

科技自立自强之路

从原始社会崇拜和利用光,到现代社会研究与应用光,人类“追光”的历史贯穿了整个文明发展历程。
发现日光有7种颜色、发现无线电波可以用来

通信、发现紫外线能够杀菌、发现X射线和伽马射线能够透视物体内部结构……激光发明后,“追光者”们探索的光的波长,从可见光的400至700多纳米一直缩短至紫外线的300多纳米。

当时间走进20世纪末,人们有了新目标——进军波长小于200纳米的深紫外光。
与此前所有的光学发展史不同,这次,跑在最前面的“追光者”是中国人。

深紫外世界里的“追光者”

■本报记者 倪思洁 见习记者 赵宇彤

1 勇闯“无人区”

深紫外激光具有波长短、能量分辨率高、光子通量密度大等特点,在激光光刻、激光微加工等领域颇具应用价值。一些先进科学仪器也会将其作为“探针”,探测物体内部结构。

长期以来,国际激光学界普遍认为200纳米是一道难以跨过的坎,谁能迈过去,率先造出实用化、精密化的深紫外激光光源,谁就能抢占深紫外领域制高点。

这一挑战深深吸引了中国科学家。我国人工晶体专家陈创天早在1990年就注意到氟代硼酸钡(KBBF)晶体及其光学特性。1996年,他和激光专家许祖彦利用多波长宽调谐光参量放大器,首次产生出184.7纳米的激光,为打破200纳米“魔咒”带来了希望。

2001年,已调入中国科学院理化技术研究所(以下简称理化所)工作的陈创天带领团队成功生长出实用的KBBF晶体,这是世界上唯一能直接倍频产生深紫外激光的非线性光学晶体。

而许祖彦从上世纪80年代末起,就怀着“填补空白”的初心,尝试研制深紫外激光器。

于是,陈创天和许祖彦,一位手握晶体技术,一位手握激光技术,两人一拍即合,决定联手闯一闯深紫外的“无人区”。

他们首先要找到有深紫外激光使用

需求的用户,据此设计并制造相应的深紫外激光器。为了寻找合作用户,接下来3年多的时间里,年逾六十的许祖彦变身“推销员”,在全国各地十几个研究机构穿梭游说,详细讲解深紫外激光在科学研究中的潜力。

当时,他被问到最多的一个问题是,“这个领域在国外有哪些论文?国际上有没有类似的事例?”每次,许祖彦都如实地说:“目前全世界还没有其他人从事这一研究,只有我们发表过文章。”结果,他不出意料地总是无功而返。

正当许祖彦和陈创天一筹莫展时,两封邮件带来了转机。

邮件来自刚从美国访学回来的中国科学院物理研究所(以下简称物理所)研究员周兴江。回来前,周兴江在美国斯坦福大学同步辐射实验室工作,研究高温超导材料内部的电子状态。回国后,由于当时国内还没有适用的同步辐射光源装置,他一时间找不到合适的科研平台。

2004年5月的一天,周兴江无意中在一本国际刊物上看到陈创天和许祖彦发表的论文,他们用许祖彦研制的世界首台多波长宽调谐光参量放大器实现了184.7纳米的深紫外全固态激光。这让周兴江眼前一亮:“我的研究有没有可能用深紫外激光器实现呢?”按照论文作者信

息,他给许祖彦和陈创天各发了一封邮件,很快就收到回复和邀约。周兴江也因此成为第一位合作用户。

在财政部专项基金及中国科学院仪器设备研制和改造项目支持下,经过多方共同努力,这次合作首战告捷。2006年底,他们以深紫外激光为光源,研制出国际首台“真空紫外激光角分辨光电子能谱仪”,并测量出电子的能量和动量。看着电脑上显示的能谱图,周兴江难掩心中激动:“比第三代同步辐射光源光电子能谱仪的精度还要高!”

有了成功的经验,陈创天和许祖彦更加坚定了走下去的信心。2007年,财政部和中国科学院共同设立“国家重大科研装备项目”试点专项。“深紫外全固态激光源前装装备研制”(以下简称一期项目)成为首批启动的8个试点项目之一,目标是研制8类实用化、精密化深紫外全固态激光源。项目由理化所牵头,许祖彦和陈创天担任首席科学家。

2013年,一期项目完成后,深紫外全固态激光源前装装备研制(二期)项目(以下简称二期项目)启动。许祖彦提出将研究领域从物理、化学、材料拓展至信息、生命、资环领域,并研制出6套国际领先的深紫外全固态激光源重大科研装备,建立起“深紫外晶体—激光源—前装装备—科学研究—产业化”的完整链条。

2 攻下实用级 KBBF 晶体

在深紫外全固态激光源的研制中,KBBF晶体是研制链条的起点。

KBBF晶体就像一颗小石子,体积很小,层状结构极易引起解理,很难长出大而厚的晶体,自然生长下厚度只有0.1毫米。更难的是,KBBF晶体生长不能采用传统的“晶种法”,只能靠自然生长,即便撒下晶体“种子”,也无法诱导在其上定向聚集核并生长,反而会在多处自发成核生长,最终收获一大堆小而薄的碎晶体。

1999年7月,陈创天牵头组建团队,理化所研究员王晓洋就是其中的一员大将。他于2004年加入陈创天团队,负责KBBF晶体生长。

KBBF晶体生长主要采用“炉海战

术”,4个月才能长出一炉,所以他们就安排了一堆炉子,给每个炉子创造不同的晶体生长条件。

每次开炉无异于“开盲盒”,而结果总是不尽如人意。

就在王晓洋极度郁闷之时,2006年下半年,连续两个周期,有一台炉子很“争气”地长出了厚达3毫米的KBBF晶体。“完全满足实用需求!”王晓洋松了口气,认为已经解决了晶体生长难题。

可惜,喜悦有多大,失望就有多大。第三个及后面几个试验周期,KBBF晶体的良品率急剧下降。王晓洋花了很长时间才找到原因,原来是晶体生长所用原材料的生产厂家换了,此前“两连胜”的KBBF晶体原料都来自同一个厂家,但第

三个周期开始前,厂家突然倒闭,他们不得不更换了新厂家,买到的原料产自不同矿区,所含微量元素也有所不同。

痛定思痛,王晓洋决定从头制备原料。他们一边重新生长晶体,一边摸索出一套原料制备和提纯方法。2013年,一期项目验收时,他们在国际上首次实现了批量生长大尺寸、高质量KBBF晶体的技术。

一次次技术迭代、性能优化让KBBF晶体的品质越来越高。“到2023年二期项目结束时,我们完全攻克了KBBF晶体生长工艺难题。”王晓洋说,二期项目结束时,KBBF晶体的良品率从一期项目的10%提升到30%。而如今,KBBF晶体的良品率已达60%以上,不但满足了实用要求,还逐渐走向商业化。

3 从晶体到激光器

在开展晶体攻关的同时,激光器的研制也在进行。早在二期项目立项之前,许祖彦就已经开始摸索“如何用KBBF晶体制成实用化精密的深紫外激光源”。

一般来说,当激光器发射出的激光以特定匹配角穿过非线性光学晶体时,射出的激光线会“一分为二”,多出的这束光线的波长会变为原激光波长的1/2,频率则提升至两倍。这被科学家称为“激光倍频技术”。

当时国际上鲜有人涉足波长小于200纳米的固态激光“深紫外激光”研究。许祖彦等人做了一个设计,如果能够用好KBBF晶体,1064纳米激光经过六倍频,便可产生波长177.3纳米的深紫外激光。

要实现这样的设计目标,首先需要将晶体和棱镜无缝组装在一起。

起初,许祖彦和陈创天试着将KBBF晶体按照一定方向“粘”在两个紫外级石

英棱镜之间,然而,许祖彦找了两年多,始终没找到既能将棱镜和KBBF晶体粘在一起,又能透过深紫外光的光胶。

既然没有,那就自己造。团队另辟蹊径,发明了光胶专利技术,用一种特殊工艺将KBBF晶体和棱镜表面打磨得光滑平整,然后利用分子间作用力,直接让棱镜和晶体紧紧耦合在一起。凭借这种没有胶的光胶工艺,他们成功发明了全球首个KBBF晶体棱镜耦合装置,首次实现1064纳米激光的六倍频输出,将全固态激光波长缩短至177.3纳米。

2005年,相关技术申报了国际专利并被授权。2020年,我国商务部和科技部联合发文,将“KBBF晶体生长与棱镜耦合器件加工技术”列入限制出口技术目录。这成为我国少有的对国外实行技术禁运的高新技术。

2007年,一期项目立项后,他们继续

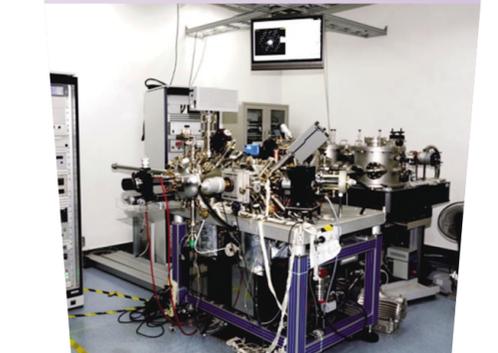
探索如何将深紫外棱镜耦合倍频器件发展成全固态深紫外激光源。

理化所研究员张申金是首台皮秒175~210纳米宽调谐深紫外全固态激光源研制过程的亲历者之一。他记得,2010年,他们度过了一个压力极大的夏天。皮秒175~210纳米宽调谐深紫外全固态激光源属于国际首创,不仅要实现实用化与精密化的样机并将其配套到前装装备光电子能谱仪上,还要实现每次开机每天运行24小时,至少连续运行约7天的目标。

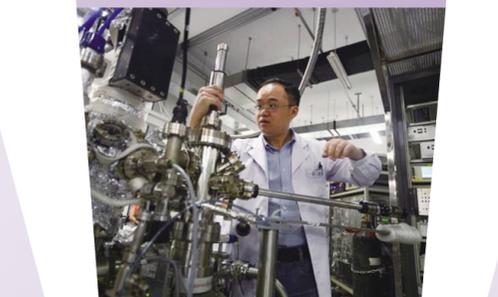
为满足光电子能谱仪对波长宽调谐后光束指向的要求,许祖彦和张申金一起讨论二倍频和四倍频关键技术问题与解决方案,最终自主研发了高精度350~420纳米宽调谐反向级联二倍频系统和高精度175~210纳米宽调谐深紫外激光产生、整形及光束指向自动调控系统,满足了整机要求。



▲2009年3月,国际首台纳秒深紫外全固态激光源实用化样机研制成功。左一为许祖彦,左二为一期项目总指挥袁文山。



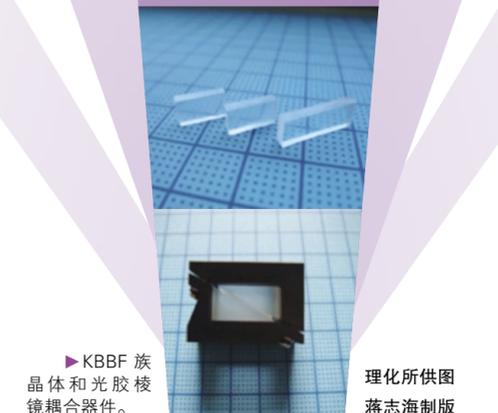
▲深紫外全固态激光光发射电子显微镜。



▲2013年9月,研究人员操作基于飞行时间能量分析器的深紫外激光角分辨光电子能谱仪。



▲2013年9月,研究人员在操作深紫外激光光化学反应仪。



►KBBF族晶体和光胶棱镜耦合器件。

理化所供图 蒋志海制版

4 受益者

在晶体与激光器技术被逐一攻克的同时,“定制化”的深紫外全固态激光装置平台越来越多。

周兴江对10多年来的持续合作攻关历程记忆犹新。

2006年,周兴江和陈创天、许祖彦初次合作首战告捷后,他们在二期项目中继续合作。一期项目8台科学仪器装备,周兴江团队负责了其中两台半的制备工作。

这其中的“平台”设备,指的是调整周兴江此前合作建设的真空紫外激光角分辨光电子能谱仪。另外两台设备,一台是深紫外激光自旋分辨光电子能谱仪,另一台是基于飞行时间能量分析器的深紫外激光角分辨光电子能谱仪。

一期项目结束后,周兴江盼望能有一台具备极低温研究环境的深紫外激光装备,观察极低温条件下超导材料的电子结构,于是又参与了二期项目。

历时8年,周兴江团队和陈创天、许祖彦团队制成国际首台大动量极低温深紫外激光光电子能谱仪,不仅创造了0.8开氏度的极低温纪录,还将光子能量提升到7.4电子伏特。至此,科研人员终于能精准“看清”超导材料的微观电子结构,探索超导、拓扑等先进量子材料奇特特性的起源了。

从2004年合作至今,作为我国紫外全固态激光装备研制的见证者和参与者,周兴江收获颇丰。2013年,他因以深紫外全固态激光前装装置为平台做出的重要研究成果,荣获全球华人物理学会亚洲成就奖。今年,他又基于大动量极低温深紫外激光角分辨光电子能谱仪,揭示了铁基超导配对机理中的关键信息,引发国际关注。

深紫外全固态激光装置的受益者,还有中国科学院大连化学物理研究所(以下简称大化所)。深紫外一期项目期间,理化所为大化所定制的深紫外激光源使其发现了石墨烯对催化反应的调控作用、石墨烯对铂金催化表面反应有限增强效应等不少新现象。

除了周兴江团队、大化所团队外,理化所还与中国科学院精密测量科学与技术研究院团队合作,用特别定制的深紫外激光研制铝离子光频标;与中国科学院化学研究所团队合作,研制出高灵敏度深紫外/红外离子化检测质谱光谱仪;与中国科学院半导体研究所团队合作,研制出深紫外激光调制反射光谱仪。

从2007年一期项目开始,到2023年二期项目验收,我国科学家自主研发成功16种20台深紫外全固态激光源前装科研仪器,覆盖材料、物理、化学、生命、信息、资环六大领域。

5 向远而行

经过二期项目15年的探索,我国深紫外科研仪器设备已经初步形成“深紫外晶体—激光源—前装装备—科学研究—产业化”的自主创新链条。

“过去,中国所有大型科研仪器设备都得从国外进口。如今在深紫外全固态激光源领域,我们可以独立自主研制大型科研仪器设备了,这极大增强了我国科研人员的信心。”许祖彦说。

一期项目结题验收会上,许祖彦曾在技术总结报告中说:“深紫外激光大型科学装置是国际首创。我们用事实证明了中国人有可能、有能力自主创新开发大型科学装置,我们今天突破了!”

时至今日,科学家们探索的脚步并未停止。他们下一阶段的目标之一是推进深紫外全固态激光装置产业化,研制出更多品种的、包括连续出光的激光器在内的深紫外激光源。

在应用方面,现已84岁的许祖彦有一个心愿——用深紫外全固态激光装备,把国际长度计量基准固定下来。随着制造业的发展,测量精度的要求也在不断提高。早在19世纪初,物理学家就提出以可见光波长作为长度基准的设想。许祖彦希望二期项目中的铝离子光频标设备,能够利用精准深紫外激光,助力我国“做出中国自己的标准长度,领跑世界”。

如今,深紫外激光这块处女地已经繁花似锦。面对无限的应用可能,许祖彦反复说:“大型科学仪器的突破绝不可能是一个人努力的结果,而是国家、中国科学院、各科研机构共同协作的成果,是集体智慧的结晶。无论未来怎样发展,这一点不会变。”