



# 科学仪器要从“零”到“万”

## ——记“多波段脉冲单自旋磁共振谱仪”研制历程

■本报记者 张双虎

过去百年来,诺贝尔自然科学奖所涉及的关键性工作和重大发现中,近70%借助仪器完成,物理和化学领域的发展更是离不开科学仪器的支撑。

正是意识到仪器在促进科技进步、推动人类认识客观世界方面的重要意义,十多年来,中国科学院院士、中国科学技术大学副校长杜江峰带领的微观磁共振重点实验室团队在国家自然科学基金的长期支持下,“边科研边研制”,在微观尺度磁共振谱学及生物、物理、信息等领域取得了一系列原创成果,60余篇相关论文在《科学》《自然》《自然》子刊和《物理评论快报》等期刊上发表,多项成果获得奖励。他们依托创新科研成果研制的近20种仪器,已广泛服务于高校、研究所、医院和企业。

杜江峰认为,如果研制出原创的科学仪器是从“0”到“1”,那么把仪器送到千万用户手中,让用户来验收就是从“1”到“万”。在当前中国急需各种高端仪器的情况下,仪器研制应做到从“零”到“万”。

### “借”和“买”的困境

上世纪末以前,我国科学家多数是做些不用仪器或使用低端仪器的研究。后来能从国外买一些高端仪器,但不少研究仍是“买得到就做,买不到就不做”。

“这给科技创新带来了巨大阻碍。一是发达国家对高端仪器禁运,有钱也买不到。二是即便能买,拿到仪器时也比人家晚一个阶段。三是拿到仪器后,因为没有维护维修能力,往往难以发挥最大作用。”杜江峰对《中国科学报》说,“现代科技已经发展到高度依赖尖端科学仪器的阶段,但我们的供给严重不足,仪器缺乏已经成为制约我们原始创新的大问题。”

20年前,杜江峰团队基本上靠借仪器做实验,听说哪里有仪器,就跑去测一测,做个实验。10年前,团队有了第一台进口仪器,利用那台仪器,做出了一些成果,也发了文章。很快,“借”和“买”都不能满足需求了,他们就萌生了“自己做仪器的想法”。

2010年,团队得到中科院支持,启动一个200多万元的仪器研制项目。通过那个项目,团队积累了研发经验,也得到了锻炼。

随着国内科学研究对仪器的需求越来越旺盛,国家自然科学基金委、科技部、财政部陆续推出一些仪器研制计划。国家自然科学基金委的国家重大科学仪器研制项目定位于“前端”和“创新”,项目承担者需要做出从“0”到“1”的突破,研制出原创的科学仪器。

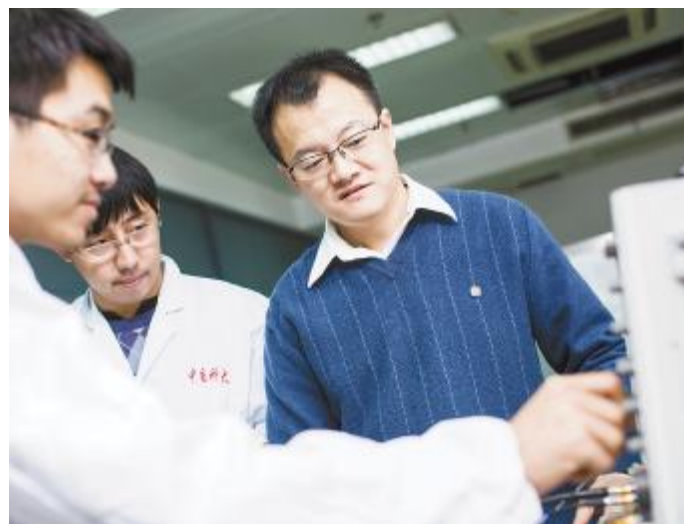
“我们去申请国家自然科学基金委国家重大科学仪器研制项目时,既有一定的研制基础,又做出了很好的成果,还有一支优秀的团队。”杜江峰说,“当时我们提的方案合理,各项指标也非常高,国际上又没有同类型仪器,这完全符合项目定位。”

“多波段脉冲单自旋磁共振谱仪”能够在不破坏研究对象的前提下,提供微观物质内部结构信息,拓展人们对物质内部结构认识,对前沿基础科学以及提升我国开展原创性研究能力意义重大。

2013年初,杜江峰团队顺利获得国家自然科学基金委国家重大科学仪器研制项目资助,团队成员摩拳擦掌,准备大干一番。

### 蓄积力量

缺乏高端科研仪器之“痛”有两个突出表现。一是发达国家的技术封锁,有钱也买不到。二是我国少数领域



杜江峰(右)指导学生做实验。

迈入国际前沿时,迫切需要的仪器国际上也不一定有的。

当中国科学家在多个领域跻身国际前列时,缺“仪”之痛和今天的缺“芯”之痛如出一辙。

在研制多波段脉冲单自旋磁共振谱仪时,有个关键部件叫钻石传感器,它的灵敏度决定着仪器的性能。但当时相关的原理才提出四五年时间,国内外都没有现成的设备可参考。

“当时美、德有个研究组也在往这个方向走,知道我们要研制后,马上把相关的技术和产品都封锁了。”该团队成员、中科院微观磁共振重点实验室副研究员王鹏飞说,“国外厂商禁运了钻石传感器相关的产品和技术,所以一开始,我们就面临很大的困难。”

钻石传感器研制中用到一种离子注入技术,但当时大家连离子注入的机制都不清楚。

### “落地”才算验收

2014年,杜江峰发现,国内一些研究机构也面临着自己曾经的苦恼:迫切需要一些高端仪器但买不到。

这时他们已经研制出部分仪器,杜江峰说,既然有这个能力,何不多做几台?

“我们要探索新的合作方式,改变过去那种‘立项研究,验收了事’的做法。”杜江峰说。

科学家研制仪器和企业做仪器的目标、关注点完全不同。高校和研究室的仪器研制项目属于“学术牵引”,可以不计原件成本,只要各项技术指标在验收时最好即可。但企业完全遵照市场规律,以产出成套仪器为目的,注重稳定性、可重复性,讲究成本可控。

“尽管都和仪器有关,但做产品和搞基础研究是两码事。”杜江峰说,“不少项目是‘进门严苛,出门宽松’,只要能立项,验收通常并不困难。专家把各项指标一测,达标就可以通过。但仪器成为商品不同,就像一个手机,不能今天有信号,明天没信号。”

为解决产学研衔接的难题,让仪器研究真正“落地”,杜江峰下定决心,承诺延迟验收,让用户单位来验收。“用户什么时候觉得满意了,什么时候通过验收。”

“我们这套仪器原计划2016年完成,专家验收是2016年完成的,但用户在实际使用过程中,不断发现问题、提出改进意见,包括原来计划里没有的。研究出现新情况、产生新需求,我们都尽可能满足,最后用户彻底满意了。”杜江峰说。

该仪器后期迭代也随着国仪量子(合肥)技术有限公司的成立交由公司负责,从而更加明确了科研团队的“0”到“1”、企业从“1”到“万”的产学研模式。

“杜老师在理论上给予指导,和我们一起讨论,研究解决方案。”王鹏飞说,“我们从一台农业育种注入机上得到启发,对它进行改造和设计,又造了一些部件,最终达到了项目初步目标。”

后来,团队不断探索,找相关单位攻克VR加工技术、波导设计加工工艺。经过几轮迭代,团队用不到3年时间,将钻石传感器技术提升至国际先进水平。

“2016年底,连传感器的原料也被发达国家禁运了,我们必须一点点摸索,攻克一道道工艺难关,但这也让我们一步步、全链条地掌握了核心技术。”中科院微观磁共振重点实验室副研究员秦熙说,“在这个过程中,能明显感觉到国外仪器厂商对我们的态度,经历了几轮反转。”

在国家自然科学基金委仪器研制项目的资助下,杜江峰团队一路披荆斩棘,在实战中蓄积着“起跳的力量”。

# 见微知著 打造半导体材料精准研究“利器”

## ——记“纳尺度多场耦合效应的原位表征系统”研制历程

■本报记者 甘晓

每个人都想拥有“充电五分钟,通话两小时”的理想手机。而这个简单的“理想”却代表着对电子产品中半导体材料和器件性能的极致追求。手机芯片快速数据运算过程和电池能量存储过程都发生在只有头发丝直径万分之一的纳米尺度下,而这些过程会影响到产品的工作稳定性和服役寿命。

研制高效绿色能源器件和低功耗信息功能器件,亟待在纳米尺度深入研究和理解材料结构与器件性能之间的构效关系,阐明纳尺度多场耦合条件下材料的功能退化与损伤机理、器件的功能退化与失效机理。

近年来,围绕这一前沿基础科学问题,北京科技大学材料科学与工程学院教授、中国科学院院士张跃团队在国家重大科学仪器研制项目(自由申请)的支持下,开展了“纳尺度多场耦合效应的原位表征系统”研制工作。目前,项目顺利通过结题验收,该仪器的成功研制,将实现对半导体材料在服役过程中各项指标的原位监测。研制过程中,科学家率先实现了在超高真空、极低温、多波段光谱入射采集、纳微米应力精确加载等条件下,材料微观原子结构、界面能带结构、器件电学性能的跨尺度原位表征,填补了纳尺度多场耦合原位表征技术的空白。

### 以国家需求为牵引

在材料科学领域,材料的服役行为研究并不陌生,包括澄清服役环境中材料的损伤机理、认识其损伤动力学过程、评价工程结构的安全性及服役寿命,发展延长寿命的技术等。

过去几十年来,研究者已经在金属材料体系中建立起成熟的材料服役研究和表征方法,监测其服役过程中

的各项指标,从而对材料的服役可靠性进行精准判断。

但是,针对半导体材料服役行为的研究却面临较大挑战。据研究人员介绍,一方面,随着芯片集成度提升,半导体器件中材料越来越小,如今单个晶体管核心结构单元的尺寸小于10纳米;另一方面,随着可穿戴设备和便携设备的发展,半导体材料与器件的工作环境越来越复杂,冷热交替、潮湿、弯折与柔性等环境都对材料和器件有了更加严苛的要求。他们意识到,建立能在多场耦合服役条件下对低维半导体材料的结构和性能演变规律进行原位表征的方法与技术手段,对研制下一代半导体材料与器件尤为重要。

与此同时,国家未来发展对于下一代半导体材料与器件也有重大现实需求。在这样的背景下,研发团队决定自主研发一台新仪器,以在纳尺度多场耦合效应下进行半导体材料和器件性能调控与服役行为原位科学研究。

2016年,在国家自然科学基金支持下,国家重大科学仪器研制项目(自由申请)“纳尺度多场耦合效应的原位表征系统”正式立项。

研究人员向《中国科学报》介绍,研制这一新仪器的难点在于,通过多物理场耦合模拟半导体材料和器件的实际工作条件,从纳尺度原位揭示半导体材料与器件界面载流子输运行为与调控规律。同时,通过材料结构和界面的精细设计,提高半导体器件性能,设计构筑低功耗、高性能的半导体器件,研究建立纳尺度半导体材料与器件的服役行为研究方法并评价标准。

### “研以致用”的实践精神

项目执行的5年中,研发团队坚

持设计、制造、研究、验证协同的全链条研究思想,直面建立微纳尺度结构与宏观器件性能之间的关联性这一重大挑战,陆续攻克和解决了多项关键科学和技术难题。

据了解,科研团队始终坚持“研以致用”的工作作风,以应用为导向开展科学研究。“材料研究不能仅仅停留在‘测一条曲线’上,坚持往前多想一步,争取多做一步,是我们团队多年养成的研究习惯。”项目团队成员、北京科技大学材料科学与工程学院教授廖庆亮介绍说。

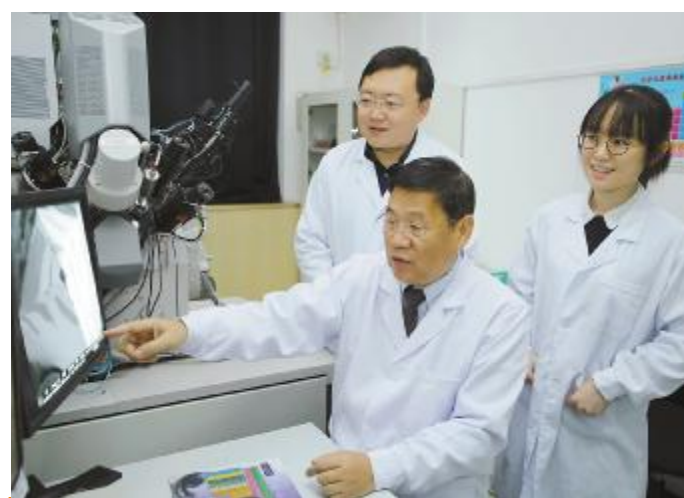
正是在“多一步”思想的指引下,研发团队周密布局、仔细论证,充分验证,把每一分钱都花在刀刃上。项目启动之初,研发团队组建了由业内顶尖专家组成的咨询组,严格把关项目进度和研制方案。

同时,他们走访了30多家国内外生产表征仪器设备的企业和机构,寻求从科学研究到实际应用的经验。同时,充分发挥现有研究平台的作用,遵循模块化设计理念,分模块、分功能逐一验证,陆续研制了多台套功能验证装置,逐个测试了装置和功能的可行性、验证方案的合理性,最终经过多轮论证,形成了系统的研究方案。

具体而言,根据这套设备的目标,研发团队设计了超高真空低温探针、共聚焦激光耦合、设备监控与信号测量等三个子系统。

其中,“超高真空多功能低温探针”“多通道样品台和多功能探针联动耦合系统”“下沉式杜瓦和针阀制冷系统”“三段调节的共聚焦耦合光路”等多项国际领先的“黑科技”,把各项指标做到了极限。

“设备的真空水平实现了 $10^{-9}$ Pa的超高真空,温度达到4K的极低温



张跃院士(中)、张铮教授(左)与项目组成员在工作中。

环境,可以模拟太空中地月之间的真空和温度水平,为开展空间探测用半导体材料与器件研究提供了良好的研究平台。”项目团队成员、北京科技大学材料科学与工程学院教授张铮介绍。

此外,该团队还格外注重设备研制的通用性。据了解,这套系统能够广泛应用于能源、电子、传感等领域的功能器件在多场耦合条件下关键结构单元的演变规律和性能调控方法的研究。

### 用“工匠精神”死磕

“要做世界领先、功能完备、性能最优的设备,而不仅仅是完成指标要求。”项目启动之初,团队就立下了“军令状”。

为了最先进的科研仪器能够真正用起来,研发团队除了要提出原创的科学思想外,还要直面许多工程和技术难题。为此,他们在可借鉴经验较少

### 底气何来

“我们实验室有近40台装备,除了2009年买过一台进口仪器外,这12年来没买过成套装备,基本上自己想到的、需要的,都由自己做。”杜江峰说。

目前,该团队研制的仪器已广泛服务于医院、企业、科研院所。谈及团队制胜的“法宝”,杜江峰用“品格、平台、氛围”六个字概括。

“感谢中科院和国家自然科学基金委领导的远见和魄力,支持我们探索一种灵活的机制,比如‘边科研边研制’,比如支持我们把研制的仪器真正‘落地’。”杜江峰说,“在持续资助下,我们也在实战中锻炼了一支特别能‘打’的队伍。”

“务实、低调、凝聚力强”,是国仪量子(合肥)技术有限公司总裁贺羽对团队的最深刻印象。目前,该公司已经从科学家手中接过成果产业化的“接力棒”,开始用产品经营的思路、以工程化的方式向商业化迈进。

中国科学技术大学教授石发展说:“杜老师常说,学术讨论只有对错,不分地位高低。所以我们形成了自由、平等的学术讨论氛围。我们从不打卡,但晚上12点实验室灯火通明是常态。大家都奔着一个目标,做得非常离开。”

杜江峰认为,人才是大学最重要的产品,除了要培养学生的品格外,还要提供一流的平台、好的工作环境和科研氛围。

“非常感谢团队成员的努力。”杜江峰说,“虽然我们取得了多个世界第一、获得了一流成果、培养了一流人才、提供了一流平台、做出了一流产业,但在仪器研制方面,跟国际先进水平相比仍有差距。仪器研制‘路漫漫其修远兮’。”

“对于我们的设备而言,在被检测材料所处的环境中,一束激光需要穿过10个反射镜组成的光路调节镜组,1个直径为1.5厘米的石英玻璃窗口,3个垂直排列的直径小于1厘米的屏蔽舱门盖,最后准确抵达直径为0.5厘米的物镜后焦点光心,整个光路距离将近1米。在这个距离实现两束激光的准直,就好像一个神枪手在打靶,光路每偏转0.1度都会导致反射和折射光出现巨大偏差。”康卓介绍说。

为了解决这一问题,项目组前后设计了十余套解决方案,从全手动目视调节到成像辅助调节,设计了水平自由度的精确位置控制平台,建立了分步调节方法,最终完美解决了光路耦合的重大问题。

2020年项目接近尾声,突遇新冠疫情袭来,研制进度受到了严重影响。为了赶工期,研究团队的老师和学生们加班加点。“早上一大早就来跟设备‘报到’,晚上三更半夜才回家睡个觉,基本上日夜和设备呆在一起。”张铮和同事们开玩笑,“这台设备就是我的‘孩子’。”

在研究团队的共同努力下,该设备最终按期完成各项任务指标要求。在2021年5月国家自然科学基金委工程与材料学部组织的结题验收中,专家组一致认为该项目“全面完成计划,研究工作取得突出进展”,综合评价为“优秀”。

面向未来,研发团队表示,目前的设备仅是1.0版本,在调试和使用过程中,设备从系统、软件、硬件等多方面将不断简化、优化,经过几年时间的调试,有望达到成果转化需求。

他们期待,该设备能为研制低功耗晶体管、高效率光电转换器件、自驱动可穿戴人工智能传感器等提供技术支持。