

文章编号: 1001-4322(2003)01-0001-04

# 高能飞秒激光系统中空间滤波器的研究和设计\*

夏兰<sup>1</sup>, 钱列加<sup>2</sup>, 王世绩<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所, 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800;

2. 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)

**摘要:** 由于透镜传输时间延迟效应(PTD), 飞秒激光脉冲经过空间滤波器产生脉冲波前变形。讨论了用双胶合透镜或双分离透镜代替空间滤波器中的单透镜, 以消除或减小 PTD 效应, 设计了适用于飞秒激光装置的空间滤波器。

**关键词:** 空间滤波器; PTD 效应; 相速度; 群速度

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A

空间滤波器是高功率激光装置中必不可少的关键器件, 在系统中起着扩束、像传输和滤波等重要的作用<sup>[1-4]</sup>。用于纳秒量级长脉冲激光系统的空间滤波器技术已经成熟, 然而, 在超短脉冲激光系统中, 受介质中光束群速度和相速度不一致的影响, 激光脉冲波前(脉冲振幅包络面)和激光相位波前(等位相面)之间存在着显著的时间延迟(PTD 效应, propagation time delay)<sup>[5,6]</sup>。对于传统的透镜系统, 由于径向厚度不同, PTD 效应将会造成脉冲时间波前和激光位相波前之间的径向不均匀延迟, 影响激光脉冲的宽度和质量<sup>[5,6]</sup>。由于 PTD 效应, 激光脉冲经过空间滤波器后产生脉冲波前的变形, 变形的脉冲波前经过脉冲压缩器后, 脉冲宽度将不能被还原。因此, 传统的空间滤波器技术已经不能满足大口径超短脉冲激光系统的要求。在设计和研制大口径的 CPA 空间滤波器时, 必须考虑时间域的因素或 PTD 问题。尽管对 PTD 问题的研究已经开展了多年, 但至今国内外在超短脉冲激光领域尚未引起足够的重视。本文将讨论空间滤波器的 PTD 问题对高能飞秒激光装置的影响, 及适用于高能飞秒激光装置的空间滤波器系统。

## 1 空间滤波器中的 PTD 效应

当飞秒激光脉冲在透镜介质中传输时, 各光束路径长短由光束进入透镜系统时与光轴的距离决定, 如图 1 所示。由于介质中光束的相速度和群速度之间的差别, 脉冲波前与相位波前间的时间延迟随  $r$  的不同而不同, 从而使脉冲波前横向变形, 这种效应称为 PTD, 它同时与介质色散  $dn/d\lambda$  成正比<sup>[5-7]</sup>。一般用光轴上脉冲波前与相位波前之间的时间差  $\Delta t(r_0)$  来衡量 PTD 效应。

首先, 计算光脉冲在通过透镜产生的 PTD。由群速度和相速度公式

$$v_g = c / (n - \lambda dn/d\lambda), \quad v_p = c / n \quad (1)$$

及透镜各参数的关系傍轴近似后可推出光轴上相位波前与脉冲波前的时间差为<sup>[5,6,8]</sup>

$$\Delta t(r_0) = \frac{r_0^2}{2f(n-1)} \left( -\lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (2)$$

由两个单透镜组成的空间滤波器是一个简单的望远镜系统。根据透镜系统 PTD 公式(2)及望远镜系统各参数的关系可得空间滤波器的 PTD<sup>[5]</sup>

$$\Delta t(r_{10}, r_{20}) = \frac{r_{20}}{4f_{\#}(n-1)} \left( -\lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \quad (3)$$

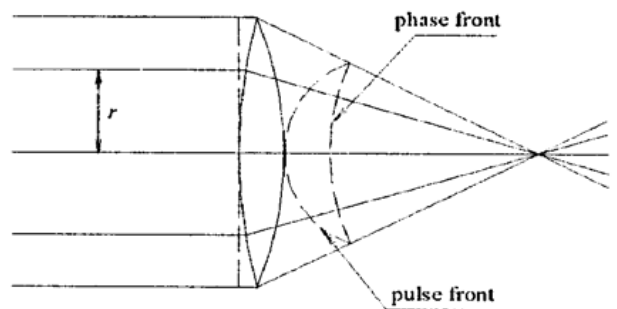


Fig. 1 Temporal front of the laser pulse delayed with respect to the phase front

图1 激光脉冲通过单透镜介质造成脉冲波前与相位波前的时间差

\* 收稿日期: 2001-08-20; 修订日期: 2002-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(60088003); 国家 973 项目资助课题(G19990752023); 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 夏兰(1976), 女, 硕士研究生, 从事飞秒激光系统中光束传输研究; 上海 800-229 信箱; E-mail: septem\_tuo@hotmail.com.

其中,  $r_{20}$  是望远镜系统输出光束的半径,  $m = f_1/f_2$  为望远镜系统的放大系数,  $f_{\#}$  是输出镜的 F 数, 这里两块透镜材料相同。由(3)式可知, 激光脉冲过空间滤波器产生的 PTD 与滤波器的孔径成正比, 与  $f_{\#}$  成反比, 还与透镜的材料有关。

以熔融氧化硅为材料的单透镜组成的空间滤波器为例。对于  $\lambda = 1.065\mu\text{m}$  的激光脉冲,  $-\lambda dn/d\lambda = 0.013$ , 图 2 中各曲线是不同  $f_{\#}$  系统随光束半径变化的 PTD 曲线。可以看到, 当  $f_{\#}$  较小而光束半径很大时, PTD 的值相对飞秒激光脉冲而言很大, 严重影响飞秒激光装置的技术指标。

从公式(2)可知要消除或减小透镜 PTD 效应, 就是要求  $\Delta t(r_0)$  的值为零即脉冲波前与相位波前重合, 或使  $\Delta t(r_0)$  为与  $r$  无关的常数, 使脉冲波前和相位波前是圆心在透镜系统焦点的同心球面。消除或减小 PTD 的方法很多, 如采用反射镜或双胶合透镜及双分离透镜代替单片透镜, 而采用反射镜会使空间滤波器结构变得很复杂, 可以考虑用双胶合或双分离透镜设计空间滤波器。

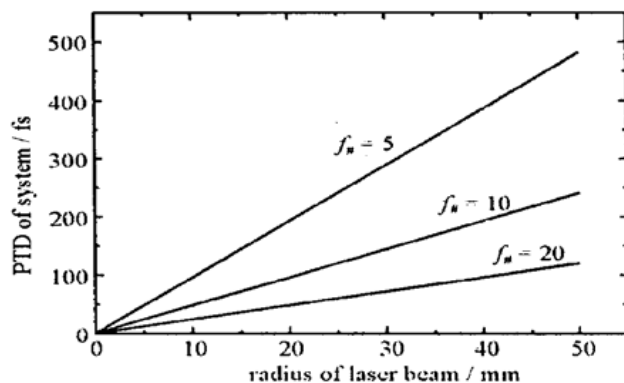


Fig. 2 PTD of the spatial filter composed of single lens

图 2 单透镜组成的空间滤波器产生的 PTD

## 2 飞秒激光器空间滤波器的改进方案

通常可以将衡量飞秒激光器空间滤波器 PTD 的判据取为

$$\Delta t(r_0) \leq 0.1 \tau_p \quad (4)$$

就可满足大多数飞秒激光装置了。除此以外, 要对飞秒激光光束进行有效的滤波, 要求空间滤波器满足色散  $\Delta f$  远小于焦深  $Zr$  的匹配条件, 具体的判据取为  $\Delta f \leq 0.1 Zr$ , 其中  $Zr \approx (2\pi f_{\#}^2 / M^2) \lambda$ ,  $f_{\#}$  是空间滤波器的 F 数,  $M^2$  是光束质量因子。为了计算的方便, 取  $M^2 = 1$ , 即理想的高斯光束。可改写成

$$\Delta f \leq f_{\#}^2 \lambda \quad (5)$$

公式(4)和(5)就是设计飞秒激光装置的空间滤波器应满足的条件。

### 2.1 双胶合透镜组成的空间滤波器

消色差双胶合透镜(如图 3)可以消除或减小透镜系统的 PTD。由相速度和群速度公式, 得到激光光束通过在  $\lambda$  点消色差的单个双胶合透镜从平面 A 到焦点 F 的传输时间为<sup>[5,6]</sup>

$$t(r) = \frac{d_1}{c} \left( n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \right) + \frac{d_2}{c} \left( n_2 - \lambda \frac{dn_2}{d\lambda} \right) + f/c \quad (6)$$

由此可见, 激光脉冲通过双胶合透镜的传输时间与光束截面各点的半径不相关, 即脉冲波前与相位波前的传输时间差  $\Delta t(r_0, r)$  是一常数, 脉冲波前没有产生变形, 这样就可以达到消除或减小脉冲波前变形的目的。

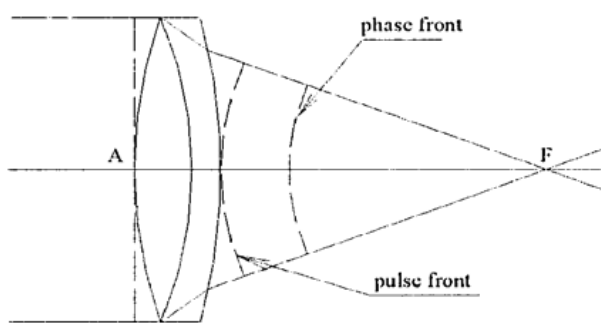


Fig. 3 Delay between the phase and pulse front

图 3 激光脉冲通过双胶合透镜

对于功率密度较小的激光脉冲, 空间滤波器可以用两片在激光波长消色差的双胶合透镜代替单透镜; 但当激光脉冲的功率密度较高时, 激光脉冲会破坏双胶合透镜的胶合层。结合空间滤波器的实际应用, 一般的空间滤波器还有扩束的作用, 出射端光束孔径大于入射端的光束孔径, 出射端光束的功率密度小于入射端。因此, 对于较强的功率密度的激光光束, 小孔径及 F 数较大的空间滤波器, 在考虑消除 PTD 时, 可以用双胶合透镜代替出射端的单透镜。

### 2.2 双分离透镜组成的空间滤波器

双胶合透镜组成的空间滤波器不能适用于超强超短激光脉冲, 可以考虑用双分离透镜组代替上面的双胶合透镜。

首先, 讨论激光脉冲在单个双分离透镜系统中传播的情况。假设,  $f_1, f_2$  分别是透镜系统两透镜的焦距,  $f$  是系统的焦距,  $D$  是两透镜的距离,  $r_1$  是第一块透镜入射光束半径,  $r_2$  是第二块透镜入射光束的半径, 则有  $r_2$

$= (f_1 - D)r_1/f_1$ , 整理可得

$$\Delta t(r_1) = \frac{r_1^2}{2f_1} \left[ \left( -\lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \right) \left[ \frac{1}{f_1(n_1 - 1)} \right] + \frac{(f_1 - D)^2}{f_2 f_1^2 (n_2 - 1)} \left( -\lambda \frac{dn_2}{d\lambda} \right) \right] \quad (9)$$

要消除激光脉冲的 PTD, 即使  $\Delta t$  减小或为零, 要求(9)式花括号内因子为零或足够小, 这时透镜系统必须为正负透镜组。在这里假设第一块透镜是正透镜, 第二块透镜是负透镜, 则有

$$D = f_1 - \sqrt{\frac{(-\lambda dn_1/d\lambda)(n_2 - 1)}{(-\lambda dn_2/d\lambda)(n_1 - 1)} f_1 f_2} \quad (10)$$

可见, 对于双分离透镜系统, 在确定了材料、系统的焦距  $f$  和一块透镜的焦距  $f_1$  后, 就可以通过设计合适的透镜距离来消除激光脉冲的 PTD。例如, 假设激光波长为  $1.065\mu\text{m}$ , 双分离透镜为两片透镜, 第一块透镜的材料是 SF11, 折射率是 1.754 31, 参数  $-\lambda dn/d\lambda$  为 0.029, 第二块透镜的材料是 BK7, 折射率是 1.506 62, 参数  $-\lambda dn/d\lambda$  是 0.014, 假设系统的焦距为 4m, 取第一块透镜焦距为 0.8m, 则第二块透镜焦距为  $-0.899\text{m}$ , 透镜距离为 0.081m。在这个例子中, 目的是完全消除 PTD, 在实际设计过程中, 只需要将 PTD 减小到脉冲宽度的十分之一, 同时还要考虑透镜组其他的设计要求, 如像差要求。用合适的双分离透镜组代替双胶合透镜组成空间滤波器, 也同样能够消除或减小 PTD 效应造成的脉冲波前变形。

为了减少系统中透射元件, 用单透镜和双分离透镜组构成的空间滤波器来减小脉冲波前的扭曲变形(如图 5)。设计方法同上面相似, 公式(9)的右边加上输入单透镜引入的 PTD, 再根据公式(4)和(5)给出的超短脉冲激光装置空间滤波器设计要求, 选择适当的材料和参数  $f, f_1, D$ , 就能够控制双分离透镜的色散, 从而达到减小 PTD 效应的目的。这种空间滤波器只能用在大于 100fs 以上的激光装置中。这是因为空间滤波器有效滤波要求空间滤波器满足色散  $\Delta f$  远小于焦深  $Zr$  的匹配条件。这个条件要求空间滤波器输入透镜产生的 PTD 小于未展宽前超短脉冲的宽度。

图 5 是适用于长脉冲激光装置中的空间滤波器与适用于超短脉冲激光装置的空间滤波器引入的 PTD 随光束半径变化的曲线。虚线是双分离透镜组组成的空间滤波器 PTD 随光束半径变化的曲线。这里两个空间滤波器的放大率都为 1, 输入镜的焦距为 2m。双分离透镜的第一块透镜焦距为 0.25m, 两块透镜之间的距离为 0.05m。可以看到, 由双分离透镜组组成的空间滤波器引入的 PTD 远小于长脉冲空间滤波器引入的。

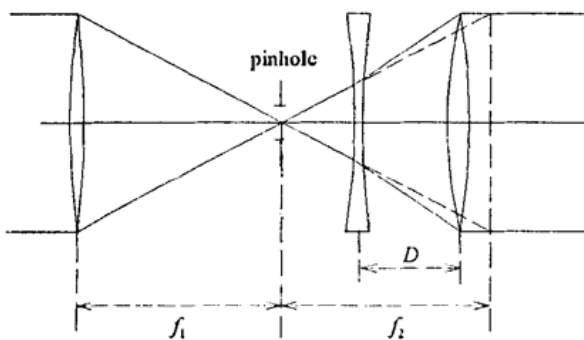


Fig. 4 Spatial filter composed of single lens and an achromatic combination of two lenses

图 4 双分离透镜组组成的空间滤波器

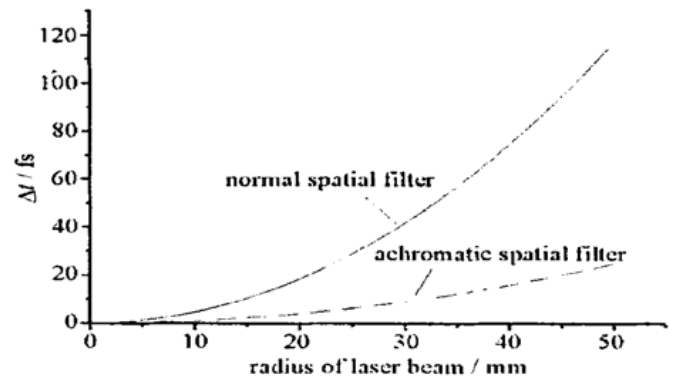


Fig. 5 Propagation time delay of different spatial filters

图 5 不同空间滤波器引入的 PTD 随光束半径变化曲线

### 3 结 论

透镜介质的 PTD 效应会造成脉冲波前的严重变形, 因此用于长脉冲激光装置的普通空间滤波器并不适用于飞秒量级的超短脉冲激光。而使用胶合透镜或分离透镜组成空间滤波器可以有效的消除或减小空间滤波器的 PTD 效应, 能够大幅度的提高超短脉冲激光的质量。

### 参考文献:

- [1] Simmons W W. A high energy spatial filter for removal of small scale beam instabilities in high power solid state laser[J]. *IEEE J Quantum Ele*, 1975, **11**: 30D.
- [2] Hunt J T, Renard P A, Simmons W W. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spatial filters[J]. *Appl Opt*, 1977, **16**: 779.

- [3] Simmons W W, Speck D R, Hunt J T. Argus laser system: performance summary[J]. *Appl Opt*, 1978, **17**: 999.
- [4] 王桂英, 赵九源, 张明科, 等. 钕玻璃高功率激光系统中的空间滤波器的基本研究[J]. 物理学报, 1985, **34**: 175. (Wang G Y, Zhao J Y, Zhang M K, et al. Basic study on spatial filter used in Nd-glass high power laser system. *Acta Physica Sinica*, 1985, **34**: 175)
- [5] Bor Z. Distortion of femtosecond laser pulses in lenses and lens system[J]. *J Mod Opt*, 1988, **35**: 1907.
- [6] Bor Z. Distortion of femtosecond laser pulses in lenses[J]. *Opt Lett*, 1989, **14**: 119.
- [7] Lbragimov E. Focusing of ultrashort laser pulses by the combination of diffractive and refractive elements[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**: 7280.
- [8] Jasapara J, Rudolph W. Characterization of sub-10-fs pulse focusing with high-numerical-aperture microscope objectives[J]. *Opt Lett*, 1999, **24**: 777.

## Study and design of spatial filter in high power femtosecond laser system

XIA Lan<sup>1</sup>, QIAN Lie-jia<sup>2</sup>, WANG Shi-ji<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, National Laboratory on High Power Laser Physics,  
P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China;

2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences,  
National Laboratory on High Power Laser Physics, P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Owing to the PTD effect in the lenses of spatial filter, large temporal front distortion of femtosecond pulses occurs in the spatial filter. In this work, in order to design a spatial filter which is applicable to high power femtosecond laser system, PTD of achromatic doublet or separated doublet is calculated and special spatial filter is discussed in which achromatic doublet or separated doublet replace the single lens. PTD of the special spatial filter is little so temporal front distortion of femtosecond pulse in laser system is eliminated or reduced.

**Key words:** Spatial filter; PTD effect; Phase velocity; Group velocity