

光纤放大网络及其应用研究进展

李宏勋^{1,2}, 张锐¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 激光放大系统通常可分为高峰值功率和高平均功率两大类。近年来出现了越来越多同时需要这两种特性的应用,即要求系统能输出高峰值功率激光,能高效、高重复频率的工作,并具有高能量转化效率。针对不断增长的应用需求,相干放大网络(ICAN)计划基于啁啾脉冲放大、光纤分束放大和相干合束技术解决了高功率激光脉冲在光纤中的非线性损伤等限制功率提升的关键问题,在获得更高能量和峰值功率的同时避免了光纤中非线性效应导致的波形畸变,为突破若干限制高峰值功率、高重复频率脉冲激光系统发展的关键障碍提供了解决途径。光纤放大网络的可定标放大特性为许多新的应用提供了解决方案,如基于激光的粒子加速器、激光驱动核废料处理、地球轨道碎片清理和激光驱动聚变能等。

关键词 激光技术; 光纤放大网络; 相干放大网络; 激光粒子加速器; 核废料处理; 轨道碎片清理

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.010002

Progress of Fiber Amplification Network and Its Application

Li Hongxun^{1,2}, Zhang Rui¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Generally, laser amplification systems can be divided into two types, high peak power laser systems and high average power laser systems. In recent years, there are more and more applications which need the characteristics of the above two systems at the same time. That is to say, the system is required to be able to output high peak power laser and to work efficiently with high repetition frequency, as well as with high energy conversion efficiency. According to the increasing application demand, the coherent amplification network (ICAN) plan solves the key problems limiting power increase, such as nonlinear damage of high power laser pulse in fiber, based on chirped pulse amplification, fiber beam splitting, fiber amplification and coherent beam combination techniques. The waveform distortion caused by the nonlinear effect in fiber is avoided, while the higher energy and peak power are obtained. It offers a solution to break through some key barriers which limit the development of high peak power, high repetition frequency pulse laser system. The scaling amplification characteristics of fiber amplification network provide solutions for many new applications, such as laser-based particle accelerator, laser-driven spent fuel transmutation, orbital debris removal, laser-driven fusion energy and so on.

Key words laser technique; fiber amplification network; coherent amplification network; laser-based particle accelerator; spent fuel transmutation; orbital debris removal

OCIS codes 140.3298; 140.3510; 140.3538; 060.3510

1 引言

超短超强激光装置输出的功率密度超过 10^{21} W/cm² 的激光脉冲使研究人员可以在实验室进行多种高能密度物理研究。目前国际上开展的工作主要有激光驱动离子加速和电子加速、激光核物理、强场下的原

收稿日期: 2016-07-19; **收到修改稿日期:** 2016-09-16; **网络出版日期:** 2016-12-26

作者简介: 李宏勋(1992—),男,硕士研究生,主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: lihongxunku@163.com

导师简介: 张锐(1981—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事高功率激光和光束控制技术方面的研究。

E-mail: zhangrui8s-1@caep.cn(通信联系人)

子分子电离、短脉冲 X 射线源产生等。受上述应用牵引,高功率固体激光技术在过去数十年里得到快速发展,尤其是超短脉冲激光技术。为了获得大能量和高功率,目前主流的技术路线仍基于闪光灯抽运方式,系统能量转换效率和重复频率较低。引入半导体抽运技术后脉冲重复频率可达 10 Hz,能量转换效率可达 10%^[1],但仍处于较低水平。

有许多应用需要激光系统提供高重复频率、高功率的激光脉冲,如基于激光的粒子加速器,为了达到或超过传统加速器的性能,要求激光驱动器具备产生高功率激光、可高重复频率工作的能力,并具有高转化效率。目前已建成的拍瓦激光装置^[2]只有数十瓦的平均功率,电光转化效率也仅有 10^{-4} 。为了产生高平均功率的粒子流,具备实用价值的激光加速器要求脉冲重复频率达到数万赫兹,平均功率达到数十万瓦,电光转化效率大于 20%;用于核废料无害化处理的激光驱动核废料嬗变技术则需要数十焦耳的激光能量,脉宽在 10^{-13} 秒量级,重复频率达数万赫兹。而现有高功率激光装置的能量转换效率和重复频率显然无法满足上述应用需求。

光纤激光器具有高转换效率、可高重复频率工作、可维护性好、负载能力高、光束质量好、运行成本低、使用寿命长等优点,经过数十年的发展,已在通信和工业领域得到广泛应用,并基于这些应用形成了完整产业链,具备大规模工业制造的能力。目前光纤激光器单纤输出的平均功率可达数千瓦,继续提高输出功率将导致多种非线性效应,引起激光脉冲波形、光谱和输出光束质量的劣化,并容易造成光纤和器件的损坏。光纤放大网络(FAN)技术便是为了解决上述问题而被提出。

2006 年 Mourou 等^[3]针对粒子加速的需求提出了基于啁啾脉冲放大和脉冲相干合成技术的相干放大网络(CAN)概念。2008 年 Labaune 等^[4]进一步提出了基于 CAN 和 FAN 的惯性约束聚变激光驱动器方案。FAN 具有高能量转换效率、可高重复频率工作等优点,可大幅提高激光装置的运行效率,简化维护工作,便于工业化制造,从而实现传统激光装置“效率瓶颈”和“运行体制瓶颈”的突破。

本文系统地介绍了 FAN 的工作原理、总体架构及各部分的作用,并对其涉及的关键技术、主要应用方向及发展前景等进行了讨论。

2 FAN 的原理、关键技术及研究进展

2.1 FAN 的研究背景

按目前几小时打一发的重复频率来算,现有高功率固体激光驱动器的平均功率仅达十瓦级,对于粒子加速等应用来说过低。为获得与传统粒子加速器相当或超出其性能的激光加速器,激光驱动器必须高效地产生高重复频率(数万赫兹)、高平均功率(数十万瓦)的高功率激光脉冲。

传统激光器采用的棒状增益介质有效散热面积有限,大量热量不能散发,介质中心产生高温,易导致热透镜效应和热致双折射效应^[5],从而造成材料损坏和光束质量下降,使平均功率难以提升。为解决上述问题,高重复频率激光系统的增益介质采用片状结构和光纤结构,可以认为它们是由棒状结构向横向、纵向拓展得到的,两种结构均提高了介质的表面积体积比,增加了有效散热面积,从而使介质散热性能得到提升^[5]。片状结构侧重于降低光束功率密度,光纤结构侧重于增加抽运吸收距离和实现基横模约束。

由于光纤掺杂的种类和浓度不同,其吸收系数也不同。根据不同的吸收系数和抽运波长,增益光纤可达几十米,从而实现抽运光的充分吸收,提高能量转化效率。光纤易于盘绕的特性使系统更为紧凑,提高了系统的灵活性。由于抽运吸收距离较长,系统的散热性能得到改善。此外,光纤激光系统便于集成,使系统的集成度和模块化得到极大提高,体积大幅缩小,便于实现系统的在线可替换和低成本维护^[6],在大量体积受限制的应用中具有明显优势。

高功率、高能量脉冲光纤激光器在过去十多年里得到极大发展,其功率的迅速提升得益于大模场光纤放大技术的发展,尤其是大模场光子晶体光纤(PCF)的设计和制造技术^[6]。通过对 PCF 的结构进行优化设计,可得到基横模、大模场光纤,使输出激光具有高光束质量、高功率的优势^[7]。目前通过对纳秒级激光脉冲放大实现了数毫焦、数兆瓦的近衍射极限输出,受光纤限制,其性能已逐步接近极限。在高功率运转下,非线性效应成为进一步提升功率和单脉冲能量的主要限制因素,尤其是自聚焦效应。近期来看,大幅提升脉冲光纤激光系统输出能量和功率水平最有希望的方式是光纤组束。

对于以实现商业聚变能源应用为目标的第三代高功率固体激光驱动器,用二极管激光器替代高废热的氙灯作为抽运源已成为发展趋势,可实现高电光转化效率、重复频率运转和高可靠性。受不断增长的工业需求推动,用于光纤激光器的尾纤输出二极管激光抽运技术日趋成熟,其价格也不断下降。

基于上述工业基础和物理应用需求,2006年 Mourou 等^[3]提出了 CAN 的概念,建议紧凑型直线对撞机 (CLIC) 的激光驱动器不再使用类似美国国家点火装置 (NIF) 的大口径钕玻璃激光装置,而是大量使用相同的光纤激光放大模块。CLIC 要求将电子加速至 1.5×10^{12} eV 的能量,若采用传统的加速器技术,加速器长度将达到 40 km^[8],工程难度大,造价极高;但若采用激光等离子体加速技术,加速长度有望缩短至数十米,将大幅降低造价。2013 年该方案已发展成为国际光纤相干放大网络 (ICAN) 计划。

FAN 与 CAN 在结构上相似,都是由光纤器件构成的网络状分束放大激光系统。CAN 从种子光源产生一个或多个相互关联的脉冲,经过脉冲展宽、多级分束、传输、放大和脉冲压缩得到多束锁相输出的激光脉冲;FAN 多级分束前没有脉冲展宽,放大后没有脉冲压缩,其他过程与 CAN 相同。因此在强调系统的光纤分束放大结构时,可以将 FAN 和 CAN 统称为光纤放大网络。

2.2 FAN 的工作原理

图 1 为 ICAN 的光路示意图^[9],其工作过程为^[10]:锁模激光器产生一个脉冲宽度极窄的种子脉冲,通过一对衍射光栅后在时域上得到展宽;利用光纤分束器将经过展宽的激光脉冲耦合进多级单模光纤放大器中,每个光纤放大器可将输入脉冲放大至毫焦耳级,为第一级放大阶段;将一级放大激光脉冲再次分束耦合进多级光纤放大器中;放大后的脉冲通过相干组束,经光栅压缩后峰值功率得到极大提升;将光束经透镜或抛物面镜聚焦后得到功率密度极高的短脉冲。以图 1 所示的具体参数为例,振荡器产生 30 fs 的短脉冲,单脉冲能量为 30 nJ;通过预放大和展宽后脉冲宽度变为原来的 10^5 倍,单脉冲能量提升到毫焦耳量级;经过分束后,单脉冲能量大大降低,减小了光纤非线性效应的影响;通过多级放大、组束、脉冲压缩后,脉冲宽度恢复为 30 fs,单脉冲能量提升至 30 J,峰值功率提升了 10^9 倍^[9],达到 10^{15} W/cm²,即拍瓦级。利用光纤分束器和多级光纤放大器进行分束和独立放大,可改善系统的散热性能,从而大幅提高拍瓦激光系统的脉冲重复频率。

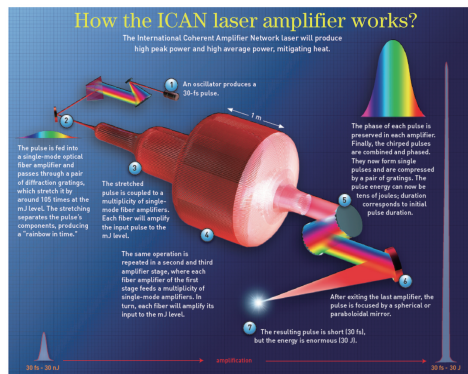


图 1 ICAN 激光系统工作原理示意图^[9]

Fig. 1 Schematic of working principle of ICAN laser system^[9]

2008 年 Labaune 等^[4]进一步提出了基于 CAN 和 FAN 的惯性约束聚变激光驱动器方案,如图 2(a)所示。图中 FA 为光纤放大器,AOM 为声光调制器,PC 为 Pockels 盒。为了充分利用多束光纤靶面均匀辐照的优势和 CAN 可产生高峰值功率激光的特点,降低所需的激光驱动器能量,Mourou 等^[11]选择了直接驱动加热点火方式,多束光纤耦合进靶室时的示意图如图 2(b)所示,其中纳秒级压缩脉冲能量约为 200 kJ,脉冲宽度为数纳秒;快点火脉冲能量约为 100 kJ,脉冲宽度为数皮秒。以当前光纤激光器的脉冲输出能力为例,假设单根光纤输出能量为 10 mJ,则所需光纤总数约 3×10^7 根。利用多级光纤耦合器来实现单一输入光束到甚多束输出光束的高效分束,分束带来的损耗由各分束级间的光纤放大器来补偿。每路均具有相同的模块,整个系统的模块化和可维护性大幅提升。

图 3 为基于 FAN 的高功率脉冲光纤激光系统的总体架构。激光链路可分为 6 大子系统^[12],即脉冲产生、分束预放、主放、组束、频率转换、束靶耦合系统。辅助系统包括模拟控制、参数测量、环境控制系统等,能

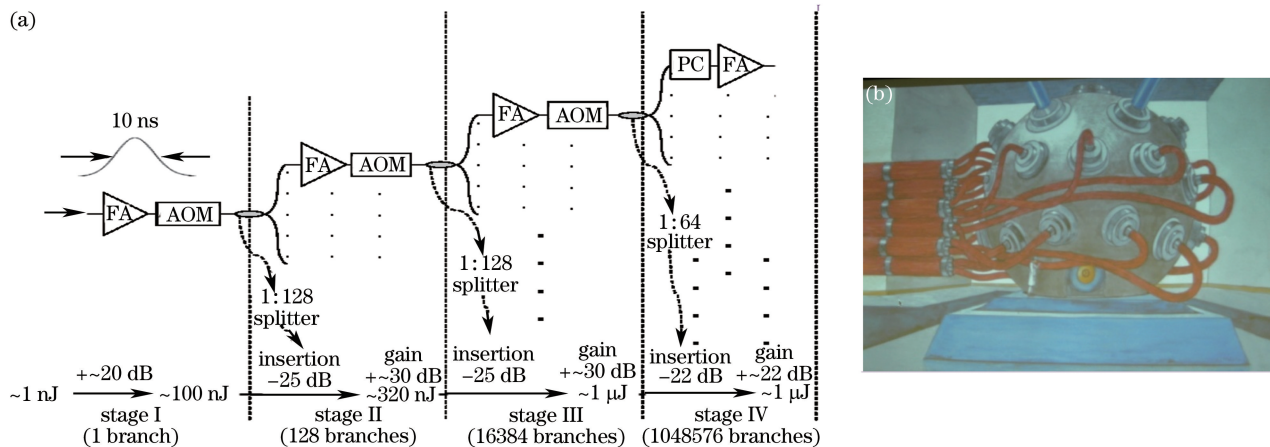


图 2 (a) FAN 分束放大方式原理图^[4]; (b) 甚多束光纤耦合进靶室时的示意图^[11]

Fig. 2 (a) Schematic of beam splitting method of FAN^[4]; (b) schematic of fibers coupling into the target chamber^[11]

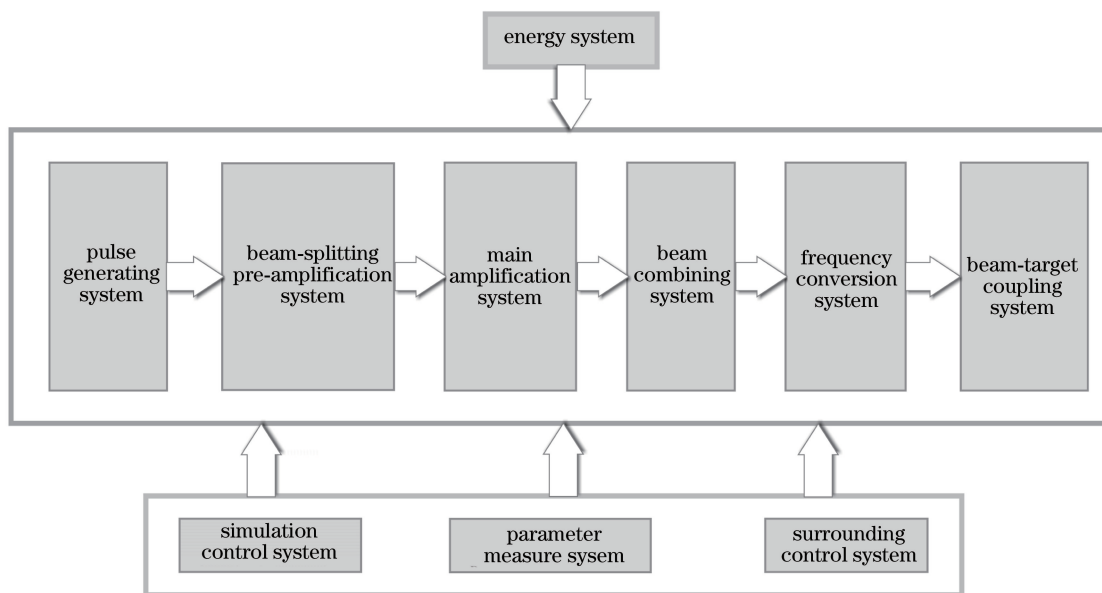


图 3 基于 FAN 的光纤激光系统总体架构^[12]

Fig. 3 Overall framework of fiber laser system based on FAN^[12]

源系统为整个装置提供能量。

图 3 中脉冲产生系统负责产生特定重复频率、频谱和时间特性的种子脉冲信号;分束预放系统负责将种子脉冲进行脉冲展宽(CAN 中有该功能要求),并通过多级分束将展宽的脉冲等分为甚多束,每束均提供适当的增益。系统要求的总能量与单根光纤输出的能量之比就是分束数量。主放系统由甚多路多级光纤放大器构成,能量从纳焦耳级提升到毫焦耳级,提升倍率约为 10^7 ,是整个系统能量提升的关键。每级放大器由增益光纤、抽运耦合器、抽运源、时域和谱域滤波器及级间隔离器等构成,并形成标准的在线可替换模块;组束系统将甚多束激光脉冲通过组束方式获得多个集束,再将合成光束进行脉冲压缩(CAN 中有该功能要求);频率转换系统通过非线性晶体将基频光转换为二倍频或三倍频光,从而满足靶物理对激光波长的要求。对快点火和激光驱动粒子加速等应用,需要增加脉冲压缩系统而无需使用频率转换系统。束靶耦合系统将经过组束系统和频率转换系统(或脉冲压缩系统)输出的激光经过空间光学耦合系统高效而均匀地辐照在靶上,以实现相应的物理目标。

2.3 FAN 的关键技术及其研究进展

由 FAN 的总体架构可知,FAN 主要包含如下关键技术:相干合束、啁啾脉冲放大、光纤分束、大能量光

纤放大、甚多束光纤靶面均匀辐照技术等。

相干放大网络中采用的合束技术是相干合束技术(CBC),能够实现光束功率的倍增,但要求对所有光纤输出激光的相位进行精确控制,因此甚多束光纤激光输出超短脉冲的相干合束问题是 CAN 所面临的主要挑战。CBC 要求对相位进行锁定,主要通过控制具有相同工作波长的阵列单元的相位,将矢量光场合成,得到多束光波的相干合成。通常采用主动锁相技术,主要有自适应、外差、自参考锁相等。具体工作过程为:通过诊断系统检测输出波前相位,进行一系列的模拟计算后,将结果经由闭环反馈系统传递到高速相位调制器,对波前相位进行调制,即对每一路激光的相位进行不同程度的超前或滞后补偿,从而实现各路光束的相位锁定,保证所有光纤同相输出,达到相干合束的目的。

国外方面,2011 年美国林肯实验室的 Yu 等^[13]报道了对 8 路光纤放大阵列进行主动相位控制的相干合成,效率大于 78%,合成后光束质量约为 1.25 倍衍射极限;2012 年 Redmond 等^[14]采用锁相衍射光学器件(DOE)合成方法实现了 1.9 kW 的基模高斯激光输出,合成效率高于 80%。2014 年法国的 Antier 等^[15]基于一种新结构实现了 16 根光纤的相干合成,在采样频率千赫兹领域实现了相位的主动控制,剩余相位误差的均方根值为 $\lambda/20$,集中在主瓣内的功率达到理论值的 84%。其特点是采用高速 CCD 相机记录的干涉条纹作为反馈条件来提取所有光纤输出的相位信息,其原理示意图如图 4 所示。采用这种技术时,能够合成的光纤数目取决于每根光束所能分配到的相机像素和相干条纹分析所需要的像素数。

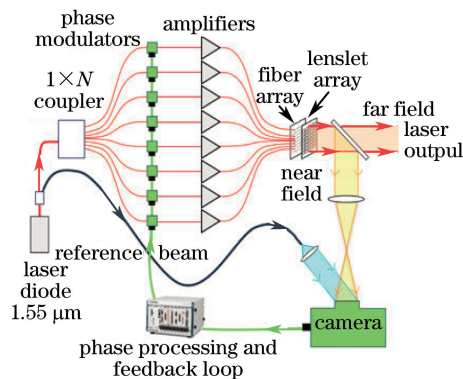


图 4 基于干涉测量技术的相干合成原理示意图^[15]

Fig. 4 Schematic of coherent beam combination based on interferometry technique^[15]

国内方面,2011 年中国科学院上海光学精密机械研究所的周军等^[16]对高功率光纤激光的被动 CBC 进行了理论和实验研究,建立了 4 路和 8 路高功率光纤放大器的相干合束系统,并分别实现了 1062 W 和 1060 W 的相干耦合激光输出。2013 年中国工程物理研究院的黄智蒙等^[17]用非保偏光纤实现了偏振主动控制,为非保偏光纤实现相干合成提供了条件;2014 年黄智蒙等^[18]设计制作了高速随机并行梯度下降(SPGD)算法控制器,实现了 5 路和 10 路光纤阵列的主动锁相。2014 年国防科学技术大学的杨保来等^[19]开展了全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成研究,实现了 4 路光纤激光的全光纤被动锁相相干合成。2014 年中国工程物理研究院的母杰等^[20]研究了相干合成中基于 SPGD 算法的平移误差和倾斜误差的控制问题,结果表明,要提高相干合成的效果,必须同时校正平移误差和倾斜误差。2015 年母杰等^[21]讨论了高功率激光装置中波前畸变对相干合成的影响,根据高功率激光装置中波前畸变分段的特点,提出通过构造不同频段的波前畸变来研究相干合成结果与波前畸变之间的关系。2016 年国防科学技术大学的马鹏飞等^[22]基于主动锁相相干偏振合成系统,实现了 4 路 500 W 级全光纤窄线宽保偏放大器的共孔径合成输出,输出功率为 2164 W,合成效率为 94.5%。

啁啾脉冲放大(CPA)技术三十年来已得到飞速发展和广泛应用,成为获得高峰值功率激光的主要手段之一,其核心思想为利用啁啾脉冲展宽和压缩技术实现脉冲展宽和放大后的压缩。在 CPA 技术的基础上,又发展出了光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术。采用上述技术目前已能获得数拍瓦激光,能量和峰值功率进一步提高的主要技术瓶颈在于大口径高损伤阈值脉冲压缩光栅的研制。近年来,为解决 CPA 和 OPCPA 中光栅负载受限的问题,2012 年 Mourou 等^[23]提出了基于背向拉曼放大(BRA)、CPA、OPCPA 实现脉冲级联转换压缩(C3)的方案。相比于传统 CPA 技术,BRA 显著的优点是无需光栅,激光可在成丝不稳定发展起

来之前完成脉冲放大和压缩。但该技术以等离子体为放大媒介,存在大量非线性和动力学效应,影响 BRA 的激光放大输出性能和能量转换效率,需要进行相应的精确控制。

在 CAN 中需要采用光纤分束技术。目前光纤分束器主要有熔融拉锥型(FBT)和平面光波导型(PLC)两种。FBT 是最常采用的分束器,通过设定加热场温度、加热区域范围、拉伸长度、拉伸速度等参数,可制备各种不同分光比的分束器,制作器件的原材料价格便宜且容易获得。PLC 采用半导体工艺(显影、光刻、腐蚀等)制造,能够在芯片上实现分束功能。与 FBT 相比,PLC 技术复杂、成本高,但是其结构紧凑、易集成、损耗低,且受波长影响小,能实现甚多路分束,且分配均匀。

FAN 的主放大阶段涉及大量的毫焦耳级光纤放大器。为了实现相干合束,要求各光纤均输出高质量光束。在短脉冲技术方面,2010 年德国 Jena 大学的 Eidam 等^[24]利用 CPA 技术得到了高平均功率的超短脉冲输出,平均功率为 830 W,重复频率为 78 MHz,脉冲宽度为 640 fs。2011 年 Eidam 等^[25]实现了峰值功率为 3.8 GW、脉冲宽度为 500 fs、单脉冲能量为 2.2 mJ 的激光输出。在纳秒脉冲放大方面,2005 年美国密歇根大学的 Cheng 等^[26]采用纤芯直径为 200 μm 的多模光纤获得了单脉冲能量为 82 mJ 的输出,脉冲宽度为 500 ns。2006 年 Cheng 等^[27]利用纤芯直径为 80 μm 的大模场 PCF,实现了光束质量因子 $M^2 = 1.3$ 的近衍射极限输出,单脉冲能量达到 7 mJ,重复频率为 50 Hz。2012 年德国 Jena 应用物理研究所的 Stutzki 等^[28]对调 Q 产生的脉冲宽度为 60 ns、重复频率为 5 kHz 的激光脉冲进行放大,得到单脉冲能量为 26 mJ、峰值功率为 500 kW、光束质量因子为 1.3 的激光输出,系统中主放大阶段采用的 PCF 纤芯直径为 135 μm 。

本课题组近年来对基于 FAN 的波导激光驱动器进行了理论研究。提出了结合甚多束光纤光谱共孔径合成、偏振共孔径合成、靶面合成的总体技术路线,以实现 FAN 的数兆焦耳输出和靶面均匀辐照,并将单根光纤输出能力的要求降到目前可实现的毫焦耳量级。在此基础上,以获得高光束质量、高重复频率输出的单纤链路为目标,开展了单模毫焦耳级光纤激光放大实验研究,获得了全光纤、单横模、基模、1.06 mJ(10 ns)的激光脉冲输出。搭建了光束质量因子优于 1.3、脉冲对比度优于 500:1 的高对比度整形脉冲毫焦耳级单纤实验演示平台,实现了光纤系统高光束质量、2.5 mJ(10 ns)输出,系统光路示意图如图 5 所示,图 5 中 DFB 为分布反馈式激光器,POS 为稳偏器,AMP 为放大器,AM 为幅度调制器,PM 为相位调制器,AWG 为任意波形发生器,DM 为双色镜,P 为偏振片,L 为透镜,M 为反射镜。建立了高功率阵列光纤集束的理论模型,并搭建了实验研究平台,开展了 9 芯、19 芯阵列光纤的集束实验研究,为实现 FAN 合束输出奠定了理论和实验基础。

此外,清华大学的 Zhang 等^[29-30]实现了百毫焦耳光纤放大输出,并开展了对部分相干光和相干光单纤

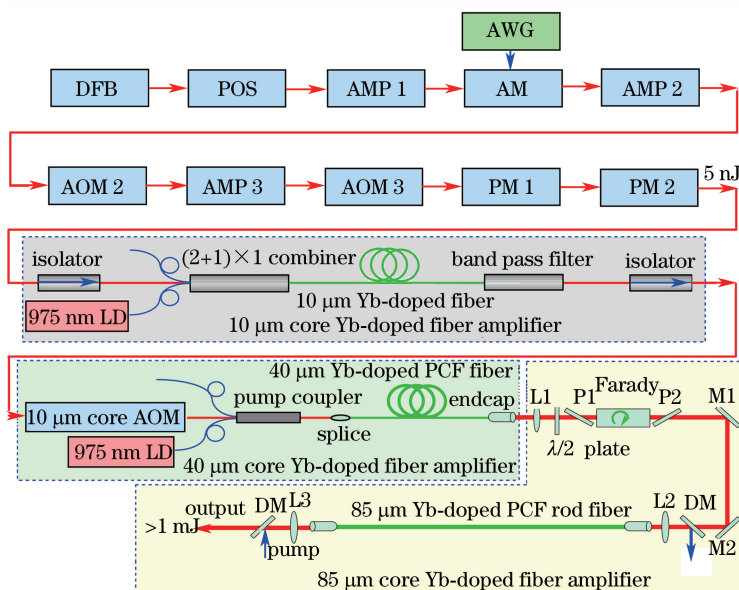


图 5 毫焦耳级光纤放大系统光路示意图

Fig. 5 Schematic of fiber amplification system with millijoule level output

提取效率、损伤与自聚焦、受激布里渊散射、受激拉曼散射和自相位调制等制约光纤输出能力因素的评估。中国科学院上海光学精密机械研究所的 Du 等^[31]研究了大模场 PCF 的制备方法,开展了基于国产光子晶体光纤的放大系统研究。在甚多束光纤靶面均匀辐照技术方面,中国科学技术大学的 Xu 等^[32]提出了一种甚多束激光驱动 ICF 的光束优化自适应排布方法,可获得比传统设计方法更优的靶面辐照均匀性。从靶物理需求出发,利用排布优化计算推导出对光纤数量、排布方式、光纤集束光场的基本要求。

3 FAN 应用概述

3.1 激光驱动粒子加速技术

粒子加速器是研究粒子物理最有效的方法之一。根据量子场论,不同种类的粒子可以相互转化,因此对撞之后有可能探测到与入射种类不同的粒子。对撞的粒子能量越高,产生更复杂粒子和新粒子的可能性越大,这促使加速器物理向能量越来越高的方向发展。

现代加速器中粒子是在电磁场中加速的,因此实验粒子必须是带电的,通常为电子、质子或离子。用激光加速粒子时,使电子达到相对论运动状态需要的激光强度高达 10^{18} W/cm²,而使离子达到该状态则需要激光强度高达 10^{22} W/cm²^[33]。在正负电子对撞机中若要求电子达到 10×10^9 eV,则需要兆瓦级(13 kHz, 拍瓦级峰值功率)的平均功率^[34]。ICAN 计划提供了一种能够满足粒子加速技术高功率、高平均功率要求的方案。CAN 系统不仅对基础物理的探索有着重要意义,对相对论运动状态的离子源、中子源、光核物理和天体物理等研究均有重要的推动作用^[35]。

CAN 系统可置于一个中子源的前端,用于驱动加速器。利用加速器可产生相对论运动状态的质子,质子在达到相对论状态之前的传输距离(几百米)较长时会受损,即由于稳定性的问题,质子流在相对论运动状态下很难维持。利用激光驱动质子加速可在毫米以下的传输距离达到相对论运动状态,从而解决这一问题^[36]。

CAN 系统还可应用于激光驱动核嬗变。图 6 为 ICAN 激光系统用于核废料转化的示意图^[36],图中通过 ICAN 激光聚焦产生 10^{23} W/cm² 的功率密度,以 10 kHz 的重复频率打靶通过相对论质子加速(RPA)产生高能质子束流;使质子束流入射到高 Z 液体靶,产生散裂中子,用产生的中子轰击用过的核燃料,将较重的、半衰期较长的原子转化为较轻的、半衰期较短的原子^[37]。该技术可应用于核废料处理,它比传统方法更简洁有效、成本更低^[38]。

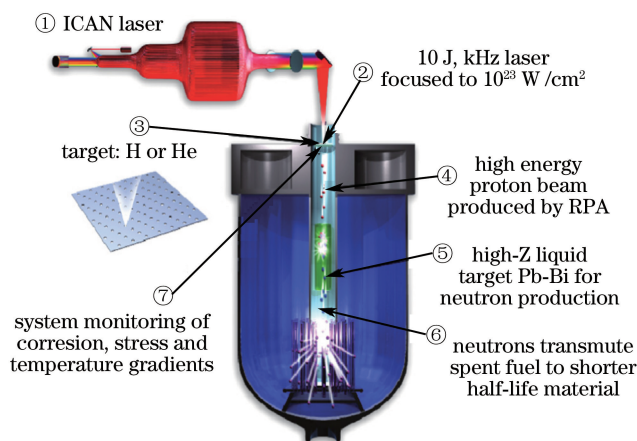


图 6 ICAN 激光系统用于核废料转化示意图^[36]

Fig. 6 Schematic of ICAN laser system applied to spent fuel transmutation^[36]

CAN 系统还可用于驱动特定能量的伽马光子流,经由激光产生康普顿散射,这在核医学领域有重要的价值。核共振荧光可用来远程诊断核材料的存在或缺失、检测出未被发现的核物质,在核废料再加工工厂中还可用于诊断放射性同位素。基于 CAN 的激光系统由于具备高能量转换效率、高脉冲重复频率、大能量等特点在这些方面具有极大优势^[39-40]。

2013年诺贝尔物理学奖授予了物理学家弗朗索瓦·恩格勒和彼得·希格斯。两位科学家描述了粒子物理学的标准模型,并预测了一种基本粒子——希格斯玻色子的存在。欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)^[41]作为该粒子发现的重要工具成为了关注的焦点。粒子加速需要非常大的能量,因此LHC的结构相当庞大。基于CAN系统的粒子加速技术可用于产生希格斯(Higgs)波色子。在各种各样的Higgs玻色子产生方法构想中,利用光子对撞比电子对撞有利,因为光子对撞需要的能量比电子对撞低。光子对撞基于康普顿散射,将低能光子流射入高能电子流中,产生的高能光子流背向散射可用于光子对撞。

3.2 FAN 用于空间碎片清理

在50多年的航空史中有超过 3×10^7 kg的卫星和火箭被送往太空。据估算有 3×10^6 kg的无用太空垃圾分布在近地轨道上^[42],包括火箭残骸和完整的卫星,它们的轨道速度很快,可能会对国际空间站和卫星造成毁灭性损坏。

大多数航天器可有效防护尺寸小于1 cm的空间碎片,对于尺寸大于10 cm的物体可通过航天器的防撞规避操作来减免撞击^[43]。尺寸在1~10 cm的空间碎片对航天器最具威胁,是激光空间碎片清理的主要目标。根据如图7(a)所示的地球附近空间碎片分布情况,可知在该尺寸范围内的太空碎片主要集中在距地面800 km的近地轨道上;图7(b)为利用激光烧蚀太空碎片的表面,将太空碎片移除方法的示意图。只要碎片轨道速度充分降低,碎片将由高海拔轨道向低海拔轨道运动,经过近地点进入大气层后就会被烧蚀而消除。对于激光空间碎片的清理,关键是要求碎片速度改变量足够大,这就需要激光系统有足够强的脉冲能量。在800 km的轨道上10 cm的太空碎片需要的速度改变量约为194 m/s,对应的激光能量为690 kJ^[44]。

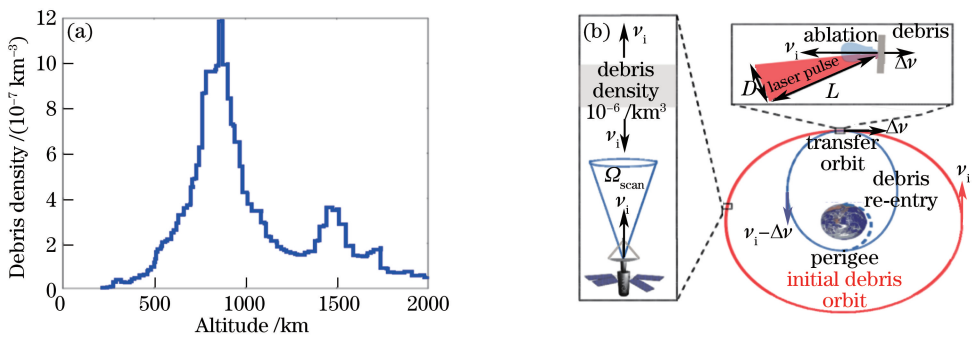


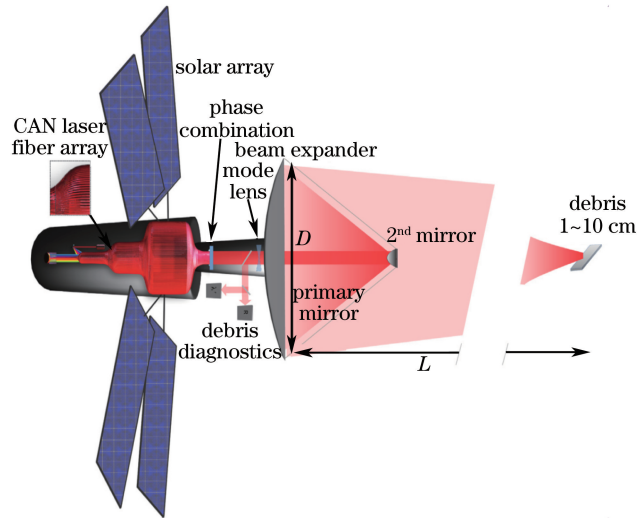
图7 (a) 太空垃圾随海拔高度的分布;(b) 激光移除太空垃圾的工作原理示意图^[43]

Fig. 7 (a) Distribution of space debris versus altitude; (b) schematic of working principle of space debris removal by laser^[43]

早在20世纪80年代末,就有人认为可以利用激光脉冲清理太空垃圾。2014年Soulard等^[43]提出将CAN系统搭载于国际空间站或者卫星上,由搭载平台上的太阳能电池板提供清除太空垃圾的能量。2015年Ebisuzaki等^[45]给出了将国际空间站作为空间碎片清理激光测试平台的详细方案。相比地基激光系统,天基激光系统输出激光无需长传输距离,减小了光束能量的损耗,并且太空中可避免大气湍流对激光光束质量的影响,有较大优势。由CAN系统产生的高能激光脉冲经过一系列光学装置,最终聚焦于空间碎片上,实现对空间碎片的清除。该系统还有一套反馈诊断装置,可通过不断改变球面镜方向使扩束光在太空中进行扫描。扫描到碎片时,碎片表面的反射光被系统收集,并经由诊断装置进行信息处理,从而实现对碎片的超广角扫描和精确定位,其结构示意图如图8所示。

3.3 基于FAN的波导激光驱动器

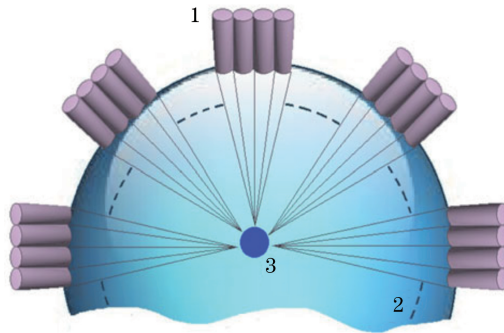
为实现惯性约束核聚变,许多国家进行了大量研究,建立了多个大型高功率激光驱动装置。目前,多台新的、输出能力更强的高功率激光装置正在规划和研制中。基于技术差异,这些装置可以分为三代:第一代以美国的NOVA装置为代表,主要技术特征为圆光束、单口径、主振荡功率放大(MOPA)技术路线、分离式器件、较低通量、较低效率;第二代以NIF为代表,主要技术特征为方形光束、组合口径、多程放大技术路线、模块化结构、较高通量、较高效率;第三代以美国的生活和欧洲的HiPER为代表,主要技术特征为用半导体激光器替代氙灯作为抽运源,效率和重复频率更高。

图 8 用于太空碎片清理的天基 CAN 系统结构示意图^[43]Fig. 8 Structure schematic of space-based CAN system for space debris removal^[43]

激光驱动核聚变需要极高的脉冲能量,并要求对靶丸进行高度均匀的压缩^[46]。基于 FAN 的波导激光驱动器属于第三代高功率激光装置,效率更高,且可高重复频率工作,从而可大幅缩短系统准直、打靶波形生成、功率平衡调节所需的时间。单根光纤免维护使驱动器的整体维护更加容易,光纤、光纤器件、LD 抽运激光器的可工业化和大规模制造的特点可降低整个波导激光驱动器的建造和运行成本。

利用 CAN 系统可实现固体燃料的聚变点火^[47]。基于 CAN 的激光装置具有发射高于 900 PW 球型激光脉冲的潜力,可在无放射性辐射危险的状态下点燃¹¹B(HB11)质子反应,实现激光驱动核聚变。该方案基于啁啾脉冲放大技术,采用脉冲宽度短于 1 ps、峰值功率为数百拍瓦至艾瓦(10^{18} W)的激光脉冲均匀辐照固体靶丸。该方案的优点是不产生有害的放射性辐射,不产生中子,可应用于清洁的聚变能发电。HB11 反应是首次实现不产生中子的核反应,这是采用氘氚材料作为靶丸的聚变(简称 DT 聚变)所不具备的,也是 HB11 反应最重要的优点。DT 聚变所产生的中子经过 12 min 的半衰期会转变为质子和电子并产生水,但在这之前,中子会与稳定的核子反应,产生大量的放射性。

在 CAN 系统中激光脉冲经过多级放大后,令光纤的输出端口紧紧围绕在一个直径约为 2 m 的球型表面,脉冲输出方向指向球心^[48],系统聚焦打靶的示意图如图 9 所示。

图 9 光纤相干放大网络直接驱动打靶的示意图^[48]Fig. 9 Schematic of direct driven target-shooting by fiber coherent amplification network^[48]

激光脉冲经过球形表面后转化为会聚的脉冲球面波,之后聚焦在靶丸位置。每个脉冲球面波的脉冲宽度为 1 ps,峰值功率可达艾瓦量级^[48]。在球心处放置的反应堆芯(HB11 燃料)将会受到高能激光脉冲在 4π 立体角内的均匀辐照,形成高温高压等离子体,利用反冲压力使靶外壳作向心运动,使靶丸压缩,实现核聚变。

3.4 FAN 的其他潜在应用方向

在科学研究领域,FAN 还可应用于极端光设施(ELI)和国际泽瓦-艾瓦科学技术中心(简称 IZEST)的相

关研究,进而用于创造强辐射场、非线性量子电动力学现象研究、与基础物理学和天体物理学相关的物理过程的研究。

在医学、材料加工、缺陷无损探测等领域,FAN 也具有广泛的应用潜力,如激光驱动离子的强子肿瘤疗法;将激光加速获得的高能电子通过波荡器得到的 X 射线用于生命科学和材料科学中的诊断;基于 FAN 的不同材料、孔加工深度需要的激光功率不同。高重复频率超短脉冲光纤激光系统可用于多种目前加工手段无法实现的超大深径比微细孔和结构件的加工;通过与物质相互作用产生的高重复频率 X 射线源可作为新型可移动激光加载平台,可对大型材料中的缺陷结构进行无损探测,对核电站产生的物质进行探测和管理,对封装好的或运输容器中的易爆物质进行无损探测等。

4 结 论

FAN 充分吸纳了光纤激光和高峰值功率激光多年来发展所积累的关键技术,解决了传统激光器和放大器能量转换效率低、重复频率低的问题。基于啁啾脉冲放大技术和光纤分束放大技术,在大幅提高全系统输出能量和峰值功率的同时解决了单根光纤在高功率下的非线性损伤问题,为得到可高重复频率工作的高峰值功率激光系统提供了一种可行的解决方案。FAN 系统便于实现高度的模块化和大规模工业化生产,使将光纤激光应用于粒子加速、核废料处理、空间碎片清理和惯性约束聚变能等具备了可行性。

参 考 文 献

- [1] Soulard R, Quinn M N, Mourou G. Design and properties of a coherent amplifying network laser[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4640-4645.
- [2] Danson C, Hillier D, Hopps N, *et al.* Petawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2015, 3(1): e3.
- [3] Mourou G A, Hulin D, Galvanauskas A. The road to high peak power and high average power lasers: Coherent-amplification-network (CAN) [C]. *Superstrong Fields in Plasmas: Third International Conference on Superstrong Fields in Plasmas*, 2006, 827(1): 152-163.
- [4] Labaune C, Hulin D, Galvanauskas A, *et al.* On the feasibility of a fiber-based inertial fusion laser driver[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(15): 4075-4080.
- [5] Tünnermann A, Schreiber T, Limpert J. Fiber lasers and amplifiers: An ultrafast performance evolution[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): F71-F78.
- [6] Brooks C D, Di Teodoro F. High peak power operation and harmonic generation of a single-polarization, Yb-doped photonic crystal fiber amplifier[J]. *Optics Communications*, 2007, 280(2): 424-430.
- [7] Röser F, Eidam T, Rothhardt J, *et al.* Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3495-3497.
- [8] Zhang Chuang. Frontiers of particle accelerators in the world[J]. *Physics*, 2008, 37(5): 289-297.
张 闯. 国际粒子加速器的前沿[J]. *物理*, 2008, 37(5): 289-297.
- [9] Tajima T, Brocklesby W S, Mourou G, *et al.* ICAN: The next laser powerhouse[J]. *Optics & Photonics News*, 2013, 24(5): 36-43.
- [10] Brocklesby W S, Nilsson J, Schreiber T, *et al.* ICAN as a new laser paradigm for high energy, high average power femtosecond pulses[J]. *European Physical Journal Special Topics*, 2014, 223(6): 1189-1195.
- [11] Mourou G A, Labaune C, Hulin D, *et al.* New amplifying laser concept for inertial fusion driver [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 112(3): 032052.
- [12] Huang Zhihua. The laser coupling and beam evolution of the fiber-based high-energy high-power pulsed laser system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
黄志华. 高能高功率脉冲光纤激光系统的束靶耦合与传输放大[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [13] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, *et al.* Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [14] Redmond S M, Ripin D J, Yu C X, *et al.* Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW

- Gaussian beam[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2832-2834.
- [15] Antier M, Bourderionnet J, Larat C, *et al.* kHz closed loop interferometric technique for coherent fiber beam combining[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 182-187.
- [16] Zhou Jun, He Bing, Xue Yuhao, *et al.* Study on passive coherent beam combination technology of high power fiber laser arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900129.
周 军, 何 兵, 薛宇豪, 等. 高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900129.
- [17] Huang Z M, Liu C L, Li J F, *et al.* Fiber polarization control based on a fast locating algorithm[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(27): 6663-6668.
- [18] Huang Zhimeng. Research on active phase locking and adaptive polarization control technology of fiber lasers[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2014.
黄智蒙. 光纤激光主动相位与偏振自适应控制技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014.
- [19] Yang Baolai, Wang Xiaolin, Zhou Pu, *et al.* Research of all-fiber laser coherent combing system based on fiber-loop [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1005001.
杨保来, 王小林, 周 朴, 等. 全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1005001.
- [20] Mu Jie, Jing Feng, Wang Xiao, *et al.* Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0602002.
母 杰, 景 峰, 王 道, 等. 相干合成中基于 SPGD 算法的平移误差和倾斜误差控制[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0602002.
- [21] Mu Jie, Wang Xiao, Jing Feng, *et al.* Effect of wavefront distortion on coherent beam combination in high-power laser facilities[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0602010.
母 杰, 王 道, 景 峰, 等. 高功率激光装置中波前畸变对相干合成的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602010.
- [22] Ma Pengfei, Wang Xiaolin, Su Rongtao, *et al.* Coherent polarization beam combining of fiber lasers to 2 kW power level[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(4): 040102.
马鹏飞, 王小林, 粟荣涛, 等. 2 kW 级光纤激光相干偏振合成[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(4): 040102.
- [23] Mourou G A, Fisch N J, Malkin V M, *et al.* Exawatt-Zettawatt pulse generation and applications [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(5): 720-724.
- [24] Eidam T, Hanf S, Seise E, *et al.* Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(2): 94-96.
- [25] Eidam T, Rothhardt J, Stutzki F, *et al.* Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power[J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 255-260.
- [26] Cheng M Y, Chang Y C, Galvanauskas A, *et al.* High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200 μm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(4): 358-360.
- [27] Cheng M Y, Hou K C, Galvanauskas A, *et al.* High average power generation of single-transverse mode MW-peak power pulses using 80 μm core Yb-doped LMA fibers [C]. *Conference on Lasers & Electro-optics & Quantum Electronics & Laser Science Conference*, 2006, CThAA: CThAA3.
- [28] Stutzki F, Jansen F, Liem A, *et al.* 26 mJ, 130 W Q-switched fiber-laser system with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1073-1075.
- [29] Zhang H T, Shen X L, Chen D, *et al.* High energy and high peak power nanosecond pulses generated by fiber amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(22): 2295-2298.
- [30] Shen X L, Zhang H T, He H, *et al.* Self-phase modulation of nanosecond pulses in fiber amplifiers with gain saturation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4382-4390.
- [31] Du S T, Wang Z W, Wang Z K, *et al.* All fiber high average power nanosecond laser based on core diameter adjustment[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(9): 091402.
- [32] Xu T, Xu L X, Wang A T, *et al.* Optimization of beam configuration in laser fusion based on the laser beam pattern [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(12): 122702.
- [33] Esirkepov T, Borghesi M, Bulanov S V, *et al.* Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(17): 175003.

- [34] Leemans W, Chou W, Uesaka M. White paper of the ICFA-ICUIL joint task force: High power laser technology for accelerators[J]. ICFA Beam Dynamics Newsletter, 2011, 56: 10-87.
- [35] Li Yutong, Liao Guoqian, Zhao Gang, *et al.* Progress and prospects of high energy density physics driven by intense lasers[J]. Science China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2013, 43(7): 795-809.
李玉同, 廖国前, 赵刚, 等. 强激光高能量密度物理的若干进展和展望[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2013, 43(7): 795-809.
- [36] Mourou G, Tajima T, Quinn M N, *et al.* Are fiber-based lasers the future of accelerators?[J]. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, 2014, 740(4): 17-20.
- [37] Gales S. Laser driven nuclear science and applications: The need of high efficiency, high power and high repetition rate laser beams[J]. European Physical Journal Special Topics, 2015, 224(13): 2631-2637.
- [38] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, *et al.* The future is fibre accelerators[J]. Nature Photonics, 2013, 7(4): 258-261.
- [39] Bychenkov V Y, Brantov A V. Laser-based ion sources for medical applications[J]. European Physical Journal Special Topics, 2015, 224(13): 2621-2624.
- [40] Mourou G, Tajima T. Summary of the IZEST science and aspiration[J]. European Physical Journal Special Topics, 2014, 223(6): 979-984.
- [41] Zhou Meilin, Yan Xueqing. The development of a laser plasma accelerator[J]. Physics, 44(5): 281-289.
周美林, 颜学庆. 激光等离子体加速器的兴起与发展[J]. 物理, 44(5): 281-289.
- [42] Zhang Shijie, Duan Chenyang, Su Hang. Natural-artificial space security threats and their mitigation strategies[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 92-98.
张世杰, 段晨阳, 苏杭. 空间主被动安全威胁及其减缓策略[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 92-98.
- [43] Soulard R, Quinn M N, Tajima T, *et al.* ICAN: A novel laser architecture for space debris removal[J]. Acta Astronautica, 2014, 105(1): 192-200.
- [44] Schall W O. Laser requirements for the removal of space debris from orbit[C]. Twelfth International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference, International Society for Optics and Photonics, 1998: 426-436.
- [45] Ebisuzaki T, Quinn M N, Wada S, *et al.* Demonstration designs for the remediation of space debris from the international space station[J]. Acta Astronautica, 2015, 112: 102-113.
- [46] Hora H, Lalouis P, Giuffrida L, *et al.* Petawatt laser pulses for proton-boron high gain fusion without problem of nuclear radiation[C]. SPIE, 2015, 9515: 951518.
- [47] Hora H. Laser fusion with nonlinear force driven plasma blocks: Thresholds and dielectric effects[J]. Laser and Particle Beams, 2009, 27(2): 207-222.
- [48] Hora H, Lalouis P, Moustazis S. Fiber ICAN laser with exawatt-picosecond pulses for fusion without nuclear radiation problems[J]. Laser and Particle Beams, 2014, 32(1): 63-68.