

对于具有一定宽度的光束通过展宽器的色散误差的评价*

刘永军¹⁾²⁾ 柴 路¹⁾ 王清月¹⁾ 张志刚¹⁾

¹⁾天津大学精仪学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

²⁾天津大学理学院应用物理系, 天津 300072)

(2001 年 10 月 3 日收到, 2001 年 11 月 16 日收到修改稿)

利用光线追踪法计算了具有一定宽度的光束通过 Martinez 展宽器时的色散误差. 结果表明, 通常的无宽度理想光线的展宽器模型有足够的精确度. 但是如果将光束反转后再送入展宽器, 将得到更加完美的色散误差补偿.

关键词: 飞秒激光放大器, 展宽器, 压缩器, 色散补偿

PACC: 4265K, 4280W

1. 引 言

随着飞秒技术的发展^[1], 脉冲展宽-放大-压缩 (CPA) 现在已经成为标准的飞秒脉冲放大技术. 脉宽从 100fs 到较窄的 20fs, 能量从数毫焦到数十微焦, 都能够通过这套成熟的技术来得到. 若配上参量放大系统, 可以实现更宽波长范围内的调谐, 满足对超快过程研究的需要. 对于 CPA 系统, 一方面可以优化入射的种子脉冲^[2], 另一方面展宽器和压缩器的设计相当重要. 只有在精确计算出光在展宽器中的色散, 才能够设计出满足条件的压缩器, 使放大后的脉冲色散得到补偿^[3,4]. 但是对于以前的脉冲展宽过程计算都是假设待放大的入射光是理想光, 即入射光为一无限细的光束. 但是实际情况与此不符. 入射的待放大的光一般都是具有毫米量级尺度, 与理想光束之间有很大差别. 因此对于实际 CPA 系统, 必须考虑入射光的尺度, 准确地把握实际光束在展宽器中的色散问题.

前人提出了对于 Martinez^[5]展宽器模型, 假设入射光和出射光平行, 称之为平行理论模型. 而由于像差的影响, 入射光和出射光不平行. 以此计算色散的模型称为非平行模型理论. 本文利用较为简易的 Martinez 平行展宽系统模型理论^[3,4], 使用光线追踪法, 对具有一定尺度的实际光束的色散补偿过程进

行了理论计算, 并提出和证明了通过一些简单方法, 可以改善或抵消这种影响.

2. 光束的平行理论

2.1. 理想光束的平行理论展宽系统模型

图 1 显示了平行理论展宽系统的模型. 它假设了入射光为理想的入射光, 即横截面无限小的光束, 这样的光入射到光栅上时可以看作是一个点 (图中的 B). 光束从 P 点开始经过 PBDEHIQ, 从 Q 点出射. B 点通过球面镜成像为 B'. 根据光线追迹法得到总位相为

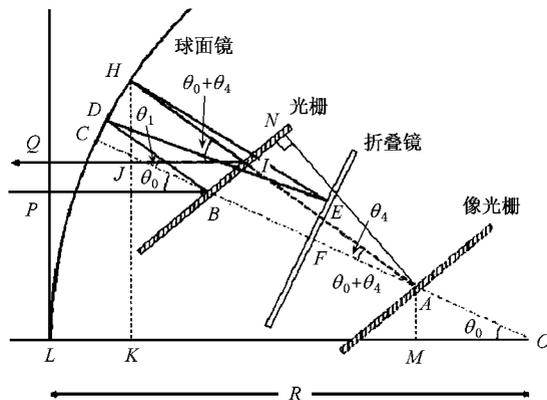


图 1 平行理论展宽系统模型

* 国家自然科学基金 (批准号 60178007), 天津市自然科学基金 (批准号 0201-413188), 国家重点基础研究专项经费 (批准号: G1999075201-2) 资助的课题.

$$\phi_L(\omega) = \frac{\omega p_L}{c} + \frac{2\pi G}{d} \tan(\gamma - \theta_0 - \theta_4) + \frac{2\pi}{d} (G_0 - G) \tan(\gamma - \theta_0), \quad (1)$$

则时间延迟为

$$\tau_L = \frac{d\phi_L(\omega)}{d\omega}, \quad (2)$$

其中各量的定义可以参考文献 [3, 4].

2.2. 具有一定宽度入射光的平行理论模型

在入射到展宽器的光有一定宽度的情况下, 入射光可以看作是由无数束没有宽度的理想光组成. 除了中心光线, 其他光线按照光线追迹法所定义的入射点 s_1 都会离开轴线, 引起入射点的位移, 如图 2 所示. 根据新的入射点 s_1 就可以利用光线追迹法追踪每一束这样的理想光线, 计算出每根光线的长度.

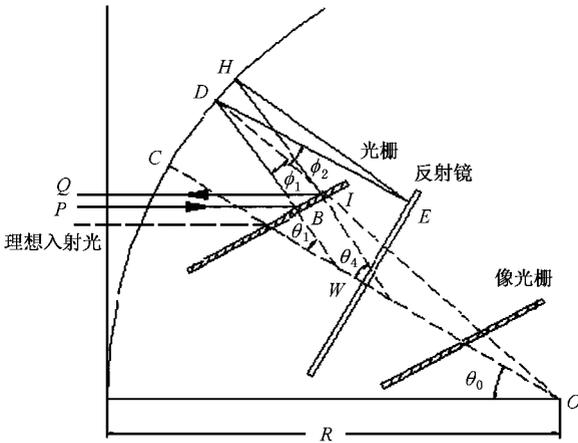


图 2 具有宽度的入射光的理论模型

设某一光线入射与理想光线入射之间的垂直距离为 D , θ_1 为衍射光与光轴的夹角, 即图 2 中的 PB 反向延长与光轴的夹角. 可见, 不同位置的入射光, B 点的位置不同. 因此其中各变量的定义与理想光束模型稍有不同, 假设 DB 的延长线与轴的交点为 W , 而 DE 与光轴的交点设为 W' (未标出), 那么需要修正的各段光线的长度分别是

$$l_1 = DW, \quad (3)$$

$$l_2 = W'D, \quad (4)$$

$$l_3 = W'H \quad (5)$$

$$p_0 = PB, \quad (6)$$

$$p_1 = l_1 - BW, \quad (7)$$

$$s_1 = CW. \quad (8)$$

由于入射点和成像点的位移, 需要再增加一个

位相修正因子

$$G_1 = (s_1 - 0.25R) \times \cos(\gamma - \theta_0), \quad (9)$$

因此总的位相可以写为

$$\phi_L(\omega) = \frac{\omega p_L}{c} + \frac{2\pi G}{d} [\tan(\gamma - \theta_0 - \theta_4) + \tan(\gamma - \theta_0 + \theta_1)] + \frac{2\pi}{d} [(G_0 - G) \tan(\gamma - \theta_0) + (G_0 - G_1) \tan(\gamma - \theta_0)], \quad (10)$$

其中推导过程和各量的定义同样可以参考文献 [3, 4].

3. 计算结果

根据实际的 CPA 系统, 我们选取了以下展宽器的参数: 球面镜曲率半径 $R = 1000\text{mm}$, 光栅到球面镜的距离为 $0.25R$, 光栅密度 $1200/\text{mm}$, 入射角为 38.6° . 压缩器中的光栅常数、入射角以及光栅间距都与展宽器相同. 波长考虑范围是 $700\text{--}900\text{nm}$, 中心波长 800nm . 我们规定, 处在理想入射光线上的为正, 下的为负. 假定所考虑的系统没有材料色散, 我们计算了入射光与理想光线差 D 为 -2mm , -1mm , 0mm , $+1\text{mm}$, $+2\text{mm}$ 的各种情况下的群延迟, 并与理想情况相比. 计算结果如图 3 所示.

从图中可以看出当理想入射情况的中心波长 800nm 处 100nm 范围内的群延迟色散很好地被补偿的时候, 处在与理想入射光有一定距离 D 的光束也可以获得较好的补偿, 即光线宽度对于色散的误差很小. 但是如果将这一误差放大 (图 4), 可以看出, 与理想情况相比, 在 $750\text{nm}\text{--}850\text{nm}$ 之间的带宽内, 偏离为 1mm 的光线的群延迟与理想情况之间的群延迟之差最大在 5fs 左右, 而偏离 2mm 的光与理想情况之间的群延迟之差最大在 10fs 左右. 所以这个误差是宽带飞秒脉冲放大中必须考虑的问题.

从图 4 又看到, 与理想光情况相比较各平行离轴光线偏离距离相同而符号不同的光的群延迟差方向相反. 因此可以想见, 若将偏离相同距离而符号相反的光的群延迟相加, 可以消除这种漂移带来的误差.

图 5 给出了偏离在 -1mm 和 $+1\text{mm}$, -2mm 和 $+2\text{mm}$ 下两者的群延迟之和与理想情况相比较的结果, 可见两条曲线重合, 之间的差别已经辨别不出. 为了更好的看出之间的差别, 我们给出两者之差 (图 5.6).

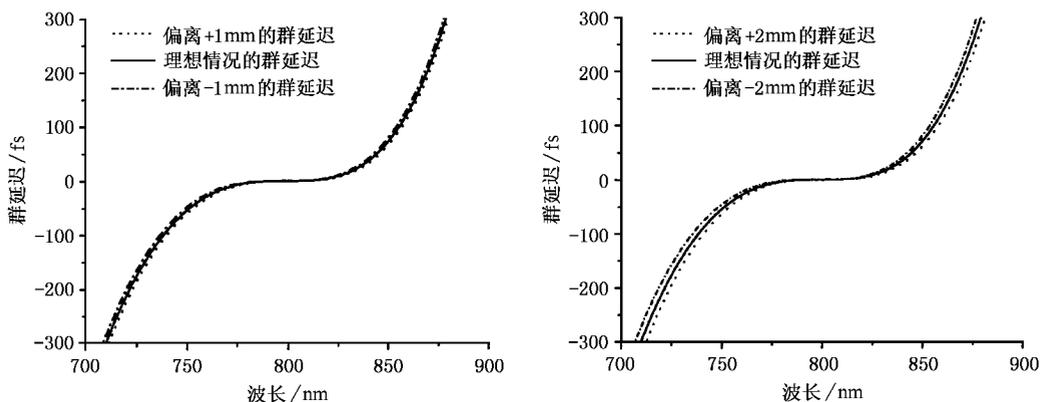


图3 各种偏离情况下的群延迟

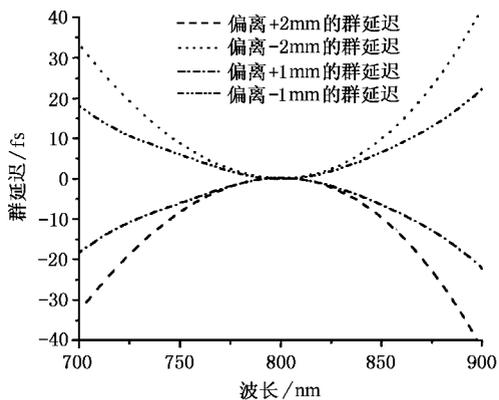


图4 各种偏离与理想情况的群延迟之差

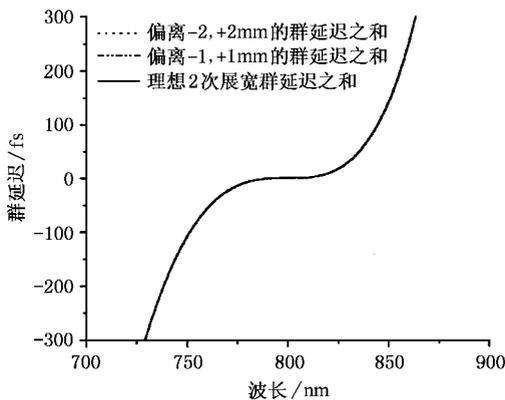


图5 偏离相同距离的群延迟之和

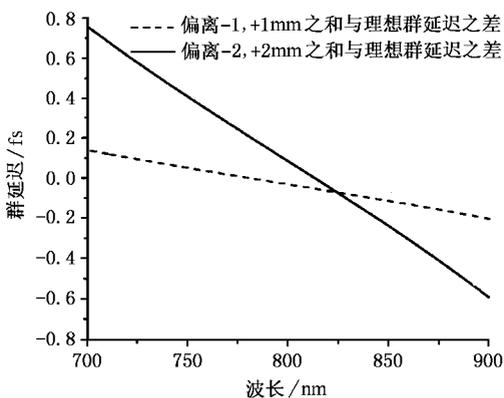


图6 光束反转后与2次展宽理想情况的群延迟之差

可以看出,理想光线与各平行离轴光线之间的群延迟差别极小,即便是在700和900nm处,群延迟差别也不到1fs,这个结果比图3 A所示的群延迟之差小得多.图5 6告诉我们,对于有一定宽度的入射光,为了更好地实现CPA系统中的色散补偿,可以将

展宽一次出射的光经过光束反转装置,使其在水平方向上反转,然后再次送入展宽器中.也就是说对于在第一次入射时平行离轴光线为正的(规定处在理想入射光线以上的为正)在第二次入射到展宽器以前将光束反转,使平行离轴入射光线为负.这样就可以使得因为偏离理想入射的光线而引起的带宽漂移在两次展宽中得到补偿.而且得到与理想光展宽系统模型两次展宽相比较几乎同样的群延迟.这个对于啁啾脉冲放大,尤其是飞秒量级的脉冲放大尤为重要.这也对于在以后的脉冲放大的计算中,以理想光代替有限宽度的光提供了理论基础.

实现光束反转,可以用Lemoff和Barty^[6]提出的反转装置.这种装置可以实现光束在水平方向的反转,使入射光的偏离宽度在两次进入展宽器时相对理想入射光的宽度符号相反,而绝对值相等,而中心的光束则是沿着原路返回.根据以上所计算的结果,它可以使各种偏离情况都得到很好的色散补偿,同时由于球面镜加工的不精细而引起角度的偏差在两

次展宽中也得到了抵消.

4. 结 论

通过对平行展宽模型系统的计算表明:对于 ps 量级的啁啾脉冲放大,可以用理想光展宽系统模型来代替实际光的展宽系统模型,而对于 fs 量级的啁啾脉冲放大,则必须考虑入射光宽度带来的误差.为了更好的色散补偿,我们提出在展宽器前加上反

转装置,就可以实现与理想光展宽一样的色散补偿,这样也为在修正后的展宽器系统中以理想光代替实际光提供了理论基础,为 CPA 系统中得到无啁啾的 ps, fs 放大脉冲提供了重要的依据.

飞秒激光脉冲应用前景广阔,有了一定宽度的实际光束的色散补偿技术,从而可以更好地利用啁啾脉冲放大技术,提高脉冲能量,缩短脉冲宽度,以开辟更多的应用.

[1] Yang H *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1292 (in Chinese) [杨 宏 等 2000 物理学报 **49** 1292]

[2] Cao D M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1202 (in Chinese) [曹东茂 等 2000 物理学报 **49** 1202]

[3] Zhang Z, Yagi T and Arisawa T 1997 *Appl. Opt.* **36** 3393

[4] Zhang Z G *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1080 (in Chinese) [张志刚等 2001 物理学报 **50** 1080]

[5] Martinez O E 1987 *IEEE J. Quan. Electron.* QE **23** 59

[6] Lemoff B E and J. Barty C P 1993 *Opt. Lett.* **18** 1651

Dispersion evaluation for Martinez stretcher with finite incident beam size *

Liu Yong-Jun^{1,2)} Chai Lu¹⁾ Wang Qing-Yue¹⁾ Zhang Zhi-Gang¹⁾

¹⁾ Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, University of Tianjin, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072, China)

²⁾ (Department of Applied Physics, University of Tianjin, Tianjin 300072, China)

(Received 3 October 2001 ; revised manuscript received 16 November 2001)

Abstract

We calculated the dispersion error in Matinez stretchers for finite incident beam size, and showed that this dispersion error can be compensated by inversed beam.

Keywords : femtosecond laser amplifier, stretcher, compressor, dispersion compensate

PACC : 4265K, 4280W

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60178007), the Natural Science Foundation of Tianjing (Grant No. 0201-413188), and the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. G1999075201-2).