

中子辐照导致线阵电荷耦合器件 电荷转移效率退化实验研究

肖志刚^{1,2}, 唐本奇¹, 李君利², 张 勇¹, 刘敏波¹, 王祖军¹, 黄绍艳¹

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要:利用 TRIGA 型脉冲反应堆提供的快中子, 对线阵电荷耦合器件进行中子辐照实验研究。研究结果表明: 在 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 中子注量范围内, 该器件的电荷转移效率 (CTE) 随辐照中子注量的增加而线性下降; 电荷转移效率的下降与电荷包在沟道中的转移时间及转移电荷包的电量有关。

关键词:线阵电荷耦合器件; 中子辐照; 电荷转移效率

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2007)01-0117-04

Experimental Study on Neutron-Induced Charge Transfer Degradation of Linear Charge Coupled Device

XIAO Zhi-gang^{1,2}, TANG Ben-qi¹, LI Jun-li², ZHANG Yong¹,
LIU Min-bo¹, WANG Zu-jun¹, HUANG Shao-yan¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The effect of neutron irradiation on the charge transfer efficiency of the linear CCD (charge coupled device) is studied. The CCD was irradiated by the fast neutron with the fluence of $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ from the TRIGA reactor. The charge transfer efficiency of the irradiated linear CCD is linearly decreased with the increase of neutron fluence, and the charge transfer degradation is related to the charge transfer time and the quantity in CCD's transfer channel.

Key words: linear charge coupled device; neutron irradiation; charge transfer efficiency

电荷耦合器件 (CCD, charge coupled device) 由美国 Bell 实验室于 1970 年首先研制成功, 它是作为 MOS (metal oxide semiconductor) 技术的延伸而生产的 1 种半导体光电器件。CCD 的体积小、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, 已被

广泛应用于航天器对地观测、遥感等空间科学探测器以及反应堆热中子、快中子场成像等领域。随着 CCD 在上述领域的大量使用, 各种核辐射对 CCD 的辐射损伤影响日益突出。因受核辐射环境中的 γ 射线、质子、中子、电子等粒子的辐射作用, 工作在辐射环境中的 CCD 将出

现暗电流增加、电荷转移效率 CTE (charge transfer efficiency) 降低、读出噪声增大等现象,影响器件正常工作,严重时会使 CCD 失效。近 10 年来,国外在 CCD 辐射效应研究方面主要集中在空间质子产生的位移辐射损伤效应^[1-4],而中子辐射效应研究方面的工作鲜见报道,国内则主要利用 γ 辐射源、电子辐照源进行总剂量效应方面的研究^[5]。对于 CCD 中子位移损伤效应研究,目前尚未见国内的相关报道。

1 实验

1.1 中子辐照源

中子辐照源为西北核技术研究所的 TRIGA 型脉冲堆(简称西安脉冲堆)。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 $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,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。 n/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 $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{Gy}^{-1}$ (对 Si 而言)。CCD 中子辐照试验的中子注量分别为 1×10^{12} 、 3×10^{12} 、 5×10^{12} 和 $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (注量误差为 5%)。伴随的中子俘获 γ 总剂量低于 $1.6 \times 10^{-2} \text{ kGy}$ (对 Si 而言), γ 电离总剂量效应可忽略不计^[5]。

1.2 CTE 的测试

实验选用一种商用线阵埋沟道 CCD 芯片(批号为 0302EAD)进行中子辐照实验。为方便离线测量,CCD 辐照板与测试板分开设计。辐

照板为器件提供加电和不加电两种状态。测试板为辐照板提供电源和驱动时序脉冲信号。为便于测量不同时序条件下器件的 CTE,选用可编程器件来完成线阵 CCD 的驱动设计^[6]。

CTE 测试系统结构框图示于图 1。积分球光源提供均匀注入光场,采用光注入法测试器件辐照前后 CTE 的变化。

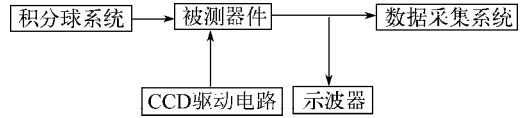


图 1 CCD 参数测试系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of CCD's test system

光注入法测试 CTE 示意图示于图 2。图中, $D_1 \sim D_{66}$ 单元为 CCD 的哑元部分, $S_1 \sim S_{1024}$ 单元为 CCD 的光敏单元。利用积分球光源,使 CCD 器件中距离输出端不同位置处的两部分光敏单元 (S_A 、 S_B) 均匀感光,产生相同电量的电荷包。由于这两部分光敏单元所对应的存储单元转移次数不同,相同电量的电荷包经过不同次数转移损失后,到达输出端后输出的电压则不尽相同。根据两部分光敏单元的输出电压 V_1 、 V_2 及其对应的像素单元序号 S_A 、 S_B ,可知电荷包由光敏单元 S_A 对应寄存器到光敏单元 S_B 对应寄存器所转移的次数 $n = B - A$,由下式可计算出 CTE:

$$\frac{V_1}{V_2} = \text{CTE}^n$$

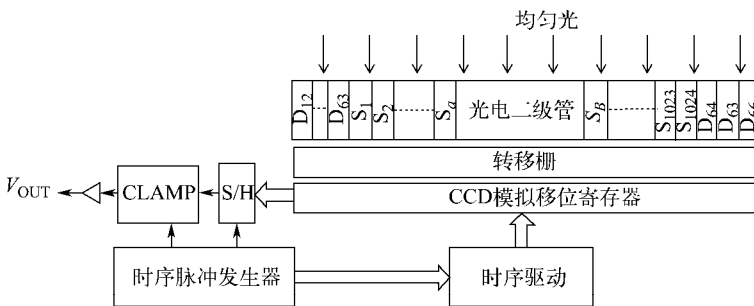


图 2 光注入法测试 CTE 结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CCD CTE test

2 实验结果及其分析

2.1 实验结果

分别离线测量了经 1×10^{12} 、 3×10^{12} 、 5×10^{12} 和 8×10^{12} cm^{-2} 快中子辐照后 CCD 的 CTE 变化。测量了器件在不同时序(帧转移周期分别为 3.3、8.86、15 和 22 ms)和在转移不同电量的电荷包情况下,CTE 的退化情况。

图 3 为经 1×10^{12} cm^{-2} 快中子辐照后,CTE 与电荷包在单个栅元中转移时间的关系。光注入法测试时,注入光强为半饱和光强。图 4 示出 CCD 经 1×10^{12} cm^{-2} 快中子辐照后器件帧转移周期为 8.86 ms 条件下 CTE 与电荷包电量间的关系。光注入法测试时,注入光强分别取使输出电压为 1/4、1/3、1/2、2/3、3/4 饱和电压时的光强。

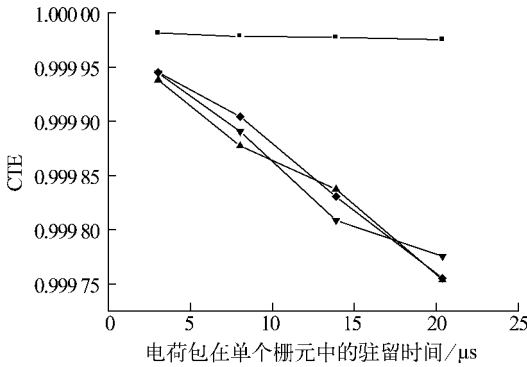


图 3 CTE 与电荷包单次转移时间的关系

Fig. 3 CTE vs. charge transfer time

■——辐照前;◆——2# CCD(加电辐照);
▲——3# CCD(加电辐照);▼——4# CCD(不加电辐照)
光信号为半饱和光强,快中子注量为 10^{12} cm^{-2} ,
温度为 20°C

图 5 示出帧转移周期为 3.3 ms,经 1×10^{12} 、 3×10^{12} 、 5×10^{12} 和 8×10^{12} cm^{-2} 注量的快中子辐照后,沟道内转移半饱和电量时的 CTE。CCD 芯片按序号进行编号。辐照时,抽取 10 片 CCD,分组进行 1×10^{12} 、 3×10^{12} 、 5×10^{12} cm^{-2} 注量辐照,其中,10# CCD 经过 3×10^{12} 和 5×10^{12} cm^{-2} 两次注量的累积辐照。

2.2 实验结果分析

实验结果显示,器件在加电辐照和不加电辐照时,离线测量得到的损伤结果相同。中子入射主要引起 CCD 器件的辐射位移损伤。中子与 Si 原子作用在 Si 体内引起晶格原子错

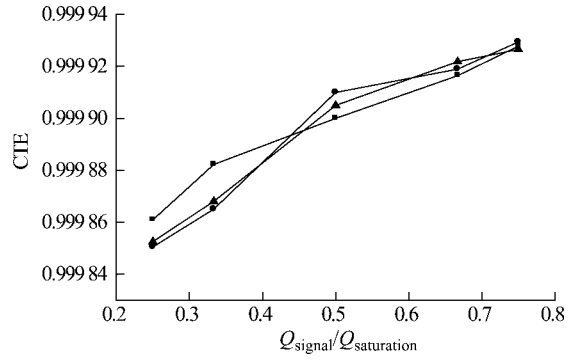


图 4 CTE 与电荷包电量的关系

Fig. 4 CTE vs. charge quantity

■——3# CCD;●——2# CCD;▲——4# CCD
快中子注量为 10^{12} cm^{-2} ,温度为 20°C

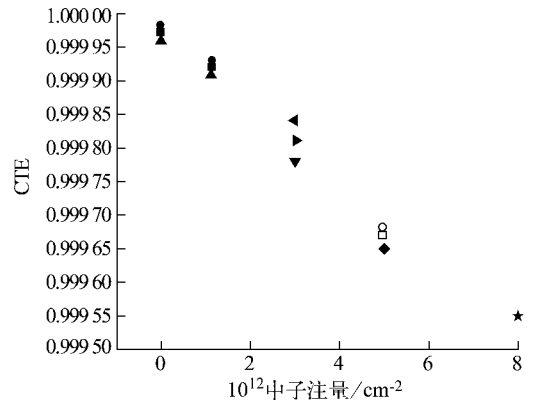


图 5 不同中子注量下 CTE 的退化

Fig. 5 CTE at different neutron fluences

帧转移时间为 3.3 ms,温度为 20°C

■——3# CCD;●——2# CCD;▲——4# CCD;
▼——5# CCD;◀——7# CCD;▶——9# CCD;
◆——10# CCD;□——14# CCD;
○——15# CCD;★——10# CCD

位,产生空位-隙原子对,形成复合中心。其中部分被复合,部分在体内迁移,与其它缺陷、杂质、掺杂原子形成稳定的缺陷团,其能级处于能隙之间。转移沟道内缺陷引入的附加体态对信号电荷的俘获导致 CTE 降低。

由缺陷俘获理论^[7],考虑缺陷俘获和发射两种机制。对于导带下方距离导带能量为 E_i 、俘获截面为 σ_n 的陷阱,其俘获的时间常数 τ_c 和发射时间常数 τ_e 分别由式(1)和(2)给出:

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

$$\tau_e = \frac{\exp(E_i/kT)}{\sigma_n X_n v_{th} N_c x} \quad (2)$$

式中: n_s 为信号密度; 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 为热力学温度; k 为波尔兹曼常数; X_n 为电子从陷阱发射后熵的变化; x 为场增强发射允许的系数。

发射时间常数 τ_e 与温度呈指数关系。俘获时间对温度依赖不强。可以看出, 俘获时间与信号强弱成反比。假如电荷通过转移单元的时间比俘获时间短, CTE 将不会降低。电荷转移损失率 CTI (CTI = 1 - CTE) 的捕获系数 ξ 可由式(3)给出:

$$\xi = 1 - \exp(-t/\tau_c) \quad (3)$$

式中: t 为转移时间。

电荷通过转移单元的转移时间增长, 电荷转移效率损失增大。图 3 所示结果可用上述理论得以解释。图 4 所示结果与 CCD 电荷转移效率有关(电荷转移效率是指光生电荷在转移区中从一级转移寄存器到下一级转移寄存器的电荷数占原电荷数的百分数)。CTE 值的大小不仅与缺陷对信号电荷的俘获损失有关, 还与所转移的信号电量有关。图 4 的结果表明, 弱信号下的电荷转移损失率比强信号下的大。

在 CCD 转移沟道内, 缺陷引入的附加体态 N_t 俘获电子数 n_t 随时间变化关系由式(4)给出:

$$n_t = \frac{N_t(1 - e^{-t/\tau_c} e^{-t/\tau_e})}{1 + \tau_c/\tau_e} \quad (4)$$

在电荷包体积 V_s 内, 得到所有缺陷俘获电子数为 n_t , 若检测到的转移电荷包电子数为 N_{test} , CTE 的退化 ΔCTE 则如式(5)给出:

$$\Delta CTE = \frac{1}{N_{test}} \int_{V_s} n_t dV = \frac{1}{N_{test}} \int_{V_s} \frac{N_t(1 - e^{-t/\tau_c} e^{-t/\tau_e})}{1 + \tau_c/\tau_e} dV \quad (5)$$

由图 5 可见, 随辐照中子注量增加, CTE 在 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 范围内线性下降, 说明中子与 CCD 器件中 Si 原子作用由中子位移效应在转移沟道内产生的稳定缺陷数与中子注量呈现线性关系。

3 结论

对于一般商用线阵 CCD, 随辐照中子注量的增加, CTE 在 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 范围内线性下降。电荷转移效率的降低实际取决于电荷包在沟道中的转移时间。转移时间越长, 缺陷俘获

信荷电荷导致电荷转移效率的降低越严重。电荷转移效率的损失, 随沟道内所转移电荷包的电量增加而减小。

本工作得到朱广宁高级工程师、赵柱民副研究员、郝金林高级工程师及其他反应堆运行人员的大力支持与帮助, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] HOPKINSON G R, DALE C J, MARSHALL P W. Proton effects in charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2):614-627.
- [2] WACZYNSKI A, POLIDAN E J, MARSHALL P W, et al. A comparison of charge transfer efficiency measurement techniques on proton damaged n -channel CCDs for the hubble space telescope wide-field camera 3[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6):1 807-1 814.
- [3] HARDY T, MUROWINSKI R, DEEN M J. Charge transfer efficiency in proton damaged CCD's[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(2):154-163.
- [4] HOPKINSON G R. Proton-induced CCD charge transfer degradation at low-operating temperatures[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6):1 790-1 795.
- [5] 刘俊刚, 李敬虹. 电荷耦合器件抗 γ 总剂量辐射加固[J]. 半导体光电, 1996, 17(1):16-22.
LIU Jungang, LI Jinghong. Resistant radiation hardening of γ total dose for charge coupled devices[J]. Semiconductor Optoelectronics, 1996, 17(1):16-22(in Chinese).
- [6] 张勇, 唐本奇, 肖志刚, 等. 基于 CPLD 的 CCD 通用驱动电路设计方法[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 25(2):214-217.
ZHANG Yong, TANG Benqi, XIAO Zhigang, et al. Design method of general-purpose driving circuit for CCD based on CPLD [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, 25(2):214-217(in Chinese).
- [7] HOPKINS I H, HOPKINSON G R, JOHLANDER B. Proton-induced charge transfer degradation in CCD's for near-room temperature applications [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, 41(6):1 986-1 987.