

## 星光超强激光装置

戴亚平<sup>1,2</sup>, 栗敬钦<sup>1,2</sup>, 魏晓峰<sup>1\*</sup>, 吴玉迟<sup>1,2</sup>, 刘兰琴<sup>1,2</sup>, 李平<sup>1,2</sup>, 王文义<sup>1,2</sup>, 林东晖<sup>1,2</sup>, 郭良福<sup>1,2</sup>, 陈勇<sup>1,2</sup>,  
李明中<sup>1,2</sup>, 田小程<sup>1,2</sup>, 曾小明<sup>1,2</sup>, 左言磊<sup>1,2</sup>, 周凯南<sup>1,2</sup>, 严雄伟<sup>1,2</sup>, 贺书凯<sup>1,2</sup>, 董军<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中山光子科学中心, 广东 中山 528400;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 超短超强脉冲激光是目前世界上在实验室内产生超高能量密度、超强电磁场和超快时间尺度的综合性极端物理条件的重要手段。在对超短超强脉冲激光发展现状和趋势分析的基础上, 针对高能量密度物理等前沿基础科学实验研究多样化的需求, 提出研制不同脉冲宽度、三种脉冲激光(两束输出功率为 10 PW 的飞秒激光、单束输出功率为 1 PW@1 Hz 的飞秒激光、单束千焦耳皮秒激光和单束万焦耳纳秒激光)协同输出至 4 个物理实验站形成不同工作模式, 实现多种加载-诊断物理实验功能的星光超强激光装置(XG-ELF)的设想。对 XG-ELF 装置的物理实验设想和主要设计结果进行介绍。建成后的 XG-ELF 装置将为我国高能量密度物理前沿基础领域中的研究提供先进的研究平台。

**关键词** 激光器; 极端条件; 高能量密度物理; 超短超强激光; 光参量啁啾脉冲放大

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1714001

## XingGuang-Extreme Laser Facility

Dai Yaping<sup>1,2</sup>, Su Jingqin<sup>1,2</sup>, Wei Xiaofeng<sup>1\*</sup>, Wu Yuchi<sup>1,2</sup>, Liu Lanqin<sup>1,2</sup>, Li Ping<sup>1,2</sup>,  
Wang Wenyi<sup>1,2</sup>, Lin Donghui<sup>1,2</sup>, Guo Liangfu<sup>1,2</sup>, Chen Yong<sup>1,2</sup>, Li Mingzhong<sup>1,2</sup>,  
Tian Xiaocheng<sup>1,2</sup>, Zeng Xiaoming<sup>1,2</sup>, Zuo Yanlei<sup>1,2</sup>, Zhou Kainan<sup>1,2</sup>, Yan Xiongwei<sup>1,2</sup>,  
He Shukai<sup>1,2</sup>, Dong Jun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Zhongshan Photon Science, Zhongshan 528400, Guangdong, China;

<sup>2</sup>Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

**Abstract** The ultrashort and ultra-intense pulsed laser is an important means of producing comprehensive extreme physical conditions with ultra-high energy density, ultra-strong electromagnetic fields, and ultra-fast time scale in the laboratory. The development status of ultrashort and ultra-intense pulsed lasers, the development trend of ultrashort and ultra-intense pulsed lasers, and the diverse needs of scientific experimental research on high-energy-density physics are analyzed. On this basis, the scheme of the XingGuang-extreme laser facility (XG-ELF) with multiple loading-diagnostic physical experimental functions is proposed, which is composed of three kinds of pulsed lasers with different pulse widths (i. e., two femtosecond lasers of 10 PW, a femtosecond laser of 1 PW@1 Hz, a picosecond laser of 1 kJ, and a nanosecond laser of 10 kJ) that collaboratively output to four physical experiment stations. Moreover, the assumptions and main design results of the physical experiments on XG-ELF are introduced. The completed XG-ELF will provide an advanced experimental platform for research on the frontiers and basic fields of high-energy-density physics in China.

**Key words** lasers; extreme conditions; high-energy-density physics; ultrashort and ultra-intense laser; optical parametric chirped pulse amplification

## 1 超强激光装置现状和发展趋势

超短超强激光是当代激光技术发展的前沿方向, 美国《科学》杂志将“人类到底能造多强的激光”列为最

具挑战的百个基本科学问题之一<sup>[1]</sup>。超短超强脉冲激光是目前世界上在实验室内产生超高能量密度、超强电磁场和超快时间尺度的综合性极端物理条件的重要手段, 为人类探索极端条件下的自然规律提供了前所

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-05-24; 录用日期: 2022-06-20

通信作者: \*xfwei@caep.cn

未有的条件,对高能量密度物理科学、新型加速器物理、激光核物理和实验室天体物理等领域具有重大的科学意义<sup>[2-3]</sup>。超短超强激光技术的发展水平和激光装置的研制能力是衡量一个国家科技实力的重要标志之一。

超短脉冲激光技术在历史上经历调Q、锁模等发展阶段,功率持续提升。1985年,在啁啾脉冲放大技术<sup>[4]</sup>发明后,激光输出的功率实现了5个量级的跨越。在进入21世纪后,超短超强激光技术进入了快速发展的阶段。

目前1 PW激光装置已成为国际上主要实验室的标配,同时国际上科技发达的国家正在积极推进10 PW激光装置的建设<sup>[5]</sup>。典型的10 PW激光装置包括欧洲联盟的ELI-NP、法国的Apollon、英国的Vulcan10和中国的SULF装置。ELI-NP于2020年8月实现了1 min间隔的10 PW放大压缩输出,计划正式对外开放提供运行。法国Apollon和英国Vulcan10等装置的建设也正在积极推进中。我国SULF装置于2020年已实现10 PW输出,目前正在转入物理实验运行阶段。可以预见,未来国际上10 PW激光装置将陆续建成并投入使用,进而成为前沿极端物理条件实验研究的主力装置。

此外,各国正在加紧推进百拍瓦量级装置的论证、立项和建设。已见报道的包括俄罗斯的XCELS<sup>[6]</sup>、美国的EP-OPAL<sup>[7]</sup>、中国的SEL<sup>[8]</sup>等建设计划。俄罗斯XCELS拟输出激光的峰值功率达200 PW,是目前国际上最早报道的百拍瓦量级激光装置。美国EP-OPAL计划输出的激光脉冲功率为75 PW,目前已建成中等规模实验系统,并开展了EP-OPAL的全光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术路线的验证。我国已启动百拍瓦量级装置的建设计划,规划于2025年建成100 PW激光装置SEL,目前装置技术方案的设计工作正在推进中。

超短超强激光技术正处于重大技术突破和拓展重大应用的关键阶段。超短超强激光装置的发展呈现以下的主要发展趋势。

### 1) 物理实验功能的多样化

强激光相关的科学研究已经呈现出多元化和交叉化的趋势。强激光与物质相互作用不仅能够获得极强的电磁场环境,还能够产生高温、高压和高密度的物质状态,为物质科学、天体物理和核物理等方面的研究注入了新的活力。这些多元化的研究需求使得强激光装置与其他类型的研究平台不断交叉融合。目前,利用高能纳秒激光与短脉冲激光联合形成的泵浦-探测实验能力,已经在惯性约束聚变、高压科学、材料科学和天体物理等研究方面中发挥了重要作用。强激光与加速器或自由电子激光的结合可望为材料、生物和核物理等领域中的研究创造新的条件。

目前国际上以高功率激光为基础的大科学设施主要分为大能量的万焦耳纳秒激光装置、千焦耳皮秒激光装置和高峰功率的拍瓦飞秒激光装置。这些装置大多以单一物理目标为牵引,创造的极端物理条件和

配套的次级辐射诊断源多样性不足。如何满足不同用户不同领域的多样性物理实验需求,是未来强激光科学装置建设首要考虑的问题。

2013年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心建成的星光-III激光装置<sup>[9]</sup>,实现了三类脉冲(飞秒、皮秒、纳秒)的同源输出,在同一实验站中具备不同类型泵浦-探测的物理实验能力。欧洲在建的ELI-Beamlines中的P3实验站也具备类似的功能<sup>[10]</sup>。

可以预见,基于多种脉冲输出创造不同时间尺度和不同强度区间的极端条件,并配置不同时空分辨和能量区间的激光驱动辐射源作为探测手段,将是未来多用户群超短超强激光装置的主要发展趋势之一。

### 2) 聚焦功率密度的持续提升

聚焦功率密度的提升是创造极端实验条件和产生高品质激光辐射源的关键,是超短超强激光装置建设关注的核心问题。目前国际上已建成投入运行的装置,如HERCULES Laser、Texas Petawatt Laser、J-KAREN-P Laser、SULF Laser、CoRels Petawatt Laser等,均有聚焦功率密度超过 $5 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$ 的报道<sup>[5]</sup>。2021年,已有报道<sup>[11]</sup>指出韩国CoRels Petawatt Laser的聚焦功率密度已达到 $10^{23} \text{ W/cm}^2$ 。

虽然在过去的20多年里,在实验室中可产生的功率密度已经从 $10^{16} \text{ W/cm}^2$ 提升至 $10^{22} \text{ W/cm}^2$ ,但是距离当前的物理研究预想的功率区间依然存在巨大差距。理论研究已经触及了功率密度为 $10^{28} \text{ W/cm}^2$ 的范畴,并预言了大量的新物理现象<sup>[12-14]</sup>。当功率密度超过 $10^{23} \text{ W/cm}^2$ 时,强激光作用的物理过程中必须考虑量子效应。当功率密度达到 $10^{26} \text{ W/cm}^2$ 时,辐射的量子效应将占据主导地位。当功率密度超过 $10^{28} \text{ W/cm}^2$ 时,电磁场将能够直接“撕裂真空”,实现虚实粒子转换<sup>[15]</sup>。新物理现象经历了从理论预言到实验验证的阶段,期待超短脉冲激光聚焦功率密度的进一步提升<sup>[16]</sup>。

### 3) 多元化的靶面光场主动调控

科学研究的不断深入对强激光装置的实验参数需求也表现出多元化。激光束与靶的耦合作用是物理实验研究的关键过程。物理实验研究对激光靶面光场的要求从传统的功率密度、信噪比等,逐渐扩展到对激光更多的参数(偏振态、时域频谱、空间相位和光强分布)提出精密调控的要求。实现激光束靶面光场的主动控制,满足未来多样化的物理实验需求是未来超短超强激光技术发展的趋势。

## 2 星光超短超强激光装置的科学研究目标

科学问题研究需求是装置设计与研制的依据。通过系统地梳理高能量密度物理的前沿研究态势,并组织国内同行开展广泛的研讨分析,确定了星光超短超强激光装置(XG-ELF)将重点面向极端条件下的物质特性、实验室天体物理、激光核物理、强激光驱动辐射源和材料超快动力学等前沿研究方向。以下将对各主要物理方向的研究意义、重点问题和标志性实验目标进行简要的介绍。

## 2.1 极端条件下的物质特性

自然界中存在大量处于极端高温高压环境下的物质。研究处于极端条件下物质的性质,在材料科学、地球物理等研究领域具有重要的意义。强激光驱动不仅能够产生压力覆盖  $10^9 \sim 10^{12}$  Pa、温度覆盖  $10^3 \sim 10^9$  K 的极端条件,并且能够实现其他驱动方式所不能达到的高应变率。结合高时空分辨诊断技术,强激光驱动可以在实验室中产生极端条件并精确获取物质的状态参数<sup>[17-20]</sup>。

围绕“类地行星内部物质高压物性”这一重点问题,利用 XG-ELF 独特的加载-诊断协同实验能力,对类地行星内部高温高压状态下的内核物质进行了研究,进而可获得其结构、物性参数等第一手的实验室研究数据。

## 2.2 实验室天体物理

高功率激光装置的飞速发展使人们能够在实验室内创造与天体环境类似的高温、高压、高密度和强电磁场等极端物理条件,提供了对天体现象进行主动、近距、可控和可重复研究的全新手段。高功率激光装置能够在实验室尺度下再现天文现象和天文过程,结合天文观测数据,可进一步探索天体奥秘<sup>[21-23]</sup>。

围绕“宇宙高能射线起源”这一重点问题,利用 XG-ELF 的先进激光驱动能力,通过等离子体对流的方式在实验室中率先实现韦伯不稳定性诱导的电磁型无碰撞冲击波,并研究这种冲击波驱动的带电粒子加速过程,以验证高能宇宙射线非热幂谱的起源机制。

## 2.3 激光核物理

超短超强激光在实验室中所创造的高能量密度极端环境为研究和揭示原子核在特殊环境下的性质提供了前所未有的研究平台,形成了一个新兴的交叉学科——激光核物理。除了极端环境之外,超强激光驱动的多类型超高通量高能粒子束流使核物理的实验室研究进入了一个全新的领域,包括研究极端条件下的原子参数与核参数<sup>[24-25]</sup>、短寿命同位素的产生<sup>[26]</sup>、丰中子重核素的合成<sup>[27]</sup>和快速中子的俘获<sup>[28]</sup>等。

围绕“宇宙中重元素起源”这一重点问题<sup>[29]</sup>,利用两束 10 PW 的飞秒激光驱动产生的高密度、高能离子束流与中子束流探索核物理基本理论重大问题,实现远离  $\beta$  稳定线且处于中子俘获过程等待点附近的中子数为  $N=126$  的新丰中子核素的产生<sup>[30]</sup>,并实现快速中子俘获过程( $r$  过程)<sup>[31]</sup>,进而直接校验  $r$  过程和重元素合成的理论模型。

## 2.4 强激光驱动辐射源

超短超强激光与物质相互作用能够通过多种物理机制产生强辐射源,包括高能离子、高能电子、X 射线和高能伽马射线等<sup>[32-38]</sup>。这些辐射源具有传统驱动方式所不具备的短脉冲宽度(飞秒至皮秒量级)、小空间尺度(微米量级)的特点,能够获得前所未有的高密度高流强辐射源,在科研和应用领域中具有广阔的前景<sup>[39-40]</sup>。当前,充分发挥激光的超强驱动能力,以不断提升辐射源的性能与品质成为相关领域的研究热点。

围绕“高品质高能辐射源产生”这一重点问题,充分发挥 XG-ELF 先进的激光驱动能力和多样化的协同实验模式,冲击辐射源研究的科学前沿,力求实现高能质子束能量突破 200 MeV、高能电子束能量突破 15 GeV、准单能伽马射线能量突破 20 MeV 和高亮度准单能硬 X 射线光子能量达到 100 keV,进而推动激光驱动辐射源领域研究水平的全面提升。

## 2.5 材料超快动力学

材料的非平衡微结构动力学对于理解物质演化、预测反应产物和调控反应方向具有重要意义,但其反应体系复杂、过程时间短,长期以来都是材料科学研究中的重点和难点<sup>[41-43]</sup>。基于超短脉冲激光驱动微焦点、短脉冲宽度的辐射源实现跨时域范围(从静态到超快)、跨光子能量(从可见光到硬 X 射线)和跨空间尺度(从宏观到微观)的诊断能力,为材料超快动力学研究提供新的强大手段<sup>[44-46]</sup>。

围绕“光电材料的能量转换机制及动力学”这一重点问题,发挥激光超快辐射源的特点与优势,构建涵盖 X 射线、高能电子和可见光的高分辨超快诊断能力,开展对光电-半导体材料中光生载流子的迁移、复合和界面分离等动力学过程的研究<sup>[47-48]</sup>,获取载流子寿命、电荷迁移率和微观结构变化等物理信息,揭示光电器件能量转换效率的关键影响因素及其有效调控机制,为先进光电技术实用化奠定坚实的科学基础。

# 3 星光超强激光装置总体设计

基于上述科学问题研究需求和目标,XG-ELF 总体设计如图 1 所示,其中 DFB 为分布反馈激光器,SC 为超连续谱,SHG 为二次谐波,THG 为三次谐波。XG-ELF 装置包括了两束 10 PW 的单次飞秒激光、一束输出功率为 1 PW@1 Hz 的飞秒激光、一束千焦耳皮秒激光、一束输出万焦耳能量的纳秒激光和 4 个物理实验站(极端条件物理实验站、极强场物理实验站、先进辐射源实验站和超快动力学实验站)。输出的飞秒激光、皮秒激光、纳秒激光三类激光束线能够灵活切换至 4 个不同的物理实验站。XG-ELF 中三类激光的关键技术指标如表 1 所示。

XG-ELF 总体布局如图 2 所示,装置总体布局根据装置总体光路设计,综合考虑了激光实验区、物理实验站、中心控制室、精密装校区和能库实验区等主要功能区的排布和相互接口关系。装置实验室可分为两层:装置实验室一层主要包括激光大厅、光束编组站、4 个物理实验站、精密装校实验区和水电辅助功能区等;装置实验室二层主要包括中心控制室和能库实验室。实验室主体建筑的尺寸约为  $192.5 \text{ m} \times 72 \text{ m}$ 。

# 4 星光超强激光装置主要系统方案设计

## 4.1 脉冲产生与同步控制系统

为实现装置三类不同激光脉冲高精度的同步输出和同步延迟的调节,XG-ELF 采用了如图 3 所示的技



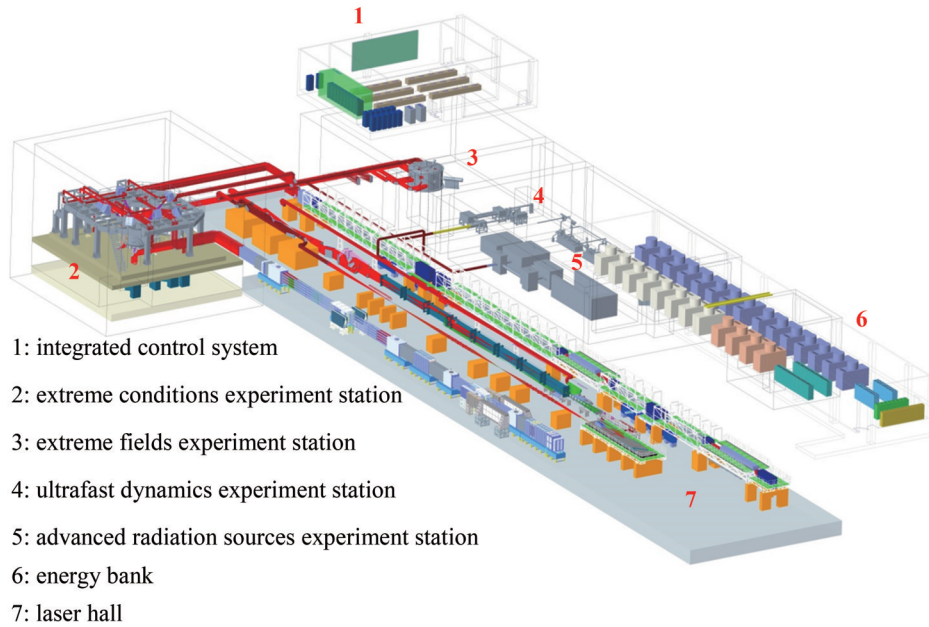


图 2 XG-ELF 总体布局图  
Fig. 2 Overall layout of XG-ELF

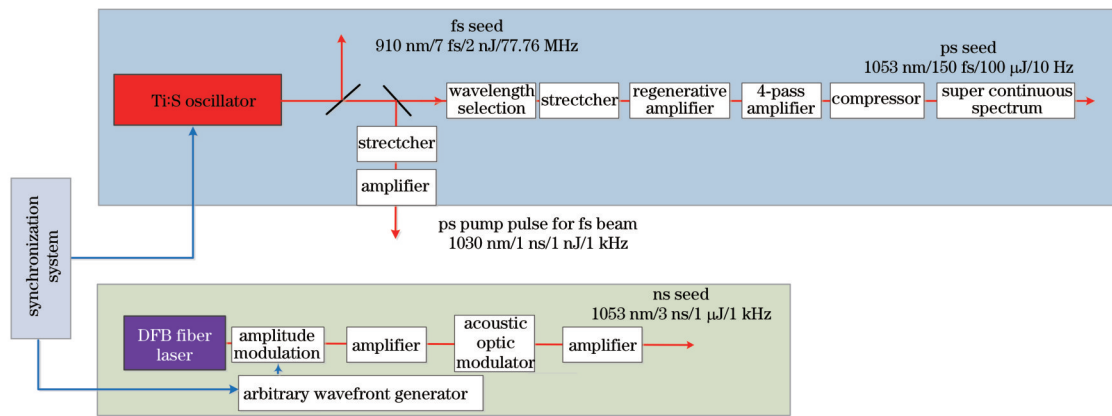


图 3 XG-ELF 中三种脉冲产生示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of three kinds of pulse generation in XG-ELF

一束 ps-OPA 泵浦光, 泵浦光的脉冲宽度约为 10 ps, 得益于光参量放大器的增益开关效应(泵浦光脉冲宽度底宽以外的时域范围, 信号光噪声本底无增益), 采用该级联的 ps-OPA 方式, 可以显著提升飞秒激光在 20 ps 时域范围以外的脉冲信噪比。上述 ps-OPA 输出的信号光脉冲再次经过纳秒展宽器, 脉冲宽度被从数皮秒展宽到数纳秒, 进而可满足后续能量放大对脉冲宽度的需求。展宽后的信号光进入两级级联的 ns-OPCPA, 实现了信号光脉冲能量从毫焦耳级到焦耳级的超宽带放大输出。随后, 该信号光被一分为三, 其中一束使用重复频率百焦耳泵浦光, 采用大口径三硼酸锂(LBO)光参量晶体, 将能量从焦耳级放大到数十焦耳, 经过压缩后可实现重复频率拍瓦激光的输出。另外两束使用万焦耳泵浦光, 经过分光后分别泵浦 LBO 晶体和磷酸二氧钾(DKDP)晶体, 将能量从焦耳级放大到数百焦耳, 经过压缩后可实现两束 10 PW 激光的输出。

飞秒激光压缩系统采用四光栅单通构型的技术方案, 通过四块光栅的衍射将激光脉冲的脉冲宽度从 3 ns 压缩到 30 fs。光栅采用镀金光栅, 刻线密度为 1480 line/mm, 工作中心波长为 910 nm, 支持的无损光束的带宽在 200 nm 以上, 光束口径为 450 mm × 450 mm。

为实现功率密度为 1 PW@1 Hz 的飞秒激光的输出。重复频率飞秒激光 ns-OPCPA 需要 1 Hz 重复频率、百焦耳量级能量的绿光进行泵浦。泵浦光采用“氙灯泵浦组合式钽玻璃薄片+浸没式液冷+激光多程主放大构型”的技术方案。如图 5 所示, 该泵浦光系统包括光纤前端与再生放大组件、前置多程放大组件、空间滤波器、大口径重复频率片状放大器、大口径重复频率等离子体电光开关和大口径重复频率倍频组件等。光纤前端输出脉冲形状可任意整形、脉冲宽度为数纳秒、能量约为 1 μJ、波长为 1053 nm、口径约为 3 mm、高斯

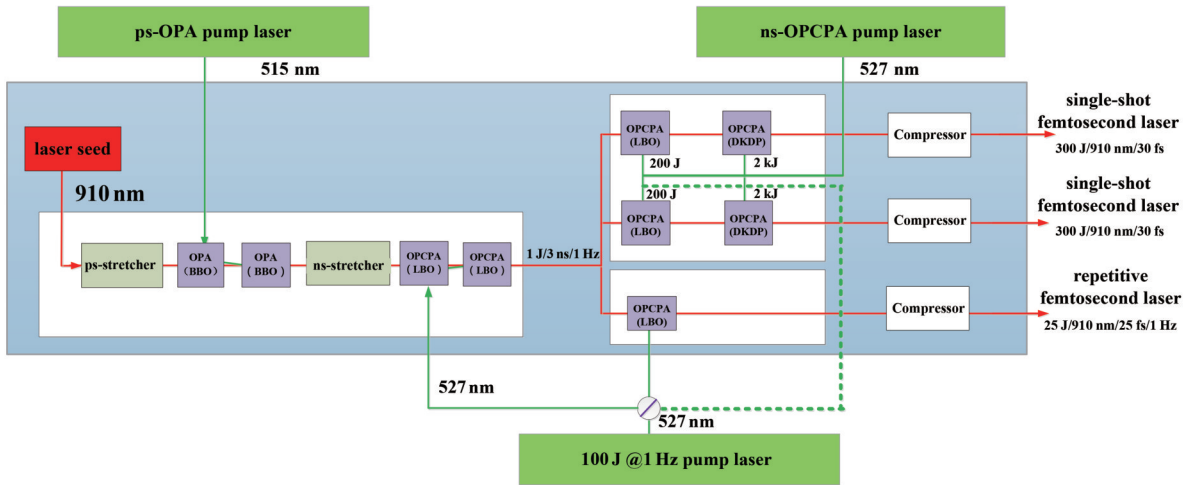


图 4 XG-ELF 飞秒激光系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of femtosecond laser system in XG-ELF

近场分布的脉冲种子光,经再生放大组件将能量放大至 25 mJ,经过近场整形和扩束隔离处理进入前置多程放大组件中,能量可被放大至 500 mJ。然后,脉冲

种子光经过扩束隔离处理进入多程放大,能量可放大到约 200 J。最后,利用大口径重复频率倍频组件实现约 100 J 绿光输出。

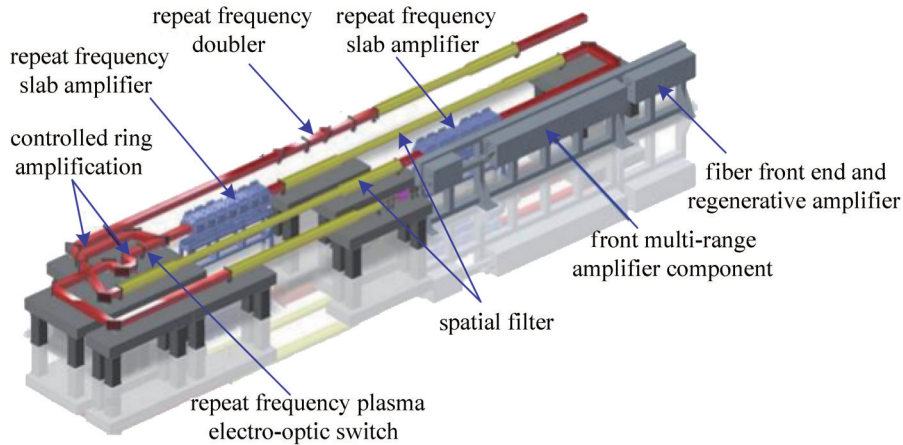


图 5 100 J@1 Hz 泵浦光系统三维示意图

Fig. 5 Three-dimensional schematic diagram of 100 J@1 Hz pump laser system

大口径重复频率片状激光放大器是重复频率百焦耳泵浦光系统的核心组件,综合考虑系统储能、增益、激光通量(负载)和造价等因素,放大器采取了氙灯泵浦钽玻璃薄片组的方式,基本结构如图 6 所示。钽玻璃法线方向( $n$ )与主激光成  $45^\circ$  角,可支撑  $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$  口径光束的放大,钽玻璃薄片组采用浸没式液体冷却。

### 4.3 1 PW 千焦耳皮秒激光系统

XG-ELF 中皮秒激光系统采用“高质量短脉冲激光产生+短脉冲参量放大(ps-OPA)+钽玻璃啁啾脉冲放大(CPA)”的技术路线,XG-ELF 装置皮秒激光技术方案如图 7 所示,以基于  $800\text{ nm}$  激光超连续谱产生结合 OPA 技术获得的高信噪比的  $1053\text{ nm}$  短脉冲作为种子光,使用展宽器将种子光时域宽度展宽至纳秒量级,通过全四程钽玻璃放大将脉冲能量放大到数千焦耳,再通过单程压缩将纳秒级激光脉冲压缩至皮秒

级,最终可获得能量为  $1\text{ kJ}$ 、脉冲宽度在  $1\sim 10\text{ ps}$  范围内可调的高能拍瓦激光,实现信噪比优于  $10^8:1$ 、聚焦功率大于  $10^{20}\text{ W/cm}^2$  (常规运行)的输出。

### 4.4 万焦耳纳秒激光系统

万焦耳纳秒激光系统采用已得到工程验证的如图 8 所示的“方形光束+内腔四程放大+助推三程放大+变口径放大+菱形孔位排布”的总体构型,采用“短脉冲宽度强泵浦钽玻璃片状放大器”的泵浦模式,确保系统具备较高的增益能力,实现高运行通量的稳定输出。采用“外置式 U 型光路+ $90^\circ$  角反射”的光束反转器,实现高功率激光脉冲多程放大的反转传输、旋转隔离、口径匹配和波前补偿等多种功能。

### 4.5 物理实验系统

XG-ELF 中物理实验系统可将满足各类物理实验研究所需的各路激光引导、注入到不同靶场的靶室中,并可根据实验需求实现光束末级控制和高精度束靶耦

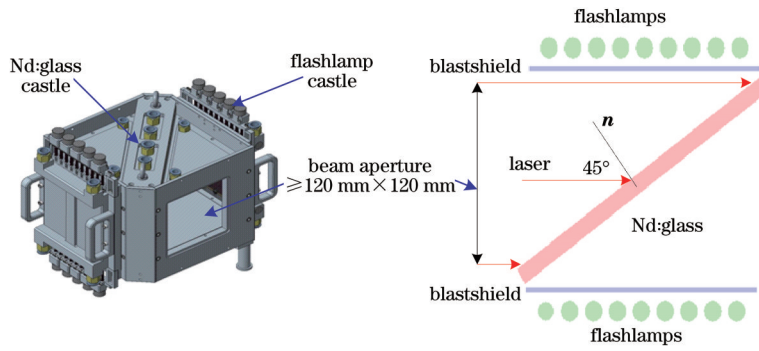


图 6 100 J@1 Hz 泵浦光系统放大器示意图

Fig. 6 Schematic diagram of amplifier in 100 J@1 Hz pump laser system

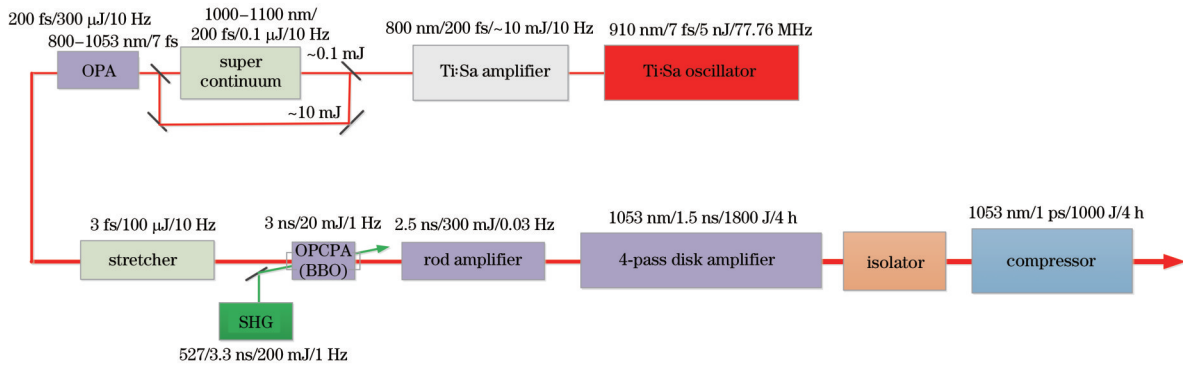


图 7 XG-ELF 皮秒激光系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of picosecond laser system in XG-ELF

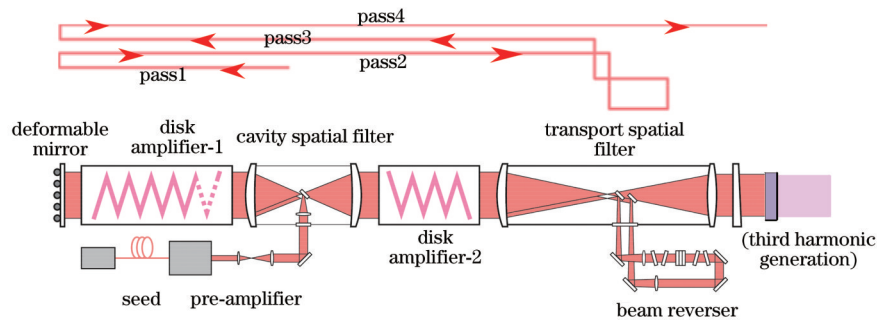


图 8 XG-ELF 纳秒激光系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of nanosecond laser system in XG-ELF

合,完成激光与物质相互作用实验。同时,配置必要的诊断能力,进而可以在物理实验中获取可靠的实验数据。以科学目标为牵引,根据开展物理研究所需的实验能力要求,按照激光驱动能力和物理实验的特点,设立4个物理实验站。

#### 4.5.1 极端条件物理实验站

极端条件物理实验站利用两束 10 PW 飞秒激光束、千焦耳皮秒激光束和万焦耳纳秒激光束,实现了多种加载-诊断协同的独特实验能力。不同类型激光汇集在一个大型真空靶室内,万焦耳纳秒激光主要用于加载,具备单路、4路和8路运行模式。围绕加载区域,千焦耳皮秒激光与  $2 \times 10$  PW 飞秒激光从不同方位上产生粒子束与射线束进行状态诊断。实验站主要面向极端条件物质特性、实验室天体物理等方向开展综合

性研究,匹配开展物理实验所需的诊断系统,实现对关键物理过程、物理参数的高精度诊断。极端条件物理实验站示意图如图9所示。

#### 4.5.2 极强场物理实验站

极强场物理实验站基于  $2 \times 10$  PW 飞秒激光的高品质聚焦,采用紧聚焦方式实现  $10^{22} \sim 10^{23}$  W/cm<sup>2</sup> 的极强光场物理条件,能够以合束、垂直和对撞的排布形式与靶进行相互作用。同时,配备千焦耳皮秒激光束用于对靶状态进行调控与诊断。实验站具备等离子体状态、高能粒子束、光子束和核物理等方面的配套诊断能力,支撑开展激光核物理、强场量子电动力学等方面的科学研究。此外,基于  $2 \times 10$  PW 飞秒激光发展相干合束等前沿激光技术实验研究能力,支撑面向 EW 的先进激光技术研究。极强场物理实验站示意图如图10所示。

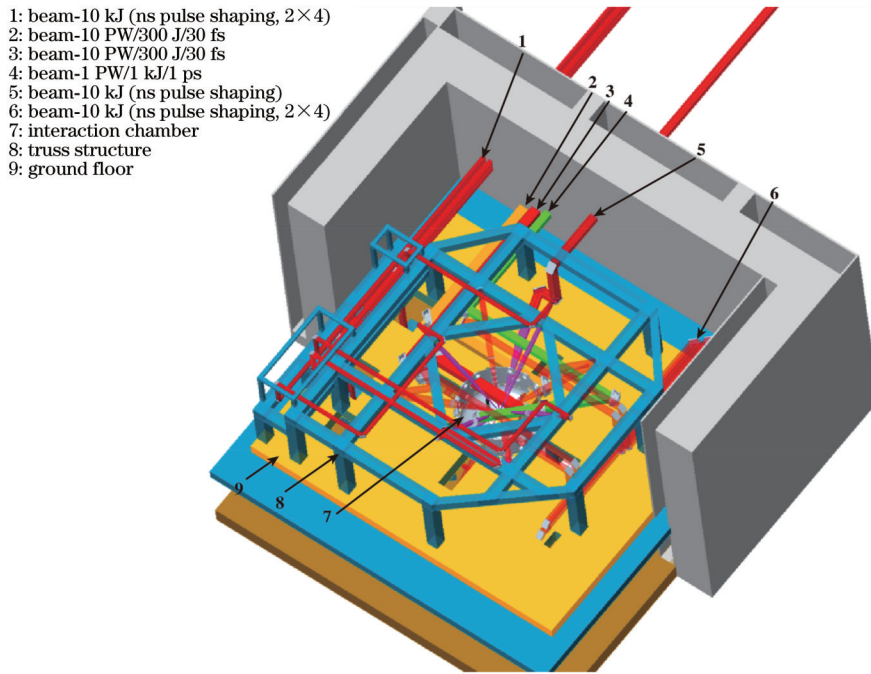


图 9 极端条件物理实验站示意图

Fig. 9 Schematic diagram of extreme conditions experiment station in XG-ELF

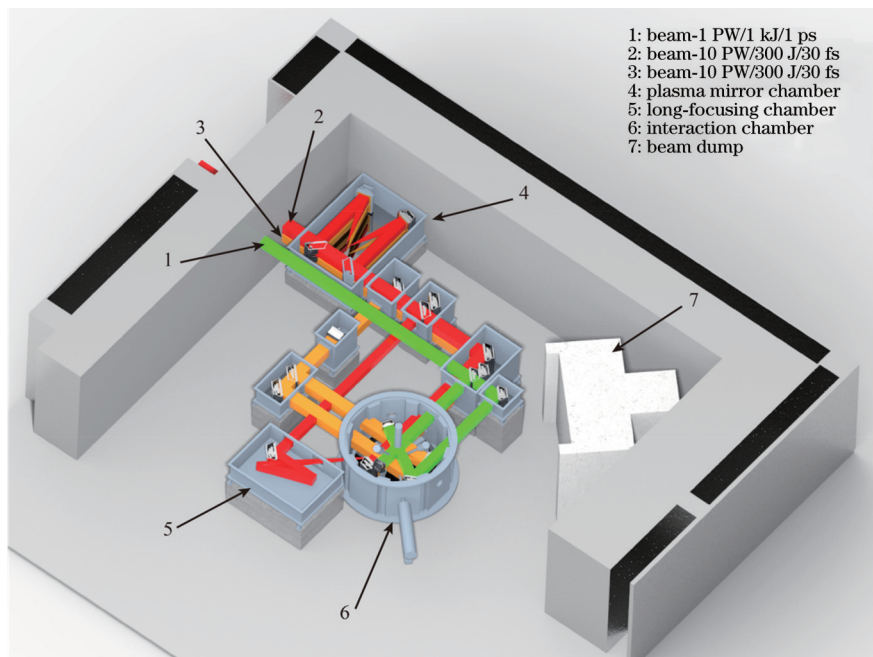


图 10 极强场物理实验站示意图

Fig. 10 Schematic diagram of extreme fields experiment station in XG-ELF

#### 4.5.3 先进辐射源实验站

先进辐射源实验站利用 1 PW 重复频率飞秒激光, 以长焦聚焦的形式实现与大尺度等离子体的相互作用驱动产生高能电子束, 并通过 1 PW 重复频率激光在实验站内分束形成级联或碰撞排布形式, 实现激光束之间和激光与电子束间的高精度相互作用。配备以大尺度等离子体状态、高能电子束、高能 X 射线和伽马射线束为主的物理诊断能力, 先进辐射源实验站可实现高能电子加速、高亮度 X 射线辐射方面的产生机理和应用技术研究。先进辐射源实验站示意图如图 11 所示, 其

中包括激光尾场电子加速(LWFA)实验区。

#### 4.5.4 超快动力学实验站

超快动力学实验站主要以 1 PW 重复频率飞秒激光驱动产生的次级辐射源为基础, 重点建立 X 射线吸收精细谱、高能电子衍射、高能 X 射线衍射和光谱学 4 类高分辨超快实验能力, 并配备样品搭载系统, 以及各类成像、光谱学诊断系统, 形成服务于材料科学、生物化学等领域中超快动力学过程研究的稳定平台。超快动力学实验站示意图如图 12 所示, 实验站分为动态 X 射线吸收谱(DXAS)实验区、超快电子衍射(UED)实



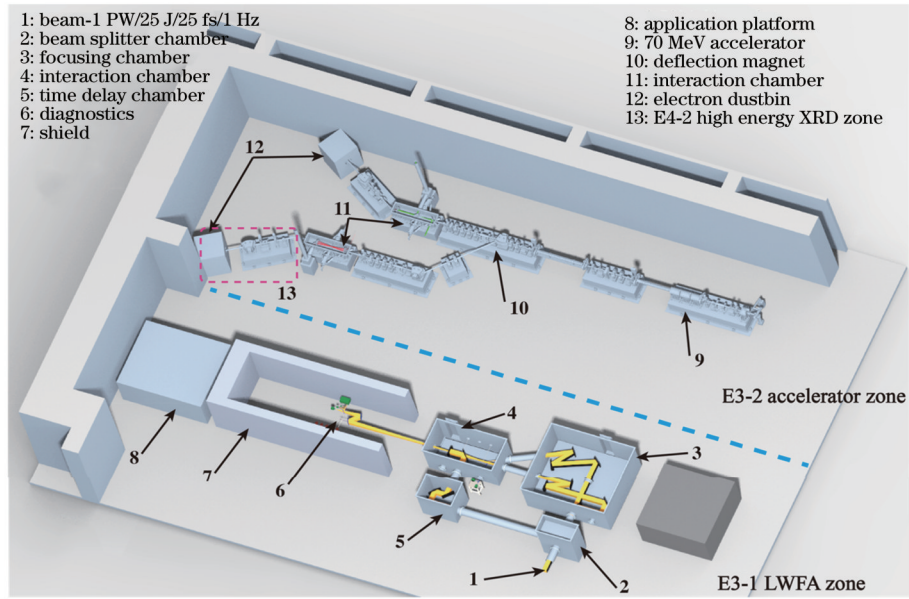


图 11 先进辐射源实验站示意图

Fig. 11 Schematic diagram of advanced radiation sources experiment station in XG-ELF

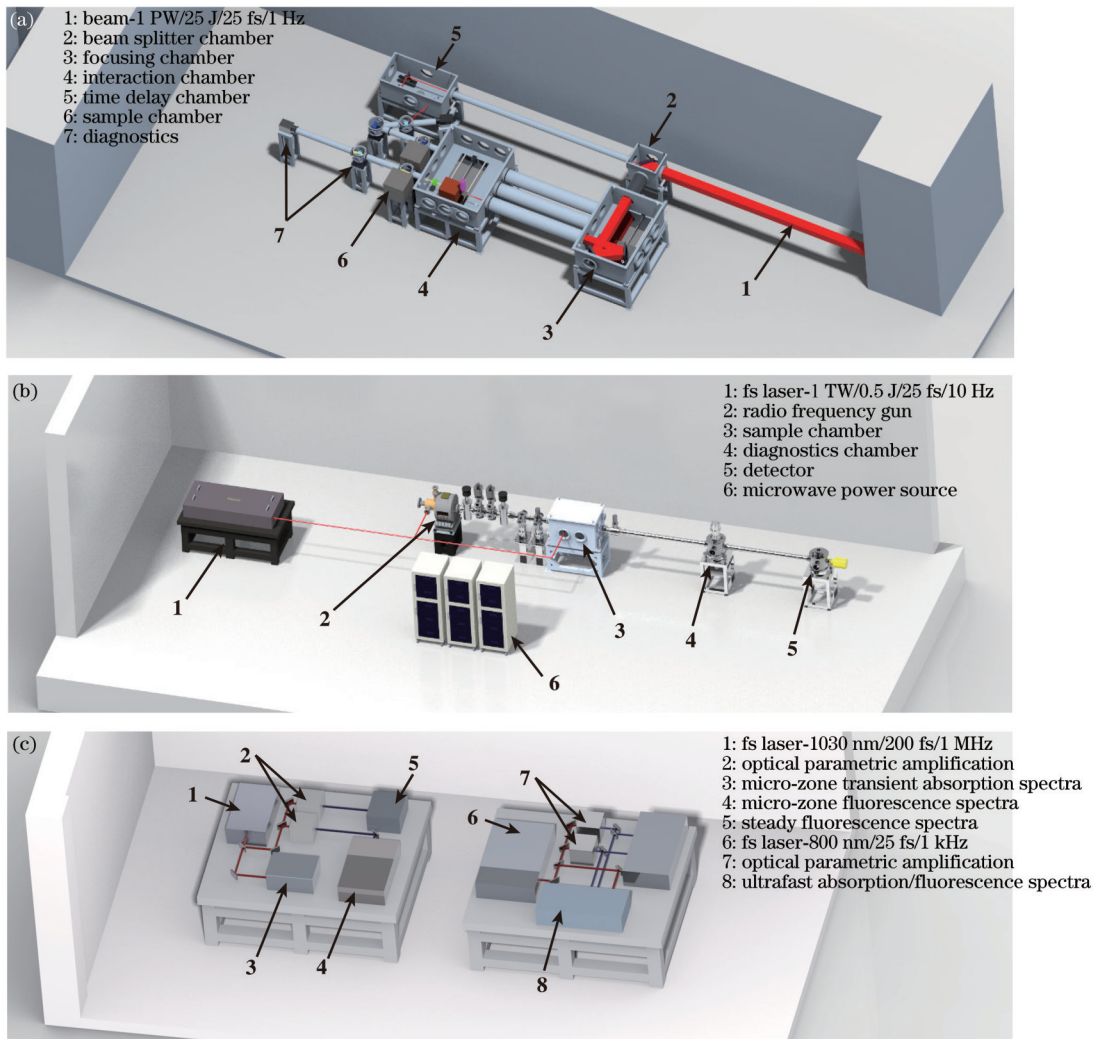


图 12 超快动力学实验站示意图。(a)DXAS实验区; (b)UED实验区; (c)超快光学实验区

Fig. 12 Schematic diagram of ultrafast dynamics experiment station in XG-ELF. (a) DXAS zone; (b) UED zone; (c) ultrafast optics zone

验区和超快光学实验区。

## 5 结束语

通过分析超短超强脉冲激光发展趋势和高能量密度物理研究领域前沿领域研究的需求,提出建立三类激光(飞秒、皮秒、纳秒)耦合 4 个物理实验站,形成具有多种泵浦-诊断实验方式的多功能强激光装置的设想。对 XG-ELF 的科学目标、总体设计和关键系统的设计进行了介绍。XG-ELF 的设计继承了我国星光-III 激光装置三束激光同源的核心思想,同时充分借鉴了我国神光系列激光装置研制的工程经验。XG-ELF 是中山光子科学中心超强相对论物理实验平台的核心组成部分,将为我国高能量密度物理前沿基础领域研究提供前所未有的实验能力。

### 参 考 文 献

- [1] Science magazine's 125th anniversary issue: 125 questions: what we don't know[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.309.5731.75>.
- [2] Mourou G A, Labaune C L, Dunne M, et al. Relativistic laser-matter interaction: from attosecond pulse generation to fast ignition[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2007, 49(12B): B667-B675.
- [3] Mourou G A, Korn G, Sandner W, et al. ELI-extreme light infrastructure: science and technology with ultra-intense lasers[EB/OL]. [2022-02-05]. <https://eli-laser.eu/media/1019/eli-whitebook.pdf>.
- [4] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 56(3): 219-221.
- [5] 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.
- [6] Bashinov A V, Gonoskov A A, Kim A V, et al. New horizons for extreme light physics with mega-science project XCELS[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2014, 223(6): 1105-1112.
- [7] Bromage J, Bahk S W, Begishev I A, et al. Technology development for ultraintense all-OPCPA systems[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7(1): 31-41.
- [8] Wang X L, Liu X Y, Lu X M, et al. 13.4 fs, 0.1 Hz OPCPA front end for the 100 PW-class laser facility[J]. *Ultrafast Science*, 2022, 2022: 9894358.
- [9] Zhu Q H, Zhou K N, Su J Q, et al. The Xingguang-III laser facility: precise synchronization with femtosecond, picosecond and nanosecond beams[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(1): 015301.
- [10] Weber S, Bechet S, Borneis S, et al. P3: an installation for high-energy density plasma physics and ultra-high intensity laser-matter interaction at ELI-Beamlines[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2017, 2(4): 149-176.
- [11] Yoon J W, Choi I, Sung J, et al. Realization of laser intensity over  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>[J]. *Optica*, 2021, 8(5): 630-635.
- [12] Marklund M, Shukla P K. Nonlinear collective effects in photon-photon and photon-plasma interactions[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(2): 591-640.
- [13] Ehlötzky F, Krajewska K, Kamiński J Z. Fundamental processes of quantum electrodynamics in laser fields of relativistic power[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2009, 72(4): 046401.
- [14] di Piazza A, Müller C, Hatsagortsyan K Z, et al. Extremely high-intensity laser interactions with fundamental quantum systems[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2012, 84(3): 1177-1228.
- [15] Schwinger J. On gauge invariance and vacuum polarization[J]. *Physical Review*, 1951, 82(5): 664-679.
- [16] Mourou G, Tajima T. Summary of the IZEST science and aspiration[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2014, 223(6): 979-984.
- [17] Kraus R G, Hemley R J, Ali S J, et al. Measuring the melting curve of iron at super-Earth core conditions[J]. *Science*, 2022, 375(6577): 202-205.
- [18] Zhang Y J, Lin J F. Molten iron in Earth-like exoplanet cores[J]. *Science*, 2022, 375(6577): 146-147.
- [19] Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers [J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 2016, 114(6): 65001.
- [20] Batani K, Batani D, He X T, et al. Recent progress in matter in extreme states created by laser[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2021, 7(1): 013001.
- [21] Takabe H, Kuramitsu Y. Recent progress of laboratory astrophysics with intense lasers[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e49.
- [22] Zhong J Y, Li Y T, Wang X G, et al. Modelling loop-top X-ray source and reconnection outflows in solar flares with intense lasers[J]. *Nature Physics*, 2010, 6(12): 984-987.
- [23] Remington B A, Drake R P, Ryutov D D. Experimental astrophysics with high power lasers and Z pinches[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(3): 755-807.
- [24] Johnson M G, Zylstra A B, Bacher A, et al. Development of an inertial confinement fusion platform to study charged-particle-producing nuclear reactions relevant to nuclear astrophysics[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(4): 041407.
- [25] Fu C B, Bao J, Chen L M, et al. Laser-driven plasma collider for nuclear studies[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(13): 1211-1213.
- [26] Ledingham K W D, McKenna P, McCanny T, et al. High power laser production of short-lived isotopes for positron emission tomography[J]. *Journal of Physics D*, 2004, 37(16): 2341-2345.
- [27] Zagrebaev V I, Karpov A V, Mishustin I N, et al. Production of heavy and superheavy neutron-rich nuclei in neutron capture processes[J]. *Physical Review C*, 2011, 84(4): 044617.
- [28] Hill P, Wu Y B. Exploring laser-driven neutron sources for neutron capture cascades and the production of neutron-rich isotopes[J]. *Physical Review C*, 2021, 103(1): 014602.

- [29] 何建军, 周小红, 张玉虎. 核天体物理实验研究[J]. 物理, 2013, 42(7): 484-495.  
He J J, Zhou X H, Zhang Y H. Experimental studies of nuclear astrophysics[J]. Physics, 2013, 42(7): 484-495.
- [30] Ur C A, Balabanski D, Cata-Danil G, et al. The ELI-NP facility for nuclear physics[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2015, 355: 198-202.
- [31] Chen S N, Negoita F, Spohr K, et al. Extreme brightness laser-based neutron pulses as a pathway for investigating nucleosynthesis in the laboratory[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2019, 4(5): 054402.
- [32] Higginson A, Gray R J, King M, et al. Near-100 MeV protons via a laser-driven transparency-enhanced hybrid acceleration scheme[J]. Nature Communications, 2018, 9: 724.
- [33] Macchi A, Borghesi M, Passoni M. Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction[J]. Reviews of Modern Physics, 2013, 85(2): 751-793.
- [34] Gonsalves A J, Nakamura K, Daniels J, et al. Petawatt laser guiding and electron beam acceleration to 8 GeV in a laser-heated capillary discharge waveguide[J]. Physical Review Letters, 2019, 122(8): 084801.
- [35] Svensson J B, Guénot D, Ferri J, et al. Low-divergence femtosecond X-ray pulses from a passive plasma lens[J]. Nature Physics, 2021, 17(5): 639-645.
- [36] Ta Phuoc K, Corde S, Thauray C, et al. All-optical Compton gamma-ray source[J]. Nature Photonics, 2012, 6(5): 308-311.
- [37] Dong K G, Zhang T K, Yu M H, et al. Micro-spot gamma-ray generation based on laser wakefield acceleration[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(24): 243301.
- [38] Günther M M, Rosmej O N, Tavana P, et al. Forward-looking insights in laser-generated ultra-intense  $\gamma$ -ray and neutron sources for nuclear application and science[J]. Nature Communications, 2022, 13: 170.
- [39] Albert F, Thomas A G R. Applications of laser wakefield accelerator-based light sources[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2016, 58(10): 103001.
- [40] Daido H, Nishiuchi M, Pirozhkov A S. Review of laser-driven ion sources and their applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2012, 75(5): 056401.
- [41] Wehrenberg C E, McGonegle D, Bolme C, et al. In situ X-ray diffraction measurement of shock-wave-driven twinning and lattice dynamics[J]. Nature, 2017, 550(7677): 496-499.
- [42] Mo M Z, Chen Z, Li R K, et al. Heterogeneous to homogeneous melting transition visualized with ultrafast electron diffraction[J]. Science, 2018, 360(6396): 1451-1455.
- [43] 王宇, 李炯, 张硕, 等. X射线吸收精细结构在材料科学中的应用[J]. 中国材料进展, 2017, 36(3): 188-194.  
Wang Y, Li J, Zhang S, et al. Applications of X-ray absorption fine structure in materials science[J]. Materials China, 2017, 36(3): 188-194.
- [44] Mahieu B, Jourdain N, Ta Phuoc K, et al. Probing warm dense matter using femtosecond X-ray absorption spectroscopy with a laser-produced betatron source[J]. Nature Communications, 2018, 9: 3276.
- [45] Kettle B, Gerstmayr E, Streeter M J V, et al. Single-shot multi-keV X-ray absorption spectroscopy using an ultrashort laser-wakefield accelerator source[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(25): 254801.
- [46] 王沿东, 张哲维, 李时磊, 等. 同步辐射高能 X 射线衍射在材料研究中的应用进展[J]. 中国材料进展, 2017, 36(3): 168-174, 194.  
Wang Y D, Zhang Z W, Li S L, et al. Application of synchrotron-based high-energy X-ray diffraction in materials research[J]. Materials China, 2017, 36(3): 168-174, 194.
- [47] Merano M, Sonderegger S, Crottini A, et al. Probing carrier dynamics in nanostructures by picosecond cathodoluminescence[J]. Nature, 2005, 438(7067): 479-482.
- [48] Li Z, Klein T R, Kim D H, et al. Scalable fabrication of perovskite solar cells[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3: 18017.

#### 约稿专家简介:



戴亚平(1973—), 博士, 研究员/博士生导师, 四川省学术和技术带头人后备人选, 享受国务院政府特殊津贴。1990年考入浙江大学光学电子工程学系光学仪器专业, 1995年毕业。现任中山光子科学中心主任。长期从事激光驱动惯性约束聚变领域高功率激光驱动器技术和精密制靶技术研究工作。曾获国家科学技术进步奖二等奖1项, 省部级科技进步奖一等奖2项。发表论文40余篇, 申请发明专利近20项。E-mail: ypdai@mail.shnc.ac.cn。