

# 光纤脉冲堆积器的模拟分析\*

胡正良 胡永明 赵明辉 张学亮

(国防科技大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

**摘要** 介绍了用于惯性约束核聚变(ICF)前端系统的光纤脉冲堆积器的基本原理. 该堆积器对种子脉冲分束、延时、调幅、合束,最后整形出任意形状的脉冲. 通过数值模拟分析了种子脉冲形状、脉冲之间的时延和相位差以及光学滤波对脉冲堆积波形的影响. 结果表明,增大脉冲的上升沿和下降沿,控制相邻脉冲之间的相位差在  $\pi/2$ ,并对输出脉冲进行光学滤波后能够获得上升沿小于 100 ps、脉冲顶部起伏小于 5%、时间准确度为 100 ps 的整形脉冲.

**关键词** 光纤与导波光学;脉冲整形;惯性约束核聚变(ICF);光学滤波

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A

## 0 引言

在惯性约束核聚变(ICF)系统中,为了实现对聚变靶丸的压缩和点火,抑制压缩过程中产生的不稳定性<sup>[1]</sup>、提高压缩比和能量耦合效率、降低对激光能量的要求<sup>[2]</sup>,因此激光脉冲的精确时间脉冲整形<sup>[3~5]</sup>成为 ICF 前端系统中非常重要的一部分,目前主要有基于集成光学调制器和光纤脉冲堆积器进行脉冲整形两种方案.

光纤脉冲堆积器首先由日本大阪大学激光工程研究所在上世纪 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,采用部分相干啁啾脉冲,克服了脉冲相干叠加问题. 由于“神光-Ⅲ”激光装置的种子脉冲是具有一定偏振态的高相干光源( $<0.02 \text{ nm}$ ),脉冲堆积时不可避免的存在干涉. 本文从理论上分析了不同阶高斯脉冲的整形结果,提出了利用压电陶瓷控制相邻光脉冲的相位差来消除脉冲重叠区域的干涉,以及利用光学滤波器改善输出光脉冲顶部起伏的方法. 数值模拟分析结果表明,通过控制相位和光学滤波可获得脉冲顶部起伏小于 5%整形脉冲输出.

## 1 光纤脉冲堆积器的基本构成

光纤脉冲堆积器采用全光纤 32 路幅度可调等程差网络方案,它的光学系统由 62 个保偏光纤耦合器和 32 个保偏光纤可调衰减器(VOA)构成,在输入端和输出端分别用 31 个  $1 \times 2$  的保偏光纤耦合器级联成一个  $1 \times 32$  的分束系统和一个  $32 \times 1$  的合束系统,每路中间用一个光纤时延器和一个光纤衰减器连接起来. 连接方式如图 1.

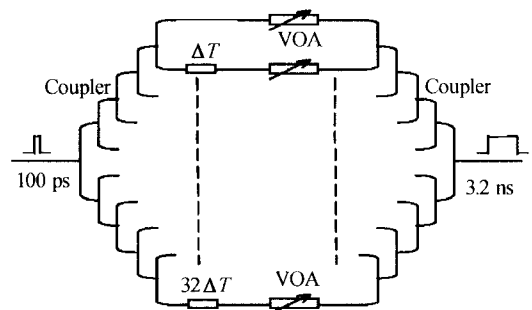


图 1 光纤脉冲堆积器结构图

Fig. 1 The structure of optical pulse stacker

从前端输入的 100 ps 脉冲经保偏光纤耦合器等程分束,得到 32 路子脉冲,每路脉冲经过光纤时延器,产生等差时延  $\Delta T = 100 \text{ ps}$ ,然后经过一个保偏光纤可调衰减器调节各路光强幅度,最后用耦合器把 32 路光脉冲按序合成,从而形成一个 3.2 ns 的整形脉冲.

脉冲时延通过控制光纤长度的方法来实现,光纤长度与脉冲时延的关系为

$$\Delta L = \frac{C}{n} \Delta T \quad (1)$$

式中  $n$  是纤芯折射率, $C$  是光速.

由于系统中采用的种子脉冲是波长为 1053 nm,谱宽约为  $0.02 \text{ nm}$ <sup>[8]</sup>的线偏振光,它的相干时间大于脉冲时延,脉冲堆积(见图 2)时重叠部分会发生相干. 假设输入种子脉冲为高斯形或者超高斯形,半高宽为  $T_{\text{FWHM}} = 100 \text{ ps}$ ( $1/e$ 处的脉冲半宽度为

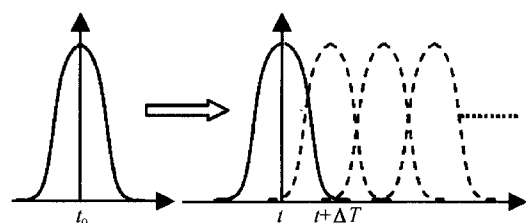


图 2 脉冲堆积

Fig. 2 Schematic of pulse stacking

\* 国家 863 高技术计划资助项目

Tel: 0731-4573739 Email: zheng\_liang\_hu@163.com

收稿日期: 2005-04-13

$T_0 = \frac{T_{FWHM}}{2\sqrt{\ln 2}}$ ,  $m$  为高斯阶数), 光脉冲幅度为  $E_0$ , 那么种子脉冲可表示为<sup>[9]</sup>

$$E(T) = E_0 \exp\left(-\frac{T^{2m}}{2T_0^{2m}}\right) \exp(-i\omega T + \Phi_0) \quad (2)$$

式中  $\omega$  为种子脉冲的光频率,  $\Phi_0$  为初位相,  $T$  为传输时间.

经光纤时延器延时后, 再经衰减器对各脉冲幅度进行调节, 在合束系统前的各路子脉冲可表示为

$$E_k(T) = A_k \exp\left(-\frac{(T+k\Delta T)^{2m}}{2T_0^{2m}}\right) \cdot \exp[-i\omega(T+k\Delta T) + \Phi_0] \quad (3)$$

$A_k$  为合束前的光场振幅,  $k$  为第  $k$  路光脉冲.

由于脉冲堆积器采用全保偏光纤系统, 注入偏振光的偏振态不会发生改变. 合波后, 脉冲干涉只发生在注入偏振态上. 对式(3)各子脉冲矢量叠加后共轭相乘可得整形输出脉冲强度为

$$P = \left| \sum_{k=0}^{31} A_k \exp\left(-\frac{(T+k\Delta T+\delta t)^{2m}}{2T_0^{2m}}\right) \cdot \exp[-i\omega(T+k\Delta T+\delta t) + \Phi_0] \right|^2 \quad (4)$$

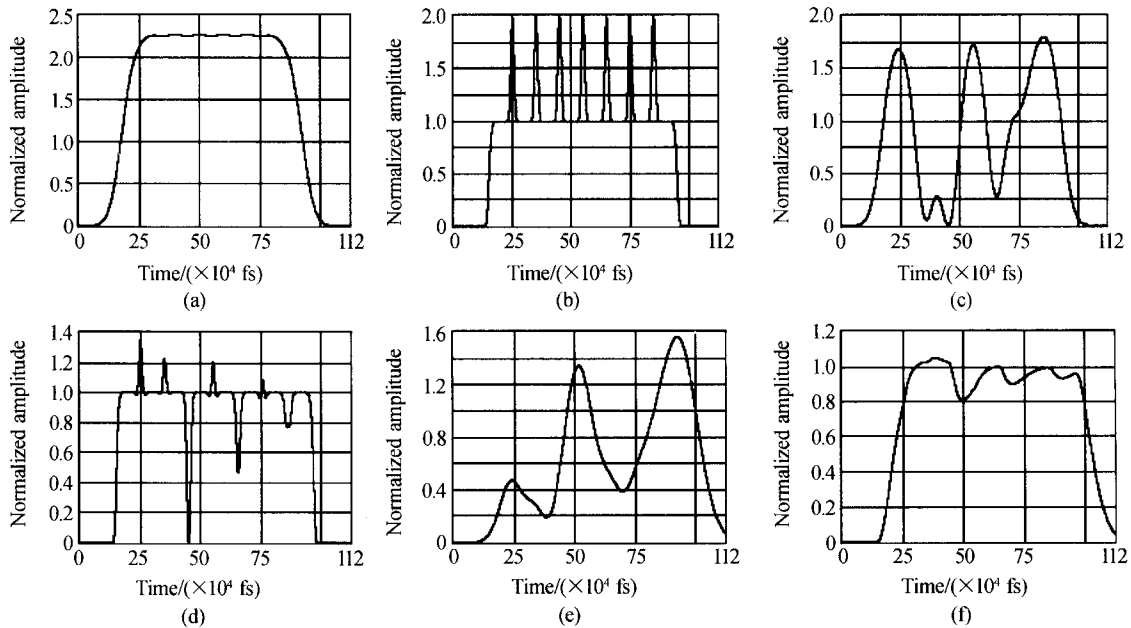
考虑到光纤连接长度误差以及外界环境变化引起的相邻脉冲的相位变化, 引入时延误差  $\delta t$ . 从表达式可以看出, 在相邻脉冲的相干叠加区域, 每一时

刻的相位差为  $\omega\Delta T + \delta t$ , 相邻脉冲交叠区域任一时刻的位相差相等, 因此不会出现高频的干涉抖动现象. 对种子脉冲进行时频分析可以看出种子脉冲的频率集中在 4 GHz 范围内, 因此选用中心波长在 1053 nm、带宽为 4 GHz 光学滤波器对整形后的输出脉冲进行滤波, 它将平滑因脉冲干涉和时延误差引起的脉冲起伏.

## 2 数值模拟及分析

数值模拟中, 种子脉冲取脉冲半高宽为 100 ps 的一阶和四阶高斯脉冲 ( $m=1$  和  $m=4$ ), 它们的上升沿分别为 71.31 ps 和 18.46 ps, 堆积时不考虑光幅度衰减, 光强幅度取  $A_k=1$ , 脉冲之间的时延间隔  $\Delta T=100$  ps, 光学滤波器带宽取 4 G. 利用式(4)分别对有时延误差和有时延误差 ( $\delta t \neq 0$  和  $\delta t=0$ ) 的 8 路脉冲堆积进行模拟, 并模拟了光学滤波对整形脉冲的平滑作用.

比较图 3(a)、(b) 可以看出, 脉冲的形状对堆积后的脉冲波形影响很大. 一阶高斯脉冲堆积后顶部比较平坦, 而四阶高斯脉冲在重叠处总会出现相干相长的尖峰或相干相消的凹陷, 即使调整时延差仍会出现较小的起伏.



(a), (b) Shaped pulse of first-order and fourth-order Gaussian pulse; (c), (d) Shaped pulse of first-order and fourth-order Gaussian pulse with 5 ps random time delay error; (e), (f) Output flitting pulse of (c) and (d) shaped pulse with optics filter of 4G

图 3 脉冲堆积输出脉冲的仿真  
Fig. 3 Output pulse after pulses stacking

比较图 3(c)、(d) 可知, 一阶高斯脉冲由于上升沿比较大, 叠加区域的时间跨度比较长, 幅度也较大. 时延误差使得相邻脉冲之间的相位差不同, 叠加后的光强会随脉冲之间的相位差相干相长或相干相消, 出

现较大的起伏. 四阶高斯脉冲由于上升沿和下降沿比较小, 叠加的区域比较短, 对脉冲的顶部影响很小, 只在叠加区域出现比较窄的光强凹陷和尖峰.

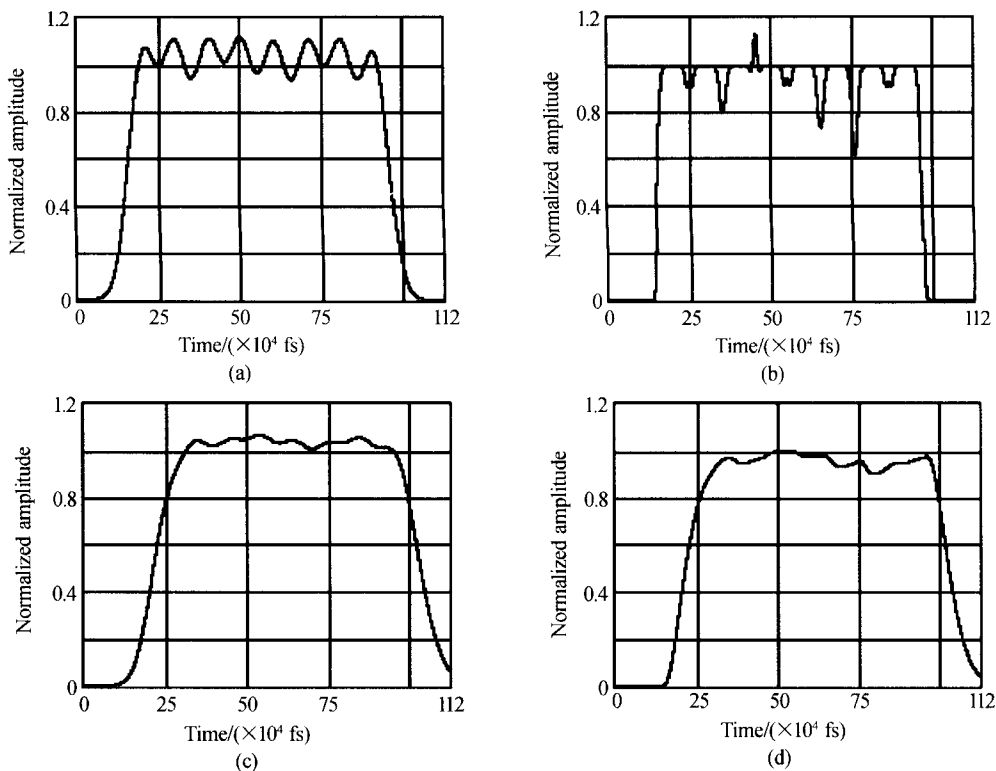
比较图 3(c)、(d)、(e)、(f) 可知, 四阶高斯脉冲堆

积后,相干叠加引起的凹陷和尖峰的频率成分较高,光学滤波后,脉冲顶部的起伏变小,而一阶高斯脉冲滤波的效果不明显.光学滤波平滑脉冲的同时加大了脉冲的前后沿,滤波后一阶高斯脉冲的上升沿由原来的 71.31 ps 变为 85.78 ps,四阶高斯脉冲则从 18.46 ps 变为 71.12 ps,脉冲的起伏仍大于 5%.

为了减小干涉叠加引起的脉冲起伏,把每路传输脉冲的一段光纤绕在一个压电陶瓷上,通过调整陶瓷的驱动电压控制相邻脉冲的相位差为  $\pi/2$ . 根

据光干涉的表达式,相位差为  $\pi/2$  的脉冲堆积时,干涉项为零,输出光强为两脉冲的光强叠加,脉冲的起伏很小.由于系统连接时存在时延误差,它会在脉冲叠加时引起脉冲较大的起伏.

分析图 4(a)、(b)、(c)、(d)可知,由脉冲时延误差,在整形脉冲的顶部出现较大的起伏,经 4GHz 的光学滤波后,波动幅度变小,一阶高斯脉冲叠加滤波后脉冲顶部的起伏小于 5%,四阶高斯脉冲堆积滤波后脉冲起伏仍大于 5%.



(a),(b) Shaped pulse of first-order and fourth-order Gaussian pulse with 5 ps random time delay error and phase difference of  $\pi/2$ ; (c),(d) Output flitting pulse of (a) and (b) shaped pulse with optics filter of 4G

图 4 相位稳定后的输出脉冲

Fig. 4 Output pulse after stabilize phase

实际上,控制相位差为  $\pi/2$  的脉冲叠加与非相干种子脉冲叠加一样,都是光强的简单相加.因此只有当脉冲谱宽足够宽( $>0.2$  nm),克服锁模脉冲的相干和部分相干,输出的脉冲光强幅度才为两叠加脉冲光强幅度相加,无需控制相位同样可以获得起伏小于 5% 的整形脉冲.这种使用宽谱光源减小脉冲起伏方法也可以考虑应用于脉冲整形系统,它能获得较好的整形效果,同时还可以提高系统的稳定性.

### 3 结论

本文分析了光纤脉冲整形系统中脉冲的形状、相邻脉冲时延和相位差以及光学滤波对整形脉冲形状的影响.结果表明,在时延控制准确度不太高( $<5$  ps)的情况下,采用 100 ps 的高斯脉冲,控制相

邻脉冲的相位稳定在  $\pi/2$ ,并对输出脉冲进行 4 GHz 的光学滤波后,可以获得上升沿小于 100 ps、脉冲顶部起伏小于 5%、时间准确度为 100 ps 的整形脉冲.

### 参考文献

- 1 Nuckolls J, Wood L, Hiessen A T, et al. Laser compression of matter to super-high densities: thermonuclear (CTR) application. *Nature*, 1972, **239** (15): 139~142
- 2 陈波,刘华,苏春燕,等.二次谐波转换对激光脉宽影响的实验研究. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(2): 139~142
- 3 Chen B, Liu H, Su C Y, et al. *High Power Laser and Partical Beam*, 1999, **11**(2): 139~142
- 3 王韬,范滇元.高功率激光放大器脉冲的整形设计. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(2): 139~142

- Wang T, Fan D Y. *High Power Laser and Partial Beam*, 1999, **11**(2): 139~142
- 4 Okishev A, Skeldon M D, Letzring S A, *et al.* The pulse-shaping system for the 60-beam, 30-kJ OMEGA laser. *Proc of SPIE*, 1996, **2770**: 10~18
- 5 Skeldon, Mark D, Letzring, *et al.* Pulse shaping system, US Patent, G02f, 5886808. 1999.08~14
- 6 Nakatsuka M, Miyanaga N, Kanabe T, *et al.* Partially coherent light source for ICF experiment. *Proc of SPIE*, 1993, **1870**: 151~162
- 7 Matsuoka S, Miyanaga N, Ando A, *et al.* Flexible pulse shaping of partially coherent light on GEKKO XII. *Proc of SPIE*, 1995, **2633**: 627~633
- 8 Andrey V, Okishev W S. Diode-pumped, single-frequency Nd : YLF laser for 60-beam OMEGA laser pulse shaping system. *Proc of SPIE*, 1997, **2986**: 93~98
- 9 Agrawal G P 著, 贾东方译. 非线性光纤光学原理及应用. 北京: 电子工业出版社, 2002
- Agrawal G P. Translated by Jia D F. *Nonlinear fiber optics, third edition & application of nonlinear fiber optics.* Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002

## Analysis and Simulation of Optic Fiber Pulse Stacker

Hu Zhengliang, Hu Yongming, Zhao Minghui, Zhang Xueliang

*College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073*

Received date: 2005-04-13

**Abstract** The basic principle of the optical fiber pulse stacker in Inertial Confinement Fusion (ICF) front end system is described. When the seed pulse is split, time delayed, amplitude modulated and combined in the stacker, last arbitrary shape pulse is shaped. The effect of the seed pulse shape, the time delay and phase difference between pulses and optical filtering on stacking pulse shape is analyzed through numerical simulation. The results show that the shaping pulse with less than 100 ps rising edge, less than 5% pulse fluctuation, 100 ps time precision can be obtained through increasing rising edge and falling edge, controlling phase difference at  $\pi/2$  between adjacent pulse and filtering output pulse. The performance index can satisfy the application of ICF.

**Keywords** Guided wave and fiber optics; Inertial Confinement Fusion (ICF); Pulse shaping; Optical filter

**Hu Zhengliang** was born in 1976 in Hunan Province. He received the B. S. degree and M. S. degree from the College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology. Now he is studying for his Ph. D. at the school. His major research fields are passive fiber device and fiber sensor.

