

超小间距微台面 InGaAs 探测器光电性能研究

田宇^{1,2}, 于春蕾^{2*}, 李雪², 邵秀梅², 李涛², 杨波², 于小媛^{1,2},
曹嘉晟², 龚海梅^{2*}

(1. 上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海市 201210;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海市 200083)

摘要: 超小中心距 InGaAs 探测器的制备需要降低探测器像元间的串音和探测器的暗电流。通过探索微台面 InGaAs 探测器制备工艺, 成功制备了 10 μm 和 5 μm 中心距微台面 InGaAs 光敏芯片测试结构, 并对其像元间的串音和探测器的暗电流进行了详细研究。结果表明, 当隔离沟槽刻蚀进入吸收层时, 微台面结构能有效抑制像元间的串音; 但是由于在制备微台面器件过程中造成的材料损伤, 由此引起的复合电流和欧姆漏电流的增加, 会导致探测器暗电流增幅超过一个数量级。研究结果为制备超小中心距 InGaAs 焦平面探测器提供了新思路 and 启示。

关键词: 砷化镓; 微台面; 串音; 暗电流

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Study on photoelectric performance of ultra-small pixel pitch micro-mesa InGaAs detector

TIAN Yu^{1,2}, YU Chun-Lei^{2*}, LI Xue², SHAO Xiu-Mei², LI Tao², YANG Bo², YU Xiao-Yuan^{1,2},
CAO Jia-Shen², GONG Hai-Mei^{2*}

(1. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

2. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The pursuit of ultra-small pixel pitch InGaAs detectors necessitates a meticulous approach to addressing challenges associated with crosstalk reduction and dark current minimization. By developing the fabrication process technology of micro-mesa InGaAs detector, a test structure featuring a micro-mesa InGaAs photosensitive chip with 10 μm and 5 μm pixel pitch was successfully prepared. Subsequently, a comprehensive investigation was conducted to analyze the impact of the micro-mesa structure on crosstalk and dark current characteristics of the InGaAs detector. The obtained results revealed the efficacy of the micro-mesa structure in effectively suppressing crosstalk between adjacent pixels when the isolation trench etches into the absorption layer. However, a noteworthy challenge emerged as the fabrication processes induced material damage, leading to a considerable increase in recombination current and Ohmic leakage current. This adverse effect, in turn, manifested as a dark current escalation by more than one order of magnitude. The significance of these findings offers a novel perspective for the manufacturing of ultra-small pixel pitch InGaAs focal plane detectors.

Key words: InGaAs, micro-mesa, crosstalk, dark-current

引言

InGaAs 是直接带隙的三元化合物半导体, 其禁

带宽度可在 InAs 的 0.36 eV 与 GaAs 的 1.42 eV 之间变化^[1], 对应的光谱响应截止波长分别为 3.45 μm

收稿日期: 2024-02-01, 修回日期: 2024-03-29

基金项目: 上海市自然科学基金 (22ZR1472600)

Foundation items: Supported by Shanghai Natural Science Foundation (22ZR1472600)

作者简介 (Biography): 田宇 (1997-), 男, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要研究领域为 InGaAs 探测器。E-mail: tianyu@shanghaitech.edu.cn

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

Received date: 2024-02-01, Revised date: 2024-03-29

和 $0.87\text{ }\mu\text{m}$, 很好地覆盖了 $1\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 的大气窗口。在短波波段, 与 InP 衬底晶格匹配的 InGaAs 探测器, 即 In 组分为 0.53 的探测器, 具有高量子效率、高灵敏度, 特别是在室温下工作也具有很高的性能, 让 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As/InP}$ 红外探测器在摆脱制冷设备的限制, 实现探测系统小型化, 降低探测器成本等方面具有较大优势, 因此受到了广泛的关注并被应用于医学、航天以及工业等领域^[2]。

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As/InP}$ 探测器的一个重要的发展趋势就是像素中心距不断减小, 面阵规模越来越大^[3]。因为减小探测器的像素尺寸不仅有利于降低探测器系统的体积、重量、功耗和成本, 还有利于提高探测器空间分辨率和工作温度^[4, 5], 从而在给定空间增加系统功能和价值。然而, 随着像素中心距的不断减小, 当光生载流子的扩散长度大于像素中心距时, 会使探测器像素间产生很大的串音, 从而导致成像系统调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 变小, 最终表现为图像传感器成像质量变差^[6]。所以制备超小像素中心距 InGaAs 焦平面探测器不仅需要探索制备工艺和降低器件暗电流, 也需要解决像素间串音随像素中心距减小而增大的问题^[7]。

根据探测器光敏元成结技术的不同, InGaAs 探测器分为图 1 所示的平面型探测器和台面型探测器。对于平面型 InGaAs 探测器, 其 p-n 结是通过对 n-i-n⁺ 型外延材料的 n 型帽层进行 p 掺杂得到的, 由于 p-n 结埋藏于外延材料之中, 具有暗电流低的优势; 对于台面型 InGaAs 探测器, 在材料生长的过程中就对外延层进行了 p、n 掺杂, 所以需要通过刻蚀进行物理隔离形成相互独立的光敏元, 具有串扰低的优势。

本文结合平面型探测器暗电流低和台面型探测器串音低的优势, 创新地引入图 2 所示的微台面结构。通过探索微台面结构探测器制备工艺, 包括工艺流程、像素之间隔离沟槽刻蚀工艺和钝化工艺, 成功制备了 $10\text{ }\mu\text{m}$ 中心距扩散孔直径为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5\text{ }\mu\text{m}$ 中心距、扩散孔直径为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 的微台面 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As/InP}$ 光敏芯片测试结构。通过串扰测试结构, 测试对比了平面型和微台面器件对串音的抑制效果, 结果表明当隔离沟槽刻蚀深度超过 InP 帽层的厚度时, 即吸收层材料被刻蚀时, 微台面结构能够有效抑制像素之间的串扰, 特别是当隔离沟槽刻蚀到 p 区与吸收层的形成的 p-n 结时, 像素之间

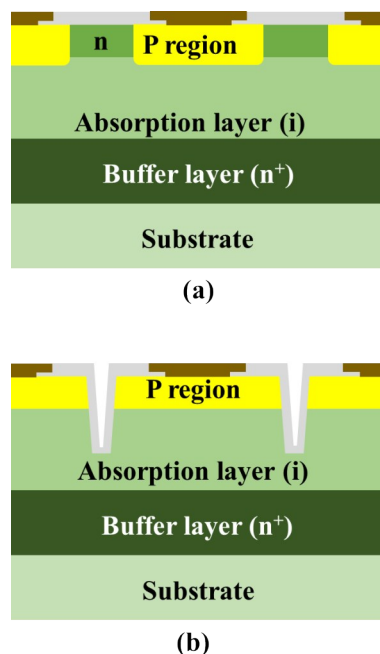


图 1 InGaAs 探测器类型示意图: (a) 平面型 InGaAs 探测器; (b) 台面型 InGaAs 探测器

Fig. 1 InGaAs detector type diagram: (a) plane type InGaAs detector; (b) mesa type InGaAs detector

的串扰几乎全被抑制; 若隔离沟槽的刻蚀深度没有超过 InP 帽层的厚度, 则微台面器件对串扰的抑制效果则会大幅降低。论文进一步研究了微台面器件的暗电流特性, 结果表明通过刻蚀制备微台面结构而引入的材料损伤会使器件的暗电流增大, 且器件暗电流会因为隔离沟槽刻蚀到 p 区与吸收层的形成的 p-n 结而急剧增大, 通过测试微台面器件在不同温度下的暗电流, 拟合得到了探测器的激活能^[8-10], 拟合结果表明微台面器件制备引入的复合电流和欧姆漏电流是微台面器件暗电流增大的主要原因。论文的研究结果为制备超小中心距 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As/InP}$ 焦平面探测器提供理论依据和现实指导。

1 实验

器件制备采用的材料结构如图 2 所示。其中包括 $350\text{ }\mu\text{m}$ 厚的半绝缘 InP 衬底层, $2\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 n 型重掺杂 InP 衬底层 (掺杂浓度为 $3\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$), $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 n 型轻掺杂 InGaAs 吸收层 (掺杂浓度为 $5\times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$) 以及 $1\text{ }\mu\text{m}$ 厚 n 型 InP 帽层 (掺杂浓度为 $1.25\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$)。

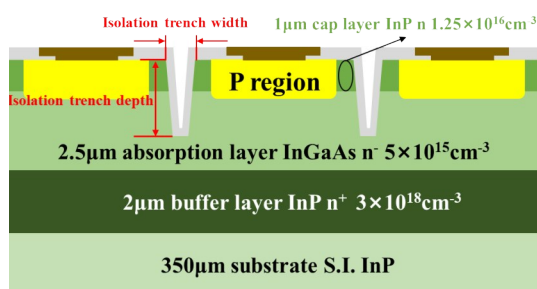


图2 微台面 InGaAs 探测器

Fig. 2 Micro-mesa type InGaAs detector

为了在对比分析微台面结构和平面型结构器件时能有效控制变量,通过设计工艺流程,在制备隔离沟槽时,采用 SiN_x 介质层对平面型器件的表面进行了保护,最终在同一片材料上同时实现了两种器件的制备,器件制备工艺流程示意图如图3所示。

实验采用 ADVANCED MEMS 公司的 IBE150 离子束刻蚀机制备了微台面器件的隔离沟槽。刻蚀条件为:刻蚀气体:Ar;腔体压强: 2×10^{-2} Pa;离子能量:500 eV;束流:50 mA;中和:50 mA。为了制备预期深度的隔离沟槽,对 SiN_x 刻蚀掩膜和 InP 在上述刻蚀条件下的刻蚀速率进行了摸索,获得了图4所示的 SiN_x 和 InP 刻蚀深度随刻蚀时间的关系, SiN_x 掩膜和 InP 的刻蚀选择比约为8。

基于上述工艺成功制备了 10 μm 中心距、扩散孔直径为 5 μm 的平面型隔离沟槽分别为 1、2 和 3 μm 的光敏芯片测试结构,以及 5 μm 中心距、扩散孔直径为 1.5 μm 的平面型和隔离沟槽为 1 μm 的光敏芯片测试结构。为了表达方便,在本文中以 10-5-0、1、2、3 来表达上述结构,如 10-5-2 表示 10 μm

中心距 5 μm 、扩散孔 2 μm 宽隔离沟槽的微台面器件。图5为器件部分实际图,(a)为刻蚀隔离沟槽后共聚焦显微镜拍摄的器件形貌图,(b)为用 SEM 拍摄的 InGaAs 形貌,(c)是串音测试结构实物图。

为研究隔离沟槽深度对串扰的抑制作用,制备了两种不同深度的隔离沟槽,分别为 0.7 μm 和 1.4 μm 。

2 实验结果及讨论

2.1 微台面结构对串音的抑制作用

采用了两种方式表征微台面结构对串扰的抑制作用,第一种测试响应电流,测试结构示意图如图6所示。用波长为 1.55 μm 的激光采用正照射的方式测试中心像元对其近四元的串音,由于中心像元上不覆盖金属,所以辐射最终只被中心像元吸收,随后将中心像元周围的四个像元的信号通过加厚电极引出。这里加厚电极不仅充当了串音信号引出电极,也充当了遮挡层防止目标像元之外的像元接受到辐射。通过串音测试结构测量 10 μm 中心距平面型以及微台面器件的光电流和暗电流来定性观察微台面结构对串音的抑制作用。

当微台面器件的隔离沟槽刻蚀未进入吸收层时,微台面器件和平面型器件的光电流和光电压几乎一致,说明微台面器件对串音几乎没有抑制作用,测试结果如图7所示。

当微台面器件的隔离沟槽刻蚀进入吸收层时,微台面器件的光电流和光电压远远小于平面型器件的光电流和光电压,说明此时微台面器件对串音的抑制效果明显,特别是当隔离沟槽为 3 μm 时,由于 p-n 结暴露,串音几乎完全消失,测试结果如图8

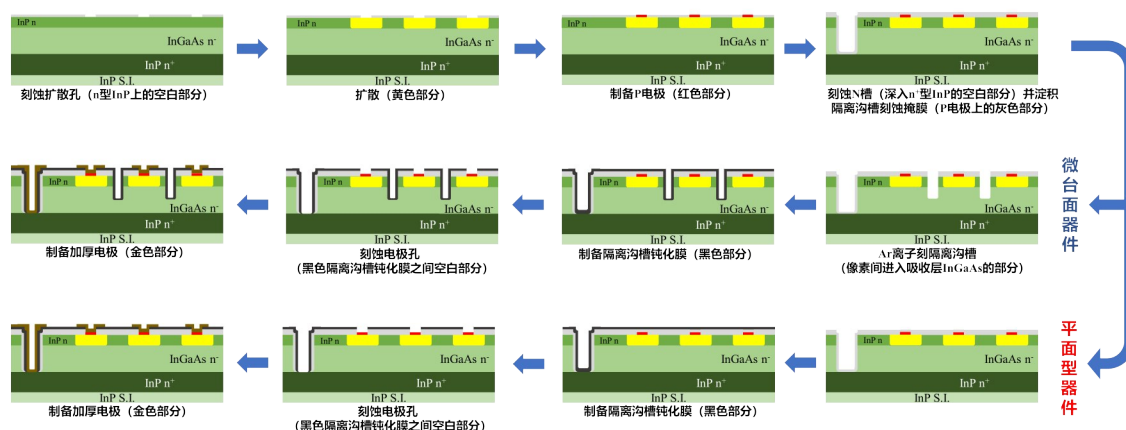


图3 器件制备工艺流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of device fabrication process

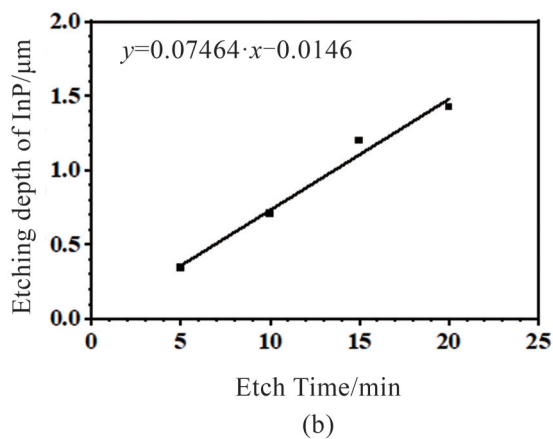
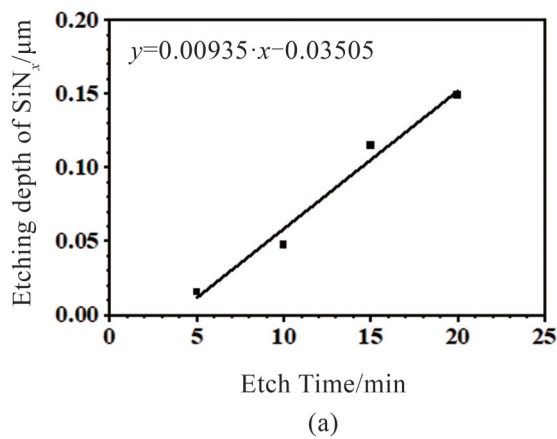


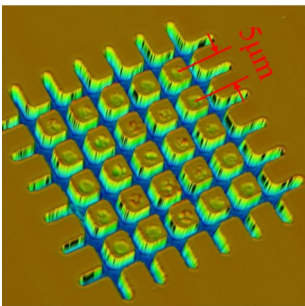
图4 刻蚀掩膜 SiN_x 和 InP 刻蚀深度与刻蚀时间的关系
Fig. 4 The relationship between SiN_x and InP etching depth with etching time

所示。

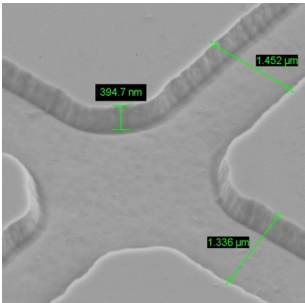
基于上述结果,制备了5 μm 中心距、1.5 μm 扩散孔平面型器件和微台面型器件,微台面隔离沟槽深度设计为1.4 μm 和0.7 μm,宽度为1 μm。为了定量表征微台面结构对串扰的抑制作用,采用了如图9所示的测试系统对串扰信号进行了测试。测试结构在接收调制后的黑体信号后,产生的电流信号会经过电流电压转换和放大然后输入锁相放大器,最后在锁相放大器上读出黑体响应信号。平面型测试结构器件的次近四元像素串扰信号为34.1 mV;微台面型测试结构的次近四元像素串扰信号为0.326 mV,串扰信号相比于平面型结构明显下降。测试结果进一步证实,当隔离沟槽进入吸收层后,微台面结构可以有效抑制超小像素之间的串扰。

2.2 微台面器件的暗电流特性

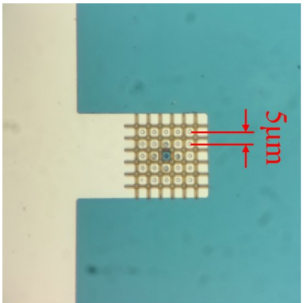
除了串扰特性之外,探测器的暗电流直接影



(a)



(b)



(c)

图5 器件部分实物图:(a) 共聚焦显微镜拍摄的器件形貌图;(b) 2 μm 隔离沟槽的微台面器件 InGaAs 形貌;(c) 微台面串音测试结构实物图

Fig.5 Physical diagram of part of devices: (a) image of device morphology taken by a confocal microscope; (b) InGaAs morphology of a 2 μm isolated trench micromesa device; (c) micromesa crosstalk test structure physical diagram

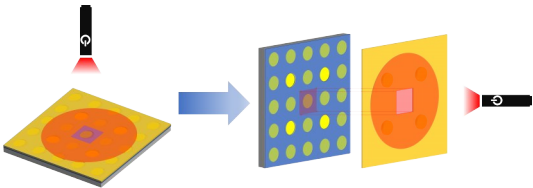
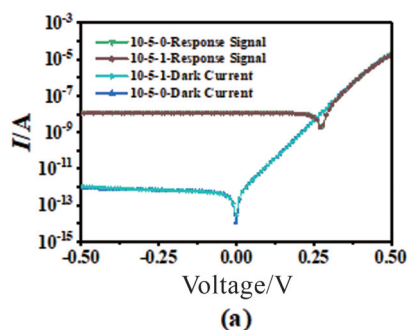
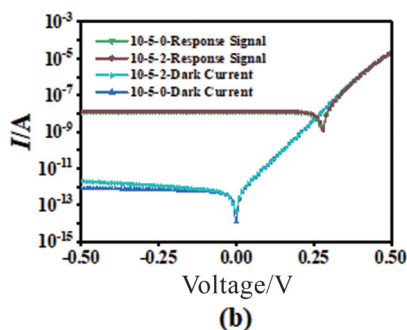


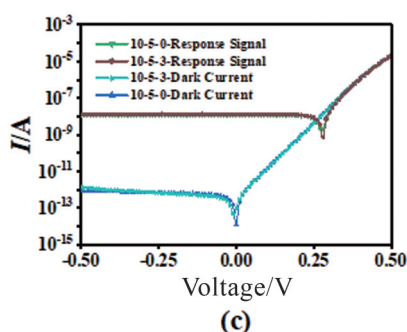
图6 串音测试结构示意图。
Fig. 6 Crosstalk test structure diagram.



(a)



(b)



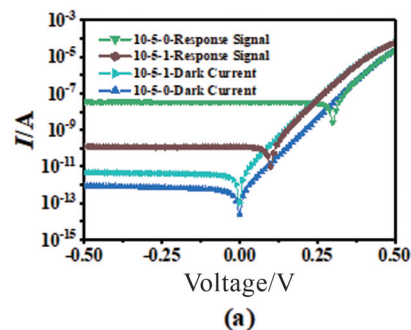
(c)

图7 隔离沟槽刻蚀未进入吸收层时微台面器件和平面型器件串音测试结果对比

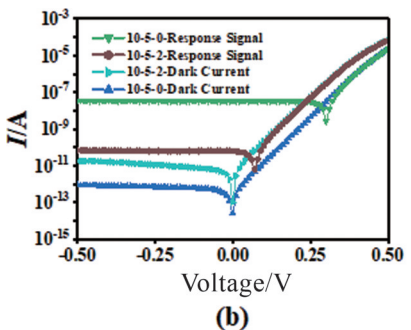
Fig. 7 Comparison of crosstalk test results of micromesa devices and planar devices when isolation trenches etching does not enter the absorption layer

响信噪比。论文首先对 $5\ \mu\text{m}$ 中心距平面型和微台面器件的暗电流进行了测试分析。 $5\ \mu\text{m}$ 中心距平面和隔离沟槽宽度为 $1\ \mu\text{m}$ 的微台面结构的暗电流如图 10 所示,在 $-0.1\ \text{V}$ 时平面型、隔离沟槽深度为 $0.7\ \mu\text{m}$ 和隔离沟槽深度为 $1.4\ \mu\text{m}$ 的微台面器件的暗电流密度分别为 1.35×10^{-7} 、 1.89×10^{-7} 和 $3.33 \times 10^{-6}\ \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,测试结果表明当隔离沟槽刻蚀进入吸收层时,微台面结构会引入较大暗电流。

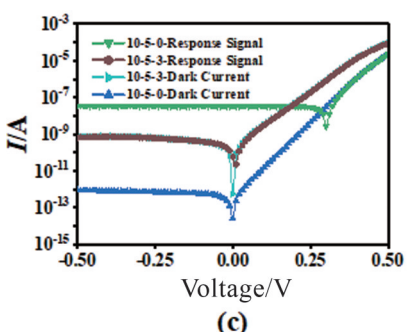
进一步研究了隔离沟槽宽度和深度对微台面器件暗电流的影响。对于 $10\ \mu\text{m}$ 中心距、扩散孔直径为 $5\ \mu\text{m}$ 的器件,当隔离沟槽刻蚀未进入吸收层时,不同隔离沟槽宽度的微台面器件的暗电流如图 11 所示,结果表明微台面结构的引入几乎不会影响



(a)



(b)



(c)

图8 隔离沟槽刻蚀进入吸收层时微台面器件和平面型器件串音测试结果对比。

Fig. 8 Comparison of crosstalk test results of micromesa devices and planar devices when isolation trenches etched into the absorption layer.

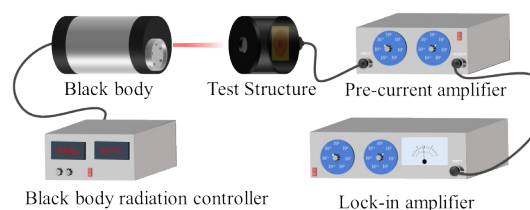


图9 黑体响应信号测试示意图

Fig. 9 Blackbody response signal test structure diagram

器件的暗电流,但需要注意的是此时微台面结构对像元间的串音也没有了抑制作用。

而对于 $10\ \mu\text{m}$ 中心距器件,当隔离沟槽刻蚀进入吸收层时,不同隔离沟槽宽度的微台面器件的暗电流如图 12 所示。由于刻蚀引入的材料损

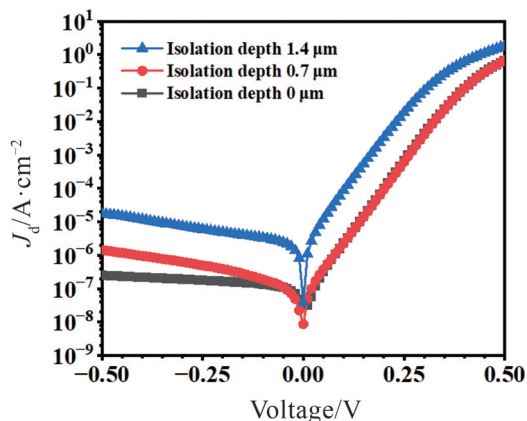


图 10 5 μm 中心距平面和微台面结构的暗电流。

Fig. 10 Dark current of 5 μm pixel pitch plane and micromesa structure.

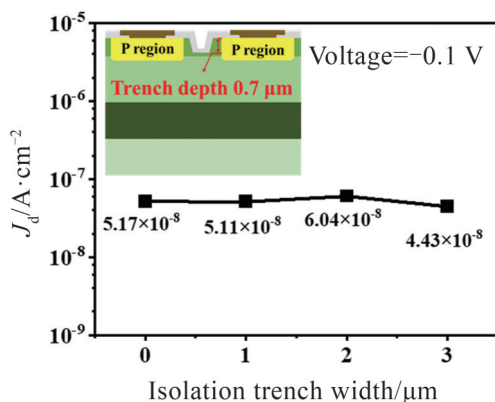


图 11 隔离沟槽刻蚀未进入吸收层时平面型器件和不同隔离沟槽宽度微台面器件暗电流

Fig. 11 Dark currents of planar devices and micromesa devices with different isolation groove widths when the isolation trench etching does not enter the absorption layer.

伤会导致器件的暗电流增大,且微台面器件暗电流随隔离沟槽宽度的增加而增大。特别是当沟槽宽度为 3 μm 时,暗电流急剧增大,此现象可能是隔离沟槽刻蚀接触到扩散结侧面导致 p-n 结暴露所致。

为了进一步分析微台面探测器暗电流的主要成分,从而为降低微台面器件暗电流提供指导依据,论文还测量了 10 μm 中心距器件在不同温度下的暗电流。当隔离沟槽刻蚀未进入吸收层时,通过拟合得到的探测器的激活能如图 13 所示,在 250 K 至 320 K 的温度范围内,10-5-1、2、3 激活能与 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的禁带宽度 0.75 eV 差距不大,说明此时暗电流仍然以扩散电流为主。

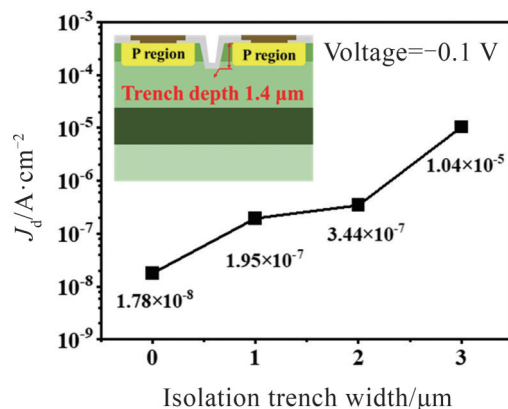


图 12 隔离沟槽刻蚀进入吸收层时平面型器件和不同隔离沟槽宽度微台面器件暗电流。

Fig. 12 The dark current of planar devices and micromesa devices with different isolation groove widths when the isolation trench etches into the absorption layer

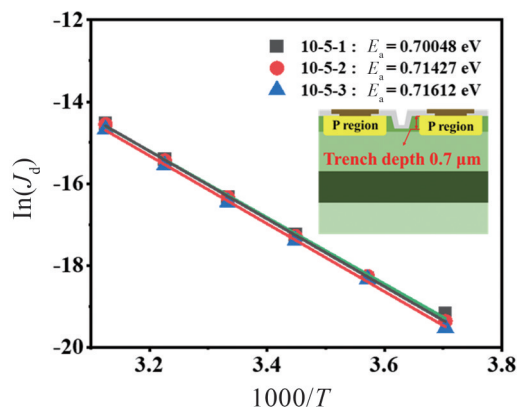


图 13 隔离沟槽刻蚀未进入吸收层时拟合得到的器件激活能

Fig. 13 The activation energy obtained when the isolation trenches etching does not enter the absorption layer

而当隔离沟槽刻蚀进入吸收层时,通过拟合得到的探测器的激活能如图 14 所示,在 250 K 至 320 K 的温度范围内,10-5-1、2 的激活能与 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的禁带宽度 0.75 eV 仍差距不大,说明暗电流依然以扩散电流为主;但 10-5-3 拟合得到的激活能在 250 K 至 320 K 的温度范围内小于 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的禁带宽度 0.75 eV,特别是在 230 K 至 250 K 区间,拟合得到的激活能接近于 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 禁带宽度的一半,说明此时暗电流以产生复合电流和欧姆漏电流为主。

3 结论

为解决超小间距 InGaAs 探测器的串扰难题,论

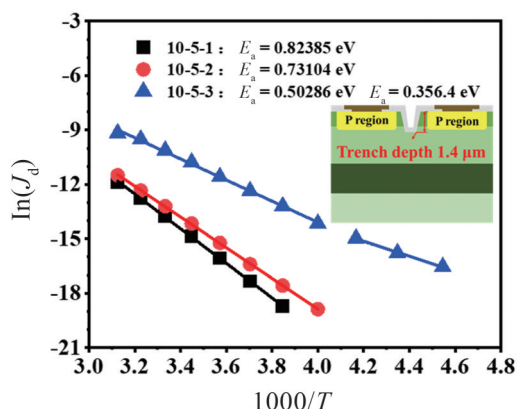


图 14 隔离沟槽刻蚀进入吸收层时拟合得到的器件激活能

Fig. 14 The activation energy obtained when the isolation trenches etching enters the absorption layer

文提出了微台面结构,突破了超小间距微台面 InGaAs 探测器的工艺难点,成功制备了 $5\text{ }\mu\text{m}$ 中心距超小像素光敏芯片。研究了微台面结构对 InGaAs 探测器串扰和暗电流特性的影响,发现微台面结构能有效抑制像素间的电串音,但是在制备微台面器件隔离沟槽时额外引入的产生复合电流和欧姆漏电流会使微台面器件暗电流急剧增大。需要优化低损伤刻蚀和表面钝化方法,实现在抑制串扰的同时减小暗电流。论文结果为实现超小像素 InGaAs 焦平面探测器提供了理论依据。

References

- [1] Zhang Yong-Gang, Gu Yi, Ma Ying-Jie, et al. The magic of III-Vs [J]. Journal of Infrared and Millimeter waves. (张永刚, 顾溢, 马英杰, 等. 三五之魅. 红外与毫米波学报), 2022, 41(6): 941-950.
- [2] Zhang Yong-Gang, Gu Yi, Shao Xiu-Mei, et al. Short-wave infrared InGaAs photodetectors and focal plane arrays [J]. Chinese Physics B, 2018, 27(12): 128102.
- [3] Li Xue, Shao Xiu-mei, Li Tao, et al. Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. Infrared and Laser Engineering (李雪, 邵秀梅, 李涛, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展. 红外与激光工程), 2020, 49(1): 64.
- [4] Kinch, M A. Fundamentals of infrared detector materials [M], Bellingham: SPIE press, 2007: 8.
- [5] Kinch, M A. The future of infrared; III - Vs or HgCdTe? [J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44 (9), 2969-2976.
- [6] Armstrong, J M, Skokan M R, Kinch M A, et al. HDVIP five-micron pitch HgCdTe focal plane arrays [C]. SPIE press, 2014(9070): 907033.
- [7] Du, X, Savich G R, Marozas B T, et al. Suppression of lateral diffusion and surface leakage currents in nBn photodetectors using an inverted design [J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 47(2), 1038-1044.
- [8] Chen Bai-Le, Yuan Jin-Rong, Holmes A L, et al. Dark current modeling of InP based SWIR and MWIR InGaAs GaAsSb type-II MQW photodiodes [J]. Optical and Quantum Electronics, 2013, 45(3), 271-277.
- [9] Ji Xiao-Li, Liu Bai-Qing, Tang Heng-Jing, et al. $2.6\text{ }\mu\text{m}$ MBE grown InGaAs detectors with dark current of SRH and TAT [J]. AIP Advances, 2014, 4(8): 087135.
- [10] Liu Ya-Ge, Ma Ying-Jie, Li Xue, et al. Surface leakage behaviors of $2.6\text{ }\mu\text{m}$ $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ photodetectors as a function of mesa etching depth [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2020, 56(2), 1-6.