

多臂迈克耳逊干涉仪激光脉冲整形系统 ——参数的设计*

谢兴龙 陈绍和 邓锡铭

(中国科学院上海光机所高功率激光联合实验室 上海 201800)

提要 设计了纳秒级激光脉冲整形的多臂迈克耳逊干涉仪系统,并且从理论上分析了利用全光学手段对激光脉冲进行整形的过程。根据特定的输出波形计算了一组系统参数,比较了该组参数下实际输出的波形与参考波形的关系,指出在二倍到四倍初始脉宽之内,系统可以较好地整形。

关键词 多臂迈克耳逊干涉仪,全光学手段,激光脉冲整形

1 引言

高功率激光系统中,对前级激光脉冲进行整形是必要的工作,针对不同的实验要求,输出不同形状的激光脉冲,可以大大提高激光脉冲能量的利用率。从原理上来说,目前纳秒级激光脉冲整形大致有以下几种手段:电光手段^[1]、时空变换手段^[2,3]、全光学手段^[4,5]和集成光学手段^[6,7]。本文从全光学手段出发,设计了一种简单而造价低廉的多臂迈克耳逊干涉仪整形系统,并从理论上计算了各反射镜元的参数,与四光路叠加系统^[4]相比,调节一路光程只需调整光路中相对应的一个全反射镜元的位置即可,而四光路叠加系统中,调节一路光程则至少需要调整两个反射镜元的位置,从而节约了大量的工时。

2 多臂迈克耳逊干涉仪脉冲整形系统

图 1 为多臂迈克耳逊干涉仪脉冲整形系统的示意图,图中,激光器输出宽度为 1.0 ns 左右的初始激光脉冲,经过多臂迈克耳逊干涉仪进行叠加之后,由反射镜 R_8 输出整形后的激光脉冲,再经过波面平滑单元和空间滤波器平滑、滤波之后,输入到下一级放大系统。为了消除脉冲经过分光元件反射后的多光点现象, R_4, R_5, R_6, R_8, R_9 一般不再是表面相互平行的平板,而是将其两表面设计成一个 $1^\circ \sim 2^\circ$ 的小角度,这样经过反射之后后表面的反射光点将会偏出系统。

多臂迈克耳逊干涉仪脉冲整形系统的光路和光程如下所示:

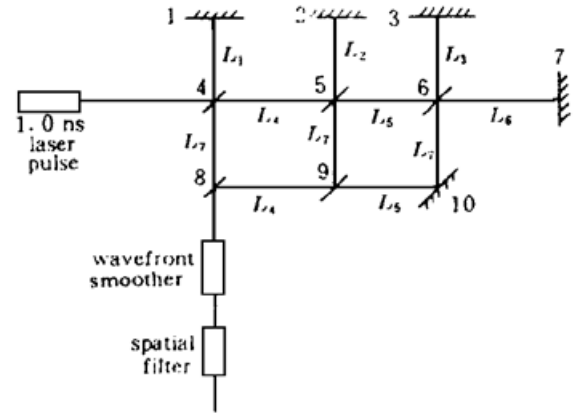
* “神光-1”精密化资助课题。

图 1 多臂迈克尔逊干涉仪激光脉冲整形示意图

图中 1, 2, 3, 7, 10 为全反射镜, 4, 5, 6, 8, 9 为分光元件, 它们对应的反射系数分别为 R_i , 且 $R_1, R_2, R_3, R_7, R_{10} = 1$

Fig. 1 Multiarm Michelson interferometric system for the shaping of the laser pulse

Where 1, 2, 3, 7, and 10 are total reflection mirrors and 4, 5, 6, 7, and 9 are beam splitters whose reflectance are expressed by R_i . Furthermore R_1, R_2, R_3, R_7 , and R_{10} of the total reflection mirrors equal to 1



光路:

$$R_4 R_1 (1 - R_4) (1 - R_8)$$

$$(1 - R_4) R_5 R_2 R_5 R_4 (1 - R_8)$$

$$(1 - R_4) R_5 R_2 (1 - R_5) R_9 R_8$$

$$(1 - R_4) (1 - R_5) R_6 R_3 R_6 R_5 R_9 R_8$$

$$(1 - R_4) (1 - R_5) R_6 R_3 R_6 (1 - R_5) R_4 (1 - R_8)$$

$$(1 - R_4) (1 - R_5) R_6 R_3 (1 - R_6) R_{10} (1 - R_9) R_8$$

$$(1 - R_4) (1 - R_5) (1 - R_6) R_7 R_6 R_{10} (1 - R_9) R_8$$

$$(1 - R_4) (1 - R_5) (1 - R_6) R_7 (1 - R_6) R_5 R_9 R_8$$

$$(1 - R_4) (1 - R_5) (1 - R_6) R_7 (1 - R_6) (1 - R_5) R_4 (1 - R_8)$$

光程:

$$2L_1 + L_7$$

$$2L_2 + 2L_4 + L_7$$

$$2L_2 + 2L_4 + L_7$$

$$2L_3 + 2L_5 + 2L_4 + L_7$$

$$2L_3 + 2L_5 + 2L_4 + L_7$$

$$2L_3 + 2L_5 + 2L_4 + L_7$$

$$2L_6 + 2L_5 + 2L_4 + L_7$$

$$2L_6 + 2L_5 + 2L_4 + L_7$$

$$2L_6 + 2L_5 + 2L_4 + L_7$$

其中反射系数 $R_1 = R_2 = R_3 = R_7 = R_{10} = 1$ 。

3 多臂迈克尔逊干涉仪脉冲整形系统参数的确定

激光脉冲在真空中传播时满足

$$E(x, y, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint E(k_x, k_y, \omega) \exp[i(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)] d\omega dk_x dk_y \quad (1)$$

其中

$$E(k_x, k_y, \omega) = \iiint E(x, y, 0, t) \exp[-i(\omega t - k_x x - k_y y)] dx dy dt \quad (2)$$

$$k_z = \sqrt{(\omega/c)^2 - k_x^2 - k_y^2} \quad (3)$$

假定初始激光脉冲为单色平面高斯包络脉冲, 即

$$z = 0 \text{ 时, } E(x, y, 0, t) = A_0 \exp(-t^2/T^2) \exp(i\omega t) \quad (4)$$

按(1)式积分得

$$E(z, t) = A_0 \exp\left[-\left(\frac{t - z/c}{T}\right)^2\right] \exp[i\omega(t - z/c)] \quad (5)$$

如果要求输出的脉冲也为平面单色脉冲, 只不过其振幅包络是特定的形状, 令

$$E'(t) = f(t) \exp(i\omega t) \quad (6)$$

计算中我们采用为 ICF 打靶所设计的特殊脉冲为输出脉冲^[8], 并令初始脉冲的 $T = 1.0 \text{ ns}$, $f(t)$ 的近似式为

$$\begin{aligned}
 f(t) &= 61.147t - 3.944 & 0.0645 \text{ ns} \leq t \leq 0.129 \text{ ns} \\
 f(t) &= 2.3563t^2 - 3.1712t + 4.31387 & 0.129 \text{ ns} \leq t \leq 1.000 \text{ ns} \\
 f(t) &= 1.92985t^2 - 2.7875t + 4.3567 & 1.000 \text{ ns} \leq t \leq 2.000 \text{ ns} \\
 f(t) &= 2.83776t^2 - 8.4377t + 12.025 & 2.000 \text{ ns} \leq t \leq 2.710 \text{ ns} \\
 f(t) &= 5.5365t^2 - 34.565t + 63.009 & 2.710 \text{ ns} \leq t \leq 3.161 \text{ ns} \\
 f(t) &= -35.163t + 120.222 & 3.161 \text{ ns} \leq t \leq 3.419 \text{ ns}
 \end{aligned} \tag{7}$$

振幅对照比为 1·2.8, 峰值相对振幅为 10。

初始激光脉冲经过多臂迈克耳逊整形系统后, 得到 4 个分量:

$$E_i(z_i, t) = A_i \exp\left[-\left[\frac{t - z_i/c}{T}\right]^2\right] \exp[i\omega(t - z_i/c)] \quad (i = 1, 2, 3, 4) \tag{8}$$

由于波面平滑器和空间滤波器的作用, 可以使等相面上振幅的分布非常均匀, 从而可以略去 (8) 式中的相位因子 $\exp[i\omega(t - z_i/c)]$ 。

定义瞬时均方差函数

$$G(t) \equiv \left[f(t) - \sum_i A_i \exp\left[-\left[\frac{t - z_i/c}{T}\right]^2\right] \right] \exp(i\omega t) \tag{9}$$

则总均方差为

$$\int G(t) G^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left[f(t) - \sum_i A_i \exp\left[-\left[\frac{t - z_i/c}{T}\right]^2\right] \right]^2 dt \tag{10}$$

根据 ICF 打靶脉冲的宽度(约为 3.2 ns)和初始脉冲的宽度 $T = 1.0 \text{ ns}$, 可以任意选定一组 z_i 值为

$$z_1 = 12.0 \text{ cm}; \quad z_2 = 36.0 \text{ cm}; \quad z_3 = 60.0 \text{ cm}; \quad z_4 = 84.0 \text{ cm}$$

然后将 (10) 式对 A_i 求偏导并令其等于零得

$$\int \exp\left[-\left[\frac{t - z_i/c}{T}\right]^2\right] \left[f(t) - \sum_{j=1}^{j=4} A_j \exp\left[-\left[\frac{t - z_j/c}{T}\right]^2\right] \right] dt = 0 \tag{11}$$

式中 $i = 1, 2, 3, 4$ 。将 $f(t)$ 的近似表达式代入上式, 利用数值方法进行积分, 然后算得各分量的相对振幅为

$$A_1 = 1.085; \quad A_2 = 2.806; \quad A_3 = 2.604; \quad A_4 = 8.005$$

3.1 各光程的确定

假定分光元件的厚度为 0.1 cm, 折射率为 1.5, 由此带来的时间延迟为 $(n - 1)/c = 1.67 \text{ ps}$, 考虑到相邻激光脉冲的时间间隔为几百 ps, 另一方面, 由于初始激光脉冲为宽度 1 ns 的时域高斯脉冲, 其位置即使移动达到 10 ps, 叠加后的影响也不会太大, 故此为简单起见分光元件的厚度可以略去不加考虑, 于是对应于第二节中的光路有

$$\begin{aligned}
 2L_1 + L_7 &= z_1 \\
 2L_2 + 2L_4 + L_7 &= z_2 \\
 2L_3 + 2L_4 + 2L_5 + L_7 &= z_3 \\
 2L_6 + 2L_4 + 2L_5 + L_7 &= z_4
 \end{aligned} \tag{12}$$

任意选定 $L_7 = 4.0 \text{ cm}$, $L_4 = 12.0 \text{ cm}$, $L_5 = 12.0 \text{ cm}$, 解得 $L_1 = 4.0 \text{ cm}$, $L_2 = L_3 = 4.0 \text{ cm}$, $L_6 = 16.0 \text{ cm}$, 这样计算的值可以近似认为是分光元件之间的距离。

3.2 分光元件反射系数的确定

根据振幅合成法则得如下方程

$$\begin{aligned}
 A_4 &= A_0 R_4 (1 - R_4) (1 - R_8) \\
 A_3 &= A_0 (1 - R_4) R_5^2 R_4 (1 - R_8) + A_0 (1 - R_4) R_5 (1 - R_5) R_9 R_8 \\
 A_2 &= A_0 (1 - R_4) (1 - R_5) R_6^2 R_5 R_9 R_8 + A_0 (1 - R_4) (1 - R_5)^2 R_6^2 R_4 (1 - R_8) + \\
 &\quad A_0 (1 - R_4) (1 - R_5) R_6 (1 - R_6) (1 - R_9) R_8 \\
 A_1 &= A_0 (1 - R_4) (1 - R_5) (1 - R_6) R_6 (1 - R_9) R_8 + A_0 (1 - R_4) (1 - R_5) (1 - R_6)^2 R_5 R_9 R_8 + \\
 &\quad A_0 (1 - R_4) (1 - R_5)^2 (1 - R_6)^2 R_4 (1 - R_8)
 \end{aligned} \tag{13}$$

考虑到激光脉冲在传输过程中的损失,假定初始激光脉冲的相对振幅为 64,并令 $R_4 = 0.50$,利用计算机进行数值迭代解得

$$R_5 = 0.28; \quad R_6 = 0.70; \quad R_8 = 0.51; \quad R_9 = 0.69$$

4 整形系统输出结果的数值模拟与理论比较

图 2 为所设计的整形系统输出脉冲时域包络的数值模拟结果,由于假定了在空域上是无限大的平面波,故在传输的过程中,光脉冲的空域特性不变。图 3 是为 ICF 打靶所设计的脉冲^[8],通过比较图 2 与图 3 可以看出,所设计的系统基本上可以取得预期的整形效果。进一步分析知道,输出整形脉冲的宽度在一定程度上受到初始脉冲宽度的限制,一般当初始激光脉冲的宽度为 T 时,输出整形脉冲的宽度在 $2T \sim 4T$ 时,整形系统能够获得较为理想的结果。

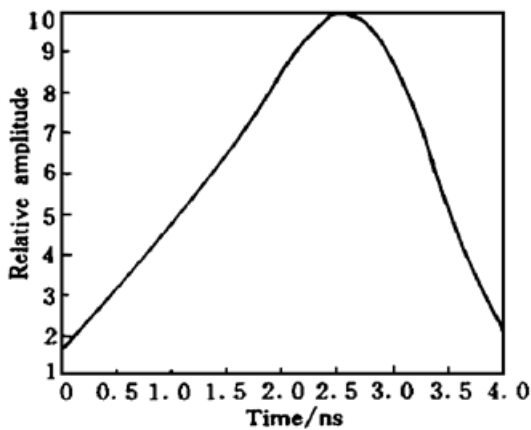


图 2 根据设计的参数计算的脉冲形状

Fig. 2 Calculated pulse shape with designed parameters

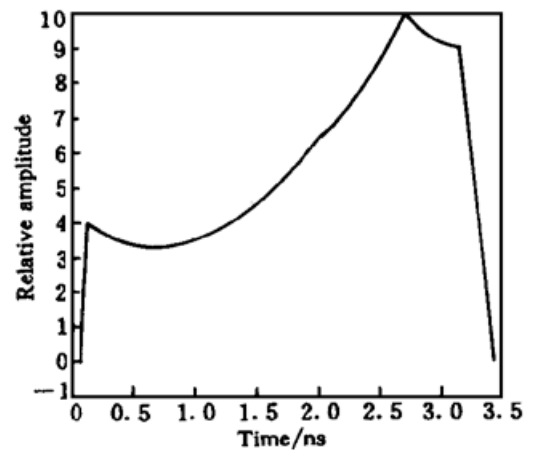


图 3 Nova 装置上为约束核聚变试验设计的激光脉冲形状,振幅对照比(平台与峰值之比)为 1:2.8

Fig. 3 Pulse shape designed for an ICF experiment produced on a Nova system. Front-to-back contrast ratio of the amplitude is 1:2.8

参 考 文 献

- 1 R. S. Craxton, ed.. OMEGA Upgrade preliminary design, laboratory for laser energetics report: DOE/DP 40200-101, University of Rochester, 1989, Oct. P5. 11~ 5. 15
- 2 V. S. Belyaev, A. R. Isaakyan, K. V. Kolchin *et al.*. Formation of laser ultrashort pulse by the deflection method. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1991, **21**(12): 1369~ 1373
- 3 Xu Faming, Chen Shaoh, Chen Lanrong *et al.*. Pulse chopping by fast-response electro-optic deflectors.

Chinese J. Lasers (中国激光), 1996, **A23**(9) : 811~ 814 (in Chinese)

- 4 D. R. Speck, E. S. Bliss, J. A. Glaze *et al.*. The Shiva laser-fusion facility. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9) : 1599~ 1619
- 5 N. Miyanaga, S. Matsuoka *et al.*. 1st Annual Conf. on Solid State Laser for Application to ICF, Monterey, CA, 1995, 321~ 328
- 6 B. M. Van Wonterghem, D. R. Speck, M. Norman *et al.*. A compact and versatile pulse generation and shaping subsystem for high energy laser systems. *SPIE*, 1993, **1870** : 64~ 72
- 7 R. B. Wilcox, W. Behrendt, D. F. Browing *et al.*. Fusion laser oscillator and pulse-forming system for using integrated optics. *SPIE*, 1993, **1870** : 53~ 63
- 8 J. K. Lawson, D. R. Speck, C. Bibeau *et al.*. Temporal shaping of third-harmonic pulses on the Nova laser system. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(24) : 5061~ 5068

Multi-arm Michelson Interferometric System for the Shaping of the Laser Pulse——. Parameter Design

Xie Xinglong Chen Shaohe Deng Ximing

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

Abstract A multi-arm Michelson interferometric system for the shaping of the nanosecond laser pulse is designed. Process of the pulse shaping by an all-optical method is analyzed theoretically. According to a specially designed pulse shape for the purpose of ICF targeting usage, parameters of the system are calculated. In conclusion, when the width of the shaped laser pulse is in the range from 2 times to 4 times the width of the primary input pulse, the pulse shaping system works well.

Key words multi-arm Michelson interferometer, all-optical method, shaping of the laser pulse