

汇智聚力 加强全国科技创新中心建设

——“2016年北京市科学技术奖”获奖项目巡礼(二)

编者按 加强全国科技创新中心建设既是推动首都发展的新引擎,也是供给侧结构性改革的着力点。近年来,北京市围绕国家经济社会发展重大需求,把科技创新作为推进供给侧结构性改革的重要内容和关键支撑,积极开展基础性、战略性、前沿性科学研究和共性技术研究,加大科技创新储备,积极培育先导技术和战略性新兴产业,布局了一批具有全局性、前瞻性、带动性的关键共性技术,并取得重大突破,有力的促进了新一代信息技术、新能源、新材料、数字化制造、轨道交通、生物医药、集成电路等重点产业领域的创新发展,为构建高端引领型产业增添了新的动力。在2016年度北京市科学技术奖评选中,一批具有自主知识产权的获奖成果解决了制约相关产业发展的关键技术瓶颈,为产业转型升级发展提供了重要的技术支撑,成为推动产业发展的核心动力。本期我们为您推荐的是其中的两个优秀获奖项目。

推动中国集成电路技术砥砺前行

本报记者 申明



科研人员在洁净室进行工作

小小的芯片承载我国科技创新的梦想和驱动力。集成电路芯片是信息时代的核心基石,它被誉为现代工业的“粮食”,更成为全球高科技竞争中的战略必争制高点。然而,长期以来,我国芯片产业一直受到西方在先进制造装备、材料和工艺引进等方面的种种限制,想要拥有自主知识产权的高技术芯片,就必须发展我国自己的集成电路制造体系。近年来,我国在集成电路芯片领域投入巨大人力物力,取得了显著成效。尤其是中科院微电子研究所集成电路先导工艺研发中心通过4年的艰苦攻关,在22纳米关键工艺技术先导研究与平台建设上,实现了重要突破。这让我国集成电路制造产业开始拥有自己的话语权,该成果也为我国继续自主研发16纳米及以下技术代的关键工艺提供了必要的技术支撑,表明我国已开始在全球尖端集成电路技术创新链中拥有了自己的地位。在2016年度北京市科学技术奖评选中,“22纳米集成电路核心工艺技术及应用”项目荣获一等奖。

“我们可以把栅极比喻为控制水管的阀门,开启让水流过,关闭截止水流。”中科院微电子研究所集成电路先导工艺研发中心主任赵超告诉记者,从65nm开始,我们已经无法让二氧化硅栅极介电质继续变薄,如果不能解决栅极向下的漏电问题以及源极和漏极之间的漏电问题,摩尔定律可能会失效,新一代处理器的问世可能变得遥遥无期。寻找比二氧化硅更好的“绝缘体”,迫在眉睫。这种材料应具有良好的绝缘属性,同时在栅极和晶体硅衬底的通道之间(源极和漏极之间)产生很好的场效应。”赵超告诉记者,英特尔公司的科学家经过反复测试,率先在22纳米 CMOS 技术节点引入高K-金属栅极技术,有效地降低了成本,减少了功耗并提高了器件性能。

事关摩尔定律的生死

很多人知道摩尔定律,但很少有人知道,在2004年左右,摩尔定律差点“死了”。最终是一个名为高K-金属栅极的技术,让我们今天可以轻松的工作、上网,而不用考虑芯片过热、漏电等问题造成的电脑或手机性能下降。根据摩尔定律,每18个月就会在同样面积的硅片

上把两倍的晶体管“塞”进去。按之前的工艺,已经将晶体管的组成部分做到了几个分子和原子的厚度,组成半导体的材料已经达到了极限。其中,最早达到这个极限的部件是组成晶体管的栅极氧化物——栅极介电质,原有的工艺都是采用二氧化硅层作为栅极介电质。

“这项技术拯救了摩尔定律,成功研制高K-金属栅极并将之付诸量产,被誉为半导体业界40年来里程碑式的革命性突破。”赵超说。自此,22纳米 CMOS 技术成了全球研究开发的又一代有重大技术创新的集成电路制造工艺,各国都投入了巨大资金,力争抢占技术制高点。这是我国集成电路研发体系系统不过去的坎。“2009年,在国家科技重大专项的支持下,我国开始22纳米关键技术先导研发。我们与项目联合承担单位,北京大学、清华大学、复旦大学和中科院微系统所的项目组一道,开展了系统的联合攻关。”赵超说。

加入高端集成电路先导工艺研发国际俱乐部
4位“千人计划”、5位中科院百人计划,30多位业界核心的工程师团队……先导工艺研发中心拥有这样一支令人艳羡的国际化研发团队。2009年,在国家科技重大专项的支持下,微电子所成立研发团队并引进了一大批海归,建成了拥有200多名研发人员的集成电路先导工艺研发中心,赵超就是其中的一位。研发方向有了,人也有了,但项目团队依然面临着巨大的挑战。“我们研发与工业主流工艺兼容的22纳米器件结构和工艺制程几乎是从零开始。”赵超说。尤其是器件制造工艺及集成技术给团队带来巨大挑战:一是界面工程,需要研究高K材料与硅沟道的界面态特性、应力引入控制机制、影响载流子迁移率的原理机制等;二是栅工程,对高性能的NMOS和PMOS器件而言,筛选出具有合适功函数的金属栅材料并堆叠结构避免费米钉扎效应,降低刻蚀工艺及集成技术的难度至关重要;三是需要实现超浅结的源漏工程,确保器件具有良好的短沟道效应抑制特性和欧姆接触。

针对上述核心问题,项目组开展了系统的研究工作,仅用了7个月的时间就漂亮地完成了原定两年多时间的工作:国内首次采用后高K工艺流程,获得小于30纳米栅长的NMOSFET和PMOSFET器件,器件性能优良;对栅工程中阈值电压(V_{th})调节,界面层去除,栅介层及金属层填充等工艺难点作了系统研发,为工业界的二次开发提供了一系列工艺解决方案。“这标志着我国也加入了高端集成电路先导工艺研发的国际俱乐部。”赵超自豪地说。

整个团队的付出开始得到回报:该团队随后在更具挑战性的鳍型晶体管(FinFET3D)研发上取得良好进展,完成与工业主流工艺兼容的FinFET工艺集成和器件研发。

“这些成果为我国芯片制造企业的生产技术开发扫清道路,为半导体集成电路行业中无生产线设计公司及早介入工艺创造条件。”赵超表示。由于项目团队采用了与工业生产一致的工艺方法和流程,具备向产业界转移的条件,因而对我

国集成电路产业的技术升级形成了具有实际意义的推动作用。

撑起中国的专利保护伞
“我们是国家集成电路工艺研发战役中的‘侦察部队’。”赵超告诉科技日报记者,“在与国际巨头的竞争中,我们就是要用专利布局的方法占领战略要地。”国家科技重大专项02专项的领导在项目一开始就提出了“专利导向下的研发战略”。“过去,我国在知识产权建设上没有合理的战略布局,是把专利当论文用,我们辛辛苦苦研发的技术其实早就被别人申报了专利。这样,即使有自主研发,也做不到自主知识产权。”赵超感叹道。自研发之初,项目团队就把为国内集成电路高K-金属栅极关键工艺建成具有自主知识产权的保护体系作为目标,分析制定了专利地图,寻找专利漏洞,抢占专利先机。这是我国科研方法的一次巨大改变。“其实专利就是炮弹,是打仗用的。”赵超告诉记者,在集成电路领域,专利不仅是保护自己的有力盾牌,也是打击对手的利器武器,专利纠纷经常发生,没有知识产权保护体系就像是毫无防御工事的阵地。

据了解,项目团队在该领域申请发明专利1650项,其中高K-金属栅极的相关专利全球排名第四,被IBM、台积电、三星等多家国际半导体知名企业引用600多次,基本形成了“你中有我”,为实现对中国企业的专利保护奠定了坚实基础。近年来,项目团队成功完成向武汉新芯、中芯国际等国内主要IC制造公司的专利许可和转让达1358件,有力推动了高端产品的技术研发进程。先导工艺研发中心还建成了一个能够开展22纳米及以下技术代研发的工艺平台。“工艺平台对后续项目发展起到非常重要的作用。”赵超表示,先导工艺研发中心的研发效率和质量管理体系都是工业化标准的,得到了业界研发伙伴的充分认可。同时,项目对整个集成电路产业链也起到了直接的支撑作用。赵超表示:“研发中心不仅在先导工艺技术研发上起到国家队的作用,同时也成为了国产半导体装备和材料的验证基地、集成电路工程技术人才的培养基地和该领域的国际交流基地。”

“16纳米的已经做完,7纳米和5纳米的正在布局。”赵超透露,下一步,项目团队将参加更大规模的“战役”,力争把先导技术转化成工业生产技术,为国家集成电路产业发展作出更大贡献。

过过渡区在内的叶片集成磨削精加工。

项目团队最终研制出的六轴联动数控砂带磨床,能够对只有一张百元纸币厚度的弯扭叶片边缘进行磨削抛光,而误差不过其厚度的十分之一,超越了国外现有技术水平。

打磨抛光做成一个大市场
“没想到打磨抛光能做成一个大市场。”具有自主知识产权的六轴联动数控砂带磨床投产以来,供不应求,这让刘树生十分感慨。

如今,我国自主研发的叶片六轴联动数控砂带磨床,遍布大江南北,应用于核电汽轮机叶片制造和新型航空发动机叶片制造领域,成为高质量叶片制造的必要手段。据了解,目前,成果应用于东方汽轮机有限公司的大型叶片加工打磨生产线和无锡透平叶片有限公司,累积生产大型叶片5万余片,价值超过10亿元。东汽公司实际使用后,发现数控机床和数控系统的使用稳定可靠,加工叶片质量较以往手工打磨有质的飞跃。新设备所制造的叶片一致性非常好,低压转子在不经配重调整的情况下,高速动平衡效果已经优于国外制造的转子。

就像汽车一样,核电的叶片在安装后也要做动平衡,一般要做几个小时。但在我国CAP1400型压水堆核电机组的末级叶片的安装时,却发现几乎不用做动平衡。国外阿尔斯通公司的人不相信,结果发现,以前,手工打磨的叶片往往有500克的偏差,现在只有30克。

此外,成果还应用于西安航空发动机股份有限公司某型号发动机风扇叶片生产,保障了新型航空发动机的制造质量。项目成果为黎明航空发动机集团、中国商发的新型航空发动机研制,中航惠阳螺旋桨有限公司新型复合材料空气螺旋桨研制,昌河飞机工业有限责任公司新型直升机桨毂制造提供了先进制造工艺支持。

“随着智能制造、3D打印、精铸工艺的进步,下一步,我们正在研发一种新的数控机床,将继续占领高地。”刘树生满怀信心地表示。

“我们自主研发的叶片六轴联动数控砂带磨床,能够对只有一张百元纸币厚度的弯扭叶片边缘进行磨削抛光,而误差不过其厚度的十分之一,超越了国外现有技术水平。”

“没想到打磨抛光能做成一个大市场。”具有自主知识产权的六轴联动数控砂带磨床投产以来,供不应求,这让刘树生十分感慨。

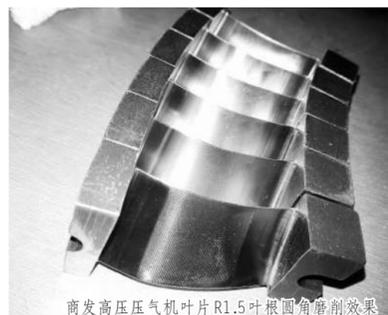
如今,我国自主研发的叶片六轴联动数控砂带磨床,遍布大江南北,应用于核电汽轮机叶片制造和新型航空发动机叶片制造领域,成为高质量叶片制造的必要手段。

据了解,目前,成果应用于东方汽轮机有限公司的大型叶片加工打磨生产线和无锡透平叶片有限公司,累积生产大型叶片5万余片,价值超过10亿元。东汽公司实际使用后,发现数控机床和数控系统的使用稳定可靠,加工叶片质量较以往手工打磨有质的飞跃。新设备所制造的叶片一致性非常好,低压转子在不经配重调整的情况下,高速动平衡效果已经优于国外制造的转子。

就像汽车一样,核电的叶片在安装后也要做动平衡,一般要做几个小时。但在我国CAP1400型压水堆核电机组的末级叶片的安装时,却发现几乎不用做动平衡。国外阿尔斯通公司的人不相信,结果发现,以前,手工打磨的叶片往往有500克的偏差,现在只有30克。

此外,成果还应用于西安航空发动机股份有限公司某型号发动机风扇叶片生产,保障了新型航空发动机的制造质量。项目成果为黎明航空发动机集团、中国商发的新型航空发动机研制,中航惠阳螺旋桨有限公司新型复合材料空气螺旋桨研制,昌河飞机工业有限责任公司新型直升机桨毂制造提供了先进制造工艺支持。

“随着智能制造、3D打印、精铸工艺的进步,下一步,我们正在研发一种新的数控机床,将继续占领高地。”刘树生满怀信心地表示。



商发高压压气机叶片R1.5叶根圆角磨削效果

小小叶片,带动中国创新引擎腾飞

本报记者 申明

一个呈麻花状扭曲,表面十分粗糙的发动机叶片,正在一台数控机床上不断被抛光打磨,只见在数控机床的操作下,不一会的工夫,砂带就精准地将整个叶片打磨光滑,就连死角都没有落下。

不要小觑这台机器,它打破了国外技术垄断,为我国核电、燃气轮机和航空发动机制造提供了先进的工艺手段。“叶片类复杂曲面零件是汽轮机、燃气轮机、航空发动机等动力装置的关键零件,其几何精度和表面质量直接影响能源动力设备的工作效率,其质量的一致性直接影响动力机械安全运行。”北京胜为弘技数控装备有限公司总经理刘树生告诉科技日报记者。

据了解,由北京胜为弘技数控装备有限公司等单位研发的“叶片复杂型面精加工六轴联动数控砂带磨床关键技术研究与工程应用”项目,通过产学研用,研制出自主知识产权的叶片六轴联动数控砂带磨床和编程系统,解决了叶片复杂曲面磨削精加工的技术难题,打破了国外垄断,成果应用于我国核电汽轮机叶片制造和新型航空发动机叶片制造领域,成为高质量叶片

制造的必要手段。在2016年度北京市科学技术奖评选中,该项目荣获一等奖。

手工打磨抛光已成叶片发展瓶颈

装备制造业是一个国家建设的基石,拥有涡轮动力装置制造技术更是一个强国的标志,而涡轮式动力装置的核心零件就是叶片。“工作状态的叶片表面光洁度越高越好,表面质量、一致性影响到装备的能量转换效率。”刘树生告诉记者。据悉,一般用于加工核电、火电等电站用汽轮机叶片形面加工的多轴联动数控磨床是涡轮设备制造领域的高档关键设备。叶片从形态上看是复杂薄壁类零件,型面为空间自由曲面,曲率变化大,在数控铣削加工后易发生变形,导致无法采用常规方法进行表面精加工。随着能源、动力装置的功率不断增大,为了获得更好的空气动力学效果,最大限度地提升单位体积的功率,叶片型面向着更加弯、扭、扭、曲面更加复杂的方向发展。“我国一般采用手工打磨方式加工大型叶片,叶面精度差,加工效率低,劳动条件非常恶劣。”刘树生告诉记者,手工抛光时产生大量粉尘,严重影响了操作人

员的健康。刘树生的公司位于北京亦庄,记者在车间看到一块手工抛光的叶片,其表面有很明显的手工打磨痕迹,锐边有些锋利,槽内有凸起点、毛刺。而经过抛光加工的叶片内凸起点、毛刺、锐边等均被磨至圆滑状态,且表面纹理均匀。据了解,一些复杂型面的叶片,如果不够光滑,不符合空气动力学,除了耗费大量的人力资源,也易造成产品质量不稳定,甚至制造过程中出现废品。采用传统的手工打磨抛光方式,已经不能满足先进叶片制造质量的要求。

“手工打磨抛光会破坏前序价值高昂的五轴铣加工出叶片的精确型面。”刘树生说。先进的五轴铣削设备与手工打磨抛光在工艺水平上的不匹配,已经成为制约叶片行业快速发展的瓶颈。这在以核电叶片为代表的大型叶片和以航空发动机叶片为代表的小型叶片制造过程中,体现尤为突出。

对于以核电汽轮机叶片为代表的大型叶片来说,体积巨大(我国CAP1400型压水堆核电机组的末级叶片长度超过2米,重量大于280公斤)、型面复杂、精度要求高,采用手工打磨抛光越来越困难,效率低下,加工质量难于保证,从而影响到通流、影响热效率;此外手工打磨抛光叶片一致性差,从而影响到动平衡、影响机组运行安全。

而对于以航空发动机叶片为代表的小叶片来说,又成为另一个极端,叶片长度多小于100mm,型面弯、扭、扭、进排气边厚度只有0.1-0.2mm(1-2张百元纸币厚度),综合轮廓误差<0.05mm,手工磨削抛光很容易造成叶片烧伤和轮廓破坏,型面精度根本不能保证。发动机叶片型面制造质量正是影响我国发动机制造水平,进而影响各类飞机性能的关键因素。

国产机床实现“以柔克刚”
要改变人工抛光带来的弊端,只能靠机器打磨了,但这种数控砂带磨床被国外垄断,只有德国等国家拥有该项技术。

2008年,刘树生和他的研发团队,面对从德国进口的、国内唯一的一台叶片曲面磨削加工设备,是跟随还是仿制?“但那不是我们想要的。”刘树生说,他们给自己定了一个近似不可能完成的任务,那就是研发六轴联动数控磨削机床,以此来解决叶片型面精加工问题。这是德国人也没有解决的问题。“以前觉得5轴就可以,但实际加工后发现,有些凹点磨不到,必须要用6

轴。”刘树生说。看似多了一个轴,但多出来的研发难度却是几倍递增。在准确的位置用合适的力度切除材料,这和所有的机械加工原理是一样的,但能否将机床的运动轨迹和磨削压力在时间和空间上精确配合,是最大的挑战。数控机床被誉为制造业的“大脑”。随着计算机技术、信息技术与自动化技术的发展应用,数据库、计算机以及人工智能开始用于评估、预测、模拟、优化以及控制磨削过程。通过数控、自动化以及人工智能技术改造砂带磨削、砂带磨削工艺,使磨削工艺能够自控、稳定、环保且更适用于高效率的批量生产。

对刘树生他们而言,自动化程序的控制是一道“拦路虎”,“最难的还是编程,当时国内没有这种专业化的软件。”刘树生说。最终,刘树生他们联合华中数控公司,提出了双矢量控制的编程算法,自主研发了六轴联动数控砂带磨削加工工艺编程软件,该软件具备六轴联动轨迹光滑、加工参数优化和仿真、后置处理等功能,实现了自动编程与自动加工。并且自主研发了六轴联动数控砂带磨削国产专用数控系统,实现了三回转、三直线的六轴联动数控插补控制,满足了复杂叶片的多轴联动控制要求。

随着新材料、新结构的叶片不断出现,叶形曲线也越来越复杂,给叶片抛光技术带来了更大的挑战。专一形式的抛光方法已不能解决叶片全部的抛光。针对不同结构、不同材料的叶片,需要采用不同的抛光方法,加工工艺越来越复杂。同时,各部位抛光需要机床的运动形式、规格参数差异很大,在同一个机床上完成叶片不同部位的抛光较难实现。因此,多工位、多种加工方式并行的工艺策略更适用于叶片全部的抛光。

对此,项目团队创造性地提出内置砂带装置单元化的中空C轴式BC双摆头结构,研制出国内首台公开展示的高动态性能九轴六坐标联动数控砂带磨床,实现了核电叶片复杂曲面高效、高质量六轴联动磨削精加工,在国际上具有独创性和先进性。

“以前加工叶片都是硬碰硬,但现在的叶片都是曲面薄壁零件,不仅仅要准确还要控制力度和速度,以不确定去确定。”刘树生说,“我们的机床就是要以柔克刚。”项目团队提出了水平布置多砂带装置的六轴联动数控砂带磨床新型结构,实现微接触力控制磨削,满足航空发动机叶片0.1-0.2mm薄进排气边磨削加工要求,实现了包括叶身型面、进排气边、叶根圆角、阻尼

轴。”刘树生说。看似多了一个轴,但多出来的研发难度却是几倍递增。在准确的位置用合适的力度切除材料,这和所有的机械加工原理是一样的,但能否将机床的运动轨迹和磨削压力在时间和空间上精确配合,是最大的挑战。数控机床被誉为制造业的“大脑”。随着计算机技术、信息技术与自动化技术的发展应用,数据库、计算机以及人工智能开始用于评估、预测、模拟、优化以及控制磨削过程。通过数控、自动化以及人工智能技术改造砂带磨削、砂带磨削工艺,使磨削工艺能够自控、稳定、环保且更适用于高效率的批量生产。

对刘树生他们而言,自动化程序的控制是一道“拦路虎”,“最难的还是编程,当时国内没有这种专业化的软件。”刘树生说。最终,刘树生他们联合华中数控公司,提出了双矢量控制的编程算法,自主研发了六轴联动数控砂带磨削加工工艺编程软件,该软件具备六轴联动轨迹光滑、加工参数优化和仿真、后置处理等功能,实现了自动编程与自动加工。并且自主研发了六轴联动数控砂带磨削国产专用数控系统,实现了三回转、三直线的六轴联动数控插补控制,满足了复杂叶片的多轴联动控制要求。

随着新材料、新结构的叶片不断出现,叶形曲线也越来越复杂,给叶片抛光技术带来了更大的挑战。专一形式的抛光方法已不能解决叶片全部的抛光。针对不同结构、不同材料的叶片,需要采用不同的抛光方法,加工工艺越来越复杂。同时,各部位抛光需要机床的运动形式、规格参数差异很大,在同一个机床上完成叶片不同部位的抛光较难实现。因此,多工位、多种加工方式并行的工艺策略更适用于叶片全部的抛光。

对此,项目团队创造性地提出内置砂带装置单元化的中空C轴式BC双摆头结构,研制出国内首台公开展示的高动态性能九轴六坐标联动数控砂带磨床,实现了核电叶片复杂曲面高效、高质量六轴联动磨削精加工,在国际上具有独创性和先进性。



燃机压气机叶片磨削