

文章编号: 0258-702X(2001)07-0607-05

用时间域滤波的方法改善高能飞秒 激光脉冲的质量*

周士安¹ 钱列加² 韩申生¹

(中国科学院上海光机所¹ 强光学开放研究室²; 高功率激光物理国家实验室 上海 201800)

提要 从理论上分析了非线性折射率引起的脉冲自位相调制对超短脉冲的影响。提出用时间域滤波改善飞秒激光脉冲质量。针对这一新的方法进行了数值模拟分析。研究结果表明时间域滤波可使系统输出脉冲变窄,并提高了脉冲峰值功率,有效地提高了脉冲的质量。

关键词 时间域滤波, B 积分, 自位相调制

中图分类号 TN 713 TN 78 文献标识码 A

Improving Quality of High Energy Femtosecond Laser Pulse by Temporal Filtering

ZHOU Shi-an¹ QIAN Lie-jia² HAN Shen-sheng¹

(¹Laboratory for High Intensity Optics, ²National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The article theoretically analyzes the impact of self-phase modulation caused by nonlinear refractive index on ultrashort pulse. A new method, temporal filtering, is proposed for improving quality of femtosecond laser pulse. After analyzing the result of simulation, it is found that the filter method can narrow pulse and enhance the intensity of pulse. The approach can improve the quality of femtosecond pulse.

Key words temporal filtering, B -integral, self-phase modulation

1 引 言

1990 年克尔透镜锁模技术的出现^[1],为飞秒全固化激光器发展提供了可靠的保障。另一方面,啁啾放大技术(CPA)^[2,3]使得啁啾光脉冲可以通过多级激光放大器被有效地放大,最终经压缩后的脉冲峰值功率能达到 100 TW 或更高。在这些关键技术的推动下,高功率超短脉冲固体激光器迅速发展。世界各国的实验室纷纷研制超短超强激光器。所有这些为研究极端条件下光与物质相互作用及其应用如快点火(ICF)研究、X 射线激光以及相对论性等离子体物理研究等开辟了广阔的空间。

随着飞秒激光脉冲及啁啾脉冲放大技术的日趋

成熟,美国里弗莫尔实验室(LLNL)利用大口径高能钽玻璃激光装置实现了 1.5 PW 的亚皮秒激光脉冲输出^[4]。里弗莫尔实验室的 M. D. Perry 等认为,源于介质非线性克尔折射率 n_2 (通常以非线性相移或 B 积分表征)的脉冲自位相调制(SPM)将影响到 CPA 系统输出脉冲的宽度及脉冲质量(脉冲信噪比 S/N)。为保证输出脉冲质量,要求整个 CPA 系统的 B 积分值较小($B \leq 1$)^[5]。事实上,到目前为止,几乎所有的高能激光器的 B 积分值均不超过 1。对啁啾脉冲的进一步放大以期获得更高的脉冲能量,不可避免地增加系统的 B 积分值,从而使输出脉宽增大并降低脉冲的信噪比。因此非线性 B 积分是限制 CPA 系统最终可输出峰值功率的根本物理因素。系统的 B 积分值达到 1 以后,对啁啾脉冲的进一步放大,虽然可以增大输出脉冲能量,但受严重的脉冲自位相调制的影响,输出脉冲宽度将增宽,激光脉冲的峰值功率并不能相应地提高。对此,国际上有些研

* 国家自然科学基金(No. 60088003),国家 973(No. G19990752023)和国家 863 高技术惯性约束聚变资助项目。

收稿日期 2000-04-19;收到修改稿日期 2000-06-06

究小组在原理上提出了若干解决该问题的措施^[6,7],但都不是理想,很难真正被实际应用。本文提出应用全新的时间域滤波技术来控制脉冲的自位相调制。这是一个技术上可实现的措施,时间域滤波可以通过在脉冲压缩器中应用光阑滤除少量的高频率和低频率成分来实现。数值模拟计算表明,采用时间域滤波技术,系统的 B 积分值允许取 2。如果采用多级滤波的话,最终输出脉冲的宽度及质量仅取决于相邻两级滤波器间的 B 积分值(要求 $\Delta B \leq 2$),而与整个系统总的 B 积分值 ΣB 无关,从而在原理上保证啁啾脉冲的进一步放大,可以进一步提高系统的峰值功率,彻底解决非线性 B 积分对脉冲时间特性的影响。

2 数值模拟和时间域滤波结果分析

首先考虑由非线性折射率 n_2 引起的 B 积分

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l n_2 \mathcal{K}(z) dz \quad (1)$$

其中 $\mathcal{K}(z)$ 为入射光脉冲强度, λ 为光波中心波长 $1.064 \mu\text{m}$, l 为光通过放大系统中非线性介质长度。在光传输过程中材料色散也同时对光脉冲有着重要的影响。这两种过程对光脉冲传输的影响可以用非线性薛定谔方程来描述

$$i \frac{\partial A(z, t)}{\partial z} = i \frac{\alpha}{2} A(z, t) + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A(z, t)}{\partial t^3} - \gamma |A|^2 A(z, t) \quad (2)$$

β_2 为介质群速度色散, β_3 为三阶群速度色散, α 为介质增益系数或损耗, γ 为与非线性折射率有关的参数, $\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c}$ 。

因为方程(2)是一个没有解析解的方程,可采用分步法(Split-step approach)进行数值模拟计算^[8]。分步法解偏微分方程(2)的基本原理是分两步来分别考虑非线性项和色散项对超短超强脉冲所产生的影响。先分析非线性折射率的影响,不考虑色散项,仅有 B 积分时,光场的变化

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial t} = i \frac{\alpha}{2} A(z, t) - \gamma |A|^2 A(z, t) \quad (3)$$

解得

$$A(z, t) = A(0, t) \exp\left(\frac{\alpha z}{2}\right) \exp[iB(z, t)] \quad (4a)$$

$$B(z, t) = \gamma A^2(0, t) \int_0^z \exp(\alpha z) - 1 \gamma \alpha \quad (4b)$$

分步法的第二步不考虑 B 积分的作用,只计算

介质色散项,由方程(2)可得到

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A(z, t)}{\partial t^3} \quad (5)$$

解得

$$A(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int A(0, \omega) e^{-i\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(0, \omega) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\beta_2 \omega^2}{4\pi} + \frac{i\beta_3 \omega^3}{12\pi}\right)z\right] \exp(-i\omega t) d\omega \quad (6)$$

公式(4)和公式(6)分别表示非线性折射率和介质色散对超短激光脉冲所产生的影响,它们结合起来将正确表示激光脉冲传输时所受到的 B 积分和介质色散项共同作用的结果,典型计算结果如图1所示。它清楚地表明当 $B = 2$ 时,与原始注入 100fs 脉冲(图1虚线所示)相比,脉冲宽度变宽且脉冲严重畸变(图1(a)(b))。这样的光脉冲直接进入下一级放大器将会导致更严重的非线性效应或损坏光学放大介质。所以先对光脉冲进行整形是很有必要的。

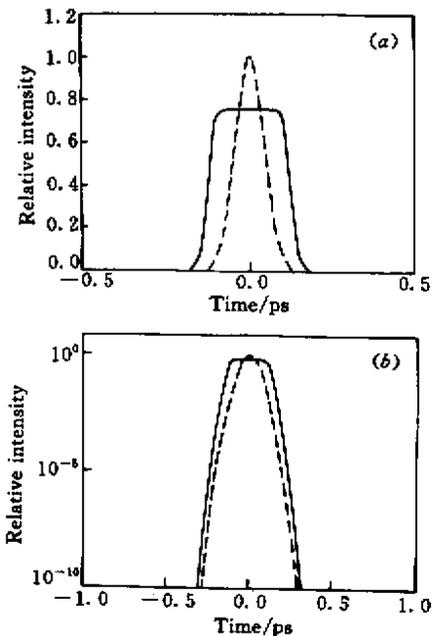


图1 计算结果

Solid curve indicates the pulse shape passing through a medium. Dotted curve presents the input pulse. B -integral is equal to 2. Input pulse is an initially 100 fs Gaussian pulse

Fig.1 Calculated results

Solid curve indicates the pulse shape passing through a medium. Dotted curve presents the input pulse. B -integral is equal to 2. Input pulse is an initially 100 fs Gaussian pulse

在高能固体激光器中,为抑制非线性 B 积分对光束空间质量的影响,通常采用空间滤波器来滤除有害的空间高频成分,改善光束的空间质量。借助于

空间滤波概念,非线性 B 积分或脉冲自位相调制对激光脉冲时间域质量的影响应该可以采用时间域滤波来抑制。滤除有害的较高时间频率和较低时间频率成分,可以改善脉冲时间域质量。

首先研究不同滤波窗口对输出脉冲的影响,并由此决定最佳滤波的选取。假定原始 100 fs 入射光脉冲是高斯型 $A(0, t) = \exp[-2\ln 2 \times (t/t_0)^2]$ 对 100 fs 脉冲展宽至 100 ps 再经过放大系统,受 B 积分和介质色散影响的脉冲,运用傅里叶变换将其转换到频域。如图 $\chi(a)$ 所示,主峰边上有两个次峰,其对光脉冲形状有着严重的破坏作用。然后我们分别在第一极小值、第一极大值、第二极小值处设“窗口”时间域滤波让中央频率成分通过,滤去两侧次峰频率成分。图 $\chi(b) \sim (d)$ 分别是以上滤波的结果。图 $\chi(b) \sim (d)$ 是上面计算结果在普通坐标下的形状。很明显在第一个极小值处滤波效果最好。采用最佳滤波方式,将模拟计算结果与滤波前的脉冲比较,如图 $\chi(b)$ 所示,曲线 1 表示滤波前的脉冲形状,曲线 2 表示滤波后的脉冲形状,表明经过滤波后的脉冲有较大的改善 (1) 脉冲峰值功率相对提高了 $40\% \sim 50\%$ 左右 (2) 脉冲半值宽度变小,脉冲变窄。

时间域滤波的引入可以将非线性 B 积分的限制 ($B < 1$) 放宽至 ($B \leq 2$),为彻底解决 B 积分的影响,可以相应采用多级时间滤波系统进行多次时间域滤波。在理论上分析研究了二级时间域滤波器的作用,其结果可简单地类推到多级滤波的情况。一束高斯型光脉冲进入第一级放大系统, B 积分为 2,通过第一级滤波器进行滤波。然后进入第二级放大系统, B 积分也为 2,再通过第二级滤波器滤波。得到如图 4 所示的结果。图 $\chi(a)$ 是第一级滤波前光脉冲功率谱,在其第一极小值处滤波。图 $\chi(b)$ 曲线 1 表示第一级滤波前的脉冲形状,曲线 2 表示第一级滤波后的脉冲形状,相比之下,滤波后的脉冲脉宽更窄,具有更大的峰值功率。图 $\chi(c)$ 为第一级滤波后的指数坐标下的脉冲形状,受滤波的影响两边并不光滑。图 $\chi(d)$ 是第二次滤波前光脉冲频谱,也在第一极小值处滤波。图 $\chi(e)$ 曲线 1 表示第一级滤波前的脉冲形状,曲线 2 表示第一级滤波后的脉冲形状。图 $\chi(f)$ 为第二级滤波后的指数坐标下的脉冲形状,受滤波的影响两边并不光滑。根据以上计算结果,在 B 积分为小于等于 2 时,第二次滤波仍能有效控制波形,保持较好的脉冲质量。

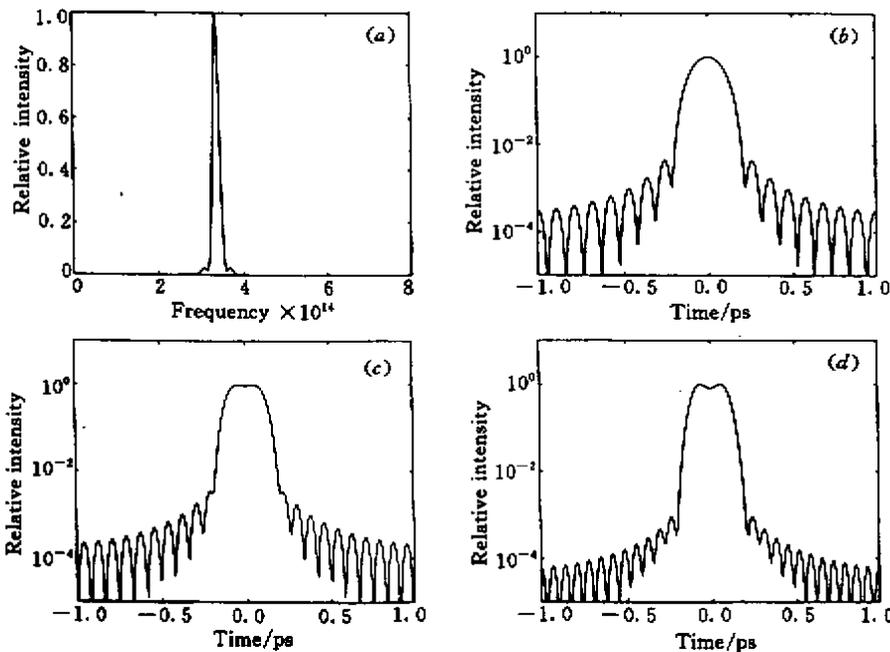


图 2 激光脉冲频谱 (a) 以及采用各种滤波窗口时指数坐标轴下相应的脉冲时间滤波曲线 (b) 为第一极小值处滤波结果, (c) 为第一极大值处滤波结果 (d) 为第二极小值处滤波结果。 B 积分为 2, 原始脉冲宽度 τ_0 为 100 fs

Fig.2 Frequency spectrum of pulse through an amplifier figure (a). And three temporal filter curves in logarithm coordinate axis, when setting filtering windows. Figure (b) at the first minimum value. Figure (c) at the first maximum value. Figure (d) at the second minimum value. B -integral is equal to 2. The input pulse is an initially 100 fs Gaussian pulse

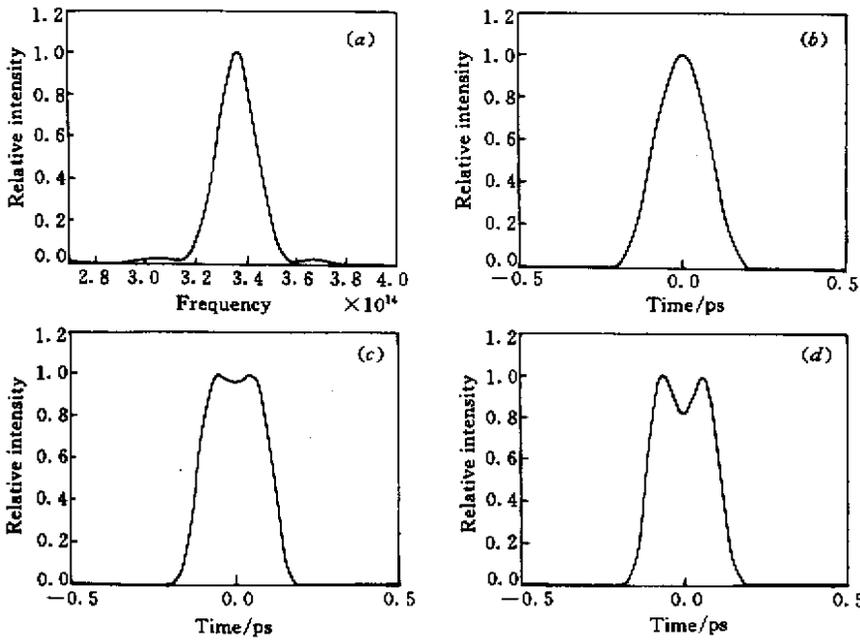


图3 激光脉冲频谱 (a) 以及采用各种滤波窗口时正常坐标轴下相应的脉冲时间滤波曲线 (b) 为第一极小值处滤波结果, (c) 为第一极大值处滤波结果 (d) 为第二极小值处滤波结果。B 积分为 2, 原始脉冲宽度 τ_0 为 100 fs

Fig.3 Frequency spectrum of pulse through an amplifier figure (a). And three temporal filter curves in common coordinate axis, when setting filtering windows. Figure (b) at the first minimum value. Figure (c) at the first maximum value. Figure (d) at the second minimum value. B-integral is equal to 2. Input pulse is an initially 100 fs Gaussian pulse

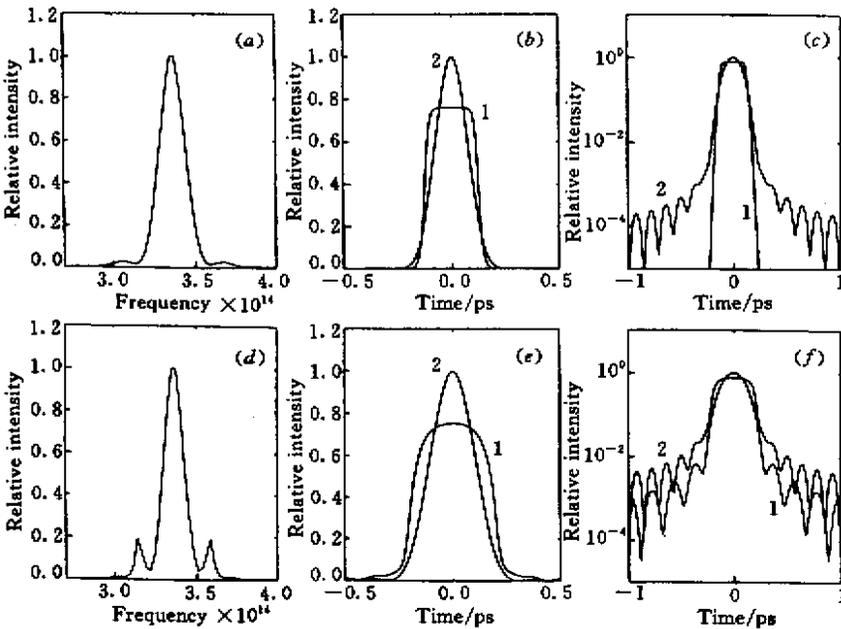


图4 第一级时间域滤波与第二级时间域滤波响应的脉冲光谱和时间波形

(a)(d) 分别为经过第一级、第二级放大系统后的激光脉冲频谱 (b)(c) 中曲线 1 2 分别为第一级滤波前后脉冲波形, (e)(f) 中曲线 1 2 分别为第二级滤波前后脉冲波形。B 积分为 2, 原始脉冲宽度 τ_0 为 100 fs

Fig.4 Frequency spectrum of pulse after passing through the first temporal filtering and the second temporal filtering

On figure (a) (d), the curves present respectively frequency spectrum of pulse after the first and second pulse amplifiers. On figure (b) (c), the curve one, two present respectively the frequency spectrum of pulse before and after the first filtering system. On figure (e) (f), the curve one, two present respectively the frequency spectrum of pulse before and after the second filtering system. B-integral is equal to 2. The input pulse is an initially 100 fs Gaussian pulse

3 结 论

长期以来在设计超短超强全固化激光器时,为了得到较好的脉冲质量,人们不得不把 B 积分控制在 1 以内。依据以上分析和模拟计算结果,飞秒脉冲经过啁啾展宽、放大和压缩过程后,即使 B 积分值高达 2 时,通过时间滤波,也能在很大程度上控制好脉冲宽度及质量。 B 积分值增大一倍,峰值功率将得到相应的增加。为彻底解决 CPA 系统中非线性 B 积分或脉冲自位相调制的影响,可以采用多级时间滤波方案。这样最终 CPA 系统输出脉冲的宽度和质量将不受整个系统总的 B 积分值(ΣB)的影响,而只要保证级间非线性 B 积分值不超过 $\alpha \Delta B \leq 2$ 。因此时间滤波和多级滤波器方案的提出,将在物理原理上保证 CPA 系统最终可使输出峰值功率不断提高。当然,随着脉冲能量的不断提高,在技术上要求使用大口径光学元件(特别是大尺寸光栅元件)。总之,本文提出的全新脉冲时间域滤波方案用于 CPA 系统,理论分析表明它可以解决脉冲自位相调制对脉冲的影响。

致谢 作者感谢谢兴龙副研究员许多有益的建议和帮助。

参 考 文 献

- 1 H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen. Analytic theory of additive pulse and Kerr lens mode locking. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10): 2086 ~ 2096
- 2 Zhou ShiAn, Qian LieJia. Analyze the impact on the grating stretcher of the spherical Aberration derived from the confocal telescope. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **27**(6): 519 ~ 524 (in Chinese)
- 3 P. Maine, D. Strickland, P. Bado *et al.*. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(2): 398 ~ 403
- 4 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 160 ~ 162
- 5 M. D. Perry, T. Ditmire, B. C. Stuart. Self-phase modulation in chirped-pulse amplification. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24): 2149 ~ 2151
- 6 A. Braun, S. Kane, T. Norris. Compensation of self-phase modulation in chirped-pulse amplification laser systems. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9): 615 ~ 617
- 7 C. Pare, A. Villeneuve, P. A. Belanger *et al.*. Compensating for dispersion and the nonlinear Kerr effect without phase conjugation. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(7): 459 ~ 461
- 8 J. Y. Zhang, J. Y. Huang, H. Wang *et al.*. Second-harmonic generation from regeneratively amplified femtosecond laser pulses in BBO and LBO crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(1): 200 ~ 209