

文章编号: 1001 - 9014(2010)01 - 0006 - 04

不同钝化层结构的长波碲镉汞光伏探测器的辐照效应

乔辉¹, 邓屹^{1,2}, 胡伟达³, 胡晓宁¹, 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 中科院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要:对采用单层 ZnS 和双层 CdTe/ZnS 两种钝化层结构的长波碲镉汞光伏器件进行了实时辐照效应研究. 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, 两种器件表现出不同的辐照效应. 结合光伏器件的电流机制分析, 对器件的电阻-电压曲线进行数值拟合, 发现器件的主要电流机制在偏压较大时为间接隧道电流, 在偏压较小及零偏压附近时为产生-复合电流. 对辐照前后器件的电阻-电压曲线进行对比分析, 认为 CdTe/ZnS 双层钝化结构有助于降低辐照位移效应的影响, 使得器件间接隧道电流随辐照剂量无明显的增加; 同时发现辐照电离效应的影响与器件材料的初始性能参数密切相关, 拟合得到 ZnS 单层钝化结构的器件具有较高的少子产生-复合寿命, 受电离效应的影响较大, 导致其产生-复合电流随着辐照剂量增加持续增大.

关键词:辐照效应; 电流机制; 钝化; 光伏探测器; 碲镉汞

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A

STUDY ON IRRADIATION EFFECTS OF LONG-WAVELENGTH HgCdTe PHOTOVOLTAIC DETECTORS WITH DIFFERENT PASSIVATE LAYERS

QIAO Hui¹, DENG Yi^{1,2}, HU Wei-Da¹, HU Xiao-Ning¹,
ZHANG Qin-Yao¹, LI Xiang-Yang¹, GONG Hai-Mei^{1*}

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The irradiation effects of long-wavelength HgCdTe photovoltaic detectors with different passivate structures (one structure was a single layer of ZnS and the other was double layers of CdTe/ZnS) were studied. A real-time measurement of current-voltage ($I-V$) characteristic was performed during the irradiation process. It is found that the detectors exhibit different irradiation effects as the irradiation dosages increase. Numerical fitting of the resistance-voltage ($R-V$) curves of detectors was made according to the current mechanism of photovoltaic detectors. It is found that the current is mainly trap-assisted-tunneling current (TAT) at larger reverse bias voltages. And it is generation-recombination current (G-R) at smaller and zero reverse bias voltages. After the analysis of $R-V$ curves of detectors before and after irradiation, it is discovered that the double layers of CdTe/ZnS help to reduce the irradiation displacement effect and bring no obvious increase of indirect trap-assisted-tunneling current as the increase of irradiation dosage. It is also found that irradiation ionization effects are closely related to the initial material parameters of the detectors. Besides, it is also found that the detector with a single layer of ZnS has a higher generation-recombination lifetime of minority carriers by fitting method, and its generation-recombination current increases persistently as the increase of irradiation dosage.

Key words: irradiation effect; current mechanism; passivation; photovoltaic detector; HgCdTe

收稿日期: 2009 - 07 - 17, 修回日期: 2009 - 10 - 20

Received date: 2009 - 07 - 17, revised date: 2009 - 10 - 20

基金项目: 上海市自然科学基金资助 (09ZR1436200)

作者简介: 乔辉 (1979-), 男, 山东莱阳人, 助理研究员, 硕士, 主要从事碲镉汞红外器件的工艺与辐射效应研究.

* 通讯作者: hmcong@mail.sip.ac.cn

引言

碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)长波红外光伏探测器是目前应用最重要的红外探测器件之一. 作为评价器件应用可靠性的关键要素,碲镉汞光伏器件的 射线辐照效应是器件可靠性研究的一个重要方面^[1~3]. 目前对于碲镉汞光伏器件 射线辐照效应的主要研究手段是静态方法,即分别在辐照前后对器件的性能进行测试来评价其辐照效应. 由于器件的辐照效应在辐照停止后会产生一定程度的弛豫恢复,因此静态方法无法反映工作在 射线辐照环境中的器件的辐照效应,甚至会对器件工作状态下的抗辐照能力产生误判而影响其工作的可靠性,因此有必要对辐照环境下器件的实时辐照效应进行评价,以进一步提高器件应用的可靠性. 由于辐照环境的特殊性,限制了对辐照状态中的器件进行性能测试的范围. 不同偏压下光伏器件的电流机制是分析光伏器件性能的重要理论基础,光伏器件的电流—电压 ($I-V$)特性是对器件的性能进行评价的主要手段之一,可以直接反映器件的信号和噪声水平,已有许多作者对此进行了分析^[4~7]. 因此本实验利用⁶⁰Co源对碲镉汞长波光伏器件进行了动态实时辐照,在辐照过程中对器件的电流—电压 ($I-V$)特性进行了实时测试,研究了 辐照条件下器件电流—电压特性随着辐照剂量增加而产生的变化,对采用不同钝化层结构的长波碲镉汞光伏器件的实时 射线辐照效应进行了评价.

光伏器件的电流机制主要包括: n区和 p区的扩散电流 I_{dif}^{8j} ,势垒区的产生复合 ($g-r$)电流 I_{g-r}^{4j} ,直接隧道电流 I_{btb}^{9j} ,以及通过缺陷中心的间接隧道电流 I_{lat}^{10j} . 对不同的电流机制通过微分方法可以得到相应的电阻 R_{dif} , R_{g-r} , R_{btb} , R_{lat} , 然后可以得到器件总的电阻 R_{total} 为:

$$1/R_{total} = 1/R_{dif} + 1/R_{g-r} + 1/R_{btb} + 1/R_{lat} \quad (1)$$

1 实验

实验中的辐照样品种为长波碲镉汞光伏器件,表1给出样品的 x 组分、材料参数以及器件钝化层结构. 二种器件工艺的主要差别在于钝化层结构不同,器件1的钝化层为200nm的 ZnS,器件2的钝化层为100/200nm的 CdTe/ZnS. 由于长波器件需要工作于液氮温度(77K),实验中将器件封装于灌满液氮的低温真空杜瓦内的冷头上,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

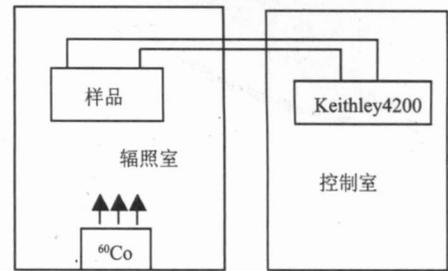


图1 γ 辐照过程示意图
Fig.1 Setup of γ irradiation process

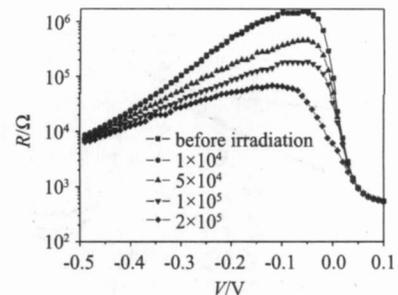


图2 器件1的 $R-V$ 曲线随辐照剂量的变化
Fig.2 $R-V$ curves of No.1 detector with different dosages

表1 辐照实验的样品参数 (77K)

器件	x 组分	迁移率 ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	掺杂浓度 (cm^{-3})	钝化层结构
1	0.224	828	8.92×10^{15}	ZnS
2	0.228	787	9.35×10^{15}	CdTe/ZnS

中器件温度维持在77K,然后将封装有光伏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相连接,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 辐照,器件放置位置的辐照剂量率为28 rad/s. 随着辐照时间的延长,器件的辐照剂量也逐渐增大. 实验中对两个器件分别选择了四个剂量相近的测试点,对 $I-V$ 特性进行了实时测试.

2 实验结果与讨论

将实验中获得的 $I-V$ 曲线对电压 V 微分后取倒数,可以得到器件的 $R-V$ 曲线. 图2和图3给出器件1和2的 $R-V$ 曲线在辐照前以及不同剂量辐照后的变化.

从图2和图3看出,随着辐照剂量的增加,两种钝化结构器件的 $R-V$ 曲线随着辐照剂量增加表现出不同的变化趋势. 器件1的反向偏压电阻随着剂量增加而明显降低,而器件2的电阻在大部分反向

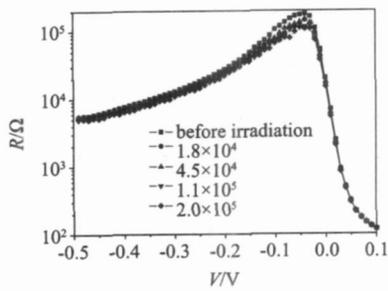


图3 器件2的 R - V 曲线随辐照剂量的变化
Fig. 3 R - V curves of No. 2 detector with different dosages

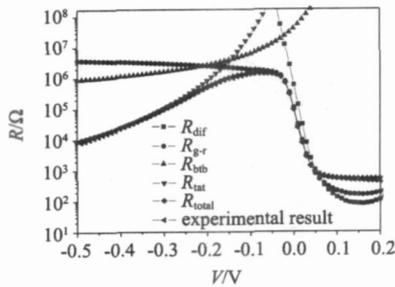


图4 器件1辐照前 R - V 曲线的拟合结果
Fig. 4 Fitting results of R - V curves of No. 1 detector before irradiation

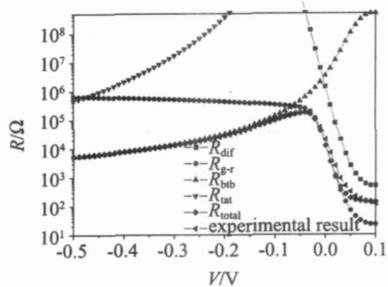


图5 器件2辐照前 R - V 曲线的拟合结果
Fig. 5 Fitting results of R - V curves of No. 2 detector before irradiation

偏压下无明显变化,仅在零偏附近表现出比较明显的变化.为了更清楚对器件的电流—电压特性随辐照剂量的变化机理进行分析,根据公式(1),采用文献[11]提出的方法对器件的 R - V 曲线进行了数值拟合.图4和图5给出器件1和2辐照前 R - V 曲线的拟合结果:

从图中可以看出,反向偏压条件下器件的电流机制主要为间接隧道电流(TAT)和产生—复合电流(G-R)限制,当偏压较大时,以间接隧道电流限制为主(R_{tat}),在小偏压及零偏压附近则以产生—复合电流限制为主(R_{g-r}),这与文献[12]中得到的结论相一致.图6~9给出了按照文献[11]中的方法拟合得到的两个器件的 R_{tat} 和 R_{g-r} 随着辐照剂量增

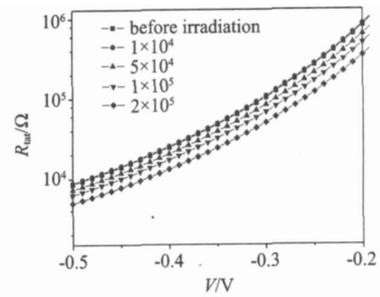


图6 拟合得到的不同剂量下器件1的 R_{tat}
Fig. 6 Fitting results of R_{tat} for No. 1 detector after different dosages

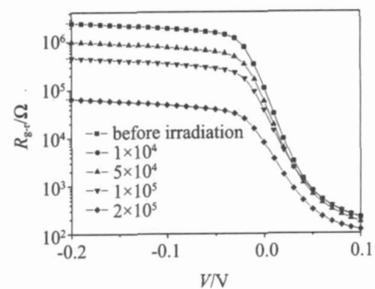


图7 拟合得到的不同剂量下器件1的 R_{g-r}
Fig. 7 Fitting results of R_{g-r} for No. 1 detector after different dosages

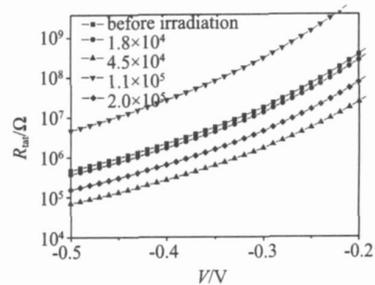


图8 拟合得到的不同剂量下器件2的 R_{tat}
Fig. 8 Fitting results of R_{tat} for No. 2 detector after different dosages

加的变化,其中 R_{tat} 的偏压范围为 $-0.5 \sim -0.2$ V, R_{g-r} 的偏压范围为 $-0.2 \sim 0.1$ V.

从图中可以看出,对于采用 ZnS 单层结构钝化的器件1,其 R_{tat} 和 R_{g-r} 随着辐照剂量增加持续降低,反映出器件的间接隧道电流和产生—复合电流随着辐照剂量增加而持续增大.而对于采用 CdTe/ZnS 双层钝化结构的器件2,虽然辐照后器件的 R_{g-r} 有所降低,但随着辐照剂量增加并无固定的变化趋势,同样其 R_{tat} 随着辐照剂量增加也无固定变化趋势,反

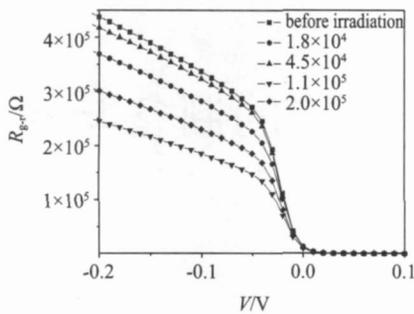
图 9 拟合得到的不同剂量下器件 2 的 R_{g-r}

Fig 9 Fitting results of R_{g-r} for Na 2 detector after different dosages

映出辐照对器件 1 和器件 2 的电流机制的影响机理有所不同。

辐照对碲镉汞器件的影响主要有位移效应和电离效应两种形式,其中位移效应的影响是产生辐照位移损伤,形成点缺陷或缺陷团而成为间接隧道电流中心,增加器件的间接隧道电流,其影响程度主要与入射粒子的能量以及被辐照样品的原子序数有关^[13]。电离效应的主要影响是产生多余电子-空穴对,其影响程度主要与材料的禁带宽度有关^[14]。对于位移效应的影响,两种器件结构的差别在于器件 2 的 ZnS 与 HgCdTe 之间增加了 100 nm 的 CdTe,考虑到 CdTe 具有比 ZnS 大的多的原子序数,具有更好的抗辐照能力,因此器件 2 中的 CdTe 钝化层对于降低辐照的位移效应具有重要的作用,使得图 3 中器件 2 较大反向偏压下的电阻随辐照剂量增加无明显变化,相比之下,图 2 中器件 1 较大反向偏压下的电阻随辐照剂量增加持续降低。但辐照仍会对器件的间接隧道电流产生了一定的扰动,这就可以解释图 8 中器件 2 的间接隧道电流随着辐照剂量增加无固定的变化趋势。此外由于 ZnS 与 HgCdTe 有较大的晶格失配,而 CdTe 与 HgCdTe 有良好的晶格匹配,这也会使得在辐照条件下器件 2 比器件 1 具有更小的辐照位移效应。

比较图 7 和图 9 可以发现,器件 2 的 R_{g-r} 随着反向偏压降低比器件 1 的变化要更快,利用文献 [11] 中的方法可以提取拟和过程中的拟和参数 τ_{gr} ,即器件少子产生-复合寿命,如表 2 和表 3 所示,可以看出辐照前器件 2 的少子寿命就比器件 1 要小近一个量级。从表 1 中看到,器件 2 的材料的载流子迁移率要低于器件 1,载流子浓度则高于器件 1,认为这就是器件 2 的少子寿命 τ_{gr} 比器件 1 小的原因。根据表 1,两种器件的禁带宽度基本相同,因此辐照对两

表 2 器件 1 辐照前后的拟和参数 τ_{gr} Table 2 Fitting parameter τ_{gr} of Na 1 detector before and after irradiation

剂量 (rad)	0	1×10^4	5×10^4	1×10^5	2×10^5
$\tau_{gr} (10^{-2} \text{ ns})$	1.24	1.22	1.11	1.27	0.377

表 3 器件 2 辐照前后的拟和参数 τ_{gr} Table 3 Fitting parameter τ_{gr} of Na 2 detector before and after irradiation

剂量 (rad)	0	1.8×10^4	4.5×10^4	1.1×10^5	2×10^5
$\tau_{gr} (10^{-3} \text{ ns})$	2.36	3.62	1.65	5.19	2.27

种器件的电离效应基本相同,即辐照会在器件中产生程度差不多的多余电子-空穴对,但却对两种器件的少子寿命 τ_{gr} 产生了程度不同的影响,如表 2 和表 3 所示。器件 1 辐照前的载流子浓度较低,因此受到的影响也比较大,辐照产生的多余电子-空穴对明显降低了少子寿命,使得图 2 中零偏压附近的电阻急剧下降;而对于器件 2,由于本来载流子浓度就较高,受到辐照产生的多余电子-空穴对的影响程度小,导致 τ_{gr} 与 R_{g-r} 虽有所降低,但随着辐照剂量增加并无固定的变化趋势,总体影响则表现为图 3 中零偏压附近的电阻仅有轻微的下降。

3 结论

对采用单层 ZnS 和双层 CdTe/ZnS 两种钝化层结构的长波碲镉汞光伏器件进行了实时辐照效应研究,发现随着辐照剂量增加两种器件表现出不同的辐照效应。通过对实验结果进行分析比较,认为 CdTe 层有助于降低辐照产生的位移效应,在器件 $R-V$ 曲线上的表现是较大反向偏压的电阻随辐照剂量无明显变化;同时发现辐照电离效应对器件性能的影响与器件材料的初始参数密切相关,若辐照前器件具有较好的材料参数,少子寿命 τ_{gr} 较大,电离效应对器件会有比较明显的影响,器件的少子产生-复合寿命会随着辐照剂量增加而降低,反映出辐照导致器件的产生-复合电流持续增大,从 $R-V$ 曲线上表现为零偏压附近的电阻随辐照剂量急剧降低;反之,若辐照前器件的少子寿命较小,辐照电离效应对器件的少子寿命产生扰动,使得 τ_{gr} 与 R_{g-r} 随着辐照剂量增加并无固定的变化趋势,从 $R-V$ 曲线上则表现为零偏压附近的电阻仅有轻微的下降。

REFERENCES

- [1] Pickel J C, Kalma A H, Hopkinson G R, Marshall C J.
(下转 68 页)

计算阈值,与基于粒子群优化算法相比,减少了计算量.实验证明了本算法的有效性.

REFERENCES

- [1] ZHANG Tian-Xu, ZHAO Guang-Zhou, WANG Fei, *et al* Fast recursive algorithm for infrared ship image segmentation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序,赵广州,王飞,等.一种快速递归红外舰船图像分割新算法.红外与毫米波学报), 2006, 25(4): 295—300
- [2] DU Feng, SHI Wen-KANG, DENG Yong, *et al* Fast infrared image segmentation method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杜峰,施文康,邓勇,等.一种快速红外图像分割方法.红外与毫米波学报), 2005, 24(3): 370—373
- [3] SUN Wei, XIA Liang-Zheng Infrared target segmentation algorithm based on morphological method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙伟,夏良正.一种基于形态学的红外目标提取方法.红外与毫米波学报), 2004, 23(3): 233—236
- [4] TAO Wen-bing, JIN Hai Ship infrared object segmentation based on mean shift filtering and graph spectral clustering [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陶文兵,金海.基于均值漂移滤波及谱分类的海面舰船红外目标分割.红外与毫米波学报), 2007, 26(1): 61—64
- [5] REN Ji-jun, HE Ming-yi Level set method of image segmentation based on improved C-V model of 3-D histogram [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (任继军,何明一.一种基于三维直方图的改进 C-V 模型水平集图像分割方法.红外与毫米波学报), 2008, 27(1): 72—76
- [6] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [J]. *Neural Networks*, 1995, Proceedings, IEEE International Conference on Volume 4, 27 Nov. - 1 Dec 1995 Page(s): 1942—1948
- [7] FANG Zheng, TONG Guo-Feng, XU Xin-He Particle swarm optimized particle filter [J]. *J. Control and Decision* (方正,佟国峰,徐心和.粒子群优化粒子滤波方法.控制与决策), 2007, 22(3): 273—277
- [8] Isard M., Blake A. CONDENSATION—Conditional density propagation for visual tracking [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998, 29(1): 5—28
- [9] Cheng Jian Research on Visual Tracking Algorithms Based on Particle Filtering and Their Applications in Infrared Imaging Guidance [D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2006 (程建.基于粒子滤波的视觉跟踪算法研究及其在红外成像制导中的应用.上海:上海交通大学), 2006: 31—32
- [10] Lei Yang, Jie Yang, Ningsong Peng, *et al* Weighted Information Entropy: A Method for Estimating the Complex Degree of Infrared Images' Backgrounds [C]. *International Conference of Image Analysis and Recognition 2005 (ICIAR 2005)*. Lecture Notes in Computer Science 3656, 215—222
- (上接 9 页)
- Radiation effects on photonic imagers—A historical perspective [J]. *IEEE Trans Nucl Sci* 2003, 50: 671—688
- [2] HU Xin-Wen, ZHAO Jun, LU Hui-Qing, *et al* Gamma irradiation on room temperature short-wavelength HgCdTe photovoltaic device studied by admittance spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica* (胡新文,赵军,陆慧庆,等.辐照室温短波 HgCdTe 光伏器件的导纳谱研究.物理学报), 1999, 48(6): 1107—1112
- [3] LIAO Yi, WANG Jian-Xin, ZHANG Qin-Yao Gamma radiation effects on MW IR HgCdTe FPA device [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (廖毅,王建新,张勤耀.中波红外焦平面阵列探测器辐照效应.量子电子学报), 2007, 24(1): 110—113
- [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—152
- [5] Nguyen T H, Musca C A, Dell J M, *et al* The effects of vacuum baking on the I—V characteristics of LW IR HgCdTe photodiodes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5274: 433—441
- [6] SUN Tao, CHEN Xin-Guo, HU Xiao-Ning, *et al* Low-frequency noise of Hg_{1-x}Cd_xTe long-wavelength photovoltaic detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙涛,陈兴国,胡晓宁,等. Hg_{1-x}Cd_xTe 长波光伏探测器的低频噪声研究.红外与毫米波学报), 2005, 24(4): 273—276
- [7] ZHANG Xin-Chang, ZHANG Qin-Yao, XU Zhen, *et al* A study of interface electrical characteristics for CdTe/ZnS passivation films [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张新昌,张勤耀,徐震,等. CdTe/ZnS 复合钝化膜的界面电学特性研究.红外与毫米波学报), 1996, 15(6): 417—422
- [8] Willardson R K, Beer A C. *Semiconductors and Semimetals Vol 18* [M]. New York: Academic Press, 1981, 201.
- [9] Nemirovsky Y, Unikovsky A. Tunneling and 1/f noise currents in HgCdTe photodiodes [J]. *J. Vac Sci Technol B*. 1992, 10(40): 1602—1610
- [10] 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 non-p junctions formed by plasma-induced type conversion [J]. *J. Crystal Growth*, 2000, 214/215: 1106—1110
- [11] QUAN Z J, LI Z F, HU W D, *et al* Parameter determination from resistance-voltage curve for long-wavelength HgCdTe photodiode [J]. *Journal of Applied Physics* 2006, 100: 084503
- [12] QIAO Hui, ZHOU Wen-Hong, YE Zhen-Hua, *et al* study on variable-area hydrogenation of HgCdTe photovoltaic detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (乔辉,周文洪,叶振华,等.碲镉汞光伏型探测器的变面积氢化研究.红外与毫米波学报), 2008, 27(6): 425—428
- [13] CHU Jun-Hao *Narrow bandgap semiconductor physics* [M]. Beijing: Science Press (褚君浩.窄禁带半导体物理学.北京:科学出版社) 2005, 458
- [14] CAO Jian-Zhong *Radiation effects of semiconductor materials* [M]. Beijing: Science Press (曹建中.半导体材料的辐射效应.北京:科学出版社), 1993, 66