

# 电荷耦合器件辐射效应理论分析与模拟试验方法研究

唐本奇,肖志刚,王祖军,张 勇,黄绍艳,刘敏波,周 辉,陈 伟

(西北核技术研究所,陕西西安 710024)

**摘 要:** 分析了 CCD 电离效应和位移损伤机理,建立了一种国产埋沟 CCD 器件物理模型,实现了 CCD 信号电荷动态转移过程的数值模拟,计算了 1MeV、14MeV 中子引起的 CCD 电荷转移效率的变化规律.建立了线阵 CCD 辐照效应离线测量系统,实现了 CCD 辐射敏感参数测试.利用 Co-60 源和反应堆脉冲中子,开展了商用器件总剂量和中子位移损伤效应模拟试验,在不同辐照条件下,给出了暗电流信号、饱和电压信号、电荷转移效率以及像元不均匀性的变化情况.

**关键词:** CCD; 辐射效应; 理论分析; 模拟试验

**中图分类号:** TN99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 08-1481-04

## Mechanism Analysis and Experiment Simulation on Radiation Effects of CCDs

TANG Ben-qi, XIAO Zhi-gang, WANG Zu-jun, ZHANG Yong, HUANG Shao-yan,

LIU Min-bo, ZHOU Hui, CHEN Wei

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

**Abstract:** It is analyzed about the damage mechanism of ionization and displacement radiation on CCDs, The physical model and the numerical processing method are set up about a buried channel CCD, which has been used to simulate the dynamic transfer process of CCD with the three phrases pulse driver by semiconductor device simulator MEDICI. It is also calculated on the charge transfer efficiency of CCDs irradiated by 1MeV and 14MeV neutrons. An offline measure system is designed for radiation damage effects on linear CCDs based on CPLD. The experiments of ionization and displacement radiation effects are carried out on the commercial linear CCD by Co-60 source and neutron pulse from Xi'an Pulse Reaction with our self-designed test system, and get some valuable results of dark voltage and saturation voltage and charge transfer efficiency and cells inequality varied with total dose and neutron fluence for the devices.

**Key words:** CCD (charge coupled device); radiation effect; mechanism analysis; simulation experiment

## 1 引言

电荷耦合器件(CCD)是重要的光电器件之一,广泛应用于天文星体跟踪、卫星侦察、光学图像处理等领域.卫星在轨运行期间,始终处在空间辐射环境中,造成星用 CCD 器件辐射损伤.在辐射环境监测、核医学图像处理等应用中,CCD 的辐射损伤效应,也是一项重要的研究内容.

在 CCD 器件电离效应和位移损伤机理分析的基础上,本文开展了 CCD 器件信号电荷动态转移过程与中子位移损伤的数值模拟方法研究.设计了线阵 CCD 器件辐照效应离线测量系统,利用 Co-60 源和反应堆脉冲中子,开展了商用器件的总剂量效应和中子位移损伤效应的模拟试验.

## 2 CCD 器件辐射效应机理分析

CCD 器件的辐射效应,主要表现为电离效应和位移损伤.大多数图像 CCD 器件对电离效应非常敏感.对于商用和普通民用器件,损伤的典型剂量值在 3 ~ 10krad 之间,暗电流的增大范围为 1 ~ 10nA/cm<sup>2</sup>/krad<sup>[2]</sup>.电离损伤,在 CCD 内电极与栅氧之间,以及 Si/SiO<sub>2</sub> 界面,引起陷阱和陷阱电荷的累积. Si/SiO<sub>2</sub> 界面陷阱的能级处在 Si 的禁带间,与 Si 体内的载流子相互作用,引起电子—空穴对的热激发,导致暗电流信号的增大.

位移损伤主要由高能电子、质子、中子入射引起.高能粒子与 Si 原子作用,在 Si 体内引起晶格原子错位,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.器件转移沟道出现陷阱,俘获信号电荷,从而导致电荷转移效率 CTE 降低<sup>[3]</sup>.

### 3 CCD 器件电荷转移过程与中子位移损伤的理论模拟

采用重庆光电技术研究所 80 ×80 面阵 CCD 为分析对象,该器件为 N 沟三相多晶硅交迭栅、帧转移结构.光敏区和存储区像元数分别为 80 ×80 元,水平区每个抽头的转移位数为 48 位,器件以逐行转移方式工作.采用两个抽头输出,垂直区和水平区均设计为三层三相多晶硅交叠栅工艺,采用埋沟信号结构,以提高电荷转移效率.器件的横向剖面图如图 1 所示.

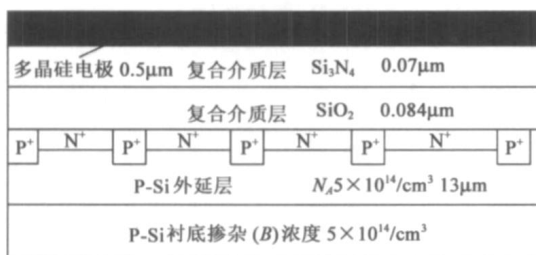


图 1 80×80 面阵 CCD 器件横向剖面图

建立的器件模型如图 2 所示,器件长度 63.4 μm;从表面到器件内部长度 5 μm;复合介质层厚度为 0.154 μm,其中 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 层厚度为 0.07 μm, SiO<sub>2</sub> 层厚度为 0.084 μm;输入、输出栅的长度均为 5 μm;各传输栅与其左边间隙的长度和均为 13.1 μm;输入输出二极管的宽度为 5 μm;P-Si 衬底掺杂浓度为  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ;输入输出

二极管的 N 型掺杂浓度为  $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 高斯分布, 结深为 0.9 μm; 沟道的 N 型掺杂浓度为  $2.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 高斯分布, 沟道结深为 0.5 μm; 少子寿命为 0.1 μs.

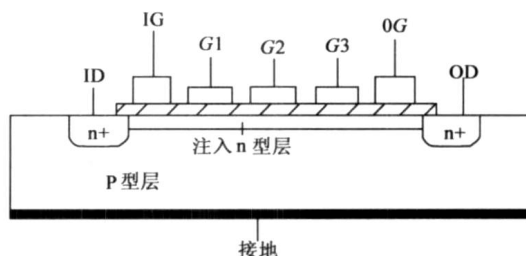


图 2 实际模拟计算时 CCD 器件的简化模型

CCD 器件各栅极,包括输入、输出栅和传输栅的直流偏压均为 -8V;输入、输出二极管的直流偏压为 +14V;接地直流偏压为 0V.在  $t = 1 \mu\text{s}$  时刻,输入栅 IG 跳变到 +8V,跳变时间为 0.01 μs,这时输入栅开启;在  $t = 2 \mu\text{s}$  时刻, G1 跳变到 +12V,跳变时间为 0.01 μs,这是使第一个传输栅开启,这时在 G1 下形成了一个电子势阱,如图 3(a) 所示;在  $t = 3 \mu\text{s}$  时刻, ID 跳变到 -1V,跳变时间为 0.01 μs,这是使输入二极管通过输入栅对第一传输栅 G1 下的势阱注入信号电荷,如图 3(b) 所示;在  $t = 4 \mu\text{s}$  时刻, ID 跳变到 +10V,跳变时间为 0.01 μs;在  $t = 5 \mu\text{s}$  时刻, G2 跳变到 +12V,跳变时间为 0.01 μs,信号电荷开始从 G1 往 G2 下的势阱中转移,如图 3(c) 所示;在  $t = 6 \mu\text{s}$  时刻, G1 跳变到 -8V,跳变时间为 0.1 μs,以给信号电荷提供足够的转移时间;维持 G1 为 -8V 直到  $t = 7 \mu\text{s}$  时刻,传输过程结束,如图 3(d) 所示.

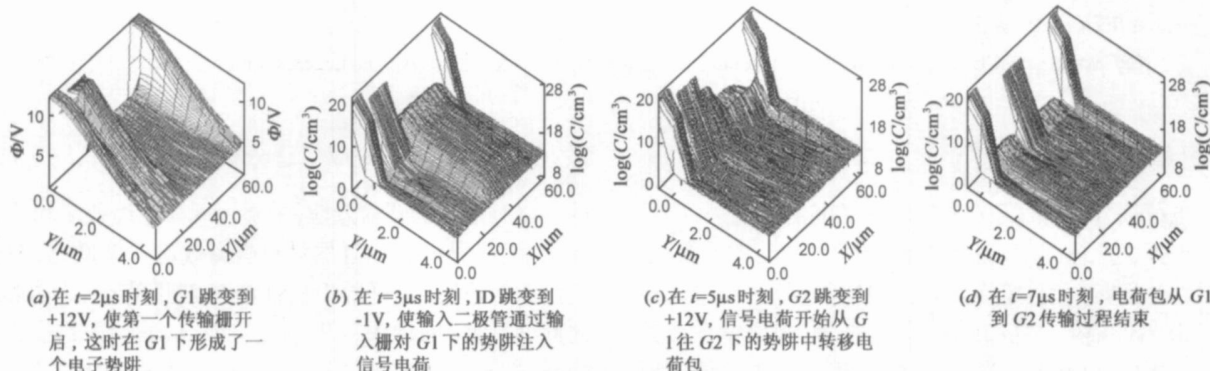


图 3 CCD 器件信号电荷动态转移过程的数值模拟

CCD 器件在中子辐照后产生位移损伤效应,主要表现为电荷转移效率 CTE 降低,从而使器件输出信号失真,严重的会导致器件功能失效.中子与 Si 晶格原子发生弹性碰撞,使晶格原子离开平衡晶格点,产生空位-间隙原子对,从而在 Si 禁带中部产生各种缺陷能级(深能级),这种靠近禁带中心的能级将成为载流子(电子或空穴)的陷阱,降低了 CCD 器件 Si 材料中的载流子浓度.中子辐照引起原子位移将产生附加的电离散射中心,降低了载流子的迁移率.此外,中子辐照引起的缺

陷还形成各种复合中心,使 Si 中的少子寿命下降.

采用 MEDICI,模拟了 CCD 器件在 1MeV、14MeV 中子辐照下 CTE 的变化,计算结果如图 4 所示.可以看出,CTE 随中子辐照剂量增大而减小,当中子辐照剂量小于  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  时,电荷转移效率 CTE 随中子辐照剂量增加而减小缓慢,当中子辐照剂量大于  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  时,电荷转移效率 CTE 随中子辐照剂量增加而减小明显.且 14MeV 中子的损伤情况,较之 1MeV 中子严重得多.

埋沟 CCD 器件携带信息的电子是  $N$  层中的多子,而以多子为导电机理的半导体器件性能退化的主要原因是载流子去除效应.只有当缺陷俘获的电荷密度接近原掺杂浓度时,载流子去除效应才明显.由于 14MeV 中子辐照产生的缺陷团总密度约为 1MeV 中子的 3 倍,所以 14MeV 中子比 1MeV 的中子对电荷转移效率的影响更大.

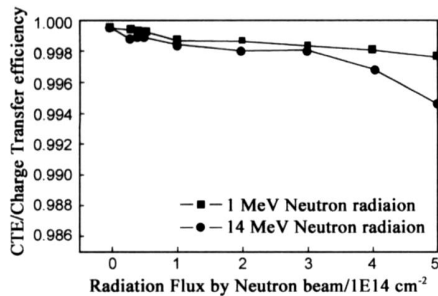


图 4 1MeV 和 14MeV 中子作用下, CCD 器件 CTE 随中子注量 ( $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \sim 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) 的变化曲线

#### 4 线阵 CCD 器件总剂量与中子位移损伤效应的试验模拟

自行研制了线阵 CCD 辐照效应离线测试系统<sup>[4,5]</sup>,分别为 DUT 提供驱动信号和偏置电源,测试 CCD 芯片参数;辐照板上设计 3 个 DUT 插座,分别提供 3 种偏置状态:加偏置电压和驱动信号,只加偏置电压,不加偏置.建立的 CCD 器件总剂量辐照效应模拟试验系统,主要包括:Co-60 辐射源、DUT 和辐照板、测试板.

试验过程中,Co-60 的辐射剂量率为  $0.5 \text{ rad/s}$ ,累积剂量每间隔  $1 \text{ krad}$ ,对器件参数进行离线测量,包括在 3 种偏置状态下,器件的暗电压、饱和电压、动态范围和信噪比.在图 5 中,分别给出了 TCD132D 暗电压、饱和电压和电流随辐照剂量的变化.可以看出,随着辐照剂量的增大,TCD132D 的暗电流信号增大,饱和电压减小.CCD 器件的偏置状态,严重影响器件的总剂量损伤程度.在未加电情况下,累积剂量低于  $40 \text{ krad (Si)}$  时,器件的暗电流和饱和电压随着辐射剂量的增加,缓慢的变化.器件在偏置状态下,CCD 器件参数随辐射剂量的增加,变化较快.对于该器件的总剂量辐射损伤,存在一个较为明显的转折点,在累积辐射剂量低于  $\sim 4 \text{ krad (Si)}$  时,器件饱和电压的变化相对缓慢;累积辐射剂量低于  $\sim 7 \text{ krad (Si)}$  时,器件暗电流信号的变化相对缓慢;而当累积辐射剂量超过该阈值时,器件的暗电流信号迅速增大,饱和电压严重下降.此外,器件在加电状态下的损伤规律,与器件处于同时加电压加载驱动信号情况下的试验结果,大体一致.

利用西安脉冲反应堆快中子装置,开展了 CCD 中子位移损伤的模拟试验.在表 1 中,给出了辐照装置的中

子环境的相关参数.进行了三次反应堆辐照效应试验,中子注量分别为  $1 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ ,  $3 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ ,  $5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ ,每次辐照 4 片 CCD,其中,加电和不加电器件各两片,对编号 10# 的片子进行了  $3 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$  和  $5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$  两种注量的累积辐照.在  $3.3 \text{ ms}$ 、 $8.86 \text{ ms}$ 、 $15 \text{ ms}$ 、 $22 \text{ ms}$  四种积分时间状态下,分别进行了测试,测得 CCD 器件 TCD1208AP 的饱和输出电压为  $3.53 \text{ V}$ ,在输出电压为半饱和电压时所对应的光强下进行 CTE 的测量.

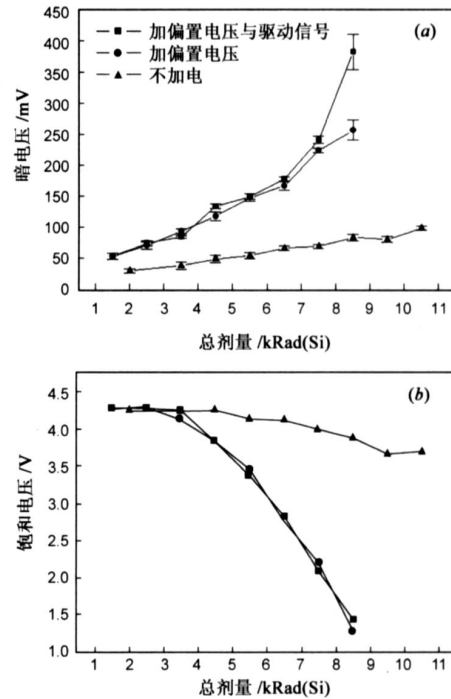


图 5 TCD132D 暗电压 (a) 与饱和电压; (b) 随累积剂量的变化

表 1  $1^{\#}$  中子装置内部空间前表面处中子、  
表 1  $1^{\#}$  中子装置内部空间前表面处中子、  
参数的理论计算值和测量值

参 数	蒙特卡罗	离散坐标	测量值
	耦合抽样法	耦合求解法	
$\phi_f \times 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} > 0.1 \text{ MeV}$	1.8390	1.8124	2.0104
$\phi_{\text{fast}} \times 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 超热中子	1.0975	0.98643	0.97567
$\phi_{\text{th}} \times 10^8 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 热中子	0.053272	0.067700	4.7576
$\phi_f \times 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	2.9366	2.7989	2.9738
$\dot{D} \times 10^{-2} \text{ Gy/s}$	25.99	27.04	34.91
$\phi_f \dot{D} \times 10^{11} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{Gy})$	7.0758	6.7027	5.7588
$E > 0.01 \text{ MeV}$ 的中子损伤等效系数 $D$	0.850	—	0.701
$E > 0.1 \text{ MeV}$ 的中子损伤等效系数 $D$	1.06	—	1.02
大于 $0.01 \text{ MeV}$ 中子谱平均能量	1.14 MeV	—	0.85 MeV
大于 $0.1 \text{ MeV}$ 中子谱平均能量	1.4 MeV	—	1.05 MeV

在表 2 中,给出了不同中子注量辐照后 CTE 的变化,可以看出,随着中子注量的增加,转移效率明显下降,且 CTE 随中子注量的变化,呈现出近似线性的关系.说明,在此辐照条件下,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具有某种线性的关系.

表 2 不同中子注量辐照下 CTE 的变化

中子注量 ( $n/cm^2$ )	0	$1 \times 10^{12}$	$3 \times 10^{12}$	$5 \times 10^{12}$	$8 \times 10^{12}$
总的转移效率 TTE	97.88 %	93.88 %	81.40 %	74.03 %	64.04 %
单次转移效率 CTE	99.99677 %	99.99265 %	99.97854 %	99.96916 %	99.95483 %

离线测量了  $1 \times 10^{12} n/cm^2$ 、 $3 \times 10^{12} n/cm^2$  两种注量下,像元输出电压波形变化情况,如图 6、图 7 所示,积分时间为 8.86ms. 依据局部 10 个相邻像元,分别计算出辐照前的不均匀度为:0.71%,注量  $1 \times 10^{12} n/cm^2$  的辐照后的像元不均匀度为:1.67%,注量  $3 \times 10^{12} n/cm^2$  辐照后像元的不均匀度为 5.49%.

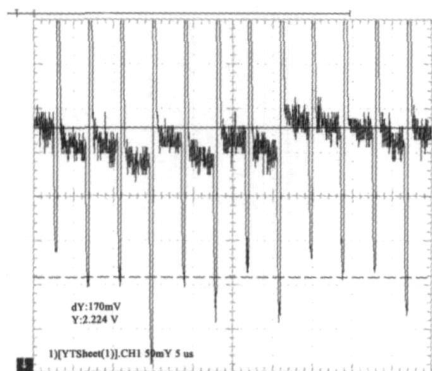
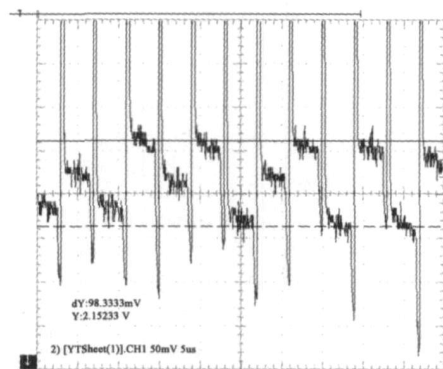


图 6 辐照前像元输出波形

图 7  $1 \times 10^{12} n/cm^2$  中子辐照后像元输出波形

## 5 结论

选取线阵 CCD 器件,开展了光电器件辐射效应的理论分析与模拟试验方法研究. 分析了 CCD 器件电离效应和位移损伤机理,建立了一种国产埋沟 CCD 的器件物理模型,利用二维器件模拟软件 MEDICI,模拟了该器件在三相时序脉冲驱动下的电荷包的动态转移过程以及转移效率 CTE 的提取方法. 建立了 CCD 器件中子位移损伤效应模型,分别计算了 1MeV 和 14MeV 中子辐照对 CCD 器件电荷转移效率 CTE 的影响. 建立了线阵 CCD 器件辐照效应离线测量系统. 利用 Co-60 源和反

应堆中子,开展了商用器件的总剂量效应与中子位移损伤效应的模拟试验,给出了暗电流信号、饱和电压信号、电荷转移效率以及像元不均匀性的变化情况,得到了初步的规律. 实践证明,在一定范围内,本工作所建立的数值计算与模拟实验方法,是可行和可靠的.

## 参考文献:

- [1] Radeka V. Two Dimensional Transient Analysis of a Buried CCD[J]. Nucl Instr and Meth, 1984, A226(2): 209 - 218.
- [2] Hopkinson G R. Random telegraph signals from proton irradiated CCDs[A]. RADECS '93, 2th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems [C]. Saint-Malo, France. 1993. 13 - 16.
- [3] 唐本奇, 王祖军, 张勇, 肖志刚, 黄绍艳. 电荷耦合器件辐射损伤机理分析[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(6): 579 - 581.  
Tang Ben-qi, Wang Zu-jun, Zhang Yong. Analysis of radiation damage mechanism of charge coupled devices [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(5): 494 - 497. (in Chinese)
- [4] 张勇, 唐本奇, 肖志刚, 等. 线阵 CCD 总剂量辐照效应离线测量系统设计[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(5): 494 - 497.  
Zhang Yong, Tang Ben-qi, Xiao Zhi-gang. Design of offline measure system for radiation damage effects on linear CCD [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(5): 494 - 497. (in Chinese)
- [5] 张勇, 唐本奇, 肖志刚. 基于 CPLD 通用驱动电路的设计方法[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 25(2): 214 - 217.  
Zhang Yong, Tang Ben-qi, Xiao Zhi-gang. Design method of general-purpose driving circuit for CCD based on CPLD [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, 25(2): 214 - 217. (in Chinese)

## 作者简介:



唐本奇 男, 1966 年生于湖南常德, 1987 年获武汉大学学士学位, 1997 年获西安交通大学半导体器件与微电子学专业博士学位, 2004 - 2006 年, 在防化研究院核科学与技术博士后流动站做博士后. 副研究员, 硕士生导师. 主要研究方向为电子产品辐射效应及其模拟技术和加固性能评估技术研究. 发表论文二十余篇, 获部级科技进步一、三等奖五项.

E-mail: tangbq@hotmail.com