

全光纤多种子激光脉冲产生系统

林宏奂[†] 王建军 党 钊 张 锐 邓 颖 许党朋 陈 骥 王 超 陈德怀

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2008 年 9 月 27 日收到; 2009 年 4 月 29 日收到修改稿)

报道一种可精确同步输出宽带啁啾脉冲、纳秒级整形脉冲以及窄带光参量啁啾放大抽运脉冲的全光纤多种子激光脉冲产生系统. 采用掺镱光纤锁模激光器和掺镱单纵模光纤振荡器作为系统的光源, 将掺镱光纤锁模激光器输出的超短脉冲分束啁啾展宽至 0.9 ns 后, 一路进行放大产生 10 μJ 量级的宽带啁啾脉冲为高能拍瓦激光器系统提供种子光脉冲, 另一路通过 1.2 nm 滤波产生 140 ps 的基元脉冲, 通过光纤堆积器产生可编程整形的 2.3 ns 脉冲, 再经过放大达到 10 μJ 量级, 提供任意整形的压缩脉冲. 同时, 将部分掺镱光纤锁模激光器输出的超短脉冲进行光电转换并锁相后, 产生与锁模超短脉冲高精度同步的电脉冲用于触发幅度调制器, 将掺镱单纵模光纤振荡器输出的连续光削波放大, 产生光参量啁啾放大抽运脉冲. 该系统能够根据物理实验的需要, 非常灵活地在输出各种脉冲之间做出选择.

关键词: 激光聚变驱动器, 前端, 光纤激光系统

PACC: 5250J, 4260, 4255N

1. 引 言

光纤激光系统相比于传统固体激光系统, 具有输出脉冲波形和功率可编程控制、分束可靠、传输灵活、系统稳定可靠的特点, 技术更加先进, 因此在激光驱动的惯性约束聚变中有很好的应用前景. 特别是在用于惯性约束聚变的大型激光装置中, 全光纤前端系统作为种子光源, 已经发挥了巨大的作用^[1,2]. 目前, 全光纤光脉冲产生系统(即光纤前端系统)的功能较为单一, 大多只能为大型激光装置提供窄带(单纵模)、脉宽纳秒量级、能量纳焦量级的可编程整形脉冲, 如美国国家点火装置(NIF)和我国的神光Ⅲ原型装置的全光纤系统等^[1,2], 这样必然限制了整个激光装置的输出功能, 也就限制了装置所能提供物理实验的种类.

随着激光驱动的惯性约束聚变的发展, 高密度等离子体、强场物理、“快点火”^[3,4]等领域物理实验的新需求, 促使大型激光装置向多功能化转变, 因此也就要求大型激光装置的前端系统能够输出多种类型的种子脉冲: 需同步输出宽带啁啾脉冲、纳秒级整形脉冲和光参量啁啾放大(OPCPA)抽运脉冲三类激光脉冲, 并且三类激光脉冲在时间上实现“零抖

动”输出, 即输出的三种脉冲间的抖动时间小于 10 ps(均方根 RMS). 但这样的多种子脉冲产生系统目前还未见国内外报道.

根据未来大型激光装置对光脉冲产生系统的需要, 我们提出了一种基于双振荡器的, 以光学方法结合电光调制实现脉冲精确整形以及长、短(压缩后至皮秒量级)脉冲零抖动输出的全光纤、全固化的多种子激光脉冲精密同步产生方法: 采用掺镱光纤锁模激光器和掺镱单纵模光纤振荡器作为系统的光源, 将掺镱光纤锁模激光器输出的超短脉冲分束啁啾展宽至 0.9 ns 后, 一路进行放大产生 10 μJ 量级的宽带啁啾脉冲为高能拍瓦激光器系统提供种子光脉冲, 另一路通过 1.2 nm 滤波产生 140 ps 的基元脉冲, 通过 32 路堆积器产生可编程整形的 2.3 ns 脉冲, 再经过放大达到 10 μJ 量级, 提供任意整形的压缩脉冲. 同时, 将部分掺镱光纤锁模激光器输出的超短脉冲进行光电转换并锁相后, 产生与锁模超短脉冲高精度同步的电脉冲用于触发幅度调制器, 将掺镱单纵模光纤振荡器输出的连续光削波放大, 产生 OPCPA 抽运脉冲. 该系统能够根据物理实验的需要, 非常灵活地在输出各种脉冲之间做出选择.

[†] E-mail: Happylin2003@yeah.net

2. 系统结构及原理

全光纤多种子激光脉冲产生系统的结构如图 1 所示. 掺镱光纤锁模激光器输出中心波长 1049 nm、带宽 11.5 nm、脉宽 7 ps、平均功率 10 mW、重复频率 51.84 MHz 的锁模脉冲序列. 锁模激光器工作于增益导引孤子区^[5], 输出的锁模脉冲序列是整个系统的时钟基准, 也是宽带啁啾脉冲和整形脉冲的种子. 锁模脉冲序列经过分束, 其中 1% 经过光电转换进入锁相倍频器三倍频至 155.52 MHz, 作为时钟基准提供给高精度同步信号产生模块 (FPGA) 产生触

发各开关(声光开关、幅度调制器及任意波形发生器等)的同步电信号;另外 99% 经过宽带光纤放大器(双程放大,反射器为高斯型 20 nm 带宽镀膜反射器)放大并经过50:50分束器分束,输入两路带啁啾光纤光栅(啁啾量 120 ps/nm)的光纤放大器放大展宽,得到两路带宽 7.6 nm,脉冲宽度 0.9 ns 的啁啾脉冲序列. 其中一路先通过 20 nm 宽带放大器放大,并通过幅度调制器降频至 1—1000 Hz,再经过放大和一级幅度调制器提高信噪比后,经末级 20 nm放大器放大至峰值功率 25 W,通过声光调制器隔离放大器连续噪声后,被大模场光纤放大器 (LMA)放大至峰值功率 10 kW,为高能拍瓦激光器

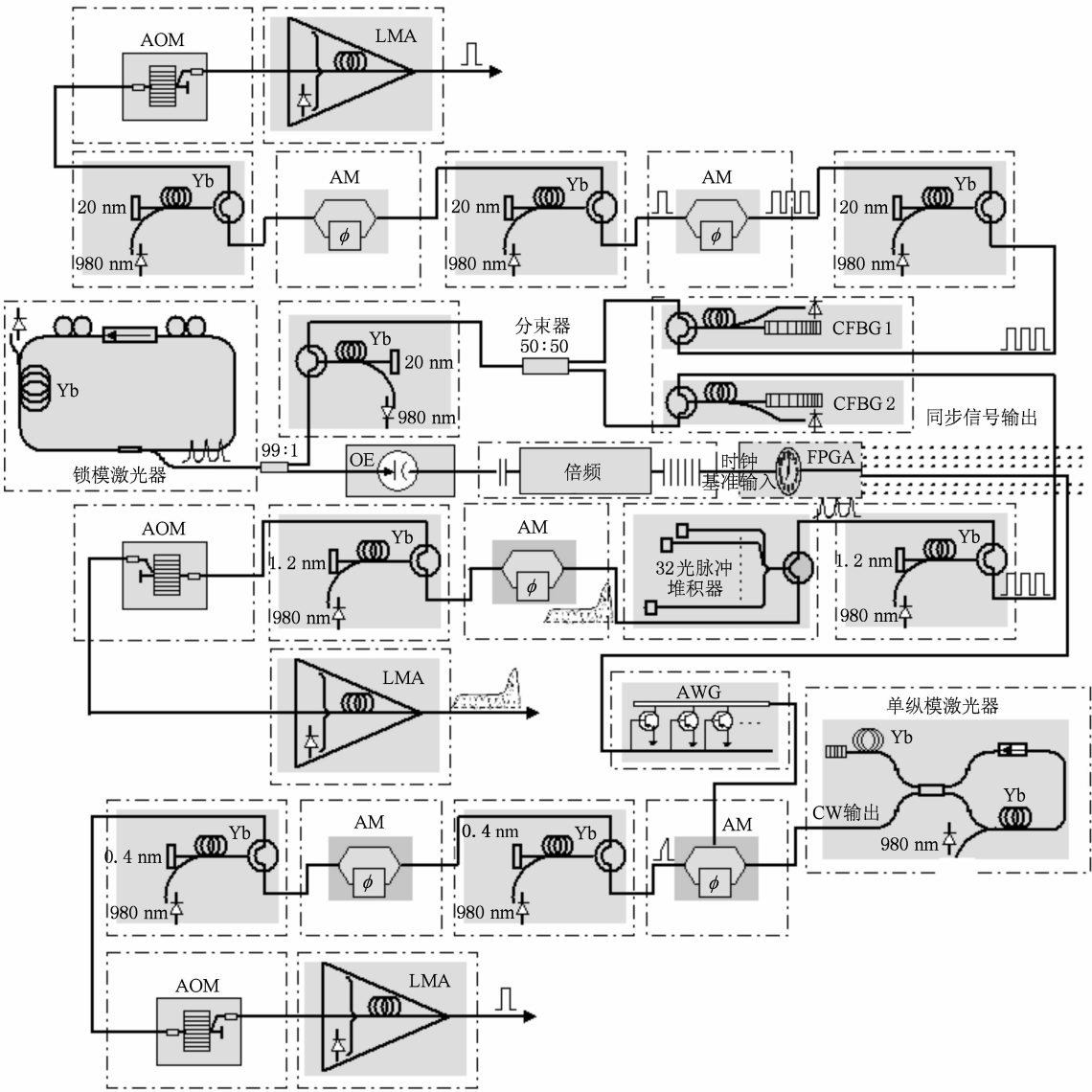


图 1 全光纤多种子脉冲产生系统结构 AOM 为声光调制器,LMA 为大模场光纤放大器,AM 为幅度调制器,CFBG 为啁啾光纤光栅,AWG 为任意电脉冲发生器,OE 为光电转换

系统提供宽带啁啾种子光脉冲;另一路啁啾脉冲先经过 1.2 nm 带宽放大器(双程放大,反射器为高斯型 1.2 nm 带宽镀膜反射器)滤波放大产生 140 ps 的基元脉冲序列,该脉冲输入由 1×32 光纤分束器、可变光延迟线、可变光衰减器构成的光脉冲堆积器堆积形成 2.3 ns 的可编程整形脉冲,再经过幅度调制器降频至 1—1000 Hz,经过 1.2 nm 放大器和声光调制器后,被大模场光纤放大器放大至峰值功率 10 kW,为高功率激光器系统提供用于打靶的可整形压缩脉冲.单纵模掺铒光纤激光器^[2]是窄带脉冲的种子源.FPGA 输出的与锁模激光脉冲高度同步的电脉冲(同步晃动 RMS 值小于 2 ps)触发任意波形发生器产生整形电脉冲加在幅度调制器上调制单纵模光纤激光器输出的连续激光产生重复频率为 1—1000 Hz 的 3 ns 窄带整形脉冲.该脉冲经过带宽 0.4 nm 的放大器(双程放大,反射器为超高斯型 0.4 nm 带宽光纤光栅),通过一级幅度调制器提高信噪比,再经过 0.4 nm 放大器和声光调制器最终被大模场光纤放大器放大至峰值功率 10 kW,为放大超短脉冲的 OPCPA 系统提供种子光.这样,系统就实现了窄频带脉冲和宽频带整形及啁啾脉冲的精密同步多种子输出.

2.1. 线性啁啾脉冲的产生

为提高种子脉冲的能量提取效率,同时避免系统在高峰值功率下的损伤,拍瓦激光器系统大都采用啁啾脉冲放大(CPA)的方法实现宽带超短脉冲的放大^[6-10],因此前端系统必须输出线性啁啾展宽的光脉冲;另外,任意整形脉冲是通过啁啾脉冲堆积产生的^[11],需要脉宽 140 ps、带宽 1.2 nm 的基元脉冲,因此采用啁啾光纤光栅对输入的锁模脉冲进行展宽.目前,分束后两路光脉冲的展宽所使用的啁啾光纤光栅的带宽和啁啾量是相同的,即带宽为 7.61 nm,啁啾量为 120 ps/nm,平坦度优于 0.2 dB.考虑到将来与后续系统的色散匹配,用于拍瓦激光系统展宽的啁啾光纤光栅可以根据色散量和带宽要求替换;而考虑到未来的潜在需求,系统需输出可压缩至飞秒的带宽更宽的脉冲,放大器采用 20 nm 带宽的滤波器为升级系统预留足够的带宽.

图 2 为经过啁啾光纤光栅展宽后的脉冲光谱和时间波形,由于啁啾光纤光栅是线性正啁啾的,脉冲的前沿与光谱的后沿(红光部分)对应,脉冲的后沿与光谱的前沿(蓝光部分)对应.光谱的不平坦是锁

模激光器输出中心波长与光栅的中心波长不对应造成的.

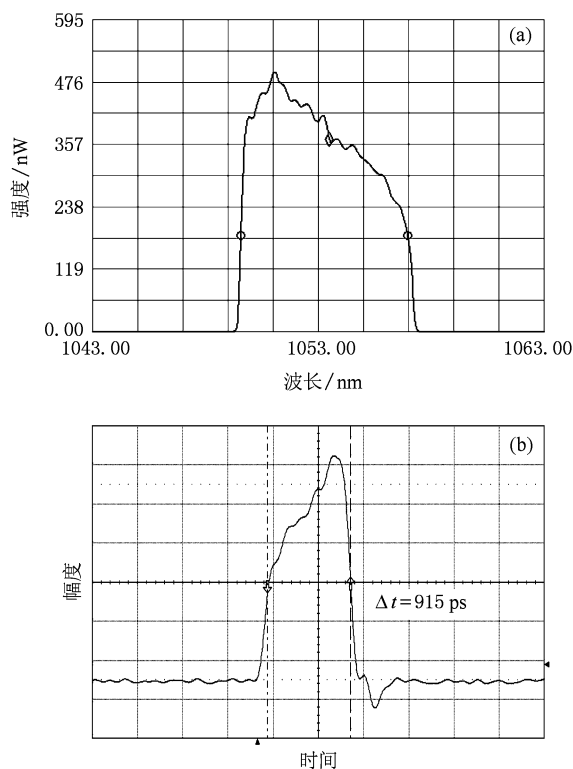


图 2 啁啾光纤光栅输出脉冲的光谱和时间波形 (a) 光谱波形, (b) 时间波形(横坐标 500 ps/div, 纵坐标 20 mV/div)

2.2. 任意整形脉冲的产生

光脉冲整形采用啁啾脉冲堆积的方法^[11],即将啁啾展宽后的锁模脉冲通过光谱滤波(1.2 nm 带宽的反射器)至所需要的宽度,通过分束,各束脉冲延时,并按照不同比例衰减,最后将各束脉冲合束形成整形脉冲的方法.由于采用了线性啁啾脉冲,脉冲前沿和后沿的频率不同,克服了相邻脉冲间的相干效应,得到的整形脉冲稳定平滑.啁啾光脉冲堆积可用下式表示:

$$U(T) = \sum_{k=0}^n \alpha_k \exp \left[- \frac{(1 + iC)(T - krT_{FWHM})^2}{2T_0^2} \right] \times \exp[i\omega_0(T - krT_{FWHM})],$$

式中 n 为堆积脉冲路数, α_k 为第 k 个啁啾脉冲的强度衰减因子, r 为相邻脉冲重叠因子, r 越大则相邻脉冲离得越远.通过控制重叠因子(即相邻脉冲的延时),可以控制整形脉冲的宽度.

光纤光脉冲堆积器如图 3 所示.140 ps 的基元脉冲经过分束器并通过精确延时进入 8 个 4 路堆积

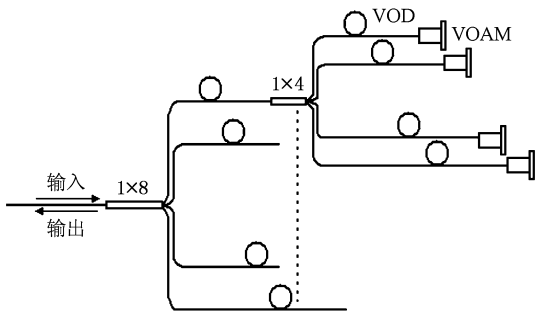


图3 光脉冲堆积器 VOD 为可变光延迟线,VOAM 为可变光衰减反射镜

模块. 在 4 路堆积模块中,各路脉冲经过可变延时器延时(延时 98 ps,即 r 取 0.7)和可变光衰减反射镜后被反射再次通过可变延时器和分束器合成 392 ps 的脉冲. 反射的各路 392 ps 脉冲延时后(延时 392 ps)经过分束器合成任意整形的宽度约 2.3 ns 的脉冲. 整形脉冲由各路基元脉冲合成,其整形精度为 140 ps,单路可调谐精度由可编程光衰减反射镜决定,为 40 dB. 因此,这种方法可提供时间上可编程控制的几乎任意整形的光脉冲,同时,由于基元脉冲为 140 ps,所以整形脉冲的上升沿小于 100 ps. 光脉冲堆积器由光纤分束器及光纤元器件构成,插入损耗约 32 dB(输出与输入单脉冲峰值功率的比),输入脉冲的峰值功率约 100 W,因此输出的脉冲峰值功率约 50 mW.

2.3. 脉冲的功率放大

由于采用单模光纤,全光纤光脉冲产生系统的输出能量一般较小,峰值功率为瓦级,而能量仅为纳焦量级. 为提高注入到后续系统的光脉冲能量,一般采用高增益放大器(如神光Ⅲ原型装置)^[12]或再生放大器系统(如 NIF 装置)^[1]将光纤前端系统的脉冲能量放大到毫焦水平,再注入到预放大系统,这样增加了系统的复杂性,不利于装置的稳定运行. 我们采用大模场光纤放大器先将光纤系统输出的脉冲放大到 10 μJ 量级,再注入预放大系统,这样可避免采用结构和控制较复杂的高增益系统,从而提高装置的稳定性.

大模场光纤放大器结构如图 4(a)所示. 大模场光纤放大器由输入隔离器、信号/抽运集束器、大模场掺镱光纤和大模场匹配光纤构成. 集束器信号端光纤与系统的单模光纤匹配,抽运端光纤有 6 根,芯径/包层直径为 105/125 μm,与 975 nm 的泵源尾纤

匹配,目前只使用一只连续输出 5 W 功率的 LD 抽运放大器,更高功率的放大可以根据情况在集束器抽运端连接更多的 LD. 集束器输出端为 15/130 μm 的光纤,与掺镱大模场光纤匹配. 采用 Nufern 公司的掺镱大模场光纤,芯径/包层直径为 15/130 μm,数值孔径 0.08,对 975 nm 的抽运光吸收系数为 6 dB/m,长度为 10 m. 掺镱大模场光纤外涂覆层为对 975 nm 激光低折射率的聚合物,包层截面是八边形型结构,这样光纤的纤芯、包层和涂覆层构成了双包层结构,使抽运光更有效被纤芯吸收. 为保证信号光的单模输出,在掺镱大模场光纤后熔接了一段不掺杂匹配光纤,接点浸没于高折射率匹配液中,使高阶模式完全泄露.

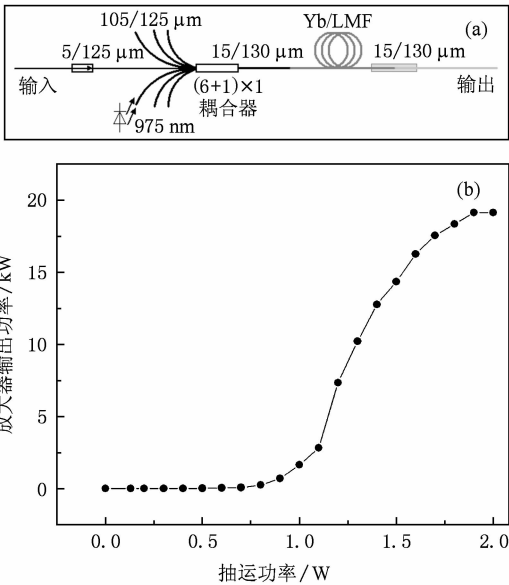


图4 大模场光纤放大器结构和放大器输出与抽运功率的关系 (a)放大器结构,(b)放大器输出与抽运功率的关系

由于大型激光装置低重频(小于 10 Hz)运行,因此大模场光纤放大器一般工作于低频(1—10 Hz)运行状态. 采用单纵模、峰值功率 10 W、脉冲宽度 2 ns、重复频率 1/10 Hz 的脉冲注入大模场光纤放大器,测得输出功率与抽运功率的关系如图 4(b)所示,放大器在抽运功率达 2 W 时达到饱和,输出脉冲峰值功率接近 20 kW. 还将带宽 1.2 nm、脉宽 2.3 ns 的整形脉冲和带宽 7.6 nm、脉宽约 0.9 ns 的啁啾脉冲注入大模场光纤放大器,测得放大器低频下工作特性和图 4(b)所示结果基本一致. 这是因为放大器工作于宽带放大状态,各种脉冲放大时能量的提取虽和带宽和脉宽有一定的关系,但放大时各种脉冲的增益基本一致,输出峰值功率差异不大. 改

变输入脉冲的重复频率,当脉冲的重复频率小于 Yb^{3+} 的上能级寿命的倒数,即重频小于1 kHz时,脉冲输出峰值功率与抽运功率的关系与图4(b)的结果也基本一致,只有重频大于1 kHz时,由于输入脉冲能量的提取速度大于上能级的储能速度,输出脉冲的峰值功率较图4(b)开始明显下降.

2.4. 自发辐射放大(ASE)的抑制

光纤系统采用多级级联放大的方式,且抽运方式为连续抽运,因此会引入大量的ASE噪声. ASE不但降低了系统增益,还会降低输出脉冲的信噪比. ASE噪声主要特点是时域连续,频域(光谱)宽带. 因此采用时间快门和光谱滤波,同时,改善放大器结构和抽运方式,可以有效抑制ASE噪声. 宽带啁啾脉冲产生系统、窄带抽运脉冲系统中以及整形脉冲系统中,采用幅度调制器(AM,消光比大于30 dB)和声光调制器(AOM,消光比大于60 dB)作为快门通过同步触发使信号通过而隔离ASE噪声;系统分别采用20,1.2和0.4 nm的滤波器滤去信号带宽以外的噪声;同时将光纤放大器设计为双程放大的结构,合理控制掺杂光纤的长度和抽运功率,可以在增

加增益的同时抑制噪声^[2]. 20,1.2和0.4 nm放大器的抽运功率分别为65,60和65 mW,小信号增益(对脉冲增益)均达26 dB,噪声系数均优于5 dB,全系统增益稳定性(多级级联脉冲放大后)优于1%.

测量了系统输出宽带啁啾脉冲、整形压缩脉冲和窄带抽运脉冲的信噪比(时域),整形压缩脉冲的信噪比优于40 dB,而宽带啁啾脉冲和窄带抽运脉冲的信噪比优于50 dB. 需要指出的是,系统输出的整形压缩脉冲和窄带抽运脉冲信噪比已经满足应用需求,而宽带啁啾脉冲信噪比还需进一步提高(最好大于80 dB,并且越高越好). 由于ASE和信号脉冲的峰值功率不同,目前采用非线性的光纤放大环形镜^[13-15]净化注入宽带啁啾脉冲系统的超短脉冲,使信号脉冲透过,而ASE噪声被反射,可使整体输出信号的信噪比提高15—20 dB. 下一步将采用非线性的光纤放大环形镜串联的方式,使系统输出宽带啁啾脉冲信噪比达到更高的水平.

3. 系统输出

系统输出如表1所示.

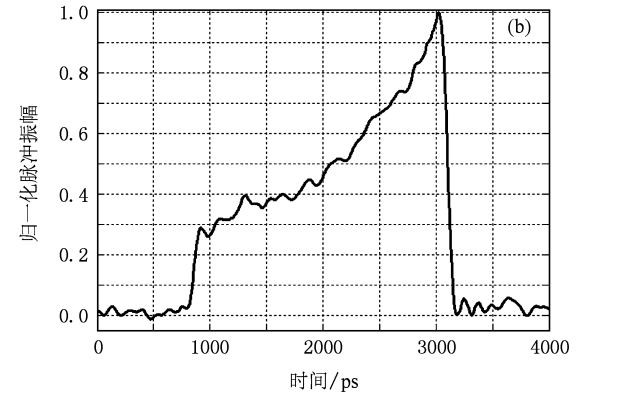
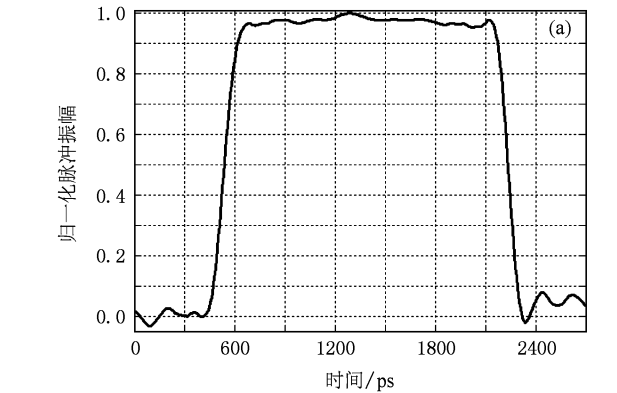
表1 全光纤多种子脉冲产生系统的输出能力

脉冲类型	脉冲宽度/ns	脉冲带宽/nm	(脉冲功率/能量)/(kW/ μJ)	整形能力	用途
宽带啁啾脉冲	0.9	7.6	10/9	—	快点火超短脉冲
整形压缩脉冲	2.3	1.2	10/20	任意整形	打靶压缩脉冲
窄带抽运脉冲	0.3—20	单纵模	10/1—20	任意整形	OPCPA抽运脉冲

由于宽带啁啾脉冲和整形压缩脉冲采用了同一种子源,因此两路脉冲在时间上是完全同步的. 采用Agilent示波器($12\text{ GHz}/40\text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$)和SD43(8 GHz)测量了整形压缩脉冲和窄带抽运脉冲间的同步晃动为6 ps(RMS),峰值晃动为44 ps,晃动来源于高精

度同步信号产生模块(FPGA)触发任意波形发生器的电同步晃动.

系统输出几种典型的整形压缩脉冲波形如图5所示,宽带啁啾脉冲的波形如图2(b)所示,窄带脉冲波形在文献[2]中已有介绍,这里不再列出.



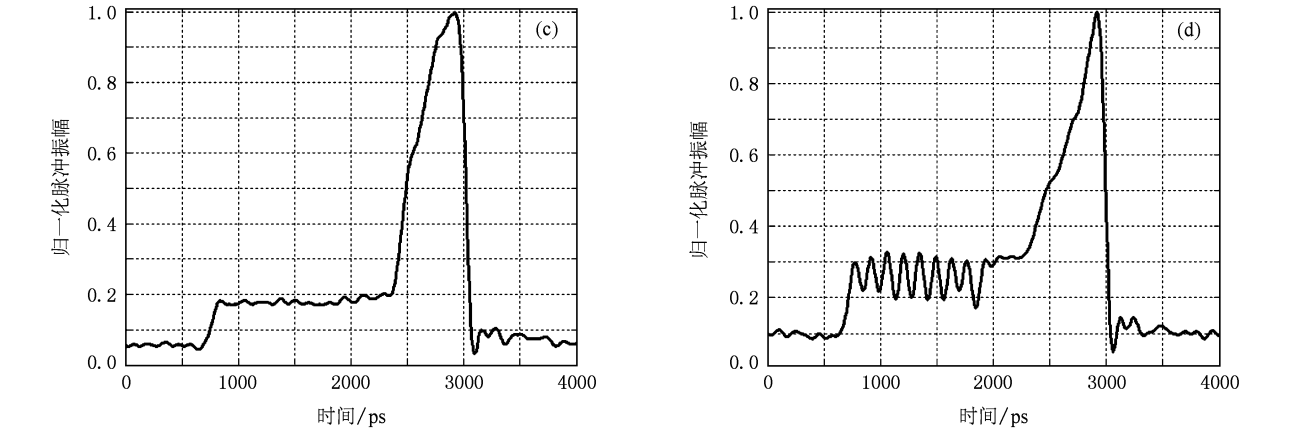


图5 系统输出的几种典型整形脉冲 (a)超高斯脉冲,(b)指数上升脉冲,(c)Haas脉冲,(d)“栅栏+台阶”脉冲

4. 结 论

提出一种基于光学方法结合电光调制实现脉冲精确整形以及长、短脉冲零抖动输出的全光纤、全固

化的多种子激光脉冲精密同步产生方法,研制了全光纤多种子脉冲产生系统.该系统能够产生时间上高精度同步的宽带啁啾脉冲、任意整形压缩脉冲和窄带抽运脉冲,可根据物理实验需要,非常灵活地在输出各种脉冲之间做出选择.

[1] Wilcox R B, Browning D F 1995 *LLNL Report* 115

[2] Lin H H, Wang J J, Sui Z, Li M Z, Chen G H, Ding L, Tang J, Deng Q H, Luo Y M, Dong Y F, Li F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1771 (in Chinese) [林宏免、王建军、隋展、李明中、陈光辉、丁磊、唐军、邓青华、罗亦明、董一方、李峰 2008 物理学报 **57** 1771]

[3] Max T, James H, Michael E 1994 *Phys. Plasmas* **1** 1626

[4] Zhang J T, He B, He X T 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 921 (in Chinese) [张家泰、何斌、贺贤士 2001 物理学报 **50** 921]

[5] Lin H H, Lu Z H, Wang J J, Zhang Y, Wang F R, Xu D P, Zhang R, Li M Z, Deng Q H, Luo Y M, Tang J, Ding L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5646 (in Chinese) [林宏免、卢振华、王建军、张颖、王凤蕊、许党朋、张锐、李明中、邓青华、罗亦明、唐军、丁磊 2008 物理学报 **57** 5646]

[6] Perry M D, Pennington D, Stuart B C 1999 *Opt. Lett.* **24** 160

[7] Stuart B C, Perry M D, Miller J 1997 *Opt. Lett.* **22** 242

[8] Kitagawa Y, Fujita H, Kodama R 2004 *IEEE J. Q. E.* **40** 281

[9] Danson C N, Brummitt P A, Clarke R J 2004 *Nucl. Fusion* **44** S239

[10] Collier J, Allott R, Danson C N 1999/2000 *Facility Development-Vulcan, Central Laser Facility Annual Report* 174

[11] Lin H H, Sui Z, Wang J J, Zhang R, Li M Z 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 466 (in Chinese) [林宏免、隋展、王建军、张锐、李明中 2007 光学学报 **27** 466]

[12] Luo Y M, Li M Z, Tang J, Wang J J, Fu X J, Jia W, Deng Q H 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** (S0) 45 (in Chinese) [罗亦明、李明中、唐军、王建军、傅学军、贾伟、邓青华 2005 强激光与粒子束 **17** (S0) 45]

[13] Han M, Lou C Y, Li Y H, Gao Y Z 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 751 (in Chinese) [韩明、娄彩云、李玉华、高以智 2000 物理学报 **49** 751]

[14] Wu J W, Xia G Q, Wu Z M 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1105 (in Chinese) [吴建伟、夏光琼、吴正茂 2004 物理学报 **53** 1105]

[15] Tan B, Li Z Y, Li S C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3071 (in Chinese) [谈斌、李智勇、李世忱 2004 物理学报 **53** 3071]

An all fiber multi-laser pulse generation system

Lin Hong-Huan[†] Wang Jian-Jun Dang Zhao Zhang Rui Deng Ying

Xu Dang-Peng Chen Ji Wang Chao Chen De-Huai

(*Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 27 September 2008; revised manuscript received 29 April 2009)

Abstract

We demonstrate an all fiber multi-laser pulse generation system that can output broadband chirped pulse, nano-second shaped pulse and narrowband pump pulse for optical parametric chirped pulsed amplifiers system with precise synchronization. Yb^{3+} -doped fiber mode-locked laser and single longitudinal oscillator are used as the optical source for the fiber system. The ultra-short pulse train generated from the mode locked fiber laser was split into two beam-lines and both were chirp-stretched to 0.9 ns. One of them was directly amplified to a magnitude of 10 μJ to provide the high-energy petawatt laser facility with seed pulse. The other was tailored by a 1.2 nm bandwidth filter to form a 140 ps unit pulse. It was then stacked in a fiber stacker and formed a 2.3 ns arbitrarily shaped pulse. The shaped pulse was amplified to 10 μJ to provide seed pulse for the pellet compression. Simultaneously, we sampled part of the ultra-short pulse train from the mode locked laser. The sampled pulse train was converted to electrical signal and phase-locked to generate trigger pulse that precisely synchronized with the mode locked pulse for an amplitude modulator. The continuous-wave laser generated from the fiber single longitudinal oscillator was tailed by the amplitude modulator and then amplified to provide seed pulse for the OPCPA system. The output of the fiber system can switch between different kinds of pulses with flexibility according to the physical experimental requirement.

Keywords: laser fusion driver, front-end, fiber laser system

PACC: 5250J, 4260, 4255N

[†] E-mail: Happylin2003@yeah.net