

质子与中子辐照对电荷耦合器件暗信号参数的影响及其效应分析

曾骏哲 李豫东 文林 何承发 郭旗 汪波 玛丽娅 魏莹 王海娇 武大猷 王帆 周航

Effects of proton and neutron irradiation on dark signal of charge-coupled device

Zeng Jun-Zhe Li Yu-Dong Wen Lin He Cheng-Fa Guo Qi Wang Bo Maria Wei Yin Wang Hai-Jiao Wu Da-You Wang Fan Zhou Hang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 194208 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.194208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 量子阱与体材料的 1 MeV 电子束辐照光致发光谱研究](#)

[Photoluminescence spectra of 1 MeV electron beam irradiated In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP quantum well and bulk materials](#)

物理学报.2015, 64(15): 154217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154217>

[电荷耦合器件在质子辐照下的粒子输运仿真与效应分析](#)

[Particle transport simulation and effect analysis of CCD irradiated by protons](#)

物理学报.2015, 64(11): 114214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114214>

[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](#)

[Dark signal degradation in proton-irradiated complementary metal oxide semiconductor active pixel sensor](#)

物理学报.2015, 64(8): 084209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084209>

[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 spilt oil](#)

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

质子与中子辐照对电荷耦合器件暗信号参数的影响及其效应分析*

曾骏哲¹⁾²⁾ 李豫东¹⁾ 文林^{1)†} 何承发¹⁾ 郭旗¹⁾ 汪波¹⁾²⁾ 玛丽娅¹⁾²⁾
魏莹¹⁾ 王海娇¹⁾²⁾ 武大猷¹⁾²⁾ 王帆¹⁾²⁾ 周航¹⁾²⁾

1) (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,
中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2015年3月24日收到; 2015年5月15日收到修改稿)

对科学级电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 进行了质子和中子辐照试验及退火试验, 应用蒙特卡洛方法计算了质子和中子在 CCD 中的能量沉积, 分析了器件的辐射损伤机理. 仿真计算了 N^+ 埋层内沉积的位移损伤剂量, 辐照与退火试验过程中主要考察暗信号的变化规律. 研究结果显示, 质子与中子辐照均会引发暗信号退化, 其退化的规律与位移损伤剂量变化一致; 退火后, 质子辐照所致 CCD 暗信号大幅度恢复, 其体暗信号增加量占总暗信号增加量的比例最多为 22%; 中子辐照引发的暗信号增长主要为体暗信号. 质子和中子在 N^+ 埋层产生相同位移损伤剂量的情况下, 两者导致的体暗信号增长量相同, 质子与中子辐照产生的体缺陷对体暗信号增长的贡献是同质的.

关键词: 电荷耦合器件, 质子辐照, 中子辐照, 输运仿真

PACS: 42.88.+h, 85.60.Dw, 61.85.+p

DOI: 10.7498/aps.64.194208

1 引言

CCD 因具有体积小、功耗低、动态范围大、量子效率高等特点, 已成为卫星光学系统中的关键器件, 在航天器对地观测、空间科学探测器等领域被广泛地应用^[1,2]. 然而空间辐照环境中的粒子会对星载 CCD 造成辐射损伤, 影响光学成像系统的性能, 甚至失效.

空间辐射环境中存在 γ 射线、质子、中子、电子等辐射粒子, 其中质子辐照 CCD 产生电离效应和位移效应, 中子辐照 CCD 产生位移效应, 两种辐照效应均会导致 CCD 参数退化. 国外较早开展了 CCD 质子与中子辐射引起的辐照效应研究^[3,4] Jaanimagi, Stefanov 等的研究表明^[5,6], 中子辐照引起像元区域局部的损伤使得部分像元提供高暗

信号, 会造成假信号增多、产生暗信号尖峰、暗信号增大等现象. Hopkinson 等的研究表明^[7], 质子辐照会引发 CCD 表面暗信号和体暗信号增大, 表面暗信号增大是由于电离效应, 退火后会急剧减小; 体损伤形成的缺陷会产生暗信号尖峰和场增强效应. 目前国内 CCD 辐射效应研究因受器件设计与测试条件限制, 研究起步较晚^[8,9], 文献^[8]通过质子辐照及退火试验, 推导了器件敏感参数随质子辐照注量变化的理论模型, 文献^[10]表明中子辐照试验导致 CCD 像元非均匀度增大, 且国内少有辐照试验数据与仿真结果相结合的分析. 本文利用蒙特卡洛 (Monte Carlo) 方法计算科学级埋沟结构 CCD 中 N^+ 埋层的位移损伤剂量, 并对 CCD 进行质子和中子辐照试验, 得到辐照阶段和退火阶段暗信号的变化规律, 通过仿真与试验结合的方法, 分析了其暗信号退化的原因. 在 N^+ 埋层相同位移损

* 国家自然科学基金 (批准号: 11005152) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenlin@ms.xjb.ac.cn

伤剂量的情况下, 质子辐照与中子辐照所产生的体暗信号相同, 两者辐射感生体缺陷对体暗信号的贡献是同质的.

2 试验及仿真方法

2.1 试验方法

质子辐照试验在北京大学重离子物理研究所 2×6 MeV EN 串列静电加速器上进行. 本次试验采用的质子束能量点为 10 MeV, 注量率为 5×10^7 p/cm²·s, 注量分别为 2×10^{10} p/cm², 5×10^{10} p/cm², 7×10^{10} p/cm², 1×10^{11} p/cm², 使用 4 个初值一致性较好的 CCD 样品进行辐照 (表 1). 偏置方式是 CCD 所有管脚短接. 在辐照完成后依次进行常温和 100 °C 退火试验, 所用偏置条件与辐照时相同.

表 1 质子注量与样品编号

Table 1. Variation of proton fluence and the number of samples.

质子注量/(p/cm ²)	2×10^{10}	5×10^{10}	7×10^{10}	1×10^{11}
样品编号	10#	9#	11#	12#

中子辐照试验在西北核技术研究所的 TRIGA 型脉冲堆上进行, 该堆低功率稳态运行时, 快中子辐照腔可提供中子注量率为 10^9 — 10^{10} cm⁻²·s⁻¹, 大于 0.1 MeV 中子谱的平均能量为 1.05 MeV, 中子损伤等效系数为 1.02 MeV. 中子 γ 比 (辐射源在同一时间间隔内向辐射场某一点发射的中子注量与该点 γ 射线吸收剂量之比) 大于 5×10^9 n/rad. 测试选取的注量点分别为 1×10^{10} n/cm², 2×10^{10} n/cm², 5×10^{10} n/cm², 10×10^{10} n/cm², 15×10^{10} n/cm². 使用 1 片 CCD 样品进行累积注量辐照.

2.2 仿真方法

本文 Monte Carlo 方法使用的程序为 MULASSIS (multi-layered shielding simulation software). MULASSIS 是 QinetiQ, BIRA 和 ESA 合作开发的计算程序, 可以模拟计算不同组分的屏蔽材料对空间辐射环境的屏蔽效果, 其运用 Geant4 (Geometry ANd Tracking) 工具包模拟空间粒子的运动 [11].

试验样品为某国产埋沟结构 CCD, 图像采集区域 64×64 像元, 像元尺寸 $48 \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$, 采用

三相工作模式. 该 CCD 在栅氧化层上有一层 Si₃N₄ 外延层, 之上还有多晶硅布线, 对质子入射到敏感区域可能有一定屏蔽和衰减作用. MULASSIS 软件的模拟涵盖了各层材料对粒子的屏蔽作用, 并能计算多层屏蔽材料边界层的粒子通量和能量, 输出敏感层的电离损伤剂量以及位移损伤剂量. 图 1 为该国产埋沟结构科学级 CCD 的像元结构图, n 型埋沟的厚度为 1 μm , 电荷转移在此区域内进行, 按此结构建立 MULASSIS 软件仿真的器件模型.

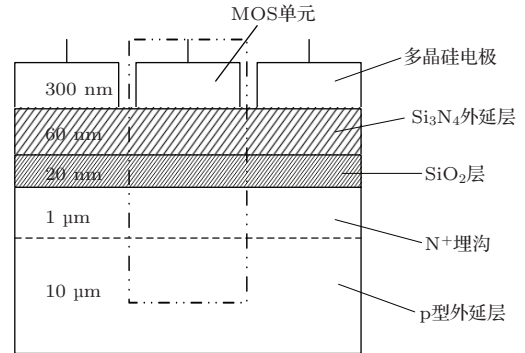


图 1 CCD 的像元结构图

Fig. 1. CCD pixel structure.

3 试验及仿真结果

3.1 中子辐照损伤机理及试验结果

图 2 为 1 MeV 中子辐照试验中 CCD 暗信号的变化情况, 其随着中子注量增大而明显上升, 且其上升趋势接近线性. 中子辐照会在 N⁺ 埋层的电荷转移沟道内形成体缺陷, 在禁带中引入缺陷能级, 使得电子通过热运动由价带跃迁到导带的概率大大提高, 导致体暗信号增大.

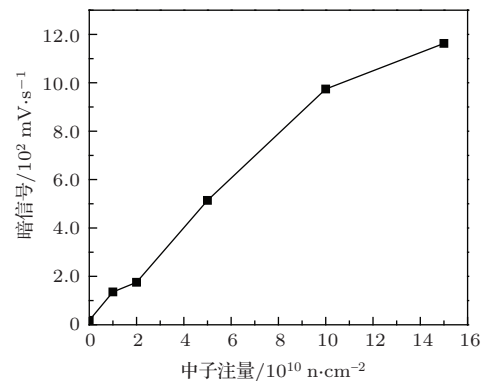


图 2 CCD 暗信号与中子注量的关系

Fig. 2. Variation of dark signal with neutron fluence.

缺陷的类型及退火温度 [12,13]: 双空位缺陷 (V-V 中心) 为 300 °C, 氧空位缺陷 (V-O 中心) 为

350 °C, 磷空位缺陷 (P-V 中心) 为 150 °C. Si-SiO₂ 界面态的完全退火温度为 175 °C [14,15], SiO₂ 层内氧化物陷阱电荷在室温下就会发生退火. 中子是不带电粒子, 辐照只会产生位移效应, 诱发体暗信号的增大. 而体缺陷的退火温度远高于室温, 因此中子辐照所致的暗信号不会在室温条件下发生退火.

3.2 质子辐照损伤机理及试验结果

图 3 为 10 MeV 质子辐照及退火试验中 CCD 暗信号的变化情况, 其随着质子注量增大而明显上升. 室温下体缺陷不会发生退火; 当退火温度达到 100 °C 时, 氧化物陷阱电荷的退火变得重要. 氧化

层内被陷阱俘获的空穴由于热运动会从 SiO₂ 的能带隙跃迁至 SiO₂ 价带. 因此在常温和 100 °C 高温退火阶段, 体缺陷和界面态基本不会有退火效应, 退火主要影响对象为氧化物陷阱电荷. 在退火阶段暗信号大量恢复, 表明暗信号主要受电离效应影响.

常温退火前期 CCD 参数较快恢复为浅氧化物陷阱电荷的退火; 中期界面态的后生长效应是暗信号增长的主要原因 [16]; 后期由后生长效应引起的不稳定界面缺陷完成复合, 暗信号保持稳定. 100 °C 高温退火阶段暗信号继续恢复, 原因是常温下稳定的深氧化物陷阱电荷发生了退火效应.

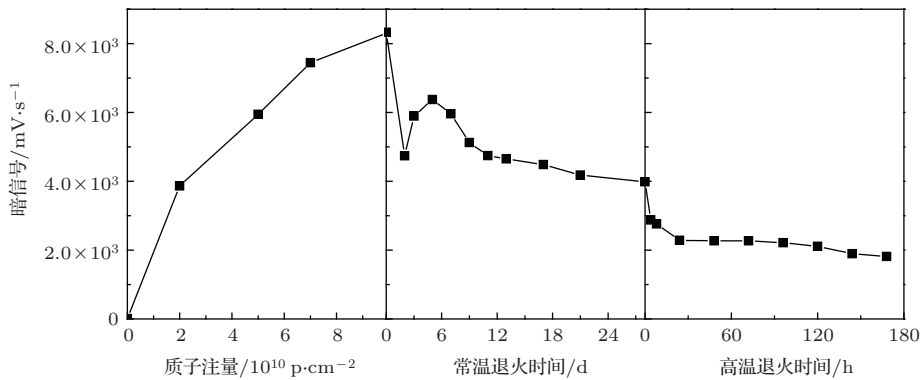


图3 CCD暗信号与质子注量、退火时间及温度的关系

Fig. 3. Variation of dark signal with proton fluence, annealing time and temperature.

3.3 仿真结果

辐照产生的位移损伤剂量 Dd 为

$$Dd = \int NIEL(E) \frac{d\phi(E)}{dE} dE$$

$\phi(E)$ 为入射粒子能谱, NIEL(E) 为粒子的非电离能损, 其与粒子类型、粒子能量、入射材料有关. 单一能量的同种粒子辐照, 有 $Dd = NIEL(E) \times Fluence(E)$, 位移损伤剂量随着粒子注量线性上升.

MULASSIS 软件模拟设置结构如图 1 所示, 物理作用类型选择 EM(Standard Electromagnetic, 标准电磁相互作用模型), 粒子入射方式为 Planar(平行垂直入射), 归一化参数为粒子注量. 材料边界层的粒子通量计算方式为 omin(当利用截断阈值和 NIEL 系数计算能量沉积时可用), 位移损伤剂量的 NIEL 系数选择 cern(该系数可用于质子、中子、正负电子入射), 模拟入射质子数设置为 10⁵ 个(计算结果显示, 该数量下误差一般在 0.3% 左右, 最大不超过 3%).

光生载流子的产生与转移过程均在 N⁺ 埋层内完成, 利用 MULASSIS 模拟计算 10 MeV 质子和 1 MeV 中子辐照在 N⁺ 埋层内产生的位移损伤剂量, 如图 4 所示. 两者在 N⁺ 埋层所产生的位移损伤剂量均随着粒子注量的增加而线性增大, 10 MeV 质子产生的位移损伤剂量明显高于 1 MeV 中子.

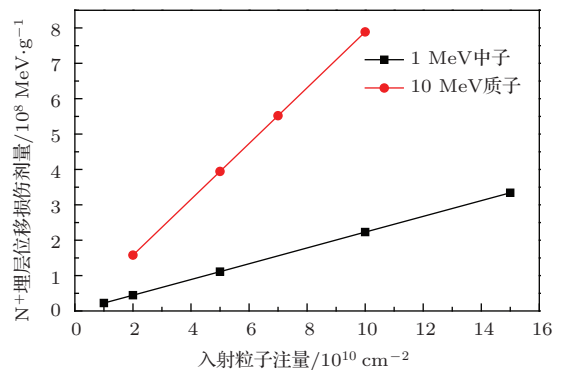


图4 1 MeV 中子与 10 MeV 质子在 N⁺ 埋层的位移损伤剂量沉积

Fig. 4. The displacement damage dose generated by 10 MeV proton and 1 MeV neutron irradiation in N⁺ buried channel.

4 参数退化分析

暗信号是指在既无光注入又无其他信号注入的条件下, CCD 产生的输出电压信号. 其主要原因是由于器件本身的热生成载流子引起. 暗信号增大会导致器件信噪比、动态范围降低, 严重影响器件的成像质量, 并且会增加器件功耗电流.

暗信号由表面暗信号和体暗信号构成, 辐射所致电离效应在栅氧化层产生氧化物陷阱电荷, 在 Si-SiO₂ 界面处产生界面态, 导致表面暗信号的增长; 辐照所致位移损伤会在 CCD 体 Si 中产生体缺陷, 这些体缺陷的能级在禁带中, 使电子通过热运动由价带跃迁到导带的概率大大增大, 导致体暗信号增长.

粒子(比如质子、中子、电子)辐照 Si 材料器件时, 会与其中的 Si 原子发生相互作用, 导致 Si 原子离开其本来所在的晶格位置, 产生空位间隙原子对. 这些空位和间隙原子进行重新结合或者在材料中迁移, 直到与其他的缺陷、掺杂原子、杂质原子相组合, 最后形成稳定的缺陷结构. 粒子入射 CCD 后在 N⁺ 埋层产生的缺陷中心主要为: P-V 中心、V-V 中心、V-O 中心. P-V 中心为 N⁺ 埋层内的掺杂原子磷与空位结合后形成的稳定缺陷, V-V 中心为体 Si 中两个空位相互结合, V-O 中心为 SiO₂-Si 界面附近的氧原子与空位相结合. 表 2 为 n 型 Si 材料中陷阱的能级和俘获界面^[17]. 其中 V-V 中心在禁带中会引入两个能级. 处于这两个能级的缺陷具有不同的电荷状态, 能级为 0.41 eV 的 V-V 中心带有单个负电荷, 能级为 0.23 eV 的 V-V 中心具有两个负电荷.

表 2 n 型 Si 材料中陷阱的能级和俘获截面
Table 2. Energy level and the capture cross-section of defects in n-type silicon.

缺陷类型	能级/eV	电荷状态	俘获截面/cm ²
V-O	0.17	-/0	1 × 10 ⁻¹⁴
V-V	0.23	= / -	4 × 10 ⁻¹⁶
	0.41	-/0	2 × 10 ⁻¹⁵
P-V	0.44		4 × 10 ⁻¹⁵

粒子辐照在禁带引入陷阱能级 E_t , 载流子有四种微观过程, 如图 5 所示. 过程 (a) 的产生率 r_a 与过程 (b) 的产生率 r_b 分别为

$$r_a = \sigma_n V_{th} n N_t (1 - f), \quad (1)$$

$$r_b = V_{th} \sigma_n n_i e^{(E_t - E_i)/kT} N_t f, \quad (2)$$

其中 V_{th} 为电子热运动平均速率, n 为自由电子密度, N_t 为陷阱密度, f 为陷阱俘获电子概率, n_i 为本征载流子浓度, E_i 为本征费米能级, σ_n 为电子俘获截面.

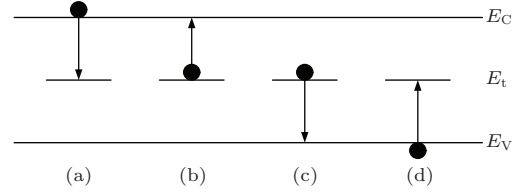


图 5 载流子通过缺陷能级产生与复合的过程 (a) 俘获电子; (b) 发射电子; (c) 俘获空穴; (d) 发射空穴
Fig. 5. Generation and recombination of carriers through trap levels: (a) electron capture; (b) electron emission; (c) hole capture; (d) hole emission.

由电子填充到缺陷能级的概率与电子离开缺陷能级的概率相同及热平衡状态下载流子总产生率为零, 可知电子净产生率 G 为

$$G = r_b - r_a = r_d - r_c = \sigma_n \sigma_p v_{th} N_t (n_i^2 - np) \times \{ \sigma_n [n + n_i e^{(E_t - E_i)/kT}] + \sigma_p [p + n_i e^{(E_i - E_t)/kT}] \}^{-1}. \quad (3)$$

当半导体器件处于平衡状态时, $n_i^2 = np$. 对于深耗尽区域, 比如 CCD 曝光时的像元, n 和 p 远远小于 n_i , 可知,

$$G = \frac{\sigma_n \sigma_p v_{th} N_t n_i^2}{\sigma_n n_i e^{(E_t - E_i)/kT} + \sigma_p n_i e^{(E_i - E_t)/kT}} = \frac{n_i}{\tau_0}, \quad (4)$$

其中 τ_0 为耗尽区载流子有效寿命, 且

$$\tau_0 \equiv \frac{\sigma_n e^{(E_t - E_i)/kT} + \sigma_p e^{(E_i - E_t)/kT}}{\sigma_n \sigma_p v_{th} N_t}. \quad (5)$$

因此体暗电流密度的表达式为(单位 nA/cm²)

$$J_{body} = qGx_d = \frac{qn_i x_d}{\tau_0}, \quad (6)$$

其中 x_d 为耗尽区的宽度. 由此可知, 缺陷能级对体暗电流大小的贡献不仅和缺陷数量有关, 还与缺陷能级所在的位置有关, 处在不同能级位置的缺陷产生的体暗电流大小不同, 其中处于禁带中央附近的缺陷能级对体暗电流的大小起到重要作用.

国外文献显示质子和中子辐照 CCD 后在 N⁺ 埋沟产生的缺陷能级, 见表 3^[18] 和表 4^[19]. 可见质子和中子辐照均会产生 V-V(0.23 eV 和 0.41 eV), P-V(0.44 eV), O-V(0.17 eV) 中心, 还有其他未知

类型的缺陷. 由(6)式可知, 不同位置的能级对体暗信号的贡献不同. 当缺陷能级处于禁带中央附近时, 其对体暗信号的贡献才最明显.

表3 质子辐照 CCD 后测量到的体缺陷能级
Table 3. Bulk trapping levels observed in proton damaged CCDs.

$(E_c - E_t)/\text{eV}$	σ_n/cm^2	产生率/ cm^{-1}	陷阱的影响
$E_1 = 0.11$	10^{-15}	7	
$E_2 = 0.17$	10^{-14}	84	
$E_3 = 0.22$	10^{-15}	8.7	低温下增大电荷转移损失率
$E_4 = 0.30$	10^{-15}	28	
$E_5 = 0.43$	10^{-14}	56	高温下增加电荷转移损失率和读出噪声
$E_6 = 0.55$	10^{-15}	6.7	增加体暗信号

表4 中子辐照结型场效应晶体管产生的缺陷能级 (测量方法: 晶体管噪声)

Table 4. Defects trapping levels observed in neutron damaged junction field-effect transistors.

缺陷	$(E_c - E_t)/\text{eV}$	σ_n/cm^2
I	0.17	4.4×10^{-14}
II	0.23	4.8×10^{-15}
III	0.42	7.9×10^{-16}
IV	0.60	1.6×10^{-13}
V	1.04	6.0×10^{-10}

质子辐照诱发的暗信号包括电离效应导致的表面暗信号和位移效应导致的体暗信号. 对器件退火可以进一步区分表面暗信号和体暗信号, 常温退火阶段主要影响对象为氧化物陷阱电荷, 暗信号减少的部分主要是栅氧化层氧化物陷阱电荷所致的表面暗信号; 高温退火后, 界面态发生部分退火, 使得表面暗信号进一步降低; 两个退火阶段由体缺陷产生的体暗信号基本无减少. 虽然高温退火后的暗信号含有部分由残存界面态引起的表面暗信号, 但仍可以由退火后的暗信号, 得知质子辐照所致 CCD 体暗信号占总暗信号的最大比例. CCD 退火前的暗信号为 8328 mV/s, 退火后的暗信号为 1832 mV/s, 因此

$$\begin{aligned} & \text{体暗信号最多所占比例} \\ &= \frac{\text{退火后暗信号}}{\text{退火前暗信号}} = \frac{1832 \text{ mV/s}}{8328 \text{ mV/s}} = 22\%. \end{aligned} \quad (7)$$

实验数据说明, 质子辐照 CCD 所致暗信号增长中表面暗信号为主要成分, 体暗信号所占比例最

多为 22%. 表 5 为在不同质子注量下, N^+ 埋层内位移损伤剂量的仿真计算结果与辐照退火试验所得总暗信号、体暗信号所占最大值之间的关系.

对于 CCD 暗信号而言, 1 MeV 中子入射产生的电离效应和单粒子效应可以忽略, 只考虑位移效应. 中子辐照 CCD 后诱发的暗信号主要是体缺陷导致的体暗信号, 图 2 中的暗信号值即为体暗信号值. 表 6 不同中子注量下, N^+ 埋层内位移损伤剂量的仿真结果与实验结果体暗信号所占最大值之间的关系. 在相同的辐照注量下, 质子产生的位移损伤剂量高于中子产生的位移损伤剂量, 引发的体暗信号增长也高于中子引发的体暗信号.

表5 不同质子注量下, N^+ 埋层位移损伤剂量与总暗信号、体暗信号之间的关系

Table 5. Variation of displacement damage dose in N^+ buried channel with dark signal and bulk dark signal in different proton fluence.

质子注量 $/ (10^{10} \text{ p/cm}^2)$	位移损伤剂量 $/ (10^8 \text{ MeV/g})$	总暗信号 $/ (\text{mV/s})$	体暗信号 $/ (\text{mV/s})$
2	1.58	3867	851
5	3.94	5945	1307
7	5.52	7443	1637
10	7.89	8328	1832

表6 不同中子注量下, N^+ 埋层位移损伤剂量与体暗信号之间的关系

Table 6. Variation of displacement damage dose in N^+ buried channel with bulk dark signal in different neutron fluence.

中子注量 $/ (10^{10} \text{ n/cm}^2)$	位移损伤剂量 $/ (10^7 \text{ MeV/g})$	体暗信号 $/ (\text{mV/s})$
1	2.23	135.51
2	4.45	175.67
5	11.10	513.91
10	22.30	974
15	33.40	1162.8

图 6 为质子和中子辐照诱发的体暗信号与 N^+ 埋层位移损伤剂量的关系. 由图可知, 质子和中子辐照产生相同位移损伤剂量时, 引发的体暗信号基本相同. 由表 5 和表 6 可知, 中子注量为 $10 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ 到 $15 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ 时, 在 N^+ 埋沟层内产生的位移损伤剂量值位于质子注量在 $2 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$

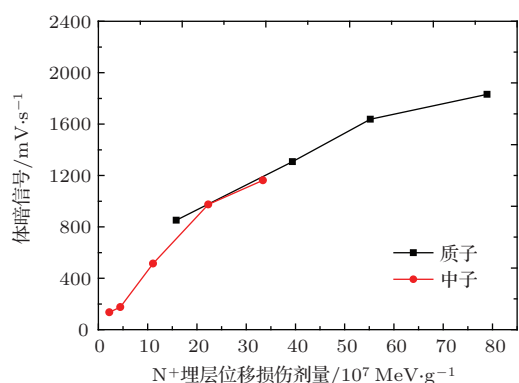


图6 质子与中子辐照诱发体暗信号与N⁺埋层位移损伤剂量关系

Fig. 6. Variation of displacement damage dose in N⁺ buried channel with bulk dark signal in proton and neutron irradiated CCD.

到 5×10^{10} n/cm² 时产生的位移损伤剂量值之间. 因此, 可以计算出质子和中子辐照引起相同位移损伤剂量的情况下, 两者产生的体暗信号增长值. 通

过质子辐照试验数据, 推算出质子辐照所致位移损伤剂量为 2.23×10^8 MeV/g 和 3.34×10^8 MeV/g 时所需注量及产生的体暗信号最大值, 如表 7 所示. 在产生相同的位移损伤剂量时, 中子辐照产生的体暗信号与质子辐照产生的体暗信号基本相同.

质子与中子在N⁺埋层产生的位移损伤剂量相同, 即在单位质量材料内位移损伤所沉积的能量相同, 表明两者引发的辐射感生体缺陷数量相同. 虽然体缺陷的数量相同, 但是缺陷在能带中形成的缺陷能级会有所差异. 由于体缺陷能级所在位置对体暗信号的大小有很大影响, 而两者引发的体暗信号基本一致, 说明质子与中子辐照后在禁带中央附近产生的缺陷能级对体暗信号的贡献相同. 在相同位移损伤剂量下, 质子与中子辐照对体暗信号的影响是同质的. 可以用损伤参数 k_{damage} 建立暗信号与位移损伤剂量的联系 [7].

表7 N⁺埋层相同位移损伤剂量时, 中子与质子辐照产生的体暗信号对比

Table 7. Dark signal of neutron and proton irradiated CCD while the displacement damage dose in N⁺ buried channel is same.

位移损伤剂量 /(10 ⁸ MeV/g)	中子注量 /(10 ¹⁰ n/cm ²)	体暗信号 /(mV/s)	质子注量 /(10 ¹⁰ p/cm ²)	体暗信号 /(mV/s)
2.23	10	974	2.82	976
3.34	15	1163	4.23	1191

5 结 论

10 MeV 质子和 1 MeV 中子辐照均会导致埋沟工艺科学级 CCD 暗信号的退化. 结果显示, 相同粒子注量下, 10 MeV 质子辐照引发的暗信号增长量大于 1 MeV 中子, 且 10 MeV 质子在 N⁺ 埋层内的位移损伤剂量大于 1 MeV 中子. 质子辐照诱发的暗信号分为表面暗信号和体暗信号, 表面暗信号是由电离效应感生的栅氧化层陷阱电荷和 Si-SiO₂ 界面态导致, 体暗信号是由位移效应形成的体缺陷作为热载流子产生中心导致. 中子辐照诱发的暗信号为体暗信号. 对于质子辐照, 在常温退火和高温退火阶段体缺陷和 Si-SiO₂ 界面态基本不会有退火效应, 只有氧化物陷阱电荷有退火效应, 退火阶段减少的暗信号为表面暗信号. 由退火后与退火前的暗信号比值, 可以得出, 对于该国产埋沟科学级 CCD, 质子辐照所致暗信号增长中体暗信号最多占 22%. 由

公式推导可知, 对于体暗信号而言, 粒子辐照形成的体缺陷在 Si 禁带中产生的缺陷能级位置对诱发体暗信号值的大小有很大影响, 其中位于禁带中央的缺陷能级能有效提供热载流子. 由质子辐照退火数据得出暗信号中体暗信号所占比例, 并与中子辐照试验数据对比, 结合仿真工具, 得知: N⁺埋层位移损伤剂量沉积相同时, 质子辐照与中子辐照所形成的体暗信号基本相同, 说明两者在禁带中央附近产生的缺陷能级对体暗信号的贡献相同, 质子与中子辐照对体暗信号的影响是同质的. 位移损伤剂量可以用于表征 CCD 辐照后体暗信号的退化程度.

参考文献

[1] Bebek C, Groom D, Holland S, Karcher A, Kolbe W, Lee J, Levi M, Palaio N, Turko B, Uslenghi M, Wagner A, Wang G 2002 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **49** 1221
 [2] Chugg A M, Jones R, Moutrie M J, Truscott P R 2004 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **51** 3579

- [3] Pickel J C, Kalma A H, Hopkinson G R, Marshall C J 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 671
- [4] Hopkinson G R 1994 *Radiation Physics and Chemistry* **43** 79
- [5] Jaanimagi P A, Boni R, Keck R L 2001 *Review of Scientific Instruments* **72** 800
- [6] Stefanov K D, Tsukamoto T, Miyamoto A, Sugimoto Y, Tamura N, Abe K, Nagaminc T, Aso T 2000 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **47** 1280
- [7] Hopkinson G R, Mohammadzadeh A 2004 *International Journal of High Speed Electronics and Systems* **14** 135
- [8] Wen L, Li Y D, Guo Q, Ren D Y, Wang B, Ma L Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024220 (in Chinese) [文林, 李豫东, 郭旗, 任迪远, 汪波, 玛丽娅 2015 物理学报 **64** 024220]
- [9] Wang Z J, Tang B Q, Xiao Z G, Liu M B, Huang S Y, Zhang Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4136 (in Chinese) [王祖军, 唐本奇, 肖志刚, 刘敏波, 黄绍艳, 张勇 2010 物理学报 **59** 4136]
- [10] Xiao Z G, Tang B Q, Li J L, Zhang Y, Liu M B, Zhang Y, Wang Z J, Huang S Y 2007 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **27** 724 (in Chinese) [肖志刚, 唐本奇, 李君利, 张勇, 刘敏波, 张勇, 王祖军, 黄绍艳 2007 核电子学与探测技术 **27** 724]
- [11] Lei F, Truscott P R, Dyer C S, Quaghebeur B, Heynderickx D, Nieminen P, Evans H, Daly E 2002 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **49** 2788
- [12] Benton J L, Kimerling L C 1982 *Journal of the Electrochemical Society* **129** 2098
- [13] Timothy D. Hardy 1994 *MS Dissertation*(Columbia: Simon Fraser University)
- [14] Saigne F, Schrimpf R. D, Fleetwood D M, Cizmarik R, Zander D 2004 *IEEE Trans, on Nucl. Sci.* **44** 1989
- [15] Schrimpf R D, Fleetwood D M, Galloway K F, Lacoce R C, Mayer D C, Puhl J M, Pease R L, Suehle J S 2004 *IEEE Trans, on Nucl. Sci.* **51** 2903
- [16] Boesch H E 1988 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **35** 1160
- [17] Kono K, Sandland J G, Wada K, Kimerling L C 2000 *X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy* **4140** 267
- [18] Timothy Hardy D 1997 *M. S. Dissertation* (Canada: Simon Fraser University)
- [19] Kenneth Wang K, Aldert, Eugene Chenette R 1975 *IEEE Transactions on Electron Devices* **22** 591

Effects of proton and neutron irradiation on dark signal of charge-coupled device*

Zeng Jun-Zhe¹⁾²⁾ Li Yu-Dong¹⁾ Wen Lin^{1)†} He Cheng-Fa¹⁾ Guo Qi¹⁾ Wang Bo¹⁾²⁾
Maria¹⁾²⁾ Wei Yin¹⁾ Wang Hai-Jiao¹⁾²⁾ Wu Da-You¹⁾²⁾ Wang Fan¹⁾²⁾ Zhou Hang¹⁾²⁾

1) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments of CAS; Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices; Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry of CAS, Urumqi 830011, China)

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

(Received 24 March 2015; revised manuscript received 15 May 2015)

Abstract

The proton and neutron irradiation and annealing experiments are carried out on a domestic buried channel charge-coupled device (CCD), Monte Carlo method being applied to calculate the energy deposition of scientific CCD irradiated by proton and neutron, and the radiation damage mechanism of the device is analyzed. The displacement damage dose in N^+ buried channel is simulated. During irradiation and annealing experiments, the main parameter (dark signal) is investigated. Results show that the dark signal of the buried channel CCD irradiated by 10 MeV proton and 1 MeV neutron rises obviously. With the same fluence, the increase of dark signal and the displacement damage dose in N^+ buried channel caused by 10 MeV proton is larger than that by 1 MeV neutron. Dark signal caused by proton irradiation is divided into surface dark signal and bulk dark signal. Oxide-trapped-charges and interface states may be caused by ionization-generated surface dark signal, and the bulk defects may be caused by displacement-generated bulk dark signal. Neutron irradiation only affects the bulk dark signal. Defects and their annealing temperature are studied. The dark signal of CCD irradiated by proton is greatly reduced after annealing, this phenomenon means that the dark signal is mainly affected by ionization. The proportion of bulk dark signals in total dark signals can be calculated by the remainder of dark signal after annealing, and it is at most about 20% or less. From the formula, the position of energy level of bulk defects has an obvious influence on the bulk dark signal. The energy level in the middle of the forbidden band can provide effective hot carriers. Combining the results of experiment and simulation, when the displacement damage doses in N^+ buried channel are the same, the bulk dark signal produced by proton is nearly the same as that produced by neutron. This phenomenon means that the defect levels in the forbidden band gap caused by proton and neutron irradiation have the same contributions to dark signal generation. Effect of proton and neutron irradiation on the bulk dark signal is homogeneous. The displacement damage dose can be used to characterize the degradation degree of the bulk dark signal in CCD after irradiation.

Keywords: charge coupled devices, proton irradiation, neutron irradiation, transport simulation

PACS: 42.88.+h, 85.60.Dw, 61.85.+p

DOI: 10.7498/aps.64.194208

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

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