

# 基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积方法

曾曙光<sup>1,2</sup> 胡 静<sup>1</sup> 王 飞<sup>1</sup> 刘 雁<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 三峡大学理学院, 湖北 宜昌 443002; <sup>2</sup> 三峡大学新能源研究院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要** 利用传统的脉冲堆积方法进行脉冲整形时,由于拍频效应会使得堆积出来的整形脉冲出现强度起伏,由于光谱干涉效应会使得堆积出来的脉冲光谱出现强度起伏。针对上述问题,提出了一种基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积脉冲整形方法。利用该方法对啁啾脉冲堆积脉冲整形问题展开了理论分析与数值模拟,并将结果与传统的啁啾脉冲堆积脉冲整形技术进行了对比。结果表明,基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积脉冲整形方法可以有效地降低拍频效应,得到更为平滑的整形脉冲;且波长间隔越大,脉冲平滑效果就越好。另外,基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积脉冲整形方法还可以有效地降低或消除频谱干涉效应。

**关键词** 光纤光学;脉冲堆积;脉冲整形;波分复用;拍频效应;频谱干涉效应

**中图分类号** TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0514001

## Pulse Stacking Scheme Based on Wavelength Division Multiplexing

Zeng Shuguang<sup>1,2</sup> Hu Jing<sup>1</sup> Wang Fei<sup>1</sup> Liu Yan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Science, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)  
(<sup>2</sup> College of New Energy, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract** For the case of pulse shaping by the usual pulse stacking scheme, the beat effect brings intensity fluctuation to the shaped pulse, and the spectrum interference effect will cause intensity fluctuation of the spectrum of the shaped pulse. To solve these problems, a pulse stacking scheme based on the wavelength division multiplexing (WDM) is proposed. Theoretical analysis and numerical simulation are developed on this scheme and this scheme is compared with the usual pulse stacking scheme. The results show that the pulse stacking scheme based on WDM can reduce the beat effect effectively, and smoother shaped pulse can be obtained. The larger the wavelength spacings are, the smoother shaped pulse we can get. Otherwise, this scheme can also reduce or eliminate the spectrum interference effect.

**Key words** fiber optics; pulse stacking; pulse shaping; wavelength division multiplexing (WDM); beat effect; spectrum interference effect

**OCIS codes** 140.3300; 140.3538; 060.3510

## 1 引 言

光脉冲整形可作为超短脉冲产生的补充手段。在过去 10 多年间,人们已经发展了一系列脉冲整形方法,可根据使用要求产生复杂的超短光学波形。已有研究证明,脉冲整形系统为超快光谱学、非线性光纤光学和强场物理提供了前所未有的控制超短光脉冲波形的手段<sup>[1]</sup>。现有的脉冲时域整形方案主要有空间光调制器<sup>[2]</sup>、普克尔斯盒削波<sup>[3]</sup>、集成光学调

制器<sup>[4]</sup>和光纤脉冲堆积器<sup>[5~10]</sup>等。

光纤脉冲堆积器首先由日本大阪大学激光工程研究所在 20 世纪 90 年代研制 GEKKO-Ⅻ 升级装置时提出并研制了样机<sup>[6,7]</sup>。在该系统中,采用部分相干的啁啾脉冲,克服了脉冲相干叠加问题。然而,后来的研究表明,采用啁啾脉冲进行堆积时,由于相邻脉冲重叠部分的频率差恒定且初始相位相同,叠加后的脉冲会出现“拍频”的现象,从而导致叠

收稿日期: 2012-10-15; 收到修改稿日期: 2012-12-12

基金项目: 宜昌市科学技术研究与开发项目(A2012-302-28)和三峡大学优秀人才培养启动基金(KJ2011B066)资助课题。

作者简介: 曾曙光(1984—),男,讲师,主要从事超短脉冲相关技术方面的研究。E-mail: zengshuguang19@sohu.com

加后的脉冲时域波形出现周期性“调制”<sup>[10]</sup>。拍频现象引起的波形调制会给整形脉冲的应用带来不稳定性,是实验中所不希望出现的。另外,本文通过研究发现对于传统的脉冲堆积方案,由于用来堆积的若干个脉冲均具有一定的谱宽且中心波长相同,堆积时将会发生所谓的宽带光光谱干涉效应<sup>[11]</sup>。波分复用技术(WDM)是光纤通信中非常成熟的、传输容量潜力最大的一种多信道复用技术。该技术最大的特点是不同信道具有不同的光波波长<sup>[12~14]</sup>。为了尽量地减少啁啾脉冲堆积时的拍频效应和光谱干涉效应,本文提出了一种基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积脉冲整形方法,该方法中,用于堆积的每一路子脉冲的中心波长不同。利用该方法对啁啾脉冲堆积脉冲整形问题展开了理论分析与数值模拟,并将结果与传统的啁啾脉冲堆积脉冲整形技术进行了对比。

## 2 理论模型

### 2.1 传统的啁啾脉冲堆积脉冲整形模型

传统的啁啾脉冲堆积原理如图 1 所示<sup>[5]</sup>,将一个百皮秒级的啁啾脉冲经光纤分束器(FBS)分成若干子脉冲,各子脉冲进入不同路光纤,利用压电陶瓷(PZT)控制光纤长度以使各路脉冲之间存在一定的延时,用可调光衰减器(VOA)控制各路脉冲的振幅大小,再将各路光纤中的脉冲叠加产生所需的纳秒级整形脉冲。

假设单个子脉冲的归一化光场分布为

$$E(t) = \exp\{-[(1-iC)/2](t/\tau)^2 + i\omega_0 t\}, \quad (1)$$

式中  $\tau$  为光脉冲的  $1/e$  半宽度,  $\omega_0$  为中心频率,  $C$  为啁啾参量。由(1)式不难得知,单个脉冲时域的光强分布和频域的光谱分布均为高斯型。

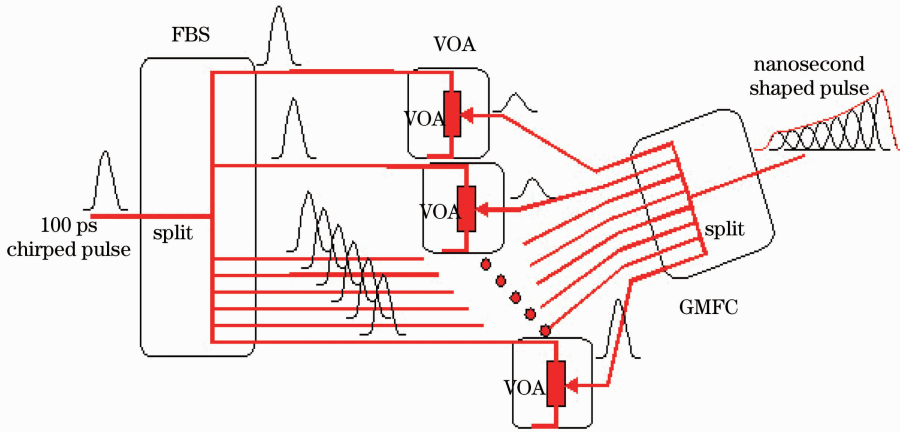


图 1 脉冲堆积示意图

Fig. 1 Scheme of pulse stacking

子脉冲经脉冲堆积器叠加后脉冲场分布可表示为

$$E_{\text{sum}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} E_n = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n \exp\{-[(1-iC)/2][(t-n\Delta t)/\tau]^2 + i\omega_0(t-n\Delta t)\}, \quad (2)$$

式中  $\alpha_n$  为各路脉冲的衰减系数,  $\tau$  为脉冲的  $1/e$  半宽度,  $\Delta t$  为延迟时间 ( $\Delta t = k\tau_w$ ,  $k$  为延时参数,  $\tau_w$  为单个脉冲半峰全宽),  $N$  为子脉冲个数。为了讨论方便,上式中略去了常数振幅系数。

采用传统的啁啾脉冲堆积方案时,由于相邻脉冲重叠部分的频率差恒定且初始相位相同,叠加后的脉冲会出现“拍频”的现象,从而导致叠加后的脉冲时间波形出现周期性“调制”(高低起伏)<sup>[10]</sup>。拍频现象引起的波形调制会给整形脉冲的应用带来不稳定性,是实验中所不希望出现的。

另外,对于传统的脉冲堆积方案,由于用来堆积

的若干个脉冲均具有一定的谱宽且中心波长相同,堆积时将会发生所谓的宽带光光谱干涉效应<sup>[11]</sup>,使得堆积后脉冲的光谱出现多个干涉峰。本文以两路脉冲堆积为例,通过解析推导来说明这种光谱干涉效应,推导时假定各路衰减系数  $\alpha_n = 1$ 。在(2)式中,令  $N=2$ ,两路脉冲叠加后的光谱可以表示为

$$I(\omega) = |E_{\text{sum}}(\omega)|^2 = \frac{8\pi\tau^2}{(1+C^2)} \times \exp\left[\frac{-(\omega-\omega_0)^2\tau^2}{1+C^2}\right] \left[\cos\left(\frac{\omega\Delta t}{2}\right)\right]^2, \quad (3)$$

式中  $E_{\text{sum}}(\omega)$  是  $E_{\text{sum}}(t)$  的傅里叶变换。由(3)式可

以看出,叠加后脉冲的光谱包络仍然是高斯型的,但要受到余弦项的调制。正是由于该余弦项的存在,使得叠加后的脉冲光谱强度出现周期性的调制。其光谱调制的频域周期为

$$T_{\omega} = \frac{2\pi}{\Delta t}. \quad (4)$$

光谱干涉效应会使堆积后脉冲的光谱出现明显的调制,这是脉冲整形实验中所不希望出现的。

## 2.2 基于波分复用思想的脉冲堆积脉冲整形技术

波分复用技术(WDM)是光纤通信中非常成熟的、传输容量潜力最大的一种多信道复用技术。该技术最大的特点是不同信道具有不同的光波波长<sup>[12]</sup>。为了尽量地减少啁啾脉冲堆积时的拍频效

应以及光谱干涉效应,本文提出了一种基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积脉冲整形方案(以下简称WDM脉冲堆积方案)。其原理是:将一个宽带宽的初始脉冲分成多个中心波长不相同的子脉冲;各子脉冲进入不同路光纤,利用PZT控制光纤长度以使各路脉冲之间存在一定的延时,用可调光衰减器控制各路脉冲的振幅大小,再将各路光纤中的脉冲叠加产生所需的整形脉冲。该方案与传统的啁啾脉冲堆积方案相比,不同之处在于每一路子脉冲的中心波长不同,且要求初始的啁啾脉冲具有较大的带宽。

具体地,利用WDM脉冲堆积方案进行部分相干堆积后的电场分布可表示为

$$E_{\text{sum}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n \exp\{-[(1-iC)/2][(t-n\Delta t)/\tau]^2 + i[2\pi c/(\lambda_0 + n\Delta\lambda)](t-n\Delta t)\}, \quad (5)$$

式中 $\omega_0$ 和 $\lambda_0$ 分别为第一路子脉冲的中心频率和中心波长, $c$ 为真空中的光速, $\Delta\lambda$ 为相邻子脉冲的中心波长差。根据(5)式,当波长间隔 $\Delta\lambda = 0$ 时,各路子脉冲的中心波长相同,对应于传统的啁啾脉冲堆积方案;当 $\Delta\lambda \neq 0$ 时,各路子脉冲的中心波长不相同,对应于WDM脉冲堆积方案。

接下来,利用公式推导的方法来说明WDM脉冲堆积方案减小拍频效应、平滑整形脉冲的原理。为了方便解析推导,先来看两路子脉冲堆积的情形,推导时假定各路衰减系数 $\alpha_n = 1$ 。在(5)式中,令 $N=2$ ,两路脉冲叠加后的光强可以表示为

$$I(t) = |E_{\text{sum}}(t)|^2 = \exp[-(t/\tau)^2] \times [1 + 2\exp(-A/2)\cos B + \exp(-A)], \quad (6)$$

式中

$$A = [-2t\Delta t + (\Delta t)^2]/\tau^2, \quad (7)$$

$$B = AC/2 + \omega_0 \left[ (t - \Delta t) \frac{\lambda}{\lambda + \Delta\lambda} - t \right] = -\Delta\omega \cdot t + \phi_0, \quad (8)$$

$$\Delta\omega = C\Delta t/\tau^2 + \omega_0 \Delta\lambda/(\lambda + \Delta\lambda). \quad (9)$$

式中 $\phi_0$ 为一与时间无关的常数。仔细分析(6)式不难看出,啁啾脉冲堆积时,由于调制项“ $\cos B$ ”的存在,将会使得叠加后的脉冲产生周期性的强度调制,调制频率为 $\Delta\omega$ 。由(9)式可知,随着相邻子脉冲的波长间隔 $\Delta\lambda$ 的增大,调制频率也将增大,进而强度调制周期减小,拍频效应减小,堆积出来的整形脉冲更为平滑。

为了更好地说明WDM脉冲堆积方案的脉冲

时域平滑作用,本文采用不均匀度 $\eta$ 来衡量叠加后脉冲的平滑性,即

$$\eta = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (10)$$

式中 $I_{\text{max}}$ 、 $I_{\text{min}}$ 分别为叠加后脉冲的最大和最小光强。不均匀度 $\eta$ 越小,脉冲就越平滑。

## 3 数值模拟与分析

本节将通过数值模拟来说明WDM脉冲堆积方案的脉冲平滑作用。在以下计算中,下列参数是相同的:各路光纤的衰减系数 $\alpha_n = 1$ ,初始注入脉冲的光谱宽度要大于等于 $N\Delta\lambda$ ,分束后单个子脉冲半峰全宽 $\tau_w = 100$  ps,各子脉冲啁啾参数 $C$ 均为61.5,第一路子脉冲的中心波长 $\lambda_0 = 1053$  nm,第 $n$ 路子脉冲的中心波长为 $\lambda_{n0} = \lambda_0 + (n-1)\Delta\lambda$ ,第一路子脉冲的谱宽为1 nm(半峰全宽,下同),第 $n$ 路子脉冲的谱宽为

$$\delta\lambda_n = [\lambda_0 + (n-1)\Delta\lambda]^2 \sqrt{(1+C^2)\ln 2}/(\pi c\tau). \quad (11)$$

为了讨论方便,先对两路子脉冲部分相干堆积时的情况进行数值模拟。

### 3.1 两路子脉冲部分相干堆积时的数值模拟

在3.1节的计算中:延时参数 $k=0.1$ ,延迟时间 $\Delta t = k\tau_w = 10$  ps,积分时间为6 ps(相当于探测器的时间分辨率为6 ps)。根据第2部分的理论模型,采用Matlab软件编程可模拟出两路子脉冲部分相干堆积时的情形。图2为两路脉冲堆积后的光强分

布图,其中图 2(a)为传统的脉冲堆积方案,波长间隔  $\Delta\lambda=0$  nm;图 2(b)为 WDM 脉冲堆积方案,波长间隔  $\Delta\lambda=10$  nm。由图可见,传统的脉冲堆积方案下,两路脉冲堆积后形成了 7 个“干涉峰”;WDM 脉冲堆积方案下,堆积出来的脉冲没有“干涉峰”。这说明了 WDM 脉冲堆积方案可以减少拍频效应,起到平滑脉冲的作用。可以根据 (9)式来解释上述现

象。根据 (9)式,传统的脉冲堆积方案下( $\Delta\lambda=0$ ),强度调制周期  $T_m=2\pi/\Delta\omega=36.8$  ps(远大于积分时间),在脉冲包络内的干涉峰数  $N_m\approx 2.7T_w/T_m\approx 7$ ;WDM 脉冲堆积方案下( $\Delta\lambda=10$  nm),调制周期  $T'_m=0.37$  ps(远小于积分时间),在一个积分时间(6 ps)内含有 16 个调制周期,这使得堆积出来的脉冲是平滑的。

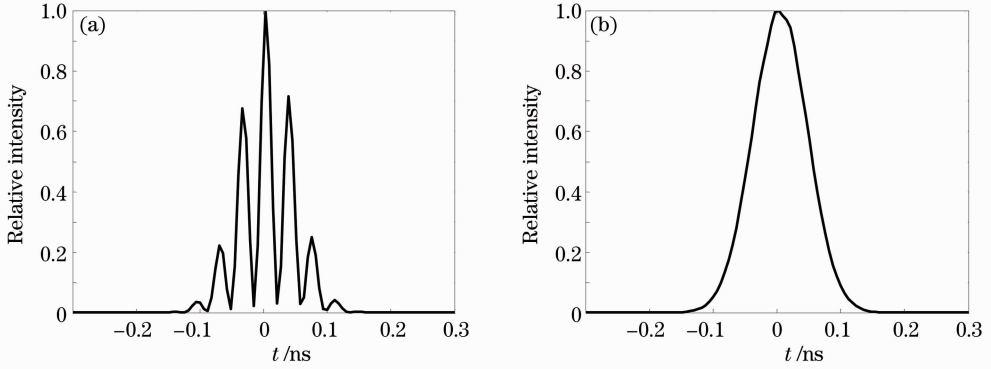


图 2 两路脉冲堆积后的光强分布图。(a)传统的脉冲堆积方案;(b) WDM 脉冲堆积方案

Fig. 2 Intensity distributions of two pulses stacking. (a) Usual pulse stacking scheme; (b) WDM pulse stacking scheme

以上从时域分析和对比了两种啁啾脉冲堆积方案。对于整形脉冲的应用而言,其光谱分布同样非常重要。图 3 给出了不同波长间隔时两路脉冲堆积后的光谱分布图,其中图 3(a)为传统的脉冲堆积方案,波长间隔  $\Delta\lambda=0$  nm;图 3(b)为 WDM 脉冲堆积方案,波长间隔  $\Delta\lambda=10$  nm。由图 3(a)可知,对于传统的脉冲堆积方案下( $\Delta\lambda=0$  nm),由于用来堆积的两个脉冲均具有一定的谱宽且中心波长相同,

堆积时将会发生所谓的宽带光谱干涉效应,使得堆积后脉冲的光谱出现多个干涉峰。根据 (4)式,不难得知此时光谱干涉的周期为 0.63 THz(在中心波长 1053 nm 处约 0.37 nm),故在高斯型的光谱包络内的光谱干涉峰数约为 7 个。对于图 3(b),由于此时参与堆积的两个脉冲的中心波长相差 10 nm,两个脉冲的光谱不会发生交叠,从而不会发生光谱干涉效应。

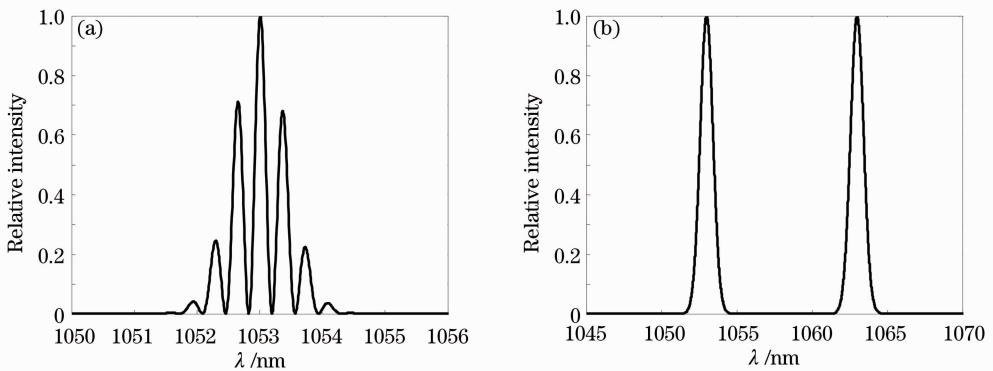


图 3 两路脉冲堆积后的光谱分布图。(a)传统的脉冲堆积方案;(b) WDM 脉冲堆积方案

Fig. 3 Spectrum distributions of two pulses stacking. (a) Usual pulse stacking scheme; (b) WDM pulse stacking scheme

### 3.2 32 路子脉冲部分相干堆积时的数值模拟

实际的应用中,要求堆积出来的整形脉冲具有一定的宽度,因此脉冲堆积方案一般是采取多路的方式。接下来,以 32 路脉冲部分相干堆积为例,对比一下传统的脉冲堆积方案和 WDM 脉冲堆积方案的异同。在本节的计算中:延时参数  $k=0.6$ ,延

迟时间  $\Delta t=60$  ps,积分时间为 28 ps,第一路子脉冲的谱宽为 1 nm,其他各路子脉冲的谱宽可由(11)式计算出来。图 4 为 32 路脉冲堆积后的光强分布图。由图 4 可见,传统的脉冲堆积方案下( $\Delta\lambda=0$  nm),堆积出来的平顶脉冲顶部出现了明显的强度起伏;WDM 脉冲堆积方案下,堆积出来的平顶脉冲则较

为平滑,且波长间隔越大,平滑效果越好。经过进一步计算,图 4(a)~(d) 中,脉冲的不均匀度  $\eta$  分别为 4.76%、1.39%、0.80%、0.36%。其原因同样可以根据(9)式来分析。当波长间隔  $\Delta\lambda$  越大时,强度调制

周期越小,积分时间内的干涉峰越多,堆积出来的脉冲就越平滑。

图 5 给出了不同波长间隔时 32 路脉冲堆积后的光谱分布图。由图 5(a)可知,对于传统的脉冲堆

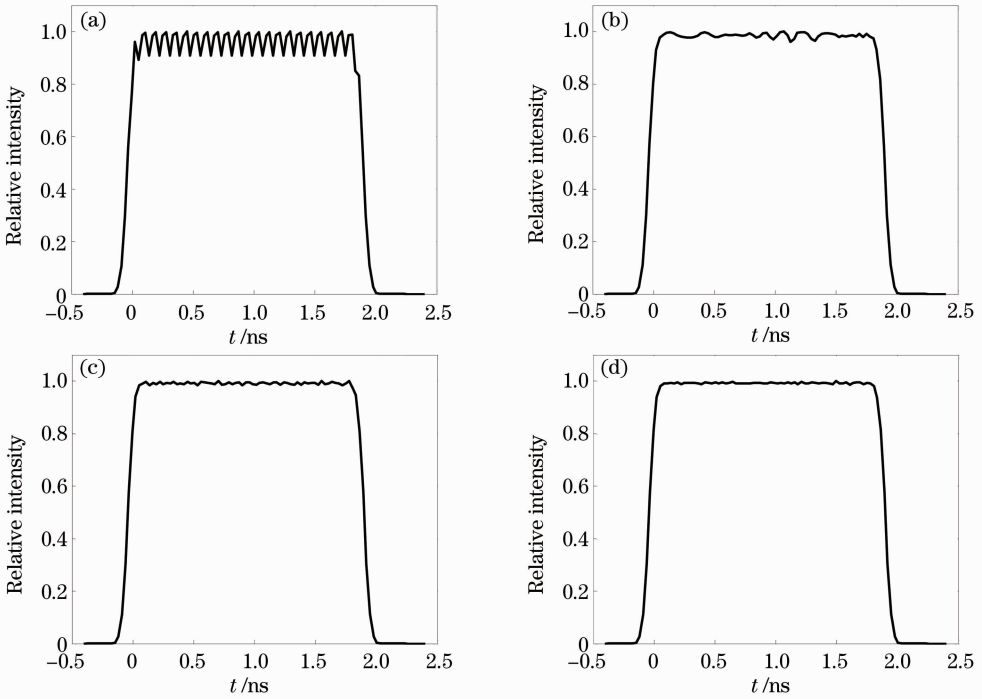


图 4 32 路脉冲堆积后的光强分布图。(a)  $\Delta\lambda=0$  nm; (b)  $\Delta\lambda=1$  nm; (c)  $\Delta\lambda=5$  nm; (d)  $\Delta\lambda=10$  nm

Fig. 4 Intensity distributions of 32 pulses stacking. (a)  $\Delta\lambda=0$  nm; (b)  $\Delta\lambda=1$  nm; (c)  $\Delta\lambda=5$  nm; (d)  $\Delta\lambda=10$  nm

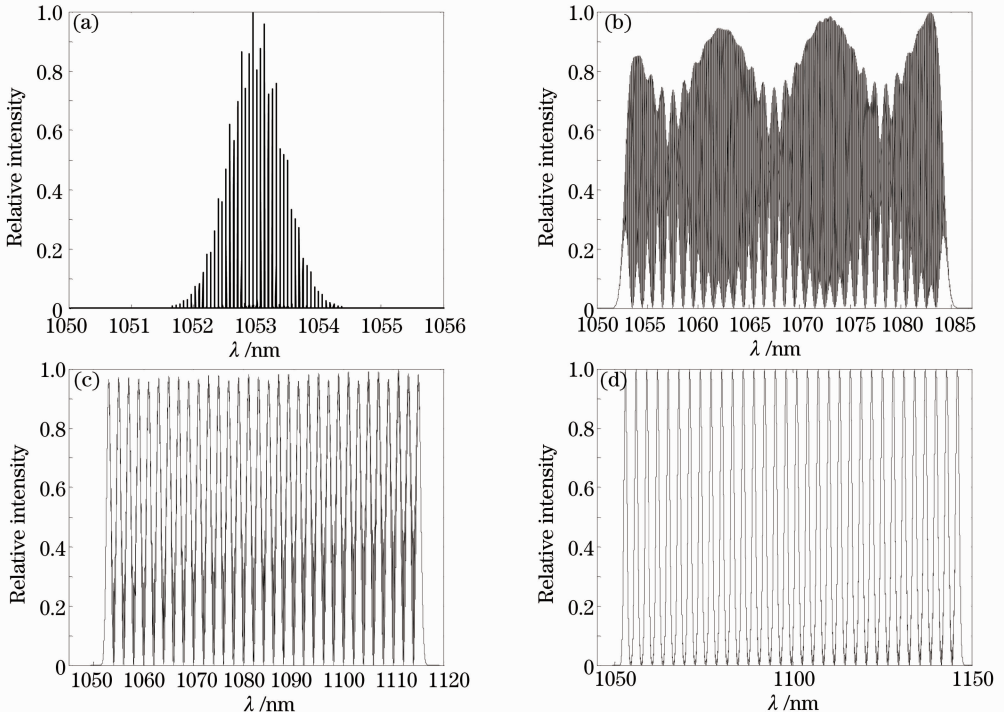


图 5 32 路脉冲堆积后的光谱分布图。(a)  $\Delta\lambda=0$  nm; (b)  $\Delta\lambda=1$  nm; (c)  $\Delta\lambda=2$  nm; (d)  $\Delta\lambda=3$  nm

Fig. 5 Spectrum distributions of 32 pulses stacking. (a)  $\Delta\lambda=0$  nm; (b)  $\Delta\lambda=1$  nm; (c)  $\Delta\lambda=2$  nm; (d)  $\Delta\lambda=3$  nm

积方案( $\Delta\lambda=0$  nm),与图 3(a)类似,此时也将发生光谱干涉效应;且由于此时延迟时间  $\Delta t$  更大,根据(4)式,其相应的光谱干涉周期更短(约 0.062 nm),光谱干涉对应的干涉峰更多。由图 5(b)可知,对于 WDM 脉冲堆积方案,当波长间隔较小时,由于相邻子脉冲的光谱有一定的重叠,同样会发生光谱干涉效应。然而,由图 5(d)可知,当波长间隔大于等于 3 倍的脉冲谱宽时,相邻子脉冲的光谱几乎没有重叠部分,其光谱干涉效应可以忽略。

## 4 结 论

本文提出了一种基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积脉冲整形方法。利用该方法对啁啾脉冲堆积脉冲整形问题展开了理论分析与数值模拟,并将结果与传统的啁啾脉冲堆积脉冲整形技术进行了对比。结果表明,无论是两路还是多路脉冲堆积,基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积脉冲整形方法都可以有效地降低拍频效应,得到更为平滑的整形脉冲;且波长间隔越大,脉冲平滑效果就越好。另外,就光谱而言,采用传统的啁啾脉冲堆积脉冲方法时,会出现明显的光谱干涉效应;而基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积方法通过选择合适的波长间隔可以有效地降低甚至消除频谱干涉效应。该方法可为脉冲堆积整形技术提供新的思路。

## 参 考 文 献

- 1 A. Okishev, M. D. Skeldon, S. A. Letzring *et al.*. The pulse-shaping system for the 60-beam, 30-kJ OMEGA laser [C]. *SPIE*, 1996, **2770**: 10~18
- 2 A. M. Weiner. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(5): 1929~1960
- 3 Cao Dingxiang, Zhang Xiongjun, Zheng Wanguo *et al.*. Thermal distortion and birefringence in repetition-rate plasma electrode Pockels cell for high average power [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 292~1294
- 4 Wang Chun, Chen Shaohu, Ma Zhonglin *et al.*. The realization of the arbitrary shaping of the laser pulse by the integrated optical

- modulator in the ICF solid-state laser driver II. the integrated optical modulator [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2001, **18**(6): 530~534
- 王 春,陈绍和,马忠林等. 利用集成光学调制器实现 ICF 固体激光驱动器中激光脉冲任意整形 II. 集成光学调制器[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(6): 530~534
- 5 Ji Fan, Sui Zhan, Li Feng *et al.*. Analysis of pulse smoothing by multi-pulse interference in time domain [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(3): 401~404
- 纪 帆,隋 展,李 锋等. 时域延时多脉冲叠加平滑过程的分析[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(3): 401~404
- 6 M. Nakat suka, N. Miyanaga, T. Kanabe *et al.*. Partially coherent light source for ICF experiment [C]. *SPIE*, 1993, **1870**: 151~162
- 7 S. Matsuoka, N. Miyanaga, A. Ando *et al.*. Flexible pulse shaping of partially coherent light on GEKKO XII [C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 627~633
- 8 Hu Zhengliang, Hu Yongming, Zhao Minghui *et al.*. Analysis and simulation of optical fiber pulse stacker [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 966~969
- 胡正良,胡永明,赵明辉等. 光纤脉冲堆积器的模拟分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 966~969
- 9 Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 466~470
- 林宏奂,隋 展,王建军等. 啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 466~470
- 10 Zeng Shuguang, Zhang Bin. Inverse problem of pulse shaping by pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2272~2276
- 曾曙光,张 彬. 脉冲堆积方式产生整形脉冲的逆问题[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2272~2276
- 11 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- 12 Yang Xianglin. Optical Fiber Communication System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000
- 杨祥林. 光纤通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
- 13 Lu Huaiwei, Wei Yun, Wu Kaijun *et al.*. Design of all-fiber asymmetric interleaver with  $2\times 2$  and  $3\times 3$  fiber couplers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1106002
- 鲁怀伟,魏 贇,邬开俊等. 基于  $3\times 3$  和  $2\times 2$  光纤耦合器的全光纤不等带宽梳状滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1106002
- 14 Yu Kuanglu, Wu Chongqing, Guo Xuan *et al.*. A novel multi-point fiber optics acetylene sensing system based on dense wavelength division multiplexers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0506003
- 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