

超强超短激光及其应用新进展*

李儒新[†] 冷雨欣 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

2015-07-21 收到

† email:ruxinli@mail.shenc.ac.cn

DOI:10.7693/wl20150804

Progress in superintense ultrafast lasers and their applications

LI Ru-Xin[†] LENG Yu-Xin XU Zhi-Zhan

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

摘要 超强超短激光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、阿秒科学、激光聚变、等离子体物理、核物理与核医学、原子分子物理、实验室天体物理、高能物理等领域具有重大应用价值，是当前国际科技重要前沿与竞争重点领域之一。文章简述了超强超短激光的基本概念，最新研究进展与未来发展趋势，以及我国超强超短激光的研究现状，最后简述了超强超短激光的应用示例。

关键词 超强超短激光，极端物理条件，激光加速，阿秒科学，激光核物理

Abstract Superintense ultrafast lasers can be used to create extreme physical conditions with unprecedented ultrahigh energy density, superintense electromagnetic field, and ultrafast temporal scale. As one of the most competitive scientific and technological frontiers, there are a series of significant applications of superintense ultrafast lasers in laser acceleration, attosecond science, laser fusion, plasma physics, nuclear physics and medicine, atomic and molecular physics, laboratory astrophysics, high energy physics and etc. The fundamental concept, status and future tendency of superintense ultrafast lasers are briefly introduced. Finally, some typical applications of superintense ultrafast lasers are briefly described.

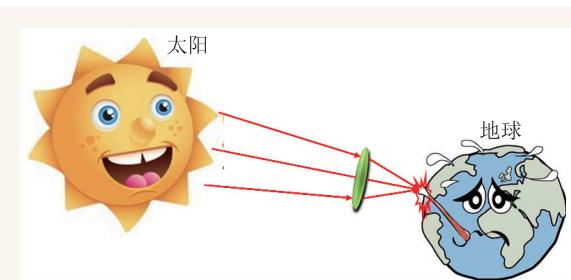
Keywords superintense ultrafast lasers, extreme physical conditions, laser acceleration, attosecond science, laser-based nuclear physics

1 引言

超强超短激光(一般指峰值功率大于1 TW (10^{12} W, 太瓦)，脉冲宽度小于100 fs (10^{-15} s, 飞秒))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已可能在实验室内创造。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)并超高功率(从100 TW到1000 TW量级)的激光输出^[3-6]。目前，超强超短激光经聚焦得到的最高光强已达到了 10^{22} W/cm²量级^[7]。这么高的光强到底是什么概念呢？如图1所示，光强 10^{21} W/cm²约等

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB808100)资助项目

图1 10^{21} W/cm^2 光强的形象估算(图片来自网络)图2 捷克首都布拉格的ELI-Beamlines Facility^[12]

于地球接收到的太阳总辐射聚焦到头发丝粗细的尺度。自然界中已知的最高光强是估计达到 10^{20} W/cm^2 量级的宇宙伽玛射线爆的强度, 所以超强超短激光被认为是已知的最亮光源。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, 未来五年左右激光的聚焦强度可能达到甚至突破 10^{23} W/cm^2 。此外, 这种超强光场在时间范畴又是极端超快的, 超强超短激光的中心波长一般是在近红外波段, 其脉冲宽度已可压缩至数飞秒, 与激光场的振荡周期(如中心波长为 800 nm 的激光脉冲, 其光场振荡周期为 2.67 fs)可以比拟, 而利用超强超短激光驱动产生的XUV波段相干辐射, 其脉冲宽度已经突破飞秒进入了阿秒(as, 10^{-18} s)的新范畴。这种极端超快时间尺度的强光场的产生和应用导致了阿秒科学全新领域的开拓与发展。

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, 正如 *Science* 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]。

光强 10^{21} W/cm^2 产生的极端条件主要为

(1)超强电场: $\sim 10^{12} \text{ V/cm}$, 氢原子库仑场强的170倍;

- (2)超高磁场: $\sim 10^9 \text{ Gs}$ 的超强范围;
- (3)超高能量密度: 达到 $3 \times 10^{10} \text{ J/cm}^3$ (相当于每立方厘米爆炸 20 吨 TNT 炸药);
- (4)巨大光压: 接近 10^{12} 大气压量级;
- (5)相对论效应主导: 电子动能 10 MeV, 远超电子静能(0.5 MeV)。

2 国际发展趋势

超强超短激光领域正处于取得重大突破与开拓应用的关键阶段, 国际上正在大力开展超强超短激光光源以及依托其的前沿科技创新平台。例如, 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), 拟发展峰值功率 200 PW(拍瓦, 10^{15} W) 级超强超短激光装置, 开创激光与物质相互作用研究与应用的新时代, 被纳入欧盟未来大科学装置发展路线图^[9-11]。ELI 计划的主要科学目标是: 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的研究和光核物理研究。ELI 计划下设四大研究装置, 分别为位于捷克布拉格的 ELI 束线装置(ELI-Beamlines Facility), 位于匈牙利赛格德的 ELI 阿秒装置(ELI-Attosecond Facility), 位于罗马尼亚默古雷莱的 ELI 核物理装置(ELI-Nuclear Physics Facility), 以及目前尚未定址的 ELI 超强场装置(ELI-Ultra High Field Facility)。2012 年以来, ELI 计划陆续启动了前 3 个装置的建设, 投入经费共 8.5 亿欧元, 计划于 2017 年研制完成 10 PW 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。

ELI-Beamlines Facility^[12] 位于捷克布拉格近郊(图 2), 装置包含不同能量和重复频率水平的多路激光束线: 两束 0.2 J/1 kHz 、三束 10 J/10 Hz 、两束 50 J/10 Hz 和两束 300 J/0.016 Hz (100 J/0.1 Hz)。其中 2 束 300 J 激光束线的终端放大模块将基于大口径钛宝石的啁啾脉冲放大技术(CPA)或基于大口径非线性光学晶体的光学参量啁啾脉冲放大技术(OPCPA), 峰值功率均将达到 10 PW, 预计于 2017 年底完成。激光脉冲产生的极端电场强度也

可用于产生 e^- 、 p^+ 和高能光子等二级辐射源。该装置主要用于原子分子物理、生物学、材料科学、稠密等离子体物理、温稠密物质和实验室天体物理学等领域的研究。此外，该装置提供的高重频(0.1 Hz)、高功率密度(10^{23} W/cm^2)激光条件也可用于极端等离子体物理和非线性量子电动力学效应的研究。

ELI-Attosecond Facility^[13]位于匈牙利赛格德(图3)，该装置将是ELI计划中唯一能够实现覆盖从太赫兹(10^{12} Hz)至X射线(10^{18} — 10^{19} Hz)宽波段的高重复频率超短脉冲输出的光源。包括重复频率在10 Hz—100 kHz的太赫兹、红外、可见乃至紫外波段的周期量级超短脉冲，毫焦耳级10 Hz—100 kHz的极紫外、软X射线和硬X射线阿秒脉冲，以及光子能量达到数十keV的硬X射线亚飞秒脉冲。该装置主要用于对原子、分子、等离子体和固体中的电子动力学进行阿秒尺度超快成像与诊断测量，此外该装置也可用于超高功率激光方面的研究。

ELI-Nuclear Physics Facility^[14]位于罗马尼亚默古雷莱(图4)，装置包含两部分：一部分为两束基于OPCPA前端放大器和钛宝石CPA放大器的10 PW激光光束，终端放大器单脉冲能量将大于300 J，重复频率为0.05 Hz，两束激光相干合成后获得 10^{23} — 10^{24} W/cm^2 的聚焦光强，电场强度达到 10^{15} V/m ；另一部分为超强伽玛束线，由传统直线加速器产生的高亮电子束与激光发生非相干康普顿背向散射产生。该装置主要用于开展激光核物理研究，具体包括激光与物质相互作用、光核反应和极端核物理学与天体物理学等。

ELI-Ultra High Field Facility^[11]的技术路线和建造地点目前尚未最终确定，该项目将取决于激光技术本身的发展、上述三大ELI计划装置的研制以及财政情况。该装置预期的激光峰值功率将超越上述ELI三大装置一个数量级以上。未来基于该装置将在粒子物理、核物理、引力物理、非线性场理论、超高压物理、天体物理和宇宙学等广泛领域开展全新的探索性研究。

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、日、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。

英国卢瑟福实验室中央激光装置(CLF)作为一个拥有多套激光束线的综合平台，为英国和其他欧共体国家的研究人员提供高功率短脉冲钕玻璃激光装置、钛宝石激光装置以及几个较小规模的激光器，以开展材料科学和原子物理等方面的研究。卢瑟福实验室CLF的核心装置是Vulcan激光装置，该装置计划在6年内投入2500万英镑，采用OPCPA技术将其输出脉冲峰值功率由PW量级升级到10 PW量级，单脉冲能量达到300 J，脉宽达到30 fs，聚焦光强达到 10^{23} W/cm^2 ^[15]。

法国的Apollon激光装置位于巴黎郊区，由法国国家科学研究中心(CNRS)、巴黎综合理工大学和法国高等科技学院设计建造，计划于2015至2016年间建成^[16]。该装置基于OPCPA前端和钛宝石放大器结构，拟实现300 J放大脉冲输出，压缩后可获得150 J、15 fs、10 PW激光脉冲输出，聚焦光强超过 $2 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$ ，时间对比度大于 10^{12} 。该装置有望率先实现10 PW超强激光输出，其主要应用包括离子和电子加速、超强X射线源、强



图3 匈牙利赛格德的ELI-Attosecond Facility^[13]



图4 罗马尼亚默古雷莱的ELI-Nuclear Physics Facility^[14]

场物理和高能量密度物理等方面的研究。

俄罗斯应用物理研究所提出的用于极端光学研究的艾瓦中心(Exawatt Center for Extreme Light Studies, XCELS)计划也瞄准200 PW峰值功率的实现,设计中的激光装置包含12束15 PW、25 fs超强超短激光,利用相干合成技术实现180 PW输出,最高可能达到200 PW^[17]。同时,装置还设计有一束100 MeV电子直线加速器和一束1 PW、1 Hz—10 kHz重复频率的探针光。拟开展高能物理、强场物理和真空的时空结构探索研究,以及实验室天体物理和宇宙学、核光学、中子物理、真空、阿秒与仄秒物理和基础计量等研究。

美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)正在实施BELLA计划。该计划通过与法国公司合作建立了输出参数为40 J、40 fs、1 Hz重复频率的PW级超强超短激光系统^[18],主要开展激光等离子体加速电子研究,目标是实现小型化(米级)的10 GeV量级的高性能电子加速器,以用于材料科学等前沿研究,并为未来发展基于多级(100级)级联激光等离子体加速器的1 TeV级电子—正电子对撞机提供研究基础。此外,美国罗切斯特大学和劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)均提出了发展数百PW级超强超短激光的构想,美国德州大学和内布拉斯加—林肯大学均建立了基于PW级超强超短激光装置的研究平台。

德国 Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)研究中心建立了包括高亮度低发射度直线电子加速器ELBE(Electron Linac for Beams with High Brilliance and Low Emittance)、超强超短激光、自由电子激光器(FEL)、X射线和中子束线的综合性研究平台^[19]。该装置中的超强超短激光部分目前是一台150 TW/30 fs钛宝石激光器,主要是进行电子、离子加速及其应用研究。在未来,该激光系统的一个核心任务是升级到PW量级的峰值功率,以提供更高峰值功率和更大的激光能量,满足多学科研究的需要。HZDR还提出了在位于德国汉堡的欧洲X射线自由电子激光装置上建立超强超短激光装置的计划,即所谓的Helmholtz Beamline,主要科学目标是利用X射线

自由电子激光和超强超短激光两种光源开展高能量密度物理研究。此外,德国马普学会量子光学研究所(MPQ)建立了以产生周期量级极短脉冲为主要特征的超强超短激光研究与应用平台,主要开展阿秒科学,电子和质子加速研究。德国耶拿大学正在发展基于二极管激光直接泵浦的高重复频率全固态PW级超强超短激光装置。

3 我国开展相关研究的主要情况

中国科学院(简称中科院)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”提出了发展超强超短激光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科院上海光机所、中物院激光聚变中心和中科院物理所。中物院激光聚变中心正在研制5 PW级超强超短激光装置,该装置的特色是可实现飞秒级超强超短激光与纳秒级、皮秒级高功率激光的多束同步输出。中科院物理所也成功研制了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。上海交通大学和北京大学已建立了200 TW级的超强超短激光研究平台。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。限于篇幅,本文主要介绍上海光机所在这方面的近期研究进展。

上海光机所强场激光物理国家重点实验室于2007年研制成功当时世界最高功率(0.89 PW)的飞秒激光系统^[20]。在此基础上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,有效解决了获得高增益放大并超高时间对比度等关键科学技术问题,2013年研制成功世界最高激光峰值功率的2.0 PW激光放大系统^[6],并突破了输出激光脉冲达到超高时间信噪比(10^{11})的世界性技术难题。2014年进一步发展了通过优化注入脉冲抑制寄生振荡的新方法,基于150 mm直径的钛宝石晶体,实现192.3 J放大激光能量输出,可压缩脉宽27.0 fs,可支持5.13 PW的峰值功率,

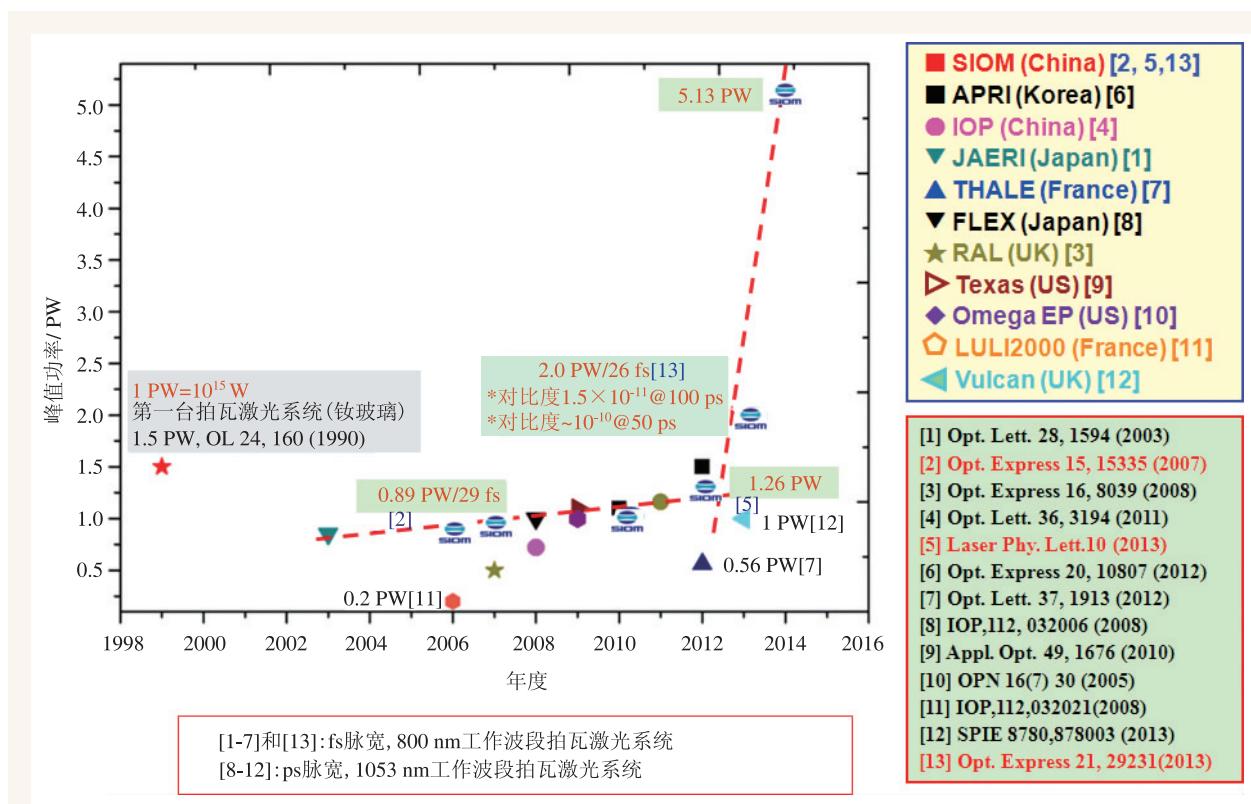


图5 国际PW级超强超短激光研制进展总结

这是目前国际最高峰值功率的激光放大系统。1999年以来的国际拍瓦激光发展历程总结如图5所示。

上海光机所强场激光物理国家重点实验室目前正在研制10 PW级超强超短激光装置,提出了以高对比度啁啾脉冲放大链和光学参量啁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,有效利用了啁啾脉冲放大技术(CPA)的高稳定性和高转换效率,以及光学参量啁啾脉冲放大技术(OPCPA)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年首次在实验上验证了CPA/OPCPA混合放大器方案,实现0.61 PW激光脉冲输出^[21],2014年又进一步将输出能力提升到1 PW^[22]。这是目前国际上基于OPCPA放大器获得的最高激光脉冲能量和最高峰值功率(图6),验证了CPA/OPCPA混合放大器方案作为10 PW级超强超

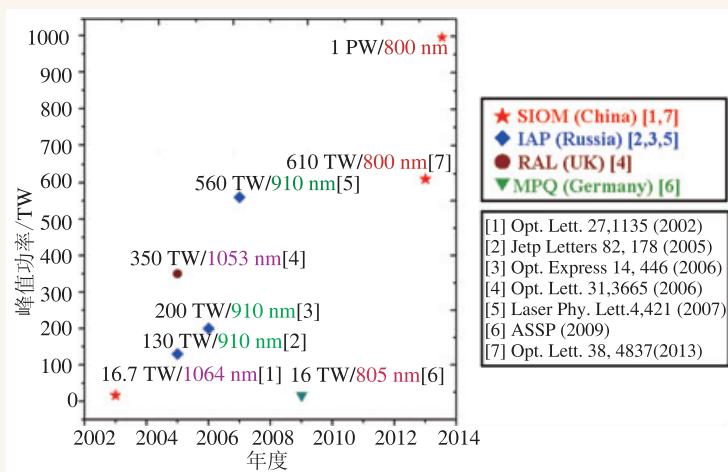
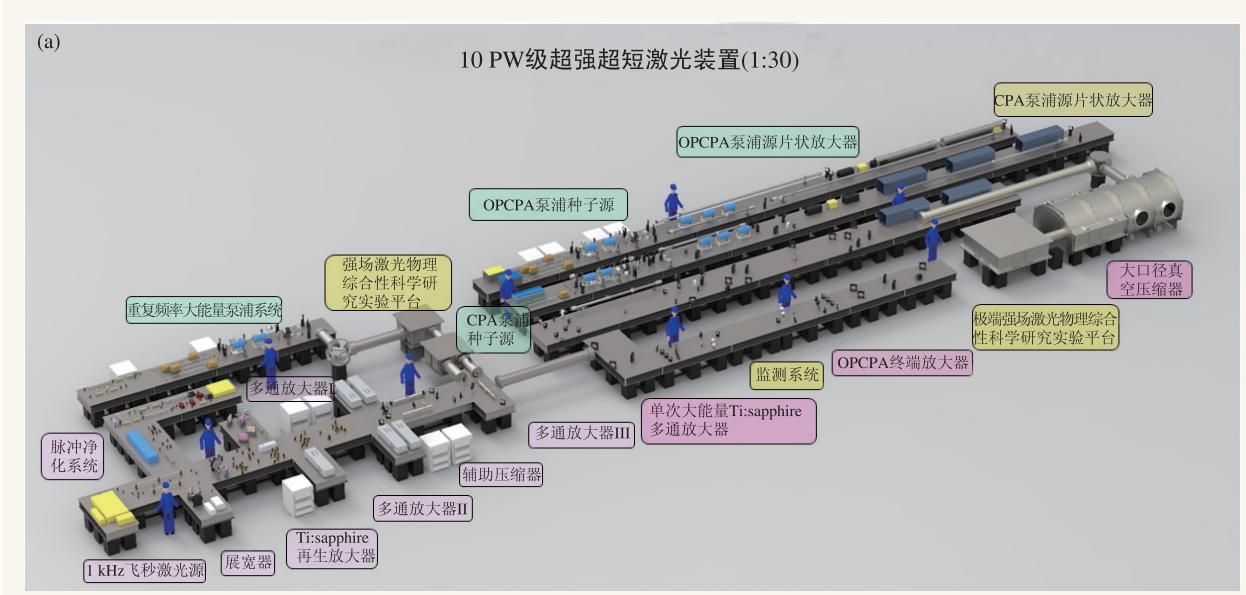


图6 国际OPCPA超强超短激光发展现状

短激光装置总体技术路线的可行性。基于上述研究基础,强场激光物理国家重点实验室拟建立面向多学科用户的综合性研究平台——上海超强超短激光用户装置,主要科技目标是:研制建成峰值功率10 PW级(激光聚焦强度超过 10^{22} W/cm^2)的超强超短激光系统(该装置示意图和总体方案框图如图7所示),并通过组束技术建成峰值功率100 PW级



(b) 上海光机所CPA-OPCPA 混合式10 PW激光技术方案
CPA 前端 + OPCPA 终端放大

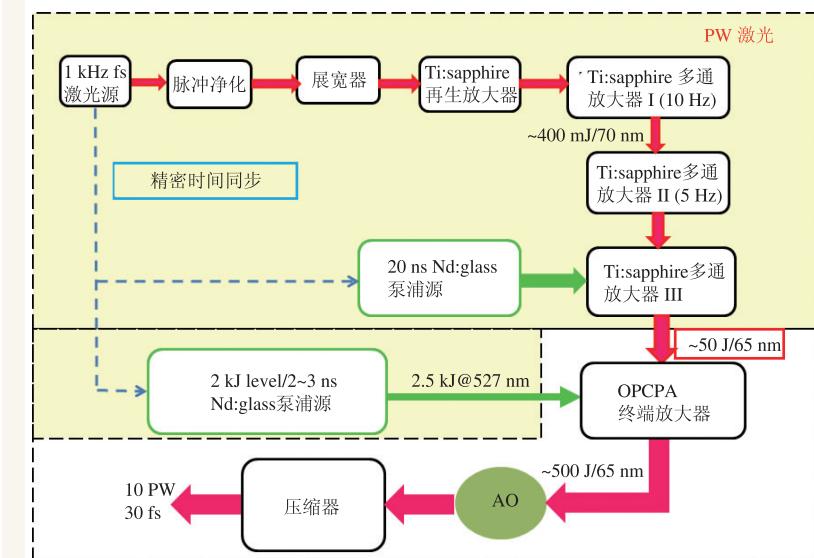


图7 10 PW级超强超短激光装置示意图(a)及其总体方案框图(b)

(激光聚光强超过 10^{23} W/cm^2)的超强超短激光系统, 利用该激光装置驱动产生高亮度超短脉冲X射线、 γ 射线、电子、质子、中子等次生辐射与粒子束束线, 建成国际一流的综合性科学研究中心, 开展激光加速、阿秒科学、极端条件材料科学、超快核物理、高能量密度物理、实验室天体物理、核医学等领域前沿基础研究和战略高技术研发, 在基础研究及前沿应用开拓方面取得重大成果。

4 超强超短激光前沿应用研究示例

超强超短激光推动着激光科学、原子分子物理、等离子体物理、高能物理与核物理、凝聚态物理、天体物理以及非线性科学、化学动力学、微结构材料科学、超快信息光子学、生物医学光子学等一批基础与前沿交叉学科的开拓和发展。同时也将为相关战略高技术领域的创新发展, 如超高梯度高能粒子加速器、高亮度新波段相干光源、激光核物理与核医学、聚变能源、精密测量等提供原理依据与科学基础。

超强超短激光的应用将可能开创新的研究领域, 并带来巨大的应用。正如2010年第一期 *Nature* 杂志作为该刊物新十年第一期, 以“2020 Visions”为题, 预测了激光领域未来十年可能实现五项重大突破, 其中四个与超强超短激光直接相关: 基于激光的超精密钟与宇宙常数的精密测量; 新一代激光将可用于产生新物态并提供无碳和无限的清洁能源; 获得阿秒脉冲跟踪化学反应中的极端

超快电子运动；实现低成本、台式化的激光高能粒子加速器等^[23]。下文仅以中科院上海光机所强场激光物理国家重点实验室近期研究进展举例说明超强超短激光的重要应用。

4.1 超强超短激光驱动尾波场电子加速

超强超短激光驱动的尾波场电子加速器相比于传统的高能粒子加速器而言，极限加速电场高出3个量级以上，为实现小型化的高能粒子加速器提供了新原理和新方法，也将对未来的同步辐射装置、自由电子激光以及高能粒子物理等的研究与发展产生重要影响。国际上激光尾波场电子加速研究在2004年取得突破，实现了100 MeV级的准单能电子束，2006年实现了GeV级的准单能电子加速。上海光机所2010年获得了最高能量达到1.8 GeV的当时国际最高能量的激光电子加速实验结果。激光尾波场电子加速虽取得了显著进展，但国际上广泛采用的单级尾加速方案仍面临难以克服的障碍，如电子注入和电子加速两个基本物理过程不能分别控制等。而级联电子加速方案具有对电子注入和电子加速两个物理过程分别控制与优化等方面的优点，将是未来实现高性能10 GeV量级甚至更高能的单能电子束的可行方案，特别是对台式化X射线自由电子激光等领域的发展具有重要的推动意义。

上海光机所首次利用电离注入的全光驱动双尾波场级联电子加速器方案，成功实现了电子注入与电子加速的两个基本物理过程的分离与控制，实验获得了能量近GeV的准单能电子束和187 GV/m的超高加速梯度等突破性研究成果^[24]。该双尾波场级联加速方案的成功实现为未来产生高性能10 GeV量级甚至更高能量单能电子束提供了可行途径，将对超强超短激光驱动的台式化粒子加速器的发展与应用带来深远影响。如图8所示，实验是在该实验室自行研制成功的拍瓦级超

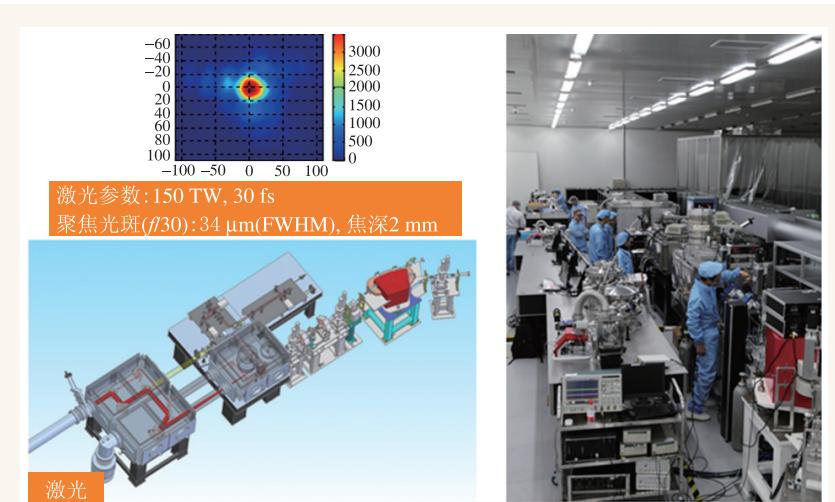


图8 激光尾波场电子加速实验装置

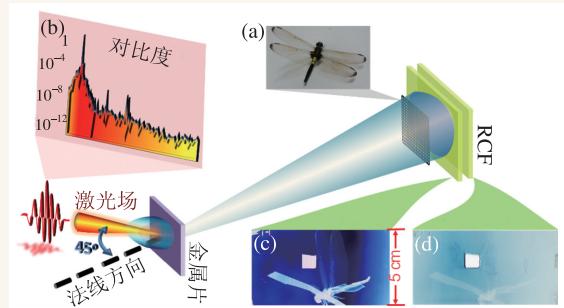


图9 质子照像实验 (a)蜻蜓样本；(b)PW激光；(c)第一层RCF上蜻蜓成像；(d)第二层RCF上蜻蜓成像

强超短激光实验装置上完成的。为了实现电离注入的全光驱动的双尾波场级联电子加速方案，他们提出了具有特色的两段气体喷流池的新型设计：第一段采用较高密度的氦氧混合气体以实现电离注入；第二段采用较低密度的纯氦气体以实现等离子体尾波场加速。通过独立控制电子注入和电子加速两个基本物理过程并实现电子束在双尾波场间的高效耦合以及激光相对论自导引传输等，成功地将第一级注入器产生的具有麦克斯韦分布(能散度100%)的低能电子束注入到第二级尾波场加速器(气体喷流池长度仅为3 mm)中加速，实验获得了0.8 GeV的准单能电子束，对应的加速梯度达到了187 GV/m的超高量级。

该项研究为将来发展基于双级乃至多级尾波场级联加速的小型化10 GeV—TeV级电子加速器进行了有益的探索，解决了多项关键科学技术问题。

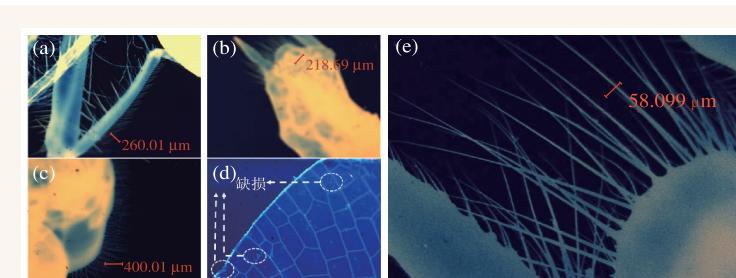


图10 蜻蜓的成像结果 (a)脚部; (b)尾巴; (c)头部和(d)翅膀的细微成像; (e)尾巴放大像

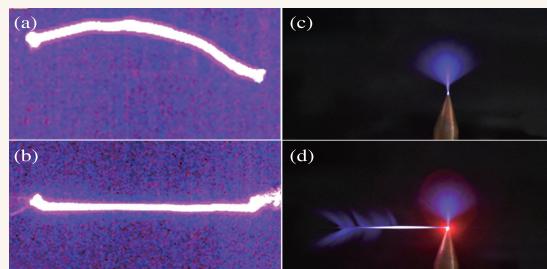


图11 (a)高压电场空气击穿放电; (b)激光诱导高压电场空气击穿放电; (c)高压电场尖端电晕放电; (d)激光诱导高压电场电晕放电

4.2 激光质子加速与质子照相

质子照相作为一种密度诊断手段,可利用微分截止和散射来显示样本静态或动态的密度变化,是目前探测等离子体中电磁场分布的唯一方法。在过去的几年中,质子照相技术已经得到广泛应用,在实验中成功探测到瞬时电磁场的数据。上海光机所利用PW超强超短激光驱动产生了能量达到10 MeV以上的高能质子束,并利用该质子束成功开展了对蜻蜓样品的质子照相实验,通过缩小物距实现了蜻蜓的清晰成像^[25]。如图9所示获得了蜻蜓的等比例整体成像,同时分辨率达到微米量级。如图10所示质子束完成了对蜻蜓头部、翅膀、脚、尾巴、甚至其内部结构的细节成像。实验结果证明,多次散射可以引起成像模糊,而通过将蜻蜓样本紧贴在RCF胶片的方式,可以克服成像模糊,并能同时提高成像的分辨率。这个实验研究结果和理论预测相一致。另外,实验进一步使用多层RCF胶片进行质子成像,通过在第二层

RCF成像,可克服低能质子束引起的成像模糊的缺点。同时,第二层RCF胶片可实现更高密度和厚度样品的探测。此项研究不仅有助于物理动力学分析研究,在医学癌症细胞的早期特征探测方面也有重要应用。

4.3 超强超短激光引雷

利用超强超短激光引雷从而减少雷电灾害是超强超短激光的一个潜在重要应用。超强超短激光在空气中传输可以产生一条具有高激光强度的等离子体通道,即光丝现象,该通道具有可远程产生和导电的特点。光丝等离子体的导电特性可以应用于触发和诱导高压放电。与高压电场空气自然击穿放电相比,激光诱导高压电场空气击穿放电需要较低的空气击穿放电电压,同时该过程具有良好的方向性和可控性,克服了自然击穿放电的随机性和不稳定性,因此在引雷方面有着重要的应用前景^[26]。

利用超强超短激光开展激光引雷的基础研究受到世界上许多国家的高度重视,上海光机所是国内最早开展相关研究的几家单位之一。最近基于以前的研究基础,实验上首次观察到了激光诱导电晕放电现象并对这一发现展开了深入的研究,典型结果如图11所示。这一成果为深入理解高压电场沿着光丝的传输和演化过程,从而实现激光引雷提供了重要的科学依据。

5 结束语

发展超强超短激光光源具有重要科学意义和应用价值。通过在极端物理条件下对物质结构、运动和相互作用进行研究可以使得人类对客观世界规律的认识更加深入和系统。超强超短激光光源及其前沿应用研究不仅将推动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,并引发新技术变革和创造新产业。

超强超短激光本身的发展及其应用的开拓,

特别是国际上正在展开激烈竞争的10 PW乃至100 PW级超强超短激光装置的研制，有望开辟超强超短激光应用的新阶段，例如，约 10^{23} W/cm²量级光强的实现将使激光与物质的相互作用进入到所谓的强相对论性参数空间，激光质子加速有望取得重大突破。若超强超短激光束技术或者基于等离子体介质的超高通量激光放大技术取得突破， 10^{25} W/cm²量级光强在不久的将来即可能实现。这时候，利用超强超短激光“无中生有”——从真空中激发出正负电子对的梦想就可能实现。

致谢 感谢梁晓燕、刘建胜、沈百飞、王铁军提供相关材料，并感谢杨艳丽、李朝阳、邹晓对本文撰写的帮助。

参考文献

- [1] Perry M D, Mourou G. Science, 1994, 264:917
- [2] Kiriyama H, Mori M *et al.* IEEE J. Sel. Top. Quant., 2015, 21: 1601118
- [3] Aoyama M, Yamakawa K *et al.* Opt. Lett., 2003, 28:1594
- [4] Wang Z, Liu C *et al.* Opt. Lett., 2014, 36:3194
- [5] Yu T, Lee S *et al.* Opt. Express, 2012, 20:10807
- [6] Chu Y, Liang X *et al.* Opt. Express, 2013, 21:29231
- [7] Bahk S W, Rousseau P *et al.* Opt. Lett., 2004, 29:2837; <http://cuos.engin.umich.edu/researchgroups/hfs/facilities/hercules-petawatt-laser>
- [8] Service R F. Science, 2003, 301:154
- [9] Mourou G, Tajima T. Optics and Photonics News, 2011, 22:47
- [10] Powell D. Nature, 2013, 500:264
- [11] <http://eli-laser.eu>
- [12] www.eli-beams.eu
- [13] www.eli-hu.hu
- [14] www.eli-np.ro
- [15] Hernandez-Gomez C, Blake S *et al.* Journal of Physics: Conference Series, 2010, 244: 032006
- [16] Blanc C, Papadopoulos D *et al.* Report at PAL Laserlab Meeting, 24/09/2013
- [17] <http://www.xcels.iapras.ru>
- [18] <http://loasis.lbl.gov>
- [19] <http://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=145>
- [20] Liang X, Leng Y *et al.* Opt. Express, 2007, 15:15335
- [21] Xu L, Yu L *et al.* Opt. Lett., 2013, 38:4837
- [22] Yu L, Liang X *et al.* Opt. Lett., 2015, 40:3412
- [23] Baer T M, Bigelow N P. Nature, 2010, 463:26
- [24] Liu J, Xia C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 107:035001
- [25] Wang W, Shen B *et al.* Radiology, under review
- [26] Diels J, Bernstein R *et al.* Scientific American, 1997, 277:50



微弱信号检测

半个世纪的骄傲

Model 7265
数字锁相放大器

经典机型
业内翘楚



Model 5210
模拟锁相放大器



生产商：阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司
电 话：010-85262111-10 传真：010-85262141-10
Email：infosi@ametek.cn
网 址：www.signalrecovery.com.cn

中国代理商：北京三尼阳光科技发展有限公司
电 话：010-65202180/81 传真：010-65202182
Email：sales@sunnytek.net
网 址：www.sunnytek.net