

InAs/GaSb II类超晶格长波红外探测器的 实时 γ 辐照效应

靳川^{1,2}, 许佳佳¹, 黄爱波¹, 徐志成¹, 周易¹, 白治中¹, 王芳芳¹,
陈建新^{1*}, 陈洪雷¹, 丁瑞军¹, 何力¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:研究了InAs/GaSb II类超晶格长波探测器的 γ 辐照效应. 在⁶⁰Co源 γ 辐照下器件的电流-电压(I - V)特性并未随辐照剂量的增大而发生显著的变化, 100 krad (Si)辐照剂量下的零偏阻抗相较辐照前的减小率仅为3.4%, 表明该探测器具有很好的抗辐照性能. 结合不同辐照剂量下的实时 I - V 特性曲线和辐照停止后器件电流随时间的演化情况, 对辐照所带来的器件性能的损伤以及微观损伤机理进行了分析. 发现零偏压和小反向偏压下, 辐照开始后电流即有明显增大, 辐照损伤以暂态的电离效应为主导, 器件性能可以在很短时间内恢复. 而大反向偏压下器件暗电流的主导机制为直接隧穿电流, 辐照所引入位移效应的影响使得暗电流随辐照剂量增大而减小, 损伤需通过退火效应缓慢恢复, 弛豫时间明显长于电离效应损伤.

关键词: γ 辐照; 实时辐照效应; 长波红外探测器; InAs/GaSb II类超晶格
中图分类号: TN21 **文献标识码:** A

Real-time γ irradiation effects on long-wavelength InAs/GaSb Type II superlattice infrared detector

JIN Chuan^{1,2}, XU Jia-Jia¹, HUANG Ai-Bo¹, XU Zhi-Cheng¹, ZHOU Yi¹, BAI Zhi-Zhong¹,
WANG Fang-Fang¹, CHEN Jian-Xin^{1*}, CHEN Hong-Lei¹, DING Rui-Jun¹, HE Li¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detector, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the γ -irradiation effect on InAs / GaSb II superlattice long-wave detectors was studied. The detector has a good anti-radiation performance under the irradiation of ⁶⁰Co γ -rays as the current-voltage (I - V) characteristics of the devices did not change significantly with the increase of the irradiation dose. Compared with the value before irradiation, the reduction rate of the zero-bias resistance was only 3.4% under the irradiation dose of 100 krad (Si). By combining the real-time I - V curves at different irradiation doses and the evolution of the current with time after the irradiation, the damage and the corresponding mechanism of the γ -irradiation were analyzed. At zero bias as well as small reverse bias, the current is obviously increased after irradiation. The radiation damage is dominated by the transient ionization effect, and the device performance can be recovered in a short time. While at large reverse bias, the main dark current mechanism is the direct tunneling current, leading to a decreased dark current with the increase of the irradiation dose. The time of the damage recovery is

收稿日期: 2017-01-20, 修回日期: 2017-02-17

Received date: 2017-01-20, revised date: 2017-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(61505237, 61176082, 61290302, 61534006), 国家重点研发计划项目(2016YFB0402403), 上海市自然科学基金项目(15ZR1445600, 16ZR1447900)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61505237, 61176082, 61290302, 61534006), National Key Research and Development Program of China (2016YFB0402403), Shanghai Natural Science Foundation (15ZR1445600, 16ZR1447900)

作者简介 (Biography): 靳川 (1981-), 男, 四川成都人, 博士, 主要从事 II 类超晶格材料与器件研究. E-mail: jinchuan@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jianxinchen@mail.sitp.ac.cn

significantly longer than that of the ionization damage, and an annealing may be required.

Key words: γ irradiation, real-time effects, long-wave infrared detector, InAs/GaSb superlattice

PACS: 95. 55. Aq, 85. 30. - z, 42. 88. + h

引言

InAs/GaSb II 类超晶格材料体系基于较为成熟的 III-V 化合物材料,性能稳定、均匀性好,因此自 1988 年被提出后就受到了研究人员的广泛关注,被认为是一种很有前途的红外探测候选材料体系.而且,理论计算和目前实验报道均表明,超晶格红外探测器在长波波段的关键性能已经可以与碲镉汞红外探测器相比拟,甚至有希望超越后者,显示出优良的红外探测应用前景^[1-2].

航天红外遥感是红外焦平面的一大重要应用领域,然而,空间环境中大量存在的带电粒子、中性粒子分子、空间 X 射线和空间 γ 射线等的空间辐照对于飞行器内部固体电子元器件具有很大的影响,可能会在探测器中引入瞬态甚至永久损伤.因此,研究高能辐射对红外探测器性能的影响,对寻求辐照加固的途径和措施,有效提高器件的工作稳定性、可靠性和使用寿命有着重要的实际意义^[3-4].

近年来,针对太空中的各种辐射,研究人员对 HgCdTe、InP、InGaAs 和 Si 等材料的红外探测器辐照效应及其辐照损伤机理进行了大量的研究,然而对于新型的 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器辐照特性的研究则相对较少^[5-9].此外,目前对于辐照效应的影响研究主要是采用对比辐照前后器件性能的研究方式,而辐照停止后器件性能会发生弛豫性恢复,且这一过程所需时间很短,因此这种非实时辐照的研究方式并不能反映出器件实际的损伤情况.而辐照环境的特殊性导致能对辐照状态中器件性能进行表征的手段十分有限,电流-电压 (I - V) 特性可以直接反映光伏器件的信号和噪声水平,因此是实时辐照实验中最常用的对器件的性能进行评价手段之一.本文制备了 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外探测器单元器件,通过实时测试 γ 辐照下器件的电流-电压 (I - V) 特性的方法,研究了不同辐照剂量 γ 辐照对器件性能的影响,并结合辐照停止后器件性能随时间的变化,对辐照所带来的器件性能的损伤以及微观损伤机理进行了分析.

1 实验

1.1 材料结构和器件制备

采用固态源分子束外延技术在 (100) 晶向的 GaSb 衬底上外延生长 InAs/GaSb II 类超晶格 p-B- π -B-n 结构,具体结构包括 GaSb 衬底/N 型 InAsSb/空穴势垒/吸收区/电子势垒/P 型接触层,如图 1 所示.首先在衬底上沉积 1 μm 的 N-InAsSb 接触层,掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,随后是 80 个周期的 N 型空穴势垒区, (16.3 ML) InAs / (4 ML) GaSb,掺杂浓度为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$;吸收区是 400 周期的长波超晶格材料 (16 ML) InAs / (7 ML) GaSb,掺杂浓度 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,最后是 80 周期 P 型掺杂 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的电子势垒层,结构为 (7 ML) InAs / (7 ML) GaSb,上面覆盖了 50 nm 的 GaSb 层用来做金属接触,其中 Be 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

单元器件的光敏元面积为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$.台面通过等离子体干法刻蚀形成,台面侧壁用 SiO_2 进行钝化保护,电子束蒸发 Ti/Pt/Au 合金形成电极.采用钢柱倒装方式将光敏芯片和过渡电极板互连以便测试.器件的 50% 截止波长为 12 μm .

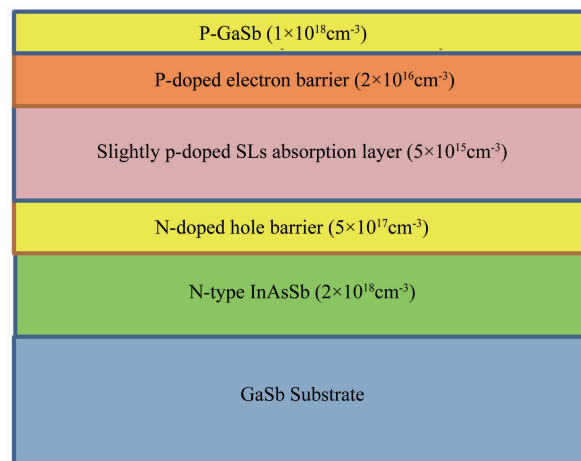


图 1 InAs/GaSb 长波器件结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of InAs/GaSb long wavelength photodetector

1.2 测试与表征

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实时监测辐照过程中冷头的温度,确保辐照过程中器件温度始终维持在 77K 的器件工作温度.通过屏蔽引线将器件与控制室内的 I - V 测试仪 Keithley 2450 相连接,如图

2 所示. 辐照采用 ^{60}Co 源 γ 射线, 在辐照开始前, 首先对器件的初始 I - V 特性进行了测试. 由于辐照剂量可以表示为辐照剂量率与辐照时间的乘积, 因此我们将器件放置位置的辐照剂量率固定为 $20 \text{ rad (Si)}/\text{s}$, 通过延长辐照时间得到不同辐照剂量, 对 $30 \sim 100 \text{ krad (Si)}$ 辐照剂量下器件的 I - V 特性进行实时测试. 辐照结束后, 将辐照后的器件放置 5 min 、 1 h 、 3 h 以及置于室温环境中 24 h 后, 再对器件 I - V 特性 (77 K) 进行测试, 观察器件的电学特性在辐射停止后随着时间延长而发生的变化.

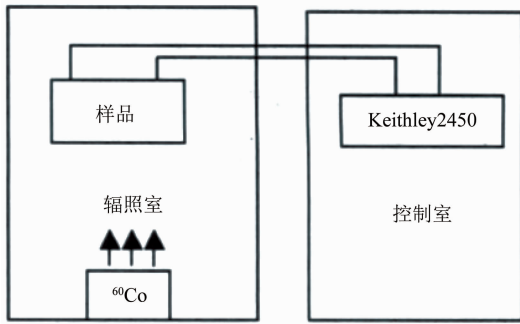


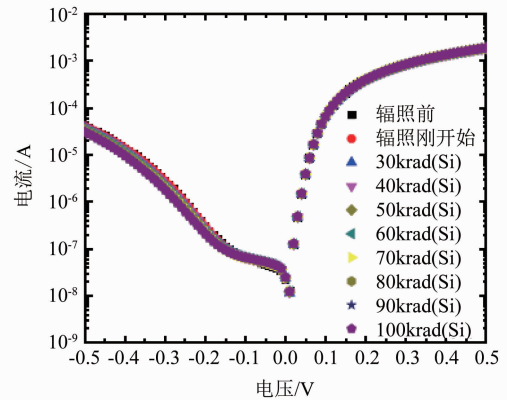
图 2 γ 实时辐照实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the gamma irradiation experiment

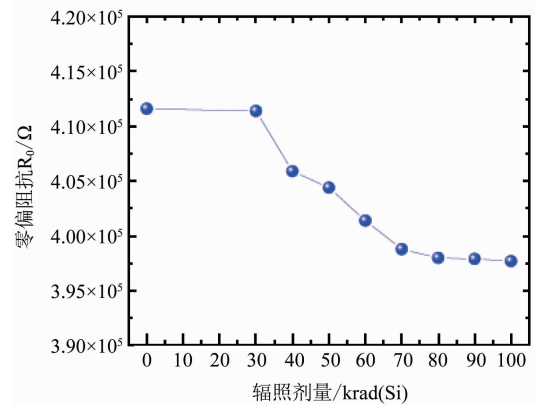
2 结果分析与讨论

图 3(a) 给出了不同辐照剂量下器件的实时 I - V 曲线, 可以发现辐照剂量的增大, 所制备 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外探测器的 I - V 特性曲线与未辐照前基本重合, 说明辐照并未对器件的 I - V 特性带来显著的变化. 通常将器件的零偏阻抗 R_0 变为辐照前一半时所接受的辐照剂量定义为器件的辐照损伤阈值, 通过 I - V 曲线计算得到不同辐照剂量下样品的零偏阻抗, 如图 3(b) 所示, 可以发现, 辐照前器件的零偏阻抗为 $4.12 \times 10^5 \Omega$, 而随着辐照剂量的增大零偏阻抗逐渐减小; 当辐照剂量为 100 krad (Si) 时, 零偏阻抗减小到 $3.98 \times 10^5 \Omega$, 相较辐照前的减小率仅为 3.4% , 从而可以推断器件的辐照损伤阈值远远大于 100 krad (Si) , 具有良好的抗辐照特性.

辐射粒子与半导体材料之间的作用主要包括与电子的作用和与原子核的作用. 其中, 辐照粒子与电子的作用主要体现为电离效应, 即当能量大于半导体材料禁带宽度的粒子辐照到半导体材料时, 价带中的电子会由于吸收入射粒子的能量而被激发到导带, 从而产生电子-空穴对^[10]. 而辐照粒子与原子核的作用则主要体现为位移效应, 即入射粒子或者次



(a)



(b)

图 3 (a) 不同辐照剂量下器件的实时 I - V 特性曲线 (b) 零偏阻抗 R_0 与辐照剂量的关系

Fig. 3 (a) Real-time I - V curves of device under different radiation doses (b) The relationship between R_0 and the radiation dose

生离子与晶格发生碰撞使晶格原子发生位移而引入缺陷, 从而产生以下五种效果: 缺陷产生电子-空穴对、缺陷使电子空穴对复合、缺陷俘获载流子、施主及受主补偿和载流子隧穿^[11]. 此外, 以上两种作用都可能在半导体材料中产生与表面界面有关的效应以及热效应. 这几种效应通常都存在, 但以电离效应和位移效应为主, 同时在具体的辐照条件下, 可能是某一种效应起主导作用.

为了研究辐照对于器件性能产生影响的作用机制, 我们首先由图 3 提取出不同辐照剂量下的零偏压电流, 如图 4 所示, 可以发现辐照刚开始时, 器件的电流呈阶跃增大, 由此说明此时辐照的电离效应起主导作用. 电离效应在 p - n 结空间电荷区及其附近的少子扩散区产生了大量的电子-空穴对, 从而有效增大了非平衡载流子的浓度, 这些非平衡载流子在电场作用下形成光电流, 随着辐照剂量的逐渐增大, 所产生的光电流也逐渐增大. 而随着辐照剂量的

进一步增大,光电流的增加率逐渐减小,这可能是由于随着辐照剂量的增大,位移效应所引入的辐照损伤越来越多,从而使得辐照电离效应产生的自由载流子产额随之逐渐降低.但我们也可以注意到,辐照刚开始电流虽然呈现阶跃增加,但数值仅由 2.17×10^{-8} A 增大到 2.36×10^{-8} A,因此,辐照带来的电离效应对我们所制备的长波红外 InAs/GaSb II 类超晶格探测器的性能影响并不明显,这可能来自于我们在器件中引入的双势垒阻挡层的作用.

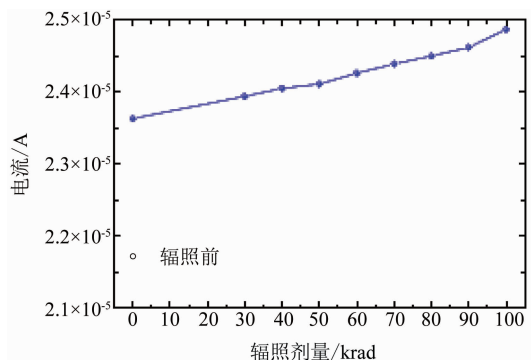


图4 零偏下器件的电流与辐照剂量的关系
Fig. 4 Relationship between the current and radiation dose at zero bias

光伏器件的暗电流机制主要包括:扩散电流(diff)、产生-复合电流(g-r)、直接隧道电流(btb)以及通过缺陷中心的辅助隧道电流(tat),而暗电流机制是分析光伏器件性能的重要理论基础^[12].因此,接着我们通过分别研究较小反向偏压(-20 mV)和较大反向偏压(-400 mV)下器件的电流与辐照剂量的关系以及辐照停止后器件电流随时间的演化情况,对辐照损伤及其作用机制进行进一步的分析.

如图5所示,在反向偏压为-20 mV时,与零偏压下类似,辐照刚刚开始,电流即由 3.87×10^{-8} A 阶跃到 4.23×10^{-8} A,说明此时辐照所带来的电离效应占据主导,电流本质上的增加主要是由于电离效应所产生的光电流,随后随着辐照剂量的进一步增大,位移效应的影响越来越大,从而引起电流的增速明显减慢.另外,如表1所示,当辐照停止5 min后,器件的电流即出现了一定的恢复,由 4.38×10^{-8} A 减小到 4.37×10^{-8} A,而停止1 h后,即可以恢复到

3.90×10^{-8} A,与辐照前基本一致.由于电离效应所引起的非平衡载流子浓度变化是一种瞬态效应,当辐照停止后,载流子浓度会因这些非平衡载流子的复合而在较短时间内恢复到平衡状态,而位移效应则因涉及到缺陷对载流子的俘获,从非平衡态恢复到平衡态弛豫时间大大增长.由此可以看出,在小反向偏压和在所测试的辐照剂量下, γ 辐照所带来的器件损伤以暂态的电离损伤为主,在较短时间内即可恢复.

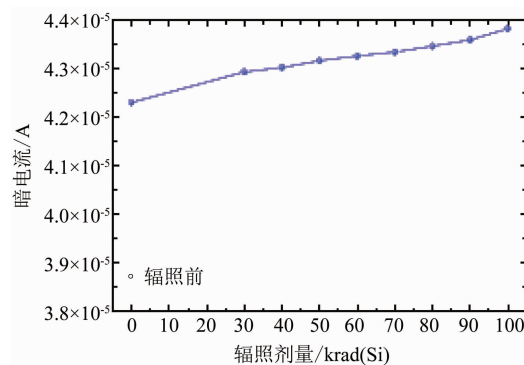


图5 -20 mV 反偏下器件的电流与辐照剂量的关系
Fig. 5 Relationship between the current and radiation dose at bias -20 mV

而当器件所加的反偏电压增大到-400 mV时,如图6所示,与较小反偏电压时的情况不同,辐照刚开始电流并未出现明显变大的现象,仍保持在未辐照时的 1.36×10^{-5} A,随着辐照剂量的增大,器件的电流则呈减小的趋势,当辐照剂量达到100 Krad(Si)时,电流减小到 9.49×10^{-6} A.另外,当辐照停止后,如表1所示,器件的电流增大极其缓慢,辐照停止3 h后器件的电流仅增加到 9.72×10^{-6} A,仍明显小于辐照前的数值.只有当回到室温环境24 h后,器件的电流才恢复到辐照前水平.因此,我们可以推断出此时具有较长弛豫时间的辐照位移效应是影响器件性能的主导因素.

利用数值拟合方法对器件的 $I-V$ 特性曲线进行拟合,对所制备器件的主导暗电流机制进行了分析,可以发现,大反向偏压下直接隧穿电流(btb)限制的暗电流及其影响占据主导,如图6所示.据文献报

表1 辐照停止后一定时间的器件电流与辐照前及辐照中对比
Table 1 Comparison of currents before and after radiation

偏置电压/mV	辐照前/A	100 krad (Si)辐照时/A	辐照后/A			
			5 min	1 h	3 h	室温环境 24 h
-20	3.87E-8	4.38E-8	4.37E-8	3.90E-8	3.89E-8	3.88E-8
-400	1.36E-5	9.49E-6	9.53E-6	9.59E-6	9.72E-6	1.25E-5

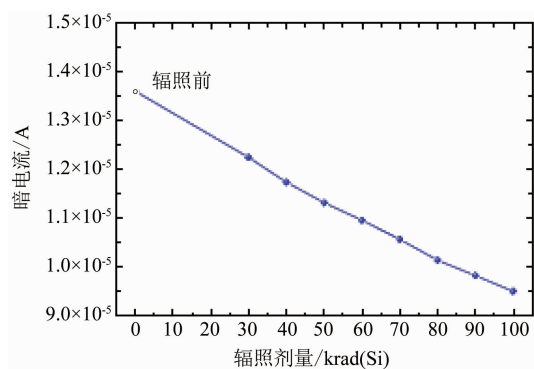


图6 -400 mV 反偏下器件的电流与辐照剂量的关系
Fig. 6 Relationship between the current and radiation dose at bias -400 mV

道^[11,13],⁶⁰Co 源 γ 射线与半导体材料之间的主要作用机理是康普顿效应,所产生的高能康普顿电子能够与材料晶格发生碰撞而产生点缺陷或缺陷团等位移损伤,这些损失可以形成缺陷能级俘获载流子或者形成极性相反的缺陷而产生补偿效应,使得载流子浓度减小,即产生多子去除效应.因此,当 InAs/GaSb II 类超晶格材料受到辐照作用后,材料中部分载流子被缺陷能级俘获而导致材料中空穴浓度降低.另外,辐照还能够产生 n 型损伤,使得 p 型 InAs/GaSb II 类超晶格的空穴浓度也会由于补偿效应而降低,从而带来直接隧穿电流 (btb) 的减小.然而,在一定温度下,由于退火效应所带来的热运动和晶格重构,这些由于位移效应带来的缺陷会弛豫消失,从而使得暗电流也可以恢复到辐照前水平,因此我们可以观察到的器件的电流会经过室温放置 24 h 后恢复到辐照前水平.由于位移效应会在器件的串联电阻上有所表现,因此我们同时对串联电阻随辐照剂量的变化情况进行了研究,结果如下图 7 所示,可以看出随着辐照剂量的增加,器件的串联电阻逐渐变大.辐照剂量为 100 krad(Si) 时,器件电阻的增量约为 5 Ω .材料电阻与浓度的关系,见式(1~2).

$$\rho_s = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p} \quad (1)$$

$$R = \rho_s \frac{L}{S} \quad (2)$$

其中 ρ_s 为材料的电阻率, n 、 P 分别代表电子和空穴浓度, μ_n 、 μ_p 代表电子和空穴迁移率, q 为电子电量, L 为材料的厚度, S 为光敏元的面积.根据文献[14],空穴在超晶格中的纵向迁移率为 $300 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$.根据图 7 暗电流的拟合结果,吸收区的浓度由 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 变化到 $4.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,由此可以计算

得到对应的吸收区体电阻由 127 Ω 增加到 133 Ω ,变化值为 6 Ω ,与实验值基本吻合,从而也进一步证明了较大反偏下电流的辐照特性与位移效应相关.除了实验误差的影响之外,二者之间的差异还可能来自于纵向迁移率的差异,以及金属-半导体接触电阻的影响.

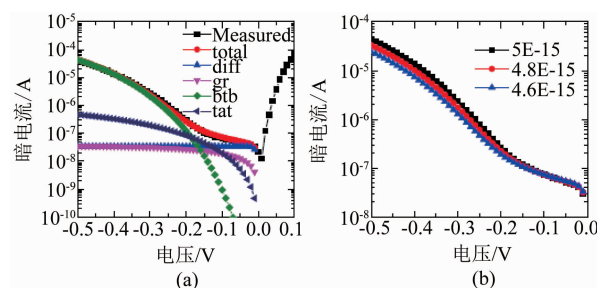


图7 (a)暗电流 I - V 曲线拟合,(b)载流子浓度变化对暗电流的影响

Fig. 7 (a) Measured and simulated curves of dark current density, (b) influence of different carrier concentrations on the dark currents

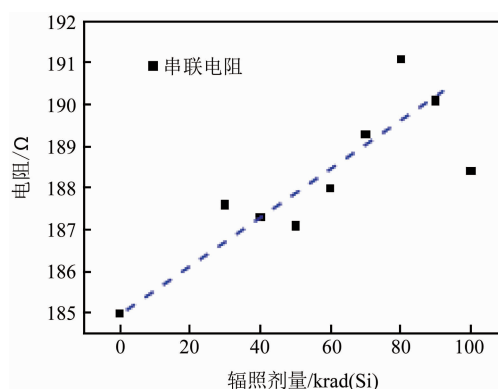


图8 器件串联电阻与辐照剂量的关系
Fig. 8 Relationship between the series resistance and radiation dose

3 结论

制备了 InAs/GaSb II 类超晶格 p-B- π -B-n 结构的长波红外探测器单元器件,通过实时测试 γ 辐照下器件的电流-电压 (I - V) 特性,可以发现辐照剂量的增大并未对器件的 I - V 特性带来显著的变化,当辐照剂量为 100 krad(Si) 时,零偏电阻相较辐照前的减小率仅为 3.4%,具有良好的抗辐照特性.结合辐照停止后器件暗电流随时间的变化,对辐照所带来的器件性能的损伤以及微观损伤机理进行了分析.发现零偏压和小反向偏压下,辐照开始后电流即有明显增大,辐照损伤以暂态的电离效应为主导,器

件性能可以在很短时间内恢复. 而大反向偏压下器件暗电流的主导机制为直接隧穿电流, 辐照所引入位移效应的影响使得暗电流随辐照剂量增大而减小, 损伤需通过退火效应缓慢恢复, 弛豫时间明显长于电离效应损伤.

References

- [1] Soibel A, Ting D Z-Y, Hill C J, *et al.* Gain and noise of high-performance long wave length superlattice infrared detectors [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2010, **96**:111102.
- [2] Haddadi A, Darvish S R, Chen G, *et al.* High operability 1 024 \times 1 024 Long Wavelength Infrared Focal Plane Array Base on Type-II InAs/GaSb Superlattice [C]. *AIP Conf. Proc.* 2011, **1416**:56 - 58.
- [3] WEI Zhi-yong, FANG Mei-hua, YANG Hao. Study on Radiation Environment in Spacecraft under Deep Space [J] *SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING* (魏志勇, 方美华, 杨浩. 深空条件下航天器内的辐射环境研究. *航天器环境工程*), 2008, **25**(3):229 - 232.
- [4] LI Tao-sheng, CHEN Jun, WANG Zhi-qiang. Overview of space radiation environment [J]. *Radiation Protection Bulletin* (李桃生, 陈军, 王志强. 空间辐射环境概述. *辐射防护通讯*), 2008, **28**(2):1 - 9.
- [5] Qiu W C, Hu W D, Lu Chen, *et al.* Dark current transport and avalanche mechanism in HgCdTe electron-avalanche photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, **62**(6):1926 - 1931.
- [6] Voitsehovski A V, Broudnyi V N, Lilenko Y V, *et al.* High temperature defects in electron irradiated semiconductors HgCdTe and PbSnTe [J]. *Solid. State Commun*, 1979, **31**(2):105 - 108.
- [7] Bardes, Ecoffet, Costerastej, *et al.* Displacement damage effects in InGaAs detectors: experimental results and semi-empirical model prediction [J]. *IEEE Trans. On Nuclear Science*, 2000, **47**(6):2466 - 2472.
- [8] Cowan V M, Morath C P, Hubbs J E, *et al.* Radiation tolerance characterization of dual band InAs/GaSb type-II strainlayer superlattice pBp detectors using 63 MeV protons [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2012, **101**:251108.
- [9] Jackson E M, Aifer E H, Canedy C L, *et al.* Radiation Damage in Type II Superlattice Infrared Detectors [J]. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 2010. **39**(7).
- [10] Hopkinson G R. Radiation effects on solid state imaging devices [J]. *Radiat. Phys Chem*, 1994, **43**(1-2):79 - 91.
- [11] Joseph R Srour, James M. McGarrity. Radiation Effects on Microelectronics in Space [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1988, **76**(11).
- [12] Nguyen J, Ting D Z, Hill C J, *et al.* Dark current analysis of InAs/GaSb superlattice at low temperature [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2009, **52**:317 - 321.
- [13] Look D C, Sizelove J R. Defect production in electron-irradiated, n-type GaAs [J]. *Appl. Phys. Lett*, 1987, **62**:3660.
- [14] Umana-Membreno G A, Klein B, Kala H, *et al.* Vertical minority carrier electron transport in p-type InAs/GaSb type-II superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2012, **101**:253515.
- [11] Driggers R G. *Analysis and Evaluation of Sampled Imaging Systems* [M], 2010: 31 - 59.
- [12] KOU X M. Evaluation Method Research of Overall Performance for Infrared Imaging and Observation System [D]. (寇小明. 红外成像观测系统性能评价方法研究. 西安电子科技大学) Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology.
- [13] BAI T Z, JIN W Q. *Principle and Technology of Photoelectric Imaging* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, (白廷柱, 金伟其. 光电成像原理及技术. 北京理工大学出版社), 2006: 514.
- [14] Dudzik M C, Accetta J, Shumaker D. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Vol. 4 [J]. *Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing*, 1993: 91 - 93.
- [15] ZHOU Y, JIN Wei-qi. The transfer characteristic of human visual system and models [J]. *Optical Technique*, (周燕, 金伟其. 人眼视觉的传递特性及模型 [J]. *光学技术*) 2002, **28**(1): 57 - 61.
- [16] Espinola R L, Jacobs E L, Halford C E, *et al.* Modeling the target acquisition performance of active imaging systems [J]. *Optics express*, 2007, **15**(7): 3816.
- [17] SIFIR-50. [2017. 5, 14]. <https://www.coherent.com/lasers/>.
- [18] Introduction of NEC THz Product: High Sensitivity Real-Time Uncooled THz Imager and Transmission THz Microscope [2017. 5. 14]. <http://www.nec.com/en/>.
- [19] Rosker M J, Wallace H B. Imaging Through the Atmosphere at Terahertz Frequencies [C]. *Microwave Symposium*, 2007. IEEE/MTT-S International, 2007: 773 - 776.

(上接第 687 页)