

相干脉冲堆积——超越啁啾脉冲放大的新技术

张志刚

北京大学信息科学技术学院区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871

摘要 无论是在固体还是在光纤放大器中,飞秒的脉冲能量都受到热效应和非线性效应的制约。即使是啁啾脉冲放大(CPA),也难以超越高峰值功率和平均功率的限制。脉冲空间和时间分割放大-合成,有可能打破僵局,产生高重复频率和高脉冲能量;而将高功率光纤放大器中的脉冲进行相干堆积,有可能超越啁啾脉冲放大,得到高于其若干数量级的脉冲能量,同时保持高重复频率。

关键词 激光光学;相干脉冲堆积;相干光束合并;高功率脉冲

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.120001

Coherent Pulse Stacking—An Innovation Beyond the Chirped Pulse Amplification

Zhang Zhigang

*State Key Laboratory of Advanced Optical Communication System and Networks,
School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China*

Abstract Either in the solid state or in the fiber amplifier, femtosecond pulse energy is limited by the thermal and nonlinear effects. Chirped pulse amplification (CPA) solely cannot break the barrier of high peak power and average power. Coherent pulse combination, such as the spatially or temporally divided pulse amplification, has the potential to produce higher pulse energies at high repetition rate. Furthermore, coherent pulse stacking from high repetition rate, high power fiber amplifier may even surpass the chirped pulse amplification and produce many order higher pulse energy with high repetition frequency.

Key words laser optics; coherent pulse stacking; coherent beam combination; high power pulses

OCIS codes 140.3298; 320.7090; 140.3510

1 引言

20世纪60年代中期,调Q和锁模技术的相继发明,使激光脉冲的功率有了较快的发展,但很快就到了一个平台期。一直到20世纪80年代末期,啁啾脉冲放大技术的出现,使激光脉冲功率结束了二十余年的平台期,再次经历了飞速发展。在脉宽不能继续缩短的情况下,提供脉冲能量成为了一个关键。但是现在,脉冲能量似乎又停滞在一个平台上,迫切需要新技术^[1],来触发一场新的激光革命。

第一代飞秒激光器是以染料激光器为代表的低脉冲能量、低平均功率飞秒激光器;第二代是以钛宝石激光器为代表的高脉冲能量、低平均功率的时代;第三代则是高重复频率、高脉冲能量阶段。第三代飞秒激光器以新一代激光粒子加速器^[2]、太空碎片清除^[3]、高通量阿秒脉冲产生^[4-5]、核聚变激光点火^[6]等应用为牵引动力,主要特征是:焦耳量级脉冲能量、数十千赫兹重复频率、千瓦以上平均功率。特别是在射频加速器的梯度已经接近其内禀极限的情况下,高能量脉冲激光有望成为新一代小型化 GeV 加速器的驱动源。其要求的

收稿日期: 2017-06-21; **收到修改稿日期:** 2017-07-10

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CB922401)、国家自然科学基金(61575004,61735001)、科技部重大仪器研发项目(2012YQ14000505-0304)

作者简介: 张志刚(1955—),男,博士,教授,主要从事超短脉冲固体和光纤激光器方面的研究。

E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn

诸如 32 J 激光能量、15 kHz 重复频率和 480 kW 平均功率^[2], 远超目前激光器的能力。激光器要达到这样的水平, 也许需要几十年时间的艰苦努力, 特别需要新概念和新途径^[7]。

本文旨在简要说明各种提高飞秒激光脉冲能量和平均功率的技术, 试图使读者对各种新技术有个基本的了解和判断。

2 脉冲相干合成

2.1 以钛宝石为代表的固体飞秒激光器

以钛宝石激光器为代表的固体激光器能产生非常高的峰值功率, 例如美国伯克利激光加速器 BELLA 系统的钛宝石激光器产生 40 J、30 fs 脉冲, 峰值功率大于 1 PW ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$)^[8]。但重复频率低至 1 Hz, 平均功率只有 40 W。我国上海光学精密机械研究所研制的大口径激光系统产生 192 J、27 fs、大于 5 PW 峰值功率^[9], 只是单发脉冲。世界上其他拍瓦激光器, 例如美国德克萨斯 1 PW 钽玻璃激光器 (190 J, 170 fs) 和日本大阪的 2 PW 激光快点火实验 (LFEX) 钽玻璃激光器 (2 kJ, 1 ps), 也是单发^[10]。

提高重复频率受限于放大介质中的热-光效应, 例如热透镜和热致双折射等。改变激光介质的形状, 例如碟片激光放大器^[11], 能部分地解决问题, 但目前脉冲能量和脉宽还不能与钛宝石激光器相比。最近捷克 HiLASE 宣布建成平均功率 1 kW 的碟片超级激光器, 脉冲能量高达 100 J, 但脉宽为 1.3 ps, 重复频率仅为 10 Hz^[12]。所以这个碟片激光器也不能达到以上列举的前沿应用需求指标。提高脉冲能量和重复频率的努力还在持续进行中。

2.2 光纤激光空间合束

与固体激光器平行发展的是光纤激光器。由于散热好、可集成、运用灵活, 光纤激光器在平均功率、能量转换效率和光束质量上优于固体激光器, 单根光纤可以输出成百甚至上千瓦的功率。但在啁啾脉冲光纤激光放大器中, 受光纤芯径的和由此带来的非线性效应限制, 即使用最大模场面积的光子晶体光纤, 将其用光栅展宽器展宽到最大脉宽, 在单根光纤中获取的脉冲能量还是远远小于光纤中储存的能量, 峰值功率也只有吉瓦量级^[13], 已经接近极限^[14]。其原因是非线性效应限制。从图 1 看出, 要想从光纤激光放大器中最大限度地获取能量, 除了用大模场面积光纤, 脉冲宽度需要展宽到几十上百纳秒。而把一个 100 fs 的脉冲展宽成 10 ns, 脉冲展宽器中需要的光栅尺寸约为 0.9 m, 光栅距离约为 2.7 m, 这基本上是不现实的。

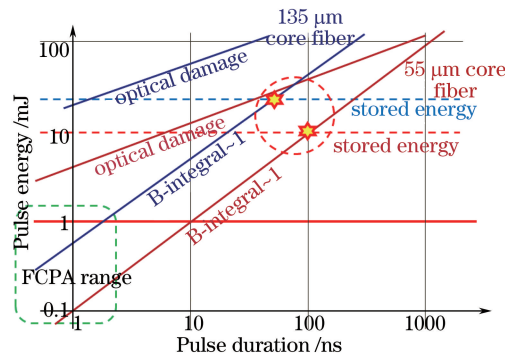


图 1 135 μm 和 55 μm 两种大模场面积光纤啁啾脉冲放大 (FCPA) 中脉冲能量受限。

绿色图框表示目前 FCPA 达到的脉冲能量, 红色圈表示在 B 积分受限下可能从光纤中抽取的脉冲能量

Fig. 1 Limitation for pulse energy of fiber chirped pulse amplification (FCPA) in two kind of large mode area (135 μm and 55 μm). The green block indicates the pulse energy from fiber chirped pulse amplification, the red circle points the ideal extracted pulse energy under the limit of B-integral

直观的解决方案, 是空间合束, 即将脉冲分成若干路光纤分别放大再合成一路。这种技术最早用于连续激光, 最近几年扩展到飞秒脉冲激光^[15-16]。理论证明, 可以将上千根光纤激光发出的光合束, 以获得单根光纤达不到的峰值功率和脉冲能量^[17-18]。受到这种理念的鼓舞, CPA 技术的发明者 Mourou 教授提出, 将一万根 1 mJ、10 kHz 的光纤激光合束为 10 J、10 kHz 的脉冲, 作为将来的加速器光源^[19]和“国际相干放大网络 (ICAN)”计划的一部分 (图 2)。

这里的技术问题是如何将上万根光纤进行合束,每个光纤的相位都需要同步。实现起来虽然复杂,也不是不可能。目前实验上刚刚达到8根光纤合束为1 kW,1 mJ^[20]。我国国防科技大学也通过光纤合束得到313 W的平均功率,827 fs的脉冲^[21]。

其实这个方案不是控制一万根光纤的相位这样的技术问题,而是概念问题。所用的单根光纤放大的脉冲能量已经达到极限,而加速器要求的重复频率又太低,只有10 kHz。即使单根光纤能提供1 mJ的脉冲能量,单根光纤输出的平均功率也只有10 W,其实是浪费了光纤激光器高平均功率的能力。仔细想想,靠增加光纤的数目来提高脉冲能量,除了比固体激光器散热好一些,与仅靠扩大放大介质的面积来增加功率耐受度有什么区别?这是不是又回到了CPA之前?这个CPA的开创者,怎么走了回头路?

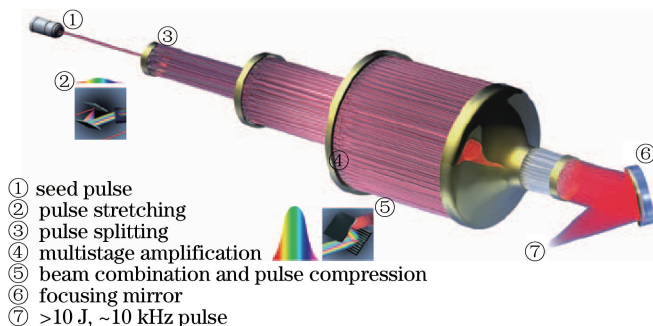


图2 光纤相干合束概念图^[19]

Fig. 2 Concept of coherent pulse combination^[19]

2.3 时域分割放大

回头想想,CPA的概念是什么?就是把脉冲在时域展宽,再放大,然后再压缩回去。可传统的展宽器,最多也只能把脉冲展宽到1 ns。所以光纤也好固体也好,都承受不了高峰值功率。能不能想个别的办法展宽呢?有人说,把一个脉冲在时域上切成几个脉冲,不就相当于在时域展宽了吗?于是就有了脉冲分割放大(图3)。

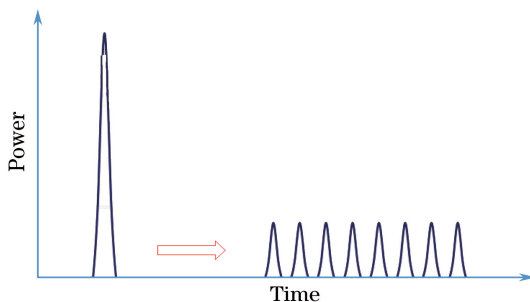


图3 时间分割——等效于脉冲展宽

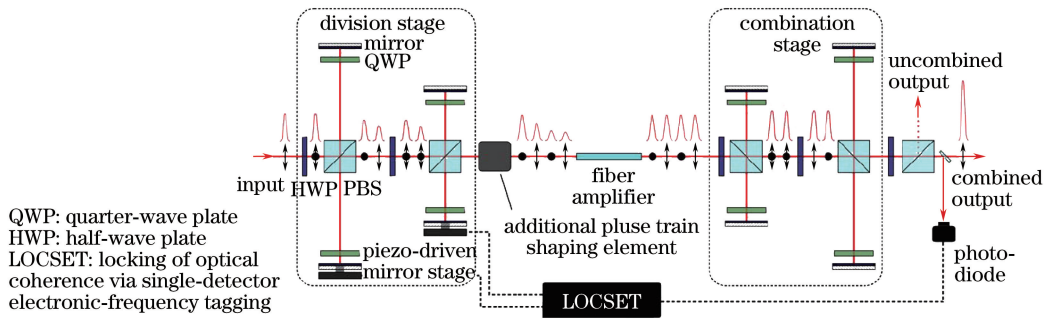
Fig. 3 Pulse division in time domain—equivalent to pulse stretching

为解决这个矛盾,有研究者提出先利用多次偏振分光将脉冲在时域分割,经过时间延迟,将重复频率倍增,耦合入一根光纤放大到高平均功率后,再次将脉冲分光、延时补偿,使之合成为一个脉冲(图4)。这个技术称为分割脉冲放大(DPA)^[22-24]。这个技术要经过放大前后两次偏振分光(PBS),两套延迟控制和补偿光路,非常复杂。而且,这种利用偏振分割和合成的脉冲的数目非常有限。时间分割和空间合束结合起来也许是解决之道^[25]。

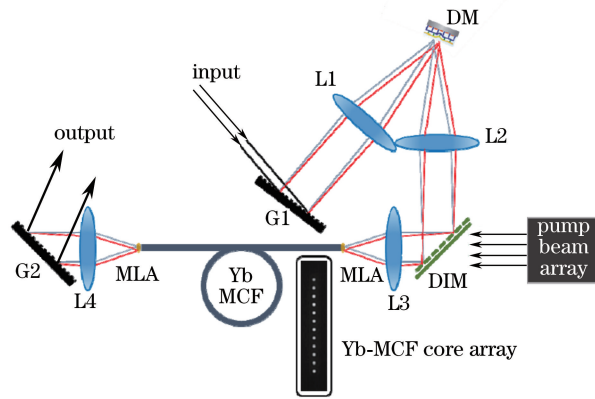
2.4 光谱分割放大

还有一种方法叫光谱放大合成方法,即:将脉冲的光谱分割,分别放大,再合成在一起。

图5是其中一例。光栅将入射脉冲的光谱展开,分成几个光谱分量分别耦合到一种多芯光纤中,放大后再通过光栅合成^[26]。在分束光栅的傅里叶平面上,安装变形镜以调谐各波长分量的相对相位。在文献^[26]的实验中,将40 nm的光谱分成了12个通道,每个接近3~3.8 nm;耦合入15芯的光纤中(有光纤芯没用到)。放大到平均功率100 mW,否则就会有非线性效应产生。这个实验只证明了光谱合成后可以产生100 fs量级的脉

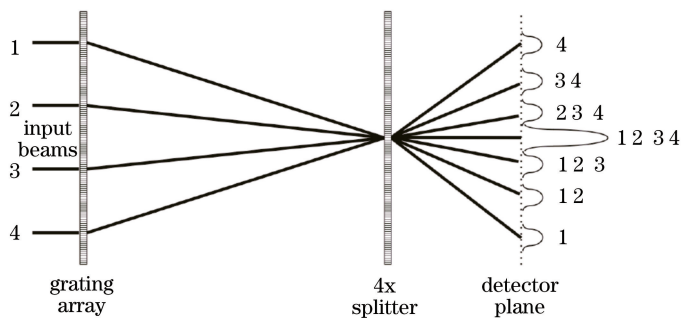
图 4 时间分割-相干合成装置示意图^[24]Fig. 4 Equipment of time division-coherent combination^[24]

冲,而非高脉冲能量。这里致命的问题是,分割后光谱变窄为 3 nm,而这样窄的光谱恰恰是啁啾脉冲展宽的大敌!例如原来 40 nm 的光谱可以展宽至 500 ps,现在分割到 1/12,每段光谱就只能展宽成 500 ps 的 1/12 了!每根光纤(这里是每个芯)对应的峰值功率还是一样的,仍然受非线性效应的限制。结果,虽然是分割放大,却是个零和游戏——没有一个分量的脉冲能量可以放大到超过合起来放大的脉冲能量的 1/12!

图 5 光谱分割-相干合成技术示意图^[26]Fig. 5 Schematic of spectrum division-coherent combination technology^[26]

2.5 衍射光学合成

这里还穿插着另外一种空间合成方法,叫衍射合成^[26]。设想将入射光按不同级别的角度入射到光栅上,使其集中到零级光上。要想得到多级衍射,就得用光栅密度低的;而低密度光栅的衍射效率就会低,因为不可能只有一级衍射;为提高效率,很容易想到闪耀光栅;可要是这么多级次都闪耀,还叫闪耀光栅吗?同时,能合成的光束数目也非常有限。其实这只是空间合束的一个版本而已。从图 6 可以看出,入射 4 束,合成出 7 束光!零级光所占的比例能有多少呢?实验结果是 76%。原理上用 1 个光栅就可以。但是衍射后

图 6 利用衍射器件(这里是光栅)的光束合成装置示意图^[27]Fig. 6 Schematic of beam combination equipment with diffraction device (grating)^[27]

的光束会有“脉冲阵面”倾斜。为了纠正这个倾斜才用了两个光栅,虽然牺牲了一些效率。

这4束光是从哪儿来的呢?还是偏振分割而成的,只不过合成不是用偏振而已。图7是整个系统的构成图。无论如何,用压电陶瓷控制光束的相对相位是不可避免的。

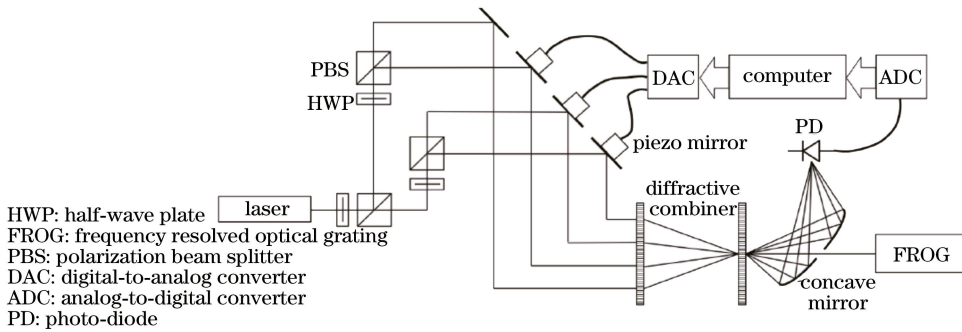


图7 时间分割-衍射合成装置示意图^[27]

Fig. 7 Equipment of time division-diffraction combination^[27]

2.6 相干脉冲堆积

脉冲分割放大合成是靠偏振分割,毕竟数目有限,而且分合都需要偏振和时间延迟控制。如果把脉冲列看成已经分割好的脉冲,直接把脉冲在时域合成,就像图8那样,可以吗?

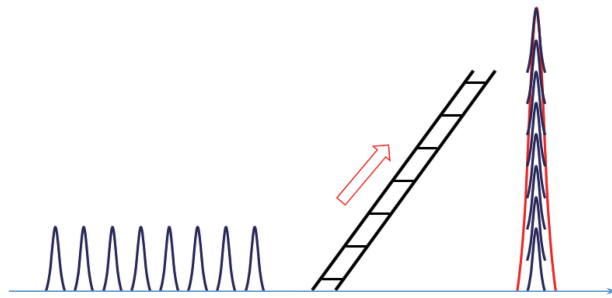


图8 脉冲时间堆积概念

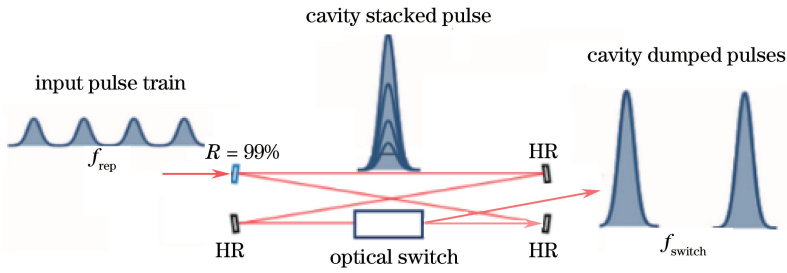
Fig. 8 Concept of pulse stacking in time domain

人们首先想到的就是腔增强技术。腔增强时域脉冲合束不需要脉冲分割,不需要偏振控制,直接将脉冲列中大量脉冲在腔内叠加在一起,因此也称相干脉冲堆积放大(CPSA)技术。相干脉冲堆积腔的腔型可分为两种:高 Q 值腔(高精度度腔)^[7]和低 Q 值腔(低精度度腔)^[28],区别是输入耦合镜的反射率和堆积后的脉冲从腔内的导出方式。

高 Q 值腔的脉冲腔内增强堆积放大技术见图9,图中 f_{rep} 是入射脉冲的重复频率, f_{switch} 是腔内开关的重复频率,HR表示高反射镜。图9中入射耦合镜的反射率 R 在99%以上。将脉冲序列连续注入与脉冲时间间隔相等的谐振腔,脉冲被局限在腔内相干堆积,达到饱和后,通过高速光开关将腔内脉冲倒空(注意不是从入射端镜输出)。此技术称为堆积和腔倒空(SnD)技术^[7]。模拟表明在高 Q 值腔可堆积600多个脉冲。如果导出效率能达到80%,相当于500倍的增强^[7]。

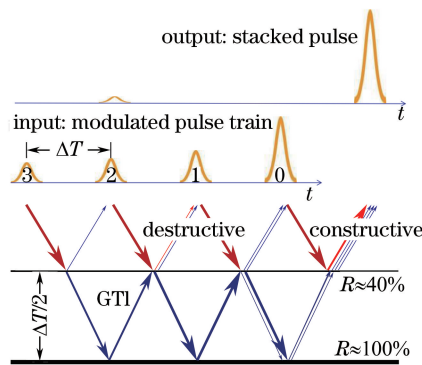
耶拿大学的研究者最近实验证实了腔增强SnD概念^[29]。增强腔由一个输入耦合镜和15个腔镜构成,输入耦合镜的反射率是99%。腔倒空光开关选用了声光调制器(AOM)。输入脉冲能量 $3\ \mu\text{J}$,腔倒空出的脉冲能量为 $160\ \mu\text{J}$,能量倍增效率是65倍(远低于理想的600倍,受限于腔内AOM的非线性效应),脉宽为800 fs。SnD有两点限制:一是为了适应腔内光开关AOM几十纳秒的上升沿和下降沿时间,这个实验中,谐振腔相当长(30 m),与之匹配的入射脉冲列的重复频率为10 MHz;二是为了减少AOM的上升沿时间,在AOM上的光斑也相当小(0.4 mm),这对进一步提高脉冲能量不利。为了提高功率耐受性,他们又提出了高速机械开关^[30]。

对于高 Q 值腔增强,Mourou教授认为腔倒空开关并不存在。的确,面对如此高的脉冲能量,无论是电光调制器(EOM),还是AOM,都无法承受得住。Mourou教授进一步指出,高速机械开关本质上还是机械

图9 高Q值腔相干脉冲SnD技术示意图^[7]Fig. 9 Principle of coherent pulse SnD technology in a high-Q cavity^[7]

开关,机械不可能有那么高的速度。

密歇根大学的 Galvanauskas 教授提出了用低 Q 值腔将脉冲叠加在一起的概念。在低 Q 值腔内堆积放大技术中,入射耦合镜的反射率很低,在 40% 左右。脉冲的耦合入腔和导出都利用干涉效应,所以又称 Gires-Tournois 干涉仪(GTI)。以 4 个脉冲的脉冲列为例,如图 10 所示,编号 3、2、1、0 的脉冲相继入射到输入耦合界面,为了显示清楚,图中用斜入射两镜腔表示。3 号脉冲的 60% 入射到腔内,经底层反射镜和顶层反射镜反射,与 2 号脉冲的入射部分在腔内相干叠加堆积;而 2 号脉冲在界面的反射光与 3 号脉冲的透射光相干相消。同理,1 号脉冲与腔内 3 号和 2 号脉冲相干堆积,而最后入射的 0 号脉冲,其能量与腔内堆积的脉冲能量相等、相位相同,形成相干反射增强,相当于一个开关,将腔内脉冲全部导出。这种技术称为 GT 相干堆积(GTI-CPS)^[28]。美中不足的是,最初的 3 号脉冲的反射光没有与之干涉相消的腔内脉冲,因此就留在了反射光脉冲列内。但因时间与输出脉冲相隔很远,与最终输出的脉冲相比,3 号脉冲的反射光能量占比非常小,可以忽略,也可以通过选单技术将其消除。

图10 低Q值GT腔相干脉冲堆积器工作原理图^[26]Fig. 10 Working principle of coherent pulse stacker in low-Q GT cavities^[26]

实际应用的 GTI 堆积器是图 11(根据参考文献[31]改画)所示的四镜或三镜腔。需要指出的是,这种 GT 腔型看起来和萨尼亚克干涉仪相似,实际上是不同的:入射耦合镜的方向相差 90° ,结果是,GTI 腔内只有一个方向的光循环,而萨尼亚克干涉仪腔内有两个相对方向的光循环。

实际上激光器输出的是等幅度脉冲列,幅度调制意味着能量损失。好在理论和实验证明,对于等幅入射的脉冲列,只要满足以上相位条件,用 m 个腔相联,能将 $2m+1$ 等幅脉冲合成为一个脉冲^[28]。如 $m=4$,即 4 个腔,就可以把 9 个等振幅的入射脉冲合成为一个主脉冲; $m=8$,就可以把 17 个等振幅的入射脉冲合成为一个主脉冲。更进一步,如果想加速这个过程,可用级联堆积,即下一级堆积器的腔长是前一级的 $m+1$ 倍。 N 级级联就可以将 $(2m+1)N$ 个相干脉冲堆积为一个。如图 12(图中堆积器未按比例画)所示,两级 $4+4$ 个腔,就可以堆积 81 个脉冲。脉冲列被切割为 81 个脉冲一组,脉冲组的重复频率可根据应用需求设置,例如 10 kHz。一级堆积器将 81 个相干脉冲堆积为 9 个脉冲;二级堆积器将 9 个相干脉冲堆积为 1 个脉冲。

Galvanauskas 研究小组用本研究小组提供的 1 GHz 光纤激光器,通过一级 GTI 堆积器,将 1 ns 间隔的 9 个 0.1 mJ 的脉冲合成为接近 1 mJ 能量的脉冲^[31];他们又通过一级堆积器,将 27 个相干脉冲堆积为一个

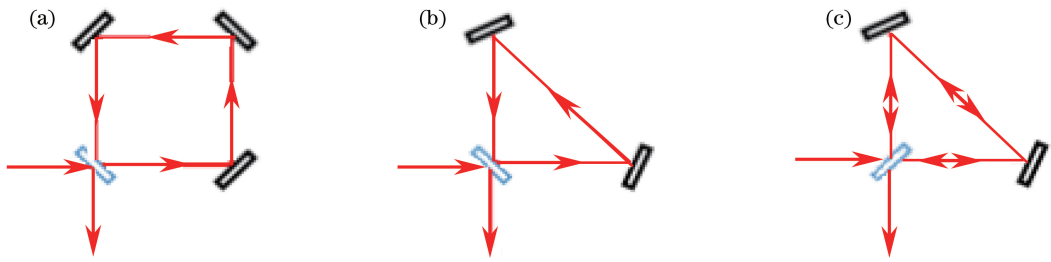


图 11 实际使用的(a)四镜腔和(b)三镜腔 GTI 堆积器;(c)萨尼亚克干涉仪

Fig. 11 Practical (a) four-mirror and (b) three-mirror cavity GTI stacker; (c) Sagnac interferometer

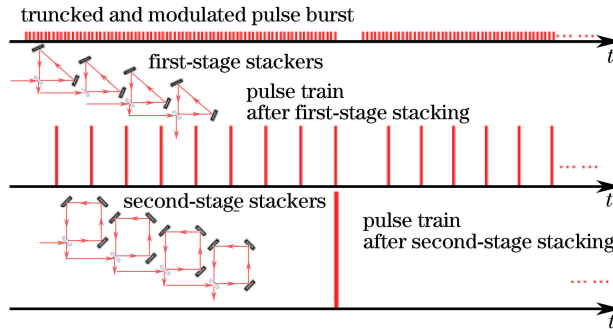


图 12 二级相干脉冲堆积示意图

Fig. 12 Schematic of two-orders coherent pulse stacking

脉冲^[33]。图 13 是实验得到的脉冲堆积结果,图中红色是入射的 27 个脉冲,蓝色是经过 4+1 个腔将 27 个脉冲堆积为一个脉冲^[32]。可以看到,入射脉冲基本上被压了下去,堆积到第 27 个脉冲上。

对于这个进步,Mourou 教授同样有疑问:Galvanauskas 研究小组得到的脉冲的对比度(20 dB)与 Mourou 所得脉冲的对比度(120 dB)差距较大。从图 13 可见,第 9 个脉冲因为无脉冲与之相干相消,只好以大约 2 倍于入射脉冲的功率,孤零零地留在脉冲列中;主脉冲附近也有脉冲残留。如同任何一个新技术,总会有缺点。

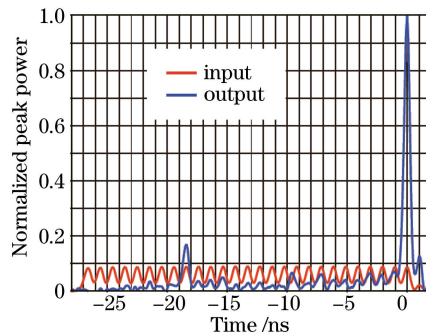


图 13 4+1 个腔的腔内脉冲堆积后的脉冲列^[33]

Fig. 13 Pulse train after 4+1 cavity stacking^[33]

2.7 只有多种技术合起来才能达到最高脉冲能量

目前从 0.1 mJ 堆积出的脉冲能量是毫焦量级。对于很多应用,例如飞秒加工,已经够用了。要达到焦耳量级,则需要用更多级堆积。而多级腔,每一级腔长都是前一级腔长的数倍。例如 1 GHz 激光器作为种子脉冲,一级堆积腔长是 30 cm,二级堆积腔长是 2.7 m,三级堆积腔长是 24.3 m,四级腔的腔长就是 218.7 m!之后级次的腔长更会大得惊人!多通长腔的方案因反射损耗巨大也变得不可行。

怎么办?图 14 给出焦耳量级脉冲的装置构想。高重复频率光纤激光器输出的脉冲,经过展宽和振幅相位调制,在空间分成若干路放大,然后空间合束。最后是脉冲的时域堆积和脉冲压缩。注意这里不同于

Mourou 教授的空间分割放大合束概念的是,放大器中的光脉冲的重复频率很高,而不是几十千赫兹。也不同于耶拿大学的 SnD 技术,其方案是在倒空后空间合束。

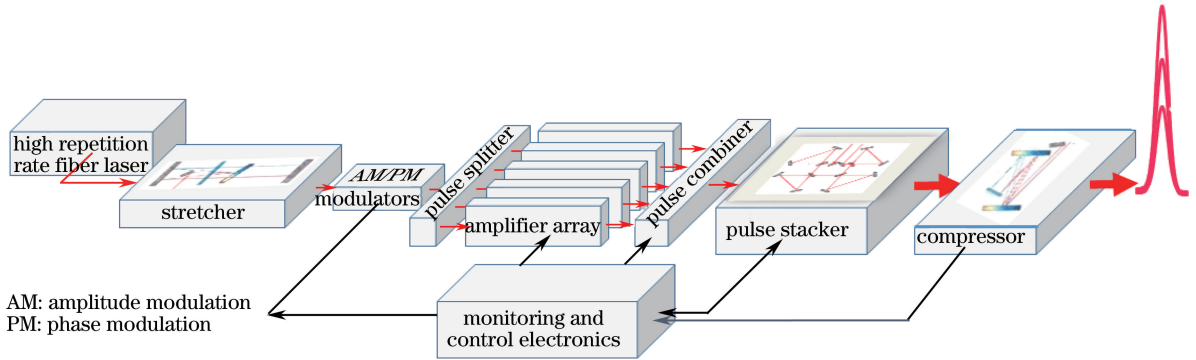


图 14 焦耳量级飞秒脉冲激光产生设想装置

Fig. 14 A proposed amplification chain for joule-level femtosecond pulse laser generation

说到这才明白,原来相干堆积是放大的最后一级! 别误会,如果不需要焦耳量级的脉冲,不分束直接放大、堆积也是可以的。

3 结 论

为了飞秒脉冲能量和平均功率的进一步提高,人们不断地推出新的技术。在众多的新技术中,也许相干脉冲堆积技术与其他分束合成技术的结合,有望将脉冲能量和平均功率提高几个数量级^[34]。

相干脉冲堆积技术刚刚推出,还有很多技术问题没解决,例如:

1) 信噪比。如图 13 所示,目前实验中的信噪比不到 20 dB。计算至少可达 40 dB。提高信噪比,需要对脉冲的重复频率、相位和堆积腔长进行严格的控制和同步。这么多腔的同时控制和同步,是一个艰巨的任务。

2) 脉冲宽度。上述讨论一直没提脉冲宽度,目前堆积出来的脉冲还是在几百飞秒量级。脉冲宽度小于 100 fs,甚至是单周期脉冲也可以做到,这就需要提高脉冲在更宽谱内的相干性,即脉冲光谱的频率间隔和载波包络相位的精确控制。

激光光场的精确控制。因为是相干堆积,需要提高飞秒激光脉冲的相干性,这就需要激光器本身更加稳定,包括载波包络相位控制、所有(上百个)脉冲堆积腔的腔长,也需要更加精确的控制。这是新的光场调控的要求。这么多参数,这么多自由度,无法通过人为控制。于是就催生了一门新的学科:智能光子学。

参 考 文 献

- [1] Fattahi H. Third-generation femtosecond technology[J]. *Optica*, 2014, 1(1): 45-63.
- [2] Leemans W, Esarey E. Laser-driven plasma-wave electron accelerators[J]. *Physics Today*, 2009, 62(3): 44-49.
- [3] 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.
- [4] Sansone G, Poletto L, Nisoli M. High-energy attosecond light sources[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 655-663.
- [5] Wu Y, Cunningham E, Zang H, *et al.* Generation of high-flux attosecond extreme ultraviolet continuum with a 10 TW laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(20): 201104.
- [6] Fujioka S, Arikawa Y, Kojima S, *et al.* Fast ignition realization experiment with high-contrast kilo-joule peta-watt LFEX laser and strong external magnetic field[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(5): 056308.
- [7] Breitkopf 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.
- [8] Leemans W P, Duarte R, Esarey E, *et al.* The Berkeley lab laser accelerator (BELLA): a 10 GeV laser plasma accelerator[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1299: 3-11.

- [9] Chu Y, Gan Z, Liang X, *et al.* High-energy large-aperture Ti: sapphire amplifier for 5 PW laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5011-5014.
- [10] Danson C, Hillier D, Hopps N, *et al.* Petawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science Engineering*, 2015, 3(1): 5-18.
- [11] Chvykov V, Cao H, Nagymihaly R, *et al.* High peak and average power Ti:sapphire thin disk amplifier with extraction during pumping[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(13): 3017-3020.
- [12] Smrž M, Mužík J, Novák O, *et al.* Progress in kW-class picosecond thin-disk lasers development at the HiLASE[C]. *SPIE*, 2016, 9726: 972617.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Klenke A, Bretkopf S, Kienel M, *et al.* 530 W, 1.3 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2283-2285.
- [16] Bellanger C, Toulon B, Primot J, *et al.* Collective phase measurement of an array of fiber lasers by quadriwave lateral shearing interferometry for coherent beam combining[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 3931-3933.
- [17] Klenke A, Seise E, Limpert J, *et al.* Basic considerations on coherent combining of ultrashort laser pulses[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25379-25387.
- [18] Goodno G D, Shih C C, Rothenberg J E. Perturbative analysis of coherent combining efficiency with mismatched lasers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 25403-25414.
- [19] Mourou G, Brockslesby B, Tajima T, *et al.* The future is fibre accelerators[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 258-261.
- [20] Müller M, Kienel M, Klenke A, *et al.* 1 kW 1 mJ eight-channel ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3439-3442.
- [21] Yu Hailong. Study on high power femtosecond fiber laser and coherent combination technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
于海龙. 高功率飞秒光纤激光及其相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [22] Zhou S, Wise F W, Ouzounov D G. Divided-pulse amplification of ultrashort pulses[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 871-873.
- [23] Zaouter Y, Guichard F, Daniault L, *et al.* Femtosecond fiber chirped-and divided-pulse amplification system [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 106-108.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Barthélémy A, Desfargesberthelemot A, Bouwmans G, *et al.* Spectral division amplification of a 40 nm bandwidth in a multicore Yb doped fiber and femtosecond pulse synthesis with in-fiber delay line[J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27448-27456.
- [27] Wilcox R, Dahlen D, Sano T. Femtosecond beam combination using diffractive optic pairs[C]. *CLEO2017*, 2017: SM4I.2.
- [28] Zhou T, Ruppe J, Zhu C, *et al.* Coherent pulse stacking amplification using low-finesse Gires-Tournois interferometers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7442-7462.
- [29] 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(12): 297.
- [30] Lilienfein N, Holzberger S, Pupeza I. Ultrafast optomechanical pulse picking[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(1): 47.
- [31] Ruppe J, Chen S, Zhou T, *et al.* Coherent pulse stacking extension of CPA to 9 ns effectively-long stretched pulse duration[J]. *CLEO2016*, 2016: SM4I.2.
- [32] Ruppe J, Chen S, Zhou T, *et al.* Extending CPA by at least an order of magnitude using coherent pulse stacking

amplification[C]. 7th Conference of the International Committee on Ultrahigh Intensity Lasers, 2016.

- [33] Ruppe J, Chen S, Sheikhsofla M, *et al.* Multiplexed coherent pulse stacking of 27 pulses in a 4 + 1 GTI resonator sequence[C]. Advanced Solid State Lasers, 2016: AM4A.6.
- [34] Galvanauskas A. Coherent pulse stacking amplification extending chirped pulse amplification by orders of magnitude [C]. CLEO2017, 2017: SM4I.1.