

超快科学研究进展及发展建议

雷冰莹¹, 张理奕^{1,2}, 林华^{1,2}, 付玉喜^{1,2*}, 赵卫^{1,2*}, 侯洵^{1*}

1. 中国科学院西安光学精密机械研究所阿秒科学与技术研究中心, 西安 710119

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 超快科学以超快光源和超快探测为主要研究手段, 通过对微观世界超快动力学过程的测量和操控, 实现对宏观物质的理解、应用和控制。作为当前国际科技最重要的前沿方向之一, 超快科学的发展将为众多学科提供重要的原始创新驱动动力, 其突破将助力解决关乎国家重大需求和人民生命健康相关的诸多重大问题。聚焦超快科学中的超快激光技术、超快测量技术及超快动力学的研究, 主要介绍了其发展现状、应用现状和发展前景, 分析了超快科学发展存在的问题, 提出了超快科学发展的具体建议, 即加强顶层设计, 促进产业化, 完善人才培养评价机制, 支持重大科技基础设施和国际大科学计划。

关键词 超快激光技术; 超快测量技术; 超快动力学; 超快应用; 大科学装置

微观世界构筑了万物基础, 了解微观世界的超快动力学过程, 是解释所有生物、化学、物理现象的关键。超快科学是多领域交叉融合的世界科技前沿方向之一, 也是当今科学研究中的重要基础。它以超快光源和超快测量为主要手段, 可对构成物质的原子、分子、电子等微观粒子进行超高时间和空间分辨率的测量和操控, 通过对微观过程演化机制和微观粒子超快动力学规律的掌握, 实现对宏观物质的理解、应用和调控。

自然物质世界的时间尺度跨越从 10^{18} s 的宇宙

年龄到 10^{-24} s 的核子运动特征周期, 微观尺度上超快动力学过程的累积与演化决定了物质的宏观特性^[1]。“超快”一词通常指以 ps (10^{-12} s) 及以下等级的时间尺度衡量的变化速度。微观粒子运动的特征时间大多处于此范围, 如图 1 所示。对于分子尺度上的运动, 单分子的振动和转动, 化学键的断裂和形成等对应的时间范围在 fs (10^{-15} s) 至 ps (10^{-12} s) 量级; 在原子、分子和固体体系中, 电子运动的时间尺度范围从几十 as (10^{-18} s) 至几十 fs。由于目前化学、生物、材料等学科的研究已深入到纳米、分子和

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12104501, 62175256, 92050107, 61690222); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2019JCW-03); 中国科学院重大科技基础设施预研项目 (J20-021-III)

作者简介: 雷冰莹, 特别研究助理, 研究方向为高功率激光技术, 电子信箱: leibingying2016@opt.ac.cn; 付玉喜 (通信作者), 研究员, 研究方向为阿秒科学与技术, 电子信箱: fuyuxi@opt.ac.cn; 赵卫 (通信作者), 研究员, 研究方向为超快光学, 电子信箱: weiz@opt.ac.cn; 侯洵 (通信作者), 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为瞬态光学与光电子学, 电子信箱: houxiun@opt.ac.cn

引用格式: 雷冰莹, 张理奕, 林华, 等. 超快科学研究进展及发展建议[J]. 科技导报, 2023, 41(10): 9-30; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.10.002

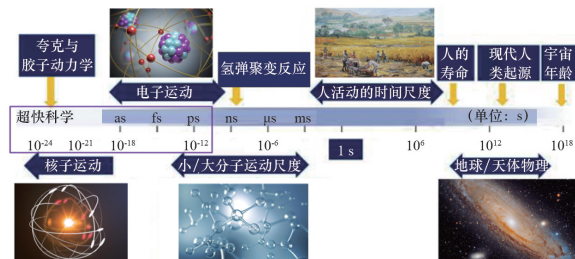


图1 自然物质世界的典型时间跨越尺度

原子尺度,涉及的绝大多数现象均为超快过程,需要信息的超快速获取手段才能研究,因而超快科学的渗透性与带动性更加突出。

超快科学是超快理论、技术和应用的总称,它帮助人类理解微观世界并加以开发利用。发展超快科学是人类不断突破认知和探索未知的强烈要求。它将推动前沿科学的进步,为基础学科重大原始创新提供机遇。在1995年的激光与光电子学会议(Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO)上,贝尔实验室的Wayne H. Knox在大会特邀报告中称“在今后世界上所有的研究工作及应用中,超快科学与技术将日益显得重要和不可或缺。相对而言,目前的超快技术发展速度还嫌太慢,必需加快步伐大力发展”^[2]。目前,超快科学领域已经获得了多项诺贝尔奖。作为当前国际科技最重要的前沿方向之一,超快科学为解决室温超导材料制造、超高速计算和信息传输、太阳能电池转换效率提升、癌症和神经退行性疾病治疗等关乎国家重大需求和人民生命健康的重大问题而涉及的最底层的共性科学问题提供了强大助力。

激光问世以来,依托锁模、啁啾脉冲放大和脉冲压缩技术已进入了ps、fs超快时代。鉴于其优异的空间和时间分辨率,超快激光技术已成为用于拓展人类认知的前沿基础科学研究最重要的工具之一,在某些方面甚至是独一无二和不可替代的研究手段,使人类探索未知领域及发现新的物理规律成为可能。面向世界科技前沿,超快激光能创造出前所未有的超高强场、超高温度和超高压力等极端物理条件,是推动高温等离子体物理、原子分子物理、粒子物理与核物理等学科发展的重要基础科学研

究工具。面向经济主战场,超快激光同时是推动集成电路、消费电子、航空航天、船舶海工、新能源汽车等国民经济支柱产业实现转型升级的利器,面向国家重大需求,超快激光是解决芯片、发动机、材料、数控机床等领域“卡脖子”问题的关键技术,为破解国家发展战略难题、发展世界领先科技提供新动力。面向人民生命健康,超快激光是激光质子刀、等离子体医学等精准医疗领域的核心技术,在基础研究和临床诊疗方面催生了众多新技术,促进先进医疗健康行业快速发展。超快科学基于超快理论,依托超快技术对目标材料中的微观粒子演化和运动规律进行观测和控制,揭示超快现象及其机制,从而实现超快应用,是信息学科、能源领域、材料学科、生物医学等多学科交叉的基础性、前沿性科学。

本研究综述超快科学的发展现状、前景及存在的问题,提出加强顶层设计和协作、实施重大项目与工程、打造世界超快科学交流中心的措施建议。

1 超快科学前沿

1.1 超快激光技术

超快激光作为超快科学的基本工具,兼具超短时间和超高峰值功率特性,为人类创造出了前所未有的超短时间、超高强场、超高温度和超高压力等极端物理条件,是推动基础科学实现重大突破、驱动战略性新兴产业发展的动力源泉^[3]。1964年,诺贝尔物理学奖授予Charles H. Townes、Nikolay G. Brarov和Aleksandr M. Prokhorov,以表彰他们促进了基于受激辐射的微波放大(microwave amplification by stimulated emission of radiation, MASER)和激光原理的激光振荡器及放大器的构建。自第1台激光器问世后,激光技术在生物、国防、工业各个领域巨大的应用前景有力地推动了其自身的发展,而脉冲激光主要向超短脉冲和高能量高峰值功率2个方向发展。

1966年,Demaria等^[4]采用调Q技术第1次获得了小于1 ns的脉冲,标志着激光技术进入皮秒领域。随后,锁模技术的出现使激光脉冲迅速缩短至

fs量级。Shank等^[5]在1974年采用被动锁模的方式在染料激光器中首次产生了小于1 ps的脉冲。1982年,美国贝尔实验室的Fork等^[6]采用碰撞脉冲锁模(colliding pulse mode-locking, CPM)技术并在染料激光器中获得90 fs激光脉冲。1986年中国科学院西安光学精密机械研究所(以下简称“中国科学院西安光机所”)陈国夫^[7]采用CPM技术将激光脉宽进一步缩短至19 fs,创造了当时染料激光器的国际纪录。尽管染料激光器可实现几fs的输出脉冲宽度,然而由于液体介质较低的饱和通量使染料激光器能量存储能力较差,加之维护过程复杂,导致其应用范围仍受限制^[8-9]。20世纪80年代中期,美国罗切斯特大学的Strickland等^[10]报道了啁啾脉冲放大(chirped pulse amplification, CPA)技术,揭开了超快激光向超强激光飞跃的序幕,也因此于2018年获得了诺贝尔物理学奖。几乎同时,另一个对当代激光物理和技术具有重要影响的发现在1986年出现。美国施瓦茨电光公司的Moulton^[11]和联邦德国汉堡大学的Albers等^[12]同时发现了一种宽带激光增益介质——钛宝石(Ti:Al₂O₃)。5年后,Spence等^[13]在钛宝石激光器中发现了克尔透镜锁模(Kerr-lens mode-locking, KLM)机制并获得了60 fs的激光脉冲,这一系列革命性的突破极大地推进了超快激光技术的发展。

钛宝石激光器的出现加之克尔透镜锁模技术和啁啾脉冲放大技术的发展,使人类真正步入超短超强脉冲时代。飞秒激光的单脉冲能量、峰值功率迅速提升至焦耳(J)、拍瓦(PW)量级,打开了超快超强激光在各个领域应用的大门。1991年,加州大学伯克利分校的Sullivan等^[14]用钛宝石振荡器和放大器在较低重复频率~10 Hz产生了脉宽95 fs、能量达450 mJ的激光脉冲。随后,美国密歇根大学、华盛顿州立大学、中国科学院西安光机所及中国科学院物理研究所(简称“中科院物理所”)等众多研究单位在高重频(~kHz)激光器中也相继获得了能量达毫焦量级的飞秒激光脉冲^[15-18]。为了避免增益窄化效应和热效应,借助光参量啁啾脉冲放大(optical parametric chirped pulse amplification, OPCPA)技术,飞秒激光系统可以进一步提升激光

脉冲峰值功率至几十拍瓦乃至更高量级,这也是产生光学周期量级超短脉冲的主要手段之一。目前,世界上已建成50多套拍瓦级激光装置^[19]。最近5年,欧盟提出的超强光基础设施(ELI)计划、法国Apollon激光装置、英国Vulcan激光装置、日本激光快速点燃实验项目(LFEX)装置等多个科研机构已实现了10 PW瓦级激光输出,多个国家近期提出了100~200 PW重大激光科学装置的发展计划。

近年来,中国在此方向取得了一些重要研究成果,部分成果已经处于国际领先水平。2015年,中国科学院上海光学精密机械研究所(以下简称“中科院上海光机所”)在国际上率先实现了5 PW的超强激光输出,并在2018年突破10 PW^[20-22];2017年,中国工程物理研究院基于大口径三硼酸锂(LBO)晶体和OPCPA技术路线获得了近5 PW超强激光输出^[23]。2012年,工作于日本理化学研究所的付玉喜获得了5 mJ/5 fs近红外超短飞秒激光脉冲,并且全自研锁定了其载波包络相位(carrier envelope phase, CEP),不稳定值约250 mrad,这是在国际上首次获得波形稳定的TW级(10¹² W)、高重频(kHz)、约2个周期宽度的超短激光脉冲。此外,付玉喜使用全新的双啁啾光参量放大(dual-chirped optical parametric amplification, DC-OPA)方法克服了传统光参量放大(optical parametric amplification, OPA)方法的能量瓶颈和增益窄化问题,在国际上首次实现了100 mJ、TW级超强的中红外波段飞秒光源,报道了当时超短中红外飞秒光源的能量及峰值功率最高结果^[24-26]。基于OPA、OPCPA、DC-OPA及频域光参量放大(frequency domain optical parametric amplification, FOPA)技术,图2^[27]给出自1994年以来的中红外脉冲的能量变化示意图,文献[27]对此展开了详细介绍。

另一方面,在追求更短激光脉宽的进程中,研究者发现单靠激光器腔内自相位调制和色散补偿获得的超短激光脉冲宽度逐渐接近极限(~5 fs),因此将目光转向腔外压缩。最早的突破是通过腔倒空激光注入光纤实现的。1998年,中科院西安光机所的程昭等^[28]在奥地利采用中空光纤和啁啾镜技术率先获得了4 fs的激光脉冲。2003年,瑞士

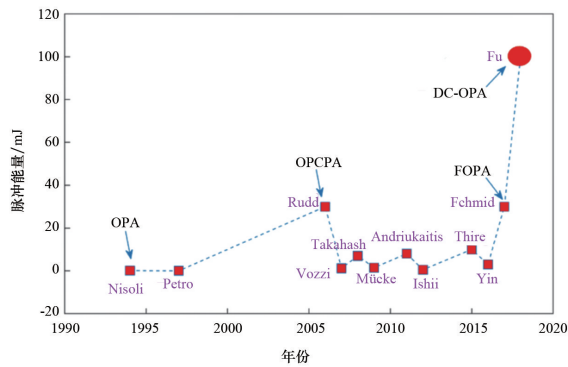


图2 自1994年以来基于OPA相关技术的
中红外脉冲能量变化

联邦理工学院的 Schenkel 等^[29]结合相干电场重构法测量技术(SPIDER)和空间相位调制器(SPM)使激光脉宽进一步缩短至 3.8 fs。随后,日本北海道大学的 Matsubara 等^[30]和德国汉堡大学的 Chia 等^[31]利用空芯光纤后压缩技术和光波合成技术,分别获得了 2.6 fs 和 1.9 fs 的超短脉冲。

随着超快激光技术的广泛应用,一系列基于超短激光脉冲的调控技术随之发展,如激光脉冲调频和整形技术。脉冲调频技术通常以半导体激光器、光纤激光器、半导体泵浦固体激光器作为调制光源,通过注入电流调制、外腔调制、声光调制、电光调制等调制方式实现不同调频带宽、调制速度和调制线性度的激光输出,以适用于不同的应用场景^[32-38]。激光脉冲整形作为控制激光脉冲波形的重要技术手段之一,其基本原理是对激光脉冲幅度、相位及偏振方向进行调制。根据脉冲整形技术和器件类型,可将整形技术分为被动式和主动式 2 种。被动式脉冲整形技术主要基于固定光学结构,包括光栅对、棱镜对、啁啾镜和这些元件的组合。主动式脉冲整形技术中具有代表性的方案是基于液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)、声光可编程色散滤波器(Acousto-opto Programmable Dispersive Filter, AOPDF)和机械式可变形镜(Deformable Mirror, DM)等器件的脉冲整形系统^[39-40]。目前,超快脉冲整形技术在分子动力学、低维纳米材料制备、生物医学及高速光通信等领域的应用日益广泛^[41-45]。

另一方面,随着最短激光脉冲的记录被不断刷新,当脉宽逐渐趋近于载波的振荡周期时,光电场波形对周期量级激光脉冲特性的影响不容忽视。此时,脉冲整形技术升级为激光脉冲光场整形技术,是当今超快激光研究最前沿的重要课题之一^[46]。激光脉冲光场整形技术从本源上丰富了操控光与物质相互作用的手段,标志着通过任意波形光场直接操控强场物理过程成为可能,不仅为分子超快动力学过程等前沿领域提供了更精密的操纵手段,也为高次谐波产生(High Harmonic Generation, HHG)提供了有效调控策略,从而为进一步探索、优化更短脉宽的激光源奠定了基础。

在可见光范围内,几 fs 的激光脉宽接近于一个光周期的根本脉宽极限,若要将超快激光推进至阿秒领域,则需在对应于极紫外甚至 X 射线波段的更高频率产生辐射。2001 年, Hentschel 等^[47]和 Paul 等^[48]采用飞秒激光与惰性气体的相互作用产生高次谐波,分别测得了百阿秒量级的阿秒脉冲串及孤立的阿秒脉冲,真正地在实验上突破飞秒尺度的界限,阿秒超快时代正式拉开序幕。

近年来,固体高次谐波、液体高次谐波和等离子体高次谐波的理论正在逐步完善,而气体高次谐波是目前应用最为广泛可靠的高次谐波产生方式,其机制可通过“三步模型”理论进行解释。在线偏振强激光的辐照下,原子或分子中的电子发生隧穿电离成为自由电子,这些离化后的电子离开母核后在激光场的影响下加速。之后,部分自由电子受反向激光场的作用被拉回并被母核重新俘获,释放高能光子。由于初始电离发生在激光电场最大值附近的短时间区域内,高能光子发射的持续时间是驱动激光光学周期内的一小部分,形成阿秒脉冲。根据“三步模型”可知,通过 HHG 获得的最大光子能量与驱动激光光强和波长成正比。因此,为了获得更短波长(高光子能量)和更高单脉冲能量(高通量)的阿秒脉冲,飞秒驱动光源主要向高功率和长波长 2 个方向发展。同时在阿秒脉冲应用领域的牵引下,高重频飞秒激光驱动技术也成为了阿秒光源的重要前沿内容^[27,49-50]。此外,由于孤立阿秒脉冲在超快测量等研究领域具有广阔的应用前景,为

产生高通量孤立阿秒脉冲, CEP 稳定的高强度周期量级驱动激光技术和阿秒脉冲选通技术也成为了十分关键的研究课题^[51]。

2002年,日本理化学研究所的Takahashi等^[52]利用松聚焦的TW级驱动激光在氙气中实现了高通量的HHG输出,在72.7 nm波长处能量达7 μJ ,转换效率高达 4×10^{-4} 。2009年,常增虎等^[53]通过8 fs、0.8 mJ、中心波长为790 nm的驱动激光实现了28~620 eV(波长2~45 nm)的XUV超连续谱。2006年,Sansone等^[54]利用CEP稳定的少周期驱动激光(~5 fs)产生了光子能量为36 eV,130 as的孤立脉冲。2008年,Goulielmakis等^[55]采用3.3 fs的驱动激光获得低于100 as的孤立脉冲,其光子能量达到了80 eV。Zhao等^[56]在2012年通过双光选通技术获得了中心光子能量90 eV(波长约14 nm),67 as的孤立脉冲。2017年,美国中佛罗里达大学的常增虎等^[57]及瑞士苏黎世联邦理工学院的Wörner等^[58]采用类似的驱动激光(中心波长~1.8 μm),分别产生了53、43 as的最短脉冲,打破了世界纪录。

国内阿秒激光的研究虽然总体起步较晚,但近些年进展很快,相关研究也进入了国际先进水平,以中科院西安光机所、中科院物理所和中科院上海光机所为核心的科研机构在阿秒脉冲激光研究方面承担了主要任务^[3]。2013年,中科院物理所魏志义等^[59]采用3.8 fs驱动激光实现了160 as的孤立阿秒脉冲,是国内测量到的首个阿秒脉冲结果。2019年,中科院西安光机所通过自主研发的高能量分辨阿秒条纹相机产生了159 as的孤立阿秒脉冲^[60],并在2021年产生了更短的75 as的阿秒光脉冲,刷新了国内的阿秒脉冲纪录。2020年,中国科学院西安光机所的付玉喜等^[61]利用氙气高次谐波实现了光子能量150~300 eV、能量高达10 nJ的软X射线阿秒脉冲,又利用氦气靶将光子能量进一步提升至380 eV,在水窗波段范围内能量约为3.5 nJ,比国际同类水平提升了100倍以上。国内高等院校也开展了阿秒激光的相关研究。华中科技大学^[62]和国防科技大学^[63]在2020年相继实现了272、88 as的孤立阿秒脉冲。自2004年以来,孤立阿秒脉冲在脉冲宽度尺度上的国内外发展现状如图3所示。

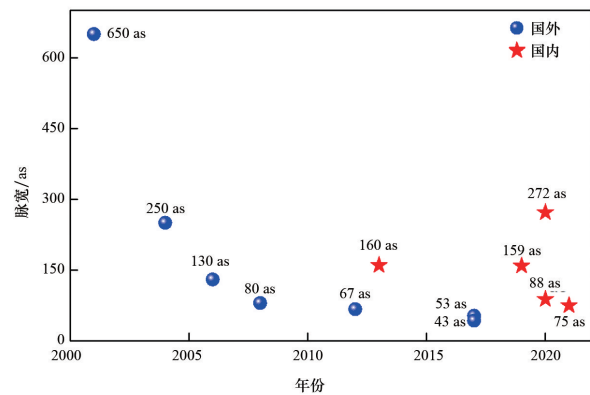


图3 孤立阿秒脉冲在脉冲宽度上的国内外发展现状

阿秒是目前人类能掌握的最短时间尺度。在国内外科研工作者的共同努力下,阿秒科学现已发展为一个活跃且成熟的研究领域,其最终目标是在各种形态(从原子、分子到凝聚态和等离子体)的物质中实时跟踪其内部的电子动态^[64]。这一目标的实现需要超快激光技术,超快测量技术,极紫外(XUV)光学元件,泵浦-探针测量技术等多个研究领域的共同进步。

近20年,随着超快科学的迅速发展,一批大科学装置,如欧盟“极端光设施阿秒光脉冲源(Extreme Light Infrastructure-Attosecond Light Pulse Source, ELI-ALPS)”、美国“直线加速器相干光源(linac coherent light source, LCLS)”等相继建成并推动着新一代阿秒光源的发展。中国对先进阿秒光源大科学设施也进行了布局。

1.2 超快测量技术

超快激光凭借其超短和超强特性为人类研究超快现象提供了强有力的手段,在物理学、化学、生物学、材料科学、医学及工业领域有广泛的应用。随着超快激光的应用领域日趋扩大,作为评价和应用超短脉冲的前提,超快测量技术和超短脉冲的产生技术具有同等重要的意义。对基础研究而言,必须精确知道脉冲在产生传输和变换过程中的特性,才能揭示超快过程中的物理机制。为了满足不同应用领域的需求,则需要针对性地选择不同特性的激光以达到应用目的。纵观超短激光脉冲测量技术的发展历史,其进步与超短激光脉冲产生技术的

发展是分不开的。因此研究超短激光脉冲测量技术,完整准确地了解脉冲的宽度、相位及形状信息,是超快科学研究中非常重要的内容。

对于皮秒量级分辨率的测量,可分为间接测量和直接测量2种类型。间接测量主要采用的是相关法,而直接测量,以高速示波器和高速条纹相机为代表。自1949年英国 Courtney-Pratt^[65]研制出 ns 时间分辨的条纹变像管,Bradley 等^[66]于1969年通过设置加速栅网减小了光电子的渡越时间弥散,将条纹相机的时间分辨率提高到 2 ps。中科院西安光机所是国内最早专注于研究高速摄影技术的单位,在时任所长龚祖同的领导下,1964年研制出了中国第1台单片克尔盒高速摄影机和每秒20万次高速摄影机,圆满完成了拍摄中国首次原子弹爆炸的任务。此后,龚祖同带领中科院西安光机所又陆续研制出间歇式高速摄影机、棱镜补偿式高速摄影机、等待型转镜高速摄影机、同步型高速摄影机,以及不同时间分辨率的转镜型扫描高速摄影机和小型电影经纬仪,为中国瞬态现象的研究和国防建设作出了重要贡献。自1964年起,龚祖同领导中科院西安光机所率先开展了以光电子学为基础的变像管高速摄影机的基础研究。这些研究成果为中国超快技术在世界上占有一席之地奠定了基础^[67]。1977年起,中科院西安光机所侯洵与牛憨笨先后参与、主持微微秒变像管技术、BWS-5K (Burrus Wavelet Systems-5K)变像管皮秒扫描相机以及软 X 射线皮秒变像管、红外条纹相机等研制工作,研制出具有皮秒级时间分辨率的扫描变像管及条纹相机,成功使中国瞬态现象研究的时间分辨率从 μs 提升至 ps,响应波段从红外覆盖至软 X 射线,一举进入超快科学领域,打破了“巴统禁运”,满足了重大国防军工的急需,同时使中国变像管超快诊断技术跻身世界前列,达到国际先进水平^[68-69]。在此基础上,侯洵主持开展了“八五”国家攀登计划项目——“飞秒激光技术与超快过程研究”,由此开始了中国涉及多个领域的超快科学研究。此外,牛憨笨在中科院西安光机所围绕变像管超快诊断技术还取得了诸多突破性成果,为国防建设及核聚变新能源研究做出了重要贡献。1999年,中科院西安光

机所的常增虎研制出时间分辨能力为 0.54 ps 的行波偏转短磁聚焦飞秒条纹相机^[70]。此外,国内其他科研院所,如深圳大学及中国工程物理研究院等也同时开展了超快诊断技术的研究并取得了一定的成果^[71-72]。2012年,中科院西安光机所承接了国家重大科研仪器项目——“高性能条纹相机”。面向国家重大需求,历经5年艰苦攻关,成功研制出多种类型的条纹相机,并且在关键性能指标上达到甚至超出了当时国际水平,建成了国内唯一集设计、生产、检测为一体的条纹相机研发基地,成功突破国外封锁,为国家大科学工程和基础前沿技术提供了核心技术保障^[67]。

自20世纪80年代中期,超短激光脉冲技术从 ps 进入 fs 领域,飞秒激光脉冲的测量目前主要采用的是间接测量法。鉴于干涉自相关测量法相比于强度自相关测量法不仅可以提供超短脉冲的宽度,还能给出脉冲的相位、脉冲的形状等信息,因此在飞秒脉冲测量中更为常用。目前,基于干涉自相关测量法发展起来的频率分辨光学开关法(Frequency-Resolved Optical Gating, FROG)和自参考光谱相位相干电场重构法(Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-Field Reconstruction, SPIDER)已逐渐成为评价飞秒脉冲的标准方法^[73-74]。FROG的基本方法是将待测脉冲经分束器分为2束,一束作为探测光,另一束作为光开关,并且让作为开关的光束引入一个时间延迟 τ ,然后再让2束光通过倍频晶体产生相互作用。经光谱仪进行光谱展开后,用 CCD 进行测量,得到相互作用后的光强随频率和时间延迟变化的空间图形,称为 FROG 图形。利用二维位相重建法的迭代运算即可从 FROG 图形中恢复脉冲的振幅和相位信息。根据光学开关的形成机制,FROG 有各种形式,主要包括偏振开关型 FROG (PG-FROG)、自衍射型 FROG (SD-FROG)、二次谐波型 FROG (SHG-FROG) 等^[75-77]。SPIDFR的基本方法是基于一种称作光谱剪裁相干的方法。它是将待测脉冲经分束器分为两束,其中一束通过一块色散介质展宽为啁啾脉冲,另一束经迈克尔逊干涉仪分为2个具有时间延迟 τ 的脉冲,然后再将它们聚焦到倍频晶体中进行

频率转换。由于两脉冲在时间上的走离,在和频之后它们的中心频率就出现了微小的差别,这个频率差称为光谱剪裁。和频后的脉冲对经过光谱仪记录下光谱相干的干涉条纹,再利用反演算法,就可得到入射脉冲的相关信息^[74]。随着飞秒激光技术的发展,飞秒脉冲的脉宽可达周期量级尺度,TIP-TOE (Tunneling Ionization with a Perturbation for the Time-Domain Observation of an Electric Field)技术的出现为精确测量周期量级脉冲的时域信息提供了一种全新的方案^[78]。

相比于产生阿秒脉冲,阿秒脉冲的测量是一项更大的挑战。由于阿秒脉冲的时间尺度比电子元件的响应时间小,且波长通常位于非线性晶体吸收效应显著的极紫外甚至X射线波段内,因此常规电学方法及部分传统飞秒脉冲测量手段已不再适用^[79]。目前,测量阿秒脉冲的方法可主要分为自相关和互相关测量法。2003年,德国的Tzallas等^[80]首次采用自相关方法在实验上测量到了 (780 ± 80) as的阿秒脉冲。然而,由于高次谐波的转换效率较低,阿秒脉冲的能量不足以产生非线性效应,互相关测量法逐渐走进人们的视线,并成为目前测量阿秒脉冲的主流方法^[51]。通过阿秒光电子谱技术,如双光子干涉的阿秒拍频重构(Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-photon Transitions, RABITT)测量法,激光辅助横向X射线光电离(laser-assisted lateral X-ray photoionization)法,及阿秒条纹相机(attosecond streak camera)等,可获得阿秒脉冲的时域信息。其中,RABITT测量法是目前阿秒脉冲串测量的主要方法之一,而阿秒条纹相机是测量孤立阿秒脉冲最为常用的设备^[79,81]。

值得一提的是,以上阿秒脉冲测量方法由于对脉冲的产生和测量是在不同位置进行的,因此又称为非原位测量(Ex-situ)法。相对地,对于阿秒脉冲的产生和测量在同一位置的测量方法,称为原位测量(In-situ)法^[63]。加拿大渥太华大学的Kim等^[82]和华中科技大学的Yang等^[63]先后通过全光学测量方法,在阿秒脉冲的产生处实现了其相位和脉宽的原位测量。然而,由于原位测量无法显示应用位置

处的阿秒脉冲信息,在后续应用领域仍然存在限制。2001年,维也纳技术大学的Scrini等^[83]首次提出阿秒互相关法(Attosecond Cross Correlation, ACC),并利用阿秒脉冲和强驱动激光脉冲在气体靶中发生互相关作用,通过测量与阿秒脉冲和驱动激光脉冲间延时相关的参数变化,从而确定阿秒脉冲的宽度。随后,加拿大的Bandrauk等^[84]提出了不对称光致电离方法(Asymmetric Photoionization Method),通过光电子数与不对称系数的线性关系成功反演出阿秒脉冲时域信息。此外,基于传统飞秒脉冲测量的FROG和SPIDER技术分别发展起来的阿秒光学频率分辨选通的阿秒脉冲完整重构方法(Frequency Resolved Optical Gating for Complete Reconstruction of Attosecond Bursts, FROG CRAB)和阿秒光谱剪切干涉法等,也被证明是测量阿秒脉冲信息的有效手段^[48,85-86]。2010年,常增虎等^[87]进一步提出了Omega振荡滤波相位反演(Phase Retrieval by Omega Oscillation Filtering, PROOF)重构方法,解决了FROG CRAB在中心能量近似时出现的重构偏差问题,可用于脉宽更短(能谱更宽)的阿秒脉冲重构(图4^[87])。

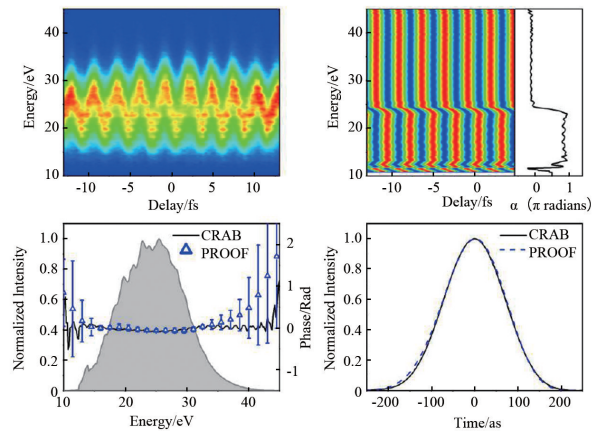


图4 利用PROOF技术反演获得的窄带阿秒脉冲

通过直接应用超短脉冲作为光源,除了以上超快测量技术,还形成了多种超快时间分辨光谱技术以及泵浦-探测技术,如时间分辨荧光光谱技术、瞬态吸收光谱技术、反射光谱法、超高时间分辨扫描探针显微技术、超快光导探针等^[2]。这些超快信

息获取技术,不仅促进了超短激光脉冲产生技术的发展,也极大地推动了人类对微观世界中超快过程的研究。

1.3 超快物理、化学与生物学

微观粒子的超快动力学过程涉及物理现象背后的驱动因素,对其进行深入研究可揭示多种重要的物理机制,同时为理清含混的物理事实提供重要的实验依据。早在激光发明之前,人们就已经将微观粒子的超快动力学研究视为重要的研究内容。20世纪中期,英国剑桥大学的George Porter利用强闪光灯引发化学反应,并通过探测中间产物和反应速度开展了超快化学反应的研究,随后与Manfred Eigen和Ronald George Wreyford Norrish共同获得了1967年的诺贝尔化学奖^[88]。激光技术出现后,超快激光脉冲为超快测量提供了有力的工具。在20世纪后期,科学家们通过皮秒激光技术对分子动力学过程进行了大量的研究,对超快过程的认知从微秒尺度进入了几个纳秒甚至皮秒量级^[89]。图5^[90]展示了“超快”时间范畴内微观粒子结构和动力学对应的空间和时间特征尺度。分子振动能量间隔在毫电子伏特量级,这意味着分子振动发生在几十至

几百飞秒的时间尺度^[90]。1999年,诺贝尔化学奖授予美国加州理工学院的科学家Ahmed Zewail,以表彰他在超快光谱和飞秒化学方面的开拓性工作。Zewail利用飞秒激光技术成功观测并控制了化学键的断裂和成键过程,这一系列开创性工作将超快科学的研究推进到飞秒尺度,并从根本上改变了人们对化学反应过程的认知,进而引发了整个化学及相关学科的重大变革^[91-93]。在超短脉冲激光技术出现后,美国科学家John L. Hall和Theodor W. Hänsch因提出激光精密光谱及光学频率梳技术的概念和方法,共同获得了2005年的诺贝尔物理学奖。20世纪60年代后期,美国贝尔实验室的Arthur Ashkin成功开展了激光操纵微粒的一系列研究工作,为光学镊子及其在生物系统的应用做出巨大贡献,并与Gérard Mourou和Donna Strickland共同获得了2018年诺贝尔物理学奖^[94]。随着激光技术的不断发展和完善,由超快激光脉冲引出的超快科学研究不仅在化学领域实现了重大突破,在物理、生物、材料、能源、制造、信息等领域也相继取得了重要成果。下文以超快激光诊断技术为主线,简要介绍在化学、物理、生物学3个方面的应用。

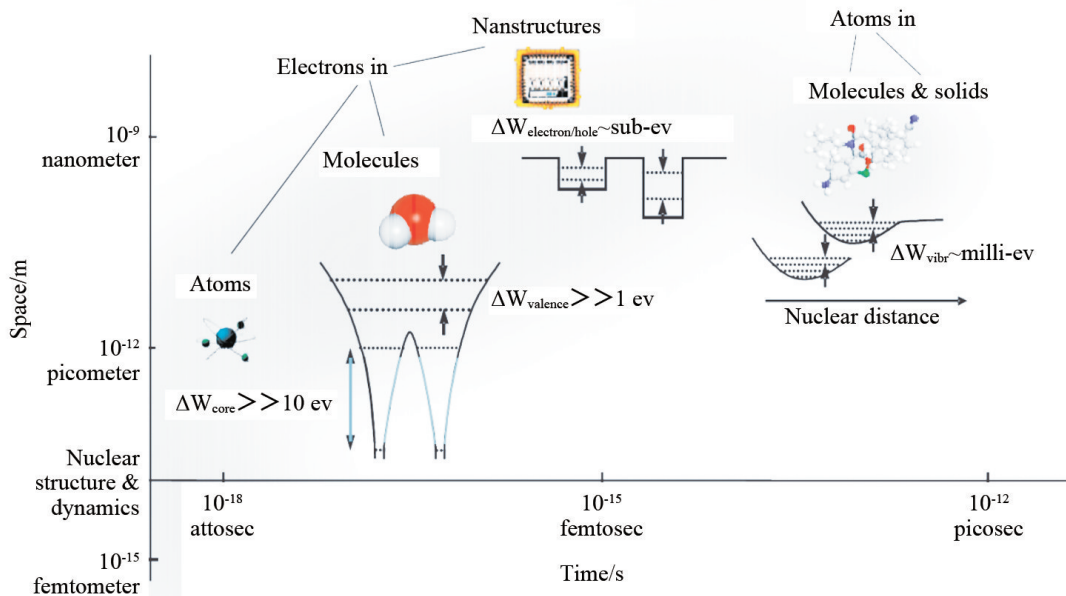


图5 微观世界中结构和动力学对应的特征长度和时间尺度

自皮秒激光器问世,拉曼光谱、共振吸收和荧光辐射等技术已成为检测分子动力学超快过程(包括液体中光的克尔效应、反应中间态寿命、双分子反应、分子之间的能量或电荷转移、分子的转动和振动、分子异构体转化等)的主要手段,其研究过程通常为 ns-ps 量级^[95]。随着超快激光技术的迅速发展,超快科学进入了飞秒时间尺度。在飞秒化学领域中,研究主要涉及化学反应中 ps-fs 量级的超快动力学过程,包括:分子解离、电子转移、质子传递、分子内部的弛豫过程、波包的运动、化学键的断裂和形成等。目前,利用飞秒激光光谱、质谱和衍射技术可以作为“高速摄影机”定格微观粒子的运动,直接观测化学反应中的分子动力学过程。除此之外,超快探测技术还包括四波混频(four-wave mixing, FWM)、光学克尔效应(optical Kerr effect, OKE)、泵浦-探测(pump-probe)、空间自相位调制(spatial self-phase modulation)、二次谐波产生(second harmonic generation, SHG)、吸收谱、太赫兹(terahertz, THz)光谱等多种形式^[96-97]。1980年,Zewail^[91]首次利用飞秒激光技术研究了氰化碘(ICN)解离过程,并测得光解反应的过渡态寿命为 200 fs。此外,他通过适当选择超短脉冲的持续时间、延迟和脉冲形状,实现了对化学反应过程的控制。随后,Tannor 等^[98]和 Shapiro 等^[99]分别于 1985 和 1986 年提出了相干激光脉冲序列和优化整形脉冲激光控制方案,并在实验上证明了飞秒激光控制化学反应的可行性。随着脉冲整形技术的进一步完善,通过引入闭合循环技术和优化算法,科研人员已在试验中成功实现了多种化学反应和化学产物的控制^[100]。进入 21 世纪后,量子优化控制理论的提出,使人们对飞秒激光脉冲控制分子重组问题的认识向前迈进了重要一步^[101-102]。另外,超快光谱采用泵浦-探测技术已广泛应用于凝聚态物理和材料科学领域,在半导体量子阱材料、高温超导、拓扑材料、关联量子材料、纳米结构、磁性材料、软物质等凝聚态物质的研究中取得了重要成果^[2,97,103-108]。2021 年,上海交通大学张文涛团队利用红外飞秒激光操控量子材料,在三维电荷密度波材料(1T-TiSe₂)中实现了瞬时二维长程有序电子态,并在所

形成的二维电子态中发现了光致超导现象^[109]。2022 年,上海交通大学的张杰和向导课题组^[110]利用自主研发的兆伏特超快电子衍射装置,结合相干衍射成像技术(coherent diffraction imaging, CDI)提出了一种可在不结晶的条件下实现单分子结构解析的方法,空间分辨率达 0.7 Å,为 fs 时间尺度和原子空间尺度上创建三维“分子电影”奠定了基础(图 6^[110])。

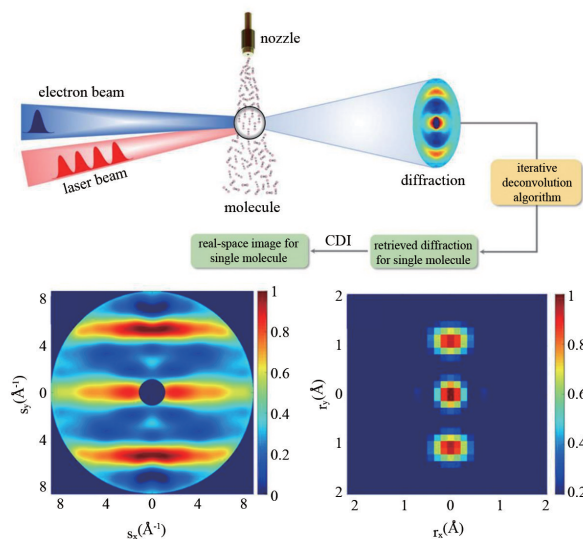


图6 相干衍射成像技术示意及基于 CDI 方法的分子结构重建结果
(单分子的反演衍射分布和重建后的分子结构)

此外,将超快激光与扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)技术相结合,也可以实现在纳米甚至亚纳米尺度上对微观粒子动力学的探测^[111-115]。2022 年,Luo 等^[116]基于 STM 采用尖端增强拉曼光谱(tip-enhanced Raman spectroscopy, TERS)技术,在亚纳米分辨率下追踪到了分子和低维材料的振动指纹信息。在生物领域中,飞秒激光技术的发展为研究生物体中的超快现象提供了可能,特别是研究光合作用的能量传递以及电荷分离过程,有助于人类有效利用太阳能、揭示自然界作用机制并提高农业产量^[117-118]。此外,对于人体视觉过程中视紫质中的光致异构化过程、DNA/RNA 中的能量转移过程等其他医学领域的研究,飞秒激光测量技术也起着十分重要的作用^[91,119]。

电子作为原子间相互作用和物质相应外界变化和的第一步,对微观过程的演化起着决定性的作用。通过将飞秒泵浦-探测技术与低温、强磁场、高压等极端条件相结合可进一步研究材料处于激发态的时间分辨超快动力学性质,并揭示物质外层电子的物性。然而,内层电子涉及深能级电子动力学研究,其特征时间不仅在更快的阿秒量级,还需要更大的光子能量激发^[105,120]。基于阿秒光源发展出的各种阿秒超快测量技术使人类深入研究内层电子的动力学行为成为可能,主要包括以阿秒条纹相机、阿秒双色双光子干涉和角分辨光电子能谱(angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES)为代表的阿秒光电子谱技术、阿秒离子谱技术以及阿秒光谱技术^[81]。其中,阿秒光谱技术中最具代表性的方法有阿秒瞬态吸收谱(attosecond transient absorption spectroscopy, ATAS)、阿秒瞬态混频谱法(attosecond wave-mixing spectroscopy, AWMS)、阿秒瞬态反射光谱法(attosecond transient reflectivity spectroscopy, ATRS)和高次谐波光谱法(high harmonic spectroscopy, HHS)等^[64]。2002年,维也纳技术大学的Drescher等^[121]首次应用阿秒脉冲研究了核电离Kr原子的俄歇衰变寿命,证明使用阿秒泵浦-探针技术可通过时域测量确定原子的性质,包括激发态寿命。随后,阿秒泵浦-探针方法也被用于探索在频域无法回答的问题,如强场体系中电离过程的物理本质,以及来自不同原子或分子轨道的单光子电离是否同步发生或存在相对延迟等^[122-124]。除此之外,通过阿秒超快测量技术也可让人们更好地理解量子力学^[125],以及研究内层电子的跃迁、超快弛豫、相互作用、对外层电子物性的影响、电子之间相互作用、电子隧穿势垒、多电子俄歇衰变等重要的基础科学问题^[90]。在化学领域中,鉴于阿秒脉冲具有高时间分辨和宽光谱特性,通过阿秒超快测量技术可以直接获得反应中电子和原子结构信息,从而完成化学反应过程的实时追踪,与此同时阿秒脉冲也可以和飞秒激光脉冲一样控制化学反应和改变化学产物。在生物学领域,阿秒超快测量技术可拓展至更复杂的生物分子应用中。2014年,Calegari等^[126]采用孤立阿秒脉冲促

进 α -氨基酸分子形成单价的分子离子,并观察到了二价离子碎片产率以 ~ 4 fs的超快振荡周期,对应于周期性的分子电荷转移过程。上述对多原子分子中超快电子动力学的观测和研究,标志着超快科学正逐渐在向越来越复杂的系统迈进。除此之外,水窗段的高通量阿秒X射线相干光源为生物活体清晰成像和癌症早期诊断提供了独特的技术手段,可从根本上揭示疾病发生的起因,在微观层面实现疾病的诊断和治疗^[1]。

高次谐波和阿秒脉冲的产生为人类打开了通往原子-亚原子超快世界的大门,使人们有可能研究更快的物理过程以及由内层电子决定的物性,这一前所未有的时间尺度影响了许多学科,并为各学科之间搭建起桥梁。近些年,国际上关于阿秒超快过程的实验研究稳步推进,而国内一众科研院所和高校,如中科院西安光机所、中科院物理所、中科院上海光机所、北京大学、华东师范大学、华中科技大学、中国原子能科学研究院、上海交通大学、国防科技大学等对于超快动力学的研究也在逐步开展,并取得了一系列重要成果^[110,127-134]。可以预见,随着高通量阿秒脉冲技术的发展,其波长覆盖范围将不断扩大,时间尺度有望从阿秒进一步缩短至zs(10^{-21} s),这将大幅拓展微观世界的研究范围,促进物理、化学、生物、材料等领域的快速发展^[135]。

2 超快科学应用

2.1 信息通信

激光技术的出现,促进了信号载体从电子向光电子转变,引领人类文明进入信息时代。目前,超快激光技术已应用于信息领域中传输、显示、信息处理、传感、探测、存储等诸多领域,对推动国家信息化、国防建设、航空航天、能源环境等民生及国家重大战略安全领域作出了巨大贡献,也为科学探索和科技创新提供了前所未有的手段和机遇^[136]。

低损耗光纤技术的出现直接推动了光纤通信技术的商业化应用,光纤通信的传输速度更快、能量损耗更小、激光调制速率更高,对通信性能的提高是颠覆性的,具有巨大的经济价值和无限的产业

前景。随着激光器性能的提升和波分、时分、码分等复用及相干通信等技术的发展,目前中国光纤通信已经突破一根普通光纤中速率 100 Tb/s,无中继数据传输 80 km。在光纤通信带宽的不断提升下,全球互联网环境建立,并成为如今发展最迅速的领域。无线激光通讯领域结合了无线电通信和光纤通信的优点,通信速率高、通信容量大、抗干扰能力强、抗截获能力强、重量轻和功耗低,在军事和民用领域均具有重大的战略需求与应用价值^[137]。2011年,哈尔滨工业大学开展了国内首次星地激光通信链路数据传输试验,下行最高速率为 504 Mb/s。2017年,搭载“实践十三号”高通量卫星的星地激光通信终端成功开展了世界上首次高轨卫星对地高速激光双向通信试验,在星地距离 40000 km 时,最高下行速率为 5 Gb/s。

在光信息存储方面,超快激光技术的发展颠覆了以往磁存储技术的容量概念,其数据存储寿命长且存储介质稳定,数据可保存 10 年以上。此外,光存储移动性好、能耗低、成本低,成为当今乃至未来应用最广、效率最高、容量最大的存储技术。面对大数据、云计算、物联网、人工智能的需求,超大容量光存储技术得到快速发展,容量已经超过太字节,并发展了体全息存储、近场光学存储和双光子双稳态存储等多种光存储技术。采用激光全息技术的全息存储,能实现三维图像存储,具有更大的存储容量^[138]。目前,随着各种信息爆炸式增长,日常需要处理的信息容量将以太字节计,信息流以 Tb/s 计。光存储正在突破衍射极限向超高密度信息存储方向发展,由二维到多维存储。新型大容量光存储技术研究及实用化发展迅速,蓝光存储技术已实现产业化并在不断扩大规模,双光束超分辨和玻璃存储技术进入工程化和产业化推进阶段,多波长多阶光存储和全息存储等技术已趋向成熟,而荧光纳米晶体存储、脱氧核糖核酸(DNA)存储技术及近场光存储等技术的研究也不断取得进展。随着激光器性能的提高和存储技术的进步,2019年单个光盘存储容量达 500 GB,未来有望突破 1 TB^[138]。

在光传感技术领域,激光雷达向高灵敏度、高信噪比、高分辨率和宽测量范围发展,其进步和应

用推广与激光器的技术发展息息相关。随着新兴的光纤激光器、量子级联激光器等技术的发展,激光器在波段拓展可调谐及线宽、能量、脉冲等技术指标上不断提高,也将促进激光雷达达到更高的测量精度和更好的实用性。

目前,光通信网络向超高速(ultra-high-speed)、超大容量(ultra-large-capacity)和超长距离(ultra-long-haul)的三超(3U)方向发展,预计至 2025 年可实现 100 Tb/s 超高速光纤通信系统,并于 2035 年全面实现通信前端的关键电子、光子和光电子器件集成应用,突破 1000 Tb/s 光纤高速信息传输^[139];在信息存储方面,预计在 2022 年左右与光存储相关的单项技术和系统集成技术将达到稳定,存储购买成本可达 1 美分/GB,预计到 2025 年可实现太字节量级的光盘存储器,到 2035 年突破拍字节量级的光盘存储系统^[140]。以上目标的实现有赖于光电子技术、超快激光技术、超快材料等各个领域的共同发展^[2]。

2.2 生物医学

超快激光技术的发展使激光诊疗技术在生命健康领域得到了越来越广泛的应用,成为现代医学精准诊疗的重要组成部分。随着激光技术以及相关测量诊断技术的不断完善,激光医学已初步发展成为一门体系较为完整且相对独立的新型交叉学科,在医学科学中起着越来越重要的作用。

在激光诊断技术方面,借助激光与物质的各种相互作用(散射、吸收等)可以测量生物组织的微观结构、生理作用、生化分子浓度分布等关键指标,从而获取生物组织的结构和功能信息,剖析疾病的发生发展过程。典型的激光成像技术,如光学相干断层成像(OCT)、激光荧光显微分析、光声成像、多光子显微成像、拉曼成像等非接触无标记成像诊断技术,已逐渐走向临床应用^[141-143]。时域 OCT(swept source-OCT, SS-OCT)作为代表性的光学诊断技术,以无损伤的近红外超快脉冲激光为光源,配合扫描仪器,能够通过反复扫描采集到所需的样品信息,可实时获得类似于组织病理的视网膜断层图像,广泛应用于眼科多种疾病的诊断。基于超快激光的双光子显微成像技术是观测生物微观结构与

功能的重要工具。由于近红外超快激光的辐射作用较弱,不易引起生物组织内水分子共振,且穿透生物组织能力较强,因此,红外超快激光与双光子激发相结合能极大程度地推动生物光子学基础研究,特别是在脑科学领域,该技术是观察和剖析大脑神经活动中复杂机制的关键手段。对神经细胞膜电位变化进行实时记录,有助于理解和掌握大脑神经元网络、神经回路活动机制和信息处理机制。

在激光治疗技术方面,超快激光作为“光刀”,因其与生物组织是“冷”作用,具有出血少、操作定位精确、非接触、无菌、对周围组织损伤小等优点,在临床中迅速得到广泛使用,成为激光医疗发展最快、最为成熟的分支^[107,144-145]。飞秒激光在透明生物组织中可以无衰减地传输到聚焦点,对周围组织热损伤小且切割精度高。与传统治疗手术和其他激光手术相比,飞秒激光手术具有更高的准确性、安全性和稳定性。相比于传统准分子激光技术,利用基于超快激光的视力矫正技术,医生可以在组织中准确定位需要创造的微切口,增加激光视力矫手术精度;同时,因其只需较低的脉冲能量,对周围组织产生的热损伤效应也较弱,因此应用于视力矫正具有更高的准确度、更轻的疼痛感、更佳的术后视觉效果,已成为治疗近视的主流方法^[144]。在牙齿治疗方面,采用飞秒激光可以获得干净整齐的孔道,避免了长脉冲激光造成的机械应力和热应力影响钙化与裂纹和粗糙的表面^[5,146]。鉴于飞秒激光无热损伤的特点,使超快激光技术在激光心肌血管重建术和激光血管成型术中具有重要意义。此外,超快激光是激光质子刀、等离子体医学等精准医疗的核心技术。相比于传统的质子加速技术,飞秒激光加速质子束具有尺寸小、脉冲短、亮度高、能谱宽等特点,可实现质子放疗装置的小型化、低成本和低能耗^[147]。近些年,超快激光技术在医疗美容行业也受到越来越多的关注,其微创/无创的特点、较弱的热灼烧感、较短的修复时间受到了更多爱美人士的青睐^[140,148]。

超快激光技术与生物医学领域的交叉结合,促进了现代医学诊疗技术的发展,改变了传统临床治疗和疾病诊断方式,在医疗应用和生命科学中显示

出了其强大应用潜力。随着化学和生物学等相关学科发展,各种生物探针和靶向标记技术得到快速发展,激光技术、材料学、纳米技术和生物技术的相互融合正在不断地为医学诊断和治疗带来新的发展空间^[144]。

2.3 加工制造

激光加工领域起始于20世纪六七十年代。主要采用红外和近红外波段输出的高功率激光系统(CO₂和Nd:YAG激光器),主流作业是金属加工。在这一阶段,激光加工是基于材料中的电子通过对光子共振线性吸获得的热能,将材料逐步熔化、蒸发驱除,从而实现打孔、切割、焊接、淬火和雕刻等多种加工形式。直到20世纪80年代,准分子激光器的登场使得利用短波长非金属材料,如聚合物和瓷器进行光刻、表面处理等微细加工成为可能。在这一技术中,材料通过线性吸收大能量的单个光子就可直接切断其中的分子或原子结合键,在表面生成等离子体,因此实质上属于光化学反应,而非热熔化过程,因此热扩散影响较小。另外,由于波长短,光束容易获得聚焦,因此加工精确度也得到了相应的提高,但它仍然受到光学系统衍射极限的限制。自20世纪80年代初宽带可调谐激光晶体和自锁模技术的出现,飞秒激光技术突飞猛进的发展,使人们看到了超快激光加工在超精密加工制造领域中强大的应用潜力。区别于长脉冲的“热加工”,飞秒激光脉冲凭借其较短的脉宽和较高的峰值功率,能够以极快的速度将其全部能量注入到很小的作用区域,使材料发生高度电离形成等离子体,避免了激光线性吸收、能量转移和扩散等的影响,使飞秒激光加工成为具有超高精度、超高空间分辨率和超高广泛性的非热熔“冷”处理过程,开创了激光加工的崭新领域^[145]。

在微细加工领域,采用超快激光技术可实现多种材料的精密加工,包括:钻孔、切割、表面处理和3D结构制作等。相比于传统纳秒、皮秒激光加工,飞秒激光脉冲可将微纳加工精度和速度提高1000倍以上。对于超高硬度材料(金刚石),瑞士的Dumitru等采用飞秒激光脉冲(150 fs@800 nm)对人造CVD(chemical vapor deposition)金刚石进行了钻

孔和切割处理,发现飞秒激光加工避免了热弛豫对样品造成的破坏,明显地消除了边缘炭化效应的存在,具有非常高的处理精度^[149]。这一工艺的提升极大推进了半导体激光技术的发展。此外,对于高爆炸危险物品,如:TNT(三硝基甲苯)、PETN(季戊四醇四硝酸酯,又称太安)、HMX(环四亚甲基四硝胺,又称奥克多宁)等通常由于对热应力和冲击波的敏感性使得其加工处理过程中的安全性受到重大挑战。超快激光技术(飞秒及以下尺度激光脉冲)由于作用过程快,范围小,因此几乎是加工此类危险材料的唯一手段。美国里弗莫尔实验室的Perry等^[150]采用100 fs激光脉冲(1 kHz)成功实现了对高爆炸危险品的安全切割。超快激光脉冲作为一种冷处理工具,给退役火箭、炮弹及其他武器系统的安全拆除带来了希望,在国防安全领域大有可为。此外,超快激光也可实现特殊材料的表面加工和内部结构修复,包括超导体、陶瓷、半导体等^[151-152]。

在微电子领域,光掩模和光刻技术作为芯片集成制造中的关键环节,是联络集成电路设计与制造的纽带。飞秒激光技术可实现对光掩模缺陷的高质量修复,同时不损伤衬底硅材料及其相邻的区域,为工业上生产亚100 nm线宽无缺陷光掩模提供了新的工具。近些年,电子束曝光技术作为普遍采用的新型光刻技术之一,具有波长短、焦深长、分辨率高等优点,然而受限于最小线宽、生产速度、工艺集成性等一系列劣势,使该技术很难用于光掩模的大规模生产。新加坡南洋理工大学的Venkatakrisnan等^[153]采用飞秒激光直接刻写技术实现了一种全新的光掩模制造技术,并在实验上获得1 μm的均匀线宽。同时,这种一步式刻写技术对于微电子器件制造领域也具有非常重要的意义^[154]。

此外,超快激光在透明材料内的传播过程中可产生非线性吸收、等离子体、烧蚀等现象,能实现高力学、光学性能焊接,在透明材料焊接领域具有重大应用价值。基于超快激光的双光子聚合技术能实现精度达100 nm的3D打印,在智能光学、生物传感、仿生器件等多个领域有着广泛的应用前景。

超快激光作为高端加工制造的核心技术,已广泛应用于精密制造、航空航天、微电子等领域。近

年来,随着激光技术的不断发展,激光器的性能也得到不断的改善:波长实现了从远红外到X射线的全波段调谐;输出功率已升至kW乃至PW量级;脉冲持续时间不断缩短,从ns、ps、fs,甚至as及未来的zs量级。面对超快激光精密加工的巨大潜力,国内外相继启动了应用于高端制造技术中的新型超快激光器研发计划。

随着相关理论的发展、实验的推进、技术的革新,超快科学逐步从实验室走向实际生产,在信息技术、生物医学、加工制造等多个领域都有日益广泛且深入的应用。超快科学不仅是当下各个应用领域推广的主流,同时也是未来发展的方向。

3 超快科学未来的发展趋势

3.1 引领产业化发展

当前,超快激光技术正朝着更高脉冲能量、更高平均功率、更窄脉冲宽度的目标发展。激光脉冲宽度将从as缩短至zs,光子能量将推进至硬X射线和伽马射线波段,平均功率将达到EW(10^{18})量级。超快探测技术向着兼具超高时间和空间分辨的方向稳步推进。以上目标的实现亟需基础理论、发光材料、光电子器件、工程技术等多维度创新。展望未来,超快科学可与物理、化学、生物、医学、材料、能源、电子、信息、制造、航空航天等多学科交叉,激发科技创新活力,有望孕育新的科技革命。

超快科学对高新技术产业有着重要的支撑和促进作用。除了超快科学直接催生的激光技术和超快测量技术,加工制造、信息技术、清洁能源、生物医药、新材料等下游产业对发展超快科学也提出了迫切需求,预期带动产值近万亿元人民币。同时,超快激光结合光信息和光分析技术,推动生命科学、环境科学、食品安全等领域的产业发展。这些产业的发展将反哺基础研究并孕育新型革命性技术。

以超快科学为科技创新的突破口,有望引领新一代产业变革和产业结构调整,实现中国在《十四五规划和2035年远景目标纲要》中战略部署的新一代信息技术、智能制造、航空航天、生命健康等领

域的进一步突破,引导并推动这些领域向规模化、高端化及自主化发展,抢占未来经济发展的先机。

3.2 解决底层重大科学问题

过去的60年中,超快科学不断深化其研究并扩展其应用范围,在物理、化学、信息、能源、材料、生物、环境等越来越多的领域表现出强大的生命力。由于时间和空间的高分辨能力,超快科学是实现微观过程动力学观测、操控、进而对相关学科从机制上进行解释的强大工具,是解决底层重大科学问题的重要手段。

2021年《Science》发布的“全世界最前沿的125个科学问题”中有十余个问题需要通过超快科学探索解决。例如,借助超快时间分辨测量技术,有望从根本上认识复杂激光场中的多体量子相互作用,为这一长期困扰科学界的基本物理问题提供新的思路;结合传统电子动量、能量与时间分辨测量,为研究量子材料提供全新途径;研究超导电子库珀对的形成中电子、晶格、自旋和轨道微观自由度在超快尺度上的相互作用,为最终理解高温超导机制提供直接依据;通过电荷转移激子解离动力学的研究推动新的太阳能转换策略,提高太阳能电池的光转换效率;在as的时间尺度上揭示生物分子之间的电荷转移过程,帮助人们从微观层次上深入了解生命过程的本质;利用超快激光测量光波驱动绝缘体中电子的运动,有望实现PHz开关,将现有的电路响应速度提高100000倍以上。

当前,随着超快科学研究方法和技术水平的逐步提升,国际上已经进入了超快科学研究成果的井喷期,在多个科学和应用研究领域涌现出了众多原始创新。中国应抓住这一重要关键时期,加速布局、发展超快科学。

3.3 依托大科学装置

由于超快科学重要的学术和战略意义,国际上已形成激烈的竞争态势。以美国、欧盟为首的发达国家和地区十分重视超快科学的发展,美国将超快科学相关技术列入21世纪的20项战略技术之一,日本将其列入6大核心技术之一,德国视之为优先发展技术。

大科学装置是最能体现国家科技实力和创

新潜力的集成,为了推动超快科学研究的发展,国际上在已建成的许多大科学装置上,如美国SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)和LCLS、日本SPring-8(The Super Photon ring-8 GeV)和SACLA(SPring-8 Angstrom Compact free-electron Laser)、德国DESY(Deutsches Elektronen-Synchrotron)及法国ESRF(European Synchrotron Radiation Facility)的同步辐射源和自由电子激光装置,都布局了超快科学研究。此外美国的BELLA(Berkeley Lab Laser Accelerator)和HERCULES(High Energy Density Sciences International Center)、日本的GEKKO-EXA和JAERI(Japan Atomic Energy Research Institute)、英国的VULCAN 10、法国APOLLON和X-LOA(X-ray Laser and Optics Laboratory)、德国的PLARIS-JENA等众多的拍瓦激光装置,更是与超快激光直接关联。特别是针对超快科学最前沿的阿秒激光的发展和應用,国际上直接开始了阿秒激光设施建设和竞争,由诺贝尔物理奖获得者Gérard Mourou等倡导,欧盟率先开展了欧洲极端光设施-阿秒光源(ELI-ALPS)的建设,并推动了欧洲相关激光公司的技术跨代升级。如全球制造技术引领者德国TRUMPF公司、欧洲第一大武器生产集团法国THALES公司、全球第一大激光器供应商美国COHERENT公司等均已经重点部署了超快激光业务。

中国在超快科学领域仍处于“追赶”状态,但与其他国家的标志性指标差距不大,在超快光源、飞秒激光精密加工等方面也有自己的独特优势。在更短和更强的激光方面,中国已突破了100 as超短脉冲激光研制,将超快过程的时间分辨测量能力提高到as的水平,从而可以跟踪测量电子动力学行为;超快激光也已突破10 PW的峰值功率,建成了SULF(Shanghai Ultrafast Laser Facility)、SEL(Station of Extreme Light)、神光等拍瓦激光设施。这些与北京高能同步辐射光源、合肥光源、上海光源、大连先进光源等同步辐射和自由电子激光设施一起,支撑了强场物理和极端条件研究的发展。其次,在超快诊断和超快动力学研究方面,开展了实时观察并控制原子、分子尺度和多种形态物质的微

观粒子运动及相互作用过程,为更进一步探索微观世界并揭示新现象和新机制提供了重要支撑。

4 超快科学发展的现有问题及思考

4.1 现有问题

超快科学是科学与技术高度融合相互促进的典范,是兼具广度和深度的学科,当前中国超快科学还存在若干重要问题亟待解决。

1) 学科发展顶层设计不足,导致研究无法形成巨大合力。

当前中国超快科学主要为自由探索式研究,科研力量较为分散,导致基础研究相对薄弱,核心技术自主研发不足,超快科学研究手段普及度不够,缺少学科之间的交叉融合,且同多个领域的产业结合不深入。迫切需要对学科发展和产业布局进行整体的规划和顶层设计,凝聚科研力量和资源。

2) 创新链-产业链不强,导致产业转化和自主能力缺乏。

中国超快科学的相关技术尚没有形成生态体系,且缺少具有国际影响力的产业技术平台和最优化资源整合,科研成果转化率不高。另外,中国高端装备市场占有率低,核心元器件自给率低,高性能激光光源、探测器、光学镀膜、高端超快动力学研究设备仍比较依赖于进口。

3) 高水平技术人才储备不足,导致可持续发展受限。

超快科学包含超快激光、超快测量和超快动力学研究,涵盖了超快物理、超快化学、超快激光、超快成像、超快光谱、超快诊断、超快材料等。中国从事相关研究的人才储备严重不足,尤其是持续从事该方向研究的高水平人员更是不足,与超快科学的发展要求不匹配。

4) 缺乏科学的评价机制,导致核心人才培养难。

超快科学领域重大成果产出需要足够的科研积累,且其必需的高端装备和器件研制周期长、技术难度大、难出成果。然而,传统评价周期短,缺少分类评价标准,导致科研人员愿意从事短平快项目

的研究,严重影响了部分科研人员的积极性和创造性,影响了超快科学研究的创新创效和科研转化。

4.2 思考与建议

1) 加强超快科学顶层设计,设立重大专项,推动多学科交叉融合。

建议“十四五”期间对超快科学发展进行战略研究部署,制定中国超快科学发展规划,加强国家对超快科学的布局、引导。针对超快动力学研究、高端装备研制、特殊光学镀膜、超精密激光制造等设立重大专项,例如科技部重点研发计划、自然科学基金重大项目、基础研究中心、交叉研究重点项目等;建立超快科学中心,为各学科领域提供波段全覆盖的皮秒至阿秒超快研究平台;组建超快科学全国性学术咨询和指导机构,成立超快科学学会;制定统一的超快行业技术标准,推动科学与技术的协作和多学科的交叉融合。

2) 构建超快科学政产学研用协同攻关体系。

充分调动政产学研用各方面优势力量,构建联合攻关体系。以国家重大科学问题和产业需求为牵引,实现基础研究促应用、应用牵引基础研究的双向驱动发展。发展关键器件和基础技术,以期摆脱对国外的依赖,实现自立自强。推动高时空分辨诊断仪器、超短脉冲激光等高端装备商品化,为各学科领域提供可靠、易使用和经济的研究工具,显著提升国产科研仪器的占有率。

3) 完善人才评价体系,推动超快科学关键人才培养。

深化人才发展体制改革,发扬大国工匠精神,实施更加有效的人才激励政策,吸引并鼓励科技人员潜心以十年磨一剑的决心和韧劲开展超快科学研究。包括对投身不同方向和层面的科研人员进行分类评价,以能力和贡献为导向建立科学评价指标,对作出突出贡献的人员应有所激励,充分调动和激发全体科研人员的积极性和创造性;依托人才项目长期持续培养从事基础理论、关键器件、高性能激光技术、高端装备研究及超快应用的人才;提高关键核心器件研制人员的待遇,推进中国高端装备自主化。

4) 持续支持重大科技基础设施的建设与运

行,实施国际大科学计划,打造世界超快科学交流中心。

建议持续支持超强超短激光、自由电子激光等国内已有超快科学研究设施投入,同时加快国内尚未有的以阿秒光源为代表的新型大科学设施的布局与建设,为源头性创新提供强大的研究平台。同时,针对中日韩、中欧、中美设立国际合作项目,实施国际大科学计划,打造世界超快科学交流中心,促进人员互访与联合人才培养,抢占超快科学国际话语权。

5 结论

超快科学已推动了物理、化学、材料、生物、信息、能源等多个学科的创新发展和突破,并将持续为这些学科提供重要的原始创新驱动力。“十四五”时期是中国加快布局、发展超快科学的关键时期。结合当前的国际形势,中国应把握住超快科学的重要发展机遇,突破基础科学、超快技术和相关产业发展的瓶颈,取得重大原始创新和关键技术突破,实现在该领域的“并跑”甚至“领跑”。

参考文献(References)

- [1] Xu X R, Zhong C L, Zhang Y, et al. Research progress of high-order harmonics and attosecond radiation driven by interaction between intense lasers and plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(8): 084206.
- [2] 侯洵. 超短脉冲激光及其应用[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2000, 1(1): 1-5.
- [3] Liu J, Zeng Z N, Liang X Y, et al. Development trend of ultrafast and ultraintense lasers and their scientific application[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2020, 22(3): 42.
- [4] Demaria A J, Stetser D A, Heynau H. Self mode-locking of lasers with saturable absorbers[J]. *Applied Physics Letters*, 1966, 8(7): 174-176.
- [5] Shank C V, Ippen E P. Subpicosecond kilowatt pulses from a mode-locked cw dye laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 24(8): 373-375.
- [6] Fork R L, Greene B I, Shank C V. Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode locking[J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 38(9): 10.1063/1.92500.
- [7] Chen G, Finch A, Sibbett W, et al. Generation and measurement of 19 femtosecond light pulses[C]//18th Intl Congress on High Speed Photography and Photonics. Bellingham: SPIE, 1989, doi: 10.1117/12.969140.
- [8] Fattahi H. Third-generation femtosecond technology[D]. Munich: Faculty of Physics, LMU München, 2015.
- [9] Knox W H, Downer M C, Fork R L, et al. Amplified femtosecond optical pulses and continuum generation at 5-kHz repetition rate[J]. *Optics Letters*, 1984, 9(12): 552-554.
- [10] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 56(3): 219-221.
- [11] Moulton P F. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃ [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, 3(1): 125.
- [12] Albers P, Stark E, Huber G. Continuous-wave laser operation and quantum efficiency of titanium-doped sapphire[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, 3(1): 134.
- [13] Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti: Sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(1): 42-44.
- [14] Sullivan A, Hamster H, Kapteyn H C, et al. Multiterawatt, 100-fs laser[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(18): 1406-1408.
- [15] Salin F, Vaillancourt G, Squier J, et al. Multikilohertz Ti:Al₂O₃ amplifier for high-power femtosecond pulses[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(24): 1964.
- [16] Rudd J V, Bado P, Korn G, et al. Chirped-pulse amplification of 55-fs pulses at a 1-kHz repetition rate in a Ti:Al₂O₃ regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(23): 2044.
- [17] Zhao S H, Wang Y S, Chen G F, et al. Amplification and compression of Ti: Sapphire femtosecond pulses at high-repetition-rate[J]. *Science in China Series A: Mathematics*, 1998, 41(1): 107-112.
- [18] Wei Z Y, Zhang J, Xia J F, et al. Highly efficient TW multipass Ti: Sapphire laser system[J]. *Science in China Series A: Mathematics*, 2000, 43(10): 1083-1087.
- [19] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7(3): 172-225.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Li W Q, Gan Z B, Yu L H, et al. 339 J high-energy Ti: sapphire chirped-pulse amplifier for 10 PW laser facility [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(22): 5681–5684.
- [23] 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.
- [24] Fu Y X, Midorikawa K, Takahashi E J. Towards a petawatt-class few-cycle infrared laser system via dual-chirped optical parametric amplification[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7692.
- [25] Fu Y X, Midorikawa K, Takahashi E J. Dual-chirped optical parametric amplification: A method for generating super-intense mid-infrared few-cycle pulses[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(4), doi: 10.1109/JSTQE.2019.2925720.
- [26] Fu Y X, Xue B, Midorikawa K, et al. TW-scale mid-infrared pulses near 3.3 μm directly generated by dual-chirped optical parametric amplification[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(24): 241105.
- [27] Yuan H, Cao H B, Wang H S, et al. Development and prospect on driving laser for attosecond pulse[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(8): 878–888.
- [28] Cheng Z, Tempea G, Brabec T, et al. Generation of intense diffraction-limited white light and 4-fs pulses[C]//CLEO/Europe Conference on Lasers and Electro-Optics. Piscataway: IEEE, 2003: 3.
- [29] Schenkel B, Biegert J, Keller U, et al. Generation of 3.8-fs pulses from adaptive compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1987–1989.
- [30] Matsubara E, Yamane K, Sekikawa T, et al. Generation of 26 fs optical pulses using induced-phase modulation in a gas-filled hollow fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(4): 985.[LinkOut]
- [31] Chia S H, Cirimi G, Fang S B, et al. Two-octave-spanning dispersion-controlled precision optics for sub-optical-cycle waveform synthesizers[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 315.
- [32] Ma W Z, Wang T S, Zhang P, et al. Widely tunable multiwavelength thulium-doped fiber laser using a fiber interferometer and a tunable spatial mode-beating filter[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3786.
- [33] Wang L, Wan M G, Shen Z K, et al. Wavelength-swept fiber laser based on bidirectional used linear chirped fiber Bragg grating[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(3): 219.
- [34] Sun X J, Wei J, Wang W Z, et al. Realization of a continuous frequency-tuning Ti: Sapphire laser with an intracavity locked etalon[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(7): 71401–71404.
- [35] Zhang R J, Yu B L, Cao Z G, et al. Frequency modulated and polarization maintaining fiber laser with narrow linewidth[J]. *Optics Communications*, 2007, 274(2): 392–395.
- [36] Zheng Y, Lu H, Li Y, et al. Broadband and rapid tuning of an all-solid-state single-frequency Nd: YVO₄ laser [J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3): 485–488.
- [37] Wei F, Lu B, Cao Y L, et al. Narrow-linewidth laser source with precision frequency tunability for distributed optical sensing applications[C]//International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24). Bellingham: SPIE, 2015, 9634: 916–919.
- [38] Shin D K, Henson B M, Khakimov R I, et al. Widely tunable, narrow linewidth external-cavity gain chip laser for spectroscopy between 10–11 μm [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27403–27414.
- [39] 邹华, 周常河. 飞秒脉冲时空变换整形技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(2): 2–7.
- [40] Yao Y H, Lu C H, Xu S W, et al. Femtosecond pulse shaping technology and its applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184201.
- [41] 田梦瑶, 左佩, 梁密生, 等. 飞秒激光加工低维纳米材料及应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 38–58.
- [42] 杜海伟, 许晨. 缓慢上升快速下降的飞秒激光脉冲与气体等离子体作用的太赫兹辐射产生研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(5): 174–181.
- [43] Judson R S, Rabitz H. Teaching lasers to control molecules[J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(10): 1500–1503.
- [44] Brixner T, Strehle M, Gerber G. Feedback-controlled optimization of amplified femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics B*, 1999, 68(2): 281–284.
- [45] Efimov A, Moores M D, Beach N M, et al. Adaptive control of pulse phase in a chirped-pulse amplifier[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(24): 1915–1917.
- [46] 杨煜东, 魏志义. 亚周期激光脉冲光场整形研究[J]. 光

- 子学报, 2022, 51(1): 163–173.
- [47] Hentschel M, Kienberger R, Spielmann C, et al. Attosecond metrology[J]. *Nature*, 2001, 414(6863): 509–513.
- [48] Paul P M, Toma E S, Breger P, et al. Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation [J]. *Science*, 2001, 292(5522): 1689–1692.
- [49] 魏志义, 钟诗阳, 贺新奎, 等. 阿秒光学进展及发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48(5): 9–24.
- [50] Furch F J, Witting T, Osolodkov M, et al. High power, high repetition rate laser-based sources for attosecond science[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2022, 4(3): 032001.
- [51] Wei Z Y, Xu S Y, Jiang Y J, et al. Principle and progress of attosecond pulse generation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(8): 889–901.
- [52] Takahashi E, Nabekawa Y, Midorikawa K. Generation of 10- μ J coherent extreme-ultraviolet light by use of high-order harmonics[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(21): 1920.
- [53] Mashiko H, Gilbertson S, Chini M, et al. Extreme ultraviolet supercontinua supporting pulse durations of less than one atomic unit of time[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3337–3339.
- [54] Sansone G, Benedetti E, Calegari F, et al. Isolated single-cycle attosecond pulses[J]. *Science*, 2006, 314(5798): 443–446.
- [55] Goulielmakis E, Schultze M, Hofstetter M, et al. Single-cycle nonlinear optics[J]. *Science*, 2008, 320(5883): 1614–1617.
- [56] Zhao K, Zhang Q, Chini M, et al. Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3891–3893.
- [57] Li J, Ren X M, Yin Y C, et al. 53-attosecond X-ray pulses reach the carbon K-edge[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 186.
- [58] Gaumnitz T, Jain A, Pertot Y, et al. Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27506–27518.
- [59] Zhan M J, Ye P, Teng H, et al. Generation and measurement of isolated 160-attosecond XUV laser pulses at 82 eV[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(9): 093201.
- [60] 王向林, 徐鹏, 李捷, 等. 利用自研阿秒条纹相机测得 159as 孤立阿秒脉冲[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 329–332.
- [61] Fu Y X, Nishimura K, Shao R Z, et al. High efficiency ultrafast water-window harmonic generation for single-shot soft X-ray spectroscopy[J]. *Communications Physics*, 2020, 3(1): 92.
- [62] Wang X, Wang L, Xiao F, et al. Generation of 88 as isolated attosecond pulses with double optical gating[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(2): 023201.
- [63] Yang Z, Cao W, Chen X, et al. All-optical frequency-resolved optical gating for isolated attosecond pulse reconstruction[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 567.
- [64] Biegert J, Calegari F, Dudovich N, et al. Attosecond technology(ies) and science[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2021, 54(7): 070201.
- [65] Courtney-Pratt J S. A new method for the photographic study of fast transient phenomena[J]. *Research; A Journal of Science and Its Applications*, 1949, 2(6): 287–294.
- [66] Bradley D J, Liddy B, Sleat W E. Direct linear measurement of ultrashort light pulses with a picosecond streak camera[J]. *Optics Communications*, 1971, 2(8): 391–395.
- [67] Zhao W, Hou X, Tian J S. Historical development and application of ultra fast diagnosis based on image tube in XIOPM[C]//27th International congress on High-Speed Photography and Photonics. Bellingham: SPIE, 6279: 67–83.
- [68] Niu H, Wang S C, Chao J L, et al. A picosecond synchroscan streak camera system[C]//18th Intl Congress on High Speed Photography and Photonics. Bellingham: SPIE, 1989: 58.
- [69] Niu H. Experimental study of femtosecond streak image tube[C]//Dewey J M, Racca R G. 20th International Congress on High Speed Photography and Photonics. Bellingham: SPIE, 1993: 1035–1041.
- [70] Chang Z, Rundquist A, Wang H, et al. Demonstration of a 0.54-ps X-ray streak camera[C]//22nd International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Bellingham: SPIE, 1997: 971–976.
- [71] 廖华, 胡昕, 杨勤劳, 等. 宽量程高时间分辨扫描变像管[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(1): 79–82.
- [72] 宗方轲, 雷保国, 顾礼, 等. 应用于高速条纹相机的行波偏转器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 321–327.
- [73] Kane D J, Trebino R. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency-resolved optical gating [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(2): 571–579.
- [74] Iaconis C, Walmsley I A. Spectral phase interferometry

- for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(10): 792.
- [75] DeLong K W, Trebino R, Kane D J. Comparison of ultrashort-pulse frequency-resolved-optical-gating traces for three common beam geometries[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1994, 11(9): 1595.
- [76] Kane D J, Trebino R. Single-shot measurement of the intensity and phase of an arbitrary ultrashort pulse by using frequency-resolved optical gating[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(10): 823–825.
- [77] DeLong K W, Trebino R. Improved ultrashort pulse-retrieval algorithm for frequency-resolved optical gating[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(9): 2429.
- [78] Park S B, Kim K, Cho W, et al. Direct sampling of a light wave in air[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 402.
- [79] 王虎山, 曹华保, 皮良文, 等. 阿秒脉冲产生和测量技术研究进展[J]. *光子学报*, 2021, 50(1): 9–33.
- [80] Tzallas P, Charalambidis D, Papadogiannis N A, et al. Direct observation of attosecond light bunching[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 267–271.
- [81] 曹伟, 陆培祥. 基于高次谐波阿秒光源的超快测量技术[J]. *光子学报*, 2021, 50(8): 49–66.
- [82] Kim K T, Zhang C, Shiner A D, et al. Manipulation of quantum paths for space-time characterization of attosecond pulses[J]. *Nature Physics*, 2013, 9(3): 159–163.
- [83] Scrinzi A, Geissler M, Brabec T. Attosecond cross correlation technique[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(3): 412–415.
- [84] Bandrauk A D, Chelkowski S, Shon N H. How to measure the duration of subfemtosecond xuv laser pulses using asymmetric photoionization[J]. *Physical Review A*, 2003, 68(4): 041802.
- [85] Muller H G. Reconstruction of attosecond harmonic beating by interference of two-photon transitions[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(1): s17–s21.
- [86] Mairesse Y, Quéré F. Frequency-resolved optical gating for complete reconstruction of attosecond bursts[J]. *Physical Review A*, 2005, 71(1): 011401.
- [87] Chini M, Gilbertson S, Khan S D, et al. Characterizing ultrabroadband attosecond lasers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 13006–13016.
- [88] Porter G N. Flash photolysis and spectroscopy: A new method for the study of free radical reactions[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1950, 200(1061): 284–300.
- [89] Shelton J, Armstrong J. Measurement of the relaxation time of the Eastman 9740 bleachable dye[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1967, 3(12): 696–697.
- [90] Krausz F, Ivanov M. Attosecond physics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(1): 163–234.
- [91] Zewail A H. Femtochemistry: Atomic-scale dynamics of the chemical bond[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2000, 104(24): 5660–5694.
- [92] Scherer N F, Knee J L, Smith D D, et al. Femtosecond photofragment spectroscopy: The reaction $\text{ICN} \rightarrow \text{CN} + \text{I}$ [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1985, 89(24): 5141–5143.
- [93] Rosker M J, Dantus M, Zewail A H. Femtosecond real-time probing of reactions. I. The technique[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1988, 89(10): 6113–6127.
- [94] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 288.
- [95] Zhao K. Laser, chirped pulse amplification, ultrafast optics, and Nobel Prize in Physics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(14): 1433–1440.
- [96] 赵继民. 超快光谱技术及其在凝聚态物理研究中的应用[J]. *物理*, 2011, 40(3): 184–193.
- [97] Wu Q, Tian Y, Wu Y, et al. Ultrafast optical spectroscopy of high-temperature superconductors[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(34): 3995–4009.
- [98] Tannor D J, Rice S A. Control of selectivity of chemical reaction via control of wave packet evolution[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1985, 83(10): 5013–5018.
- [99] Shapiro M, Brumer P. The equivalence of unimolecular decay product yields in pulsed and cw laser excitation [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1986, 84(1): 540–541.
- [100] Wiseman H M. Feedback in open quantum systems[J]. *Modern Physics Letters B*, 1995, 09(11n12): 629–654.
- [101] Werschnik J, Gross E K U. Quantum optimal control theory[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2007, 40(18): R175–R211.
- [102] Guo H, Liu K. Control of chemical reactivity by transition-state and beyond[J]. *Chemical Science*, 2016, 7(7): 3992–4003.
- [103] Tian Y C, Zhang W H, Li F S, et al. Ultrafast dynamics evidence of high temperature superconductivity in single unit cell FeSe on SrTiO_3 [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(10): 107001.
- [104] Sun F, Wu Q, Wu Y L, et al. Coherent helix vacancy

- phonon and its ultrafast dynamics waning in topological Dirac semimetal Cd_3As_2 [J]. *Physical Review B*, 2017, 95(23): 235108.
- [105] Wu Q, Sun F, Zhang Q Y, et al. Quasiparticle dynamics and electron-phonon coupling in Weyl semimetal TaAs[J]. *Physical Review Materials*, 2020, 4(6): 064201.
- [106] Wu Y L, Yin X, Hasaeni J, et al. High-pressure ultrafast dynamics in Sr_2IrO_4 : Pressure-induced phonon bottleneck effect[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(4): 047801.
- [107] Hu L L, Yang M, Wu Y L, et al. Strong pseudospin-lattice coupling in $\text{Sr}_3\text{Ir}_2\text{O}_7$: Coherent phonon anomaly and negative thermal expansion[J]. *Physical Review B*, 2019, 99(9): 094307.
- [108] Zhao J M, Bragas A V, Lockwood D J, et al. Magnon squeezing in an antiferromagnet: Reducing the spin noise below the standard quantum limit[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(10): 107203.
- [109] Duan S F, Cheng Y, Xia W, et al. Optical manipulation of electronic dimensionality in a quantum material[J]. *Nature*, 2021, 595(7866): 239-244.
- [110] Ma Z R, Zou X, Zhao L R, et al. Ultrafast isolated molecule imaging without crystallization[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(15): e2122793119.
- [111] Gutzler R, Garg M, Ast C R, et al. Light-matter interaction at atomic scales[J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3(6): 441-453.
- [112] Nunes G Jr, Freeman M R. Picosecond resolution in scanning tunneling microscopy[J]. *Science*, 1993, 262(5136): 1029-1032.
- [113] Terada Y, Yoshida S, Takeuchi O, et al. Real-space imaging of transient carrier dynamics by nanoscale pump-probe microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(12): 869-874.
- [114] Cocker T L, Jelic V, Gupta M, et al. An ultrafast terahertz scanning tunnelling microscope[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(8): 620-625.
- [115] Cocker T L, Peller D, Yu P, et al. Tracking the ultrafast motion of a single molecule by femtosecond orbital imaging[J]. *Nature*, 2016, 539(7628): 263-267.
- [116] Luo Y, Martin-Jimenez A, Gutzler R, et al. Ultrashort pulse excited tip-enhanced Raman spectroscopy in molecules[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(13): 5100-5106.
- [117] Van Oijen A M, Ketelaars M, Köhler J, et al. Unraveling the electronic structure of individual photosynthetic pigment-protein complexes[J]. *Science*, 1999, 285(5426): 400-402.
- [118] Van Brederode M E, Jones M R, Van Mourik F, et al. A new pathway for transmembrane electron transfer in photosynthetic reaction centers of *rhodospirillum rubrum* not involving the excited special pair[J]. *Biochemistry*, 1997, 36(23): 6855-6861.
- [119] Douhal A, Santamaria J. *Femtochemistry and femtobiology: Ultrafast dynamics in molecular science*[M]. River Edge: World Scientific, 2002.
- [120] Hao W, Zhai Y, Zhang Q, et al. Attosecond light source in material science investigation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(8): 856-864.
- [121] Drescher M, Hentschel M, Kienberger R, et al. Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy[J]. *Nature*, 2002, 419(6909): 803-807.
- [122] Uiberacker M, Uphues Th, Schultze M, et al. Attosecond real-time observation of electron tunnelling in atoms[J]. *Nature*, 2007, 446(7136): 627-632.
- [123] Schultze M, Fiess M, Karpowicz N, et al. Delay in photoemission[J]. *Science*, 2010, 328(5986): 1658-1662.
- [124] Klünder K, Dahlström J M, Gisselbrecht M, et al. Probing single-photon ionization on the attosecond time scale[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(14): 143002.
- [125] Maquet A, Caillat J, Taïeb R. Attosecond delays in photoionization: time and quantum mechanics[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2014, 47(20): 204004.
- [126] Calegari F, Ayuso D, Trabattoni A, et al. Ultrafast electron dynamics in phenylalanine initiated by attosecond pulses[J]. *Science*, 2014, 346(6207): 336-339.
- [127] Lakhota H, Kim H Y, Zhan M, et al. Laser picoscopy of valence electrons in solids[J]. *Nature*, 2020, 583(7814): 55-59.
- [128] Xu H Y, Cao W, Zhang J, et al. Mapping time-dependent quasi-energies of laser dressed helium[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 11342-11352.
- [129] Mi K, Cao W, Xu H Y, et al. Perturbed ac stark effect for attosecond optical-waveform sampling[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(1): 014032.
- [130] Zhang S J, Wang Z X, Xiang H, et al. Photoinduced nonequilibrium response in underdoped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ probed by time-resolved terahertz spectroscopy[J]. *Physical Review X*, 2020, 10(1): 011056.

- [131] Xu X R, Qiao B, Yu T P, et al. The effect of target thickness on the efficiency of high-order harmonics generated from laser-driven overdense plasma target [J]. *New Journal of Physics*, 2019, 21(10): 103013.
- [132] Cheng Y, Zong A, Li J, et al. Light-induced dimension crossover dictated by excitonic correlations[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 963.
- [133] Lv C, Zhao B Z, Wan F, et al. Effect of the electron heating transition on the proton acceleration in a strongly magnetized plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(10): 103101.
- [134] Liu C D, Jia Z M, Zheng Y H, et al. Research progress of the control and measurement of the atomic and molecular ultrafast electron dynamics using two-color field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(22): 223206.
- [135] Leone S R, Mccurdy C W, Burgdörfer J, et al. What will it take to observe processes in 'real time'? [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(3): 162-166.
- [136] Wang T S. Development trend of laser technology application in the information field toward 2035[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2020, 22(3): 7.
- [137] 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. *飞行器测控学报*, 2015, 34(3): 207-217.
- [138] 金国藩, 张培琨. 超高密度光存储技术的现状和今后的发展[J]. *中国计量学院学报*, 2001, 12(2): 6-12.
- [139] 余少华, 杨奇, 薛道均, 等. “三超”光传输关键技术研究[J]. *光通信研究*, 2014(6): 1-6, 10.
- [140] 苏文静, 胡巧, 赵苗, 等. 光存储技术发展现状及展望[J]. *光电工程*, 2019, 46(3): 4-10.
- [141] Swanson E A, Fujimoto J G. The ecosystem that powered the translation of OCT from fundamental research to clinical and commercial impact [Invited][J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(3): 1638-1664.
- [142] Orringer D A, Pandian B, Niknafs Y S, et al. Rapid intraoperative histology of unprocessed surgical specimens via fibre-laser-based stimulated Raman scattering microscopy[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2017, 1(2): 0027.
- [143] Lin L, Hu P, Shi J H, et al. Single-breath-hold photoacoustic computed tomography of the breast[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2352.
- [144] Qiu H X, Li B H, Ma H, et al. Medical application and industrial development strategy of laser technology in China[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2020, 22(3): 14.
- [145] 杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用(I) [J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(3): 42-52, 57.
- [146] Craig B. Ultrafast pulses promise better processing of fine structures[J]. *Laser Focus World*, 1998, 34(9): 79-84.
- [147] Weiss P. Hot flashes, cold cuts: Ultrafast lasers give power tools a new edge[J]. *Science News*, 2002, 162(20): 315-317.
- [148] 唐明俊, 杨春俊, 刘盛秀, 等. 超脉冲二氧化碳激光在皮肤美容方面的应用[C]//中华医学会第六次全国医学美学与美容学术年会暨第五次全国中青年学术会议论文集. 北京: 中华医学会, 2009: 420-421.
- [149] Dumitru G, Romano V, Weber H P, et al. Femtosecond ablation of ultrahard materials[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2002, 74(6): 729-739.
- [150] Perry M D, Stuart B C, Banks P S, et al. Ultrashort-pulse laser machining of dielectric materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(9): 6803-6810.
- [151] Rizvi N H, Karnakis D, Gower M C. Micromachining of industrial materials with ultrafast lasers[C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Jacksonville: Laser Institute of America, 2001: 1511-1520.
- [152] Ihlemann J, Scholl A, Schmidt H, et al. Nanosecond and femtosecond excimer-laser ablation of oxide ceramics[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1995, 60(4): 411-417.
- [153] Venkatakrishnan K, Ngoi B K A, Stanley P, et al. Laser writing techniques for photomask fabrication using a femtosecond laser[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2002, 74(4): 493-496.
- [154] Gower M C. Industrial applications of laser micromachining[J]. *Optics Express*, 2000, 7(2): 56-67.

Research progress and prospect of ultrafast science

LEI Bingying¹, ZHANG Liyi^{1,2}, LIN Hua^{1,2}, FU Yuxi^{1,2*}, ZHAO Wei^{1,2*}, HOU Xun^{1*}

1. Center for Attosecond Science and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Ultrafast science employs ultrafast light sources and ultrafast measurement as the main approaches to understand, apply and control macroscopic matter through the measurement and manipulation of ultrafast kinetic processes of microscopic particles. As one of the most important frontiers in international science and technology, the development of ultrafast science will provide an important impetus for original innovation in numerous disciplines. Its breakthroughs will help to address many important issues related to the vital national needs and public health. This paper focuses on the research of ultrafast laser technology, ultrafast measurement technology and ultrafast dynamics in ultrafast science, mainly introducing their development status, frontier application and future prospect. In-depth analysis of the problems facing the development of ultrafast science in China is provided, and specific recommendations are proposed to promote its development, including strengthening top-level design, promoting industrialization, improving the evaluation mechanism for talent cultivation, supporting major scientific and technological infrastructures, and participating in international big science programs.

Keywords ultrafast laser technology; ultrafast measurement technology; ultrafast dynamics; ultrafast applications; large scientific installations ●



(责任编辑 刘志远)