

γ 辐照导致中波碲镉汞光伏器件暗电流退化的机理研究

王志铭^{1,2}, 周东¹, 郭旗¹, 李豫东¹, 文林¹, 马林东^{1,2}, 张翔^{1,2}, 蔡毓龙^{1,2}, 刘炳凯^{1,2}

(1. 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)

摘要: 针对红外探测器在空间应用中受到高能粒子辐照后暗电流退化的问题, 开展 γ 射线对中波碲镉汞(HgCdTe)光伏器件暗电流影响的研究。在室温和 77 K 温度下, 利用 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线对 HgCdTe 器件进行辐照试验, 辐照试验结束后对低温辐照器件进行 77 K 低温退火和室温退火。通过比较 γ 辐照前后和退火后器件的 I-V 特性、R-V 特性和零偏动态电阻 R_0 参数, 分析了 γ 辐照对 HgCdTe 器件暗电流的影响机制。试验结果表明: 在总剂量为 7 Mrad(Si)照条件下, 器件暗电流未出现明显的退化; 在 77 K 温度辐照条件下, 器件暗电流随着总剂量的增加而增加, 且暗电流退化幅度与辐照过程中的偏置有关。研究表明暗电流的退化源于 γ 辐照在器件中造成电离损伤, 导致器件 HgCdTe 化层中的界面态和空穴陷阱电荷密度增加。

关键词: 碲镉汞(HgCdTe)光伏器件; 红外探测器; 辐射效应; γ 射线; 暗电流

中图分类号: TN386.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0916001

Study on the mechanism of dark current degradation of HgCdTe photovoltaic devices induced by γ -irradiation

Wang Zhiming^{1,2}, Zhou Dong¹, Guo Qi¹, Li Yudong¹, Wen Lin¹, Ma Lindong^{1,2},
Zhang Xiang^{1,2}, Cai Yulong^{1,2}, Liu Bingkai^{1,2}

(1. Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the problem that the infrared detector is degraded by the high-energy particle irradiation in the space application, the effect of γ -ray on the dark current of the medium-wave HgCdTe photovoltaic device was studied. The HgCdTe device was irradiated with $^{60}\text{Co}-\gamma$ rays at room temperature and 77 K. After the irradiation test, the low temperature irradiated device was subjected to 77 K low temperature annealing and room temperature annealing. By comparing the I-V characteristics, R-V characteristics and zero-bias dynamic resistance R_0 parameters of the device before and after irradiation, the influence mechanism of γ -irradiation on the dark current of the HgCdTe device was analyzed. The test results show that the dark current of the device does not show obvious degradation

收稿日期: 2019-04-05; 修订日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61704190, 61640401); 中国科学院西部之光项目(2016-QNXZ-B-8); 国家自然科学基金面上项目(11675259)

作者简介: 王志铭(1994-), 男, 硕士生, 主要从事光电器件辐射效应方面的研究。Email: wangzhiming16@mails.ucas.edu.cn

导师简介: 郭旗(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电材料与器件空间辐射效应方面的研究。Email: guoqi@ms.xjb.ac.cn

after irradiation at room temperature under the total dose of 7 mrad (Si). Under 77 K temperature irradiation conditions, the dark current of the device increases with the dose, and the dark current degradation amplitude is related to the bias during the irradiation test. Studies have shown that the degradation of dark current was caused by gamma irradiation causing ionization damage in the device, resulting in an increase in the interface state and hole trap charge density in the device's CdTe passivation layer.

Key words: HgCdTe photovoltaic devices; IR detector; radiation effect; γ -ray; dark current

0 引言

碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)是应用最广泛的红外探测器材料,它是一种由 HgTe 和 CdTe 组成的二元化合物材料。由于 HgCdTe 材料具有高量子效率、高电子迁移率、低介电常数和禁带宽度连续可调等优点,目前仍是空间应用红外探测器的首选材料^[1]。空间环境中存在质子、电子、 α 粒子和重离子等高能粒子,这些高能粒子会使 HgCdTe 红外探测器产生电离总剂量效应、位移效应和单粒子效应,其中电离总剂量效应会导致器件的暗电流等参数的退化,影响探测器的精确性及可靠性。因此必须开展电离总剂量效应导致 HgCdTe 器件暗电流退化的研究。

国外对 HgCdTe 材料与器件的辐射效应研究,起步于 20 世纪 70 年代,由于早期红外探测器主要为单元器件,研究主要集中在 HgCdTe 材料的位移效应。80 年代初,随着探测器阵列的发明应用,探测器单元之间必须进行钝化处理,而最常见的钝化方法是沉积 ZnS 钝化层。由于 ZnS 材料具有非常高的电荷俘获效率,因此电离辐射在 ZnS 钝化层中造成的总剂量效应将严重影响器件性能。80~90 年代,大量的学者通过测量 C-V 的方法研究 HgCdTe MIS 器件的总剂量效应,发现 ZnS 钝化层能同时俘获电子和空穴,且俘获电荷的大小取决于偏置和表面处理的方式,而俘获电荷将导致界面势的漂移,影响器件性能。90 年代初,随着 CdTe 钝化技术的发明应用,HgCdTe 器件的抗总剂量水平得到了显著的提高。研究表明采用 CdTe 钝化的器件抗总剂量水平达到了 1 Mrad (HgCdTe)^[2]。2006 年,乌克兰半导体物理研究所 F F Sizov 等人研究 γ 辐射对 HgCdTe 薄膜 pn 结阵列暗电流的影响,观察到 10 Krad(Si)总剂量辐照后,30%的二极管暗电

流增加了 2.8 倍^[3]。2006~2008 年,韩国科学技术院先后对不同表面处理方式和不同钝化层的 HgCdTe 光伏器件 γ 辐照后暗电流退化进行研究,研究表明采用肼进行表面处理比采用溴处理具有更好的抗辐射性能。同时观察到采用 ZnS/CdTe 双层钝化层,器件的抗总剂量水平达到 1 Mrad(Si)^[4-5]。

国内 HgCdTe 材料与器件的辐射效应研究,开始于 90 年代末,1998~1999 年,中国科学院上海技术物理研究所胡新文等人研究了室温 γ 辐照对 ZnS 钝化的短波光伏器件性能的影响,在 1 Mrad(Si)总剂量后器件暗电流未出现明显退化。并通过测试导纳谱和深能级瞬态谱观察到 γ 辐射在价带上 0.19 eV 引入了一个新的能级。在 22.8 Mrad(Si)总剂量后,器件的响应率和探测率大幅度下降^[6-7]。2008~2016 年,乔辉等人研究了实时 γ 辐射对 HgCdTe 光伏器件暗电流的影响,观察到辐照后暗电流的增加,对辐照前后 R-V 曲线进行拟合,分析认为暗电流的增加与 γ 辐照导致产生-复合电流的增加有关^[8-10]。

目前,国内外对于 HgCdTe 材料与器件总剂量效应的研究,主要针对器件的光谱响应、探测率、暗电流等参数的退化规律开展了研究,温度和偏置条件对器件辐射损伤的影响研究较少。文中选取了中波 HgCdTe 光伏器件作为研究对象,开展了室温与 77 K 温度下两种不同辐照偏置的 γ 辐照试验,通过比较 γ 辐照前后和退火后器件的 I-V 特性、R-V 特性、零偏动态电阻 R_0 参数,分析 γ 辐照对 HgCdTe 器件暗电流的影响机制。

1 辐照样品种及试验

试验样品为中波 HgCdTe 光伏器件。该器件为在 p 型 HgCdTe 材料上,利用 B⁺ 离子注入形成 n 区的

n⁺-on-p 型光伏器件。p 型 HgCdTe 材料通过移动加热器法生长得到,材料分别经过粗抛研磨减薄、化学机械抛光、溴甲醇抛光和清洗,之后在表面生长 ZnS 作为离子注入阻挡层,利用光刻工艺生成离子注入区,进行 B⁺离子注入,形成 n 区。在去除阻挡层之后,在样品的表面通过热蒸发的方式在样品表面生长 CdTe 钝化层。最后通过光刻胶玻璃工艺制备了 Sn/Au 金属膜作为欧姆电极,器件结构如图 1 所示。

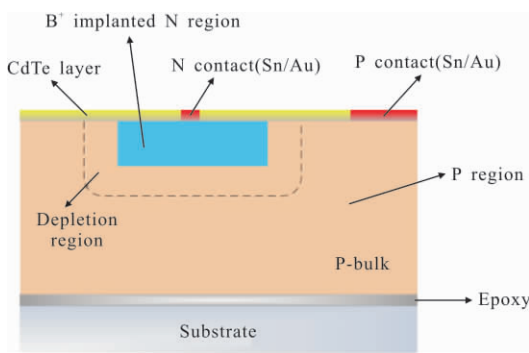


图 1 中波 HgCdTe 光伏器件的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of medium-wave HgCdTe photovoltaic device

在实验中,辐照源采用⁶⁰Co- γ 射线源,辐照剂量率为 400 rad(Si)/s。辐照过程示意图如图 2 所示,样品置于杜瓦瓶中,利用冷屏对器件进行暗场屏蔽。通过液氮进行制冷,并用温控仪对杜瓦温度进行

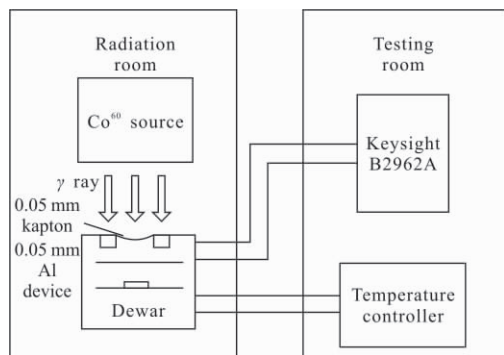


图 2 辐照过程示意图

Fig.2 Diagram of irradiation process

监测。用引线连接电源与杜瓦的接口对器件加偏置。 γ 射线经过杜瓦瓶入射到器件,路径经过杜瓦窗口和冷屏,杜瓦窗口为 0.05 mm 厚的聚酰亚胺薄膜,冷屏为 0.5 mm 厚的铝。1.25 MeV 的 γ 光子在聚酰亚胺薄膜的衰减可以忽略;在铝中的衰减系数为 0.055,剂量率的衰减倍数为: $\exp(-0.055 \cdot 0.05 \cdot 2.69)=0.993$,衰

减也可忽略。辐照过程中器件的辐照条件为:(1) #1 室温辐照,在器件两端加-0.5 V 偏置;(2) #2 室温辐照,器件两端短接;(3) #3 77 K 温度辐照,在器件两端加-0.5 V 偏置;(4) #4 77 K 温度辐照,器件两端短接,如表 1 所示。为研究器件暗电流退化与剂量的关系,选取 0.5、1、1.5、2、3、4、5、6、7 Mrad(Si)剂量点进行测试,利用 Keysight B2962A 精密电源测试样品的 I-V 特性。在总剂量达到 7 Mrad(Si)后,对器件进行 8 h 的 77 K 的低温退火和一周的室温退火。

表 1 不同的辐照条件

Tab.1 Different irradiation conditions

Devices	Temperature/K	Biased conditions/V
1#	300	-0.5
2#	300	0
3#	77	-0.5
4#	77	0

2 试验结果与分析

2.1 室温 γ 辐照对器件 I-V 特性的影响

电流-电压(I-V)特性测试时 HgCdTe 探测器的重要表征手段之一,能够反映器件的基本特性,通过 I-V 曲线可以获取器件不同偏置条件下的暗电流特性、零偏动态电阻等参数。

中波 HgCdTe 光伏器件在室温辐照后的暗场 I-V 特性如图 3~4 所示,剂量点为 0.5、1、1.5、2、3、4、5、6、7 Mrad(Si),其中图 3 为-0.5 V 偏置条件下辐照的器件 I-V 特性,图 4 为零偏辐照条件下的器件 I-V

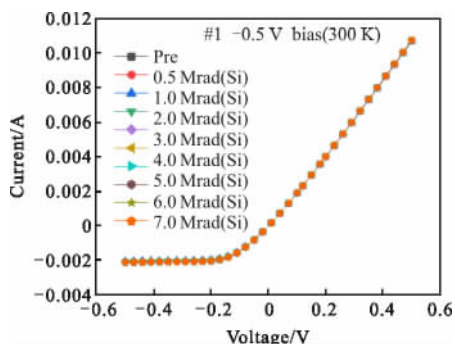


图 3 γ 辐照对器件 #1 I-V 特性的影响

Fig.3 Effect of γ -irradiation on the I-V characteristics of device #1

特性。从图 3 和图 4 中可以看到, 经过总剂量 7 Mrad(Si)的 γ 辐照后, 在两种不同的偏置条件下, 器件的 I-V 特性没有发生明显的变化。

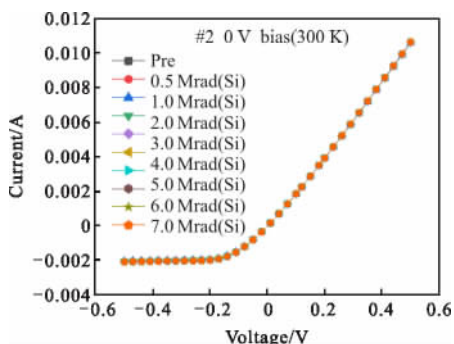


图 4 γ 辐照对器件 #2 I-V 特性的影响

Fig.4 Effect of γ -irradiation on the I-V characteristics of device #2

2.2 低温 γ 辐照对器件 I-V 特性的影响

中波 HgCdTe 光伏器件在 77 K 温度下辐照后的暗场 I-V 特性如图 5~8 所示, 剂量点为 0.5、1、1.5、2、3、4、5、6、7 Mrad(Si), 其中图 5 和图 6 分别为 -0.5 V 偏置条件下辐照的器件反向和正向 I-V 特性曲线。图 7 和图 8 分别为零偏辐照条件下器件的反向和正向 I-V 特性曲线。

从图 5 可以观察到, -0.5 V 辐照偏置下, 77 K 温度 γ 辐照后, 器件的反向电流随着总剂量的增加而增加, 在总剂量达到 7 Mrad(Si), 电压为 -0.5 V 时, 电流增加了 10%。图 6 观察到器件的正向电流随着总剂量的增加而减小, 在总剂量达到 7 Mrad(Si), 电压为 0.5 V 时, 电流减小了 2.5%。

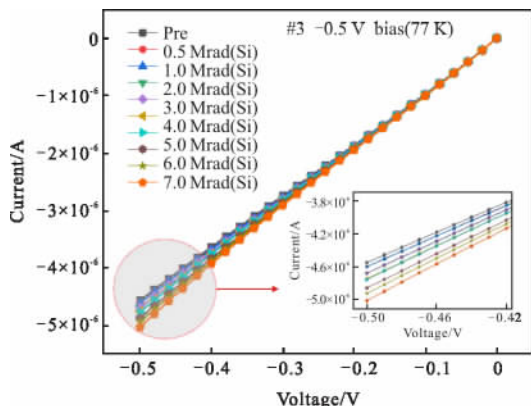


图 5 γ 辐照对器件 #3 反向 I-V 特性的影响

Fig.5 Effect of γ -irradiation on the negative I-V characteristics of device #3

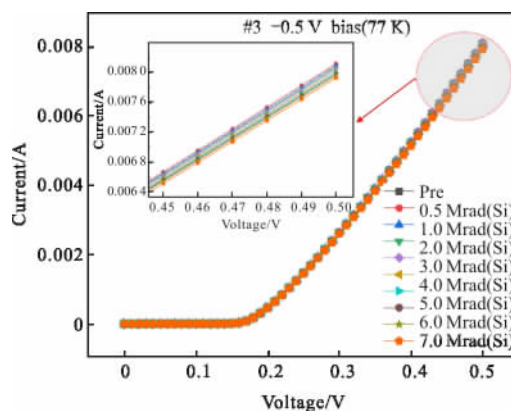


图 6 γ 辐照对器件 #3 正向 I-V 特性的影响

Fig.6 Effect of γ -irradiation on the forward I-V characteristics of device #3

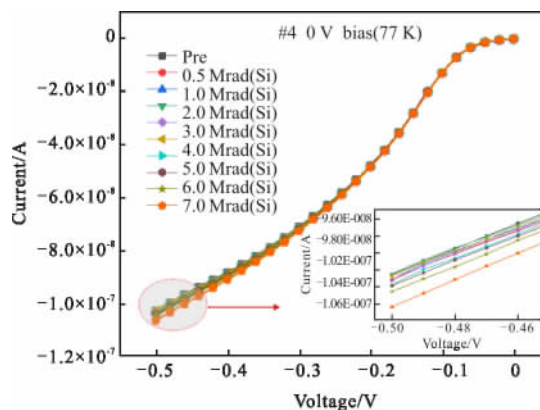


图 7 γ 辐照对器件 #4 反向 I-V 特性的影响

Fig.7 Effect of γ -irradiation on the negative I-V characteristics of device #4

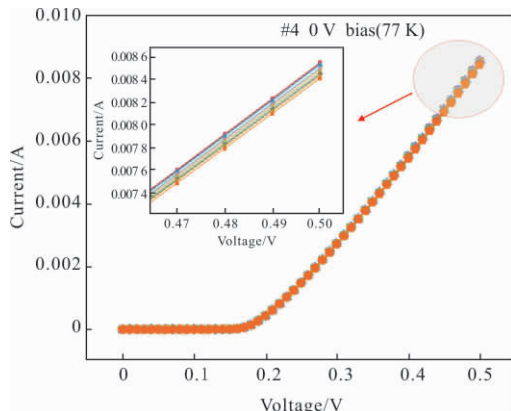


图 8 γ 辐照对器件 #4 正向 I-V 特性的影响

Fig.8 Effect of γ -irradiation on the forward I-V characteristics of device #4

从图 7 可以观察到, 零偏辐照条件下, 77 K 温度 γ 辐照后, 器件的反向电流随着总剂量的增加而增

加,在总剂量达到 7 Mrad(Si),电压为-0.5 V 时,电流增加了 2%。图 8 观察到器件的正向电流随着总剂量的增加而减小,在总剂量达到 7 Mrad(Si),电压为 0.5 V 时,电流减小了 1.5%。

HgCdTe 光伏器件的暗电流为器件在不受任何红外辐射条件下的反向偏置电流。器件暗电流的种类主要分为:扩散电流 I_{diff} 、产生复合电流 I_{g-r} 、带间隧穿电流 I_{bvt} ,陷阱辅助隧穿电流 I_{tat} ,其表达式为^[11]:

$$I_d = I_{diff} + I_{g-r} + I_{bvt} + I_{tat} \quad (1)$$

具有良好暗电流特性的 HgCdTe 光伏器件通常是扩散限制的器件,低温条件下,其暗电流主要由扩散电流和产生复合电流组成,其表达式为:

$$I(n^+ - on - p) = \frac{qAn_i^2}{N_a} \left(\frac{kT\mu_e}{q\tau_e} \right)^{1/2} \cdot \left[\left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) + \frac{qn_i W_{dep}}{2\tau} \left(e^{\frac{qV_d}{2kT}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

式中: N_a 为 p 区的受主浓度; n_i 为本征载流子浓度; μ_e 为 p 区电子迁移率; τ_e 为 p 区电子载流子寿命; A 为结面积; q 为电子电荷量; k 为玻耳兹曼常数; T 为绝对温度; W_{dep} 为耗尽层宽度。

在 γ 射线辐照下,试验器件的 CdTe 钝化层中会产生大量电子-空穴对。由于电子迁移率较高,在短时间内会被扫出钝化层,而空穴则会缓慢输运至钝化层界面处。输运过程中一部分空穴被钝化层中空穴陷阱俘获,形成带正电的空穴陷阱电荷,而另一部分输运至界面处形成界面态,并且界面态可以俘获电子,形成带负电的界面陷阱电荷^[12]。

由于界面态的生长是一个缓慢的过程,在大剂量率的情况下,带正电的陷阱电荷的生长速度远大于界面态,在钝化层界面处主要积累的是正电荷^[13]。钝化层处的正电荷积累,将改变器件的表面势,使器件的耗尽层展宽,如图 9 所示。根据公式(2),随着 γ 辐照导致器件耗尽层宽度 W_{dep} 的增加,器件的产生复合电流增加,进而导致器件暗电流的增加。

另一方面, γ 辐照在钝化层中引入的界面态,在禁带中引入高密度的能级。界面态的能级在禁带中为连续分布,呈 U 型分布,在导带和价带附近密度最高^[14]。根据 shockley-Read-Hall 理论,表面复合率公式为^[15]:

$$S = \frac{N_{it}\sigma v_{th}(np - n_i^2)}{n + p + 2n_i} \quad (3)$$

式中: S 为复合速率; σ 为陷阱俘获截面; v_{th} 为载流子热速度; N_{it} 为界面态密度; n_i 为本征载流子浓度; n, p 分别为电子和空穴的浓度。

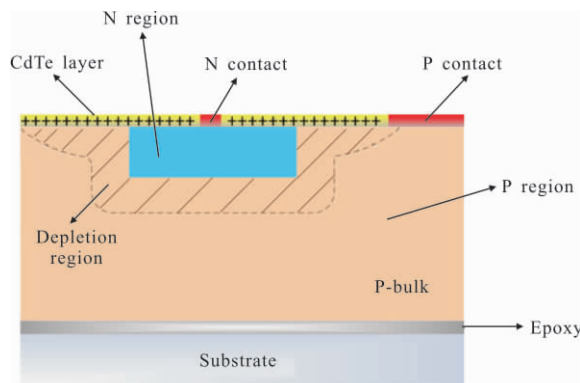


图 9 γ 辐照导致器件耗尽层展宽的示意图

Fig.9 Schematic diagram of gamma irradiation leading to device depletion layer broadening

若考虑表面引入的产生复合效应时,公式(2)可以改写成^[11]:

$$I(n^+ - on - p) = \frac{qAn_i^2}{N_a} \left(\frac{kT\mu_e}{q\tau_e} \right)^{1/2} \cdot C \left[\left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) + \frac{qn_i W_{dep}}{2\tau} \left(e^{\frac{qV_d}{2kT}} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中: $C = \frac{S\tau_n \cosh \frac{d}{L_n} + L_n \sinh \frac{d}{L_n}}{S\tau_n \sinh \frac{d}{L_n} + L_n \cosh \frac{d}{L_n}}$, 其中, S 为表面复合速率; d 为 p 区厚度; L_n 为少数载流子扩散长度。

根据公式(3)和(4), γ 辐照导致钝化层界面处界面态密度 N_{it} 增加,使表面复合速率 S 增加,将导致器件产生-复合电流的增加,进而使暗电流增加。由于产生复合电流为负向电流,因此还观察到正向电流有小幅度的减小。

通过对比图 3 和图 5 中所示的室温和低温条件下试验结果,观察到图 3 中暗电流在室温辐照条件下未发生明显退化,而图 5 中暗电流在低温条件下退化较为明显,在 7 Mrad(Si) 剂量辐照后,暗电流增加 0.5E-6A。分析认为由于室温下的器件本身暗电流较大,达到 1E-3 的量级,辐照产生的影响较之可忽略。而低温下暗电流的大小只有 1E-6 的量级,因此辐照对暗电流的退化作用较为显著。

比较 -0.5 V 和 0 V 两种偏置条件下的试验结

果,可以观察到,在两种偏置条件下, γ 辐照都能导致器件暗电流退化,并且加偏比不加偏退化更明显。

辐照过程中钝化层的电场来源于 PN 结内建电场的边缘电场,如图 10 所示。由于不同偏置条件下 PN 结空间电荷区的宽度不同,偏置电压为负时,耗尽层变宽;偏置电压为正时,耗尽层变窄。因此空间电荷区的边缘电场在负压时增强,在正压时减弱,如图 11 所示。因此在辐照过程中,-0.5 V 偏置与 0 V 偏置相比,器件钝化层中具有更高的电场, γ 射线在钝化层中造成的总剂量效应也更严重,导致-0.5 V 偏置条件下,器件暗电流的退化更严重。

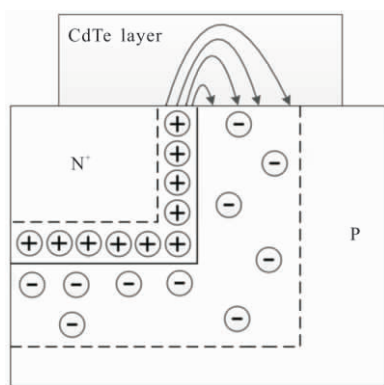


图 10 PN 结内建电场的边缘电场示意图

Fig.10 Schematic diagram of fringing electric field from the built-in potential of PN junction

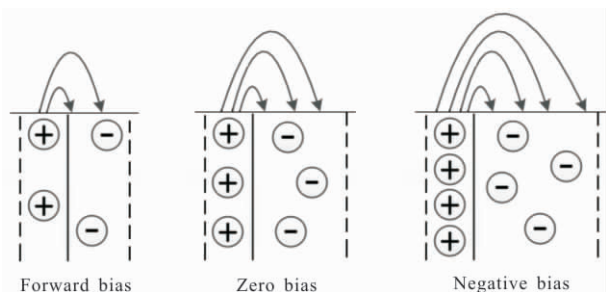


图 11 正压、零偏、负压偏置条件下的边缘电场示意图

Fig.11 Schematic diagram of fringing electric field under forward, zero and reverse biases

2.3 低温 γ 辐照对器件 R-V 特性的影响

对 I-V 曲线求导可以获得器件动态阻抗分布曲线,伽马辐照后器件 #3 的 R-V 曲线如图 12 所示。从 R-V 曲线上可以得到三个器件参数:串联电阻 R_{sd} ,反向峰值阻抗 R_m ,零偏电阻 R_0 。 R_{sd} 主要来自吸收层的材料阻抗, R_m 和 R_{sd} 与器件漏电流有直接关系。

R_{sd} ,反向峰值阻抗 R_m ,零偏电阻 R_0 随总剂量的变化如表 2 所示。

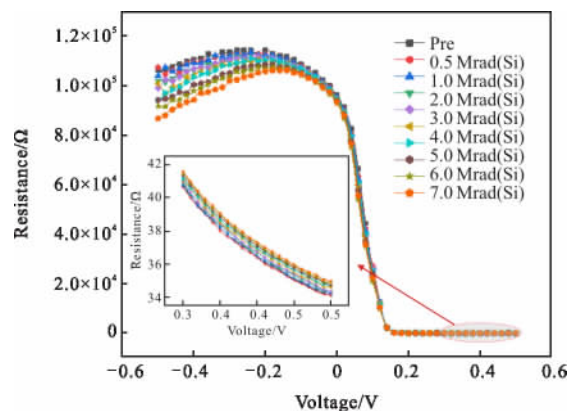


图 12 γ 辐照对器件 #3 R-V 特性的影响

Fig.12 Effect of γ -irradiation on the R-V characteristics of device #3

表 2 R_{sd}, R_m 和 R_0 随总剂量的变化

Tab.2 Variation of R_{sd}, R_m and R_0 with TID

TID/Mrad(Si)	R_{sd}/Ω	R_m/Ω	R_0/Ω
0	34.13	1.15×10^5	9.62×10^4
0.5	34.13	1.13×10^5	9.52×10^4
1	34.25	1.12×10^5	9.52×10^4
1.5	34.36	1.11×10^5	9.48×10^4
2	34.36	1.11×10^5	9.48×10^4
3	34.60	1.09×10^5	9.43×10^4
4	34.72	1.10×10^5	9.48×10^4
5	34.72	1.07×10^5	9.39×10^4
6	34.84	1.05×10^5	9.30×10^4
7	34.97	1.03×10^5	9.35×10^4

从图 12 可以看出来,随着总剂量的增加,正向电压动态电阻略微增加,反向电压动态电阻减小。从表 2 可以看出,随着总剂量的增加,串联电阻 R_{sd} 略微的增加,反向峰值阻抗 R_m 和零偏电阻 R_0 逐渐减小。随着剂量的增大,观察到 R_m 减小的同时,反向动态电阻的饱和区仍然存在,说明器件 R_m 的减小主要源于表面漏电流。

2.4 退火试验对辐照后器件暗电流特性的影响

辐照后对器件 #3 进行 7 h 77 K 的低温退火,以及一周的室温退火。比较器件 I-V 特性中电压为

-0.5 V 时的暗电流值随辐照剂量和退火时间的变化,如图 13 所示。

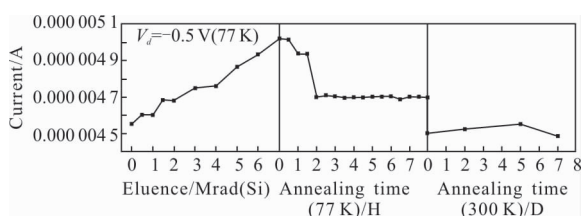


图 13 器件 #3 暗电流随总剂量及退火时间的变化

Fig.13 Dark current of the device #3 varies with total dose and annealing time

图 13 中可以观察到,暗电流随着总剂量的增加而线性增加,在总剂量达到 7 Mrad(Si)时,暗电流增加约 10%。辐照结束后进行 77 K 低温退火试验,在最初两小时的低温退火后,器件暗电流退化恢复 50%。随后数小时的低温退火,暗电流基本不恢复。低温退火后进行室温退火,室温退火 30 min 后,暗电流完全恢复至辐照前值,之后一周的室温退火未观察到暗电流发生明显变化。

辐照过程中,空穴陷阱电荷的产生速度很快,并且在辐照停止之后很快就不再增长,且空穴陷阱电荷在低温条件下也可以退火。分析认为在最初两小时的低温退火过程中,暗电流的恢复与空穴陷阱电荷的退火有关。界面态的产生和退火与温度有较强的依赖关系,根据文献报道,室温 γ 辐照在硅基器件中产生的界面态,在室温下较为稳定,当温度达到 175 $^{\circ}\text{C}$ 时将全面退火^[16]。随着低温退火试验继续进行,观察到暗电流不在恢复,分析认为此时空穴陷阱电荷几乎完全退火,而 77 K 温度下辐照产生的界面态,在 77 K 温度下几乎不发生退火。室温退火 30 min 后,器件暗电流恢复至辐照前值,分析认为 77 K 温度下辐照产生的界面态,在升温的过程中迅速退火。

3 结论

在室温和 77 K 温度下,通过 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线对中波 HgCdTe 光伏器件进行辐照试验,发现在总剂量 7 Mrad(Si)辐照后,室温辐照条件下,器件暗电流未出现明显的退化。77 K 温度辐照条件下,器件暗电流随着总剂量的增加而增加,且暗电流退化幅度与辐照过程中的偏置有关。通过 77 K 温度和室温退火试

验,发现器件暗电流有明显恢复。低温退火试验后,暗电流恢复 50%。室温退火 30 min 后,暗电流完全恢复至辐照前值。

分析认为产生这一现象的原因为: γ 射线在器件中产生了电离损伤,导致器件 CdTe 钝化层中的界面态和空穴陷阱电荷密度增加。界面态密度的增加,增大了表面复合速率,导致界面处产生-复合电流增加。空穴陷阱电荷密度的增加,改变了界面处表面势,使靠近界面处的耗尽层展宽,导致产生-复合电流增大。辐照试验中的偏置效应,与 pn 结空间电荷区的边缘电场有关。在负压偏置条件下,空间电荷区的宽度增加,边缘电场增强,加重了 CdTe 钝化层的损伤。

参考文献:

- [1] Rogalski A. Next decade in infrared detectors [C]//SPIE, 2017, 10433: 1-25.
- [2] Pickel J C, Kalma A H, Hopkinson G R, et al. Radiation effects on photonic imagers—a historical perspective[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, 50(3): 671-688.
- [3] Sizov F F, Lysiuk I O, Gumenjuk-Sichevska J V, et al. Gamma radiation exposure of MCT diode arrays [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, 21(3): 358-363.
- [4] Lee M Y, Kim Y H, Lee N H, et al. A comparison of gamma radiation effects on bromine-and hydrazine-treated HgCdTe photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35(6): 1429-1433.
- [5] Lee N H, Cho J W, Kim S H, et al. A study on a radiation hardening of an infrared detector [J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2008, 45(5): 564-567.
- [6] Hu X W, Fang J X, Wang Q, et al. A deep level induced by gamma irradiation in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(1): 91-92.
- [7] Hu X W, Zhu K X, Li X, et al. Influence of gamma irradiation on the performance of HgCdTe photovoltaic devices[C]//SPIE, 1999, 3698: 920-924.
- [8] Qiao Hui, Liao Yi, Hu Weida, et al. Research on real-time γ radiation effects of HgCdTe planar photovoltaic devices[J]. *Acta Phys Sin*, 2008, 57(11): 7088-7093. (in Chinese)
- [9] Qiao Hui, Deng Yi, Hu Weida, et al. Study on γ irradiation effects of long-wavelength HgCdTe photovoltaic detectors with different passivate layers [J]. *J Infrared Millim Wave*, 2010, 29(1): 6-10. (in Chinese)

- [10] Qiao H, Hu W D, Li T, et al. Electrical characteristics of mid-wavelength HgCdTe photovoltaic detectors exposed to gamma irradiation[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, 45(9): 4640–4645.
- [11] Yang Jianrong. Physics and Technology of HgCdTe Materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [12] Moriwaki M M, Srour J R, Lou L F, et al. Ionizing radiation effects on HgCdTe MIS devices [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1990, 37(6): 2034–2041.
- [13] Fleetwood D M. Evolution of total ionizing dose effects in MOS devices with moore' s law scaling [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, 99(12): 1–17.
- [14] Mueller H H, Schulz M. Individual interface traps at the Si–SiO₂ interface[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1995, 6(2): 65–74.
- [15] Hopkinson G R. Radiation-induced dark current increases in CCDs[C]//IEEE, 1993: 401–408.
- [16] Boch J, Saigne F, Schrimpf R D, et al. Elevated temperature irradiation at high dose rate of commercial linear bipolar ICs [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(5): 2903–2907.