

文章编号: 1672-8785(2023)10-0015-06

InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器 背减薄技术研究

王晓乾 胡雨农 游聪娅 李景峰 李海燕 刘 铭

(中国电子科技集团有限公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 针对 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器开发高质量背减薄工艺, 获得了高质量衬底表面, 改善了超晶格红外探测器组件的成像品质。采用机械抛光和机械化学抛光相结合的工艺减薄衬底, 其中机械抛光削减衬底大部分厚度, 然后通过机械化学抛光去除机械损伤。机械化学抛光过程中, 在压力、转速等不变的情况下, 主要研究机械化学抛光液的 pH 值对衬底表面质量的影响。实验结果表明, 当机械化学抛光液的 pH 值为 9.4 时, 获得了高质量、低损伤的芯片衬底表面, 并实现了最佳的探测器组件成像效果。

关键词: InAs/GaSb II 类超晶格; 红外探测器; 背减薄; pH 值

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.10.003

Study on Back Thinning Technology of InAs/GaSb Type-II Superlattice Infrared Detector

WANG Xiao-qian, HU Yu-nong, YOU Cong-ya, LI Jing-feng, LI Hai-yan, LIU Ming

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

Abstract: High quality substrate thinning process is developed for InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors to obtain high quality substrate surface and improve the quality of superlattice infrared detectors. A combination of mechanical polishing and mechanochemical polishing is used to thin the substrate, in which mechanical polishing reduces most of the thickness of the substrate, and then mechanical damage is removed through mechanochemical polishing. In the process of mechanochemical polishing, the influence of the pH value of the mechanochemical polishing solution on the surface quality of the substrate is mainly studied while the pressure, speed, and other factors remain unchanged. The experiment shows that when the pH value of the mechanochemical polishing solution is 9.4, a high-quality and low damage substrate surface is obtained, and the imaging effect of the detector component is the best.

Key words: InSb/GaSb type-II superlattice; infrared detector; back thinning; pH value

收稿日期: 2023-03-27

作者简介: 王晓乾(1996-), 男, 河北人, 助理工艺师, 主要从事超晶格红外探测器方面的研究。

E-mail: wxq123456@126.com

0 引言

1977 年, Sakaki H 等人^[1]从理论上提出了 InAs/GaSb II 类超晶格结构的概念, 并针对超晶格材料的吸收系数进行了研究。后来, Smith D L 等人^[2]将该超晶格材料应用引入到红外探测领域。基于分子束外延系统的 InAs/GaSb 超晶格材料制备技术的突破, 极大地推动了 InAs/GaSb 材料在红外探测领域的应用。InAs/GaSb 超晶格具有错开型能带结构^[3]。短周期 InAs/GaSb 超晶格结构中电子会局限在 InAs 层, 而空穴会局限在 GaSb 层。光敏材料吸收入射红外光后, 电子获得能量, 从价带子带跃迁到电子微带, 产生光电流。超晶格材料具有周期性结构, 且 InAs 层和 GaSb 层的厚度很小。当 InAs 层的厚度改变时, 由于量子效应, InAs 基态电子能级会向上或向下偏移。同理, GaSb 层的厚度变化也有类似的效果^[4]。因此, 通过改变 InAs 层或 GaSb 层的厚度来调控其有效禁带宽度, 可以实现探测波长从 $3\ \mu\text{m}$ 到 $30\ \mu\text{m}$ 变化。

InAs/GaSb 超晶格光敏芯片与读出电路采用倒装互连的形式构成红外探测器芯片。红外光透过 GaSb 衬底后, 被 InAs/GaSb 光敏材料吸收而转换为电信号; 经互连电路的读出、转换、放大和除噪声处理后实现电信号输出。

因此, 入射到光敏芯片上的红外光越强, 探测器输出的电信号也越强, 探测器成像效果就越好。但是, 探测器正常工作时降温到 $77\ \text{K}$ ^[5]。在此温度下, 较厚 GaSb 衬底的红外透过率低^[6], 透过的红外光少, 影响探测器的成像质量。其次, 探测器制备过程在衬底表面留下明显的加工损伤, 这些损伤也会影响器件的成像效果。因此迫切需要开发高表面质量探测器背减薄技术。

红外探测器芯片背减薄的主要方式有机械切削、机械抛光、机械化学抛光和化学抛光等^[7]。机械抛光会在衬底表面留下一定深度的损伤层, 需要结合机械化学抛光或化学抛光去除。而 GaSb 材料活性大、带隙小, Sb 基氧化物具有钝化作用^[8], 使得 GaSb 的纯化学抛光难以进行。所以本文采用机械抛光和机械化学抛光相结合的工艺减薄衬底, 并系统研究机械化学抛光过程中抛光液 pH 值对衬底表面质量的影响。

1 实验

如图 1 所示, 实验片为倒装互连后的红外探测器芯片。从图 1(a)中可以看出, 减薄前的探测器芯片的衬底厚度较大, 且表面存在很多机械损伤。经背减薄后, 探测器芯片的衬底厚度明显减小, 表面的损伤也得到去除。

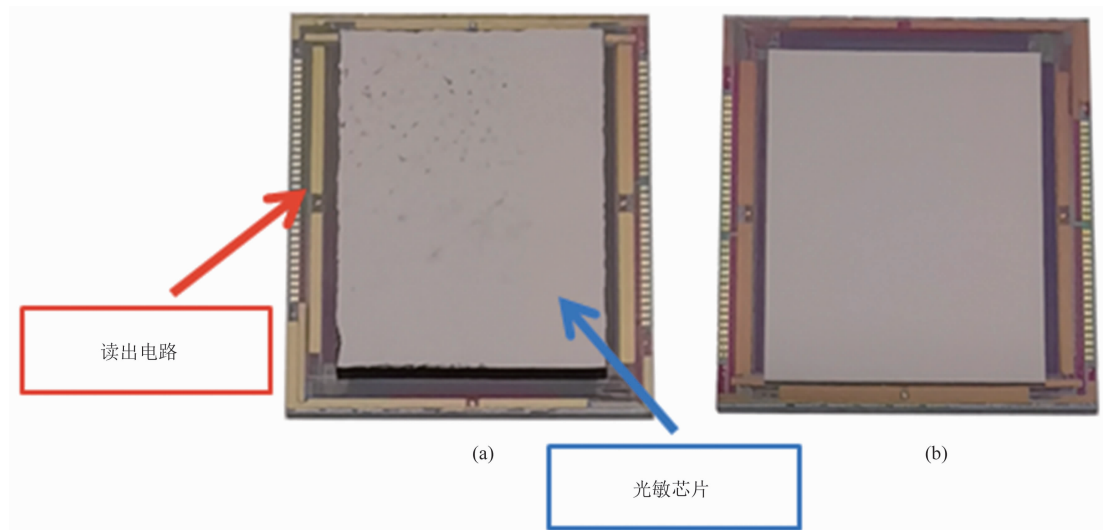


图 1 倒装互连后的探测器芯片(样品 A): (a)减薄前; (b)减薄后

互连芯片的背减薄由粗抛光和精抛光两个过程完成。粗抛光选择磨料尺寸为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的机械抛光, 在机械作用下快速去除衬底。考虑到 GaSb 材料硬而脆, 机械加工困难, 单一机械磨削会在衬底表面留下划痕, 所以粗抛光后要预留 $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚的衬底进行精抛光。精抛光是通过机械化学抛光方式消除粗抛光带来的机械损伤。机械化学抛光液由双氧水、磷酸、氢氧化钠和 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 氧化铝磨料构成。实验选择 PM5 型抛光机, 抛光过程示意图如图 2 所示。样品在粗抛光和精抛光工艺过程后, 利用测厚显微镜测量减薄后的芯片高度, 保证减薄后的衬底厚度剩余 $40\text{ }\mu\text{m}$ 左右。

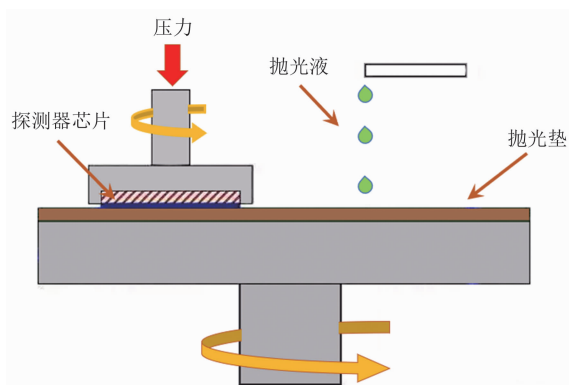


图 2 抛光工艺示意图

粗抛光削减了大部分衬底厚度, 精抛光则用于去除机械损伤, 改善表面质量。机械化学抛光是抛光液中氧化剂的化学腐蚀和磨料的机械磨削共同作用的结果, 衬底的表面质量取决于该过程中化学作用与机械作用的相对强度。在保证抛光过程中压力和转速一定的情况下, 通过磷酸溶液调配机械化学抛光液的 pH 值, 调控抛光过程的化学作用强度, 从而研究不同 pH 值抛光液对 GaSb 衬底的抛光效果。抛光液的 pH 值与加入酸含量的关系见表 1。利用检测显微镜和原子力显微镜表征机械化学抛光后衬底的表面情况, 初步判断不同 pH 值抛光液的化学作用与机械作用的相对大小。利用 X 射线双晶衍射法测试样品的损伤层, 进一步确定不同 pH 值抛光液的抛光效果。

2 结果与讨论

图 3 为聚焦离子束扫描电子显微镜(Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscope, FIB-SEM)得到的微区解剖图像。可以看出, 背减薄后的衬底厚度剩余 $42\text{ }\mu\text{m}$ 左右。保留一定厚度的衬底, 一方面能够满足探测红外光透过的要求, 另一方面还能为深台面结构的光敏芯片提供足够支撑, 保障芯片在开关机过程温度冲击下的稳定。

利用放大 100 倍的检测显微镜观察衬底表面(结果见图 4)。其中没有添加磷酸溶液的抛光液的 pH 值为 11.8。精抛光后衬底表面存在较多的腐蚀坑。由于机械化学抛光液与衬底作用, 造成了过度腐蚀, 在机械剥离作用下形成腐蚀坑。添加 1% 的磷酸体系溶液后, 抛光液的 pH 值为 10.2。此时衬底表面上的腐蚀坑数量明显减少。当添加 1.4% 的磷酸体系溶液后, 抛光液的 pH 值为 9.4。此时衬底表面平整光滑, 没有出现明显的腐蚀坑, 且表面也没有明显的机械划痕, 说明机械与化学作用接近, 具有很好的抛光效果。当 pH 值低于 8.3 后, 衬底表面出现一些明显的划痕, 此时的机械作用较强, 机械摩擦产生划痕。

利用 X 射线双晶衍射法表征衬底损伤情况。测试结果列于表 2 中。可以看出, 经 pH 值为 9.4 的机械化学抛光液抛光过的样品表面的加工损伤层最小, 而随着抛光液 pH 值的降低, 机械作用增强, 机械作用相对强度增大, 在衬底表面留下的机械划痕增多, 表面损伤程度呈现增加趋势。而抛光液 pH 值过高时, 存在化学腐蚀坑也使得衬底表面损伤程度较高。结合检测显微镜结果可以判断, 当抛光液 pH 值为 9.4 时, 更有利于获得高质量的衬底表面。利用原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)表征抛光液(pH 值为 9.4)抛光后的衬底表面, 获得的立体形貌如图 5 所示。可以看出, 衬底表面粗糙度降低到 2.6 nm 。

表 1 抛光液 pH 值与磷酸体系溶液比例的关系

样品编号	1	2	3	4	5	6
酸含量/%	0	1	1.4	1.8	2.5	3.0
抛光液 pH 值	11.8	10.2	9.4	8.3	7.5	6.8

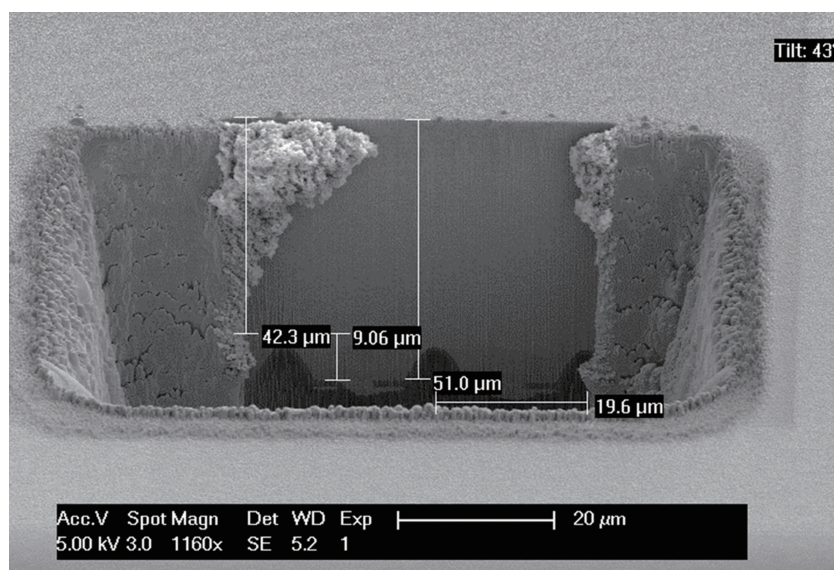


图 3 背减薄后衬底厚度的 FIB-SEM 图像

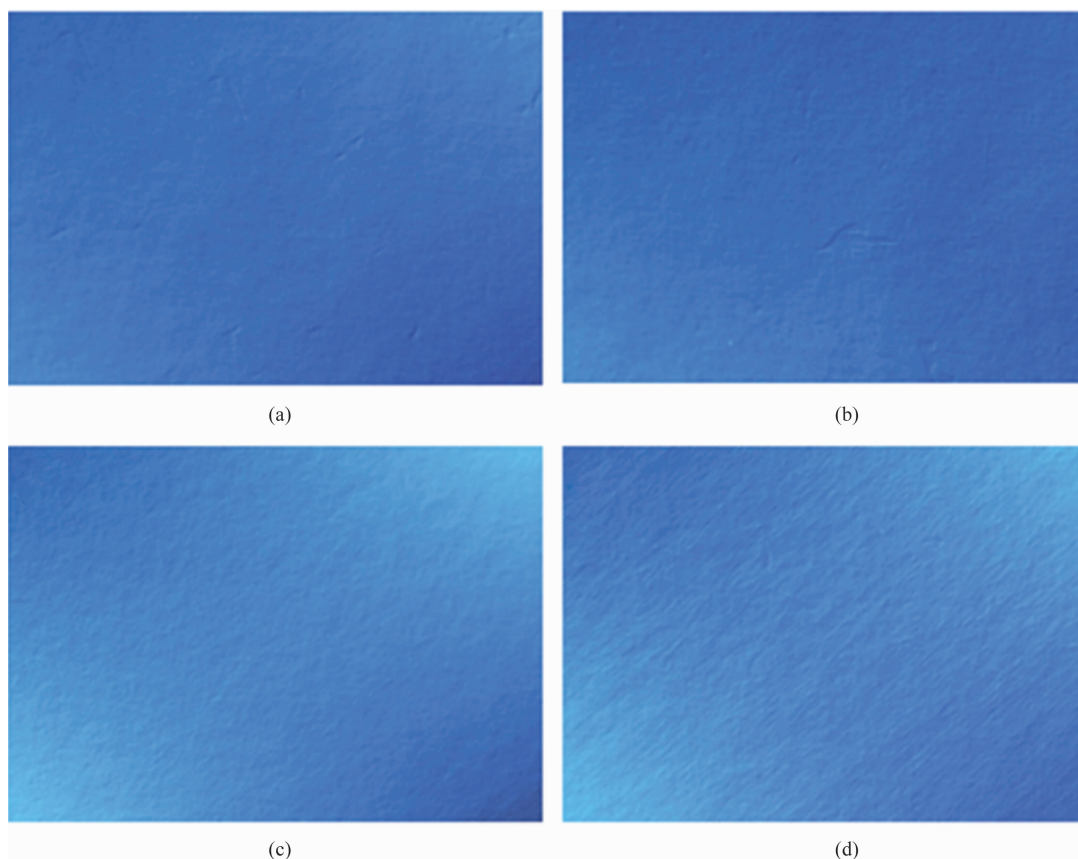
图 4 不同 pH 值抛光液抛光后的表面形貌图(放大 100 倍): (a) pH 值为 11.8;
(b) pH 值为 10.2; (c) pH 值为 9.4; (d) pH 值为 8.3

表 2 不同 pH 值抛光液对衬底的损伤

样品编号	1	2	3	4	5	6
抛光液 pH 值	11.8	10.2	9.4	8.3	7.5	6.8
半峰宽 α''	45.7	25.4	12.5	18.9	55.6	185.4

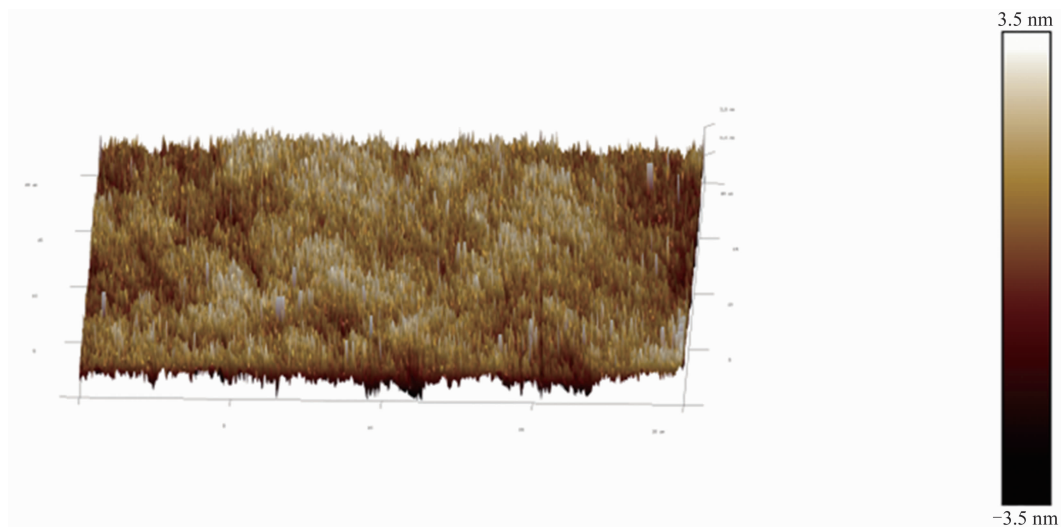


图 5 AFM 立体形貌

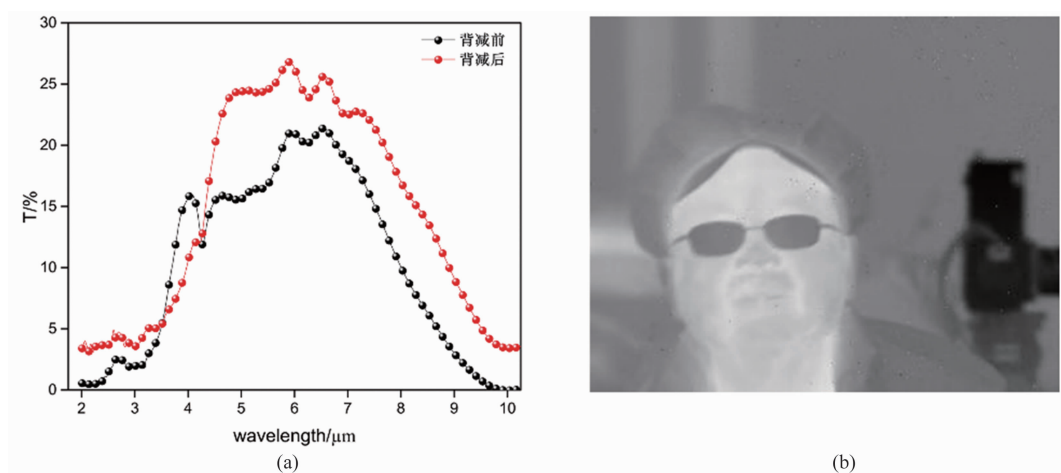


图 6 探测器组件封装测试: (a)光谱透过率曲线; (b)成像效果图

将该探测器芯片封装到微杜瓦内, 测试减薄后红外探测器的光谱透过和成像情况(结果见图 6)。从图 6(a)中可以看出, 背减薄前, 探测器的光谱透过率均低于 20%; 背减薄后, 探测器的光谱透过率有了明显增加, 其中 4.5 ~ 5.4 μm 波段的透过率提升 66% 左右, 5.4 ~ 10 μm 波段的透过率提升 25% 左右。从图 6(b)中可以看出, 红外图像层次较分明, 轮廓清晰, 图像表面没有出现多余的线条和污点, 说明 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器件的背减

薄工艺适配性好; 机械化学抛光液的 pH 值为 9.4 时, 获得了高表面质量的 GaSb 衬底, 进而实现了高成像品质的红外探测器组件。

3 结束语

本文主要研究了 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器芯片背减薄后的衬底情况。结果表明, 机械化学抛光液的 pH 值显著影响机械化学抛光过程的化学作用强度。当 pH 值较高时, 化学腐蚀作用明显, 在衬底表面留下明显的腐蚀坑。当 pH 低于一定值时, 化学腐蚀作

用变差,机械作用相对增大,在衬底表面留下机械划痕。腐蚀坑和机械划痕的存在,都使得衬底表面损伤较大。而当抛光液的 pH 值为 9.4 时,机械作用强度与化学腐蚀强度相匹配,抛光后样品表面损伤小,粗糙度小,探测器组件成像效果好。机械抛光结合机械化学抛光的背减薄工艺,不仅可以实现衬底厚度的快速去除,而且还可以获得高质量衬底表面,为探测器组件的高品质成像提供支持。该工艺为 II 类超晶格材料在红外探测领域的产业化发展奠定了重要基础。但是,这种背减薄工艺过程中长时间受外加压力作用,对探测器芯片的结构稳定性有一定影响,在成品率提升方面还有优化空间。

参考文献

- [1] Sakaki H, Chang L L, Sai-Halasz G A, et al. Two-dimensional Electronic Structure in InAs-GaSb Superlattices [J]. *Solid State Communications*, 1978, **26**(9): 589-592.
- [2] Smith D L, Mailhot C. Proposal for Strained Type II Superlattice Infrared Detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(6): 2545-2548.
- [3] Talwar D N, Jogai B, Loehr J P. Novel Type II Strained Layer Superlattices for Long Wavelength Infrared Detectors [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 1998, **51**(1-3): 12-17.
- [4] 徐志成. InAs/GaSb II 类超晶格探测器结构 MBE 生长研究 [D]. 北京: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [5] Hoang A M, Dehzangi A, Adhikary S, et al. High Performance Bias-selectable Three-color Short-wave/Mid-wave/Long-wave Infrared Photodetectors Based on Type-II InAs/GaSb/AlSb Superlattices [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 1-7.
- [6] Bai Y B, Bai Y B, Zhao Y W, et al. N-type GaSb Single Crystals with High Below-band Gap Transmission [J]. *Chinese Physics B*, 2017, **26**(10): 107801.
- [7] 李海燕, 曹凌霞, 陈籽先, 等. 大面阵锑化铟探测器芯片背减薄工艺技术开发 [J]. *红外*, 2023, **44**(2): 8-12.
- [8] 边子夫, 李晖, 徐世海, 等. GaSb 单晶片 CMP 工艺的研究 [J]. *微纳电子技术*, 2017, **54**(11): 797-800.