

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0114-08

基于相干相位-波分复用原理的脉冲激光技术

王小林 周 朴 马浩统 马阎星 许晓军 刘泽金 赵伊君

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提出了基于相干相位-波分复用(CPWM)原理的脉冲激光产生的新方法,进行了数值模拟并分析了各个参数对输出脉冲形态的影响。利用多波长激光相干合成原理,将等频率间隔的多束连续激光进行相干合成,通过有效的相位控制,实现光强、脉宽、脉冲重复频率参数可控的脉冲激光输出。理论分析表明,多路激光完全锁相时输出脉冲激光与锁模激光有类似的特征,脉冲重复频率为相邻两束光的频率间隔;对各路激光进行特定的相位控制,能够得到特定波形的脉冲激光输出。随着外腔相位控制技术的发展和,该方法有可能成为从连续光产生多参量可调脉冲激光的一种有效手段。

关键词 激光器; 脉冲激光; 相干相位-波分复用; 相位锁定

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0114

Pulse Laser Technology Based on Coherently Phase-Wavelength Multiplexed Principle

Wang Xiaolin Zhou Pu Ma Haotong Ma Yanxing Xu Xiaojun Liu Zejin Zhao Yijun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A new pulse laser technology based on coherently phased-wavelength multiplexed (CPWM) principle has been proposed, simulation has been done to analyze the effect of each parameters to the characteristic of the pulse laser. Base on the coherent combining of the multi-wavelength laser, several CW laser's those hold the same frequency interval are coherently combined, by effective phase control of each laser, pulse laser with adjustable parameter such as intensity, pulse width, pulse repetition rate can be generated. In theory, the combined pulse laser holds the same characteristic as the mode-locked laser, and the repetition rate is equal to the frequency interval. Apply a certain phase control to each laser; an anticipant pulse laser can be generated. As the development of the out-cavity phase controlling technology, this method can be an effective way to generate pulse laser with multi-parameter adjustable from a CW laser.

Key words lasers; pulse laser; coherently phased-wavelength multiplexed; phase-locking

1 引 言

由于脉冲激光具有许多独特的优点,在工业制造、材料处理、遥感遥测等领域有着广泛的应用^[1~5],激光器脉冲光技术研究十分活跃^[6~11]。传统的电光声光调 Q,锁模,倒腔,抽运电流调制技术和新近发展的单偏振光纤偏振态调节锁模技术^[6], SESAM 锁模技术^[7],基于背向 Raman 散射的脉冲技术^[8],声光调制光纤 Bragg 光栅调 Q 技术^[4~9]、基

于相位调制器和线性啁啾光纤 Bragg 光栅的脉冲技术^[10]都是基于腔内增益或相位控制的脉冲激光技术。随着腔外相位控制技术的发展和,基于腔外相干合成相位控制的脉冲激光技术^[11]和脉冲激光相干合成技术^[12]也相继提出并得以实现。2004 年,美国诺格公司的 Cheung 等^[12]提出利用相干相位-波分复用(CPWM)技术对光纤放大器进行主动相位控制,实现了脉冲激光的相干合成输出。Cheung 等最

基金项目: 国防科技大学优秀研究生创新项目(B080702)资助课题。

作者简介: 王小林(1985—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: wxllin@nudt.edu.cn

导师简介: 赵伊君(1930—),男,中国工程院院士,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术领域的研究。

许晓军(1973—),男,研究员,硕士生导师,主要从事高能固体激光器、大气光学与自适应光学等领域的研究。

E-mail: xuxj@21cn.com

初提出的 CPWM 技术本质是将脉冲光进行放大。本文中提出了基于 CPWM 原理将连续光产生脉冲光的新方法：利用多波长激光相干合成原理，将等频率间隔的多束激光合成，实现重复频率与相邻两束光的频率间隔相等的脉冲激光输出。文中对该方法进行了详细的理论分析，讨论了各个参数对输出脉冲形态的影响。理论分析表明，多路激光完全锁相时输出脉冲激光与锁模激光有类似的特征，脉冲重复频率为相邻两束光的频率间隔；对各路激光进行特定的相位控制，能够得到特定波形的脉冲激光输出。通过增加合成光束数目，可以实现峰值功率为单路光束的 N^2 倍激光输出；通过调节相邻两束光的频率间隔 $\Delta\nu$ ，可以实现重复频率和脉宽可调节的脉冲激光输出，脉冲重复频率可达吉赫兹、太赫兹量级，脉宽可达纳秒、皮秒量级。

2 理论模型与分析

2.1 基于 CPWM 原理的脉冲激光技术

基于 CPWM 原理的脉冲光技术原理如图 1 所示。利用特定元件(光谱分离元件、移频器件等)从连续种子光得到频率间隔相等的 N 束连续准单色光，相邻两束光之间频率之差为 $\Delta\nu$ ；然后将 N 束光分别先后通过相位调制器和光纤放大器；最后利用光束合成元件将 N 束光进行合成输出；相位检测与控制单元利用特定的相位控制算法，从合成输出光束提取各路相位信息，通过相位控制器进行相位控制，使得各束光相位锁定，能够得到稳定的、与锁模脉冲性质相同的脉冲光输出；通过相位控制，使得各束光的相位满足特定关系，能够得到特定波形的脉冲激光输出。

图 1 中，从连续光得到频率间隔相等的 N 束连续单色光可以有以下几种方法：1) 利用高分辨率的色散元件(光栅, DWDM)将连续光分成多束频率间隔相等的单色光；2) 利用多个移频器将一单色种子光移频到其他频率得到多束频率间隔相等的单色光。将 N 束光进行合成输出可以利用高分辨率的色散元件如光栅、光纤耦合器等器件实现。

为了进行有效的相位控制，需要特定的算法实现主动锁相。在相干合成的各种主动相位控制方法中，SPGD 算法^[13]、多抖动法^[14]等迭代算法以光强为判据进行相位反演和控制，由于各束光的频率不等，拍频的结果使得输出激光具有脉冲特性，受到控制带宽的限制，这些算法难以实现有效的相位控制；而外差法^[15]通过信号光与参考拍频进行相位检测，是进行相位控制的一种较为有效的方式。

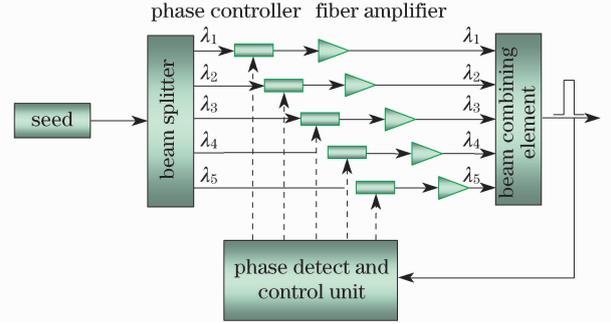


图 1 基于 CPWM 原理的脉冲激光产生技术原理图
Fig.1 Scheme of pulse laser technology based on CPWM principle

2.2 理论分析

2.2.1 合成光强数学模型

考虑 N 束振幅相等、相邻两束光频率相差为 $\Delta\nu$ 的单频激光

$$E_k = E_0 \exp\left\{-i\left[2\pi(\nu_0 + k \cdot \Delta\nu)t + (k - 1)\Delta\varphi_k\right]\right\}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

当相邻两束光相位差相等，即 $\Delta\varphi_k = \Delta\varphi_0$ 时，有 $E_k = E_0 \exp\{i[2\pi(\nu_0 + k \cdot \Delta\nu)t]\}$ ， N 束光和场强为

$$E = \sum_{k=1}^N E_0 \exp\{-i[2\pi(\nu_0 + (k - 1)\Delta\nu)t + (k - 1)\Delta\varphi_0]\} = E_0 \frac{\sin N\pi\Delta\nu t}{\sin \pi\Delta\nu t} \exp\left\{-i\left\{[2\nu_0 + (N - 1)\Delta\nu]\pi t + (N - 1)\Delta\varphi_0\right\}\right\}, \quad (2)$$

光强为

$$I = |E|^2 = \left| E_0 \frac{\sin N\pi\Delta\nu t}{\sin \pi\Delta\nu t} \exp\left\{-i\left\{[2\nu_0 + (N - 1)\Delta\nu]\pi t + (N - 1)\Delta\varphi_0\right\}\right\} \right|^2 = I_0 \left[\frac{\sin N\left(\pi\Delta\nu t + \frac{\Delta\varphi_0}{2}\right)}{\sin\left(\pi\Delta\nu t + \frac{\Delta\varphi_0}{2}\right)} \right]^2 \quad (3a)$$

理想情况 $\Delta\varphi_k = \Delta\varphi_0 = 0$ ，光强为

$$I = |E|^2 = \left| E_0 \frac{\sin N\pi\Delta\nu t}{\sin\pi\Delta\nu t} \exp\{-i[2\nu_0 + (N-1) \cdot \Delta\nu]\pi t\} \right|^2 = I_0 \left(\frac{\sin N\pi\Delta\nu t}{\sin\pi\Delta\nu t} \right)^2 \quad (3b)$$

实际上,式(3)与锁模脉冲激光器输出的光强表达式^[16]完全一样。因此,如果 N 束光的振幅相等,相邻两束光频率相差为 $\Delta\nu$,相邻两束光束初始相位差为零,那么合成输出脉冲激光与锁模激光的形态完全相同。

2.2.2 脉冲参数与单路激光参数关系讨论

考虑 N 路光强相等(都为 I_0)、光频率间隔相等(光频率为 $\nu_0 + k\Delta\nu, k=0, 1, \dots, N-1$)、初始相位差都为零的光束合成脉冲光的参数。结合锁模激光器的特点,讨论脉冲形态和参数(脉冲峰值功率、脉冲重复频率、脉冲持续时间\脉宽、脉冲激光光谱)与各个控制参数(光束数量 N , 激光光强 I_0 , 频率 ν_0 , 频率间隔 $\Delta\nu$)的关系。

1) 峰值功率

当各路光强相等时,根据式(3)可知,脉冲峰值功率为单路光强的 N^2 倍,即 $I = N^2 I_0$ 。

2) 脉冲重复频率

根据式(3),脉冲激光重复频率即为相邻两光束的频率差 $\Delta\nu$,而与激光频率 $\nu_0 + k\Delta\nu$ 无关。因此,通过改变频率差 $\Delta\nu$ 可以有效地改变脉冲激光的重复频率。

3) 持续时间、脉宽

根据式(3),考虑锁模激光器的特点^[16]。合成输出脉冲极大峰值之间有 $N-2$ 个次峰,脉冲持续时间为 $T_d = \frac{2}{N\Delta\nu}$,单脉冲的脉宽为 $T_p = \frac{1}{N\Delta\nu}$ 。通过增加合成光束数目和提高相邻光束的频率差,能够减小脉冲持续时间和脉冲宽度。

4) 脉冲激光光谱

对(2)式进行傅里叶变换,由傅里叶变换的线性可知,合成脉冲激光的光谱是由各束合成光的光谱线性叠加而成的分离谱线,各个分离谱线的间隔为各路相干光的频率间隔。

根据以上分析可知,基于 CPWM 技术的脉冲激光源的特性与锁模激光特性类似。合成脉冲激光峰值功率为单路光强的 N^2 倍,脉冲激光重复频率为相邻两光束的频率差 $\Delta\nu$,脉冲持续时间 $T_d = \frac{2}{N\Delta\nu}$,脉宽为 $T_p = \frac{1}{N\Delta\nu}$ 。通过增加合成光束数目,可以实现峰值功率为单路激光功率 N^2 倍增加的脉

冲激光输出;通过调节相邻两束光的频率间隔,可以实现高重复频率的超短脉冲光输出,能够压缩脉宽

$$T_p = \frac{1}{N\Delta\nu}。$$

3 数值模拟

实际上,由于严格控制各路激光的参数有较大的难度,当各路光强、频率、初始相位偏差存在随机扰动时,合成输出脉冲光的形态将发生变化。当各路光强 E_k , 频率间隔 $\Delta\nu_k$, 初始相位 φ_k 都不相等时,合成光场为

$$E = \sum_{k=1}^N E_k \exp\left\{-i\{2\pi[\nu_0 + (k-1)\Delta\nu_k]t + \varphi_k\}\right\} = \exp(-i2\pi\nu_0 t) \sum_{k=1}^N E_k \times \exp\left\{-i[2(k-1)\pi\Delta\nu_k t + \varphi_k]\right\}, \quad (4)$$

光强为

$$I(t) = |E|^2 = \left| \exp(-i2\pi\nu_0 t) \sum_{k=1}^N E_k(t) \times \exp\left\{-i[2(k-1)\pi\Delta\nu_k t + \Delta\varphi_k]\right\} \right|^2. \quad (5)$$

下面以 N 路光强中心频率分别为 $\nu_0 + k\Delta\nu (k=0, 1, \dots, N-1)$ 合成为例,讨论各个控制参数变化时,脉冲激光形态和参数的特性,给出各个参数容许的误差范围。

3.1 光强对输出脉冲的影响

仅考虑光强影响,式(5)变为:

$$I(t) = |E|^2 = \left| \exp(-i2\pi\nu_0 t) \sum_{k=1}^N E_k(t) \times \exp\left\{-i[2(k-1)\pi\Delta\nu t]\right\} \right|^2. \quad (6)$$

根据(6)式,各路光的光强不同时,脉冲激光的重复频率、脉宽、脉冲持续时间等基本不变。由于各束光的能量不同导致合成输出激光峰值功率有所变化,图 2 给出了不同光强(光强固定、光强随机等情况)的脉冲激光波形和频谱分布。对比图 2(a)和(b)可知,适当选择不同的光强分布,在总的合成光功率相等的情况下,脉冲峰值功率相同。由图 2(d)可知,随机光强起伏时,脉冲激光的时域特性(主要

是峰值之间的次峰个数和形态)有所变化。分析表明,在光强起伏的均方根为0.5时(如图2(d)),输出脉

冲光的形态与光强不起伏时的相似度可达99.95%。因此,光强起伏对脉冲光形态的影响不大。

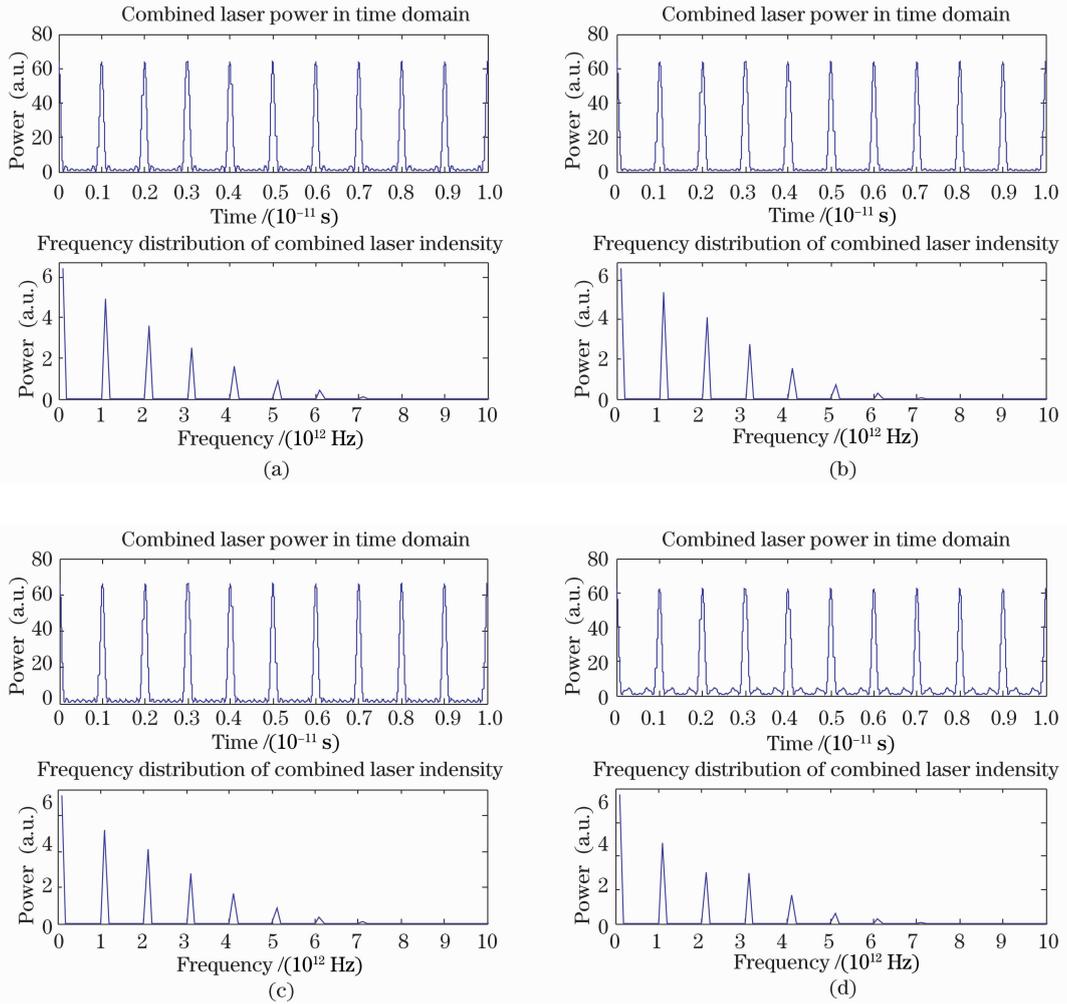


图2 8路连续光合成脉冲激光与各路光强关系。(a)8束光光强均为1;(b)8束光光强:[0.85,0.95,1.05,1.15,1.15,1.05,0.95,0.85];(c)光强随机变化,均方根0.1,8束光光强分布:[1.0287,0.8181,0.8427,1.2016,0.9928,1.2629,0.9757,1.0173];(d)光强随机变化,均方根0.5,8束光光强分布:[0.8088,0.5233,1.1168,1.6176,0.7107,0.7492,1.3614,1.0197]

Fig.2 Relationship between the combined pulse laser and intensity of each CW laser (a) each laser intensity is 1; (b) intensity of 8 lasers[0.85,0.95,1.05,1.15,1.15,1.05,0.95,0.85]; (c) random sample (RMS=0.1) intensity of 8 lasers: [1.0287,0.8181,0.8427,1.2016,0.9928,1.2629,0.9757,1.0173]; (d) random sample (RMS=0.5) intensity of 8 lasers: [0.8088,0.5233,1.1168,1.6176,0.7107,0.7492,1.3614,1.0197]

3.2 频率间隔偏差对输出脉冲的影响

理论分析表明,频率偏差对输出脉冲特性影响较大,当各束光频率间隔不能严格相等而出现随机变化时,会严重影响输出脉冲时域特性。图3给出了频率差在不同幅度的随机扰动下合成激光时域和频域特性。观察图3(c),在扰动幅度的均方根为0.1时,合成光已经不具备脉冲特性;分析表明,对于8路光合成时,在频率偏差的变化幅度的均方根小于 $\Delta\nu$ 的1%时,输出脉冲激光与无频率扰动时得到的脉冲激光相似度大于90.35%,扰动的影响可以忽

略。因此,此方法对各束光的频率差要求较为严格。

3.3 初始相位随机扰动对输出脉冲的影响

由于实验中相位调制器的引入,使得各路激光的相位可控。通过对相位的控制,合成脉冲表现出丰富的光强动力学特性,能够实现特定波形的脉冲激光输出。图4给出了几种特定初始相位情况下合成脉冲激光的时域波形和频谱分布。其中图4(a)为4路光相位同相但与另4路光相位异相得到的脉冲波形,与8束光同相时相比,脉冲被分离成了两个紧挨着的脉冲。图4(b)中8路激光的初始相位分

布为 $-\pi, -\pi, 0, \pi, \pi, 0, 0$ 时的合成光,合成激光峰值被分离,从频谱分布可知,脉冲激光重复频率加倍。图4(c)的合成激光出现了分离,在主峰前面出

现了两个次峰。图4(d)得到了与图4(b)类似的结果。因此,通过控制各路激光器的相位差满足特定要求,可以实现脉冲激光的倍频输出。

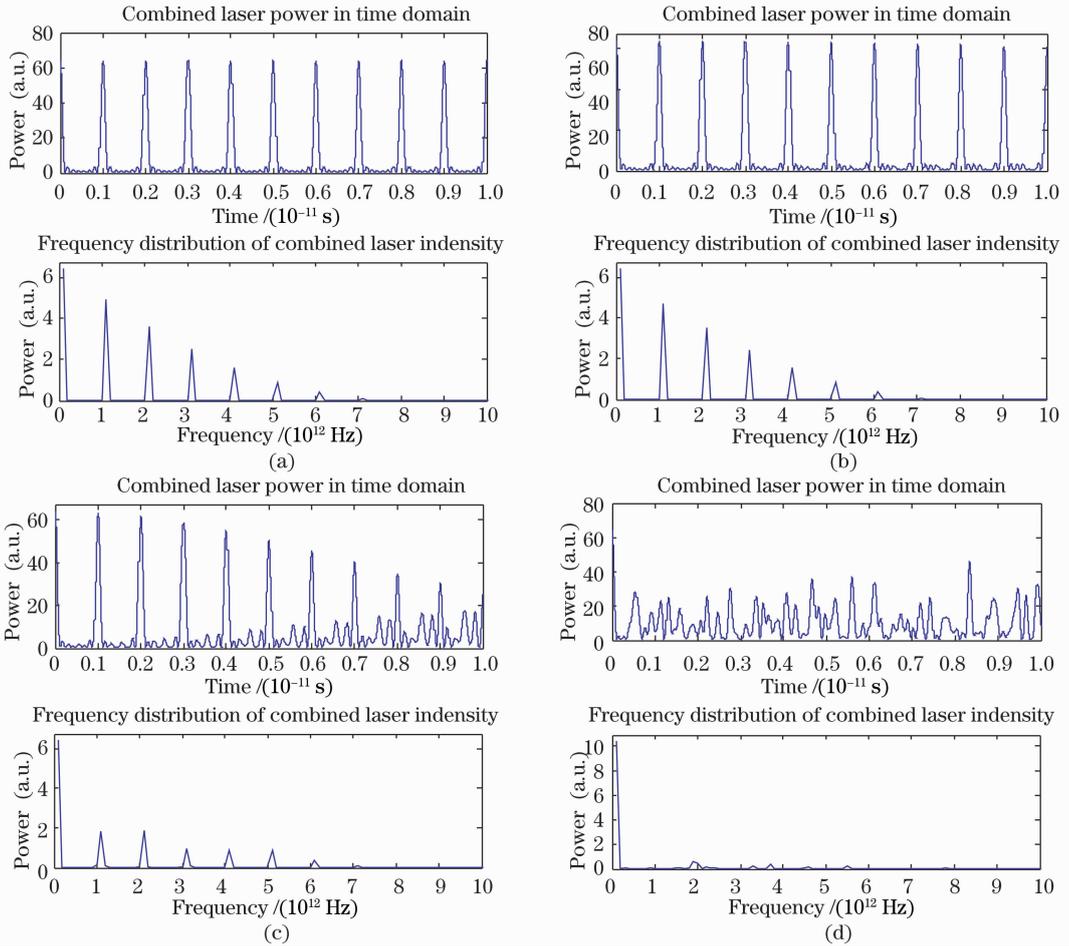


图3 8路连续光合成脉冲与各路激光频率间隔的关系。(a) 8束光频率间隔均为 $\Delta\nu=10^{12}$ Hz; (b) 频率间隔随机,均方根0.001. 频率间隔(10^{12} Hz): $[0.9990, 0.9993, 1.0013, 0.9991, 0.9996, 0.9995, 1.0016, 1.0001]$; (c) 频率间隔随机,均方根0.01. 频率间隔(10^{12} Hz): $[1.0023, 0.9904, 0.9985, 1.0074, 0.9911, 1.0014, 0.9976, 0.9992]$; (d) 频率间隔随机,均方根0.1,频率间隔(10^{12} Hz) $[1.0760, 0.8287, 1.1537, 0.8390, 1.1110, 0.8890, 1.0385, 1.0965]$

Fig. 3 Relationship between the combined pulse laser and frequency interval of each CW laser. (a) Frequency interval $\Delta\nu=10^{12}$ Hz; (b) random sample (RMS=0.001) frequency interval of 8 lasers: $[0.9990, 0.9993, 1.0013, 0.9991, 0.9996, 0.9995, 1.0016, 1.0001]$; (c) random sample (RMS=0.01) frequency interval of 8 lasers: $[1.0023, 0.9904, 0.9985, 1.0074, 0.9911, 1.0014, 0.9976, 0.9992]$; (d) random sample (RMS = 0.1) frequency interval of 8 lasers: $[1.0760, 0.8287, 1.1537, 0.8390, 1.1110, 0.8890, 1.0385, 1.0965]$

当各路放大器中存在随机扰动的相位噪声时,合成激光为随机状态。仿真结果表明,当噪声相位变化幅度均方根为 0.1π 和 0.2π 时,脉冲激光波形与完全锁相时脉冲激光波形的相似度达99.83%和96.61%(如图5所示)。因此,系统的相位控制精度在十分之一波长内时,就能得到较为理想的脉冲光输出。

特别地,根据(3a)式,如果相邻两路激光的相位差相等且都为 $\Delta\varphi_0$,那么输出脉冲激光特性与相位差为0时相同,只是在时域上向左平移 $\tau_d=(2_0/\Delta\nu)\pi\cdot\Delta\varphi_0$,如图6所示。

综上分析可知,基于CPWM的脉冲激光技术对各束光之间的频率差要求最为严格,对各束光相位控制的精度要求次之,对各束光的光强要求较低。

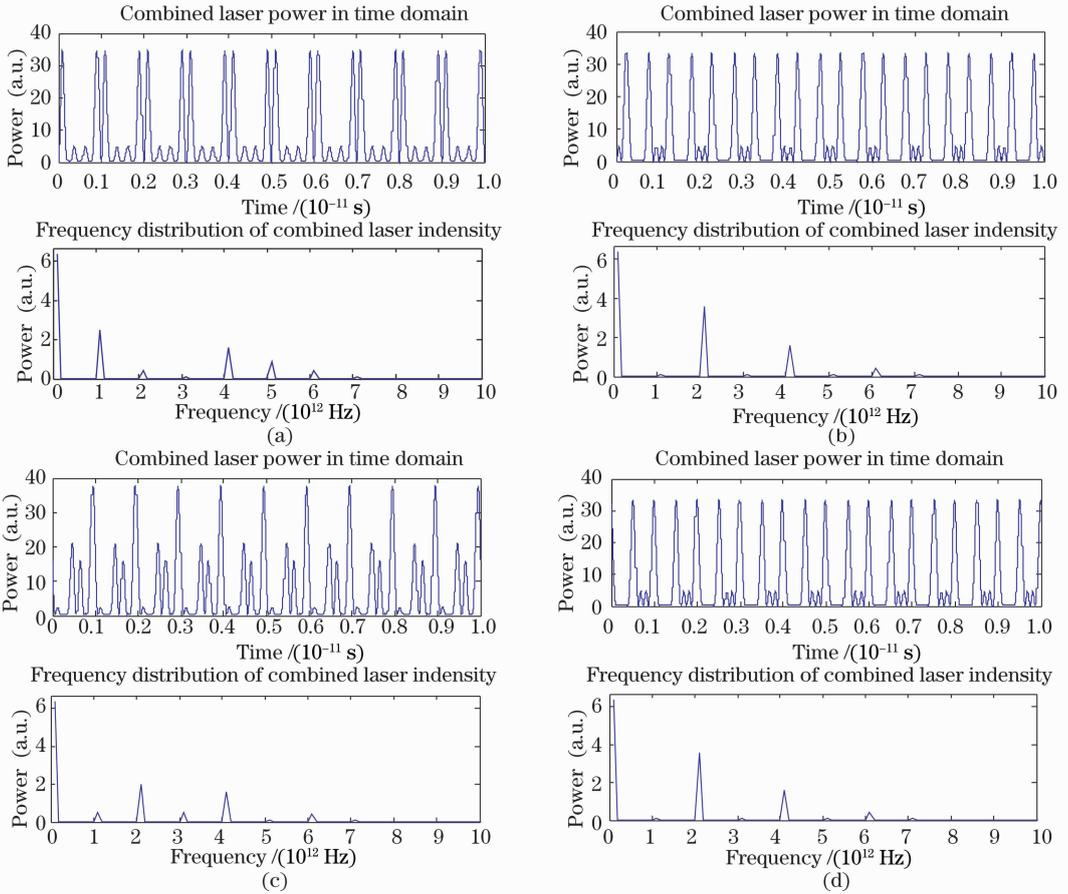


图 4 几种不同初始相位情况下的合成脉冲激光时域和频域特性。(a) 8 束光初始相位： $[0, 0, 0, 0, \pi, \pi, \pi, \pi]$ ；(b) 8 束光初始相位： $[-\pi, -\pi, 0, 0, \pi, \pi, 0, 0]$ ；(c) 8 束光初始相位： $[-\pi/2, 0, -\pi/2, 0, 0, \pi/2, 0, \pi/2]$ ；(d) 8 束光初始相位： $[0, \pi/2, 0, \pi/2, 0, \pi/2, 0, \pi/2]$

Fig. 4 Combined pulse laser in different initial phase of 8 lasers. (a) Initial phase of 8 lasers： $[0, 0, 0, 0, \pi, \pi, \pi, \pi]$ ；(b) initial phase of 8 lasers： $[-\pi, -\pi, 0, 0, \pi, \pi, 0, 0]$ ；(c) initial phase of 8 lasers： $[-\pi/2, 0, -\pi/2, 0, 0, \pi/2, 0, \pi/2]$ ；(d) initial phase of 8 lasers： $[0, \pi/2, 0, \pi/2, 0, \pi/2, 0, \pi/2]$

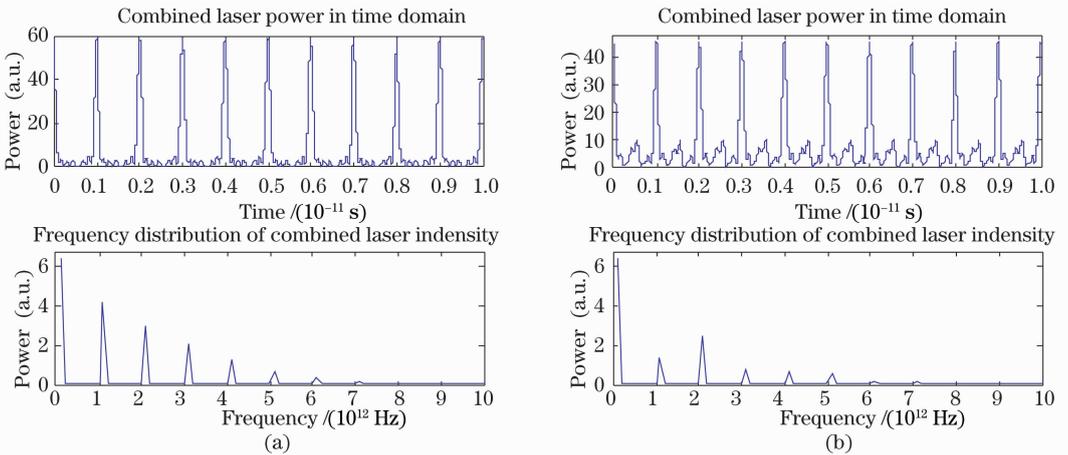


图 5 初始相位随机情况下合成激光的时域和频域特性。(a) 相位扰动均方根 $0.1 \times \pi$ ，8 路初始相位： $[0.3351, 0.0186, -0.0300, -0.2615, 0.0925, -0.4198, 0.2244, 0.5101]$ ；(b) 相位扰动均方根 $0.5 \times \pi$ ，8 路初始相位： $[-1.0079, 0.1617, -0.6638, 0.8892, -0.5059, 0.3322, 0.1378, -0.5792]$

Fig. 5 Combined pulse laser in random sample initial phase of 8 lasers. (a) Random sample (RMS= $0.1 \times \pi$) initial phase of 8 lasers： $[0.3351, 0.0186, -0.0300, -0.2615, 0.0925, -0.4198, 0.2244, 0.5101]$ ；(b) random sample (RMS= $0.2 \times \pi$) initial phase of 8 lasers： $[-1.0079, 0.1617, -0.6638, 0.8892, -0.5059, 0.3322, 0.1378, -0.5792]$

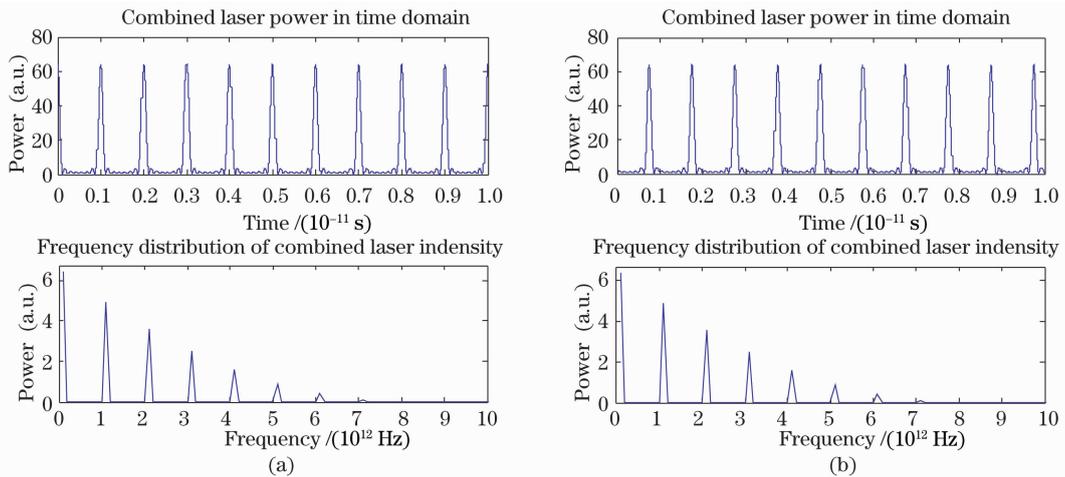


图 6 相邻两路激光的相位差相等,输出脉冲时间平移。(a) 8 束光初始相位均为 0;

(b) 8 路初始相位 $[0, \pi/2, \pi, 3 \times \pi/2, 2 \times \pi, 5 \times \pi/2, 3 \times \pi, 7 \times \pi/2]$

Fig. 6 Time shift of the pulse laser when the initial phase difference is not zero. (a) initial phase of 8 lasers are all 0;

(b) initial phase $[0, \pi/2, \pi, 3 \times \pi/2, 2 \times \pi, 5 \times \pi/2, 3 \times \pi, 7 \times \pi/2]$

4 结 论

提出了基于 CPWM 原理将连续光产生脉冲光的方法,分析了各个参数对输出脉冲形态的影响,指出了该方法对各路合成光的强度、频率差、相位扰动幅度的要求。利用多波长激光相干合成原理,将等频率间隔的多束激光合成,实现重复频率与相邻两束光的频率间隔相等的脉冲激光输出。理论分析表明,基于 CPWM 技术的脉冲激光源的特性与锁模激光特性类似。合成脉冲激光峰值功率为单路光强的 N^2 倍,脉冲激光重复频率为相邻两光束的频率差 $\Delta\nu$,脉冲持续时间 $T_d = 2/N\Delta\nu$,脉宽为 $T_p = 1/N\Delta\nu$ 。通过增加合成光束数目,可以实现峰值功率为单路激光功率 N^2 倍的脉冲激光输出;通过调节相邻两束光的频率间隔,可以实现高重复频率的超短脉冲光输出,能够压缩脉宽。该方法可以较为容易地实现脉冲重复频率为吉赫兹、太赫兹量级,脉宽可达纳秒、皮秒量级的超短脉冲输出。与锁模脉冲激光相比,该方法具有多参数可调的特点。随着外腔相位控制技术的发展,该方法将成为从连续光产生脉冲光的一种有效手段。

参 考 文 献

- 1 F. Wang, B. Shen, X. Zhang *et al.*. Electron acceleration by a propagating laser pulse in low-density plasma [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 194~197
- 2 Zhang Xiaomei, Shen Baifei. Neutron source from thin foil target compressed by shaped laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1594~1597
- 张晓梅, 沈百飞. 利用整形激光脉冲压缩薄膜靶得到中子源[J].

光学学报, 2006, **26**(10): 1594~1597

- 3 Liu Yaodong, Zhao Lei. Preparation of ZnO thin films by pulsed laser deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 534~537
- 刘耀东, 赵磊. 脉冲激光沉积法制备氧化锌薄膜[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 534~537
- 4 C. Cuadrado-Laborde, M. Delgado-Pinar, S. Torres-Peiro *et al.*. Q-switched all-fiber laser using a fiber-optic resonant acousto-optic modulator [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **274**: 407~411
- 5 Ferdinand, Bammer, Rok Petkovsek. Q-switching of a fiber laser with a single crystal photo-elastic modulator [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 6177~6182
- 6 Shenping Li, Xin Chen, Dmitri V. Kuksenkov *et al.*. Wavelength tunable stretched-pulse mode-locked all-fiber erbium ring laser with single polarization fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 6098~7102.
- 7 R. Fluck, B. Braun, E. Gini *et al.*. Passively Q-switched 1.34- μm Nd : YVO₄ microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 991~993
- 8 Zhenhuan Ye, Qihong Lou, Jingxing Dong *et al.*. Sub-nanosecond strong pulse generated by backward Raman scattering [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 406~407
- 9 M. Delgado-Pinar, D. Zalvidea, A. Diez *et al.*. Q-switching of an all-fiber laser by acousto-optic modulation of a fiber Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 1106~1112
- 10 Hao Hu, Jinlong Yu, Litai Zhang. Pulse source based on directly modulated laser and phase modulator [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(14): 8931~8937
- 11 Wang Xiaolin, Xu Xiaojun, Zhou Pu *et al.*. Adjustable all fiber pulse laser based on coherent combination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 87~91
- 王小林, 许晓军, 周朴等. 基于相干合成的可调全光纤脉冲激光源[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 87~91
- 12 Eric Cheung, Mark Weber, David Mordaunt. Mode-locked pulsed fiber array scalable to high power [C]. *SPIE*, 2004, **5335**: 98~105
- 13 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaolin Wang *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application [J]. *IEEE J. Sel. Top.*

Quan. Electron. (accepted)

- 14 S. J. Augst, T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 474~476
- 15 R. Xiao, J. Hou, M. Liu *et al.*. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. *Opt.*

Express., 2008, **16**(3): 2015~2022

- 16 Shi Shunxiang, Guo Siji. Photoelectron Technology and its Application[M]. Chengdu: Publishing House of University of Electronic Science and Technology of China, 2000. 125
- 石顺祥, 过巳吉. 光电子技术及其应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000. 125