

文章编号: 0253-2239(2007)03-0477-5

# 高功率激光装置前端系统激光脉冲的时间整形及修正技术

王艳海 王江峰 李学春

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘要:** 针对激光惯性约束聚变实验研究对高功率激光驱动器前端系统复杂时间形状种子激光脉冲的需求, 应用孔径耦合带状线集成波导整形系统设计了满足需要的前端整形激光脉冲。用一种新方法精确计算了孔径耦合带状线电脉冲整形器的耦合系数和孔径宽度的数值关系, 并针对高衬比度整形激光脉冲的需求, 提出了高衬比度双极型集成波导整形系统方案。由该系统可以得到 100 ps 脉冲前沿、1~3 ns 脉冲宽度可调、高衬比度(大于 100:1)、光滑无纹波调制、可精确满足神光 II 八路及第九路装置需求的前端整形激光脉冲。

**关键词:** 激光技术; 时间整形; 孔径耦合带状线; 层剥技术; 电光波导调制器

中图分类号: TN249 文献标识码: A

## Laser Pulse Shaping and Modification Techniques in Front-End of High-Power Laser Facility

Wang Yanhai Wang Jiangfeng Li Xuechun

(National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** Due to the demand of complicated-time-shape seed laser pulse for inertial confine fusion (ICF) research, by using the pulse-shaping system based on aperture-coupled striplines, we design the front-end laser pulse temporal waveform, which totally meets the requirement of physical experiments. Besides, we precisely calculate the numerical relationship between the voltage coupling coefficient of the aperture-coupling striplines and its aperture width with a new method. In order to meet the demand of high-contrast laser pulse waveform, we put forward a new scheme based on double-electrode integrated wave-guide modulator. The system is capable of providing 1~3 ns pulse envelope, high contrast (>100:1) and slippery waveform, meeting the "ShenGuang II" eight lines and the ninth facility demand of the front-end temporal shaping laser pulse.

**Key words:** laser technique; temporal shaping; aperture-coupling stripline; layer-peeling technique; electro-optic waveguide modulator

## 1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)实验中,要求高功率激光驱动器系统终端能输出不同时间形状的激光脉冲,以满足不同的物理实验的要求,并使得靶丸获得最大限度的压缩。但是在高能量激光脉冲的情况下,主放大器工作在近饱和状态,由于增益饱和效应,主放大器对脉冲前沿的增益系数将高于对脉冲后半部分的增益系数,放大后的激光脉冲将产生时间畸变<sup>[1]</sup>。为了充分提取放大器能量,实现终端特定形状的激光脉冲

输出,要求前端系统对激光脉冲进行时间整形。同时物理实验对激光脉冲形状的多样化要求,也要求前端能输出不同时间形状的激光脉冲。高功率激光驱动器终端输出激光脉冲能量越大,激光脉冲放大过程中产生的时间畸变也越大,要求前端系统输出激光脉冲的衬比度越高。因此高衬比度的脉冲时间整形能力是衡量前端系统的一个重要指标。目前,惯性约束聚变前端的整形技术主要分为两种技术路线,一种是基于单纵模长脉冲削波的集成波导电光调制技术,另一

作者简介: 王艳海(1979—),男,河南人,博士研究生,主要从事激光束时间整形的研究。E-mail: wangyh@siom.ac.cn

导师简介: 李学春(1972—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事神光 II 前端系统的研究工作。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn

收稿日期: 2006-07-12; 收到修改稿日期: 2006-11-30

种基于单激光脉冲堆积技术。

本文基于孔径耦合带状线集成波导电光调制技术进行激光脉冲整形,用一种新方法重新计算了孔径耦合带状线的电压反射系数和孔径宽度的数值关系,讨论了高功率激光系统所需的前端整形激光脉冲的设计工作,并针对高衬比度整形激光脉冲的需求,在现有整形系统的基础上提出了高衬比度双极型整形方案。

## 2 前端激光脉冲的设计

高功率激光器系统前端时间整形激光脉冲的设计,由终端输出激光脉冲形状逆向计算出前端种子激光脉冲时间波形,然后通过集成波导调制器计算出激光脉冲时间波形和电脉冲波形的对应关系,由孔径耦合带状线电脉冲整形器得到整形电脉冲,整形电脉冲便通过集成波导调制器对激光脉冲进行时间整形。

### 2.1 集成波导激光脉冲整形系统原理

集成波导激光脉冲整形系统原理如图1。由单纵模光纤激光器输出的连续激光脉冲经过声光斩波器斩波后,经过光纤放大器放大,然后通过单模保偏光纤耦合到双极型波导调制器。光纤激光器输出的激光脉冲波形为近高斯形,时间长度远大于整形电脉冲,所以在整形电脉冲作用于激光脉冲期间,激光脉冲的幅度近似恒等于其峰值幅度。波导调制器在偏置电压的作用下,在整形电脉冲和门电脉冲到来前后,光脉冲透射率到达最小值,处于关闭状态,仅当整形电脉冲和门电脉冲到达时,光脉冲才能透过波导调制器,因此激光脉冲幅度和时间宽度都由整形电脉冲决定。

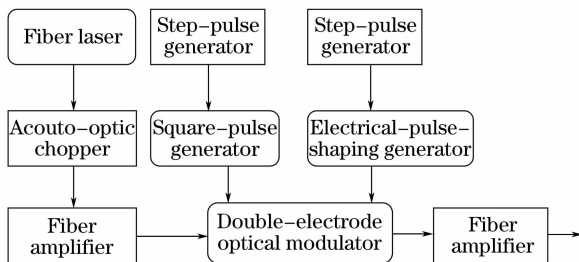


图1 激光脉冲整形系统原理图

Fig. 1 System of laser pulse shaping

如果忽略有限的频率带宽以及调制的相位变量,波导调制器输出激光脉冲的时间形状取决于

$$I_{\text{out}}(t) = I_{\text{in}} \sin^2 \left[ \frac{\pi}{2} \frac{V_{\text{gate}}(t)}{V_{\pi}} \right] \sin^2 \left[ \frac{\pi}{2} \frac{V_{\text{shape}}(t)}{V_{\pi}} \right], \quad (1)$$

其中  $I_{\text{in}}$  为波导调制器输入激光脉冲强度,  $V_{\pi}$  为电

光调制器半波电压,  $V_{\text{gate}}(t)$ 、 $V_{\text{shape}}(t)$  为门电脉冲和整形电脉冲电压,  $I_{\text{out}}(t)$  为整形后的激光脉冲强度。输出整形激光脉冲被送到光纤放大器放大,然后再经过固体激光放大器高增益放大,就可以得到前端系统最后输出的整形激光脉冲。

### 2.2 孔径耦合带状线电脉冲整形器原理

由2.1节可知,激光脉冲波形和宽度是由加在集成波导调制器上的整形电脉冲决定的,而整形电脉冲则由孔径耦合带状线电脉冲整形器产生。如图2所示,孔径耦合带状线电脉冲整形器是一个四层、四端口装置,由四层介电常量为2.2的微波薄板叠压在一起。

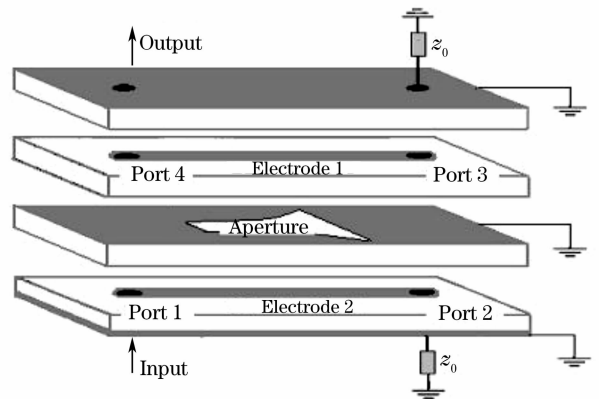


图2 孔径耦合带状线电脉冲整形装置

Fig. 2 Configuration of electrical pulse shaping based on aperture-coupled striplines

当测试不同耦合孔径下输出电脉冲波形时,得到一些重要结论:1)实验发现端口1的反射输出波形和端口4得到的耦合输出波形相同;2)同一位置处耦合系数和反射系数相等;3)孔耦合带状线等效于一条变阻抗传输线,其有效阻抗是由耦合孔径的宽度决定,有效阻抗的大小又决定了耦合电脉冲的大小。

单条传输线上的电压和电流服从电报方程<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial e(x,t)}{\partial x} = -L(x) \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}, \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -C(x) \frac{\partial e(x,t)}{\partial t}, \end{cases} \quad (2)$$

其中  $e(x,t)$  为电压信号,  $i(x,t)$  为电流信号,  $L(x)$  为传输线的电感,  $C(x)$  为传输线的电容。定义传输线的特征阻抗为  $Z(x) = \sqrt{L(x)/C(x)}$  以及电脉冲速度为  $c = dx/dt$ , 则(2)式可以转化为

$$\begin{cases} \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = -k(x)V(x,t) - c \frac{\partial I(x,t)}{\partial t}, \\ \frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = k(x)V(x,t) - c \frac{\partial I(x,t)}{\partial t}, \end{cases} \quad (3)$$

其中  $V(x,t) = e(x,t)Z^{-1/2}(x)$ ,

$$I(x,t) = i(x,t)Z^{1/2}(x),$$

$k(x)$  为传输线上各点的反射系数。(3) 式可以进一步化简为

$$\begin{aligned} \frac{\partial WR(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{c} \frac{\partial WR(x,t)}{\partial t} &= -k(x)WL(x,t), \\ \frac{\partial WL(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{c} \frac{\partial WL(x,t)}{\partial t} &= -k(x)WR(x,t), \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $WR(x,t) = [V(x,t) + I(x,t)]/2$  为右行波,  $WL(x,t) = [V(x,t) - I(x,t)]/2$  为左行波。

基于以上结论,耦合孔径的计算可以转化为反射系数  $k(x)$  的计算,而变阻抗传输线的反射系数和电脉冲波形数值关系用层剥技术<sup>[3]</sup> 解决。由于耦合孔径一般是不规则的几何形状,因此直接计算反射系数和耦合孔径的关系很困难。但是只要找出孔径宽度和反射系数的数值关系,就可以运用层剥技术解决孔径的设计问题。

定义阻抗反射系数

$$k_i = \frac{Z_i - Z_{i-1}}{Z_i + Z_{i-1}}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} WR_{i,j}^+ \\ WL_{i,j}^+ \end{bmatrix} = (1 - k_j)^{-1/2} \begin{bmatrix} 1 & -k_j \\ -k_j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} WR_{i,j}^- \\ WL_{i,j}^- \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$WR_{i+1,j}^- = WR_{i,j}^+, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N - i \quad (7)$$

$$WL_{i+1,j}^- = WL_{i,j+1}^+, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N - i \quad (8)$$

如图 3 所示,式中  $WR_{i,j}^-$ 、 $WR_{i,j}^+$ 、 $WL_{i,j}^-$ 、 $WL_{i,j}^+$  分别表示位置  $x = i\Delta x - \epsilon$ 、 $x = i\Delta x + \epsilon$ ,时刻  $t = i + 2(j - 1)\Delta t$ ,左行波和右行波的幅值。

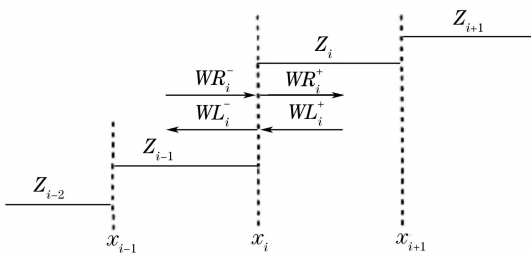


图 3 左行波、右行波的定义

Fig. 3 Definition of right- and left-traveling waves

阻抗反射系数可由下式计算

$$k_i = WL_{i,1}^- / (WR_{i,1}^-), \quad (9)$$

定义电压反射系数为

$$R_i = (Z_i - Z_0) / (Z_i + Z_0). \quad (10)$$

层剥技术认为,变阻抗传输线是由一系列  $(N + 1)$  均匀阻抗且等长的段所组成,每段都有不同的阻抗、电流以及电压。由初始条件

$$Z = Z_0 = 50\Omega, \quad WR_{1,j}^- = a_j, \quad WL_{1,j}^- = b_j,$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (11)$$

其中  $WR_{1,j}^-$  为试验中输入的阶跃电脉冲,  $WL_{1,j}^-$  为示波器测量的输出电脉冲。给定  $Z_0$ ,  $i = 1$ , 并且使用

$$WR_{1,j}^- = a_j, \quad WL_{1,j}^- = b_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N$$

计算步骤如下:

1) 利用(9)式解出  $k_i$  并且利用(5)式解出  $Z_i$ , 利用(10)式计算出位置  $x_i$  处的电压反射系数  $R_i$ ;

2) 利用(6)式计算  $WR_{i,j}^+$  和  $WL_{i,j}^+$ , 其中  $j = 1, 2, 3, \dots, N + 1 - i$ ;

3) 利用(7)式、(8)式计算  $WR_{i+1,j}^-$  和  $WL_{i+1,j}^-$ , 这样就剥去了一个阻抗段;

4) 使  $i = i + 1$ , 重复 1) 到 4) 直到  $i = N$  为止, 计算出所有阻抗段的阻抗、电压、以及电压反射系数。

由以上公式可以计算出各阻抗段处的电压反射

系数  $R_i$ , 由电脉冲传输速度  $v = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$

计算出  $Z_i$  对应的位置  $x_i (j\Delta t)v$ , 再由高斯孔径函数求出对应的宽度, 即可得到耦合孔径宽度与电压反射系数  $R$  的数值关系。

由上述公式,可以得到电压反射  $R$  系数和阻抗反射系数  $k_i$  的关系。只要得到了电压反射系数  $R$ , 就可以解决耦合孔径的设计问题。计算耦合孔径电压反射系数时,必须考虑到阶跃激励电脉冲在传播耦合过程中幅值降低以及前沿变缓的影响,不能简单地以不同宽度的矩形孔径来确定电压反射系数和孔径宽度的数值关系<sup>[4]</sup>。文献[4]中的方法是用长度相同(10 cm)、孔径宽度不同(分别为 1 ~ 15 mm, 宽度相差 1 mm 递增)的耦合孔径,测量耦合输出电压,由  $R = V_{out}/V_{in}$  计算出电压反射系数。我们在实验中采取了开有半高斯孔径的电路板(高斯孔径位置  $x_i$  处的孔径宽度由高斯函数  $x = a \exp[1 - \exp(-y^2/b^2)]$  确定的),高斯孔长 30 cm, 最大孔径为 10 mm, 由宽

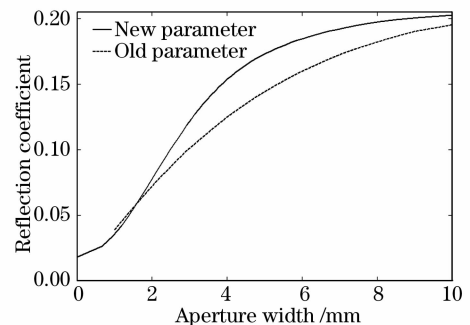


图 4 反射系数随孔径宽度的数值变化关系

Fig. 4 Reflection coefficient values changing with aperture width

带、高取样率数字存储示波器测量孔耦合带状线端口 4 输出的耦合电脉冲,然后利用以上来计算不同大小孔径的电压反射系数。如图 4 所示为反射系数  $R$  随孔径宽度的数值变化关系,实线为利用本文的方法计算出来的新参量,虚线为文献[4]中的方法计算的旧参量。新参量明显比旧参量偏大,这是很容易理解的:文献中的方法由于阶跃激励电脉冲在传播耦合过程中幅值降低,测量的电压值偏小,而整形用的电路板耦合孔径最大值一般不大于 6 mm,所以新方法的非线性效应比文献[4]中的方法要小得多,因此确定的参量也更为精确。

### 2.3 前端整形激光脉冲的设计

惯性约束聚变实验要求终端输出矩形激光脉冲,前端种子激光脉冲在传输放大过程中,由于增益饱和效应,脉冲前、后部分得到不同的增益,输出激光脉冲在将在时间上产生波形畸变。为了输出矩形激光脉冲,必须对前端种子激光脉冲进行时间整形。应用脉冲分割和放大介质分割模型<sup>[5,6]</sup>,由终端输出矩形激光脉冲,反推前端种子激光脉冲波形,由(1)式计算出相应的整形电脉冲  $V_{shape}(t)$  波形,用层剥技术计算出各个位置处的电压反射系数,然后由电压反射系数和孔径宽度的数值关系得出电路板的孔径宽度,最后由孔径耦合带状线电脉冲整形器得到相应的电脉冲。由振荡器输出的激光脉冲通过集成波导调制器,再经过固体激光器放大,即可得到前端整形激光脉冲。这样经过一次整形后,如果终端输出激光脉冲与所需目标输出激光脉冲波形有偏差,可以对前端整形激光脉冲进行修正,如有需要可以多次修正,一般一次修正即可满足实验要求。

该整形方案操作简单,系统稳定,但是也存在一些问题:1) 电脉冲整形器两条微带线不能严格平行的问题,由于固定微带线的微波电路薄板上的定位孔加工不够精确,导致两条微带线不能严格平行,这样每套电脉冲整形器装置同样孔径下的电压耦合系数并不完全一致,用同一开有孔径的整形电路板(如图 2 所示)夹在不同的整形装置上输出的电脉冲波形是有差别的。2) 开有孔径的整形电路薄板的定位孔的加工问题,如果整形电路板的定位孔加工不够精确,导致孔径中心线和微带线不能严格平行,同样会产生电脉冲波形畸变的问题。为了解决以上两个问题,我们可以用 2.2 节的方法,确定每套整形装置(如图 2)的电压耦合系数和孔径的数值关系,设计的整形电路板要加载到与设计该电路板的孔径时所用参量对应的那套电脉冲整形装置。这样经过适当的修正后,可

以设计出满足实验需求的前端整形激光脉冲波形。

图 5~图 8 分别是神光 II 八路 1 ns 激光脉冲打靶所需前端整形激光脉冲修正前后脉冲波形、电脉冲波形对比以及终端基频激光脉冲波形(脉冲能量如表 1 所示)。修正后终端激光脉冲波形起伏的最大相对误差不超过 3%,很好地满足了打靶需求。利用同样的方法,可以设计出满足神光 II 第九路打靶实验需求的前端整形激光脉冲。

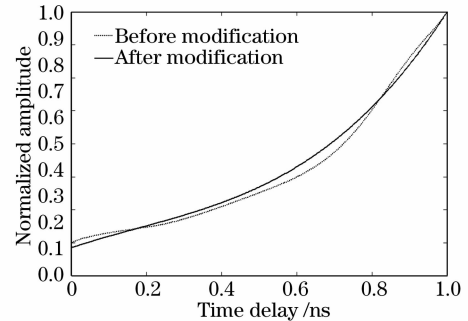


图 5 修正前后前端激光脉冲波形对比  
Fig. 5 Comparison of laser pulse waveform before and after modification

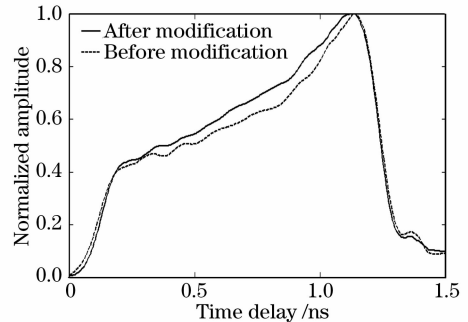


图 6 修正前后电脉冲波形对比  
Fig. 6 Comparison of electrical pulse waveform before and after modification

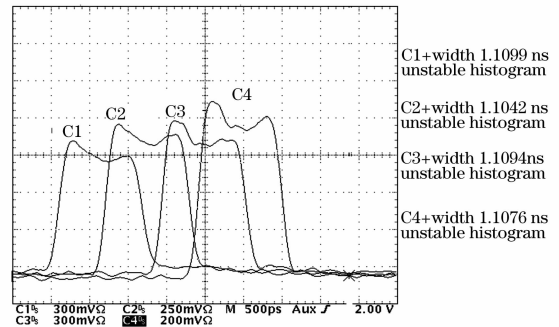


图 7 整形激光脉冲波形修正前神光 II 北四路终端输出激光脉冲波形  
Fig. 7 Exporting laser pulse waveform from the terminals of Shenguang II North-4 lines before laser pulse waveform modification

表 1 神光 II 北四路波形修正前后基频输出能量对比

Table 1 Output-energy comparison in north four lines of laser beampath before and after waveform modification

North four lines of laser beam $1\omega$ energy / J	C1(Fifth beam)	C2(Sixth beam)	C3(Seventh beam)	C4(Eighth beam)
Before modification (number: 0060621008)	480.86	459.94	445.21	458.19
After modification(number: 0060710009)	467.93	458.14	455.49	445.27

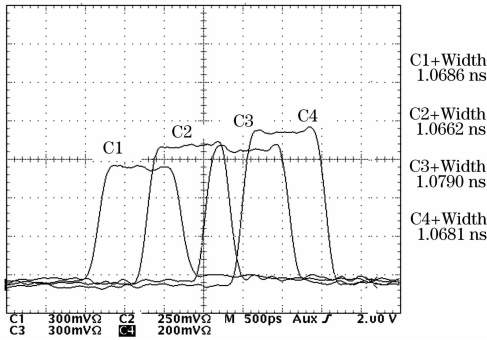


图 8 整形激光脉冲波形修正后神光 II 北四路终端输出激光波形

Fig. 8 Exporting laser pulse waveform from the terminals of Shenguang II North-4 lines after laser pulse waveform modification

### 3 双极型激光脉冲整形系统

由图 3 所示孔耦合电脉冲整形器的孔径宽度和电压反射系数的数值关系,我们可以看出孔径最小值不能太小,否则信号就会被电噪声所湮没,得不到稳定的脉冲前沿;孔径最大值也不可能太大,大于 6 mm 时有效阻抗就出现了非线性的趋势,电压信号值有上限(不能大于双极型集成波导调制器的半波电压)。对于高衬比度激光脉冲的整形(大于 20:1),如果只有一极调制,则因为脉冲前沿的不稳定,经过各级放大器放大后,最终输出波形前沿得不到有效放大,这已经由神光 II 第九路高能打靶实验验证。因此为了得到有稳定的脉冲前沿、高衬比度的整形激光脉冲,可以考虑实行双极型激光脉冲整形方案,即双极型波导调制器的两极均加载整形电脉冲。

如果双极型集成波导调制器的两极均加载整形电脉冲,经过整形后的输出激光脉冲波形由下式决定:

$$I_{\text{out}}(t) = I_{\text{in}} \sin^2 \left[ \frac{\pi}{2} \frac{V_{\text{shape1}}(t)}{V_{\pi}} \right] \sin^2 \left[ \frac{\pi}{2} \frac{V_{\text{shape2}}(t)}{V_{\pi}} \right], \quad (12)$$

如果加在两极上的整形电脉冲形状相同,(12)式可以再简化为

$$I_{\text{out}}(t) = I_{\text{in}} \sin^4 \left[ \frac{\pi}{2} \frac{V_{\text{shape}}(t)}{V_{\pi}} \right], \quad (13)$$

这样,对于同样衬比度整形的需要,单极电路板的耦合孔径宽度就可以相对较大,可以解决原来由于噪声的影响而导致的整形激光脉冲前沿不稳定的问题。由单路可以得到有效的衬比度为 10:1 的整形激光脉冲,由(13)式可以看出利用双极型整形方案可以得到衬比度大于 100:1 的前端整形激光脉冲。

## 4 结 论

本文用一种新方法精确计算了孔耦合带状线电脉冲整形器的电压反射系数和耦合孔径的数值关系,解决了原来参量偏差较大的问题。应用新参量设计出来的前端整形激光脉冲经过各级放大器放大后,终端输出基频激光脉冲波形接近于理想方波脉冲,很好地满足了神光 II 八路激光打靶实验要求。同时,利用本文提出的集成波导调制双极整形方案可以提供第九路所需的高衬比度、脉宽 1~3 ns 的前端整形激光脉冲。

**致谢** 感谢朱海东博士在设计整形激光脉冲波形问题方面给予的有益建议。

## 参 考 文 献

- Deng Ximing, Yu Wunyan. Development of high-power laser system for laser fusion research[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1650~1653
- M. D. Skeldon. A high-bandwidth electrical waveform generator based on an aperture-coupled stripline[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(9): 3559~3566
- Scott C. Burhart, Bussell B. Wilcox. Arbitrary pulse shape synthesis via nonuniform transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1990, **38**(10): 1514~1518
- Gao Yunkai, Jiang Yuntao, Li Xuechun. Laser pulse-shaping system based on aperture-coupled striplines[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1619~1622 (in Chinese)  
高云凯,蒋运涛,李学春.基于孔耦合带状线的激光脉冲整形系统[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1619~1622
- W. H. Lowdermilk, J. E. Murray. The multipass amplifier: Theory and numerical analysis [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(5): 2436~2444
- Liu Renhong, Tan Weihai. An exact solution for laser amplification[J]. *Acta Physica Sinica*, 1995, **44**(7): 1029~1034 (in Chinese)  
刘仁红,谭维翰.激光放大一维问题的解[J]. *物理学报*, 1995, **44**(7): 1029~1034