

文章编号: 1672-8785(2025)10-0039-07

分子束外延硅基碲镉汞 p-on-n 异质结研究

姜梦佳 张 添 王 丹 李 震 折伟林 牛佳佳

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 报道了硅基碲镉汞 p-on-n 异质结薄膜材料, 重点研究了多层材料的结构设计及生长。使用分子束外延方法实现了碲镉汞薄膜的 n 型及 p 型掺杂。所得异质结材料表面的平均宏观缺陷密度约为 500 cm^{-2} 。二次离子质谱仪测试结果表明, 该异质结材料的 n 型层和 p 型层均达到了理想的掺杂浓度设计值, 分别为 $1.02 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ 和 $5.15 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 。基于该异质结材料制备的中波红外焦平面阵列显现出良好的光电性能, 其反向偏压高于 800 mV。

关键词: p-on-n 异质结; 硅基碲镉汞; 分子束外延; 焦平面阵列

中图分类号: TN213; TN214; TN215 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.10.003

Study on Silicon-Based HgCdTe p-on-n Heterojunction by Molecular Beam Epitaxy

JIANG Meng-jia, ZHANG Tian, WANG Dan, LI Zhen, SHE Wei-lin, NIU Jia-jia

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: A silicon-based HgCdTe p-on-n heterojunction thin film material is reported, focusing on the structural design and growth of the multilayered material. Both n-type and p-type doping of the HgCdTe thin film is achieved using molecular beam epitaxy. The average macro-defect density on the surface of the obtained heterojunction material is approximately 500 cm^{-2} . Secondary ion mass spectrometer results indicate that both the n-type and p-type layers of the heterojunction material achieved the ideal doping concentrations of $1.02 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ and $5.15 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$, respectively. A mid-wave infrared focal plane array fabricated based on this heterojunction material exhibits excellent optoelectronic performance, with a reverse bias voltage exceeding 800 mV.

Key words: p-on-n heterojunction; silicon-based HgCdTe; molecular beam epitaxy; focal plane array

收稿日期: 2025-09-03

作者简介: 姜梦佳(1998-), 女, 河南商丘人, 硕士, 主要研究方向为分子束外延碲镉汞材料生长。

E-mail: 13920585519@163.com

0 引言

碲镉汞具有禁带宽度可调的特点, 吸收范围覆盖整个红外波段^[1-2], 可展现出高量子效率以及优异的光电响应特性, 因此是制备红外探测器的理想材料。随着第三代红外焦平面技术的不断发展, 对红外探测器的性能提出了更高的要求。碲镉汞异质结材料为实现更高灵敏度、更低噪声以及大阵列的高性能红外探测器提供了有效途径。传统的硼注入 n-on-p 异质结利用碲镉汞材料中的汞空位形成本征的 p 型层, 但汞空位容易引入复合中心, 降低载流子寿命。相比之下, 原位掺杂的 p-on-n 结构异质结更具优势, 可通过低浓度的 n 型掺杂有效降低产生-复合电流, 提高少子寿命, 且能够克服传统汞空位掺杂的固有缺陷。而 p 型层采用宽带隙材料, 其电子势垒能够阻挡光生载流子, 进而提高探测器的性能。

现阶段, 美国雷神公司利用分子束外延技术实现了不同组分下的原位 In、As 掺杂及浓度控制, 制备得到的基于硅基碲镉汞 p-on-n 异质结的中波、长波红外探测器均展现出优异的性能^[3-6]。在国内, 中国科学院上海技术物理研究所在砷化镓衬底上制备了原位掺杂的 p-on-n 异质结材料, 分析了暗电流对器件性能的影响, 并针对异质结能带优化开展了理论分析研究^[7-8]; 昆明物理研究所采用原位掺杂技术, 在碲锌镉衬底上生长得到了碲镉汞 p-on-n 异质结和双色材料, 相关测试结果表明此类材料具有较高的晶体质量^[9]。在先前的报道中, 本单位利用液相外延技术在碲锌镉衬底上得到了原位掺杂的碲镉汞 p-on-n 异质结和双色材料。测试结果表明, 该器件具有高 R_0A 值与低暗电流^[10-11]。

本文使用分子束外延技术, 在硅衬底上制备碲镉汞 p-on-n 异质结材料。所使用的硅衬底虽与碲镉汞之间的晶格匹配性不如碲锌镉衬底, 但具有更高的机械强度、更低的成本以及可制备更大尺寸材料的优势; 硅与读出电路的良好兼容性使其可制备具有更高可靠性的红外

焦平面阵列。此外, 分子束外延是一种在超高真空条件下利用分子束流实现可控的高质量单晶薄膜生长的先进技术。与液相外延和离子注入技术相比, 它能够更精确地控制组分、厚度和掺杂浓度, 实现对能带的精细调控^[12-13], 避免了高能量轰击造成的材料表面损伤。

1 实验

硅基碲镉汞 p-on-n 异质结材料结构如图 1 所示。由下至上, 分别为 Si 衬底、In 掺杂 n 型吸收层和 As 掺杂 p 型层。

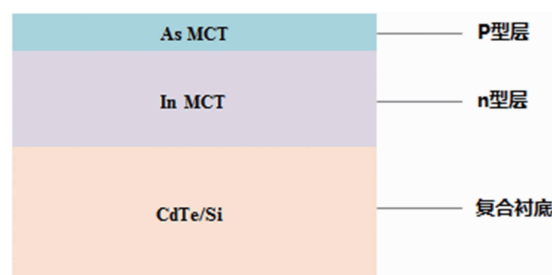


图 1 硅基碲镉汞 p-on-n 异质结的结构示意图

1.1 n 型吸收层生长

在外延 n 型碲镉汞层时, 以中波波段吸收为目标, 通过在分子束外延设备中控制 CdTe/Te 比及 Hg 流量, 生长 Cd 组分为 0.3、厚度为 5~6 μm 的吸收层。选用 In 作为掺杂剂, 将碲镉汞层的导电性改为 n 型。In 的电离能低, 室温激活率接近 100%, 且 In 具有在碲镉汞中溶解率高的优势。

采用分子束外延系统生长 In 掺杂碲镉汞层, 可知 In 束流与实际掺 In 浓度之间具有线性关系。而 In 束流大小取决于源温高低, 因此源温与 In 掺杂浓度之间具有正比关系。基于此, 在 170~180 $^{\circ}\text{C}$ 的碲镉汞生长窗口下, 开展不同 In 源温度下的 In 掺杂实验。当 In 源温度由 375 $^{\circ}\text{C}$ 升至 420 $^{\circ}\text{C}$ 时, 可相应获得 $1 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的 In 掺杂浓度。

1.2 p 型层生长

在生长 p 型层时, 根据导带差与组分差 (Δx) 的关系 ($\Delta E_c \approx 0.6 \Delta x$), 当 n 型层的组分为 0.3 时, p 型层的组分值设定为 0.35, 即可建立起有效的电子势垒。通过控制 CdTe/Te

比及 Hg 流量, 生长 Cd 组分为 0.35、厚度约为 $1\ \mu\text{m}$ 的 p 型层。该厚度下的 p 型层可确保空穴的高效注入, 且避免光生空穴在界面堆积。由于 As 具有高稳定性、低扩散性的优势, 选用 As 作为掺杂剂, 将碲镉汞层的导电性改为 p 型。

在分子束外延系统中, 使用 As 裂解炉生长 As 掺杂碲镉汞层。As 裂解炉能够将 As_4 分解为 As_2 或 As 原子, 促使 As 在碲镉汞中吸附。As 掺杂浓度随 As 源炉温度的升高而升高, 源于 As 束流随 As 源炉温度升高而变大; 而 As 掺杂浓度随生长温度的升高而降低, 源于 As 的黏附系数随碲镉汞表面温度的升高而减小。当固定生长温度为 $175\ ^\circ\text{C}$ 、As 源炉针阀开度为 50% 时, 调节 As 源炉温度为 $265\sim 280\ ^\circ\text{C}$, 可获得 $2\times 10^{17}\sim 5\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 的 As 掺杂浓度。

1.3 激活退火

在分子束外延的 As 掺杂过程中, 由于 As 的两性特征, As 元素会优先占据 Hg 位, 表现出 n 型特性。需在外延结束后进行热处理, 使 As 移至 Te 位, 显现出 p 型特性。本研究的热处理方法将 p-on-n 异质结材料置于 Hg 饱和气氛下进行闭管退火^[15]。首先进行高温退火, 该过程为 As 转移提供激活能。接着进行长时间的低温退火, 消除 Hg 空位的补偿效应, 使异质结的 p 型特征完全来自于 As 掺杂。如图 2 所示, 两步退火过程中, 样品与 Hg 源分开放置, Hg 源温度始终低于样品温度, 避免 Hg 腐蚀损坏材料表面。

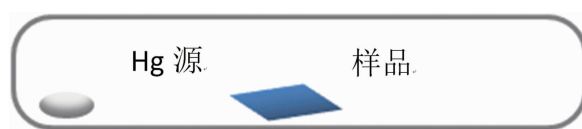


图 2 退火管中 Hg 源和样品的位置示意图

1.4 表面缺陷控制

采用分子束外延技术生长碲镉汞材料时, 考虑到富汞条件生长可抑制 Te 空位形成, 降低 As 原子、In 原子被 Te 空位捕获的可能性, 提高掺入效率^[16]。因此在实际生长过程中, 倾向于微富汞条件生长。首先固定生长温度, 将生长温度波动控制在 $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ 以内。接着通过调节 Hg 流量, 在富汞的基础上尽量降低富汞缺陷数量。采用反射式高能电子衍射仪 (Reflection High Energy Electron Diffractometer, RHEED) 进行实时监控。图 3(a) 和图 3(b) 所示分别为富汞程度大时的 RHEED 条纹和富汞程度小时的 RHEED 条纹。可以看出, 通过调节 Hg 流量, 成功使得材料生长环境稳定于微富汞条件。

2 材料表征分析

2.1 晶体质量表征

采用显微镜观察异质结材料的表面形貌。使用 $200\times$ 的放大倍数, 选取 9 个视场进行缺陷统计。图 4 为异质结材料的显微镜图像, 其背景光滑, 缺陷较少。通过计算得到其平均表面宏观缺陷 (直径小于 $10\ \mu\text{m}$) 约为 $500\ \text{cm}^{-2}$ 。

2.2 组分厚度测试

采用傅里叶红外光谱仪测试异质结的组分

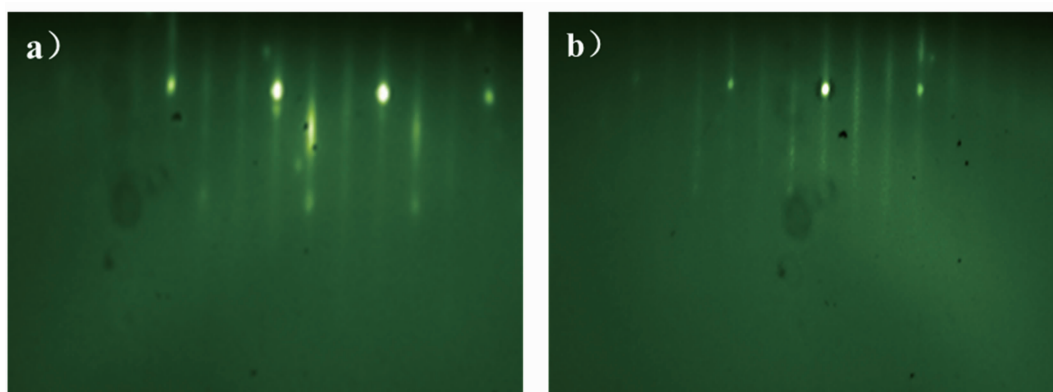


图 3 (a) 富汞程度大时的 RHEED 条纹; (b) 富汞程度小时的 RHEED 条纹

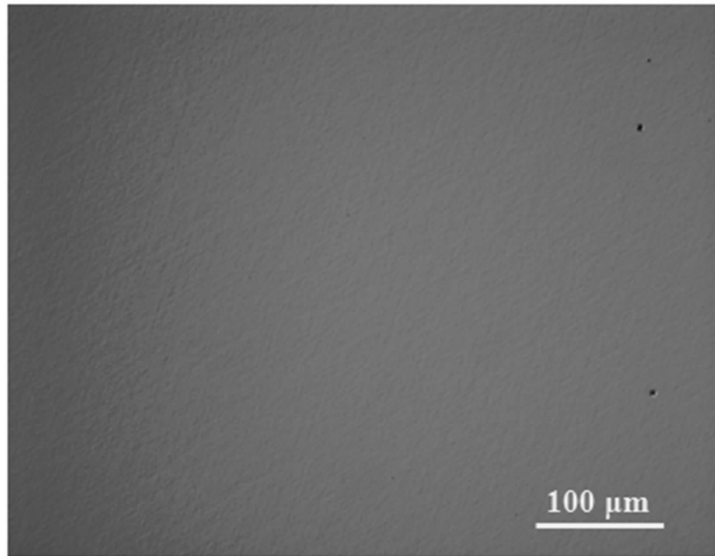


图 4 异质结材料的显微镜图像

表 1 傅里叶拟合结果

n 型吸收层组分	n 型吸收层厚度/ μm	p 型吸收层组分	p 型吸收层厚度/ μm
0.309	5.97	0.354	1.03

表 2 单层掺杂片测试结果

单层掺 In 片测试结果			单层掺 As 片测试结果		
电荷传输特性	掺杂浓度/ cm^{-3}	迁移率/ $(\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s}))$	电荷传输特性	掺杂浓度/ cm^{-3}	迁移率/ $(\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s}))$
n 型	1.02×10^{15}	33545	p 型	5.15×10^{17}	172

和厚度，并对各层进行拟合^[17]。图 5 所示为常温下的红外光谱测试结果。表 1 列出了通过计算拟合得到的 77 K 下异质结材料的各层组分与厚度值。组分均匀性的标准偏差为 0.0004，厚度均匀性的标准偏差为 0.0729 μm 。由此可见，在分子束外延过程中对束流进行精确控制后，各层组分及厚度均达到设计值，异质结材料整体上具有良好的均匀性。

2.3 电学性能测试

在 77 K 以及强度为 1 T 的磁场下，利用霍尔效应测量异质结的载流子运输特性。测试与异质结采用相同掺杂工艺下的单层掺 In 片和激活后的单层掺 As 片，其电荷传输特性、载流子浓度及迁移率如表 2 所示。结果表明，In 掺杂浓度为 $1.02\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，迁移率为 $33545 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ，激活后 As 掺杂浓度为 $5.15\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，迁移率为 $172 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。

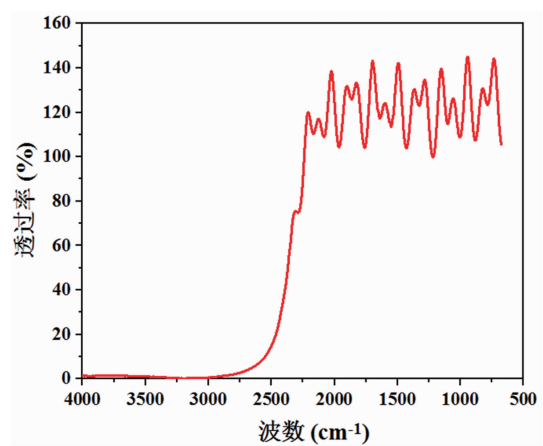


图 5 常温下异质结材料的傅里叶红外光谱图

2.4 二次离子质谱

采用二次离子质谱仪 (Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS) 对异质结材料进行测试^[18]。如图 6(a)所示，在距离材料表面 1~6 μm 内，实现了平均掺杂浓度为 $1\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的 In 掺杂，且具有良好的工艺可重复性。如

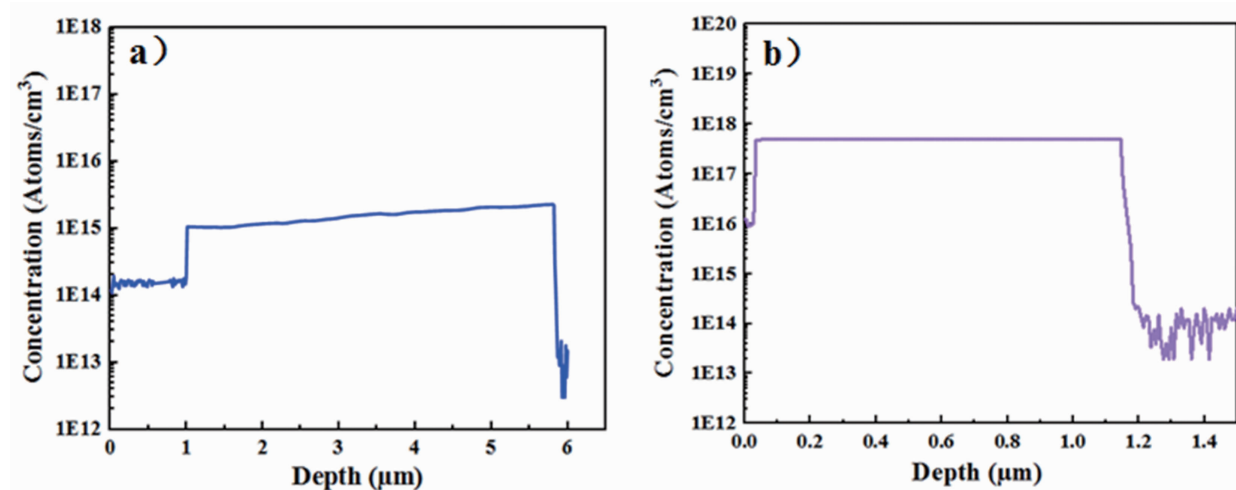


图 6 (a) In 掺杂时的 SIMS 测试结果; (b) As 掺杂时的 SIMS 测试结果

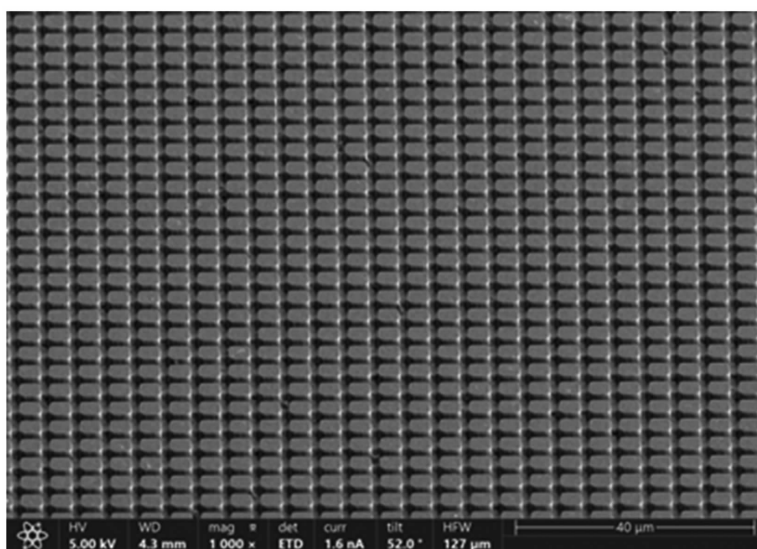
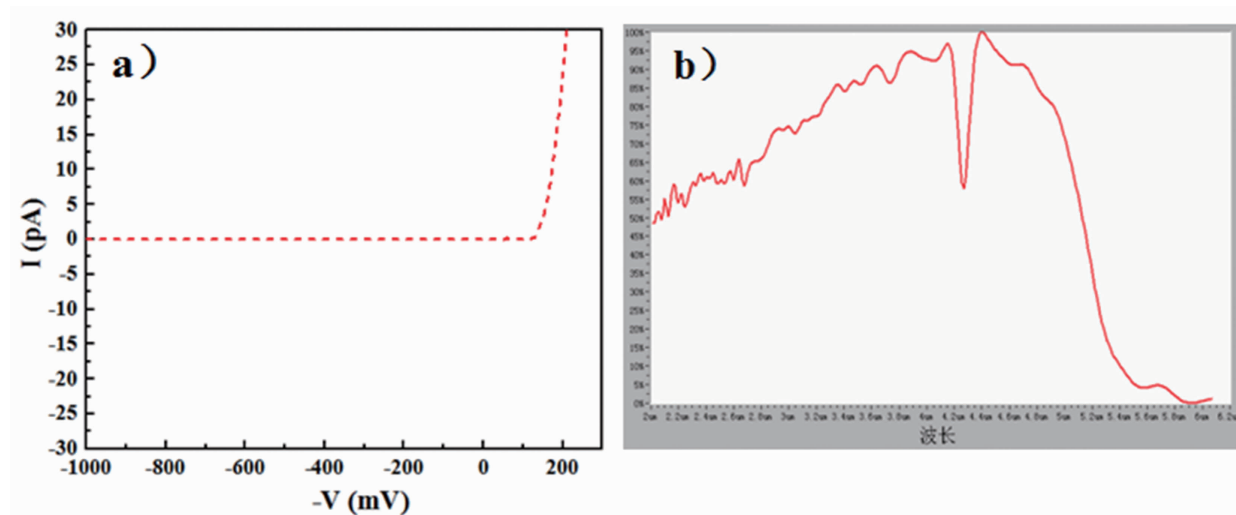


图 7 台面阵列的扫描电子显微镜图

图 8 (a) I - V 测试结果; (b) 光谱响应图谱

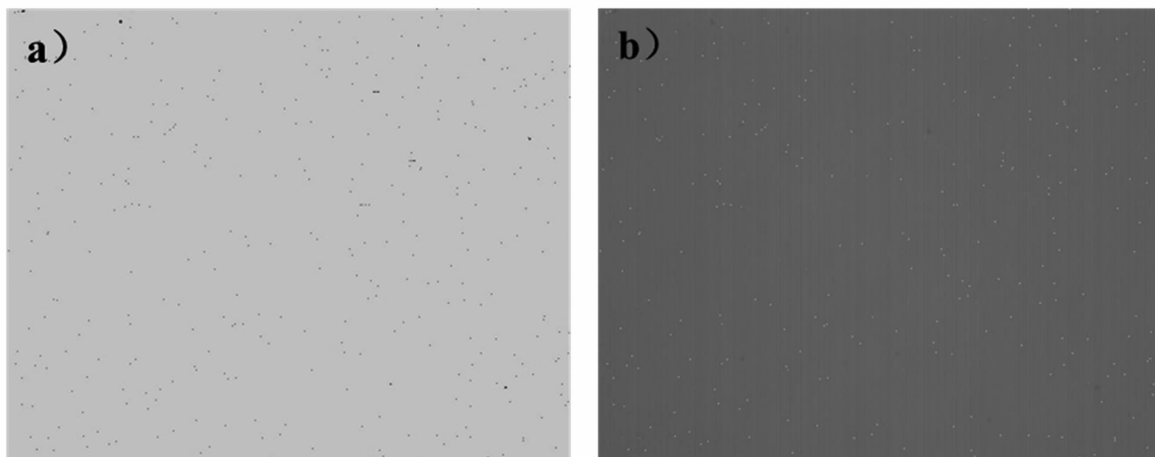


图 9 (a)盲元图; (b)电平图

图 6(b)所示, 在距离材料表面 $1\ \mu\text{m}$ 内, 实现了稳定的 As 掺杂(平均掺杂浓度为 $5 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$)。

3 器件结果

基于外延得到的硅基碲镉汞 p-on-n 异质结材料, 采用 ICP 刻蚀及湿法腐蚀工艺制备了像元间距为 $15\ \mu\text{m}$ 的 640×512 台面阵列(见图 7), 然后经过钝化、退火、刻蚀接触孔、生长电极等工艺, 最终得到中波红外探测器芯片。

典型的 I - V 曲线如图 8(a)所示, 其平坦区域长, 具有优异的反向击穿特性(反向击穿电压达到 $800\ \text{mV}$ 以上)。测得其零偏压电阻可达 $1 \times 10^7\ \Omega$ 。图 8(b)展示了该器件的响应光谱。可以看出, 在 $5\ \mu\text{m}$ 红外吸收范围内响应良好。该器件的盲元数较少, 如图 9 所示, 盲元率为 0.12% 。在没有抗反射涂层的情况下, 该器件的探测值峰值达到 $1.19 \times 10^{10}\ \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

4 结束语

本文设计了基于硅基衬底的 p-on-n 异质结碲镉汞薄膜材料, 并采用分子束外延方法实现了异质结各层的组分、厚度及掺杂浓度的精确控制。所得材料的吸收波段为中波红外波段。n 型吸收层的 In 掺杂浓度为 $1.02 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$, 迁移率为 $33545\ \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; p 型层的 As 掺杂浓度为 $5.15 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$, 迁移率为 $172\ \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。利用已开发的退火工艺, 可实

现几乎 100% 的 As 激活。测试分析评价表明, 所得异质结材料的晶体质量较好, 平均表面宏观缺陷约为 $500\ \text{cm}^{-2}$ 。制备的 640×512 中波红外焦平面台面阵列展现出良好的光电性能。 I - V 测试结果表明, 其反向平坦区长, 反向偏压高于 $800\ \text{mV}$, 盲元率为 0.12% , 探测值峰值为 $1.19 \times 10^{10}\ \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。该研究为用分子束外延方法生长 p-on-n 异质结材料提供了参考, 并为制备第三代高性能红外探测器奠定了基础。未来将持续优化 p-on-n 异质结材料质量, 为进一步降低暗电流、提升探测器性能提供保证。

参考文献

- [1] 杨健荣. **HgCdTe 材料物理与技术** [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] 褚君浩. **窄禁带半导体物理学** [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] Vilela M F, Olsson K R, Reddy M, et al. $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ from short to long wave infrared on Si substrates grown by MBE [J]. *Phys Status Solidi C*, 2011, **10**: 2518–2521.
- [4] Vilela M F, Buell A A, Newton M D, et al. Control and Growth of Middle Wave Infrared (MWIR) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ on Si by Molecular Beam Epitaxy [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, **6**: 561–565.
- [5] Vilela M F, Lofgreen D D, Smith E P G, et al. LWIR HgCdTe Detectors Grown on Ge Substrates

- [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37**(9): 1465–1470.
- [6] Bornfreund R, Rosbeck J P, Thai Y N, et al. High-Performance LWIR MBE-Grown HgCdTe/Si Focal Plane Arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2007, **36**(8): 1085–1091.
- [7] 叶振华, 吴俊, 胡晓宁, 等. 碲镉汞 p^+-on-n 长波异质结探测器的研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(6): 423–426.
- [8] 全知觉, 孙立忠, 叶振华, 等. 碲镉汞异质结能带结构的优化设计 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(7): 3611–3616.
- [9] 杨春章, 覃钢, 李艳辉, 等. 碲锌镉衬底上中长双色红外碲镉汞分子束外延生长研究 [J]. *红外技术*, 2018, **40**(1): 1–5.
- [10] 田震, 宋淑芳, 王小菊, 等. 碲镉汞 $p-on-n$ 长波异质结探测器材料的制备研究 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(6): 730–734.
- [11] 谭振, 刘世光, 田震, 等. 双层异质结碲镉汞甚长波红外焦平面探测器研究进展 [J]. *红外*, 2018, **39**(6): 1–7.
- [12] 高达, 李震, 王丛, 等. 基于分子束外延的硅基 HgCdTe 材料工艺研究 [J]. *红外*, 2021, **42**(3): 6–10.
- [13] 折伟林, 邢晓帅, 邢伟荣, 等. 中国电科 11 所碲镉汞薄膜材料制备技术进展 [J]. *激光与红外*, 2024, **54**(4): 483–494.
- [14] 王丹, 李震, 高达, 等. 分子束外延硅基碲镉汞 In 掺杂材料制备 [J]. *红外*, 2023, **44**(3): 13–19.
- [15] 姜梦佳, 折伟林, 王丹, 等. 硅基碲镉汞材料高低温循环退火降位错研究 [J]. *红外*, 2025, **46**(1): 27–35.
- [16] Sivananthan S, Wuewarnasuriya P S, Aqariden F, et al. Mode of Arsenic Incorporation in HgCdTe Grown by MBE [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1997, **26**(6): 225–228.
- [17] 折伟林, 田璐, 晋舜国, 等. $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$ 薄膜厚度测试方法的研究 [J]. *激光与红外*, 2012, **42**(12): 1351–1354.
- [18] 李乾, 折伟林, 周朋, 等. 红外半导体材料 SIMS 分析研究 [J]. *红外*, 2018, **39**(11): 17–20.