

2019 年国家科学技术奖提名项目公示内容

(技术发明奖)

项目名称：大尺寸硅片超精密磨削技术与装备

提名者：教育部

一、提名意见

提名意见：

我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关内容符合国家科技奖的提名要求。

单晶硅片是集成电路（IC）芯片制造最主要的衬底材料，大尺寸硅片超精密磨削是IC芯片制造的关键技术之一。我国大尺寸硅片超精密磨削技术和设备完全依赖进口，成为制约“中国芯”制造的技术瓶颈之一。

该项目历时15年，系统研究了大尺寸硅片超精密磨削基础理论、技术及装备，主要技术发明包括：（1）发明了单颗粒金刚石纳米切深高速划擦试验方法与装置，发明了硅片的金刚石砂轮高效低损伤磨削工艺，研制出系列化金刚石砂轮。（2）发明了单晶硅等硬脆晶体的软磨料砂轮机械化学磨削新原理新技术，开发出磨削硅片的系列化软磨料砂轮及超低损伤磨削工艺。（3）发明了大尺寸硅片加工变形测量方法与设备，发明了消除硅片重力附加变形的计算分离法和液浸消除法。（4）发明了恒速进给磨削和控制力磨削相结合的高效磨削工艺及加工控制方法，研制出国内首台300mm硅片双主轴三工位全自动超精密磨床和国际首台300mm硅片双主轴两工位多功能超精密磨床。

研究成果已应用于我国首条国产300mm硅材料成套加工设备示范线中硅片的磨削以及激光反射镜的磨削加工。还可推广应用于蓝宝石等硬脆基片的超精密加工，应用前景广阔，社会效益显著。授权美国发明专利1项，中国发明专利31项，软件著作权2项，发表论文78篇；通过部级成果鉴定5项，获2018年高等学校技术发明奖一等奖和中国机械工业科学技术奖一等奖。

对照国家技术发明奖授奖条件，提名该项目为2019年度国家科学技术奖技术发明二等奖。

二、项目简介（限 1 页）

硅片又称硅晶圆，是制作集成电路（IC）的重要材料。运用注入、沉积、光刻等工艺在硅片上制成 IC 芯片，要求硅片具有超平整超光滑无损伤表面。超精密磨削主要用于衬底硅片的平整化加工和带图案硅片的背面减薄，磨削损伤导致的碎片将使高附加值的晶圆制造“前功尽弃”。大尺寸硅片磨削的规模化生产要求高效率和高成品率（99.99%），及极端加工精度和质量。而硅片高硬度、高脆性、大径厚比（300/0.75~300/0.05）、超薄低刚度（ $\leq 50\mu\text{m}$ ）的特点和易变形、易损伤、精度质量不易保证的难题，对先进的磨削工艺和装备提出了迫切需求。

本项目面向国家重大需求，承担国家重大项目，持续 15 年，系统研究了大尺寸硅片超精密磨削基础理论、工艺、关键技术及装备，主要技术发明如下：

（1）首创了单晶硅等硬脆晶体磨削机理研究的单颗粒金刚石纳米切深高速划擦试验方法与装置，揭示了单晶硅超精密磨削的材料去除和表面损伤形成机理，提出了在表面损伤深度和加工效率约束下的金刚石砂轮特性参数以及磨削工艺参数选择方法，发明了系列化的稳定自锐金刚石砂轮及其高效低损伤磨削工艺。在保证精磨去除率 $6\mu\text{m}/\text{min}$ 约束条件下，表面损伤深度控制在 70nm 以下。

（2）发明了软磨料砂轮机械化学磨削（MCG）新原理新技术。提出了“以软磨硬”的反常规磨削加工理念，发明了采用软磨料弱化机械作用和引入化学作用的低损伤磨削方法，发明了系列化软磨料砂轮，开发了低损伤磨削工艺，实现了硅片表面损伤深度 $\leq 15\text{nm}$ 的“超低损伤”磨削。

（3）发明了大尺寸薄硅片变形测量方法与设备。提出了硅片轮廓非接触扫描测量方法，发明了消除重力附加变形的计算分离法和液浸消除法，突破了薄硅片精确定位、激光位移测量结果修正等关键技术，研制出大尺寸薄硅片变形测量设备（精度 $\pm 1.7\mu\text{m}$ ）。

（4）发明了恒速进给磨削和控制力磨削相结合的高效低损伤磨削加工方法和加工过程控制策略，发明了多轴系磨床磨削硅片面型的控制策略和调整装置，突破了磨削力在线测量与控制、微量进给、多轴系磨床磨削硅片面型的控制、高精度气浮电主轴制造等关键技术，研制出国内首台 300mm 硅片双主轴三工位全自动超精密磨床和国际首台 300mm 硅片双主轴两工位多功能超精密磨床。

开发的超精密磨削工艺、砂轮和磨床的技术指标达到国外同类产品的先进水平，已应用于首条国产 300mm 硅材料成套加工设备示范线以及国内 IC 制造企业，满足规模化生产要求。研究成果具有自主知识产权，填补国内空白，打破了国外技术垄断，不仅为“中国芯”制造提供了技术支撑，还可推广应用于蓝宝石和碳化硅等硬脆晶体基片的超精密加工，具有广阔应用前景，社会效益显著。

授权国际发明专利 1 项，中国发明专利 31 项，软件著作权 2 项；发表论文 78 篇（SCI 收录 20 篇，EI 收录 43 篇）；通过省部级科技成果鉴定 5 项，鉴定意见为：技术成果整体居国际先进水平，部分技术居国际领先水平；**两项成果分别获 2018 年高等学校技术发明奖一等奖和中国机械工业科学技术奖一等奖。**

三、客观评价

1. 科技奖励

研究成果“大尺寸晶圆的高效低损伤减薄磨削理论与关键技术”获 2018 年教育部高等学校技术发明奖一等奖，“300mm 硅片超精密磨削技术与装备”获 2018 年中国机械工业科学技术奖一等奖。

2. 鉴定评价

蒋庄德院士为组长的专家组对“晶片超精密平整化磨削技术与装备”的鉴定意见为：该成果为国内首创，技术成果居国际先进水平，其中晶片超精密磨削过程中磨削力在线测量与监控技术居国际领先水平；对“金刚石砂轮超精密磨削单晶硅损伤控制理论与工艺”的鉴定意见为：该成果为国内首创，其中硬脆材料的单颗粒金刚石划擦试验研究居国际领先水平；对“大尺寸薄硅片加工变形测量与残余应力评价技术”的鉴定意见为：该成果属国内首创，其中液浸法消除重力影响获得硅片残余应力的技术成果居国际先进水平。雒建斌院士为组长的专家组对“大尺寸晶圆超精密磨削减薄工艺与设备”的鉴定意见为：技术成果整体居国际先进水平，其中设备的关键技术指标居国际领先水平；对“单晶硅片的软磨料砂轮机械化学磨削技术”的鉴定意见为：该技术成果居国际先进水平”。

3. 课题验收意见

国家 863 计划重点项目课题验收意见：该课题研制了超精密磨削直径 300mm 基片的双主轴三工位全自动超精密磨床，完成了合同规定的任务，实现了课题目标，验收专家组建议该课题通过验收。**国家科技重大专项（02 专项）课题验收意见：**课题组研制了 300mm 硅片超精密磨削机，各项技术指标满足 90-65nm 集成电路硅材料加工要求，达到了任务合同书的考核要求。实现了一台 300mm 磨削机的示范应用，经考核评估，结论合格。同意课题通过任务验收。

4. 用户评价

有研半导体材料有限公司的评价：研制的国内首台 300mm 硅片超精密磨床的性能指标和使用效果达到国际先进产品水平。硅片超精密磨削技术与装备自 2013 起在我国首条 300mm 硅片生产线中得到应用，磨床技术参数和工艺性能满足硅片规模化生产要求，打破了国外技术垄断，经济社会效益显著。

郑州磨料磨具磨削研究所有限公司的评价：应用大连理工大学的硅片超精密磨削技术成果所开发的金刚石砂轮产品于 2009 年定型，已形成了稳定销售，成为本公司的主打产品之一，为公司创造了显著的经济效益。研制的砂轮产品打破了国外的技术和产品垄断，为我国自主研发“中国芯”提供了技术支撑。

中国人民解放军国防科技大学的评价：应用大连理工大学开发的超精密磨削技术和装备加工单晶硅激光反射镜，获得了高精度和高质量表面，为军口 863 项目等国家重大项目的完成提供了支撑，具有重要的应用前景。

中芯国际集成电路制造（北京）有限公司的评价：经评估，有研半导体材料有限公司 12 英寸晶圆电性、良率和工艺可靠性达到了 90nm 技术节点的要求，

提供给我司的 12 英寸晶圆测试片在北京厂大规模使用。

台湾中国砂轮企业股份有限公司的评价：有研半导体材料有限公司 300mm 硅材料成套设备示范线生产的 300mm 硅片技术参数与我司基准片一致，已在我司大规模使用，截止 2017 年底，总采购量已超 10 万片，后续订单持续进行中。

北京燕东微电子有限公司的评价：郑州磨料磨具磨削研究所有限公司的金刚石砂轮，质量稳定，寿命满足晶圆磨削减薄要求，加工效率满足生产线节拍要求。取代进口砂轮在晶圆级封装生产线上应用成功，带来了显著的经济效益。

讯芯电子科技（中山）有限公司的评价：我公司批量采购郑州磨料磨具磨削研究所有限公司的树脂结合剂金刚石砂轮，用于 12"晶圆的背面减薄加工，经线上使用测试，砂轮磨削性能与进口砂轮相当，砂轮在磨削精度及稳定性、晶圆表面粗糙度、加工效率和砂轮寿命满足硅片磨削减薄的使用要求。

华进半导体封装先导技术研发中心有限公司的评价：采用大连理工大学开发的技术和装备对本公司减薄加工的基片加工变形进行测量，解决了困扰本公司多年的大尺寸超薄基片加工变形测量的难题，为加工工艺的改进提供了依据。

5. 检测报告

江苏省机床质量检测站依据无锡机床股份有限公司硅晶片磨床鉴定文件与合格说明书，根据 WXG45-99 标准、电气安全标准等对 WX-6008 型 Ø300mm 硅片全自动超精密磨床的主要规格参数和技术指标进行了型式试验，主要结论：技术指标符合工作精度要求，全自动晶片磨削机具有性能优良、精度好的特点。

机械工业组合机床及液压元件产品质量监督检测中心对本项目研制的 Ø300mm 晶圆双主轴两工位超精密磨床进行了检验，依据 GB15760-2004、GB5226.1-2008、GB/T20957-2007，JB/T11724-2013 等相关标准及“超精密晶片磨抛机”课题任务书进行了检验，共检验指标 70 项，全部达到标准要求。

机械工业组合机床及液压元件产品质量监督检测中心对本项目研制的大尺寸薄硅片变形测量数控气浮平台进行了检验，依据 GB15760-2004、GB5226.1-2008、GB/T18400.2-2010 等相关标准及“数控气浮平台”课题任务书进行了检验，共检验指标 60 项，全部达到标准要求。

国家磨料磨具质量监督检验中心对本项目研制的系列化金刚石砂轮和软磨料砂轮的磨削性能进行了测试，认为金刚石砂轮的磨削性能指标达到国外同类产品水平。软磨料砂轮的性能及其磨削硅片的质量满足课题指标要求。

6. 学术论文引用评价

学术成果发表在 Int J Mach Tool Manuf, Appl Surf Sci, J Non-Cryst Solids, Precis Eng, J Manuf Sci E-T ASME, Mater Sci Semicond Process 等权威期刊。得到了国内外学者的正面评价，如澳大利亚工程院院士 Liangchi Zhang 教授肯定了本项目发明的单颗粒金刚石纳米切深高速划擦试验新方法。美国著名学者 Komanduri 教授等认为本项目发明的软磨料化学机械磨削是大尺寸硅片低损伤磨削的理想方法。

四、推广应用情况

1. 应用情况

本项目研究的 300mm 硅片双主轴三工位全自动超精密磨床以及磨削工艺已应用于有研半导体材料股份有限公司，为我国首条 300mm 硅材料成套加工设备示范线提供了关键加工设备及先进加工工艺。利用本项目研究的超精密磨削技术和装备生产的硅片已批量供应于中芯国际集成电路制造（北京）有限公司、中国砂轮企业股份有限公司等单位。

本项目开发的硅片磨削用系列化金刚石砂轮已成为郑州磨料磨具磨削研究所有限公司的主要产品之一，稳定供应于华天科技、长电科技、北京燕东、讯芯电子、北京燕东等半导体企业，以及中国电子科技集团公司第 13 所和第 55 所等科研生产单位，用于硅片的平整化磨削以及晶圆的背面减薄磨削。经用户验证，所开发砂轮的磨削性能达到国外同类金刚石砂轮的水平，满足半导体企业硅片磨削的实际生产需求。

研制的大尺寸片加工变形测量方法与设备，在硅片加工变形测量中消除重力附加变形的方法等创新研究成果解决了大尺寸薄硅片加工变形测量的技术难题，已在本项目承担单位投入使用，用于测量大尺寸硅片的加工变形，为单晶硅片高效低损伤磨削工艺研究提供了测量评价手段。同时，也为华进半导体封装先导技术研发中心有限公司提供减薄硅片加工变形的测量服务，为该公司加工工艺的改进提供依据。

所开发的 300mm 硅片双主轴二工位超精密多功能磨床及低损伤磨削工艺用于国防科技大学军口 863 项目中 200mm 直径单晶硅平面反射镜的超精密磨削，磨削表面粗糙度 $Ra < 1 \text{ nm}$ ，面型精度 $PV < 2 \mu\text{m}$ ，为后续反射镜面抛光和修形加工提供了技术保障，为军口 863、国家基金重大研究计划集成项目等国家重大项目的顺利完成提供了支撑。

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间
1	有研半导体材料有限公司	硅片超精密磨削设备及工艺	我国首条 300mm 硅材料成套加工设备示范线的关键加工设备，1 台套。	2013.6-至今
2	郑州磨料磨具磨削研究有限公司	硅片超精密磨削砂轮特性参数与工艺参数选择方法	开发硅片磨削用系列化金刚石砂轮，已实现批量销售。	2004.5-至今

3	中芯国际集成电路制造（北京）有限公司	应用本项目成果生产的300mm硅片	90nm 技术节点 IC 芯片生产，大规模使用。	2015.1-2017.6
4	中国砂轮企业股份有限公司	应用本项目成果生产的300mm磨削硅片	300mm抛光硅片生产，大规模使用。	2016.1-2017.12
5	北京燕东微电子有限公司	所开发的金刚石砂轮及磨削工艺	取代进口砂轮，晶圆封装产品线上晶圆的超精密减薄加工	2013.3-2018.4
6	讯芯电子科技有限公司（中山）有限公司	所开发的金刚石砂轮及磨削工艺	12寸晶圆背面减薄加工，53片金刚石砂轮。	2015.1-2017.12
7	国防科技大学	超精密磨削设备及工艺	高功率连续激光单晶硅平面反射镜超精密磨削，2件反射镜。	2017.8-2018.4
8	华进半导体封装先导技术研发中心有限公司	大尺寸硅片变形测量方法与设备	减薄硅片的变形测量，测试服务。	2016.4-2016.5

五、主要知识产权和标准规范等目录（不超过 10 件）

知识产权 (标准) 类别	知识产权 (标准)具 体名称	国家 (地区)	授权号 (标准 编号)	授权(标 准发布) 日期	证书编号 (标准批 准发布部 门)	权利人 (标准 起草单 位)	发明人 (标准起 草人)	发明专 利(标 准)有效 状态
发 明 专 利	Multifunctional substrate polishing and burnishing device and polishing and burnishing method thereof	美国	US9138855B2	20150922	US9138855B2	大连理工大学	康仁科, 朱祥龙, 董志刚, 冯光, 郭东明	有效专利
发 明 专 利	一种半导体晶片磨削力在线测量装置及控制力磨削方法	中国	ZL201010553691.X	20130130	1130706	大连理工大学	康仁科, 朱祥龙, 金洙吉, 郭东明	有效专利
发 明 专 利	一种硬脆晶体基片超精密磨削砂轮	中国	ZL200610134248.2	20081029	438821	大连理工大学	康仁科, 田业冰, 郭东明, 金洙吉, 高航	有效专利
发 明 专 利	一种多功能的基片磨抛装置及其磨抛方法	中国	ZL201210018459.5	20140423	1390189	大连理工大学	康仁科, 朱祥龙, 董志刚, 冯光, 郭东明	有效专利
发 明 专 利	一种硬脆晶体基片的无损伤磨削方法	中国	ZL200610134249.7	20081217	453506	大连理工大学	郭东明, 田业冰, 康仁科, 金洙吉, 高航	有效专利
发 明 专 利	一种薄基片变形的测量方法	中国	ZL201310187846.6	20160106	1910076	大连理工大学	康仁科, 董志刚, 刘海军,	有效专利

	与装置						佟宇, 郭东明	
发明专利	一种消除重力影响的薄基片变形测量方法	中国	ZL201510496479.7	20180713	2997768	大连理工大学	董志刚, 康仁科, 刘海军, 高尚, 朱祥龙, 周平, 陈修艺	有效专利
发明专利	一种半导体晶片磨削砂轮对刀装置	中国	ZL200910181812.X	20120905	1042292	无锡机床股份有限公司, 大连理工大学	吕洪明, 郭东明, 康仁科, 储湘华, 朱祥龙	未缴费失效的专利
发明专利	一种用于脆硬材料磨削的超硬树脂砂轮及其制备方法	中国	ZL201510078163.6	20170412	2442691	郑州磨料磨具磨削研究所有限公司	惠珍, 丁玉龙, 丁春生, 叶腾飞	有效专利
发明专利	一种大直径硅片制造工艺	中国	ZL201010588498.X	20150624	1705564	有研新材股份有限公司	库黎明, 闫志瑞, 索思卓	有效专利

承诺: 上述知识产权和标准规范等用于提名国家技术发明奖的情况, 已征得未列入项目主要完成人的权利人(发明专利指发明人)的同意。

六、主要完成人情况表

排名	姓名	工作单位	完成单位	职务	职称	对本项目贡献
1	康仁科	大连理工大学	大连理工大学	所长	教授	<p>项目负责人，负责总体研究方案规划与组织实施，对技术发明点 1、2、3 和 4 作出了创造性贡献。发明了单颗金刚石纳米切深高速划擦试验方法与装置，提出了金刚石砂轮开发方案（发明点 1）；发明了软磨料砂轮机械化学磨削新原理新技术，提出了软磨料砂轮开发方案（发明点 2）；发明了硅片变形测量方法与装置（发明点 3）；发明了磨削力在线测量装置及控制力磨削方法（发明点 4），发明了多功能磨抛装置及其磨抛方法（发明点 1、4），提出了 2 种硅片超精密磨床设计方案。</p> <p>授权美国发明专利 1 项，中国发明专利 7 项；科技成果鉴定 5 项。</p>
2	董志刚	大连理工大学	大连理工大学	无	副教授	<p>对技术发明点 1、3 和 4 作出了创造性贡献。研制了单颗金刚石纳米切深高速划擦试验装置，确定了金刚石砂轮磨削单晶硅时延性域去除的临界加工条件，建立了单晶硅延性域磨削加工的亚表面损伤深度预测模型（发明点 1）；提出了采用大量程激光位移传感器和高精度运动平台的硅片轮廓扫描测量方法，发明了消除重力附加变形的计算分离法和液浸消除法（发明点 3）；发明了恒速进给磨削和控制力磨削相结合的高效磨削加工控制方法（发明点 4）。</p> <p>授权国际发明专利 1 项，中国发明专利 3 项；通过科技成果鉴定 5 项。</p>

3	朱祥龙	大连理工大学	大连理工大学	无	副教授	<p>对技术发明点 1、3 和 4 作出了创造性贡献。发明了多功能磨抛装置及其磨抛方法（发明点 1），研制了大尺寸硅片变形测量设备（发明点 3）；发明了砂轮轴—工件轴相对角度的独立调整方法以及双主轴三工位磨床多轴系相对角度的关联调整方法，研制了多轴系相对角度精确调整装置；发明了采用压电石英传感器的三向磨削力在线测量系统和控制力磨削系统（发明点 4）负责直径 300mm 硅片全自动超精密磨床和双主轴两工位超精密磨床的方案设计、结构设计、性能测试和应用试验。</p> <p>授权美国发明专利 1 项，中国发明专利 4 项；科技成果鉴定 5 项。</p>
4	闫志瑞	有研半导体材料有限公司	有研半导体材料有限公司	副总经理	教授级高级工程师	<p>对技术发明点 1 和 4 作出了创造性贡献。开展了的直径 300mm 硅片超精密磨削用系列砂轮的应用验证试验，为系列砂轮的实际应用积累了重要的数据参考（发明点 1）。参与了直径 300mm 硅片超精密磨床的功能需求分析、方案设计、性能测试与应用试验，负责超精密磨床在首条国产直径 300mm 硅材料成套加工设备示范线中的应用验证和性能考核工作，负责超精密磨削工艺在生产中的应用，以及 300mm 硅片磨削加工精度和质量的分析（发明点 4）。</p> <p>授权中国发明专利 1 项。</p>
5	丁玉龙	郑州磨料磨具磨削研究所有限公司	郑州磨料磨具磨削研究所有限公司	无	高级工程师	<p>对技术发明点 1 作出了创造性贡献。负责晶圆超精密磨削用金刚石砂轮的开发与应用。完成了金刚石砂轮的组织与结构设计，开发了金刚石砂轮的制造工艺，研制了用于晶圆粗磨、半精磨和精磨加工的系列化金刚石砂轮，研究了金刚石砂轮的组织特性对砂轮磨削性能的影响规律，确定了金刚石砂轮超精密磨削晶圆的合理加工参数。</p> <p>授权中国发明专利 1 项。</p>
6	吕洪明	无锡机床股份有限公司	无锡机床股份有限公司	无	高级工程师	<p>对技术发明点 4 作出了创造性贡献。设计了高回转精度高刚度的空气轴承电主轴，完成了电主轴热特性分析及冷却系统的设计；研究了电主轴零部件连接、装配技术，研制出空气轴承砂轮电主轴和工件电主轴，发明了磨削砂轮对刀装置及对刀方法。</p> <p>授权中国发明专利 1 项。</p>

七、完成人合作关系说明

“大尺寸硅片超精密磨削技术与装备”技术成果由大连理工大学康仁科、董志刚、朱祥龙、有研半导体材料有限公司闫志瑞、郑州磨料磨具磨削研究所有限公司的丁玉龙和无锡机床股份有限公司的吕洪明共同完成。具体合作情况如下：

1. 康仁科、董志刚、朱祥龙、闫志瑞共同承担国家 02 专项课题，研究硅片超精密磨削技术和设备，研究成果于 2018 年获教育部高等学校技术发明一等奖；
2. 康仁科、董志刚、朱祥龙、闫志瑞、吕洪明共同承担国家 02 专项课题，研究硅片超精密磨削技术和设备，研究成果于 2018 年获中国机械工业科学技术一等奖；
3. 康仁科、董志刚、朱祥龙共同完成“金刚石砂轮超精密磨削单晶硅损伤控制理论与工艺”等科技成果鉴定 5 项，共同申报美国专利 1 项、中国发明专利 2 项；
4. 康仁科、丁玉龙代表大连理工大学和郑州磨料磨具磨削研究所有限公司通过委托研制合同、委托检测合同等方式，共同开发了硅片超精密磨削专用系列金刚石微粉砂轮。所开发的砂轮于 2009 年定型并进行产业化推广。通过双方的合作研究，形成了一批专利等研究成果；
5. 康仁科、朱祥龙、吕洪明共同承担国家 02 专项课题，共同申请中国发明专利 1 项；
6. 康仁科、董志刚共同研究大尺寸硅片变形测量技术，获得共同知识产权；
7. 康仁科、朱祥龙共同承担国家 863 计划课题、国家自然科学基金重点项目等课题，获共同知识产权。