

碲镉汞焦平面光伏器件的实时 γ 辐照效应研究

乔 辉^{1)†} 廖 毅¹⁾ 胡伟达¹⁾ 邓 屹¹⁾²⁾ 袁永刚¹⁾²⁾ 张勤耀¹⁾ 李向阳¹⁾ 龚海梅¹⁾

1) 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)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2007 年 11 月 29 日收到, 2008 年 4 月 10 日收到修改稿)

对碲镉汞长波和中波焦平面光伏器件进行了实时 γ 射线辐照效应研究, 通过辐照过程中实时测试器件的电流-电压特性, 发现随着辐照剂量的增加, 中波器件比长波器件表现出更好的抗辐照能力. 对于长波器件, 随着辐照剂量的增大, 能够反映器件性能的零偏电阻逐渐降低; 对于中波器件, 零偏电阻随着辐照剂量的增加无固定变化趋势. 辐照效应主要表现在电阻-电压曲线随着辐照剂量增加出现越来越明显的扰动. 根据光伏器件的暗电流机理, 对长波器件的电阻-电压曲线进行数值拟合, 发现辐照引起少子产生-复合寿命逐渐降低, 缺陷密度逐渐增大, 主要影响的电流机理为产生-复合电流. 由于中波器件材料的载流子迁移率比长波器件低, 掺杂浓度比长波器件高, 禁带宽度几乎是长波器件的两倍, 导致中波器件的辐照效应弱于长波器件, 但辐照引起的电阻-电压曲线扰动说明辐照会引起中波器件噪声的增加.

关键词: γ 辐照, 辐照效应, 光伏器件, 碲镉汞

PACC: 6180, 6180E, 7155, 7155G

1. 引 言

碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)是目前制备红外焦平面光伏探测器(FPA)的首选材料. 作为影响器件应用可靠性的关键因素之一, 碲镉汞焦平面器件的 γ 射线辐照效应是器件可靠性研究的一个重要方面, 但目前在这方面的研究主要集中于非实时辐照条件下的静态研究^[1,2], 即通过辐照前后对器件进行性能对比测试来分析辐照对器件性能的影响; 由于辐照引起的器件性能改变在辐照停止后的很短时间内会发生弛豫性恢复, 因此不能真实反映出工作状态时器件的辐照效应. 为了评价碲镉汞焦平面器件在 γ 射线辐照条件下工作的可靠性, 本实验利用⁶⁰Co源对中波和长波碲镉汞焦平面光伏器件进行了动态实时 γ 辐照, 在辐照过程中对器件电流-电压($I-V$)特性进行实时测试, 研究了 γ 辐照条件下器件性能随着辐照剂量增加的变化.

2. 基本理论

2.1. 光伏器件性能评价

评价光伏器件性能的主要参数包括其信号响应率、噪声以及 $I-V$ 特性. 实验中由于信号和噪声测试无法在辐照现场进行, 只对器件的 $I-V$ 特性进行了实时动态测试, 记录了零偏电阻 R_0 随辐照剂量的变化. 根据光伏器件电压响应率和电流噪声的计算公式^[3], 从 R_0 随辐照剂量的变化可以推导出器件信号响应和噪声的变化趋势.

2.2. 光伏器件暗电流机理

光伏器件的暗电流机理是分析光伏器件性能的重要理论基础, 已有许多作者对此进行了分析^[4-6]. 光伏器件的暗电流机理主要包括: n 区和 p 区的扩散电流 I_{dif} ^[7], 势垒区的产生-复合($g-r$)电流 I_{g-r} ^[4]; 直接隧道电流 I_{btb} ^[8], 以及通过缺陷中心的间接隧道电流 I_{tst} ^[9]. 根据 Shockley 方程^[10]以及动态电阻

$$R_d = \left(\frac{\partial I}{\partial V} \right)_{V=V_b}^{-1}, \quad (1)$$

通过这些不同的电流机理可以得到相应的电阻

† E-mail: qiaohui@mail.sitp.ac.cn

$R_{dif}, R_{g-r}, R_{bb}, R_{lat}$ [3], 总的电阻 R_{total} 为

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_{dif}} + \frac{1}{R_{g-r}} + \frac{1}{R_{bb}} + \frac{1}{R_{lat}}. \quad (2)$$

3. 实 验

实验中辐照样品为中波和长波碲镉汞 FPA 器件. 表 1 给出实验样品的 x 组分和截止波长. 由于中波和长波 FPA 器件需要工作于液氮温度(77 K), 因此需要封装于低温真空杜瓦内. 杜瓦内灌满液氮, 器件装于杜瓦冷头上, 通过装于冷头上的铂电阻来监测辐照过程中冷头的温度, 确保辐照过程中器件温度维持在 77 K. 将封装有 FPA 器件的杜瓦置于辐照室内, 通过屏蔽引线与控制室内的 $I-V$ 测试仪 Keithley4200 相联接, 如图 1 所示. 辐照开始前对器件的 $I-V$ 特性进行测试, 然后开始固定剂量率的 γ 辐照. 之前经过标定得到杜瓦放置位置的辐照剂量率为 28 rad/s ($1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$). 随着辐照时间的延长, 器件的辐照剂量也逐渐增大. 辐照剂量通过剂量率与辐照时间的乘积得到. 实验中选择的测试点为 $1 \times 10^4 \text{ rad}, 5 \times 10^4 \text{ rad}, 1 \times 10^5 \text{ rad}, 2 \times 10^5 \text{ rad}$. 辐照过程中对 $I-V$ 特性进行实时测试并作记录.

表 1 γ 辐照实验的样品

波段	温度/K	x 组分	迁移率 $/\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	掺杂浓度 cm^{-3}	截止波长 μm
中波	77	0.3035	312	2.57×10^{16}	4.99
长波	77	0.224	828	8.92×10^{15}	10.18

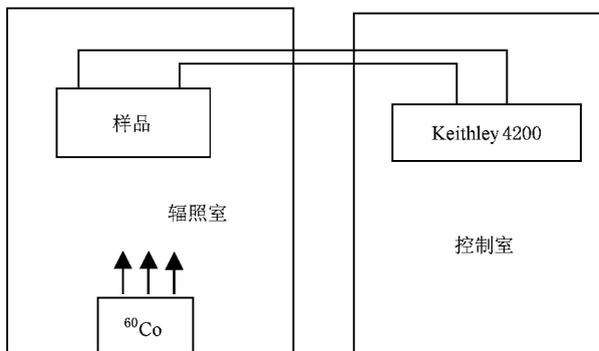


图 1 γ 辐照过程示意图

4. 实验结果

4.1. $R-V$ 曲线随辐照剂量的变化

光伏器件 $R-V$ 曲线在分析其暗电流机理中起着重要的作用. 将实验中获得的 $I-V$ 曲线对电压 V 微分后取倒数, 可以得到随着辐照剂量增大长波和中波器件的 $R-V$ 曲线的变化, 如图 2 和图 3 所示.

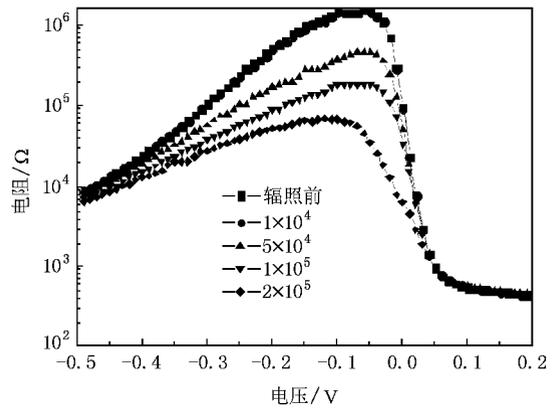


图 2 长波器件 $R-V$ 特性随辐照剂量的变化

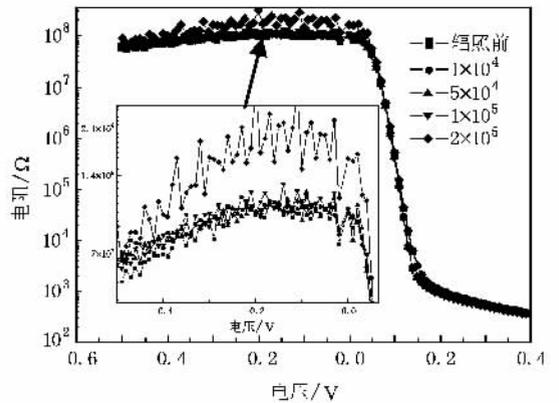


图 3 中波器件 $R-V$ 曲线随辐照剂量的变化

从图 2 和图 3 看出, 随着辐照剂量的增加, 长波和中波器件表现出不同的抗辐照能力. 长波器件的反偏电阻随着剂量增加而急剧降低, 相比之下, 中波器件反偏电阻随辐照剂量增加变化不如长波明显. 辐照的影响主要表现在电阻值的扰动增加.

4.2. R_0 随辐照剂量的变化

根据 2.1 的讨论, 光伏器件的零偏电阻 R_0 直接与器件的响应率和噪声有关, 表 2 和表 3 给出了长波和中波器件的 R_0 随辐照剂量的变化.

表 2 长波器件零偏电阻 R_0 随辐照剂量的变化

辐照剂量/ 10^4 rad	0	1	5	10	20
$R_0/10^4 \Omega$	9.4	9.2	5.0	3.4	6.1×10^{-1}

表 3 中波器件零偏电阻 R_0 随辐照剂量的变化

辐照剂量/ 10^4 rad	0	1	5	10	20
$R_0/10^8 \Omega$	1.04	1.01	9.97×10^{-1}	1.04	1.62

从表 2 和表 3 的结果可以看出,对长波器件,随着辐照剂量的增大, R_0 呈一直下降趋势,而对于中波器件 R_0 则无固定的变化趋势.

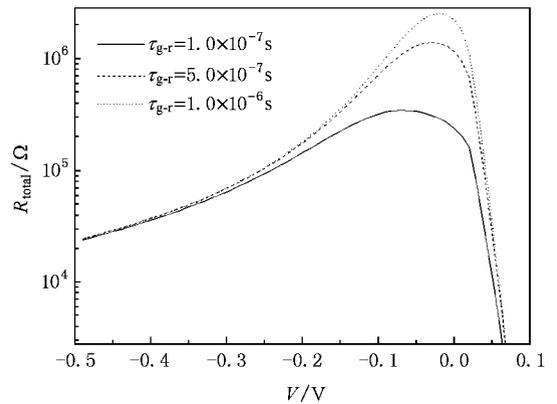
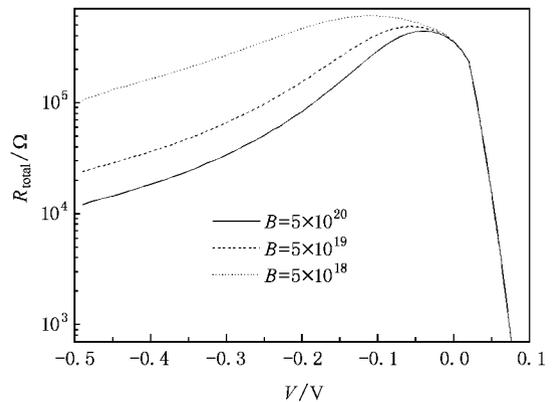
5. 讨 论

根据 4 的结果,可以认为随着辐照剂量增加,长波器件信号响应率和噪声性能的衰减要比中波器件明显.从图 3 看出,中波器件随着辐照剂量的增大, $R-V$ 曲线的扰动越来越大,这反映出器件的噪声随着辐照剂量增加而逐渐增大,中波器件响应率随辐照剂量的变化趋势由于 R_0 的关系而无法确定,但根据 $R-V$ 曲线变化可以认为其影响要小于长波器件.两种器件的制备工艺过程完全相同,唯一不同的是其材料的禁带宽度不同. γ 辐射对碲镉汞器件的影响主要有电离效应和位移效应两种形式,其中电离效应对半导体主要的影响是产生电子-空穴对,使得材料的载流子浓度增加,位移效应则是在半导体中产生位移损伤,形成点缺陷或缺陷团,这些缺陷会在禁带中引入缺陷能级,多数情况下引入的是处于禁带中央附近的深能级^[11].对于位移效应^[12,13],主要与入射粒子的能量以及被辐照材料的原子序数有关,因此 γ 辐照对长波和中波器件具有类似的位移效应,对于电离效应, γ 射线辐照到器件上产生电子-空穴对所需的平均能量约是其材料禁带宽度的 3—5 倍^[14].根据碲镉汞材料的禁带宽度 E_g 的计算公式^[15],可以得到实验中所用的中波和长波器件材料的禁带宽度,如表 4 所示,中波材料的禁带宽度为长波材料的 2 倍,这样相同能量的 γ 辐照沉积在长波器件上所产生的电子-空穴对的密度要明显大于中波器件,因此对于长波器件的影响要甚于中波.

表 4 实验样品的禁带宽度

波段	x	T/K	E_g/eV
中波	0.3035	80	0.266
长波	0.224	80	0.135

γ 射线辐照在碲镉汞中产生的电子-空穴对会引起载流子浓度的增大从而降低产生-复合寿命,同时辐照对碲镉汞晶格产生的辐照位移损伤缺陷会充当产生-复合中心和隧道跃迁中心,因此辐照过程主要影响器件暗电流机理中的产生-复合电流和间接隧道电流.对于产生-复合电流,通过采用 Gopal 提出的简化模型^[4],改变其中的参数产生-复合寿命 τ_{g-r} ,可以得到产生-复合电流限制的 $R_{total}-V$ 曲线,如图 4 所示.根据间接隧道电流的表达式^[9],通过改变其中与缺陷密度有关的参数 B ,得到间接隧道电流限制的 $R_{total}-V$ 曲线,如图 5 所示.

图 4 不同寿命 τ_{g-r} 条件下数值拟合的 $R_{total}-V$ 曲线图 5 不同缺陷中心密度条件下数值拟合的 $R_{total}-V$ 曲线

对比图 4 和图 5 可以看到产生-复合电流限制和间接隧道电流限制的暗电流机理的明显不同:产生-复合电流限制的暗电流机理其影响主要表现在较小的反向偏压范围,而由间接隧道电流限制的暗电流机理其影响主要表现在较大的反向偏压范围.

利用文献 [16] 中提到的方法,我们对长波器件的 $R-V$ 曲线进行了数值拟合和参数提取,图 6 是对

辐照前的 $R-V$ 曲线进行拟合的结果,图 7 是利用同样的方法对辐照前后的 $R-V$ 曲线进行拟合的结果,表 5 给出根据拟合结果所提取的参数,其中 τ_{g-r} 直接影响产生-复合电流, N_t 为直接影响间接隧道电流的缺陷密度, E_t 为缺陷能级. 由于辐照引起中波器件 $R-V$ 曲线扰动而降低了其参数提取的准确性,故在此没有给出拟合结果,而是利用长波器件的拟合结果对其进行分析.

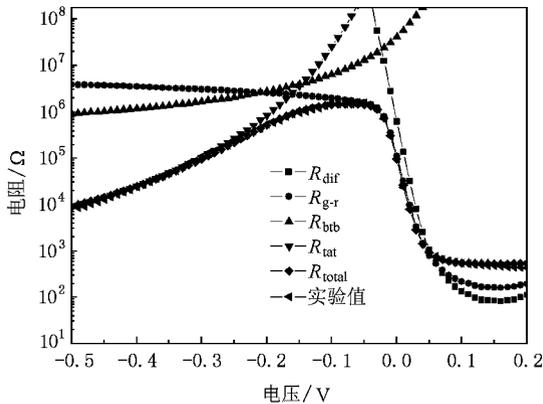


图 6 辐照前长波器件 $R-V$ 曲线的拟合结果

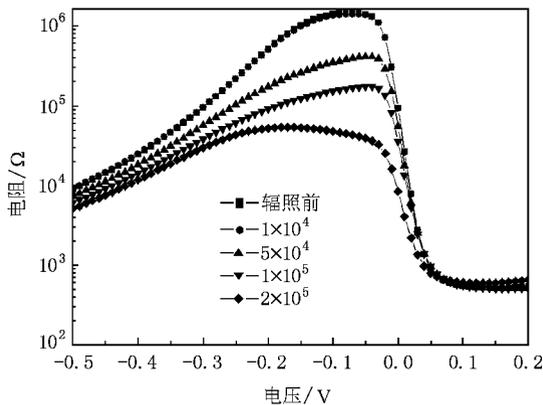


图 7 长波器件 $R-V$ 曲线的拟合结果

表 5 辐照前后根据 $R-V$ 曲线提取的参数

辐照剂量/ 10^4 Rad	0	1	5	10	20
$\tau_{g-r}/10^{-2}$ ns	1.24	1.22	1.11	1.27	3.77×10^{-1}
$N_t/10^{12}$ cm^{-3}	1.61	2.03	8.58	1.02×10	范围内任意值
E_t/E_g	0.44	0.44	0.48	0.53	0.53

从表 5 中的结果可以看出,随着辐照剂量的增加,碲镉汞的少子寿命 τ_{g-r} 不断降低,同时间接隧道跃迁缺陷密度 N_t 也逐渐增大,因此辐照引起的电离和位移两种效应同时对器件的性能起到衰减作

用,导致产生-复合电流和间接隧道电流增大,但二者随着剂量增加的加剧程度不同,从图 2 看出,长波器件电阻的降低在较小反偏范围更为明显,根据图 4 和图 5 的对比分析,可以知道辐照引起的少子寿命 τ_{g-r} 的降低更为明显,这是因为除了电离效应引起的载流子浓度增加会降低少子寿命外,位移效应引起的缺陷除了充当间接隧道中心外也会充当少子复合中心,而且从表 5 看到,随着辐照剂量的增加,在缺陷密度增大的同时,缺陷能级的位置也随之向价带方向移动,增大了载流子俘获截面,使得缺陷更易俘获载流子成为复合中心. 随着辐照引起少子寿命 τ_{g-r} 的降低,器件的暗电流机理逐渐由产生-复合电流限制,使缺陷密度可以在拟合范围内任意取值而不会影响拟合结果.

对于中波器件,从图 3 看出辐照对其 $R-V$ 曲线的影响要远小于长波器件,辐照的电离效应和位移效应的影响都不明显. 根据上面对长波器件的分析,辐照引起的电离效应和位移效应都会使得少子寿命 τ_{g-r} 降低,根据文献 [17],器件辐照前的少子寿命越低,其抗辐照能力也就越强,并且只有当辐照产生的缺陷密度接近于掺杂浓度时,辐照效应才有明显影响,因此掺杂浓度高的材料具有较强的抗辐照能力. 从表 1 可以看出,中波器件的材料载流子迁移率要远小于长波材料,根据迁移率公式

$$\mu = q\tau/m, \quad (3)$$

其中 q 和 m 分别为单位电荷和载流子有效质量,可以得出中波器件材料的寿命 τ 也要低于长波材料;根据表 1 中给出的二者的掺杂浓度,中波器件的掺杂浓度要高于长波,前面还提到,由于中波器件的禁带宽度大于长波器件,同样条件的 γ 辐照产生的电子-空穴对密度要低于长波器件,综合这些因素,使得中波器件的辐照效应要远弱于长波器件. 即使如此,辐照仍会引起其载流子浓度的扰动,表现在随着辐照剂量的增加, $R-V$ 曲线的扰动加剧,这会使器件的噪声增大.

6. 结 论

对长波和中波碲镉汞焦平面器件进行了动态 γ 射线辐照,通过在辐照过程中对器件的 $I-V$ 特性进行实时测试,发现 γ 射线对长波和中波焦平面器件表现出不同的辐照效应,主要表现在长波器件的零偏电阻 R_0 随着辐照剂量增加明显降低,而中波器

件的 R_0 则无明显变化. 根据光伏器件的暗电流机理, 对长波器件的 $R-V$ 曲线进行数值拟合和参数提取, 发现随着辐照剂量增加, 器件的产生-复合少子寿命 τ_{g-r} 逐渐降低, 缺陷密度逐渐增大, 影响的暗电流机理为产生-复合电流, 从而导致其 R_0 随辐照剂

量增加而降低. 相比之下, 中波器件材料的载流子迁移率比长波器件低, 掺杂浓度比长波器件高, 同时其禁带宽度几乎是长波器件的两倍, 使得中波器件的辐照效应要明显弱于长波器件, 具有较强的抗辐照能力.

- [1] Pickel J C , Kalma A H , Hopkinson G R , Marshall C J 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 671
- [2] Hu X W , Zhao J , Lu H Q , Li X Y , Fang J X 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1107 [in Chinese] 胡新文、赵 军、陆慧庆、李向阳、方家熊 1999 物理学报 **48** 1107]
- [3] Tang D Y , Mi Z Y 1989 *Introduction of Photoelectric Device* (Shanghai : Shanghai Science and Technology Literature Publish Company) p322 (in Chinese) [汤定元、糜正瑜 1989 光电器件概论(上海:上海科技文献出版社)第 322 页]
- [4] Gopal V , Gupta S , Bhan R K , Pal R , Chaudhary P K , Kumer V 2003 *Infrared Physics & Technology* **44** 143
- [5] Nguyen T H , Musca C A , Dell J M , Antoszewski J , Faraone L 2004 *Proceedings of SPIE* **5274** 433
- [6] Sun T , Chen X G , Hu X N , Li Y J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3357 (in Chinese) [孙 涛、陈兴国、胡晓宁、李言谨 2005 物理学报 **54** 3357]
- [7] Willardson R K , Beer A C 1981 *Semiconductors and Semimetals* (New York : Academic Press) p201
- [8] Nemirovsky Y , Unikovskiy A 1992 *J. Vac. Sci. Technol. B* **10** 1602
- [9] Rais M H , Musca C A , Antoszewski J , Dell J M , Nener B D , Faraone L 2000 *J. Crystal Growth* **214/215** 1106
- [10] Huang Y C , Liu D F , Liang J S , Gong H M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2261 [in Chinese] 黄杨程、刘大福、梁晋穗、龚海梅 2005 物理学报 **54** 2261]
- [11] Cao J Z 1993 *Radiation effects of semiconductor materials* (Beijing : Science Press) p153 [in Chinese] 曹建中 1993 半导体材料的辐射效应(北京:科学出版社)第 153 页]
- [12] Sun L Z , Chen X S , Zhou X H , Sun Y L , Quan Z J , Lu W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1757 [in Chinese] 孙立忠、陈效双、周孝好、孙沿林、全知觉、陆 卫 2005 物理学报 **54** 1757]
- [13] Chu J H 2005 *Narrow bandgap semiconductor physics* (Beijing : Science Press) p458 [in Chinese] 褚君浩 2005 窄禁带半导体物理学(北京:科学出版社)第 458 页]
- [14] Cao J Z 1993 *Radiation effects of semiconductor materials* (Beijing : Science Press) p66 [in Chinese] 曹建中 1993 半导体材料的辐射效应(北京:科学出版社)第 66 页]
- [15] Chu J H 2005 *Narrow bandgap semiconductor physics* (Beijing : Science Press) p933 [in Chinese] 褚君浩 2005 窄禁带半导体物理学(北京:科学出版社)第 933 页]
- [16] Quan Z J , Li Z F , Hu W D , Ye Z H , Hu X N , Lu W 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 084503
- [17] Lai Z W 1998 *Radiation Hardening Electronics-Radiation Effects and Hardening Techniques* (Beijing : National Defense Industry Press) p12 (in Chinese) 赖祖武 1998 抗辐射电子学-辐射效应及加固原理(北京:国防工业出版社)第 12 页]

Real-time study of γ irradiation on $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ focal plane photodiodes

Qiao Hui^{1)†} Liao Yi¹⁾ Hu Wei-Da¹⁾ Deng Yi¹⁾²⁾ Yuan Yong-Gang¹⁾²⁾ Zhang Qin-Yao¹⁾
Li Xiang-Yang¹⁾ Gong Hai-Mei¹⁾

¹⁾ *State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*

²⁾ *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 29 November 2007 ; revised manuscript received 10 April 2008)

Abstract

Real-time measurement of γ irradiation effect of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ long- and mid-wavelength focal plane array photodiodes has been carried out. Through measuring the current-voltage characteristic during irradiation process, it has been found that mid-wavelength detectors are more radiation resistant than long-wavelength photodiodes. For long-wavelength detectors, the zero bias resistance, which is usually used to evaluate the performance of photodiodes, decreases with increased γ irradiation dosage. For mid-wavelength detectors, the zero biased resistance does not show a definite changing trend, and the irradiation mainly caused fluctuations of resistance-voltage curves with increased dosage. By numerically simulating the resistance-voltage curves of long-wavelength detectors on the basis of dark current mechanism, it was found that the lifetime of minority carriers in the generation-recombination process was shortened and the defects produced by irradiation increased as the dosage increased, and the affected dark current mechanism was mainly the generation-recombination current. Because the irradiated mid-wavelength detectors have much larger carrier mobility and much lower dopant density, and also a bandgap twice that of long-wavelength detectors, they showed a weaker irradiation effect. The fluctuations of the resistance-voltage curves caused by irradiation would lead to an increase on noise of the detectors.

Keywords : γ irradiation, irradiation effect, photovoltaic detector, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

PACC : 6180, 6180E, 7155, 7155G

† E-mail : qiaohui@mail.sitp.ac.cn