

文章编号: 1000-7032(2016)01-0044-06

电荷耦合器件中子辐照诱发的位移效应

汪 波^{1,2}, 李豫东^{1*}, 郭 旗¹, 汪朝敏³, 文 林¹

(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, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘要: 为研究电荷耦合器件空间辐照效应、参数退化机理,对国产 64 × 64 像元电荷耦合器件进行了中子辐照位移损伤效应研究。样品在中子辐照下,暗信号、暗信号非均匀性和电荷转移效率等关键性能参数退化显著。研究表明:暗信号的退化是由于中子辐照产生的体缺陷能级在耗尽层中充当复合-产生中心,增大了热载流子的产生率所致,而各像素单元暗信号退化的不一致性使暗信号非均匀性增大;电荷转移效率显著减小则是由于中子辐照在转移沟道中产生的体缺陷不断捕获、发射电子所引起。在整个实验过程中,饱和输出电压的退化可以忽略不计,表现出较好的抗位移损伤能力。

关键词: 电荷耦合器件; 中子辐照; 位移效应; 电荷转移效率; 暗信号

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20163701.0044

Neutron Irradiation Induced Displacement Damage Effects on Charge Coupled Device

WANG Bo^{1,2}, LI Yu-dong^{1*}, GUO Qi¹, WANG Chao-ming³, WEN Lin¹

(1. Key Laboratory of Functional Materials and Devices under Special Environments of Chinese Academy of Sciences, Xinjiang Key Laboratory of Electric Information Materials and Devices, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China)
* Corresponding Author, E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn

Abstract: Displacement damage effects due to neutron irradiations of charge coupled devices were presented through the analysis of the dark signals behavior in pixel arrays. When the fluence of neutron reached the predetermined point, the change of dark signal, dark signal non-uniformity, charge transfer efficiency and saturated output signal was measured off line. The major effect of neutron induced displacement damage on charge coupled device is the increase in dark signals as a result of carrier generation in the bulk depletion region of the pixel. Although the increase in the mean dark signals with neutron irradiation is important, the dark signals non-uniformity is generally the biggest concern for charge coupled device applications in space. Very large dark signals pixels can be produced when a collision occurs in a high electric field region of a pixel as a result of electric field enhanced emission. Another important performance parameter for a charge coupled device is the charge transfer efficiency, which is the fraction of signal charge transferred from pixel to pixel during read out. If a signal charge is trapped by neutron induced defect, and remains trapped for more than one clock cycle, it will be lost from the signal

charge packet. Saturation output signal voltage does not have any obvious degradation even at the highest DDD level. The research will help the designers to know the radiation damage in charge coupled device and improve the tolerance by radiation hardening design.

Key words: charge coupled devices; neutron irradiation; displacement damage effect; charge transfer efficiency; dark signal

1 引言

电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)是空间光学卫星的核心器件,在航天对地侦察、目标监视、姿态控制等方面发挥着不可替代的作用。空间高能带电粒子辐射环境作用于器件,可导致器件的灵敏度、动态范围、信噪比等指标退化,将严重影响卫星与载荷的在轨应用性能与运行寿命^[1-3]。因此,研究 CCD 的空间辐照效应、损伤机理,并对器件的抗辐照能力进行准确预估,是宇航级 CCD 研制及其空间应用的关键。

美国、西欧较早开展了 CCD 质子、 γ 射线、中子、电子等不同粒子的辐照损伤效应研究。随着 CCD 制造工艺、器件结构、工作模式的不断改进,CCD 抗电离总剂量效应能力不断提高,但空间高能质子和电子辐照导致 CCD 产生位移效应的问题日益突出。高能粒子入射器件内部,将导致 CCD 体暗电流与噪声增大、电荷转移效率衰减、出现随机电码信号现象,造成器件性能严重退化^[4-6]。例如,加拿大 DALSA 公司的高电阻系数 Si 制造的 P 埋沟背照射 CCD,辐照前器件的电荷转移效率为 0.999 999,受 2 MeV 能量的电子辐照后,注量为 $1 \times 10^{12} \text{ e/cm}^2$ 时的电荷转移效率已下降至 0.999 850。

我国对 CCD 位移效应研究开展得较晚,目前只是零星开展了质子辐照 CCD 的理论计算和辐照实验研究^[7],在 CCD 位移效应引起参数退化机理方面的研究还有待进一步深入。本文通过 CCD 中子辐照实验,研究了器件受位移损伤后关键性能参数的退化情况,结合器件结构和工艺参数深入分析了其辐照损伤机理。

2 样品和方法

实验样品采用国产埋沟结构、像素阵列为 64×64 像元的 CCD。图 1 为 CCD 像素单元示意

图,像素单元的尺寸为 $48 \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$,采用复合栅结构,在 20 nm 厚的二氧化硅层上淀积一层 60 nm 厚的氮化硅作为绝缘层。

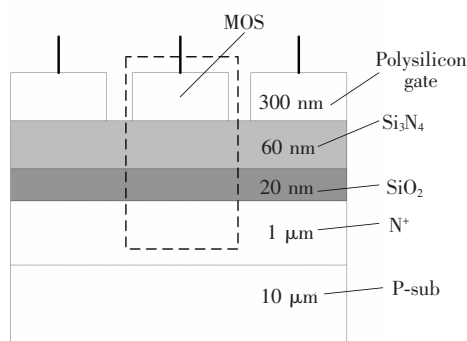


图 1 CCD 像素单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CCD pixel unit

中子辐照实验在西北核技术研究所的 TRIGA 型脉冲堆上进行。实验采用的中子能量大于 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 比大于 $5 \times 10^9 \text{ n/rad}$ 。为了保证实验结果的可信度,实验样品从同一批次样品中挑选了 3 片参数一致性较好的 CCD,实验过程中样品所有管脚全部短接接地,采用不加电偏置进行辐照。当中子辐照注量达到预定值时,将器件带回新疆理化所进行测试。因中子辐照器件存在活化问题,所有测试均在辐照后一个月进行,期间实验样品不加电室温放置。测试选取的注量点分别为 1×10^{10} , 2×10^{10} , 5×10^{10} , 10×10^{10} , $15 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ 。

3 实验结果

3.1 暗信号、暗信号非均匀性随中子注量的变化

暗信号是 CCD 像素在未受光照条件下存在于 MOS 电容中的本底信号,其产生主要是由于器件本身的热生成载流子引起。暗信号的存在对 CCD 的诸多性能参数有较大影响,其中最具有典型性的是动态范围/信噪比。暗信号的存在实际上

等于降低了像素的满阱容量,影响像素的最大可探测信号,严重影响器件的成像质量,并且会增加器件功耗电流。图 2 给出了器件受中子辐照后暗信号的退化情况,可以看出,随着辐照注量的增加,暗信号几乎呈线性增大。

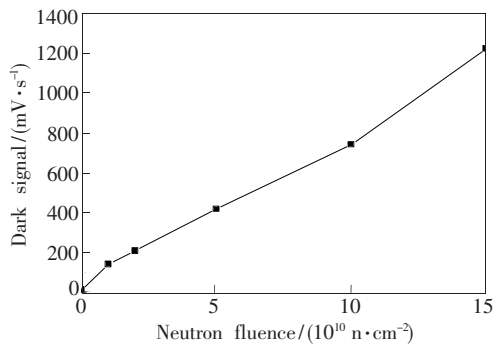


图 2 暗信号随中子注量的变化关系

Fig. 2 Variation of dark signal with neutron irradiation

暗信号非均匀性又被称为固定图像噪声,指在无光照条件下,在单位积分时间内,器件光敏区各像元产生的输出信号与输出信号平均值的偏差。图 3 给出了暗信号非均匀性随中子注量的变化关系,从图中可以看出,中子辐照注量越大,暗信号非均匀性的退化就越大。位移损伤造成的晶格缺陷可直接导致暗信号及像元的非均匀性,暗信号非均匀性会一步步传输到后一级去,降低信噪比,导致成像质量严重退化。因此,在器件具体应用时,暗信号非均匀性的退化对器件性能影响较大。

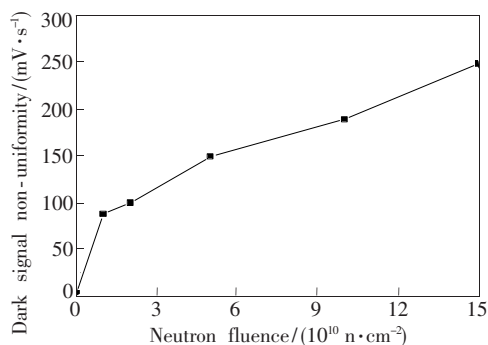


图 3 暗信号非均匀性随中子注量的变化关系

Fig. 3 Variation of dark signal non-uniformity with neutron fluence

3.2 电荷转移效率随中子辐照注量的变化

电荷转移效率是指 CCD 信号电荷包从一个电极转移到下一个电极,转移后电极下的电荷量与转移前电极下电荷量的比值,通常用 η_i 表示。

电荷转移效率的变化可以反映出 CCD 受中子辐照后器件内部载流子产生、收集、运输的退化情况。

图 4 给出了电荷转移效率随中子注量的变化关系,从图中可以看出,随着中子注量的增大,器件电荷转移效率逐渐减小。当辐照注量大于 $2 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ 时,电荷转移效率迅速减小,由初始值的 0.99996 退化到 0.99987。对于实际应用的 CCD,像素的信号电荷需经过几千次电荷转移才能到达器件输出端口,电荷转移效率的退化将会导致器件信号电荷严重衰减,致使动态范围减小,并且引起像素间的差异变大。

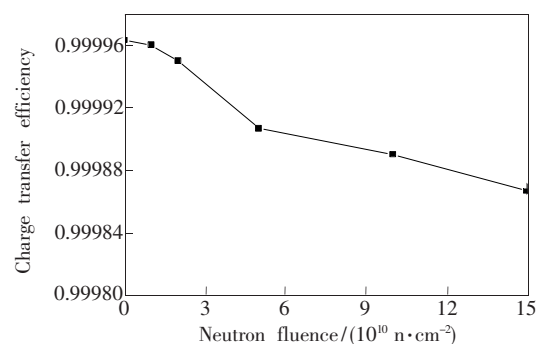


图 4 电荷转移效率随中子注量的变化关系

Fig. 4 Variation of charge transfer efficiency with neutron fluence

3.3 饱和输出电压随中子注量的变化

饱和输出电压是指 CCD 在正常工作条件下输出信号的最大值,它表征了 CCD 所能响应信号的最大值。它主要由器件耗尽层深度和 CCD 片上放大器增益决定,耗尽层深度和放大器增益均与外加栅压有关,因此,饱和输出电压的变化可以反映栅极阈值电压的漂移信息。图 5 给出了器件

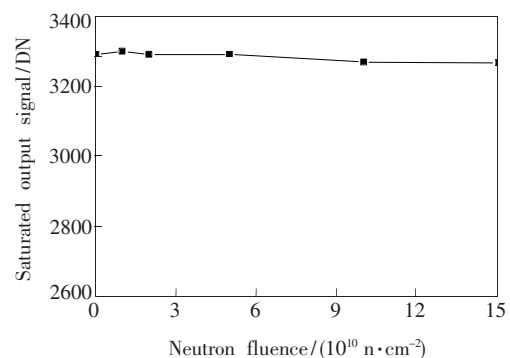


图 5 饱和输出电压随中子注量的变化关系

Fig. 5 Variation of saturated output signal of CCD with neutron irradiation

饱和输出电压随中子注量的变化关系,从图中可以看出,饱和输出电压的抗中子能力较好,当累积辐照注量达到 $15 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ 时,其退化程度仍可以忽略。

4 分析与讨论

4.1 暗信号、暗信号非均匀性退化机理分析

本次实验采用的中子平均能量为 1 MeV。中子入射器件后主要发生弹性散射作用,初级入射中子在一次弹性碰撞中将传递给晶格原子一部分能量,如果这部分能量大于位移所需能量,则造成原子离开晶格位置,成为晶格中的间隙原子。如果初级反冲原子具有两倍以上位移阈能,那么在它停下来之前能使第二个原子位移,形成双空位缺陷。当初级反冲原子的能量更高时,产生级联缺陷,这些缺陷部分被复合,部分在体内迁移,与其他杂质、缺陷、掺杂原子形成稳定的缺陷团。一次弹性散射碰撞后的中子平均能量由式(1)给出:

$$E = E_0 \frac{1+r}{2}, \quad (1)$$

$$r = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2, \quad (2)$$

式中 E_0 为中子初能, A 为原子量。由此可知 1 MeV 中子传递给硅晶格原子的平均能量约为 70 keV。而初级粒子产生率与其能量成平方反比关系^[8],即能量为 E 的初级粒子的产生率为 $1/E^2$,由此得出 1 MeV 中子入射 CCD 后在体硅内产生位移缺陷初级粒子的能量分布如图 6 所示。

从图中可以看出,位移缺陷初始反冲能绝大部分都小于 100 eV。对硅原子而言,初始反冲能

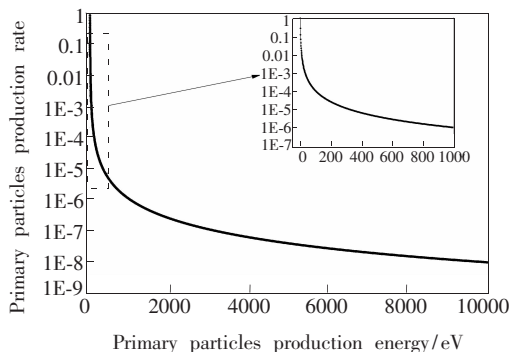


图 6 1 MeV 中子入射 CCD 后初级粒子产生率与其能量分布

Fig. 6 Relationship between primary particles production rate and energy after 1 MeV neutron irradiation

约为 2 keV 只产生点缺陷;反冲能在 2 ~ 12 keV 之间可形成一缺陷团;反冲能大于 20 keV 后会形成一树状缺陷结构,在各树状缺陷(包括点缺陷)末梢是终端缺陷团。因此可以认为,1 MeV 中子入射 CCD 在体硅内主要产生点缺陷,只有极少数的缺陷团和缺陷簇。

图 2 显示,随着中子注量的增加,暗信号线性增大。由 Shockley-Read-Hall 理论可知,CCD 的体暗电流密度^[9]可表示为

$$J_{\text{generation}} = \frac{qn_i W}{\tau_g}, \quad (3)$$

$$\tau_g = \frac{\sigma_n + \sigma_p}{\sigma_p \sigma_n} \cdot \frac{1}{v_{\text{th}} N_i}, \quad (4)$$

式中: $J_{\text{generation}}$ 为体暗电流密度(单位为 nA/cm^2), W 为耗尽区宽度, q 为电子电荷量, n_i 为本征载流子浓度, τ_g 为载流子的有效产生寿命, σ_n 为电子俘获截面, σ_p 为空穴俘获截面, v_{th} 为载流子速率, N_i 为体缺陷能级。中子入射 CCD 器件后在像素单元耗尽区中产生位于禁带中的缺陷能级,这些缺陷能级形成了新的复合-产生中心,使价带的电子更容易跃迁至导带,促进了电子-空穴对的产生,增大了由于热运动激发的载流子密度。中子注量越大则产生的缺陷能级越多,载流子通过能级跃迁的几率就越大,从而使载流子的寿命 τ_g 减小,CCD 的暗信号增大。

暗信号非均匀性主要是指由中子辐照后引起的各像素单元暗信号增大的不一致性,这种增大的不一致性主要是由入射中子与 CCD 体硅发生相对稀少的非弹性碰撞导致大量的位移能量沉积在一个像元里引起,从而使中子辐照在器件内由于位移损伤效应产生的缺陷团分布不均匀。另一方面,由于暗信号生成机制较为复杂,其中多个机制与缺陷能级、电场等特性相关,对于 CCD 这种含有大量像素单元的器件受中子辐照后无法保证在像素与像素之间产生均匀性的缺陷能级,因此暗信号在像素阵列空间分布上呈现非均匀性,即暗信号非均匀性变大。

4.2 电荷转移效率退化机理分析

本次实验样品的制备采用的是埋沟工艺,因此界面质量的退化对电荷转移效率的影响可以忽略不计。由上文分析可知,中子辐照在耗尽区内产生大量的点缺陷,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^+ 层内

的掺杂原子磷与空位结合后形成稳定缺陷, V-V 中心为体硅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 1 给出了硅材料中点缺陷的能级、捕获截面和发射时间^[10]。

表 1 硅材料中缺陷的能级、捕获截面和发射时间

Tab. 1 Energy level, capture cross-section and release time constant of defects in silicon

Defect types	Energy level /eV	Capture cross-section/cm ²	Release time/ms
P-V	0.46	6×10^{-15}	6×10^5
V-V	0.41	5×10^{-16}	2×10^5
O-V	0.17	1×10^{-14}	4×10^{-4}

CCD 信号电荷在转移输出的过程中, 这些体缺陷能级不断地捕获、发射在埋沟中转移的信号电荷, 从而使电荷转移效率退化。尽管俘获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。这些体缺陷不但会引起陷阱能级, 还有可能因为引起局部电势的偏差导致势阱或者势垒, 这将导致转移时间变长、信号电荷转移发生残留。因此随着中子辐照注量的增大, 引入的体缺陷增多, 电荷转移效率将显著退化。图 7 为中子辐照引入的体缺陷影响电荷转移示意图。

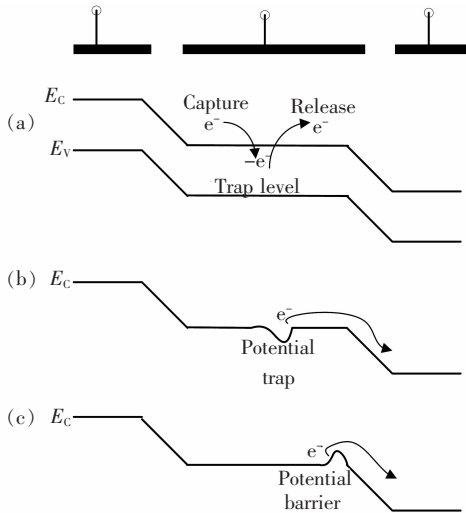


图 7 中子辐照引入的体缺陷能级影响电荷转移示意图
Fig. 7 Diagram of neutron radiation introduced defect level affects charge transfer

4.3 饱和输出电压退化机理分析

图 5 结果显示器件饱和输出电压具有一定的抗中子能力, 整个实验过程中其退化程度可以忽略不计。饱和输出电压主要由像素单元耗尽层深

度和 CCD 片上读出电路增益决定。CCD 片上读出电路由不同的 MOSFET 组成, 包括厚栅氧的输出栅极、薄栅氧的复位晶体管及大宽长比的放大电路, 结构示意图如图 8 所示。它是一个三级源跟随器, 由 MOS 管 M₁、M₂、M₃ 和作为偏置作用的有源负载 M_c、M_d 组成, 复位 MOS 管 M_r 的源极与节点电容、M₁ 的栅极三者相连。MOSFET 是以多数载流子工作的器件, 对中子辐照不灵敏, 有较强的抗中子能力^[11]。即使中子辐照注量高达 10¹⁴ ~ 10¹⁵ n/cm², MOSFET 的主要电参数变化仍然很小。由于 CCD 片上放大器和像素单元均是 MOS 结构, 且本次实验中子最大注量仅为 15 × 10¹⁰ n/cm², 因此实验过程中 CCD 饱和输出电压的退化基本可以忽略不计。

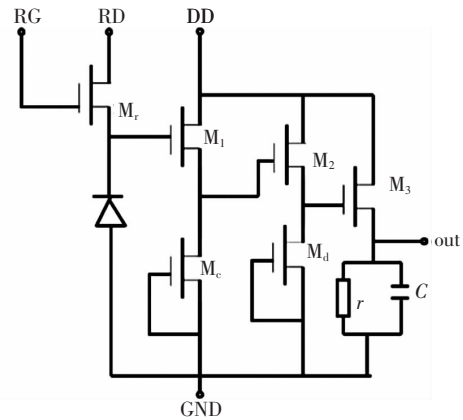


图 8 CCD 读出电路结构示意图
Fig. 8 Readout circuit structure of CCD

5 结 论

通过对 64 元 CCD 开展中子辐照实验, 分析了中子入射体硅后的辐照损伤机理, 结合器件结构和工艺参数, 获得了 CCD 的位移效应: 暗信号、暗信号非均匀性、电荷转移效率是位移效应的敏感参数。参数退化的主要原因是中子辐照诱发大量的体缺陷, 这些缺陷能级增大了暗场条件下耗尽区热载流子的发射几率。在信号电荷读出期间, 体缺陷不断发射和俘获引起电荷转移效率显著退化。为深入开展 CCD 的抗辐照设计及准确评估器件的抗位移辐照损伤性能提供科学依据, 下一步将通过设计像素单元结构进行辐照实验, 结合器件辐照效应仿真技术, 从微观层面对辐照产生的有效缺陷进行描述, 定量分析 CCD 宏观参数退化与微观缺陷的联系。

参 考 文 献:

- [1] HOPKINSON G R, MOHANMADZADEH A. Radiation effects in charge coupled device imagers and CMOS active pixel sensors [J]. *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, 2004, 14(2):419-443.
- [2] 丛忠超,余学峰,崔江维,等. 半导体器件总剂量辐射效应的热力学影响 [J]. *发光学报*, 2014, 35(4):465-469.
CONG Z C, YU X F, CUI J W, *et al.*. Thermodynamic impact on total dose effect for semiconductor components [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(4):465-469. (in Chinese)
- [3] MAGNA P. Detection of visible photons in CCD and CMOS: a comparative view [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2003, 504:199-212.
- [4] HOPKINSON G R. Proton-induced changes in CTE for n-channel CCDs and the effect on star tracker performance [J]. *IEEE Trans Nucl. Sci.*, 2000, 47(6):2460-2465.
- [5] 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 Trans. Nucl. Sci.*, 2001, 48(6):1807-1814.
- [6] 李豫东,汪波,郭旗,等. CCD 与 CMOS 图像传感器辐射效应测试系统 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11):2778-2784.
LI Y D, WANG B, GUO Q, *et al.*. Testing system for radiation effects of CCD and CMOS image sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11):2778-2784. (in Chinese)
- [7] 王祖军,黄绍艳,刘敏波,等. CCD 位移辐射效应损伤机理分析 [J]. *半导体光电*, 2010, 31(2):175-179.
WANG Z J, HUANG S Y, LIU M B, *et al.*. Analysis of the displacement damage mechanism of radiation effects in CCD [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2010, 31(2):175-179. (in Chinese)
- [8] WOOD S, DOYLE N J, SPITZNAGEL J A, *et al.*. Simulation of radiation damage in solids [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1981, 28(6):4107-4112.
- [9] SZE S M, NG K K. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [10] SEABROKE G, HOLLAND A, CROPPER M. Modelling radiation damage to ESA's Gaia satellite CCDs [J]. *SPIE*, 2008, 7021:70211P-1-12.
- [11] 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应 [M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
CHEN P X. *Radiation Effects on Semiconductor Devices and Integrated Circuits* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)



汪波(1988-),男,江苏连云港人,博士研究生,2011年于中国矿业大学获得学士学位,主要从事 CCD、CMOS 图像传感器的空间辐射效应研究。
E-mail: chenxing198889@163.com



李豫东(1982-),男,新疆伊犁人,博士,研究员,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电成像器件空间辐射效应方面的研究。
E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn