

基于减薄工艺的大量程测量研究

白阳, 梁津, 孙莉莉, 马标

中国电子科技集团公司第四十五研究所, 北京 100176

DOI:10.61369/ERA.2026070028

摘 要 : 碳化硅因其独特的材料特性和化学稳定性, 已成为第三代半导体的代表性材料。然而, 其最大减薄厚度可达传统硅材料减薄厚度的 50 倍, 传统测量方式已难以满足相应的测量需求, 因此亟需开发一种高精度、大量程的测量机构。本文介绍了超厚产品减薄过程中的测量原理与实现方法, 重点研究了如何通过升降机构来扩展测量仪的量程。基于该结构设计的位移传感器, 可实现 0 ~ 50mm 的测量范围, 测量精度达 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。实验结果表明, 该结构在超厚产品减薄工艺中具备良好的实时在线测量与加工性能, 展现出广阔的应用前景。

关 键 词 : 晶锭减薄; 大量程测量仪; 测量精度

Research on Large-Range Measurement Based on Grinding Technology

Bai Yang, Liang Jin, Sun Lili, Ma Biao

The 45th Research Institute of CETC, Beijing 100176

Abstract : Silicon carbide has become a representative material for the third-generation semiconductor due to its unique material properties and chemical stability. However, its maximum grinding thickness can be up to 50 times that of traditional silicon materials, making conventional measurement methods inadequate for corresponding requirements. Therefore, there is an urgent need to develop a high-precision, large-range measurement mechanism. This paper introduces the measurement principles and implementation methods for ultra-thick product grinding processes, with a focus on how to extend the measurement instrument's range through a lifting mechanism. The displacement sensor designed based on this structure achieves a measurement range of 0 ~ 50 mm and a precision of $\pm 3 \mu\text{m}$. Experimental results demonstrate that this structure exhibits excellent real-time online measurement and processing performance in ultra-thick product grinding processes, showing broad application prospects.

Keywords : ingot grinding; wide-range measuring instrument; measurement accuracy

引言

随着半导体行业的飞速发展, 半导体材料也在更新换代。第一代半导体材料以硅为主导, 技术成熟, 广泛应用于集成电路行业; 第二代半导体材料以砷化镓和磷化铟为主导, 主要应用于信息、光纤通信以及半导体激光器等领域; 碳化硅材料作为第三代半导体代表性材料, 具有高禁带宽度, 较高的击穿场强, 高热导率等诸多优点, 可应用于照明、显示等多个领域。近年来我国碳化硅行业发展速度较快, 5G、人工智能、新能源等发展提速, 对碳化硅需求猛增, 产业的关注度日益增高。产业链结构上看, 碳化硅器件的成本主要由衬底、外延、流片和封测等环节形成, 衬底在碳化硅器件成本中占比高达 45%, 是核心价值环节。从 2025 年开始, 8 英寸及以上的衬底“切磨抛”八成以上采用“激光剥离 + 晶锭 / 晶锭减薄 + CMP”的工艺路线^[1]。

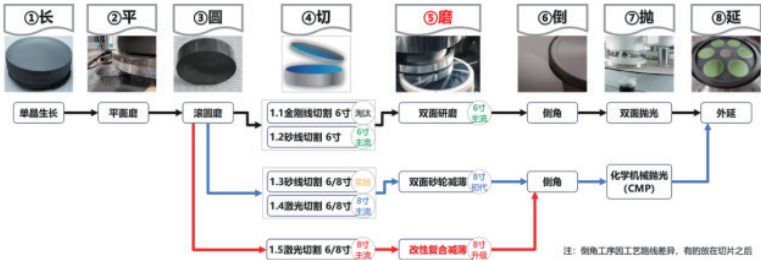


图 1 碳化硅衬底加工路线

作者简介：白阳（1990.11-），男，汉族，北京人，大学本科，高级工程师，主要从事半导体设备的电气设计工作。

一、传统晶片测量方式

传统晶片测量系统通过实时测厚方案对晶圆厚度进行在线监测，所需测量量程为 $\pm 2\text{mm}$ 。该系统与进给系统联动构成闭环控制，可精确控制减薄厚度，确保磨削加工质量。主要包括测子、测杆、原位传感器、冷却单元、安装座等部分。下图给出了传统测量模块结构图

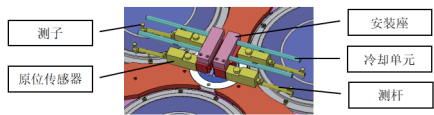


图2 传统测量模块结构图

在磨削过程中，碳化硅晶锭随承片台一同旋转，测量仪需持续搭接在晶锭表面，其测头会持续承受侧向力。同时，磨削水使磨削区域长期处于潮湿环境，因此测量仪的防水等级需达到 IPX8 及以上。为满足该工况下的减薄测量需求，本文选用了意大利马波斯（MARPOSS）公司 A10 系列接触式测量仪。该测量仪的最大量程为 $\pm 2\text{mm}$ ，重复精度达 $0.2\mu\text{m}$ ，能够满足一般工件厚度测量的高精度要求。^[2]

二、大量程测量仪测量方案

减薄加工过程中，下方承片台会因热膨胀而发生形变，单一测量仪无法排除形变对测量数值的影响。为保证测量精度，本文采用比较式测量方式，并同时配置测头 A 与测头 B 两套测量仪。两个测头分别同时搭接在承片台基准面和晶锭表面，通过计算二者高度差得出晶锭厚度，从而确保晶圆目标厚度的准确性与一致性。

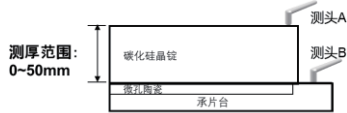


图3 大量程测量仪测量方式

大量程测量仪在原有测量仪的基础上增加了升降电机、升降模组及定位光栅。在原有测量功能之外，通过电机带动测头 A 升降，实现量程放大的需求，并借助精度为 $0.5\mu\text{m}$ 的定位光栅确保

测量精度。测量前，先将测头 A 和测头 B 同时搭接在空台面上，通过中间差值 $M = \text{测头 A 值} + \text{定位光栅值} - \text{测头 B 值}$ 计算出测头 A 与测头 B 之间的初始差值 M。在晶锭厚度测量过程中，通过公式晶锭厚度 $N = \text{测头 A 值} + \text{定位光栅值} - \text{测头 B 值} - M$ ，得出当前测量点位的晶锭实际厚度 N。

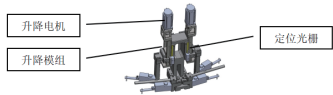


图4 大量程测量仪升降机构

大量程测量竖直轴采用微进给方案，对运动精度与响应速度均有较高要求，需采用闭环控制实现位置监测与反馈。光栅尺测量具备高分辨率、测量快速、适配性好、稳定性高等优点，已被广泛应用于精密与超精密机床设计中，且能够实现动态测量，充分满足进给系统对高精度运行的设计要求。因此，竖直轴选用敞开式光栅尺进行全闭环反馈。经选型，最终确定光栅尺型号为 MS15MK，可提供分辨率为 $0.5\mu\text{m}$ 的数字信号。由于竖直轴进给的最小分辨率要求为 $1\mu\text{m}$ ，采用 $0.5\mu\text{m}$ 分辨率的光栅尺理论上可实现 $1\mu\text{m}$ 的进给分辨率。^[3]

三、测量标定

测量仪安装后需进行线性标定。固定式测量仪（如测头 B）仅需对自身进行标定即可。而测头 A 固定在升降模组上，通过定位光栅进行位置反馈。由于光栅安装的平行度以及模组与承片台之间的垂直度都会对测量精度产生影响，因此需借助激光干涉仪进行一次线性标定后使用标准块对测头 A 进行二次线性标定。

（一）一次线性标定

将光栅尺接入驱动器，通过电子齿轮比匹配电机编码器脉冲与光栅尺实际位移。执行原点传感器初始化，重复 3~5 次以确认位置一致性。随后，从零点位置开始，以 1mm 为步距基准，驱动电机进行 50 组相对位移，并借助激光干涉仪反馈的数值，对 50mm 量程的光栅尺进行系统补偿，修正线性误差。修正完成后，复测全行程精度，光栅尺位置与激光干涉仪位置之间的误差小于 $1\mu\text{m}$ ，一次标定完成。

表1 一次线性标定数据

光栅尺值 (mm)	激光干涉仪值 (mm)	修正值 (mm)	光栅尺值 (mm)	激光干涉仪 值 (mm)	修正值 (mm)	光栅尺值 (mm)	激光干涉仪 值 (mm)	修正值 (mm)	光栅尺值 (mm)	激光干涉仪值 (mm)	修正值 (mm)
1	1.0001	0.0001	14	14.0041	0.0041	27	27.0103	0.0103	40	40.0157	0.0157
2	1.9986	-0.0014	15	15.0041	0.0041	28	28.0103	0.0103	41	41.0158	0.0158
3	3	0	16	16.0042	0.0042	29	29.0111	0.0111	42	42.017	0.017
4	4.0005	0.0005	17	17.0057	0.0057	30	30.011	0.011	43	43.0168	0.0168
5	5.0001	0.0001	18	18.0066	0.0066	31	31.0119	0.0119	44	44.0175	0.0175
6	5.9999	0.0001	19	19.0068	0.0068	32	32.0123	0.0123	45	45.0181	0.0181
7	7.0015	0.0015	20	20.0072	0.0072	33	33.012	0.012	46	46.0183	0.0183
8	8.0013	0.0013	21	21.0079	0.0079	34	34.0123	0.0123	47	47.0188	0.0188
9	9.0017	0.0017	22	22.0078	0.0078	35	35.0134	0.0134	48	48.0195	0.0195
10	10.002	0.002	23	23.008	0.008	36	36.0133	0.0133	49	49.0194	0.0194
11	11.003	0.003	24	24.0084	0.0084	37	37.014	0.014	50	50.0209	0.0209
12	12.0034	0.0034	25	25.0096	0.0096	38	38.0143	0.0143			
13	13.0029	0.0029	26	26.0099	0.0099	39	39.015	0.015			

表2 一次线性标定复测数据

标准块 厚度 (mm)	实测 厚度 (mm)	标准块 厚度 (mm)	实测 厚度 (mm)	标准块 厚度 (mm)	实测 厚度 (mm)	标准 块厚度 (mm)	实测厚度 (mm)
1	1.001	14	14.001	27	27	40	40
2	1.999	15	15.001	28	28.001	41	41.001
3	3.001	16	16.001	29	28.999	42	42.001
4	4.001	17	16.999	30	29.9996	43	42.999
5	4.999	18	17.999	31	31	44	44.001
6	6.001	19	19.001	32	32	45	45.001
7	7	20	20.001	33	33.001	46	46.001
8	8.001	21	21.001	34	34	47	47
9	9	22	22	35	34.999	48	48
10	10.001	23	23.001	36	36	49	49
11	10.999	24	24	37	37.001	50	50.0001
12	12.001	25	25.001	38	38.001		
13	13	26	26	39	39.001		

(二) 二次线性标定

根据初始厚度1mm、厚度间隔1mm、最终厚度50mm的要求，选取了50个标准块。首先在空台面上进行测量校零，计算中间差值M；随后将50个标准块依次放置于测量仪下方进行厚度测量，得到如下数据。

表3 二次线性标定前测量数据

标准块 厚度 (mm)	实测 厚度 (mm)	标准块 厚度 (mm)	实测 厚度 (mm)	标准块 厚度 (mm)	实测 厚度 (mm)	标准块 厚度 (mm)	实测厚度 (mm)
1	1.01	14	14.012	27	27.015	40	40.017
2	2.012	15	15.013	28	28.016	41	41.016
3	3.011	16	16.014	29	29.015	42	42.017
4	4.013	17	17.013	30	30.016	43	43.016
5	5.01	18	18.014	31	31.016	44	44.018
6	6.01	19	19.014	32	32.015	45	45.018
7	7.013	20	20.013	33	33.016	46	46.017
8	8.012	21	21.014	34	34.016	47	47.018
9	9.011	22	22.014	35	35.017	48	48.018
10	10.011	23	23.015	36	36.016	49	49.019
11	11.013	24	24.015	37	37.017	50	50.019
12	12.014	25	25.016	38	38.016		
13	13.013	26	26.014	39	39.018		

考虑到光栅尺安装可能存在的平行度误差，测量仪的二次线性标定采用分段校准方式，即对每一段均通过两点进行标定，并利用以下公式进行分段补偿：

$$k=(x_2-x_1)/(y_2-y_1) \quad (\text{式}-1)$$

$$b=y_1-kx_1 \quad (\text{式}-2)$$

四、结果与讨论

从一次线性标定数据可以看出，光栅尺安装后受安装间隙与平行度影响，其位置精度无法满足测量需求。50段测量误差非纯线性但呈递增趋势，因此需要进行分段线性误差修正。



图5 光栅尺校准前与激光干涉仪偏差值

修正后的复测数据显示，每1mm行程内的偏差可控制在1μm以内，满足测量要求。

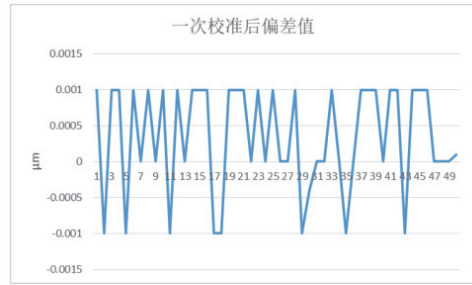


图6 光栅尺校准后与激光干涉仪偏差值

二次线性标定前实测厚度与标准块厚度偏差值非纯线性但呈递增趋势，表明模组与承片台之间非垂直，可通过分段校准方式进行厚度补偿。



图7 校准前实测厚度与标准块厚度偏差值

经过二次线性标定后，使用初始厚度为1.5mm、厚度间隔1mm的标准块进行复测，测量结果如下：

表4 二次线性标定后测量数据

标准块 厚度 (mm)	实测厚度 (mm)	标准块 厚度 (mm)	实测 厚度 (mm)	标准块 厚度 (mm)	实测 厚度 (mm)	标准块 厚度 (mm)	实测 厚度 (mm)
1. 5	1.499	14. 5	14.500	27. 5	27.500	40. 5	40.501
2. 5	2.501	15. 5	15.500	28. 5	28.501	41. 5	41.500
3. 5	3.499	16. 5	16.501	29. 5	29.500	42. 5	42.501
4. 5	4.502	17. 5	17.500	30. 5	30.500	43. 5	43.499
5. 5	5.500	18. 5	18.500	31. 5	31.501	44. 5	44.500
6. 5	6.499	19. 5	19.501	32. 5	32.500	45. 5	45.501
7. 5	7.501	20. 5	20.500	33. 5	33.500	46. 5	46.500
8. 5	8.501	21. 5	21.500	34. 5	34.500	47. 5	47.500
9. 5	9.500	22. 5	22.500	35. 5	35.501	48. 5	48.500
10. 5	10.499	23. 5	23.500	36. 5	36.500	49. 5	49.500
11. 5	11.500	24. 5	24.500	37. 5	37.501		
12. 5	12.501	25. 5	25.501	38. 5	38.499		
13. 5	13.501	26. 5	26.500	39. 5	39.501		

配置大量程测量组件并完成校准后，使用标准块进行了49组数据测量。测量厚度与实际测块厚度的偏差值为±2μm，满足目标厚度±3μm的技术要求。



图8 校准后实测厚度与标准块厚度偏差值

大量程、高精度的绝对式直线位移测量在碳化硅晶圆减薄过程中扮演着至关重要的角色。随着产业对大尺寸碳化硅需求的不断增长，对具备大量程与高精度的测量技术提出了更高要求，其核心特点在于量程范围大、精度高，并能够在减薄环境下实现实时在线测量。然而，目前绝大多数测量仪在精度与量程范围方面

已难以满足大量程减薄装备对测量技术的实际需求。高精度与大量程往往难以兼得，这为大量程绝对式直线位移传感器的设计与研发带来了挑战。综上所述，本文提出的大量程测量仪在保证高精度的同时，能够通过拼接技术实现量程扩展，为产业化发展注入新的活力。

参考文献

[1] 梁津, 赵岁花, 高岳. 碳化硅晶片减薄工艺试验研究 [J]. 电子工业专用设备. 2018, 47(01): 3-6+24.
[2] 江豪. 碳化硅晶片超精密磨床设计研究 [D]. 湖南: 湖南大学机械工程. 2025.
[3] 王博文. 拼接式直线时栅传感结构设计及优化 [D]. 重庆: 重庆理工大学机械工程. 2024.