

质子辐照电荷耦合器件诱导电荷转移效率退化的实验分析

王祖军^{1)2)†} 唐本奇²⁾ 肖志刚²⁾ 刘敏波²⁾ 黄绍艳²⁾ 张 勇²⁾

1) (清华大学工程物理系, 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2009 年 9 月 17 日收到; 2009 年 12 月 10 日收到修改稿)

开展了电荷耦合器件 (CCD) 质子辐照损伤的实验研究. 分析了质子辐照 CCD 后电荷转移效率的退化规律, 阐述了质子辐照诱导电荷转移效率退化的损伤机理, 比较了不同能量质子对电荷转移效率的损伤程度. 通过开展辐射粒子输运理论计算, 分析了不同能量质子对电荷转移效率损伤差异的原因.

关键词: 电荷耦合器件, 质子, 辐照效应, 电荷转移效率

PACC: 6170Y

1. 引 言

电荷耦合器件 (CCD) 具有体积小、质量轻、功耗低、量子效率高、动态范围大、寿命长以及机械强度高优良性能, 被广泛应用于航天器对地观测、遥感和空间科学探测等领域, 目前 CCD 已成为卫星光学系统中的关键元器件. 在空间辐射环境中, 星载 CCD 的辐射损伤主要由质子引起, 处于低地球轨道主要由地球 Van Allen 辐射带质子引起; 处于地球同步静止轨道主要由太阳耀斑质子引起. CCD 受质子辐照后, 质子辐照损伤诱发的体缺陷对 CCD 性能将产生重要影响, 尤其是辐照导致 CCD 的电荷转移效率 (CTE) 降低, 将严重影响成像质量, 甚至导致 CCD 功能失效, 因而 CCD 质子辐照效应研究备受关注.

国外对 CCD 质子辐照损伤研究开展了大量的工作. Hopkinson^[1] 研究了质子辐照导致 n 埋沟道 CCD 的 CTE 退化的测试方法. Waczynski 等^[2] 跟踪测试了哈勃太空望远镜中使用的 n 埋沟道 CCD 空间运行 5 a 的退化情况, 得出 CTE 从 99.9999% 降至 99.981%, 分析认为 CTE 退化主要是由于质子辐照引起的位移损伤引入了磷-空位缺陷. 在欧洲空间

局的 X 射线多反射镜任务中^[3], 成像阵列采用英国 EEV 公司生产的 CCD, 当能量为 10 MeV 的质子辐照注量为 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时, 电荷转移损失 (CTI) 大约增加了 10^{-4} . Hardy 等^[4] 对背面光照 CCD 成像器件分别在空间飞行器、核成像、粒子探测三种质子辐照环境下开展实验, 得出 CTE 是信号幅度、温度、辐照剂量的函数, 认为影响 CTE 的主要因素是体缺陷. 文献^[5] 还比较了能量分别为 10 和 60 MeV 的质子辐照 CCD 导致 CTE 的退化情况.

国内开展了一些电子元器件的辐照效应实验^[6,7], 但对 CCD 质子辐照效应的实验研究开展很少, 只是零星开展了质子辐照 CCD 的理论计算^[8] 和少量的辐照模拟实验研究^[9]. 随着我国航天事业的迅速发展, 载人航天工程和“嫦娥探月”工程相继实施, CCD 长时间在空间运行的辐射损伤效应亟待研究.

本文通过开展能量分别为 2, 5 和 10 MeV 质子辐照 CCD 的实验研究, 对 CCD 的 CTE 退化规律和损伤机理进行了深入分析; 结合粒子输运理论计算, 分析了不同能量质子辐照 CCD 时 CTE 退化程度不同的原因. 这为星载 CCD 的辐射损伤评估和抗质子辐射加固技术研究提供了理论依据和实验支持.

† E-mail: wzj029@qq.com

2. 实 验

质子辐照实验在北京大学的串列加速器上完成,主要开展了能量分别为 2,5 和 10 MeV 质子辐照 CCD 实验,质子辐照注量范围为 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ — $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. 辐照时,将被辐照器件放入质子加速器的辐照腔内,每次辐照前在腔内的辐照电路板上

放 2 片 CCD. 辐照电路板可提供加电和不加电两种偏置工作方式. 被辐照样品放置完毕后,关闭辐照腔窗口,然后抽真空. 本文的实验进行了 12 批次辐照,一共使用了 24 片 CCD. 辐照时,质子注量率选取两种,分别为 $4.0 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $3.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 为消除 CCD 玻璃窗口对入射粒子能量的吸收,在辐照实验前,去掉了被辐照 CCD 的玻璃窗口. 表 1 给出了 24 片 CCD 受质子辐照时的实验条件.

表 1 质子辐照 CCD 的实验条件

CCD 编号	质子能量/ MeV	累积注量/ 10^{10} cm^{-2}	注量率/ $10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	辐照条件
21	10	7	4	加电辐照
22	10	7	4	加电辐照
23	10	10	4	不加电辐照
24	10	10	4	不加电辐照
25	10	7	35	加电辐照
26	10	7	35	加电辐照
27	10	10	35	不加电辐照
28	10	10	35	不加电辐照
29	10	7	4	加电辐照,遮挡放大器
30	10	7	4	加电辐照,遮挡放大器
11	5	5	35	加电辐照
12	5	5	35	加电辐照
13	5	7	35	不加电辐照
14	5	7	35	不加电辐照
15	5	5	35	加电辐照
16	5	5	35	加电辐照
01	2	3	35	加电辐照
02	2	3	35	加电辐照
03	2	5	35	不加电辐照
04	2	5	35	不加电辐照
05	2	3	35	加电辐照
06	2	3	35	加电辐照
07	2	7	35	加电辐照,遮挡放大器
08	2	7	35	加电辐照,遮挡放大器

质子辐照实验选用的 CCD 是日本东芝公司生产的 TCD1208 线阵 CCD, 型号为 TCD1208BP. TCD1208 线阵 CCD 具有光灵敏度高、暗电流低、一致性好等优良性能. TCD1208BP 型线阵 CCD 具有

2212 个像元,每个像元的尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$. CCD 的一帧输出信号依次为 13 个哑元信号、24 个遮光单元信号、3 个哑元信号、2160 个光敏元信号和 12 个哑元信号. 遮光单元是用作暗信号检

测而被遮蔽. 光敏元由 p-n 结光电二极管组成, 用于产生光信号. 驱动脉冲电压和电源供电电位均为 5 V.

3. 实验结果及分析

3.1. 质子辐照诱发 CTE 降低

CTE 是表征 CCD 性能好坏的重要参数. 在理想情况下, 认为信号电荷包能够完整无损并及时地从一个势阱转移到另一个势阱中. 但事实上并非如此, 电荷包从前面的势阱转移到相邻的势阱时, 因种种原因, 电荷不是瞬时、完全地从前面的势阱转移到相邻的势阱中, 而是有所损失. 电荷转移损失越大、转移次数越多, 信号电荷的衰减就越快, 从而导致 CCD 性能降低. CTE 与转移速度快慢、界面态俘获、极间势垒、环境温度、电荷包大小等因素均有关^[10].

在实验测试过程中, CTE 的测试采用均匀平行光照射, 对整个 CCD 所有像元进行光注入, 读出输出波形, 获取所有像元的输出数据进行分析. 计算 CTE 时, 利用积分球光源, 使 CCD 器件中所有的光敏区像元均匀曝光, 先测试哑元的绝对电位 V_D , 然后取前若干个首像元的平均电位 V_1 , 取末尾若干个像元的平均电位 V_N . 取半饱和光强时的电荷包大小为转移信号电荷包. 除去遮光单元和哑元后, 光敏区像元有 2160 个, 其中每个像元输出时经过的转移次数不同, 离输出端近的转移次数少, 离输出端远的转移次数多, 于是第一个像元转移一次, 第 2160 个像元就转移 2160 次. 由于 TCD1208BP 型 CCD 的转移栅分奇偶两路进行信号转移, 所以实际转移次数^[11] $N = 1080$. 总的转移效率 ε 实际上为转移后的电荷包 Q_1 与转移前的电荷包 Q_0 之比, 取输出放大器增益为 G , 则 $Q_1 = (V_D - V_1)G$, $Q_0 = (V_D - V_N)G$. 所以, 计算总的转移效率 ε 和 CTE 的公式分别为

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{V_D - V_1}{V_D - V_N} \right), \quad (1)$$

$$\eta = \left(\frac{V_D - V_1}{V_D - V_N} \right)^{1/N}. \quad (2)$$

式中 η 为 CTE.

从示波器测试的波形图 (图 1) 可以看到, 辐照

前后 CCD 一帧输出信号的波形变化显著, 图 1(a) 和 (b) 分别为辐照前和辐照后的典型波形. 图 1(a) 中辐照前 V_1 和 V_N 测试值相差不大, 用公式 (1) 和 (2) 计算得出 $\eta = 99.998\%$, 而图 1(b) 中辐照后 V_1 和 V_N 相差较大, CCD 的一帧输出信号形状呈弧形, 用公式 (1) 和 (2) 计算得出 $\eta = 99.98\%$, θ ($\theta = 1 - \eta$) 增大了一个数量级, θ 为 CTL.

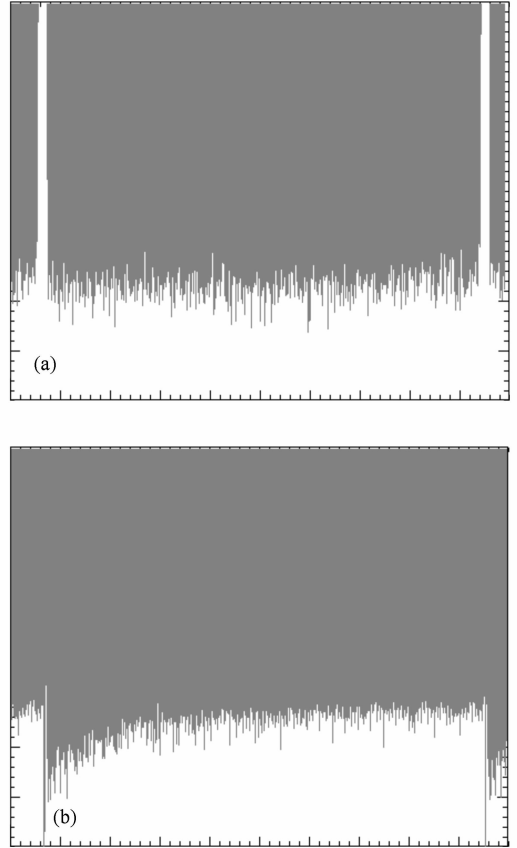


图 1 质子辐照前后, CCD 一帧输出信号的典型波形 (a) CCD 辐照前的典型波形, (b) 质子辐照注量累积到 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时的典型波形

CCD 在进行辐照实验时, 随着辐照粒子的注量或剂量的累积, 会出现辐射诱发的暗信号不断增加, 当所有势阱中充满暗信号时, CCD 像元处于饱和状态. 此时 CCD 失去了感光功能且退火后仍不会恢复而无法成像, 在辐照实验测试时, 通常认为这种情况下 CCD 已经功能失效. 图 2 给出了在能量为 10 MeV 质子辐照下, 编号为 21—28 的 CCD 的 CTE 随质子辐照注量的变化, 从图 2 可以看到, 加电辐照时 CTE 退化要更严重. 当质子辐照注量累积到 $7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时, 处于加电辐照工作状态的编号为 21, 22, 25 和 26 的 CCD 功能均已失效; 而当质子辐照注

量累积到 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时,处于不加电辐照工作状态的编号为 23,24,27 和 28 的 CCD 功能才失效。

图 3 给出了在能量为 5 MeV 质子辐照下,编号为 11—16 的 CCD 的 CTE 随质子辐照注量的变化。从图 3 可以看到,加电辐照时 CTE 退化要更严重。当质子辐照注量累积到 $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时,处于加电辐照工作状态的编号为 11,12,15 和 16 的 CCD 功能均已失效;而当质子辐照注量累积到 $7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时,处于不加电辐照工作状态的编号为 13 和 14 的 CCD 功能才失效。

图 4 给出了在能量为 2 MeV 质子辐照下,编号为 01—04 的 CCD 的 CTE 随质子辐照注量的变化。从图 4 可以看到,加电辐照时,CTE 退化要更严重。当质子辐照注量累积到 $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时,处于加电辐照工作状态的编号为 01 和 02 的 CCD 功能均已失效;而当质子辐照注量累积到 $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时,处于不加电辐照工作状态的编号为 03 和 04 的 CCD 功能才失效。

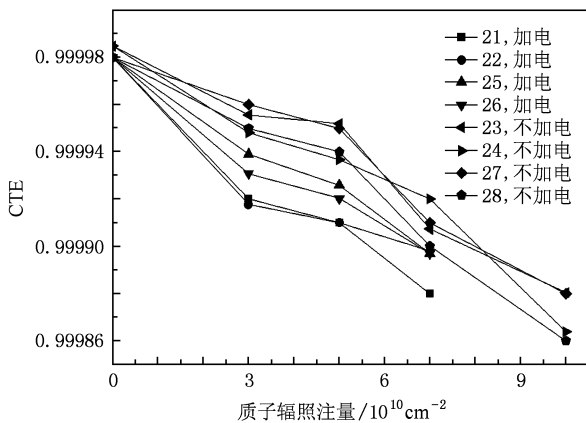


图 2 在 10 MeV 质子辐照下,CCD 的 CTE 随质子辐照注量的变化

从 CCD 辐照实验的测试结果可以看到,CCD 的 CTE 均随质子辐照注量增大而减小,这是由于入射质子碰撞使 CCD 的 Si 中出现晶格原子位移,产生初始空位-间隙原子对。这些初始空位-间隙原子对扰乱了晶格的完整性,使系统处于激发态。空位和间隙原子可以在晶体中移动,直至通过各种竞争反应,形成各种类型稳定的体缺陷,如磷-空位缺陷、氧-空位缺陷和双空位缺陷等^[12]。这些稳定的体缺陷不断发射和俘获在埋沟中转移的信号电荷,从而使 CTE 受到体缺陷的影响。CCD 的 CTE 退化是由于位移损伤诱发的体缺陷俘获了一部分 CCD 转移沟道中信号电荷包内的载流子。尽管缺陷俘获信号

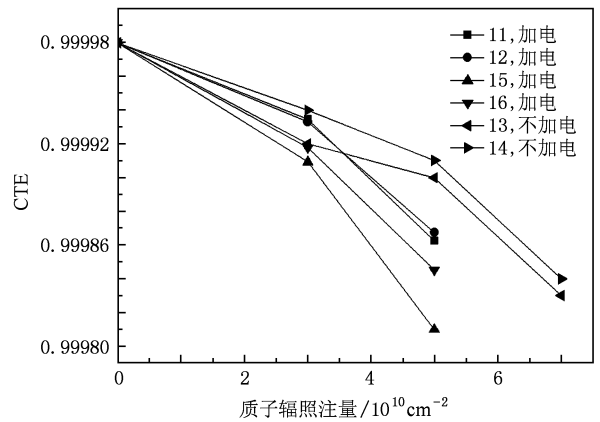


图 3 在 5 MeV 质子辐照下,CCD 的 CTE 随质子辐照注量的变化

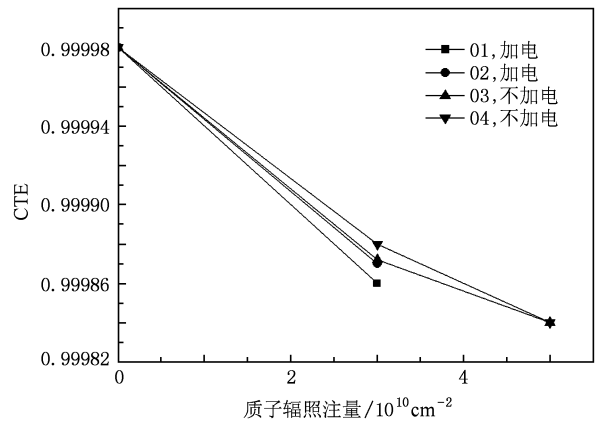


图 4 在 2 MeV 质子辐照下,CCD 的 CTE 随质子辐照注量的变化

电荷包中的载流子后来又发射,但这部分载流子不一定被释放回原来的电荷包中^[13]。图 5 给出了通过辐射粒子输运模拟软件 TRIM,计算能量为 10 MeV 的质子入射到 CCD 像元中产生的初始空位密度及其分布。分布在 CCD 像元中的空位,特别是在埋沟道区和耗尽区,容易形成稳定的体缺陷(如磷-空位缺陷),而磷-空位缺陷对 CTE 的退化起主要作用。

TCD1208BP 型 CCD 的信号电荷在埋沟中转移,埋沟中存在一系列不断发射和俘获电子的体缺陷。CTE 受到体缺陷的发射或俘获电子的动态过程影响,其影响程度与缺陷的俘获时间常数 τ_c 和发射时间常数 τ_e 有关。根据缺陷俘获理论^[14],考虑缺陷俘获和发射两种机制,对距离导带下方能量为 E_i 、俘获截面为 σ_n 的缺陷,其俘获时间常数 τ_c 和发射时间常数 τ_e 分别由下列公式给出^[15]:

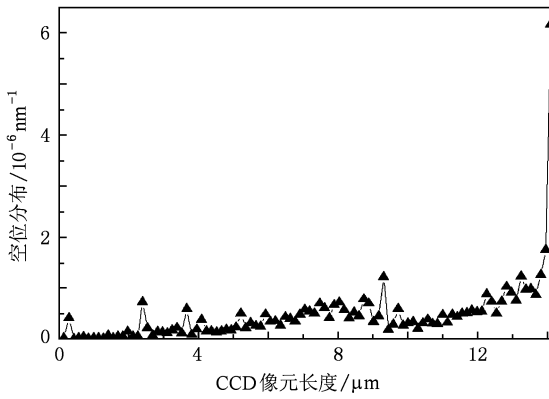


图5 能量为10MeV的质子入射到 CCD 像元中产生的空位密度及其分布

$$\tau_c = \frac{1}{\sigma_n v_{th} n_s}, \quad (3)$$

$$\tau_e = \frac{\exp(E_i / (k_B T))}{\sigma_n X_n v_{th} N_c \chi}, \quad (4)$$

式中 n_s 为埋沟道中的信号电荷密度, v_{th} 为电子的平均热运动速率, N_c 为导带的有效态密度, T 为绝对温度, k_B 为玻尔兹曼常数, X_n 为电子从陷阱发射后熵的变化, χ 为场增强发射允许因子.

从(3)式可以看出, τ_c 与信号强度成反比. 在 CCD 转移沟道内, 辐射引入的附加体缺陷 N_i 俘获电子数 n_i 随时间变化关系由下列公式给出:

$$n_i = \frac{N_i [1 - \exp(-t/\tau_c) \exp(-t/\tau_e)]}{1 + \tau_c/\tau_e}. \quad (5)$$

在电荷载体体积 V_s 内, 得到所有缺陷俘获电子数 n_i , 若检测的转移电荷载体电子数为 N , CTE 的退化 $\Delta\eta$ 由下列公式给出:

$$\Delta\eta = \frac{1}{N} \int_{V_s} n_i dV$$

$$= \frac{1}{N} \int_{V_s} \frac{N_i [1 - \exp(-t/\tau_c) \exp(-t/\tau_e)]}{1 + \tau_c/\tau_e} dV. \quad (6)$$

3.2. 不同能量质子导致 CTE 退化的比较

由于空间辐射环境中质子的能量分布主要在 0.1—400 MeV 范围内, 而地面开展的质子辐照模拟实验往往选取一个或者若干个能量点, 通常采用能量为 10 MeV 的质子作为等效, 所以研究不同能量质子的损伤相关性具有重要意义. 鉴于目前国内质子加速器所能提供条件的限制, 只开展了能量分别为 2, 5 和 10 MeV 的质子辐照实验. 图 6 给出了 CCD 在不加电状态下, CTE 随能量分别为 2, 5 和 10 MeV 的质子累积辐照注量的变化. 图 7 给出了 CCD

在加电状态下, CTE 随能量分别为 2, 5 和 10 MeV 的质子累积辐照注量的变化. 从图 6 和图 7 中均可以看到, 在能量为 2 MeV 质子辐照下, CTE 随质子辐照注量累积退化最显著; 在能量为 5 MeV 质子辐照下, CTE 随质子辐照注量累积退化次之; 在能量为 10 MeV 质子辐照下, CTE 随质子辐照注量累积退化最小.

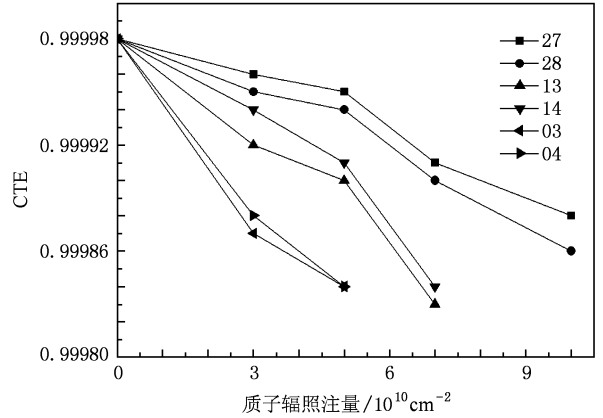


图6 CCD 在不加电状态下, CTE 随能量分别为 2, 5 和 10 MeV 的质子累积辐照注量的变化

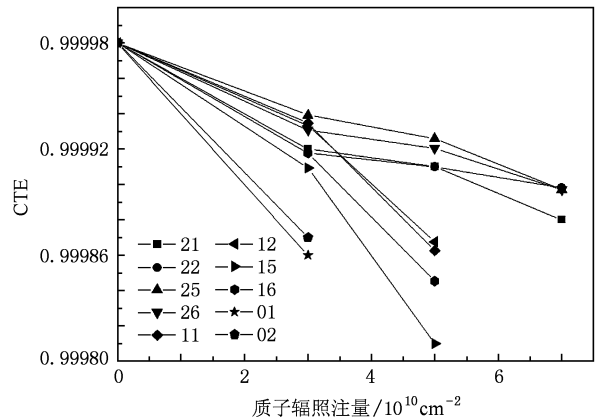


图7 CCD 在加电状态下, CTE 随能量分别为 2, 5 和 10 MeV 的质子累积辐照注量的变化

不同能量质子辐照 CCD 后, CTE 随质子累积辐照注量的退化程度不同, 主要是由于不同能量的质子在 CCD 的体 Si 中产生的位移损伤程度不同. 位移损伤引起器件性能的变化与位移碰撞过程中的非电离能量损失 (NIEL) 近似成正比. 美国海军实验室通过对 CCD 受单能质子辐照后的实验数据进行分析, 得出 CCD 质子位移损伤与 NIEL 具有较好的一致性^[13]. 入射粒子和晶格原子之间的库仑弹性碰撞以及原子核弹性和非弹性碰撞作用造成的损失

称为 NIEL. 入射质子在 CCD 体内的 NIEL 用于产生空位-间隙原子对和声子^[8]. 能量在 1—10 MeV 范围内的质子辐照, 其 NIEL 与器件位移损伤呈近似线性关系, NIEL 越大, 器件损伤越严重. 根据文献^[16]用辐射粒子输运软件 MCNPX 计算能量在 0.1—10 MeV 范围内的质子在 Si 中的 NIEL 值, 画出了 NIEL 随质子能量的变化关系, 如图 8 所示.

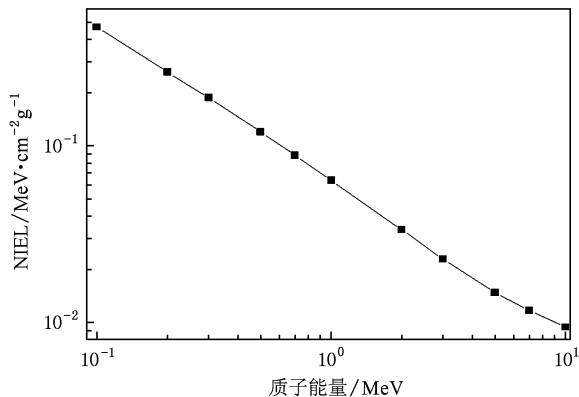


图 8 能量为 0.1—10 MeV 的质子入射在 Si 材料中 NIEL 的理论计算结果^[16]

应用 TRIM 粒子输运模拟软件, 采用 Monte-Carlo 方法进行不同能量质子入射到 CCD 像元的理论计算, 通过计算 50000 个入射质子作统计平均后得到平均每个质子产生的初始空位密度及其分布. 图 9 给出了能量分别为 2, 5 和 10 MeV 的质子入射到 CCD 像元中产生的初始空位密度及其分布. 从图 9 可以看到, 能量为 2 MeV 的质子入射到 CCD 像元中产生的初始空位密度最大, 能量为 10 MeV 的质子入射到 CCD 像元中产生的初始空位密度最小. 初始空位密度越大, CCD 位移损伤越严重, CTE 退化越显著.

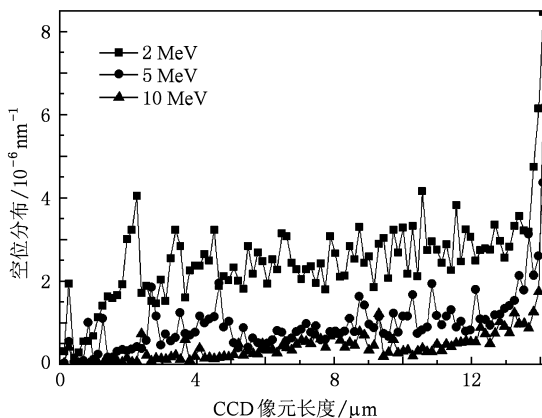


图 9 能量分别为 2, 5 和 10 MeV 的质子入射到 CCD 像元中产生的空位密度及其分布

4. 结 论

通过开展 CCD 质子辐照实验研究, 得出了 CTE 随质子辐照剂量退化的规律. CTE 退化是由于质子辐照诱发的体缺陷影响了 CCD 转移沟道中的信号电荷. 比较了能量分别为 2, 5 和 10 MeV 的质子辐照 CCD 时 CTE 的退化程度. 结合辐射粒子输运理论计算, 分析了不同能量质子辐照 CCD 导致 CTE 退化程度不同的原因. 由于不同能量的质子辐照 CCD 产生的位移损伤程度不同, 而位移损伤导致器件性能退化与位移碰撞过程中的 NIEL 呈近似线性关系. 能量为 2 MeV 的质子入射到 CCD 像元中产生的 NIEL 和初始空位密度明显大于能量为 5 和 10 MeV 的质子入射后产生的 NIEL 和初始空位密度, 能量为 10 MeV 的质子入射到 CCD 像元中产生的 NIEL 和初始空位密度相对最小.

[1] Hopkinson G R 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2460
 [2] Waczynski A, Elizabeth J P, Marshall P W, Reed R A, Johnson S D, Hill R J, Delo G S, Wassell E J, Cheng E S 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 1807
 [3] Holmes S A, Holland A, Watts S 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 2998
 [4] Hardy T, Murowinski R, Deen M J 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 154
 [5] Hopkinson G R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1960
 [6] Zhao H J, He S Y, Sun Y Z, Sun Q, Xiao Z B, Lü W, Huang

C Y, Xiao J D, Wu Y Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 404 (in Chinese) [赵慧杰、何世禹、孙彦铮、孙强、肖志斌、吕伟、黄才勇、肖景东、吴宜勇 2009 物理学报 **58** 404]
 [7] He C H, Geng B, Yang H L, Chen X H, Li G Z, Wang Y P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2235 (in Chinese) [贺朝会、耿斌、杨海亮、陈晓华、李国政、王燕萍 2003 物理学报 **52** 2235]
 [8] 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)]
 [9] 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]
- [10] Zhou Y S, Liu Y F, Bai T Z 1997 *Electro-Optical Image Formation Principle* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) p291 (in Chinese) [邹昇松、刘玉凤、白廷柱 1997 光电成像原理 (北京:北京理工大学出版社) 第 291 页]
- [11] Xiao Z G, Tang B Q, Li J L, Zhang Y, Liu M B, Wang Z J, Huang S Y 2007 *At. Ener. Sci. Techn.* 41 117 (in Chinese) [肖志刚、唐本奇、李君利、张勇、刘敏波、王祖军、黄绍艳 2007 原子能科学技术 41 117]
- [12] Cao J Z 1993 *Radiation Effects on Semiconductor Materials* (Beijing: Science Press) pp144,145 (in Chinese) [曹建中 1993 半导体材料的辐射效应 (北京:科学出版社) 第 144, 145 页]
- [13] Dale C, Marshal P, Cummings B, Shamey L, Holland A 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 40 1628
- [14] Hopkins I H, Hopkinson G R, Johlander B 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 41 1984
- [15] Hopkinson G R 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 43 614
- [16] Insoo J, Michael A 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 50 1924

Experimental analysis of charge transfer efficiency degradation of charge coupled devices induced by proton irradiation

Wang Zu-Jun^{1)2)†} Tang Ben-Qi²⁾ Xiao Zhi-Gang²⁾ Liu Min-Bo²⁾ Huang Shao-Yan²⁾ Zhang Yong²⁾

1) (Key Laboratory of Particle and Radiation Imaging of Ministry of Education, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 17 September 2009; revised manuscript received 10 December 2009)

Abstract

The experiments on charge coupled devices (CCD) irradiated by protons were carried out. The charge transfer efficiency (CTE) of CCD was measured before and after proton radiation. The radiation damage mechanism of CTE degradation was analyzed. The CTE degradation induced by irradiation of protons of different energies was compared. The experimental results were explained by the theoretical analysis based on the calculation by radiation particle transport simulation software.

Keywords: charge coupled devices, proton, radiation effect, charge transfer efficiency

PACC: 6170Y