

利用波导调制器实现连续可调 任意整形激光脉冲

谢兴龙 陈绍和 周良智

李德杰* 王 春 邓锡铭

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

* 清华大学电子工程系, 北京 100083

摘 要 目前, 惯性约束聚变激光驱动器前级的发展方向是以稳定性好的激光二极管取代原来的闪光灯泵浦, 以集成光学和光纤技术取代原来的块状光学调制器进行激光脉冲的整形工作。本文从实验上研究了以激光二极管泵浦的固体激光器作为光源, 以波导调制器作为整形器件的激光脉冲的整形和频谱展宽技术, 获得了初步的实验结果。

关键词 振幅调制, 相位调制, 脉冲整形。

1 引 言

惯性约束聚变打靶对入射激光脉冲的形状因不同的物理目标要求而不同。因此, 惯性约束聚变激光驱动系统中脉冲整形器是必不可少的一个环节。早期的激光驱动器一般采用锁模加调 Q 的钕激光器作为种子光^[1-3], 脉冲整形技术采用块状普克尔盒加光电导开关技术。从九十年代初期, 美国在 NOVA 升级的设计中, 便改进了其脉冲整形和频谱展宽技术, 以集成光学波导调制器代替原来的块状光学调制器, 以稳定的半导体激光二极管泵浦代替原来的闪光灯泵浦, 并且以光纤取代了原先冗长的光路, 使系统更趋于小型化和易于调试, 该系统 1992 年在 Beamlet 上演示, 并获得了成功^[4]。考虑到我国惯性约束聚变发展的要求, 以及这种新技术的优点, 作者从 1994 年开始研究这种新整形器, 并取得了一定的进展。本文简要地介绍了最近所获得的结果。

2 基础理论

激光脉冲整形包括频谱展宽和振幅调制, 经过频谱展宽之后, 可以获得很多的边频分量, 从而减少或消除打靶过程中所产生的布里渊散射, 而振幅调制则实现了激光脉冲形状的可调性。

2.1 频谱展宽原理

当正弦微波信号输入 LiNbO₃ 相位调制器后, 其折射率满足:

$$n = n_e + n_m \cos (\omega_m t + \phi_m) \quad (1)$$

$$n_m = - \frac{n_e^3 \mathcal{Y}}{2} \frac{dV}{dz} \quad (2)$$

式中 n_e 为未加微波信号时的折射率, \mathcal{Y} 为电光系数, $-dV/dz$ 为调制微波信号的电场振幅, ϕ_m 为附加相位, ω 为微波信号的频率。所以光场的角频率 $\omega(t)$ 为:

$$\omega(t) = \frac{2\pi c}{\lambda} n = \frac{2\pi c}{\lambda} n_e + \frac{2\pi c}{\lambda} n_m \cos (\omega_m t + \phi_m) = \omega_0 + \frac{2\pi c}{\lambda} n_m \cos (\omega_m t + \phi_m) \quad (3)$$

故光场信号为: $E(t) = A \exp [i\theta(t)] = A \exp [i \int_0^t \omega(t) dt]$

$$= A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \cos [(\omega_0 + n\omega_m)t + n\phi_m] \quad (4)$$

式中 A 为光场振幅, $J_n(\beta)$ 为 n 阶贝塞尔函数, $\beta = 2\pi c n_m / \lambda \omega_m$ 为调制深度。显然, 利用正弦波进行调制, 可获得 $\omega = \omega_0 \pm n\omega_m$ 的边带分量, 即所获得的激光信号具有很宽的频谱。

2.2 振幅调制原理

激光脉冲进入振幅调制器后, 在注入口被分成振幅相等的两束, 通过给调制器的偏置电极加直流电压, 使两束光的相位发生相对改变, 然后在输出口进行迭加。假定入射激光场分布为 $E(t) = A \cos \omega t$, 在注入口有

$$E_1(t) = E_2(t) = (A/2) \cos (\omega t) \quad (5)$$

则在调制器的输出口激光场为:

$$E'_1(t) = (A/2) \cos (\omega t + \phi), \quad E'_2(t) = (A/2) \cos (\omega t + \phi + V/V_{\lambda/2}) \quad (6)$$

式中 ϕ 为光场经过调制器后所引入的相位, V 为调制器上所加的偏置电压, $V_{\lambda/2}$ 为调制器的半波电压, 也就是相位变化为 π 时所加的直流偏置电压。于是从调制器输出的瞬时光强为:

$$I(t) = |E'_1(t) + E'_2(t)|^2 = A^2 \cos^2(2\omega_m t + V/V_{\lambda/2}) \cos^2(V/V_{\lambda/2}) \quad (7)$$

在不考虑与时间的迅变关系时, 得到瞬时光强 I 为:

$$I = I_0 \cos^2(V/V_{\lambda/2}) \quad (8)$$

从(8)式可知, 通过改变调制器的偏置电压, 可以控制输出激光的强度, 也就是说只要在调制器上加一个形状合适的偏置电脉冲, 就可以获得形状符合要求的激光脉冲。

3 实验设计及其特征参数

图 1 是这种新型整形器的光路排布图, 在图 1 中, 振荡器是一台由激光二极管泵浦, 输出功率为 6 mW 的连续单纵模激光器。用于频谱展宽和脉冲整形的分别是一级 LiNbO₃ 相位调制器和一级 LiNbO₃ 振幅调制器。并用单模保偏光纤将相位调制、振幅调制和传输光路耦合在一起。这既提高了系统的稳定性和可靠性, 又克服了诸如准直、空间光路补偿、衍射控制和光束质量的要求等问题。当在振幅调制器栅极上加直流偏压时(调制器半波电压), 单模保偏光纤与振幅调制器形成了一对消光比 ≥ 27 dB 的电光开关(消光比为实测值)。整形光脉冲产生的过程是: 首先振荡器运转并对振幅调制器加偏压。然后由微波源输出脉宽 1 μ s, 频

率 6 GHz, 功率十多瓦的微波脉冲加到相位调制器上, 将产生一个脉宽 1 μ s, 频带大大加宽的方波脉冲。当这个方波脉冲传输到振幅调制器时, 由整形电脉冲发生器输出的脉宽为纳秒量级的整形电脉冲也传到振幅调制器上, 并从这个宽频谱方波光脉冲中削出脉宽为纳秒量级的宽频带整形光脉冲输出。整形光脉冲和整形电脉冲之间的关系由方程确定。由于整形电脉冲是任意可调的, 所以该装置能输出任意形状的光脉冲。

高频微波脉冲由微波源产生。本实验中的微波源由一台微波振荡器和一级微波放大器组成, 其输出是频率为 6 GHz, 重复频率为 1 kHz, 脉宽为 1 μ s, 振幅电压为 3 V 的方波微波脉冲、其结构如图 2 所示。

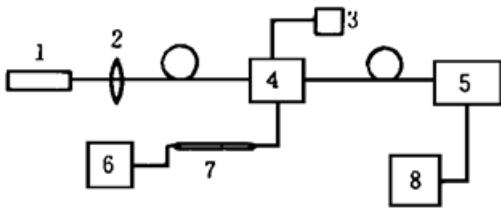


Fig. 1 Schamatic for the amplitude modulation of the laser pulse
1. single-mode CW laser, 2. lens, 3. bias voltage power, 4. LiNbO₃ modulator, 5. Optio-electro amplifier, 6. 1 ns electrical pulse generator, 7. Delay line, 8. Oscilloscope

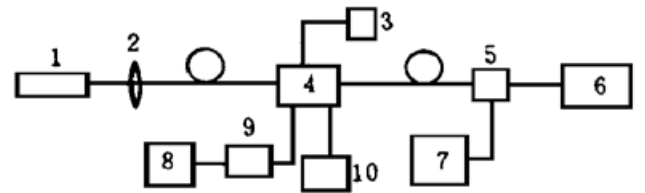


Fig. 2 Schamatic for the phase modulation of the laser pulse
1. single-mode CW laser, 2. lens, 3. bias voltage power, 4. LiNbO₃ modulator, 5. F-P etalon, 6. Oscilloscope, 7. Saw-wave generator, 8. Micro-wave power, 9. Micro-wave amplifier, 10. 1 μ s 1 kHz electrical pulse generator

整形电脉冲源由一台输出脉宽 1 ns, 振幅 50 V, 重复频率 1 kHz 的方脉冲发生器 and 一对微带传输线组成, 其结构如图 3 所示。

整形电脉冲产生的过程是当脉宽 1 ns, 幅度 50 V 的电脉冲经电阻耦合到一条微带传输线上时, 由于传输线上可变电阻的分压力, 将产生一系列不同幅度, 不同延迟的电脉冲, 然后进行迭加, 结果得到宽度 6 ns, 最高振幅电压为几伏(振幅调制器半波电压)的电脉冲, 其形状可以通过改变传输线上可变电阻的阻值来控制, 从而实现脉冲振幅和形状的任意可调性。表 1 是本文研制的用单模保偏光纤耦合串联在一起的相位调制器和振幅调制器的设计参数(实际测量值)。

Table 1. Performance characteristic of the integrated optical modulator

parameter	specification
optical wavelength	1. 053 μ m
insertion	< 7 dB
extinction	> 27 dB
risetime	- 100 ps
amplitude modulator halfwave voltage	3. 0 V
phase modulation halfwave voltage	9. 0 V
phase modulation frequency	6. 14~ 6. 40 GHz

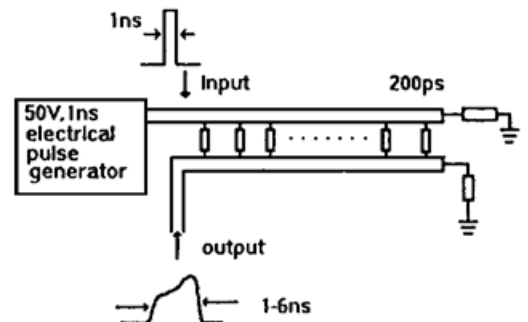


Fig. 3 The shaped electrical pulse generator

4 实验结果及其分析

4.1 振幅调制

图 4 是本文在实验中得到的整形光脉冲波形, 其脉宽大约为 6 ns, 前后沿分别为 1 ns 和 2 ns, 图 4(a), 图 4(b), 图 4(c), 图 4(d) 对应的对照比分别为 1.4 ·1, 1.8 ·1, 4.0 ·1, 15.0 ·1, 由于在实验中使用的示波器分辨率为 2 ns/div, 所以光脉冲前沿的确定已超出了分辨极限, 故只能得出前沿的大致宽度, 而判断不了其确切的数值, 同时由于实验的过程中, 接收元件电噪声较大等因素的影响, 使得所获得的整形光脉冲的包络线看起来很粗和不均匀。从图 4(d) 可以看出, 对照比较大的脉冲, 其底部已掩盖在噪声之内了, 从而形成一个三角波。

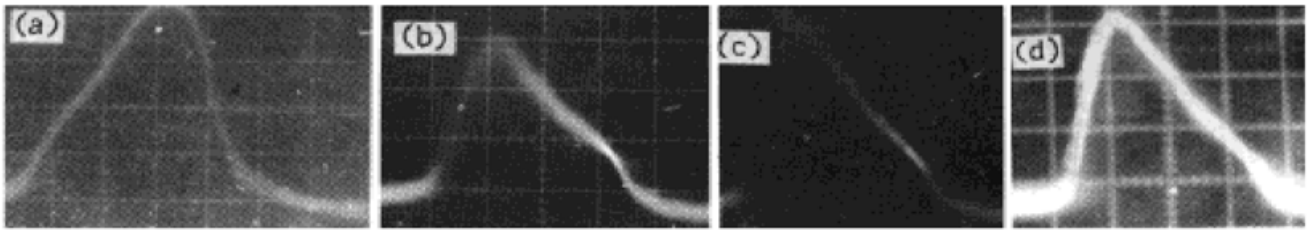


Fig. 4 Shaped laser pulses of the amplitude modulation

将本文实验结果与 Beamlet 整形系统作了比较^[5]如表 2 所列。其结果相近, 所获脉冲前、后沿与 Beamlet 之所以有些差别主要是由于以下两个因素所造成的: 1) 前沿的大小由参与迭加的电脉冲的前沿所决定, 本文采用的电脉冲前沿大约为 800 ps, 所获光脉冲的振幅正比于电脉冲振幅的平方, 所以光脉冲的前沿大致在 600 ps 左右; 2) 后沿的加宽主要是由于本文利用短脉冲的迭加形成调制电脉冲, 这样每一个子脉冲的后沿都对调制电脉冲有贡献, 从而将后沿抬高了少许, 实用中利用一快速光电门将后沿截去即可。

Table 2. Comparison of the experimental results of the Beamlet's with that of ours

		beamlet	ours
amplitude modulation	peak-to-foot contrast ratio	1.2 ·1	1.4 ·1
		2.3 ·1	1.8 ·1
		5.6 ·1	4.0 ·1
		15 ·1	15 ·1
amplitude modulation	front edge	min 250 ps	700 ps-1 ns
	hind edge	min. 500 ps	2 ns
	FWHM	1 ns-3 ns	1 ns-6 ns
phase modulation	modulation frequency	7.6 GHz	6.8 GHz
	side-bands width	aprox. 85 GHz	*

* As the free spectral region of the F-P etalon we used is only 4 GHz, we can not measure the width of the whole sidebands, but we have observed at least two of them at one side of the laser pulse. That is to say, the whole sidebands' width is certainly greater than 14 GHz.

4.2 相位调制

如图 5 所示, 为相位调制的输出波形, 其输入调制器的微波脉冲宽度 $1 \mu\text{s}$, 重复频率 1 kHz , 频率 6.80 GHz , 功率大约为 12.3 W , 由于实验中所使用的法布里-珀罗干涉仪的自由光谱区只有 4 GHz , 所以分开的频谱边带有可能经过多次折迭, 从而不能在主频带的两旁看到对称的边带, 图中锯齿波为扫描干涉仪的扫描电压信号, a_1, a_2 为两个周期

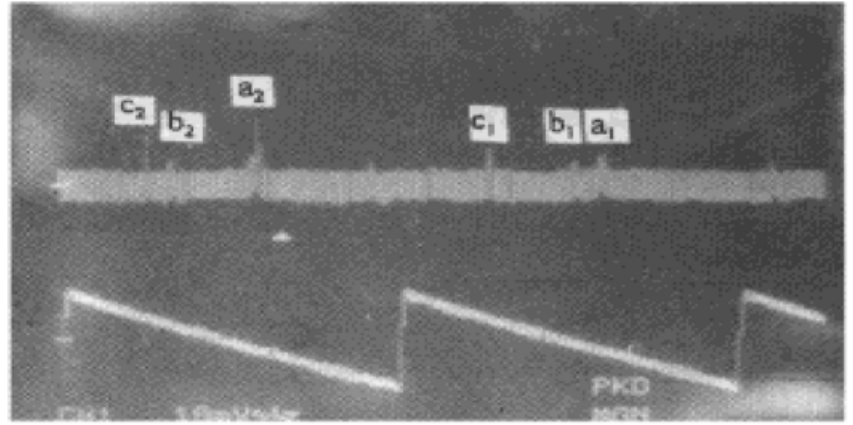


Fig. 5 Photograph of the phase modulated laser pulse

之内各自的主频带, b_1, b_2, c_1, c_2 为相应的边带。虽然 a_1, a_2 是对应于同一模式的主频带, 但其高度并不相同, 而且其相应的边带, 除了位置对应之外, 其高度也不相同, 这主要是由于探测手段所造成的, 因为在测量中法布里-珀罗干涉仪的扫描信号与相位调制器的微波信号分别产生于不同的源, 它们之间的同步状态总是处于不停的变化之中, 从而引起观测信号的幅度变化。在本实验中发现, 当增加微波调制信号的频率时, 其边频与主频之间的距离也随之增大, 通过观察边带的移动, 实验中作者至少看到主频带的两边各有两条边带, 也就是说, 所获得的总频宽肯定大于二倍的微波调制频率, 本文采用的微波调制信号的频率为 6.8 GHz , 所以总频宽至少大于 14 GHz 。

结束语 本文得了激光脉冲的任意整形波形和相位调制波形, 并解决了实验中遇到的某些问题, 为“神光-II”精密化的前置光源部分提供了第一手的资料和初步的经验。

最后感谢胡文涛博士和沈小华博士在激光二极管激光器调试过程中的大力支持。

参 考 文 献

- [1] D. R. Speck, The shiva laser-fusion facility. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(9) : 1599~1619
- [2] D. J. Kuizenga, Short-pulse oscillator development for the Nd-glass laser-fusion systems. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(9) : 1694~1708
- [3] Laser Program Ann. Rep. 1980, *LLNL Rep.*, UCRL-50021-80-Vol. 1
- [4] R. B. Wilcox, Oscillator and pulse-forming system for the beamlet. *Conference on Lasers and Electro-Optics, (Optical Society of America)*, Washington, DC. 1992, CW16
- [5] R. B. Wilcox, D. F. Browning, Oscillator and Pulse-Forming System for the Beamlet, *LLNL Rep.* UCRL-50021-95-Vol. 1

Continuously Tunable System for Arbitrarily Forming of Laser Pulses Using a Integrated LiNbO₃ Waveguide Modulator

Xie Xinglong Chen Shaohe Zhou Liangzhi LI Daiji*
Wang Chun Deng Ximing

[*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*]

* *Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100083*

(Received 27 March 1996; revised 11 June 1996)

Abstract Up to now, the development of the first stage of ICF solid-state laser driver is to replace the pumping flash lamp by the laser diode which has much better stability and to replace the bulk-optic modulator by integrated optics and fiber technology for laser pulse forming. We study experimentally the laser pulse forming technology using a laser-diode pumped solid-state laser and a integrated waveguide modulator. The fundamental results are obtained which will be of great importance to the laser pulse formation of the new ICF laser drive system.

Key words amplitude modulation, phase modulation, laser pulse formation.