

# Offner展宽器的矩阵光学分析与实验设计

郭晓杨<sup>1,2</sup> 冷雨欣<sup>1</sup> 许毅<sup>1</sup> 黎文开<sup>1,2</sup> 陆效明<sup>1</sup> 彭宇杰<sup>1</sup> 陆俊<sup>1,2</sup> 王乘<sup>1</sup> 李儒新<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 使用矩阵光学的方法得到了Offner展宽器等效光栅对表达式、经过Offner展宽器后脉冲的脉宽表达式及展宽器各元件尺寸的解析表达式。确定了一般化的设计步骤,并给出了一个设计实例。矩阵光学获得的解析结果与光线追迹方法获得的数值结果一致。

**关键词** 激光光学; 啁啾脉冲放大; Offner展宽器; 矩阵光学

中图分类号 O436; TN248 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0714001

## Matric Analysis and Experimental Design of Offner Stretcher

Guo Xiaoyang<sup>1,2</sup> Leng Yuxin<sup>1</sup> Xu Yi<sup>1</sup> Li Wenkai<sup>1,2</sup> Lu Xiaoming<sup>1</sup>

Peng Yujie<sup>1</sup> Lu Jun<sup>1,2</sup> Wang Cheng<sup>1</sup> Li Ruxin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Effective grating pair distance of Offner triplet stretcher is obtained by matric optics. Pulse duration after stretcher calculated formula and the elements' size analytic expressions are obtained. A generalized solution designing a practical Offner stretcher and an example are provided. The analytic results are in agreement with the ray tracing results.

**Key words** laser optics; chirped pulse amplification; Offner stretcher; matric optics

**OCIS codes** 140.7090; 140.3280; 080.1510

## 1 引言

啁啾脉冲放大技术(CPA)的出现使激光脉冲聚焦强度超过  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>成为可能<sup>[1]</sup>。在CPA技术中,将振荡器输出的种子脉冲在时域上进行高倍率展宽,降低其峰值功率,避免了在放大过程中对放大介质以及系统元器件的损坏,同时提高了脉冲对抽运能量的提取效率。放大后的脉冲再经过压缩器将脉宽复原,得到超短超强激光脉冲。因此对脉冲的展宽压缩是CPA的关键过程。

人们提出了多种类型的展宽压缩器,在高倍率展宽压缩系统中,最常用的是光栅展宽器和压缩器组合。光栅展宽器就是在两块反平行放置的光栅对之间放入了一个望远镜系统,从而改变了系统提供的色散,使得展宽器提供的正啁啾色散与压缩器提供的负啁啾色散相匹配。因此展宽器类型的不同,主要取决于展宽器中所采用的望远镜系统的不同。Offner展宽器中凸面镜和凹面镜的共心设计,使得系统无象

收稿日期: 2015-01-23; 收到修改稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61205208)

作者简介: 郭晓杨(1987—),男,博士研究生,主要从事非线性激光放大方面的研究。E-mail: guoxiaoyang@siom.ac.cn

导师简介: 李儒新(1969—),男,博士,研究员,主要从事强场激光物理科学与技术方面的研究。

E-mail: ruxinli@mail.shnc.ac.cn

\*通信联系人。E-mail: lengyuxin@siom.ac.cn

差<sup>[2]</sup>。因此该种展宽器在超短超强激光系统中得到广泛应用,文献[3]综述了国内外著名的超短超强激光系统所使用的 Offner 展宽器的情况。

Offner 展宽器的理论分析与实验设计对于工程设计者而言十分重要,在确定了展宽量的情况下,需要确定 Offner 展宽器各元件参数,满足展宽所需的色散。诸多文献[4-7]对 Offner 展宽器进行了详细地光线追迹描述,讨论了 Offner 展宽器的色散特性。文献[6-7]给出了在光线追迹模型下的各个元器件的尺寸公式,为 Offner 展宽器的设计优化提供了指导。但是光线追迹模型过于复杂,采用了太多的参变量,不利于工程设计。为方便展宽器的工程设计,文献[8]利用几何光学逐次成像的方法,忽略像差和色差,得到了 Offner 展宽器等效光栅对形式,从而得到了各级色散表达式。但是逐次成像方法仍然较为繁琐,且未给出 Offner 展宽器中各元件尺寸的解析公式。为了满足工程需要,本文使用矩阵光学的方法得到了等效光栅对表达式,物理过程直观,矩阵光学方法的模块化分析不易出错。得到了展宽器各元件尺寸的解析表达式(非光线追迹模型),公式简洁且与光线追迹计算的结果一致。确定了一般化的设计步骤,并给出了一个设计实例,可供科研工作者参考。

## 2 Offner 展宽器基本原理

### 2.1 Offner 展宽器基本结构

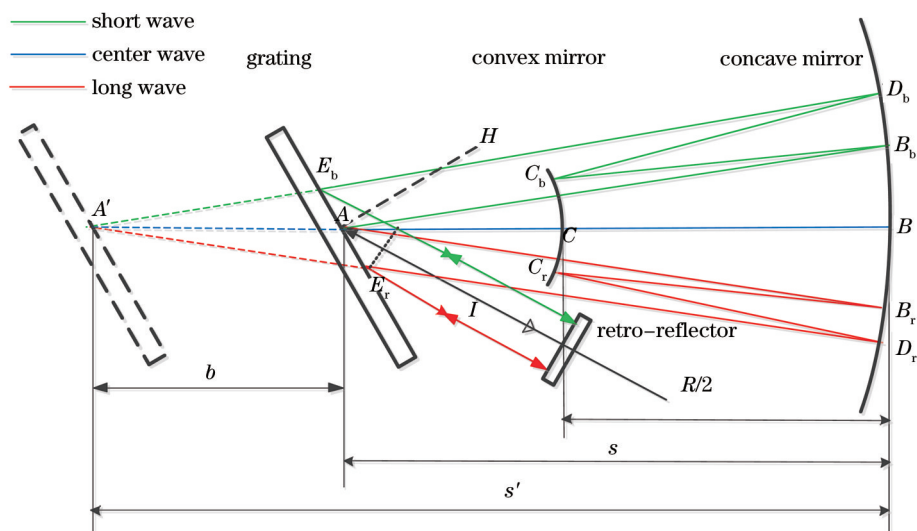


图 1 Offner 展宽器原理示意图(俯视图)

Fig.1 Sketch of the Offner stretcher (top view)

图 1 为典型的八通结构 Offner 展宽器示意图,包括光栅、凸面镜、屋脊反射镜、棱镜和凹面镜。凹面镜和凸面镜共心放置。凸面镜的曲率半径为凹面镜曲率半径( $R$ )的一半,且凸面镜位于凹面镜焦点位置( $R/2$ ),光栅放置在距离凹面镜  $s$  处 ( $R/2 < s < R$ , 下文将详述)。凹面镜和凸面镜组成一个望远系统,光栅经过这个光学系统后所成的像在距离凹面镜  $s'$  处。

结合实例说明光线在 Offner 展宽器中的传输过程,图 1 有三条光线。一条中心波长的光线(蓝色实线,并且作为光轴),两条边缘光线(绿色实线代表最短波长光线,红色实线代表最长波长光线)。宽带入射光线  $I$  以入射角  $\gamma$  入射在光栅  $A$  点,经光栅衍射后,短波长光线到达凹面镜的  $B_b$  点,凹面镜将光反射至凸面镜的  $C_b$  点,凸面镜再将光线反射至凹面镜的  $D_b$  点,最后凹面镜将光线反射至光栅的  $E_b$  点,中心波长及短波长光线传播路线已在图中画出。此时经过光栅衍射后,激光脉冲频率在空间上呈线性分布(空间啁啾),光斑呈水平直线并进入屋脊反射镜再折返至光栅及望远系统,出射后恢复入射光斑形状,空间啁啾被消除,此为四通结构(4 次通过光栅),一次展宽过程。为了进一步增加展宽量,在出射位置加一棱镜使之再进入展宽器,原光路再传输一次(在空间上与原光路略有偏离,否则脉冲无法导出),此为八通结构,两次展宽过程。图 2 是 Offner 展宽器的三维装置图,更生动形象地展示光路传输过程。

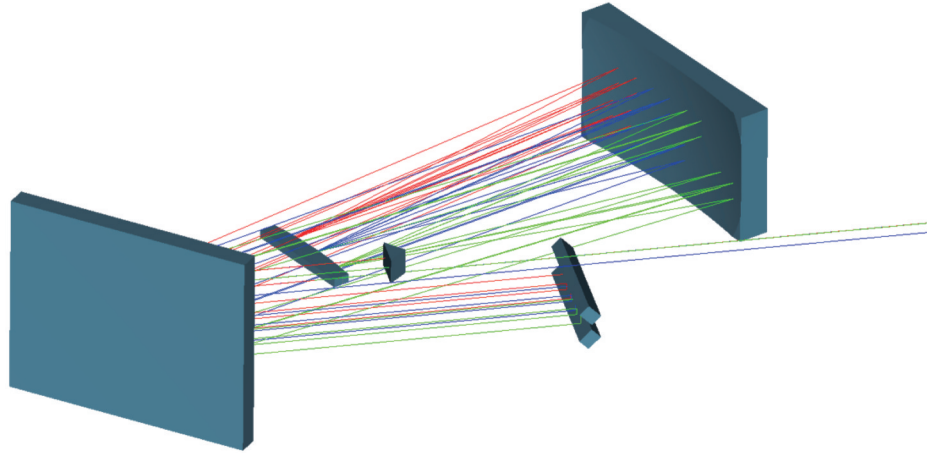


图2 Offner展宽器的三维装置示意图

Fig.2 Three-dimensional drawing of Offner stretcher

### 2.2 Offner展宽的等效光栅对计算

在超短超强激光系统中,色散的精确控制十分重要,要获得近傅里叶变换极限脉宽的脉冲,就必须利用压缩器或者附加可编程色散控制元件补偿系统中展宽器、材料及其他光学元件引入的色散。然而在实际的超短超强激光系统的设计中,首先应设计一个可使用且性能较好的展宽器满足放大过程中对展宽量的要求,至于色散的精确补偿,可以在压缩阶段进行精确的分析。文献[5]理论指出,利用等效光栅对得到的各阶色散相比于利用光线追迹得到的各阶色散,误差在2%以内,对于放大过程而言,这是一个可以接受的误差。由于等效光栅对分析展宽器色散特性要远远比光线追迹简单,因此等效光栅对的分析方法广泛应用于Offner展宽器的分析设计中。将Offner展宽器等效为光栅对,核心是获得等效光栅对斜距与Offner展宽器各元件参数的关系,下面利用矩阵光学的方法,分析这一过程。

结合图1,入射光以 $\gamma$ 角入射至光栅,经过凹面镜与凸面镜组成的望远系统回到光栅,传输矩阵 $M$ 可表示为

$$M = \begin{pmatrix} 1 & s' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{4}{R} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 2R-s-s' \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

从矩阵 $M$ 可以看出,Offner望远系统1:1成倒立像。另外,根据 $2R-s-s'=0$ ,可以得出 $s'=2R-s$ ,即像光栅位于距离凹面镜 $2R-s$ 处,则原光栅与像光栅的斜距为

$$b = 2R - s - s = 2(R - s). \quad (2)$$

### 2.3 展宽脉冲的脉宽

脉冲经过展宽器后,引入色散从而被展宽。将展宽器引入的色散曲线在中心波长处进行泰勒展开:

$$\varphi(\omega) = \varphi(\omega_0) + \varphi'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2!}\varphi^{(2)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{3!}\varphi^{(3)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^3 + \dots, \quad (3)$$

式中 $\omega_0$ 是中心频率, $\varphi'(\omega_0)$ 、 $\varphi^{(2)}(\omega_0)$ 等是相应的色散系数。确定中心频率(波长)处的色散系数 $[\varphi(\omega_0), \varphi'(\omega_0), \varphi^{(2)}(\omega_0), \dots]$ 后,就可以确定整条色散曲线。使用的色散系数阶数越高,则获得的色散曲线越精确。在不致混淆的情况下,色散、或者色散量均指泰勒展开式的各阶色散系数。在实际设计中,只需要考虑二阶及以上色散,这是由于在冲传输过程中,二阶及以上的色散才会对脉冲宽度产生影响。

光栅对引入的二阶至四阶色散表达式如下<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} \varphi^{(2)}(\omega_0) = \frac{b}{c} \frac{G^2}{\omega_0} \\ \varphi^{(3)}(\omega_0) = -\frac{3}{\omega_0} \varphi^{(2)}(\omega_0) (1 + G \tan \rho_0) \\ \varphi^{(4)}(\omega_0) = \frac{3}{\omega_0^2} \varphi^{(2)}(\omega_0) [4 + 8G \tan \rho_0 + G^2 (1 + 5 \tan^2 \rho_0)] \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sin \gamma + \sin \rho_0 = \frac{\lambda_0}{d} \\ b = 2(R - s) \\ G = \frac{\lambda_0}{d \cos \rho_0} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $\lambda_0$ 是中心波长, $c$ 是光在真空中的速度, $d$ 是光栅常数, $\rho_0$ 是中心波长衍射角, $b$ 、 $\gamma$ 、 $R$ 、 $s$ 与之前定义相同。以上公式得到的各阶色散是两次通过光栅的情况,一般情况下需4次通过光栅才能消除空间啁啾,完成一次展宽,此时得到的色散量应该乘以2,另外为进一步增加展宽量,往往加一个棱镜使之两次展宽,此时的色散量应乘以4。

脉冲经过展宽器后,引入了色散,脉冲在时域上被展宽。考虑(3)式,如果三阶色散的作用小于二阶色散,而且四阶色散的作用远远小于三阶色散,即

$$\left| \frac{\varphi^{(3)}}{\varphi^{(2)}} \right| \ll \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\Delta\nu}, \quad (6)$$

$$\left| \frac{\varphi^{(4)}}{\varphi^{(3)}} \right| \ll \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\Delta\nu}, \quad (7)$$

式中 $\Delta\nu$ 是脉冲的带宽。此时展宽后脉冲可以表达为

$$\Delta\tau = \varphi^{(2)} \Delta\omega, \quad (8)$$

或者

$$\Delta\tau = D \Delta\lambda, \quad (9)$$

$$D = \varphi^{(2)} \frac{2\pi c}{\lambda^2}, \quad (10)$$

其中, $\Delta\omega$ 和 $\Delta\lambda$ 分别是角频率和波长表示的光谱半峰全宽,一般把 $D$ 称为啁啾量。

#### 2.4 Offner展宽器各元件尺寸的确定

确定展宽器各个元件的尺寸具有非常重要的实际意义。由于元件的纵向尺寸较为容易确定,下面利用矩阵光学的方法推导横向尺寸的解析表达式。在不致混淆的情况下,下面的尺寸均指横向尺寸。

##### 1) 凸面镜的尺寸

类似于分析等效光栅对斜距的方法,从光栅中心至凸面镜 $C_b(C_r)$ 的传递矩阵为

$$\begin{pmatrix} 0 & \frac{R}{2} \\ -\frac{2}{R} & 1 - \frac{2s}{R} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

短波边缘光线在凸面镜的高度和角度为

$$\begin{pmatrix} h_b \\ \theta_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{R}{2} \\ -\frac{2}{R} & 1 - \frac{2s}{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \gamma - \rho_b \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$h_b = \frac{R}{2}(\gamma - \rho_b), \quad (13)$$

式中 $\rho_b$ 是最短波长光线的衍射角。

同理,长波边缘光线在凸面镜的高度和角度为

$$h_r = \frac{R}{2}(\gamma - \rho_r), \quad (14)$$

式中 $\rho_r$ 是最长波长光线的衍射角。

令长波边缘光线与短波边缘光线第一次经光栅衍射后的夹角为

$$\alpha = \rho_r - \rho_b. \quad (15)$$

那么为了满足边缘光线均能由凸面镜反射,所要求的凸面镜口径为

$$L_{\text{vex}} = \frac{R}{2}\alpha, \quad (16)$$

式中  $\alpha$  是最短波长和最长波长经光栅衍射后的夹角。

利用类似确定凸面镜尺寸的方法,可以确定出凹面镜、光栅及屋脊反射镜的尺寸。

2) 凹面镜的尺寸

$$L_{\text{cav}} = (2R - s)\alpha. \quad (17)$$

3) 光栅的尺寸

$$L_{\text{grate}} = 2(R - s)\frac{\alpha}{\cos \rho_0}. \quad (18)$$

4) 屋脊反射镜的尺寸

$$L_{\text{retro}} = L_{\text{grate}} \cos \gamma. \quad (19)$$

### 3 Offner展宽器一般设计步骤

第2节已详细给出展宽器色散量及各元件尺寸的计算公式,下面讨论在已知超短超强激光系统的中心波长、带宽以及展宽后脉冲脉宽的条件下,如何利用这些公式来设计一个展宽器。

1) 根据展宽量,即带宽和需要展宽的脉冲宽度,利用(9)式确定啁啾率  $D$ 。

2) 根据啁啾率  $D$  和中心波长,利用(10)式确定需要的二阶色散  $\varphi^{(2)}$ 。

3) 根据中心波长,选择光栅刻线 ( $g$ , line/mm)。光栅刻线可选择的余地较小,商品化光栅的刻线主要有 600/1200/1480/1740 line/mm 几种,如果中心波长为 800 nm,一般采用 1200 line/mm 或者 1480 line/mm,如果中心波长为 1053 nm,一般采用 1480 line/mm 或者 1740 line/mm)。

4) 根据中心波长及光栅刻线,利用下式确定 Littrow 角度

$$2 \sin \theta_L = \frac{\lambda}{d}. \quad (20)$$

5) 以  $\gamma$  和  $b$  为变量,得出二阶色散  $\varphi^{(2)}$ 。在 Littrow 角附近,得出一组满足展宽所需二阶色散  $\varphi^{(2)}$  的  $\gamma$  和  $b$  的试探值。另外应注意展宽器是四通结构还是四通结构,两者之间的色散量相差一倍。

6) 确定  $\gamma$  和  $b$  的试探值后,确定  $R$  和  $s$ ,  $R$  尽量大一些,  $s$  尽量接近  $R$  以满足无像差条件。

7) 利用(16)~(19)式确定各个元件的尺寸,此时需要注意各个元器件之间是否挡光。

下面以文献[10]的系统为例,阐述分析过程。

已知条件:系统中心波长为 1053 nm,带宽为 6.5 nm,边缘波长为 [1043.5 nm, 1062.5 nm], Offner 展宽器为四通结构,展宽后脉冲宽度为 3.2 ns。

设计过程:根据展宽脉冲宽度和带宽,得出啁啾量  $D$  为 523 ps/nm,需要的二阶色散  $\varphi^{(2)}$  为  $2.9 \times 10^8 \text{ fs}^2$ 。选取光栅刻线  $g$  为 1740 line/mm,则 Littrow 角  $66.3^\circ$ 。以  $\gamma$  和  $b$  为变量,得出二阶色散  $\varphi^{(2)}$ ,如图 3 所示,红线是 Littrow 角的位置,白线是满足二阶色散  $\varphi^{(2)}$  为  $2.9 \times 10^8 \text{ fs}^2$  的  $\gamma$  和  $b$ ,试探选取  $\gamma$  为  $70^\circ$ ,  $b=235.6 \text{ cm}$ ,试探选取  $R=340 \text{ cm}$ ,  $s=222.2 \text{ cm}$ 。最后再利用(16)~(19)式得出各个元件的尺寸。

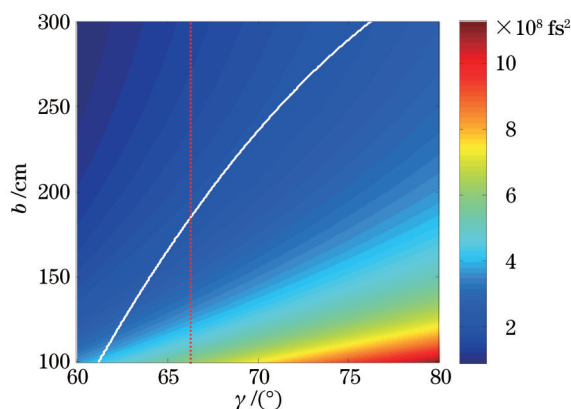


图 3 二阶色散  $\varphi^{(2)}$  与  $\gamma$  与  $b$  的关系图

Fig.3 Relationship between  $\varphi^{(2)}$  and  $\gamma$  and  $b$



表 1 显示了相应参数,与文献[10]光线追迹方法获得的结果一致。

表 1 Offner 展宽器相关参数

Table 1 Relative parameters of Offner stretcher

Pulse	Value	Stretcher	Value	Length	Value	Dispersion	Value
$\lambda_0$ /nm	1053	$g$ , /line/mm	1740	$L_{\text{grate}}$ /mm	385.6	$C$ /ps/nm	523
$\Delta\lambda$ /nm	6.5	$R$ /m	3.4	$L_{\text{cave}}$ /mm	338	$\varphi^{(2)}$ / $10^8\text{fs}^2$	2.9
$\Delta\nu$ /THz	1.76	$s$ /m	2.2222	$L_{\text{vex}}$ /mm	125.5	$\varphi^{(3)}$ / $10^9\text{fs}^3$	-4.4
$\Delta\tau$ /ns	3.2	$\gamma$ /( $^\circ$ )	70	$L_{\text{retro}}$ /mm	131.9	$\varphi^{(4)}$ / $10^{11}\text{fs}^4$	1.1

## 4 结 论

Offner展宽器在超短超强激光系统中得到广泛应用。使用矩阵光学的方法推导出 Offner展宽器等效光栅对表达式,物理过程直观,矩阵光学方法的模块化分析不易出错。得到了 Offner展宽器各元件尺寸的解析表达式,公式简洁实用,为搭建 Offner展宽器提供了理论指导。

## 参 考 文 献

- 1 Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Opt Commun, 1985, 56(3): 219-221.
- 2 Cheriaux G, Rousseau P, Salin F, *et al.*. Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification[J]. Opt Lett, 1996, 21(6): 414-416.
- 3 Yang Qiangwei, Guo Ailin, Xie Xinglong, *et al.*. Stretcher system in high-energy petawatt laser facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(7): 66-71.  
杨庆伟, 郭爱林, 谢兴龙, 等. 高能拍瓦激光装置中的展宽系统[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(7): 66-71.
- 4 Jiang Jie, Zhang Zhigang, Hasama Toshifumi. Evaluation of chirped-pulse-amplification systems with Offner triplet telescope stretchers[J]. J Opt Soc Am B, 2002, 19(4): 678-683.
- 5 Tian Jinrong, Sun Jinghua, Wei Zhiyi, *et al.*. Theoretical and experimental studies on large-ratio stretching of femtosecond pulse with Offner triplet stretcher[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(3): 1200-1207.  
田金荣, 孙敬华, 魏志义, 等. Offner展宽器高倍率展宽脉冲的理论及实验研究[J]. 物理学报, 2005, 54(3): 1200-1207.
- 6 Xiong Hongjun, Zhao Wei, Chen Guofu. The principle and optimized design of a stretcher in OPCPA system[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(12): 1441-1444.  
熊红军, 赵 卫, 陈国夫. 用于 OPCPA 展宽器的原理和优化设计[J]. 光子学报, 2004, 33(12): 1441-1444.
- 7 Yang Qingwei, Guo Ailin, Xie Xinglong, *et al.*. Effects of asymmetric spectral clipping in the stretcher on the output pulse contrast[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 1970-1974.  
杨庆伟, 郭爱林, 谢兴龙, 等. 展宽器中非对称光谱剪切对输出脉冲对比度的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1970-1974.
- 8 Zhang Xiangdong, Xu Zhizhan, Wang Xiaofang. Analysis of group velocity dispersion of typical stretchers by means of geometric optics[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(2): 127-130.  
张向东, 徐至展, 王晓方. 展宽器群速度色散的几何光学方法分析[J]. 中国激光, 2002, 29(2): 127-130.
- 9 Wang Cheng, Leng Yuxin. Double grating expanders for fourth-order dispersion compensation in chirped pulse amplifiers[J]. Chinese Physics Letter, 2013, 30(4): 044208.
- 10 Yang Qingwei. Research on the Stretcher and the Related Technique of the High Energy Petawatt Laser System[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 36-45.  
杨庆伟. 高能拍瓦激光展宽系统及其相关技术的研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008: 36-45.

栏目编辑: 史 敏