

文章编号: 1672-8785(2019)04-0018-07

4 in InSb 晶片加工技术研究

赵 超 徐鹏艳 孔忠弟 彭志强

王小龙 庞新义

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 在红外探测领域, InSb 材料已经大规模地被用于制造 3~5 μm 波长范围的焦平面阵列探测器。对更大规模、更高性能探测器的需求日益增长, 而该类探测器需要在更大尺寸、更高质量的晶片上制备。所以, 对 4 in InSb 晶片加工技术进行了研究。通过优化研磨、抛光工艺参数, 最终获得总厚度偏差小于等于 10 μm 、翘曲度小于等于 20 μm 、表面粗糙度小于 1 nm、表面质量优的 4 in InSb 晶片, 提高了加工效率, 能够满足大规模高质量红外焦平面探测器的使用需求。

关键词: InSb; 4 in; 总厚度偏差; 翘曲度; 表面粗糙度; 表面宏观质量; 研磨; 抛光

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.04.003

Research of 4 in InSb Wafer Processing Technology

ZHAO Chao, XU Peng-yan, KONG Zhong-di, PENG Zhi-qiang, WANG Xiao-long, PANG Xin-yi

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In the field of infrared detection, InSb materials have been widely used to fabricate focal plane array detectors in the wavelength range from 3 to 5 microns. There is a growing demand for larger, higher performance detectors that need to be fabricated on larger, higher quality wafers. Therefore, the processing technology of 4-inch InSb wafers is studied. By optimizing the grinding and polishing parameters, 4-inch InSb wafers with a total thickness deviation of 10 μm or less, a warpage of 20 μm or less, a surface roughness of less than 1 nm, and excellent surface quality were obtained, which improves processing efficiency and can satisfy the need to use large-scale high-quality infrared focal plane detectors.

Key words: InSb; 4 in; total thickness deviation; warp; surface roughness; surface macro-quality; grinding; polishing

0 引言

InSb 是一种 III-V 族化合物半导体材料, 因其具有极高的电子迁移率、非常窄的禁带宽

度、优良的红外探测能力等优点, 被应用于热成像、自由空间通讯、光电子集成电路等^[1]。目前, 红外探测领域已经将该材料大规模地用

收稿日期: 2019-03-26

作者简介: 赵超(1986-), 男, 山东临沂人, 硕士, 主要从事 InSb 材料方面的研究。

E-mail: zhaochaod@163.com

于制造 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波长范围的红外光电探测器, 并逐渐由最早的单元光敏器件发展到现在的 2048×2048 焦平面阵列^[2]。随着 InSb 探测器制备技术的日渐成熟, 对更大规模、更高性能探测器的需求日益增长, 而该类探测器需要在更大尺寸的晶片上制备^[3]。现国内可制备 InSb 晶片的最大尺寸仅为 3 in, 研制 4 in 甚至更大尺寸的 InSb 晶片材料迫在眉睫。

这些年随着国内对红外材料等基础材料研究的支持, 质量较优的 4 in InSb 晶体材料已经研制成功^[4]。但是红外焦平面探测器用的 InSb 晶片不仅对位错、电参数等晶体质量参数要求较高, 而且对总厚度偏差(Total Thickness Variation, TTV)、翘曲度(Warp)、表面粗糙度、抛光表面质量等晶片质量参数也有较高的要求。TTV 是指晶片的最大厚度值与最小厚度值之差。随着探测器芯片尺寸的增加, TTV、Warp 会直接影响光刻、倒装焊、台面腐蚀等几个极其重要的探测器制备工艺的质量, 从而影响探测器的性能。表面粗糙度过高会导致器件的漏电流增加。抛光片表面的宏观缺陷会直接影响 InSb 光电器件的性能和成品率^[5]。综上所述, 急需优化 4 in InSb 晶片的各项质量参数。

InSb 材料软且脆, 相对于 2 in 的 InSb 晶片, 4 in InSb 晶片的厚度面积比仅为 2 in InSb 晶片的 32%。因此, 加工 4 in InSb 晶片比加工 2 in 晶片时更容易碎片, 加工过程中极易划伤、碎片, 且 TTV 很难控制。同时, 随着晶片尺寸的增加, 晶片的表面积大幅增大, 导致研磨抛光速度直线下降, 而且研磨抛光料在晶片径向分布上的差异会增大, 造成研磨抛光速率不同, 从而使晶片表面外形的质量变差, 不能获得满足要求的晶片。图 1 为 InSb 晶片的主要加工工艺流程。在加工过程中, 晶片研磨、晶片抛光工艺会直接影响晶片最终的 TTV、Warp 等外形参数, 其研磨压力、研磨转速、压盘工艺参数、盘型修整、抛光液温度、抛光液流量、抛光压力、抛光盘转速、粘

片工艺等均为影响晶片最终表面外形质量的工艺参数。本文在 4 in InSb 晶片研磨工艺方面, 对研磨压力、压盘工艺参数、盘型修整进行了优化调整; 在 4 in InSb 晶片抛光工艺方面, 主要针对抛光液温度、流量及粘片工艺参数、抛光盘转速、抛光压力进行了优化。

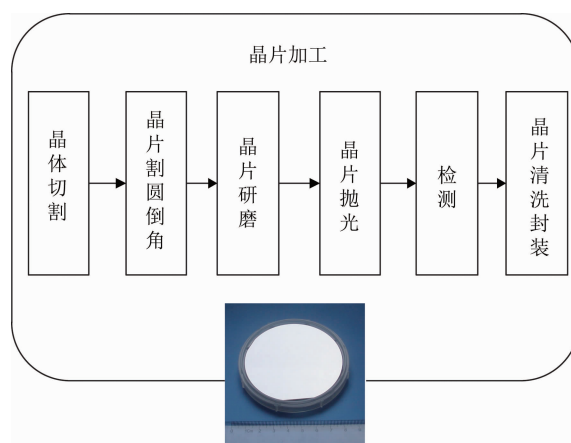


图 1 InSb 晶片加工流程图

1 实验和方法

1.1 4 in InSb 晶片研磨

研磨工艺的作用是, (1) 去除切割损伤层; (2) 为了后续抛光工艺质量, 增加晶片间厚度的一致性; (3) 控制晶片 TTV、Warp 等几何参数。所以, 在割圆倒角完成后需要对 InSb 晶片进行研磨。双面研磨的原理为, 将研磨的晶片放在游轮片内, 上下均有研磨盘; 研磨盘由中心齿轮和内齿圈组成的差动轮系驱动; 研磨压力则由气缸加压上研磨盘实现。为减少研磨时晶片所受的作用力, 一般使上研磨盘和下研磨盘分别以大小相等、方向相反的角速度旋转^[6]。晶片的运动由游轮片带动, 同时在上下研磨盘研磨压力的作用下产生自转。因此晶片的运动是行星运动和自转运动的合成运动^[7]。再加入一定比例具有一定流速的研磨液, 可以进行晶片表面磨削加工。双面研磨时磨削阻力小, 不损伤工件, 而且两面均匀研磨, 生产效率高, 原理如图 2 所示。针对 4 in InSb 晶片材料的性质, 我们选用双面研磨工艺进行晶片研磨, 主要对研磨压力、压盘工艺参

数、盘型修整等工艺参数进行优化。针对 InSb 材料的软脆性，我们选用特定材料制作的研磨盘和合适的研磨砂，调整研磨的压力和速率，最终获得 TTV 等参数较优的 InSb 晶片。

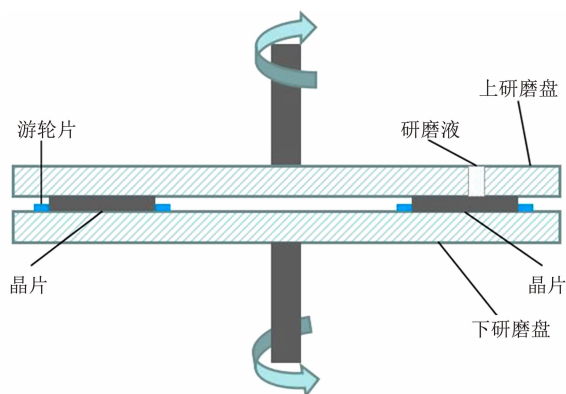


图 2 双面研磨工艺的原理示意图

1.1.1 研磨压力

对于 4 in InSb 晶片，由于表面积的增加，为了保持或进一步提高研磨效率，需要加大研磨压力。在有限范围内增加研磨压力能使晶片较厚处受到的压力更大，增强研磨工艺对晶片的修整作用。随着压力的增加，较大的研磨砂颗粒插入晶片表面更深的位置，增加了磨削力，而且随着参与切削的研磨砂增加，研磨速率上升。因此，应在适当范围内增大研磨压力。晶片的 TTV 随研磨压力变化的趋势是，随着压力增加，TTV 开始近似线性下降。针对研磨压力，进行了不同压力的研磨实验，获得的实验结果如图 3 所示。从图 3 中可以得出，随着研磨压力的增加，晶片 TTV 参数近似线性关系在改善。当研磨压力到达 6 kgf 时为最优值，但超过 6 kgf 时 TTV 变差。这可能是因为当压力增加到一定程度时，研磨液在晶片表面的流动性急剧恶化。在研磨盘与晶片结合紧密处新鲜的研磨砂无法进入，导致片上的研磨液分布不均匀。因此在压力增加到一定数值时，TTV 不再改善，反而有劣化趋势，而且过大的研磨压力会导致碎片率提升。所以最终采用 6 kgf 作为 4 in InSb 晶片的研磨压力。

1.1.2 压盘工艺参数

在研磨的初期阶段，由于晶片表面不能与

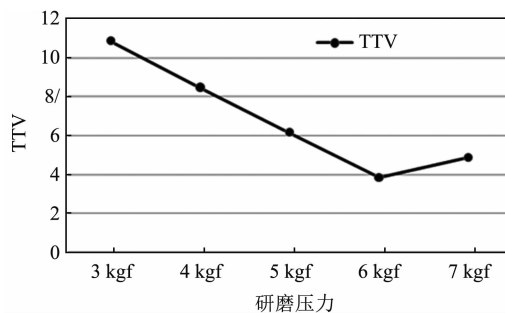


图 3 不同研磨压力下研磨后晶片的 TTV 值

研磨盘很好地耦合，晶片某些点处的压力会比较大。大的压力可能会导致晶片碎裂。针对大压力可能引起研磨初期的晶片碎裂问题，我们进一步优化了压盘技术，同时延长压盘研磨时间，待晶片和研磨盘充分耦合后再逐步加大压力。在上盘压盘时采取相应的缓冲措施保护晶片，在研磨盘快要接触晶片时配置反平衡压力，让上研磨盘缓慢地与晶片接触，从而解决了上研磨盘“硬着陆”对晶片造成崩裂的问题。通过多次实验，最终获得了表 1 所示的压盘工艺。通过该压盘工艺，大幅降低了晶片碎裂的概率，在一定程度上改善了晶片的 TTV 参数。

表 1 最终的压盘工艺参数

步骤	时间/min	研磨压力/kgf	转速/rpm
1	1	1.2	2.0
2	1	1.5	3.0
3	1	1.5	5.0
4	1	3.0	8.0

1.1.3 盘型修整

对于 4 in InSb 晶片，研磨压力增大会导致平整的研磨盘很容易变型，如图 4 所示。该种面型的研磨盘面会劣化晶片的 TTV、Warp 等指标。在工艺中加入修盘工艺，同时缩短修盘周期，最终通过修正上下研磨盘的面形来补偿晶片的平整度，优化了晶片 TTV 等参数。

1.2 4 in InSb 晶片抛光

经双面研磨后的晶片在平整度及损伤、厚度一致性较高的情况下，可以采用抛光工艺对晶片表面进一步加工。机械化学抛光 (Chemi-

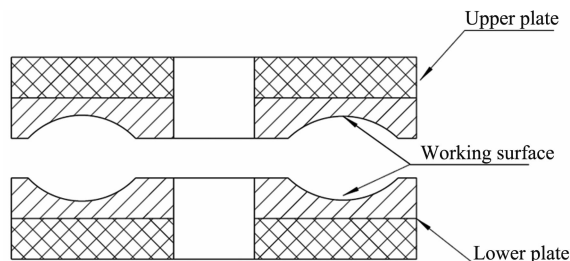


图 4 研磨盘上下变形

cal Mechanical Polishing, CMP)的原理是,将机械作用力和化学作用力一起作用于晶片表面,能够获得比仅用机械作用力小得多的晶片表面损伤层。在 CMP 过程中,抛光液中的氧化剂与材料表面的氧化反应弱化了材料表面的键能^[8]。同时,抛光液中的磨料与加工材料表面那些键能被弱化了了的分子/原子吸附,并被带出抛光区,实现材料表面的分子级加工去除^[8]。化学抛光液和晶片表面进行化学反应,分解晶片表面物质,形成络合物,然后在抛光液研磨料、抛光头、抛光盘的机械作用下,去除化学反应后的络合物,露出新的晶片表面,进行化学反应,周而复始实现 CMP^[9]。CMP 设备的基本组成部分为一个转动着的圆盘和一个抛光盘固定装置,圆盘转动,抛光盘自转,有自动供液装置,不停地给抛光过程提供一定配比流速的抛光液^[10],CMP 的工艺原理如图 5 所示。4 in InSb 晶片采用单面 CMP 工艺,该工艺能去除研磨带来的晶片表面损伤层,改善晶片的表面粗糙度,最终获得“镜面”表面的 InSb 晶片。在该工艺中,主要针对抛

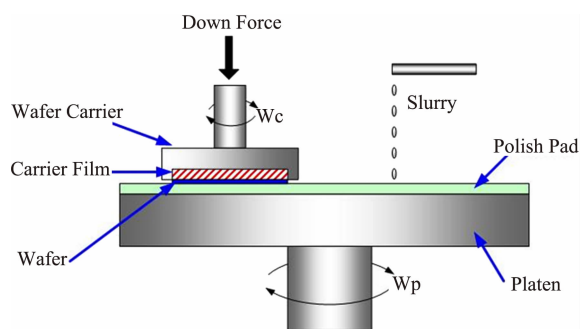
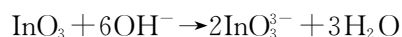
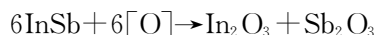


图 5 CMP 工艺的原理示意图

光液温度、抛光液流量、抛光压力、抛光盘转速、粘片工艺参数进行了优化。

InSb CMP 的化学反应式为



1.2.1 抛光液的温度

抛光液的温度是影响晶片抛光速率的一个重要参数。由于抛光液的化学特性,温度升高会导致抛光速率增加,而晶片的抛光速率与温度成指数关系。温度太高会导致抛光液过度挥发、发生快速的化学反应,从而影响了 CMP 的机械作用与化学作用的平衡,产生不均匀的抛光效果及抛光雾^[11]。所以采用冷却水循环来控制抛光液在抛光盘上的温度。基于 3 in InSb 晶片抛光工艺抛光液温度的基础,在该基点附近调整温度,进行实验,获得最佳抛光液温度值。实验结果见表 2。可以看到,抛光液的温度为 21~22℃时,晶片抛光表面质量最优。

表 2 4 in InSb 晶片抛光液温度试验

序号	20~21℃			21~22℃			22~23℃		
	划痕	亮点	橘皮	划痕	亮点	橘皮	划痕	亮点	橘皮
1	有	无	无	无	有少量	无	无	有大量	有小片
2	无	无	无	无	无	无	无	有少量	无
3	有	无	无	无	无	无	无	有少量	无
4	有	无	无	有	无	无	无	有大量	有小片
5	有	无	无	无	无	无	无	有少量	无
6	有	无	无	无	无	无	无	有大量	无
7	有	无	无	无	无	无	无	有大量	有小片

1.2.2 抛光液流量

抛光液流量是抛光工艺质量的关键工艺参数。过小的流量会使晶片与抛光垫之间的摩擦力增加,无法及时带走抛光时产生的热量。在晶片尺寸增大的情况下,晶片各个位置的温度不同,从而导致晶片的化学反应速率不同,最终劣化了晶片的几何参数和表面质量。适当的流量克服了上述缺点,还可以及时带走晶片表面的化学反应产物,保持晶片表面上化学反应速率一致,最终保证了晶片的几何参数和表面质量。由于晶片面积增大,需根据晶片面积的比例在 2 in InSb 抛光工艺抛光液流量的基础上做相应调整,2 in InSb 晶片的抛光液流量为 100 ml/min。根据面积比为 1.57,所以设定 4 in InSb 晶片的抛光液流量为 160 ml/min。

1.2.3 抛光盘的转速

根据现有抛光设备的具体情况,抛光盘的转动速度对抛光质量有很大影响。增加转动速率,可以增加抛光速率。如果转速过高,抛光垫上的抛光液很难均匀分布,而且会带来很强的机械力,造成晶片表面损伤大,晶片掉片几率增加,无法获得较好的工艺质量。如果转速过低,机械作用力小于化学反应速度,不能及时去除化学反应产物,也无法获得较好的晶片表面质量。要优化抛光盘转速,重要的一点是要保证晶片上每个部位有同样的线速度,这样才能使整盘晶片的平整程度一致。3 in 晶片抛光工艺的抛光盘转速为 15 rpm。晶片尺寸增加时,测试不同转速下晶片的抛光效果,结果见表 3。根据结果设定 4 in InSb 晶片抛光工艺抛光盘的转速为 20 rpm。

表 3 不同抛光盘转速的抛光效果

抛光盘转速/rpm	表面质量	晶片粘贴状态
25	划痕	掉片
20	较好	正常
15	表面氧化	正常

1.2.4 抛光盘压力

要提高晶片的表面质量,关键要平衡抛光

过程中的机械力与化学作用。由于晶片面积增大,需根据晶片面积比例在 2 in InSb 抛光工艺抛光液流量的基础上做相应调整。关于抛光压力,在抛光盘大小不变的前提下,也需根据晶片的总面积计算单位面积晶片所受的压力,从而确定抛光总压力。抛光压力计算公式为

$$F_4 = F_2 \times \left(\frac{D_4}{D_2}\right)^2 \times \frac{4}{10} \quad (2)$$

式中, F_4 、 D_4 为 4 in 晶片的抛光压力、晶片直径, F_2 、 D_2 为 2 in 晶片的抛光压力、晶片直径。由 2 in 晶片的抛光压力为 50 kg 可得,4 in 晶片的抛光压力为 80 kg。

1.2.5 粘片工艺

抛光过程中,InSb 晶片与抛光盘之间必须有足够强的粘合力,该粘合力能承受抛光时抛光垫与晶片表面间产生的横向摩擦力。我们选用专用蜡进行晶片与抛光盘之间的粘合。该粘片工艺能够产生所需的足够强的粘合力。但若粘片的工艺参数不合适,不但会影响抛光时晶片的牢固度,还会由于蜡在晶片上分布不均匀而影响抛光过程中晶片的平整度及一致性。因此,我们采用离心甩胶法解决蜡层在晶片上的分布及厚度均匀性。主要措施是将蜡滴在晶片上,然后通过晶片的高速度旋转,使蜡能均匀分布在晶片上。然后,将其放置于加热的抛光盘上,对该晶片由中心缓慢向四周逐步增加压力,使晶片在几何上均匀对称受力,以便能去除晶片与抛光盘之间的气泡,平整地粘接晶片,并保证其粘贴牢固。使用该种工艺能保证晶片的几何外形尺寸(TTV、Warp)参数。最终 4 in InSb 晶片的抛光工艺参数见表 4。

表 4 4 in InSb 晶片的抛光工艺参数

抛光液 温度	抛光液 流量	抛光盘 转速	抛光 压力	其他
21~ 22℃	160 ml/min	20 rpm	80 kg	采用粘蜡 工艺及离 心甩蜡法

2 结果与讨论

2.1 几何参数

使用非接触式几何参数测试仪对晶片的几何参数进行测量。该仪器利用电容原理, 通过上下两个探头测量出晶片的几何参数数据。通过对研磨以及抛光工艺的优化改进, 晶片的几何参数得到了较大幅度的提高, 结果见表 5。TTV 优化到 $3\sim 4\ \mu\text{m}$, Warp 优化到 $8\sim 15\ \mu\text{m}$ 。通过对研磨压力、压盘工艺参数、盘型修整、抛光液温度、抛光液流量、抛光压力、抛光盘转速、粘片工艺参数的调整, 使研磨液、抛光液在晶片表面分布均匀化, 晶片面上反应速率、压力一致, 晶片粘接后表面的平整度提高, 从而最终保证了晶片几何参数的优化。同时在提高晶片几何参数的同时, 增加了晶片研磨速率, 提高了工艺效率。

2.2 表面质量

使用白光干涉仪对晶片进行表面粗糙度检测。检测区域大小为 $120\times 95\ \mu\text{m}^2$, 选取中心

一个点和距离边缘 $5\ \text{mm}$ 的四个点, 测量结果见表 6。从表 6 中可以看到, 晶片表面的五点表面粗糙度平均值为 $0.2552\ \text{nm}$, 达到了原子级别平整的表面形貌。通过对抛光液温度、抛光流量、抛光压力等参数的调整, 使晶片微观表面的反应速度较均匀, 且抛光过程中物理去除与化学反应速率较一致, 使晶片的微观表面趋于平整。

图 6 为中心点(C 点)的白光干涉检测图像。可以看到, 晶片表面较均匀平整, 凸起以及凹陷小。

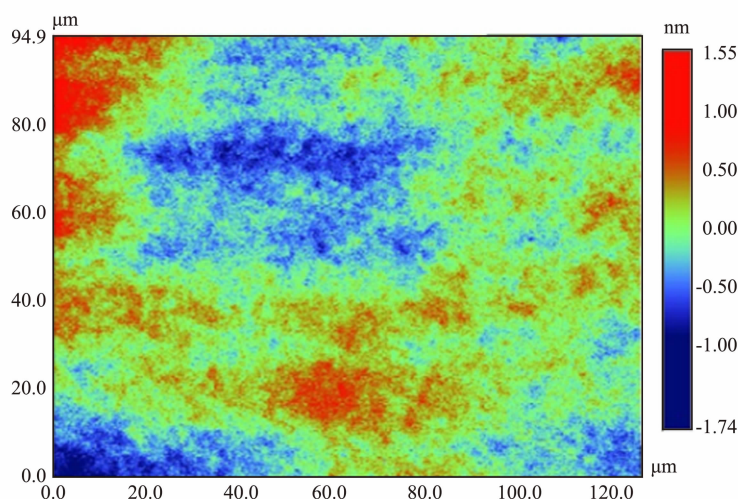
使用光学显微镜在暗场条件下对晶片抛光表面质量(宏观缺陷)进行检测。如图 7 所示, 晶片表面基本无抛光雾(Haze)、划痕、崩边、坑点、橘皮等宏观缺陷, 表面质量优。这是通过对抛光液温度、抛光液流量等影响化学反应的工艺参数以及抛光压力、抛光转速等影响物

表 5 研磨工艺改进前后对比

研磨工艺	研磨速率($\mu\text{m}/\text{min}$)	TTV(μm)	Warp(μm)
原工艺	0.8	10~12	20~25
现工艺	2.3	3~4	8~15

表 6 4 in InSb 晶片表面粗糙度的五点测量值

	A	B	C	D	E	平均值
表面粗糙度 $R_a(\text{nm})$	0.258	0.242	0.256	0.265	0.255	0.2552



Label	Value	Units
Average	0	nm
Ra	0.256	nm
Rp	1.551	nm
Rq	0.324	nm
Rt	3.291	nm
Rv	-1.740	nm

图 6 4 in InSb 晶片微观表面形貌图(白光)

理去除速度的工艺参数进行优化调整后,使晶片表面的化学反应物及时被物理反应去除,同时物理反应又不会超过化学反应速率的结果。

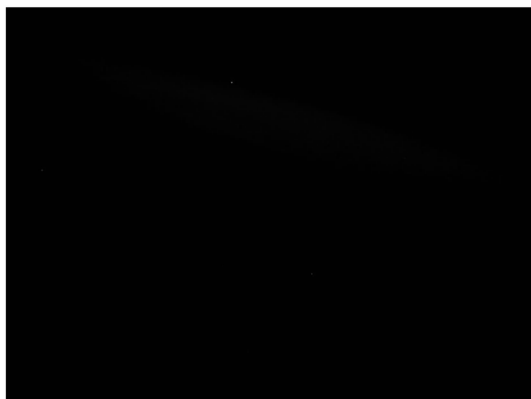


图 7 4 in InSb 晶片表面暗场照片

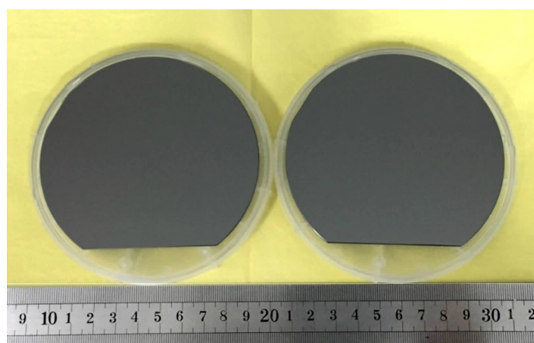


图 8 4 in InSb 晶片照片

3 结论

通过对大尺寸 InSb 晶片加工工艺,特别是研磨、抛光工艺的研究,最终成功加工出表面以及外形参数优良的 4 in InSb 晶片,达到了国外厂商同尺寸产品的质量水平。但在成品率方面需要进一步提高,从而为批量化生产打下基础。在下一步研究工作中,还需要对大尺寸高质量 InSb 晶片材料的表面氧化层、表面

颗粒度开展优化研究。

参考文献

- [1] Flint P, Allen L P, Dallas G, et al. CMP Process Comparison for 150 mm Larger Area InSb (111)B Focal Plane Array Substrates [C]. *SPIE*, 2009, **7487**: 74870C.
- [2] 巩锋,程鹏,吴卿,等. InSb 晶片材料性能表征与机理分析 [J]. *激光与红外*, 2013, **43**(10): 1146-1148.
- [3] Furlong M J, Martinez R, Amirhaghi S, et al. Scaling up Antimonide Wafer Production: Innovation and Challenges for Epitaxy Ready GaSb and InSb Substrates [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 801211.
- [4] 赵超,彭志强,柏伟,等. 100 mm 直径低位错密度 InSb 单晶生长研究 [J]. *红外*, 2018, **39**(3): 9-12.
- [5] 赵超. InSb 晶片的表面状态参数研究 [J]. *红外*, 2015, **36**(12): 18-26.
- [6] 徐安民. 蓝宝石晶片超光滑加工技术研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2007.
- [7] 金杨福,李伟,胡刚翔,等. 双面抛光加工运动过程分析与数学模型的建立 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, **37**(S1): 86-89.
- [8] 张伟,刘玉岭,孙薇,等. 磨料和 H_2O_2 对 InSb CMP 效果影响的研究 [J]. *半导体技术*, 2008, **33**(11): 1016-1019.
- [9] 种宝春,柳滨,宋文超. CMP 抛光机抛光盘温度的精确控制 [J]. *电子工业专用设备*, 2007, **36**(10): 14-16.
- [10] 李兴. 高速发展的化学机械抛光技术 [J]. *半导体杂志*, 1999, **24**(3): 31-34.
- [11] 狄卫国. 甚大规模集成电路制备中硅衬底精密抛光的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2002.