

文章编号: 0253-2239(2009)05-1305-05

# 堆积啁啾脉冲时间调制及强度演化规律

刘兰琴 林宏奂 彭志涛 粟敬钦 王建军 胡东霞 景峰 张小民

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 采用啁啾脉冲堆积的方法获得纳秒级宽带整形激光脉冲,是目前用于惯性约束聚变(ICF)的激光装置前端系统拟采用的技术路线。但这种堆积啁啾脉冲在时间上由于相干而存在时间调制,同时也将导致光谱存在调制。此外,堆积啁啾脉冲的峰值强度也随延迟时间等因素的变化而有所不同。通过数值模拟,分析了时间调制、光谱调制以及强度的演化规律。研究表明,时间调制与基元脉冲的展宽量及相邻脉冲之间的延迟时间有关,光谱调制只与相邻脉冲之间的延迟时间有关,而强度的演化则与相位因子的余弦函数演化具有一定的相似性。

**关键词** 激光光学; 宽带激光; 堆积啁啾脉冲; 时间调制; 光谱调制; 强度因子

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1305

## Evolutionary Rules of Time Modulation and Intensity of Stacked Chirped Pulses

Liu Lanqin Lin Honghuan Peng Zhitao Su Jingqin Wang Jianjun  
Hu Dongxia Jing Feng Zhang Xiaomin

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

**Abstract** The broadband nanosecond shaped laser pulse obtained by chirped pulse stacking(CPS) method can make the output stacking pulse meet the requirement of the inertial confinement fusion (ICF), and CPS is the main technique way adopted in front end systems in some laser facilities. However, temporal pulse shape modulation will exist due to the pulse coherence for chirped stacking pulse, and spectrum modulation will exist too. Moreover, the peak intensity of this stacked chirped pulses will change rapidly under different influence conditions. The evolutionary rules of the temporal pulse shape modulation, spectrum modulation and the intensity factor are reported. The results show the temporal pulse shape modulation is affected by the broadening factor and the delay time, as spectrum modulation is only affected by the delay time, and the intensity factor changes similarly with the cosine function of the phase factor.

**Key words** laser optics; broadband laser; stacked chirped pulses; temporal pulse shape modulation; spectrum modulation; intensity factor

## 1 引 言

光纤脉冲堆积方法<sup>[1~4]</sup>在惯性约束聚变(ICF)系统中,实现激光的精确时间脉冲整形<sup>[5]</sup>,在聚变靶丸的压缩和点火过程中,抑制压缩过程中产生的不稳定性<sup>[6]</sup>,提高压缩比和能量耦合效率,从而降低对激光能量的要求。但是光纤脉冲堆积方法由于多模光纤分束器串联使用,只能提供台阶状的光脉冲而

无法产生任意整形光脉冲。后来提出的啁啾脉冲堆积方法<sup>[7~9]</sup>,是将  $\text{Yb}^{3+}$  锁模脉冲序列线性啁啾展宽后通过光谱滤波至所需要的宽度。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,可获得任意整形脉冲。啁啾脉冲堆积方法结合光束匀滑技术还可有效地改善靶面辐照均匀性<sup>[10,11]</sup>,提高靶丸对激光的吸收。

**收稿日期**: 2008-08-03; **收到修改稿日期**: 2008-09-25

**基金项目**: 国家 863 计划和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2007B08005)资助课题。

**作者简介**: 刘兰琴(1973—),女,博士,副研究员,主要从事宽带激光脉冲传输放大与光束控制技术研究。

E-mail: ly\_ly2008@yahoo.com.cn

在啁啾脉冲堆积过程中,由于子脉冲之间的相干效应,将有可能导致纳秒脉冲时间波形的精细结构中可能存在皮秒量级的且具有较深调制的梳状序列结构<sup>[12,13]</sup>。如果确实存在梳状调制结构,则有可能对后续传输、放大以及谐波转换造成影响。

## 2 小宽带啁啾脉冲的堆积数学模型

啁啾高斯脉冲堆积数学模型<sup>[7~9,12,13]</sup>

$$E(T) = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k E_0 \exp\left[-\frac{(1-ib_0)(T-k\tau_d)^2}{2T_0^2}\right] \times \exp[i\omega_0(T-k\tau_d)], \quad (1)$$

式中  $n$  为堆积啁啾脉冲路数;  $\alpha_k$  为第  $k$  个基元脉冲的衰减因子;  $E_0$  为光场的峰值振幅;  $b_0$  为脉冲的啁啾参数,  $b_0 = \Delta\omega T_0$ ,  $T_0$  为脉冲的  $e^{-1}$  半宽度,  $\Delta\omega$  为光谱的  $e^{-1}$  半宽度;  $\tau_d$  为相邻脉冲的延迟时间;  $\omega_0$  为中心频率。

这里,基元脉冲的瞬时频率可表示为

$$\omega(t) = \omega_0 + b_0 t / T_0^2. \quad (2)$$

可见,对基元啁啾脉冲而言,脉冲在不同时刻所对应着不同的频率。根据(1)式,相邻脉冲之间存在交叠,且各路脉冲均来自同一光源。因此,堆积啁啾脉冲存在各基元脉冲的相互干涉问题。由于脉冲在不同时刻所对应着不同的频率,因此相邻脉冲之间的干涉效应将减弱。然而,由于相邻脉冲重叠部分的频率差恒定且初始相位相同,叠加后脉冲会出现拍频现象,即叠加后的脉冲时间波形出现周期性的“调制”,调制的周期应与频率差有关。

## 3 理论分析

由于相邻脉冲的延迟时间恒定,定义相位因子  $\beta$  为

$$\beta = \frac{b_0}{2} \left(\frac{\tau_d}{T_0}\right)^2 = \frac{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}}{T_{\text{FWHM}}} \frac{\pi c \tau_d^2}{\lambda_0^2} = \frac{1}{P} \frac{\pi c \tau_d^2}{\lambda_0^2}, \quad (3)$$

式中  $P = \frac{T_{\text{FWHM}}}{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}}$  为基元脉冲的展宽量。其中  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$  为光谱的半峰全宽,  $T_{\text{FWHM}}$  为脉冲的半峰全宽,  $\lambda_0$  为中心波长,  $c$  为光速。

相邻脉冲之间延迟  $\tau_d$  对应的频率相同,堆积啁啾脉冲出现调制,即  $\frac{b_0 \tau_d}{T_0^2} = \frac{2\pi}{T_M}$ , 因此,堆积啁啾脉冲的时间调制周期  $T_M$  可表示为

$$T_M = \frac{2\pi T_0^2}{b_0 \tau_d} = \frac{T_{\text{FWHM}}}{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}} \frac{\lambda_0^2}{c \tau_d} = P \frac{\lambda_0^2}{c \tau_d}. \quad (4)$$

由(4)式可见,脉冲的时间调制周期  $T_M$  与基元脉冲的展宽量及相邻脉冲之间的延迟时间有关。

由于相邻脉冲之间的叠加,叠加后的脉冲频谱也将出现“调制”,脉冲的频谱调制周期可表示为

$$S_{\omega M} = 2\pi / \tau_d, \quad (5)$$

从而得到脉冲的光谱调制周期为

$$S_{\lambda M} = \frac{\lambda_0^2}{c \tau_d}. \quad (6)$$

可见,光谱的调制周期  $S_{\lambda M}$  只与延迟时间有关。结合(4)式有  $T_M / S_{\lambda M} = P$ , 也就是说如果基元脉冲的展宽量一定,则脉冲的时间调制周期与光谱调制周期之比恒定。

此外,定义相同能量、相同脉宽的堆积啁啾脉冲的峰值强度与窄带脉冲的峰值强度之比为

$$\xi = \frac{I_{\text{stackpulse}}}{I_{\text{narrowpulse}}}, \quad (7)$$

$\xi$  也称为强度因子。

## 4 数值模拟

### 4.1 堆积啁啾脉冲梳状调制的存在性分析

图1所示的32路堆积啁啾脉冲实验系统光路,采用掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤锁模振荡器得到稳定的锁模光脉冲序列。将该锁模脉冲通过啁啾光纤光栅展宽并通过高斯形光谱滤波器滤波,得到标准的140 ps高斯形啁啾脉冲序列。将此脉冲选单经过光纤延迟线组成的32路脉冲堆积器,可得到任意整形光脉冲。

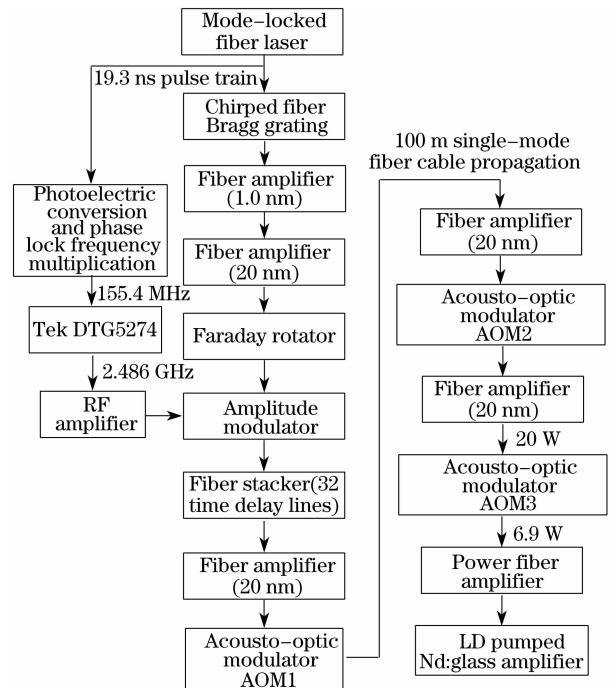


图1 堆积啁啾脉冲实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for stacked chirped pulses

在改变堆积啁啾脉冲路数的情况下,对堆积后输出脉冲的光谱进行了实验测量,同时给出了理论模拟和表达式计算结果,结果见图2。理论模拟与

实验比对参数:光谱宽度0.975 nm,脉冲宽度140 ps,时间延迟90 ps。表1汇总了其它不同路的堆积啁啾脉冲结果。

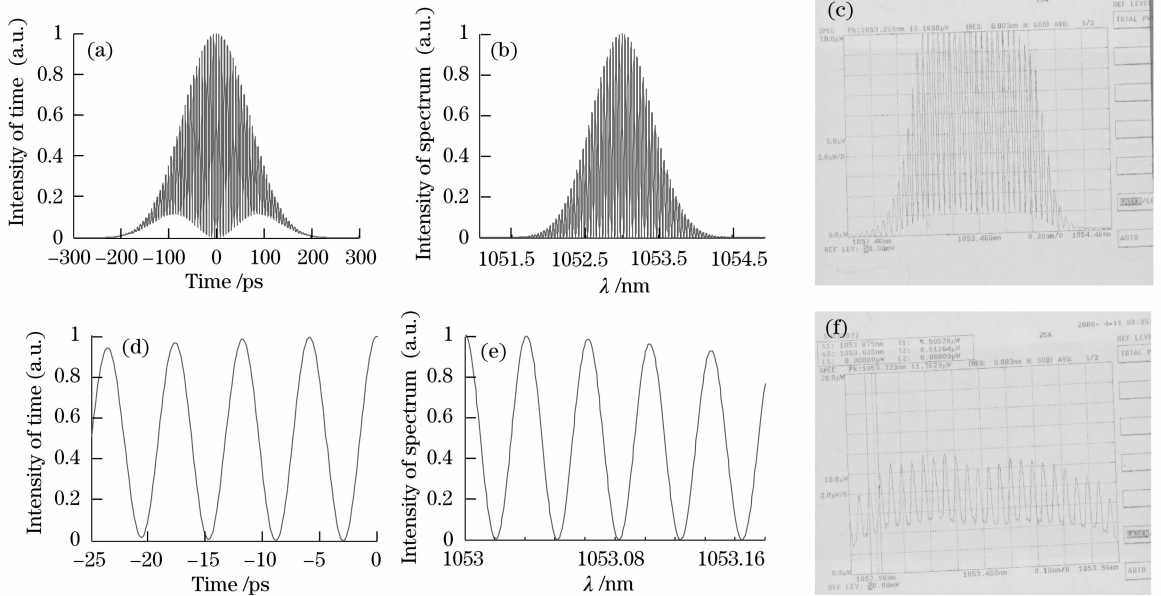


图2 基元脉冲第五路和第六路堆积结果。(a)堆积啁啾脉冲;(b)光谱;(c)光谱实验结果;  
(d)堆积啁啾脉冲局部放大;(e)光谱局部放大;(f)光谱实验结果局部放大

Fig. 2 Stacked chirped-pulse stacking results of No. 5 and No. 6 with delay time of 90 ps. (a) stacking pulse;  
(b) spectrum; (c) experimental measurement result of spectrum; (d) partially enlarged spectrum;  
(e) partially enlarged stacking pulse; (f) partially enlarged measurement result of spectrum

在图2(a)、图2(b)给出的理论时间调制周期和光谱调制周期分别为6 ps和40 pm。实验中采用分辨率为3 pm的光纤光谱仪测得的光谱调制与理论计算结果完全一致,均为40 pm。其它多路不同时间延迟下堆积啁啾脉冲的光谱调制的实验结果(表1)和理论计算结果也是一致的。由于时间波形测量仪器的局限性,实验中一直未能取得时间调制的脉

冲波形。不过,从光谱调制可间接佐证时间调制的存在,由于光谱是直接对(1)式做傅里叶变换后得到的,光谱调制已由实验证实存在。那么由(1)式直接得到的堆积啁啾脉冲存在时间调制是合理的,说明子脉冲之间的相干行为是存在的。时间调制导致光谱调制,这也是自治的。

表1 不同路数的堆积啁啾脉冲结果

Table 1 Stacked chirped-pulse results of different time delay lines

Time delay lines	Theoretical results				Measuremental results
	Period of time modulation		Period of spectrum modulation		Period of spectrum modulation /pm
	Simulation /ps	Expression (4) /ps	Simulation /pm	Expression (6) /pm	
No. 5 and No. 6	6	5.90	40	41.07	40
No. 5 and No. 7	3	2.95	20	20.53	20
No. 5 and No. 8	2.1	1.97	14	13.69	14
No. 1 and No. 5	1.5	1.47	10	10.27	10

#### 4.2 不同延迟时间对堆积啁啾脉冲的影响

计算参数中心波长1053 nm,光谱宽度0.975 nm,基元脉冲宽度130 ps,堆积啁啾脉冲个数15个。图3给出了不同延迟时间下堆积啁啾脉冲时间波形。

由图可以看出,在 $\tau_d = 88.797$  ps时,堆积啁啾脉冲时间波形顶部平坦,调制全部到底; $\tau_d = 89.5$  ps时,顶部出现“兔耳朵”,部分调制到底; $\tau_d =$

90.174 ps时,顶部包络起伏,少部分调制到底。由此可见,脉冲延迟时间 $\tau_d$ 对堆积啁啾脉冲的调制结构以及强度因子 $\xi$ 均有很大影响,脉冲延迟时间的很小变化都会使调制结构有很大的变化,堆积啁啾脉冲的顶部平坦并不意味着堆积啁啾脉冲波形优化峰值强度小。因此,首先弄清堆积啁啾脉冲的调制结构以及强度因子 $\xi$ 与哪些参量具有密切关系,以及

具有怎样的变化规律对以后研究堆积啁啾脉冲的传输放大具有重要意义。

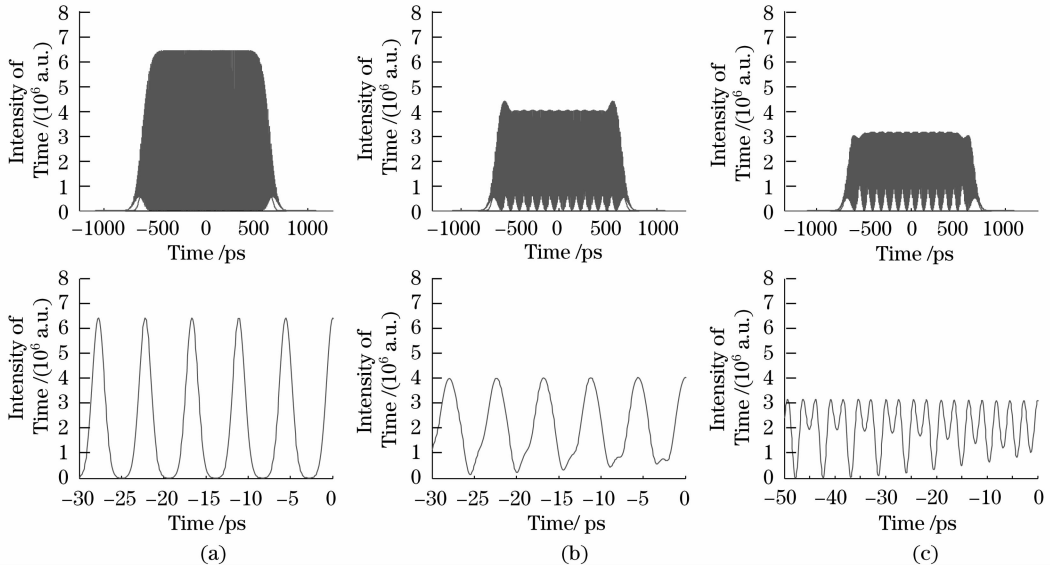


图 3 延迟时间对堆积啁啾脉冲调制的影响。(a)时间延迟 88.797 ps,强度比 2.8815;  
(b)时间延迟 89.5 ps,强度比 2.0596;(c)时间延迟 90.174 ps,强度比 1.5304

Fig. 3 Influence of delay time on stacking pulse modulation. (a)  $\tau_d=88.797$  ps,  $\xi=2.8815$ ;  
(b)  $\tau_d=89.5$  ps,  $\xi=2.0596$ ; (c)  $\tau_d=90.174$  ps,  $\xi=1.5304$

### 4.3 不同延迟时间对堆积啁啾脉冲的影响规律

图 4 给出了在堆积啁啾脉冲时间宽度和光谱宽度不变的情况下,  $T_M$ 、 $S_{\lambda M}$  与  $\tau_d$  的变化关系。可见,  $T_M$ 、 $S_{\lambda M}$  与  $\tau_d$  具有反比关系。延迟时间越长,脉冲之间的“拍频”越弱,周期越小。

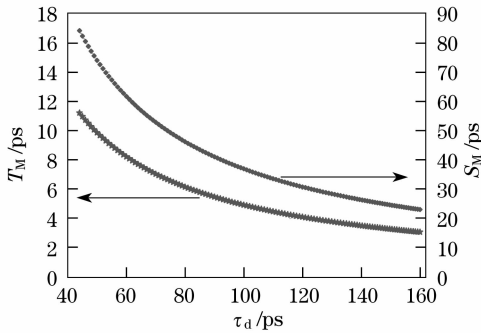


图 4  $\tau_d$  对  $T_M$ 、 $S_{\lambda M}$  的影响规律

Fig. 4 Influence of  $\tau_d$  on  $T_M$  and  $S_{\lambda M}$

图 5 给出了在堆积啁啾脉冲时间宽度和光谱宽度不变的情况下,  $\xi$ 、 $\cos^2 \beta$  与  $\tau_d$  的变化关系。 $\xi$  与  $\tau_d$  之间为振荡关系,其振荡周期和  $\cos^2 \beta$  与  $\tau_d$  之间的变化周期具有一致性,可见延迟时间对相位起作用,从而影响峰值强度的变化。强度因子的包络并不似  $\cos^2 \beta$  的包络一样局限在  $[0, 1]$  之间,而是呈衰减趋势,分析其原因,延迟越长,脉冲之间的“拍频”越弱,对峰值强度的影响也就越弱。

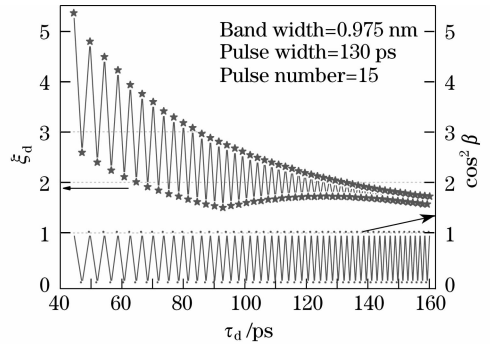


图 5  $\tau_d$  对  $\xi$ 、 $\cos^2 \beta$  的影响规律

Fig. 5 Influence of  $\tau_d$  on  $\xi$  and  $\cos^2 \beta$

### 4.4 脉冲宽度对堆积啁啾脉冲的影响规律研究

图 6 给出了在堆积啁啾脉冲光谱宽度、延迟时间不变的情况下,  $T_M$ 、 $\xi$ 、 $\cos^2 \beta$  与  $T_{FWHM}$  的变化关系。

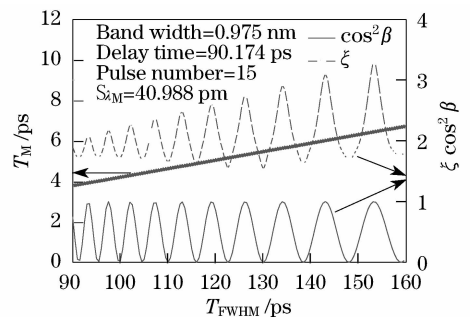


图 6  $T_M$ 、 $\xi$ 、 $\cos^2 \beta$  与  $T_{FWHM}$  的关系

Fig. 6 Variation of  $T_M$ 、 $\xi$ 、 $\cos^2 \beta$  with  $T_{FWHM}$

由图可见,时间调制周期  $T_M$  与基元脉冲的时间宽度  $T_{FWHM}$  之间呈线性增长关系; $\xi$  与  $T_{FWHM}$  之间呈弹性、振荡发散关系,变化周期同  $\cos^2\beta$  与  $T_{FWHM}$  的完全一致。

#### 4.5 带宽对堆积啁啾脉冲的影响规律

图 7 给出了在堆积啁啾脉冲在脉宽、延迟时间不变的情况下, $T_M$ 、 $\xi$ 、 $\cos^2\beta$  与  $\Delta\lambda_{FWHM}$  的变化关系。时间调制周期  $T_M$  与基元脉冲的时间宽度  $\Delta\lambda_{FWHM}$  之间呈反比关系; $\xi$ 、 $\cos^2\beta$  二者与  $\Delta\lambda_{FWHM}$  的变化具有一致关系,为  $\pi$  周期关系。

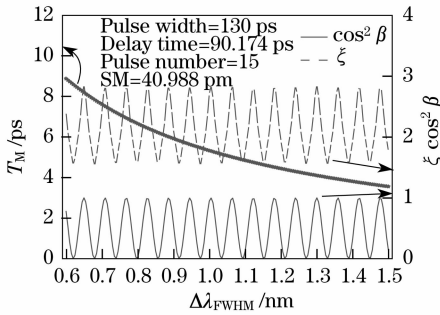


图 7  $T_M$ 、 $\xi$ 、 $\cos^2\beta$  与  $\Delta\lambda_{FWHM}$  的关系

Fig. 7 Variation of  $T_M$ ,  $\xi$ ,  $\cos^2\beta$  with  $\Delta\lambda_{FWHM}$

## 5 结 论

通过理论与实验相结合的方法,证实了啁啾脉冲堆积方法确实会因子脉冲之间的相于效应而引起堆积啁啾脉冲存在梳状调制结构。理论推导了堆积啁啾脉冲的时间调制周期和光谱调制周期的表达式,并给出了数值模拟结果。结果表明,基元脉冲时间宽度越大,堆积啁啾脉冲的时间调制周期越大,其谱宽越宽,延迟时间越长,则调制周期越小。而光谱的调制周期只与延迟时间有关,延迟时间越长,则调制周期越小。同时还对堆积啁啾脉冲的强度演化规律进行了研究。结果表明,堆积啁啾脉冲的强度因子与延迟时间有密切关系,并具有周期性变化的特点,其变化周期与相位因子  $\beta$  的函数  $\cos^2\beta$  的变化周期具有严格的一致性。此结果对研究、控制堆积啁啾脉冲在传输放大过程中的非线性效应具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 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
- Hu Zhengliang, Hu Yongming, Zhao Minghui, Analysis and simulation of optic 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
- Nakat Suka M, Miyanaga N, Kanabe T *et al.*. Partially coherent light source for ICF experiment[C]. *Proc. SPIE*, 1993, **1870**: 151~162
- Matsuoka S, Miyanaga N, Ando A *et al.*. Flexible pulse shaping of partially coherent light on GEKKO X[C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 627~633
- Okishev A, Skeldon M D, Letzring S A *et al.*. The pulse-shaping system for the 60-beam, 30-kJ OMEGA laser [C]. *SPIE*, 1996, **2770**: 10~18
- Skupsky S, Lee L. Uniformity of energy deposition for laser driven fusion[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(7):3662~3671
- Sui Zhan, Lin Honghuan, Wang Jianjun *et al.*. A compact nanosecond-pulse shaping system based on pulse stacking in fibers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(8):2074~2076
- Wang Jianjun, Lin Honghuan, Sui Zhan *et al.*. Temporal pulse shaping by chirped pulse stacking in fiber time delay lines[C]. *SPIE*, 2006, **6287**:62870G
- Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):401~404  
林宏免,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):401~404
- Zhang Rui, Zhang Xiaomin, Su Jingqin *et al.*. Temporal beam smoothing technique using chirped pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1512~1516  
张锐,张小民,粟敬钦等,采用啁啾脉冲堆积的时间束平滑技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1512~1516
- Regan S P, Marozas J A, Craxton R S *et al.*. Performance of 1-MHz bandwidth, two-dimensional smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing of high-power, solid-state laser beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(5):998~1002
- Zhou Xiaojun, Zhang Zhiyao, Sui Zhan *et al.*. Characteristics of nonlinear transmission of stacking chirped pulses in single-mode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1):159~163  
周晓均,张智遥,隋展等,堆积啁啾脉冲在单模光纤中的非线性传输特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1):159~163
- Zeng Shuguang, Li Kun, Zhang Bin, Third Harmonic generation of Broadband laser by chirped pulses stacking method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2):207~200  
曾曙光,李琨,张彬,啁啾脉冲堆积宽带激光的三次谐波产生[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(2):207~211