

文章编号: 0253-2239(2007)01-0181-6

# 适用于亚 10 fs 的共心衍射无像差展宽器

胡婉约 王二玉 李文雪 丁良恩

(华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 在升级 5 TW/40 fs 钛宝石激光系统的过程中, 伴随 10 fs 种子源的使用, 提出并研制了一种新型的共心衍射无像差展宽器和全能量压缩器。该展宽器的最大特点是通过平面镜反射使光束入射时所形成的衍射点与展宽后的还原点均在凹面镜的球心(即共心结构), 凹面镜不存在其它同类方法中的成像问题, 展宽函数中不涉及凹面镜的焦距和离轴量。该展宽器可将亚 10 fs 的种子脉冲展宽到纳秒量级, 且具有无像差、高带宽、结构紧凑、调整精度高等优点, 适合 100 TW 级超快激光系统中脉冲展宽。

**关键词:** 超快光学; 啁啾脉冲放大(CPA); 展宽器; 共心衍射; 压缩器; 色散补偿

中图分类号: TN242 文献标识码: A

## Aberration-Free Stretcher Based on Concentric Diffraction for Sub-10fs Pulses

Hu Wanyue Wang Eryu Li Wenxue Ding Liang'en

(Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Ministry of Education of China,  
East China Normal University, Shanghai 200063)

**Abstract:** In the process of updating 5 TW/40 fs table-top Ti: sapphire laser system, a 10 fs pulse source is introduced, and a new type aberration-free pulse stretcher and compressor is proposed and designed. Compared with other stretchers, the specialty of the proposed one is that the diffraction point of input pulses and reverting point of stretched pulses coincide in the centre of the concave mirror, i. e. concentric structure. Imaging problems related to other methods don't appear in the concave mirror, and the focal length and adaxial approximation of the concave mirror are not involved in the stretching function. This stretcher system, aberration-free, compact, easy to adjust precisely, provides broad bandwidth, permits the stretching of sub-10 fs seed pulse to nanosecond level, and is suitable for 100 TW ultrafast laser system.

**Key words:** ultrafast optics; chirped pulse amplification(CPA); stretcher; concentric diffraction; compressor; dispersion compensation

## 1 引 言

啁啾脉冲放大(Chirped pulse amplification, CPA)技术<sup>[1]</sup>是产生大能量超短脉冲的重要手段。其主要思想就是先将超短光脉冲在放大之前进行时域上的展宽, 然后经增益介质使其能量放大, 最后用与展宽器色散特性相反的元件将脉冲压缩。啁啾脉冲放大技术在展宽过程中降低了脉冲的峰值功率, 从而在放大过程中避免出现增益饱和效应、非线性效应以及对系统元件的损伤。当前, 在各种放大介

质中, 掺钛蓝宝石(Ti: sapphire)由于具有宽的增益带宽、良好的热性能而得到广泛应用。Barty 等<sup>[2]</sup>运用 Franz-Nodvic 分析法计算得出: 为了达到 57% 的放大抽取效率理论极限, 抽运光的能流密度需在  $2 \text{ J/cm}^2$  以上。而掺钛蓝宝石的损伤阈值约为  $5 \text{ GW/cm}^2$ 。显然, 为了保证系统安全且获得最高的抽取效率, 激光脉冲在进入放大器之前必须至少展宽到 400 ps。

目前国际上较为典型的展宽器有: 传统的 4f

作者简介: 胡婉约(1981—), 女, 浙江人, 硕士研究生, 主要从事超快强激光技术的研究。E-mail: huwanyue@sohu.com

导师简介: 丁良恩(1949—), 男, 上海人, 教授、博士生导师, 主要从事超快强激光技术和量子信息光学的研究。

E-mail: leding@phy.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2006-02-14; 收到修改稿日期: 2006-11-08

系统(包括改进后的 Martinez 型<sup>[3]</sup>),增强像差展宽器(Barty 型)<sup>[4]</sup>和无像差展宽器(Offner 型)<sup>[5]</sup>。三者最大的差别表现在对像差的控制上。通常认为像差是高阶色散的来源,它的存在可以平衡放大器中的材料色散。不同的放大系统引入不同大小的色散量,需要选择合适的展宽器来补偿该色散。因此设计一个有效的展宽-压缩系统,首先要根据种子光脉冲的光谱和时间特性以及具体的放大器,确定展宽器所需展宽的倍数、最小带宽和色散补偿能力。

在 5 TW/40 fs 钛宝石激光系统中,其展宽器为 Martinez 型结构。由于引入了包含球面镜的非共心结构,有较大的像差和色差,光斑会发生畸变。该种展宽器展宽比小、带宽窄,限制了下一步放大链中抽运光的抽取效率。实验发现该展宽器的通频带宽极限在 70 nm 左右,不适合 10 fs 以下超短种子脉冲的展宽。

在升级 5 TW/40 fs 钛宝石激光系统<sup>[6]</sup>的过程中,伴随 10 fs 种子源的使用,提出并研制了一种新型的共心衍射无像差展宽器和全能量压缩器。并对放大过程中所引入的附加色散进行了理论分析,提出用可编程声光色散滤波器(Acousto-optic programmable dispersive filter, AOPDF)<sup>[7]</sup>等对其中的残留色散进行补偿。

## 2 新型共心全反射式展宽器

### 2.1 基本原理

目前,啁啾脉冲放大系统中的压缩器一般采用 Treacy 型光栅对或单光栅结构。平行放置的光栅对光脉冲进行负色散压缩。为了与压缩器配套,使脉冲能成功压缩,展宽器引入的色散必须是正色散。我们设计的展宽器原理图如图 1 所示。光栅 1 位于球面镜的曲率中心上,在光栅 1 和凹面镜之间引入与光栅 1 相平行的光栅 2,从凹面镜反射回的光在光栅

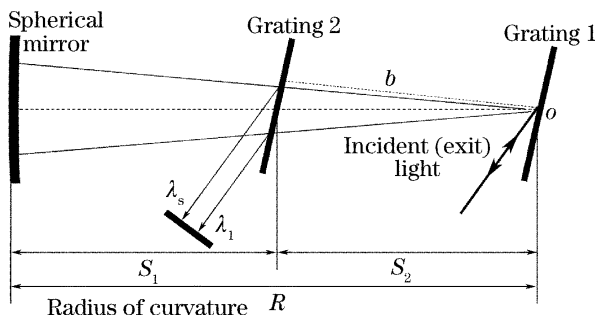


图 1 共心全反射式展宽器原理图

Fig. 1 Principle diagram of concentric total reflection stretcher

2 上再次产生衍射,衍射光方向沿着平行于入射光的方向。由于各不同频谱成分在光栅 2 上的空间位置不同,其中的长波部分将早于短波部分射出,从而产生色散展开,其色散符号刚好与压缩器的相反,构成一个光脉冲展宽器。其色散的大小随着光栅 2 与凹面镜之间距离  $S_1$  的改变而改变,距离越近,色散量越大。

由于各频谱成分在空间上的分布,光栅 2 处的衍射光具有空间啁啾,不仅严重影响光斑质量,而且影响光脉冲进一步的放大压缩。为了消除空间啁啾及提高展宽倍数,我们增加了一个脊型爬高爬低架,让激光爬低后原路返回进行二次展宽。

在整个展宽过程中,两个光栅之间必须保持严格的平行,否则将引起严重的空间啁啾和光斑畸变。所谓的严格平行不仅指两光栅表面的严格平行,还包括两光栅上各刻槽的严格平行,在实际的操作过程中非常难以实现。为了避免这种局面,同时降低成本,我们提出了共心结构的单光栅对展宽器,具体装置如图 2 所示。与图 1 不同之处在于,光脉冲经一个高反镜  $M_1$  入射到光栅  $G$  的右上侧进行频谱展开之后,采用两个相互平行的平面高反镜  $M_2$  和  $M_3$  将光线入射点处的光栅等效在大凹面镜  $M_5$  的球心,这样就用一个光栅代替了原来的光栅对而实现了同样的展宽效果。种子脉冲在展宽器中各元件上的光斑如图 3 所示。由图 3 可知,激光脉冲在共心结构的单光栅对展宽器内传输过程中,在凹面镜上的反射次数为 2 次,光栅上的衍射次数为 4 次。而其他同类型的展宽器如 Offner 型展宽器和 Martinez 型展宽器等,激光脉冲在球面镜上的反射次数为 4 次,光栅上的衍射次数为 4 次。由于球面镜和光栅表面镀金,它们的反射、衍射率都相对较低,一般只有 90% 左右。因此,共心结构的单光栅对展宽器有效地减少了脉冲在传输过程中的损耗,提高了能量转换效率,理论上可达 55% 以上。

以上设计是针对理想光束而言。实际光束总有一定宽度,这样的光束通过凹面镜时会先聚集然后发散。为了保持光束的收敛性,我们用一个望远镜系统代替单一的球面镜。将展宽器中的入射镜  $M_1$  改为一个小凹面镜,先将具有一定宽度的光线会聚在焦点后再发散,其焦点和大凹面镜的焦点刚好重合。这样,从大凹面镜出射的光线将又恢复到平行光,经光栅两次展宽后光线再次回到小凹面镜上以平行光离开展宽器。

需要特别指出的是,由于布局原因该展宽器在

安装过程中需要有适当的光路倾斜以保证光线的正常传播。光线的倾斜角应尽量小,保持在  $5^\circ$  以内,

防止引起强烈的像差和光斑畸变。

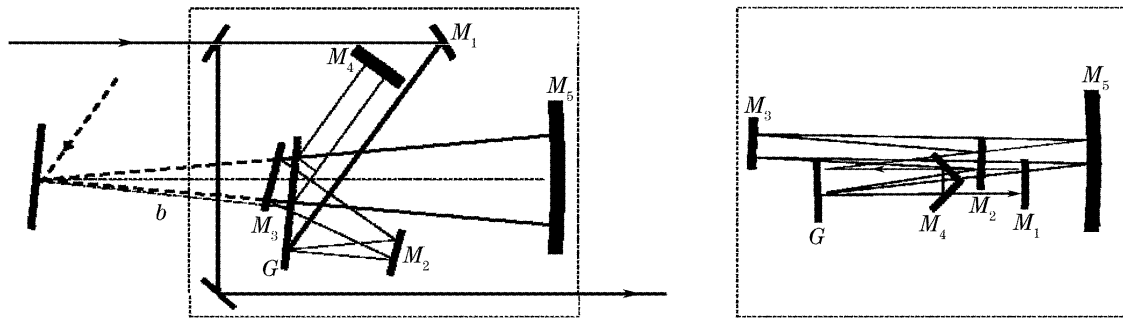


图 2 单光栅展宽器装置图。(a)为俯视图,(b)侧视图

Fig. 2 Schematic of the single-grating stretcher. (a) Top view, (b) side view

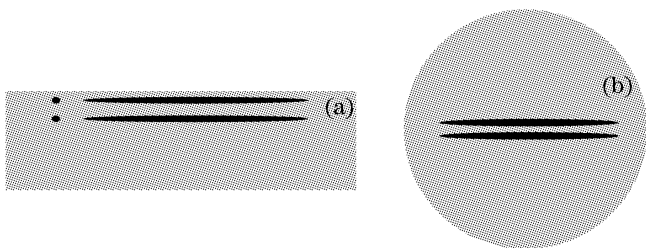


图 3 种子脉冲在展宽器中各元件上的光斑示意图。

(a)光栅光斑图形,(b)球面镜光斑图形

Fig. 3 Stretched beam pattern in the different components

(a) Grating G, (b) concave mirror  $M_5$

在展宽器的设计过程中,通频带宽是一个重要的参量。为了对中心波长 800 nm、亚 10 fs 的脉冲成功进行展宽,不产生任何的光谱变窄效应,要求展宽器的通频带宽必须在 150 nm 以上,主要由其中各部分光学元件的口径大小和介质高反膜的带宽所决定。我们选用的光栅为 Richardson 公司生产的 1200 line/mm 镀金闪耀光栅(型号 1570),其闪耀波长为 600 nm,闪耀角为  $21.1^\circ$ 。光栅上的入射角,原则上应该取入射激光的利特罗角,以防止发生光斑畸变。但是为了保证光栅衍射效率和展宽器带宽,应取偏离中心波长、较长波长处的利特罗角。当取入射角为  $59.7^\circ$  时,单次衍射效率在 91% 以上。为了获得纳秒级的展宽脉冲,相应的各镜片最小口径如表 1 所示。

表 1 实验设计中各光学镜片的最小口径

Table 1 Least aperture size design of the optical components in the stretcher system

Components	G	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$
Aperture /mm	220	50	50	100	97.2	192.6

该新型共心全反射式展宽器的最大特点是通过平面镜反射使光束入射时所形成的衍射点与展宽后的还原点均在凹面镜的球心(即所谓的共心结构),凹面镜不存在其他同类方法中的成像问题,展宽函

数中不需要涉及凹面镜的焦距和离轴量;并且运用平面镜将双光栅等效为单光栅结构。

## 2.2 展宽函数

不同波长之间的延时量决定于它们在展宽器中的相移。假设中心波长处的衍射光方向总是处于球面镜的轴线上,取光栅 2 与轴线交点垂直于衍射光的平面作为参考平面。采用光线追迹法得出波长为  $\lambda$  的光线经过一次展宽的光程  $P(\lambda)$  为

$$P(\lambda) = 2R - \frac{b}{\cos \theta} + b(\tan \theta_0 - \tan \theta) \sin \gamma, \quad (1)$$

其中  $R$  为球面镜的曲率半径,  $\gamma$  为光栅的入射角,  $\theta$  为衍射角,  $\theta_0$  为中心波长处的衍射角,  $b = (R - S_1)[1 - (\lambda_0/d - \sin \gamma)^2]^{1/2}$  为光栅对之间的垂直距离。则由该光程引起的相移为

$$\phi(\lambda) = \frac{4\pi P(\lambda)}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ 2R - \frac{b}{\cos \theta} + b(\tan \theta_0 - \tan \theta) \sin \gamma \right], \quad (2)$$

由此推出基于该相移产生的各阶色散量为

$$\begin{cases} \phi_2 = \frac{\lambda^3 b}{\pi c^2 d^2 \cos^3 \theta}, \\ \phi_3 = -\phi_2 \frac{3\lambda}{\pi c} \left( 1 + \frac{\lambda \sin \theta}{d \cos^2 \theta} \right), \\ \phi_4 = \phi_2 \frac{3\lambda^2}{4\pi^2 c^2} \left\{ 4 + 3 \frac{\lambda}{d} \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} + \frac{\lambda^2}{d^2} [1 + \tan^2 \theta (6 + \tan^2 \theta)] \right\}, \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\phi_2$  为群速度色散,对脉冲宽度起主要作用; $\phi_3$ 、 $\phi_4$  分别为三阶色散和四阶色散,它们的存在将引起脉冲的失真和畸变,决定着脉冲的保真度。通过模型分析我们知道,该新型共心全反射式展宽器没有类似 Offner 型展宽器等的离轴问题<sup>[8]</sup>,因此不存在近轴近似,不同波长处的色散结果一致。

初始脉冲宽度为  $\tau_0$ 、初始啁啾为  $c$  的飞秒高斯

脉冲激光经过共心全反射式展宽器展宽后的脉冲宽度  $\tau$  为

$$\tau = \tau_0 [(1 + c\phi_2/\tau_0^2)^2 + (\phi_2/\tau_0^2)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

该共心全反射式展宽器的可调参量为:光栅与凹面镜之间的距离  $S_1$ ,入射角  $\gamma$ ,和光栅常量  $d$ 。一般市面上只有几种固定规格的光栅,并且在一个具体的展宽器系统中,一旦某个光栅确定之后一般不随意更换,所以光栅常量不可以任意连续改变。而入射角  $\gamma$  的选择,如前所述,我们取为  $59.7^\circ$ 。因此本展宽器真正可调参量为:光栅与凹面镜之间的距离  $S_1$ 。

为了明确各阶色散以及相关参量对脉冲展宽量的影响,我们对种子脉冲在展宽器中受各参量的影响进行了理论计算。图 4 为中心波长处各阶色散量随光栅与凹面镜之间的距离  $S_1$  的变化。由图可知,展宽器的各阶色散与光栅与凹面镜之间的距离  $S_1$  成线性反比关系,随着  $S_1$  增大而减小。当光栅位于凹面镜的球心时,各阶色散为零,此时没有展宽效果。图 5 为计算种子脉冲展宽后脉冲宽度  $\tau_{\text{out}}$ 、展宽比  $\tau_{\text{out}}/\tau_0$  与光栅与凹面镜之间的距离  $S_1$ 、初始啁啾  $c$  的关系。由图可知,该展宽器的展宽比最高可达 110000,可将初始脉宽为 10 fs 的种子脉冲展宽到 1.1 ns。但是,这种情况只有  $S_1$  接近零时才可以达到,实现起来是不现实的,因此实际的最大展宽比可能会比 110000 略低一点。而且,我们注意到,初始啁啾对展宽效果的影响非常明显,种子脉冲拥有适当的正初始啁啾有利于进行脉冲展宽。对初始啁啾为 1.1 的 10 fs 种子脉冲只需将光栅与凹面镜之间的距离设置为 317 mm 即可展宽到 500 ps,若将无初始啁啾的 10 fs 种子脉冲展宽到 500 ps 则需将光栅与凹面镜之间的距离设置为 540 mm。但是,必须意识到

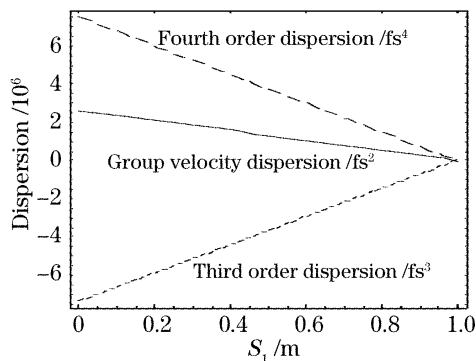


图 4 中心波长处各阶色散随距离  $S_1$  的变化 ( $\theta = 59.7^\circ$ ,  $\tau_0 = 10$  fs,  $d = 1/1200$  line/mm)

Fig. 4 Dispersion as a function of the distance between grating and concave mirror ( $\theta = 59.7^\circ$ ,  $\tau_0 = 10$  fs,  $d = 1/1200$  line/mm)

种子光初始啁啾的存在是由于振荡源中的高阶色散未补偿完全所造成的,其本身是一种负面效应。虽然它有利于脉冲展宽,但是它的存在将导致展宽后的脉冲难以压缩回傅里叶极限状态。我们应尽量优化振荡源以获得品质最优良的种子光。

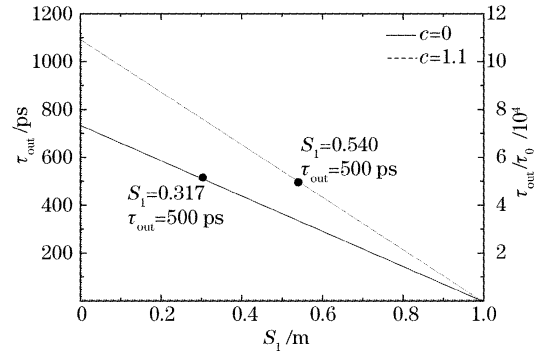


图 5 展宽后脉冲宽度  $\tau_{\text{out}}$ 、展宽比  $\tau_{\text{out}}/\tau_0$  与光栅距凹面镜之间的距离  $S_1$  的关系 ( $\theta = 59.7^\circ$ ,  $\tau_0 = 10$  fs,  $d = 1/1200$  line/mm)

Fig. 5 Stretched pulse width  $\tau_{\text{out}}$  and stretching ratio  $\tau_{\text{out}}/\tau_0$  as a function of the distance between grating and concave mirror ( $\theta = 59.7^\circ$ ,  $\tau_0 = 10$  fs,  $d = 1/1200$  line/mm)

### 2.3 实验结果

运用该新型共心全反射式展宽器,我们对中心波长是 800 nm、初始啁啾为 1.1、脉宽为 10 fs、谱宽为 100 nm 的种子脉冲进行展宽。光栅  $G$  与凹面镜  $M_5$  之间的距离  $S_1$  设为 580 mm,光栅上的入射角取为  $59.7^\circ$ ,理论计算得出 10 fs 的飞秒脉冲将展宽到 476 ps。各光学元器件实际参量如下所示:光栅  $G$  为 1200 line/mm,大小为  $220$  mm  $\times$   $110$  mm  $\times$   $30$  mm,衍射效率大于 91.53%,镀金;凹面镜  $M_5$  的口径为 300 mm,曲率半径  $R$  为 1000 mm,厚 43.3 mm,镀金;小凹面镜  $M_1$  的口径为 50 mm,曲率半径  $R$  为 2000 mm,镀 800 nm 高反膜;各平面高反镜的大小分别是: $M_2$  为  $50$  mm  $\times$   $50$  mm  $\times$   $15$  mm,  $M_3$  为  $100$  mm  $\times$   $25$  mm  $\times$   $15$  mm,  $M_4$  为  $150$  mm  $\times$   $50$  mm  $\times$   $15$  mm,镀 800 nm 高反膜,反射率大于 99.69%。所有的光学支架均自行研制。

实验结果发现,该展宽器的能量转换效率高达 66.7%,而国际上同类展宽器能量转换效率只有 40% ~ 50%。

我们采用一个自行设计的高能量真空压缩器来对展宽放大后的脉冲进行压缩,具体结构见图 6。

采用可适用于 800 nm 的高速硅光电二极管 (Hamamatsu S7911) 对展宽后的脉冲进行探测,其信号接入高速宽带取样示波器 (Agilent 54833A

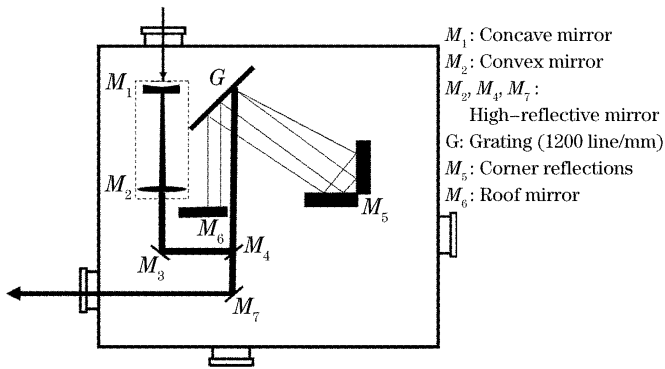


图 6 高能真空压缩器结构图

Fig. 6 Schematic of the high-intensity vacuum compressor

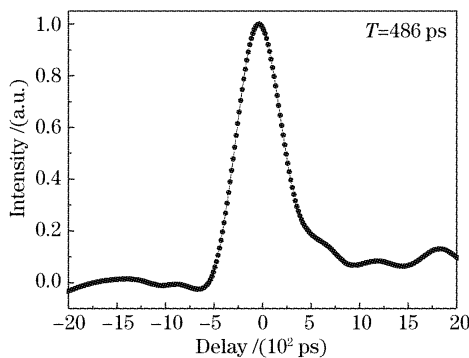


图 7 测量获得的展宽脉冲时间波形

Fig. 7 Measured temporal profile of the stretched pulse (DSO) 进行分析,测量得到的脉冲波形如图 7 所示。由图可知,展宽后的脉冲宽度为 486 ps,与理论计算结果 476 ps 相比,误差为 2.1%。我们认为该误差主要是因为探测器和示波器的响应速度没有足够快而造成。其色散公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_2 = -\frac{\lambda^3 b}{\pi c^2 d^2 \cos^3 \theta}, \\ \phi_3 = -\phi_2 \frac{3\lambda}{\pi c} \left(1 + \frac{\lambda \sin \theta}{d \cos^2 \theta}\right), \\ \phi_4 = \phi_2 \frac{3\lambda^2}{4\pi^2 c^2} \left\{4 + 3 \frac{\lambda}{d} \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} + \frac{\lambda^2}{d^2} [1 + \tan^2 \theta (6 + \tan^2 \theta)]\right\}, \end{array} \right. \quad (5)$$

对照我们设计的展宽器和压缩器的各阶色散函数公式(3),发现它们除了符号上的相异,各部分完全一致。在理想情况下,只要展宽器和压缩器的各参量一致,各阶色散可以完全匹配,光脉冲就可以顺利压缩回原始状态。而在放大过程中各色散元件引入的各阶附加色散是导致展宽-压缩系统色散失调的关键。虽然可以通过改变展宽器和压缩器的入射角和光栅间距来获得二阶色散的完全补偿,但是仍存在残留的三阶、四阶色散等高阶色散。

我们用 Positive light 公司生产的自相关仪对压缩脉冲进行脉宽测量。为了保证自相关仪工作在

安全阈值下,用一个分束片将压缩后的脉冲分一小部分能量注入到自相关仪中,自相关曲线如图 8(a)所示,测得的脉宽为 34 fs。对比入射的 10 fs 种子脉冲,显然该结果不是很理想,我们认为是残留的高阶色散造成的。

为了彻底消除残留的高阶色散。我们引进了由法国 Fastlits 公司生产一套可编程声光色散滤波器(AOPDF)。通过对各阶色散的调谐,最终成功地获得了脉宽为 20 fs 的输出脉冲,接近傅里叶变换极限,如图 8(b)所示。

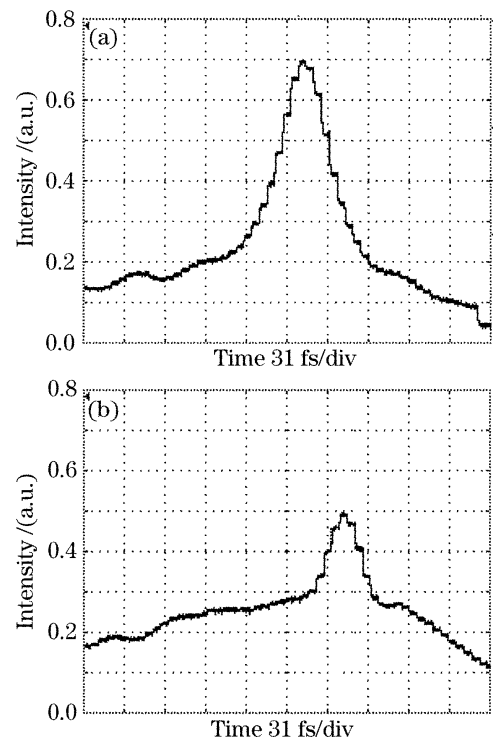


图 8 自相关仪自相关曲线。(a)使用 AOPDF 前, (b)使用 AOPDF 后

Fig. 8 Autocorrelation trace of the compressor.

(a) Without AOPDF, (b) with AOPDF

### 3 结 论

在升级 5 TW/40 fs 钛宝石激光系统的过程中,伴随 10 fs 种子源的使用,提出并研制了一种新型的共心衍射无像差展宽器和全能量压缩器。该展宽器具有无像差、宽频带、大展宽比、结构紧凑、调整精度高等优点,可以应用于 100 TW 超快强激光系统中。

致谢 真诚感谢中国科学院徐至展院士对本项目的悉心指导和中国科学院上海精密机械研究所冷雨欣博士等给予的多方面帮助。

### 参 考 文 献

1 Donna Strickland, Gerard Mourou. Compression of amplified

- chirped optical pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 C. P. J. Barty, C. L. Gordon III, B. E. Lemoff *et al.*. Methods for generation of 10-Hz, 100-TW optical pulses[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2377**: 311~322
- 3 Liang Min, Li Wenxue, Ding Liang'en *et al.*. Studies on 5 TW/40 fs table-top Ti: sapphire laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 81~85 (in Chinese)  
梁 敏,李文雪,丁良恩等. 5 TW/40 fs 台式钛宝石激光系统研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 81~85
- 4 Pierre Tournois. Acoustic-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **140**: 245~249
- 5 Oscar Eduardo Martinez. 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: application to fiber compensation in 1.3~1.6  $\mu\text{m}$  region [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(1): 59~64
- 6 B. E. Lemoff, C. P. J. Barty. Quintic-phase-limited, spatially uniform expansion and recompression of ultrashort optical pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(19): 1651~1653
- 7 G. Cheriaux, P. Rousseau, F. Salin *et al.*. Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6): 414~416
- 8 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 (in Chinese)  
田金荣,孙敬华,魏志义等. Offner 展宽器高倍率展宽脉冲的理论 and 实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(3): 1200~1207