

延伸波长 InGaAs 红外探测器的实时 γ 辐照研究

李 淘^{1,2,3}, 乔 辉^{1,2}, 李永富^{1,2,3}, 唐恒敬^{1,2}, 李 雪^{1,2}, 龚海梅^{1,2}

(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; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:通过实时测试方法,研究了延伸波长 InGaAs 红外探测器在 55×10^4 rad 的 γ 辐照下的电流-电压特性变化,发现器件的暗电流没有明显变化,零偏电阻稍有变化,但变化的幅度很小。在辐照前后对器件的性能进行了测试,发现在辐照后器件的信号稍有下降,噪声基本不变,说明在受到辐照后器件的探测性能略有下降。对器件在辐照前后的低频噪声进行了测试,发现整个低频区的噪声都没有明显的改变。这些结论表明 γ 辐照对延伸波长 InGaAs 器件的影响较小。

关键词:红外探测器; InGaAs; γ 辐照

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Real-time study of γ irradiation effect on extended wavelength InGaAs infrared detectors

LI Tao^{1,2,3}, QIAO Hui^{1,2}, LI Yong-fu^{1,2,3}, TANG Heng-jing^{1,2}

LI Xue^{1,2}, GONG Hai-mei^{1,2}

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,

Shanghai 200083, China; 2. Key Laboratories of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of

Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. Graduate School of the

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In this work, we used real-time measurement to investigate the I - V characteristic of extended wavelength InGaAs infrared detectors under 55×10^4 rad γ irradiation. The results indicate that the dark current of the devices have no obvious change, the R_0 have small changes. The detector performances were measured before and after irradiation, the results show that the signal of detector decrease slightly after irradiation, and the noise almost don't change, which means the detect performance becomes a little worse after irradiation. The low frequency noise was also measured, the results show that the noise in the low frequency region have no noticeable change. These results imply that to the extended wavelength InGaAs infrared detectors the γ irradiation has little effect.

Key words: infrared detector; InGaAs; γ irradiation

1 引 言

由 InGaAs 材料制作的短波红外探测器具有量子效率高、灵敏度高、可在室温工作等优点,在仪器的小型化、降低红外系统成本等方面具有很强的竞争力^[1],国外已经成功将 InGaAs 探测器应用在空间遥感等多个领域^[2-4]。在国内, InGaAs 探测器主要

应用于光纤通讯领域,对于其空间应用仍然处于研

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 50632060);中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(No. C2-32, C2-50)资助。

作者简介:李 淘(1982-),男,博士研究生,主要从事短波红外探测器的研究。E-mail: richard.li989@gmail.com

收稿日期: 2009-12-09

究阶段^[5-6]。

目前,InGaAs 探测器的一大发展趋势即是响应波长向长波或短波方向进行扩展。通过增加 InGaAs 材料中 In 的组分含量使材料的禁带宽度相应减小,从而可使响应波长向长波方向扩展,即可得到延伸波长的 InGaAs 探测器。而要将延伸波长 InGaAs 探测器应用到太空环境,必须要考虑到空间辐射中的电子、质子、中子或 γ 射线对探测器造成的损伤,这是器件可靠性研究的一个重要方面。目前对于 InGaAs 探测器辐照效应的研究进行得很少,而且主要是非实时辐照研究,即在辐照前后对器件进行性能对比测试^[7]。而由于辐照停止后器件会在很短时间内发生弛豫性恢复,因此非实时研究不能真实反映出辐照下器件的变化。本文通过实时测试 γ 辐照下器件的电流-电压特性,并结合辐照前后器件的性能对比测试,研究了空间的重要辐射源 γ 射线对延伸波长 InGaAs 探测器的影响。

2 器件与测试

器件所采用的外延材料由中科院上海微系统与信息技术研究所提供,结构如表 1 所示。其中缓冲层采用了 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$,窗口层采用了宽禁带的 $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 。制备得到背照型与正照型两种线列器件,采用湿法腐蚀台面成型工艺,钝化层采用 SiN_x 薄膜。背照型器件采用 In 柱倒装方式将光敏芯片和过渡电极板进行互连以便测试。

表 1 外延材料参数

Tab. 1 the parameters of epitaxy layers

$\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ Capping layer $\text{P}^+ \geq 2 \times 10^{18}$	0.6 μm
$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ Absorption layer $\text{n}^- 3 \times 10^{16}$	1.5 μm
$\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ Grading buffer layer $\text{n}^+ \geq 2 \times 10^{18}$	1.35 ~ 1.4 μm
S. I. InP Substrate	(350 $\pm$ 20) μm

将封装有器件的杜瓦置于辐照室内,通过屏蔽引线与控制室内的电流-电压($I-V$)测试仪 Keithley 6430 型源-测量单元相连接,如图 1 所示,测试环境与器件均处于室温下。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(30 rad/s)的 γ 辐照。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。辐照过程中对 $I-V$ 特性进行

实时测试并作记录。

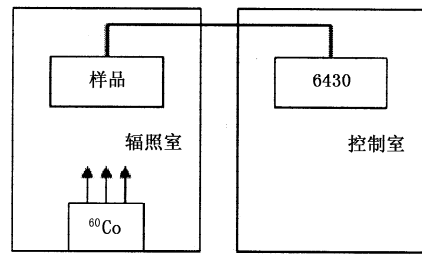


图 1 γ 辐照过程示意图

Fig. 1 schematic diagram of γ irradiation

对器件的低频噪声测试采用安捷伦的动态信号分析仪 35670A 进行。低频噪声测试系统如图 2 所示。通过电流前置放大器将器件的噪声信号放大输入到动态信号分析仪中,经过 FFT 分析得到噪声的功率谱密度图。电流前置放大器采用的是低噪声前置电流放大器 DL1211,可以给输入端提供 $\pm 5\text{ V}$ 的偏压。所有测量均在避光和电屏蔽的条件下进行。

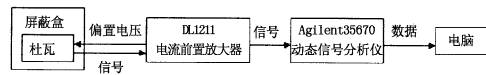


图 2 低频噪声测试系统框图

Fig. 2 schematic diagram of the measurement set-up for low frequency noise

3 实验结果及讨论

3.1 实时电流-电压特性

电流-电压特性测试是 InGaAs 探测器性能表征的重要手段之一,通过 $I-V$ 测试可以获取器件在不同偏压下的暗电流特性、器件的动态零偏电阻,确定器件的优值因子 R_0A ,可以反映出探测器的性能优劣。

对背照 8#器件的实时电流-电压特性测试的结果如图 3 所示。可见,在实时测试中,辐照剂量从 0 逐步增大到 $55 \times 10^4\text{ rad}$,器件的 $I-V$ 曲线基本重合,暗电流并没有明显变大。图 4 是 8#器件的 R_0 值随着辐照剂量的增大而变化的曲线图。可见,随着辐照剂量的增大, R_0 逐渐变小,但变化的幅度不大,最多变小了 1.69%。

对正照 6#器件的实时电流-电压特性测试的结果和 8#器件一致,辐照剂量增大,器件的 $I-V$ 曲线基本重合,暗电流没有明显变化。图 5 是 6#器件的 R_0 值随着辐照剂量的增大而变化的曲线图,随着辐照剂量的增大, R_0 稍变大,但变化的幅度不大,最多变大了 2.03%。

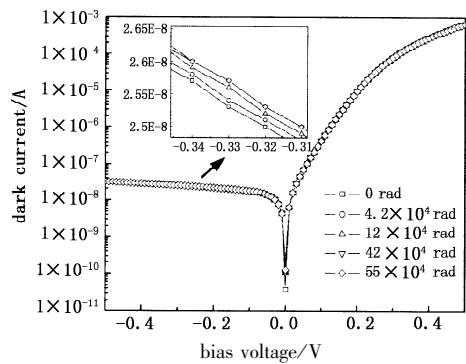


图3 背照8#器件的实时 $I-V$ 特性

Fig. 3 Real-time $I-V$ characteristics of back-illuminated device 8#

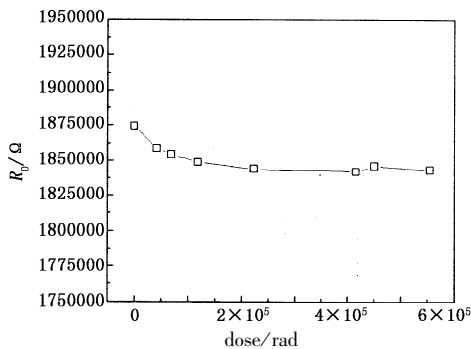


图4 背照8#器件的 R_0 变化曲线

Fig. 4 R_0 of back-illuminated device 8#

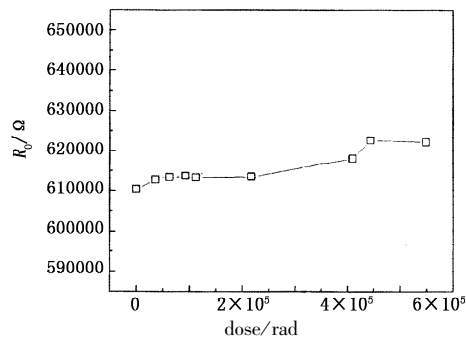


图5 正照6#器件的 R_0 变化曲线

Fig. 5 R_0 of front-illuminated device 6#

γ 辐照对器件产生影响主要是因为其会在半导体材料中产生位移效应和电离效应^[8], 电离效应的重要结果就是使载流子的浓度增加, 位移效应则是在半导体中产生位移损伤, 产生点缺陷或缺陷团, 引入处于禁带中央附近的深能级, 会导致产生 - 复合电流的增大, 使暗电流变大。此外, 辐照还可能会产生表面效应, 增大表面复合速度和引入表面态, 使得表面漏电流变大。黄杨程^[7] 在研究 γ 辐照对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器的影响时就发现随着辐照剂量的增大器件暗电流是逐步增大的。而我们的实验中 8#, 6#器件的暗电流并没有明显变化, 这一方面可能是因为辐照剂量相对不太大, 效应未明显表现出来; 另一方面更重要的是与器件的结构有关, 延伸波长器件中吸收层 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 与衬底的晶格失配较大, 器件中的位错等缺陷密度较大, 使得器件暗电流中的产生 - 复合电流成分本就较大, 在辐照剂量不太大时, 辐照额外引入的暗电流不能明显表现出来, 因此器件的暗电流没有明显的规律性变化, R_0 值的变化也非常小, 甚至略有增大(6#器件)。

3.2 信号与噪声

在辐照前后对正照与背照器件的信号与噪声按照常规的黑体测试方法进行了测试, 黑体温度 900 K, 孔径 5 mm, 测试距离 16 cm, 调制频率 800 Hz, 带宽 80 Hz, 信号与噪声测试时电流前置放大器均采用 10^{-8} A/V 的放大倍数, 测试结果如表 2 所示。可见, 辐照前后信号稍有变小, 这可能是由于辐照在器件中产生的缺陷能级可以复合掉光生载流子, 从而造成器件的响应率降低。而辐照前后噪声基本无变化, 所以辐照后器件的信噪比稍有下降, 也即其探测率略有变小, 但变化程度较小。这说明在受到 55×10^4 rad 的 γ 辐照后, 器件的探测性能稍有下降。

表 2 辐照前后的信号与噪声对比

Tab. 2 the signal and noise before irradiation and after irradiation

器件编号		辐照前信号/mV	辐照后信号/mV	变化率/%	辐照前噪声/ μV	辐照后噪声/ μV	变化率/%
背照	A1	9.5	9	-5.26	80	80	0.00
	A2	9.5	8.8	-7.37	80	75	-6.25
	A3	9.5	9.2	-3.16	82	80	-2.44
	A4	9.7	8.9	-8.25	80	80	0.00
	A5	10.5	10.2	-2.86	80	80	0.00
正照	A1	92	81	-11.96	125	130	4.00
	A2	90	83	-7.78	130	140	7.69
	A3	96	87	-9.38	130	135	3.85
	A4	96	85	-11.46	130	130	0.00
	A5	98	90	-8.16	130	130	0.00

3.3 低频噪声

在用图2所示的低频噪声测试系统对器件辐照前后的低频噪声进行测试,其结果如图6、图7所示。可见,器件在辐照前后的低频噪声基本无变化,说明不仅仅是常规噪声测试得到的噪声数值前后无变化,整个低频区的噪声都没有明显的改变,表明 $0 \sim 55 \times 10^4 \text{ rad}$ 的 γ 辐照对器件的低频噪声无明显影响。

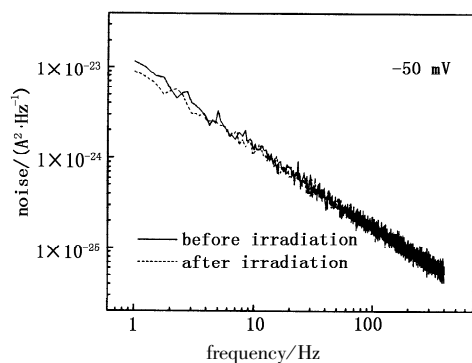


图6 背照8#器件辐照前后的低频噪声

Fig. 6 low frequency noise of back-illuminated device 8# before and after irradiation

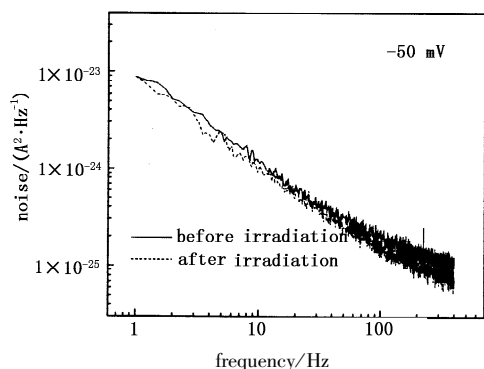


图7 正照6#器件辐照前后的低频噪声

Fig. 7 low frequency noise of front-illuminated device 6# before and after irradiation

4 结论

实时测试了延伸波长 InGaAs 红外探测器在 γ 辐照下的电流-电压特性,结果发现:在辐照剂量

$55 \times 10^4 \text{ rad}$ 下,正照与背照器件的暗电流均没有明显变化;随着辐照剂量的增大,器件的零偏电阻稍有变化,但变化的幅度很小。辐照前后对器件的性能进行了测试,发现在辐照后器件的信噪比稍有下降,说明在受到 $55 \times 10^4 \text{ rad}$ 的辐照后,器件的探测性能稍有下降。对器件在辐照前后的低频噪声进行了测试,发现整个低频区的噪声都没有明显的改变。这些结果均表明 $55 \times 10^4 \text{ rad}$ 的 γ 辐照对延伸波长 InGaAs 器件没有明显的影响。

参考文献:

- [1] T N Krabach, C Staller, S Dejewski, et al. InGaAs detectors for miniature infrared instruments [C]. SPIE, 1993, 1874: 214 - 223.
- [2] Moy J P, Hugon X, Chabbal J, et al. 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for the spot 4 SWIR channel [C]. SPIE, 1989, 1107: 137 - 151.
- [3] Hoogeveen Ruud W M, Var Der A Ronald J, Goede Albert P H. Extended wavelength InGaAs infrared ($1.0 \sim 2.4 \mu\text{m}$) detector arrays on SCIAMACHY for spacebased spectrometry of the Earth atmosphere [J]. Infrared Physics & Technology, 2001, 42: 1 - 16.
- [4] Kozlowski L J, Tennant W E, Zandian M, et al. SWIR staring FPA performance at room temperature [C]. SPIE, 1996, 2746: 93 - 100.
- [5] 唐恒敬, 吕衍秋, 张可锋, 等. 空间遥感用 InGaAs 短波红外探测器[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(5): 42 - 49.
- [6] 唐恒敬, 吕衍秋, 吴小利, 等. 正照射与背照射 InGaAs 探测器的性能对比研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(增刊): 938 - 940.
- [7] 黄杨程, 曹光明, 刘大福, 等. InGaAs 红外探测器的 γ 辐照研究[J]. 功能材料与器件学报, 2005, 11(1): 68 - 70.
- [8] 曹建中. 半导体材料的辐射效应[M]. 北京: 科学出版社, 1993.