

文章编号: 0253-2239(2003)05-0598-06

利用集成光学技术的新型时间脉冲整形系统

沈 磊¹ 陈绍和¹ 刘百玉² 许世忠¹ 马忠林¹ 韦 辉¹ 张生佳¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)
(² 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘要: 通过对时间脉冲整形技术的探索, 发展了一套准备应用于未来高功率激光装置的激光脉冲整形系统。在这套整形系统中, 使用了通光波长 $1.053 \mu\text{m}$ 的质子交换型波导调制器。通过这套利用集成光学调制技术的整形系统, 得到了脉冲起伏小于 10% 的整形方波光脉冲。

关键词: 激光技术; 时间脉冲整形, 质子交换型波导调制器; 方波激光脉冲

中图分类号: TN784.1 文献标识码: A

1 引 言

对惯性约束聚变(ICF)实验而言, 前端系统的激光时间脉冲整形不仅能够对靶丸预热、减小惯性约束聚变过程中的瑞利-泰勒不稳定性、提高惯性约束聚变激光驱动能量的利用效率, 而且能有效地减少惯性约束聚变过程中的受激布里渊散射效应(SBS), 防止激光系统中器件的损伤和激光波形的畸变。

为了发展适合国情的激光脉冲整形系统, 同时着眼于未来的发展, 在探索和完善现有的时空变换脉冲整形系统的同时, 参考国外的先进技术^[1~3], 发展了一套准备应用于“神光-III”原型单路装置的激光脉冲整形系统。由于“神光-III”装置是一个 60 路放大的高功率激光系统, 要求其前级系统能迅速灵活地提供具有一定能量、带宽, 输出稳定可靠的整形激光脉冲。

考虑到集成光学调制器的优点(以集成光学和光纤技术替代了块状普克尔盒削波技术, 驱动调制器的电压仅为几伏), 加上配套的高稳定的激光二极管抽运的单纵模振荡器和整形电脉冲源, 能够大大提高激光脉冲整形的稳定性和灵活性。因此, 选用集成光学调制器作为“神光-III”装置脉冲整形的首选方案。而目前比较流行的另一种时间脉冲整形方案, 即日本大阪大学采用的光纤堆砌脉冲整形方案, 确实是一个具有前瞻性的方案, 但是有一定的风

险性。以时间上积累平均来提高光束照明均匀度的方法对惯性约束聚变实验的影响尚未从根本上研究清楚, 是否确实能够满足惯性约束聚变实验的要求目前仍然有争议。

2 利用集成光学技术的新型光学整形系统的基本原理

2.1 总体介绍

集成光学调制单元中的核心元件是用于脉冲整形和频谱加宽的电光波导调制器, 关键元件则是整形电脉冲发生器。集成光学调制器输出的整形激光脉冲的形状和宽度主要取决于输入调制器的整形电脉冲的形状和宽度。为了较灵活地控制整形激光脉冲的形状和宽度, 要求对电脉冲的形状和宽度都能有效、灵活地控制。在 1996 年我们利用微带传输线成功地实现连续整形电脉冲, 在微带传输线输入端加入 1 ns 方波脉冲, 经过一系列可调分压电阻的分压和延时在输出端叠加上所需要的特定形状的电脉冲。通过调整各分压电阻的阻值就可以改变整形电脉冲的形状, 调整微带线的长度就可以改变整形电脉冲的宽度。但是, 这种方法由于叠加脉冲之间相互关联, 难以实现计算机控制, 调整起来比较麻烦, 而且整形电脉冲的时间分辨率也比较低。考虑到以上的问题, 改用 GaAs 场效应管的电压控制电流和开关的两个特性成功研制了整形电脉冲发生器(AWG)。该整形电脉冲发生器的每个基元电路充分利用了 GaAs 场效应晶体管的特性, 产生的基元电脉冲形状和宽度与加在栅极的触发信号相同, 幅度由加在 GaAs 场效应管上的负偏压决定。各基元

E-mail: lshen@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2002-04-10; 收到修改稿日期: 2002-07-04

电路产生的用于叠加的基元电脉冲相互独立,使计算机控制栅极偏压进而控制整形电脉冲的形状成为可能。波导调制器加宽频谱和脉冲整形的基本原理是通过外加电场,在晶体中产生电光效应引起折射率变化,使波导中传输光(即导波光)的传输特性发生变化而达到调制的目的。

2.2 整形电脉冲发生器的原理

在利用电光波导调制器进行激光脉冲整形的过程中,首先给波导调制器加半波电压,使输入到调制器内的激光信号在调制器的输出端干涉相消,然后再利用另一电极给振幅调制器加整形电脉冲信号,从而达到激光脉冲整形的目的。为了能灵活控制激光脉冲的形状和宽度,要求对电信号的形状和宽度能有效地加以控制。

采用 GaAs 场效应管(FET)的整形电脉冲发生

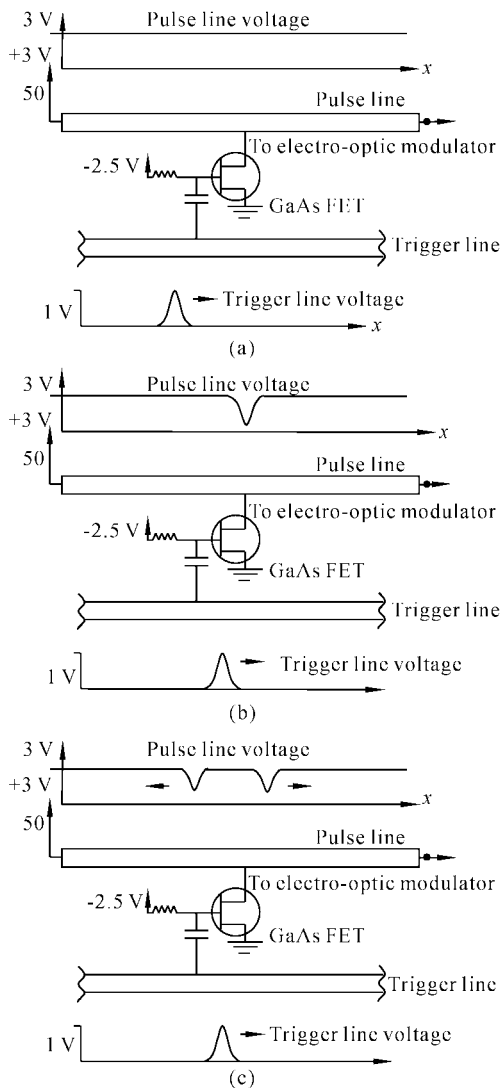


Fig. 1 The schematic unit circuit of arbitrary waveform generator

器的基本单元电路工作原理如图 1 所示。单元电路中的场效应管的源极接地,漏极接加有 +3 V 直流电压的脉冲传输线,栅极接直流偏置电压和信号触发线,如图 1(a)所示。漏、源间所加电压为 +3 V。由于栅、源间的夹断电压为 -2.2 V,所加偏置电压为 -2.5 V,低于夹断电压,不能使场效应管导通。因此,只有当 1 V 的触发脉冲信号传输耦合到场效应管的栅极时,加在栅、源间的电压高于夹断电压,场效应晶体管才开启。这个时候,源、漏极间的导通电流正比于加在栅极的触发电压,如图 1(b)所示。此时,在脉冲传输线上产生两个相向传输的脉冲。这两个脉冲的形状和宽度与触发脉冲完全一样,但与触发脉冲的极性相反,如图 1(c)所示。左行的脉冲被终端负载所吸收,右行的脉冲形成整形脉冲的一个基元脉冲。产生基元脉冲的幅度大小取决于加在栅极上的偏置电压(即 V_{b1} 、 V_{b2} 、 V_{b3} …)。由于场效应管只有在栅、源电压高于 -2.2 V 时才能导通,如果初始的电流偏置设为 -4.0 V,那么 1 V 的触发脉冲就无论如何也打不开 GaAs 场效应管,在脉冲传输线上将没有脉冲产生;相反,如果初始的电流偏置设为 -2.2 V,则 1 V 的触发脉冲就很容易使 GaAs 场效应管打开,在脉冲传输线上产生幅度超过 1 V 的脉冲。当直流偏置电流介于 -4.0 V 与 -2.2 V 这两个极限值之间时,产生脉冲的幅度遵循如下规律:

$$I_{ds} \propto (V_{gs} - V_{TO})^2$$

V_{gs} 是由直流偏置电压与触发脉冲共同作用之后加在栅极和源极间的电压, V_{TO} 是栅极的夹断电压,通常为 -2.2 V。

图 2 给出了由 3 个上述单元电路组成的整形电脉冲发生器在栅极偏置电压相同 ($V_{b1} = V_{b2} = V_{b3}$) 时,产生的基元电脉冲叠加形成方波脉冲的示意图。根据时间分辨率的需要和实际情况,单元电路在脉冲传输线上产生基元电脉冲的重复频率设置为 4 GHz,相应基元电脉冲之间的时间间隔为 250 ps。为了实现信号触发线与脉冲传输线之间的同步和相邻基元脉冲首尾相接叠加在一起的要求,触发信号线上的触发脉冲取样相继延时应为 $500 \text{ ps} - t_F$, t_F 为场效应管的固有延迟时间,触发脉冲宽度取为 300 ps。高频取样产生的谐波由输出端带宽为 1 GHz 的低通滤波器所抑制,这样构成的带宽为 1 GHz、取样率为 $4 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的电脉冲发生器输出整形电脉冲的宽度取决于沿传输线并联的 GaAs 场效应晶体管的数量。

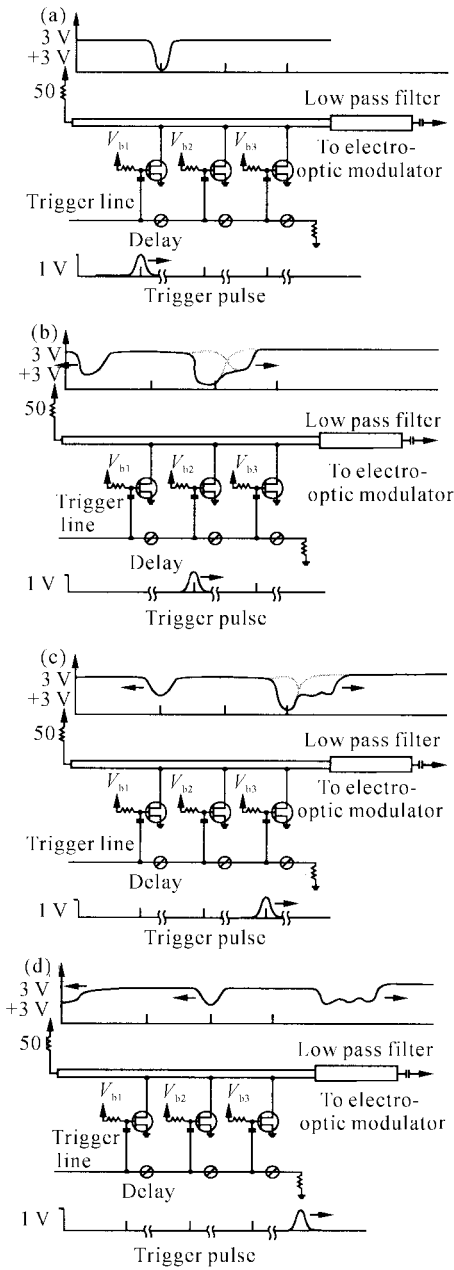


Fig. 2 The sketch map of square pulse forming, Square pulse is superposed by the unit electric pulse produced by the arbitrary waveform generator made up of the unit circuit

2.3 振幅调制器工作原理

通常的振幅调制器结构如图 3 所示,输入光波经一段路程后在第一个 Y 分支处,被分成两部分,每一部分分别通过光波导的二个支路,然后在第二个 Y 分支处汇合成一个光波。设计要求光在第一个 Y 分支处被分成完全相等的两个分量,即光在两分支支路的光程差相等,而且光强相等。

下面简单讨论振幅调制器产生整形脉冲的原理。设在第一个分支点,光波表示为

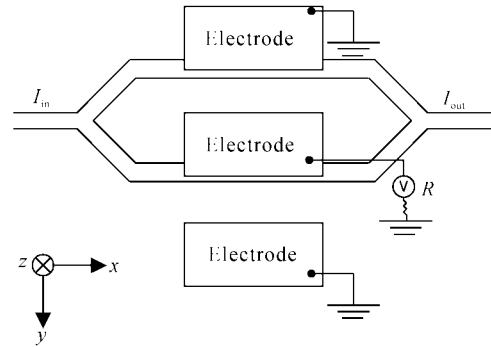


Fig. 3 The structure map of the amplitude modulator

$$A(t, 0) = A_m \exp(i\omega t), \tag{1}$$

在分支点后,进入两支路后的光波可表示为

$$A_1(t, 0) = A_2(t, 0) = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp(i\omega t), \tag{2}$$

从图 3 看出,两支路的波导受到外电场方向是相反的。因此光脉冲通过两支路后相位差(由光程差 $\Delta n \cdot L$ 引起)等值异号,即为

$$\Delta\varphi_{A_1} = \Delta\varphi_{A_2} = \Delta\varphi$$

经过第二个分支点后,合成的光波表示为

$$A(t, L) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\omega t + \Delta\varphi)] + \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\omega t - \Delta\varphi)] \right\}, \tag{3}$$

将两端平方后可得输出光强为

$$I = I_0 \cos^2 \Delta\varphi, \tag{4}$$

其中

$$I_0 = A_0^2, \quad I = A^2,$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot L = -\pi n_c^3 \gamma \frac{\Gamma L}{\lambda G} V,$$

n_c 为晶体折射率, L 为电极长度, G 为两电极间距, Γ 为考虑到电场、光场的不均匀性而引入的一个重叠因子, γ 为晶体电光系数, V 为加在晶体上的电压。从 (4) 式可看出:

当 $\Delta\varphi = \pi/2$ 时,两分支光路的相位差为

$$\Delta\varphi_{A_1} - \Delta\varphi_{A_2} = \frac{\pi}{2} - \left(-\frac{\pi}{2}\right) = \pi,$$

$\Gamma = 0$ 相当于干涉相消。此时加在调制器上的电压定义为半波电压 $V_\pi = \frac{\lambda G}{2n_c^3 \gamma \Gamma L}$ 。

当 $\Delta\varphi = 0$ 或 π 时,两支路的位相差为 0。此时输出光强最大,即 $I = I_0$, 相当于干涉增强。

从 (4) 式还可看出,对于振幅调制器,由于加在调制器上的电压大小与输出光强有严格的对应关系,因此,通过适当选择加在调制器上的工作电压,

能使得当加在调制器上的的是一个一定形状的电脉冲时,输出的是一个相应形状的光脉冲。采用集成光学振幅调制器的优点是半波电压 $V_{\pi} = \frac{\lambda G}{2n_c^3 \gamma L}$ 仅为几伏,所以用于调制器产生整形电脉冲的最大幅度值也是几伏,故可靠性、稳定性特别高。但由于工艺和耦合技术等方面的限制,Y 分支对光强的分配(包括光强和光程)不可能作到完全相等。这样,即使在干涉相消的情况下,即 $V = V_{\pi}$ 时,仍有一定的光输出,也就是振幅调制器输出有一定的消光比。定义振幅调制器的消光比为

$$E_{\text{ex}} = 10 \lg \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{min}}}, \quad (5)$$

消光比也是衡量调制器性能好坏的一个重要参量。

3 脉冲整形实验

整个整形电脉冲发生器由电压为 1 V、脉宽为 320 ps 的触发脉冲源、4 个场效应管组成的电脉冲整形电路、低通滤波器和宽频带放大器组成,如图 4 所示。

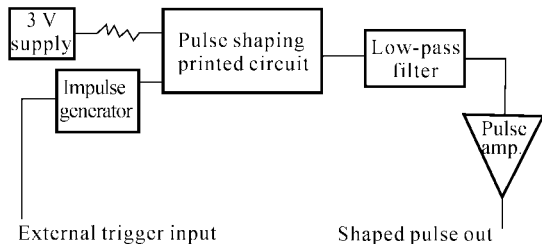


Fig. 4 The structure map of arbitrary waveform generator

整个系统的实验装置光路图如图 5。在进行脉冲整形实验之前,首先对调制器进行了测试。利用单纵模调 Q 主振荡器输出的脉宽近似 60 ns 的光脉冲耦合进通光波长 $1.053 \mu\text{m}$ 的单模保偏光纤中,然后将光纤输出的调 Q 光脉冲耦合进铌酸锂振幅调制器。在调制器的偏置电极上加上 8 V 的偏置电压(调制器的半波电压),此时调制器处于关断状态,

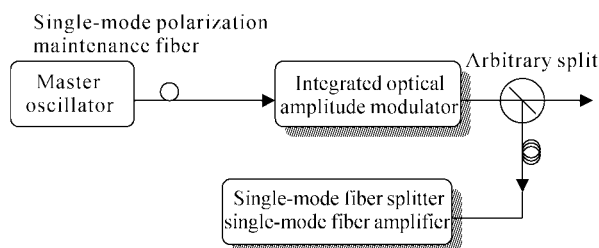


Fig. 5 The simulate map of system practice

记录下此时调制器输出的光脉冲的幅度 I_{min} ;然后逐渐减小加在调制器偏置电极上的偏置电压,此时调制器处于导通状态,当调制器输出的光脉冲幅度最大的时候,记录下此时的光脉冲幅度 I_{max} 。根据(5)式不难得到这个调制器的信噪比。在我们的实验中,实际测量得到的结果是调制器的信噪比为 22 dB。

使用这个调制器,利用数字同步机进行精确延时,使电脉冲发生器输出的脉宽接近 1 ns 的整形电脉冲与调 Q 光脉冲峰值在振幅调制器中精确同步,得到脉宽接近 1 ns 的整形光脉冲。在整个系统实验中,单纵模调 Q 振荡器输出的调 Q 脉冲波形如图 6 所示(从中可以看到调 Q 光脉冲起伏小于 10%)。触发脉冲源输出的 1 V、320 ps 电脉冲波形如图 7 所示。图 8 为利用整形电脉冲发生器输出的两种整形电脉冲。图 9 所示为整形电脉冲发生器产生的方波整形电脉冲波形(共测十次),从中可以看出脉冲起伏小于 3%。利用得到的电脉冲注入调制器中,得到的整形方波光脉冲的波形如图 10 所示(与电脉冲同样共测十次),从中也可以看出脉冲起伏小于 10%。

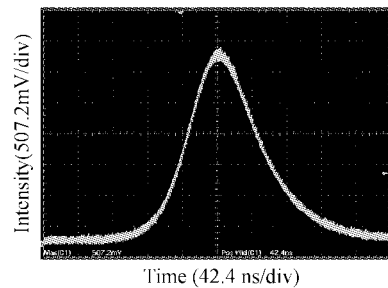


Fig. 6 Q-switched pulse waveform of the output from the single longitudinal mode Q-switched oscillator

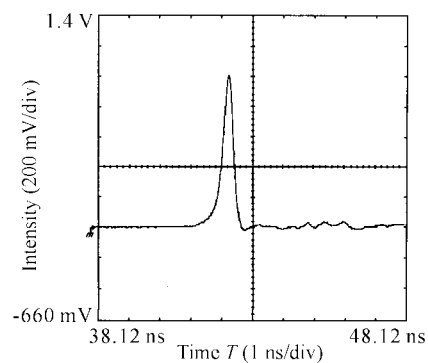


Fig. 7 The waveform of 1 V, 320 ps electric pulse output from trigger pulse source

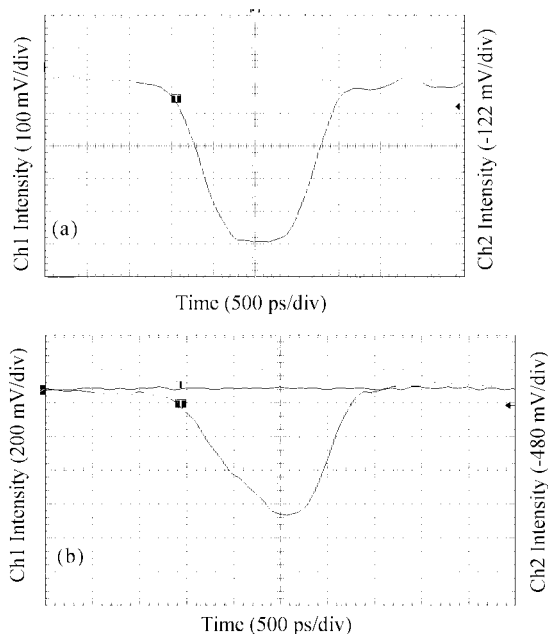


Fig. 8 Two shaped electric pulse produced by arbitrary waveform generator

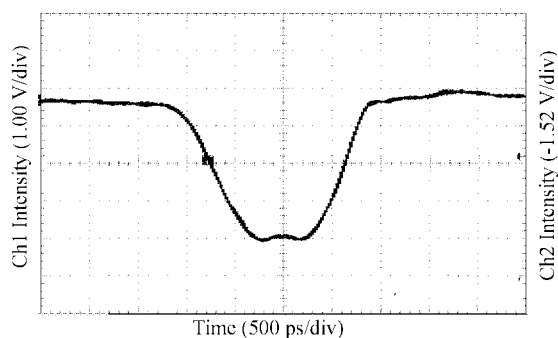


Fig. 9 Waveform of square electric pulse produced by arbitrary waveform generator (10 times measured)

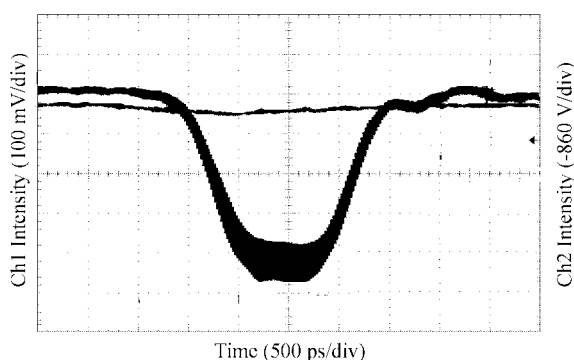


Fig. 10 The waveform of optical pulse output from the LiNbO_3 amplitude modulator (also 10 times measured)

4 讨 论

在实验过程中,发现经过铌酸锂振幅调制器调

制之后输出的光脉冲波形的振幅稳定性比注入调制器的方波整形电脉冲要差。经过实验的分析判断,认为是由于注入调制器的调 Q 光脉冲的稳定性不高所造成的。通过进一步研究输出的各种脉冲波形,发现通过调制器后得到的 1 ns 光脉冲与调 Q 光脉冲的幅度稳定性基本一致,形状与电脉冲相当。基于以上分析,认为通过进一步改进单纵模调 Q 振荡器输出的稳定性,将大大改善输出整形光脉冲的振幅稳定性。

另外,在调制器的使用过程中,由于调制器制作工艺的问题,调制器半波电压漂移的现象非常严重。半波电压漂移,严重影响了调制器的性能,使其信噪比大大降低,使用寿命大大缩短。在具体实验过程中采用特殊的实验技术,克服半波电压漂移的问题,使得调制器的性能在很长一段时间内(每天工作 6 h),保持相对稳定,信噪比与原先基本一致。

大型激光系统的时间脉冲整形是一个综合性的系统工程问题。时间脉冲整形除了与前端系统的时间脉冲形状有关之外,还与整个激光装置的全系统增益能力有非常密切的关系。在放大器的放大过程中,激光脉冲的前沿总是先消耗放大器的激活离子数而率先得到放大,具体的表现就是激光脉冲的前沿在放大过程中相对后沿有更快的“陡化”过程。基于这点考虑,为了能在整个激光系统的终端(靶场)得到所需要的方波脉冲,前端系统的输出脉冲就不可能是方波。根据“神光-Ⅱ”装置的具体实验结果,当靶场得到给定能量的方波脉冲时,前端输出的应该是在本文得到利用整形电脉冲发生器得到的第二种时序上类似三角形的激光脉冲,如图 8(b)。也就是,在我们目前方案现有的整形能力基础上,适当配合放大器的增益能力,在未来的大型激光装置上是可以输出满足物理实验需要的时间脉冲波形的。

总结 通过对时间脉冲整形技术的探索,发展了一套可自行设计的准备应用于“神光-Ⅲ”原型单路装置的激光脉冲整形系统。该系统选用集成光学调制技术作为“神光-Ⅲ”装置脉冲整形的首选方案。经过理论和实验研究,首次成功地使用了通光波长 $1.053 \mu\text{m}$ 的质子交换型波导调制器,将得到的方波电脉冲注入该调制器后得到了所需的整形光脉冲。

参 考 文 献

- 1 Campbell J H *et al.*. Special Issue: Beamlet Laser Project. ICF Quarterly Report 5 (1), pp. 42 ~ 44, Lawrence

Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-
LR-105821-95-1 (1995)

2 Wilcox R B, Browning D F. Oscillator and Pulse-Forming
System for the Beamlet. ICF Quarterly Report 2 (3), 115
~ 122, Lawrence Livermore National Laboratory,

Livermore, CA, UCRL-LR-105821-92-3 (1992)

3 Wilcox R B, Behrendt W, Browning D F *et al.*. Fusion
laser oscillator and pulse-forming system using integrated
optics. *Proc. SPIE*, 1993, **1870**:53~63

New Temporary Pulse-Shaping System Using Integrated Optics Technology

Shen Lei¹ Chen Shaohe¹ Liu Baiyu² Xu Shizhong¹

Ma Zhonglin¹ Wei Hui¹ Zhang Shengjia¹

*1 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences,
National Laboratory on High Power Laser Physics, Shanghai 201800*
2 Xi'an Institute of Optical and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

(Received 10 April 2002; revised 04 July 2002)

Abstract: Through the research on temporary pulse-shaping technology, a new type of laser pulse-shaping system is developed for the future high-power laser facility. In this pulse-shaping system, the 1.053 μm proton-exchange waveguide modulator is used. By using this shaping system, the square laser pulse is obtained and the fluctuation is less than 10%.

Key words: laser technology; temporary pulse-shaping; proton-exchange waveguide modulator; square laser pulse

ILOPE 2003

第九届中国国际激光及光电子产品展览会

展会地点：中国国际展览中心·北京

展会时间：2003年10月23~25日

展品大类：

1 光电材料和元件

2 激光器与应用

3 光通信产业

4 显示技术及设备

5 光信息产业

6 光学仪器

7 红外、传感技术等相关应用

联系方式：

中展集团北京华港展览有限公司

方 芳 刘宝存 梁 晨 李 超

电 话：010-84600341, 84600339, 84600335 传 真：010-84600325, 84600346

电子邮件：fang@cicc-exhibition.com lc@cicc-exhibition.com

中国光学光电子行业协会

所洪涛 吕玉华

电 话：010-64362211-490 传 真：010-64347322

电子邮件：cocma@public2.bta.net.cn

展会网址：<http://www.ilope-expo.com> <http://ilope.cicc-exhibition.com>