

文章编号:1004-4213(2010)06-1070-8

# 啁啾脉冲堆积宽带激光的时间与频谱特性分析\*

王友文, 陈列尊, 游开明, 陆世专

(衡阳师范学院 物理与电子信息科学系, 湖南 衡阳 410082)

**摘要:** 理论研究了啁啾堆积脉冲宽带激光时间与频谱特性与子脉冲参量的关系. 结果表明, 变换极限子脉冲堆积所得的脉冲平滑, 频率啁啾型与时间啁啾型子脉冲堆积所得脉冲出现时间调制, 平滑性变差, 从频谱上看, 前者出现单一谱线, 而后可看到多条谱线; 随着子脉冲间延迟的增加, 堆积脉冲由脉冲间干涉引起的时间调制增多, 但幅度减弱, 而频谱的谱线数量增加. 所得结果可为适当地选择堆积脉冲参量以获得所需的时间与频谱形状的宽带激光提供参考.

**关键词:** 啁啾脉冲; 宽带激光; 频谱特性; 时间调制

中图分类号: O437

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103906.1070

## 0 引言

高功率驱动器采用宽带激光传输不仅能有效地改善靶面照明均匀性, 而且对激光系统本身也有益<sup>[1-2]</sup>. 啁啾脉冲堆积是产生 ns 量级宽带激光脉冲的重要方法, 是目前用于 ICF 的激光装置前端系统拟采用的技术路线<sup>[3-5]</sup>. 它不仅能输出任意整形的光脉冲, 预补偿传输放大过程所造成的波形畸变, 从而满足激光压缩脉冲对形状的特定需求, 还能提供时间上零同步的可整形压缩脉冲和超短脉冲<sup>[6-8]</sup>. 此外, 其光谱时间扫描特性同时为激光驱动的惯性约束聚变打靶束匀滑提供了新方法<sup>[9-10]</sup>, 且具有高于时间相位调制宽带激光的三倍频转换效率<sup>[11]</sup>. 啁啾脉冲堆积是将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, 获得任意整形脉冲. 美国罗彻斯特大学和日本大阪大学分别用分光镜分束、多模光纤分束光脉冲堆积整形<sup>[12-14]</sup>. 但前者采用大量分光镜占用很大空间, 后者只能提供台阶状的光脉冲而无法产生任意整形光脉冲. 近来提出的啁啾脉冲堆积方法, 是利用并联可编程单模光纤延迟线进行啁啾光脉冲堆积整形<sup>[3-5]</sup>. 对于这种啁啾脉冲堆积产生的宽带光束, 胡正良等分析了子脉冲形状、脉冲间时延等对脉冲堆积波形的影响<sup>[15]</sup>. 纪帆等分析了满足平滑要求的延迟时间和脉冲间延时相位差所需的控制准确度<sup>[16]</sup>. 林宏兔等考察了脉冲间延迟对脉冲顶部调制的影响<sup>[5]</sup>. 黄小

东等分析了两路子脉冲情况下时间与频谱调制周期与时延、啁啾之间的关系<sup>[17]</sup>. 刘兰琴等研究了其时间与光谱调制周期与子脉冲展宽量、脉冲间延迟的关系, 及其调制结构在传输与放大过程中的变化<sup>[18-19]</sup>. 周晓军等分析了其在光纤中的非线性传输特性<sup>[20]</sup>. 然而, 目前未有全面考察子脉冲参量对堆积宽带激光的时间及频谱特性的影响的文献报道. 本文全面地研究了子脉冲参量对堆积宽带激光的时间特性, 特别是频谱特性的影响.

## 1 子脉冲参量对堆积脉冲时间特性与光谱特性的影响的理论分析

设脉冲具有线性初始啁啾, 由高斯型或超高斯型堆积啁啾脉冲堆积法获得的宽带啁啾脉冲的场分布可表示为

$$E(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k \exp \left[ -\frac{(t - krT_{FWHM})^{2m}}{2\tau^{2m}} - ib \frac{(t - krT_{FWHM})^2}{2\tau^2} - i\omega_0(t - krT_{FWHM}) \right] \quad (1)$$

为简化各种参量的影响, 方程采用归一化形式表达, 指数第一项描述脉冲的形状, 第二项为脉冲的啁啾项,  $b$  为啁啾量 (Chirp), 最后一项中  $k\omega_0 r T_{FWHM}$  是由于不同路径长度传输后引起的脉冲之间相对位相延迟差,  $T_{FWHM}$  为每个脉冲的半高全宽,  $\tau$  为  $1/e$  强度脉冲宽度,  $T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} \tau$ ,  $r$  表示脉冲间延迟相对于脉宽的比例 (一般可取 0.7 左右), 其中  $k$  为脉冲序数,  $\alpha_k$  为第  $k$  个脉冲的振幅. 特别地,  $m=1$  对应高斯脉冲堆积, 有

$$E(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k \exp \left[ -\frac{(1+ib)(t - krT_{FWHM})^2}{2\tau^2} - i\omega_0(t - krT_{FWHM}) \right] \quad (2)$$

\* 湖南省教育厅资助科研项目 (08C176) 和衡阳师范学院科学基金 (08B03) 资助

Tel: 0734-8484935

Email: hysjwyw123@163.com

收稿日期: 2009-12-17

修回日期: 2010-01-24

式(2)为一等比等差数列,相当于对  $k$  求积分,即

$$E(t) \approx \exp \left[ -\frac{(1+ib)t^2}{2\tau^2} \right] \exp(-i\omega_0 t) \int_0^{n-1} \alpha_k \cdot \exp \left\{ -\frac{(1+ib) [(rT_{\text{FWHM}})^2 k^2 - 2trT_{\text{FWHM}}k]}{2\tau^2} + i(k\omega_0 rT_{\text{FWHM}}) \right\} dk \quad (3)$$

若各路的振幅系数  $\alpha_k$  相同,经傅里叶变换,可得其频谱为

$$|E(\omega)| = \tau\alpha_k \sqrt{\frac{2\pi}{1+b^2}} \exp \left[ -\frac{(\omega-\omega_0)^2 \tau^2}{2(1+b^2)} \right] \cdot \left| \frac{\sin(N\omega rT_{\text{FWHM}}/2)}{\sin(\omega rT_{\text{FWHM}}/2)} \right| \quad (4)$$

可以看出,式(4)可看作为高斯型透过率的透射光栅的夫琅禾费衍射图样:在高斯衍射的轮廓下,有许多干涉引起的条纹.若  $2b = \Delta\omega\tau$ ,且  $b > 3$ ,则有

$$|E(\omega)| \approx 0.135\tau\alpha_k \sqrt{\frac{2\pi}{1+b^2}} \left| \frac{\sin(N\omega rT_{\text{FWHM}}/2)}{\sin(\omega rT_{\text{FWHM}}/2)} \right| \quad (5)$$

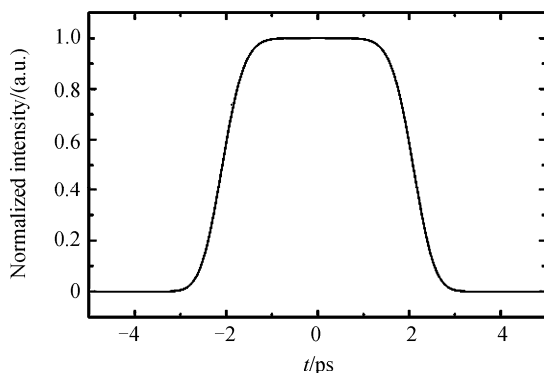
即其谱宽几近不变.特别是相同谱宽,不同脉宽单脉冲堆积,此时轮廓不变,而谱线主极大位置由  $\sin(N\omega rT_{\text{FWHM}}/2) = \sin(\omega rT_{\text{FWHM}}/2) = 0$  决定,即  $\omega rT_{\text{FWHM}}/2 = j\pi$  决定,故主极大间隔为  $\Delta\omega = 2\pi/rT_{\text{FWHM}}$ ,由延迟决定,啁啾变大时,  $T_{\text{FWHM}}$  变大,间隔变小,谱线主极大增多.而对于频率啁啾脉冲,啁啾量变大时,带宽增加,在其他参量不变时,可看见的谱线条纹数量将增加.

对一般任意形状的堆积脉冲(包括高斯型),假定脉冲具有线性初始啁啾,脉冲堆积法获得的宽带啁啾脉冲的场分布可表示为

$$E(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k f(t - krT_{\text{FWHM}}) \cdot \exp[-i\omega_0(t - krT_{\text{FWHM}})] \quad (6)$$

若参入叠加的脉冲振幅相同,其频谱则为

$$|E(\omega)| = |\alpha_k F(\omega - \omega_0)| \frac{\sin(N\omega rT_{\text{FWHM}}/2)}{\sin(\omega rT_{\text{FWHM}}/2)} \quad (7)$$



(a) Temporal wave-form of a pulse stacked by 7 transform-limited sub-pulses

即同样为单脉冲频谱下的多条谱线,谱线的多少由单脉冲谱宽及延迟决定,两主极大间有  $N-1$  个极小(0点).然而,由于谱宽  $\Delta\omega = \omega - \omega_0 = 2\pi/T$ ,而  $\text{Sinc}(\ast)$  决定的谱线间距为  $2\pi/rT$ ,因而只有中央谱线可以看到( $r < 1$ ).对于频率啁啾脉冲,啁啾量变大时,带宽增加,在其他参量不变时,可看见的条纹数量将增加.这与前面高斯型堆积脉冲的频谱特性具有完全相同的特征.

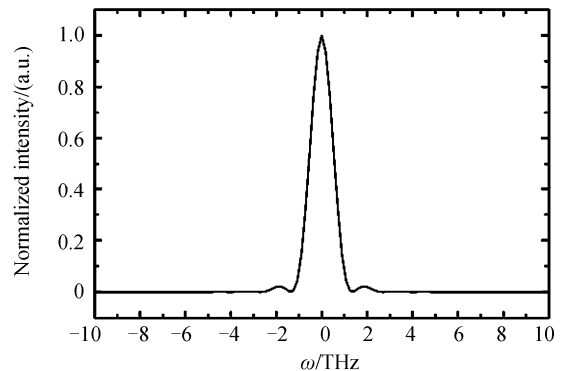
当堆积脉冲的数量增加时,每个周期中变换所得的谱形状都是一样的,但每个有一相移,叠加的效果,即为干涉,变成条纹状分布.随着周期数的增加,谱的强度增加,但谱宽不变化.这可从周期函数的傅立叶变换获得理解.

## 2 数值模拟结果

考察工作波长为 1 053 nm,角频率  $1.8 \times 10^{15}$  Hz 的子脉冲光波.并设子脉冲为高斯波形.变换极限子脉冲光强  $1/e$  全宽 1 ps,带宽约 1.17 nm.

### 2.1 堆积脉冲时间波形与光谱特性随子脉冲数量变化

图 1 为不同数量光强  $1/e$  全宽度 1 ps,变换极限脉冲(啁啾量 Chirp=0)子脉冲,时间延迟 0.7 脉冲  $1/e$  全宽,堆积所得脉冲的时间波形与光谱分布图.图 1(a)和(b)为 7 个子脉冲堆积的结果,(c)和(d)为 32 个子脉冲堆积的结果.从图中可以看出,32 个子脉冲堆积除了时间上延续的更长以外,与 7 路堆积脉冲光场的时间分布相似,所得脉冲均很光滑.从二者的频谱看,除了 7 个脉冲堆积的谱线宽度较 32 路的略宽以外,分布也很相近,这可以从前面的解析结果中得到解释,谱线宽度为  $\pi/Nr\omega T$ ,因为数量  $N$  增加后,谱线宽度变窄.



(b) Frequency spectrum of a pulse stacked by 7 transform-limited sub-pulses

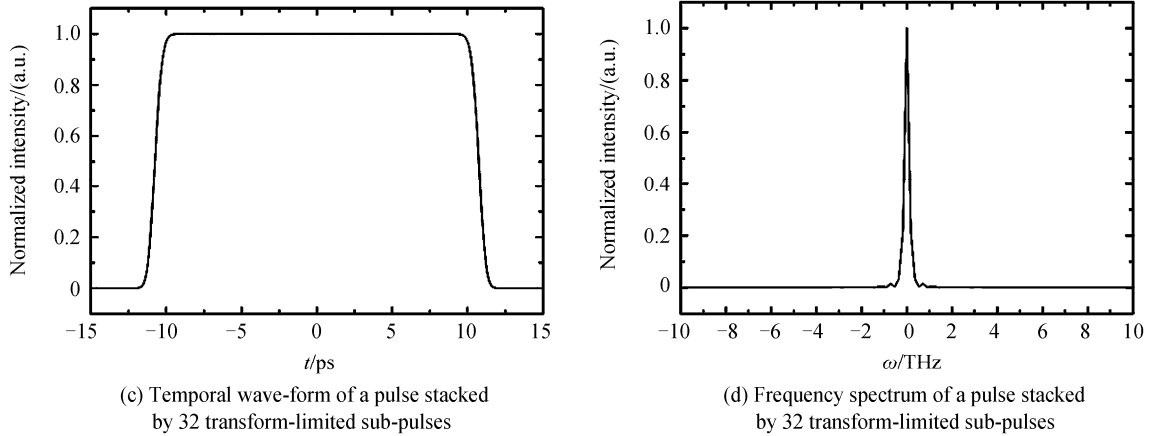


图 1 不同数量变换极限脉冲(啾啾量 Chirp=0)堆积脉冲的时间波形与光谱分布  
Fig. 1 Temporal wave-form and frequency spectrum of the broadband laser pulse stacked by various numbers of transform-limited pulses

图 2 为不同数量子脉冲  $1/e$  全宽度 1 ps, 啾啾脉冲(啾啾量 Chirp=10), 时间延迟 0.7 脉冲  $1/e$  全宽, 堆积后的时间波形与光谱分布图. 由  $\Delta\omega = \sqrt{(1+C^2)}/\Delta T$ , 可知在脉宽不变的情况下, 引入啾啾, 相当于子脉冲的带宽增加. 图 2(a)和(b)为 7 个子脉冲堆积的结果, 图 2(c)和(d)为 32 个子脉冲堆积的结果. 从图中可以看出, 随着啾啾的引入, 带宽增加, 脉冲的光滑度下降, 脉冲上出现许多的调制,

导致脉冲质量下降, 说明带宽的增加, 不利于脉冲堆积所得脉冲的时间光滑. 而在光谱上则可以看到, 相对于变换极限脉冲堆积结果, 谱线数量明显增加, 整个光谱的频谱宽度变宽, 这是由于参入堆积的子脉冲的频谱宽度变宽的结果; 与变换极限情况类似的是, 32 路子脉冲堆积的光谱谱线较 7 路子脉冲的略窄, 但可以看到的谱线数量是一样的, 频谱宽度也相同.

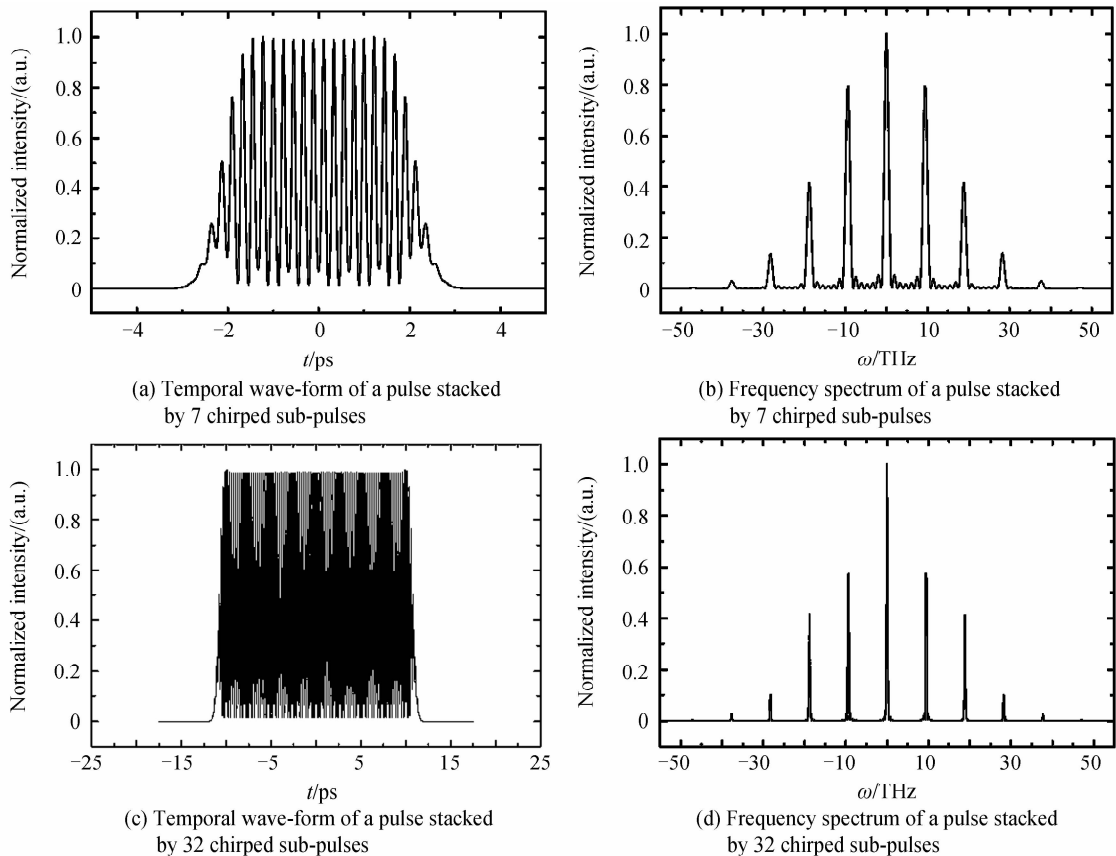


图 2 不同数量啾啾脉冲(啾啾量 Chirp=10)堆积脉冲的时间波形与光谱分布  
Fig. 2 Temporal wave-form and frequency spectrum of the broadband laser pulse stacked by various numbers of chirped pulses

## 2.2 堆积脉冲时间波形与光谱特性随子脉冲宽度(时间啾啾,带宽不变)变化

图 3 为 32 路带宽约 1.2nm,不同时间宽度(时间啾啾)子脉冲,时间延迟 0.7 脉冲 1/e 全宽,堆积所得脉冲的时间波形与光谱分布图.图 3(a)和(b)

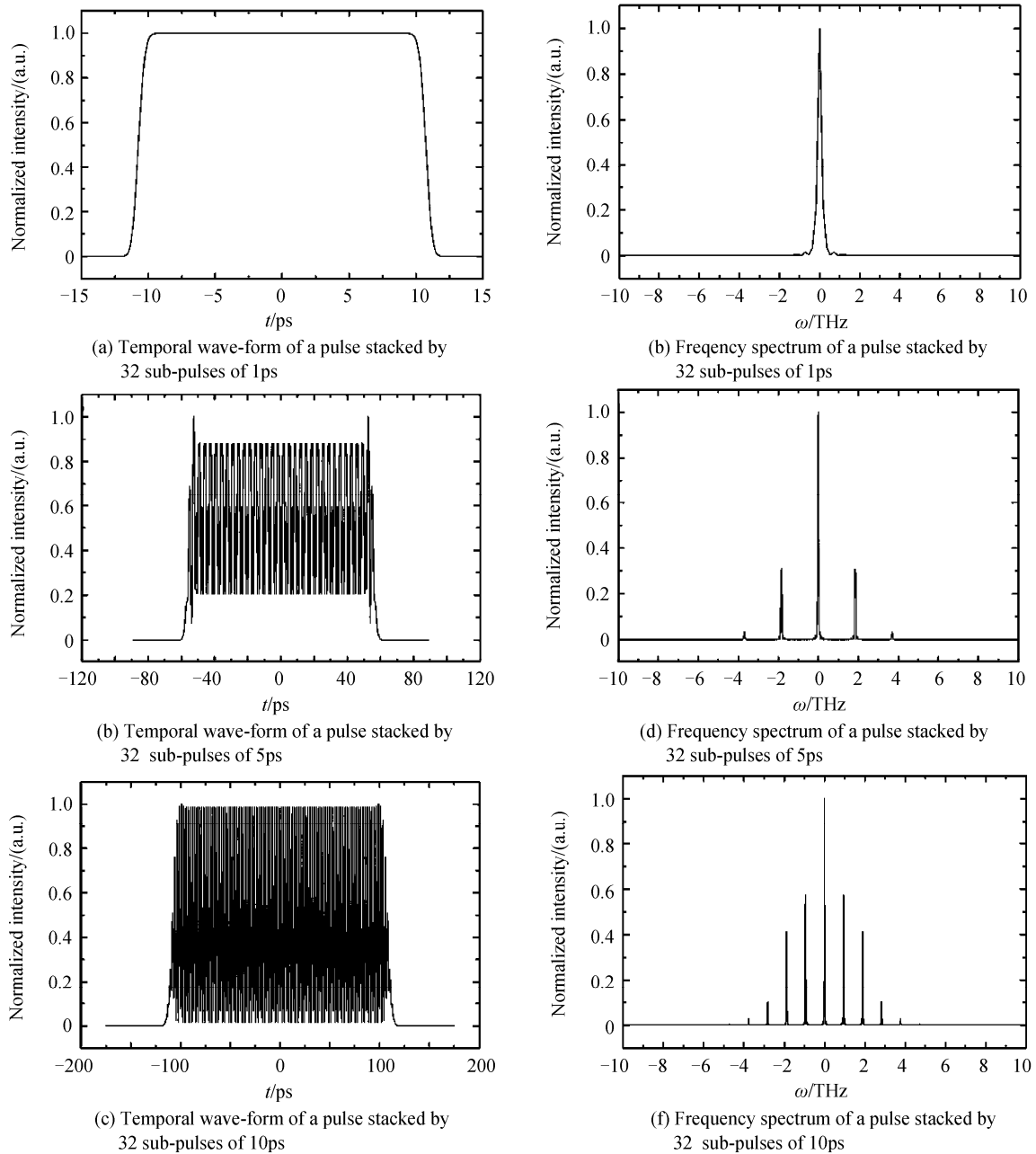


图 3 不同脉宽啾啾脉冲(带宽一定)堆积后的时间波形与光谱分布

Fig. 3 Temporal wave-form and frequency spectrum of the broadband laser pulse stacked by chirped pulses with various sub-pulse width for given spectrum width

从图 3 可以看出,在带宽一定的情况下,随着时间啾啾的增加,子脉冲宽度增加,堆积脉冲的宽度增加,并且,变换极限子脉冲堆积所得堆积脉冲的时间分布光滑平整,随着时间啾啾量的增加,堆积脉冲出现时间调制,脉冲的质量下降.从光谱上看,随着时间啾啾增加,脉宽增加,导致绝对延迟增加(0.7T),谱线间距变小,可见谱线数量增多,而总的频谱宽度

为光强 1/e 全宽 1 ps 变换极限(啾啾量 Chirp=0)子脉冲堆积的结果,图 3(c)和(d)为光强 1/e 全宽 5 ps 时间啾啾(啾啾量 Chirp=5)子脉冲堆积的结果,图 3(e)和(f)为光强 1/e 全宽 10 ps 时间啾啾(啾啾量 Chirp=10)子脉冲堆积的结果.

不变.

图 4 为 32 路带宽不同,时间宽度不同子脉冲,时间延迟 0.7 脉冲 1/e 全宽,堆积所得脉冲的时间波形与光谱分布图.图 4(a)和(b)为光强 1/e 全宽 5 ps 变换极限(啾啾量 Chirp=0)子脉冲堆积的结果,图 4(c)和(d)为光强 1/e 全宽 10 ps 变换极限(啾啾量 Chirp=0)子脉冲堆积的结果.可见,变换

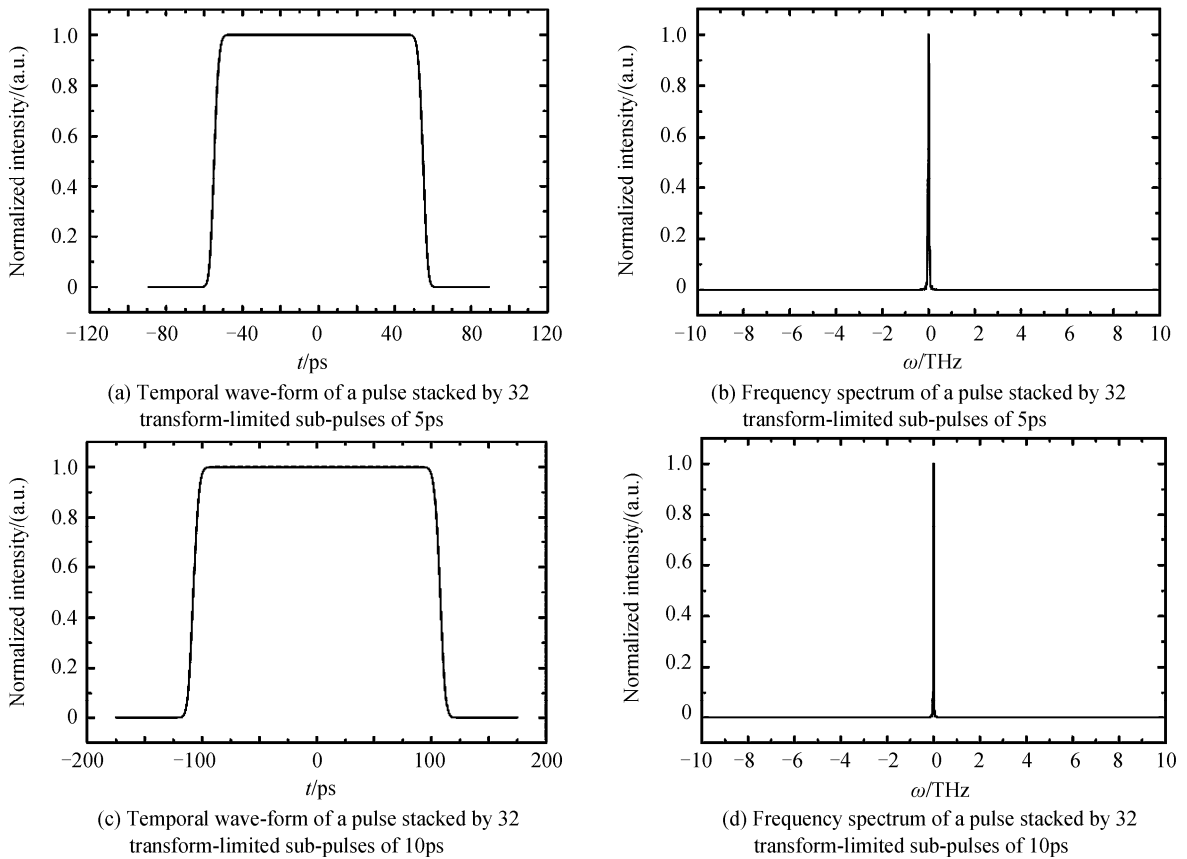


图 4 不同脉宽变换极限子脉冲堆积脉冲的时间波形与光谱分布

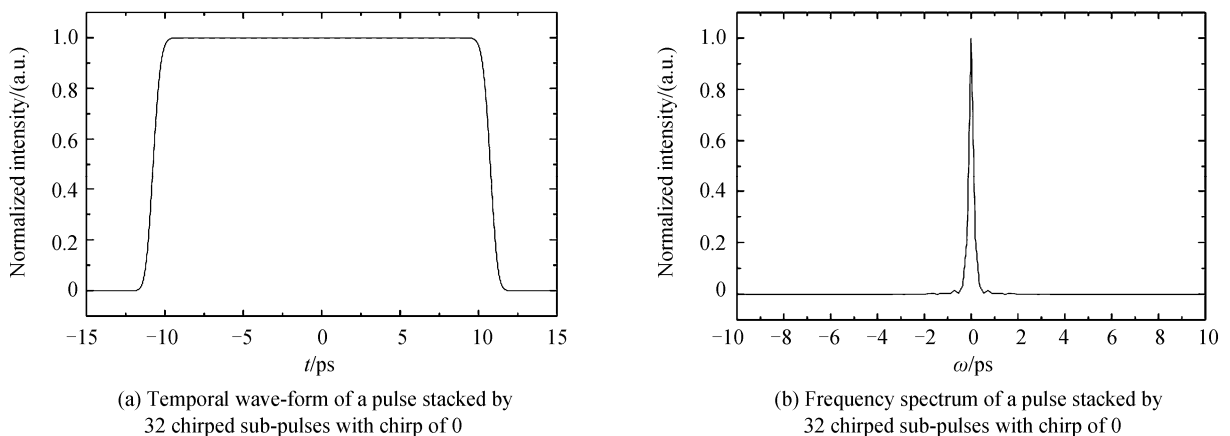
Fig. 4 Temporal wave-form and frequency spectrum of the broadband laser pulse stacked by transform-limited pulses with various sub-pulse width

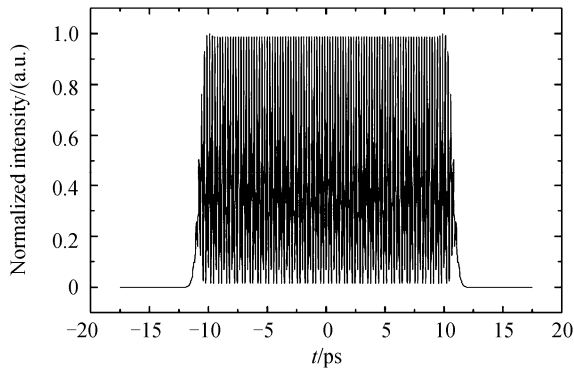
极限子脉冲堆积所得脉冲很光滑,没有时间调制. 比较上图啾啾型子脉冲,可知时间啾啾的引入会降低堆积脉冲的时间平滑度. 从光谱图上看,只能看到变换极限子脉冲堆积所得脉冲一条谱线,这与前面理论分析的结果一致,因为堆积后谱线间距大于堆积脉冲的频谱宽度.

### 2.3 堆积脉冲时间波形与光谱特性随子脉冲频率啾啾变化

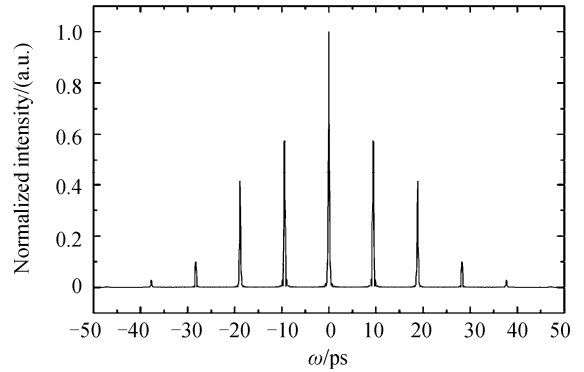
图 5 为 32 路光强  $1/e$  全宽 1 ps,带宽不同(频率啾啾)子脉冲,时间延迟 0.7,堆积所得脉冲的时

间波形与光谱分布图. 图 5(a)和(b)为光强  $1/e$  全宽 1 ps 变换极限型(啾啾量  $\text{chirp}=0$ ),带宽 1.2 nm 子脉冲堆积的结果,图 5(c)和(d)为光强  $1/e$  全宽 1 ps 频率啾啾型(啾啾量  $\text{chirp}=10$ ),带宽 12 nm 子脉冲堆积的结果. 从图 5 可以看出,变换极限子脉冲堆积所得脉冲平滑,没有调制,频谱上只能看到一条谱线;而对于频率啾啾型子脉冲堆积所得脉冲,出现较多时间调制,脉冲平滑性下降,频谱上看到较多的谱线,这是由于谱线间隔一定时,带宽增加的结果.





(c) Temporal wave-form of a pulse stacked by 32 chirped sub-pulses with chirp of 10



(d) Frequency spectrum of a pulse stacked by 32 chirped sub-pulses with chirp of 10

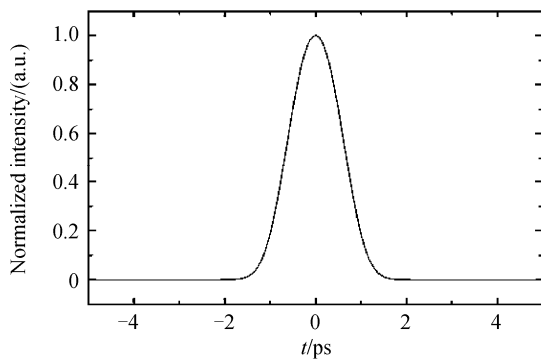
图 5 不同频率啁啾脉冲(脉宽一定)堆积脉冲的时间波形与光谱分布

Fig. 5 Temporal wave-form and frequency spectrum of the broadband laser stacked by chirped pulses with various sub-pulse chirps for given sub-pulse width

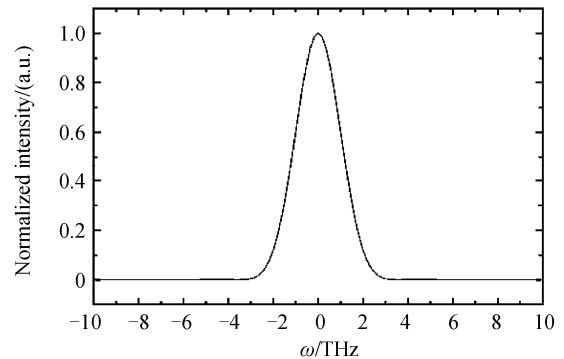
## 2.4 堆积脉冲时间波形与光谱特性随子脉冲之间延迟变化

图 6 为 7 路光强  $1/e$  全宽 1 ps, 啁啾为 0 的变换极限子脉冲, 不同时间延迟, 堆积所得脉冲的时间波形与光谱分布图. 图 6(a) 和 (b) 为子脉冲间延迟 0.25 个脉冲全宽的堆积结果, 图 6(c) 和 (d) 为子脉冲间延迟 0.7 个脉冲全宽的堆积结果. 从图 6 可以看出, 变换极限子脉冲堆积所得脉冲均很光滑平

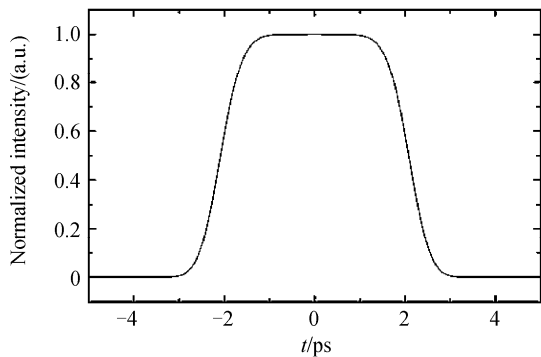
整, 没有时间调制, 随着延迟的增加, 堆积脉冲的宽度增加; 从频谱上看均只能到一条谱线, 而延迟较小时的谱线相对延迟较大者的谱线宽度略宽, 这可以从解析结果获得解释. 由于谱宽  $\Delta\omega = 2\pi/T$ , 而谱线间距为  $2\pi/rT$ , 故只有中央谱线可以看到 ( $r < 1$ ). 而谱线宽度则为  $2\pi/NrT$ , 故随着延迟量增加, 谱线宽度变窄.



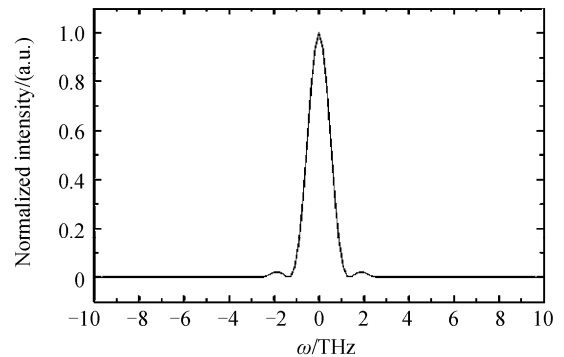
(a) Temporal wave-form of a pulse stacked by 7 transform-limited sub-pulses with time-delay of  $0.25T$



(b) Frequency spectrum of a pulse stacked by 7 transform-limited sub-pulses with time-delay of  $0.25T$



(c) Temporal wave-form of a pulse stacked by 7 transform-limited sub-pulses with time-delay of  $0.7T$



(d) Frequency spectrum of a pulse stacked by 7 transform-limited sub-pulses with time-delay of  $0.7T$

图 6 不同脉冲间延迟的变换极限子脉冲堆积脉冲的时间波形与光谱分布

Fig. 6 Temporal wave-form and frequency spectrum of the broadband laser pulse stacked by transform-limited pulses with various time delay between neighboring sub-pulse

图 7 为 7 路光强  $1/e$  全宽 1 ps, 带宽不同的频率啁啾子脉冲, 不同时间延迟堆积所得脉冲的时间波形与光谱分布图. 图 7(a) 和 (b) 为子脉冲间延迟 0.25 个脉冲全宽的堆积结果, 图 7(c) 和 (d) 为子脉冲间延迟 0.7 个脉冲全宽的堆积结果. 从图 7 可以看出, 频率啁啾型子脉冲堆积所得脉冲出现时间调制, 脉冲平滑性变差, 随着延迟的增加, 堆积脉冲的

宽度增加; 并且, 随着子脉冲间延迟的增加, 堆积脉冲时间调制增多, 但调制的幅度有所减弱. 从频谱上看, 随着子脉冲间延迟的增加, 谱线数量增加. 脉冲谱宽一定时 (由于啁啾引入, 使谱宽比变换极限时成倍增加), 谱线间距为  $2\pi/rT$ ,  $r$  越小, 间隔越大, 看到的谱线越少, 反之, 看到的谱线越多.

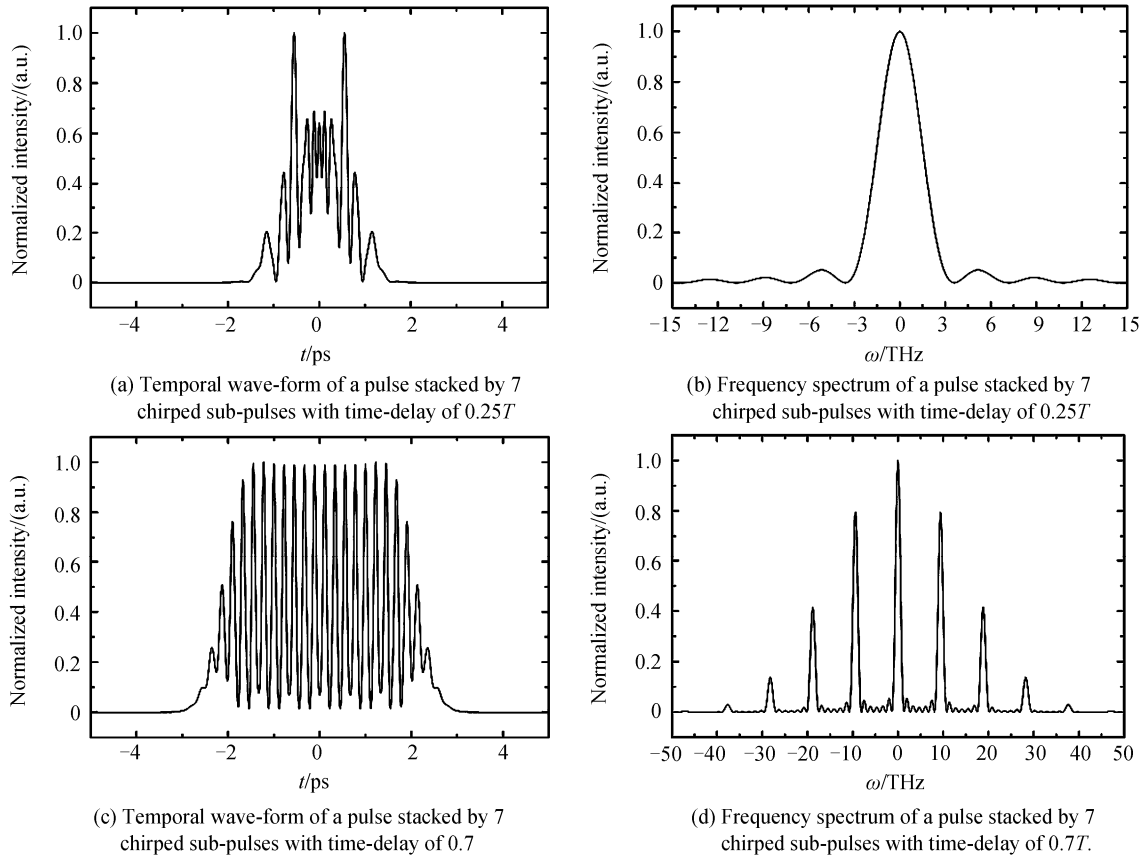


图 7 不同脉冲间延迟的啁啾子脉冲堆积脉冲的时间波形与光谱分布

Fig. 7 Temporal wave-form and frequency spectrum of the broadband laser pulse stacked by chirped pulses with various time delay between neighboring sub-pulse

### 3 结论

理论与数值研究啁啾堆积脉冲宽带激光时间与频谱特性与子脉冲参数的关系. 结果表明, 变换极限子脉冲堆积所得的脉冲平滑, 频率啁啾型与时间啁啾型子脉冲堆积所得脉冲出现时间调制, 平滑性变差, 从频谱上看, 前者出现单一谱线, 而后者可看到较多谱线; 随着子脉冲间延迟的增加, 堆积脉冲时间调制增多, 但调制的幅度有所减弱, 而频谱的谱线增加; 堆积脉冲数量对脉冲时间调制的影响不大, 随着堆积脉冲数量的增加, 堆积脉冲宽度增加, 谱线数量不变, 但每条谱线的宽度有所减小. 数值结果与理论分析的结果基本一致.

#### 参考文献

[1] FAN D, ZHANG X, FU X, *et al.* A conceptual design of multi-PW laser system [C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 64-70.

[2] PENNINGTON D M, BRITTEN J A, MILLER J L, *et al.* The petawatt laser system [C]. LLNL Laser Program Quarterly Report, 1997, UCRL-LR-105821-97(4): 230-238.

[3] SUI Z, LIN H H, WANG J J, *et al.* A compact nanosecond-pulse shaping system based on pulse stacking in fibers [J]. *Chin Phys Lett*, 2006, **23**(8): 2074-2076.

[4] WANG J J, LIN H H, SUI Z, *et al.* Temporal pulse shaping by chirped pulse stacking in fiber time delay lines [C]. *SPIE*, 2006, **62870**: 62870G. 1-62870G. 7.

[5] LIN H H, SUI Z, WANG J J, *et al.* Optical pulse shaping by chirped pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 465-470.

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): 465-470.

[6] CHUANG Y H, KESSLER T J, SKUPSKY S. Laser-beam pulse shaping using dispersive filtering [C]. *SPIE*, 1993, **1870**: 34-46.

[7] LAWSON J K, SPECK D R, BIBEAU C, *et al.* Temporal shaping of third-harmonic pulses on the NOVA laser system [J]. *Appl Opt*, 1992, **31**(24): 5061-5068.

[8] LIND J D, MEAD W C. Two dimensional simulation of fluid

- instability in laser fusion pellets [J]. *Phys Rev Lett*, 1975, **34**(20):1273-1276.
- [9] SKUPSKY S, SHORT R W, KESSLER T, *et al.* Improved laser beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light [J]. *J Appl Phys*, 1989, **66**(8):3456-3462.
- [10] ZHANG Rui, ZHANG Xiao-min, SU Jing-qin, *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.
- [11] ZENG Shu-guang, 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):207-211.  
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.
- [12] THOMAS C E, SIEBERT L D. Pulse shape generator for laser fusion[J]. *Appl Opt*, 1976, **15**(2):462-465.
- [13] NAKATSUKA M, MIYANAGA N, KANABE T, *et al.* Partially coherent light source for ICF experiment[C]. *SPIE*, 1993, **1870**:151-162.
- [14] MATSUOKA S, MIYANAGA N, ANDO A, *et al.* Flexible pulse shaping of partially coherent light on GEKKO XII[C]. *SPIE*, 1995, **2633**:627-633.
- [15] HU Zheng-liang, HU Yong-ming, ZHAO Ming-hui, *et al.* 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.
- [16] 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.
- [17] HUANG Xiao-dong, ZHANG Xiao-min, LI Gui-qiu, *et al.* Characteristic and amplification of stacked chirped pulse [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(1):71-75.  
黄小东, 张小民, 李桂秋, 等. 啁啾脉冲堆积及其放大特性[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(1):71-75.
- [18] LIU Lan-qin, LIN Hong-huan, PENG Zhi-tao, *et al.* Evolutionary rules of time modulation and intensity of stacked chirped pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12):2272-2276.  
刘兰琴, 林宏奐, 彭志涛, 等. 堆积脉冲时间调制及强度演化规律[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5):1305-1309.
- [19] LIU Lan-qin, LIN Hong-huan, SU Jing-qin, *et al.* Characteristics of amplification transmission of stacked chirped pulse [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12):2006-2010.  
刘兰琴, 林宏奐, 粟敬钦, 等. 小宽带堆积啁啾脉冲传输放大特性[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(12):2006-2010.
- [20] ZHOU Xiao-jun, ZHANG Zhi-yao, 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.  
周晓军, 张旨遥, 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.

## Characteristics of Temporal Wave-form and Frequency Spectrum of Broad-band Laser Pulse Stacked by Chirped Pulses

WANG You-wen, CHEN Lie-zun, YOU Kai-ming, LU Shi-zhuan

(Department of Physics and Electronic Information Science, Hengyang Normal University, Hengyang, Hunan 421008, China)

**Abstract:** The dependence of the temporal wave-form and frequency spectrum of the broad-band laser pulse stacked by chirped pulses on the parameters of the sub-pulses is investigated theoretically and numerically. It is shown that, the temporal wave-form of the broad-band lasers stacked by the transform-limited pulses is usually smoothing, while that stacked by chirped pulses takes detrimental modulation. And the former consists of one spectrum line, while the latter consists of multiple spectrum lines. In addition, with the delay-time between neighboring sub-pulses increasing, the modulation riding on the broad-band laser pulse increases, and results in the spectrum lines of the output pulse to increase. The results can help in generating broad-band laser pulse of specific temporal wave-form and frequency spectrum by optimize parameters of the sub-pulses.

**Key words:** Chirped pulses; Broad-band laser; Characteristics of temporal frequency spectrum; Temporal modulations



**WANG You-wen** was born in 1972. He received the Ph. D. degree from School of Computer and Communication, Hunan University. Now he is an associate professor, and his research interests focus on nonlinear optics and light propagation.