

❖ 特约专栏 ❖

## 超短脉冲偏振分割放大技术研究进展(特邀)

杨康文<sup>1</sup>, 郝强<sup>1</sup>, 曾和平<sup>1,2</sup>

- (1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 介绍了超短脉冲偏振分割器的基本类型和放大器的光路布局, 总结了国内外采用偏振分割放大技术抑制光纤非线性效应、提高超短脉冲输出能量和突破增益介质抗损伤阈值方面的新进展。重点报道了偏振分割放大技术在高重复频率高功率掺铒飞秒激光器研制方面的最新进展, 基于双程放大结构和多级偏振分割, 同时实现超短脉冲的非线性放大与脉冲压缩, 结合光学倍频, 获得百毫瓦百飞秒, 中心波长 780 nm 的激光脉冲, 为实现结构紧凑、使用方便、环境稳定、光束质量好的飞秒激光光源提供了一个有效的技术途径, 有望部分替代钛宝石激光器, 在太赫兹产生、生物医学成像、光学非线性效应研究等方面拓展应用。

**关键词:** 分割脉冲放大; 光纤飞秒激光; 相干合成

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0103004

## Advances in ultrashort divided-pulse amplification systems(Invited)

Yang Kangwen<sup>1</sup>, Hao Qiang<sup>1</sup>, Zeng Heping<sup>1,2</sup>

- (1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The new development of using divided-pulse amplification system in controlling the fiber nonlinearity, enhancing the pulse energy and breaking through the damage threshold of gain material was reviewed, including the basic types of pulse divider and optical arrangement of amplifiers. The latest advances in high repetition rate, high power Er-doped fiber divided-pulse amplifier was introduced. Based on the double-pass configuration and multi-stage pulse divider, nonlinear amplification and pulse compression were achieved simultaneously, resulting in frequency-doubled output pulses with an average power of hundreds of milliwatts and pulse width less than one hundred femtosecond at 780 nm. This divided-pulse Er-doped amplification method has proven a valuable tool to develop compact, user-friendly and environment stable femtosecond source, which provides an alternative to Ti:sapphire laser in applications to the generation of Terahertz radiation, biological imaging and optical nonlinearity.

**Key words:** divided-pulse amplification; femtosecond fiber laser; coherent beam combination

收稿日期: 2017-09-10; 修订日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(11504235, 11404211); 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ150092)

作者简介: 杨康文(1987-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事高功率光纤激光器和光纤参量转换方面的研究。Email: kangwenyang@yeah.net

导师简介: 郝强(1981-), 男, 副教授, 主要从事超快激光技术方面的研究。Email: qianghao@usst.edu.cn

## 0 引言

高功率高能量超短脉冲激光在精密加工、生物医疗、光谱分析、国防工业等领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。随着增益光纤制造工艺和半导体泵浦技术的不断发展,高功率光纤激光器在光束质量、转换效率、波长范围等方面相比固体激光器具有显著的优势。但是,超短脉冲峰值功率极高,在增益介质尤其是光纤中放大时,随着输出功率的提高,累积的非线性效应会引起严重的畸变,导致时域分裂、频谱失真、光斑抖动等问题<sup>[3]</sup>。

为抑制光纤中的非线性效应,常用的解决方案是啁啾脉冲放大技术。通过在振荡器和放大器之间引入色散型光学器件(如传统的 Martinez 型,增强像差的 Barty 型,以及无像差的 Öffner 型展宽器)将超短脉冲在时域上展宽数千倍,然后将展宽后的长脉冲耦合到固体或者光纤放大器中进行功率放大,最后再通过抗损伤阈值极高的光栅进行脉冲压缩<sup>[4-5]</sup>。啁啾脉冲放大技术的出现,使得激光脉冲的功率获得极大的提升。但是,这项技术有其固有局限性:(1) 对于频谱极窄的皮秒脉冲,需要采用极大色散量的光学器件或者很长的工作距离,才能实现脉冲时域展宽;(2) 展宽过程中色散型器件不可避免引入高阶色散,而高阶色散的补偿难以实现;(3) 高倍率展宽器的工作距离很长,不利于整个激光系统的集成,长距离的空间光路对环境震动也更加敏感;(4) 展宽器和压缩器引入的色散量难以严格抵消。

近年来,出现了一种基于偏振态操控的分割脉冲放大技术,将脉冲在时域上分割成一系列的子脉冲,能大幅度降低脉冲的峰值功率。该技术作为啁啾脉冲放大技术的补充,可以实现高功率高能量的飞秒脉冲。这项技术的独特优点在于:(1) 该技术基于偏振态操控,因此可以适用于频谱极窄的脉冲展宽,尤其适合需要窄光谱高能量的激光应用场合;(2) 分割与合成过程仅与脉冲的偏振态有关,并不会引入高阶色散等非线性效应,对合成脉冲的光谱范围无限制,可用于宽光谱、近周期量级飞秒脉冲的分割与合成;(3) 控制放大过程中子脉冲的偏振态、幅度和相对延时,理论上能实现脉冲分割与合成模块的完全匹配,不会引入额外的噪声;(4) 分割脉冲放大与

偏振相干合成两种技术本质上都是基于对超短脉冲的偏振态操控,两者能够很容易地相互融合,每次分割后将偏振态不同的子脉冲引入不同的放大器进行功率放大,再通过偏振相干合成合为一束,能突破现有技术瓶颈,实现更高功率更高能量的激光输出<sup>[6-8]</sup>。

脉冲的时域分割与压缩技术相结合,能够避免脉冲能量过高对棱镜、光栅等压缩器件造成光致损伤。通过对脉冲的分割——压缩——再合成,可大幅提高脉冲能量,压缩脉冲宽度。一般的,按照脉冲压缩前后光谱及功率的变化情况,脉冲的时域分割与压缩技术可归纳为分割脉冲线性压缩、分割脉冲非线性压缩<sup>[9]</sup>、分割脉冲非线性放大压缩三类<sup>[10]</sup>。

分割脉冲线性压缩技术指的是较高单脉冲能量的输入脉冲经过脉冲分割器在时域上分割为多个较低单脉冲能量的子脉冲,每个子脉冲依次通过脉冲压缩器独立进行脉冲压缩,压缩后的脉冲再通过脉冲合成器进行相干合成,脉冲在分割前和合成后的光谱不发生变化。其中,压缩器一般为光栅、色散补偿光纤、棱镜对等器件,每个子脉冲的能量均小于压缩器的损伤阈值。这种技术主要是用于解决脉冲压缩器的损伤问题,可用在绝大多数采用线性脉冲压缩器的场合。

分割脉冲非线性压缩技术指的是每个子脉冲依次通过非线性介质独立进行光谱展宽,展宽后的脉冲通过脉冲合成器进行相干合成,最后通过脉冲压缩器进行脉冲压缩。其中,非线性介质一般采用惰性气体填充的大孔径空心光纤、光子晶体光纤等器件,压缩后的脉冲光谱宽度大于压缩前的光谱宽度。这种技术主要是用于克服非线性介质的损伤问题。因此,每个子脉冲的能量要优化至大于介质的非线性阈值并小于其损伤阈值。目前,分割脉冲非线性压缩技术主要用于高能量掺镱脉冲放大器中。更多的非线性介质,如固体纤芯的特种光纤,Kagome 结构的光纤等,以及高能量、近周期量级的超短脉冲有望实现,如突破空心光纤自聚焦和电离的限制,实现脉冲宽度 5 fs,单脉冲能量 10 mJ 的激光输出<sup>[9]</sup>。

分割脉冲非线性放大压缩技术指的是子脉冲通过增益介质以及非线性介质(两个介质可以是同一介质),子脉冲在获得能量放大的同时光谱也被展宽;而后,每次子脉冲可以在合成前进行独立压缩,或者在合成后进行整体压缩。这种方法的主要特点

是子脉冲的光谱展宽是在子脉冲放大环节实现的。由于放大器为输入脉冲提供了较高的增益,既能降低对入射脉冲能量的要求,又能突破增益窄化效应的局限,因此实现更宽光谱、更窄脉冲输出。这种技术在掺铒光纤放大器中有显著优势。在 1.5 μm 波段,传输光纤和增益光纤的色散可相互进行补偿,可避免分割脉冲放大前后光栅或棱镜压缩器的使用,实现全光纤化(包括光纤耦合)的高能量飞秒脉冲输出。

此外,分割脉冲技术还可以用在光纤振荡器中,提高振荡器直接输出的脉冲能量<sup>[11]</sup>;或者与啁啾脉冲放大技术结合起来共同使用,突破增益介质损伤阈值的限制,实现高能量窄脉宽的激光输出<sup>[12]</sup>。

### 1 超短脉冲偏振分割器结构

超短脉冲偏振分割放大的核心模块是脉冲分割器,经过每一次时域分割,可以将 1 个入射脉冲分解成偏振态彼此垂直的 2 个子脉冲。假定 N 是分割次数,M 是经分割后子脉冲的个数,则经过 N 次时域分割后,子脉冲个数  $M=2^N$ ,如图 1 所示。

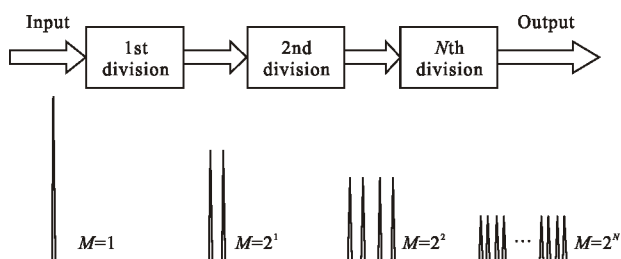


图 1 多级脉冲时域分割示意图

Fig.1 Schematic of multi-stage pulse temporal threshold division

根据单次分割器所采用的器件类型和引入延时量的区别,可以将其分为以下结构。

#### 1.1 共线型双折射晶体分割器

共线型双折射晶体分割器结构如图 2 所示。以钽酸钷(YVO<sub>4</sub>)双折射晶体为例,当入射脉冲的传播方向垂直于晶体的光轴时,在晶体上入射脉冲会分

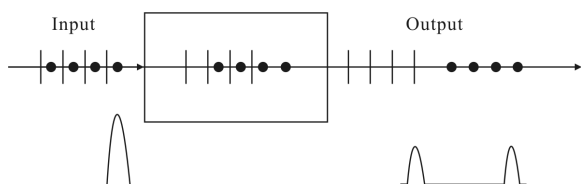


图 2 共线型双折射晶体分割器结构图

Fig.2 Schematic of collinear birefringence crystal divider

为两束传播方向相同,传播速度不同,偏振态相互垂直的寻常光(o 光)和非常光(e 光),两束光之间的时间延时量为:

$$\Delta t = (n_e - n_o) \cdot L / c$$

式中:L 为晶体的长度;c 为光速; $n_e$  和  $n_o$  分别为双折射晶体的非常光折射率和寻常光折射率。对于钽酸钷晶体, $n_o=1.9500$ , $n_e=2.1554$ ,假定晶体长度  $L=1$  cm,引入的延时量  $\Delta t$  约为 6.85 ps。

#### 1.2 非共线型双折射晶体分割器

仍以钽酸钷双折射晶体为例,非共线型双折射晶体分割器包括长度、切角完全相同的两块钽酸钷晶体。入射脉冲垂直入射到第一块双折射晶体,由于入射脉冲的传播方向与晶体的光轴有夹角,在晶体上入射脉冲会分为两束传播方向夹角为  $\theta$ ,传播速度不同,偏振态相互垂直的寻常光和非常光。经过一定长度,两束光在空间上分开,此时,将第二块双折射晶体按照镜面对称的方式放置在第一块晶体后面,如图 3 所示,在第一块双折射晶体上分开的两束光将会在第二块双折射晶体上逐渐靠近,最终完全重合,从第二块双折射晶体的后表面出射。如果两块晶体的总长度为 L,则两束光之间的时间延时量为:

$$\Delta t = (n_e / \cos \theta - n_o) \cdot L / c$$

这种非共线的展宽器可以通过增大寻常光和非常光在晶体中的走离角来获得更大的延时量。但是,非共线的结构需要严格保证前后两块双折射晶体的长度相等,非常光在垂直于入射方向上也会产生横向位移,因此所采用的双折射晶体还需满足一定横向尺寸的要求,这些不利因素限制了非共线型双折射晶体分割器的实际应用。

目前,双折射晶体的最小加工厚度约为 0.1 mm,最大加工厚度约为 50 mm。以共线型结构为例,采用一级分割器,可以实现最小 69 fs、最大约 34 ps 的延时量。受限于晶体的加工尺寸和较小的双折射系数,难以实现更大的延时量。实际应用中,可以通过多块

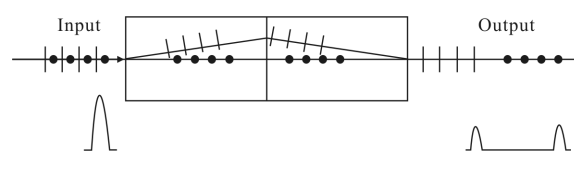


图 3 非共线型双折射晶体分割器结构图

Fig.3 Schematic of non-collinear birefringence crystal divider

双折射晶体拼接的方式, 增加单级脉冲分割器引入的延时量。

### 1.3 单偏振分束立方体分割器

另一类延时装置可采用一个偏振分束立方体, 两个  $1/4$  玻片和两个反射镜。入射光经过偏振分束立方体, 分解为两束传播方向垂直、传播速度相同、偏振态相互垂直的透射光和反射光。透射光直接经过偏振分束立方体, 反射光先经过一个  $1/4$  玻片, 然后经过反射镜反射, 再次经过  $1/4$  玻片, 如图 4 所示。

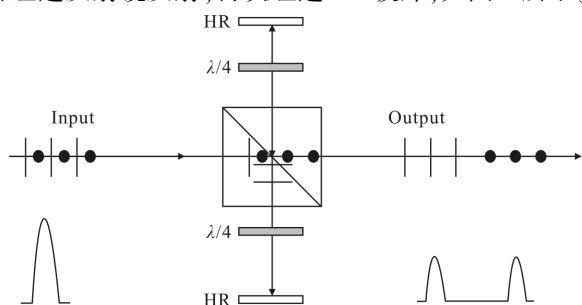


图 4 单偏振分束立方体分割器结构图

Fig.4 Schematic of single polarization beam splitter cube divider

反射光第一次回到偏振分束立方体上时, 偏振态旋转  $90^\circ$ , 从偏振立方体上透射, 再依次经过第二个  $1/4$  玻片, 反射镜, 第二个  $1/4$  玻片。反射光第二次回到偏振分束立方体上时, 偏振态总共旋转  $180^\circ$ , 从偏振立方体上透射。单偏振分束立方体分割器结构中, 脉冲的时域分割和合成都在同一块偏振分束立方体上完成, 光路的对准和调节相对容易, 两束光之间的时间延时量由两块反射镜之间的距离决定, 能够实现纳秒量级的延时。

### 1.4 双偏振分束立方体分割器

采用单偏振分束立方体的分割器必须加入  $1/4$  玻片, 玻片角度的细微变化会直接影响合成效果。为

避免该问题, 可以采用两个偏振分束立方体的分割器结构, 如图 5 所示。

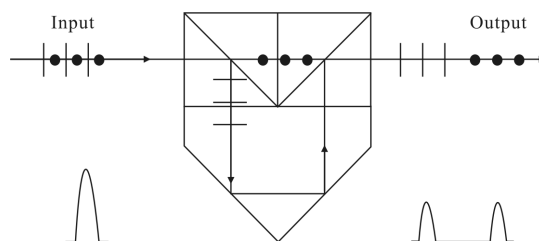


图 5 双偏振分束立方体分割器结构图

Fig.5 Schematic of double polarization beam splitters cube divider

入射光经过第一个偏振分束立方体, 分解为两束传播方向垂直、传播速度相同、偏振态相互垂直的透射光和反射光。透射光依次经过两个偏振分束立方体, 反射光经过直角棱镜两次反射后, 从第二个偏振分束立方体上反射输出, 与透射光合成一束。相比于采用玻片的单偏振分束立方体的结构, 双偏振分束立方体分割器可以通过胶合的方式, 把偏振分束立方体、直角棱镜、延时晶体直接做成一个集成的分割器件, 集成度和稳定性更好, 但在光路对准方面要求更高, 对偏振分束立方体分光系数的准确性也有更高的要求。

## 2 掺镱分割脉冲放大器研究现状

中心波长  $1.0 \mu\text{m}$  附近的高能量超短脉冲研究近年来发展极快, 分割脉冲放大技术的运用, 为突破放大器增益介质的非线性效应限制提供了新的方法, 表 1 回顾了近 10 年之间采用分割脉冲放大器实现高能量超短脉冲的部分研究进展。下面从放大器的结构出发, 对分割脉冲放大技术进行详细介绍。

表 1 掺镱分割脉冲放大器研究进展

Tab.1 Process of Yb-doped divided pulse amplifier

Year	Divider type	Amplifier structure	Gain medium	Energy	Duration	Efficiency	Reference
2007	3-stage YVO <sub>4</sub>	Double pass		2 nJ	300 fs	Passive -	[13]
2012	5-stage YVO <sub>4</sub>	Double pass		2.5 $\mu\text{J}$	2.2 ps	Passive -	[14]
2013	2-stage YVO <sub>4</sub>	Sagnac		3.1 $\mu\text{J}$	50 fs	Passive 89%	[15]
2013	2-stage PBS	Double pass	Fiber	430 $\mu\text{J}$	320 fs	Passive 82%	[16]
2014	2-stage PBS	Single pass		1.25 mJ	380 fs	Active 89%	[17]
2015	1-stage PBS	Sagnac		1.1 mJ	300 fs	Passive 90.5%	[18]
2016	2-stage PBS	Single pass		12 mJ	262 fs	Active 78%	[19]
2015	1-stage PBS 1-stage YVO <sub>4</sub>	Double pass		350 $\mu\text{J}$	3 ps	Passive 97%	[20]
2016	1-stage PBS	Double pass	Solid state	2.3 mJ	520 fs	Passive 91%	[21]
2016	1-stage PBS	Single pass		167 mJ	230 ps	Active 78.4%	[22]

### 2.1 双程结构

双程结构是最早用于分割脉冲放大器 (DPA) 的光路结构,与传统行波式放大器相比,这种结构仅增加两个核心器件,一个是脉冲分割/合成器,另一个是法拉第旋转反射镜,如图 6 所示。

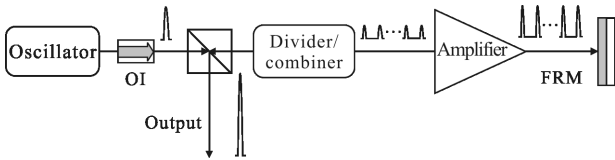


图 6 双程结构分割脉冲放大器示意图

Fig.6 Schematic of a DPA setup in double pass configuration

2007 年,美国康奈尔大学 F Wise 课题组最先提出分割脉冲放大的概念,并采用双程放大器结构和三级钽酸铋双折射晶体,将单一脉冲在时域上分割成 8 个幅度相等的子脉冲,等效于非线性效应降低到单一脉冲的 1/8,子脉冲经过双程放大后逐次合成为一个单脉冲<sup>[13]</sup>。实验中,尽管放大后脉冲的能量仅为 2 nJ,但是,通过对比 2.6 ps 和 300 fs 的超短脉冲在单程放大和分割脉冲放大条件下的光谱,证实了分割脉冲放大对非线性效应的有效抑制。

2012 年,该研究小组将脉冲分割器的级数从三级扩展到五级,实现将一个人射脉冲分割成 32 个子脉冲,同时在子脉冲进入放大器之前加入 1/4 玻片,将脉冲的线偏振态转变为圆偏振态,能够把放大过程中累积的非线性相移降低 1/3,获得峰值功率 1 MW、脉冲宽度 2.2 ps、单脉冲能量 2.5 μJ 的激光输出<sup>[14]</sup>。

2013 年,法国巴黎南方大学的研究人员将啁啾脉冲放大技术与双程放大结构的分割脉冲放大技术相结合,在棒状光纤放大器中,实现了平均功率 77 W,脉冲宽度 320 fs,脉冲能量 430 μJ 的激光输出,合成效率达到 82%,进一步提高合成效率受到子脉冲饱和和增益引入的非线性相移的限制<sup>[16]</sup>。

分割脉冲放大器的输出激光是线偏振光,能够避免在非保偏光纤直接放大过程中偏振消光比的退化。另外,采用法拉第旋转反射镜,可以自动抵消增益光纤引入的双折射抖动。双程放大结构中,脉冲分割器和合成器采用同一套器件,其典型的好处是:能在非保偏光纤中获得保偏输出;此外,双程放大的增益比单程大,同等泵浦功率和增益光纤长度下,输出功率更高。

### 2.2 Sagnac 结构

早在 20 多年前,Sagnac 结构就已经被用在连续光的激光放大中。在这种结构中,入射光在空间上分成两束,一束沿着 Sagnac 环顺时针传输,另一束沿着 Sagnac 环逆时针传输。Sagnac 环路中包括一个或者多个放大器,两束空间分开的光在 Sagnac 环中对称传输,光程相等,能实现较高的合成效率(见图 7)。

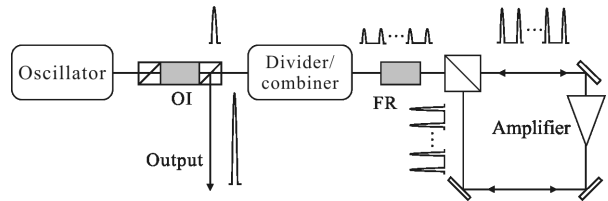


图 7 Sagnac 分割脉冲放大器示意图

Fig.7 Schematic of a DPA setup in Sagnac configuration

2012 年,法国巴黎南方大学光学研究所的 P. Georges 课题组首次在 Sagnac 结构中实现了分割脉冲放大。他们采用两级双折射晶体分割器将一个人射脉冲在时域上分成 4 个,并结合 Sagnac 结构在空间上将脉冲序列再次分割。实验上,放大后子脉冲序列的合成效率达到 89%,输出激光的脉冲宽度为 50 fs,峰值功率 52 MW。这种时域与空域相结合的方式,能进一步抑制放大过程中的非线性效应,展示了分割脉冲放大技术在高峰值功率飞秒脉冲产生方面的优势<sup>[15]</sup>。2015 年,该研究小组采用棒状增益光纤,结合啁啾脉冲放大技术和分割脉冲放大技术,在 Sagnac 结构的放大系统中,实现 1.1 mJ、300 fs、50 kHz 的高能量超短脉冲输出,合成效率达到 90.5%<sup>[18]</sup>。

放大过程中的增益饱和效应会引起不同子脉冲时域形状和幅度发生变化,进而导致子脉冲能量在接近放大器的饱和能量时,各个子脉冲增益不同,相对幅度变化剧烈,合成效率明显下降。同时,当入射脉冲的光谱宽度与放大器的增益谱宽可比拟时,子脉冲序列中的第一个和最后一个脉冲的增益曲线将在光谱上发生偏移,会进一步降低合成效率<sup>[21]</sup>。

### 2.3 主动控制结构

为了克服高功率高能量放大过程中子脉冲序列的幅度、偏振、相位不一致导致的合成效率下降,2013 年,德国耶拿大学的研究人员提出主动控制的分割脉冲放大及合成方案。该方案采用两套独立的器件,将脉冲分割器和合成器分开,再通过主动控制

电路确保放大后子脉冲的非线性相移一致。同时,在主放大器之前引入脉冲整形器,调整各个子脉冲的相对幅度,补偿放大器对于每个子脉冲的增益差异<sup>[23]</sup>。2014年,该课题组采用大模场面积光子晶体光纤,在主动控制的分割脉冲放大系统中,实现脉冲能量 1.25 mJ、脉冲宽度 380 fs、峰值功率 2.9 GW 的激光输出(见图 8)。两年后,该课题组将种子脉冲在时间上分割成 4 个,空间上采用 8 个放大器,结合啁啾脉冲放大与相干合成技术,实现脉冲能量 12 mJ、脉冲宽度 262 fs、平均功率 700 W 的高能量超短脉冲输出,合成效率达到 78.4%,这是目前光纤放大系统实现的最高的单脉冲能量<sup>[19]</sup>。分离脉冲放大技术不仅可以用于光纤放大器,还可以用在固体放大器当中,克服非线性效应导致的光谱展宽,避免增益介质的光致损伤,获得窄谱、高能量的超短脉冲,用于高效率光参量转换的泵浦<sup>[20-22]</sup>。

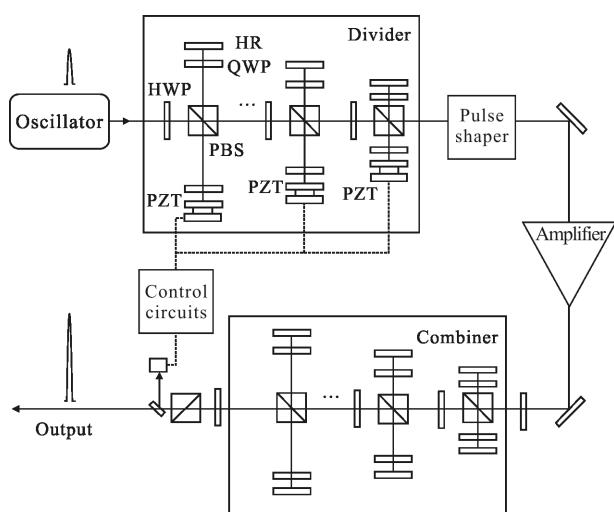


图 8 主动控制分割脉冲放大器示意图

Fig.8 Schematic of an actively controlled DPA setup

### 3 掺铒光纤分割脉冲放大器

与 1.0 μm 波段相反,单模光纤在 1.5 μm 表现出负色散特性,光纤中的反常色散和自相位调制效应能支持孤子的产生。1.5 μm 波段的超短脉冲在光纤中放大时,随着脉冲峰值功率的增加,非线性长度发生周期性改变,孤子自频移、自相位调制、频率啁啾等效效应破坏了孤子波包的稳定传输,导致高阶孤子分裂成若干个基阶孤子,脉冲能量无法继续提高<sup>[24]</sup>。受限于负色散光纤中孤子所能承载的能量,在

单模光纤或者小芯径包层光纤难以同时实现高能量与超短脉宽。传统的啁啾脉冲放大技术能有效抑制非线性效应,但是其仅能实现功率的提升,无法对脉冲宽度进行压缩。另外,啁啾脉冲放大技术常用的色散补偿器件是空间结构的光栅或者棱镜,这会严重影响光纤激光器的集成化。

为克服上述困难,课题组采用分割脉冲放大与非线性压缩相结合的方法,通过有效管理光纤中的非线性效应,在功率放大的同时对脉冲进行光谱展宽。分割脉冲技术的运用实现了高能量激光输出,非线性放大与压缩的融合将放大器与脉冲压缩器合二为一,无需将输出再耦合到色散补偿器件,实现高能量窄脉冲的直接输出。系统方案如图 9 所示<sup>[25]</sup>。

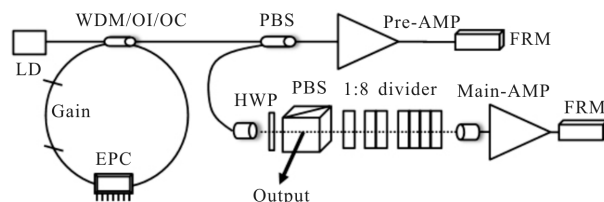


图 9 包含三级分割的掺铒分割脉冲放大器示意图

Fig.9 Schematic of Er-doped 3-stage divided pulse amplifier

光纤振荡器基于非线性偏振旋转锁模机制,通过引入复合器件和电控偏振控制器,实现了高稳定性、高集成度的种子光源。复合器件同时具备波分复用器、光隔离器、输出耦合器的功能,输出尾纤为保偏光纤。通过调节电控偏振控制器的驱动电压,可以精确改变腔内的偏振状态,实现自启动的稳定锁模。通过在输出端监测激光器的输出状态,反馈控制电控偏振控制器,实验上实现了长期稳定的锁模激光输出。腔内偏振态的改变还能用于锁定非线性偏振旋转锁模光纤激光器的重复频率,调节超短脉冲的载波包络相位,为实现高度集成化的光纤飞秒频率梳提供了技术途径<sup>[26-27]</sup>。

光纤振荡器的重复频率为 80 MHz,腔内增益光纤的长度是 0.82 m,单模光纤长度 1.74 m,总色散为正,是一种展宽压缩型振荡器。在 200 mW 泵浦光的激励下,振荡器输出脉冲的平均功率是 5 mW,脉冲宽度是 1.5 ps,光谱宽度达到 28 nm。经过单模光纤预放大器,超短脉冲的输出功率提高到 100 mW,脉冲宽度展宽到 2 ps,由于增益窄化的影响,谱宽压



缩到 14 nm。

增益窄化效应导致光纤放大器输出脉冲的光谱比输入光谱更窄,限制了超短脉冲所能压缩到的极限脉冲宽度。为克服这一效应,笔者采用非线性放大的方式,通过非线性效应引起的光谱展宽作用,补偿增益窄化,实现更宽频谱、更窄脉宽的脉冲输出。在实验上,具有正啁啾的皮秒脉冲注入负色散的掺铒光纤放大器中,非线性效应引入的光谱展宽和色散导致的时域窄化效应相互作用,在不同的光纤长度范围内呈现出不同的特征:(1) 线性区,在起初的放大过程中(增益光纤的前 3.2 m),脉冲能量处在较低水平,脉冲宽度较长,此时色散作用占据主导地位,脉冲沿光纤长度频域形状近乎不变,时域宽度缓慢线性压缩;(2) 中等非线性区,增益光纤中段(3.2 ~5 m 之间),超短脉冲能量提升较为显著,自相位调制与色散效应共同主导脉冲的演化,表现为脉冲频域光谱明显展宽,时域宽度快速压缩;(3) 过量非线性区,增益光纤长度后段(大于 5 m),脉冲已获得了充分的增益,在频域观察到孤子自频移甚至拉曼孤子的出现,时域上脉冲出现边带,甚至分裂。因此,对于特定的输入脉冲,存在一个最优的增益光纤长度,可以实现最优的脉冲放大和压缩。对于脉冲宽度 1.9 ps、平均功率 5 mW、重复频率 80 MHz、光谱宽度 14 nm 的输入脉冲,理论仿真得到的最优光纤长度是 4.7 m,如图 10 所示。此时,输出脉冲宽度小于 100 fs,平均功率 130 mW,对应的单脉冲能量是 1.6 nJ。分割脉冲放大为继续提高输出脉冲的能量提供了新的解决方案,如果采用 1 分 8 的方案,理论上就能实现平均功率 1.04 W,单脉冲能量 12.8 nJ 的超短脉冲输出。

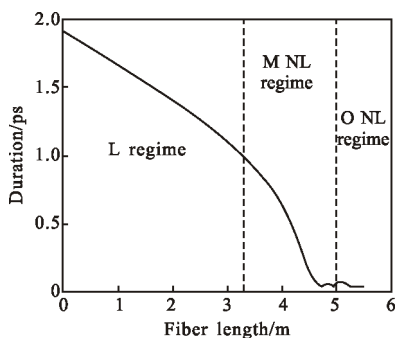


图 10 脉冲宽度随增益光纤长度的变化关系

Fig.10 Variance of pulse duration vs gain fiber length

为验证分割脉冲放大对激光输出功率与能量的

提升效果,实验上,采用三级 YVO<sub>4</sub> 双折射晶体作为脉冲分割器,长度依次是 10、20 和 40 mm。通过共线式结构,将初始脉冲在时域上分割为 8 个子脉冲。主放大器采用双程结构,包括一段长度 0.6 m 的 12/130 的双包层掺铒光纤,和一个高功率法拉第旋转反射镜。入射脉冲第一次经过增益光纤时,获得的增益有限,脉冲能量相对较低,此时色散起主要作用,放大器工作在线性区。经过法拉第旋转反射镜反射后,脉冲能量提升,自相位调制和色散效应共同作用,放大器工作在中等非线性区。采用 4 W 的泵浦功率,放大器输出功率是 580 mW,脉冲宽度 125 fs,单脉冲能量 7.25 nJ,其时域自相关图案和频域光谱分布如图 11 所示。与理论预测的 12.8 nJ 的单脉冲能量相比,实验值有点偏低,主要是由于不同种类光纤的熔接损耗、法拉第旋转反射镜的插入损耗以及光纤合束器的损耗造成的。另外,非线性放大过程中,输出光谱和输入光谱不一致,也是导致合成效率下降的一个原因。

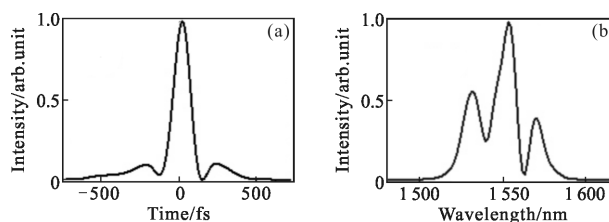


图 11 主放大器输出脉冲的自相关图和频谱图

Fig.11 Auto-correlation and frequency spectral intensity of output pulse from main amplifier

相比共线型的双折射晶体展宽器,非共线的结构能实现更大的脉冲延时,分割后的子脉冲在晶体中沿着不同路径传输,避免了可能发生的交叉相位调制等效应。2016 年,采用两级非共线 YVO<sub>4</sub> 双折射晶体脉冲分割器和双程结构的双包层放大器,课题组将脉冲的输出功率提高到 1.06 W,进一步增加非共线脉冲分割器的个数受到双折射晶体横向尺寸的限制。实验结果表明,耦合到分割脉冲放大器的能量越低,放大过程中累积的非线性效应越少,非线性脉冲压缩的演化速度也越慢,更有利于高能量超短脉冲的直接输出<sup>[28]</sup>。

最近,将双折射晶体和偏振分束立方体结合起来,实现五级共 32 个子脉冲的脉冲时域分割,通过

双包层掺铒放大器实现了平均功率 1.6 W、脉冲宽度 126 fs 的超短脉冲输出,见图 12。平均功率的进一步放大受到合成效率、增益饱和、光纤端面损伤的限制<sup>[10]</sup>。

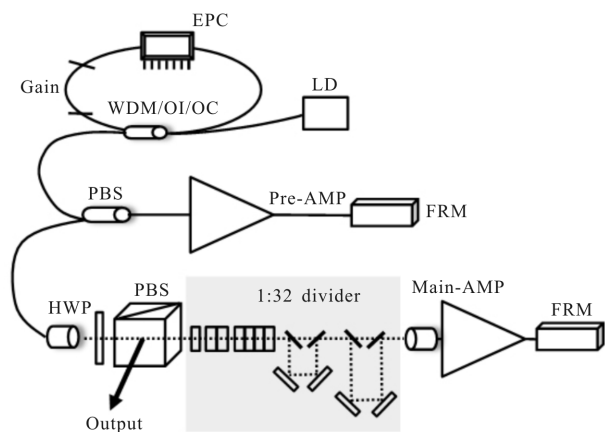


图 12 包含五级分割的掺铒分割脉冲放大器示意图

Fig.12 Schematic of Er-doped 5-stage divided pulse amplifier

理论模拟和实验结果表明,由于色散和非线性效应的共同作用,对于特定长度的主放大器增益光纤存在一个最优的子脉冲能量,即放大器输出脉冲的脉宽最窄。换句话说,无论子脉冲的个数是多少,每个脉冲在特定长度的增益光纤中实现最窄输出时,脉冲能量是确定的。脉冲能量的进一步提升会导致脉冲宽度展宽。

通过光学倍频,将 1560 nm 飞秒脉冲拓展至 780 nm 波长,此波段与钛宝石飞秒激光器相吻合。实验上,通过采用长度 0.3 mm,极化周期 20.9 μm 的周期性铌酸锂晶体作为倍频介质,将平均功率 570 mW、脉冲宽度 126 fs 的掺铒飞秒激光作为输入光,实现了平均功率 280 mW、脉冲宽度 98 fs、中心波长 780 nm 的飞秒激光,倍频效率约为 50%。780 nm 飞秒脉冲的时域自相关图和频域光谱分布如图 13 所示。基于

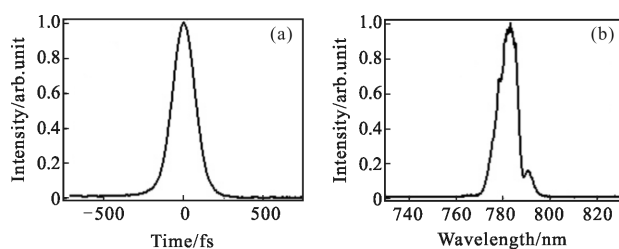


图 13 光学倍频后 780 nm 激光的自相关图和频谱图

Fig.13 Auto-correlation and frequency spectral intensity of 780 nm after optical frequency doubling

分割脉冲放大和非线性压缩的 780 nm 飞秒激光器在脉冲宽度、平均功率等性能上与钛宝石激光器可比拟,在光源体积、使用成本、长期稳定、维护方便性上具有独特优势。目前,基于该技术已经形成成熟的技术产品,应用在包括太赫兹、双光子成像、相干反斯托克斯拉曼光谱显微成像、微纳加工等多个研究领域<sup>[29]</sup>。

## 4 结论

更高能量、更窄脉宽、多波段输出一直是超快激光技术领域的不变追求。分割脉冲放大技术是基于对脉冲的偏振态控制,在时域上将一个超短脉冲分割成多个子脉冲,可有效抑制了激光放大器中的非线性效应。该方案已经在多个波段的激光放大中成功实现,间接突破了材料损伤极限的制约。综合运用分割脉冲放大与偏振相干合成技术,从时域、空域不断拓展支路数目,结合主动式相干合成控制方案,精密补偿各支路延时、偏振、强度、相位抖动,提高飞秒脉冲的输出能量与相干合成系统的合成效率,能突破增益介质的抗损伤阈值限制,展现分割脉冲放大技术在相干合成领域的独特优势。目前,该项技术已经开始向固体激光领域拓展,未来将与光纤及固体增益介质深度结合,成为大能量、高功率激光器的一个有效实现手段。分割脉冲放大技术将会随着激光技术的发展,在国防军事、材料加工及基础物理领域发挥更加重要的作用。

## 参考文献:

- [1] Liu Z J, Zhou P, Xu X J, et al. Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56: 1597-1606.
- [2] Yu Hailong, Wang Xiaolin, Su Rongtao, et al. Advances in high power femtosecond fiber laser systems [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050007. (in Chinese)  
于海龙,王小林,粟荣涛,等. 高功率飞秒光纤激光系统的研究进展[J]. 激光与光电子学进展. 2016, 53(5): 050007.
- [3] Zheng Y, Yang Y, Wang J, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation [J]. Optics Express, 2016, 24 (11): 12063.
- [4] 杨依枫,沈辉,陈晓龙,等. 全光纤化高效率、窄线宽光纤激光器实现 2.5kW 近衍射极限输出[J]. 中国激光, 2016, 43



- (4): 256.
- [5] Yu Hailong, Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, et al. 300 W linearly polarized femtosecond all-fiber chirped pulse amplification system [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2016, 28(5): 050101. (in Chinese)  
于海龙, 王小林, 张汉伟, 等. 300 W 线偏振飞秒全光纤啁啾脉冲放大系统[J]. *强激光与粒子束*. 2016, 28(5): 050101.
- [6] Ma Pengfei, Zhou Pu, Ma Yanxing, et al. Study of coherent polarization beam combining technique of multi-channel fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0402009. (in Chinese)  
马鹏飞, 周朴, 马阎星, 等. 多路光纤激光相干偏振合成技术研究[J]. *中国激光*. 2012, 39(4): 0402009.
- [7] Ma P, Tao R, Wang X, et al. Coherent polarization beam combination of four mode-locked fiber MOPAs in picosecond regime[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4123.
- [8] Yang K, Zhu G, Hao Q, et al. Coherent polarization beam combination by microcontroller-based phase-locking method [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(20): 2129-2132.
- [9] Klenke A, Kienel M, Eidam T, et al. Divided-pulse nonlinear compression[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4593-4596.
- [10] Hao Q, Wang Y, Liu T, et al. Divided-pulse nonlinear amplification at 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-8.
- [11] Lamb E S, Wright L G, Wise F W. Divided-pulse lasers[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2775.
- [12] Guichard F, Hanna M, Zaouter Y, et al. Analysis of limitations in divided-pulse nonlinear compression and amplification [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 619-623.
- [13] Zhou S, Wise F W, Ouzounov D G. Divided-pulse amplification of ultrashort pulses[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 871-873.
- [14] 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.
- [15] 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): 21627-21634.
- [16] Zaouter Y, Guichard F, Daniault L, et al. Femtosecond fiber chirped-and divided-pulse amplification system [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 106-108.
- [17] 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.
- [18] Guichard F, Zaouter Y, Hanna M, et al. High-energy chirped-and divided-pulse Sagnac femtosecond fiber amplifier [J]. *Opt Lett*, 2015, 40(1): 89-92.
- [19] 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.
- [20] Pouysegur J, Guichard F, Zaouter Y, et al. Hybrid high-energy high-power pulsewidth-tunable picosecond source [J]. *Opt Lett*, 2015, 40(22): 5184-5187.
- [21] Pouysegur J, Weichelt B, Guichard F, et al. Simple Yb:YAG femtosecond booster amplifier using divided-pulse amplification[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9896.
- [22] Webb B, Azim A, Bodnar N, et al. Divided-pulse amplification to the joule level [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(13): 3106-3109.
- [23] Kienel M, Klenke A, Breilkopf S, et al. Fiber amplifier CPA system using divided-pulse amplification for multi-mJ extraction [C]//Lasers and Electro-Optics Europe. IEEE, 2014: 1.
- [24] Govind P Agrawal. Principle and Application of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Translated. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2010. (in Chinese)  
Govind P Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [25] Hao Q, Zhang Q, Sun T, et al. Divided-pulse nonlinear amplification and simultaneous compression [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(10): 101103.
- [26] Shen X, He B, Zhao J, et al. Repetition rate stabilization of an erbium-doped all-fiber laser via opto-mechanical control of the intracavity group velocity[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 31117.
- [27] Shen X, Li W, Yan M, et al. Electronic control of nonlinear-polarization-rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(16): 3426-3428.
- [28] 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): 025503-025505.
- [29] 上海朗研光电科技股份有限公司. 飞秒光纤激光器[EB/OL]. [2017-06-10]. <http://www.roiop.com/Article-product-id-11.www.roiop.com/>.