

复杂激光脉冲波形的整形

许发明 陈绍和 陈兰荣 逯其荣 许世忠 范滇元 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 介绍了用时空变换的方法对激光脉冲整形的原理; 提出了由于硬边光通量调制器引入的动态的光脉冲强度空间分布的不一致性及其克服的方法, 理论上用二维快速傅里叶变换(FFT)进行了验证; 最后计算了系统光强透过率和光束焦斑大小、调制狭缝宽度的关系; 为了显示本系统的复杂脉冲整形能力, 在实验上获得了惯性约束核聚变(ICF)感兴趣的复杂激光脉冲波形。

关键词 时空变换法, 复杂脉冲波形, 整形。

1 引 言

惯性约束核聚变的实现要求激光脉冲辐照靶而产生的消融压力有步骤地增加^[1], 这就要求一定要有合适形状的激光脉冲作驱动源, 不仅如此, 时间上整形的激光脉冲可以减少由于冲击波引起的对靶预热的不利因素; 早期的有关惯性约束核聚变的文章计算表明在时域上对驱动源光脉冲整形对提高驱动能利用效率十分关键^[2]。另一方面对于作为驱动器的高功率激光系统来说, 由于对激光脉冲形状的可控性, 可以弥补频率转换、饱和放大等引起的非线性, 从而使驱动器的放大链可以工作于饱和区, 充分汲去高能态翻转粒子的能量, 提高驱动器输出的能量, 改善驱动器的性能。

目前, 美国的劳伦斯里弗莫尔实验室的高功率激光系统是世界上同类系统中最先进的, NOVA 装置采用光电导和非均匀传输线技术, 控制驱动块状普克尔盒的电脉冲的形状和宽度来获得所需形状的光脉冲, 时域分辨率为 300 ps^[3], 升级装置 Beamlet 则用集成光学调制器取代块状普克尔盒, 时域分辨率为 250 ps^[4], 同时降低了电源电压, 增加了可靠性, 但产生满足要求的时间分辨率的各种形状的电脉冲有相当难度。采用时空变换的方法, 利用电光偏转器在脉冲的整形区域内不同时刻的光脉冲通过不同的空间位置, 改变不同空间位置光通量的透过率, 这样即可实现激光脉冲的整形, 而且初步的实验结果表明这个系统的时域分辨率达到了 280 ps。本文以下介绍了时空变换激光脉冲整形的原理, 提出了由于硬边光通量调制器引起的动态的光脉冲强度空间上分布不一致性及其克服方法, 并用二维快速傅里叶变换进行了验证, 最后给出了复杂脉冲整形的设计实例, 实验结果表明系统基本具备了任意所需脉冲形状的整形能力。

2 原理和实验装置

时空变换法获得复杂激光整形脉冲的关键元件是电光偏转器, 选用电光系数大而且光学质量好的 LiNbO_3 晶体作材料, 电光偏转器是通过特殊的电极结构在晶体内形成电场梯度, 利用一阶线性电光效应, 在晶体内产生折射率梯度, 使通过晶体的光束发生偏转。衡量电光偏转器的品质因子是偏转可分辨的光斑数 N , N 定义为:

$$N = \frac{\theta_{\text{def}}}{\theta_{\text{dif}}} \quad (1)$$

θ_{def} 为偏转角度, θ_{dif} 为光束束宽为偏转器通光孔径的平面波的衍射全角, 而理论分析表明用 LiNbO_3 材料做成的电光偏转器的品质因子 N 和晶体上所加电压 V 成正比^[5]:

$$N = -\frac{C_s}{4.88} \frac{n_e^3 r_{33}}{\lambda} V \frac{L}{D} \quad (2)$$

其中 C_s 为结构因子, 和电光偏转的结构参数有关, n_e 为晶体 e 光折射率, r_{33} 为电光系数, λ 为光脉冲的波长, V 为偏转器上所加的电压, L 为偏转器的有效长度, D 为通光孔径。也即偏转角度和晶体上所加的电压成正比:

$$\theta_{\text{def}} = N \frac{2.44\lambda}{D} = -\frac{C_s}{2} n_e^3 r_{33} V \frac{L}{D^2} \quad (3)$$

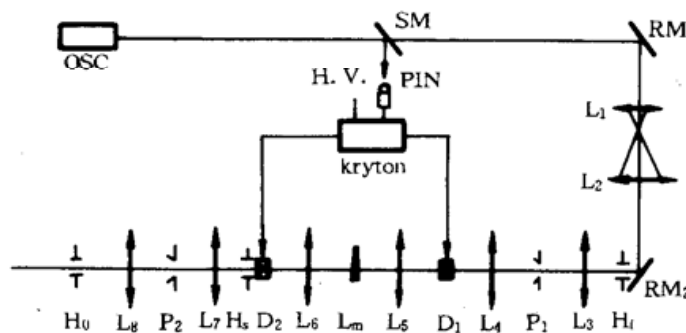


Fig. 1 Shaping system with LiNbO_3 electro-optic deflectors
OSC: Q-switched single longitudinal mode laser; SM: splitter; RM_{1-2} : reflecting mirror; L_{1-8} : lenses; H_i : input aperture; P_{1-2} : pin hole; D_{1-2} : deflectors; L_m : spatial beam fluence modulator; H_s : rectifying aperture; H_o : output aperture

实验采用的电光偏转器的有效长度 $L = 30 \text{ mm}$, 通光孔径 $D = 4 \text{ mm}$, 偏转能力为 $1.07 \times 10^{-6} \text{ rad/V}$, 对激光脉冲整形就是利用这个特性。图 1 为用 LiNbO_3 电光偏转器对对激光脉冲整形原理示意图。从振荡器 OSC 输出波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的调 Q 单纵模激光, 脉冲宽度为 20 ns 。由分光镜 SM 分一部分光通过 PIN 管触发冷阴极管, 产生的快速 8 kV 高压电脉冲去分别驱动一对电光偏转器; 主光路的激光脉冲则经延迟后和电脉冲同步到达第一个偏转器 D_1 , 随着电压的增加, 光束发生偏转, 焦距为 740 mm 透镜 L_5 和 L_6 组成一个 4F 系统, D_1 放置于 L_5 的前焦点上, 被偏转光

束在 L_5 的后焦平面上聚焦扫描成一条线, 这样时序上光强的变化变成了空间上扫描线上分布, 实现时空转换; 利用 L_6 和位于其后焦点上的第二个电光偏转器 D_2 把空间上扫开的光束复原, 实现空间到时间的还原变换。如果在扫描线上放置一光通量调制狭缝 L_m , 则依据光束的扫描速度, 控制狭缝的长度, 以控制脉冲的持续时间, 改变狭缝的宽度, 控制激光脉冲的形状, 这样就实现了复杂激光脉冲整形。

RM_1 和 RM_2 为 45° 全反镜, 可以调节光程, 起延时同步作用。透镜 L_1 和 L_2 组成扩束望远镜, 起改变高斯光束的参数的作用, 使光束的瑞利距离大于系统中透镜的焦距, 经输入光阑限束以后, 近似为有限束宽的平面波, 透镜 L_3 和 L_4 组成空间滤波器, 改善输入光束的质量。入射光阑 H_1 (控制入射光束的大小) 通过由 L_3 和 L_4 组成的空间滤波器成像于 D_1 , 这个像一直被传递至输出光阑 H_o , H_s 为纠正光阑, 与透镜 L_7 和 L_8 组成的空间滤波器一起改善系统输出

的光束的强度在空间上动态分布的一致性，与 H_0 一起组成下一级放大系统的接口。

3 空间复原

为了实现激光脉冲的整形，对激光光束焦斑的光强分布进行了改变，这样势必会导致从时域复原回去的光束在空间上光强分布产生动态的不一致性。这可用二维的快速傅里叶变换模拟计算整形系统图(如图 1 所示)中各个环节上的空间光强分布来证实。从振荡器输出的高斯光束经 L_1 和 L_2 扩束和输入光阑 H_1 限束后，光束近似为有限束宽的平面波，通过空间滤波后，光束的空间强度分布如图 2 所示，光强分布具有中心圆对称。光束通过第一个电光偏转器后，经 L_5 聚焦后的焦斑在 L_m 平面沿狭缝中心线 Y 方向扫描，依据狭缝的宽窄来控制此刻透过的光通量，实现脉冲形状的控制，透过的焦斑在扫描过程中 Y 方向宽度未受狭缝 L_m 的限制，而透过的焦斑在 X 方向上宽度有变化，图 3 为时域上复原后的光束在第二个偏转器上的空间光强分布，可见在焦斑大小未受限制的 Y 方向基本上保持了原有的空间分布特性，而由于焦斑在 X 方向上透过宽度受限，从而使得时域上复原后的光束在该方向产生衍射扩展，扩展的程度由光束焦斑大小 SZ 和狭缝宽度 W 决定，而对激光脉冲整形正是利用在扫描方向上狭缝宽度的变化来实现的，因此，在脉冲整形过程中，必然会引起时间上复原的光束在空间上光强分布动态的变化。

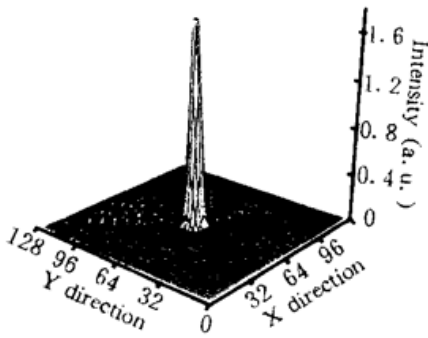


Fig. 2 Spatial distribution of laser beam intensity at the first deflector D_1

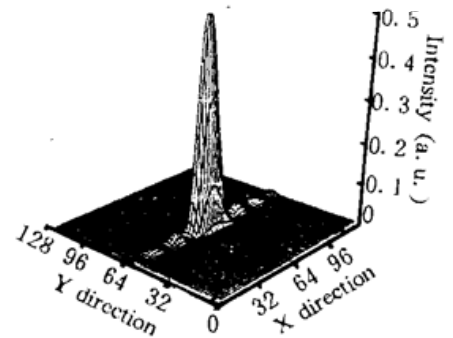


Fig. 3 Spatial distribution of laser beam intensity at the second deflector D_2 with $W/SZ = 0.25$

克服这种不利因素的方法之一是用在扫描方向上有透过率变化的薄膜或衰减片来替代狭缝光通量调制器，但要制造具有满足需要的空间分辨率的任意的透过率分布及抗光损伤的薄膜和衰减片是不容易的；另外一种方法是利用限束和空间滤波的技术对复原后光强空间分布不一致的光束在空间上再整形，理论上用快速傅里叶变换验证表明这种方法是可行的，图 4 为从时域复原的光束通过纠正光阑 H_0 和空间滤波器后输出光束在空间上的光强分布。计算结果表明，光束基本上恢复了其空间对称一致性，特别对于具有许多级限束光阑和空间滤波器的激光系统这是相当有效的。

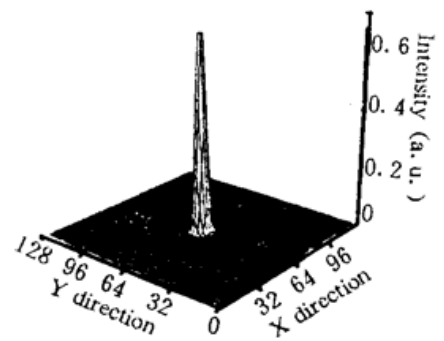


Fig. 4 Spatial distribution of output beam intensity after spatially rectifying

4 复杂激光脉冲的整形

为了减少对靶预热不利因素和增加压缩密度,惯性约束核聚变实验要求短波长的复杂

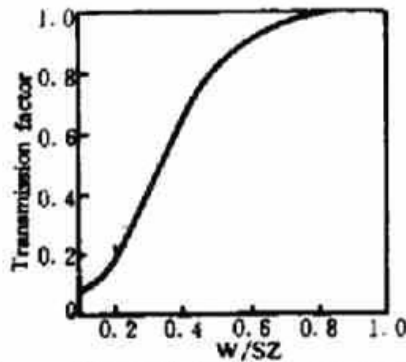


Fig. 5 Curve of transmission factor versus ratio of slit width to focused spot size

激光脉冲做驱动源。而目前还没有能够提供实现核聚变所需能量的工作于短波长的激光系统,最具有竞争力的是工作波长在红外的激光系统,通过倍频提供大能量短波长的激光脉冲,而且为了提高放大系统的能量的汲取效率,放大系统往往工作于饱和放大区,这样从激光系统的前置级到倍频晶体是一个非线性系统,为了满足惯性约束核聚变所要求的短波长的复杂激光脉冲,这就要求位于前置级的激光脉冲整形系统必须事先进行

补偿校正,整形出满足要求的波形。

引入空间光束整形系统后,整个系统的损耗不仅由光通量调制狭缝的宽度决定,还取决于校正光阑和其后的空间滤波器。图 5 为整个系统的光强透过率曲线,它是光通量调制狭缝宽度 W 和光束焦斑大小 SZ 之比的函数。

为了测试本系统的复杂激光脉冲整形能力,本文挑选了一个典型的理论上为惯性约束核聚变而设计的波形,如图 6 所示^[9],以它作为本整形系统输出二倍频的目标波形。由于复杂脉冲的底宽只有几个纳秒,对于几十纳秒的调 Q 脉冲来说,这段时间内的幅度变化不大,因此,只需根据图 6 的波形计算出相应的基频波形,得到整形系统的透过率随时间变化的曲线,利用图 5 整形系统透过率和调制光通量狭缝宽度的关系及电光偏转器的扫描速度,就可以确定狭缝的长度和形状。图 7 是倍频以后,用可见光条纹相机测量得到的波形,脉冲的持续时间为 3.23 ns,脉冲底部的上升时间为 210 ps,底峰强度之比为 0.124,和图 6 目标波形十分相近,这一实验结果表明系统具备了大于 280 ps 以上的任意复杂脉冲波形整形的能力。

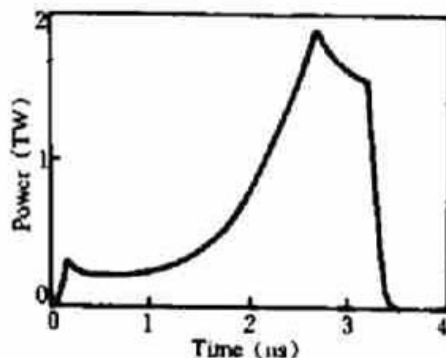


Fig. 6 Third-harmonic pulse designed for an ICF experiment produced on Nova is typical of pulses of interest. Front-to-back contrast ratio is $\sim 1:8$

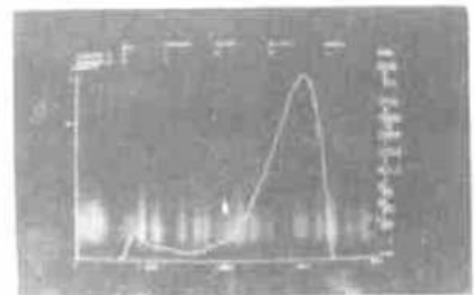


Fig. 7 Picture of second-harmonic shaped pulse taken from a C979 streak camera

如想获得别的复杂脉冲波形,只要依照上述步骤设计加工一块光通量调制狭缝,插入光路即可。用这种方法获得复杂脉冲非常简单,不仅如此,由于整形脉冲前光束是被完全阻挡的,因此整形以后的光脉冲的信噪比很高。

参 考 文 献

- [1] S. Bodner, M. Emery *et al.*, Symmetry stability and efficiency in direct-drive laser fusion. *Proceedings of the 10th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, 1988, 3 : 155
- [2] J. Nuckolls, L. Wood *et al.*, Laser compression of matter to super-high densities; thermonuclear (CTR) applications. *Nature*, 1972, 239(5368) : 139~142
- [3] J. K. Lawson, D. R. Speck *et al.*, Temporal shaping of third-harmonic pulses on Nova laser system. *Appl. Opt.*, 1992, 31(24) : 5061~5068
- [4] R. B. Wilcox, D. F. Browning, Oscillator and pulse-forming system for the Beamlet, 资料, 115~122
- [5] 许发明, 范滇元, 陈绍和等, LiNbO₃ 电光偏转器的研究. *光学学报*, 1996, 16(3) : 369~372

Shaping of Laser Complex Shape Pulses

Xu Faming Cheng Shaohe Cheng Lanrong Lu Qirong

Xu Shizhong Fan Dianyuan Deng Ximing

(Shanghai Institute Optic and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 6 February 1996)

Abstract This paper introduces the principles of pulse shaping by method of spatial-temporal transform. It is pointed out that a slit of light fluence modulator would cause dynamical discordance of spatial intensity distribution. The solution is presented and certified by two dimension FFT stimulation mathematically. Finally the dependence of system transmission factor on focused beam spot size and width of the slit is caculated. Experimentally a complex pulse is got, which is typical one for ICF experiment to demonstrate the shaping ability of the system.

Key words spatial-temporal transform method, complex shape pulse, pulse shaping.