·激光技术·

基于偏振调控的脉冲时域相干分割合成技术

刘必达,黄智蒙*,张　帆,周丹丹,张　锐,彭志涛

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心,四川　绵阳)

摘　要:介绍了基于偏振调控的脉冲时域分割-相干合成技术的原理,并设计了短脉冲时域相干合成系统,搭建了实验研究平台。利用偏振分束器、延迟线和波片将重复频率为10 MHz,脉冲宽度1 ns的每个脉冲在时间上分割成4个子脉冲,子脉冲间隔2 ns,再经过类似的偏振分束器、延迟线和波片装置进行重新组合。通过对子脉冲的偏振调控并优化分割脉冲幅度分布,实验实现了四脉冲时域相干合成,合成效率达到95.65%。

关键词:光纤激光;超短脉冲;脉冲分割合成

中图分类号:TN248　　　**文献标识码**:A　　　**文章编号**:1673-1255(2024)-05-0029-05

Coherent Pulse Division and Combination in Time-domain by Controlling Polarization

LIU Bida, HUANG Zhimeng*, ZHANG Fan, ZHOU Dandan, ZHANG Rui, PENG Zhitao

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang, China)

Abstract: The principle of pulse division and temporal coherent combination is introduced. The system of temporal coherent combination of short pulses is designed, and the experimental research platform is established. By employing a series of polarization beam splitters, delay lines and wave plates, each pulse with repetition rate of 10 MHz and pulse duration of 1 ns can be divided into four-pulse, whose interval is 2 ns. The divided pulses can be recombined using similar polarization beam splitters, delay lines and wave plates. Through adjustment of polarization and optimization of the amplitude distribution in divided pulses, the temporal coherent combination of four pulses has been obtained, and the combination efficiency is up to 95.65%.

Key words: fiber laser; short pulse; pulse division and combination

由于光纤中的非线性效应和热效应,以及高功率所引起的光纤损伤和模式不稳定性等因素的影响,单纤激光的功率与能量提升受限。相干合成技术则能够在保持良好的光束质量的同时提升系统性能,是实现高平均功率、高重复频率及高脉冲能量超短脉冲激光输出的必由之路。脉冲时域相干合成技术通过对高重频的脉冲序列进行功率放大后,再进行时序合成,降低激光的重复频率,提升输出激光的峰值功率和能量,避免低重频激光放大过程中高峰值功率引起的各种非线性效应。

当前时域相干合成主要有三种方案,分别是脉冲分割放大技术(divided-pulse amplification,DPA)[1-6]、腔增强技术(cavity enhancement)[7-8]和脉冲相干堆积技术(coherent pulse stacking,CPS)[9-13]。腔增强技术受限于光开关的插入损耗、响应速度和损伤阈值,遇到了一定的瓶颈。脉冲相干堆积技术在多脉冲时域相干合成系统中得到广泛应用,但是系统控制维度(脉冲相位与光腔相位)较多,结构复杂。EDPA系统具有控制自由度多、脉冲相位设置简单及合成效率高等优点,目前基于EDPA技术的光纤时空多维相干合成已经获得了32 mJ的单脉冲能量输出[6]。

文中基于DPA技术,设计了短脉冲时域相干合成系统。通过偏振调控与优化分割脉冲幅度分

收稿日期:2024-02-02

布[14]，实验实现了四脉冲时域相干合成，合成效率达到95.65%。

1　DPA系统介绍

在DPA系统中，输入脉冲在时域上被分割成一定数量的若干个脉冲，形成一串脉冲序列，该脉冲序列功率放大后通过时域上的叠加再次获得一个强脉冲。如图1。

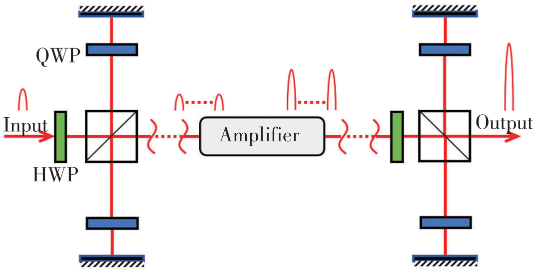


图1　DPA概念图

脉冲采用偏振分束器（PBS）、四分之一波片（QWP）和半波片（HWP）的组合进行划分。首先，利用HWP将线偏振输入脉冲的偏振方向转为与水平夹角45°，并通过之后的PBS将脉冲分成两个偏振方向正交的子脉冲。P偏振光直接透过PBS。S偏振光则经PBS反射在空间延迟线中传播，S光在延迟线的前半部分两次通过QWP，转变为P光，再次通过PBS，向延迟线的后半部分传播，又通过QWP两次，并将偏振方向转回到S偏振，最后在PBS上反射输出。由此获得到两个具有一定时间延迟的，偏振方向正交的脉冲，有效脉冲宽度增加了一倍，从而使得脉冲峰值功率下降了一倍。如果设置更多不同延迟线长度的HWP、PBS和QWP组合，可以实现更多脉冲数量的分割。分割后的脉冲经过功率放大后在与分割阶段设置相对称的合成模块进行重新组合，转动合成部分的HWP，让P偏振和S偏振均发生90°的偏转，此时原先的S偏振变为P偏振后，直接透过PBS，P偏振变为S偏振后，则反射进入空间延迟线，出射后刚好与之前透过的脉冲在时域上重合，从而补偿了分割造成的脉冲之间时间延迟，最终合成为单个脉冲。

脉冲电场的复振幅可以写成琼斯矢量，为了表示一串脉冲的时间划分，在N次分割后，总共2^N个脉冲使用不同的时间标识t表示，t=1，2，…，2^N。第t个脉冲可以写为

$$A_t=\begin{pmatrix} A_t^{p}\exp\left(i\Phi_t^{p}\right)\\ A_t^{s}\exp\left(i\Phi_t^{s}\right)\end{pmatrix} \tag{1}$$

其中，A_t^p和A_t^s分别为p偏振和s偏振的振幅，Φ_t^p和Φ_t^s分别为p偏振和s偏振的相位，在一般情况下，使用一组向量$A_{in,t}$作为输入，线性极化输入脉冲$A_{in,1}=\left(A_{in,1}\ \ 0\right)^T$为第一个脉冲，所有其他向量都等于0。该设置中的光学元件可以用琼斯矩阵来描述，如表1所示，并假设所有的反射镜都是完全反射的，即它们的琼斯矩阵是单位矩阵。其中，θ是光轴相对于脉冲的p偏振轴的旋转角度，T_p是p分量的透过率，R_s是s分量的反射率。

表1　DPA系统中光学元件的琼斯矩阵

光学元件	琼斯矩阵
HWP	$J_{HWP}(\theta)=\begin{pmatrix}\cos 2\theta & \sin 2\theta\\ \cos 2\theta & -\cos 2\theta\end{pmatrix}$
QWP	$J_{QWP}(\theta)=\begin{pmatrix}\cos^2\theta+i\sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta(1-i)\\ \sin\theta\cos\theta(1-i) & \sin^2\theta+i\cos^2\theta\end{pmatrix}$
PBS	$J_R=i\begin{pmatrix}\sqrt{1-T_p} & 0\\ 0 & \sqrt{R_s}\end{pmatrix}$ $J_T=\begin{pmatrix}\sqrt{T_p} & 0\\ 0 & \sqrt{1-R_s}\end{pmatrix}$

每个分割单元由一个HWP、PBS和两个QWP组成，在HWP和第m个分割单（m=1，2，…，N）的PBS参与下进行划分，得到每个时间序列的传输场$A_{T,t}$和反射场$A_{R,t}$ 如下

$$A_{T,t}=\boldsymbol{J}_T\boldsymbol{J}_{HWP}(\theta_m)A_t \tag{2}$$

$$A_{R,t}=\boldsymbol{J}_R\boldsymbol{J}_{QWP}^{\ 2}(\theta_m)\boldsymbol{J}_T\boldsymbol{J}_{QWP}^{\ 2}(\theta_m)\boldsymbol{J}_R\boldsymbol{J}_{HWP}^{\ 2}(\theta_m)A_t \tag{3}$$

t_m表示第m个划分单元的反射部分时间延迟，DPA原则要求每个延迟线的时间延迟都是不同的（即对于$m\neq m'$，$t_m\neq t_m'$）。因此，分割后的脉冲表示为[14]

$$A_t=\begin{cases}\boldsymbol{J}_T A_{T,t}+\boldsymbol{J}_R A_{R,t-t_m} & 对于\ t>t_m\\ \boldsymbol{J}_T A_{T,t} & 其他\end{cases} \tag{4}$$

2　实验系统

实验采用了如图2所示的两组分割-合成装置。振荡器是一台波长1 064 nm，功率50 mW的单频连续光纤激光器。由任意波形发生器（AWG）给幅度调制器AM输送调制信号，生成重频100 MHz，脉冲宽度1 ns的脉冲串。第1级放大后由声光调制

器AOM把重复频率降为10 MHz，随后再经两级放大输出，平均功率达到70 mW，光束质量M^2=1.25，其输出光谱如图3所示。重频和单个脉冲波形如图4和图5所示。S偏振光在由四分之一波片和反射镜组成的0.6 m空间延迟线内通过后比P光滞后了4 ns，输入的单脉冲被分割成两个脉冲。这两个脉冲再经过一组0.3 m的延迟线被分割成4个脉冲，脉冲间隔为2 ns。合成装置则与分割装置相对称，S偏振光旋转90°后直接通过，P偏振光旋转90°后，先在空间延迟线中通过，在0.3 m的延迟线内将4个脉冲合成两个脉冲，随后由0.6 m的延迟线合成为单个脉冲。

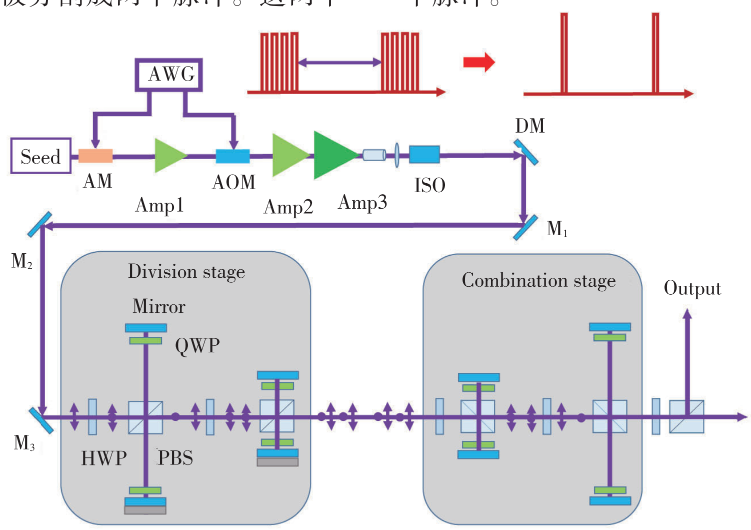


图2　DPA系统装置

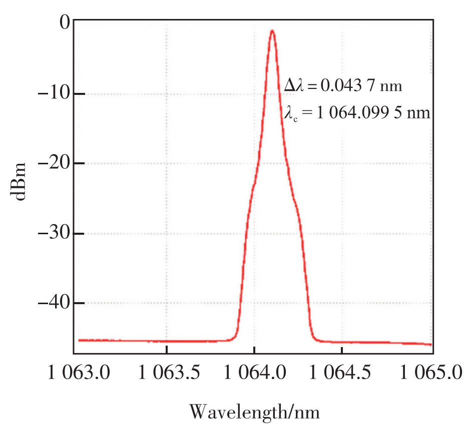


图3　DPA系统的输入光谱

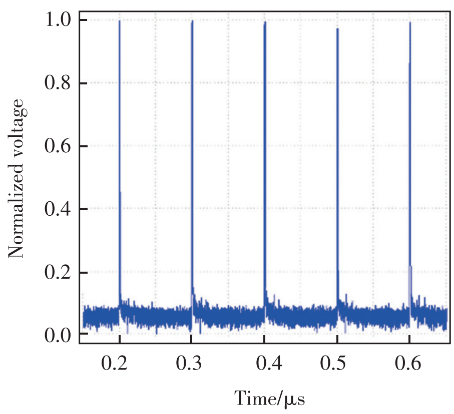


图4　DPA系统的输入脉冲(重复频率)

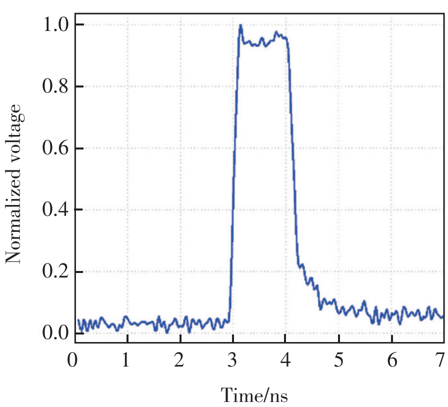
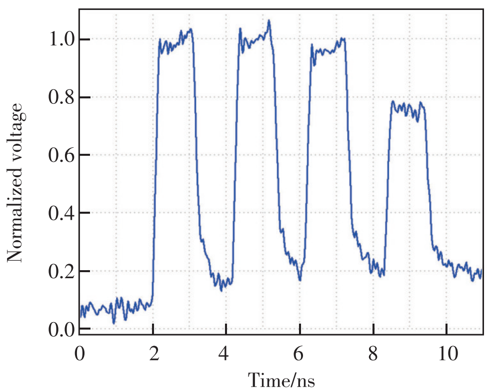


图5　DPA系统的输入脉冲(单脉冲)

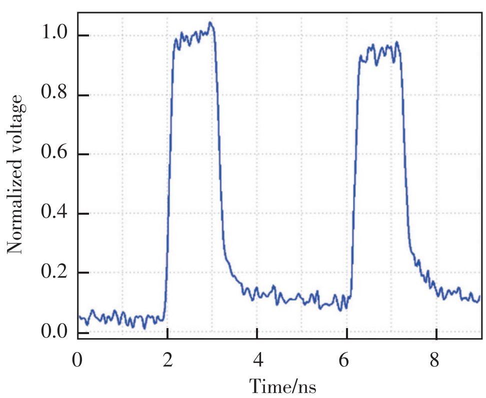
3　实验结果与分析

在DPA系统中，需要对偏振态进行精确的调控，实验初步将输入的脉冲分割为幅度相近的4个脉冲，归一化幅度分布为0.982，1.00，0.961，0.776，如图6(a)所示。输出端测到有两个幅度相近的脉冲，时间间隔4 ns，且无法消去其中任意一个，如图6(b)所示。由于实验中使用的宽带PBS对不同偏振态具有不同的功率损耗，因此对于4个幅度相近的脉冲，合成效率较低。通过调节分割阶段的

半波片，使得4个脉冲幅度成逐渐减小的趋势，如图7(a)所示，则合成效率有所提高，从图7(b)可以看出，合成输出的两个脉冲的幅度差异明显加大，在此基础上进一步对分割脉冲的偏振态与幅度分布进行调控，转动分割阶段两个HWP的角度，找到一组合成效率较高的幅度分布。如图8(a)所示，分割后的4脉冲的归一化幅度分布为1.00，0.867，0.731，0.329。经过合成模块，较好地合为一个脉冲，如图8(b)所示，主副脉冲归一化幅度分别为1.00，0.045，合成主脉冲占脉冲总能量的95.65%。测得合成后输出脉冲的功率为31 mW，偏振消光比为21.9 dB。实验使用的HWP波长为1 030 nm，1 064 nm的激光在其中产生的相位延迟略有误差，分割出光脉冲的偏振度不是特别高，具有少量的椭圆偏振成分。使用的宽光谱PBS对1 064 nm的P偏振光透过损耗在10%以内，对S偏振的反射损耗约小于5%，整个系统中光束多次经过PBS，因此累积后在输出端的光功率减弱较明显。合成的脉冲在主脉冲后20 ns处还有残留的小脉冲，来自于腔中因偏振态不纯而多次反射的残留光。

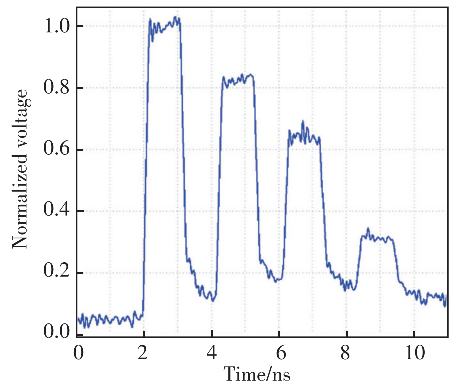


(a)分割的脉冲

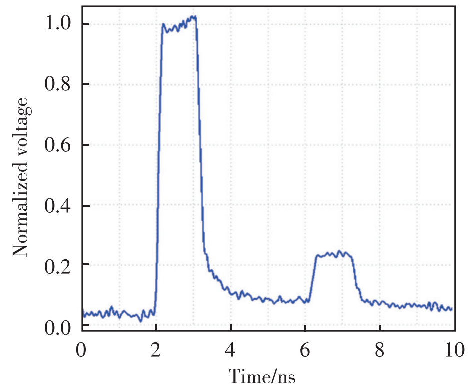


(b)合成阶段输出脉冲

图6 分割成幅度相近4脉冲的波形

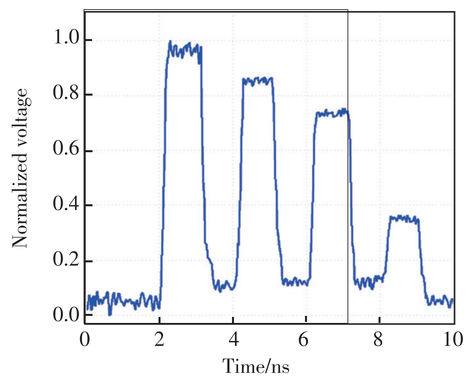


(a)分割的脉冲

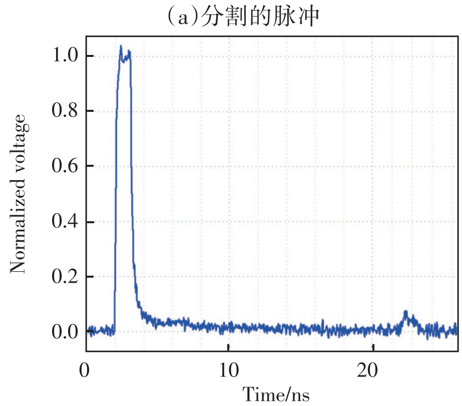


(b)合成阶段输出脉冲

图7 初步优化后的脉冲



(a)分割的脉冲



(b)合成阶段输出脉冲

图8 优化得到的最佳脉冲

4 结 论

进行了光纤激光4脉冲分割-合成的实验。DPA系统需要对偏振态进行精确的调控来达到最高合成效率。实验中需要转动每一级的四分之一波片使输出的光功率最大，保证光的偏振态纯度较高和传播方向正确。两级分割腔要转动半波片来找到一组最佳的脉冲幅度分布，该分布与实验中使用的光学元件对不同偏振态的传输损耗等因素有关。两级合成腔也要转动半波片使S偏振光延迟来补偿分割级中P偏振光的延迟。对于不同的光学元件，其分割幅度分布也略有不同，总体是逐个下降的趋势。实验将单个1 ns脉宽的光脉冲分成4个1 ns脉冲，再合成为单个1 ns脉冲，主副脉冲归一化幅度分别为1.00，0.045，合成主脉冲占脉冲总能量的95.65%。实验验证了基于偏振调控的脉冲时域相干分割合成技术能够将脉冲串中的多脉冲在时域上进行高效地相干合成，在光纤激光短脉冲的能量提升方面具有较大潜力。

参考文献

[1] ZHOU S A，FRANK W W. Divided-pulse amplification of ultrashort pulses[J]. Opt Lett，2007，32(7): 871-873.

[2] KIENEL M, KLENKE A, HADRICH S, et al. Divided-pulse amplification forhigh energy extraction[C]//Advanced Solid-State Lasers Congress, Paris, France: Optica Publishing Group, 2013: ATu3A. 09.

[3] KIENEL M，KLENKE A，EIDAM T，et al. Energy scaling of femtosecond amplifiers using actively controlled divided-pulse amplification[J]. Opt Lett，2014，39(4): 1049-1052.

[4] HENNING S，MICHAEL M，MARCE K，et al. Electro-optically controlled divided-pulse amplification[J]. Opt Express，2017，25(12): 13494-13503.

[5] STARK H, BULDT J, MVLLER M, et al. 23 mJ high-power fiber CPA system using electro-optically controlled divided-pulse amplification[J]. Opt Lett，2019，44(22): 5529-5532.

[6] HENNING S，MAXINILIAN B，JOACHIM B，et al. Pulses of 32 mJ and 158 fs at 20 kHz repetition rate from a spatiotemporally combined fiber laser system[J]. Opt Lett，2023，48(11): 3007-3010.

[7] SEEN B，TINO E，ARNO K，et al. A concept for multi-terawatt fiber lasers based on coherent pulse stacking in passive cavities[J]. Light: Science&Applications，2014，3(10): e211.

[8] BREITKOP S，WUNDERLICH S，EIDAM T，et al. Extraction of enhanced ultrashort laser pulses from a passive 10 MHz stack-and-dump cavity[J]. Appl Phys B，2016，122(12): 297-1-297-7.

[9] ZHOU T，JOHN R，ZHU C，et al. Coherent pulse stacking amplification using low finesse Gires-Tourno is interferometers[J]. Opt Express，2015，23(6): 7442-7462.

[10] JOHN R, SIYUN C, SHEIKHSOFL A M, et al. Multiplexed coherent pulse stacking of 27 pulses in a 4+1 GTI resonator sequence[C]//Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL), Boston, United States: Optica Publishing Group, 2016: AM4A.6.

[11] PEIH Z, JOHN R, SIYUN C, et al.10 mJ energy extraction from Yb-doped 85 μm core CCC fiber using coherent pulse stacking amplification of fs pulses[C]//Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL), Nagoya, Japan: Optica Publishing Group, 2017: AW4A. 4.

[12] XU Y L，RUSSELL W，JOHN B，et al. FPGA-based optical cavity phase stabilization for coherent pulse stacking[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics，2018，54(1): 1600111.

[13] PEIH Z, MATHEW W, DU Q, et al. Design and operation of coherent pulse stacking amplification as a deep recurrent neural network[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, California, United States: Optica Publishing Group, 2021: STu2E. 2.

[14] KIENEL M，KLENKE A，EIDAM T，et al. Analysis of passively combined divided-pulse amplification as an energy-scaling concept[J]. Opt Express，2013，21(23): 29031-29042.