

# 树立创新旗帜 推进全国科技创新中心建设

## ——“2017年北京市科学技术奖”获奖项目巡礼(六)

**编者按** 改革开放四十年,我国经济取得了全球瞩目的成绩,我国科技的发展也被烙上了鲜明的时代烙印。在不断求真探索的过程中,“科学家精神”薪火相传。老一辈科学家们见证了改革开放,青年科技工作者们在

改革开放的背景下面茁壮成长。新时代,我国科技的发展日新月异,在不少领域已实现从“跟跑”到“并跑”“领跑”的转变。围绕提升自主创新能力,北京市科委近年来不断强化政策引导,把创新作

为引领发展的第一动力,助力搭建高水平科技创新平台、培育世界级创新人才和团队,加快建设具有全球影响力的科技创新中心。

在2017年的北京市科学技术奖获奖项目

中涌现出了一批老科学家牵头,青年科技工作者担当主力,聚焦基础科学研究,服务国家重大战略、拓展技术应用领域,带动相关产业发展的获奖成果。本期,我们为您介绍其中的两个代表项目。

# 突破物理极限,探索未来科技的新材料

钱力

14年前,英国曼彻斯特大学的两位物理学家,安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫用胶带剥离法成功地从石墨中剥离出石墨烯,仅在六年之后的2010年,二人就凭此获得诺贝尔物理学奖。

此后,全球科研人员对这种神奇的新材料进行了不懈探索。据统计,我国目前有近5000家企业宣称涉足石墨烯业务,全国各地成立了40多家石墨烯研究院、石墨烯产业联盟和研发中心。相关学术研究也出现了“井喷”,截至2017年底,我国发表的石墨烯相关学术论文数量跃居世界第一,总数近6万篇;截至2018年3月,全球石墨烯专利申请总数为63630件,我国占比54.14%。

“我国石墨烯行业良莠不齐,虽然产品数目众多,但其中一些仅仅是概念,规模小,附加值不高。真正能体现出石墨烯的优异性能,不可或缺的拳头产品尚在探索中。”中国科学院院士、发展中国家科学院院士刘云圻说。

产量低、质量不高、成本居高不下等问题,一直制约着石墨烯进一步产业化。“基础研究还是需要进一步做扎实、做透”。在他的带领下,其课题组对于高质量石墨烯的制备和电子学性能进行了深入研究,开拓了石墨烯可控生长的新概念和新方法,其成果“低维纳米碳材料的可控生长及其电学性能研究”获得2017年度北京市科学技术奖一等奖。

### 最有可能取代硅的下一代新材料

近半个世纪以来,以硅材料为基础的微电子工业发展迅猛,集成电路的集成度不断提高,每隔18—24个月,集成电路上的元器件数目便会增加一倍,性能也将提升一倍。但是,硅集成电路的器件尺寸日益逼近其物理极限,亟须开发新型电子材料,突破微电子学发展的瓶颈。

“以石墨烯为代表的碳纳米材料是最有可能替代硅材料的下一代电子器件材料。”刘云圻表示,这是一种技术含量非常高、应用潜力非常广的新材料,具备高载流子迁移率、高

载流子浓度、高导电性、高强度等一系列优势,为人类开启了从“硅时代”迈向“碳时代”大门的可能。

“厚度是发丝的万分之一,却比钻石还坚硬”,刘云圻讲到,石墨烯的质量是相同体积钢的六分之一,但硬度要比钢材坚硬一百倍。此外,它还具有很高的透明性,单层石墨烯的透明度已经能够达到97.7%。石墨烯的载流子迁移率是硅的一百倍以上,且具有很好的导热性能,是铜的十倍。

“既能做电极,又能做半导体、绝缘体。”对于石墨烯的未来,刘云圻充满期待。他说,因为尺寸小,石墨烯在单位面积上可制备更多的器件,这大幅度提高了集成电路的集成度,能大幅增加芯片的容量。基于其优异性能,石墨烯在半导体产业、光伏产业、锂离子电池、航天、新一代显示器等传统领域和新能源、新材料等新兴领域,都将带来革命性的技术进步。

### 始于偶然的科学发现

石墨烯是由一种单层碳原子层构成的蜂窝状晶格二维原子晶体。但目前市场上很多所谓的“石墨烯”良莠不齐,不少是由石墨片来代替的。“石墨烯是单层、少数层的,十层以上就没有什么特殊性能了,而石墨片都是多层的。”刘云圻告诉记者,石墨烯最重要的指标就是大面积、单晶、单层。

为了达到如此“苛刻”的标准,刘云圻课题组多次在制备工艺上进行更新升级,但一直没能达到预期。某次实验中,他们在临近铜催化剂熔点的温度进行了石墨烯的生长实验,由于温度控制的微小误差,固态铜变成了液体。“我们惊喜地发现,当铜变成液体后,竟然能够更好地发挥催化剂的作用!”这样的发现,进一步激发了他们探究的热情。之后,课题组对液态金属催化体系进行了深入、细致的研究。他们发现,液态催化剂不仅能够消除固态表面的不均匀性和晶界对石墨烯成核生长的影响,大幅提高石墨烯的制备质量;而且因其流动性,更便于石墨烯的组装与大面积生长。此外还能有效控制石墨烯化学气相沉积(CVD)生长的

成核过程,极大提高石墨烯的生长速度,从而奠定其在电器件中大规模应用的材料基础。“很多科学发现都是来源于偶然。我们要做的,就是不放弃任何一个‘偶然’,并从中探求未知的‘必然’规律。”刘云圻很是兴奋,他告诉记者,他们希望做出单层、单晶的石墨烯,不断提升其质量和纯度。而基于其课题组的深入研究,未来高质量石墨烯的量产“指日可待”。

利用在金属催化剂表面生长的石墨烯制备器件,往往需要面临后续的转移过程,在此过程中,石墨烯表面将产生大量的杂质、褶皱以及破损等。如果可以在绝缘基底表面直接生长石墨烯,或能有效地避免这一不利情况,并且还会大大简化石墨烯器件的加工制备过程。

然而,在绝缘基底上生长的石墨烯由于催化活性低,制备出来通常晶畴较小且质量不高。课题组再次向未知出发,提出了氧辅助化学气相沉积方法,并实现了在介电层上石墨烯的直接生长。通过基底预处理来增加氧悬键的数量,加强碳的沉积,从而直接在二氧化硅介电层或石英玻璃基底上制备了高质量石墨烯。通过优化生长参数,课题组目前已经在SiO<sub>2</sub>/Si的表面生长出了10微米的石墨烯单晶。刘云圻告诉记者,单晶石墨烯阵列能保留单个单晶石墨烯片的优秀电学性能,无缺陷和无晶界,易构筑高性能的器件阵列和制备电路,不需要复杂的加工工艺。而在这个技术的催化下,能够直接与微电子学的加工工艺实现兼容,这些都为石墨烯器件的直接构筑奠定了基础。

### 调控性能,不断拓展石墨烯的应用领域

与此同时,刘云圻一直在思考,如何进一步拓展石墨烯的应用。要实现石墨烯在微电子器件中的应用,还需打开带隙和实现载流子极性的调控。“不仅要有P型半导体,还需要有N型半导体”,刘云圻讲到,只有研制出N型半导体,才能够拓展石墨烯在二极管和逻辑电路中的应用,而掺杂是实现该目标的

最有效手段之一。他们在实验上率先制备了氮掺杂的石墨烯样品,发明了高浓度氮掺杂的石墨烯单晶低温生长技术,实现了石墨烯电学性能的有效调控,获得了空气中稳定的N-型氮掺杂石墨烯单晶材料。

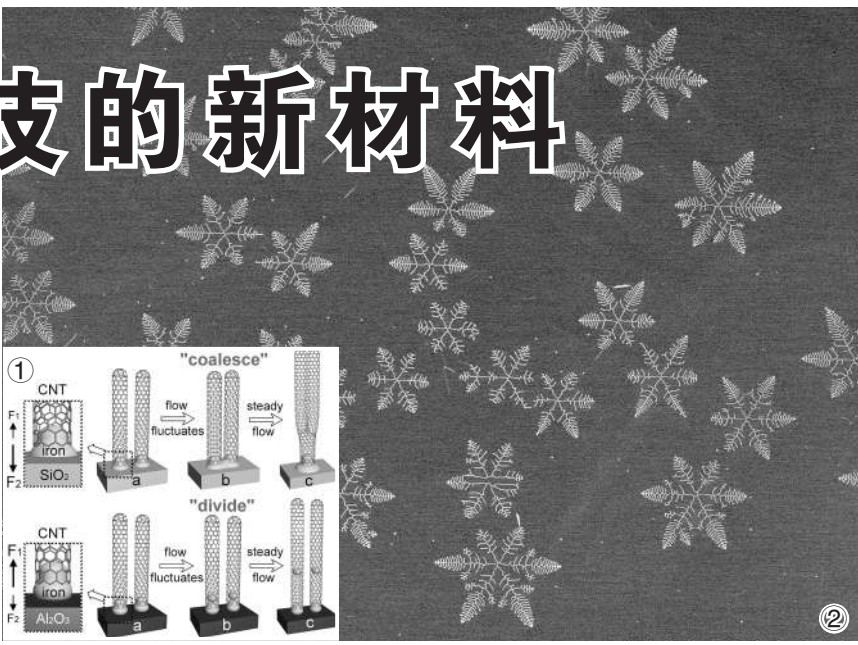
电极材料和界面修饰材料,是石墨烯的另一个应用领域。课题组同期开展了“石墨烯修饰金属电极的界面工程”研究,采用图案化的金属层为催化剂实现了石墨烯的图案化生长和金属电极的有效修饰,率先将石墨烯应用于有机场效应晶体管(OFET)器件中,为高性能、低成本有机场效应晶体管的制备提供了有效途径。

所有这一切应用的前提是实现石墨烯的大规模可控制备。为解决这一问题,刘云圻课题组开发了一种模板CVD生长石墨烯纳米带的方法,采用ZnS纳米带为催化剂和模板,实现了石墨烯的形貌控制和大规模制备,得到规整结构的石墨烯带。“基于石墨烯带的纳米机电开关器件显示出良好的开关性能,开关比达10<sup>4</sup>—10<sup>6</sup>。”刘云圻说,该结果对实现石墨烯的最终应用具有重要价值。

目前,其课题组已获授权发明专利19项。“基础研究是起点,同时我们也非常关注应用技术和成果转化。”刘云圻表示,创新从来没有终点,与产业的真正融合,将成为石墨烯产业发展的强劲动力。

### 在新材料探索中,见证中国科技进步

作为共和国同龄人,刘云圻的成长伴随着整个新中国的发展壮大。他见证了我国由弱变强,更见证了改革开放之后科技的迅猛腾飞。从最初的碳纳米管到后来的石墨烯,探索的一路,刘云圻感受到国家对科技的关注与支持力度不断加强,也感受到中国这些年来国际话语权的不断提升。“目前石墨烯的制备和产品的国际标准,有许多都是中国科学家制定或参与制定的。”刘云圻非常自豪。国家政策的转变让青年时期的刘云圻获得了“自愿报名,群众推荐”的机会,告别了知



①可控合成出的分支碳纳米管和铁掺杂碳纳米管  
②在液态铜上首次发现了大面积的石墨烯

青生活,进入南京大学读书。大学毕业后他被分配到中科院,带着满腔抱负投入到科研工作中去,几年后被中科院选派到日本继续深造。在此过程中,刘云圻认识到我们与发达国家的差距,更加激发了他投身科研,报效祖国的热情和决心。

改革开放之后,刘云圻在参加高效聚丙烯催化剂和芳纶纤维研究工作时,分别获中科院重大科学成果奖两项和院科技成果二等奖一项。1994年,他又获得中科院自然科学二等奖。刘云圻逐渐在自己所研究的分子材料与器件领域成为顶级专家,为国内分子材料与器件领域从国际上籍籍无名到接轨领先水平做出重要贡献。其间,曾有国外科研机构想留住他,但他坚决不为所动。他的心愿就是,把智慧和心血奉献给眼前的事业,以科研成果回报国家。

如今,我国的石墨烯基础研究和产业化研发工作已经与国际先进水平接轨,处于全球第一方阵,尤其在产业化方面居于领先地位。刘云圻充满了欣慰。针对多年以来困扰低维纳米碳材料发展和影响其迈向产业化的关键科学问题,其课题组的研究已经持续了十多年的时间。在实验室工作期间,刘云圻始终坚持7:30开始工作,不到23:00不离开实验室的习惯。近年来即便已经临近古稀,仍然坚持21:30左右离开实验室。“除了出去开会,不论

周六周日,还是国家法定假日,在办公室内总能看到刘老师的身影。”原课题组成员于贵告诉记者,刘云圻每天都关注国内外最新的研究进展,和同学们探讨科学创新的方法。“刘老师非常敬业,鼓励自由的学术讨论,科研上精益求精,不论为人还是做科研都非常谦逊。”于贵说,这种几十年如一日,孜孜不倦、勇攀高峰的精神让大家深受感染。

如今,刘云圻门下的不少学生已经成长为学科带头人。“比如于贵、胡文平、肖肖卫和孙艳明,均已荣获‘国家杰青’;获中科院百人计划、科技部‘万人计划’领军人才、‘国家优青’等的学生则更多一些。”刘云圻如数家珍。“长江后浪推前浪,希望学生们都能比我更优秀,出更多的成果。”这是作为老师的刘云圻的热切期待。

“工作要有原创性,要对学科有发展、有比较重大的国际影响”是刘云圻一直以来对于自己的要求。让他更加欣慰的是,看到当前国家从战略上重视石墨烯,并不给予积极的扶持,政产学研协力推进。“国家现在对科研人员的政策不断改进,对基础研究更加重视,青年人比我们年轻时候有了更好的科研条件、更宽松的科研氛围、更充足的经费保障……”他希望,未来能有更多的年轻人从事这个领域的研究,共同为我国科技的发展不断探索新的材料。

# 贮箱里面变魔法,卫星在轨延寿命

钱力

2018年11月19日,中国利用“一箭双星”发射方式,再次将两颗北斗卫星送入轨道。截至2018年11月底,以长征五号发射、嫦娥四号探月、北斗卫星组网为代表,我国在2018年已经进行了34次航天发射活动,发射次数遥遥领先于其他航天发射大国。

在这些重要的航天器中,微重力流体的高效管理和高精度控制至关重要。目前,我国已经自主研发成功了板式表面张力贮箱系统,并成为世界上第二个掌握基于板式表面张力贮箱的卫星推进剂在轨加注关键技术的企业。而更令人赞叹的是,研制这些技术的是中国航天科技集团北京控制工程研究所的一支年轻的“80后”团队。

历时十年攻关,该团队凭借“微重力流体高效管理与高精度控制技术及应用”项目,获得2017年度北京市科学技术奖一等奖。

### 填补板式贮箱空白,实现流量的高精度测量

在轨卫星是对国家安全和国民经济建设具有重要意义的空间资源。卫星的成本很高,而目前卫星寿命的终结主要源于推进剂耗尽和管理失效,如果在太空为其补加燃料,就需要克服四大难题:难定位、难测量、难控制、难补给。

通常,卫星贮箱中的流体都是由惰性气体和推进剂组成,根据需求将液体推进剂挤压进卫星发动机。与地面环境不同的是,在微重力环境下,气液不会出现上下分层,而是处于悬浮状态。要是在轨卫星发动机提供不夹气的推进剂,最大限度实现推进剂的有效利用,就需要克服四大难题:难定位、难测量、难控制、难补给。

“我国以往的贮箱中,大部分用的都是网式表面张力贮箱,利用毛细网来实现对液体的管理。由此带来的问题是,由于结构限制,在微重力环境下网式表面张力贮箱的阻力非常大,因而不能大流量、重复加注,相对板式表面张力贮箱存在重量偏大、结构复杂的劣势。”项目主要完成人之一、北京控制工程研究所“80后”高级工程师庄保堂介绍,为解决这一问题,他们经过反复实验,摸索出微重力流体在辐射状蓄液片与圆锥外壳结合结构的蓄留稳定性规律,由此发明了我国首个轻质长寿命双叶片板式贮箱。它的蓄液器内部金属板呈辐射状排列,而主导流板内部则是内外交错分布的导流叶片,可实现气液高效分离和推进剂贮箱的在轨重复加注,挤出效率达99.85%,达到国际先进水平。

“板式贮箱的优点主要体现在两个方面,一是能够确保把液体排出时不排出气体,二是可以实现推进剂的大流量可重复加注。”庄保堂讲到,板状的结构能够解决蓄留液体的问题,同时能够将液体传输到指定位置。通过微重力落塔实验,他们获得了微重力液体蓄留规律、传输速度等特性,由此设计并优化了板式贮箱的结构。研制过程中,团队人员经过反复设计、数值仿真、微重力试验、地面试验,多次进行技术改进,完成了样机研制,最终形成了板式贮箱产品研制。

与此同时,项目团队也在思考,如何提升剩余流量的测量精度,来更加精准地预测卫星使用寿命。“以往一般是通过压力、温度变化等参数来计算。当预测到推进剂燃料即将用完时,会让卫星离轨。”但这种方式估算精度比较低,大约误差正负六个月左右。其团队脑洞大开,创造性地发明了一种适用于



卫星推进系统的高精度超声波流量计,可以通过超声波的方式,以其穿过液体的时间差来测算流速,进一步计算推进剂量。该项技术将测量精度提高了一倍,卫星寿命估算误差降到了正负三个月,从而有效节省了卫星成本。目前,已经完成了在轨验证,并将应用于东方红五号卫星平台研制。

### 着眼技术细节,开拓流体管理系统的工程应用

“天高地迥,觉宇宙之无穷。”在不断仰望星空的过程中,新一代航天人正着眼当下每一个技术细节,精益求精。无论是流量的驱动还是液体的传输,泵

线管式的电磁驱动锁紧方法和复合式接口密封结构,解决了卫星密封接口高精度、自导向、柔顺自主对接等难题。

目前,“微重力高效管理及其高精度控制技术”已经推广至多家单位,实现规模化生产,切实服务于我国通信、遥感、科学探测等国家重大工程。该技术应用于在40颗高低轨卫星,全面提升了我国卫星的技术水平和品质,并实现多颗卫星出口,服务“一带一路”倡议。此外还带动了相关流体类产品的研制和应用,比如贮箱类、流量计类、微型泵、传感器类、阀门类等前沿技术研究和产品研制。该技术正转化于其他民用领域,如人工心脏泵、医疗计量器械、汽车热控系统等等。

### 新时代航天探索,不断迈向远方

改革开放以来,国家经济实力稳步提升,不仅为航天事业的发展提供了强大的物质基础,更注入了宝贵的无形资产,创新意识,以人为本,可持续发展等伴随着改革开放诞生成长的先进理念,使航天事业获得了更加强大的加速推力。

庄保堂是2011年来到中国航天科技集团北京控制工程研究所工作的。当时,我国的航天正处于蓬勃发展期,这也是他工作之后参与的第一个重要项目。团队共有十多个人,基本上都是跟他同龄的“80后”们,充满了锐气。“航天任务需要进行对接,在太空进行这种无人操作,复杂度高、难度大,且对于对接精度的要求极高。项目组研究出了一种基于球面轴承和浮动弹簧组的五自由度位置与姿态误差方法,建立起接口柔顺对接动力学模型并进行结构优化设计,并提出一种基于螺

旋管式的电磁驱动锁紧方法和复合式接口密封结构,解决了卫星密封接口高精度、自导向、柔顺自主对接等难题。需要团队携手一步步攻克。庄保堂清晰地记得,在最初缺少资料的情况下,团队每天头脑风暴做多轮设计,加班已成为家常便饭,甚至放弃节假日;在样机的实验和测试阶段,有任何一项指标不合格,都会仔细地去寻找原因,重新修改与优化。“在这样的不断试错中,获取了更多的技术更新和经验积累。”

作为在改革开放背景下成长的青年科技工作者,庄保堂切身感受到了国家对于年轻人创新的鼓励,感受到老一辈航天人对年轻人的支持和肯定,让年轻人冲在前面,让他们首先享受到丰收的果实。无论是科研经费,还是职称评定、奖励申报,都给了年轻人足够的科研动力。此外,舍得投入,宽容失败,鼓励大家放心去做、大胆去想的机制激励着他们一步步推进创新与变革。庄保堂讲到,正是一次次的大胆尝试,否定再否定、颠覆再颠覆,让他们快速成长。

美国国家航空航天局2015年发布的《NASA技术路线图》将“推进剂储存与输送”列入空间推进技术的重要发展方向之一。我国《“十三五”国家科技创新规划》将“深空探测及空间飞行器在轨服务与维护系统”列入重大项目,在轨存储与补给是该项目的核心支撑技术。

“改革开放为我国的航天事业注入了强大动力。”庄保堂对于自己所从事的领域充满了信心。“航天人的梦想,让大家凝聚在一起。这些年轻人都梦想着自己的科研成果能够飞向太空,那会有无限的自豪感。”他说。“项目的首席专家潘海林,以及副所长李永给我们年轻人奠定了很好的研究基础。”在团队中,庄保堂主要负责课题的组织、任务的