

相位调制合束产生高重复频率短脉冲技术研究

王世伟 郑 君 薛 莉 徐剑秋

(上海交通大学激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要 对相位调制合束技术产生高重复频率短脉冲技术进行了研究,利用两个电光开关的错位削波技术对连续种子激光进行斩波、分束,并分别用相同的相位调制器调制,通过相干合束产生窄带脉冲。对多种相位调制信号调制光脉冲的过程进行了数值仿真,研究了不同相位调制函数调制引起的光脉冲特性变化规律,通过实验验证了本方法产生高重复频率短脉冲的科学性。利用 2.5 GHz 带宽的实验仪器压缩出了脉宽为 60 ps、重复频率为 1 GHz 的高重复频率短脉冲。

关键词 激光器;高重复频率短脉冲;相位调制合束;错位削波;强度调制

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0614001

Phase-Modulation-Combination Method for Generation of High Repetition Short Pulses

Wang Shiwei Zheng Jun Xue Li Xu Jianqiu

(Laboratory for Laser Plasmas, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Phase-modulation-combination (PMC) method is researched for generation of high repetition short pulses. The method is simple and compact consisting of two photoelectric switches and two modulators, where two sub-pulses from the switches are modulated and combined interferentially, giving rise to a narrower pulse. The processes of PMC methods with different phase modulation functions are simulated numerically, and optimizations among different compression results induced by various phase function are given. Furthermore, the experimental verification for the system function is supplied, and short pulse train with 1 GHz repetition rate and 60-ps pulse duration is generated.

Key words lasers; high repetition short pulse; phase modulation combination; offset chop; intensity modulation

OCIS codes 060.5060; 060.2280; 140.3538

1 引 言

高重复频率短脉冲激光被广泛地应用于高速采样、高功率激光种子源和超高速光通讯等领域中^[1~3]。目前,利用激光振荡产生短脉冲激光的技术已经十分成熟,其中被动与主动锁模技术是最常用的短脉冲产生技术^[4~6]。许多锁模技术,如非线性偏振旋转、半导体可饱和吸收镜(SESAM)、石墨烯等在过去几年中都被成功地应用在锁模系统中^[7~11],但是在锁模脉冲激光器中,输出脉冲的宽度与重复频率主要取决于激光器的结构参数,如腔长、色散和调制深度等。因此,当锁模激光器参数确

定后,由锁模技术产生脉冲激光的输出脉冲脉宽、重复频率以及脉冲形状等特性都十分有限。

另一方面,利用电光强度调制直接产生短脉冲的技术也已经有了较长的研究历史^[11,12]。这种技术在控制光脉冲的脉宽与重复频率等参数上有着巨大的灵活性,而且输出激光脉冲的性能参数可调谐范围大。实验中,由于受到实际器件性能参数的限制,利用电光调制技术直接斩出的脉冲脉宽是有限的。而且,当电光调制器开关时间太快的时候,斩波产生的脉冲光带宽将会产生一定的展宽,因此在实验中无法直接获得窄带短脉冲光。利用时间透镜压

收稿日期: 2013-01-14; **收到修改稿日期**: 2013-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(61138006,61275136)和高等学校博士学科点专项科研基金(20090073120076)资助课题。

作者简介: 王世伟(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: wansen2012@gmail.com

导师简介: 徐剑秋(1969—),男,博士,博士生导师,主要从事激光器方面的研究。E-mail: jqxu09@sytu.edu.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

缩技术可以产生较短脉冲,其输出脉冲的宽度与重复频率都具有可调谐性^[11,13]。但时间透镜技术要求调制器的调制带宽大,调制深度高,否则输出脉冲宽度的压缩效率就会比较低。此外,时间透镜压缩系统结构和时序控制复杂,不易实现对脉冲宽度和重复频率的任意调谐。

在本文中,提出了一种相位调制合束(PMC)系统来产生窄带高重复频率短脉冲序列。在该系统中,利用目前市场上最高性能参数的电光调制器,可以产生重复频率 40 GHz,脉宽仅有几百飞秒的光脉冲序列。本方法对光源的波长及激光器的种类没有限制,可以适用于任意波长、任意种类的激光光源。不仅如此,系统简单的结构也使得系统可以作为种子源嵌入到其他系统中使用,进而产生脉宽更窄、重复频率更高的光脉冲序列。在通信、等离子体、测量以及生物医学等领域中该系统正在得到越来越广泛的应用。

2 相位调制合束技术的仿真与优化

用于产生窄带、高重复频率短脉冲序列的相位调制合束系统基本结构如图 1 所示,它主要包括三

部分。第一个掺镱光纤放大器(YDFA)之前的部分将被定义为第一功能模块,其利用两个马赫曾德尔(MZ)强度调制器的错位削波技术,将单纵模连续光纤激光器(输出线宽 150 kHz)输出的种子光斩为短脉冲序列光。错位削波技术的基本原理如图 2 所示,脉冲的形状、重复频率等特性可以通过设计调制器的驱动信号直接控制,实现任意形状、任意重复频率的脉冲输出。系统产生的最短脉冲宽度是电光调制器上升沿与下降沿的时间之和^[13,14]。但由于实验中,电驱动信号的下降沿稳定度远不如上升沿的稳定度高,所以常常使用两个强度调制器的上升沿来产生“最短”的脉冲序列。更短的脉冲需要进一步提高电光调制器的开关速率。但是,高速电光调制器性能指标的提高是很困难的,而且价格也十分昂贵。另一方面,当调制器响应时间过快时,由于电光调制器驱动信号边沿不稳定,容易引入噪声而使得输出脉冲的频谱被展宽。因此,很难直接通过错位削波技术产生出高重复频率的窄带脉冲。本文将采用附加调制和相干合束的方法进一步压缩输出脉冲的宽度,此功能由系统的第二功能模块实现。

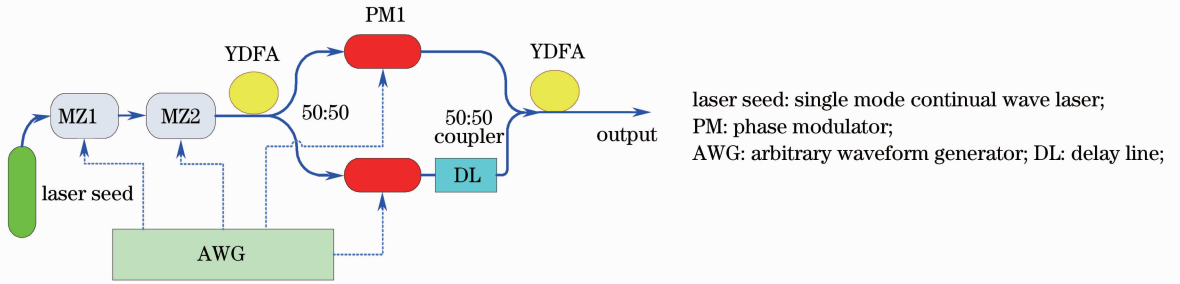


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental setup

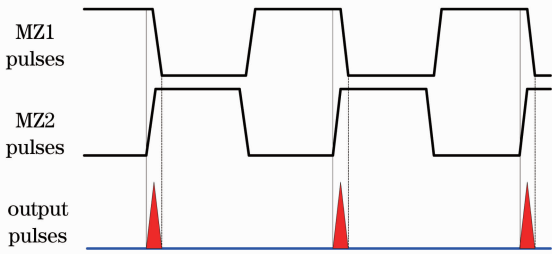


图 2 强度调制器错位削波产生短脉冲原理图

Fig. 2 Sketch map of two temporal offset intensity modulators to chop out the short pulses

第二功能模块由两个 YDFA 中间的部分,即两个被设置在每路光纤中的相位调制器构成,它将对经过的脉冲光进行相位调制。第一功能模块输出的脉冲光被输入到一个分束比为 50:50 的分束器后,

光脉冲强度被平均分为两部分,即 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$,且 $I_1(t) = I_2(t)$ 。设两个相位调制器加在光脉冲上的相位调制函数分别为 $\Phi_1(t)$ 和 $\Phi_2(t)$,那么两路光纤中的脉冲光经过调制器后其光场可以分别表示为

$$E_1(t) = E_0(t) \exp[-i\Phi_1(t)], \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_0(t) \exp[-i\Phi_2(t)]. \quad (2)$$

调制后的两束光脉冲通过一个合束器合束,则输出脉冲的强度可以表示为

$$I(t) = I_1(t) + I_2(t) + 2\sqrt{I_1(t)I_2(t)}\cos[\Phi_1(t) - \Phi_2(t)], \quad (3)$$

式中 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 是两合束光的强度。显然在使用 50:50 的分束与合束器时,系统中的 $I_1(t) = I_2(t)$ 。若定义 $\Delta\Phi(t) = \Phi_1(t) - \Phi_2(t)$,则输出激光脉冲的强度可以简化为

$$I(t) = 2I_0(t)\cos^2[\Delta\Phi(t)/2], \quad (4)$$

可见合理选择相位调制函数可以压缩输出脉冲光的脉宽。

仿真中,将选择 3 种有代表性的函数作为相位调制函数来研究系统产生短脉冲的功能。首先被选择的函数是最常用的正弦相位调制函数。设两路光脉冲的相位调制函数分别为 $\pm m\sin(2\pi f_m t)$, 其中 m 为调制深度, f_m 为调制频率。则输出合束脉冲的强度为

$$I(t) = 2I_0(t)\cos^2[m\sin(2\pi f_m t)]. \quad (5)$$

选择的第 2 种相位调制函数为三角函数 $\pm m\Delta_{f_m}$, 其输出合束脉冲光的强度为

$$I(t) = 2I_0(t)\cos^2(m\Delta_{f_m}), \quad (6)$$

式中

$$\Delta_{f_m} = \begin{cases} k_m t', & t' < T_m/4 \\ -k_m(t' - T_m/2), & T_m/4 \leq t' < 3T_m/4 \\ k_m(t' - T_m), & 3T_m/4 \leq t' \end{cases} \quad (7)$$

式中周期 $T_m = 1/f_m$, $\pm k_m$ 为函数的斜率, $k_m =$

$4m/T_m, t' = \text{mod}(t, T_m)$ 是 t 整除 T_m 后的余数, 取值范围为 $0 \sim T_m$ 。

图 3(a)和(b)给出了不同相位调制函数作用下,合束后产生短脉冲的仿真结果。两路输入光脉冲的半峰全宽(FWHM)都是 12 ps。显然,在相同调制深度的情况下,如果想得到相同宽度的脉冲,正弦相位函数所需要的频率比三角函数低。图 3(d)和表 1 分别给出了采用不同相位函数调制时,输出脉冲的半峰全宽和信噪比(SNR)(中心脉冲能量占总能量的百分比)。结果表明,相位调制函数的频率越高,相位调制深度越深,输出脉冲将会被压缩得越多;但是输出脉冲的信噪比则会变小。用调制频率 80 GHz、调制深度 1.6 的正弦相位函数去调制半峰全宽为 12 ps 的脉冲光,合束后产生了脉宽仅为 2 ps 的短脉冲;但是此时脉冲的信噪比只有 49.2%,超过一半的能量损失到中心脉冲旁的边带里。所以综合考虑半峰全宽和信噪比后,采用 $f_m = 40$ GHz, $m = \pm 1.6$ 的正弦相位调制函数可以产生相对优化的脉冲压缩结果,如图 3(a)中的红线所示。

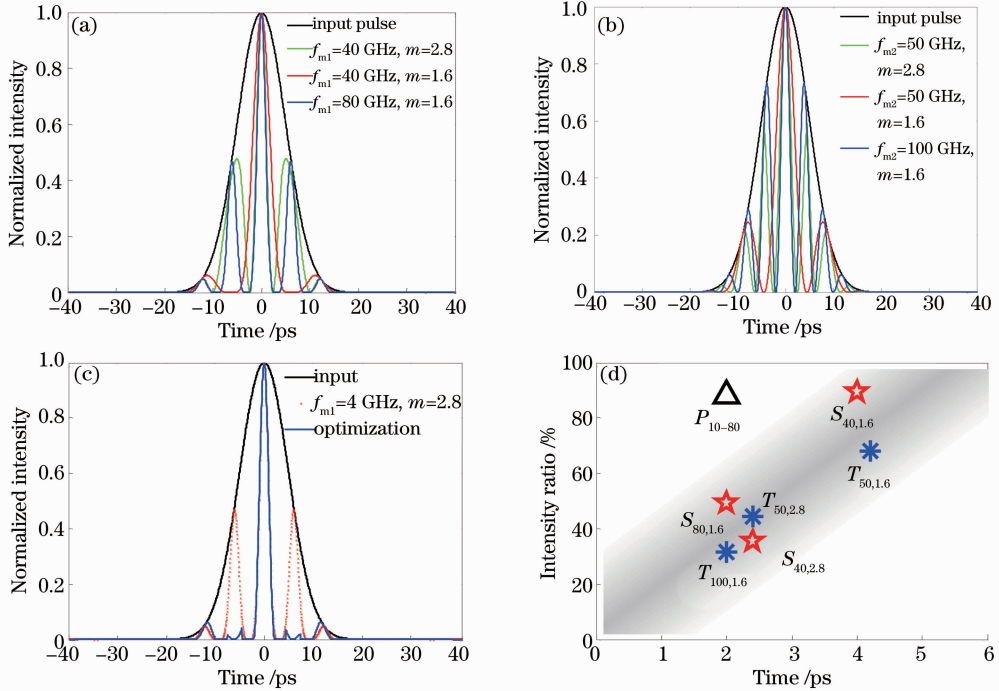


图 3 不同频率与调制深度的相位函数调制合束后的脉冲强度图。(a)正弦函数; (b)三角函数; (c)分段函数; (d)合束脉冲的半峰全宽与信噪比,其中 $S_{f_m, m}$ 代表正弦调制合束脉冲, $T_{f_m, m}$ 代表三角函数调制合束脉冲, $P_{f_m, m}$ 代表分段函数调制合束脉冲, 阴影部分代表这些脉冲的主要分布区域

Fig. 3 Intensity profiles of the combination pulses with different modulation frequencies f_m and modulation depth m . (a) Sinusoidal phase function; (b) triangular phase function; (c) piecewise phase function; (d) FWHM of the combination pulse and its SNR for the sinusoidal phase function labeled with $S_{f_m, m}$, triangle phase function labeled with $T_{f_m, m}$ and the piecewise function $P_{f_m, m}$, the shaded area is the main field

表 1 不同相位调制函数合束产生的短脉冲半峰全宽及信噪比

Table 1 FWHM of the combination pulses and their SNRs for different phase modulation functions

Phase function	f_m/GHz	m	Energy ratio /%	Pulse width /ps
Sinusoidal	40	2.8	35.4	2.4
Sinusoidal	40	1.6	89.4	4.0
Sinusoidal	80	1.6	49.2	2.0
Triangular wave	50	2.8	44.6	2.4
Triangular wave	50	1.6	68.2	4.2
Triangular wave	100	1.6	31.6	2.0
Piecewise function	10~80	1.6	88.3	2.0

显然,当常见函数被直接作为相位函数进行调制的时候,一般在压缩脉冲宽度的同时,输出脉冲的信噪比也会被降低。为了得到脉冲压缩比较大、信噪比较高的输出脉冲,这里设计了第 3 种相位调制

函数——分段函数。当使用下边分段相位函数进行调制时,输出脉冲的压缩结果如图 3 (c)中的蓝线所示,

$$\varphi(t') = \pm \begin{cases} 3\sin(2\pi f_{m1} t'), & 0 \leq t' < 2.2 \text{ ps} \\ 3\sin\{2\pi f_{m2} [t' + 1/(4f_{m2}) - T_m/4]\} - 1.4, & 2.2 \text{ ps} \leq t' < 4.5 \text{ ps} \\ 3\sin[2\pi f_{m1} (T_m/2 - t')], & 4.5 \text{ ps} \leq t' < 7.5 \text{ ps} \\ -3\sin\{2\pi f_{m2} [t' + 1/(4f_{m2}) - 3T_m/4]\} + 1.4, & 7.5 \text{ ps} \leq t' < 9.8 \text{ ps} \\ 3\sin[2\pi f_{m1} (t' - T_m)], & 9.8 \text{ ps} \leq t' < 12 \text{ ps} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $f_{m1} = 80 \text{ GHz}$, $f_{m2} = 10 \text{ GHz}$, $T_m = 12 \text{ ps}$ 。

显然优化后的合束脉冲,在中心脉冲强度不变的情况下,边带强度得到了抑制,输出脉冲的信噪比被提高到 88.3%。使用更加精密的分段调制信号调制时将会产生信噪比更高、脉宽更窄的输出脉冲。

综上所述,通过设计合理的相位调制函数,利用相位调制合束系统将可以实现脉冲的压缩,产生高重复频率短脉冲。不仅如此,基于已报道的高速调制器的最新性能参数,利用本文实验系统产生的脉冲宽度将可以实现从 100 fs 到 1 ms 的可调谐变化;脉冲的重复频率也可以实现从 1 kHz 到 40 GHz 的可调谐变化。

3 系统功能的实验验证

实验系统图如图 1 所示,波长 1053 nm 的单模光纤激光器作为光源,其线宽为 150 kHz。选用上升与下降沿时间分别为 75 ps 和 45 ps,最高工作频率为 10 GHz 的电光调制开关器件。实验系统中相位调制驱动信号全由 AWG 产生,其输出信号最高频率为 4 GHz,输出电信号的不稳定度为 7~10 ps。

虽然理论上两个强度调制器可以产生任意宽度与任意重复频率的脉冲光,但正如文章第二部分所分析,电光调制器本身响应时间有限,而且一般来

讲,电光调制器下降沿的不稳定性要远远超过上升沿。所以实验中将使用两个电光调制器上升沿时间之和作为系统错位削波技术可以产生的最短脉冲宽度。当错位削波技术产生的脉冲宽度低于电光调制器上升沿的两倍时,输出脉冲的能量与信噪比都会急剧减小,脉冲稳定性无法保证。不仅如此,当通过削波技术产生短脉冲的时候,受到器件固有机能的限制,窄带脉冲光的光谱将被展宽。图 4 给出了本实验系统产生高重复频率短脉冲的能力范围。大于 25 ps 的脉冲可以通过一个电光调制开关直接产生;大于

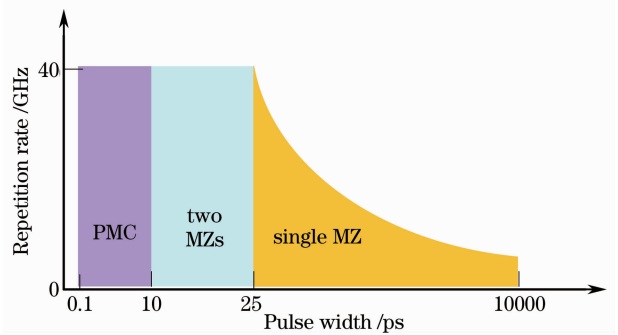


图 4 实验系统通过不同方式产生任意宽度与任意重复频率脉冲的能力

Fig. 4 Ability of the experimental system to generate pulse with arbitrary width (x-axis) and repetition (y-axis) in different ways

10 ps,但小于25 ps的脉冲则可以通过两个电光调制开关错位削波产生;而小于10 ps的脉冲则可以通过相位调制合束技术产生。

图5(a)展示的是由一个强度调制开关直接斩波产生的短脉冲,脉冲的宽度为2.5 ns,重复频率为200 MHz。图5(b)展示的则是一个通过双电光开关错位削波产生的脉宽为125 ps,重复频率为2 GHz的短脉冲。由于受到探测系统性能指标的限制,系统对于脉宽小于500 ps脉冲的探测,显示结果将会有明显的展宽。在本实验中使用的是一個由高速Si光电探头和一个带宽为2.5 GHz的示波器

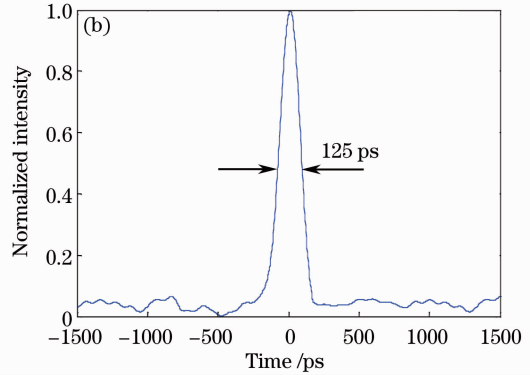
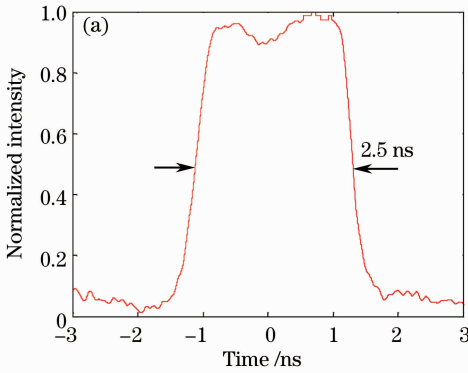


图5 实验结果。(a) 2.5 ns 脉冲; (b) 125 ps 脉冲

Fig. 5 Experimental results. (a) 2.5 ns pulse; (b) 125 ps pulse

当需要进一步压缩脉冲宽度的时候,相位调制合束技术将会是一种不错的选择。在实验中,削波后的脉冲被一个分束器等分为两束脉冲光,每束脉冲光被相位调制器调制。系统中所有的相位调制驱动信号都由具有6个通道的AWG提供。为提高AWG产生的电驱动信号对电光调制器的驱动同步性,实验中将挑选稳定的电驱动信号源、精密的光纤延时线以及相同型号的强度调制器等来增加系统的时间可控性。如图1所示,一个调节精度为1 ps,调节范围为300 ps的光纤延时线被用来控制两光路

组成的探测系统。光电探头与示波器的响应时间分别为79 ps和120 ps,整个探测系统的响应时间约为150 ps。当使用此系统测量输出脉冲脉宽的时候,测量到的结果将会受到探测系统传输函数的影响。脉冲实际宽度可表示为

$$t = \sqrt{t_{\text{mea}}^2 - \tau_{\text{res}}^2}, \quad (9)$$

式中 t_{mea} 为测量的脉冲宽度, τ_{res} 为探测系统的响应时间。所以当示波器上探测到一个195 ps脉冲的时候,脉冲的真实宽度为125 ps。

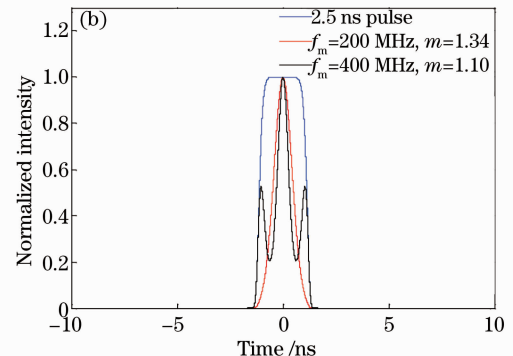
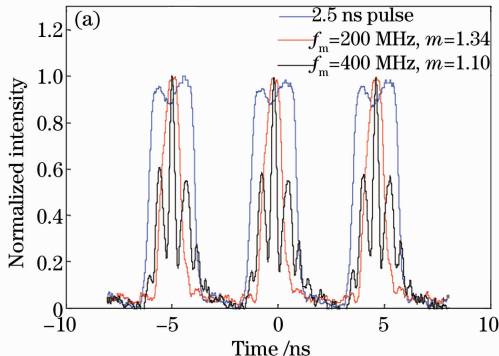


图6 (a)不同调制频率与调制深度调制的实验结果;(b)实验结果的同条件仿真

Fig. 6 (a) Experimental results with different f_m and m ; (b) corresponding simulation results

产生的,虽然它的脉冲半峰全宽只有 300 ps,但其信噪比较小,仅为 52.3%。相应的仿真结果如图 6(b)所示,很好地验证了实验结果的正确性。

从图 6 中看出,相位调制合束技术可以将原脉冲的宽度压缩 $1/6 \sim 1/8$ 。而这种压缩功能在 1 ns 脉冲被压缩为 240 ps 脉冲的实验过程中也可以被观察到。当实验中错位削波产生最短的 125 ps 脉冲作为种子注入到相位调制合束系统中时,使用频率 $f_m = 4$ GHz 和调制深度 $m = 2.1$ 的正弦信号去调制光脉冲,一个脉宽为 155 ps、重复频率为 1 GHz 的脉冲光被显示在示波器中。去除探测系统的影响后,输出脉冲的实际宽度仅为 60 ps,如图 7 所示。

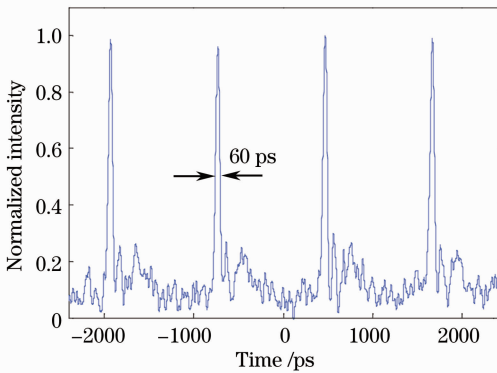


图 7 相位调制合束产生的重复频率为 1 GHz, 半峰全宽为 60 ps 的光脉冲序列

Fig. 7 PMC output pulses with the repetition of 1 GHz, and FWHM of 60 ps

此外,在实验系统的第三功能模块中增加了一个 YDFA^[15,16],它将被用来补偿系统中其他器件所引入的损耗。放大器的放大倍数为 8 dB~23 dB,但是被放大后输出脉冲的单脉冲能量仍然只有几十个皮焦,自相关等测量仪器仍无法使用。如何测量低功率超短脉冲的参数将是接下来的一个重要研究内容。

4 结 论

给出了一种用于产生窄带高重复频率短脉冲的相位调制合束方法。该方法利用两个电光调制开关的错位削波技术产生脉宽大于 125 ps 的任意宽度脉冲,再利用相位调制合束技术产生脉宽短到 60 ps 的脉冲。通过合理地选择相位调制函数及其调制频率 f_m 和调制深度 m ,可以压缩出信噪比高、脉宽低至亚皮秒的窄带高重复频率脉冲。而且,本文提出的相位调制合束技术可以集成到其他系统中,如时分复用系统,从而产生重复频率更高的脉冲序列^[17,18]。相位调制合束技术不仅可以压缩脉冲的

宽度,还可以控制脉冲形状与调谐脉冲重复频率。随着电光调制器性能参数的不断提高,将可以产生 100 fs 到 1 ms 的可调谐高重复频率短脉冲。

参 考 文 献

- 1 A. Bartels, R. Cerna, C. Kistner *et al.*. Ultrafast time-domain spectroscopy based on high-speed asynchronous optical sampling [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(3): 351071
- 2 Steve Hocquet, Geoffrey Lacroix, Denis Penninckx. Compensation of frequency modulation to amplitude modulation conversion in frequency conversion systems [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(13): 2515~2521
- 3 W. H. Knox. Ultrafast technology in telecommunications [J]. *Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(6): 1273~1278
- 4 C. X. Yu, H. A. Haus, E. P. Ippen *et al.*. Gigahertz-repetition-rate mode-locked fiber laser for continuum generation [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1418~1420
- 5 T. M. Fortier, A. Bartels, S. A. Diddams. Octave-spanning Ti:sapphire laser with a repetition rate > 1 GHz for optical frequency measurements and comparisons [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(7): 1011~1013
- 6 Fu Jie, Pang Qingsheng, Chang Liang *et al.*. Research on cavity-dumping mode-locked laser of picosecond at 10 kHz [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0314002
- 7 付 洁, 庞庆生, 常 亮 等. 10 KHz 腔倒空锁模皮秒激光器研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0314002
- 8 A. D. Kim, J. N. Kutz, D. J. Muraki. Pulse-train uniformity in optical fiber lasers passively mode-locked by nonlinear polarization rotation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(4): 465~471
- 9 Ursula Keller. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. *Nature*, 2003, **424**(14): 831~838
- 10 F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics [J]. *Nat. Photon.*, 2010, **4**(9): 611~622
- 11 Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang *et al.*. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, **19**(19): 3077~3083
- 12 He Jingliang, Hao Xiaopeng, Xu Jinlong *et al.*. Ultrafast mode-locked solid-state lasers with graphene saturable absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900138
- 13 何京良, 郝霄鹏, 徐金龙 等. 基于石墨烯饱和吸收被动锁模超快全固体激光器的研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900138
- 14 James van Home, Jennifer H. Lee, Chris Xu. Generation of 3.5 nJ femtosecond pulses from a continuous-wave laser without mode locking [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1408~1410
- 15 Tattee Khayim, Masakazu Yamauchi, Dae-Sik Kim *et al.*. Femtosecond optical pulse generation from a CW laser using an electro-optic phase modulator featuring lens modulation [J]. *Quantum Electron.*, 1999, **35**(10): 1412~1418
- 16 Yitang Dai, Chris Xu. Generation of high repetition rate femtosecond pulses from a CW laser by a time-lens loop [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6584~6590
- 17 R. Xin, J. D. Zuegel. Amplifying nanosecond optical pulses at 1053 nm with an all-fiber regenerative amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(14): 2605~2607
- 18 R. Xin, J. D. Zuegel. Directly chirped laser source for chirped pulse amplification [C]. in OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2010), AMD3
- 19 H. N. Tan, Q. Nguyen, M. Matsuura *et al.*. Reconfigurable all-optical OTDM-to-WDM conversion using a multiwavelength ultrashort pulse source based on Raman compression [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, **30**(6): 853~863
- 20 Yu Kuanglu, Wu Chongqing, Guo Xuan *et al.*. A novel multipoint fiber optics acetylene sensing system based on dense wavelength division multiplexers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0506003
- 21 余颢球, 吴重庆, 郭 旋 等. 基于波分复用的多点光纤乙炔传感系统 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0506003

栏目编辑: 宋梅梅