

文章编号: 0258-7025(2005)12-1619-04

基于孔径耦合带状线的激光脉冲整形系统

高云凯, 蒋运涛, 李学春

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 实现了一种新型的激光脉冲整形系统,该系统使用了一个由孔径耦合带状线(ACSL)电脉冲整形器驱动的电光调制器。一个电脉冲整形器由两条通过其公共接地板上的耦合孔径发生耦合作用的带状传输线所组成的四端口装置。更换具有不同耦合孔径的公共接地板,该电脉冲整形发生器可以具有 150 ps 时间结构的任意整形电脉冲。将任意整形的电脉冲输入到电光调制器上,就可以得到任意整形的激光脉冲。利用该系统,激光脉冲整形系统能够产生具有 150 ps 前后沿,1~3 ns 脉冲宽度可调、高对比度、光滑过渡以及任意整形的激光脉冲。

关键词 激光技术;高功率激光;脉冲整形;电光调制器;孔径耦合带状线

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Laser Pulse-Shaping System Based on Aperture-Coupled Striplines

GAO Yun-kai, JIANG Yun-tao, LI Xue-chun

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

Abstract A new laser pulse-shaping system using an electro-optic modulator driven by an aperture-coupled-striplines (ACSL) electrical-waveform generator has been discussed in this paper. The ACSL electrical-waveform generator consists of two striplines coupled through an aperture in their common ground plane. Replacing the aperture layer, the electrical-waveform can produce arbitrary electrical pulse with 150 ps structure. Giving the arbitrary electrical pulse to the electro-optic modulator, arbitrary optic pulse can be gotten. By the new technique, the laser pulse-shaping system is capable of producing arbitrarily shaped laser pulses with about 150 ps structure, 1~3 ns pulse envelope, high contrast waveform and slippery transition waveform.

Key words laser technique; high power laser; pulse-shaping; electro-optic modulator; aperture-coupled-striplines

1 引言

在惯性约束聚变(ICF)高功率固体激光驱动器系统中,物理实验对激光脉冲形状有着不同的要求。由于受主放大器的结构、增益介质物理特性以及所输出能量等因素的影响,激光脉冲通过主放大链时会发生时域畸变。因此,为了抵消主放大器对激光脉冲带来的时域畸变以及充分提取主放大器中的能量,惯性约束聚变前端系统中需要对注入主放大器的激光脉冲进行任意的时域整形^[1]。目前,惯性约束聚变前端的整形主要分为两种技术路线,一种是基于单纵模长脉冲削波的脉冲整形技术路线,另一种是基于短光脉冲堆积路线。其中单纵模长脉冲削

波路线也经历了两个阶段,一是基于体材料的高压电脉冲成型的泡克耳斯盒(Pockels cell)削波整形技术,一是随着集成光波导技术发展起来的低电压调制的脉冲整形技术。国内的激光脉冲整形技术以中国科学院上海光学精密机械研究所联合实验室的神光Ⅱ的时空变换脉冲削波技术为代表^[2]。

本文讨论一种利用电光调制器技术实现的激光脉冲整形系统,即利用电光调制效应,注入一个特定形状电脉冲到电光调制器中对激光脉冲进行整形。

2 激光脉冲整形系统原理

激光脉冲整形系统主要由两个电脉冲源、一个

收稿日期:2004-09-01;收到修改稿日期:2004-11-25

基金项目:国家 863-416 计划资助项目。

作者简介:高云凯(1977—),男,辽宁沈阳人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事高功率固体激光器前端系统中激光脉冲整形的研究工作。E-mail:gao_yunkai@163.com

双级型电光调制器以及一个基于孔径耦合带状线(ACSL)式电波形整形器组成(如图 1 所示)。图中,从单纵模激光器输出的激光脉冲依次通过电光调制器的一、二两级。与此同时,电方波脉冲源输出一个 3 ns 左右的门脉冲到电光调制器的第一级,这

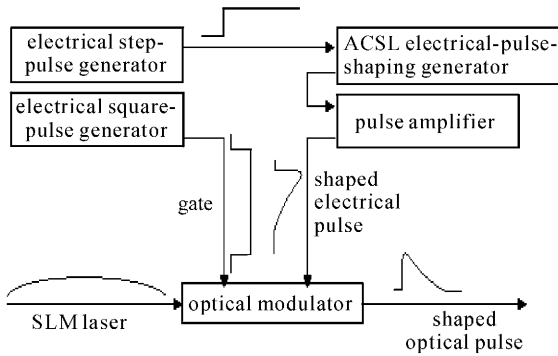


图 1 孔径耦合带状线激光脉冲整形系统
Fig. 1 ACSL laser pulse-shaping system

个门脉冲的宽度决定了整形后激光脉冲的时间宽度。电阶跃脉冲源输出一个快前沿、高幅值的阶跃电脉冲作为电脉冲整形器的输入电脉冲。电脉冲整形器能够输出一个任意形状的电脉冲,该电脉冲决定着整形光脉冲的时间形状。在整形电脉冲输入导电光调制器的第二级之前,需要使用电脉冲放大器对其进行适当的放大以与调制器半波电压相匹配。如果忽略有限的频率带宽以及调制的相位常数的话,从电光调制器出射激光脉冲的时间形状可决定为^[3]

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

式中 I_{in} 为激光输入脉冲, V_{gate} 为门电脉冲, V_{shape} 为整形电脉冲, V_{π} 为电光调制器的半波电压, I_{out} 为整形后的激光输出脉冲。通过适当调整同步关系,可以使整形电脉冲作用于激光输入脉冲的峰值部分。因为激光脉冲的波形为近高斯形,时间长度远大于整形电脉冲的时间长度,所以在整形电脉冲作用于激光脉冲的期间,激光脉冲的幅度恒等于其峰值幅度。将门脉冲的幅度调整为调制器的半波电压,再用激光输入脉冲的峰值幅度对激光输出脉冲进行归一化处理,则(1)式可简化为

$$\tilde{I}_{\text{out}} = \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \frac{V_{\text{shape}}(t)}{V_{\pi}} \right], \quad (2)$$

式中 \tilde{I}_{out} 为归一化后的输出脉冲。在这样的条件下,输出脉冲的形状就决定于整形电脉冲的形状。

3 孔径耦合带状线电脉冲整形器原理

孔径耦合带状线电脉冲整形器是本激光脉冲整形系统中重要的一部分。一个孔径耦合带状线电脉冲整形器是一个四层、四端口装置(如图 2 所示)。外侧为两块双面附铜的高频电路板,其内向一面的附铜层被制作成一条 50Ω 的传输线,其外面的附铜层分别作为两条传输线的接地板。内侧两块电路板只有其中一块的一面有附铜层,这一层附铜层作为两条传输线的公共接地板。端口 2, 3 分别接以 50Ω 的匹配电阻。在孔径耦合带状线中,快前沿的阶跃脉冲输入到端口 1,后沿传输线 1 传播到端口 2 并被匹配负载所吸收。当阶跃脉冲在传输线 1 上传播时,一个耦合电信号通过耦合孔径被耦合到了传输线 2 上,这个耦合电信号最终在端口 4 从孔径耦合带状线中输出。通过适当设计耦合孔径的形状,就可以从端口 4 得到任意时间形状的电波形。

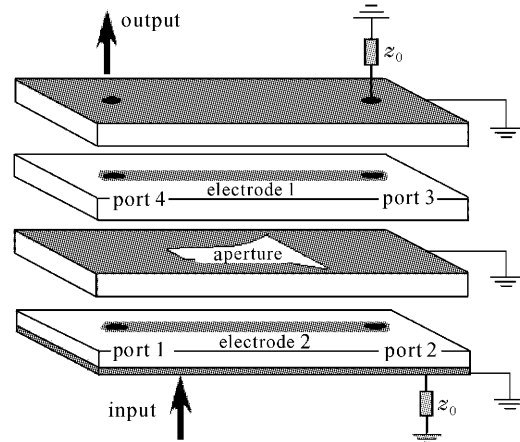


图 2 孔径耦合带状线电脉冲整形发生器
Fig. 2 ACSL electrical-pulse-shaping generator

单条传输线上的电压和电流服从著名的电报方程^[3]

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -L(x) \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}, \quad (3a)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -H(x) \frac{\partial v(x,t)}{\partial t}, \quad (3b)$$

其中 $v(x,t)$ 为电压信号, $i(x,t)$ 为电流信号, $L(x)$ 为沿线的电感, $H(x)$ 为沿线的电容。定义传输线的特征阻抗为 $Z(x) = \sqrt{L(x)/H(x)}$ 以及波速 $c = dx/dt$, 则方程(3)可以转化为

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = -k(x)V(x,t) - c \frac{\partial I(x,t)}{\partial t}, \quad (4a)$$

$$\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = +k(x)I(x,t) - c \frac{\partial V(x,t)}{\partial t}, \quad (4b)$$

其中 $V(x,t) = v(x,t)Z^{-1/2}(x)$, $I(x,t) = i(x,t)Z^{1/2}(x)$, $k(x)$ 为沿线各点的反射系数。如果将方程(4)相加和相减,则可以得到

$$\frac{\partial WR(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{c} \frac{\partial WR(x,t)}{\partial t} = -k(x)WL(x,t), \quad (5a)$$

$$\frac{\partial WL(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{c} \frac{\partial WL(x,t)}{\partial t} = -k(x)WR(x,t), \quad (5b)$$

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。

当有两条传输线的时候,在 1,2 两条传输线上分别存在左右行波,即 $WL1, WR1, WL2$ 以及 $WR2$ 。这四个行波服从一组扩展后的电报方程

$$\frac{\partial WR1(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{c} \frac{\partial WR1(x,t)}{\partial t} = -k(x)WL1(x,t) - C(x)WL2(x,t), \quad (6a)$$

$$\frac{\partial WL1(x,t)}{\partial x} - \frac{1}{c} \frac{\partial WL1(x,t)}{\partial t} = -k(x)WR1(x,t) - C(x)WR2(x,t), \quad (6b)$$

$$\frac{\partial WR2(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{c} \frac{\partial WR2(x,t)}{\partial t} = -k(x)WL2(x,t) - C(x)WL1(x,t), \quad (6c)$$

$$\frac{\partial WL2(x,t)}{\partial x} - \frac{1}{c} \frac{\partial WL2(x,t)}{\partial t} = -k(x)WR2(x,t) - C(x)WR1(x,t), \quad (6d)$$

其中 $C(x)$ 为耦合系数,它体现了在沿线各点处某条线上一个方向的行波与另一条线上另一个方向的行波之间的耦合作用。不同的耦合孔径将对应于不同的 $k(x)$ 和 $C(x)$ 。方程(6)的初值条件为 $WR1, WL1, WR2$ 以及 $WL2$ 均为零,边界条件为 $WR(0,t) = 1$ 对应于理想阶跃电脉冲的输入。当耦合孔径确定以后,由方程(6)可以求解出输出脉冲 $WL2$, 即不同的耦合孔径也将对应于不同的输出脉冲。

4 耦合孔径的设计

当测试不同耦合孔径下输出脉冲形状时,发现耦合输出波形和输入端的反射输出波形(利用时域反射计测量)是完全一样的,即 $WL1 = WL2$ 。因此,通过给定输出端波形求孔径形状和通过给定输入端反射波形求孔径形状是一样的。可以认为孔径耦合带状传输线电脉冲整形器等效于一条变有效阻抗传输线,其与真正的变阻抗传输线^[4]的区别在于:变阻抗传输线问题中传输线阻抗的变化是依靠传输线自身宽度的变化完成的,而孔径耦合带状线电脉冲整

形器问题中传输线的有效阻抗的变化是通过耦合孔径宽度的变化来实现的。虽然直接计算有效阻抗对孔径宽度的依赖关系是非常复杂的,但是通过简单的实验(测量在长度相同宽度不同的矩形孔下反射电压的幅值)就可以得到两者之间的数值关系(图 3 即为实验曲线)。实际上,耦合孔径是采用数控可编程的铣床加工而成,由数控机床的工作特点可知任意形状的耦合孔径都可以看成是由一组宽度不同的矩形孔连接而成的,其中不同宽度的矩形孔对应着不同有效阻抗的阻抗段。如果相邻两阻抗段阻抗值不同,那么在阻抗值跳跃处就会对行波电压产生反射作用。根据图 3 所设计的耦合孔径将作为最终孔径的一级近似,通过实验还将会对耦合孔径进行更精细的修正。这样耦合孔径的设计问题将转化为变有效阻抗传输线的设计问题,而变有效阻抗传输线的设计可以由 Burkhart 等在文献[4]中讨论的层剥技术加以解决。得到符合设计要求的各有效阻抗段的数据以后,就可以根据图 3 所示的关系求出所对应的各矩形孔的宽度数据。各矩形孔的宽度确定以后,它们所连接而成的耦合孔径也就被确定下来了。

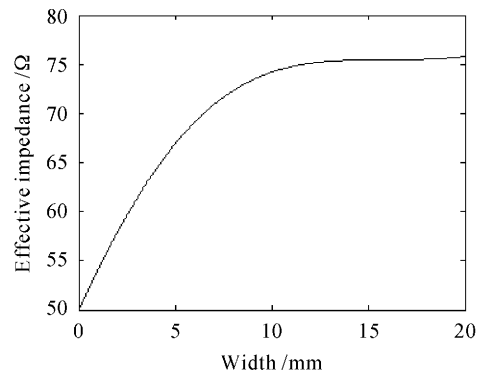


图 3 有效阻抗对孔径宽度的依赖关系

Fig. 3 Effective impedance plotted versus aperture width

5 实验结果

在激光脉冲整形系统中,门电脉冲的幅度为 5 V 左右,时间长度为 3 ns,前沿和后沿均为 150 ps 左右。将 30 V 的电压源连接到快速硅光导开关一端,然后使用 100 ps 激光脉冲照射硅光导开关,在开关的另一端得到了 5 V 左右的阶跃电脉冲,其上升前沿为 150 ps 左右,平顶持续时间为 5 ns 左右。虽然该电脉冲平顶以后部分也能激发出一定的电脉冲,但是通过门电脉冲的隔离作用可以消除这部分的影响。通过这样的方法,可得到快速的阶跃电脉冲源。在阶跃电脉冲情形下,孔径耦合带状线电脉

冲整形器输出的整形电脉冲的最大值约为1.1 V左右。由于电光调制器的半波电压为5 V左右,利用宽频带电脉冲放大器对整形电脉冲进行了适当的放大从而使之与调制器的半波电压相匹配。

实验中设计了各种不同的孔径形状以产生各种不同形状的电脉冲以及光脉冲。图4是时间长度为3 ns左右、波形对比度为1:8呈幂函数形上升的设计输出电脉冲和实测到的输出电脉冲。图5为在整形电脉冲下,设计输出激光脉冲和实测到的输出激光脉冲。从图4可以看出,实测的整形电脉冲形状与设计电脉冲形状基本相符,考虑到示波器基线自身的噪声因素,实际的整形电脉冲的光滑度应该好于图中所示。实测电波形的前沿和后沿与阶跃电脉冲的前沿相当。从图5可以看出,实测的整形激光脉冲形状与设计激光脉冲形状也是基本相符合的。由于公式(2)的原因,激光脉冲的对比度变得更大,前沿和后沿变得更陡。

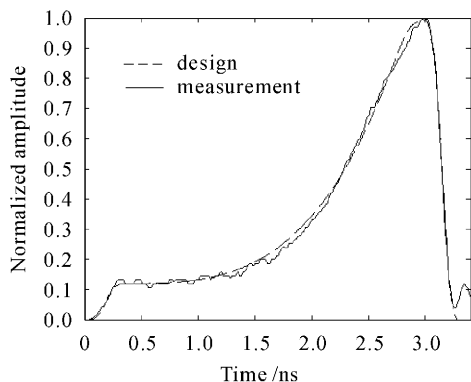


图4 实际测量的电脉冲与设计电脉冲波形的比较

Fig. 4 Measured shaped electrical pulse from an ACSL electrical-pulse-shaping generator is compared with the designed electrical pulse from the device

实验结果表明,在本系统中阶跃电脉冲的前沿决定了整形激光脉冲的前沿和后沿,耦合孔径的长度决定了整形激光脉冲的时间长度,耦合孔径宽度的分布决定了整形激光脉冲的对比度以及变化趋

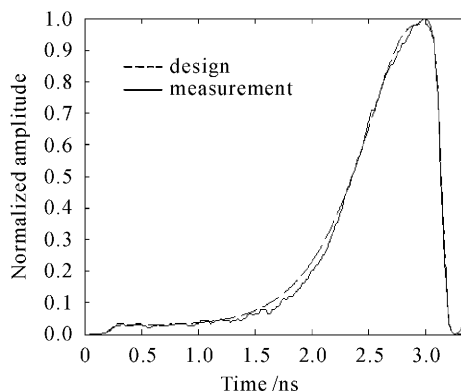


图5 实际测量激光脉冲与设计激光脉冲的比较

Fig. 5 Measured shaped laser pulse from a ACSL laser pulse-shaping system is compared with the designed laser pulse from the system

势。另外,各器件的带宽特性也会影响系统最后的输出特性。

6 结 论

综上所述,成功研制了一种基于孔径耦合带状线的激光脉冲整形系统。实现了前沿为150 ps,波形对比度大于1:40,光滑过渡以及任意整形的激光脉冲输出的整形系统。通过适当的孔径设计,该系统可以产生任意形状的激光脉冲从而满足惯性约束聚变系统对激光脉冲的不同需要。

参 考 文 献

- 1 R. J. Mason. The calculated performance of structured laser fusion pellets [J]. *Nuclear Fusion*, 1975, **15**:1031~1043
- 2 Wei Hui, Xu Shizhong, Zhang Shengjia *et al.*. A novel method for compensating deflection in temporal-spatial transform pulse shaping system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):149~152
韦 辉,许世忠,张生佳等. 时空变换脉冲整形系统中实现光束复原的一种新方法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2):149~152
- 3 M. D. Skeldon. A high-bandwidth electrical waveform generation based on an aperture coupled stripline [J]. *Rev. Sci. Instr.*, 2000, **71**(9):3559~3566
- 4 Scott C. Burkhart, Russell B. Wilcox. Arbitrary pulse shape synthesis via nonuniform transmission lines [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Technol.*, 1990, **38**(10):1514~1518