



·强激光物理与技术·综述·

## 光纤啾啾脉冲时域相干合成技术研究新进展\*

刘必达, 黄智蒙, 张帆, 夏汉定, 周丹丹, 李剑彬, 郑钧文,  
张锐, 李平, 彭志涛, 朱启华, 胡东霞

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

**摘要:** 脉冲时域相干合成技术主要通过对功率放大后的高重复脉冲序列进行时序合成, 从而降低激光的重复频率, 有效地提升输出脉冲的峰值功率与能量, 避免放大过程中高峰值功率引起的非线性效应。该技术与空域相干合成相结合, 能够突破单纤激光的性能极限, 实现高能量、高平均功率和高峰值功率的超短脉冲激光输出, 具有广阔的应用前景。介绍了超短脉冲光纤激光时域相干合成的基本原理和关键技术, 综述了时域相干合成系统的发展历程及其关键技术的研究现状, 重点介绍了近年来脉冲分割放大与脉冲相干堆积技术的研究进展, 并对时域相干合成的不同技术路线进行了分析与比较, 最后对其未来的发展方向进行了梳理, 为相关领域的研究提供参考。

**关键词:** 光纤激光; 超短脉冲; 时域相干合成; 啾啾脉冲

中图分类号: TN248

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230308

## Recent progress of temporal coherent combination of chirped pulses in fiber lasers

Liu Bida, Huang Zhimeng, Zhang Fan, Xia Handing, Zhou Dandan, Li Jianbin, Zheng Junwen,  
Zhang Rui, Li Ping, Peng Zhitao, Zhu Qihua, Hu Dongxia

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Temporal coherent combination further extends the pulse duration by assembling many pulses in a train passed through the amplifier into one output pulse, which can improve the peak power and pulse energy effectively and avoid nonlinear effects excited by the high peak power in the amplification. Spatial and temporal pulse combination can overcome limitations in single fiber laser, potentially leading to higher pulse energy, average power and peak power of ultrafast pulses currently only available from bulk amplifiers with low repetition rates. In this paper, the principles and key technologies of temporal coherent combination of ultrafast pulses in fiber lasers are introduced. The current status of temporal coherent combination and their technologies are reviewed. Recent progress of Divided Pulse Amplification (DPA) and Coherent Pulse Stacking (CPS) is emphasized. Different technical ways are compared and analyzed. Several future perspectives are pointed out. The paper can be a reference for research on temporal coherent combination of chirped pulses.

**Key words:** fiber laser, ultra-short pulse, temporal coherent combination, chirped pulse

飞秒脉冲具有超短的脉宽、超高的峰值功率, 在工业精密加工、生物医药工程、高能量密度物理以及激光粒子加速等领域有着广泛的应用前景。光纤激光具有转换效率高、结构紧凑和光束质量好等优势, 近年来得到快速发展。与此同时, 兼具高平均功率和高单脉冲能量的飞秒光纤激光更是成为超快激光研究领域中的热点之一<sup>[1-12]</sup>。

由于光纤非线性效应和热效应的影响, 如自相位调制 (SPM)<sup>[13-16]</sup>、受激拉曼散射 (SRS)<sup>[17-19]</sup>、自聚焦<sup>[20-23]</sup> 等以及高功率所引起的光纤损伤和模式不稳定性 (TMI)<sup>[24-30]</sup>, 单纤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, 是突破单纤性能极限, 实现高平均功率、高重复频率、高脉冲能量飞秒激光

\* 收稿日期: 2023-09-11; 修订日期: 2023-10-25  
基金项目: 国家自然科学基金项目 (62075201)  
联系方式: 刘必达, liubida777@163.com.  
通信作者: 黄智蒙, huangzhimeng@caep.cn.

输出的必由之路。

目前,基于光纤激光相干放大网络概念建造高能高功率激光驱动器是未来重要的发展方向,具有广阔的应用前景。不仅如此,相干合成在高功率光纤飞秒光学频率梳、非线性脉冲压缩以及阿秒光学等领域也有潜在的应用价值<sup>[31-37]</sup>。相干合成技术总体上分为三类:空域相干合成<sup>[38-41]</sup>、频域相干合成<sup>[42-46]</sup>以及时域相干合成<sup>[47-63]</sup>。其中,时域相干合成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,从而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。

本文将系统地介绍超短脉冲光纤激光时域相干合成的基本原理、关键技术和研究进展,分析其发展趋势,着重介绍近年来国内外在此研究领域的最新进展,为超短脉冲光纤激光时域相干合成的研究提供参考。

## 1 脉冲时域相干合成技术

目前光纤啁啾脉冲时域相干合成的技术路线主要有三种:第一种是脉冲分割-放大技术(DPA)<sup>[47,52-59]</sup>,第二种是增强腔<sup>[49,60]</sup>,第三种是脉冲相干堆积技术(CPS)<sup>[48,61-63]</sup>。近年来,国内外取得重要进展的研究单位主要有德国耶拿大学、美国密歇根大学、康奈尔大学、北京大学和清华大学等。另外,时域相干合成与空域相干合成相结合形成的多维相干合成系统,能够实现更高能量和功率的超短脉冲激光输出<sup>[64-66]</sup>。

### 1.1 脉冲分割-放大技术

在脉冲时域相干合成中,较早采用的方法是脉冲分割-放大技术,美国康奈尔大学 Frank W. Wise 课题组于 2007 年提出该方法,并进行了实验验证<sup>[67]</sup>。其基本原理是将单个脉冲通过一系列偏振分束器、延迟线和波片分割成几个具有不同偏振特性的子脉冲,经过放大后,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,如图 1 所示。该课题组采用掺镱光纤孤子激光器,产生波长 1 038 nm,重频 47 MHz,脉宽 300 fs~3 ps 的脉冲,并利用三块双折射钽酸钪晶体将输入脉冲分割成 8 个子脉冲进行放大,然后再合为 1 个脉冲,实验验证了 DPA 技术及其抑制非线性效应的可行性,由于没有施加相位控制,因此称之为被动式 DPA(PDPA)。

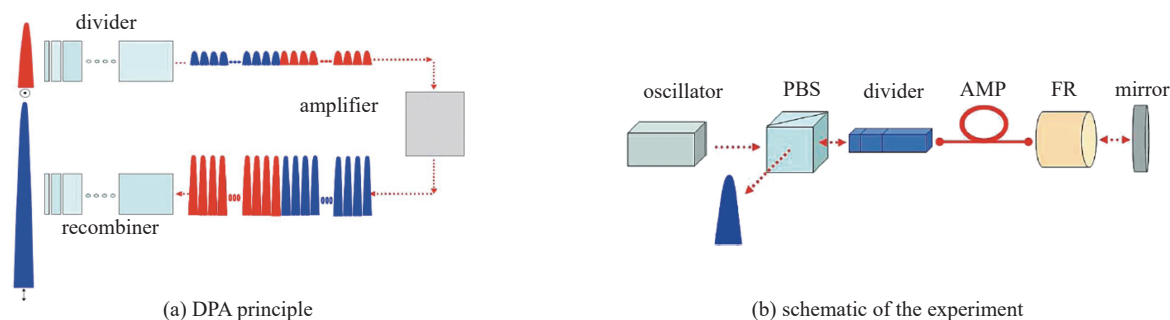


Fig. 1 Schematic of principle and experiment of DPA<sup>[67]</sup>

图 1 脉冲分割-放大技术的原理与实验图<sup>[67]</sup>

但由于脉冲序列在光纤放大器中存在增益饱和和效应,使得各脉冲的峰值功率存在差异。由 SPM 效应引起的非线性相移与脉冲峰值功率有关,这会影响系统合成效率,因此需要对脉冲串中各子脉冲的强度进行调控。然而,被动锁相系统的对称性结构限制了对子脉冲强度的控制自由度,其可合成的脉冲数目受限<sup>[50,57]</sup>。另一种解决方案是将脉冲分割和重组分为两个独立的阶段,通过对脉冲强度控制自由度为  $N-1$  的脉冲分割器将一个脉冲分割为  $N$  个脉冲,各脉冲的强度依次增加。该脉冲序列经过放大后,各脉冲的峰值功率和非线性相移基本保持一致,再由一个脉冲合成器件将其合为一束。这样的方案由于放大器中的饱和而引起的脉冲失真可以在更高的脉冲能量下得到补偿。因此可以从单个光纤放大器中提取出更高的脉冲能量。由于脉冲分割和合成采用的是两套器件,需要通过一个主动控制系统对脉冲分割器中各延迟线的光程进行精密控制,确保各子脉冲在相干合成时的光程和相位保持一致,这种类型的 DPA 称为主动式 DPA(ADPA)<sup>[58]</sup>。

2014 年,德国耶拿大学 Marco Kienel 等人提出了基于主动相位控制(电子频标多抖动法-LOCSET)的 ADPA 技术,将输入脉冲(脉宽 2 ns,重频 10 kHz)分割成 4 个子脉冲,经过大模场掺 Yb 光纤(1.2 m 长,模场直径 MFD 为 75  $\mu\text{m}$ )进行放大,然后再合为 1 个脉冲,通过主动控制,获得了 2.4 mJ 输出,合成效率约 75%,压缩后单脉冲能量为 1.25 mJ,脉宽 380 fs,峰值功率为 2.9 GW<sup>[58]</sup>。

为了扩展可合成脉冲的数目,需要对每个子脉冲的幅度与相位进行高效控制,并且减小合成系统的体积与复

杂度。2017年,德国耶拿大学 Jens Limpert 课题组提出了光电控制的 DPA 技术 (EDPA)<sup>[47]</sup>。该技术通过预先设置每个脉冲的相位与幅度,既可以保持较高合成效率,又能够显著地降低系统的复杂性。其原理如图 2 所示,光纤振荡器输出种子光里面包含 4 个 p 方向线偏振的子脉冲,该光束经过幅度调制器后被分为两束,每束光经过相位调制器后,其所包含的子脉冲相位被分别设为 0 或  $\pi$ ,再经过半波片旋转后进入光纤放大器进行功率放大,输出的两束光合成为一束光,里面 4 个子脉冲的偏振态相互正交,再通过旋转半波片和两级延迟线合成为 1 个脉冲。

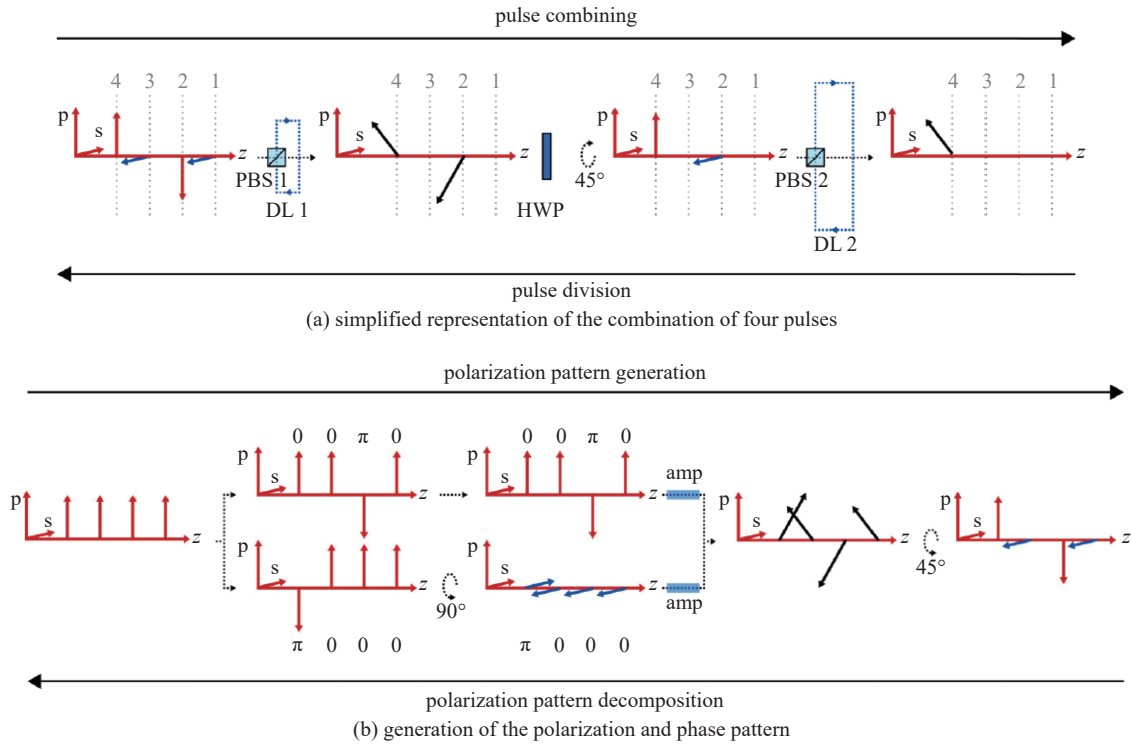


Fig. 2 Principle of EDPA system<sup>[47]</sup>

图 2 EDPA 系统原理图<sup>[47]</sup>

该课题组设计并研制了基于 EDPA 的四脉冲时域合成系统<sup>[47]</sup>,如图 3 所示,光纤振荡器,中心波长为 1030 nm,重频 108 MHz,脉宽 190 ps,经过声光调制器(AOM)后,产生了包含 4 个子脉冲的脉冲串,然后光束被分为两路,经过相位调制器(EOM)后,所含子脉冲的相位被分别设置为 0、0、 $\pi$ 、0 和  $\pi$ 、0、0、0,两束光再分别通过 6  $\mu\text{m}$  保偏光纤放大器后,平均功率放大到 300 mW,经过 PBS,波片组( $\lambda/4$  波片,  $\lambda/2$  波片)后,在空间上合为一束光,里面包含 4 个偏振态相互正交的子脉冲,接着进入两级延迟线合成为 1 个脉冲。

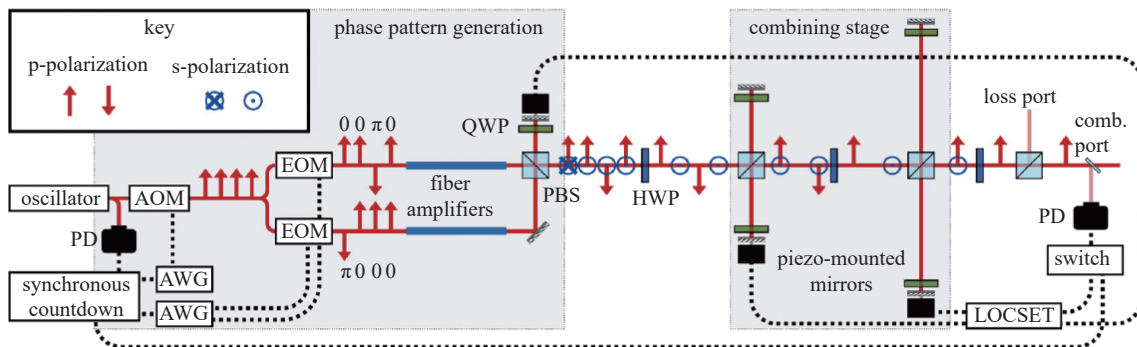


Fig. 3 Schematic illustration of the EDPA setup used for the combination of four temporally separated pulses<sup>[47]</sup>

图 3 用于四个分割脉冲时域合成的 EDPA 系统示意图<sup>[47]</sup>

利用电子频标多抖动法(LOCSET)和压电驱动的反射镜控制脉冲的相位,从而实现高效时域相干合成输出,脉冲串重频为 135 kHz,合成单脉冲能量为 3.4  $\mu\text{J}$ ,系统合成效率(包含光学元件损耗)达到 82.7%,脉冲对比度约 27.3 dB。为验证合成系统的可扩展性,又加入了一级延迟线,实现了 8 个子脉冲时域相干合成,脉冲串的重频为 1075 kHz,系统合成效率达到 76.8%。

2020年,北京大学张志刚教授课题组基于EDPA技术,实现了128个脉冲的时域相干合成<sup>[59]</sup>。如图4所示,利用7级延迟线、压电驱动反射镜和SPGD算法实现了128个子脉冲的时域相干合成,合成效率为35%<sup>[59]</sup>。

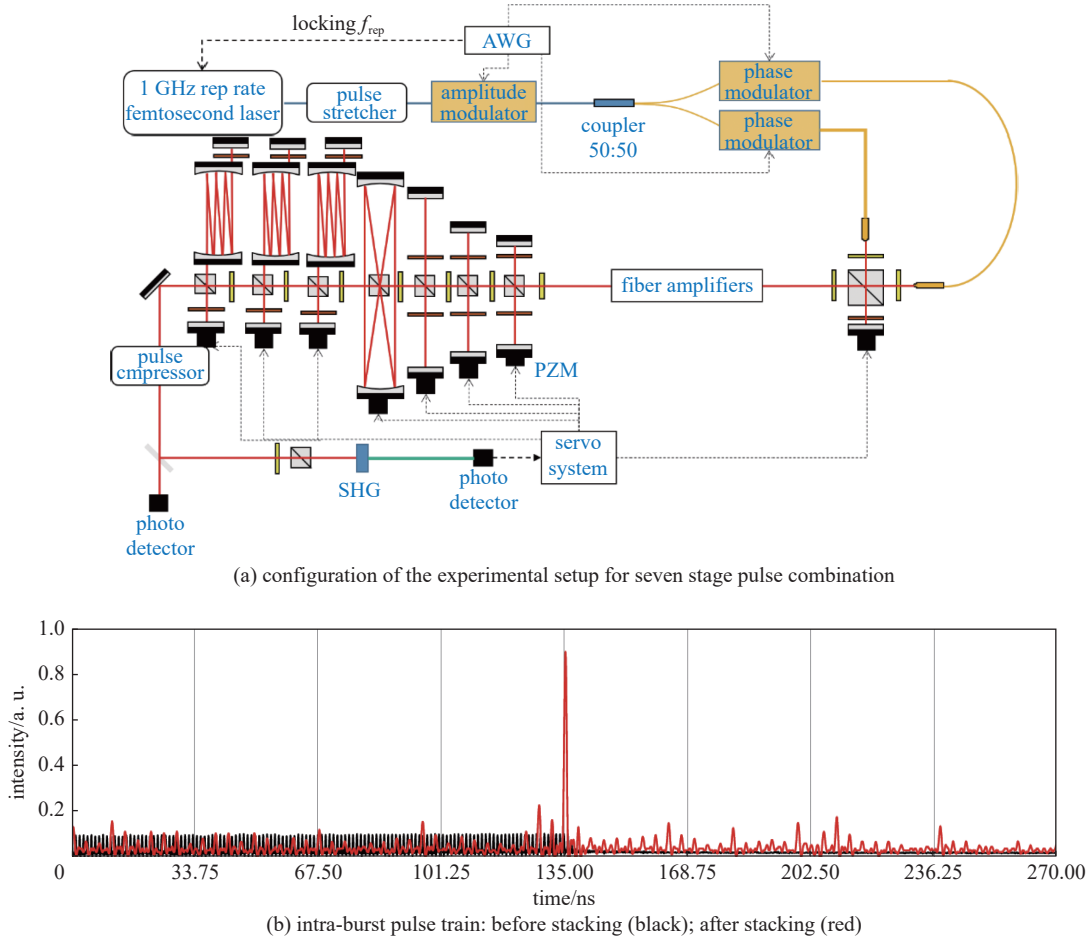


Fig. 4 Experimental results of temporal combination system of 128 pulse replicas based on EDPA setup<sup>[59]</sup>

图4 基于EDPA的128脉冲时域相干合成系统实验结果<sup>[59]</sup>

与ADPA相比,EDPA的光学系统复杂性大大降低,可以对脉冲串的幅度进行预整形以补偿增益饱和效应,还能够对脉冲串中各子脉冲的相位进行调制,在实验中,展现出了较高的合成效率,并且拥有高脉冲对比度和稳定性,具有向多脉冲扩展的潜力。

随着对高功率高能量飞秒激光系统的不断追求,空域与时域相结合的多维相干合成技术已是大势所趋。2019年,德国耶拿大学Jens Limpert课题组利用多维相干合成(12路光子晶体光纤空域相干合成与8个子脉冲时域相干合成-EDPA),实现了平均功率674 W,单脉冲能量23 mJ,脉冲宽度235 fs的单模输出<sup>[65]</sup>。

如图5所示,系统的预放大前端包括振荡器、展宽器、脉冲整形器和两级声光调制器(AOM)。种子源输出中心波长1030 nm,重频80 MHz的飞秒脉冲,经过声光调制器(AOM1)产生重频为1 MHz,包含8个子脉冲的脉冲串,然后展宽到1.9 ns。光束经过脉冲整形器与声光调制器(AOM2),进一步降重频,并对脉冲进行预整形以补偿放大过程中的增益饱和效应。光束被分为两路分别注入两个独立的电光调制器(EOM)进行相位调制,以产生不同相位分布(0、0、 $\pi$ 、 $\pi$ 、0、 $\pi$ 、0、 $\pi$ 和0、0、0、0、0、 $\pi$ 、 $\pi$ 、0)的8个子脉冲。PBS合成后的脉冲序列经过预放,被空间上均分为12束,分别注入12个光纤放大器进行放大,之后利用HC探测模块(Hänsch-Couillaud polarization detection method)、压电驱动反射镜与偏振器件实现了12束光的光程、相位闭环控制与空域偏振相干合成,空间合成后的光束仍包含时域上的8个子脉冲。通过之前的相位设置与旋转半波片(HWP),形成具有相应偏振正交关系的脉冲组合。随后该脉冲串进入由三级延迟线构成的时域相干合成系统。通过基于电子频标法(LOCSET)的EDPA技术,实现了8个子脉冲的时域相干合成,平均功率为674 W,脉冲能量为23 mJ,空域合成效率约71%,时域合成效率约85%,多维合成效率约56%,脉冲对比度约15 dB,压缩后脉冲宽度为235 fs<sup>[65]</sup>。

2023年,德国耶拿大学Limpert课题组利用多维合成系统(16路光纤空域相干合成与8个子脉冲时域相干合

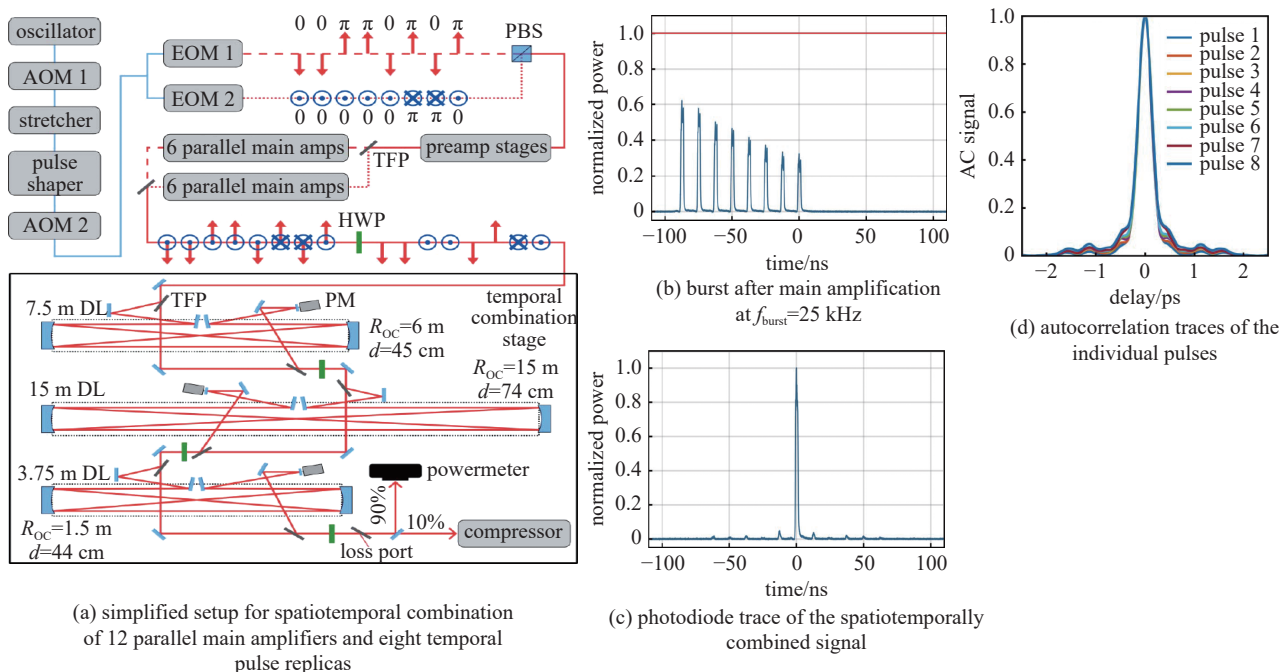


Fig. 5 Experimental results of spatiotemporal combination system based on EDPA setup<sup>[65]</sup>

图 5 基于 EDPA 的时域与空域相干合成系统实验结果<sup>[65]</sup>

成-EDPA), 实现了平均功率 703 W、单脉冲能量 32 mJ、脉冲宽度 158 fs、光束质量  $M^2=1.2$  的飞秒相干合成输出<sup>[66]</sup>。

如图 6 所示, 光纤振荡器输出重复频率 80 MHz、中心波长 1035 nm 的锁模脉冲, 经过啁啾光纤布拉格光栅 (CFBGs) 后展宽到 ns 量级, 接着经过脉冲整形器 (FDPS)、声光调制器 (AOM1), 产生包含 8 个子脉冲的脉冲串, 重频降为 400 kHz, 然后经过第二级 CFBG 展宽到 10 ns, 再通过声光调制器 (AOM2) 后重频降为 20 kHz, 与此同时对脉冲串进行预整形。此后, 光束被分为两路, 分别进入电光调制器 (EOM), 对 8 个子脉冲进行相位设置, 以产生不同的相位分布。光束被进一步分为两组, 每组 8 路进行放大, 主放大级光纤采用 105 cm 长, MFD 为 62  $\mu\text{m}$  的大模场掺镱光纤, 之后利用 HC 探测模块、压电驱动反射镜与偏振合束器件分别实现了两组光束 (每组 8 路) 的光程、相位闭环控制与空域偏振相干合成, 空间合成后的两组光束仍包含时域上的 8 个子脉冲。

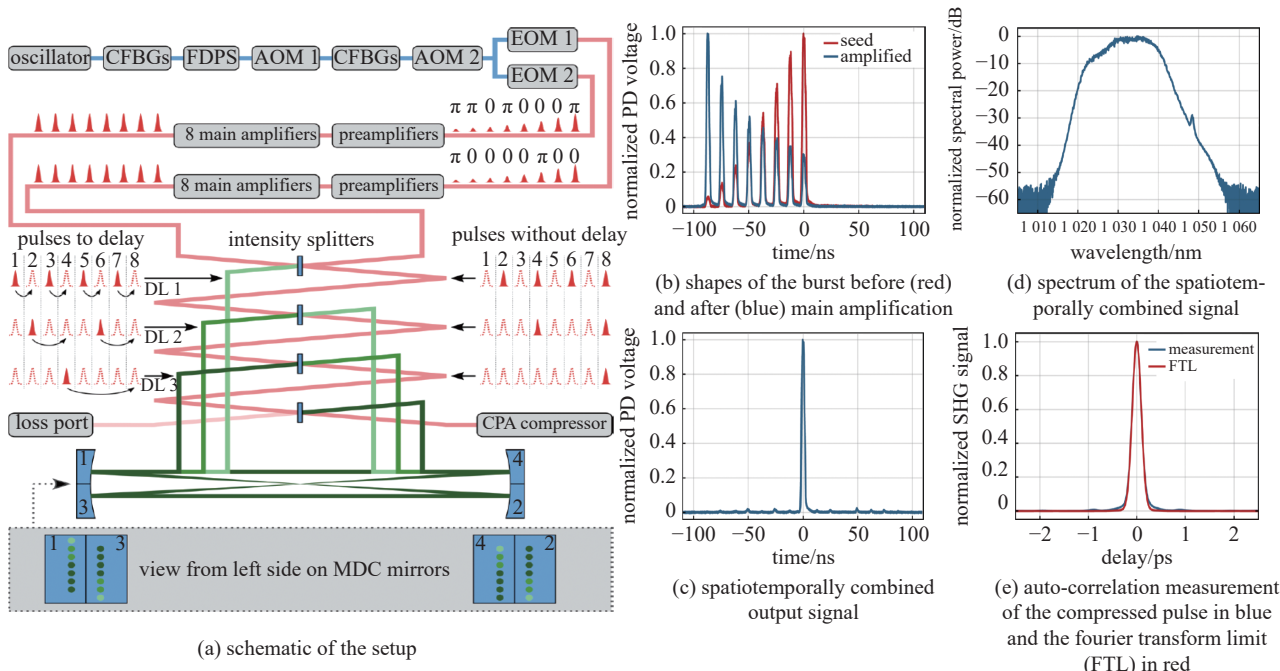


Fig. 6 Experimental results of spatiotemporal combination system with a pulse energy of 32 mJ based on EDPA setup<sup>[66]</sup>

图 6 基于 EDPA 的 32 mJ 时域与空域相干合成系统实验结果<sup>[66]</sup>

随后, 两组光束进入由三级延迟线构成的相干合成系统。采用电子频标法(LOCSET), 实现了两组(共 16 路光束)空域相干合成以及 8 个子脉冲的时域相干合成(EDPA)。最终获得了平均功率为 703 W、单脉冲能量 32 mJ 的输出, 空域合成效率为 86%, 时域合成效率为 90%, 多维合成效率提升到 77%, 脉冲对比度为 18 dB, 实现了优异的波束和脉冲质量, 峰值功率达到 202.53 GW<sup>[66]</sup>。这也是目前光纤飞秒多维相干合成的最高能量输出纪录。

## 1.2 增强腔技术

2014 年, 耶拿大学 Sven Breitkopf 等人提出利用 Stack and Dump (SnD) 型增强腔进行脉冲时域相干合成<sup>[49]</sup>, 如图 7 所示。该技术实质上是利用环形增强腔实现脉冲序列的相干叠加, 降低脉冲重频, 提升脉冲能量。这种高精度腔的核心器件是一个腔倒空开关, 该开关必须满足低损耗、高阈值和快速响应的要求。图 8 所示为基于调制盘实现脉冲导出的示意图, 通过外部时钟控制实现调制盘旋转频率的稳定与脉冲的同步, 当腔内堆叠到第  $N$  个脉冲时, 堆叠脉冲正好由调制盘上的反射镜导出腔外<sup>[49-50]</sup>。

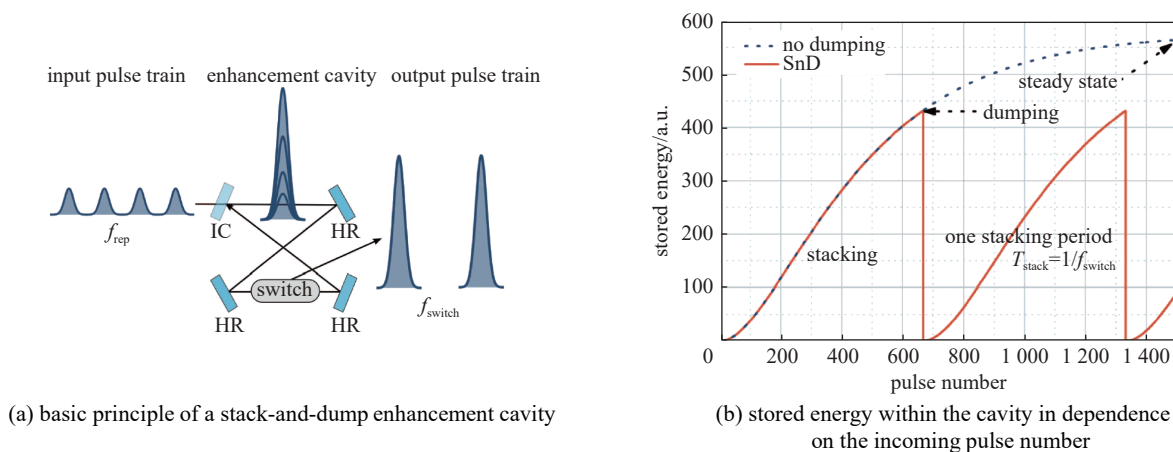


Fig. 7 Stack and dump enhancement cavity<sup>[49]</sup>

图 7 堆积与倒空增强腔<sup>[49]</sup>

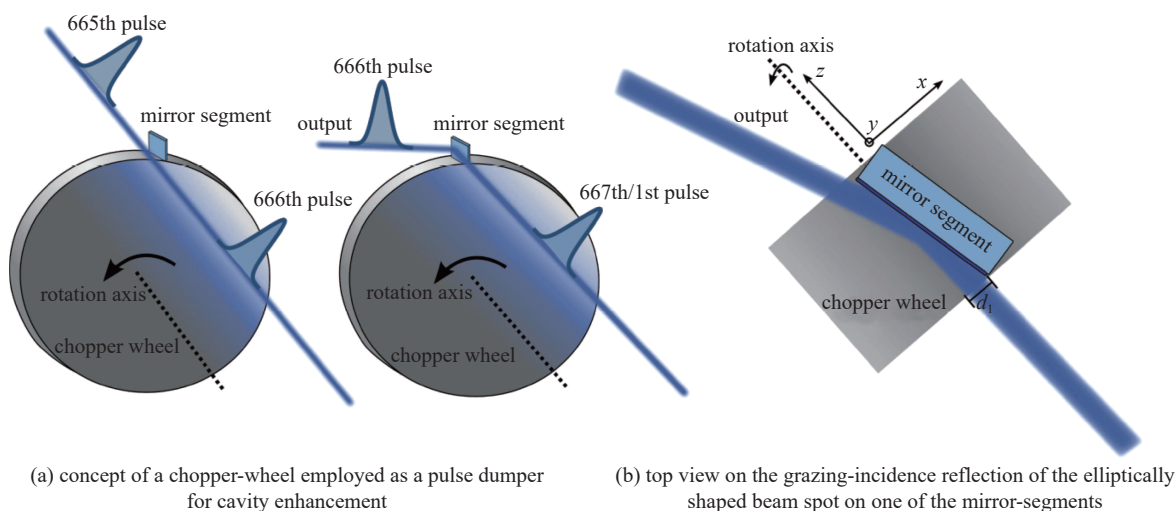


Fig. 8 Schematic of a chopper-wheel<sup>[49]</sup>

图 8 调制盘示意图<sup>[49]</sup>

2016 年, 该课题组 S.Breitkopf 等对基于 SnD 型腔的脉冲时域相干合成方案进行了实验设计与验证<sup>[60]</sup>, 如图 9 所示, 注入激光的中心波长为 1038 nm, 平均功率 30 W, 重复频率 10 MHz, 单脉冲能量 3  $\mu$ J, 展宽后脉宽为 1.5 ns, 进入长 30 m 的增强腔, 在脉冲串的重频为 30 kHz 时, 实现了 100 个子脉冲的时域相干合成, 增强因子达到 65, 单脉冲能量约 0.16 mJ, 脉冲宽度为 800 fs<sup>[60]</sup>。由于 AOM 的衍射效率有限, 一部分脉冲仍留在空腔内。该实验中选用的腔倒空开关是声光调制器(AOM), 上升沿时间为 110 ns/mm, 衍射效率 72%。声光的非线性效应限制了能量增益效率的提升, 另外开关器件的损伤阈值会限制脉冲能量的增长, 因此开关器件的设计与制备是堆积-倒空腔相干合成技术的关键。

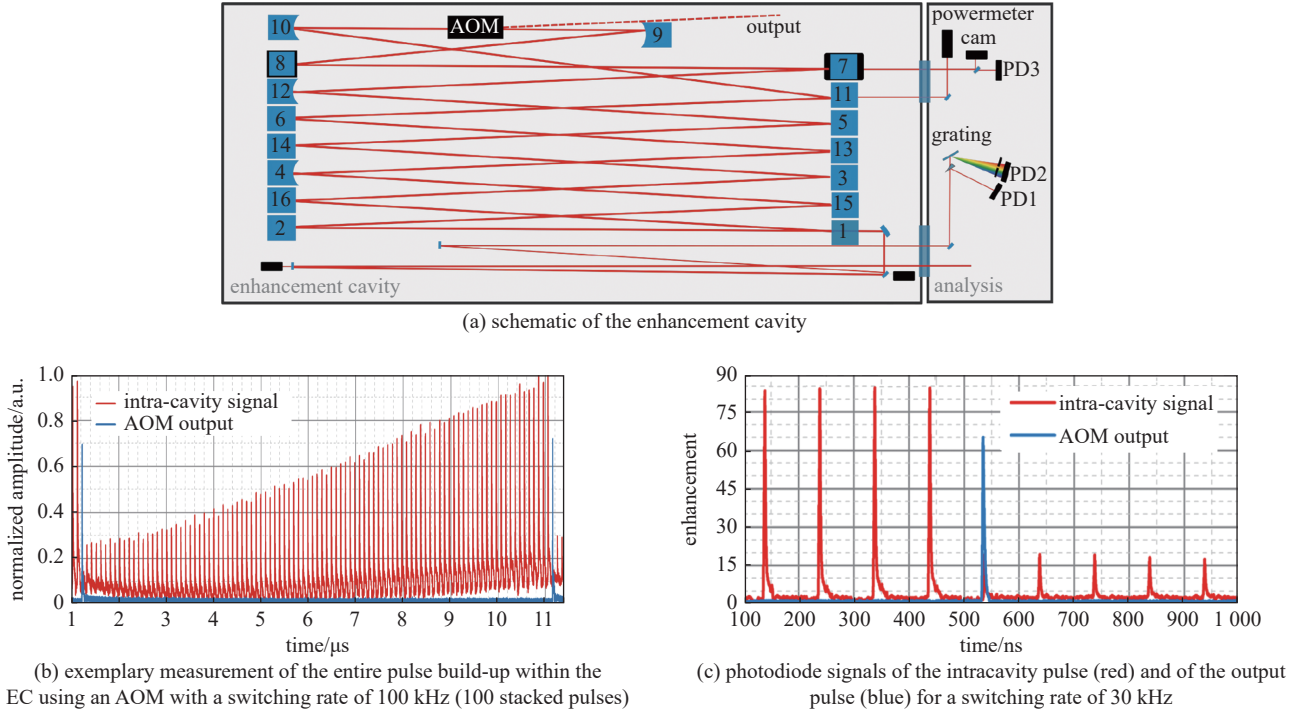


Fig. 9 Set up of SnD enhancement cavity and its experimental results<sup>[60]</sup>

图 9 SnD 增强腔及其实验结果<sup>[60]</sup>

### 1.3 GTI 腔相干脉冲堆积技术

基于 GTI 腔 (Gires-Tournois interferometers) 的脉冲相干堆积技术于 2015 年由美国密歇根大学 Zhou Tong 等人提出<sup>[48]</sup>。

图 10 所示为基于 GTI 腔的脉冲堆叠工作原理。假设  $N$  个脉冲注入到单个 GTI 腔内, 环形腔的腔长  $L=cT$ ,  $T$  为脉冲周期,  $c$  为光速。对于第 1 个脉冲, 脉冲到达  $R<1$  的反射镜时, 一部分光反射输出, 另一部分进入腔内。对于第  $n$  个脉冲 ( $n=2, 3, \dots, N-1$ ), 该脉冲 ( $in\tilde{A}_n$ ) 和腔内的脉冲 ( $cav\tilde{A}_n$ ) 同时到达反射镜 M, 两个脉冲在此发生相干相消, 此时输出脉冲 ( $out\tilde{A}_n$ ) 的振幅为 0, 脉冲能量被堆叠到腔内。当第  $N$  个脉冲到达反射镜 M 时, 与腔内脉冲发生相干相长, 所有的能量输出腔外。

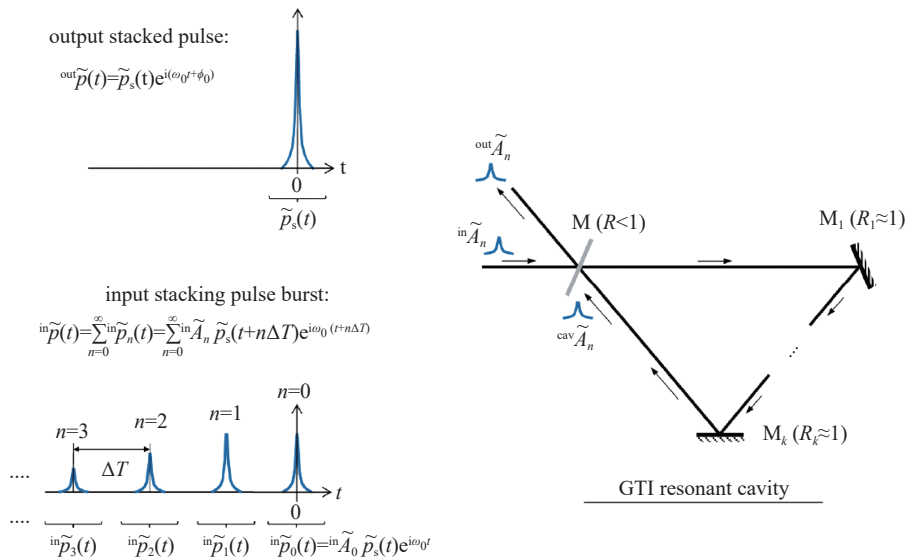


Fig. 10 Coherent pulse stacking in a traveling-wave Gires-Tournois interferometer<sup>[48]</sup>

图 10 行波 GTI 腔中的脉冲相干堆积<sup>[48]</sup>

为了进一步提高脉冲堆叠的数目与能量, 研究人员提出了级联 GTI 腔的方法, 如图 11 所示, 采用  $m$  个腔长相等等 ( $L_1=cT$ ) 的 GTI 腔进行级联, 可以实现  $2m$  个脉冲的堆叠。如果再采用  $m$  个腔长为  $L_2=2mcT$  的 GTI 腔进行组合,

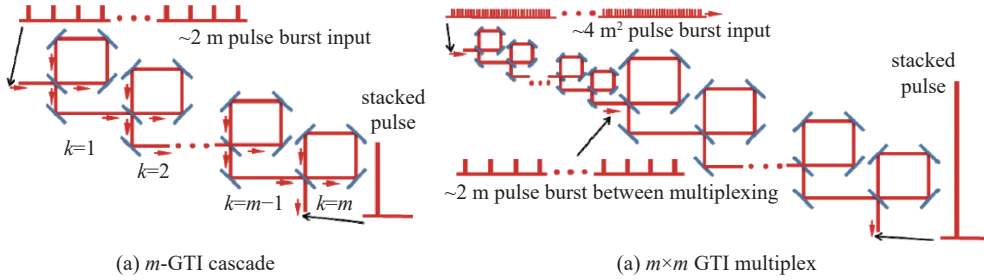


Fig. 11 Cascaded GTI cavities<sup>[48]</sup>

图 11 级联 GTI 腔<sup>[48]</sup>

就能实现总数目为  $2m \times 2m = 4m^2$  的脉冲堆叠<sup>[48]</sup>。

2016年,该课题组使用4+1 GTI腔(4个三角形腔+1个Herriot腔)<sup>[62]</sup>,实现了27个脉冲时域相干堆积,如图12所示,放大后的光束进入4+1 GTI腔进行相干堆积,由于没有执行光腔相位的闭环控制,堆积效率仅为50%,脉冲对比度约8 dB,压缩后脉冲宽度为330 fs。

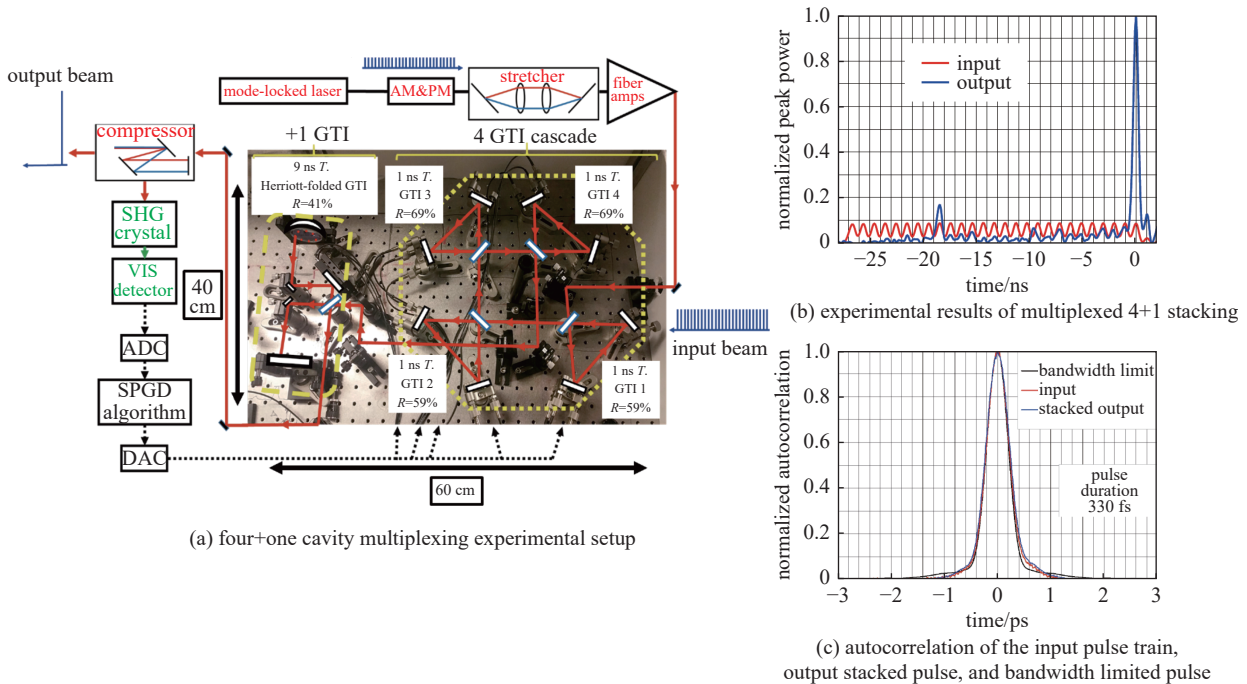


Fig. 12 Coherent pulse stacking of 27 pulses in a 4+1 GTI resonator sequence<sup>[62]</sup>

图 12 4+1 GTI 腔中的 27 个脉冲相干堆积<sup>[62]</sup>

2017年,该课题组设计了4+4 GTI腔(4个三角形腔+4个Herriot腔)<sup>[63]</sup>,实验实现了81个脉冲时域相干堆积,如图13、图14所示,锁模光纤激光器输出中心波长为1030 nm,重复频率1 GHz,脉冲宽度64 fs的锁模脉冲,通过幅度调制器(AM)和相位调制器(PM),产生了包含81个子脉冲的脉冲串,脉冲的幅度与相位均经过调制。接着经过放大器、展宽器,脉冲宽度展宽为1 ns,然后光束进入光纤放大器进行功率放大。光束通过第2个声光调制器(AOM)之后,脉冲串的重频降为1 kHz。放大后的光束(单脉冲串的能量为2 mJ)进入4+4 GTI腔进行相干堆积。由于振荡器载波频率的漂移,SPGD算法无法实现光腔相位的锁定,而脉冲堆积对腔相位的变化非常敏感,造成脉冲在前腔镜上没有完全相干,堆积效率只有35%,脉冲对比度为7 dB。

2018年,清华大学许逸伦等搭建了2+1 GTI腔,在98 kHz的重频下,15个脉冲的能量堆积到1个输出脉冲上,峰值功率放大倍数为11,达到了理论值的92%。相干堆积效率为76%,接近80%的理论值,实验得到的伴随脉冲对比度为14 dB<sup>[68-69]</sup>。

2021年,美国密歇根大学Almantas Galvanauskas教授课题组利用一种双循环稳定优化算法对光腔和子脉冲的相位进行控制,实现了堆叠轮廓的自适应优化控制和高保真相干脉冲叠加<sup>[70]</sup>。实验中,4+4 GTI腔中的8个人射前腔镜均采用压电陶瓷驱动,并对其进行稳定控制,如图15所示,81个脉冲相干堆积效率提高到70.5%<sup>[70]</sup>。



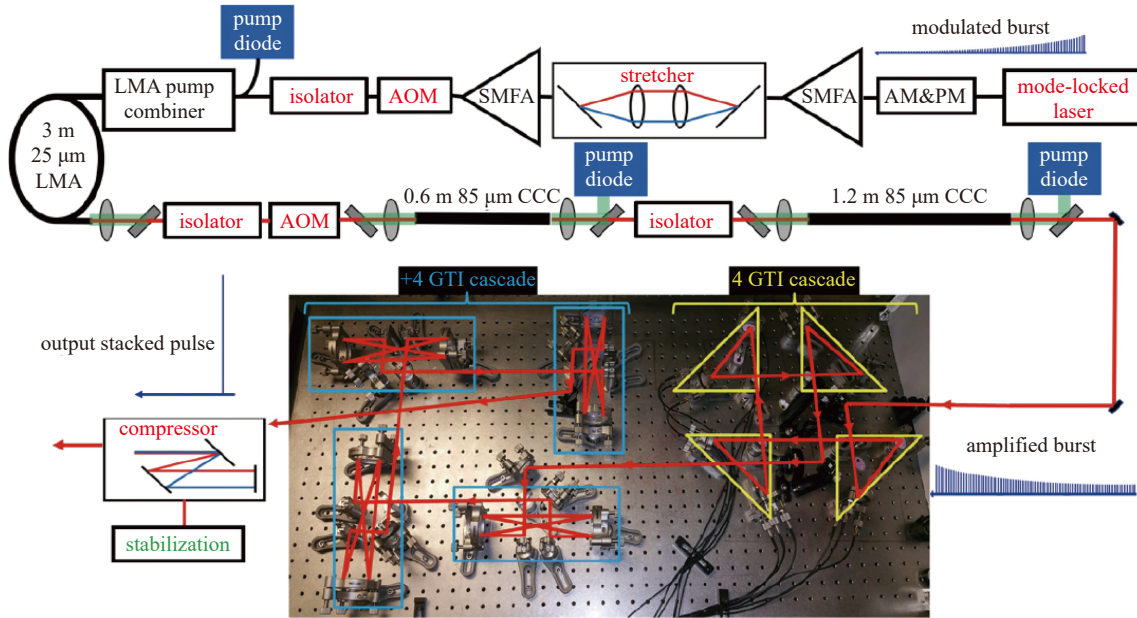


Fig. 13 Coherent pulse stacking of 81 pulses in a 4+4 GTI resonator sequence<sup>[63]</sup>

图 13 4+4 GTI 腔中的 81 个脉冲相干堆积<sup>[63]</sup>

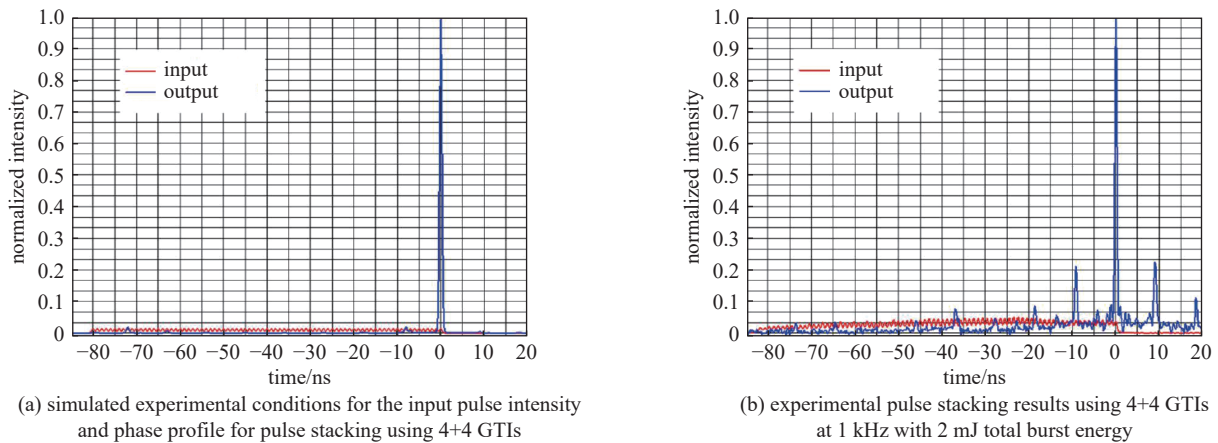


Fig. 14 Simulation and experimental result of coherent pulse stacking of 81 pulses in a 4+4 GTI resonator sequence<sup>[63]</sup>

图 14 4+4 GTI 腔中的 81 个脉冲相干堆积模拟与实验结果<sup>[63]</sup>

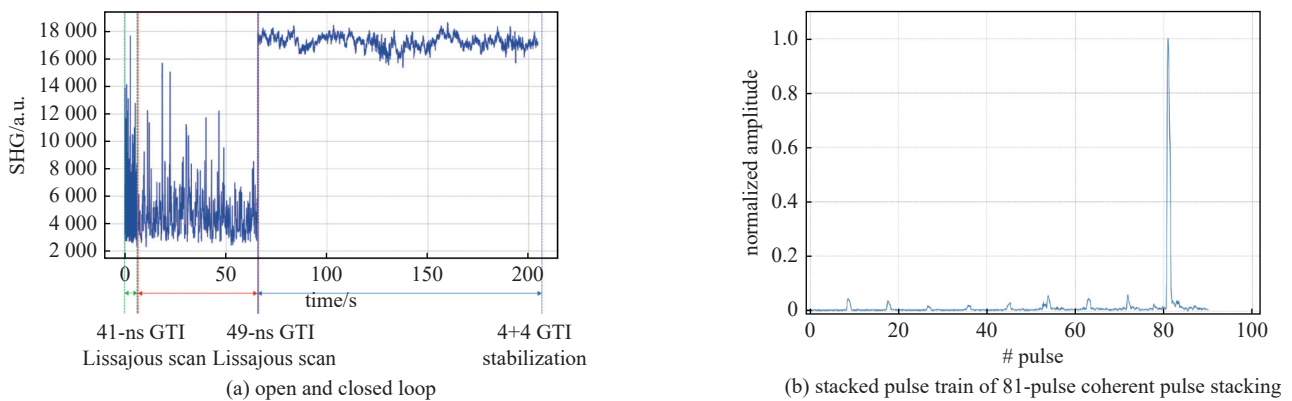


Fig. 15 Experimental result of efficient coherent pulse stacking of 81 pulses in a 4+4 GTI resonator sequence<sup>[70]</sup>

图 15 4+4 GTI 腔中的 81 个脉冲高效相干堆积实验结果<sup>[70]</sup>

#### 1.4 人工智能技术应用于脉冲时域相干合成

在时域相干合成中,传统的控制方法主要有 SPGD 和 LOCSET。其中,SPGD 会陷入局部极值,无法保证全局最优解,另外诸如学习速率  $\gamma$  这样的算法参数需要手动设置,不便于实际应用。在多级时域合成中,LOCSET 也会

增加光学与电学系统的复杂性。而人工智能算法具有控制速度快、算法参数自动寻优、能够达到全局最优等特点,具有向多脉冲合成扩展的潜力。

2021年,美国密歇根大学 Almantas Galvanauskas 教授课题组的 Du Weizhi 等人将机器学习算法应用于光腔相位的稳定控制<sup>[71]</sup>。分析了 SPGD、MSPGD 和 Policy Gradient(策略梯度)算法在脉冲相干堆积中的应用。同年,该课题组提出了一种深度复现神经网络,可以等效地模拟基于 GTI 腔的相干脉冲堆积系统<sup>[72]</sup>。其输入层和输出层为脉冲突发,每个复现的隐蔽层为 GTI 腔,如图 16 所示,一个时间序列在网络中的正向传输相当于通过 GTI 腔发送一个输入脉冲串,而从单个输出节点进行反向传输产生了空腔集的脉冲响应。光腔相位是通过 PZT 镜控制,输入脉冲通过空腔集发送,其输出反馈到神经网络,以学习空腔和输入参数的最优组合,使空腔集将输入脉冲堆叠成单个脉冲。

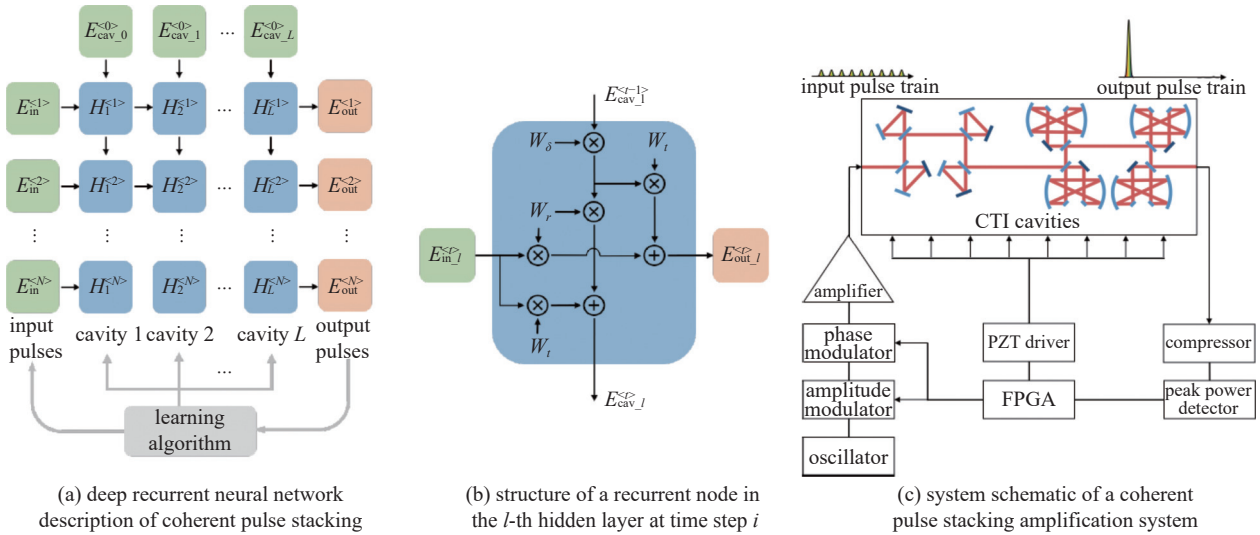


Fig. 16 Principle of coherent pulse stacking based on deep recurrent neural network<sup>[72]</sup>

图 16 基于深度复现神经网络的脉冲相干堆积原理<sup>[72]</sup>

在截断的脉冲串叠加过程中,腔存储的电场初始值为零,也可以将它们设置为非零可训练参数,以检索相应的脉冲,从而实现高脉冲对比度相干叠加。通过深度复现神经网络,并结合 SPGD 算法,对输入脉冲相位、幅度以及光腔相位进行控制,实现了 81 个子脉冲的长时高稳定相干堆积( $\sigma_{\text{peak}}=1.4\%$ ),如图 17(a)所示。另外,对 4 个 GTI 腔中的 9 脉冲相干叠加进行优化,在 2 min 内将堆积效率从 65% 提高到 91%,如图 17(b)所示。

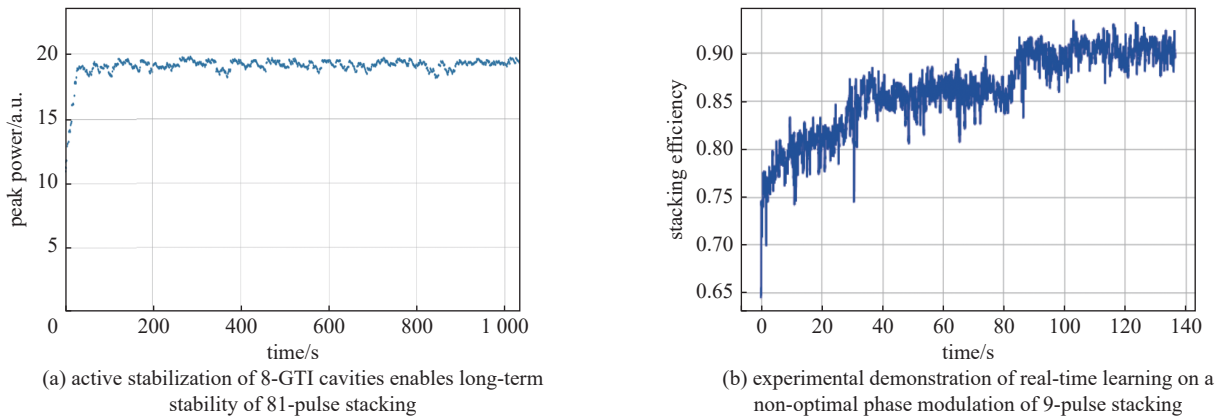


Fig. 17 Experimental results of the coherent pulse stacking based on deep recurrent neural network<sup>[72]</sup>

图 17 基于深度复现神经网络的脉冲相干堆积实验结果<sup>[72]</sup>

在运行过程中,系统噪声及其参数具有不确定性,但可以通过神经网络进行补偿,以实现高保真叠加。GTI 腔的主动控制补偿了相位噪声和漂移,对输入脉冲突发的实时学习优化了脉冲相干叠加。这种方案为设计空腔集配置和使用深度学习来稳定和优化堆叠操作提供了一个框架,并具有向约  $10^2$  个脉冲的高保真相干堆积扩展的潜力。

2020年,北京大学张志刚教授课题组将强化学习(RL)引入多级 DPA 中<sup>[73]</sup>,其原理如图 18 所示,脉冲串经过多

级延迟线合成之后, 取少部分光束经过二倍频 (SHG) 进入光电探测器与算法控制器。通过 RL 算法控制器对脉冲幅度、相位、以及延迟线中反射镜位移的闭环控制, 实现多脉冲的高效相干堆积。不同于以往使用输出功率作为评价函数, 算法中的目标函数定义为  $r = -(P_{\text{SHG}} - P_{\text{max}})^2 / P_{\text{max}}$ , 当算法收敛时,  $r = 0, P_{\text{SHG}} = P_{\text{max}}$ , 这有利于加快强化学习算法收敛速度<sup>[74]</sup>。

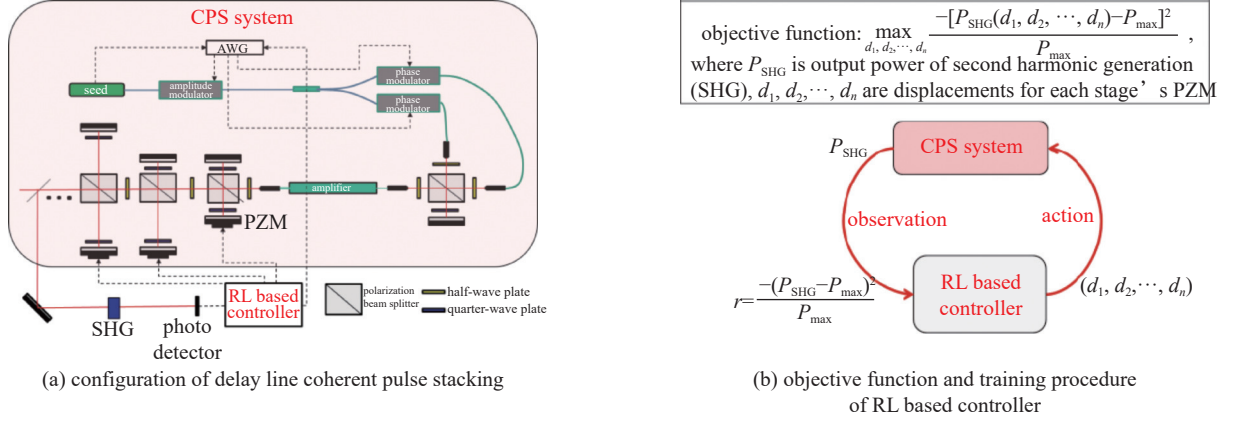


Fig. 18 Principle of temporal coherent combination in DPA based on RL controller<sup>[73]</sup>

图 18 基于强化学习算法的 DPA 时域相干合成原理<sup>[73]</sup>

2021 年, 该课题组提出了 SPGDM (SPGD with momentum) 算法<sup>[74]</sup>, 该方法引入的动量相当于在 SPGD 梯度估算中加入了 e 指数平滑, 当系统的初始状态接近匹配状态时, SPGDM 比传统的 SPGD 速度更快。将强化学习 SAC (Soft Actor-Critic algorithm) 与 SPGDM 相结合, 进一步提出了 SAC-SPGDM 算法, 其基本策略是在控制的早期阶段, 使用 SAC 算法调节各级延迟线达到匹配状态, 然后加入 SPGDM 算法实现全局最优控制, 其基本原理与算法控制流程如图 19 所示。

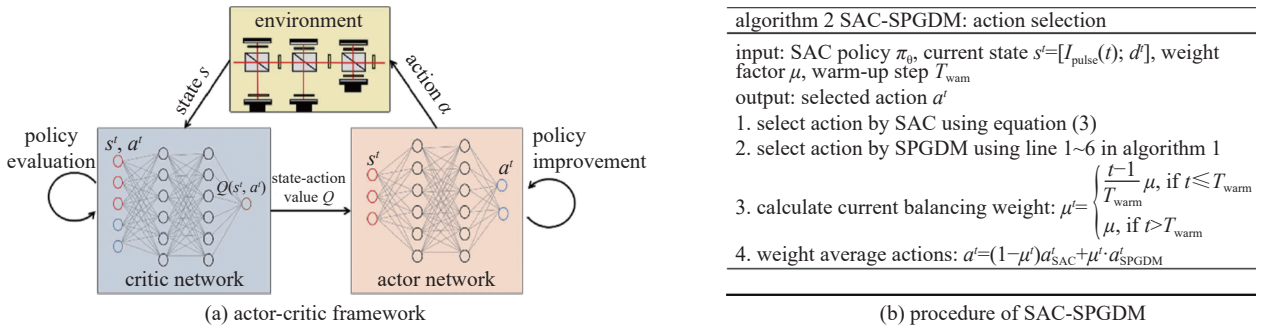


Fig. 19 Principle of temporal coherent combination in DPA based on SAC-SPGDM and the procedure of algorithm<sup>[74]</sup>

图 19 基于 SAC-SPGDM 算法的 DPA 时域相干合成原理与算法流程<sup>[74]</sup>

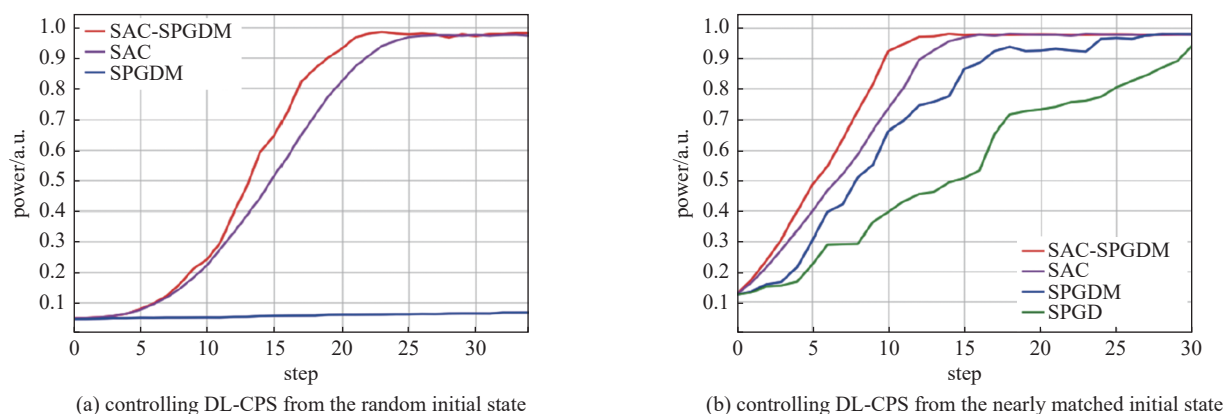
仿真结果表明, 在基于 EDPA 的 7 级 128 个脉冲时域相干合成系统中, SAC-SPGDM 算法可以使系统从最初的随机状态变为最佳匹配状态, 达到合成脉冲的最大峰值功率。

如图 20(a) 所示, SAC-SPGDM 的收敛速度比 SAC 快 50%。图 20(b) 显示, 系统的初始状态接近匹配状态时, SPGDM 算法达到最大值的 90%, 所需迭代步数在 17 步以内, 比 SPGD (迭代 28 步) 快 40%。SAC-SPGDM 达到最大值的 90%, 所需迭代步数在 10 步以内, 比 SPGDM 快 41%。SAC-SPGDM 算法速度快、能够获得全局最优解, 具有向多脉冲合成扩展的潜力<sup>[74]</sup>。

近年来, 随着人工智能技术的高速发展, 为诸多学科都赋予了新的发展动力。其中, 机器学习在光学领域得到了广泛的应用, 包括自动调谐锁模激光器、光通信、光显微、计算成像与相位检测等<sup>[74]</sup>。在机器学习中, 强化学习算法可以不断学习被观测信号的寻优行为, 并耦合深度学习策略, 允许控制器在没有手动操作的情况下, 从大量输入数据中做出判断与决策, 其控制速度快、稳定可靠, 拥有在复杂环境条件下实现多脉冲稳定控制的潜力<sup>[74]</sup>。

## 2 分析和讨论

当前, 光纤啁啾脉冲时域相干合成的主要技术路线分为三种: 脉冲分割-放大技术 (DPA)、增强腔和脉冲相干

Fig. 20 Comparison of control algorithms in DL-CPS<sup>[74]</sup>图 20 延迟线-脉冲时域相干合成中各种控制算法比较<sup>[74]</sup>

堆积技术(CPS)。

## 2.1 脉冲分割-放大技术

DPA 技术最初是采用被动式 DPA,但由于脉冲序列在光纤放大器中存在增益饱和效应,使得各脉冲的峰值功率存在差异。由 SPM 效应引起的非线性相移与脉冲峰值功率有关,这会影晌系统合成效率,被动锁相系统的对称性结构限制了对子脉冲强度的控制自由度,其可合成的脉冲数目受限。

主动式 DPA(ADPA)技术是将脉冲分割和重组为两个独立的阶段,可以确保各子脉冲在相干合成时的光程和相位保持一致,由于放大器的饱和而引起的脉冲失真可以在更高的脉冲能量下得到补偿,因此可以提取出更高的脉冲能量。虽然在能量扩展方面取得了较大进展,但是光纤中存储的能量尚未完全提取出来,在 ADPA 系统中,脉冲预整形虽然能够在一定程度上补偿幅度和相位失配,但无法对每个脉冲的幅度与相位单独进行整形,仍然有残留的幅度与相位失配,导致合成效率下降。

目前光纤飞秒相干合成最高单脉冲能量 32 mJ 的输出,其时域相干合成部分就是采用的 EDPA 技术。EDPA 系统在对脉冲幅度与相位进行调制的同时,能够对延迟线的光程进行精密控制,具有控制自由度多、脉冲相位设置简单、合成效率高等优点。随着脉冲数目的增加,对 DPA 系统中延迟线数目和长度、单脉冲稳定性和饱和增益效应控制提出了更高的要求,因此 DPA 技术一般只能将脉冲能量提高一个量级左右<sup>[50]</sup>。人工智能算法具有控制速度快、维度多、算法参数自动寻优、能够达到全局最优等特点,在 DPA 系统中已得到初步应用<sup>[73-74]</sup>,未来在向多脉冲高效合成扩展方面还有待进一步验证。

近年来相关的代表性研究结果如表 1 所示。

表 1 超短脉冲 DPA 代表性研究结果

Table 1 Representative results of DPA of ultra-short pulsed lasers

year	institution	technical solution	results
2017	Friedrich-Schiller-Universität, Jena, Germany	EDPA, free space delay lines	$N=4, t_p=190$ ps, $f_{RR}=135$ kHz, $J=3.4$ $\mu$ J, $\eta=82.7\%$ ; $N=8, t_p=190$ ps, $f_{RR}=1075$ kHz, $\eta=76.8\%$ <sup>[47]</sup>
2019	Friedrich-Schiller-Universität, Jena, Germany	EDPA+active CBC, free space delay lines	$N \times M=8 \times 12, t_p=235$ fs, $P_{ave}=674$ W, $f_{RR}=25$ kHz, $J=23$ mJ, $\eta_{comb}=71\%$ , $\eta_{temp}=85\%$ , $\eta_{sys}=56\%$ <sup>[65]</sup>
2020	Peking University, China	EDPA, free space delay lines	$N=128, f_{RR}=200$ kHz, $\eta=35\%$ <sup>[59]</sup>
2023	Friedrich-Schiller-Universität, Jena, Germany	EDPA+active CBC, free space delay lines	$N \times M=8 \times 16, t_p=158$ fs, $P_{ave}=703$ W, $f_{RR}=20$ kHz, $J=32$ mJ, $\eta_{comb}=86\%$ , $\eta_{temp}=90\%$ , $\eta_{sys}=77\%$ <sup>[66]</sup>

## 2.2 增强腔技术

增强腔技术实质上是利用环形增强腔实现脉冲序列的相干叠加,降低脉冲重频,提升脉冲能量。这种高精度腔的核心是一个腔倒空开关,该开关必须满足低损耗、高阈值和快速响应的要求。目前遇到了一定的瓶颈,主要限制在于腔内的光开关,其本应具有低的插入损耗和高的响应速度。然而,现有增强腔内所使用的声光调制器(AOM),较大的插入损耗和有限的上升时间,限制了其使用。为了避免损坏 AOM,随着能量增强,必须使用更大的光斑,这反过来会降低 AOM 的开关速度。对于 1 ns 的光脉冲<sup>[75]</sup>,在 10 J/cm<sup>2</sup> 功率密度的地方会发生光学膜层的

损伤。以脉冲能量达到 10 J 为例, 光束直径必须大于 1 cm。这种通光口径会导致 AOM 的上升时间达到微秒量级, 光腔的往返长度也会超过 300 m, 对于光腔的设计与搭建来说, 具有极强的挑战性。此外, AOM 的插入损耗将会进一步降低合成效率。

### 2.3 GTI 腔相干脉冲堆积技术

基于 GTI 腔的脉冲相干堆积技术被证实是一种提高脉冲能量的有效途径, 相比于 DPA 技术, 系统光路的复杂性和体积进一步降低, 有利于实现小型化。提高 GTI 腔脉冲堆积效率的核心是光腔相位的稳定, 目前主要使用由压电陶瓷驱动的偏摆镜, 并利用优化算法来控制镜面的三维运动, 以补偿各类噪声引起的腔相位变化。此外, 通过对光腔分束镜的反射率进行优化设计与选取、脉冲的幅度与相位进行调制, 会进一步提升脉冲对比度与合成效率, 获得高能量脉冲输出。如图 21 所示, 对 4+4 GTI 腔的理论模拟表明<sup>[70]</sup>, 合成脉冲对比度与光腔、脉冲相位( $\sigma_\phi$ )以及脉冲强度( $\sigma_I$ )有关, 随着扰动幅度的增大, 合成脉冲对比度会不断下降。光腔相位是影响脉冲对比度最主要的因素, 系统效率对其扰动的容忍度也更小, 以脉冲对比度为 40 dB 为例, 光腔相位扰动须控制在 4 mrad 以内, 而脉冲相位和强度扰动只需控制在 50 mrad 与 100 mrad 以内即可。

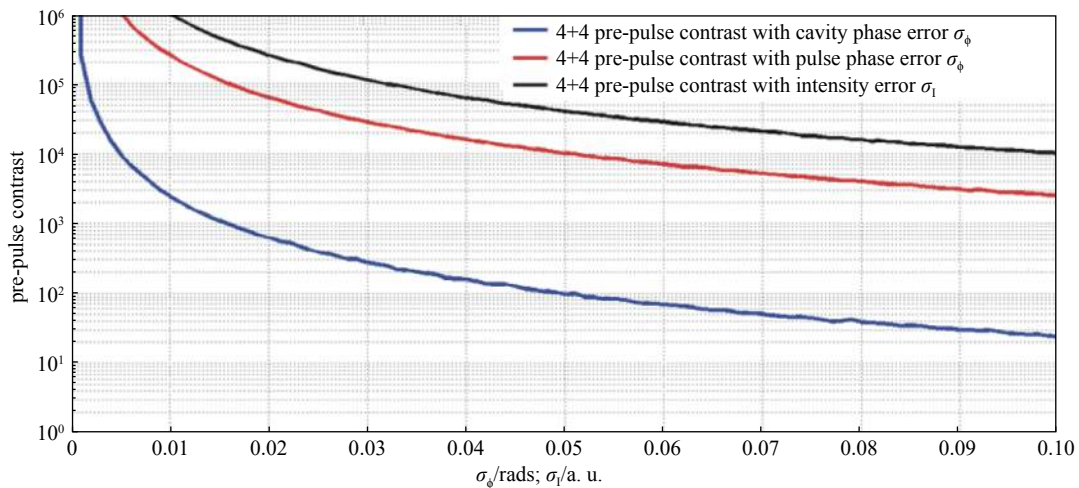


Fig. 21 Simulations illustrating the tolerances of the coherent pulse stacking parameters for 4+4 GTIs. Achievable pre-pulse contrast degrades in the presence of cavity phase errors, pulse phase errors, or pulse intensity errors<sup>[70]</sup>

图 21 基于 4+4 GTI 腔的脉冲相干堆积参数容差的理论模拟。脉冲对比度随腔相位、脉冲相位以及脉冲强度扰动的增大而下降<sup>[70]</sup>

近年来相关的代表性研究结果如表 2 所示。

表 2 超短脉冲 CPS 代表性研究结果

Table 2 Representative results of CPS of ultra-short pulsed lasers

year	institution	technical solution	results
2015	University of Michigan, USA	Gires-Tournois interferometers	$N=5$ , $t_p=700$ fs, $f_{RR}=10$ kHz, $J=\mu\text{J}$ level, $\eta=97.4\%$ <sup>[48]</sup>
2016	University of Michigan, USA	4+1 Gires-Tournois interferometers	$N=27$ , $t_p=330$ fs, $\eta=50\%$ <sup>[62]</sup>
2017	University of Michigan, USA	4+4 Gires-Tournois interferometers	$N=81$ , $t_p=300$ fs, $f_{RR}=1$ kHz, $J=\text{multi-mJ}$ , $\eta=35\%$ <sup>[63]</sup>
2018	Tsinghua University	2+1 Gires-Tournois interferometers	$N=15$ , $t_p=10$ ps, $f_{RR}=98$ kHz, $\eta=76\%$ <sup>[69]</sup>
2021	University of Michigan, USA	4+4 Gires-Tournois interferometers	$N=81$ , $t_p=1$ ns, $J=4\mu\text{J}$ , $\eta=70.5\%$ <sup>[70]</sup>

基于 GTI 腔的脉冲相干堆积技术, 能够对每个入射脉冲的幅度与相位进行调制, 也能够对光腔相位进行精密控制, 从而保证光腔中的有效干涉。具有可控自由度高、堆积脉冲数目多、合成效率高、结构紧凑等优点, 并已经在多脉冲时域相干合成系统中得到应用。2021 年, 美国密歇根大学利用 4+4 GTI 腔和优化控制算法, 将 81 个脉冲相干堆积效率提高到 70.5%, 这也是多脉冲时域相干合成效率的最高纪录。未来, 通过振荡器锁频、提高相位检测分辨率、优化脉冲幅度与相位调制, 合成效率有望提升到 85%~90%<sup>[70]</sup>。

## 3 总结和展望

由于非线性效应和热效应的影响, 单路飞秒激光的功率或能量提升受限。光纤飞秒相干合成是实现高平均功

率、高重复频率、高脉冲能量飞秒激光输出的必由之路。空域相干合成技术显著提升了飞秒光纤激光系统的平均功率,时域相干合成技术则对飞秒光纤激光系统单脉冲能量的提升至关重要。随着对高功率高能量飞秒激光系统的不断追求,空域与时域等相结合的多维相干合成技术已是大势所趋<sup>[50-51,65-66,76-77]</sup>。

本文对光纤啁啾脉冲时域相干合成的几种主要技术路线进行了调研、分析与讨论,重点介绍了近年来,基于光电控制的脉冲分割-放大和基于 GTI 腔的脉冲时域堆积技术的特点和发展历程,梳理出适合于多脉冲、高能量脉冲时域相干合成的方法,对于高功率高能量超快激光的研究具有重要的参考价值。

另外,计算机科学和人工智能技术近年来取得快速发展,将新兴的人工智能技术引入脉冲时域相干合成领域,能够解决脉冲光束光程、强度、相位等多维参量高精度主动控制的难题,在进一步提升脉冲合成数目、效率、能量以及稳定性上拥有巨大的潜力。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wan Peng, Yang L M, Liu Jian. All fiber-based Yb-doped high energy, high power femtosecond fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29854-29859.
- [3] Délen X, Zaouter Y, Martial I, et al. Yb: YAG single crystal fiber power amplifier for femtosecond sources[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 109-111.
- [4] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [5] Zhao Wei, Hu Xiaohong, Wang Yishan. Femtosecond-pulse fiber based amplification techniques and their applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20: 310513.
- [6] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [7] Liu Yicai, Wu Jingfeng, Wen Xiaoxiao, et al. >100 W GHz femtosecond burst mode all-fiber laser system at 1.0  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13414-13422.
- [8] Cao Xue, Li Qianglong, Li Feng, et al. Femtosecond Yb-doped tapered fiber pulse amplifiers with peak power of over hundred megawatts[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 5507-5518.
- [9] Yu Hailong, Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, et al. Linearly-polarized fiber-integrated nonlinear CPA system for high-average-power femtosecond pulses generation at 1.06  $\mu\text{m}$ [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(18): 4271-4277.
- [10] Li Feng, Zhao Wei, Wang Yishan, et al. Large dispersion-managed broadband high-energy fiber femtosecond laser system with sub 300 fs pulses and high beam quality output[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108653.
- [11] Zhang Yao, Wang Jingshang, Teng Hao, et al. Double-pass pre-chirp managed amplification with high gain and high average power[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3115-3118.
- [12] Yang Ruaoao, Zhao Minghe, Jin Xingang, et al. Attosecond timing jitter from high repetition rate femtosecond "solid-state fiber lasers"[J]. *Optica*, 2022, 9(8): 874-877.
- [13] Schimpf D N, Seise E, Eidam T, et al. Control of the optical Kerr effect in chirped-pulse-amplification systems using model-based phase shaping[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24): 3788-3790.
- [14] Jocher C, Eidam T, Hädrich S, et al. Sub 25 fs pulses from solid-core nonlinear compression stage at 250 W of average power[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4407-4409.
- [15] Schimpf D N, Seise E, Limpert J, et al. Self-phase modulation compensated by positive dispersion in chirped-pulse systems[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 4997-5007.
- [16] Schimpf D N, Seise E, Limpert J, et al. The impact of spectral modulations on the contrast of pulses of nonlinear chirped-pulse amplification systems[J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10664-10674.
- [17] Li Hao, Wang Meng, Wu Baiyi, et al. Femtosecond laser fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings for stimulated Raman scattering suppression in kilowatt-level fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2023, 31(8): 13393-13401.
- [18] Song Huaqing, Yan Donglin, Wu Wenjie, et al. SRS suppression in multi-kW fiber lasers with a multiplexed CTFBG[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20535-20544.
- [19] Tao Rumao, Xiao Hu, Zhang Hanwei, et al. Dynamic characteristics of stimulated Raman scattering in high power fiber amplifiers in the presence of mode instabilities[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25098-25110.
- [20] Farrow R L, Kliner D A V, Hadley G R, et al. Peak-power limits on fiber amplifiers imposed by self-focusing[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(23): 3423-3425.
- [21] Huang Zhihua, Wang Jianjun, Lin Honghuan, et al. Self-focusing length in highly multimode ultra-large-mode-area fibers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14604-14613.
- [22] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 4th ed. Amsterdam: Academic Press, 2007.
- [23] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [24] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.

- [25] Zhu Jiajian, Zhou Pu, Ma Yanxing, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18645-18654.
- [26] Otto H J, Jauregui C, Limpert J, et al. Average power limit of fiber-laser systems with nearly diffraction-limited beam quality[C]//Proceedings of SPIE 9728, Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications. 2016: 97280E.
- [27] Ke Weiwei, Wang Xiaojun, Bao Xianfeng, et al. Thermally induced mode distortion and its limit to power scaling of fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14272-14281.
- [28] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [29] Huang Zhimeng, Shu Qiang, Tao Rumao, et al. >5kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(21): 1181-1184.
- [30] Wang Guangjian, Song Jiabin, Chen Yisha, et al. Six kilowatt record all-fiberized and narrow-linewidth fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10: e22.
- [31] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, et al. The future is fibre accelerators[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4): 258-261.
- [32] Klenke A, Müller M, Stark H, et al. Coherent beam combination of ultrafast fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24: 0902709.
- [33] Grebing C, Müller M, Buldt J, et al. Kilowatt-average-power compression of millijoule pulses in a gas-filled multi-pass cell[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(22): 6250-6253.
- [34] Teng Hao, He Xinkui, Zhao Kun, et al. Attosecond laser station[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27: 074203.
- [35] 杨康文. 光纤飞秒光梳高功率放大与控制[D]. 上海: 华东师范大学, 2014: 75-103. (Yang Kangwen. High power amplification and precise control of optical fiber frequency comb[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014: 75-103)
- [36] Klenke A, Hädrich S, Kienel M, et al. Coherent combination of spectrally broadened femtosecond pulses for nonlinear compression[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3520-3522.
- [37] Huang Shuwei, Cirmi G, Moses J, et al. High-energy pulse synthesis with sub-cycle waveform control for strong-field physics[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(8): 475-479.
- [38] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [39] Stark H, Buldt J, Müller M, et al. 1 kW, 10 mJ, 120 fs coherently combined fiber CPA laser system[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 969-972.
- [40] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, et al. Coherent beam combining of 61 femtosecond fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20152-20161.
- [41] Klenke A, Steinkopff A, Aleshire C, et al. 500W rod-type 4×4 multicore ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letter*, 2022, 47(2): 345-348.
- [42] Rigaud P, Kermene V, Bouwmans G, et al. Spatially dispersive amplification in a 12-core fiber and femtosecond pulse synthesis by coherent spectral combining[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13555-13563.
- [43] Chang W Z, Zhou Tong, Siiman L A, et al. Femtosecond pulse spectral synthesis in coherently-spectrally combined multi-channel fiber chirped pulse amplifiers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3897-3910.
- [44] Guichard F, Hanna M, Lombard L, et al. Two-channel pulse synthesis to overcome gain narrowing in femtosecond fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5430-5433.
- [45] Chia S H, Cirmi G, Fang Shaobo, et al. Two-octave-spanning dispersion-controlled precision optics for sub-optical-cycle waveform synthesizers[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 315-322.
- [46] Tian Haochen, Song Youjian, Meng Fei, et al. Long-term stable coherent beam combination of independent femtosecond Yb-fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5142-5145.
- [47] Stark H, Müller M, Kienel M, et al. Electro-optically controlled divided-pulse amplification[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13494-13503.
- [48] Zhou Tong, Ruppe J, Zhu Cheng, et al. Coherent pulse stacking amplification using low-finesse Gires-Tournois interferometers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7442-7462.
- [49] Breilkopf S, Eidam T, Klenke A, et al. A concept for multiterawatt fibre lasers based on coherent pulse stacking in passive cavities[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3: e211.
- [50] 栗荣涛, 周朴, 张鹏飞, 等. 超短脉冲光纤激光相干合成[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47: 0103001. (Su Rongtao, Zhou Pu, Zhang Pengfei, et al. Review on the progress in coherent beam combining of ultra-short fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47: 0103001)
- [51] 王井上, 张瑶, 王军利, 等. 飞秒光纤激光相干合成技术最新进展[J]. *物理学报*, 2021, 70: 034206. (Wang Jingshang, Zhang Yao, Wang Junli, et al. Recent progress of coherent combining technology in femtosecond fiber lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70: 034206)
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] Zaouter Y, Guichard F, Daniault L, et al. Femtosecond fiber chirped-and divided-pulse amplification system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 106-108.
- [55] Guichard F, Zaouter Y, Hanna M, et al. High-energy chirped-and divided-pulse Sagnac femtosecond fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 89-92.
- [56] Pouysegur J, Weichelt B, Guichard F, et al. Simple Yb: YAG femtosecond booster amplifier using divided-pulse amplification[J]. *Optics Express*, 2016,

- 24(9): 9896-9904.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] Yang Bowei, Liu Guanyu, Abulikemu A, et al. Coherent stacking of 128 pulses from a GHz repetition rate femtosecond Yb: fiber laser[C]//Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics. 2020: JW2F. 28.
- [60] Bretkopf S, Wunderlich S, Eidam T, et al. Extraction of enhanced, ultrashort laser pulses from a passive 10-MHz stack-and-dump cavity[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122: 297.
- [61] Ruppe J, Zhou Tong, Zhu Cheng, et al. Cascading of coherent pulse stacking using multiple Gires-Tournois interferometers[C]//Proceedings of the Advanced Solid State Lasers 2015. 2015: AW3A. 4.
- [62] Ruppe J, Chen Siyun, Sheikhsofla M, et al. Multiplexed coherent pulse stacking of 27 pulses in a 4+1 GTI resonator sequence[C]//Proceedings of the Advanced Solid State Lasers 2016. 2016: AM4A. 6.
- [63] Ruppe III J M. Theoretical and experimental foundations of coherent pulse stacking amplification[D]. Michigan: University of Michigan, 2017: 105-107.
- [64] 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): 3343-3346.
- [65] Stark H, Buldt J, Müller M, et al. 23 mJ high-power fiber CPA system using electro-optically controlled divided-pulse amplification[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5529-5532.
- [66] Stark H, Benner M, Buldt J, et al. Pulses of 32 mJ and 158 fs at 20-kHz repetition rate from a spatiotemporally combined fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 3007-3010.
- [67] Zhou Shian, Wise F W, Ouzounov D G. Divided-pulse amplification of ultrashort pulses[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 871-873.
- [68] Xu Yilun, Wilcox R, Byrd J, et al. FPGA-based optical cavity phase stabilization for coherent pulse stacking[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2018, 54: 1600111.
- [69] 许逸伦. 激光脉冲相干堆积的理论及实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2018: 52-70. (Xu Yilun. Theoretical and experimental study on coherent pulse stacking[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018: 52-70)
- [70] Pei Hanzhang. High fidelity coherent pulse stacking amplification with intelligent system controls[D]. Michigan: University of Michigan, 2021: 62-68.
- [71] Du Weizhi, Hyeon E, Pei Hanzhang, et al. Improved machine learning algorithms for optimizing coherent pulse stacking amplification[C]//Proceedings of 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics. 2021: 1-2.
- [72] Pei Hanzhang, Whittlesey M, Du Qiang, et al. Design and operation of coherent pulse stacking amplification as a deep recurrent neural network[C]//Proceedings of 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics. 2021: 1-2.
- [73] Abuduweili A, Yang Bowei, Zhang Zhigang. Control of delay lines with reinforcement learning for coherent pulse stacking[C]//Proceedings of 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics. 2020: 1-2.
- [74] Abuduweili A, Wang Jie, Yang Bowei, et al. Reinforcement learning based robust control algorithms for coherent pulse stacking[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 26068-26081.
- [75] Ristau D. Laser-induced damage in optical materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [76] 黄智蒙, 李克洪, 张帆, 等. 4 路光纤超短脉冲阵列光程相位自适应控制[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 129902. (Huang Zhimeng, Li Kehong, Zhang Fan, et al. Adaptive control of optical path and phase in a coherent array of four ultrashort pulsed fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 129902)
- [77] 左言磊, 魏晓峰, 朱启华, 等. 用于快点火研究的超短脉冲的相干合成[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(12): 2101-2104. (Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua, et al. Coherent addition of ultrashort pulses for the fast-ignition study[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(12): 2101-2104)