

文章编号: 1001-4322(2006)03-0401-04

# 时域延时多脉冲叠加平滑过程的分析\*

纪 帆<sup>1</sup>, 隋 展<sup>2</sup>, 李 锋<sup>1</sup>, 李明中<sup>2</sup>, 王建军<sup>2</sup>, 林宏免<sup>2</sup>, 谢建平<sup>1</sup>, 明 海<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 物理系 光子技术研究所, 合肥 230026;  
2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为满足惯性约束聚变对 ns 级可整形激光脉冲的独特要求, 提出了一种将多脉冲延迟堆积实现脉冲平滑和灵活整形的方案。这种方案基于多光束耦合器与压电陶瓷结合技术, 采用光纤作为传输介质, 可以精确控制相邻脉冲延时。详细分析和讨论了时延多脉冲叠加原理和叠加技术, 给出了脉冲堆积时满足平滑要求的延迟时间(约为堆积所用高斯脉冲束腰宽度)和相邻脉冲间延时相位差所需的控制精度。

关键词: 脉冲; 平滑; 多脉冲堆积; 时延; 相位

中图分类号: O532; O436.1 文献标识码: A

惯性约束聚变(Inertial confinement fusion, ICF)是产生核聚变反应的一种方法<sup>[1-5]</sup>。在实现 ICF 的中心热斑法和快点火法<sup>[6]</sup>中都需要用特定形状的激光脉冲先将聚变燃料尽量均匀压缩。本文提出的应用时域延时多脉冲叠加方法产生的平顶 ns 级脉冲是 ICF 实验中要求的非常重要的一种脉冲波形。

目前有多种方法实现脉冲整形<sup>[7]</sup>, 如应用液晶材料作为相位或振幅调制器<sup>[8-9]</sup>和用普克尔盒<sup>[10]</sup>的主动法调制等。美国 Livermore 实验室所用方法为用包含两块高反射镜和一个镀有部分透射膜的光楔的脉冲堆积器, 使输入的光产生延迟再叠加合成所需要的矩形脉冲<sup>[11]</sup>。而在美国罗彻斯特大学激光力能实验室的 OMEGA 系统中, 脉冲整形也采用类似原理<sup>[12]</sup>, 前两种方案应用的都是体器件。目前国内实现脉冲平滑和整形主要有频域整形和时域堆积整形两种。我们使用时域堆积方法, 提出一种通过多光束耦合器与压电陶瓷(PZT)结合将多脉冲延迟叠加实现脉冲平滑和整形的方案, 应用光纤作为传输介质。分析和讨论了时延多脉冲叠加原理和叠加技术, 给出了脉冲堆积时满足平滑要求的延迟取值范围和相邻脉冲间延时相位差所需控制精度。本方案相对体器件堆积器具有调节简单、时延和相位连续可调等优点, 相对于频域整形方法具有整形能力强的优点。

## 1 模型及理论分析

应用相干叠加原理, 我们提出如下整形方法, 如图 1 所示: 将一个百 ps 锁模脉冲经偏振分束器分束后进入不同光纤, 在控制各路脉冲偏振一致情况下用 PZT 控制光纤长度以使各路光程产生差别, 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成所需的 ns 级方波脉冲。经过计算模拟发现该方法在基本原理和技术上都是可行的。

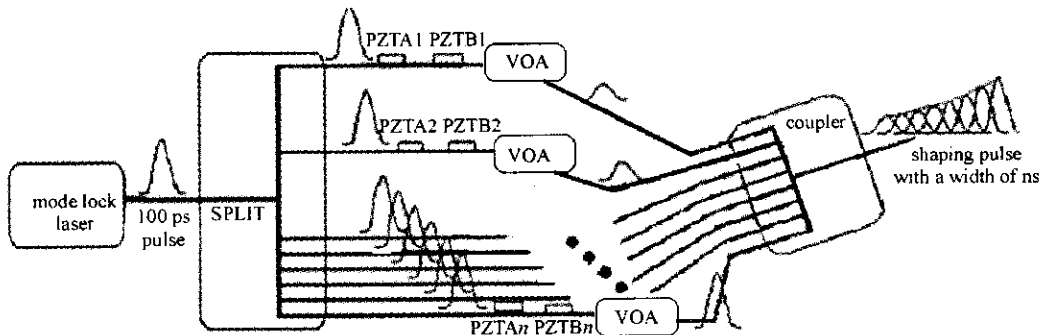


Fig. 1 Project of pulse interference stacking

图 1 脉冲堆积器方案

\* 收稿日期: 2005-09-06; 修订日期: 2006-03-03

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 纪 帆(1980—), 男, 博士, 从事激光应用及新型光器件研究; jfxx@mail.ustc.edu.cn.

用于堆积的单个光脉冲为锁模激光器输出的光脉冲,相同波形  $n$  个脉冲时延叠加后的脉冲强度可表示为

$$I(n, t) = \left| \sum_{m=0}^{n-1} A(t - m\tau) \exp[-i\omega_0(t - m\tau)] \right|^2 = \left| \sum_{m=0}^{n-1} A(t - m\tau) \exp[-i\omega_0 t + im\alpha] \right|^2 \quad (1)$$

式中:  $\tau$  是相邻脉冲间的延时;  $m$  为脉冲序号; 定义  $\alpha = 2\pi\nu_0\tau$  为相位因子,  $\nu_0$  为脉冲中心频率。

如图 1 所示, 可以用两个 PZT 分别控制时延和相位因子。对于等间隔高斯脉冲和类似形状的脉冲堆积, 叠加成的脉冲平顶部分的极值一般出现在  $\tau/2$  的整数倍处, 当用于堆积的单个光脉冲为对称的, 堆积脉冲的顶部一般有  $I[(i-1)\tau/2] = I[(i+1)\tau/2]$ , 其中  $i$  为正整数。可以这样选择平滑判据(10%判据)

$$R = \frac{I(i\tau/2) - I[(i-1)\tau/2]}{\bar{I}} \leq 10\% \quad (2)$$

式中:  $\bar{I} = \{I(n\tau/2) + I[(n-1)\tau/2]\}/2$ 。为满足平滑判据可以得到一个  $\tau\alpha$  的允许选择区域。

## 2 数值模拟及讨论

### 2.1 2 路脉冲堆积的模拟

将公式(1)中的  $n$  取为 2 可以分析 2 路脉冲叠加情况, 作为分析多脉冲叠加的基础。显然  $\alpha = 2\pi\nu_0\tau$  的取值对光强分布产生明显影响, 下面就针对  $\alpha$  的不同取值进行分析, 用于堆积的单个脉冲取为高斯脉冲  $A(t - m\tau) = \exp[-(t - m\tau)^2/T^2]$ ,  $T$  为脉冲束腰宽度。

#### 2.1.1 $\alpha = (2n+1)\pi/2$ 情况

对于两脉冲的叠加, 当  $\alpha = (2n+1)\pi/2$  时, 应用公式(1)有

$$I(t) = A^2(t) + A^2(t - \tau) + 2A(t)A(t - \tau)\cos\alpha = A^2(t) + A^2(t - \tau) \quad (3)$$

$$\Delta I = I(\tau/2) - I(0) = 2A^2(\tau/2) - A^2(0) - A^2(\tau) \quad (4)$$

满足脉冲顶部光强度波动小于 10% 的时延范围如图 2 阴影部分所示。若要合成脉冲的顶部较宽, 时延应该取得比较大, 所以满足条件的范围应该是第 2 个阴影部分, 即  $0.97 \sim 1.21T$ 。

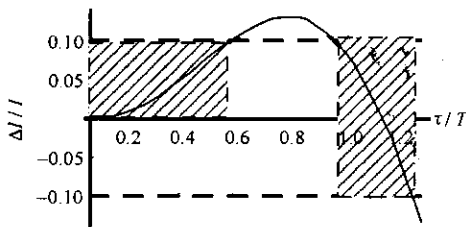


Fig. 2 Variation of 2 Gaussian pulses intensity superposition

图 2 两路高斯脉冲强度叠加起伏随时延变化图

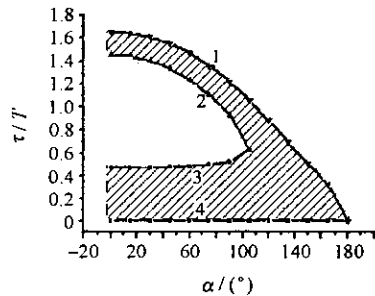


Fig. 3 Smoothing range of 2 pulses superposition

图 3 两路脉冲堆积平滑区图

#### 2.1.2 时延允许范围

改变相位因子  $\alpha$  值, 同样应用公式(1)可以得到一系列不同相位条件下满足平滑判据的时延范围, 如图 3 所示, 其中纵轴为时延  $\tau$  (单位为  $T$ ), 横轴为  $\alpha$ , 不同  $\alpha$  值对应不同时延取值范围, 将这些点连接起来, 如图中 1, 2, 3, 4 曲线所示, 在图中阴影区域中取的时延, 堆积后的合成脉冲平顶部分满足平滑判据。4 路脉冲堆积情况与 2 路时类似, 但此时  $I(0)$  将明显处于脉冲前沿, 不适合作为判据。考虑脉冲对称性, 因此取  $I(\tau/2)$ ,  $I(\tau)$ ,  $I(3\tau/2)$  作为评价点, 其他过程类似于对 2 路脉冲堆积的分析。

### 2.2 多路脉冲堆积的模拟

对于多路(一般认为超过 16 路)脉冲堆积可沿用前面 2 路和 4 路脉冲堆积延时取值范围的分析方法来原因确定延时范围。脉冲各个部分的强度可以由公式(1)来确定。由 10% 判据, 建立  $(n-1)$  个不等式来求解延时  $\tau$  的取值范围。由于是多脉冲叠加, 它们可能不存在时延  $\tau$  的共同取值范围, 这时应取满足最多不等式的  $\tau$  的共同取值范围, 舍去两侧处在上升沿部分的若干个光强度判断点, 如  $I(0)$ ,  $I(\tau/2)$  等。由这样的时延范围, 进行多脉冲叠加, 其中间部分满足平滑化要求, 而合成脉冲的上升下降沿部分可能会出现凸起或下降过缓。这时保持脉冲延时均为  $\tau$ , 对两侧少数几个脉冲的幅度进行调整, 使合成脉冲达到平滑化的要求。由 4 路脉冲的分析发现, 相邻脉冲叠加时延允许  $\tau$  在  $T$  附近变化, 这时第 4 个脉冲对第 1 个脉冲中心处的振幅贡献约为 0.012%。显然, 多脉冲堆积(如 32 路)略去相隔较远脉冲贡献不会对分析结果造成明显影响, 可参考低路数

(如 4 路)情况下的时延取值范围。再考虑时延对上升沿的影响就可以得到同时满足平顶部分和上升沿平滑要求的时延范围,如图 4 所示,由两条虚线(一般取时延为  $0.8 \sim 1.3T$ ,目的是使堆积脉冲顶部较宽)以及曲线 1 (平顶部分)和 2(上升沿平滑)所围区域阴影部分内取出的时延,堆积效果满足平滑化判据。

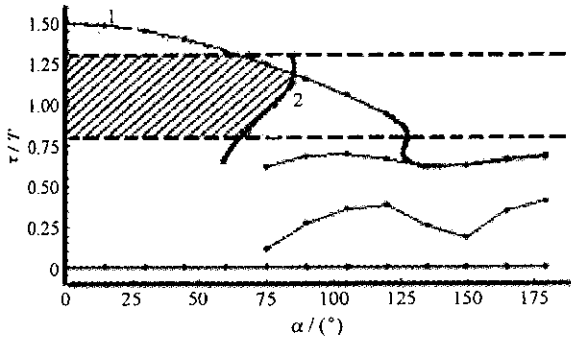


Fig. 4 Range of  $\tau\alpha$  that meets

demand of smoothing of 32 pulses superposition

图 4 32 路脉冲堆积时为满足平滑要求可以取的  $\tau\alpha$  区域

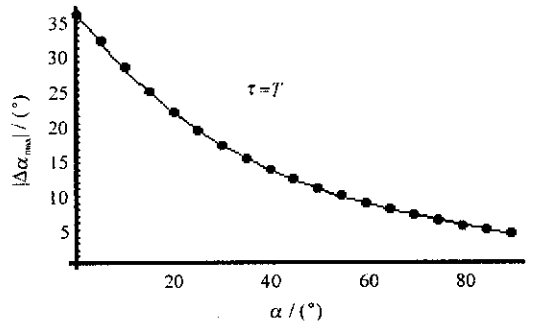


Fig. 5 Relation between  $\alpha$  and  $|\Delta\alpha_{\max}|$

图 5  $\alpha-|\Delta\alpha_{\max}|$ 关系图

### 2.3 脉冲堆积过程中相位误差 $\Delta\alpha$ 对堆积效果的影响

在进行脉冲叠加时由于控制精度原因有可能会引入相位误差  $\Delta\alpha$ ,相位误差的引入会导致加入相位误差脉冲附近的平顶出现峰谷结构,而且随着相位误差的增大,造成的起伏也会加大。通过堆积脉冲起伏的形式状断定引入的是正的还是负的相位误差,进而调节光纤长度以减小或增大  $\alpha$ ,以减小这种影响。计算可以给出使脉冲起伏满足 10%判据的最大相位误差  $\Delta\alpha_{\max}$ 。

32 路脉冲堆积时,固定各路间时延均为  $T$ ,改变  $\alpha$  值,可以得到一系列  $\Delta\alpha_{\max}$ ,从而作出  $\alpha-|\Delta\alpha_{\max}|$  关系图如图 5 所示。该图给出了一定时延和相位条件下, $\Delta\alpha$  可以允许的范围。随  $\alpha$  增大, $|\Delta\alpha_{\max}|$  逐渐减小。可以通过该图得到一定相位条件下满足堆积平滑判据的相位误差允许范围。

### 3 实验结果

我们进行了脉冲堆积的实验,图 6 为示波器上观察到的 32 路脉冲堆积产生的脉冲,图中横轴刻度为 0.5 ns/div,示波器为 TDS6604 型(8 GHz 光电探头,采样频率 20 GS/s)。实验中单个脉冲为宽度 60 ps 左右的类高斯锁模脉冲,即计算中选取的脉冲类型。根据部分相干光理论,两束光只要具有稳定的相位关系在叠加时就可以认为是相干的,实验中应用的为锁模脉冲,堆积子脉冲又是由同一束脉冲进行分束而成的,所以堆积时必然为相干叠加。

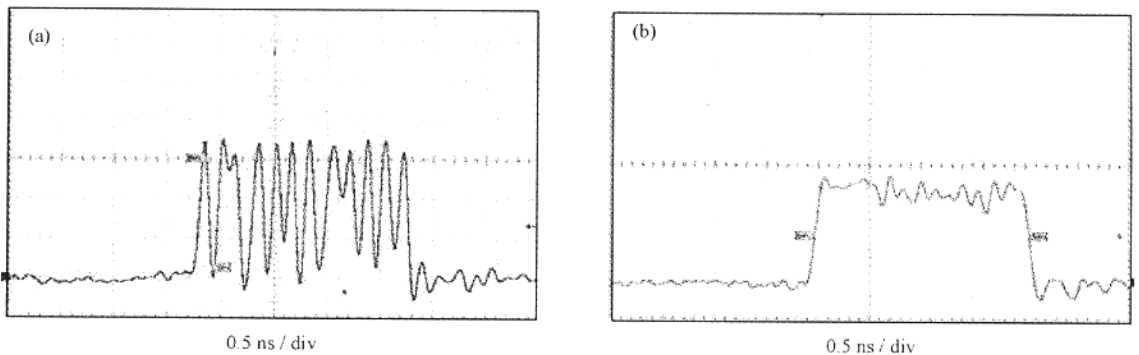


Fig. 6 Result of the experiment of 32 pulses superposition

图 6 32 路脉冲堆积实验结果

图 6(a)的延时取在满足平滑条件的允许范围以外,脉冲相干叠加使得脉冲中部起伏相当大;图 6(b)所示堆积时延为一个脉冲宽度左右,即图 4 中满足平滑条件的时延允许范围。堆积脉冲总宽度 2.067 ns,上升沿在 90 ps 左右。由图 6(b)可见,脉冲堆积前几路平滑效果较很好,后边稍差,可见通过技术上改善光程控制的手段是可以得到满意结果的。实验表明控制各个脉冲之间的时延在平滑区域之内和使用 VOA 可以起到平滑脉冲的效果。

## 4 结 论

应用脉冲堆积的基本原理,提出使用多路光纤加上 PZT 和 VOA 实现脉冲延时并相干堆积作为脉冲平滑手段,得到 ICF 实验中非常重要的方波脉冲。参考对 2 路和 4 路堆积平滑范围分析的结果,着重分析了 32 路脉冲的堆积情况,得出了诸如同时满足平顶部分和上升沿 10% 判据的时延范围,中间一路加入相位误差的允许范围等结果。分析表明多脉冲延迟叠加实现脉冲平滑和整形,以获得特定波形的脉冲,在基本原理和技术上都是可行的。应用时域脉冲堆积控制子脉冲时延的方法,可以达到使 ns 级脉冲顶部平滑的目的。

## 参考文献:

- [1] Crane J K, Wilcox R B, Hopps N W, et al. Integrated operations of the National Ignition Facility (NIF) optical pulse generation development system[C]//Proc of SPIE. 1999, **3492**:100-111.
- [2] Wisoff P J, Bowers M W, Erbert G V, et al. NIF injection laser system[C]//Proc of SPIE. 2004, **5341**:146-155.
- [3] 张杰. 浅谈惯性约束核聚变[J]. 物理, 1999, **28**(3):142-152. (Zhang J. An overview of inertial confinement fusion. *Physics*, 1999, **28**(3): 142-152)
- [4] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, et al. Ignition and high-gain with ultrapowerful lasers[J]. *Phys Plasmas*, 1994, **11**(5):1626-1634.
- [5] 李恪宇, 魏晓峰, 蔡邦维, 等. ICF 驱动器长脉冲下三倍频晶体中的横向受激拉曼散射[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(8):776-780. (Li K Y, Wei X F, Cai B W, et al. Transverse stimulated Raman scattering in tripler of ICF driver for long pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(8):776-780)
- [6] Massey G A, Elliott R A. Shaped Pulse Study[R]. UCRL 13603, 1974.
- [7] Wefers M M, Nelson K A. Programmable phase and amplitude femtosecond pulse shaping[J]. *Opt Lett*, 1993, **18**(23):2302-2304.
- [8] Benjrajka V, Chang C C, Emanuel A W R, et al. Pulse shaping of incoherent light by use of a liquid-crystal modulator array[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(21):1756-1758.
- [9] Chou P C, Haus H A. Reconfigurable time-domain spectral shaping of an optical pulse stretched by a fiber Bragg grating[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(8):524-526.
- [10] Martin W E, Johnson B C, Guinn K R, et al. Optical pulse shaping for laser fusion experiment[R]. UCRL 78775, 1977.
- [11] Skeldon M D, Bui S T, Letzring S A, et al. Implementation of pulse shaping on the OMEGA laser system[C]//Proc of SPIE. 1992, **1627**: 246-251.
- [12] Boehly T R, Craxton R S, Hutchison R J, et al. Upgrade to the OMEGA laser system[C]//Proc of SPIE. 1992, **1627**:236-245.

## Analysis of pulse smoothing by multi-pulse interference in time domain

JI Fan<sup>1</sup>, SUI Zhan<sup>2</sup>, LI Feng<sup>1</sup>, LI Ming-zhong<sup>2</sup>,

WANG Jian-jun<sup>2</sup>, LIN Hong-huan<sup>2</sup>, XIE Jian-ping<sup>1</sup>, MING Hai<sup>1</sup>

(1. Institute of Photonics, Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In the inertial confinement fusion (ICF) system, there exists a special requirement of waveform of the laser pulse (a shaping pulse with a width of ns). This paper proposes a coherent pulse stacking method which can make the output stacking pulse meet the requirement of the ICF. It theoretically and technologically investigates the multi-pulse interference in time domain, derives the range of time detention (about the width of the single Gaussian pulse) and the phase control accuracy of neighbor pulses to achieve the requirement of smoothing.

**Key words:** Pulse; Smoothing; Multi-pulse interference; Time detention; Phase