

用于 OPCPA 展宽器的原理和优化设计*

熊红军 赵卫 陈国夫

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘要 给出了一种 öffner 型展宽器的原理和设计, 在光线追迹法的基础上用 Matlab 辅助程序进行了数值模拟计算, 得到了影响展宽器性能参数的直观图形, 并对这些参数如何影响展宽器的性能进行了分析讨论, 最后给出了用于 OPCPA 展宽器的最优化设计参数. 结果表明这种展宽器能将 15 fs 的脉冲展宽到 900 ps.

关键词 光学参量啁啾脉冲放大; 利特洛角; 脉冲展宽; 欧浮纳展宽器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)的基本思想是把自锁模钛宝石激光器产生的带宽飞秒(fs)信号光脉冲,通过脉冲展宽器在时域上展宽成纳秒(ns)级的脉冲,然后使展宽后的信号光脉冲与 ns 级的窄带抽运光脉冲在非线性晶体中进行参量耦合. 耦合过程中,能量从抽运光脉冲转移到信号光脉冲,于是信号光脉冲被放大,放大后的信号光脉冲再用脉冲压缩器压缩成尽可能接近初始飞秒脉宽输出. 在 OPCPA 实验中,抽运光一般为大能量的 ns 级激光脉冲(典型脉宽 ~ 1 ns),若直接对飞秒脉冲进行参量放大,信号光和抽运光之间存在着严重的脉宽失配问题,导致参量转换效率极低. 只有当信号光和抽运光之间的脉宽完全匹配时,参量转换效率才最高,因此必须要把 fs 脉冲展宽到 ns 级,这就需要一种高效率、无像差、有上万倍展宽比的展宽器. 迄今为止,尽管人们已经找到了几种展宽和压缩脉冲的方法,最常用的展宽器是 E·B Treacy 1969 年提出的光栅对系统^[1],以及 O·E Martinez 1987 年在此基础上建立的基于光栅对的展宽及其压缩系统^[2],但是,对于展宽器展宽能力的计算公式,目前还没有一套比较完整的标准计算解析表达式. 文献[3]用光线追迹法计算了 Martinez 型展宽器的位相表达式,但是仍然不能直观地看到影响展宽器展宽能力的参数,且其表达式比较复杂. 文献[4]在比较马丁内兹和欧浮纳展宽器的文章中简单描述了各参量变化对展宽器性能的影响,但在优化设计展宽器时对于各参数的选择仍缺少很好的参考作用. 为此,本文首先给出了一种 öffner 型展宽器的原理,在光线追迹法的基础上用 Matlab 辅助程序进行了模拟

计算,得到了影响展宽器性能参数的直观图形,并对这些参数如何影响展宽器的性能进行了分析讨论,最后给出了一种 OPCPA 展宽器的优化设计.

1 展宽器的原理和设计

设计的展宽器(öffner 型)结构如图 1,它由一个平面全息衍射光栅,一个凹面镜和一个凸球镜组成. 从振荡器输出的锁模飞秒脉冲在 Littrow 角附近(一般取大于 Littrow 角 10°)入射到光栅上,一级衍射到凹面镜上,光束在水平方向展宽,在竖直方向错开,然后投射到凹面镜的 C 点,再反射到凸球镜上. 凹面镜和凸球镜在轴线上共心,在空间上错开,不在一个平面上. 轴线上的共心消除了 öffner 型展宽器的像差,这种展宽器被认为是无像差展宽器. 由凸球镜反射到凹面镜的 E 点,最后投射到光栅的 F 点,在 G 点出射,至此完成光路的一个往返. 一次往返的缺点是飞秒脉冲的频谱分量不仅在时域中被色散,而且在空间上也被色散. 结果光束的横截面类似于一个拉长的椭圆,而不是圆. 一个简单的办法就是在出射点 G 放置一稍微倾斜的镀膜全反镜,可以将展宽脉冲和输入脉冲光程分开,这就是常用的双通结构^[5].

光脉冲在传播过程中由于不同频谱成分的角色散而引入的群延迟为^[6]

$$T(\omega) = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1)$$

Φ 是整个传播过程中引入的相位改变. 色散定义为单位频谱宽度上的脉冲展宽量,则

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta\omega} = \frac{d}{d\omega}(T(\omega)) = \frac{d^2\Phi}{d\omega^2} \quad (2)$$

或者

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\Phi}{d\omega^2} \quad (3)$$

由式(2)和(3)可求得初始频谱宽度为 $\Delta\lambda_0$ 的锁模飞秒脉冲展宽为

*国家 863-416 主题基金资助项目

Tel: 029-88484268 Email: hongjunx@hounail.com

收稿日期: 2003-06-25

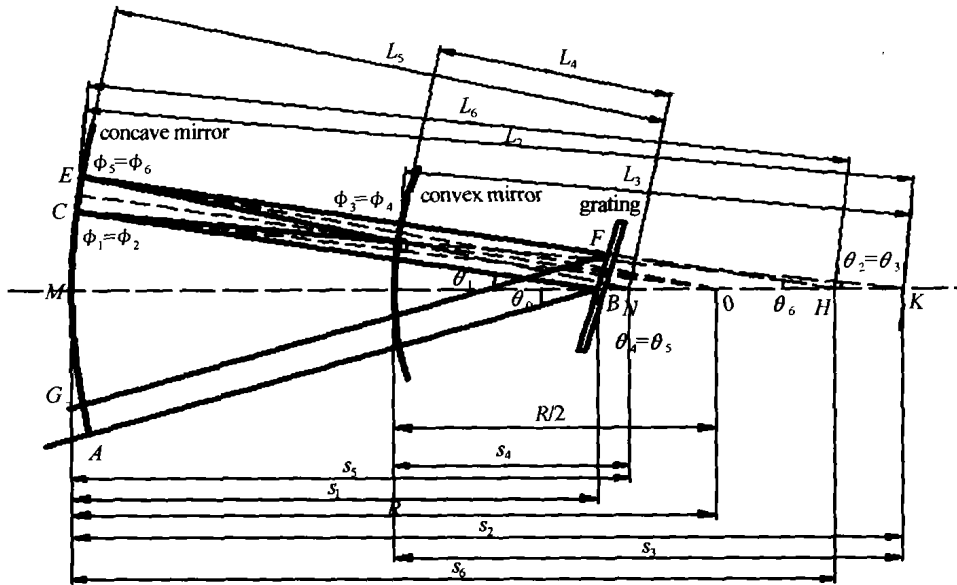


图1 单光栅欧浮纳展宽器光路图
Fig. 1 Schematic of a single-grating Offner triplet stretcher

$$\tau = \frac{2\pi c GDD(\lambda_0) \Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (4)$$

$GDD(\lambda_0)$ 是色散量. 由图1可知,脉冲从A到G所通过的路径长度P是

$$P = AB + BC + CK - KD + EN - DN + EH - FH + FG \quad (5)$$

其中

$$AB = R[1 - (1 - S_1/R) \cos \theta_0] \quad (6)$$

$$BC = R \frac{\sin(\theta_1 - \phi_1)}{\sin \theta_1} \quad (7)$$

$$CK = R \frac{\sin(\theta_1 - \phi_1)}{\sin \theta_2} \quad (8)$$

$$KD = \frac{R}{2} \frac{\sin(\theta_3 + \phi_3)}{\sin \theta_3} \quad (9)$$

$$EN = R \frac{\sin(\theta_5 - \phi_5)}{\sin \theta_5} \quad (10)$$

$$DN = \frac{R}{2} \frac{\sin(\theta_3 + \phi_3)}{\sin \theta_4} \quad (11)$$

$$EF = (L_6 - b)[1 + \cos(\theta_0 + \theta_6)] \quad (12)$$

$$FG = R - [L_6 \cos(\theta_0 + \theta_6) - (S_6 - R) \cos \theta_0] \quad (13)$$

由式(6)~(13)可以得到欧浮纳展宽器的位相改变为

$$\begin{aligned} \Phi_s = & \frac{\omega}{c}(C + A) - \frac{\omega}{c}b[1 + \cos(\theta_0 + \theta_6)] + \\ & \frac{2\pi G}{d}[\tan(\gamma - \theta_0 - \theta_6) - \tan(\gamma - \theta_0)] + \\ & \frac{2\pi G_0}{d} \tan(\gamma - \theta_0) \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$b = \frac{G}{\cos(\gamma - \theta_0 - \theta_6)} = (S_6 - S_1) \cdot$$

$$\frac{\cos(\gamma - \theta_0)}{\cos(\gamma - \theta_0 - \theta_6)} \quad (15)$$

$$C = 2R - (R - S_1) \cos \theta_0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} A = & R \left\{ \sin(\theta_1 - \phi_1) \left(\frac{1}{\sin \theta_1} + \frac{1}{\sin \theta_2} \right) - \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \sin(\theta_3 + \phi_3) \left(\frac{1}{\sin \theta_3} + \frac{1}{\sin \theta_4} \right) + \sin(\theta_5 - \right. \\ & \left. \phi_5) \left(\frac{1}{\sin \theta_5} + \frac{1}{\sin \theta_6} \right) \right\} + R \frac{\sin \phi_6}{\sin \theta_6} \cos \theta_0 \end{aligned} \quad (17)$$

式(14)中第一项是占主导地位的位相变化,最后一项是考虑到光栅的像差而增加的位相修正因子,第二项和最后一项在无像差系统中应该是互相抵消的,因此把第一项叫做位相主变化,后面两项叫做位相修正变化. G_0 是H到光栅的垂直距离.

将式(14)对 ω 求二次偏导,带入式(4)就可以从理论上进行数值计算模拟和优化设计展宽器.

2 数值模拟结果及讨论

用 Matlab 辅助程序进行数值模拟计算,得到了展宽脉冲的脉宽 τ 与入射角 γ ,凹面镜的曲率半径 R ,光栅到凹面镜的距离 S_1 ,以及光栅常数 d_s 的关系如图2.

其中,图2(a)是取中心波长 $\lambda = 800 \text{ nm}$,带宽 $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$,光栅常数 $d_s = 1/1800 \text{ mm}$,光栅到凹面镜的距离 $S_1 = 0.677R$,凹面镜的曲率半径 $R = 1000 \text{ mm}$ 时得到的展宽脉冲的脉宽 τ 与入射角 γ 的关系.由图可知,入射角 γ 取小于 Littrow 角(≈ 0.8)时,展宽脉冲的脉宽 τ 较入射角 γ 取大于 Littrow 角时宽,这个结论和文献[7]所得结论完全一致.计算表明,入射角 γ 对展宽能力影响较小,考虑到其衍射效率的问题,一般取大于 Littrow 角 10° 左右为宜.

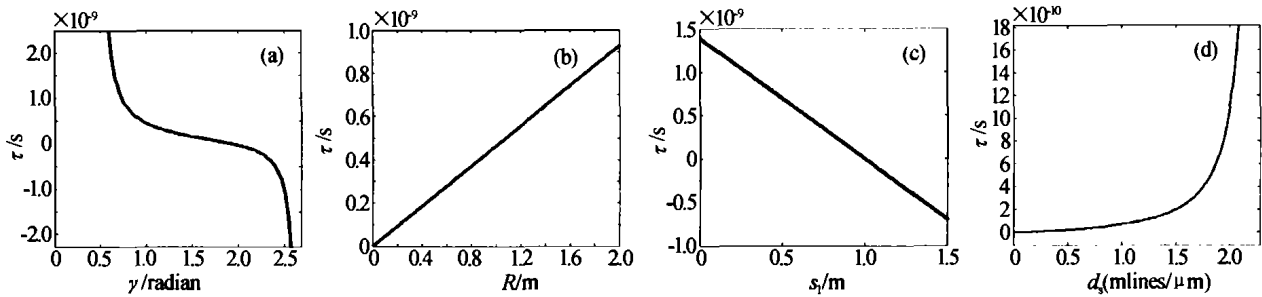
图 2 展宽脉冲的脉宽与 γ 、 R 、 S_1 、 d_1 的关系Fig. 2 The relation between width of stretched pulse and γ 、 R 、 S_1 、 d_1

图 2(b)是在光栅到凹面镜的距离 S_1 ，以及光栅常数 d_1 的取值和图(a)取值相同情况下，取入射角 $\gamma = 56^\circ$ 时展宽脉冲的脉宽 τ 与凹面镜的曲率半径 R 的关系。由图可知，凹面镜曲率半径 R 与展宽脉冲的脉宽 τ 成正比，所以要想得到较大的展宽倍数， R 是一个要考虑的重要因素，但是随着 R 的增大，展宽器的像差也在增大^[4]，所以 R 存在着一个优化选择的最佳值。展宽到 ns 量级的脉冲，一般取 $R = 1000$ mm 满足优化条件。

图 2(c)是在凹面镜的曲率半径 R ，以及光栅常数 d_1 的取值和图(a)取值相同情况下，取入射角 $\gamma = 56^\circ$ 时展宽脉冲的脉宽 τ 与光栅到凹面镜的距离 S_1 的关系。从图上可以看出光栅到凹面镜的距离 S_1 应该是越小越好，但是考虑到光栅位置偏离曲率半径中心越远，引入的像差越大，所以 S_1 取值要慎重选择。一般优化选择取 $0.5 \sim 1R$ 之间为宜。在较大展宽倍数的展宽器设计中， S_1 是较为有效的调节参量。

图 2(d)是凹面镜的曲率半径 R ，光栅到凹面镜的距离 S_1 的取值和图(a)取值相同情况下，取入射角 $\gamma = 56^\circ$ 时展宽脉冲的脉宽 τ 与光栅常数 d_1 的关系。此图表明，光栅常数 d_1 和展宽脉冲的脉宽 τ 成反比关系，所以在具有较大展宽倍数的展宽器设计中，应该选用光刻密度比较大的光栅，但光栅的选择性不是很大，市面只有 1100, 1200, 1400, 1800, 2400 mm^{-1} 等若干种。总之，要综合考虑这几个因素的影响来优化选择展宽器的参数。

3 展宽器器件参数选择

凹面镜的曲率半径: 1000mm 最小直径: $d_{\text{Concave}} = R \sin(\theta_4 - \varphi_5)$

凸球镜的曲率半径: 500mm 最小直径: $D_{\text{Convex}} = D_{\text{Concave}}(S_6 - R/2)/S_6$

光栅尺寸的选择: 光栅的横向尺寸一定要满足拉长光斑的大小, 光栅横向尺寸的不得小于 L 计算公式为

$$L = \frac{D_{\text{Concave}}(S_6 - S_1)}{S_6 \sin(\pi/2 - r + \theta_0)}$$

r 为光线的入射角

在 OPCPA 系统中, 带宽飞秒信号光脉冲需要展宽成 ns 级的脉冲, 当中心波长 $\lambda = 800$ nm, 带宽 $\Delta\lambda = 50$ nm 时, 优化选择的参数为: 光栅为全息镀金 1800l/mm, 一级衍射效率大于 80%, 尺寸为 270×100 mm, 凹面镜的曲率半径 $R = 1000$ mm, 凸球镜的曲率半径 $R/2 = 500$ mm, 尺寸分别为 $\Phi 260 \times 30$ mm, $\Phi 100 \times 12$ mm, 取光栅到凹面镜的距离 $S_1 = 0.677R$, 入射角 $\gamma = 56^\circ$, 欧浮纳展宽器在这样的条件下可以将 15 fs 的光脉冲展宽到 460 ps, 如果采用双通结构, 则可以展宽到 900 ps, 这完全可以满足 OPCPA 实验的要求。

4 结论

本文给出了一种 offner 型展宽器的原理和设计, 在光线追迹法的基础上用 Matlab 辅助程序进行了模拟计算, 得到了影响展宽器性能的参数直观图形, 并对这些参数如何影响展宽器的性能进行了分析讨论, 最后给出了用于 OPCPA 展宽器的最优化设计参数, 结果表明这种展宽器能将 15 fs 的脉冲展宽到 900 ps。

参考文献

- 1 Treacy E B. Optical pulse compression with diffraction gratings. *IEEE J Quantum Electron*, 1969, QE-5(9):454~458
- 2 Martinez O E. 3000 times grating compressor compensation in 1.3 ~ 1.6 μm region. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, QE-23(1):59~64
- 3 Jiang J, Zhang Z G, Hasama T. *J Opt Soc Am*, 2002, B19(7):678~680
- 4 Sun Darui, Song Yanrong, Zhang Zhigang. Compare of characteristics between Martinz and Offner stretchers used in chirped pulse amplifier. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(4):870~874
- 5 贾东方, 余震虹等译, 李世忱审校. 非线性光纤光学原理及应用. 北京: 电子工业出版社, 2002. 442~444
Jia D Y, Yu Z H, Li S S. Beijing: Electronics Industry Press, 2002. 442~444

- 6 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics California; Academic Press, 1989. 149 ~ 151
stretcher in chirped-pulse amplification. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(12): 1067 ~ 1070
- 7 Xu G, Qian L J, Fan D Y. Optimization of the single-grating

The Principle and Optimized Design of a Stretcher in OPCPA System

Xiong Hongjun, Zhao Wei, Chen Guofu

*State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics ,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*

Received date: 2003-06-25

Abstract The theory and optimized design of a kind of Offner stretcher is presented. After stimulated numerically and calculated with Matlab assisted program based on ray-tracing, the direct graph about parameter related with stretched capability of the stretcher is gained. Analysing and discussing that how these parameters affect the stretching capability, the optimized parameter in OPCPA stretcher is presented, the results show that the stretcher in this paper can stretch 15fs pulse to 900ps.

Keywords Optical parametric chirped-pulse amplification; Littrow angle; Pulse-stretching; Offner-stretcher

Xiong Hongjun was born in Chongqing, P. R. China. He received his B. S. from College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University in 2001. Currently he is Studying for his M. S. degree at State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include dispersion compensation, pulse broadening, pulse compression and their related numerical stimulation.