

伽马射线辐照对硅光电二极管性能的影响

骆冬根^{1,2}, 邹鹏¹, 陈迪虎¹, 王羿¹, 洪津¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031)

摘要: 研究了伽马(γ)射线辐照对星上定标用硅光电二极管性能的影响。使用硅光电二极管分别接受 20 krad(Si)、35 krad(Si)、50 krad(Si)总剂量的 γ 射线辐照, 对比了器件在不同辐照剂量下暗电流及光谱响应度的变化。结果显示在 35 krad(Si)以下剂量照射下, 硅光电二极管暗电流及光谱响应度均未发现明显的变化, 在 50 krad(Si)剂量照射下, 参试样品出现暗电流增加的现象, 但该变化在定标器应用过程中带来的影响可以忽略。试验结果表明, 参试的硅光电二极管在空间辐照环境下具有良好的稳定性及可靠性, 可以作为在轨定标器可见波段探测单元备选器件。

关键词: 伽马射线辐照; 硅光电二极管; 暗电流; 光谱响应度

中图分类号: O432 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0320001

Effect of gamma ray irradiation on silicon photodiodes

Luo Donggen^{1,2}, Zou Peng¹, Chen Dihu¹, Wang Yi¹, Hong Jin¹

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science & Technology of China, Hefei 230031, China)

Abstract: The study on effect of gamma(γ) ray irradiation on silicon photodiodes for on-orbit calibration was carried out. Silicon photodiodes were irradiated by 20 krad(Si), 35 krad(Si) and 50 krad(Si) gamma doses respectively. The darkness current and spectral responsivity were measured before and after irradiation. It's found that the darkness current and spectral responsivity have no dramatic change under less than 35 krad (Si) gamma doses. Under 50 krad (Si) gamma doses, the darkness current of the sample increases slightly, but the influence on the application of calibrator can be ignored. The results suggest that silicon photodiode under test can be used as a candidate device for on-orbit calibrator in visible spectral bands due to its good long-term stability and reliability in the space irradiation environment.

Key words: gamma ray irradiation; silicon photodiodes; dark current; spectral responsivity

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-03

基金项目: 中国科学院重点项目(KGFZD-125-13-006)

作者简介: 骆冬根(1979-), 男, 博士生, 主要从事航天遥感探测载荷研制技术方面的研究。Email: dgluo@aiofm.ac.cn

导师简介: 洪津(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术方面的研究。

Email: hongjin@aiofm.ac.cn

通讯作者: 邹鹏(1983-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电探测与信号处理方面的研究。Email: pzou@aiofm.ac.cn

0 引言

遥感技术的发展经历了由判断有无到精确量化的过程,对卫星遥感数据的定量化要求不断提高。发射前定标、星上定标以及在轨替代定标是保证遥感定量化精度的主要途径。星上定标可以在空间平台上实时、高效地对遥感器性能进行在轨跟踪测量,是遥感器全过程定标的重要环节,对遥感数据的可靠应用具有重要作用^[1]。

“太阳漫反射板+比辐射计”是当前较成功的星上定标方法之一,以太阳照射的漫反射板作为定标光源,通过比辐射计对漫反射板在轨衰减进行修正,实现光学遥感器全光路、全视场的星上绝对定标及长期稳定性监测。Terra 和 Aqua 卫星搭载的 MODIS 载荷,以及 Suomi-NPP 卫星搭载的 VIIRS 载荷均采用了此种先进的定标方法,在轨绝对辐射定标精度可达 2%^[2-3]。该定标方案主要优点在于采用比辐射计的监视方式,将光辐射绝对测量转换为等量辐射比测量,在保证较高的定标精度的同时,降低了光电探测部件绝对测量精度以及长期稳定性的要求。但是,Palmer 等人^[4]建议比辐射计探测部件在轨衰变小于 10%,原因在于探测部件的在轨性能变化会影响在轨定标精度,严重情况下会导致定标任务失败。例如探测器暗电流增加过大,可能会出现信号输出“饱和”的现象,造成比辐射计无法正常工作。探测器响应度衰减过大,会使得测量信噪比降低,影响辐射比的测量准确性,从而降低在轨定标精度。

应用于某成像光谱仪比辐射计的定标波段分布于 400~1 700 nm 之间,在可见近红外波段选用硅光电二极管作为光电探测单元,该器件具有结构简单、性能稳定、灵敏度高、动态范围大等特点,广泛应用于航天航空、军事以及民用光辐射计量领域^[5]。

硅光电二极管随比辐射计在轨运行期间会遭遇地球辐射带、太阳宇宙射线、银河射线、等离子体等电磁辐射环境^[6],各种空间辐射源会通过位移效应、电离效应和表面效应^[7]等多种损伤机制使得光电探测器性能发生衰变,具体表现为光谱响应度的下降、暗电流增加以及响应时间增加等,严重情况下会造成探测器的损坏或永久失效^[8]。为验证比辐射计在轨运行可靠性,硅光电二极管空间应用环境下抗辐照性能需要进行有效评估。

国内外多个研究机构均开展了光电探测器抗辐照性能的相关研究^[9-14]。Bourqui 等人^[11]研究了质子辐照对应用于伽利略计划的硅光电二极管性能的影响,结果显示在质子能量为 150 MeV,入射通量为 10^{11} 质子数/cm² 的照射条件下,光电二极管暗电流及噪声均出现了较大的增加。国内陈炳若等人^[14]使用 ⁶⁰Co γ 射线对某 PIN 型硅光电二极管进行了总剂量为 2×10^4 Gy(Si) 的辐照,辐照后硅光电二极管积分光电流较辐照前衰减了 21%。

文中对某成像光谱仪星上定标器所使用的硅光电二极管抗辐照性能进行了研究。使用多组 PIN 型硅光电二极管接受了不同剂量的 γ 射线照射,试验前后分别测量了光电二极管暗电流及光谱响应度,并对试验结果进行了分析。以下对试验过程以及试验结果进行详细的介绍。

1 试验

1.1 试验器件

“太阳漫反射板+比辐射计”的星上定标原理框图如图 1 所示,光电探测单元用于太阳观测通道以及漫反射板观测通道入射光信号的光电转换,所选器件为无窗型 PIN 硅光电二极管。

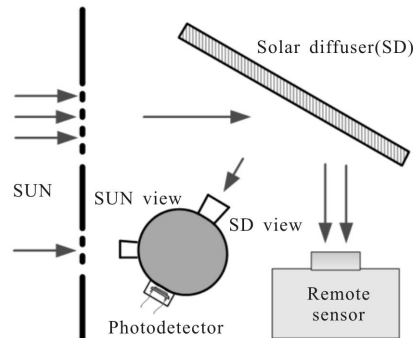


图 1 “太阳漫反射板+比辐射计”星上定标原理示意图

Fig.1 Diagram of "sun-illuminated diffuser panel+ratiometer" on-board calibration

该器件具有较高的响应率(0.62 A/W@960 nm)和较低的暗电流(100 pA@-10 mV),光敏面大小为 5.8 mm×5.8 mm,封装在一个陶瓷封装内。辐照试验共选用八只该类型光电二极管完成。

1.2 辐照条件

辐照试验在中国科学院辐照中心完成。使用

^{60}Co 射线作为辐照源,辐照剂量率为 5 rad(Si)/s。辐照试验采用静态方式,使用剂量计测量其辐照剂量率。在辐照试验过程中,元件保持在 300 K 环境温度下,且处在非偏模式下。辐照试验间分布及样片放置位置如图 2 所示。

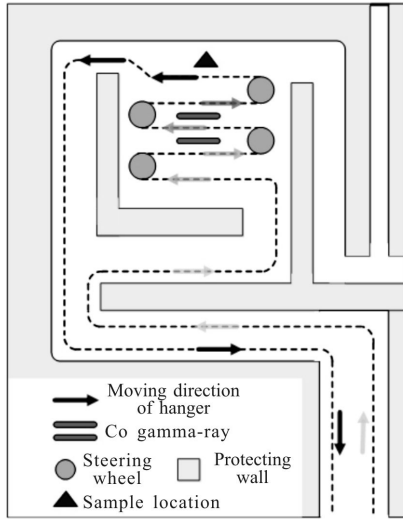


图 2 辐照间分布及样片放置位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of irradiation room and sample location

文中所提及的比辐射计搭载在某高分辨率成像光谱仪上,运行于中低轨道,预期工作寿命为八年,在采取屏蔽措施后探测器所接收的辐照剂量小于 30krad(Si)。考虑留有一定裕量,此次辐照试验硅光电二极管接受辐照总剂量最大为 50 krad(Si)。试验中共选用四组样片(编号为 41#~48#,每组包含两片硅光电二极管)进行试验,其中第一组样片(41#,42#)接受辐照剂量为 50 krad(Si),第二组样片(43#,44#)接受辐照剂量为 35 krad(Si),第三组样片(45#,46#)接受辐照剂量为 20 krad(Si),第四组样片(47#,48#)不接受辐照,用于性能对比。辐照试验操作流程如图 3 所示。

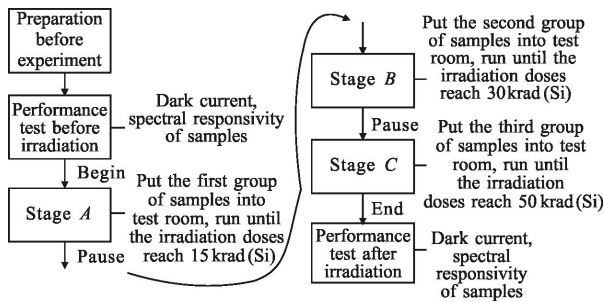


图 3 辐照试验过程框图

Fig.3 Schematic diagram of irradiation process

1.3 器件测试参数

光电探测器的主要参数包括光谱响应度、峰值波长、暗电流、结电容等。光谱响应度、峰值波长、暗电流决定着探测器的探测能力,结电容决定光电探测器的响应速度。因在轨定标过程中对探测器测量速度无较高要求,未特别关注辐照前后光电二极管结电容的变化。辐照前后在室温条件下,分别测试了各试验样片的暗电流和光谱响应度。

探测器暗电流定义为无光信号输入时探测器的输出,暗电流的大小直接影响着比辐射计的测量动态范围,同时暗电流受温度影响会产生漂移从而引入测量误差。暗电流测量使用安捷伦公司的 4140B 型皮安表完成。

探测器光谱响应度用来表征单位入射光功率与探测器输出光电流的关系,使用美国 Oriel 公司的 7400 可见近红外光谱仪测量系统和标准探测器测量完成。各样片光谱响应度测量范围为 400~1 100 nm,测量间隔为 10 nm。

2 试验结果

2.1 辐照对暗电流影响

分别施加 -0.2 V、-0.4 V、-5 V 偏压对测试样片暗电流进行了测试。各测试样片在不同反向偏压条件下暗电流变化如图 4~图 6 所示。

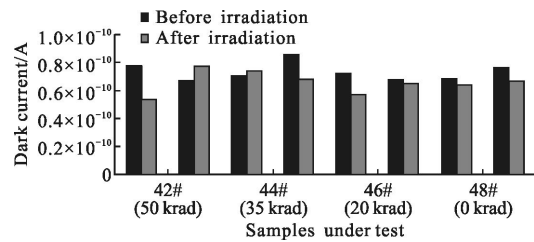


图 4 -0.2 V 偏压下辐照前后样片暗电流

Fig.4 Dark current change of samples before and after

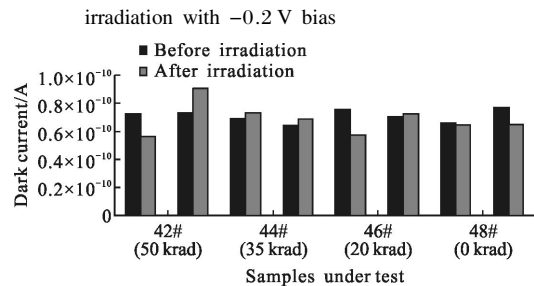


图 5 -0.4 V 偏压下辐照前后样片暗电流变化

Fig.5 Dark current change of samples before and after

irradiation with -0.4 V bias

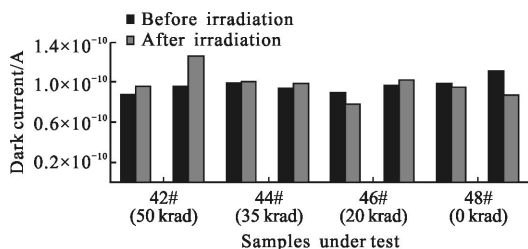


图 6 -5 V 偏压下辐照前后样品暗电流

Fig.6 Dark current of samples before and after irradiation with -5 V bias

参试的六只辐照样片以及两只对比样品中 41#、43#~48# 暗电流辐照前后均未出现明显的增加,仅出现较小的无规律的“波动”,该“波动”的产生是由于辐照前后测试环境不完全一致以及仪器的测量误差引起的。

对于 42# 探测器(接受辐照剂量为 50 krad(Si))在-0.4 V 以及-5 V 偏压下暗电流分别增加了 23.2% 和 31.3%,但暗电流增加绝对值在 3 pA 以内。对于比辐射计的在轨应用,探测器输出光电流在 10 nA 以上,因此该暗电流变化对比辐射计在轨应用性能的影响可以忽略。但是在探测器信号更加微弱且绝对测量精度要求比较高的应用场合,该暗电流的变化需要引起重视。

2.2 辐照对光谱响应影响

各测试样品辐照前后光谱响应度变化对比如图 7~图 10 所示。所有测试样品峰值响应波长在辐照前后均处于 960 nm,未发生偏移。

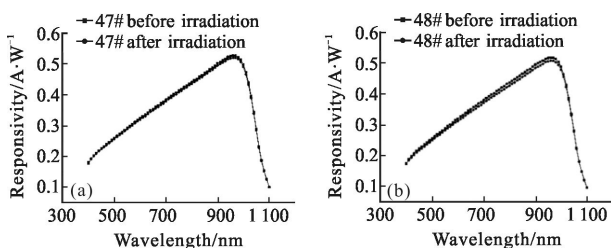


图 7 未接受辐照样片(47#、48#)光谱响应度

Fig.7 Responsivity of samples (47#, 48#) without irradiation

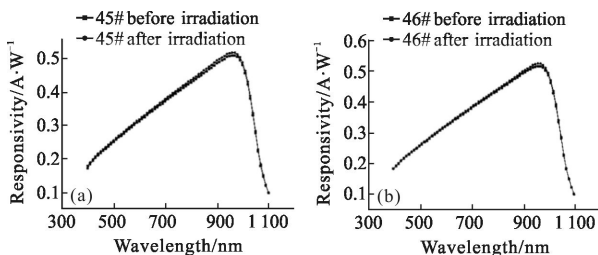


图 8 20 krad(Si)辐照前后样品(45#、46#)光谱响应度

Fig.8 Responsivity of samples (45#, 46#) before and after 20 krad (Si) gamma irradiation

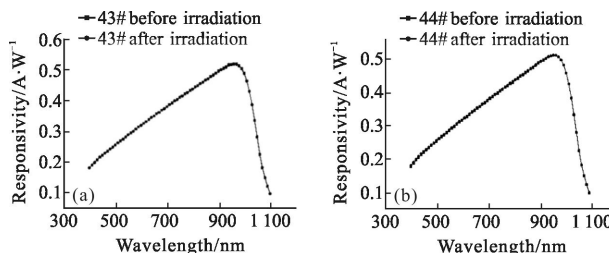


图 9 35 krad(Si)辐照前后样品(43#、44#)光谱响应度

Fig.9 Responsivity of samples (43#, 44#) before and after 35 krad (Si) gamma irradiation

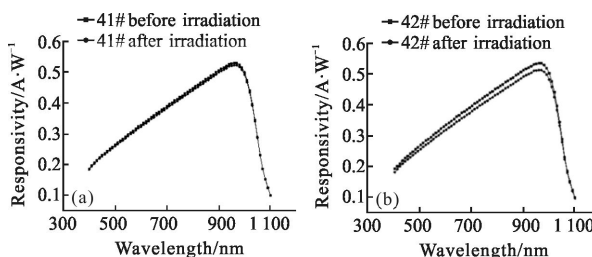


图 10 50 krad(Si)辐照前后器件(41#、42#)光谱响应度

Fig.10 Responsivity of samples (41#, 42#) before and after 50 krad(Si) gamma irradiation

各测试样品典型波长处探测器响应度相对变化如表 1 所示,所有参试样片光谱响应度的变化范围较一致,均在系统测量误差(5%)范围之内。

表 1 辐照前后典型波长处响应度相对变化

Tab.1 Relative change of responsivity of typical wavelength before and after irradiation

Wav	Relative change							
e-								
lengt	41#	42#	43#	44#	45#	46#	47#	48#
h	(50	(50	(35	(35	(20	(20	(0 krad)	(0 krad)
/nm	krad)	krad)	krad)	krad)	krad)	krad)		
550	-1.50%	-4.49%	0.33%	1.05%	1.82%	0.89%	-1.10%	-2.25%
750	-1.46%	-4.29%	-0.24%	0.67%	1.69%	1.01%	-1.27%	-2.38%
950	-1.30%	-4.11%	-0.58%	0.29%	1.60%	1.62%	-1.39%	-2.09%

对于 42# 探测器,响应率变化较其他测试样品偏高,其变化原因一方面可能是由于辐照引起的响应率衰减,另一方面可能是系统测量误差所导致,由于测量条件的限制不能准确得出响应率变化的原因,但可以确信的是参试样片辐照后光谱响应度的变化满足比辐射计探测器响应度在轨衰变小于 10% 的要求。

根据上述试验结果,在 35 krad(Si)辐照剂量条件

下,影响光电二极管应用性能的关键参数均未发生明显变化,可以预见该型号硅光电二极管随比辐射计在轨运行八年寿命期内(总辐照剂量小于30 krad(Si))具有良好的稳定性和可靠性,能够满足某成像光谱仪在轨定标应用需求。而在50 krad(Si)剂量照射下,其中一只参试样片出现暗电流增加的现象,但增加绝对量值有限,对比辐射计定标应用的影响可以忽略,说明该型号硅光电二极管具备在更加苛刻空间辐照环境下可靠应用的潜质。

3 结论

硅光电二极管是比辐射计光电探测的核心部件,其在空间环境下的稳定性对星上定标器的可靠工作至关重要。文中通过比较不同辐照剂量下硅光电二极管的暗电流以及光谱响应度的变化,分析了辐照对硅光电二极管性能的影响。实验结果表明在35 krad (Si) 总剂量辐照条件下探测器峰值波长、暗电流、光谱响应度均未出现明显的变化。在50 krad(Si)总剂量辐照条件下,测试样片出现了暗电流增加的现象,但增加绝对量值与比辐射计输出信号相比可以忽略,其对比辐射计在轨应用性能不会产生明显的影响。

通过文中的试验结果,说明参试的硅光电二极管具备在预定轨道高度空间辐照环境下长期、可靠工作的能力,可以作为在轨定标器可见波段探测单元备选器件。

参考文献:

[1] Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua, et al. Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 51 (7): 502-1505. (in Chinese)
乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程定标 [J]. 遥感学报, 2002, 51(7): 1502-1505.

[2] Xiong X, Sun Junqiang, William Barnes. Multiyear on-orbit calibration and performance of Terra MODIS reflective solar bands[J]. *IEEE*, 2007, 45(4): 879-889.

[3] Sun J, Xiong X, Butler J. Characterization and performance of the suomi-NPP VIIRS solar diffuser stability monitor[C]// SPIE, 2012, 8510: 85101I-1.

[4] James M Palmer, Philip N Slater. A radioing radiometer for use with a solar diffuser[C]//SPIE, 1991, 1493: 106-117.

[5] Huo Yukun, Ouyang Xiaoping, Li Zhenfu, et al. Development of large area silicon semiconductor detectors for use in the current mode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(7): 1502-1505. (in Chinese)
霍裕昆, 欧阳晓平, 李真富, 等. 电流型大面积 PIN 探测器 [J]. 物理学报, 2002, 51(7): 1502-1505.

[6] Bourdarie S, Boscher D. Space Radiation Environment [M]. New York: Space Technology Courses, 2004.

[7] Zhang Jianxin. Influence of reliability of silicon photodiode by radiation[J]. *Infrared*, 2005, 26(9): 25-31. (in Chinese)
张建新. 辐照对硅光电二极管可靠性影响的研究 [J]. 红外, 2005, 26(9): 25-31.

[8] GerhardLutz. Radiation damage in structured silicon semiconductor detectors[C]//IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference Phoenix, 2002: 15-20.

[9] Onoda S, Mori H, Okamoto T, et al. Investigation of radiation degradation of Si and GaAlAs optical devices due to gamma-ray and electron irradiation [J]. *Radiat Phys Chem*, 2001, 60(4-5): 377-380.

[10] Charlton D G, Dowell J D, Homer R J, et al. Radiation hardness and lifetime studies of photodiodes for the optical readout of the ATLAS semiconductor tracker [J]. *Nucl Inst Methods Phys Res A*, 2001, 456(3): 300-309.

[11] Bourqui M L, Béchou L, Cilarol O. Reliability investigations of 850 nm silicon photodiodes under proton irradiation for space applications[J]. *Microelectronics Reliability*, 2008, 48: 1202-1207.

[12] Bai Yun, Shao Xiumei, Chen Liang, et al. Effect of electron irradiation on the GaN -based p -i -n UV detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 270-273. (in Chinese)
白云, 邵秀梅, 陈亮, 等. GaN 基紫外探测器的电子辐照效应[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 270-273.

[13] Zhanh Hang, Liu Dongbin. Analysis of total dose radiation test for linear CCD KLI -2113 [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(5): 611-616. (in Chinese)
张航, 刘栋斌. 线阵探测器 KLI-2113 总剂量辐照性能试验分析[J]. 发光学报, 2013, 34(5): 611-616.

[14] Chen Bingruo, Li Shiqing, Huang Qijun, et al. Effect of γ -ray irradiation on the photocurrent of Si pthodiode [J]. *Wuhan University Journal*, 1995, 41(3): 357-362.