

γ 辐射对碲镉汞光伏探测器的暂态损伤与永久损伤

乔 辉, 廖 毅, 邓 屹, 张勤耀, 胡晓宁, 李向阳, 龚海梅
(中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

摘 要:利用 ^{60}Co γ 源对碲镉汞光伏探测器进行了辐射损伤研究,通过电流-电压测试方法对器件的辐射效应进行了表征。利用数值微分方法得到器件较大反向偏压下的暗电流与缺陷中心密度的关系更为明显。通过研究辐射停止后器件的暗电流随着时间延长的变化,认为碲镉汞光伏探测器的 γ 辐射损伤存在暂态损伤和永久损伤。将这一现象进行实际应用,可以延长工作于辐射环境中的红外探测器的使用寿命。

关键词: γ 辐射; 辐射损伤; 光伏探测器; 碲镉汞

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A

Transient and permanent defects of HgCdTe photovoltaic detectors by γ irradiation

QIAO Hui, LIAO Yi, DENG Yi, ZHANG Qin-yao, HU Xiao-ning, LI Xiang-yang, GONG Hai-mei
(State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The study of irradiation defects of HgCdTe photovoltaic detectors by ^{60}Co γ has been carried out. The current-voltage measurement method was used to evaluate the irradiation effects. It was obtained that the dark current of detectors at a larger reverse bias has a more obvious correlation with the density of defect centers using the numerical differentiate method. By studying the variation of dark current with the extension of time, it was thought that the transient and permanent irradiation defects existed in HgCdTe photodetectors after γ irradiation. This phenomenon may be applied to infrared detectors which operate in the irradiation condition to lengthen the lifetime of infrared detectors.

Key words: γ irradiation; irradiation defect; photovoltaic detector; HgCdTe

1 引 言

碲镉汞光伏探测器是目前研究最多的红外器件之一。作为先进空间光学遥感仪器的关键元部件,碲镉汞光伏探测器已经在航天飞行器(如卫星、飞船等)和太空望远镜中得到愈来愈广泛的应用。由于空间应用环境中存在着苛刻的辐射环境,因此研究工作环境中的辐射对探测器性能的影响就直接关系到器件工作的可靠性,甚至还会影响到仪器和航天飞行器的工作寿命。国内外在碲镉汞红外材料和器件的辐射损伤效应方面已经进行了大量的研究^[1-2]。概括起来,辐射对器件的影响主要有以下

形式^[3]:电离效应、位移效应、表面界面效应和热效应等,虽然这几种效应都同时存在,但通常以电离效应和位移效应为主。在具体的辐射条件下,也可能是某一种效应起主导作用。

光伏器件的暗电流机制是分析光伏器件性能的重要理论基础^[4],因此测量器件的电流-电压($I-V$)特性是评价器件性能的重要方法。实验中我们采用

作者简介: 乔 辉(1979-),男,助理研究员,硕士,主要从事碲镉汞红外器件的工艺与抗辐射加固研究。E-mail: qiaohui@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2009-05-08; **修订日期:** 2009-06-22

中波和长波碲镉汞外延材料制备的光伏探测器,首先对器件进行一定剂量的 γ 辐射,测量了辐射前后器件的 $I-V$ 特性,然后将器件置于室温环境中,观察了器件的暗电流在辐射停止后随着时间延长而发生的变化。

2 实验

实验中辐射样品分别为中波和长波外延材料碲镉汞光伏器件,对应的 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 材料组分 x 为0.3和0.22。 γ 射线源为 ^{60}Co 源。辐射前首先把器件安装于测试杜瓦的冷头面,在液氮温度下对器件进行 $I-V$ 特性测试;对器件进行一定剂量的辐射后,放置不同时间后再次测试液氮温度下器件的 $I-V$ 性能参数。由于光伏器件通常为零偏置电压状态下工作,因此辐射过程中器件采取零偏置电压状态。图1为器件的辐射实验示意图。

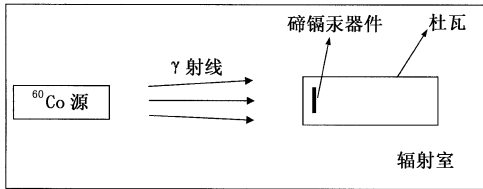


图1 辐射实验样品放置示意图

Fig. 1 experimental setup for gamma irradiation

3 实验结果与讨论

光伏器件的暗电流机制主要包括^[5-7]:n区和p区的扩散电流,势垒区的产生-复合($g-r$)电流;直接隧道电流,以及通过缺陷中心的间接隧道电流。由于 γ 辐射非常容易在材料中引入缺陷中心,因此辐射影响最大的是器件的间接隧道电流。

为了更清楚显明器件缺陷中心密度与间接隧道电流限制的反向暗电流的关系,对 $I-V$ 特性曲线进行微分后可以得到相应的电阻-电压($R-V$)曲线,利用数值拟合方法,并通过改变陷阱中心密度参数 B ^[7],可以得到不同缺陷中心密度下由间接隧道电流限制的 $R-V$ 曲线,如图2所示。

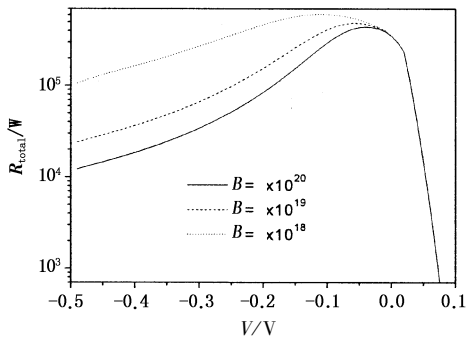


图2 不同陷阱中心密度 B 条件下数值拟合的 $R_{total}-V$ 曲线

Fig. 2 simulated $R_{total}-V$ curves with different trap density B

从图2可以看出,不同缺陷中心密度对间接隧道电流限制的暗电流的影响主要表现在较大的偏压范围。随着陷阱中心密度的增加,器件较大反向偏压下电阻的下降更为明显,这也就反映出器件较大反向偏压下的暗电流随着缺陷中心密度的增加而明显增大。因此,图3和图4只给出了表征器件性能的 $I-V$ 特性曲线中反向偏压0.2~0.5V范围内器件的暗电流的变化。从图3和图4看出,辐射停止后器件的暗电流都增大,但暗电流随停止时间的变化趋势有所不同。表1中给出了0.5V反向偏压下器件的暗电流的变化。可以看出,对于长波器件,经过 3×10^5 rad剂量的辐射后,虽然器件的暗电流增大,但暗电流有在短时间内恢复到辐射前的趋势。对于中波器件,经过 1×10^7 rad剂量的辐射后,器件的暗电流同样增大,但辐射停止很长时间后只有轻微的恢复。这一对比说明实验中 γ 辐射对于长波器件引起的损伤较大程度是暂时的,而对于中波器件引起的损伤主要是永久的。

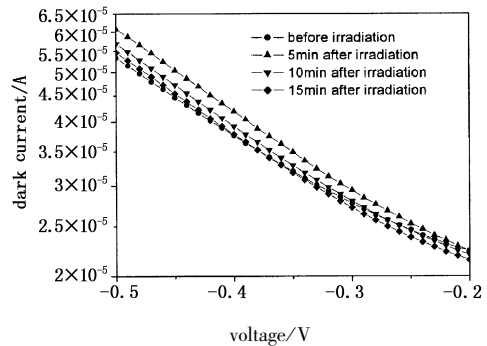


图3 长波器件辐射前及辐射后不同时间器件的暗电流的变化

Fig. 3 variation of dark current of LW detector before irradiation and after different time

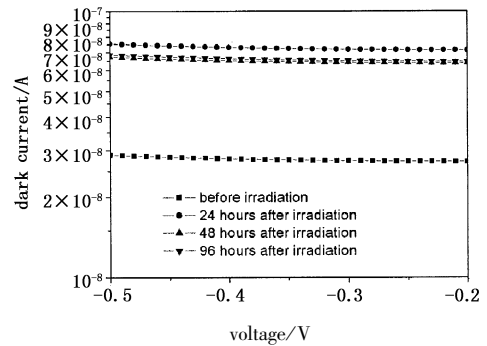


图4 中波器件辐射前及辐射后不同时间器件的暗电流的变化

Fig. 4 variation of dark current of MW detector before irradiation and after different time

表1 长波和中波器件 0.5 V 反向偏压下的暗电流的变化
Tab.1 dark current of LW and MW detectors at a bias of -0.5 V

(单位:A)

长波	辐射前	5 min	10 min	15 min
	5.33×10^{-5}	6.07×10^{-5}	5.68×10^{-5}	5.46×10^{-5}
中波	辐射前	24 hour	48 hour	96 hour
	2.88×10^{-8}	7.55×10^{-8}	6.73×10^{-8}	6.85×10^{-8}

前面提到, γ 辐射对碲镉汞器件的影响主要有电离效应和位移效应, 其中电离效应的主要影响是产生电子-空穴对, 导致载流子浓度增加, 使载流子浓度处于非平衡状态, 光伏器件的暗电流增大; 当辐照停止后, 这些非平衡载流子又会发生复合而在较短时间内使载流子浓度恢复到平衡状态。位移效应在半导体中会产生位移损伤, 形成点缺陷或缺陷团, 产生的缺陷中心密度与入射粒子的能量、剂量以及被辐照材料的原子序数有关。这些缺陷可以成为材料中载流子的复合中心和陷阱中心, 会导致光伏器件的暗电流增大。这些由于辐照产生的位移缺陷在辐照结束后会发生弛豫消失而成为暂态损伤, 也可能继续存在而成为永久损伤。实验中, 中波和长波器件的辐照剂量不同, 长波器件的辐射剂量较低, 当停止辐照后, 由于电离效应产生的非平衡载流子, 以及位移效应所产生的缺陷主要为暂态损伤, 因此大部分缺陷中心在较短的时间内消失而恢复到平衡状态, 不足以对器件产生严重的影响, 因此器件的暗电流在辐照停止后的较短时间内就得到很大程度的恢复。而对于中波器件, 其辐射剂量远大于长波器件, 此时辐射而产生的位移损伤主要为永久损伤, 因此辐射停止后很长时间(96 h), 器件的暗电流仍无法恢复。对于应用于辐射环境中的红外探测器, 可以根据这一现象利用定时开关机来提高器件的工作寿命。器件工作一段时间后性能有一定衰减(假设衰减到起初性能的 50%), 通过对系统进行针对性设计, 系统关机时器件处于非辐射的屏蔽状态, 使得器件的性能可以得到很大程度的恢复(假设恢复到起初性能的 80%)。此时系统再开机工作(自初始性能的 80%), 相比器件工作一段时间后不间断而继续工作(自起初性能的 50%), 这样就可以相对延长器件的工作寿命。对比图 2 和图 3 两种情况, 器件受到辐射的剂量不同, 其暗电流在辐射停止后随着时间的恢复程度也随之不同, 因此还可以初步认为存在某一临界辐射剂量值, 当辐射剂量低于此值时, 辐射损伤以暂态损伤为主, 停止辐射后器件性能会有较大程

度的恢复, 若辐射剂量高于此值, 则停止辐射后器件的性能很难有明显的恢复而产生永久损伤。

4 结论

通过对中波和长波碲镉汞光伏器件进行不同剂量的 γ 辐射, 发现器件的 $I-V$ 特性在辐射停止后的恢复程度不同, 分析认为辐射在器件中可以产生暂态损伤和永久损伤。初步认为 γ 辐射对器件的辐射损伤存在一临界剂量, 当辐射剂量不超过此值时, 器件的辐射损伤主要为暂态损伤, 器件的性能在辐射停止后有较大程度的恢复, 但若超过这一剂量值, 器件的辐射损伤主要为永久损伤, 辐射停止后器件性能很难恢复。利用这一现象, 通过在系统应用中进行针对性的设计, 对于延长实际应用中器件及系统的工作寿命具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Pickel J C, Kalma A H, Hopkinson G R, et al. Radiation effects on photonic imagers—a historical perspective[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, 50(3): 671–688.
- [2] 胡新文, 赵军, 陆慧庆, 等. γ 辐照室温短波 HgCdTe 光伏器件的导纳谱研究[J]. 物理学报, 1999, 48(6): 1107–1112.
- [3] 曹建中. 半导体材料的辐射效应[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 153.
- [4] Gopal V, Gupta S, Bhan R K, et al. Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride $n^+ - p$ junctions[J]. Infrared Physics & Technology, 2003, 44: 143.
- [5] Willardson R K, Beer A C. Semiconductors and semimetals[M]. New York: Academic Press, 1981: 201.
- [6] Nemirovsky Y, Unikovsky A. Tunneling and 1/f noise current in HgCdTe photodiodes[J]. J. Vac. Sci. Technol. B, 1992, 10(40): 1602–1610.
- [7] Rais M H, Musca C A, Antoszewski J, et al. Characterisation of dark current in novel $Hg_{1-x}Cd_xTe$ mid-wavelength infrared photovoltaic detectors based on n-on-p junctions formed by plasma-induced type conversion[J]. J. Crystal Growth., 2000, 214/215: 1106–1110.