

电荷耦合器件在质子辐照下的粒子输运仿真与效应分析

曾骏哲 何承发 李豫东 郭旗 文林 汪波 玛丽娅 王海娇

Particle transport simulation and effect analysis of CCD irradiated by protons

Zeng Jun-Zhe He Cheng-Fa Li Yu-Dong Guo Qi Wen Lin Wang Bo Maria Wang Hai-Jiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 114214 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114214

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114214>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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 displacement 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>

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>

# 电荷耦合器件在质子辐照下的粒子输运仿真与效应分析\*

曾骏哲<sup>1)2)</sup> 何承发<sup>1)</sup> 李豫东<sup>1)†</sup> 郭旗<sup>1)</sup> 文林<sup>1)</sup> 汪波<sup>1)2)</sup>  
 玛丽娅<sup>1)2)</sup> 王海娇<sup>1)2)</sup>

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)

(2014年9月17日收到; 2014年11月25日收到修改稿)

应用蒙特卡洛方法计算了质子在科学级电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 结构中的能量沉积, 并结合该 CCD 的质子辐照试验及退火试验数据, 分析了器件的辐射损伤机理. 仿真计算体硅内沉积的位移损伤剂量和栅氧化层的电离损伤剂量, 辐照与退火试验过程中主要考察暗信号、电荷转移效率两个参数的变化规律. 研究结果显示, 暗信号和电荷转移效率的变化规律与位移、电离损伤剂量一致; 退火后暗信号大幅度降低, 辐照导致的表面暗信号增加占总暗信号增加的比例至少为 80%; 退火后电荷转移效率恢复较小, 电荷转移效率降低的原因主要为体缺陷. 通过总结试验规律, 推导出了电荷转移效率退化程度的预估公式及其损伤因子  $k_{\text{damage}}$ .

**关键词:** 电荷耦合器件, 质子辐照, 位移效应, 输运仿真

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.114214

## 1 引言

CCD 具有体积小、功耗低、动态范围大、量子效率高<sup>[1]</sup>特点, 在航天器对地观测、空间科学探测器等领域被广泛地应用<sup>[2-4]</sup>. 空间辐照环境中的带电粒子会对星载 CCD 造成辐射损伤, 使其暗信号增大、电荷转移效率下降, 影响光学成像系统的性能, 甚至失效.

空间辐射环境中有质子、电子、重离子等主要辐射粒子, 其中星载 CCD 的辐射损伤主要由质子引起. 质子辐照 CCD 产生电离效应和位移效应, 两种效应的共同作用导致 CCD 参数退化. 国外较早开展了 CCD 质子辐射引起的辐照效应研究<sup>[5,6]</sup>, Hopkinson 等的研究表明, 质子入射 CCD 使 Si 晶格原子发生位移, 常温下产生的大部分空位-间隙

原子会迅速复合, 剩下的稳定缺陷作为少子陷阱和暗信号产生中心, 会引起 CCD 电荷转移效率和暗信号的退化<sup>[7,8]</sup>; Hardy 等的结果表明, 电荷转移效率是质子辐照所致位移损伤的敏感参数, 其为温度、辐照剂量、信号幅度的函数<sup>[3,9]</sup>. 国内对 CCD 质子辐照效应的研究起步较晚, 开展了少量的理论计算<sup>[10,11]</sup>和商业级 CCD 辐照实验模拟研究<sup>[12,13]</sup>, 少有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 SiO<sub>2</sub> 层的电离损伤剂量和 p 型外延层耗尽区的位移损伤剂量, 并对 CCD 进行了质子辐照试验, 得到辐照阶段和退火阶段暗信号和电荷转移效率的变化规律, 仿真与试验结合分析了其性能退化的原因. 分离出质子辐照所致 CCD 暗信号增长中表面暗信号所占最少比例, 推导出电荷转移效率的预估公式以及其中的损伤因子.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11005152) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn

## 2 仿真、试验及测试方法

### 2.1 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 [14].

试验样品为某国产埋沟结构 CCD, 图像采集区域为  $64 \times 64$  像元, 像元尺寸为  $48 \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$ , 采用三相工作模式. 该 CCD 在栅氧化层上有一层  $\text{Si}_3\text{N}_4$  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, 计算出多层屏蔽材料边界层的粒子通量和能量, 并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, p 型外延层中耗尽区厚度约为  $3 \mu\text{m}$ , 电荷转移在此区域内进行, MULASSIS 软件仿真的器件模型就按此结构建立.

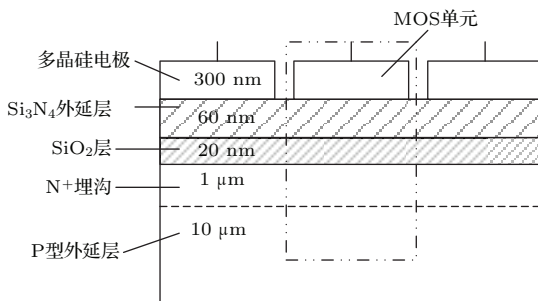


图 1 CCD 的像元结构图

Fig. 1. CCD pixel structure.

### 2.2 试验方法

辐照试验在北京大学重离子物理研究所  $2 \times 6$  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 3 MeV, 5 MeV, 10 MeV, 注量率为  $5 \times 10^7 \text{ p/cm}^2 \cdot \text{s}$ , 注量分别为  $2 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$ ,  $5 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$ ,  $7 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$ ,  $1 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$ . 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  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  退火试验, 所用偏置条件与辐照时相同.

### 2.3 测试方法

暗信号是指在无光照条件下, 器件像元产生的输出电压信号. 在规定条件下 (环境温度、工作频率), 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.

电荷转移效率是指当电荷量从一个电极转移到下一个电极时, 转移后电极下的电荷量与转移前电极下电荷量的比值. 电荷包转移存在电荷损失, 损失的电荷则成为后序尾像元中的延迟电荷, 采用延迟的电荷来导出器件的电荷转移效率. 半饱和时, 器件处于最佳状态, 所以以器件工作于半饱和状态下的所测值为准; 并且为了消除高斯型白噪声的影响, 采取连续采集多帧的信号, 取平均后再进行计算.

## 3 仿真及试验结果

### 3.1 相同能量不同注量质子辐照

质子辐照产生位移损伤剂量  $D_d$  为

$$D_d = \int \text{NIEL}(E) \frac{d\phi(E)}{dE} dE,$$

$\phi(E)$  为质子能谱,  $\text{NIEL}(E)$  为非电离能损. 对于单一能量 10 MeV 质子辐照, 有  $D_d = \text{NIEL}(E) \times \text{Fluence}(E)$ , 非电离能量沉积随着质子注量线性上升. 利用 MULASSIS 模拟计算 10 MeV 质子辐照产生的能量沉积, 如图 2 所示. 相同能量时质子辐照在氧化层电离损伤剂量与 p 型外延层耗尽区位移损伤剂量均随着注量上升而成比例增大.

图 3 为 10 MeV 质子辐照及退火试验中暗信号的变化情况, 其随着质子注量增大而明显上升. 缺陷类型及其退火温度 [15,16]: 双空位缺陷为  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 氧空位缺陷为  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ , 磷空位缺陷为  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si-SiO<sub>2</sub> 界面态的退火温度为  $175 \text{ }^\circ\text{C}$  [17,18]. 因此在常温和  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  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.

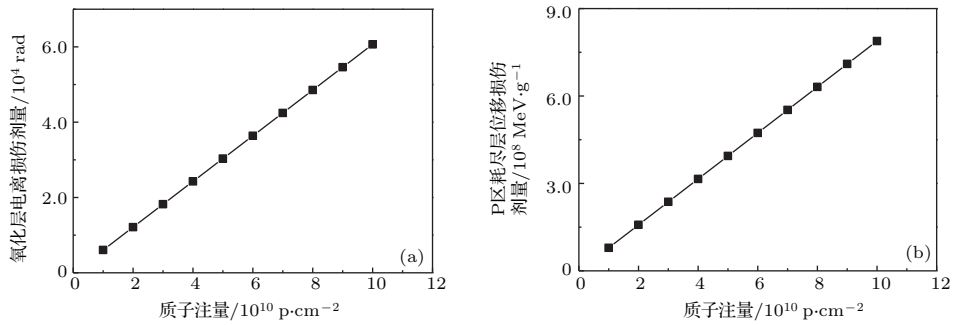


图2 (a) 10 MeV 能量不同注量质子在氧化层电离损伤剂量沉积; (b) 10 MeV 能量不同注量质子在 p 区耗尽层位移损伤剂量沉积

Fig. 2. (a) The ionizing dose in gate oxide layer generated by 10 MeV proton with different fluence; (b) The displacement damage dose in silicon deposition generated by 10 MeV proton with different fluence.

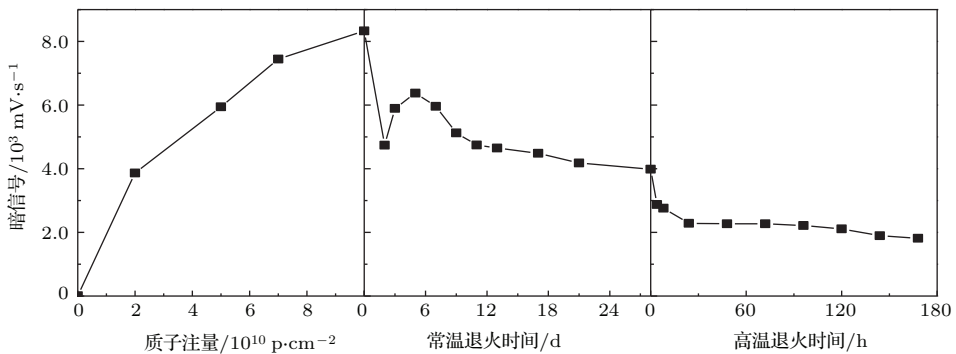


图3 CCD 暗信号与质子注量、退火时间及温度的关系

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

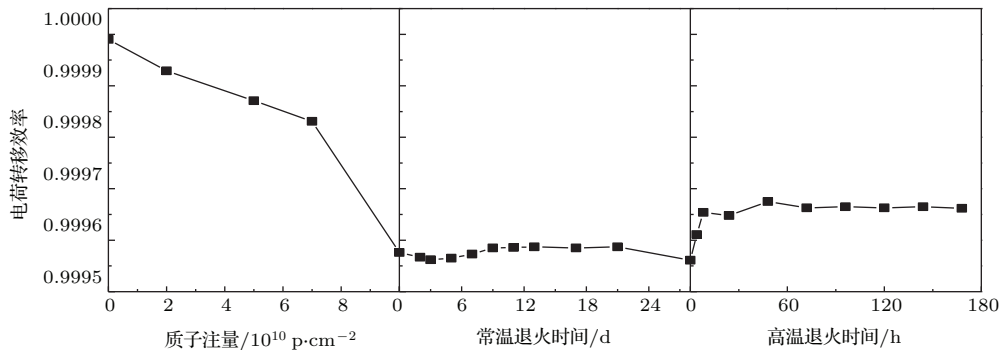


图4 CCD 电荷转移效率退化与质子注量、退火时间及温度的关系

Fig. 4. Variation of charge transfer efficiency with proton fluence, annealing time and temperature.

常温退火前期 CCD 参数较快恢复为辐射感生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 [19]; 后期不稳定的界面缺陷完成复合, 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缺陷在高温下进一步复合.

图 4 为 10 MeV 质子辐照及退火试验中电荷转移效率的变化情况, 其随着 10 MeV 质子注量增加而下降. 退火主要影响对象为氧化物陷阱电荷, 对体缺陷和界面态基本无影响. 在常温退火阶段, 电

荷转移效率保持稳定; 100 °C 高温退火阶段初期电荷转移效率仅有少量恢复, 最后维持稳定, 相对于初值仍有很大差别. 因此电荷转移效率基本不受氧化物陷阱电荷影响.

### 3.2 不同能量相同注量质子辐照

图 5 为注量为  $5 \times 10^{10} \text{ p/cm}^2$ , 能量为 1 MeV 至 10 MeV 质子在  $\text{SiO}_2$  层的电离损伤剂量和 p 型外延层耗尽区的位移损伤剂量. 两者均随着入射质子能量的上升而下降, 能量越高下降趋势越缓和.

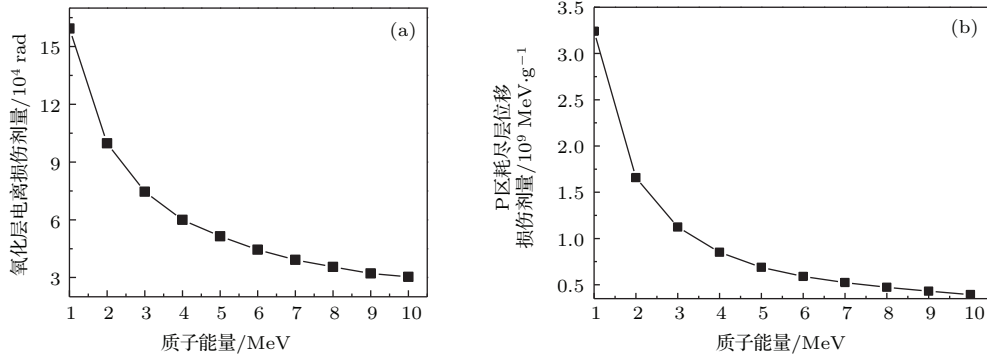


图5 (a) 1—10 MeV 能量、 $5 \times 10^{10}$  p/cm<sup>2</sup> 注量质子在氧化层电离损伤剂量沉积; (b) 1—10 MeV 能量、 $5 \times 10^{10}$  p/cm<sup>2</sup> 注量质子在 p 区耗尽层位移损伤剂量沉积

Fig. 5. (a) The ionizing dose in gate oxide layer induced by 1 MeV–10 MeV proton at  $5 \times 10^{10}$  p/cm<sup>2</sup> fluence; (b) the displacement damage dose in silicon deposition induced by 1 MeV–10 MeV proton at  $5 \times 10^{10}$  p/cm<sup>2</sup> fluence.

表1和表2显示, CCD受注量为 $5 \times 10^{10}$  p/cm<sup>2</sup>不同能量质子辐照后, 暗信号和电荷转移效率均有退化, 质子能量越高, 其退化程度越小, 且其退化趋势与图5电离和位移剂量曲线相符, 近似于指数下降趋势.

表1 CCD 电荷转移效率与质子能量的关系

Table 1. The relationship between charge transfer efficiency and energy of proton.

质子能量/MeV	电荷转移效率		相对减少率/% $\frac{\text{辐照前} - \text{辐照后}}{\text{辐照前}} \times 100\%$
	辐照前	辐照后	
3	0.999981	0.999615	37.3
5	0.999980	0.999748	23.7
10	0.999976	0.999871	10.8

表2 CCD 暗信号与质子能量的关系

Table 2. The relationship between dark signal and energy of proton.

质子能量/MeV	暗信号/mV·s <sup>-1</sup>		增大倍数
	辐照前	辐照后	
3	21.73	9201	527.0
5	19.47	7246	415.0
10	11.19	5945	340.5

## 4 参数退化分析

### 4.1 质子辐照诱发 CCD 暗信号退化分析

质子辐照 CCD 后主要产生两种辐照损伤效应: 电离效应和位移效应. 这两种效应都会诱发 CCD 暗信号增大. 电离辐照在栅极氧化层产生氧化层陷阱电荷, 在 SiSiO<sub>2</sub> 界面处产生界面态, 使表面暗信号增大; 位移损伤诱发 CCD 体 Si 中体缺陷产生, 形成新的产生复合中心, 使 CCD 体暗信号增

大. 图2显示 10 MeV 质子辐照在氧化层电离损伤剂量与 p 型外延层耗尽区位移损伤剂量均随着注量上升而成比例增大, 则受这两者影响的 CCD 暗信号也随着 10 MeV 质子注量增大而成比例上升, 这与图3实验结果相一致.

退火主要影响对象为氧化物陷阱电荷, 因此退火阶段暗信号减少的部分主要是栅氧化层氧化物陷阱电荷产生的表面暗信号, 由体缺陷产生的体暗信号基本无减少. 高温退火后, 界面态没有完全退去, 使得退火后的暗信号仍包含有部分表面暗信号. 但仍可以由退火阶段暗信号的减少量, 得知质子辐照所致 CCD 表面暗信号占总暗信号的最少比例. 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

$$\begin{aligned} & \text{表面暗信号至少所占比例} \\ &= \frac{\text{退火阶段暗信号变化量}}{\text{退火前暗信号}} \\ &= \frac{6496 \text{ mV/s}}{8328 \text{ mV/s}} = 80\%. \end{aligned} \quad (1)$$

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, 其所占比例至少为 80%. 国外的试验测试结果表明<sup>[2]</sup>: 质子辐照引起的暗信号以表面暗信号为主, 且表面暗信号比体暗信号大近一个数量级. 本文所得结果与其基本一致.

### 4.2 质子辐照诱发 CCD 电荷转移效率退化分析

电荷转移效率是质子辐照导致的位移效应敏感的参数<sup>[2,3]</sup>. 质子辐照所致电离效应产生的 Si-SiO<sub>2</sub> 界面态以及位移效应在电荷转移沟道产生的



缺陷能级对载流子的俘获,造成电荷转移效率的下降.本次试验 CCD 采用埋沟结构,电荷转移沟道为 p 型外延层耗尽区,不与 Si-SiO<sub>2</sub> 界面相接触,因此电荷转移效率退化的主要原因是位移损伤.入射质子传递给初级反冲粒子的最大能量为<sup>[21]</sup>

$$T_{\max} = \frac{4Mm}{(m+M)^2}E = 0.133E, \quad (2)$$

$E$  为入射质子的动能,  $m$  为质子质量,  $M$  为硅原子质量.一个初级反冲粒子的能量与  $1/T^2$  成比例,随着质子能量上升而急剧下降,且初级反冲粒子的平均能量较低(200 eV 左右)<sup>[22]</sup>.意味着初级反冲粒子没有足够能量去使其他硅原子产生位移,位移需要的能量至少为几个 keV<sup>[23,24]</sup>,所以 10 MeV 能量的质子一般产生单独的缺陷而非缺陷团.研究表明<sup>[23]</sup>,位移损伤产生的缺陷性质与位移损伤类型无关,认为质子入射产生的位移损伤缺陷类型对器件参数的影响是同质的.因此,不考虑位移损伤缺陷的类型和性质、而只考虑缺陷数目对器件参数的

影响.

空位间隙对并非固定不变,会在晶格中迁移.大约 90% 都会复合,不会产生永久损伤,剩下的会形成稳定的缺陷.尽管这些稳定缺陷的数量难以用基本原理准确预知,但可以得知器件的损伤与位移损伤、器件电学参数这两者成比例.由此得到一个普遍关系<sup>[8]</sup>:

$$\text{Device damage} = k_{\text{damage}} \times \text{Dd}, \quad (3)$$

$k_{\text{damage}}$  是一个损伤因子,位移损伤剂量(Dd)与 NIEL(non-ionizing energy loss, 非电离能量损失)、粒子注入量有关.由此可见,器件参数损伤值与位移损伤剂量成线性关系.

电荷转移效率主要受到电荷转移沟道内辐照所致体缺陷影响,利用 MULASSIS 软件模拟计算 p 区耗尽层位移损伤剂量,结合电荷转移效率的试验测量值,由(3)式计算出  $k_{\text{damage}}$ . 结果见表 3.

表 3 不同能量质子辐照后的电荷转移效率、位移损伤剂量及损伤因子的关系

Table 3. The relationship between the energy of proton, charge transfer efficiency, displacement damage dose and damage constant.

质子能量/MeV	电荷转移效率	电荷转移损失率	位移损伤剂量/MeV·g <sup>-1</sup>	$k_{\text{damage}}$
3	0.999615	0.000385	$1.1 \times 10^{10}$	$3.50 \times 10^{14}$
5	0.999748	0.000252	$6.9 \times 10^9$	$3.65 \times 10^{14}$
10	0.999871	0.000129	$3.9 \times 10^9$	$3.31 \times 10^{14}$

由表 3 可知,1—10 MeV 质子辐照其损伤因子  $k_{\text{damage}}$  基本为常数,说明 CCD 电荷转移损失率与位移损伤剂量成线性关系.所以对于埋沟结构 CCD,器件损伤参数为对位移损伤敏感的电荷转移损失率,有

$$\text{CTI} \propto \text{Dd}, k_{\text{damage}} = \frac{\text{CTI}}{\text{Dd}}, \quad (4)$$

CTI 为电荷转移损失率,损伤因子  $k_{\text{damage}}$  约为  $3.50 \times 10^{14}$ . 利用上述结果,对质子辐照引起的 CCD 电荷转移效率损失率进行预估. 预估公式为

$$\text{CTE}_{\text{辐照后}} = 1 - \text{Dd} \times k_{\text{damage}}, \quad (5)$$

其中 CTE 为电荷转移效率. 图 6 为注量  $5 \times 10^{10}$  p/cm<sup>2</sup>, 能量为 1 MeV 至 10 MeV 的质子辐照引起电荷转移效率退化的预估值与测量值; 图 7 为能量为 10 MeV, 注量为  $1 \times 10^{10}$  p/cm<sup>2</sup> 至  $1 \times 10^{11}$  p/cm<sup>2</sup> 质子辐照引起电荷转移效率退化的预估值与测量值. 图中电荷转移效率曲线的计算公式只以

位移损伤剂量作为变化量,其预估值与测量值符合的较好,说明位移损伤占据主导作用,与试验退火结论一致.

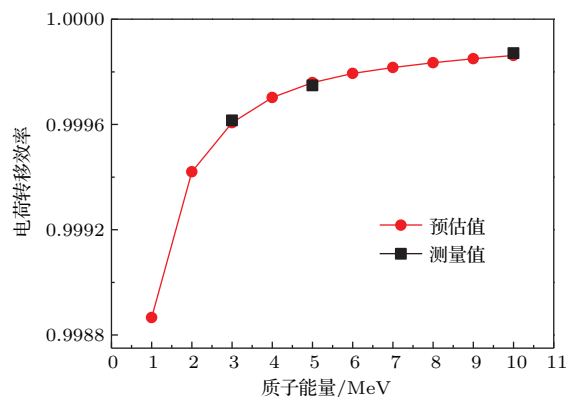


图 6 相同注量不同能量的质子入射下电荷转移效率的预估值与测量值

Fig. 6. Estimate and measure of charge transfer efficiency irradiated by proton with different energy in same fluence.

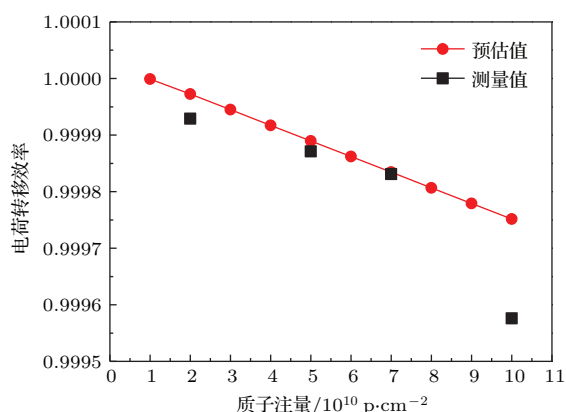


图7 不同注量相同能量的质子入射下电荷转移效率的预估值与测量值

Fig. 7. Estimate and measure of charge transfer efficiency irradiated by proton with different fluence in same energy.

本次试验 CCD 采用埋沟结构, 电离损伤基本不会影响电荷转移沟道内的少数载流子, 但氧化物陷阱电荷和界面态形成的电场在电荷转移沟道内 (即耗尽区) 存在少量的电场分量, 使耗尽区深度发生变化, 所以电离损伤仍可以导致电荷转移效率的微弱变化. 电离效应是一种累积效应, 随着质子辐照注量增大, 电离辐射损伤会非线性增大, 对电荷转移效率的影响也逐渐趋于明显. 当质子辐照注量累积到  $1 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$  时, 辐射产生了大量的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷, 使转移沟道内形成的电场分量明显增大, 该原因导致图 7 中质子注量达到  $1 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$  时预估值与测量值偏差较大.

## 5 结 论

1 MeV 到 10 MeV 能量质子辐照导致埋沟工艺科学级 CCD 暗信号与电荷转移效率显著退化, 暗信号退化的主要原因为质子辐照诱发的表面暗信号, 是由电离效应感生的栅氧化层陷阱电荷和 Si-SiO<sub>2</sub> 界面态所致, 电荷转移效率退化的主要原因是位移效应产生的孤立体缺陷作为散射中心和俘获陷阱, 导致少数载流子迁移率下降. 对于暗信号而言, 在常温退火和高温退火阶段体缺陷和 Si-SiO<sub>2</sub> 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表面暗信号至少占 80%. 对于电荷转移效率而言, CCD 采用埋沟结构, 消除了界面态对电荷转移效率的影响, 电荷转移效率退化主要

与体缺陷密度有关, 其下降趋势与辐照注量基本成线性关系, 且不同缺陷类型对器件参数的影响是同质的. 由于电荷转移损失率与位移损伤剂量成线性关系, 结合 MULASSIS 软件计算 p 型外延层耗尽区中的位移损伤剂量, 可以得出对于该国产 CCD,  $\text{CTE}_{\text{辐照后}} = 1 - Dd \times k_{\text{damage}}$ , 其中损伤因子  $k_{\text{damage}} = 3.50 \times 10^{14}$ . 利用该损伤因子和预估公式对质子辐照引起的电荷转移效率退化进行预估, 预估值与实际测量值较为符合. 质子大注量的情况下, 预估值与测量值的差别趋于明显. 小注量情况下, 在推导预估公式时忽略了电离效应的微弱贡献, 但在质子注量较大时电离效应的影响趋于明显. 下一步工作将在模型中加入电离效应的影响, 对模型及预估公式进行修正, 使预估值更符合实际情况.

## 参考文献

- [1] Wang M F, Ou H J, Liu W, Liu X Q, Chen X S, Li L, Li N, Shen X C 1998 *J. Infrared Millim. Waves* **17** 76 (in Chinese) [万明芳, 欧海疆, 陆卫, 刘兴权, 陈效双, 李宁, 李娜, 沈学础 1998 红外与毫米波学报 **17** 74]
- [2] Meidinger N, Struder L, Holl P, Soltau H, Zanthier C V 1996 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **377** 298
- [3] 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
- [4] Chugg A M, Jones R, Moutrie M J, Truscott P R 2004 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **51** 3579
- [5] Pickel J C, Kalma A H, Hopkinson G R, Marshall C J 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 671
- [6] Hopkinson G R 1994 *Radiation Physics and Chemistry* **43** 79
- [7] Hopkinson G R, Dale C J, Marshall P W 1996 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **43** 614
- [8] Hopkinson G R, Mohammadzadeh A 2004 *International Journal of High Speed Electronics and Systems* **14** 419
- [9] Hardy T, Murowinski R, Deen M J 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 154
- [10] Song Q 2002 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [宋谦 2002 博士学位论文 (北京: 中国科学院研究生院)]
- [11] Chen W H, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, He L, Zhang T F, Zhang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **58** 4090 (in Chinese) [陈伟华, 杜磊, 庄奕琪, 包军林, 何亮, 张天福, 张雪 2009 物理学报 **58** 4090]
- [12] 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]

- [13] Yu Q K, Tang M, Zhu H J, Zhang H M, Zhang Y W, Sun J X 2008 *Spacecr. Envir. Eng.* **25** 391 (in Chinese) [于庆奎, 唐民, 朱恒静, 张海明, 张延伟, 孙吉兴 2008 航天器环境工程 **25** 391]
- [14] 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
- [15] Benton J L, Kimerling L C 1982 *Journal of the Electrochemical Society* **129** 2098
- [16] Timothy D. Hardy 1994 *MS Dissertation* (Columbia: Simon Fraser University)
- [17] Saigne F, Schrimpf R. D, Fleetwood D M, Cizmarik R, Zander D 2004 *IEEE Trans, on Nucl. Sci.* **44** 1989
- [18] Schrimpf R D, Fleetwood D M, Galloway K F, Lacoé R C, Mayer D C, Puhl J M, Pease R L, Suehle J S 2004 *IEEE Trans, on Nucl. Sci.* **51** 2903
- [19] Boesch H E 1988 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **35** 1160
- [20] Hardy T D 1994 Effects of Radiation Damage on Scientific Charge Coupled Devices *Ph. D. Dissertation* (Burnaby: Simon Fraser University)
- [21] Bourgoin J, Lanoo M (translated by Cardona) 1983 *Point Defects in Semiconductors II*(Berlin: Springer-Verlag) pp103
- [22] Lehmann C 1977 *Interaction of Radiation with Solids and Elementary Defect Production* (Amsterdam: North Holland) pp127
- [23] Wood S, Doyle N J, Spitznagel J A, Choyke W J, More R M, McGruer J N, Irwin R B 1981 *IEEE Trans, on Nucl. Sci.* **28** 4107
- [24] Lindstrom G 2003 *Nucl. phys. and Meth. in Phys. Res. A* **512** 30



# Particle transport simulation and effect analysis of CCD irradiated by protons\*

Zeng Jun-Zhe<sup>1)2)</sup> He Cheng-Fa<sup>1)</sup> Li Yu-Dong<sup>1)†</sup> Guo Qi<sup>1)</sup> Wen Lin<sup>1)</sup> Wang Bo<sup>1)2)</sup>  
 Maria<sup>1)2)</sup> Wang Hai-Jiao<sup>1)2)</sup>

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 17 September 2014; revised manuscript received 25 November 2014 )

## Abstract

Monte Carlo method is used to calculate the energy deposition of proton-irradiated scientific CCD (charge coupled device) structure, and the radiation damage mechanism of the device is analyzed by combining the proton irradiation with the annealing experiments. The ionizing dose in gate oxide layer and the displacement damage dose in silicon deposition are simulated. During irradiation and annealing experiments two main parameters, dark signal and charge transfer efficiency, are investigated. Results show that variations of dark signal and charge transfer efficiency are the same as those with ionizing dose and displacement damage dose. During irradiation, dark signal rises obviously as the fluence of 10 MeV proton increases. Defects and their annealing temperature: the divacancy levels show little annealing effect below 300 °C, while the oxygen-vacancy complex is stable up to 350 °C, and the phosphorous-vacancy has a characteristic annealing temperature of 150 °C. Interface states are annealed totally at 175 °C. So the annealing only affects oxide-trapped-charges. Dark signal is greatly reduced after annealing, this phenomenon means that the dark signal is mainly affected by ionization. The surface dark signal proportion of the total dark signal can be calculated by the reduction of dark signal during annealing and this is at least 80% or more. As the fluence of 10 MeV proton increases, the charge transfer efficiency reduces obviously. After annealing, the recovery of charge transfer efficiency changes very little, so the charge transfer efficiency is unaffected by oxide-trapped-charges, since it is reduced due mainly to bulk defects. The final device damage will always be proportional to the amount of initial damage and also to the electrical effect on the device. Hence NIEL scaling implies a universal relation: device damage =  $k_{\text{damage}} \times$  displacement damage dose, where  $k_{\text{damage}}$  is a damage constant depending on the device and the parameter affected, and the displacement damage dose (DD) is the product of the NIEL and the particle fluence. MULASSIS is used to calculate the displacement damage dose in depletion area of P-area and deduce  $k_{\text{damage}}$  by combining with the experimental value of charge transfer efficiency;  $k_{\text{damage}}$  is calculated to be about  $3.50 \times 10^{-14}$ . The formula for degradation degree of charge transfer efficiency is  $\text{CTE}_{\text{after irradiated}} = 1 - \text{Dd} \times k_{\text{damage}}$ , this formula is used to estimated CTE and the result is compared with the value from experiment. It is shown that the simulated data is in agreement with the experimental data.

**Keywords:** charge coupled devices, proton irradiation, department damage, transport simulation

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

**DOI:** [10.7498/aps.64.114214](https://doi.org/10.7498/aps.64.114214)

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

† Corresponding author. E-mail: [lydong@ms.xjb.ac.cn](mailto:lydong@ms.xjb.ac.cn)