



变幻光波成新材

苏琳

2009年2月，国际著名的科学杂志《自然》（Nature）的记者经过对多国专家的走访和行业调研后，发表了一篇题为《中国“藏匿的”晶体宝藏》的文章，文中感叹，“一个中国实验室成为了一种具有重大科学价值的晶体的唯一来源。”这个实验室就是中国科学院院士陈创天领导的北京人工晶体研究与发展中心实验室，这个“具有重大科学价值的晶体”就是中国首个对国外实行技术禁运产品——“非线性光学晶体氟硼铍酸钾 $\text{KBe}_2\text{B}_3\text{O}_6$ F2”，简称“KBBF”。

“中国在非线性光学晶体研究领域对国际科研贡献很大，不仅可以称得上是世界大国，而且还是世界强国。”说到这里，陈创天充满自信，透着自豪。

的确如此，非线性光学晶体研究被国际学术界认为是中国最具有国际影响力的科学研究领域之一。目前国际上能够实用化的5种非线性光学晶体中，中国占了3种。这3种晶体均是在陈创天的阴离子基团理论指导下，由他的研究组和合作者一起研究、发现、发展、生长出来的。

学习奠定坚实基础

“立志成为中国科学事业的栋梁，为中国科学技术赶上国际先进水平而努力奋斗一生。”

1937年2月18日，陈创天出生在浙江省奉化市大桥镇斗门头村的一个知识分子家庭，在清爽宜人的江南水乡度过了美好的童年。新中国成立后，为了支援东北建设，陈创天告别就读的奉化中学，随着做会计师的父亲全家迁至辽宁省沈阳市，完成初中学业后，1954年考入重点中学沈阳二中读高中。

“我这一生始终能保持乐观向上的态度，养成了遇困难不低头的良好性格，即使是在最困难时期，我也坚信在共产党的领导下，中华民族必有立足于世界民族之林的能力，是和沈阳二中德、智、体全面发展的教育分不开的。”陈创天说，上世纪50年代中期，物质生活还很困难，10多个同学住在一间宿舍，吃的是高粱米小豆饭，但大家的精神却很振奋。



1999年，陈创天参加第九次国际晶体生长科学大会

陈创天从小对数学有着特殊的爱好。进入沈阳二中后，最感兴趣的是数学、物理两门课。陈创天记得物理老师在课上讲“以太”论时，说引力场是一种物质。通过这种物质，物体之间会产生引力。这种理论当时曾引起争论，说是引力场处于真空，不能认为是通过物质相互作用才得以实现。但这种当时颇为新奇的观点恰在陈创天的脑中挥之不去，根深蒂固。陈创天琢磨着，两个物体之间的相互作用怎么能不通过中间介质来实现呢？正是这种好奇心，促使陈创天一辈子跟物理打上了交道。这位物理老师告诉陈创天，要解决引力场的机理问题，一定要学物理，特别是理论物理。于是，陈创天决心报考物理专业，希望破解久久萦绕于心的疑问。

1956年8月，陈创天以优异成绩考入北京

大学物理系物理学专业。谈起北大6年的求学经历，陈创天庆幸自己遇到了好老师，“不是一个，而是一大批，当时教我们的老师都是国际一流的科学家。”上世纪50年代，北京大学物理系集中了一大批名扬海内外的著名学者。黄昆教“固体物理”和“固体理论”，王竹溪教“热力学”和“统计物理”，郭得仁教“特殊函数”，褚圣麟教“原子物理”，胡宁教“场论”……严格的基础教育、优良的师资、浓厚的科学研究氛围和民主的学风，使陈创天受到世界一流的训练，奠定了坚实的专业基础。“我在北大受到了扎实的理论物理方面的训练，以致以后无论是做研究还是做实验，都没有因为基本概念不清而犯错误。”就是在那时，陈创天确定了自己的人生追求和科研探索信念：“立志成为中国科学事业的栋梁，为中国科学技术赶上国际先进水平而努力奋斗一生！”陈创天说。

1962年，陈创天大学毕业。北大物理系把陈创天推荐给我国著名物理化学家、化学教育家卢嘉锡院士，前往中国科学院设在福建省福州市的华东物质结构研究所（现为中国科学院福建物质结构研究所）。

当时的华东物质结构研究所是研究化学的，主要研究微观结构和宏观性能之间的关系。时任所长的卢嘉锡对陈创天说，到这里工作，就要了解化学方面的情况，掌握化学知识。于是，在卢嘉锡的指导下，陈创天又开始了3年化学方面的学习，自学了结构化学、量子化学、群表示理论等等，在理论化学方面打下了坚实的基础。

1965年，经过慎重考虑，陈创天选择非线性光学材料结构和性能之间的关系作为研究方

向,并得到卢嘉锡的支持。

发现培育品牌晶体

陈创天的科研团队在世界上首次成功生长出厘米级尺寸的BBO单晶体,就是日后被国际同行誉为“中国牌”的晶体。

在以后的两年多时间,陈创天采用量子化学方法,对非线性光学材料的结构与非线性光学效应之间的相互关系进行了大量的理论计算,花费1年多时间完成了理论推导工作,又用1年的时间通过手摇计算机进行计算,首先算出了钛酸钡晶体的非线性系数,后来又算出其他一些晶体的非线性光学系数。1968年,陈创天提出“非线性光学效应是一种局域化的效应,是组成晶体的基本结构单元——阴离子基团的微观倍频系数的几何迭加,阴离子基团的微观倍频系数可以通过阴离子基团的局域化、量子化学轨道波函数,通过二级微扰理论算出来。”这就是国际上著名的非线性光学效应的阴离子基团理论。

1977年,陈创天被卢嘉锡任命为非线性光学材料探索组组长。陈创天根据自己提出的非线性光学效应的阴离子基团理论模型,以及自己积累的晶体生长等实验经验,同时开展了理论计算、结构选型、系统的固态化学合成、粉末倍频效应测试、单晶生长等实验工作。“新型非线性光学晶体的探索研究走上了系统研究的轨道。”陈创天说。

1978年,他开始结构选型。基于自己的“非线性光学效应的阴离子基团理论”,陈创天决定做紫外光谱区的非线性光学晶体。1979年,在研究组的共同努力下,他开始在硼酸盐化合物体系中探索新型非线性光学晶体,发现(B306)基团是一个较为理想的探索新一代非

线性光学晶体的基本结构单元,又在此基础上经过与合作者的一系列实验研究,确定低温相偏硼酸钡(BaB_2O_4 ,简称BBO)是一种优秀的非线性光学晶体。沿着这一科学思想,他们陆续发现了以(B307)基团为基本结构单元的LiB305(简称LB0)晶体和以(B03)基团为基本结构单元的KBe2B03F2(KBBF)等等。

1978年,陈创天发现偏硼酸钡化合物中的某一相可能是一个非常有希望实现新突破的新型非线性光学晶体。在卢嘉锡院士等研究所领导的支持下,他组织力量,对硼酸钡体系的相关性和晶体生长展开研究。1980年,陈创天的研究组在中国科学院物理研究所梁敬魁院士研究组的帮助下,确定了所发现的具有很强非线性光学效应的硼酸钡化合物是低温相偏硼酸钡,其化学分子式为 BaB_2O_4 ,简称BBO。随后2年,陈创天的科研团队在BBO上又取得新进展——使用熔剂生长法,在世界上首次成功生长出厘米级尺寸的BBO单晶体,就是日后被国际同行誉为“中国牌”的晶体。

BBO大块单晶体生长的成功,为陈创天研究组对该晶体进行一系列光学性能测定奠定了坚实的基础。通过测定倍频系数大小和相匹配关系,证明了BBO是非常优秀的非线性光学晶体,不但可以产生可见光谱区的谐波光,还可以通过Nd:YAG激光(波长1064纳米)的四次谐波,产生266纳米的紫外谐波光,其倍频转换效率(532至266纳米)大大超过当时被公认最好的紫外非线性光学晶体——尿素单晶。

1983年9月,陈创天首次向国外同行报告BBO晶体的非线性光学性能,引起国际激光界的关注。

1987年,陈创天和他的研究团队给世界带

来又一个惊喜：他们发现并生长出第二块“中国牌”非线性光学晶体LB0。与BB0相比，LB0紫外截止波长紫移到150纳米。LB0有适当的硬度和良好的机械加工性能，潮解性能良好，已经能够长出大尺寸、高质量的单晶。很快获得国际激光科技界和工业界的认可，并被广泛应用于激光工业界。

在发现BB0、LB0的同时，陈创天意识到，由于微观结构条件的限制，这两个晶体均无法通过简单的倍频技术产生深紫外光谱区的谐波光输出。经过反复计算和思考，陈创天又踏上一条长达10多年的新型非线性光学晶体的探索之路。

1998年，陈创天被调至中国科学院新成立的理化技术研究所，负责组建中国科学院北京人工晶体研究发展中心。在知识创新工程支持下，陈创天研究团队吸收了一批曾在国接受过多年训练的青年科学家，研发实力得到进一步提高。2002年，陈创天研究组研制出新型晶体器件——氟硼铍酸钾棱镜耦合装置。2006年，中科院物理所与理化所合作，使用KBBF—PCD器件，在国际上首次成功建造了真空紫外激光角分辨光电子能谱仪。此台仪器的核心部件就是能产生177.3纳米相干光的KBBF—PCD器件，使光电子能谱仪发生了革命性的变化，大大促进了人们对固体材料中各种奇异电子特性的了解。

成果创造市场价值

目前，中国LB0晶体的销量占全世界80%以上，年销售额超过700万美元。真正有用的成果是一定会创造价值的。

1987年，陈创天因BB0和LB0的发现荣获“第三世界科学院化学奖”，1989年获得“首

届陈嘉庚物质科学奖”。

“你猜猜，这一块卖多少钱？”记者接过陈创天递过来的一块长方体形器件。只见一块约1毫米厚度的晶体被夹在两块紫外石英晶体中间，状似“三明治”结构。“这就是2002年研制出来的新型晶体器件KBBF—PCD。每个器件的市场价格3万至5万美元不等。”

陈创天告诉记者，这个被称为KBBF—PCD的器件已经被应用在中日两国研制的真空紫外超高分辨率光电子能谱仪中，并于2005年首次直接观察到超导体在超导态时的超导能隙和库珀电子对的形成，为高温超导体的机理研究提供了新的实验证据，引起了相关领域科学界的高度重视。由于其不可替代的关键作用，KBBF—PCD器件被称为光电子能谱仪的芯片。

基于KBBF—PCD器件的深紫外全固态激光光源，由于其高光束质量、窄线宽等优点，在先进科学仪器设备制造、193纳米光刻技术和微纳米精细激光加工的发展，以及化学反应动力学等基础研究方面有重要应用。

“这些晶体在许多地方都派上了用场。”陈创天告诉记者，深紫外177.3纳米激光光源不但能够应用于光电子能谱仪，而且还能应用于其他科学仪器。例如，深紫外激光光发射电子显微镜、深紫外激光拉曼光谱仪、深紫外激光光致发光光谱仪、深紫外激光原位时空分辨隧道电子谱仪等，将为基础科学研究带来强有力的探测手段。如177.3纳米固体激光光源使用于光电子发射显微镜（PEEM），通过表面光电子发射的成像技术，能详细了解图像的各种物理、化学内涵。

陈创天说，现在液晶电视的色彩，只能反映自然界颜色的45%，而下一代将是激光电

视,利用三基色激光,可反映自然界超过70%的色彩,色饱和度更好,其中的绿光就是通过LBO晶体的倍频产生的。另外,通过我国生产的掺钕钷酸钇晶体和磷酸钛氧钾晶体倍频产生的绿光被广泛应用于投影仪中,影像效果也会更好;利用KBBF晶体倍频产生的193纳米光源,也正应用于大规模集成电路光刻技术中。

为了保护自己的科研成果,陈创天研究组为LBO申请了专利。“目前中国LBO晶体的销量占全世界80%以上,年销售额超过700万美元。”陈创天说,真正有用的成果是一定会创造价值的。

为了更好地利用KBBF单晶和棱镜耦合器件,发展中国先进的仪器制造业,推动我国具有自主知识产权的先进科学仪器的研制,2007年11月,财政部和中国科学院首次启动了一个专项名称为“深紫外固态激光源前沿装备研制”国家重大科研装备项目。此专项的核心部件就是KBBF—PCD器件。

说到成功的原因,陈创天认为主要靠3点:“第一,是国家的长期坚持,不急于求成。晶体材料的研究从未中断,一直延续下来。第二,是晶体材料领域的科学作风好,不功利。晶体材料是实用科学,以应用、拿得出有用的材料为目的,在这个领域很难弄虚作假。第三,是中国晶体界的团结合作。”

非线性光学和非线性光学晶体

当一束单色光通过各种形状的光学玻璃时,你立刻就会发现,除去光的方向会改变外,此束光的颜色是不会发生改变的,这就是我们通常所说的经典光学,也就是线性光学。但是当一束亮度很高的单色激光,通过一块从空间结构来说没有对称中心的单晶体时,你会

发现,此单色激光在通过晶体后,将会产生两种颜色的激光(也就是两种波长),一种是原来的颜色,一种是和原来颜色完全不同的另外一种颜色的激光(其波长是原来波长的两倍),此种现象就是非线性光学现象,此种晶体就是非线性光学晶体。因此,非线性光学晶体也就是光波的变频器件。

一种非线性光学晶体的变频能力,也就是把一种颜色的激光转变为另外一种颜色激光的能力,是由该晶体的空间结构所决定的。我国科学家首次在国际上解决了这个问题,并发现了许多种硼酸盐非线性光学晶体,例如低温相偏硼酸钡、三硼酸锂、三硼酸铯和氟硼铍酸钾等晶体。这些晶体具有很强的使一种颜色的激光变成另外一种颜色激光的能力,因此我国这一领域的研究在国际上处于领先水平。



陈创天和妻子合影