

·特邀综述·

上海超强超短激光实验装置

冷雨欣*

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 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。结合国内外超强超短激光研究现状和趋势,简单介绍了 SULF 的研制背景、建设现状和未来主要应用和发展方向。

关键词 激光技术; 超快器件; 超强超短激光

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0100001

Shanghai Superintense Ultrafast Laser Facility

Leng Yuxin *

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Shanghai Superintense Ultrafast Laser Facility (SULF) is one of the key projects as major science infrastructures belonging to science and technology innovation center with global influence in Shanghai. Combining the research status and trends of superintense ultrafast laser at home and abroad, we briefly introduce the background, current status, and major potential applications of SULF.

Key words laser technique; ultrafast devices; superintense ultrafast laser

OCIS codes 140.3538; 140.3460; 320.7090

1 引言

超强超短激光(一般指峰值功率大于 1 TW, 脉冲宽度小于 100 fs)的出现与迅猛发展,为人类提供了前所未有的极端物理条件与全新实验手段^[1-2],使得自然界中只有在恒星内部或是黑洞边缘才能找到的高能量密度甚至超高能量密度极端条件可能在实验室内得以创造。实验室内台式激光系统目前已经可以产生重复频率的超短脉冲(从 100 fs 到 10 fs 量级)、超高功率(从 100 TW 到 10 PW 量级)的激光^[3-6]。目前,超强超短激光经聚焦得到的最高光强已达到 10^{22} W/cm² 量级^[7],而自然界中已知的最高光强相当于 10^{20} W/cm² 量级的宇宙伽玛射线暴的强度,所以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,例如利用超强超短激光能够驱动产生多种高品质的次级辐射,包括台式化高能电子、高亮度 γ 射线源及超快阿秒脉冲源等,有望为基于加速器的新光源、核材料探测与处理、分子动力学和化学反应探测等重大应用带来变革性推动。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,正如《科学》杂志专栏文章指出,“这项工作将影响每一项研究,从聚变到天体物理”^[8]。超强超短激光在原子分子物理、化学、材料科学、阿秒科学、等离子体物理、核物理、天体物理、粒子物理、医学与生命科学等领域具有重大应用价值,是国际科技竞争的重大前沿领域之一。发达国

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-11-05; 录用日期: 2018-11-19

基金项目: 国家重大科技基础设施项目、中国科学院战略性先导科技专项 B 类(XDB1603)、政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0119300)、国家自然科学基金创新群体项目(61521093)

* E-mail: lengyuxin@siom.ac.cn

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,发明啾啾脉冲放大(CPA)这一产生超强超短激光技术的法国科学家 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超强超短激光光源的前沿科技创新平台,其中最具有代表性的是 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 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^[9]。2012 年以来,ELI 计划(参见 <http://eli-laser.eu>,www.eli-beams.eu,www.eli-hu.hu,www.eli-np.ro)陆续启动了 ELI-NP、ELI-Beamlines 和 ELI-ALPS 3 个装置的建设,投入经费共 8.5 亿欧元,原计划于 2018 年前陆续研制完成多个 10 PW 级超强超短激光系统并建成用户装置,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的研究计划,如美国 75 PW 的光参量放大束线(Optical Parametric Amplifier Line, OPAL)计划、俄罗斯 180 PW 的艾瓦中心极端光学研究(Exawatt Center for Extreme Light Studies, XCELS)计划等。

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》也相应提出了我国为发展超强超短激光需实现极端条件实验平台的建议。我国开展 PW 级超强超短激光及其应用研究的主要机构包括中国科学院上海光学精密机械研究所、中国工程物理研究院激光聚变研究中心和中国科学院物理研究所等。中国工程物理研究院激光聚变研究中心研制了 5 PW 级超强超短激光装置,该装置的特色是基于全光学参量啾啾脉冲放大(OPCPA)技术,通过与现有强激光装置相结合,可实现 fs 级超强超短激光与 ns 级、ps 级高功率激光的多束同步输出^[10]。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^[4]。此外,中国原子能

科学研究院在基于准分子激光放大的短波长超强超短激光研究方面很有特色,也已建立了 10 TW 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 OPCPA 技术方案建立 100 TW 级的中红外波段超强超短激光系统^[11]。

中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室于 2007 年成功研制激光功率为 0.89 PW、脉宽为 29.0 fs 的飞秒激光系统^[12];在此基础上,2013 年进一步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,有效解决了大口径钛宝石高增益放大、超高时间对比度等关键科学技术问题,成功研制激光峰值功率为 2.0 PW 的激光放大系统,并突破输出激光脉冲达到超高时间对比度(10^{11})的关键技术难题;2014 年进一步发展了抽运/信号时序控制和注入优化抑制大口径放大器寄生振荡的新方法,基于 150 mm 钛宝石晶体实现 192.3 J 放大输出,压缩脉宽 27.0 fs,峰值功率高达 5.13 PW^[13],并创新性地提出时域双脉冲抽运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,近年来也提出了以高对比度啾啾脉冲放大链与光学参量啾啾脉冲终端放大器相结合的混合放大器方案为总体技术路线,有效利用了 CPA 技术的高稳定性和高转换效率,以及 OPCPA 技术的无横向寄生振荡、无热效应、B 积分小等优点,充分发挥 CPA 和 OPCPA 两种激光放大技术的优势;2013 年实验验证了 CPA/OPCPA 混合放大器方案,实现 0.61 PW 激光脉冲输出^[14],2014 年又进一步将输出能力提升到 1 PW^[15],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。同时利用上述激光装置,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 建设现状

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。按照上海市建设具有全球影响力的科技创新中心的战略部署,在上海张江综合性国家科学中心打造高度集聚的世界级重大科技基础设施群,SULF将成为其中重要的组成部分。

项目的法人单位为中国科学院上海光学精密机械研究所,项目共建单位为上海科技大学,李儒新院士担任项目经理兼总工程师,徐至展院士担任项目首席科学家。该项目的目标是建成世界首套10 PW级超强超短激光装置。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,实现峰值功率为10 PW、脉宽为30 fs级的激光脉冲输出能力,激光中心波长为800 nm,额定脉宽为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)的1 PW激光脉冲输出。基于激光束线建成如下3个用户实验终端:

1) 极端条件材料科学研究平台。基于高功率激光脉冲产生极端物理条件,开展极端物理条件下材料的超高时间分辨动力学研究,在高温、高压极端物理条件下重要材料的动态特性研究等方面具有不可替代的重要应用需求。

2) 超快亚原子物理研究平台。基于超强超短激光驱动产生的fs级至ps级高强度高能质子束等超快高能粒子束流,以及超快高强度高能光子束流等,开展等离子体状态反应截面、低宇宙环境噪声下小截面反应、高能光子巨共振、点质子源探测观物理和正电子无损探测等方面的创新研究。

3) 超快化学与大分子动力学研究平台。基于超强超短激光驱动产生的飞秒X射线源、超快电子束和太赫兹强场,利用散射和衍射相干成像等技术开展有机大分子的结构测定、化学键瞬时诞生与化学反应机理和人工光合反应等基础研究。

项目执行以来,在国家发展改革委、上海市和中国科学院的共同支持下,SULF的研制工作取得重要阶段性进展:2016年8月,国际上实现了200 J以上能量水平的宽带(70 nm)激光放大输出,验证了时域双脉冲抽运技术在抑制大口径钛宝石放大器中的可行性。采用大口径光栅的脉冲压缩器压缩脉冲

宽度至24 fs,成功实现了5 PW激光脉冲输出^[16],该成果被2017年2月《科学》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”^[17],并入选中国科学院2016年月度(12项)重大科技成果之一,以及国家“十二五”科技创新成就展。

2017年10月,得益于中国科学院战略性先导科技专项(B类)的支持,研究团队进一步解决了国际最大口径钛宝石激光晶体研制、宽带高能激光脉冲高增益放大、大能量钛宝石放大器寄生振荡抑制和高保真脉冲压缩等关键科学技术问题。中国科学院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,并解决大口径高增益激光放大器等关键科学技术问题,在国际上实现了300 J以上能量水平的宽带(半峰全宽达到70 nm)激光放大输出,输出的ns级啁啾脉冲最高能量达到339 J,激光脉冲宽度被脉冲压缩器压缩后可达到21 fs,成功实现了10 PW激光放大输出,达到国际同类研究的领先水平。



图1 上海超强超短激光实验装置

Fig. 1 Shanghai superintense ultrafast laser facility

《科学》杂志于2018年1月26日出版的《神奇的光》新闻评论文章,进一步高度评价SULF的研究成果,该研究为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,如图2所示^[18]。

3 SULF未来的发展趋势和挑战

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,预期2019年建成并开放运行。

SULF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。此外,SULF拟与同处上海张江的上海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。在此基础上,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

Powering up

Researchers at Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in Livermore, California, set early power records by amplifying energies in mammoth machines. But a room-size laser in Shanghai, China, now holds the record, after squeezing modest energies into extremely short bursts. Three important techniques have propelled lasers to high powers.

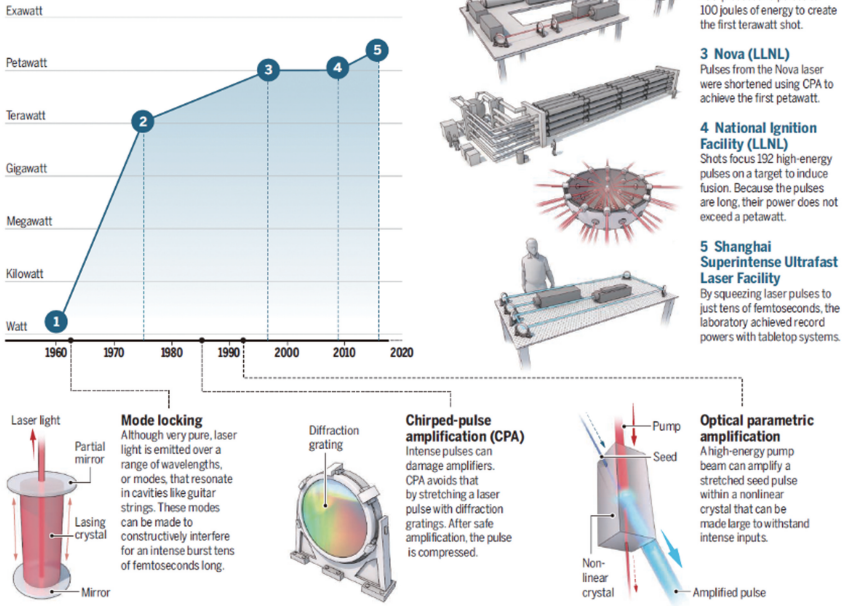


图 2 《科学》杂志评论超强超短激光的发展历程^[18]

Fig. 2 Review on the development of superintense ultrafast laser from Science^[18]

度超高强度激光光场的调控进行研究,并进一步开展面向 10^{18} 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。带动高密度物理、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。

最近,基于 SULF 的研究基础,中国科学院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”,并已获国家发改委的批准。

4 结 论

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,具有重大应用价值,是国际科技竞争重大前沿领域之一。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,这是中国科学家有望取得重大突破并在世界上占有一席之地的重大科学前沿领域,这既是重大挑战,更是难得的机遇。

SULF 主要建设内容为当前国际的竞争热点,为基础研究与工程实施的有机结合,并与国家重大战略需求息息相关。本项目将建成具有国际领先水平的重复频率的 10 PW 超强超短激光实验装置,为上海市建设具有全球影响力的科创中心,特别是建成具有国际领先水平的综合性科学研究试验基地作出重要贡献。目前,SULF 的研制工作取得一系列重要阶段性进展,通过解决关键科学技术问题,成功实现了 5 PW 激光脉冲输出和 10 PW 激光放大输出等,达到国际同类研究的领先水平。

该项目的实施为开展极端物理条件下物质结构、运动和相互作用的研究提供前所未有的研究条件,将使人类对客观世界规律的认识更加深入和系统化。SULF 的建立不仅将推动强场物理、材料科学、原子分子物理、化学与生命科学、核物理、高能物理、凝聚态物理、天体物理等一批基础与前沿交叉学科的开拓和发展,也将强力推动相关战略高技术领域的创新发展,如:为超高梯度高能粒子加速器、高亮度超短波长新光源、核能和核医学等提供原理依据与科学基础,并引发新技术变革和创造新产业,其应用广泛且符合国家需求,对保持我国在该领域的领先地位意义重大,因此该项目的社会效益和经济效益突出。

参 考 文 献

- [1] Perry M D, Mourou G. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers[J]. *Science*, 1994, 264(5161): 917-924.
- [2] Kiriyama H, Mori M, Pirozhkov A S, *et al.* High-contrast, high-intensity petawatt-class laser and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 1601118.
- [3] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, *et al.* 085-PW, 33-fs Ti:sapphire laser [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(17): 1594-1596.
- [4] Wang Z H, Liu C, Shen Z W, *et al.* High-contrast 1.16 PW Ti:sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3194-3196.
- [5] Yu T J, Lee S K, Sung J H, *et al.* Generation of high-contrast, 30 fs, 1.5 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti:sapphire laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10807-10815.
- [6] Chu Y X, Liang X Y, Yu L H, *et al.* High-contrast 2.0 petawatt Ti:sapphire laser system [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29231-29239.
- [7] Bahk S, Rousseau P, Planchon T A, *et al.* Generation and characterization of the highest laser intensities (10^{22} W/cm²) [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(24): 2837-2839.
- [8] Service R F. Laser labs race for the petawatt [J]. *Science*, 2003, 301(5630): 154-156.
- [9] Mourou G, Tajima T. The extreme light infrastructure: optics' next horizon [J]. *Optics and Photonics News*, 2011, 22(7): 47-51.
- [10] Zeng X M, Zhou K N, Zuo Y L, *et al.* Multi-petawatt laser facility fully based on optical parametric chirped-pulse amplification [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 2014-2017.
- [11] Wang F Y, Xie G Q, Yuan P, *et al.* Theoretical design of 100-terawatt-level mid-infrared laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(7): 075402.
- [12] Liang X Y, Leng Y X, Wang C, *et al.* Parasitic lasing suppression in high gain femtosecond petawatt Ti:sapphire amplifier [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15335-15341.
- [13] Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, *et al.* High-energy large-aperture Ti:sapphire amplifier for 5 PW laser pulses [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5011-5014.
- [14] Xu L, Yu L H, Liang X Y, *et al.* High-energy noncollinear optical parametric-chirped pulse amplification in LBO at 800 nm [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4837-4840.
- [15] Yu L H, Liang X Y, Xu L, *et al.* Optimization for high-energy and high-efficiency broadband optical parametric chirped-pulse amplification in LBO near 800 nm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3412-3415.
- [16] Gan Z B, Yu L H, Li S, *et al.* 200 J high efficiency Ti:sapphire chirped pulse amplifier pumped by temporal dual-pulse [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5169-5178.
- [17] Cartlidge E. Eastern Europe's laser centers will debut without a star [J]. *Science*, 2017, 355(6327): 785.
- [18] Cartlidge E. The light fantastic [J]. *Science*, 2018, 359(6374): 382-385.