

上海超强超短激光实验装置研制进展

——专访中国科学院上海光学精密机械研究所李儒新院士



超强超短激光的发展与应用是国际激光科技的最新前沿与竞争重点领域。当前, 超强超短激光正处于取得重大科技突破和开拓重大应用的关键阶段。而中国科学家可望在此领域取得重大突破并在世界上占有一席之地。这既是重大挑战, 更是难得的机遇。上海超强超短激光实验装置(SULF)作为我国正在建设的大科学装置之一, 是上海建设具有全球影响力的科创中心、打造世界级重大科技基础设施集群的首批重大项目之一。为此, 本刊编辑部就 SULF 装置的研制背景、最新建设现状和未来主要应用和发展方向, 专访了 SULF 项目负责人、中国科学院上海光学精密机械研究所李儒新院士。

1 SULF 装置的重要意义及国内外发展现状

《强》刊编辑部:

SULF 又称“羲和”激光装置, 是上海建设具有全球影响力科创中心、打造世界级重大科技基础设施集群首批启动建设的重大项目。请您介绍一下上海超强超短激光实验装置研制背景。

李儒新:

超强超短激光被认为是目前已知的最亮光源。在这样的激光条件下, 激光与物质的相互作用进入到了一个前所未有的强相对论性与高度非线性的范畴, 能在实验室内创造出前所未有的超高能量密度、超强电磁场和超快时间尺度综合性极端物理条件, 在激光加速、激光聚变、等离子体物理、核物理、天体物理、高能物理、材料科学、核医学等领域具有重大应用价值。超强超短激光的发展与应用是国际激光科技的最新前沿与竞争重点领域之一。发达国家正在大力发展超强超短激光用户装置, 并展开激烈竞争。也正因此, 发明啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA)这一产生超强超短激光的技术的法国科学家 Gérard Mourou 和加拿大科学家 Donna Strickland 获得了 2018 年诺贝尔物理学奖。

目前, 超强超短激光正处于取得重大科学技术突破和开拓重大应用的关键阶段, 未来 5 年左右激光的聚焦强度可能达到甚至突破 10^{23} W/cm²。国际上正在大力发展超强超短激光光源以及依托其的前沿科技创新平台。最具有代表性的是 2006 年 10 个国家和地区的 30 个科研机构联合向欧盟提出的极端光设施计划(Extreme Light Infrastructure, 简称 ELI 计划), 其主要科学目标是: 面向 100 GeV(1 GeV = 10^9 eV)的激光加速, 面向 Schwinger 场的真空结构研究, 1~10 keV 相干 X 射线产生与阿秒科学研究和光核物理研究。2012 年以来, ELI 计划陆续启动了前 3 个子项目的研究, 投入经费共 8.5 亿欧元, 近期将陆续研制完成多个 10 PW(1 PW = 10^{15} W)级超强超短激光系统并建成用户装置, 同时为下一步研制 200 PW 级超强超短激光大科学装置打下基础。同时, 英国和法国正紧锣密鼓地开展各自 10 PW 级超强超短激光装置的研制工作, 俄、美、德等国也纷纷提出了各自的 10 PW 级乃至 100 PW 级超强超短激光装置研究计划。

中国科学院组织专家编写的《中国至 2050 年重大科技基础设施发展路线图》也相应提出了我国发展超强超短激光、建设极端条件实验平台的建议。中国工程物理研究院激光聚变中心研制了 5 PW 级超强超短激光装置, 进一步将建设双路 10 PW 级超强超短激光, 以及未来的 200 PW 激光系统。中国科学院物理研究所也成功研制了 PW 级超强超短激光装置并发展了超高信噪比激光脉冲的产生技术研究。中国原子能科学研究院已建立了 10 TW(1 TW = 10^{12} W)级超强超短激光和质子加速研究平台。上海交通大学正在通过光参量啁啾脉冲放大(Optical Parametric Chirped Pulse Amplification, OPCPA)技术方案建立 100 TW 量级中红外波段的超强超短激光系统。

中国科学院上海光学精密机械研究所 2007 年成功研制出当时世界最高功率(0.89 PW/29.0 fs)的飞秒激光系统。2013 年发展了寄生振荡抑制、精密时空操控、级联脉冲净化等新技术, 成功研制出当时世界最高激光峰值功率的 2 PW 激光放大系统。2014 年进一步发展了泵浦/信号时序控制和注入优化抑制大口径钛宝石放大器寄生振

荡的新方法,基于150 mm口径钛宝石晶体,实现了192.3 J放大输出,可压缩脉宽至27.0 fs,峰值功率支持高达5.13 PW,这是当时国际最高峰值功率的激光放大系统,并创新性地提出了时域双脉冲泵浦抑制大口径钛宝石放大器寄生振荡的新技术,为后续开展10 PW超强超短激光研究提供了先进的技术储备。

在OPCPA技术路线方面,中国科学院上海光学精密机械研究所2013年首次实验验证了CPA/OPCPA混合放大器方案,实现0.61 PW激光脉冲输出,2014年又进一步将输出能力提升到1 PW,验证了CPA/OPCPA混合放大器方案作为10 PW级超强超短激光装置总体技术路线的可行性。并利用上述激光装置,在激光驱动产生高亮度超短波长光源与超快高性能粒子束等方面也取得了重要研究成果。

基于上述研究基础,2016年中国科学院上海光学精密机械研究所承担了由国家和上海市发展和改革委员会共同投资的国家重大科技基础设施项目“上海超强超短激光实验装置”(Shanghai Superintense Ultrafast Laser Facility, SULF)的建设。

2 SULF装置的构成、特点、性能指标及作用

《强》刊编辑部:

2016年12月2日,上海超强超短激光实验装置(SULF)项目开工仪式在上海浦东张江项目场地举办,目前已经进入项目建设的第4个年头,请您介绍一下上海超强超短激光实验装置建设现状。

李儒新:

上海超强超短激光实验装置(SULF)是上海建设具有全球影响力的科创中心、打造世界级重大科技基础设施集群的首批重大项目之一。该装置主要包括一台重复频率的10 PW超强超短激光系统,同时具备高重复频率的1 PW级激光输出束线,利用该激光系统驱动产生的高亮度超短脉冲高能光子与粒子束,建立极端条件材料科学研究平台(DMEC)、超快亚原子物理研究平台(USAP)、超快化学与大分子动力学研究平台(MODEC)3个用户实验终端,面向国内外高校、科研机构和企业全面开放,提供先进的物质科学与生命科学研究手段。

SULF项目目标是建成世界首套10 PW超强超短激光系统。该激光系统选择高对比度多级啁啾脉冲放大器链和终端大口径啁啾脉冲放大器的技术方案,实现10 PW峰值功率、30 fs级激光脉冲输出能力,激光中心波长800 nm,额定脉冲宽度30 fs,最高激光聚焦强度超过 10^{22} W/cm²,同时具备高重复频率(0.1 Hz)1 PW激光脉冲输出能力。

在国家发改委、上海市和中国科学院的共同支持下,上海超强超短激光实验装置(SULF)的研制工作取得多个重要阶段性进展。

2016年8月,在国际上首次实现了200 J以上能量水平的宽带激光放大输出,验证了时域双脉冲泵浦技术抑制大口径钛宝石放大器寄生振荡的可行性。采用大口径光栅的脉冲压缩器压缩脉冲宽度至24 fs脉冲,成功实现了5 PW激光脉冲输出,该成果被2017年2月出版的《Science》杂志评述文章评述为“中国科学家打破了最高激光脉冲峰值功率的世界纪录”,并入选中国科学院2016年度重大科技成果(12项)之一,以及国家“十二五”科技创新成就展。

2017年10月,上海光学精密机械研究所在大口径钛宝石晶体等关键单元器件技术方面取得突破,并解决了大口径高增益钛宝石放大器中的系列关键科学技术问题,在国际上首次实现了300 J以上能量水平的宽带(半高全宽达到70 nm)激光放大输出,支持10 PW峰值功率,达到国际同类研究的领先水平。

《Science》杂志于2018年1月26日出版的以《神奇的光》为标题的新闻评论文章,进一步高度评价上海超强超短激光实验装置(SULF)的研究成果是1960年第一台激光器发明以来在激光脉冲功率提升方面的第5个重大突破。

2018年7月,上海超强超短激光实验装置(SULF)开始在新建的实验大楼进场。在进场的同时,对10 PW激光系统的前端和主放大器等部分在原有的基础上进行升级改造,优化并验证大口径钛宝石放大器在一定重复频率下的高转换效率、宽带激光放大的总体技术方案。发展了重复频率的大能量钕玻璃激光泵浦技术、交叉偏振波和短脉冲光参量放大等信噪比提升技术、多光束泵浦的重复频率钛宝石宽带放大技术、大口径光束消色差传输技术等。特别是研制成功多台重复频率为3 min/shot、输出脉冲能量为100 J的泵浦激光器,填补国内空白。在此基础上,成功升级10 PW激光放大器,重复频率由每2~3 h一发大幅度提升至约每3 min一发,大大提升物理实验效率。10 PW激光放大器输出能量达到400 J以上,再次刷新了钛宝石激光放大器输出能量的世界纪录。通过优化补偿增益窄化和高阶色散效应,获得小于25 fs的压缩脉冲脉宽测试结果,激光系统具备最高峰值功率达10 PW以

上的输出能力。

目前,上海超强超短激光实验装置(SULF)已基本建成并部分进入试运行状态,用户平台已搭建完成并开展测试实验,正逐步验证验收指标。

3 SULF 该装置未来的发展趋势和挑战

《强》刊编辑部:

上海超强超短激光实验装置开建以来,已经取得了多个重要进展。请您介绍一下上海超强超短激光实验装置未来的发展趋势和挑战。

李儒新:

SULF 已被纳入上海建设具有全球影响力的科创中心、打造世界级重大科技基础设施集群的首批重大项目,也将是上海张江综合性国家科学中心的核心平台之一,即将建成并开放运行。

该装置未来可以根据用户需求,进一步提升装置性能指标,扩充用户线站,提升装置使用效率。也拟与同处上海张江的上海光源和多台自由电子激光装置配合使用,形成独具特色的世界级大科学装置集群。

另一方面,未来将重点聚焦新型超强激光光场创立及其特性操控研究方向,对超高时间对比度超高强度激光光场的调控进行研究,并进一步开展面向 $EW(10^{18} \text{ W})$ 级峰值功率的极端超强光场产生与操控的新原理研究、以及中远红外与 X 射线新波段等新型超强激光光场创立及其特性操控的新原理研究。带动高能量密度物理、高能物理与核物理、激光高能加速器、新一代超强激光技术和强激光相关材料科学等的创新发展。

基于 SULF 装置的研究基础,上海光学精密机械研究所进一步创新性地提出了在硬 X 射线自由电子激光装置上建设以 100 PW 超强超短激光为核心的极端光物理线站的建议。该建议已被纳入“十三五”国家重大科技基础设施项目“硬 X 射线自由电子激光装置”的建设规划,并已于 2018 年 4 月正式启动建设。