

利用时空变换获得超短激光脉冲

曾文章¹ 陈绍和² 张生佳² 韦 辉² 马忠林² 许世忠²

(¹泉州师范学院物理系 功能材料研究所, 泉州 362000;

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要 由 LD 抽运 Nd:YLF 固体激光器输出的单纵模调 Q 激光脉冲, 脉宽约为 85 ns, 经过快速 LiNbO₃ 电光偏转器实现时空变换, 用狭缝削取脉宽约为 1 ns 的超短激光脉冲。导出激光束通过偏转器后扫描光线长度与加到偏转器上的快速电压脉冲变化率关系, 并在实验中分别用 MOS 管和雪崩管高压电脉冲发生器取代价格昂贵的冷阴极管高压电脉冲发生器, 获得激光脉冲宽度压缩约两个量级, 且实现激光脉冲宽度可调。

关键词 时空变换, 电光偏转器, 超短激光脉冲

1 引言

为了在实验室里用高功率激光束实现惯性约束核聚变 (ICF), 对高功率激光系统提出了很高的要求。尤其是激光脉冲整形对 ICF 有极其重要的意义。激光脉冲的形状对靶丸内爆的动力学过程有直接的影响, 通过激光脉冲整形可以减少由于冲击波引起的对靶核预热的不利因素^[1], 并可以控制和减小 Rayleigh-Taylor 不稳定的增长^[2]。激光脉冲整形对提高激光驱动能的利用率也是关键技术^[3]。其次, 作为驱动器的高功率激光系统而言, 由于对激光脉冲的宽度和形状的可控制性, 可以弥补频率转换、饱和和放大等引起的非线性现象, 使驱动器的放大链可以工作于饱和区, 充分汲取高能态反转粒子的能量, 提高驱动器输出的能量, 改善驱动器的性能。

激光脉冲整形是运用各种办法和手段, 达到控制与改变输出激光的脉冲宽度和形状。国内外对 ICF 固体激光驱动器前端系统的整

形不断进行改进和升级, 以满足点火实验的要求^[4]。对激光脉冲宽度的控制和压缩是激光脉冲整形的重要方面, 其方法和技术水平也在不断地提高。如激光的削波、锁模等获得超短激光脉冲技术, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室, 用 50 Ω 阻抗匹配的普克尔盒组成削波器, 获得脉宽 0.09~35 ns 可调激光脉冲; 用电光调制器进行削波获得脉宽 500 ps~5 ns 可调激光脉冲, 再用激光锁模技术进一步压缩, 获得脉宽 10 ps~10 ns 可调激光脉冲^[2]。国内“神光 II”升级装置的激光脉冲整形系统, 由冷阴极管高压脉冲驱动 LiNbO₃ 电光偏转器要求的脉宽约 1~3 ns 的激光脉冲^[1]; 用高压电脉冲驱动普克尔盒, 最窄可获脉宽 1 ns 左右的激光脉冲^[5]。

随着对 ICF 高功率激光前端系统整形能力要求的不断提高, 要为后续系统提供更稳定、优质, 可以任意整形的激光束。在对复杂激光脉冲波形整形的研究中, 我们用 LiNbO₃ 电光偏转器进行时空变换,

用 MOS 管及雪崩管高压脉冲发生器取代价格昂贵的冷阴极管高压脉冲发生器。本文结合对 ICF 固体激光驱动器前端系统脉冲整形的实验研究, 阐述了用时空变换压缩激光脉冲的技术。我们从一台 LD 抽运的 Nd:YLF 单纵模调 Q 激光振荡器输出波长 1.053 μm 脉宽约 85 ns 的脉冲光束, 经过 LiNbO₃ 电光偏转器进行时空变换, 获得脉宽约为 1 ns 的超短激光脉冲, 且脉冲宽度可以调整。实验装置结构简单, 输出激光脉冲稳定性好, 可以应用到激光脉冲整形和稳幅等光路中, 对 ICF 前端系统的整形有实际的意义。

2 原理及实验装置

利用时空变换削取超短激光脉冲, 实现激光脉冲宽度压缩的原理, 是从基横模单纵模调 Q 激光振荡器的输出脉冲中, 选取合适的时间区域, 通过电光偏转器对光束的偏转, 把激光脉冲强度从按时序分布转换为扫描线上空间光强分布, 实现了激光脉冲时空变换。在扫

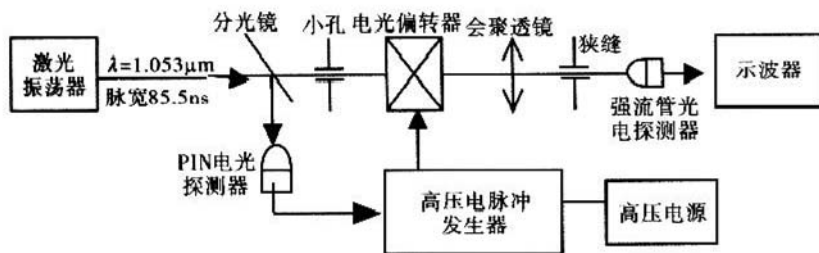


图1 时空变换获取超短光脉冲实验装置框图

描线的合适位置上放置一个光阑（小孔或狭缝）削取一部分光，从而获得比振荡器输出脉宽更窄的超短激光脉冲。实验装置框图见图1。

实现时空变换是整个削取超短激光脉冲过程的重要环节，关键器件是电光偏转器。我们采用由LiNbO₃晶体制成的、四柱面体的特殊电极结构的电光偏转器^[7]。当晶体受到外加脉冲电场作用，其内部形成电场梯度，由于晶体的电光效应，产生与电场梯度成比例的折射率梯度。当与高压电脉冲前沿同步的脉冲激光束通过晶体时，产生不同的偏折而偏离原来方向传播，在与光束传播方向垂直的平面上，按时序在空间形成一条扫描光线，实现时空变换。

反映电光偏转器偏转能力是偏转器可分辨的光斑数N，其定义为

$$N = \frac{D}{\Delta_{\text{def}} \theta_{\text{dif}}} \quad (1)$$

式中 Δ_{def} 是偏转器对光束的偏转角度， θ_{dif} 是光束束宽为偏转器通光孔径的平面波衍射全角。对于用LiNbO₃晶体做成的电光偏转器的光斑数N为^[6]

$$N = \frac{C_s}{4} \frac{n_e^3}{n_o^3} \frac{V}{L} \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

式中 C_s 是由偏转器的结构参数决定的结构因子， n_e 为晶体e光折射率， n_o 为晶体o光折射率， V 为偏转器上所加的电压， L 为偏转器的有效长度， D 为偏转器的通光孔径。由物理光学

可知， $\Delta_{\text{def}} = (2.44\lambda)/D$ ，则偏转角为

$$\Delta_{\text{def}} = N \Delta_{\text{dif}} = (-1/2) C_s \frac{n_e^3}{n_o^3} \frac{V}{L} \frac{1}{D^2} \quad (3)$$

(3)式说明电光偏转器对光束偏转的角度不仅与加在偏转器上的电压成正比，方向相反，而且还与晶体材料，偏转器的结构及入射光波长有关。选取合适的材料，设计合理的结构，可以加较低的电压，获得较大的偏转角度。时空变换方法就是利用电光偏转器的这一特性来实现的。

激光束通过偏转器偏转后偏离原来的方向，经过透镜在其焦平面上把一系列扫描光斑会聚成一条扫描光线。扫描光线的长短主要取决于电光偏转器的晶体材料、结构和电压脉冲的前沿宽度以及扫描时间。所削取的激光脉冲的波形和脉宽主要取决于光焦斑均匀性、扫描光线长度、狭缝宽度以及偏转器扫描速度。设扫描速度为 $U(t)$ 、扫描光线长度 l_m ，由(3)式可得

$$U(t) = F \left[\left(\frac{d \Delta_{\text{def}}}{dt} \right) \right] = (-1/2) C_s \frac{n_e^3}{n_o^3} \frac{1}{L} \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

$$l_m = U(t)T = (-1/2) C_s \frac{n_e^3}{n_o^3} \frac{1}{L} \frac{dV}{dt} T \quad (5)$$

式中 F 为透镜的焦距， T 为偏转器的扫描时间。电脉冲前沿的快慢控制偏转器扫描速度，实验时用电脉冲前沿驱动偏转器，电压变化率可以视为是线

性的，相应扫描速度也认为是均匀的，狭缝在扫描线中间所削取的激光脉冲波形将保持很好的几何对称性。故可以通过调整加在偏转器上的电压高低和前沿陡峭，以及削波的位置，和调节狭缝宽度来限制脉冲扫描的持续时间，以控制激光脉冲的宽度和波形。达到脉宽压缩和可调的目的。

3 结果与讨论

实验装置如图1所示，Nd:YLF激光振荡器输出波长1.053μm，脉宽约为85.5ns，每秒1次，脉冲幅度抖动小于10%，稳定性好，激光脉冲波形如图2所示。光束经分束器分出一部分光通过PIN光电探测管接收（PIN管的型号：SPD-032，性能为 $V_r=399V$ ， $FAR=48P/S$ ， $TOX=7dB$ ， $TX=41.2dB$ ， $V_n=70mV$ ， $V_{opt}=399V$ ， $S=20.1A/W$ ， $NEP=0.077$ ），触发MOS管高压电脉冲发生器，产生前沿10.77ns高压电压脉冲驱动电光偏转器，电波形如图3所示。另一部分主光路光束，经过孔径为2mm的小孔限束后，可认为是有限束宽的平面波输入LiNbO₃电光偏转器。电光偏转器是采用反应灵敏、快速响应的LiNbO₃晶体（通光孔径为4mm，有效长度为30mm）做成。偏转后的光束经过焦距为1m会聚透镜在其后焦平面上形成一条约10mm的扫描光线，即实现激光脉冲的时空变换。把宽度可调的狭缝置于透镜的后焦平面上，当缝宽调至1mm时，狭缝削取扫描线中的光斑，用光电强流管探测（强流管的型号：R1328U-51）接受。在Tektronix-DTS7404型，带宽4GHz，采样率20GS/s的高灵敏度示波器测到脉宽

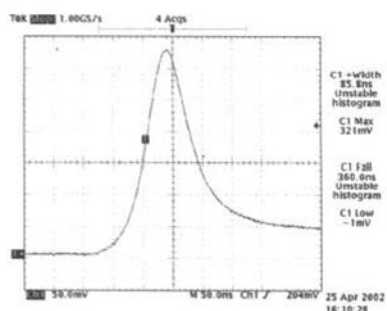


图 2 振荡器输出激光脉冲波形

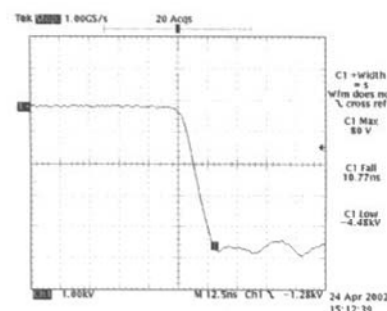


图 3 快速电压脉冲波形

约为 1.15ns 左右的超短脉冲, 如图 4 所示。

从理论上分析可知, 激光脉冲通过光电偏转器如果偏转器的扫描速度不变, 而电脉冲与输入光

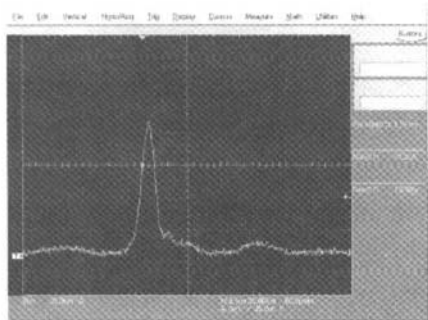


图 4 脉宽为 1.15ns 超短激光波形

脉冲同步延时不同, 偏转器扫描时间不同, 扫描光线长度不同; 如果偏转器扫描时间不变, 而电脉冲前沿电压变化速度不同, 偏转器的扫描速度不同, 扫描光线长度不同。一定宽度的狭缝削取的光脉冲宽度也不同。狭缝的位置改变, 削取的空间位置不同, 获得的光脉冲宽度不同; 狭缝的宽度变化, 光脉冲宽度随之改变。实验时加到电光偏转器的高压电脉冲, 用电脉冲前沿约为 10.77ns 的 MOS 管电脉冲发生器电路, 加 4 kV 电压, 扫描光线长度约 10mm, 狭缝宽度 1mm, 输出

光脉宽约为 1.15ns 而用电脉冲前沿约为 4ns 的雪崩二极管电脉冲发生器电路, 加同样的高压, 扫描光线长度约 14mm 狭缝宽度仍为 1mm 输出光脉宽约为 700ps 通过调节狭缝宽度, 输出激光脉宽最大的变化在 700ps~3ns 范围, 多次反复实验结果一致, 输出的激光脉冲的波形和宽度稳定, 实验结果与理论分析相符合。

这一结果达到目前正在运行的“神光 II”升级前端整形系统及 1995 年美国 LLNL 的整形系统输出的脉宽及调节范围的水平, 但我们用 MOS 管或雪崩管取代昂贵的冷阴极管电脉冲发生器, 电路造价便宜, 而且比光电导开关电路性能稳定。利用电光偏转器时空变换压缩光脉冲宽度, 除了受偏转器的灵敏度和响应速度的限制外, 主要因素是驱动电光偏转器上的电脉冲前沿陡峭。要进一步压缩获得更窄的超短激光脉冲, 还要研制响应更快的光电开关, 产生前沿更陡的电脉冲。

参 考 文 献

- 1 许发明, 陈绍和, 陈兰荣等. 复杂激光脉冲波形的整形. 光学学报, 1996, 16 (7): 943~947
- 2 Y H Chuang T J Kessler S Skupsky. Laser-beam pulse shaping using dispersive filtering SPIE 1993 1870: 34~46
- 3 J D Lindl W C Mead. Two dimensional simulation of fluid instability in laser fusion pellets Phys Rev Lett, 1975 34 (20): 1273~1276
- 4 王春, 陈绍和, 许发明等. ICF 固体激光驱动器前级系统中的脉冲整形. 量子电子学报, 2000, 17 (6): 479~492
- 5 许发明, 陈绍和, 陈兰荣等. 用快速电光偏转器对激光脉冲削波. 中国激光, 1996, A23 (9): 811~814
- 6 许发明, 范滇元, 陈绍和等. LiNbO₃ 电光偏转器的研究. 光学学报, 1996, 16 (3): 369~372

Ultra-short Pulse Generation by Spatial-temporal Transformation

ZENG Wen-zhang¹ CHEN Shao-he² ZHANG Sheng-jia² WEI Hui² MA Zhong-lin² XU Shi-zhong²

(¹Institute of Functional Materials, Department of Physics, Quanzhou Teacher's College, Quanzhou 362000;

²Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract An ultra-short pulse (~1 ns in width) was obtained by passing a single longitudinal mode Q-switched laser pulse (~85 ns in width) from a LD-pumped Nd:YLF solid state laser through a fast LiNbO₃ electro-optic deflector to realize spatial-temporal transform and chopping by a slit. The relationship of variation rate between the scan light beam length after passing through the deflector and the fast voltage pulse was derived. The laser pulse width was compressed by two orders of magnitude and the laser pulse width adjustment was realized by replacing the expensive cold cathode high voltage electric pulse generator with MOS tube and avalanche high voltage electric pulse generator.

Key words spatial-temporal transform, electro-optic deflector, ultra-short laser pulse