

# 超快光学与超强激光技术前沿研究

李儒新\*, 程亚, 冷雨欣, 曾志男, 姚金平, 曾斌, 李贵花, 张宗昕, 徐至展

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, 上海 201800

\* 通信作者. E-mail: ruxinli@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2016-05-13; 接受日期: 2016-08-25; 网络出版日期: 2016-09-18

国家自然科学基金 (批准号: 11127901, 61521093, 11134010) 资助项目

**摘要** 超快光学与超强激光技术是光学与激光领域的重大前沿, 可望推动一批基础学科与高技术应用领域的发展. 本文简要介绍了超快光学和超强激光技术领域的发展现状和趋势, 包括超快激光和超强激光在粒子加速、阿秒科学、超快非线性光学、微纳制备、宽带光学频率梳等方向的发展与应用前景, 以及发展更高性能的超强超短激光的前景和核心关键科学技术问题.

**关键词** 超快激光 超强激光 阿秒科学 非线性光学

## 1 引言

由于激光调 Q 技术、锁模技术、啁啾脉冲放大技术 (CPA) 等一系列革命性技术的诞生与发展, 激光脉冲宽度的极限不断被突破, 激光脉冲的峰值功率不断被提高<sup>[1,2]</sup>. 超快光学与超强激光技术已经成为光学与激光乃至物理学和信息科学领域最活跃的研究前沿之一, 特别是最近十余年来的发展十分迅猛, 目前正处于取得重大技术突破和开拓重大应用的前夕.

*Nature* 杂志 2010 年第 1 期 “Opinion” 专栏, 作为该刊物新十年第 1 期, 以 “2020 Visions” 为题, 分析未来十年重要科学技术领域的发展方向并提出 2020 年展望. 该文预测激光领域未来十年可能实现 5 项重大突破, 其中 4 项与超快光学及超强激光技术直接相关, 分别是: 基于激光的超精密钟用于测量宇宙基本常数, 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<sup>[3]</sup>.

超快光学与超强激光技术研究以超快激光技术和超高强度超短脉冲 (简称 “超强超短”) 激光技术, 超快激光或者超强超短激光与物质的相互作用以及交叉学科与相关高新技术领域中的应用相关的科学技术问题为研究对象. 超快激光技术在分子动力学、化学反应控制、电子微观动力学、分子生物学等方面有着重要应用前景, 也形成了阿秒脉冲的产生与测量、新波段超快激光、超快非线性光学、超快激光微纳制备、宽带光学频率梳等研究方向<sup>[4]</sup>. 这些令人振奋的进展为物理学和信息科学的前沿研究与应用开拓提供了许多新机遇, 并可能牵引未来某些高新技术产业的发展. 超快光学与其他前沿

引用格式: 李儒新, 程亚, 冷雨欣, 等. 超快光学与超强激光技术前沿研究. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 1236-1254, doi: 10.1360/N112016-00125

科学研究的有机结合将提升探索和解决重大基础科学问题的能力, 推动化学、材料科学、凝聚态物理、纳米科学、生物学、医学等诸多领域的发展和进步.

超强超短激光技术的研究以拍瓦级 ( $10^{15}$  W) 激光技术为前沿热点. 这种激光光源被认为是人类已知的最亮光源, 经过近十多年的快速发展, 超强超短激光技术目前正处于取得重大突破的前夜. 未来 5 年左右, 激光脉冲的峰值功率可望突破 10 拍瓦乃至艾瓦 ( $10^{18}$  W) 量级, 聚焦强度可能超过  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>, 甚至达到  $10^{26}$  W/cm<sup>2</sup> 以上的超高量级, 这样的激光条件下激光与物质的相互作用首次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, 例如: 超强超短激光驱动的小型化高能电子加速器、高亮度  $\gamma$  射线源及高能质子加速器, 有望为基于加速器的新光源、核材料探测与处理、核医学等重大应用带来变革性推动<sup>[5]</sup>.

本文将简述超快光学与超强激光技术领域的研究现状、发展趋势及应用前景. 第 2 节将介绍国内外大型超强超短激光装置方面的发展动态和应用前景, 主要包括欧盟的极端光设施计划 (简称“ELI”计划) 及有代表性的其他国家的超强超短激光平台的研究计划等; 第 3 节将介绍超快光学与超强激光技术的主要研究方向, 包括阿秒脉冲产生与诊断、新波段超快激光技术、超快非线性光学、超快激光微纳制备、宽带光学频率梳、超高时间对比度激光脉冲产生与测量、宽带超高通量激光脉冲放大等; 最后为全文总结及展望.

## 2 超强超短激光发展与应用

超强超短激光的出现与迅猛发展, 为人类提供了前所未有的极端物理条件与全新实验手段. 目前实验室内台式激光系统已经可产生高重复频率的超高峰值功率 (0.1 拍瓦 ~ 1.0 拍瓦量级) 的飞秒激光脉冲输出<sup>[6~9]</sup>. 超强超短激光经聚焦后其最高光强已达到了  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> 量级<sup>[10]</sup>.

### 2.1 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, 国际上正在大力发展超强超短激光光源以及依托其的前沿科技创新平台. 2006 年欧盟 10 多个国家的近 40 个研究院所和科研机构联合提出的 Extreme Light Infrastructure (ELI) 计划, 目标是发展峰值功率数百拍瓦甚至艾瓦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, ELI 计划被纳入欧盟未来大科学装置发展路线图<sup>[11,12]</sup>. 除此之外, 英国和法国也正在开展各自 10 拍瓦级超强超短激光装置的研制工作, 美国、俄罗斯、日本、韩国等也提出了类似的超强超短激光装置研究计划.

(1) 欧盟 ELI 计划. 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研究和光核物理研究. ELI 计划下设 4 大研究装置, 分别为位于捷克 Prague 的 ELI 束线装置 (ELI-Beamlines Facility)、位于匈牙利 Szeged 的 ELI 阿秒装置 (ELI-Attosecond Facility)、位于罗马尼亚 Măgurele 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 年左右研制完成 10 拍瓦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 拍瓦级超强超短激光装置打下基础.

ELI-Beamlines Facility 位于捷克 Prague 近郊, 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). 其中两束 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 拍瓦, 预计于 2017 年底完成<sup>1)</sup>. 激光脉冲产生的极端电场强度也可用于产生电子、质子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<sup>2</sup>) 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 位于匈牙利 Szeged, 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<sup>2)</sup>. 包括重复频率为 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源, 毫焦耳级 10 Hz~100 kHz 的极紫外、软 X 射线和硬 X 射线阿秒脉冲源, 以及光子能量达到数十 keV 的硬 X 射线亚飞秒脉冲源. 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 位于罗马尼亚 Măgurele, 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 拍瓦激光光束, 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<sup>2</sup> 聚焦光强, 电场强度达到  $10^{15}$  V/m; 另一部分为超强  $\gamma$  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 Compton 背向散射产生<sup>3)</sup>. 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 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 3 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 3 大装置一个数量级以上<sup>4)</sup>. 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.

(2) 俄罗斯 XCELS 计划. 俄罗斯科学院应用物理研究所 (Institute of Applied Physics) 提出的 Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS) 计划瞄准 200 拍瓦峰值功率的实现, 设计中的激光装置包含 12 束 15 拍瓦, 25 fs 超强超短激光, 利用相干合成技术实现 180 拍瓦输出, 最高可能达到 200 拍瓦<sup>5)</sup>. 同时, 装置还设计有一束 100 MeV 电子直线加速器 and 一束 1 拍瓦, 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、阿秒灰秒物理和基础计量等研究.

(3) 美国的相关研究计划. 美国劳伦斯伯克利国家实验室 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) 正在实施 Berkeley Lab Laser Accelerator (BELLA) 计划. 该计划主要是利用输出参数为 40 J, 40 fs, 1 Hz 重复频率的拍瓦级超强超短激光系统开展激光等离子体加速电子研究, 目标是实现小型化的 10 GeV 量级的高性能电子加速器用于材料科学等前沿研究, 并为未来发展基于多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<sup>6)</sup>. 此外, 美国罗切斯特大学 (University of Rochester) 和劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 均提

1) <http://www.eli-beams.eu>.

2) <http://www.eli-hu.hu>.

3) <http://www.eli-np.ro>.

4) <http://www.eli-laser.eu>.

5) <http://www.xcels.iapras.ru>.

6) <http://loasis.lbl.gov>.

出了发展数百拍瓦级超强超短激光装置的构想, 美国德州大学 (University of Texas) 和内布拉斯加大学林肯分校 (University of Nebraska Lincoln) 均建立了基于拍瓦级超强超短激光装置的研究平台。

(4) 英、法、德等的相关研究计划. 英国卢瑟福-阿普尔顿实验室 (Rutherford Appleton Laboratory) 中央激光装置 (CLF) 作为一个拥有多套激光束线的综合平台, 为英国和其他欧盟国家的研究人员提供高功率钛玻璃激光装置、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<sup>[13]</sup>. 卢瑟福-阿普尔顿实验室 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拍瓦量级升级到 10 拍瓦量级, 单脉冲能量 300 J, 脉宽 30 fs, 聚焦光强达到  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>.

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 (École Polytechnique) 和法国高等科技学院 (ENSTA) 设计建造, 计划于 2017 年建成<sup>7)</sup>. 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 拍瓦激光脉冲输出, 聚焦光强超过  $2 \times 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>, 时间对比度大于  $10^{12}$ . 该装置有望率先实现 10 拍瓦超强激光输出, 其主要应用包括离子和电子加速, 超强 X 射线源, 强场物理和高能量密度物理等方面的研究.

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<sup>8)</sup>. 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. 未来该激光系统计划升级到拍瓦级的峰值功率, 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 Hamburg 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 (Max Planck Institute of Quantum Optics, 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 (Friedrich-Schiller-Universität Jena) 正在发展基于二极管激光直接泵浦的高重复频率全固态拍瓦级超强超短激光装置.

## 2.2 国内发展现状与趋势

我国开展拍瓦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中心正在研制 5 拍瓦级超强超短激光装置, 该装置的特色是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. 中国科学院物理研究所也成功研制了拍瓦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 太瓦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, 已建立了 10 太瓦级超强超短激光和质子加速研究平台.

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在超强超短激光与强场激光物理领域持续深入研究 20 多年, 取得系列重要成果. 2003 年在基于 OPCPA 新原理的超强超短激光研究方面取得重要成果, 被国际同行学术界评论为“最近十年来国际 OPCPA 研究领域中最杰出的实验成就”. 2007 年研制成功当时世界最高功率 (0.89 拍瓦) 的飞秒激光系统<sup>[14]</sup>. 在此基础上, 2013 年

7) <http://apolloinstruments.com>.

8) <http://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=145>.

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, 研制成功世界最高激光峰值功率的 2.0 拍瓦激光放大系统<sup>[8]</sup>, 输出激光脉冲实现了超高的时间信噪比 ( $10^{11}$ ). 2014 年进一步发展了通过优化注入抑制寄生振荡的新方法, 基于 150 mm 钛宝石晶体, 实现 192.3 J 放大输出, 可压缩脉宽 27.0 fs, 可支持 5.13 拍瓦的脉冲峰值功率, 这是目前国际最高峰值功率的激光放大系统.

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还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, 有效利用了 CPA 的高稳定性和高转换效率, 以及 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 拍瓦激光脉冲输出<sup>[15]</sup>, 2014 年又进一步将输出能力提升到 1 拍瓦<sup>[16]</sup>. 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, 验证了 CPA+OPCPA 混合放大器方案作为 10 拍瓦级超强超短激光装置总体技术路线的可行性. 基于上述研究基础, 拟建立面向多学科用户的综合性研究平台——上海超强超短激光实验装置, 包括峰值功率 10 拍瓦级 (激光聚焦强度超过  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>) 的超强超短激光系统, 以及利用该激光装置驱动产生高亮度超短脉冲 X 射线、 $\gamma$  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.

### 2.3 超强超短激光应用前沿

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. 本文主要结合我国相关研究领域的科学技术基础和发展趋势, 以超强超短激光驱动电子、质子加速等为例介绍超强超短激光的重要应用.

(1) 激光尾波场电子加速. 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. 中国科学院上海光学精密机械研究所 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传统的单级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. 中国科学院上海光学精密机械研究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 V/m 的超高加速梯度等突破性研究成果<sup>[17]</sup>. 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.

(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. 中国科学院上海光学精密机械研究所利用拍瓦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<sup>[18]</sup>. 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多层辐射变色薄膜 (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 RCF 胶片进行质子成像, 通过在第 2 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 2 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.

### 3 超快光学与超强激光技术的研究前沿

近几年, 国内外在超快光学和超强激光技术研究领域已经取得了一系列研究成果, 并形成了飞秒激光成丝及其应用<sup>[19]</sup>、阿秒脉冲产生与测量<sup>[20, 21]</sup>、新波段超快激光技术<sup>[22, 23]</sup>、超快非线性光学<sup>[24~26]</sup>、超快激光微纳制备<sup>[27, 28]</sup>、宽带光学频率梳<sup>[29~34]</sup>、超高时间对比度激光脉冲产生与测量<sup>[35~42]</sup>、宽带超高通量激光脉冲放大<sup>[43~46]</sup>、宽带大能量激光脉冲压缩<sup>[47~49]</sup>及超高峰值功率光束聚焦<sup>[50~52]</sup>、高效率重复频率超强激光技术<sup>[53~55]</sup>等研究方向, 推动了光学与光电子学的发展. 超快光学、超强激光技术研究总体朝着实现更高功率、更短脉宽、更高时空性能和新波段激光脉冲输出目标发展, 提升解决重大基础科学问题和重要应用关键技术问题的能力和手段<sup>[56, 57]</sup>.

(1) 阿秒脉冲产生与测量. 在微观世界, 生物、化学和物理的界限正在逐步消失, 因为其根本都是来自电子运动, 例如分子内的电子运动负责生物信息传递、改变化学产物以及生物系统功能, 信息处理的速度则可以通过采用更小的纳米电路来提高等等. 这些电子运动的时间尺度从几十阿秒 ( $10^{-18}$  s) 到几十飞秒 ( $10^{-15}$  s), 对这些电子运动的了解是解释所有生物、化学和物理现象的基础. 阿秒量级的超高时间分辨率与原子尺度 ( $10^{-8}$  cm) 的超高空间分辨率相结合将可能实现人类了解和把握原子—亚原子微观世界中极端超快现象的梦想. 阿秒脉冲可用于观察和控制原子内部电子的动力学行为, 比如内壳层电子的弛豫和隧道电离过程等<sup>[58, 59]</sup>. 当前, 人们已经突破 100 阿秒的时间壁垒<sup>[60~62]</sup>. 随着阿秒脉冲产生与测量技术的发展, 原子、分子与凝聚态物质中的阿秒电子动力学研究也引起了人们的关注, 开展相关的超快动力学研究将是阿秒科学的总体发展趋势和研究目标.

单个阿秒脉冲的产生, 目前常见的有少周期 (few cycle) 激光脉冲泵浦激光方案<sup>[63]</sup>、偏振时间门方案<sup>[64]</sup>、DOG (double optical gating) 和 GDOG (general DOG)<sup>[65]</sup>、双色场方案<sup>[66]</sup>等. 少周期 (few cycle) 激光脉冲泵浦激光方案是采用载波包络相位稳定的, 脉冲宽度小于 4 飞秒的 800 nm 周期量级激光脉冲与惰性气体相互作用产生气体高次谐波连续谱. 偏振时间门方案是利用气体高次谐波的产生效率对于泵浦激光脉冲的偏振性质高度敏感的特性, 快速控制泵浦激光脉冲的偏振变化来产生单阿秒脉冲. DOG 与 GDOG 是美国 Kansas 大学的 Chang 教授提出的. 基于偏振时间门方案, 通过附加倍频激光场形成双色场时间门, 使较长的多周期飞秒激光脉冲可以用于产生单个阿秒脉冲. 双色场方案基于气体高次谐波产生对激光电场强度非常敏感的特性, 通过精确控制飞秒激光脉冲电场形状来产生单个阿秒脉冲. 除了上述方法外, 还有一些其他方法, 比如非倍频双色场方法, 是双色场方案的进一步发展. 采用非倍频双色场<sup>[67]</sup>, 比如 800 nm 和 1150 nm 波长组合, 可以将产生单阿秒脉冲的驱动激光脉冲宽度扩大到数十飞秒. 由于脉冲宽度数十飞秒的激光脉冲可以获得很高的单脉冲能量, 因此该方法将可能产生大能量的单个阿秒脉冲能量. 这在 Takahashi 等的实验中已经初步得到验证. 他们采用大能量的激光脉冲 (800 nm, 9 mJ; 1300 nm, 2.5 mJ) 驱动产生了 500 阿秒的单阿秒脉冲, 脉冲能量达

到  $1.3 \mu\text{J}$  [68].

进一步提升阿秒光脉冲的能量、缩短阿秒脉冲宽度、提高阿秒脉冲的测量精度、拓展高次谐波输出的光子能量是阿秒科学研究长期追求的目标. 随着光学参量放大 (OPA) 技术的发展, 已经可以产生数 mJ 甚至数十 mJ 的  $3\sim 5 \mu\text{m}$  波长的中红外光源, 通过适当的激光脉冲整形技术和相位匹配技术, 这个波段的中红外光源在高次谐波和阿秒领域最适合用于产生高亮度的“水窗”至 keV 光子能量的阿秒光源. 由高次谐波产生的理论可知, 其最高光子能量由公式  $E_{\text{cutoff}} = I_p + 3.17U_p$  ( $I_p$  为气体介质的电离能) 决定, 其中  $U_p = 9.33 \times 10^{-14} I(\text{W}/\text{cm}^2)\lambda^2$  ( $\mu\text{m}$ ) 为有质动力势 (其大小等于一个自由电子在激光场中的平均有质动力动能,  $I$  为激光强度,  $\lambda$  为激光波长). 由于最高光子能量正比于驱动激光波长的平方, 因此采用更长波长的驱动激光来实现是最为合适的.

在将阿秒脉冲链或者单个阿秒脉冲用于测量超快电子动力学过程之前, 首先需要对阿秒脉冲 (链) 本身的性质做出描述, 尤其是脉冲宽度的测量. 但是传统用于飞秒脉冲测量的自相关和互相关测量方法不能直接推广到阿秒量级超短脉冲的测量, 主要在于两个方面: 一是因为脉冲宽度太短, 小于电子元件所能达到的最短的响应时间; 二是因为阿秒脉冲的光谱通常位于极紫外和软 X 射线波段, 通常使用的非线性介质在该波段都具有强烈的吸收, 也很难产生非线性效应. 目前比较常用的阿秒脉冲宽度测量方法主要是激光辅助光电离的方法 [69, 70], 在强场近似下准经典理论将激光辅助原子远紫外 (XUV) 光电离描述为“两步过程”: 首先, 原子吸收一个 XUV 光子而发生电离, 电离产生的电子具有特定的初始动量分布; 然后, 在辅助激光电场的作用下, 电离电子像经典粒子一样在激光电场中运动, 最终的电子能量和动量依赖于电离电子产生时刻的激光电场的相位, 振幅及振荡频率. 改变辅助激光脉冲与 XUV 光脉冲之间的时间延迟, 最终测量到的电子能谱宽度受到激光脉冲  $1/2$  光周期的调制, 通过对能谱调制的分析和拟合, 可以获得阿秒脉冲宽度信息. 2001 年, 奥地利维也纳技术大学 (Vienna University of Technology) 的 Krausz 研究组在实验上成功地利用气体高次谐波产生并测量了脉冲宽度为 650 阿秒的单个阿秒脉冲 [71]. 同年, Paul 等又利用气体高次谐波产生并测量了脉宽为 250 阿秒的阿秒脉冲链 [72]. 2004 年, 他们产生了 250 阿秒的单个阿秒脉冲 [73]. 2006 年, Sansone 等采用偏振时间门的方法产生 130 阿秒的单个阿秒脉冲 [64]. 2008 年, Krausz 研究小组进一步用 3.3 飞秒驱动激光脉冲产生并测量了脉冲宽度达到 80 阿秒的单个阿秒脉冲 [74]. 目前获得的最短脉冲是中佛罗里达大学 (University of Central Florida) 物理系的 Chang 教授在 2012 年产生的 67 阿秒的脉冲 [75]. 这些由气体高次谐波产生的阿秒脉冲, 其中心频率均在 XUV 波段范围内.

(2) 新波段超快激光技术. 长期以来, 因现有超快激光增益介质 (如钛宝石) 等的限制, 绝大多数强场物理的实验研究都局限于基于可见 - 近红外波段 (或经倍频后波长进一步缩短至谐波波段) 的驱动光场. 另一方面, 强场物理研究中许多重要的物理效应和物理现象均与泵浦光的波长有重要的依赖关系. 近年来, 可调谐中红外 ( $1 \mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m}$ ) 新波段强场超快激光 (脉冲能量为毫焦耳量级或更高, 脉宽达数十飞秒甚至周期量级) 的出现与迅速发展 [76~79], 特别是光参量放大技术的发展, 开辟了强场物理领域中迄今仍很少探索过的参量空间, 为开拓强光场与物质相互作用新物理、新效应及新应用提供了新机遇.

首先, 长波长 (中红外) 新波段强激光场可以显著降低决定强场原子光电离机制的著名的 Keldysh 参数  $\gamma$ , 促使强场光电离研究深入到隧穿电离 ( $\gamma < 1$ ) 甚至深隧穿电离 ( $\gamma \ll 1$ ) 的参数空间, 从而导致一系列新效应新物理的出现, 将已有数十年研究历史的强场原子电离学科领域推进到一个崭新的阶段 [80]. 其次, 强场高次谐波也同样密切依赖于驱动激光的波长, 高次谐波的截止频率与驱动波长的平方成正比, 而阿秒啁啾与驱动波长成反比 [81]. 因此, 更长波段的中红外强场超快激光为实现超快、可调谐, 水窗波段乃至 keV 量级的台式化相干 X 射线源以及更短、更强的阿秒光脉冲提供了新途

径,也具有重大的科学意义与应用价值.另外,采用长波长激光脉冲驱动高次谐波进行分子轨道成像研究<sup>[82]</sup>,由于返回电子动能的增加并高次谐波截止频率的大大拓展,可望获得更高的分子轨道成像空间分辨率,这无疑对探索物质微观结构具有显著意义.

目前产生中红外超快激光的重要方式主要包括光学参量振荡器(OPO)、OPA和非线性差频产生(DFG)等.采用飞秒钛宝石激光振荡器同步泵浦的OPO可以产生平均功率100 mW,脉冲能量nJ量级的中红外飞秒激光脉冲<sup>[83,84]</sup>.这类高重复频率,低脉冲能量的中红外超短脉冲光源主要适用于基于泵浦-探测技术的光谱学研究.通过飞秒OPA可以产生更高能量的中红外脉冲,常用的非线性晶体有KTP, KTA, LiNbO<sub>3</sub>和PPLN等,如Brida等通过PPSLT晶体,得到中心波长为3.6 μm、脉宽为25 fs、能量为2 μJ的中红外脉冲,并且脉冲的波长在2~5 μm波段连续可调<sup>[85]</sup>.利用飞秒OPA输出的信号光与闲频光之间的差频,也能产生中红外激光脉冲,并且波长更长,但由于其级联特征,总体效率不高.OPCPA是CPA与OPA两种技术的结合,既有CPA的脉冲展宽、放大、再压缩的基本要素及高的能量提取效率,又具备OPA宽带,高增益和高信噪比的优点<sup>[86]</sup>.上海交通大学钱列加小组采用该技术在3.3~3.95 μm波段获得了能量为13.3 mJ的中红外脉冲,输出的峰值功率大于120 GW<sup>[87]</sup>.

作为近年刚兴起并发展的前沿领域,当前中红外新波段强场物理研究仍然处在迅速拓展并可望取得重大新突破的关键阶段.首先,在中红外强场超快光场条件的建立、发展与特性操控方面,还存在一系列关键科学问题有待解决.例如,目前已报道的绝大多数中红外新波段强场超快激光系统,其波长调谐范围仍局限于1~5 μm左右,波长调谐范围进一步拓展并压缩脉宽达到周期量级极端超快时间尺度,以及脉冲能量进一步提高的中红外新波段强场超快激光系统亟待发展.其次,中红外新波段强场相互作用新效应新规律的研究还刚刚开始不久,整个领域仍处在初期阶段,进一步的研究重点是深入揭示隧穿甚至深隧穿电离(即著名Keldysh参数小于甚至远小于1)起主导作用时,中红外新波段强场激光与原子、分子,甚至凝聚态物质体系相互作用的新效应,并开拓相互作用中波长依赖关系等的新规律.最后,在中红外新波段强场物理的相关应用研究方面,将着重探索中红外新波段强场激光驱动产生keV量级高亮度超快X射线相干辐射<sup>[88]</sup>和阈上电离的低能峰<sup>[89]</sup>等中的新机制等.上述关键科学问题与相关内容的深入研究,将有力地推动中红外新波段强场物理这一国际科学前沿的进一步开拓与创新.

(3) 超快非线性光学.1961年, Franken等用红宝石激光器通过石英晶体,首次观察到了二倍频效应<sup>[90]</sup>,标志着非线性光学的诞生.20世纪70年代以后,激光技术的发展促使四波混频、光克尔等新型非线性光学效应的发现,反过来这些非线性光学效应也促进了超快激光技术的发展.随着飞秒超快激光器的发展与成熟,使得超快非线性光学研究进入全新的发展阶段.随着激光强度的进一步增加,非线性光学研究从传统的微扰区进入到非微扰区乃至相对论区域.随着激光脉宽的缩短,超快非线性光学的研究对象从宏观物质体系推进到介观乃至微观物质体系,超快非线性光学的发展也为人们提供了从太赫兹到X射线波段的新颖光源<sup>[91~94]</sup>,这些新波段相干光源的出现催生了太赫兹非线性光学、X射线非线性光学等研究方向,拓展了超快非线性光学的研究领域、研究对象和应用范围.

近些年,新型的激光光源(如宽频带光梳、中红外与X射线波段超快光源等),以及新的光学探测手段(如表面倍频与和频<sup>[95]</sup>、相干拉曼散射<sup>[96]</sup>、非线性近场光学成像<sup>[97]</sup>等)发展迅速,对物质科学研究已产生根本性的影响.随着超强超快激光技术的发展与成熟,超快非线性光学的发展呈现如下趋势:研究对象从二能级简单体系拓展为多能级复杂体系;研究的参量空间从传统的微扰区域推进到前所未有的非微扰区域;研究物质的尺度从宏观尺度(衍射光学),到介观尺度(近场光学),并进一步发展到微观尺度(量子光学).同时非线性光学材料研究也得到了长足发展,由早期的晶体材料逐渐发展

为新型的纳米材料, 如半导体量子线、量子点、光子晶体、纳米管、纳米球、石墨烯等等<sup>[98~101]</sup>。

非线性光谱技术大大丰富和拓展了物性探测的能力, 然而, 该类技术在当前重要凝聚态体系中的应用依然有限, 包括拓扑绝缘体<sup>[102]</sup>、具有奇异物性的二维材料、界面微观结构与物性、反常霍尔效应<sup>[103]</sup>、自旋电子学、强关联氧化物<sup>[104]</sup>、超材料<sup>[105]</sup>、高分子相互作用与构型、生物手性<sup>[106]</sup>等领域。此外, 新型光源与非线性光谱新技术的引入, 也将对环境科学(如大气、水、土壤等中痕量成分的探测与分析)产生重要影响<sup>[107]</sup>, 开拓出非线性光谱技术应用的新领域。

尽管超快新光源和超快非线性新效应的研究突飞猛进, 其在物质科学研究方面的应用仍有广阔的拓展空间。当前, 针对物质科学前沿问题的需求, 有目的地发展新型光源与超快非线性光谱探测手段, 已成为光物理领域大多国际前沿研究小组所采取的常规模式。目前, 国内已形成了一批从事相关研究的科研队伍, 其分布涵盖了几乎所有国内顶尖的科研院所与著名大学。然而, 目前该领域的布局仍缺乏平衡, 能够同时掌握并发展尖端光学手段, 并应用于前沿物质科学开展研究的研究机构亟待培育与扶持。

(4) 超快激光微纳制备。超快激光微纳制备是一种三维微纳制备技术, 主要利用超快激光与物质动态非线性相互作用, 对材料实施超越光学衍射极限的高精度改性, 去除和成型实现微纳光子结构。由于超快激光加工所能够提供的不可取代的独特优越性, 同时也得益于高性能超快激光技术的持续发展, 目前超快激光在基础研究和多种应用研究中已成为常用的工具。

超快激光微纳制备具有其独特的优势, 它大大减少了热能向加工区域的扩散<sup>[108]</sup>, 显著降低热影响区的形成, 从而可以对生物组织等软物质<sup>[109]</sup>以及半导体、绝缘体等硬或脆的材料<sup>[110]</sup>进行高质量的微加工。同时, 抑制热能向周围区域的扩散也为获得纳米尺度加工的空间分辨率提供了必要的前提<sup>[111]</sup>。此外, 超快激光能够引发非线性吸收(即多光子吸收), 可以使原本对光透明的材料发生强烈的光吸收<sup>[112, 113]</sup>。多光子吸收过程使得超快激光不仅可以对透明材料(如玻璃、聚合物等)的表面进行加工, 还可以对其内部进行三维(3D)微加工<sup>[114~117]</sup>。同时, 多光子吸收的非线性过程天然地提供了超越衍射极限的激光加工精度<sup>[118]</sup>。如果超快激光辐照的强度接近烧蚀阈值, 会在各种材料上形成纳米条纹, 条纹的周期远小于辐照激光波长。

飞秒激光具有极高峰值功率, 焦点光场的场强与原子内部库伦场可比拟, 可直接进行价键裁剪, 实现难加工材料的成型加工, 可以对金属、半导体、陶瓷、玻璃、晶体、聚合物, 甚至是生物组织进行加工。该技术对于多种材料加工的适用性以及构筑任意三维拓扑结构光子回路的独特能力, 也为复杂芯片集成提供了可能。另一方面, 超快激光微纳制备用于表面结构制备时, 可以导致一系列新奇的特性, 包括摩擦力、粘附力、光学吸收或反射, 以及疏水性等。随着激光技术发展, 激光系统可以输出高重复频率的超快超强激光脉冲, 一方面超快激光系统变得更加可靠、经济高效, 另一方面也大大加快了超快激光微纳制备的直写速度, 提高加工效率。

利用超快激光烧蚀材料, 可以有效抑制热扩散, 实现材料的冷加工<sup>[119]</sup>。飞秒激光烧蚀产生的烧孔具有尖锐的边缘和陡峭的侧壁, 几乎没有形成明显的热影响区。相比之下, 纳秒激光烧蚀则在烧孔周围产生了很大的熔融区。

飞秒激光在生物成像以及细胞和生物组织的处理方面也有很大应用前景。飞秒激光可以将相互作用区域限制在一个微小的三维体积内, 聚焦的飞秒激光束可以用于纳米手术, 包括对组织和细胞进行解剖<sup>[120]</sup>、显微外科手术<sup>[121]</sup>, 以及转染<sup>[122]</sup>等。当飞秒激光聚焦在液体中时, 会产生冲击波和空化气泡<sup>[123]</sup>, 这一现象已经被用于聚合物的析晶<sup>[124]</sup>、蛋白质块和细胞的塑形<sup>[125]</sup>、细胞中纳米粒子的注入<sup>[126]</sup>、细胞的局部刺激<sup>[127]</sup>, 和单个细胞的分离<sup>[128]</sup>等。飞秒激光还可以用于眼角膜修复<sup>[129]</sup>。目前, 用于产生角膜薄片的飞秒激光治疗装置已经有成熟的商业化产品, 相比于传统的机械微角膜飞秒激光

修复眼角膜更加精确和可预测。

超快激光加工技术在汽车工业领域有很大的应用价值,可以满足多方面的要求,包括微型化、高精度、高质量、多样化和高效率等<sup>[130]</sup>。2007年,德国使用皮秒激光加工技术生产尾气检测器,该检测器有一个特殊的陶瓷层,能够比传统传感器更快更精确地测量废气,并通过优化燃烧控制来降低污染排放。2009年,皮秒激光被用于制造柴油机喷射器,采用皮秒激光制备的密闭系统能承受高达2000 bar的压力,这使得柴油机的注入系统更加可靠、牢固且环保。

此外,超快激光加工技术在玻璃焊接方面也应用广泛,并在微机械、医疗器件、小卫星等领域引起了人们极大的研究兴趣。2005年,Tamaki等利用飞秒激光成功实现了对两块熔石英玻璃衬底的焊接<sup>[131]</sup>。自此之后,飞秒激光和皮秒激光便被广泛地应用于焊接同类型的玻璃衬底,包括碱硼硅酸盐玻璃、钠钙玻璃、光敏玻璃等。

在飞秒激光微纳制备方面,中国科学家在超衍射极限加工分辨率、人工复眼等高性能微光学器件制备,飞秒激光直写新材料新功能拓展,以及激光湿法刻蚀新技术开拓等方面走在世界前列,在国际上该领域已占有重要一席之地。

(5) 宽带光学频率梳。基于超快脉冲激光技术的光学频率梳的出现掀起了一场光学频率测量的革命。随着光梳技术与电子工程、精密光谱学、高能激光技术的深度结合,光梳已经进化成为一种重要的科学研究工具<sup>[132,133]</sup>,并广泛应用在精密激光光谱学<sup>[134,135]</sup>、微波光子学<sup>[136]</sup>、天文光谱仪校准<sup>[137]</sup>、阿秒科学<sup>[138]</sup>等领域。宽带光学频率梳,可在更宽的频谱范围和更高的光学频率梳强度下达到更高的精度,并用于获取微观物质的内部结构、能量分布和微小粒子的运动状态等方面的重要信息,推进人们对微观物理世界的进一步认识。高功率飞秒光学频率梳对扩展光学频率梳的光谱覆盖范围尤为重要,可以通过非线性过程产生紫外、极紫外、中远红外和 THz 波段的光学频率梳。在此基础上将拓展出高功率非线性光梳光谱、紫外与极紫外光梳光谱、中远红外光梳光谱等崭新的高精度、高分辨率、高灵敏度的光谱探测与精密测量方法。

近年来,宽带光学频率梳的主要研究内容包括光场的精密控制,高功率和新波段光学频率梳 3 个方面。目前,激光线宽已压缩到亚赫兹量级,光场探测与控制已达到单个光子极限的灵敏度。同时,百瓦量级的高功率飞秒光学频率梳已研制成功,飞秒光梳技术的发展从固体激光器转向光纤激光器。通过高次谐波产生技术,光学频率梳已从近红外、可见光波段拓展到紫外波段、中远红外波段,以及太赫兹和高频微波波段。

从 2007 年至今,各国研究团队从各自的需求出发,结合多种技术手段优化光学频率梳光源的各项参数,在多个领域取得了重要研究进展。2010 年至今,德国马普量子光学研究所 (MPQ) Hänsch 教授小组开展了一系列的实验研究,通过与频率变换技术结合完成了从近红外到中红外多个波段,高精度吸收光谱测量和拉曼光谱成像的实验研究<sup>[139,140]</sup>。2007 年到 2015 年间,美国科罗拉多大学 (University of Colorado) 与美国国家标准与技术研究所 (National Institute of Standards and Technology) 联合实验室的叶军教授与著名激光公司 IMRA 合作,结合光纤光学频率梳与啁啾脉冲放大技术,将光学频率梳平均输出功率提升至 80 W,并以此为基础结合外腔增强技术获得了最短波长 38 nm 的极紫外光梳<sup>[141,142]</sup>; 2013 年,德国马普量子光学研究所 (MPQ) 等多个科研机构合作,利用非线性脉冲压缩技术,获得了输出功率 43 W、脉冲宽度 51 fs 的掺镱光纤光学频率梳,结合外腔增强技术获得最短输出波长 11.45 nm 的极紫外光梳<sup>[143]</sup>。近年来国内包括华东师范大学、中国科学院物理研究所、中国计量科学研究院、北京大学、上海理工大学、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院国家授时中心等多家单位也进行了光梳光源的研究工作,主要集中在光梳光源的研制上,开展了光学频率合成,对比及光钟的基础研究,并使用大模场掺镱光子晶体光纤作为增益介质,将光学频率梳输出功率提高

到百瓦量级。

宽带光学频率梳的发展趋势主要表现在光场控制精度的提升、光学频率梳功率的进一步放大、覆盖波段的拓展、精密光梳光谱学的应用开拓等方面。宽带光学频率梳,可在更宽的频谱范围和更高的光学频率梳强度下达到更高的精度,并用于获取微观物质的内部结构、能量分布和微小粒子的运动状态等方面的重要信息,推进人们对微观物理世界的进一步认识。高功率飞秒光学频率梳对扩展光学频率梳的光谱覆盖范围尤为重要,可以通过非线性过程产生紫外、极紫外、中远红外和 THz 波段的光学频率梳。在此基础上将拓展出高功率非线性光梳光谱,紫外与极紫外光梳光谱,中远红外光梳光谱等崭新的高精度、高分辨率、高灵敏度的光谱探测与精密测量方法。

当前,宽带光学频率梳的主要研究目标包括:将光场在时域频域同时实现精密控制的技术从近红外推进到紫外、极紫外超短波段,中远红外波段和太赫兹及高频微波波段;发展高功率光梳非线性光谱和宽波段高精度频谱标识的新方法;形成极紫外到中远红外光学频率梳多模式非线性频率相干转换的新技术;解决宽带光梳光谱灵敏测量的关键科学问题;实现宽波段光梳光谱高精度、高灵敏度、实时快捷测量等。精密光谱学在向极紫外到中远红外等宽波段延伸发展的进程中,不仅为原子分子精密测控与量子调控提供更高精度的新技术,也将为红外光谱遥感等重大应用提供崭新的高精度和高灵敏度光谱探测方法。利用高功率飞秒光梳光源驱动产生高强度 THz 光梳,也是 THz 非线性光学效应、超分辨 THz 成像、高精度 THz 计量等前沿科学探索研究的需要。

以光学频率梳为激发源的光梳光谱技术,在光谱范围、时间分辨能力、灵敏度,和测量精度等多方面都存在着显著优势。在光谱遥感领域具有巨大的应用价值,凭借已实现的高功率飞秒光学频率梳技术,可拓展极宽频谱的主动式光谱遥感技术,拓展光谱遥感跟踪范围和频谱标识精度。可望发展形成光梳光谱遥感的新兴交叉科学分支,促发系列机制方法革新与高技术创新。提前布局在这一领域展开富有成效的研究,有助使我国在远程光谱遥感抢占新兴前瞻性战略高技术的制高点。

高功率光梳光谱技术可以精确地测定物质化学成分,也可极大地提高探测灵敏度,在深入研究大生物分子的形成过程和微生物的内部结构以及生物医学诊断等方面有重要应用前景,例如,高精度高灵敏度检测人体呼出的气体中包括二氧化碳、水、一氧化碳、氨气在内的上百种化学成分,可望以此判断可能的病情;利用红外光梳光谱技术测量分析同位素分子之间的比例关系,可望诊断人体相关器官的可能病变信息。这方面的研究有望拓展与生物医学应用交叉的新前沿。

(6) 超高时间对比度激光脉冲产生与测量。在超强超短激光脉冲时间对比度提升以及相关测量技术研究方面,在拍瓦峰值功率量级,时间窗口在主脉冲前百皮秒量级的范围外,超强超短激光脉冲时间对比度已经突破了  $10^{10}$  量级<sup>[35~37,144]</sup>,但是随着聚焦功率的进一步增加,脉冲宽度的进一步压缩,以及强场激光物理实验对超强超短激光脉冲时间对比度的进一步需求,亟需进一步提升超强超短激光脉冲的时间对比度,特别是提升主脉冲前后百皮秒乃至 10 皮秒以内的超强超短激光脉冲的时间对比度,同时发展相关的激光脉冲低重复频率乃至单发激光脉冲的时间对比度测量技术。结合超强激光技术的发展方向和应用需求,如激光峰值功率的进一步提升、脉冲宽度的进一步压缩,以及带来聚焦强度的提升和强场激光物理新需求的情况下,进一步发展不同工作波段的超强超短激光脉冲时间对比度提升,特别是靠近主脉冲前后时间对比度提升技术,同时发展相应高动态范围的脉冲时间对比度测量技术等,也日益成为当前研究的重点。

(7) 宽带超高通量激光脉冲放大。宽带高通量激光脉冲放大主要有两种渠道,CPA 和 OPCPA,基于 CPA 技术的放大主要是以大口径钛宝石晶体为增益介质,目前报道的最高输出是基于 100 mm 口径钛宝石晶体在 800 nm 中心波段附近已经获得超过峰值功率 2 拍瓦、脉冲宽度 30 fs 量级的输出<sup>[8]</sup>,同时,由于晶体横向尺寸是通光厚度的数倍以上,寄生振荡抑制是一个关键技术问题。要想获得 10 拍

瓦量级乃至更高功率的输出, 就需要通光口径约 200 mm 乃至更大的钛宝石晶体作为放大介质, 随着晶体口径的增大, 寄生振荡抑制和放大性能需要进一步发展才能获得高效率的放大输出. 与 CPA 技术相比, OPCPA 技术的工作介质是非线性光学晶体, 具有单程增益高, 可支持放大带宽大等优点, 在基于大口径非线性晶体放大过程中, 不存在寄生振荡效应, 只要晶体尺寸可以满足要求, 就可实现高能量的输出, 目前最高输出是基于 100 mm 口径的 LBO 晶体, 在 800 nm 实现可支持 1 拍瓦, 32 fs 的超高功率输出, 转换效率超过 25%<sup>[16]</sup>.

超强激光在高速粒子加速、强相对论物理、 $\gamma$  射线产生等多个领域具有重要应用, 对激光输出功率的需求也不断升级, 下一阶段将需要输出峰值功率在 10 拍瓦以上的超强超短激光系统, 因此, 急需解决基于 200 mm 口径以上钛宝石晶体中的放大, 重点解决影响放大效率和输出能量、光束质量等主要科学技术问题, 解决基于 200 mm 口径以上非线性晶体 (以 LBO 为主) OPCPA 宽带, 高效率放大的科学技术问题并探索等离子体介质中的参量放大新机制, 以及高通量放大系统的整体稳定性和光束质量控制问题.

(8) 宽带大能量激光脉冲压缩. 目前随着超强超短激光技术的发展, 在百焦耳乃至千焦耳脉冲能量的量级下, 脉冲宽度已经可以压缩到百飞秒量级乃至 30 飞秒以下, 支持输出脉冲峰值功率可以达到拍瓦乃至 10 拍瓦的量级. 而在更高脉冲峰值功率的超强超短激光系统的规划中, 如百拍瓦乃至艾瓦量级下, 压缩脉冲宽度进一步要求到 10 飞秒乃至更短. 但是目前超强超短激光脉冲的强度已经接近传统光学元件所能承载的水平. 因此, 大能量超短激光脉冲压缩已经成为制约激光强度提升的瓶颈, 突破该瓶颈已经成为率先实现极端强度激光的核心问题. 目前国内外研究现状主要是通过单纯扩展脉冲压缩单元规模来提升负载通量, 通过多级色散管理来获取更短脉冲. 长远而言, 该发展模式和发展速度均难以适应强激光技术发展及相关物理研究的需求, 因此亟待发展负载能力更强、色散管理更精密的脉冲压缩新型技术和创新原理. 随着对大负载通量和时间超快两方面追求, 大能量超短激光脉冲压缩的发展趋势包括: 高阶 (四阶及以上) 色散精密管理, 时、空、谱多维度相干合成, 新构型脉冲压缩, 新材料脉冲压缩, 以及新机理脉冲压缩, 并同步注重压缩后极端强度脉冲的准确诊断.

(9) 超高峰值功率光束聚焦技术. 超强超短激光的应用需要超高功率密度, 因而提升靶面峰值功率密度始终是这一领域最主要的追求目标之一, 因而其可聚焦的功率密度是超强超短激光系统中最主要的指标之一, 主要通过可变型镜和自适应光学来主动校正波前, 提高聚焦强度, 基于 F/0.6 抛物面镜目前获得的最高聚焦功率密度达到  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup><sup>[145]</sup>, 但由于离轴抛物面镜 F 数太小无法在物理实验中实际应用. 基于物理实验的需求, 以获得  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup> 乃至更高的靶场聚焦功率密度为目标, 发展波前校正技术, 新型聚焦技术和多束激光靶场相干叠加技术为主的技术途径, 发展靶场焦点诊断技术, 充分提高超强超短激光的聚焦功率密度和对聚焦能力的分析评估能力.

(10) 高效率、高重频超强激光技术. 近年来, 超强激光峰值功率的不断攀升, 其在基础研究和高新技术发展等方面的应用价值也日益凸显, 而其工作效率和重复频率的提升也已成为当前国际研究的新趋势. 超强激光的工作模式从传统的单发次向重复频率发展, 并且对电光转换效率提出了新的要求, 故而带来了相关技术的变革. 最近, 国际上基于传统闪光灯泵浦的大能量激光系统已经实现 0.01 赫兹重复频率千焦耳能量激光脉冲输出, 峰值脉冲功率将达到 10 拍瓦量级. 另一方面, 二极管泵浦固体激光技术的发展, 以及其他高效率泵浦技术的应用使得高效高重频超强激光的转化效率和重复频率取得了突飞猛进的进步, 重复频率从赫兹乃至千赫兹的超强超短激光系统也已被纳入规划, 电光转换效率有望突破 10%. 高效高重频超强激光技术的发展主要依赖高重频高能泵浦源、高效率热管理, 以及大口径增益介质的进步, 主要表现在新型的热管理方式、新构型的强激光系统、新材料强激光脉冲产生与放大、增益介质拼接, 以及激光脉冲组束等方面.

## 4 结论

发展超快光学与超强激光技术具有重要科学意义和应用价值. 超快光学与超强超短激光技术的研究不仅将推动一批基础与交叉前沿学科的开拓, 也将强力推动相关战略高新技术领域的发展, 并可能引发新技术变革和创造新产业. 例如, 国际上正在展开激烈竞争的 10 拍瓦级超强超短激光装置的研制, 有望开辟激光与物质相互作用及超快光学发展的新阶段. 而我国也有望在高性能的 10 拍瓦乃至更高量级的超强超短激光技术与在高能粒子加速等前沿应用方面取得里程碑式进展, 以及在阿秒科学、新波段超快激光、超快非线性光学、超快激光微纳制备、宽带光学频率梳等当前国际超快激光发展前沿与应用方面取得重要突破, 在超快光学与超强激光技术这一国际竞争激烈的研究领域取得优势地位.

**致谢** 感谢华东师范大学精密光谱科学技术国家重点实验室李文雪教授提供的宝贵资料.

## 参考文献

- 1 Kiriyama H, Mori M, Pirozhkov A S, et al. High-contrast, high-intensity petawatt-class laser and applications. *IEEE J Sele Topics Quant Electron*, 2015, 21: 232–249
- 2 Perry M D, Mourou G. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers. *Science*, 1994, 264: 917–923
- 3 Baer T M, Bigelow N P. 2020 Visions (lasers). *Nature*, 2010, 463: 26–32
- 4 Weiner A. *Ultrafast Optics*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2011
- 5 Service R F. Laser labs race for the petawatt. *Science*, 2003, 301: 154–156
- 6 Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, et al. 0.85-PW, 33-fs Ti: sapphire laser. *Opt Lett*, 2003, 28: 1594–1596
- 7 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. *Opt Express*, 2012, 20: 10807–10815
- 8 Chu Y, Liang X, Yu L, et al. High-contrast 2.0 petawatt Ti: sapphire laser system. *Opt Express*, 2013, 21: 29231–29239
- 9 Wang Z, Liu C, Shen Z, 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. *Opt Lett*, 2011, 36: 3194–3196
- 10 Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, et al. Generation and characterization of the highest laser intensities ( $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>). *Opt Lett*, 2004, 29: 2837–2839
- 11 Mourou G, Tajima T. The extreme light infrastructure: optics' next horizon. *Optics Photonics News*, 2011, 22: 47–51
- 12 Powell D. Europe sets sights on lasers. *Nature*, 2013, 500: 264–265
- 13 Hernandez-Gomez C, Blake S P, Chekhlov O, et al. The vulcan 10 PW project. *J Phys Conf Series*, 2010, 244: 032006
- 14 Liang X, Leng Y, Wang C, et al. Parasitic lasing suppression in high gain femtosecond petawatt Ti: sapphire amplifier. *Opt Express*, 2007, 15: 15335–15341
- 15 Xu L, Yu L, Liang X, et al. High-energy noncollinear optical parametric-chirped pulse amplification in LBO at 800 nm. *Opt Lett*, 2013, 38: 4837–4840
- 16 Yu L, Liang X, Xu L, et al. Optimization for high-energy and high-efficiency broadband optical parametric chirped-pulse amplification in LBO near 800 nm. *Opt Lett*, 2015, 40: 3412–3415
- 17 Liu J S, Xia C Q, Wang W T, et al. All-optical cascaded laser wakefield accelerator using ionization-induced injection. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 035001
- 18 Wang W P, Shen B F, Zhang H, et al. Large-scale proton radiography with micrometer spatial resolution using femtosecond petawatt laser system. *AIP Adv*, 2015, 5: 107214
- 19 Diels J C, Bernstein R, Stahlkopf K E, et al. Lightning control with lasers. *Sci American*, 1997, 277: 50–55
- 20 Krausz F, Ivanov M. Attosecond physics. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 163–234
- 21 Vozzi C, Calegari F, Ferrari F, et al. Advances in laser technology for isolated attosecond pulse generation. *Laser*

- Phys Lett, 2009, 6: 259–267
- 22 Gale G M, Gallot G, Hache F, et al. Generation of intense highly coherent femtosecond pulses in the mid infrared. *Opt Lett*, 1997, 22: 1253–1255
- 23 Zhang C, Wei P, Huang Y, et al. Tunable phase-stabilized infrared optical parametric amplifier for high-order harmonic generation. *Opt Lett*, 2009, 34: 2730–2732
- 24 Dudley J M, Finot C, Richardson D J, et al. Self-similarity in ultrafast nonlinear optics. *Nature Phys*, 2007, 3: 597–603
- 25 Thomson R, Leburn C, Reid D. *Ultrafast Nonlinear Optics*. Berlin: Springer, 2013
- 26 Brabec T, Krausz F. Intense few-cycle laser fields: frontiers of nonlinear optics. *Rev Mod Phys*, 2000, 72: 545–591
- 27 Rizvi N H. Femtosecond laser micromachining: current status and applications. *Riken Rev*, 2003, 50: 107–112
- 28 Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. *Nature Photon*, 2008, 2: 219–225
- 29 Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. Mid-infrared frequency combs. *Nature Photon*, 2012, 6: 440–449
- 30 Cingöz A, Yost D C, Allison T K, et al. Direct frequency comb spectroscopy in the extreme ultraviolet. *Nature*, 2012, 482: 68–71
- 31 Hugi A, Villares G, Blaser S, et al. Mid-infrared frequency comb based on a quantum cascade laser. *Nature*, 2012, 492: 229–233
- 32 Ideguchi T, Holzner S, Bernhardt B, et al. Coherent Raman spectro-imaging with laser frequency combs. *Nature*, 2013, 502: 355–358
- 33 Diddams S A, Jones D J, Ye J, et al. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 5102–5105
- 34 Gerginov V, Tanner C E, Diddams S A, et al. High-resolution spectroscopy with a femtosecond laser frequency comb. *Opt Lett*, 2005, 30: 1734–1736
- 35 Kalashnikov M P, Risse E, Schönagel H, et al. Double chirped-pulse-amplification laser: a way to clean pulses temporally. *Opt Lett*, 2005, 30: 923–925
- 36 Shah R C, Johnson R P, Shimada T, et al. High-temporal contrast using low-gain optical parametric amplification. *Opt Lett*, 2009, 34: 2273–2275
- 37 Liu C, Wang Z, Li W, et al. Contrast enhancement in a Ti: sapphire chirped-pulse amplification laser system with a noncollinear femtosecond optical-parametric amplifier. *Opt Lett*, 2010, 35: 3096–3098
- 38 Homoelle D, Gaeta A L, Yanovsky V, et al. Pulse contrast enhancement of high-energy pulses by use of a gas-filled hollow waveguide. *Opt Lett*, 2002, 27: 1646–1648
- 39 Huang Y, Zhang C, Xu Y, et al. Ultrashort pulse temporal contrast enhancement based on noncollinear optical-parametric amplification. *Opt Lett*, 2011, 36: 781–783
- 40 Fourmaux S, Payeur S, Buffechoux S, et al. Pedestal cleaning for high laser pulse contrast ratio with a 100 TW class laser system. *Opt Express*, 2011, 19: 8486–8497
- 41 Collier J, Hernandez-Gomez C, Allott R, et al. A single-shot third-order autocorrelator for pulse contrast and pulse shape measurements. *Laser Part Beams*, 2001, 19: 231–235
- 42 Divall E J, Ross I N. High dynamic range contrast measurements by use of an optical parametric amplifier correlator. *Opt Lett*, 2004, 29: 2273–2275
- 43 Sung J H, Lee S K, Yu T J, et al. 0.1 Hz 1.0 PW Ti: sapphire laser. *Opt Lett*, 2010, 35: 3021–3023
- 44 Kiriya H, Michiaki M, Nakai Y, et al. High-spatiotemporal-quality petawatt-class laser system. *Appl Opt*, 2010, 49: 2105–2115
- 45 Gaul E W, Martinez M, Blakeney J, et al. Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd: glass amplifier. *Appl Opt*, 2010, 49: 1676–1681
- 46 Chvykov V, Krushelnick K. Large aperture multi-pass amplifiers for high peak power lasers. *Opt Commun*, 2012, 285: 2134–2136
- 47 Suckewer S. Ultra-intense lasers: beyond a petawatt. *Nature Phys*, 2011, 7: 11–12
- 48 Pipahl A, Anashkina E A, Toncian M, et al. High-intensity few-cycle laser-pulse generation by the plasma-wakefield self-compression effect. *Phys Rev E*, 2013, 87: 033104
- 49 Balakin A A, Litvak A G, Mironov V A, et al. Compression of femtosecond petawatt laser pulses in a plasma under

- the conditions of wake-wave excitation. *Phys Rev A*, 2013, 88: 023836
- 50 Katz O, Small E, Bromberg Y, et al. Focusing and compression of ultrashort pulses through scattering media. *Nature Photon*, 2011, 5: 372–377
- 51 Wang H Y, Lin C, Sheng Z M, et al. Laser shaping of a relativistic intense, short gaussian pulse by a plasma lens. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 265002
- 52 McCabe D J, Tajalli A, Austin D R, et al. Spatio-temporal focusing of an ultrafast pulse through a multiply scattering medium. *Nat Commun*, 2011, 2: 447
- 53 Ple F, Pittman M, Jamelot G, et al. Design and demonstration of a high-energy booster amplifier for a high-repetition rate petawatt class laser system. *Opt Lett*, 2007, 32: 238–240
- 54 Lureau F, Laux S, Casagrande O, et al. High repetition rate PetaWatt Titanium Sapphire laser system for laser plasma acceleration. In: *Proceedings of Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference, Munich, 2013*. 5–6
- 55 Rockwood A, Wang Y, Wang S, et al. Petawatt class laser with high repetition rate for the excitation of X-ray lasers. *Bull American Phys Soc*, 2015, 60
- 56 徐至展, 李儒新. 超强超快激光的特点与发展. *科学*, 2001, 6: 6–10
- 57 Mourou G, Tajima T. More intense, shorter pulses. *Science*, 2011, 331: 41–42
- 58 Li R X. Electron acceleration and its trajectory control in sub-atom regime and attosecond pulse generation. *Opt Optoelectron Tech*, 2011, 9: 1–3 [李儒新. 原子级时间与空间尺度的电子加速, 轨道操控与阿秒脉冲产生. *光学与光电技术*, 2011, 9: 1–3]
- 59 Bucksbaum P H. Attophysics: ultrafast control. *Nature*, 2003, 421: 593–594
- 60 Guo Y H, Lu R F, Han K L, et al. Generation of an isolated sub-100 attosecond pulse in a two-color laser field. *Int J Quant Chem*, 2009, 109: 3410–3415
- 61 Kim K T, Kim C M, Baik M G, et al. Single sub-50-attosecond pulse generation from chirp-compensated harmonic radiation using material dispersion. *Phys Rev A*, 2004, 69: 051805
- 62 Cao X, Jiang S, Yu C, et al. Generation of isolated sub-10-attosecond pulses in spatially inhomogenous two-color fields. *Opt Express*, 2014, 22: 26153–26161
- 63 Christov I P, Murnane M M, Kapteyn H C. High-harmonic generation of attosecond pulses in the “single-cycle” regime. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 1251–1254
- 64 Sansone G, Benedetti E, Calegari F, et al. Isolated single-cycle attosecond pulses. *Science*, 2006, 314: 443–446
- 65 Chang Z. Single attosecond pulse and xuv supercontinuum in the high-order harmonic plateau. *Phys Rev A*, 2004, 70: 043802
- 66 Zeng Z, Cheng Y, Song X, et al. Generation of an extreme ultraviolet supercontinuum in a two-color laser field. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 754–757
- 67 Zeng Z, Leng Y, Li R, et al. Electron quantum path tuning and isolated attosecond pulse emission driven by a waveform-controlled multi-cycle laser field. *Phys B*, 2008, 41: 215601
- 68 Takahashi E J, Lan P F, Mücke O D, et al. Attosecond nonlinear optics using gigawatt-scale isolated attosecond pulses. *Nat Commun*, 2013, 4: 141–155
- 69 Drescher M, Hentschel M, Kienberger R, et al. X-ray pulses approaching the attosecond frontier. *Science*, 2001, 291: 1923–1927
- 70 Scrinzi A, Geissler M, Brabec T. Attosecond cross correlation technique. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 412–415
- 71 Hentschel M, Kienberger R, Spielmann C, et al. Attosecond metrology. *Nature*, 2001, 414: 509–513
- 72 Paul P M, Toma E S, Breger P, et al. Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation. *Science*, 2001, 292: 1689–1692
- 73 Kienberger R, Goulielmakis E, Uiberacker M, et al. Atomic transient recorder. *Nature*, 2004, 427: 817–821
- 74 Goulielmakis E, Schultze M, Hofstetter M, et al. Single-cycle nonlinear optics. *Science*, 2008, 320: 1614–1617
- 75 Zhao K, Zhang Q, Chini M, et al. Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch. *Opt Lett*, 2012, 37: 3891–3893
- 76 Li C, Wang D, Song L, et al. Generation of carrier-envelope phase stabilized intense 1.5 cycle pulses at 1.75  $\mu\text{m}$ . *Opt Express*, 2011, 19: 6783–6789

- 77 Chalus O, Thai A, Bates P K, et al. Six-cycle mid-infrared source with 3.8  $\mu\text{J}$  at 100 kHz. *Opt Lett*, 2010, 35: 3204–3206
- 78 Fuji T, Ishii N, Teisset C Y, et al. Parametric amplification of few-cycle carrier-envelope phase-stable pulses at 2.1  $\mu\text{m}$ . *Opt Lett*, 2006, 31: 1103–1105
- 79 Gu X, Marcus G, Deng Y, et al. Generation of carrier-envelope-phase-stable 2-cycle 740- $\mu\text{J}$  pulses at 2.1- $\mu\text{m}$  carrier wavelength. *Opt Express*, 2009, 17: 62–69
- 80 Agostini P, DiMauro L F. Atoms in high intensity mid-infrared pulses. *Contemp Phys*, 2008, 49: 179–197
- 81 Colosimo P, Doumy G, Blaga C I, et al. Scaling strong-field interactions towards the classical limit. *Nature Phys*, 2008, 4: 386–389
- 82 Itatani J, Levesque J, Zeidler D, et al. Tomographic imaging of molecular orbitals. *Nature*, 2004, 432: 867–871
- 83 Haakestad M W, Fonnum H, Arisholm G, et al. Mid-infrared optical parametric oscillator synchronously pumped by an erbium-doped fiber laser. *Opt Express*, 2010, 18: 25379–25388
- 84 Neely T W, Johnson T A, Diddams S A. High-power broadband laser source tunable from 3.0  $\mu\text{m}$  to 4.4  $\mu\text{m}$  based on a femtosecond Yb: fiber oscillator. *Opt Lett*, 2011, 36: 4020–4022
- 85 Brida D, Manzoni C, Marangoni M, et al. Two-cycle light pulses in the near and mid-infrared by PPSLT-based optical parametric amplifiers. In: *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics, and Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference, Baltimore, 2009*. 1–2
- 86 Chu Y, Gan Z, Liang X, et al. High-energy large-aperture Ti:sapphire amplifier for 5 PW laser pulses. *Opt Lett*, 2015, 40: 5011–5014
- 87 Zhao K, Zhong H, Yuan P, et al. Generation of 120 GW mid-infrared pulses from a widely tunable noncollinear optical parametric amplifier. *Opt Lett*, 2013, 38: 2159–2161
- 88 Popmintchev T, Chen M-C, Popmintchev D, et al. Bright coherent ultrahigh harmonics in the keV X-ray regime from mid-infrared femtosecond lasers. *Science*, 2012, 336: 1287–1291
- 89 Quan W, Lin Z, Wu M, et al. Classical aspects in above-threshold ionization with a midinfrared strong laser field. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 093001
- 90 Franken P A, Hill A E, Peters C W, et al. Generation of optical harmonics. *Phys Rev Lett*, 1961, 7: 118–119
- 91 Cook D J, Hochstrasser R M. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air. *Opt Lett*, 2000, 25: 1210–1212
- 92 Xie X, Dai J, Zhang X C. Coherent control of THz wave generation in ambient air. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 075005
- 93 Cavaletto S M, Harman Z, Ott C, et al. Broadband high-resolution X-ray frequency combs. *Nature Photon*, 2014, 8: 520–523
- 94 Depresseux A, Oliva E, Gautier J, et al. Demonstration of a circularly polarized plasma-based soft-X-ray laser. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 083901
- 95 Tian C S, Shen Y R. Structure and charging of hydrophobic material/water interfaces studied by phase-sensitive sum-frequency vibrational spectroscopy. *Proc Natl Acad Sci*, 2009, 106: 15148–15153
- 96 Cheng J X, Book L D, Xie X S. Polarization coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy. *Opt Lett*, 2001, 26: 1341–1343
- 97 Sánchez E J, Novotny L, Xie X S. Near-field fluorescence microscopy based on two-photon excitation with metal tips. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 4014–4017
- 98 Johnson J C, Choi H-J, Knutsen K P, et al. Single gallium nitride nanowire lasers. *Nature Mater*, 2002, 1: 106–110
- 99 Klimov V I. Optical nonlinearities and ultrafast carrier dynamics in semiconductor nanocrystals. *J Phys Chem B*, 2000, 104: 6112–6123
- 100 Hendry E, Hale P J, Moger J, et al. Coherent nonlinear optical response of graphene. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 097401
- 101 Wang J, Hernandez Y, Lotya M, et al. Broadband nonlinear optical response of graphene dispersions. *Adv Mater*, 2009, 21: 2430–2435
- 102 Fu L, Kane C L, Mele E J. Topological insulators in three dimensions. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 106803
- 103 Chang C Z, Zhang J, Feng X, et al. Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator. *Science*, 2013, 340: 167–170
- 104 Tokura Y, Nagaosa N. Orbital physics in transition-metal oxides. *Science*, 2000, 288: 462–468

- 105 Zhang S, Genov D A, Wang Y, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 047401
- 106 Campagnola P J, Wei M D, Lewis A, et al. High-resolution nonlinear optical imaging of live cells by second harmonic generation. *Biophys J*, 1999, 77: 3341–3349
- 107 Kim H-H. Nonthermal plasma processing for air-pollution control: a historical review, current issues, and future prospects. *Plasma Process Poly*, 2004, 1: 91–110
- 108 Momma C, Chichkov B N, Nolte S, et al. Short-pulse laser ablation of solid targets. *Opt Commun*, 1996, 129: 134–142
- 109 Yanik M F, Cinar H, Cinar H N, et al. Neurosurgery: functional regeneration after laser axotomy. *Nature*, 2004, 432: 822
- 110 Barsch N, Korber K, Ostendorf A, et al. Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses. *Appl Phys A*, 2003, 77: 237–242
- 111 Nakata Y, Okada T, Maeda M. Fabrication of dot matrix, comb, and nanowire structures using laser ablation by interfered femtosecond laser beams. *Appl Phys Lett*, 2002, 81: 4239–4241
- 112 Küper S, Stuke M. Ablation of polytetrafluoroethylene (Teflon) with femtosecond UV excimer laser pulses. *Appl Phys Lett*, 1989, 54: 4–6
- 113 Küper S, Stuke M. Ablation of UV-transparent materials with femtosecond UV excimer laser pulses. *MRS Proc*, 1988, 129: 375
- 114 Davis K M, Miura K, Sugimoto N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser. *Opt Lett*, 1996, 21: 1729–1731
- 115 Glezer E N, Milosavljevic M, Huang L, et al. Three-dimensional optical storage inside transparent materials. *Opt Lett*, 1996, 21: 2023–2025
- 116 Watanabe W, Sowa S, Tamaki T, et al. Three-dimensional waveguides fabricated in poly(methyl methacrylate) by a femtosecond laser. *Jpn J Appl Phys*, 2006, 45: L765–L767
- 117 Hanada Y, Sugioka K, Midorikawa K. UV waveguides light fabricated in fluoropolymer CYTOP by femtosecond laser direct writing. *Opt Express*, 2010, 18: 446–450
- 118 Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices. *Nature*, 2001, 412: 697–698
- 119 Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Appl Phys A*, 1996, 63: 109–115
- 120 König K, Riemann I, Fritzsche W. Nanodissection of human chromosomes with near-infrared femtosecond laser pulses. *Opt Lett*, 2001, 26: 819–821
- 121 Guo S X, Bourgeois F, Chokshi T, et al. Femtosecond laser nanoaxotomy lab-on-a-chip for in vivo nerve regeneration studies. *Nat Methods*, 2008, 5: 531–533
- 122 Tirilapur U K, König K. Cell biology – targeted transfection by femtosecond laser. *Nature*, 2002, 418: 290–291
- 123 Juhasz T, Kastis G A, Suarez C, et al. Time-resolved observations of shock waves and cavitation bubbles generated by femtosecond laser pulses in corneal tissue and water. *Laser Surg Med*, 1996, 19: 23–31
- 124 Nakamura K, Sora Y, Yoshikawa H Y, et al. Femtosecond laser-induced crystallization of protein in gel medium. *Appl Surf Sci*, 2007, 253: 6425–6429
- 125 Kaji T, Ito S, Miyasaka H, et al. Nondestructive micropatterning of living animal cells using focused femtosecond laser-induced impulsive force. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 023904
- 126 Yamaguchi A, Hosokawa Y, Louit G, et al. Nanoparticle injection to single animal cells using femtosecond laser-induced impulsive force. *Appl Phys A*, 2008, 93: 39–43
- 127 Kuo Y E, Wu C C, Hosokawa Y, et al. Local stimulation of cultured myocyte cells by femtosecond laser-induced stress wave. *Appl Phys A*, 2010, 101: 597–600
- 128 Hosokawa Y, Takabayashi H, Miura S, et al. Nondestructive isolation of single cultured animal cells by femtosecond laser-induced shockwave. *Appl Phys A*, 2004, 79: 795–798
- 129 Dausinger F. Femtosecond pulses for medicine and production technology – overview of a German national project. *Proc SPIE*, 2002, 4426: 9–16
- 130 Bauer T, König J. Applications and perspectives of ultrashort pulsed lasers. *Tech Dig LPM2010*, 2010, 127

- 131 Tamaki T, Watanabe W, Itoh K. Laser micro-welding of transparent materials by a localized heat accumulation effect using a femtosecond fiber laser at 1558 nm. *Opt Express*, 2006, 14: 10460–10468
- 132 Udem M, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology. *Nature*, 2002, 416: 233–237
- 133 Hall J L. Optical frequency measurement: 40 years of technology revolutions. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2000, 6: 1136–1144
- 134 Thorpe M J, Moll K D, Jones R J, et al. Broadband cavity ringdown spectroscopy for sensitive and rapid molecular detection. *Science*, 2006, 311: 1595–1599
- 135 Bernhardt B, Ozawa A, Jacquet P, et al. Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy. *Nature Photon*, 2010, 4: 55–57
- 136 Bartels A, Diddams S A, Oates C W, et al. Femtosecond-laser-based synthesis of ultrastable microwave signals from optical frequency references. *Opt Lett*, 2005, 30: 667–669
- 137 Murphy M T, Udem T, Holzwarth R, et al. High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 380: 839–847
- 138 Gohle C, Udem T, Herrmann M, et al. A frequency comb in the extreme ultraviolet. *Nature*, 2005, 436: 234–237
- 139 Ideguchi T, Bernhardt B, Guelachvili G, et al. Raman-induced Kerr-effect dual-comb spectroscopy. *Opt Lett*, 2012, 37: 4498–4500
- 140 Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy. *Nat Commun*, 2014, 5: 3375
- 141 Ruehl A, Marcinkevicius A, Fermann M E, et al. 80 W, 120 fs Yb-fiber frequency comb. *Opt Lett*, 2010, 35: 3015–3017
- 142 Hartl I, Schibli T R, Marcinkevicius A, et al. Cavity-enhanced similariton Yb-fiber laser frequency comb:  $3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  peak intensity at 136 MHz. *Opt Lett*, 2007, 32: 2870–2872
- 143 Pupeza I, Holzberger S, Eidam T, et al. Compact high-repetition-rate source of coherent 100 eV radiation. *Nature Photon*, 2013, 7: 608–612
- 144 Chvykov V, Rousseau P, Reed S, et al. Generation of  $10^{11}$  contrast 50 TW laser pulses. *Opt Lett*, 2006, 31: 1456–1458
- 145 Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, et al. Generation and characterization of the highest laser intensities ( $10^{22} \text{ W/cm}^2$ ). *Opt Lett*, 2004, 29: 2837–2839

## Frontiers in ultrafast optics and ultra-intense laser technology

Ruxin LI\*, Ya CHENG, Yuxin LENG, Zhinan ZENG, Jinping YAO, Bin ZENG, Guihua LI, Zongxin ZHANG & Zhizhan XU

*State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

\*E-mail: ruxinli@mail.shcnc.ac.cn

**Abstract** Ultrafast optics and ultra-intense laser technology, which are important frontiers in the fields of optics and lasers, are expected to promote fundamental science discoveries and high-technology developments. In this paper, the current status and future trends of ultrafast optics and ultra-intense laser technology are introduced briefly, including the applications of ultrafast and ultra-intense lasers in particle acceleration, attosecond science, ultrafast nonlinear optics, micro/nano-fabrication, broadband optical frequency combs, etc. The future prospects and key techniques for generating ultra-intense and ultra-short laser pulses with higher performance are also described.

**Keywords** ultrafast lasers, ultra-intense laser, attosecond science, nonlinear optics



**Ruxin LI** is now serving as the director of the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (SIOM), Chinese Academy of Sciences (CAS), and the project leader of the Creative Research Groups of the Chinese National Science Foundation. He served as the director of the State Key Laboratory of High Field Laser Physics during 2005–2015, and as the project chief scientist of the National Key Basic Research Program (973 Program) during 2011–2015. His research interests are focused on ultra-intense and ultrafast lasers and their applications.