

时分复制脉冲放大技术在超快光纤激光器中的应用研究进展

王郁飞¹, 李雷¹, 赵鹭明^{1,2}

1. 江苏师范大学 物理与电子工程学院 江苏省先进激光技术与新兴产业协同创新中心
江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116;
2. 深圳大学 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 随着高功率超快光纤激光器的迅速发展, 时分复制脉冲放大技术近年来获得了广泛的关注。时分复制脉冲放大技术可以通过双折射晶体组或自由空间时延来实现。将时分复制脉冲放大技术与啁啾脉冲放大、空间分束和光子晶体光纤放大等技术相结合, 运用于相干光束合成和非线性压缩, 可以提升超快光纤激光器的脉冲能量和峰值功率。文中对时分复制脉冲放大技术在超快光纤激光器中的最新研究进展进行了详细综述, 重点分析了时分复制脉冲放大技术在相干光束合成应用中的不同系统结构, 并对时分复制脉冲放大技术的优化和发展方向进行了展望。

关键词: 时分复制脉冲放大; 相干光束合成; 非线性效应

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0803010

Research progress of divided pulse amplification technology in ultrafast fiber lasers

Wang Yufei¹, Li Lei¹, Zhao Luming^{1,2}

1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, Jiangsu Collaborative Innovation Center of Advanced Laser Technology and Emerging Industry, School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116 China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: With the rapid development of high power ultrafast fiber lasers, divided-pulse amplification (DPA) technology has attracted extensive concerns. DPA can be implemented through birefringent crystals or freespace delay lines. By combining with the techniques of chirped pulse amplification, spatial beam splitting and photonic crystal fiber amplification, DPA can be applied to coherent beam combining and nonlinear compression in order to increase both the pulse energy and peak power of ultrafast fiber lasers.

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-14

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA416004); 国家自然科学基金(11674133, 11711530208, 61405079); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_1655); 深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室开放基金资助项目(GD201705)

作者简介: 王郁飞(1994-), 男, 硕士生, 主要从事超快光纤激光器等方面的研究。Email: yfwang40@gmail.com

导师简介: 赵鹭明(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事锁模光纤激光器、光纤放大器、光孤子动力学等方面的研究。

Email: zhaoluming@jsnu.edu.cn

The research progress of DPA in ultrafast fiber lasers was reviewed. Different system structures of DPA in the applications of coherent beam combining were analyzed. The optimization and further development of DPA was also prospected.

Key words: divided pulse amplification; coherent beam combining; nonlinear effect

0 引言

超快光纤激光器以其紧凑稳定的结构、优秀的光束质量和效率在工业加工、生物医疗、国防等方面获得了持续、广泛的应用和研究^[1]。如何提高超快光纤激光器的功率,获得高脉冲能量的输出一直是国内外研究的热点。基于光纤本身的结构特点,提高超快光纤激光器的脉冲能量和峰值功率意味着引入更多的非线性效应从而导致脉冲分裂,也会带来激光损伤。为克服这些限制,通常采用的方法有:(1)使用大模场面积光纤增大光斑面积^[2];(2)在初始脉冲放大之前,对初始脉冲进行处理以降低初始脉冲的峰值功率从而减少非线性效应的积累。受限于光纤模场面积的尺寸,光纤激光器的输出峰值功率目前仍落后于大光斑直径的固体激光器,大模场面积光纤的空间耦合也会影响光纤激光器的空间稳定性,增加整个系统的复杂程度。在时域方面,比较常用的办法是啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA)技术^[3],即在功率放大前利用色散元件对初始脉冲进行时域展宽,降低初始脉冲峰值功率后再对其进行放大,放大后的脉冲经过光栅对或者棱镜进行压缩,从而获得高功率、大脉冲能量的放大脉冲输出。啁啾脉冲放大技术要求初始脉冲具有较宽的光谱,因此适用于飞秒脉冲放大。对光谱较窄的皮秒脉冲来说,因为皮秒脉冲展宽所需的色散太大,所以啁啾脉冲放大技术并不适用于皮秒脉冲放大。时分复制脉冲放大技术(Divided Pulse Amplification, DPA)最早在 2007 年由康奈尔大学的 Zhou^[4]等人提出并运用在皮秒光纤放大器中,通过在时域上对初始脉冲进行等分复制形成一个分离的子脉冲串,从而降低了脉冲的峰值功率。子脉冲串经过放大之后重新合成为一个脉冲,整个变换过程不受脉冲的光谱宽度影响,从而能有效降低初始脉冲放大前的峰值功率,抑制非线性效应的积累。2012 年,康奈尔大学

Wise 研究小组利用时分复制脉冲放大技术首次实现皮秒放大脉冲峰值功率达到 MW 水平^[5]。Roither 等人通过自由空间时延实现了脉冲的时分复制处理^[6]。2016 年,Lesparre 等人采用 Yb:YAG 单晶光纤作为主放大器,通过自由空间时延与双折射晶体结合的方法实现时分复制脉冲放大并获得脉宽为 6 ps、脉冲能量为 2 mJ、峰值功率为 320 mW 的皮秒放大脉冲^[7]。白云生等人基于时分复制皮秒脉冲光纤放大的理论模型,数值研究了五级双折射晶体级联时分复制光纤放大系统的各参数对放大脉冲特性的影响^[8]。文中介绍时分复制脉冲放大技术的基本原理和最新的研究进展,重点分析时分复制脉冲放大技术在相干光束合成中的应用,对时分复制脉冲放大技术的可能优化和发展方向进行了展望。

1 时分复制脉冲放大技术的基本结构

1.1 基于双折射晶体组的时分复制脉冲放大技术

时分复制脉冲放大技术从原理上来说就是在时域上对超短脉冲进行等分复制、放大和合成,从而能够有效降低脉冲在进入放大器前的峰值功率,进而减小非线性效应。时分复制可以由双折射晶体组来实现,其基本结构如图 1 所示^[9]。

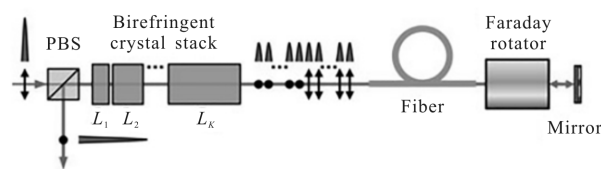


图 1 基于双折射晶体组的 DPA 结构示意图

Fig.1 Schematic setup of a DPA based on birefringent crystals

晶体的表面与晶体的光轴垂直,垂直于晶体表面入射的初始脉冲,其偏振方向与晶体的光轴方向呈 45°。由于双折射效应,入射的初始脉冲会分为两个偏振方向相互垂直的子脉冲,即 o 光(寻常光)和 e 光(非常光)。由于两个子脉冲在晶体中传播的速度不

同,两个子脉冲之间会产生时延。当通过最短的晶体之后,若两个子脉冲之间的时延大于脉冲宽度,则两个子脉冲能够在时域上彻底分离。当 K 个长度等比倍增的双折射晶体连续排列,彼此的光轴夹角为 45° 时,初始脉冲可以被时分复制成 $2K$ 个子脉冲,均匀地分布在两个正交偏振方向上,且每个子脉冲的峰值功率为初始脉冲的 $1/2K$ 。通过对初始脉冲的时分复制,有效降低了初始脉冲的峰值功率。在完成对子脉冲串的放大之后,可以使用另一组镜像布置的双折射晶体对放大后的子脉冲串进行合成以获得单个具有大脉冲能量的皮秒放大脉冲;或者利用法拉第旋转镜令放大后的子脉冲串偏振方向旋转 90° ,二次放大后再反向通过晶体组进行有效合成,同时也弥补放大过程中双折射变化带来的影响并最终获得单个具有大脉冲能量的皮秒放大脉冲。由于整个处理过程,除了放大环节有可能引入非线性效应而造成的脉冲形变,所有环节均只在时域对脉冲进行线性处理,因此如果初始脉冲是变换极限脉冲,则最终的皮秒放大脉冲也能保持变换极限特性。这是时分复制脉冲放大技术的优点之一。

2012 年, Kong 等^[5]在单路光纤放大器中,利用五级钕酸钇晶体级联将初始脉冲分离为 32 个子脉冲,如图 2 所示,使用模场直径为 $40 \mu\text{m}$ 的掺镱双包层光子晶体光纤作为增益介质将子脉冲串放大并反向通过原光路二次放大并合成后,获得了脉冲宽度为 2.2 ps ,脉冲能量为 $2.5 \mu\text{J}$ 的脉冲,其峰值功率达到了 1 mW ,皮秒放大脉冲的时间带宽积为 0.68 。

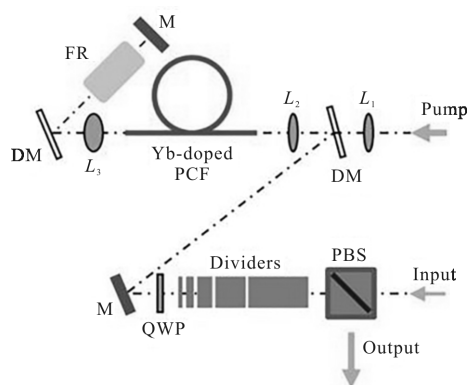


图 2 使用掺镱光子晶体光纤的圆偏振 DPA 示意图

Fig.2 Schematic of circular polarization DPA with Yb-doped PCF

1.2 基于自由空间时延的时分复制脉冲放大技术

双折射晶体,例如钕酸钇晶体的偏振时延系数

在 1040 nm 波长处约为 0.8 ps/mm 。如果子脉冲间隔为 50 ps ,所需的双折射晶体长度将超过 62.5 mm ,且后续分离需要晶体长度等比倍增,受限于已有晶体生长工艺,这在晶体制备上难以实现^[6]。因此除了通过双折射晶体组来实现时分复制外,还可以使用薄膜偏振片或偏振分束镜实现基于自由空间的时延。在如图 3 所示^[9],采用偏振分束镜的自由空间时延系统,线偏振光以 45° 入射偏振分束镜,分成等强度的两束光:透射光 p 光和反射光 s 光。合理设置反射镜与偏振分束镜之间的距离 L ,当反射光 s 光经过反射镜两次反射后通过第二块偏振分束镜, s 光因传输距离变长产生时延,使得初始脉冲被分成了两个强度相等且相互正交的线偏振光。序列使用这样的反射镜与偏振分束镜组成的时延单元,若两个子脉冲继续以 45° 入射下一时延单元,且时延单元中的时延距离设置为 $L/2$,则最终可以输出四个子脉冲。以此类推,序列使用时延单元且设置时延距离等比倍减,则初始脉冲同样可以被时分复制成 $2K$ 个子脉冲,子脉冲的峰值功率为初始脉冲的 $1/2K$ 。

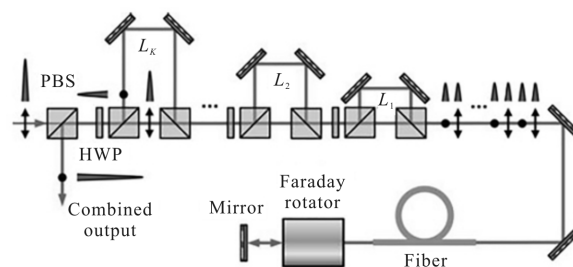


图 3 基于自由空间时延的 DPA 结构图

Fig.3 Schematic setup of a DPA based on free space delay line

2 时分复制脉冲放大技术在相干光束合成中的研究现状

时分复制脉冲放大技术作为一种有效的功率放大技术已被广泛应用于光纤放大系统中。随着相干合成技术的逐渐发展,时分复制脉冲放大技术被用于与空间相干合束、啁啾脉冲放大技术等相结合以获得更高功率的脉冲输出。利用时域空域多维度结合的相干合成技术(分为被动锁相和主动锁相),使得光纤激光器能够以更高的光束质量和效率输出能与固体激光器相比拟的高功率、大能量脉冲。

2.1 用于被动相干合成的时分复制脉冲放大技术

时分复制脉冲放大技术通常采用光路双向复用(双通)的结构,脉冲在时域上分离和再合成的过程中经过相同的器件,只是顺序相反,这种相向传递的对称结构决定了时分复制脉冲放大技术在相干合成应用中可以实现被动锁相。

2012 年, Daniault 等^[10]使用基于两级双折射晶体(钽酸钷晶体,长度分别为 5 mm 和 10 mm)的时分复制脉冲放大技术系统,与带有大模场增益光纤的 Sagnac 干涉仪相结合,在时域上将带宽为 5 nm、脉冲宽度为 200 fs 的初始脉冲分为四个子脉冲后经 Sagnac 干涉仪放大,然后在空间上再分为两路相向传输的子脉冲串。八个子脉冲经过时域合成之后,通过腔外压缩最终获得了脉冲宽度为 50 fs,重复频率为 1 MHz,脉冲能量为 3.1 μJ 和 52 MW 峰值功率的脉冲。这种时域与空域分束合成相结合的方法既免去了脉冲放大前时域的展宽,又有效降低初始脉冲的峰值功率,耦合效率达 80%。其实验结构如图 4 所示。

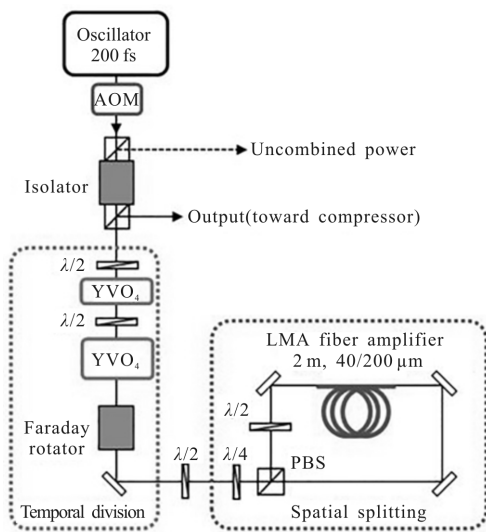


图 4 基于双折射晶体组的时空域分束合成 DPA 实验装置图
Fig.4 Experimental setup of SI and DPA together with two birefringent vanadate crystals

受限于双折射晶体的尺寸,基于双折射晶体组的结构无法通过无限拓展晶体级联数量的方式来获得更多的时分脉冲,而且仅适用于皮秒量级的脉冲放大。当初始脉冲的脉宽超过 10 ps 量级时,时分复制系统就需要使用自由空间时延的方法。

2013, Zaouter 等^[11]首次提出了在同一个飞秒光

纤放大系统中将单路啁啾脉冲放大技术与时分复制脉冲放大技术相结合(后文中用 CPA-DPA 代替)的实验方案,其结构如图 5 所示。利用薄膜偏振片组成的两个自由空间 Mach-Zehnder 干涉仪,经展宽后的初始脉冲经时分复制为四个正交偏振的啁啾子脉冲,子脉冲之间的时延为 2.2 ns。利用掺镱棒状光纤(长 1 m,芯径 85 μm,包层直径 250 μm)的放大之后,反向通过光路合成后进行腔外压缩,在 96 kHz 的重复频率下,获得的脉冲宽度为 320 fs,平均功率 42 W,单脉冲能量 175 μJ,脉冲峰值功率可以达到 1 GW。在该 CPA-DPA 结合的光纤放大器中,由于放大后的脉冲能量接近于光纤放大器的增益饱和能量,增益光纤对放大后的各子脉冲表现出了不同的饱和效果导致了非线性相移的积累,这从一定程度上降低了最终耦合的效率,耦合效率为 82%。

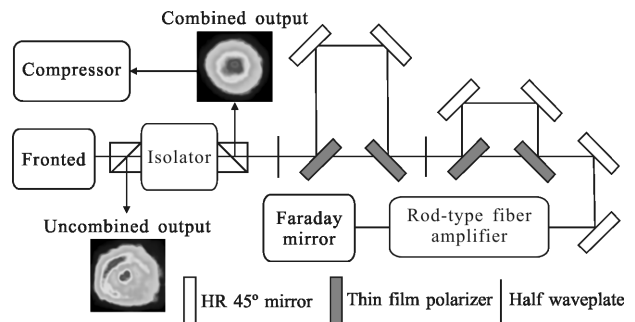


图 5 基于自由空间时延的 CPA-DPA 系统实验装置图
Fig.5 Experimental setup of CPA-DPA system based on free space delay line

2015 年, Guichard 等^[12]在之前研究的基础上,将 CPA-DPA 系统与 Sagnac 干涉仪相结合,进一步优化了这类双通结构光纤放大器在时域与空域被动相干合成的效果,实验装置如图 6 所示。200 fs 的脉冲首先被展宽器展宽至 500 ps,在 50 kHz 的重复频率下,经过一个 Mach-Zehnder 干涉仪进行时分复制为两个子脉冲。只时分复制为两个子脉冲的原因是为了能有效保证子脉冲不受增益饱和和效应的影响,通过调节入射线偏振光的方向能够调节两个子脉冲的功率。经过 Sagnac 干涉仪后两个时域分离的子脉冲在空间上再次一分为二,变为四个脉冲。值得一提的是,增益光纤选用了两根模场直径为 60 μm,长度 80 cm 的双包层掺镱棒状光纤。环路内的四分之一波片的使用保证了圆偏振放大的实现以降低非线性的

积累^[5]。Sagnac 干涉仪前的法拉第旋转镜和四分之一波片保证了返回光能够完成时空再合成。最终经过腔外压缩后,输出的单脉冲能量可达 1.1 mJ,脉冲宽度为 300 fs,平均功率为 55 W,峰值功率 3.1 GW。在不同的功率条件下耦合效率都超过了 90%。

此外,在图 6 结构基础上衍生的大模场面积棒状光纤和 Yb:YAG 块状晶体作为增益介质混用的光纤-固态激光系统也有见诸报道^[13]。

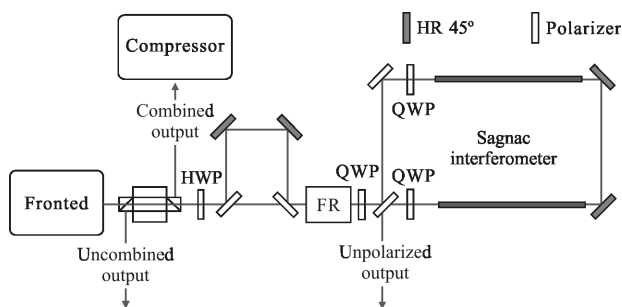


图 6 基于自由空间时延的 CPA-DPA 时空域分束合成结构图

Fig.6 Experimental setup of a spatial CPA-DPA system based on free space delay line

2.2 用于主动相干合成的时分复制脉冲放大技术

双通式的被动时分复制脉冲放大结构受限于子脉冲在放大过程中无法保持相同参数。在高非线性条件下,子脉冲之间微小的强度差会因为自相位调制而造成相移,这会使整个时分复制脉冲放大系统对任何微小差异十分敏感,阻碍时域再合成的过程。2013 年,德国耶拿大学的 KieneI 等^[14]对用于被动相干合成的时分复制脉冲放大系统进行了数值模拟和实验上的分析,他们认为基于双通结构的对称特性,光纤放大介质的增益饱和和效应带来的影响无法避免,这使得被动式的时分复制脉冲放大技术只能运用在低脉冲能量的情况下。当脉冲能量被放大达到增益饱和和能量的数量级时,子脉冲串获得的增益减少导致子脉冲串强度发生变化,如图 7 所示。强度变化同样会带来自相位调制和 Kramers-Krönig 系数变化从而产生相位差异。当放大后的子脉冲串再合束时,子脉冲之间强度和相位的差异会降低合成效率。在被动系统中,若只有两个子脉冲,增益饱和和效应仍可以通过调节两个子脉冲入射的强度来实现补偿,但是当子脉冲数增多时,对每个子脉冲强度幅值的调节变得更加困难。

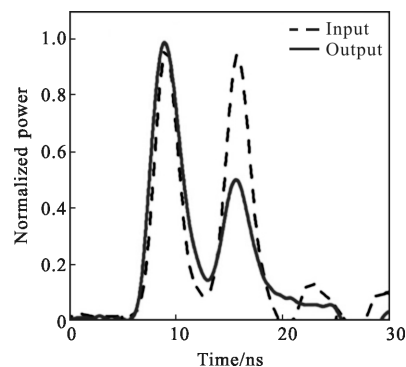


图 7 放大过程中增益饱和和效应导致的子脉冲强度不均

Fig.7 Pulse train difference induced by gain saturation effect in amplification

针对被动式时分复制脉冲放大技术的局限性, KieneI 等^[15]在 2014 年提出了通过增加系统的自由度来实现的主动式时分复制脉冲放大技术 (Active Divided-Pulse Amplification, ADPA)。在主动式时分复制脉冲放大技术中,脉冲的时分复制过程和再合成过程是被分开的,打破了原来双通式的时分复制脉冲放大技术的框架。单独的再合成结构使得脉冲在高能量下的饱和效应和 B 积分差异可以得到补偿,结合啁啾脉冲放大技术的使用能让单脉冲能量的提高突破激光损伤和非线性效应的限制。

主动式时分复制脉冲放大结构如图 8 所示,对于脉冲分束而言,入射每一个自由空间时延系统的线偏振光经过半波片 (Half-wave Plate, HWP) 和偏振分束镜 (Polarization Beam Splitter, PBS) 后被分为了 s 偏振光 (反射光) 和 p 偏振光 (透射光),他们的比例由半波片的旋转角度决定。p 偏振光直接透过偏振分束镜, s 光经过上下两个四分之一波片 (Quarter-wave Plate, QWP) 分别旋转 90° 后最终按以初始入射偏振分束镜的方向反射出去, s 光和 p 光之间由于光程差而产生时延,起到时分复制的效果。

主动式时分复制脉冲放大技术与被动式时分复制脉冲放大技术最大的区别在于,由于不存在回程再合成过程的影响,时分复制端和再合成端每个自由空间时延系统前的半波片都是独立可调的,具有更高的自由度,可以对脉冲进行整形。针对子脉冲串在放大过程中受到增益饱和和导致的强度不一的情况,可以通过对脉冲串的预整形来补偿增益饱和,实现等脉冲能量输出。在主动式时分复制脉冲放大结

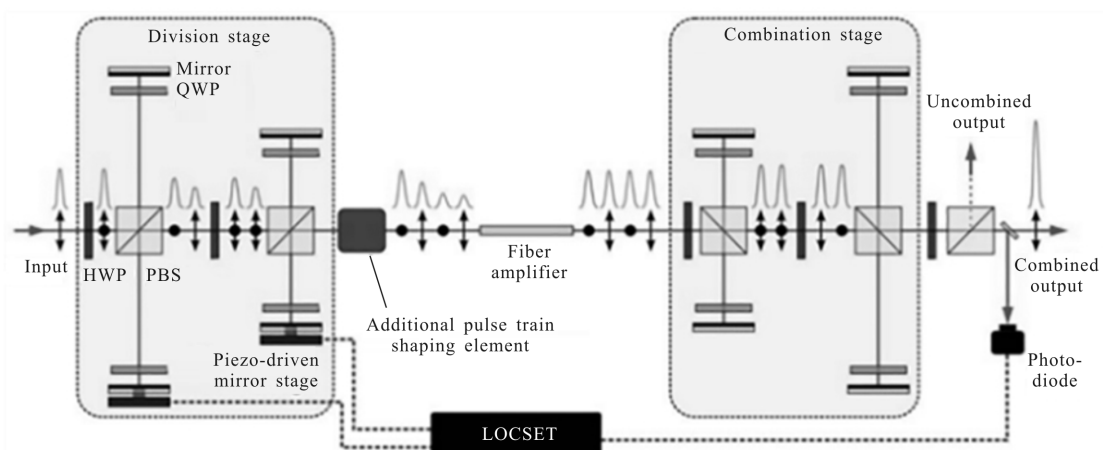


图 8 主动式时分复制脉冲放大结构示意图

Fig.8 Schematic setup of active DPA

构下,半波片可调也意味着不同脉冲会经过不同光路。这提高了对系统的稳定要求,自由空间时延系统需要能主动调整来补偿扰动造成的差异。通过采用 LOCSET 的方法^[6],利用压电驱动的平面镜来反馈合成光束传递的校准信号,以此来调整每个延迟线的路径长度以保证脉冲的相位稳定。向此主动式时分复制脉冲放大系统输入脉冲宽度为 2 ns, 10 kHz 重复频率, 500 μJ 脉冲能量的脉冲,时分复制后经过

1.2 m 长的大空气孔隙包层光子晶体光纤 (Large-pitch Fiber, LPF)^[17] 放大, 最终经合成获得了 1.25 mJ, 37.5 W 平均功率的脉冲, 经压缩后脉冲宽度为 380 fs, 峰值功率为 2.9 GW。

2015 年, Kienel 课题组^[18]首次提出了主动式时分复制技术与空间分束结合的 N×M 型多通道复用技术的结构, 如图 9 所示。该多子脉冲数、多通道系统的每个通道在高脉冲能量的情况下 (实验中分别

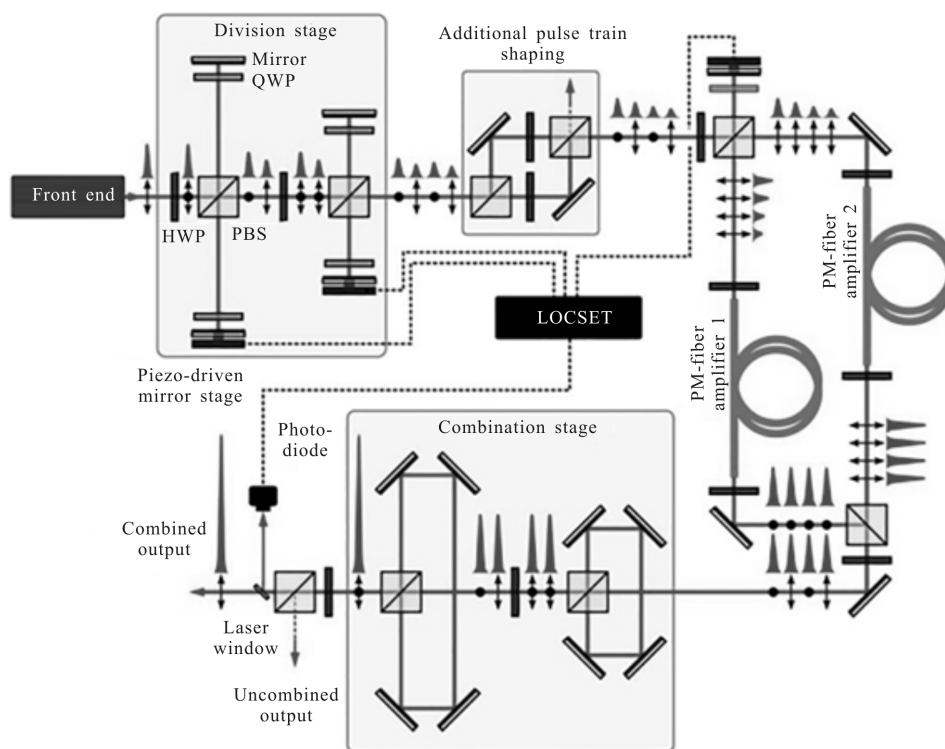


图 9 多通道复用技术结构图

Fig.9 Schematic representation of the multidimensional architecture

考虑非线性效应和增益饱和效应的影响),最终合成后输出的能量远高于单路光纤放大器的损伤阈值能量。系统效率能保持在 75%以上,系统效率的定义为:

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{spat}} \cdot \eta_{\text{temp}} \frac{E_{\text{main}}}{\sum_i E_i} \quad (1)$$

式中: η_{sys} 为系统效率; η_{spat} 为空间分束效率; η_{temp} 为时分复制效率, 两者的乘积表示最终经合束后的输出主脉冲能量 E_{main} 与系统中所包含的各子脉冲能量 E_i 叠加和的比。同年,该课题组在前期研究基础上提出了将此多通道复用技术与高水准的啁啾脉冲放大技术相结合,可以让光纤激光器的输出脉冲峰值功率突破 TW 级别的构想^[19]。

2016 年, Kienel 等^[20]报道了到目前为止,最高脉冲能量输出的超快光纤激光器系统,其结构如图 10

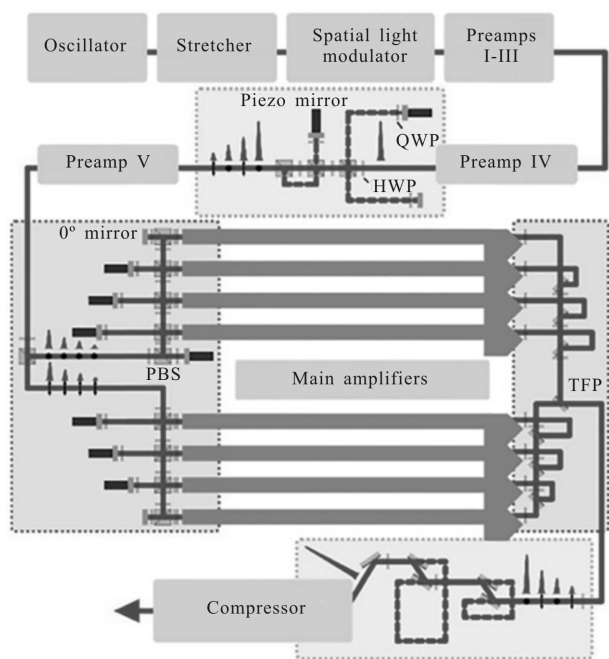


图 10 12 mJ 千瓦级超快光纤激光器系统

Fig.10 12 mJ ultrafast fiber laser system in kilowatts

所示。将主动式时分复制脉冲放大技术、啁啾脉冲放大技术、空间分束相干合成系统和大空气孔包层光子晶体光纤等技术结合,初始脉冲经展宽和预放大后时分复制获得的四个子脉冲被空间分束至八个通道,在各通道的大空气孔包层光子晶体光纤内放大后再合成后压缩,最终获得了近衍射极限光束质量的脉冲能量 12 mJ,平均功率为 700 W,重复频率为

55.9 kHz,脉冲宽度为 370 fs,中心波长在 1 032 nm 的脉冲输出,整个系统的效率为 78%,峰值功率可达 35 GW。

3 时分复制脉冲放大技术的应用拓展及优化

时分复制脉冲放大技术除了被应用于相干合成系统之外,还能用于非线性压缩过程^[18]。非线性压缩是一种克服激光器带宽限制,在频域上对脉冲进行展宽从而使脉冲在时域上得到进一步压缩的机制,通常由非线性 Kerr 介质的自相位调制来实现。在一定的作用距离下,为避免空间 Kerr 效应对光束质量产生不良影响,自相位调制需要以特定的波导结构在较高的光强下触发,常见的波导结构有全固态光纤、气体填充空芯光纤、Kagome 光子晶体光纤等^[21]。然而在高峰值功率和高脉冲能量作用下,非线性介质会发生自聚焦(Self-focusing)。为避免材料损伤,脉冲的峰值功率必须低于自聚焦阈值,时分复制脉冲放大技术可以作为一种有效的方法来克服功率限制。将初始脉冲时分复制为多个子脉冲后通过非线性介质频域展宽后再合成,可以有效降低初始脉冲的峰值功率,避免脉冲以高峰值功率直接作用于非线性介质。

2013 年, Klenke 等^[22]用基于自由空间时延的被动式时分复制脉冲放大技术和用于频域展宽的大空气孔包层光子晶体光纤(长 5 cm,模场直径 60 μm),将脉冲时分复制为四个子脉冲,最终以 75%的耦合效率获得了 1 μJ 、10 MW 峰值功率的脉冲输出,脉冲宽度由 320 fs 经压缩为 95 fs,最终获得的脉冲能量是光纤自聚焦限制能量的 3 倍,其结构如图 11 所示。

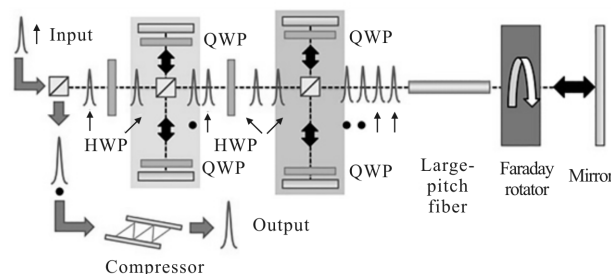


图 11 基于自由空间时延的非线性压缩装置图

Fig.11 Experimental setup of nonlinear compression system employing free-space delay lines

同年, Guichard 等^[23]使用基于双折射晶体组的

时分复制脉冲放大技术, 将单路啁啾脉冲放大系统输出的 400 fs 脉冲经过四个钽酸铋双折射晶体后时分复制为 16 个子脉冲, 再通过 Sagnac 干涉仪在空间上分为两路后通过棒状光纤(长 8 cm, 模场直径 45 μm)进行光谱展宽, 经反向再合成后输出进行压缩, 最终获得了 7.5 μJ 脉冲能量、86 MW 峰值功率、脉冲宽度为 71 fs 的脉冲。86 MW 的峰值功率比熔融石英 4 MW 的损伤阈值功率高了一个数量级, 其结构如图 12 所示。

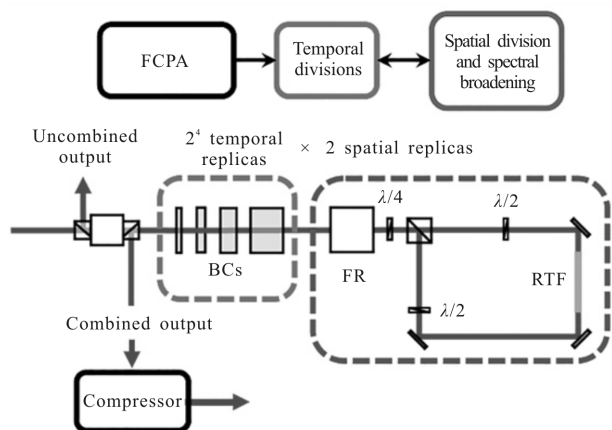


图 12 基于双折射晶体组的非线性压缩装置示意图

Fig.12 Experimental spatial-temporal post compression setup based on birefringent crystals

2015 年, 国内曾和平课题组^[24]将时分复制脉冲放大技术运用到了 1.55 μm 波段负色散掺铒双包层光纤放大器中, 其结构如图 13 所示。不同于上文提到的 1 μm 波段的时分复制脉冲放大系统, 在该结构下, 脉冲的放大和压缩在负色散区域可以同步进行而不需要单独的腔外压缩, 实验的种子源采用了基于非线性偏振旋转技术的锁模谐振腔, 添加了色散补偿光纤来调节系统的负色散, 并加入了单模光纤预放大的部分, 时分复制部分采用了一组钽酸铋双折射晶体, 放大部分使用基于双包层掺铒光纤的光纤放大器(由 1.5 m 长的单模光纤和 0.6 m 长的 12/130 双包层掺铒光纤组成), 最终能输出重复频率 80 MHz, 脉冲能量 7.5 nJ, 中心波长 1560 nm, 平均功率 600 mW, 脉冲宽度为 122 fs 的脉冲, 并通过周期极化钽酸铋晶体倍频得到 240 mW 的平均功率。该结构为准单模光纤激光器实现高功率高脉冲能量输出提供了一种思路。780 nm 的倍频过程也拓宽了该系统的应用范围。

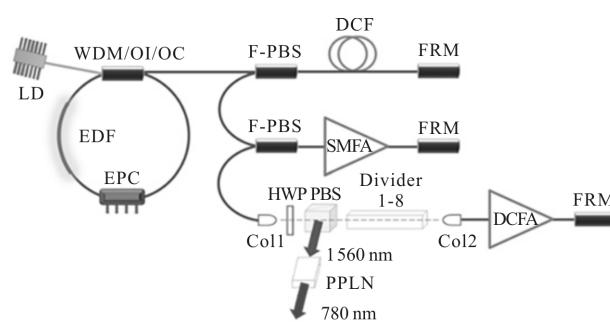


图 13 1.55 μm 波段时分复制脉冲放大激光系统示意图

Fig.13 Experimental setup of DPA laser system in 1.55 μm region

在该研究小组 2016 年的后续报道中^[25], 通过对上述腔结构的优化, 获得了经压缩后中心波长在 1 560 nm, 平均功率 680 mW, 脉冲宽度为 95.7 fs 的脉冲, 倍频后得到的平均功率为 110 mW。结合数值模拟, 证明了进入放大器的能量更低, 脉冲更长有利于减缓非线性压缩过程的演化速度, 从而能获得更高能量的短脉冲输出。该组还使用 12/130 双包层掺铒共掺光纤, 结合 5 级级联的双折射晶体组, 实现了 80 MHz 重复频率、126 fs 脉冲宽度、20.3 nJ 脉冲能量、161 kW 峰值功率的脉冲输出^[26]。

将时分复制脉冲放大系统简化, 向全光纤化的发展也是时分复制脉冲放大技术的研究方向之一。西安光机所的 Yu 等^[27]在 2016 年设计了一种基于主动控制的准全光纤 CPA-DPA 系统。利用保偏光纤集成结构, 利用改变光纤长度产生光程差的方法简化了一般常用的空间延迟线时分复制结构, 系统效率高达 95%, 在 300 kHz 的重复频率下, 经合成压缩的输出脉冲平均功率为 2.24 mW, 脉冲宽度为 1.1 ps。

2017 年, 德国耶拿大学的 Stark 等提出了采用电光调制的新型时分复制脉冲放大系统^[28]。该电光调制时分复制脉冲放大技术(Electro-optically controlled Divided-Pulse Amplification, EDPA) 的特点是光纤集成度高, 有利于时分复制脉冲放大系统的光学结构简化。在时分复制放大过程中可以对子脉冲串内的每个脉冲的幅值和相位进行调制, 是该电光调制时分复制脉冲放大技术优于其他传统时分复制脉冲放大技术脉冲串预整形机制的最主要因素, 能有效补偿子脉冲串受到的增益饱和效应和非线性相位失配的影响, 为克服目前的激光系统在高峰值功率、高脉冲能量提高上遇到的瓶颈提供了新的解决思路。

光器中的主要研究进展。

通过对时分复制脉冲放大技术在相干合成、非线性压缩等各类应用中的发展进行分析,可以得出以下结论:

4 结束语

时分复制脉冲放大技术的发展已逾十年,表 1 列出了时分复制脉冲放大技术近年来在超快光纤激

表 1 时分复制脉冲放大技术在超快光纤激光器中的主要研究进展

Tab.1 Review of divided pulse amplification technology in ultrafast fiber lasers

Years	Author	DPA Configuration	Structure	System description	Laser parameter			
					Pulse width	Repetition frequency	Pulse energy	Peak power
2012	Kong ^[5]	Five-step cascaded YVO ₄	Double-pass	Yb-doped PCF fiber amplifier	2.2 ps	880 kHz	2.5 μJ	1 MW
2012	Daniault ^[10]	Two-step cascaded YVO ₄	Double-pass	Passive spatial-temporal CBC	50 fs	1 MHz	3.1 μJ	52 MW
2013	Guichard ^[23]	Four-step cascaded YVO ₄	Double-pass	Passive spatial-temporal CBC(nonlinear compression)	71 fs	100 kHz	7.5 μJ	86 MW
2013	Zaouter ^[11]	TFP based freespace delay line	Double-pass	CPA-DPA	320 fs	96 kHz	430 μJ	1.3 GW
2013	Klenke ^[21]	PBS based freespace delay line	Double-pass	Passive CBC(nonlinear compression)	95 fs	2 MHz	1 μJ	10 MW
2014	Kienel ^[15]	PBS based freespace delay line	Separated stages	CPA-ADPA	380 fs	10 kHz	1.25 mJ	2.9 GW
2015	Zaouter ^[29]	TFP based freespace delay line	Double-pass	CPA-DPA	320 fs	100 kHz	0.6 mJ	1.8 GW
2015	Guichard ^[12]	TFP based freespace delay line	Double-pass	Spatial CPA-DPA	300 fs	50 kHz	1.1 mJ	3.1 GW
2016	Lesparre ^[7]	TFP based freespace delay line+YVO ₄	Double-pass	Yb:YAG single-crystal fiber amplifier	6 ps	12.5 kHz	2 mJ	320 MW
2016	Kienel ^[20]	PBS based freespace delay line	Separated stages	Multi-channels spatial CPA-ADPA	262 fs	55.9 kHz	12 mJ	35 GW

Note: TFP-thin film polarizer; PBS-Polarization Beam Splitter; CBC-coherent beam combining; ADPA-active divided pulse amplification

(1) 时分复制脉冲放大是一种有效的脉冲放大机制,利用光的偏振在时域上分离脉冲的方法克服了高脉冲能量高峰值功率对激光器带来的不利影响。采用增加时分复制的子脉冲数,对子脉冲串进行后续空间分束多级平行放大后经过相干合成输出的方法,将时分复制脉冲放大技术与啁啾脉冲放大技术、大模场面积光子晶体光纤、相干合成技术结合的多通道复用放大技术是未来超快光纤激光器系统继续提高脉冲能量追求高功率的有效手段之一。

(2) 目前时分复制脉冲放大系统中仍存在的增益饱和效应和非线性相移积累等问题,在一定程度上

上影响后续的脉冲合成效率。虽然已有相关方案如主动式时分复制脉冲放大技术、电光调制时分复制脉冲放大技术的提出,但是目前的基于自由空间时延的时分复制脉冲放大技术仍依赖于空间光路的精确调制,结构较为复杂。而基于双折射晶体组的时分复制脉冲放大技术则主要受到双折射晶体尺寸的限制。

(3) 时分复制脉冲放大系统的小型化、简单化、全光纤化是目前时分复制脉冲放大技术研究的热门,时分复制脉冲放大技术的运用波段也从 1 μm 向 1.55 μm 得到了拓展,时分复制脉冲放大技术的应用将变得更加多元化。

参考文献:

- [1] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(12): 868-874.
- [2] Limpert J, Deguil-Robin N, Manek-Hönninger I, et al. High-power rod-type photonic crystal fiber laser [J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1055-1058.
- [3] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 2011, 55(6): 447-449.
- [4] Zhou S, Wise F W, Ouzounov D G. Divided-pulse amplification of ultrashort pulses [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 871-873.
- [5] Kong L J, Zhao L M, Lefrancois S, et al. Generation of megawatt peak power picosecond pulses from a divided-pulse fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 253-255.
- [6] Roither S, Verhoef A, Mucke O D, et al. Sagnac-interferometer multipass-loop amplifier [C]//2008 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science. CLEO/QELS 2008. Conference on. IEEE, 2008: 1-2.
- [7] Lesparre F, Gomes J T, Délen X, et al. Yb:YAG single-crystal fiber amplifiers for picosecond lasers using the divided pulse amplification technique [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7):1628.
- [8] Bai Y S, Chen X T, Chen J W, et al. Numerical study on picosecond pulse amplifier based on divided pulse amplification technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017 (2): 201021. (in Chinese)
- [9] Limpert J. Performance scaling of ultrafast laser systems by coherent addition of femtosecond pulses [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20 (5): 268-277.
- [10] Daniault L, Hanna M, Papadopoulos D N, et al. High peak-power stretcher-free femtosecond fiber amplifier using passive spatio-temporal coherent combining [J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21627.
- [11] Zaouter Y, Guichard F, Daniault L, et al. Femtosecond fiber chirped-and divided-pulse amplification system [C]//Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. IEEE, 2013: 1-2.
- [12] Guichard F, Zaouter Y, Hanna M, et al. High-energy chirped-and divided-pulse Sagnac femtosecond fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 89.
- [13] Pouysegur J, Guichard F, Zaouter Y, et al. Hybrid high-energy high-power pulsewidth-tunable picosecond source [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5184.
- [14] Kienel M, Klenke A, Eidam T, et al. Analysis of passively combined divided-pulse amplification as an energy-scaling concept [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 29031-29042.
- [15] Kienel M, Klenke A, Eidam T, et al. Energy scaling of femtosecond amplifiers using actively controlled divided-pulse amplification[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 1049-1052.
- [16] Shay T M. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam [J]. *Optics Express*, 2006, 14(25): 12188.
- [17] Limpert J, Stutzki F, Jansen F, et al. Yb-doped large-pitch fibres: effective single-mode operation based on higher-order mode delocalization [J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(4): e8.
- [18] Tünnermann A, Klenke A, Limpert J, et al. Multidimensional coherent pulse addition of ultrashort laser pulses [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 522-525.
- [19] Eidam T, Kienel M, Klenke A, et al. Divided-pulse amplification for terawatt-class fiber lasers [J]. *European Physical Journal Special Topics*, 2015, 224(13): 2567-2571.
- [20] Kienel M, Müller M, Klenke A, et al. 12 mJ · kW -class ultrafast fiber laser system using multidimensional coherent pulse addition [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3343.
- [21] Jacqmin H, Jullien A, Mercier B, et al. Passive coherent combining of CEP -stable few-cycle pulses from a temporally divided hollow fiber compressor [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(5): 709.
- [22] Klenke A, Kienel M, Eidam T, et al. Divided-pulse nonlinear compression[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4593-4596.
- [23] Guichard F, Zaouter Y, Hanna M, et al. Energy scaling of a nonlinear compression setup using passive coherent combining [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4437.
- [24] Hao Q, Zhang Q, Sun T, et al. Divided-pulse nonlinear amplification and simultaneous compression [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(10): 16671-16676.
- [25] Wang C, Li W, Li L, et al. Femtosecond Er-doped fiber laser based on divided-pulse nonlinear amplification [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(2): 025503.
- [26] Hao Q, Wang Y, Liu T, et al. Divided-pulse nonlinear amplification at 1.5 μm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-8.
- [27] Yu J, Feng Y, Duan L N, et al. Quasi-all-fiber high-efficiency divided chirp-pulse amplification system based on active controlling [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1-9.
- [28] Stark H, Müller M, Kienel M, et al. Electro-optically controlled divided-pulse amplification [J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13494.
- [29] Zaouter Y, Guichard F, Hoenninger C, et al. High average power 600 μJ ultrafast fiber laser for micromachining application[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S2): S29301.