

文章编号: 1000-7032(2013)05-0611-06

线阵探测器 KLI-2113 总剂量辐照性能试验分析

张 航*, 刘栋斌

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对 Kodak 公司的商用 CCD 探测器 KLI-2113 进行了总剂量为 30 krad(Si) 的⁶⁰Co- γ 辐射试验。对比辐射前后 CCD 的主要参数变化, 分析了总剂量辐射对 CCD 工作性能的影响, 并研究了总剂量辐射导致 CCD 暗电流增大、电荷转移效率降低以及图像噪声增加等现象的内在机理, 为后续 CCD 抗总剂量辐射加固提供依据和参考。

关键词: 电荷耦合器件; 总剂量辐射; 暗电流; 电荷转移效率; 损伤机理

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20133405.0611

Analysis of Total Dose Radiation Test for Linear CCD KLI-2113

ZHANG Hang*, LIU Dong-bin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding Author, E-mail: panni0119_cn@sina.com

Abstract: This paper researched the Cobalt 60- γ total dose radiation test for the CCD KLI-2113 from Kodak Company by comparing the main parameters shift before and after radiation. The effect of the total dose radiation on the performance of CCD was analyzed. The results indicate that the radiation induces the increase of the dark current, the decrease of charge transfer efficiency, the increase of picture noise. There result provides reference for the total dose resistant radiation hardening in future.

Key words: CCD; total dose radiation; dark current; charge transfer efficiency; damage mechanism

1 引 言

电荷耦合器件(CCD)在1970年由美国贝尔实验室首先研制成功。作为MOS技术延伸而发展出的一种半导体光电器件^[1],它能够存储由入射光在光敏单元激发出的光信息电荷,并能在适当的时钟脉冲驱动下,把存储的电荷以电荷包的形式定向传输,从而完成从光信号到电信号的转移^[2],最终以收集到的电荷作为信号。因其质量

轻、体积小、功耗低、动态范围大、量子效率高、寿命长等优点,被大量应用在航天载荷对地观察、遥感观测、空间科学等领域。由于这些环境存在大量的辐射粒子^[3],所以抗辐射工作越来越受到关注和重视。从20世纪70年代起,外国研究机构开始对CCD辐射效应进行研究^[4-5]。CCD受到辐射后主要产生两种效应:位移辐射效应和电离辐射效应^[6-7],其中电离辐射效应又包括总剂量效应、瞬态电离效应和单粒子效应。

收稿日期: 2013-01-25; 修订日期: 2013-03-01

基金项目: 国家863计划重大项目(2011AA12A103)资助

作者简介: 张航(1984-),男,吉林长春人,主要从事空间光学成像技术方面的研究。

E-mail: panni0119_cn@sina.com

Kodak 公司的商业级三线阵探测器 KLI-2113 具有动态范围大、敏感度高、数据速度较快以及噪声低等特点,非常适合应用在空间探测领域,所以对它的抗辐照能力的研究尤为重要。本文介绍了基于探测器 KLI-2113 所设计的总剂量辐照装置、试验方法以及 CCD 受辐照后的参数变化,并分析了 CCD 受辐照后发生变化的内在机理。

2 辐射试验过程

2.1 辐射试验条件

我们选择放射性强度为 5.2×10^{15} Bq (14 万居里)的 ^{60}Co - γ 射线源作为辐射源,辐射剂量率为

10 rad(Si)/s,辐射总剂量为 30 krad(Si),分别在 5,10,20,30 krad(Si) 时对 CCD 进行参数测试,并与初始值进行对比。测试内容包括暗信号、暗噪声、固定图像噪声、饱和输出电压、响应度、电荷转移效率、响应非均匀性等 7 项参数。

三线阵探测器 KLI-2113 由 3 条平行的、完全相同的可见光谱段光电二极管阵列组成,每行有 2 098 个有效像元、12 个测试像元以及 12 个暗像元。探测器单路的结构如图 1 所示。

从 25 片探测器 KLI-2113 中随机抽取两片作为试验样品,并编号为 1#和 2#样品。大量的试验表明,CCD 探测器在工作状态下比不加电状态下

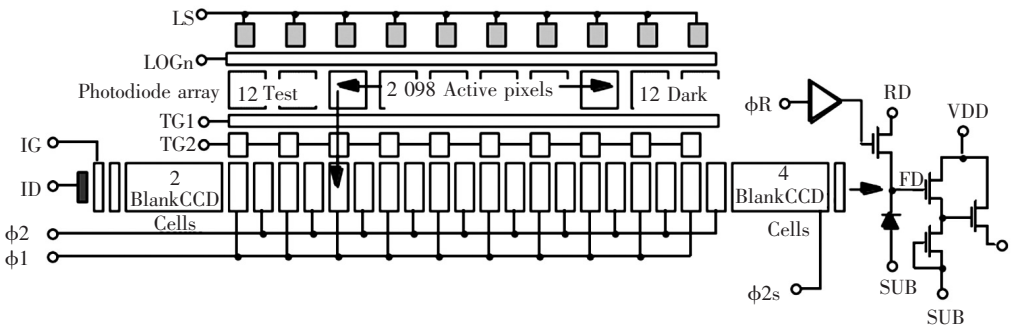


图 1 KLI-2113 单路结构

Fig. 1 Single Channel Schematic of KLI-2113

表 1 探测器 KLI-2113 的主要参数

Table1 Main parameters of CCD KLI-2113

参数	典型值
像元数	2 098 × 3
像元尺寸	14 μm × 14 μm
饱和电子数	170 000 electrons
动态范围	76 dB
输出灵敏度	11.5 μV/electron
暗电流	0.02 pA/pixel
电荷转移效率	0.999 99
最大数据率	20 MHz/Channel

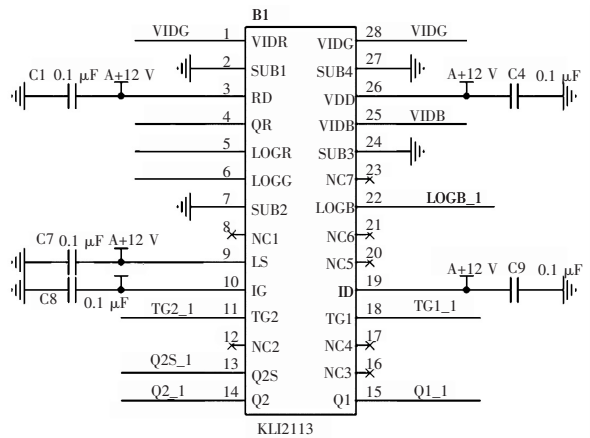


图 2 KLI-2113 线阵 CCD 辐照偏置原理图

Fig. 2 Application diagram of KLI-2113 for radiation test

2.2 试验方法与过程

我们依据 GJB548B-2005《微电子器件试验方法和程序》中 1019.2 电离辐射(总剂量)试验程序进行试验。首先在屏蔽良好的辐射场对 1#、2#探测器进行辐射,将辐照试验用的处理板放置在铅砖防护空间内,将通过电缆连接的样品及头部板放置在剂量率为 10 rad(Si)/s 的合适位置,进

更容易受到辐射的影响。为了更好地模拟空间中的辐射条件,我们设计了辐射试验头部板和处理板,在辐射过程中为探测器提供偏置电压以及工作驱动时序(探测器偏置原理图如图 2 所示),使得两片试验探测器保持典型工作状态。其中头部板连同试验探测器暴露在 ^{60}Co - γ 射线环境中,处理板由 10 cm 厚的铅砖屏蔽。

行 5 krad(Si) 的辐照试验。辐照后,分别对 1#、2# 探测器在无辐射的实验室中按要求进行 7 项参数测试,要求测试时间不超过 40 min。重复该过程,直至分别完成 10,20,30 krad(Si) 的辐照试验及测试^[8]。实验流程图以及辐照后的参数测试图分别如图 3 和图 4 所示。

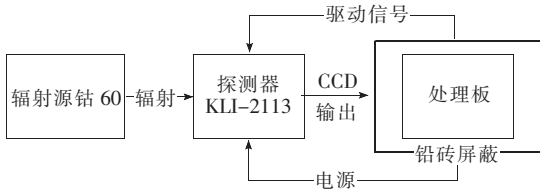


图3 辐照过程框图

Fig. 3 Block diagram of radiation process

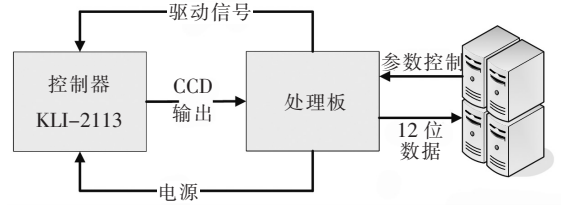


图4 辐照后进行参数测试框图

Fig. 4 Block diagram of parameter testing after radiation

3 结果与讨论

3.1 试验数据

试验中测得的 1#、2# 探测器的 7 项参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 1#样品试验数据

Table 2 Experimental data of No. 1 sample

剂量/ krad	通道	暗信号/ $\text{mV} \cdot \text{s}^{-1}$	暗噪声/ m	固定图像 噪声/%	响应非均 匀性/%	电荷转移 效率	相对响 应度	饱和输出电压/ V
初始值	1	0.581	0.537	5.625	0.202	0.999 978	33.22	2.20
	2	0.694	0.640	7.691	0.223	0.999 978	33.82	2.12
	3	0.664	0.675	6.034	0.211	0.999 979	32.28	2.08
5	1	0.740	0.628	5.249	0.412	0.999 948	32.88	2.16
	2	0.761	0.646	8.111	0.418	0.999 948	33.69	2.12
	3	0.752	0.724	6.521	0.395	0.999 947	32.17	2.08
10	1	0.825	0.839	6.371	0.348	0.999 867	32.07	2.12
	2	0.895	0.865	8.300	0.346	0.999 858	32.91	2.04
	3	0.873	0.926	8.366	0.329	0.999 878	31.36	2.00
20	1	1.524	1.126	10.234	0.958	0.999 521	28.76	1.96
	2	1.863	1.184	11.187	0.965	0.999 458	29.26	1.96
	3	1.768	1.268	10.654	0.995	0.999 432	26.11	1.92
30	1	6.669	1.504	136.274	2.300	0.998 675	24.98	1.92
	2	7.030	1.359	155.924	2.954	0.998 659	27.35	1.92
	3	5.099	1.417	151.851	3.295	0.998 378	25.65	1.88

表 3 2#样品试验数据

Table 3 Experimental data of No. 2 sample

剂量/ krad	通道	暗信号/ $\text{mV} \cdot \text{s}^{-1}$	暗噪声/ mV	固定图像 噪声/%	响应非均 匀性/%	电荷转移 效率	相对响 应度	饱和输出电压/ V
初始值	1	0.673	0.591	4.337	0.270	0.999 978	32.78	2.12
	2	0.663	0.618	4.594%	0.299	0.999 978	33.53	2.08
	3	0.671	0.650	3.997%	0.281	0.999 978	32.35	2.04
5	1	0.635	0.611	5.732%	0.316	0.999 949	32.13	2.16
	2	0.691	0.626	5.690%	0.353	0.999 949	33.00	2.08
	3	0.648	0.672	5.205%	0.330	0.999 949	31.75	2.04

续表 3

剂量/ krad	通道	暗信号/ $\text{mV} \cdot \text{s}^{-1}$	暗噪声/ mV	固定图像 噪声/%	响应非均 匀性/%	电荷转移 效率	相对响 应度	饱和输出电压/ V
10	1	0.785	0.945	14.373%	0.307	0.999 879	31.64	2.12
	2	0.860	0.917	16.492%	0.352	0.999 849	32.96	2.00
	3	0.863	0.948	12.919%	0.326	0.999 869	31.51	2.00
20	1	1.582	1.278	15.322%	0.869	0.999 463	28.69	2.00
	2	2.013	1.158	18.524%	0.965	0.999 487	28.52	1.96
	3	1.471	1.264	17.362%	0.914	0.999 492	26.69	1.92
30	1	12.615	3.056	48.040%	2.323	0.998 568	25.56	1.88
	2	5.606	2.977	69.823%	2.863	0.998 576	26.29	1.92
	3	5.501	2.827	74.126%	3.059	0.998 368	25.62	1.92

3.2 参数分析

由 1#和 2#探测器样品的试验数据可以看出,两个样品的变化趋势基本一致。据此认为测量数据真实有效,可以表征探测器 KLI-2113 受总剂量辐照后的参数变化。

3.2.1 暗电流

暗电流是指 CCD 在没有感光也没有其他形式注入信号的情况下输出的电流。从图中可以看出,随着辐射总剂量的提高,探测器 KLI-2113 的暗信号逐渐提高,这是因为总剂量损伤破坏了 Si 和 SiO₂ 之间的周期晶格结构,在 CCD 内部的电极和栅氧化层之间形成陷阱电荷,进而导致高密度界面态(处在价带和导带之间的禁带中的中间能级)的产生。这些界面态在 CCD 表面很容易产生热电子-空穴对,由于这些热电子-空穴对的出现,暗电流将增大^[9-10]。试验中用暗信号的变化来表征暗电流的变化。在无光照条件下,探测器的输出信号随积分时间线性增加,通过改变积分时间,测量对应的输出信号,然后以积分时间为横坐标,输出信号为纵坐标,按最小二乘法^[11],拟合出一条直线,该直线的斜率定义为探测器在单位时间的暗信号。暗信

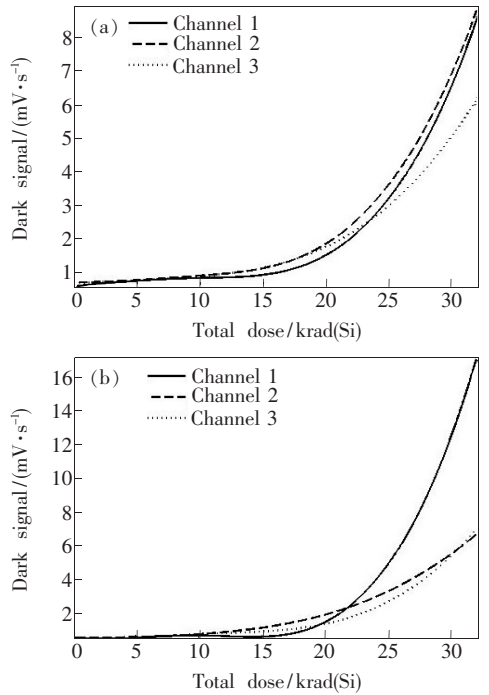


图 5 样品暗信号随总辐射剂量的变化。(a) 1#;(b) 2#。

Fig. 5 Changes of dark signal with the total dose radiation of the samples. (a) Sample 1. (b) Sample 2.

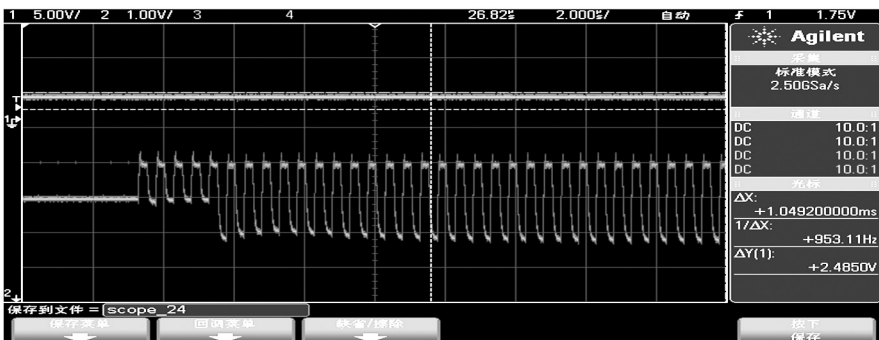


图 6 暗场情况下,加电 10 min 后的 CCD 输出。

Fig. 6 Output of CCD in dark after 10 min

号随总剂量的变化如图5所示。

当总剂量达到 30 krad(Si)时,在无辐射场的实验室中测量发现暗信号突然增大,并且随着通电时间的增加,CCD 输出的势阱从 12 个测试像元开始,逐一向后变大,直至所有像元变成饱和,如图6所示。这是由于位移辐射在 CCD 的 Si 禁带内诱发体缺陷产生,进而形成新的产生复合中心,导致暗电流尖峰出现^[12]。

3.2.2 电荷转移效率(CTE)

从表1和表2中可以看出,CCD 的电荷转移效率随着辐射剂量的增加而降低。CTE 是 CCD 的重要指标参数。在理想状态下,近似认为一个势阱中的电荷载包可以完全、快速的转移到下一个势阱中;但是在实际工作中,电荷载包在势阱之间的转移都是有损失的。KLI-2113 未经辐射时,CTE 可以达到 0.999 98~0.999 99;CCD 受辐射后,在电荷转移过程中,沟道中由辐射损伤诱发的缺陷将俘获一部分电荷载包里的载流子,有时候被俘获的载流子将被释放到下一个电荷载包中,而不是原来的电荷载包,因此辐射会造成电荷转移损失^[10]。由于电荷转移损失,导致 CCD 的响应度(图7)和饱和输出电压(图8)也要相应地随辐射总剂量的增大而减小。

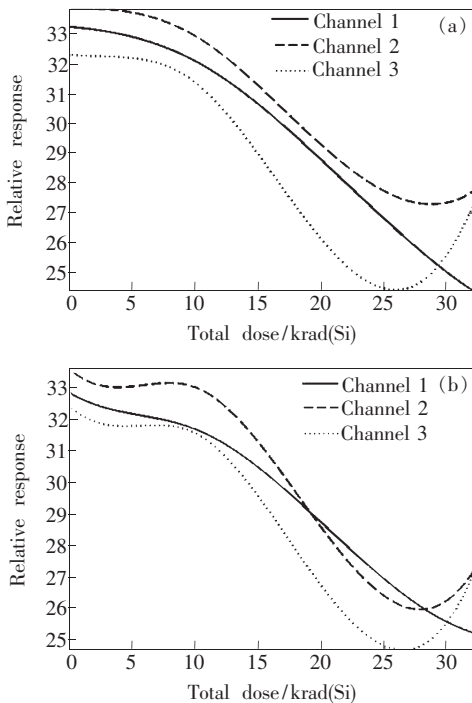


图7 样品相对响应度的变化。(a) 1#;(b) 2#。

Fig. 7 Change of relative response of the samples. (a) Sample 1. (b) Sample 2.

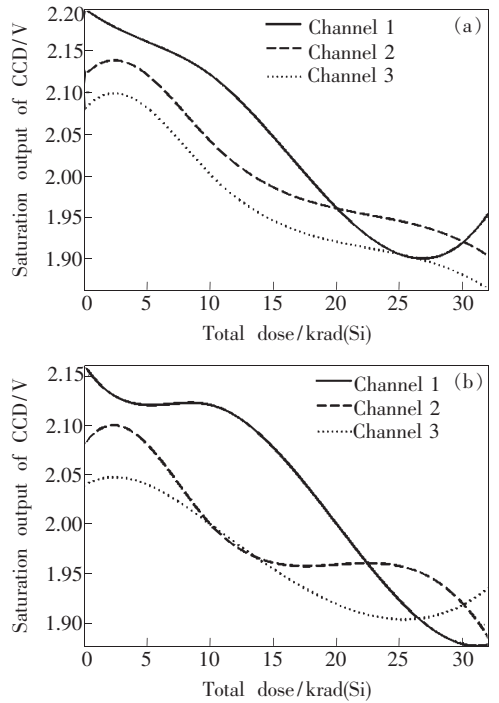


图8 样品 CCD 饱和输出的变化。(a) 1#;(b) 2#。

Fig. 8 Change of saturation output of the samples. (a) Sample 1. (b) Sample 2.

3.2.3 暗噪声和固定图像噪声

由于 MOS 器件本身的特点,界面态陷阱电荷和氧化物陷阱电荷的增加,都会导致平带电压(V_{FB})

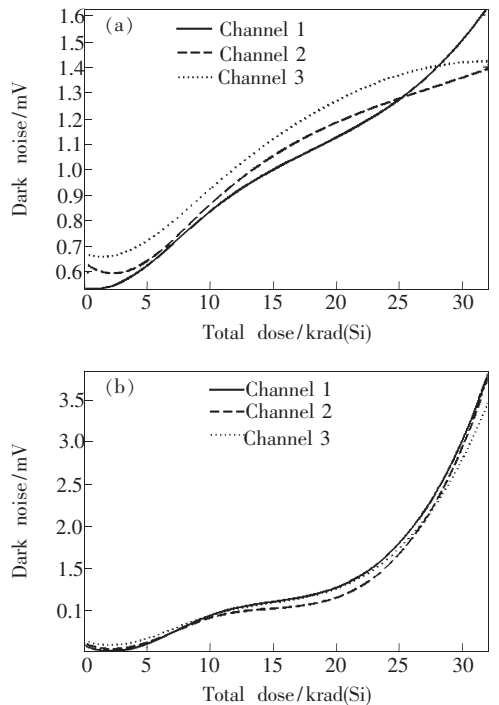


图9 样品暗噪声的变化。(a) 1#;(b) 2#。

Fig. 8 Change of dark noise of the samples. (a) Sample 1. (b) Sample 2.

发生变化。对于 CCD, 当它在一定的偏置电压处工作时, 如果平带电压发生漂移, 受影响最大的就是输出放大电路^[13]。平带电压漂移可以引起阈值电压(V_{th})发生漂移, 它们都随着辐射总剂量增加而增大。当阈值电压漂移很大时, 说明已经有大量的界面态出现。平带电压和阈值电压发生偏移将导致 CCD 转移寄存器的最佳工作偏置电压偏移^[14], CCD 输出放大器非线性工作, 读出噪声增加。暗噪声随总剂量增加的变化如图 9 所示。

4 结 论

为了测试 Kodak 公司的线阵 CCD 探测器

KLI-2113 的抗辐射能力, 设计了⁶⁰Co- γ 总剂量辐射装置, 对 CCD 样片进行总剂量为 30 krad(Si) 的辐照试验。随着辐射剂量的增加, CCD 的暗电流增加, 电荷转移效率降低, 进而导致 CCD 的响应度和饱和输出电压降低; 此外, 平带电压和阈值电压的漂移使暗噪声和图像噪声变大。KLI-2113 在总剂量 20 krad(Si) 以下时, 主要参数指标受辐射影响下降; 当总剂量达到 30 krad(Si) 时, CCD 完全失效。在探测器已经确定的情况下, 建议采用附加屏蔽的办法进行加固, 即采用抗辐射材料加固器件以及在外壳和架构上的铝板外涂覆抗辐射材料以加强对辐射的屏蔽^[15]。

参 考 文 献:

- [1] Boyle W S, Smith G E. Charge coupled semiconductor devices [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1970, 49(1): 587-593.
- [2] Zhang H, Liu D B, Li W, *et al.* Research of noise at analog front end of CCD imaging system [J]. *Modern Electronic Technique* (现代电子技术), 2011, 34(24):113-117 (in Chinese).
- [3] Guo W Q, Wan Z, Chang L, *et al.* Noise suppression of area array CCD signal acquisition [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, 29(1):204-208 (in Chinese).
- [4] Pickel J C, Kalma A H, Hopkinson G R, *et al.* Radiation effect on photonic imagers: A historical perspective [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2003, 50(3):671-688.
- [5] Hopkinson G R. Radiation effects on solid-state imaging devices [J]. *Radiation Phys. & Chem.*, 1994, 43(1/2): 79-91.
- [6] Hopkinson G R, Dale C J. Proton effects in charge-coupled devices [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, 43(2): 614-627.
- [7] Janesick J, Elliott T, Pool F. Radiation damage in scientific charge-coupled devices [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1989, 36(1):572-578.
- [8] Xue X C, Han C S, Xue D L, *et al.* Increasing dynamic range of space push-broom remote sensing camera by two-row TDI CCD [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2012, 20(12):2791-2795 (in Chinese).
- [9] Wang Z J, Tang B Q, Xiao Z G, *et al.* Progress of radiation damage effects and hardening technology on CCD [J]. *Semiconductor Optoelectronics* (半导体光电), 2009, 30(6):797-802 (in Chinese).
- [10] Wang Z J, Tang B Q, Xiao Z G, *et al.* The analysis of mechanism on ionization radiation damage effects on CCD [J]. *Nucl. Electron. & Detection Tech.* (核电子学与探测技术), 2009, 29(3):565-570 (in Chinese).
- [11] Wang X, Chen X, Zhang L G, *et al.* Development of CCD camera simulation source for remote sensing satellite [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2012, 20(11):2559-2569 (in Chinese).
- [12] Saks N S. Interface state trapping and dark current generation in buried channel charge-coupled devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, 53(3):1745-1753.
- [13] Hopkinson G R. Cobalt 60 and proton radiation effects on large format, 2-D, CCD arrays for an earth imaging application [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1992, 39(6):2018-2025.
- [14] Roy T, Watts S J, Wright D. Radiation damage effects on imaging charge coupled devices [J]. *Nuclear Instruments and Methods A*, 1989, 275(3):545-557.
- [15] Duan X Y, Qiao Y F, Wang Y W, *et al.* Design of optical system for Fizeau-type synthetic aperture telescope [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2012, (4):380-387 (in Chinese).