

文章编号: 2095-4980(2022)09-0915-07

不同偏置下 CCD 器件 γ 射线及质子辐射研究

杨智康^{1,2}, 文林^{*1}, 周东¹, 李豫东^{*1}, 冯婕¹, 郭旗^{1,2}

(1. 中国科学院新疆理化技术研究所, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 电荷耦合器件(CCD)是用于空间光电系统可见光成像的图像传感器, 在空间应用环境下受辐射效应作用导致 CCD 性能退化甚至失效。对于 CCD 空间辐射效应的地面模拟试验研究, 辐照试验中 CCD 采用合适的偏置条件是分析其空间辐射损伤的必要措施。由于 CCD 对质子辐照导致的电离总剂量效应和位移损伤效应均非常敏感, 因此针对 CCD 空间应用面临的电离总剂量效应和位移损伤效应威胁, 开展不同辐照偏置下 CCD 的辐射效应及损伤机理研究。针对一款国产埋沟 CCD 器件, 开展不同偏置条件下的 γ 射线和质子辐照试验, 获得了 CCD 的暗电流、光谱响应等辐射敏感参数的电离总剂量效应, 位移损伤效应退化规律以及辐照偏置对 CCD 辐射效应的影响机制。研究表明, γ 射线辐照下 CCD 的偏置产生重要影响, 质子辐照下没有明显的偏置效应。根据 CCD 结构和辐照后的退火试验结果, 对 CCD 的辐射效应损伤机理进行分析。

关键词: 电荷耦合器件; 电离总剂量效应; 位移损伤效应; 偏置条件

中图分类号: TN386.5

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022009

Damage mechanism of γ -ray and proton radiation effects of CCD under different bias conditions

YANG Zhikang^{1,2}, WEN Lin^{*1}, ZHOU Dong¹, LI Yudong^{*1}, FENG Jie¹, GUO Qi^{1,2}

(1.The Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang 830011, China;
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Charge-Coupled Devices(CCD) is an image sensor used for visible light imaging in space photoelectric systems. For the ground simulation test of the space radiation effect of CCD, it is necessary to use appropriate bias conditions to analyze the space radiation damage of CCD. Because CCD is very sensitive to the total ionizing dose effect and displacement effect, it is of great significance to study the radiation effect and damage mechanism of CCD under different bias conditions because of the threat of the damaging effect faced by CCD space application. In this paper, γ -ray, and proton irradiation experiments are carried out on a buried channel CCD device under different bias conditions. The degradation rules of the total ionizing dose and displacement damage about radiation-sensitive parameters such as dark current and spectral response of CCD are obtained; as well as the damage mechanism of irradiation bias on the radiation effect of CCD. The results show that the bias of CCD under γ -ray irradiation has an important effect, but there is no obvious effect under proton irradiation. Meanwhile, the radiation damage mechanism of CCD is analyzed according to the structure of CCD and the results of the annealing test after irradiation.

Keywords: Charge-Coupled Devices; total ionizing dose effect; displacement damage effect; bias conditions

电荷耦合器件(CCD)是一种固态光学成像器件, 由于其高灵敏度及动态范围, 自从被发明以来, 在成像器件

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-02-25

基金项目: 中科院西部之光计划资助项目(2020-XBQNXX-004); 国家自然科学基金资助项目(12175308); 中国科学院青年创新促进会资助项目(20211437)

*通信作者: 文林 email:wenlin@ms.xjb.ac.cn; 李豫东 email:lydong@ms.xjb.ac.cn

领域一直占据非常重要的地位,在空间光学领域也得到了广泛的应用,在气象预报、天文观测、导航等空间应用方面发挥了重要作用^[1-3]。CCD空间应用中面临着各种高能粒子组成的辐射环境的威胁,由于CCD对光信号的高度敏感性,其对高能粒子导致的辐射效应非常敏感^[4-5]。高能粒子导致电离总剂量效应和位移损伤效应统称为累积辐射效应。由于累积辐射效应随时间累积,CCD在空间辐射环境中工作时间越长,辐照导致的性能退化越严重。因此,作为长期在轨工作必须解决的问题,CCD的累积剂量辐射效应研究一直受到广泛关注。

从20世纪70年代开始,国外研究人员已经开始关注CCD的空间辐射效应及其损伤机理。早期的CCD辐射效应研究工作主要集中在中子和 γ 射线对线列和小面阵CCD造成的损伤^[6]。随着CCD制造工艺技术的发展,面阵CCD在航天任务中的应用更加广泛^[7-8],CCD的空间位移损伤效应也更加突出,由质子和中子辐照导致的CCD位移损伤对器件性能的影响^[9-15]成为研究的热点,并且一直持续到现在。其中,Janesick等报道了科学级CCD的位移损伤和电离效应,并对2种辐射效应的退化机制进行了研究^[10];汪波等报道了中子辐照下CCD器件暗信号等关键参数退化显著,并分析了敏感参数的退化机制^[13]。虽然国内外对CCD辐射效应有很多的文献报道,但目前还没有提出具体的CCD空间辐射效应评估方法,其中辐照过程中针对CCD采用的辐照偏置条件是关键问题之一。CCD是一种基于金属氧化物半导体(Metal Oxide Semiconductor, MOS)工艺的大规模集成电路,已有的针对MOS器件的辐射效应研究表明,辐照偏置对MOS器件电离总剂量效应产生重要影响。因此辐照试验中CCD采用合适的偏置条件是准确评估其空间辐射损伤的必要措施。由于空间辐射环境中质子占有相当大的比重,而CCD对质子辐照导致的电离总剂量效应和位移损伤效应均非常敏感,针对CCD空间应用面临的电离总剂量效应和位移损伤效应威胁,开展不同辐照偏置下CCD的辐射效应及损伤机理研究,建立具体可行的CCD辐射效应评估方法。本文针对一款国产埋沟CCD器件,开展不同偏置条件下的 γ 射线和质子辐照试验,结合CCD器件的退火结果,获得CCD辐射敏感参数暗电流、光谱响应的电离总剂量效应、位移损伤效应退化规律,以及辐照偏置对CCD辐射效应的影响机制,对于CCD空间辐射效应地面模拟试验中辐照偏置的选择提供理论及试验支撑。

1 辐照试验

试验样品为一款国产埋沟工艺帧转移CCD。CCD像素阵列 64×64 pixels,像元尺寸为 $48 \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$ 。CCD栅介质采用 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 复合栅结构,其中 Si_3N_4 层厚度为60 nm, SiO_2 层为20 nm;N型埋沟的厚度为 $1 \mu\text{m}$ 。CCD结构和工作原理见图1。

CCD的累积辐射效应包括电离总剂量效应和位移损伤效应。电离总剂量效应采用 ^{60}Co - γ 射线辐照试验进行研究, ^{60}Co - γ 射线辐照试验在中国科学院新疆理化技术研究所的钴源辐照装置上开展。位移损伤效应采用3 MeV质子辐照试验进行研究,质子辐照试验在北京大学重离子物理研究所的EN串联静电加速器装置上开展。

为了考察不同辐照偏置对CCD累积辐射效应的影响,辐照试验中采用了2种不同的辐照偏置状态:静态偏置辐照是指除给CCD电源管脚提供工作电压外,其余驱动时序管脚均接固定偏压(偏压值选择驱动脉冲的高电位);而不加电辐照是指CCD的所有管脚全部短接并接地。

试验样品按辐照粒子、辐照偏置条件共分为4组,每组一只器件。试验样品编号以及辐照试验条件见表1。

表1 CCD辐照试验条件

Table1 Irradiation test conditions

device number	particle types	irradiation bias	irradiation dose/fluence
1#	^{60}Co - γ ray	biased	50 rad(Si)/s
2#	^{60}Co - γ ray	unbiased	50 rad(Si)/s
3#	3 MeV proton	biased	$5 \times 10^7 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
4#	3 MeV proton	unbiased	$5 \times 10^7 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

CCD辐照试验中测试的参数主要是暗电流和光谱响应,CCD参数测试装置原理如图2所示。对于可见光成像器件CCD,除因光照产生的电子外,在没有光照的条件下,CCD内也会因热激发产生电子。暗电流是指在无

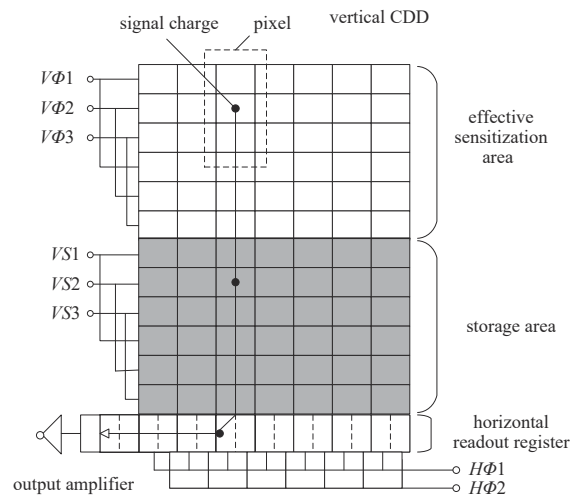


Fig.1 Schematic of CCD structure and working principle

图1 CCD结构及工作原理示意图

光照条件下，CCD 的输出信号随积分时间的线性增加。光谱响应是指可见光图像传感器在一定波长范围内，对每个特定波长的光的输出信号随波长的变化。

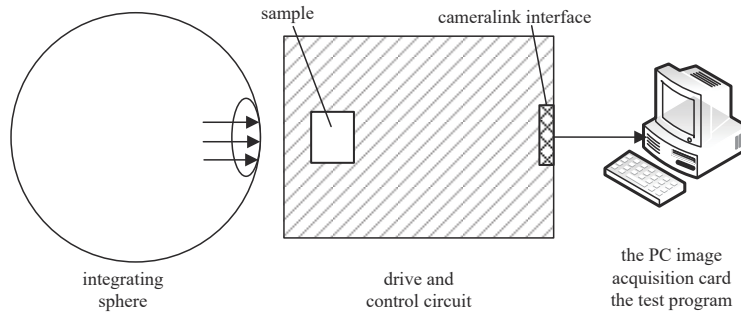


Fig.2 Principle diagram of CCD parameter test device
图 2 CCD 参数测试装置原理图

辐照试验完成后，对 CCD 进行了室温退火和 100 °C 高温退火试验，根据试验结果分析了 CCD 的累积辐射效应损伤机理。

2 试验结果与分析

2.1 辐照偏置对 CCD 电离总剂量效应的影响

在静态偏置、不加电 2 种辐照偏置条件下，采用 50 rad(Si)/s 的剂量率进行 CCD 的 ^{60}Co - γ 射线辐照试验，获得暗电流随辐照累积剂量的变化。从图 3 中可以看出，不同偏置条件下 CCD 表现出明显的差异，静态偏置辐照的 CCD，其暗电流性能在辐照到 10 krad(Si)后即急剧退化，而不加电辐照的 CCD 辐照到 100 krad(Si)时，暗电流也没有明显退化。

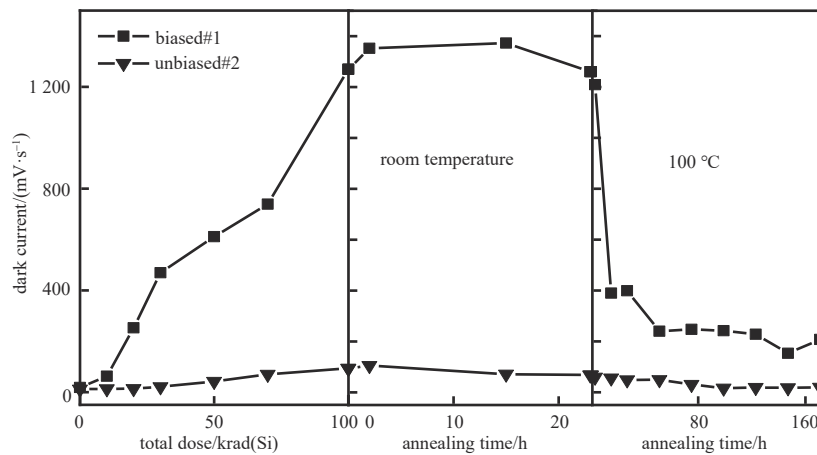


Fig.3 Dark current versus the total doses and annealing time under different bias conditions
图 3 不同偏置 CCD 的暗电流在 ^{60}Co - γ 射线辐照及辐照后退火时的变化

在辐照后的室温退火期间，静态偏置辐照器件在辐照时暗电流的严重退化情况没有很大的恢复；而在 100 °C 的高温退火期间迅速恢复，如图 3 所示。由于氧化物陷阱电荷在常温时会快速退火^[16-17]，而界面态退火则需要较高的温度^[18-19]，因此 CCD 暗电流的这一变化趋势可归结于界面态对 CCD 表面暗电流的影响：室温退火对界面态的恢复没有大的影响，而高温退火将导致界面态迅速恢复。以界面态的产生与退化规律可以较好地解释上述试验现象。辐照中在 Si-SiO₂ 界面处快速产生的界面态比较有限，并取决于界面钝化技术等具体的器件工艺，更多的是由空穴、可动离子迁移缓慢产生的界面态。空穴与可动离子的迁移过程主要受表面电场与内部电势的影响。与不加电辐照相比，静态偏置下空穴与可动离子向界面处的迁移速率高出几个数量级。所以静态偏置辐照下，暗电流的漂移也更大。

γ 射线对半导体器件造成的辐射损伤主要是电离损伤，电离辐照会在这些 SiO₂ 绝缘层中产生电子-空穴对，因此受 γ 射线辐照的影响将引入大量的氧化物陷阱电荷。一部分电子-空穴对最终变成氧化物介质层中的陷阱电荷，另一部分则会在栅极电场的作用下被转移到 Si-SiO₂ 界面，形成界面态，引起 CCD 表面暗电流增加。界面态

的形成过程可以用 Saks 模型解释^[20]：

CCD 制作过程中在栅氧化层内引入了 H，H 在栅氧化层内以不稳定的氢化合物≡Si-H 或≡Si-OH 形式存在，这 2 种不稳定的状态容易与电子-空穴对作用，释放不带电的游离 H⁰ 原子：



H⁰ 俘获空穴形成带正电的 H⁺。对于 N 沟 CCD，栅极所加偏置为正电压，在电场作用下 H⁺ 漂移到 Si-SiO₂ 界面形成界面态：



式中：e_{Si}⁻ 为从衬底隧穿到界面处的电子；≡Si- 为界面态。

界面态能级在 Si 带隙中，作为 CCD 表面暗电流产生的中心，导致表面暗电流增加，界面态导致暗电流密度 J_{DS} 增加可用式(3)描述^[6]：

$$J_{\text{DS}} = \frac{qn_i}{2} (\pi k T \sigma_n v_{\text{th}}) N_{\text{ss}} \quad (3)$$

式中：q 为电子电荷；n_i 为本征载流子浓度；k 为 Boltzmann 常数；T 为绝对温度；σ_n 为电子俘获截面；v_{th} 为电子平均热速度；N_{ss} 为界面态数量。

即使在辐照时，界面态的积累也是一个相对缓慢的过程，例如氢通过氧化物的扩散过程相比电子迁移是十分缓慢的过程，因此界面态的增长似乎是一个动态平衡的过程，在辐照期间界面态的增加与辐照剂量总体呈线性关系^[14]。

在 ⁶⁰Co-γ 射线辐照后，CCD 暗电流增加在常温下会保持几个星期或数月，100 °C 高温退火能加速这一过程，一般 100 °C 高温退火时间为 168 h，但是事实上不需要 168 h，24 h 可能已经足够使界面态大量退火^[21]。由于界面态的形成与栅极电压密切相关，因此静态偏置辐照比不加电辐照的 CCD 暗电流增加大得多。

⁶⁰Co-γ 射线辐照形成的缺陷对 CCD 性能的影响主要是：在光电转换区和电荷转移区内氧化物陷阱电荷及 Si-SiO₂ 界面态的影响，以及输出电路内氧化物陷阱电荷和界面态的影响。对于 CCD 光谱响应，由于主要的影响因素出现在光电效应产生信号电荷的过程中，一旦信号电荷包形成，则在 CCD 内部完成的是电荷包的转移和读出，与 CCD 吸收光的光谱没有关系，因此在 ⁶⁰Co-γ 射线辐照时，对 CCD 光谱响应有影响的是光电转换区 MOS 结构内由于辐照而产生的电离效应感生缺陷。

根据电离效应损伤机理，界面态对 CCD 光敏感区光谱响应的方式为：由于氧化物陷阱电荷和 Si-SiO₂ 界面态大量积累，影响像元 MOS 结构栅极电压在体 Si 内形成的电场分布，导致耗尽区深度增大，因此 CCD 对红光的响应增加。同时由于界面态的积累，埋沟 CCD 像元区 n 型埋层的厚度降低，即体 Si 内发生光电效应的区域向界面处延伸，导致穿透能力弱的短波长的蓝光吸收能力增加，即蓝光响应增加。对于波长在蓝光与红光之间的其他波长的光，影响较小。由于电离效应感生电场的叠加，整体来说 ⁶⁰Co-γ 射线辐照对 CCD 光谱响应的影响对所有波长的光来说近似是均匀的，即光谱响应曲线表现为整体变化趋势一致。图 4 和图 5 中静态偏置和不加电下 ⁶⁰Co-γ 射线辐照导致 CCD 光谱响应的变化结果印证了上述分析。

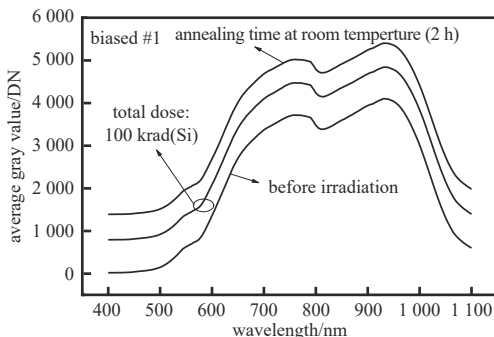


Fig.4 Spectral response of ⁶⁰Co-γ irradiated CCD of #1
图4 ⁶⁰Co-γ 辐照前后静态偏置 CCD 的#1 光谱响应变化

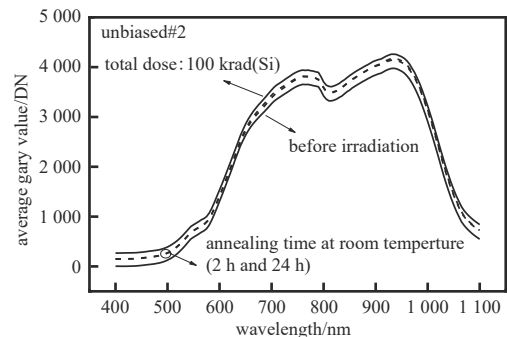


Fig.5 Spectral response of ⁶⁰Co-γ irradiated CCD of #2
图5 ⁶⁰Co-γ 辐照前后不加电 CCD #2 的光谱响应变化

图 4 和图 5 中，2 种偏置条件下 CCD 光谱响应曲线在辐照及常温退火后均表现为整体变化趋势一致，变化幅

度相近。2 条曲线在常温退火期间表现出不同之处：不加电 CCD 光谱响应在常温退火期间恢复到更接近初始值，静态偏置 CCD 光谱响应在常温退火期间表现出后损伤效应。出现这一现象的原因是电离效应感生缺陷退火行为的差异。对于不加电 CCD，由于没有电场的额外作用，辐照后很少有新的界面态生成，且辐照时产生氧化物陷阱电荷逐渐退火；而对于静态偏置 CCD，由于辐照后常温退火期间 CCD 仍施加静态偏置，正电压偏置形成的电场导致新的界面态生成，即界面态在辐照后常温退火期间继续生长，导致 CCD 光谱响应进一步退化，即出现了后损伤效应。

2.2 辐照偏置对 CCD 位移损伤效应的影响

在 3 MeV 质子辐照条件下，分别采用不同偏置条件(静态偏置和不加电)进行了 CCD 辐照试验。为了便于将质子辐照试验结果与 ^{60}Co - γ 射线辐照试验结果进行比较，质子辐照剂量采用等效吸收剂量进行标注。CCD 暗电流随质子辐照剂量的变化关系如图 6 所示，从图中可以看出，随着辐照剂量的增加，暗电流线性增大。3 MeV 质子辐照时，静态偏置和不加电状态下，CCD 暗电流变化趋势及变化量均一致，且在辐照后的常温退火期间也没有表现出明显的差异。这一结果表明，在 3 MeV 质子辐照时，CCD 暗电流退化与偏置的依赖关系不明显。

由于质子辐照同时产生电离损伤与位移损伤，电离损伤导致的界面态数量的变化量与 CCD 表面暗电流的退化呈比例关系，若引入比例因子 k_{it} ，即：

$$\Delta J_{\text{SDS}} = k_{it} N_{it} \tag{4}$$

式中： ΔJ_{SDS} 为表面暗电流密度变化量； N_{it} 为界面态数量。如图 6 所示，由于暗电流线性增大，因此若质子导致的位移损伤与 CCD 体暗电流之间存在一定的关系，从图 6 和方程(4)可知，3 MeV 质子辐照导致的位移损伤与 CCD 体暗电流的变化量也呈比例关系，存在比例因子 k_{dd} ：

$$\Delta J_{\text{BDS}} = k_{dd} N_{\text{DD}} \tag{5}$$

式中： ΔJ_{BDS} 为体暗电流密度变化量； N_{DD} 为位移损伤缺陷数目。关于质子辐照导致的 CCD 暗电流退化的机理将在后面的内容中进行分析。

质子辐照在 CCD 内同时产生电离损伤和位移损伤，电离损伤引起的 CCD 光谱响应退化与 ^{60}Co - γ 射线辐照相似，而位移损伤同样会引起光谱响应的退化。其中位移损伤对光谱响应的作用机理是由于引起的 CCD 像元-像元内晶格缺陷的差别。由于试验条件的限制，取辐照后室温退火 143 h(#3)和 136 h(#4)的测试曲线代表质子辐照试验后的数据，如图 7 和图 8 所示。可以发现，质子辐照导致的 CCD 光谱响应退化情况与受辐照时的偏置的关系并不明显，2 种偏置条件下的 CCD 光谱响应与辐照前相比均表现出一定的退化现象，且退化的幅度相近。

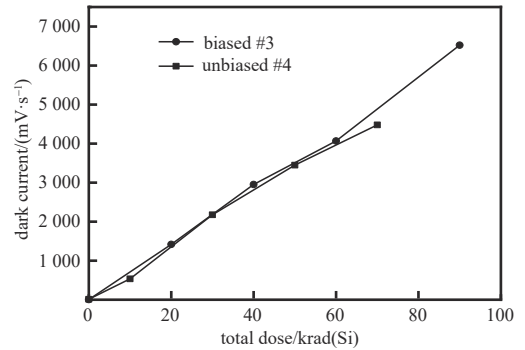


Fig.6 Dark current of 3 MeV proton incident CCD versus the total doses

图 6 3 MeV 质子入射 CCD 的暗电流随累积剂量的变化

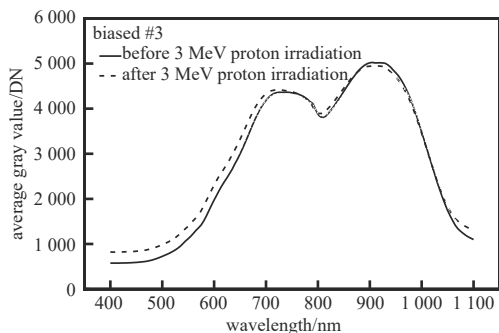


Fig.7 Spectral response of #3 before and after 3 MeV proton irradiation

图 7 3 MeV 质子辐照前后静态偏置#3 CCD 的光谱响应变化

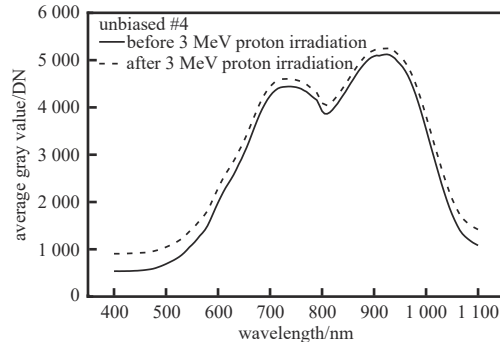


Fig.8 Spectral response of #4 before and after 3 MeV proton irradiation

图 8 3 MeV 质子辐照前后不加电#4 CCD 的光谱响应变化

2.3 偏置对 CCD 累积辐射效应的影响机制

从 ^{60}Co - γ 射线辐照 CCD 暗电流退化规律可以看出，辐照时暗电流持续增加，室温退火阶段先少量增加，而

后开始恢复, 100 °C退火阶段暗电流有显著恢复。由于电离损伤感生的氧化物陷阱电荷在室温即可发生退火, 而界面态需在 100 °C以上快速退火, 因此结合 CCD 暗电流试验结果曲线得出结论: 暗电流的变化可能主要受界面态陷阱电荷的影响。对于埋沟工艺 CCD, 其工作原理和暗电流产生原因表明暗电流主要由界面态产生, 而氧化物陷阱电荷影响暗电流主要通过降低局部电势, 使界面态作用于耗尽区, 增加暗电流。

MOS 工艺中的栅极氧化层的好坏直接决定了器件性能, 其工艺过程中尽量减少缺陷, 提高质量, 且厚度较薄。同时, 外加电场对氧化层的作用也明显不同。MOS 结构中, 外电场直接施加在氧化层上, 使较薄的氧化层内形成较强的电场。文献研究指出, MOS 器件辐照过程中不同辐照偏置器件损伤不同。静态偏置条件下器件的表面电势、内部电场是固定的, 电场始终加剧电子与空穴的分离, 削弱复合的作用, 在器件中引入更多的有效辐射感生电荷, 造成更大程度的辐射损伤。不加电辐照时, 栅极中没有电压, 因此大部分的电子空穴对会在产生位置处发生复合, 削弱了辐射损伤对器件参数的退化, 辐照过程中不同偏置条件器件辐射损伤程度不同。

氧化层厚度对分离结果的影响非常大。由于基本单元样品氧化层厚度较薄, 与栅氧较厚的器件相比, 辐照后 SiO_2 层里产生的正电荷减小了, 并且界面态更容易生长。此时辐照感生氧化物陷阱电荷的影响较小, 器件主要受界面态的影响较为显著。在 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 复合栅结构中辐照产生电子-空穴对及迁移如图 9 所示。辐照使 Si_3N_4 及 SiO_2 层中均产生大量电子-空穴对, 电子与空穴在 Si_3N_4 中的迁移率非常低, 绝大部分都复合掉了。在 SiO_2 层中空穴迁移至 Si-SiO₂ 界面附近形成陷阱电荷, 相应的电子迁移到 Si_3N_4 - SiO_2 界面处形成电子陷阱, 其中一部分遂穿至 Si_3N_4 层并与其中的空穴复合。

Si_3N_4 - SiO_2 界面处的电子陷阱使得 SiO_2 层中陷阱电荷引起的阈值电压负向漂移量减小。在正向栅偏压下, 标准 SiO_2 栅平带电压的负向漂移远大于复合栅。

由于质子辐照导致暗电流退化分为表面暗电流退化和体暗电流退化两部分, 表面暗电流主要由电离总剂量效应产生的氧化物陷阱电荷和界面态导致, 体暗信号主要由位移损伤效应产生的耗尽区位移损伤缺陷导致, 由于质子辐照导致的 CCD 参数退化对辐照偏置不敏感, 因此质子辐照及退火后的 CCD 暗电流退化主要由位移效应导致。

3 结论

通过 ^{60}Co - γ 射线辐照试验, 获取了不同辐照偏置条件下的参数退化规律。从试验结果可以看出, 对于 ^{60}Co - γ 射线辐照导致的电离总剂量效应, 暗电流和光谱响应明显退化。光谱响应的退化主要表现的是暗电流增加对信号电荷包的影响, 不同波长光的响应差异没有明显表现。CCD 的电离效应敏感参数在不同的辐照偏置条件下表现出了一定的依赖关系, 静态偏置条件下参数退化程度远大于不加电辐照情况。通过质子辐照试验, 获得了不同辐照偏置条件下 CCD 的参数退化规律。辐照试验结果和辐照后的退火试验结果表明, CCD 的暗电流和光谱响应均对质子辐照导致的损伤敏感, 但辐照偏置对 CCD 质子辐照响应没有显著的影响, 表明位移效应可能占据支配性的地位。

由于采用了 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 复合栅工艺, CCD 受电离辐射效应在栅氧化层和界面处感生缺陷的影响减小, 但场氧化物内感生氧化物陷阱电荷产生的场致耗尽层增加了表面暗电流的产生几率, 导致 CCD 暗电流对电离效应的敏感性增强。因此针对场氧化物的加固工艺和结构设计将是首要的 CCD 加固途径。质子辐照产生的体缺陷导致 CCD 暗电流和光谱响应退化, 由于针对体缺陷的有效加固措施难以实现, 但体缺陷对信号电荷的影响与一些时间常数相关, 因此通过 CCD 工作模式的优化, 将能有效降低其位移损伤效应敏感性, 今后针对 CCD 辐射效应研究的后续工作重点关注 CCD 的位移损伤加固方法。

参考文献:

- [1] HUANG Z F, WANG H Y, HAN J T. Quick method of removing smear in astronomical Full-Frame CCD image[J]. Signal Processing, 2010(26):607-611.
- [2] WOLFE M A, GOUDFROOIJ P, BOHLIN R C, et al. Status and performance of the STIS CCD after HST servicing Mission 4 repair[R]. America, Space Telescope Science Institute, 2013. <https://www.stsci.edu/hst/instrumentation/stis>.
- [3] HOLLAND S E, BEBEK C J, DANIELS P J, et al. Technology development for 4 k × 4 k, back-illuminated, fully depleted scientific CCD imagers[C]// IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. [S.l.]: IEEE, 2007:2220-2225.

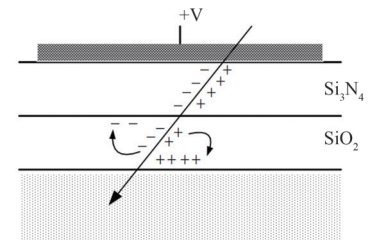


Fig.9 Induced charge and the transport by irradiation in the complex gate structure
图9 辐照在复合栅结构中感生电荷及电荷运输的情况

- [4] PAGANI C. Study of the radiation effects on the Swift-XRT CCD camera in low Earth orbit[D]. British:University of Leicester, 2015.
- [5] TERRAZAS J C,CORCIONE L,LATTANZI M G,et al. Radiation damage effects in space-borne CCD detectors operated in TDI mode[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2017,129(977):075002. doi:10.1088/1538-3873/aa69b9.
- [6] KILLIANY J M. Radiation effects on silicon charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1978,1(4):353-365. doi:10.1109/TCHMT.1978.1135311.
- [7] LARSEN K P,CLARY M C,JANESICK J R. Charge-coupled device television camera for NASA's Galileo mission to Jupiter[J]. Optical Engineering, 1984,23(3):334-342. doi:10.1117/12.7973290.
- [8] RAUGER J T. Sensors for the hubble space telescope wide-field and planetary cameras(1 and 2)[C]// CCDs in Astronomy. San Francisco,CA:[s.n.], 1990:217-230.
- [9] ROUR J R,SHANFIELD Z,HARTMANN R A, et al. Permanent damage introduced by single particles incident on silicon devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1983,30(6):4526-4532. doi:10.1109/23.34503.
- [10] JANESICK J,ELLIOTT T,POOL F. Radiation damage in scientific charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989,36(1):572-578. doi:10.1109/23.34503.
- [11] 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. doi:10.1109/TNS.1986.4334648.
- [12] 文林,李豫东,郭旗,等. 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[J]. 物理学报, 2015,64(2):024220. (WEN Lin,LI Yudong,GUO Qi,et al. Analysis of ionization and displacement effects of charge-coupled devices induced by proton irradiation at scientific level[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(2):024220.) doi:10.7498/aps.64.024220.
- [13] 汪波,李豫东,郭旗,等. 电荷耦合器件中子辐照诱发的位移效应[J]. 发光学报, 2016,37(1):44-49. (WANG Bo,LI Yudong, GUO Qi, et al. Neutron irradiation induced displacement damage effects on charge coupled device[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016,37(1):44-49.) doi:10.3788/fgxb20163701.0044.)
- [14] KILLIANY J M,BAKER W D,SAKS N S, et al. Effects of ionizing radiation on charge-coupled device structures[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1974,21(6):193-200. doi:10.1109/TNS.1974.6498927.
- [15] LI Yudong,LIU Bingkai,WEN Lin,et al. Role of the oxide trapped charges in charge-coupled device ionizing radiation-induced dark signal[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2021(189):1-5. doi:10.1016/j.radphyschem.2021.109722.
- [16] OLDHAM T R,LELIS A J,MCLEAN F B. Spatial dependence of trapped holes determined from tunneling analysis and measured annealing[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007,33(6):1203-1209. doi:10.1109/TNS.1986.4334579.
- [17] MCWHORTER P J,MILLER S L,MILLER W M. Modeling the anneal of radiation-induced trapped holes in a varying thermal environment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1990,37(6):1682-1689. doi:10.1109/23.101177.
- [18] SHANEYFELT M R,SCHWANK J R,FLEETWOOD D M,et al. Annealing behavior of linear bipolar devices with enhanced low-dose-rate sensitivity[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004,51(6):3172-3177. doi:10.1109/TNS.2004.839200.
- [19] RASHKEEV S N,FLEETWOOD D M,SCHRIMPF R D,et al. Effects of hydrogen motion on interface trap formation and annealing[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004,51(6):3158-3165. doi:10.1109/TNS.2004.839202.
- [20] SAKS N S,KLEIN R B,GRISCOM D L. Formation of interface traps in MOSFETs during annealing following low-temperature irradiation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1988,35(6):1234-1240.
- [21] HOPKINSON G R. Radiation-induced dark current increases in CCDs[C]// Radiation and Its Effects on Components and Systems. Saint Malo,France:IEEE, 1993:401-408.

作者简介:

杨智康(1996-),男,在读博士研究生,主要研究方向为光电器件辐射效应与损伤机理. email:yang6921kk@163.com.

文林(1982-),男,博士,研究员,主要研究方向为光电器件辐射效应与损伤机理.

周东(1986-),男,博士,副研究员,主要研究方向为光电材料及成像器件辐射效应.

李豫东(1982-),男,博士,研究员,主要研究方向为星用光电器件、空间光电探测系统的辐射效应与机理、试验评估方法及抗辐射设计技术.

冯婕(1985-),女,博士,副研究员,主要研究方向为光电成像器件辐射效应与损伤机理、光学系统辐射效应.

郭旗(1964-),男,博士,研究员,主要研究方向为电子器件辐射效应.