon V, Magnan P, Girard S, Saint O, Petit S, Rolland G, Bardoux A 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 927
- [9] Li Y D, Wang B, Guo Q, Ma L Y, Ren J W 2013 *Opt. Precision Eng.* **21** 42 (in Chinese) [李豫东, 汪波, 郭旗, 玛丽娅, 任建伟 2013 光学 精密工程 **21** 42]
- [10] Sze S, Ng K 2007 *Physics of Semiconductor Devices* (New York: John Wiley & Sons) pp7–68
- [11] Sze S, Ng K 2007 *Physics of Semiconductor Devices* (New York: John Wiley & Sons) pp80–118
- [12] Gao B, Liu G, Wang L X, Han Z S, Zhang Y F, Wang C L, Wen J C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 176107 (in Chinese) [高博, 刘刚, 王立新, 韩郑生, 张彦飞, 王春林, 温景超 2012 物理学报 **61** 176107]
- [13] Hopkinson G 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2480
- [14] Bogaerts J, Dierickx B, Meynants G, Uwaerts D 2003 *IEEE Trans. Elec. Dev.* **50** 84
- [15] Zhao S, Wang S J 2010 *Microcomputer Inform.* **34** 193 (in Chinese) [赵爽, 王世金 2010 微计算机信息 **34** 193]
- [16] Goiffon V, Magnan P, Saint-Pé O, Bernard F, Rolland G 2009 *Nucl. Instrum. Meth. A* **610** 225
- [17] Boch J, Saigne F, Schrimpf R, Fleetwood D, Cizmarik R, Zander D 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 2903
- [18] Goiffon V, Virmontois C, Magnan P, Girard S, Paillet P 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3087
- [19] Adamec V, Calderwood J 1975 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **8** 551
- [20] Srour J, Marshall C, Marshall P 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 653

Dark signal degradation in proton-irradiated complementary metal oxide semiconductor active pixel sensor*

Wang Bo¹⁾²⁾ Li Yu-Dong¹⁾ Guo Qi^{1)†} Liu Chang-Ju³⁾ Wen Lin¹⁾²⁾ Ren Di-Yuan¹⁾
Zeng Jun-Zhe¹⁾²⁾ Ma Li-Ya¹⁾²⁾

1) (*Key Laboratory of Functional Materials and Devices under Special Environments, CAS, Xinjiang Key Laboratory of Electric Information Materials and Devices, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China*)

(Received 30 July 2014; revised manuscript received 7 November 2014)

Abstract

In this paper, we discuss the dark signal increase in complementary metal oxide semiconductor (CMOS) active pixel sensor due to proton-induced damage, and present the basic mechanism that may cause failure. When the fluence of protons reaches a predetermined point, the change of dark signal of the device is measured offline. The experimental result shows that as the fluence of protons increases, mean dark signal increases rapidly. The main reason for dark signal degradation is: 1) the ionizing damage causes a build-up of oxide trapped charge and interface state at the Si-SiO₂ interface. The creation of the interface traps (with energy levels within the silicon bandgap), which can communicate with carriers in the silicon, gives rise to the thermal generation of the electron-hole pairs and, hence increasing the dark signals; 2) when protons pass through the sensor, there is a possibility of collisions with silicon lattice atoms in the bulk silicon. In these collisions, atoms can be displaced from their lattice sites and defects are formed. These resulting defects can give rise to states with energy levels within the forbidden bandgap. The increasing of dark signal is therefore one of the prominent consequences of bulk displacement. We use multi-layered shielding simulation software to calculate the ionization damage dose and displacement damage dose. Based on the comparison of the test data of gamma radiation, combined with the device structure and process parameters, a theoretical model for separation proton-induced ionization and displacement damage effects on CMOS active pixel is constructed, and the degradation mechanism of the mean dark signal is investigated. The result shows that the contribution of ionization effect induced surface dark signal and the contribution of displacement damage induced bulk dark signal to dark signal degradation of the whole device are roughly equal in this domestic CMOS active pixel.

Keywords: complementary metal oxide semiconductor active pixel sensor, dark signal, proton radiation, displacement effect

PACS: 42.88.+h, 85.60.Dw, 61.72.J-, 61.80.-x

DOI: 10.7498/aps.64.084209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11005152).

† Corresponding author. E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn