文章编号：1672-8785(2019)02-0007-07

单点金刚石切削 InSb 单晶的研究

程　雨　曹凌霞　肖　钰

（华北光电技术研究所，北京　100015）

摘　要：InSb 红外焦平面探测器一直在中波波段占据重要地位。随着科技的发展，迫切需要针对 InSb 单晶的精密加工方法。采用单点金刚石切削(Single Point Diamond Turning，SPDT)精密机床对 InSb 晶体进行减薄工艺开发。在机床加工工艺中，可变参数有主轴转速、单次去除量和进给速度等。通过正交试验，确定了单点金刚石切削 InSb 晶体的最佳工艺参数。对于切削后的 InSb 晶体，结合双晶衍射测试，其切削损伤低于 3 μm。InSb 红外器件流片证实单点金刚石切削 InSb 晶体工艺能满足用户的使用要求，获得较好的结果。

关键词：单点金刚石切削；精密加工；InSb

中图分类号：TN362　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2019.02.002

Study of Single Point Diamond Turning of InSb Single Crystal

CHENG Yu，CAO Ling-xia，XIAO Yu

(*North China Institute of Photoelectric Technology，Beijing 100015，China*)

Abstract：InSb Infrared Focal Plane Array (IRFPA) detectors have always occupied an important place in the medium infrared waveband. With the development of science and technology，it is urgent to find out a precision machining method for InSb single crystals. A precise Single Point Diamond Turning (SPDT) machine is used to make InSb crystal be thin. There are several variable parameters，such as spindle speed，cutting depth and feed rate etc，for SPDT machines. Through an orthogonal experiment，the optimal working parameters for single point diamond turning of InSb crystals are determined. By combining with the double crystal diffraction measurement，it is found that the damaged depth of cutted InSb crystals is less than 3 μm. This InSb device processing experiment shows that the SPDT technology meets users' requirements and achieves good results.

Key words：single point diamond turning (SPDT)；precision machining；InSb

0　引言

由于 InSb 单晶属于直接带隙半导体材料，在 3～5 μm 红外波段，光吸收形式为本征吸收，因此 InSb 中波红外器件具有极高的量子效率和响应率，在红外探测领域发挥着十分重要的作用。目前，InSb 红外探测器技术已完成由一维线列到二维焦平面阵列的过渡，正在向大规模/超大规模焦平面阵列发展。器件的

收稿日期：2019-01-09

作者简介：程雨(1989-)，女，黑龙江大庆人，工程师，主要从事红外材料与器件研究。

E-mail：chengyu0431@aliyun.com

规模越大(集成度越高)，对 InSb 红外器件背面减薄的要求就越严格。传统的磨抛方法很容易使 InSb 单晶表面嵌入较大的自由磨粒，通过后续的化学方法很难去除这些磨粒，易使光生载流子到达结区前被复合，从而产生盲元。因此很有必要寻求针对 InSb 单晶材料的精密/超精密加工方法。

单点金刚石切削技术是在 20 世纪 80 年代由一种脆性向延性转化的现象建立发展起来的精密加工技术[1]。通过优化加工参数，材料加工可发生在延性机制上，不依靠碎裂，而依靠形变来实现材料去除[1]。在没有其他操作辅助(如研磨、抛光等)的情况下，单点金刚石切削技术可直接获得微米级/次微米级的步进精度和纳米级粗糙度的材料表面[2]。结合特制的工作台，单点金刚石切削技术能精确控制加工形状和工作步距，可实现任意形状的加工，因此它比传统的磨抛方法更有优势。

本文采用 MMC600 单点金刚石切削精密机床，以不同参数加工后的 InSb 单晶表面粗糙度 Ra 为计算依据，通过正交实验对三个加工参数进行比较分析，开发 InSb 器件背面减薄技术，并通过双晶衍射测试对单点金刚石切削 InSb 材料带来的晶体损伤进行定量测试。最后通过流片来验证工艺的实用性。

1 实验方案

1.1 设备原理

MMC600 单点金刚石切削机床的工作原理如图 1 所示。主轴安装在静压气浮轴承上，轴向为 Z 轴。调整好动态平衡后，主轴的旋转精度很高。在主轴底部安装一个直径为 30 cm 的圆盘。通过夹具，在主轴圆盘边缘安装金刚石刀具。机床底部框架由沉重的大理石组成，在其上面安装 X 轴滑带，通过 4 个自调平气动隔离器对滑带进行精确控制。滑带能带动直径为 29 cm 的多孔陶瓷工作台在 X 轴轴向稳速进给，将待切削材料通过真空控制吸附在工作台上。通过控制主轴圆盘向下移动，步进精度为 0.2 μm；与待切削材料接触，伴随较高的主轴转速和稳定的 X 轴进给，实现厚度切削。切削加工会在材料表面引入沿切削路径的中频波纹，即微纹[2]。

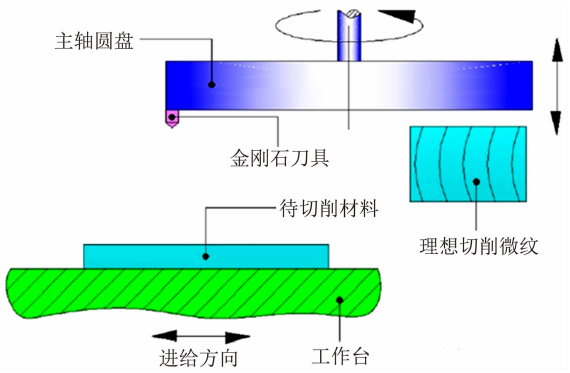


图 1 MMC600 单点金刚石切削机床的工作原理图

1.2 实验设计

在单点金刚石切削工艺中，加工参数有主轴转速 V、单次去除量 a_p 和进给速度 f 等。不同的加工参数使减薄后 InSb 表面产生不同的形貌变化。本文采用正交试验，以较少的试验次数高效经济地优化单点金刚石切削 InSb 单晶的工艺参数。

取 9 片同批次 Cz 法生长的<iii>InSb 单晶片，尺寸均大于 25×30 mm，厚度约为 600～650 μm。先用成熟的机械抛光方法对实验片表面进行相同条件的机械减薄，每片去除的厚度约为 150 μm，保证完全去除<iii>InSb 晶片切割损伤。再对 InSb 单晶片编号来区别。最后按照正交实验法对单晶片切削条件进行划分，三变量分别为主轴转速 V、单次下刀量 a_p 和进给速度 f，具体切削参数见表 1。表 1 中的切削参数均是在前期大量实验和国内外文献的基础上优化选定的，可作为加工条件。

本实验选用前角为 0°、后角为 8°且半径为 10 mm 的金刚石刀具，切削去除厚度须超过 60 μm，以保证每个单晶片至少经过两次切削，且将机械抛光造成的晶体损伤去除。由于单点金刚石切削机床特殊的平衡结构，主轴转速的改变会使实际切削深度产生变化。所以每当主轴的转速发生变化，需要先用此转速预热 1 h，再进行切削实验，以保证准确的切割深

度和稳定的切削结果[2]。切削过程中，保持机床周围无明显震动，温度保持在 22 ℃±1 ℃，湿度保持在 50%±10%，冷却液处于合适的喷射方向、风速和液体流速条件下。

表 1 单点金刚石切削 InSb 晶体的加工参数

晶片编号	主轴转速 V(r/min)	单次去除量 a_p(μm)	进给速度 f(mm/min)
1	1100	5	15
2	1100	20	30
3	1100	50	5
4	1300	5	5
5	1300	20	15
6	1300	50	30
7	1500	5	30
8	1500	20	5
9	1500	50	15

经过上述切削工艺后，对 InSb 实验片的表面用相同的有机试剂清洗，然后用 N_2 吹干。采用相同的白光干涉条件(均为移相(Phase-shift Interferometer，PSI)模式和 50 倍表面放大)进行表面粗糙度 Ra 测试和三维轮廓形貌观察；借助成熟的 0.02 μm 机械化学抛光方法和双晶衍射测试，获得由单点金刚石切削 InSb 单晶造成的损伤层厚度。结合实际情况，采用最佳的切削加工参数，对 128×128 面阵规模的 InSb 红外焦平面混成芯片进行背面减薄，进行工艺流片验证。

2 实验结果与分析

2.1 优化工艺参数

在显微镜下观察，切削加工通常会引入 3 种材料损伤：材料进刀侧面损伤、表面损伤和材料出刀侧面损伤。表面损伤类型是如前所述的中频微纹。侧面损伤类型主要是激增式爆裂，一般出刀侧面损伤比进刀侧面损伤更严重[2]。侧面损伤的厚度一般低于当前单次去除量 a_p 的 5 倍，容易通过后续化学方法去除[2]。因此，本文仅通过白光干涉测试仪关注表面形貌变化。为了消除实验误差，在每个单晶片上随机选取 3 个位置，以进行表面粗糙度测试，具体测试结果见表 2。

表 2 切削后实验片的表面粗糙度数据

晶片编号	切削后的表面粗糙度 Ra(nm)
1	2.02，1.45，1.25
2	3.99，2.74，3.75
3	1.63，1.04，1.56
4	2.29，1.89，1.61
5	4.03，2.28，3.46
6	7.21，6.34，7.33
7	7.15，4.78，4.89
8	2.39，1.12，1.59
9	2.68，2.22，2.89

取每个晶片表面粗糙度 Ra 的均值作为不同切削条件下 InSb 单晶表面的形貌特征，采用正交实验极差分析法对 Ra 均值进行比较分析，具体数据见表 3。其中，$\sum K_{ij}$ 代表所在列中标记为(i)的条件对应的 3 个 Ra 均值的和，$R_{极差}$ 代表所在列中 $\sum K_{ij}/3$ 的最大值与最小值之差。在极差分析法中，$R_{极差}$ 值越大，代表所在列的切削条件对 InSb 单晶表面形貌的影响越大。从表 3 可看出，对表面粗糙度 Ra 产生最大影响的工作参数是进给速度 f，其次是主轴转速 V，而单次下刀量 a_p 对表面粗糙度的影响最小。通过表 3 中每列 $\sum K_{ij}/3$ 的最小值(相当于表面粗糙度最小)，得出最佳工作参数，即 V 为 1100 r/min，单次去除量为 20 μm，f 为 5 mm/min。

采用金刚石刀具进行精密加工时，在仅考虑材料塑形形变的理想情况下，材料表面会形成轮廓峰和轮廓谷，它们之间的距离就是理论粗糙度 Ra，如图 2 所示。图中 F 为刀具每转的进给量(μm/r)。由此得出的理论表面粗糙度计算公式为

$$Ra = f^2/8RV^2 \quad (1)$$

式中，f、R 和 V 分别为本文中的进给速度(mm/min)、金刚石刀具的半径(mm)和主轴转速(r/min)[2]。

表 3 极差分析法所得的数据

晶片编号	主轴转速 V (r/min)	单次去除量 a_p(μm)	进给速度 f(mm/min)	Ra 均值 (nm)
1	1100(1)	5(1)	15(1)	1.62
2	1100(1)	20(2)	30(2)	3.48
3	1100(1)	50(3)	5(3)	1.45
4	1300(2)	5(1)	5(3)	2.00
5	1300(2)	20(2)	15(1)	3.55
6	1300(2)	50(3)	30(2)	6.93
7	1500(3)	5(1)	30(2)	6.79
8	1500(3)	20(2)	5(3)	1.57
9	1500(3)	50(3)	15(1)	2.57
$\sum K_{1j}/3$	2.18	3.47	2.58	—
$\sum K_{2j}/3$	4.16	2.87	5.73	
$\sum K_{3j}/3$	3.64	3.65	1.67	
$R_{极差}$	1.98	0.78	4.06	

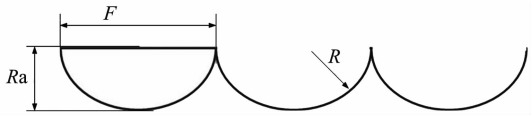
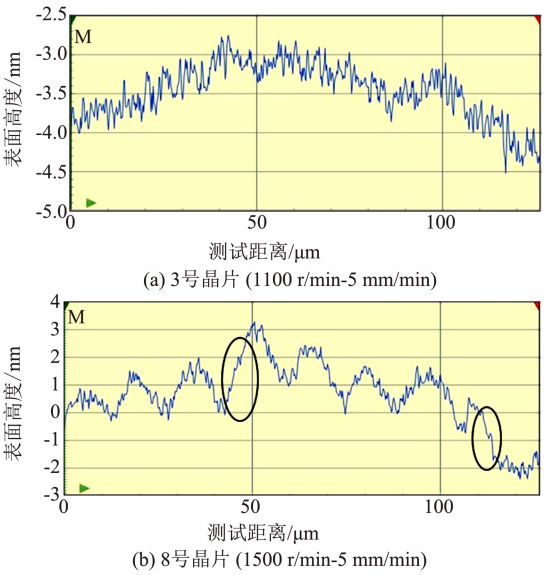


图 2 单点金刚石切削加工理想情况下的微观示意图

由式(1)可知，表面粗糙度值仅与进给速度、刀具半径和主轴转速有关，这与正交实验极差分析结论较一致。式(1)还表明，进给速度 f 越小，主轴转速 V 越大，表面粗糙度值就会越小，表面越光滑平坦。极差分析法得到的最佳进给速度 f 是所选参数的最小值，即 5 mm/min，符合理论 Ra 公式的意义；但最佳主轴转速 V 仍是所选参数的最小值，即 1100 r/min，似乎与理论 Ra 公式的意义相悖。这是因为对于被切削材料，如果主轴转速 V 过大，切削过程容易发生刀具干涉现象[3]。刀具干涉的具体特征是，刀具先切削去除的材料已经包含了本应该后切削去除的材料，比如刀具切削了 N 次，却只留下$(N-1)$个微纹。在主轴转速较大且进给速度较小的情况下，较容易发生刀具干涉现象[3]。图 3 为白光干涉测试获得的二维微观图片，横轴为测试距离，纵轴为表面高度，可见在相同的低进给速度但不同的主轴转速条件下获得的表面微纹间距规律是不同的，转速为 1100 r/min 的 3 号晶片表面微纹间距基本相同，而转速为 1500 r/min 的 8 号晶片表面微纹的间距却大小不一，图中已用圆圈标注出发生刀具干涉的位置。刀具干涉现象会造成切削过程不稳定，表面粗糙度变大。长期的刀具干涉现象会导致刀具品质降级，切削机制从延性转换到脆性，使切削后的材料表面快速变差。因此，对于<iii>InSb 单晶，1100 r/min 为最佳的主轴转速。

为了比较理论 Ra 值与实际 Ra 值的差异，将 1～3 号晶片的切削条件和金刚石刀具半径代入理论 Ra 公式中，数值对比结果见表 4。可以看出，实际的表面粗糙度值与理论值存在较大偏差。这是因为材料切削加工不仅存在塑形形变，还要考虑弹性形变。即使有冷却液的存在，在刀具切削材料表面时，材料接触面的温度也会瞬间升高，造成材料膨胀[4]。从方向上区分，材料膨胀包括横向膨胀和纵向膨胀。横向膨胀会导致表面微纹间距变宽，对表面粗糙度的影响较小。但纵向膨胀会直接导致



(a) 3号晶片 (1100 r/min-5 mm/min)

(b) 8号晶片 (1500 r/min-5 mm/min)

图 3 白光干涉仪测试二维照片

切削轮廓谷变深，增大了表面粗糙度[4]。材料膨胀后，还会发生一定程度地回弹。因此，实际表面粗糙度是塑性形变和弹性形变的综合结果。当刀具前角和单次去除量同时较小时，材料的膨胀效应能更大程度地被材料回弹修复，弹性形变的影响显著降低[4]。这就解释了 1 号晶片表面粗糙度的实际值与理论值的偏差比 2 号和 3 号晶片的偏差小得多的现象。此外，侧面损伤的厚度也与单次去除量正相关。因此，在实际切削中，为了获得完整的 InSb 探测器芯片和更稳定的 InSb 材料表面形貌，根据总去除厚度，采取单次去除量递减的分步切削工序。

表 4 表面粗糙度理论值与实际值的比较

晶片编号	理论 *Ra*(nm)	*Ra* 均值(nm)
1	2.32	1.62
2	9.30	3.48
3	0.26	1.45

根据极差分析法和理论 *Ra* 公式，进给速度对表面粗糙度的影响较大。实验还发现，进给速度越高，侧面损伤的厚度也会越深。因此，在分步切削工序中，单次去除量递减的同时，进给速度也采取递减的方式进行。

实际加工的表面粗糙度 *Ra* 还受不同加工材料的晶向、机床与刀具之间的振动、冷却液的匹配度、刀具的受损情况和安装刚度等因素的影响，本文暂不做讨论。

2.2 亚表面损伤层测试

由于单点金刚石切削工艺会在 InSb 晶片表面留有切削微纹损伤，纯化学抛光较难去除切削微纹。本文采用具有微弱机械作用的磨料粒径为 0.02 μm 的机械化学抛光方法，对切削后的 1～3 号 InSb 单晶片进行分步减薄，对 InSb 晶片产生的晶体损伤极小。再结合 X 射线双晶衍射测试，对单点金刚石切削 InSb 单晶的损伤层厚度进行表征。实验过程和测试数据见表 5，其中在步骤 1 后，已全部去除 InSb 晶片的表面微纹，FHMW(Full Width at Half Maximum)为利用双晶衍射法获得的衍射强度半高处的峰宽值，单位为 arcsec。

FHMW 表征单晶材料的晶格完整性。当达到一定去除深度后，如果继续减薄，FHMW 不再变小，说明加工损伤层已全部去除。由表 5 可知，7～10 arcsec 已经接近 X 射线双晶衍射测试的极限，且两次 FHMW 测试数值较稳定。因此，1～3 号 InSb 单晶片经单点金刚石切削加工后的亚表面损伤很小，小于 3 μm。Saurav Goel 等人通过分子动态(Molecular Dynamics，MD)模拟方法发现，单点金刚石切削加工时仅造成一层很薄的亚表面材料形变，

表 5 机械化学抛光方法与 XRD 测试的过程数据

晶片编号	步骤 1		步骤 2	
	去除量(μm)	FHMW(arcsec)	去除量(μm)	FHMW(arcsec)
1	3	8.10，7.78，7.98	3	7.64，8.34，8.50
2	3	7.15，8.14，7.40	3	7.70，7.89，8.10
3	3	9.70，9.35，8.76	3	8.56，7.69，9.63

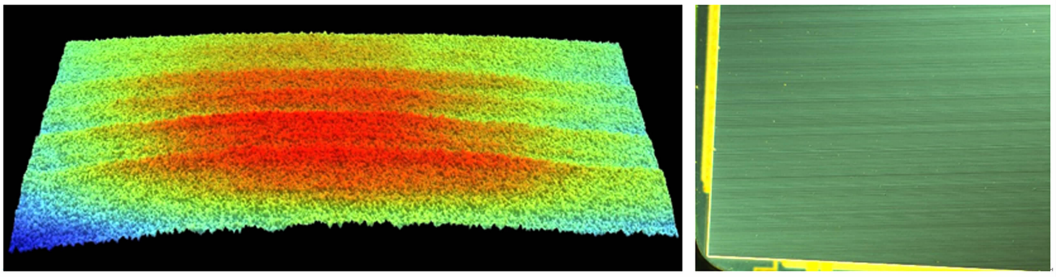
切削损伤很小[1]。本实验中损伤层的测试结果与其一致。

3 工艺实用性验证

InSb 红外焦平面混成芯片的背面减薄工艺中，一般需要去除<iii>InSb 材料的厚度约为 600～650 μm。为了去除切削损伤且便于工艺控制，预留约 15 μm 厚度进行机械化学抛光和化学抛光工艺。按照上述工作参数的优化分析，选择单次去除量和进给速度的合理搭配，可使芯片边角完整性和表面粗糙度得到优化，在最短的时间里，获得最好的结果。根据实际情况，制定了表 6 中 128×128 InSb 红外焦平面混成芯片背面减薄的切削工艺流程。经过表 6 工序切削的 InSb 混成芯片背部表面如图 4 所示。可见，切削后的 InSb 表面较光洁平坦，边角整齐，切削微纹的宽度很均匀。

表 6 单点金刚石切削加工 InSb 混成芯片的背面减薄工艺流程

主轴转速 V(r/min)	步骤	单次去除量 a_p(μm)	进给速度 f(mm/min)	运行次数 T	预计去除量 (μm)
1100	1	50	15	4～5	200～250
	2	20	12	10～11	200～220
	3	10	10	10～11	100～110
	4	5	8	10	50
	5	1	7	15	15



(a) 白光干涉仪照片(50倍放大)　(b) 金相显微镜照片(100倍放大)

图 4 切削后 InSb 表面照片

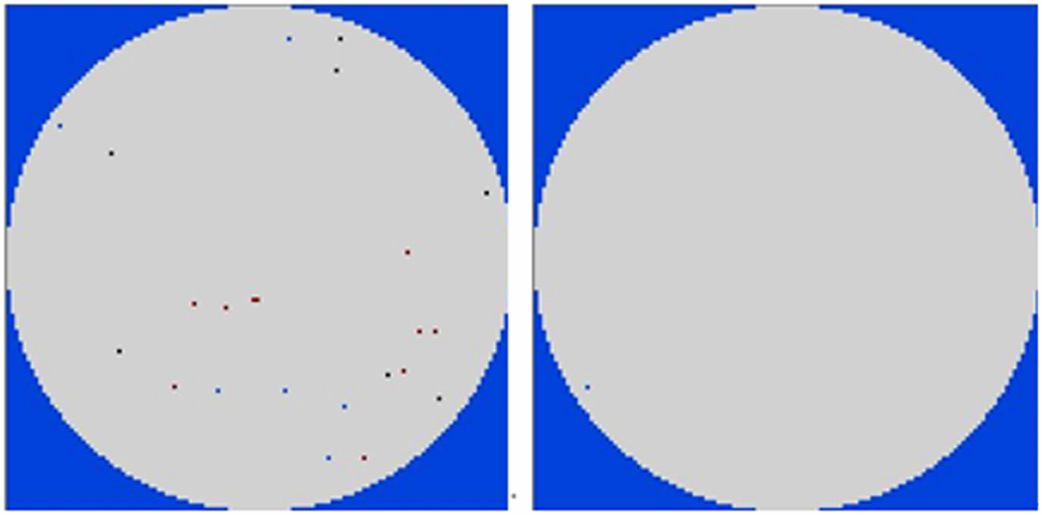
经 InSb 红外焦平面探测器制备工序制备和性能检测后，分别由传统磨抛减薄方式和单点金刚石切削减薄方式获得的 128×128 InSb 混成芯片的盲元图如图 5 所示。由图可见，在其他芯片制备工序保持不变的情况下，采用单点金刚石切削工艺取代传统机械磨抛方法，可获得更低的芯片盲元率，特别是连续盲元数目显著降低，从而能满足用户的使用要求，有利于高性能大规模/高集成度的 InSb 红外探测器的研制。

相比传统机械磨抛减薄工艺，单点金刚石切削<iii>InSb 单晶工艺具有以下优点：

(1)由于材料切削发生在延性机制上，且金刚石刀具耐磨损，硬度高，从根本上解决了 InSb 材料表面的杂质嵌入问题。对 InSb 红外探测器芯片来说，可减少光生载流子的表面复合，降低芯片盲元率，从而提高 InSb 红外探测器的性能。

(2)由于机床的步进精度高，可使材料的表面更平整；机床主轴旋转的精度高，且 X 轴的进给稳定性好，可使材料表面更光洁均匀，更有助于后续的机械化学抛光和化学抛光。

(3)单点金刚石切削加工对亚表面 InSb 材料的影响较小，切削损伤低。



(a) 传统磨抛减薄方式　　(b) 单点金刚石切削减薄方式

图 5 经减薄的 128×128 InSb 芯片盲元图

(4)单点金刚石切削工艺还具有抗杂质污染能力强、自动化程度高和加工过程可视化等优点。

综上所述，本文通过正交试验法快速有效地选出了最佳工作参数。结合理论分析，制定出了单点金刚石切削 InSb 红外焦平面混成芯片的背面减薄工作参数。InSb 单晶经切削后可获得较好的表面形貌和较低的加工损伤。在 128×128 InSb 混成芯片背面减薄工艺中，单点金刚石切削工艺可以取代传统的磨抛工艺，获得的器件性能较好，能满足使用要求。

4 结束语

对影响单点金刚石切削＜iii＞InSb 单晶质量的三种主要因素进行了分析。结合表面粗糙度的理论公式和文献报道，指出了主轴转速、单次去除量和进给速度对切削加工的实际作用，并定量测试了单点金刚石切削 InSb 单晶的加工损伤。通过流片验证，用单点金刚石切削工艺取代传统的机械磨抛工艺，可使 InSb 红外器件获得较好的性能。本文所研究的内容对单点金刚石切削 InSb 材料、提高 InSb 红外探测器芯片的性能都具有重要意义。

参考文献

[1] Goel S, Luo X C, Reuben R L. Wear Mechanism of Diamond Tools against Single Crystal Siliconin Single Point Diamond Turning Process [J]. *Tribology International*, 2013, **57**: 272-281.

[2] Chen M J, Li M G, Cheng J, et al. Study on Characteristic Parameters Influencing Laser-induced Damage Threshold of KH_2PO_4 Crystal Surface Machined by Single Pointdiamond Turning [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110**: 113103.

[3] Cheung C F, Lee W B. Characterisation of Nanosurface Generation in Single-point Diamond Turning [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, **41**: 851-875.

[4] Kong M C, Lee W B, Cheung C F, et al. A Study of Materials Swelling and Recovery in Single-point Diamond Turning of Ductile Materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, **180**: 210-215.