

文章编号: 0253-2239(2006)12-1887-5

可编程声光色散滤波器在 10 Hz 飞秒再生放大系统中的应用

王二玉 胡婉约 李文雪 丁良恩

(华东师范大学物理系 光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

摘要: 报道了在 10 Hz 飞秒再生放大超快激光系统中, 运用可编程声光色散滤波器(AOPDF)对注入再生放大的种子光进行频谱整形和色散预补偿, 使钛宝石激光系统输出光脉冲谱线半峰全宽由原来的 38 nm 展宽到 66 nm, 压缩后输出脉冲宽度从 35 fs 减小到 20 fs。实验结果表明, 利用可编程声光色散滤波器能够同时独立进行光谱整形和大范围内色散补偿的特性, 可以有效抑制啁啾脉冲放大过程中存在的谱线增益窄化效应, 补偿钛宝石激光系统中存在的残留色散。这为进一步研制小于 20 fs, 10 TW 量级钛宝石激光系统奠定了基础。

关键词: 超快光学; 光谱整形; 可编程声光色散滤波器; 增益窄化; 色散补偿

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Application of Acoustic-Optic Programmable Dispersive Filter in 10 Hz Femtosecond Regenerative Amplifier System

Wang Eryu Hu Wanyue Li Wenxue Ding Liangen

(Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Ministry of Education, Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract: The spectrum width is expanded from 38 nm to 66 nm, and the output laser pulse is consequently squeezed from 35 fs to 20 fs in the 10 Hz femtosecond regenerative amplifier, with an acoustic-optic programmable dispersive filter (AOPDF) for dispersion pre-compensation and spectrum shaping of the input seed pulses. The experimental results show that the AOPDF can make spectrum shaping and dispersion compensation in a large range simultaneously and independently, depress effectively the spectrum gain narrowing in the chirped pulse amplification and compensate the residual dispersion in the Ti:sapphire laser system. The result paves the way for the development for 20 fs, 10 TW Ti:sapphire laser.

Key words: ultrafast optics; spectrum shaping; acoustic-optic programmable dispersive filter; gain narrowing; dispersion compensation

1 引 言

自从啁啾脉冲放大(CPA)技术和再生放大技术应用于超短脉冲能量放大系统以来, 实验可获得的超短脉冲功率密度已达到 10^{21} W/cm²^[1]。但与此而来的谱线增益窄化和残留色散又会使输出脉冲谱宽变窄、脉宽加宽, 使啁啾脉冲放大系统输出脉冲宽度小于 20 fs 的激光脉冲在技术上成为瓶颈。在啁

啾脉冲放大系统中, 一般通过在激光腔中插入棱镜对^[2]、啁啾镜、变形镜^[3]和空间光调制器^[4]等器件来补偿系统色散, 利用标准具^[5]和双折射滤光片^[6]等来克服再生放大过程中存在的谱线增益窄化效应。这些方法虽有效, 但它们都不可编程、可调谐性差, 且这些光学元件的性能比较单一, 不能同时独立控制光谱的振幅和相位。

作者简介: 王二玉(1982~), 女, 安徽人, 华东师范大学硕士研究生, 主要从事超快强激光技术的研究。

E-mail: weyandwzy@163.com

导师简介: 丁良恩(1950~), 男, 华东师范大学教授、博士生导师, 主要从事超快强激光技术和量子光学及信息学的研究。

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

收稿日期: 2006-01-10; 收到修改稿日期: 2006-04-05

Tournois^[7]在1997年基于线性声光耦合作用提出了可编程声光色散滤波器(AOPDF)。它能克服啁啾脉冲放大系统中增益窄化效应引起的光谱变窄,也可以对光学元件不匹配或元件本身引入的色散在大范围内进行可编程补偿。而且可编程声光色散滤波器可以同时独立控制这两个方面。目前,许多超短脉冲激光装置中都使用了可编程声光色散滤波器,并取得良好的效果^[8,9]。我们把法国Fastlits公司生产的WB-800型可编程声光色散滤波器用于美国S-P公司生产的TSA-25飞秒激光放大系统中,进行克服再生放大过程中增益窄化效应,预补偿激光系统残留色散的实验研究,取得了近衍射极限光脉冲的实验结果。

2 可编程声光色散滤波器的原理及特性

我们采用的可编程声光色散滤波器是基于在TeO₂晶体中声波和光波相互耦合的原理研制而成,如图1所示。考虑沿z方向的线性声光相互作用,当声波由射频信号激励入射到TeO₂晶体中以速度v沿着z轴方向传播,介质晶体对飞秒量级的光脉冲而言将成为一个固定的介质光栅。若射频信号是啁啾的,那么声波将会把这种啁啾转化在空间上,其空间频率也会是啁啾的。只有在光波模式与声波相位匹配的情况下,两束光模式才会被声光相互作用有效耦合,入射光能量才能有效转换成衍射光能量。

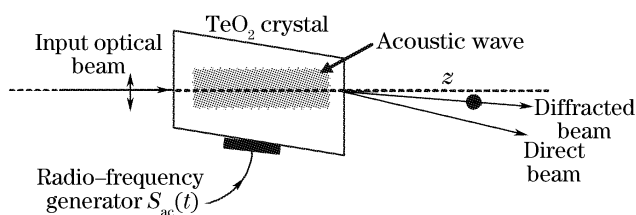


图1 光波与声波相互耦合原理图

Fig. 1 Principle of acousto-optic interaction

以上分析表明,可编程声光色散滤波器的出射光 $S_{out}(t)$ 是入射光 $S_{in}(t)$ 和电信号 $S_{ac}(t)$ 的函数,正比于入射光和一定比例电信号的卷积:

$$S_{out}(t) \propto S_{in}(t) \otimes S_{ac}(t)(t/\alpha), \quad (1)$$

其中比例因子 $\alpha = \Delta n(v/c)$,c为光速, Δn 为非常光和寻常光的折射率差。在频域内,(1)式可以写成

$$S_{out}(\omega) \propto S_{in}(\omega) \times S_{ac}(\alpha\omega), \quad (2)$$

ω 为电信号的频率。根据(1)式,(2)式及图2,假设入射光脉冲是宽带超短脉冲,带宽范围内不同频率的光衍射位置不同,而衍射光(非常光)和入射光(寻常光)在TeO₂晶体中传输速度也不同,故不同频率

的光通过长度一定的TeO₂晶体后时间延迟将不同。所以,通过调整射频信号的时间分布,即调整晶体中声波信号的空间分布,就能调制每个光谱成分在晶体中发生衍射的纵向位置以调谐相位色散。而入射光波的衍射效率由衍射位置处声波的振幅决定,即通过调节声波信号在晶体不同位置处的振幅也就可以调节入射光波各频谱成份的衍射效率,从而控制衍射光的光谱形状。

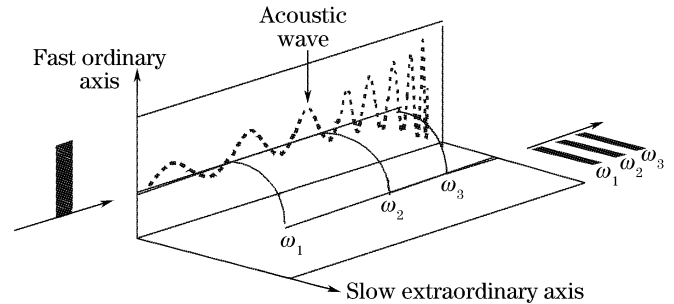


图2 可编程声光色散滤波器工作原理图

Fig. 2 Principle of the acoustic-optic programmable dispersive filter (AOPDF)

WB-800型可编程声光色散滤波器中TeO₂晶体长25mm,其损伤域值在100MW/cm²左右。在晶体中,声波以1000m/s的速度沿着z轴方向传播,非常光和寻常光折射率差 $\Delta n = 0.04$,在700~900nm波长调谐范围内可提供的最大群延迟量约为3ps。对应于衍射光波长在800nm处的声波频率为52.5MHz,相应 $\alpha \approx 10^{-7}$ 。该型号可编程声光色散滤波器的光谱分辨力是0.6nm,对应的时间分辨力为6.7fs。在声波功率允许的范围内,它的最大衍射效率在光谱宽度为100nm的范围内大于50%,在200nm范围内大于25%。

3 飞秒再生放大系统中利用可编程声光色散滤波器控制频谱和色散的实验研究

基于再生放大的钛宝石激光系统装置如图3所示。该系统由脉冲宽度 τ 小于12fs的振荡源(Compact Pro, Femtolasers GmbH)、展宽器、TSA-25系统中的再生放大器、两通放大器及压缩器组成。振荡源输出单个脉冲能量约为5nJ、谱线半峰全宽约为80nm、重复频率75MHz的锁模脉冲序列注入到光栅展宽器后展宽到200ps,单脉冲能量约为3nJ。进入再生放大器往返11次腔倒空后,脉冲能量放大到4mJ,即再生放大过程中脉冲增益系数达到 10^6 。然后光脉冲经过两通放大器放大至

28 mJ。这两级放大器是由重复频率 10 Hz、输出能量 500 mJ 的 532 nm Nd:YAG 激光器输出光按 1:9 的比例分束单向抽运的。从两通放大器输出的光脉冲经压缩器压缩到 20 mJ,用 Ocean Optics 公司生产的光纤光谱仪 HR2000 测得输出谱线半峰全宽

为 38 nm,如图 4 所示。用 Positive light 公司的自相关仪(Single shot autocorrelator, SSA)得到输出脉冲时域波形,如图 5 所示,其本底相对强度最大值约 0.25,信号相对强度最大值约为 0.7,在信号强度 0.25~0.7 的中间位置处测得脉冲宽度约为 35 fs。

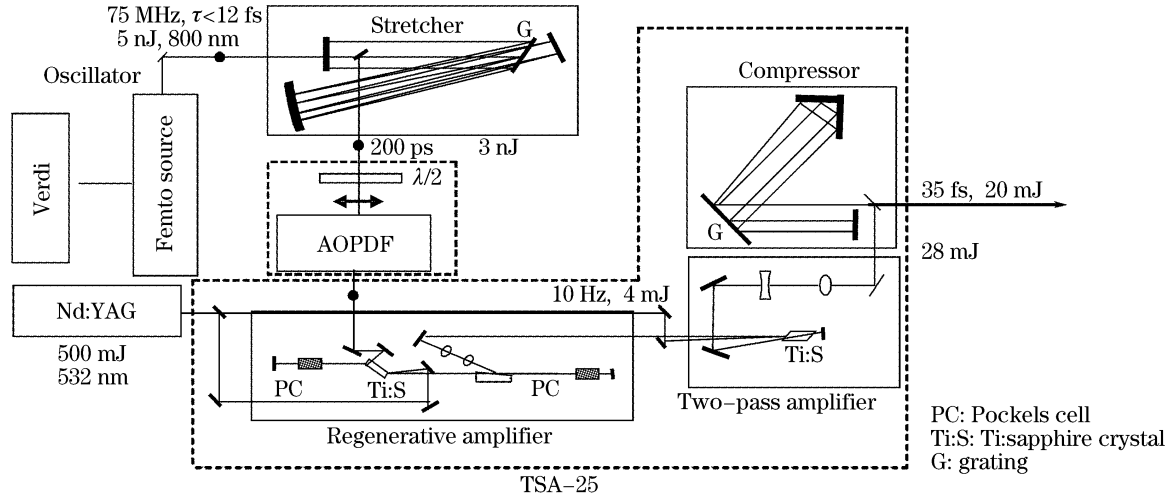


图 3 钛宝石激光系统装置图

Fig. 3 Experimental setup of the Ti:sapphire laser system

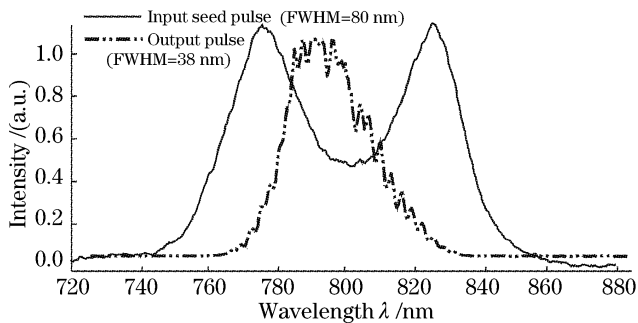


图 4 利用可编程声光色散滤波器整形前种子光谱和系统输出光谱

Fig. 4 Spectrum of seed and output pulse before application of AOPDF

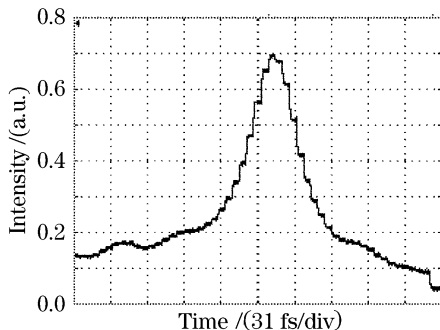


图 5 利用可编程声光色散滤波器整形前的压缩后激光脉冲时域波形

Fig. 5 Temporal pulse profiles of compressed pulse before application of AOPDF

比较注入再生前的种子脉冲光谱和系统输出光谱(图 4)发现,在放大过程中出现了谱线增益窄化。这主要是因为放大介质钛宝石的增益带宽有限,使

得啁啾脉冲放大过程中,脉冲的中心增益高,边缘增益低,随着激光脉冲逐级放大,光谱就会变得越来越窄。经过实验观察,这种效应在再生放大过程中表现得尤为突出。在使用可编程声光色散滤波器前,我们用光谱仪测得与再生放大腔内光脉冲放大次数相应的再生放大器输出光谱,如图 6 所示。可以看到在再生放大腔内,随着光脉冲放大次数增加,脉冲获得增益逐渐提高,光脉冲谱线半峰全宽逐渐变窄。再生放大过程中的增益窄化效应不仅使激光脉冲不能够充分利用放大介质的增益带宽,得不到有效放大,而且也将导致放大后的啁啾脉冲不能被压缩还原至种子脉冲宽度。

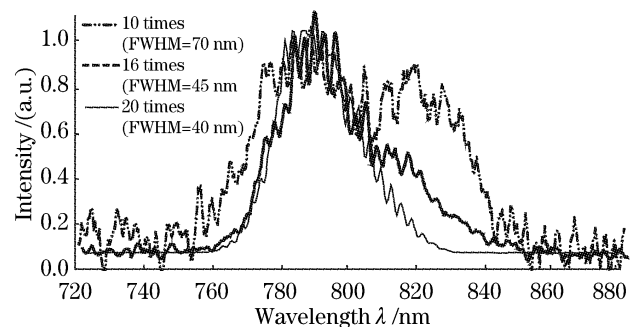


图 6 再生放大过程中不同放大次数的输出光谱

Fig. 6 Output spectrum of different magnification times in regenerative amplifier

为了克服再生放大过程中存在的增益窄化效应,一般做法是把注入到再生放大的种子光谱预整形形成驼峰形状,以均衡放大系统的光谱净增益。考

考虑到可编程声光色散滤波器的损伤域值(100 MW/cm²)较低,我们将它插在系统的展宽器后再生放大器前(如图 3),从可编程声光色散滤波器出射的光会分成两束(如图 1),一束变为水平偏振的一级衍射光,一束仍为垂直偏振的零级光。用光阑将零级光挡掉,仅使衍射光通过后续的放大器和压缩器。在输出端利用功率计、光谱仪以及自相关仪监测系统输出光脉冲的能量、谱线半峰全宽和脉宽的大小,并以此为根据来编程可编程声光色散滤波器控制软件中的相关参量优化输出光脉冲。

实验中可编程声光色散滤波器要和激光系统同步才能很好地应用到系统中去。我们利用再生放大器的抽运源 Nd:YAG 中闪光灯输出的 TTL 同步信号来触发可编程声光色散滤波器,同时考虑到声波信号要比光波信号早进入可编程声光色散滤波器 23.60 μs,设置可编程声光色散滤波器的内置延迟时间为 170.40 μs。

根据可编程声光色散滤波器原理,在声光相互耦合的过程中,光谱各频谱的衍射效率由在衍射位置处声波的振幅决定。根据实验需要选择声波波形,使得入射光波在中心波长处的衍射效率小于两侧的衍射效率,则衍射光谱的中心强度小于两翼,即将入射光谱整形为驼峰形。实验中,以置于再生放大后的光谱仪输出光谱为依据调节可编程声光色散滤波器控制软件中的振幅调制参量。反复实验后,得到了在 807 nm 处带有宽度为 50 nm、深度为 75%高斯形孔的光谱调制曲线(如图 7)。将光谱仪放在可编程声光色散滤波器后再生放大器前探测到调制前后的种子脉冲谱线半峰全宽从 80 nm 增加到 100 nm。调制后的激光脉冲通过后续放大压缩系统后,输出脉冲的谱线半峰全宽从 38 nm 增加到 66 nm,如图 8 所示。按照傅里叶变换极限,66 nm 的谱线半峰全宽对应于 17 fs 的高斯脉冲。显然,通过恰当编程可编程声光色散滤波器的振幅控制参

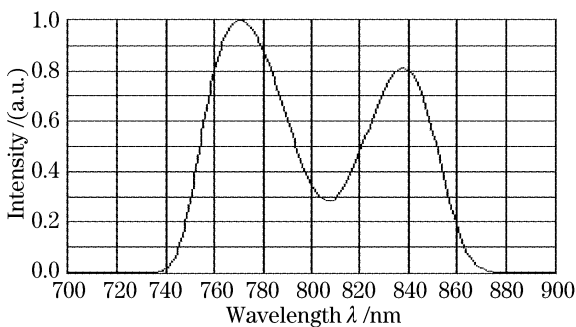


图 7 光谱调制曲线
Fig. 7 Curve of spectral modulation

量,有效克服了原系统再生放大过程中存在的增益窄化效应,获得了较大的放大频谱带宽,更宽的光谱有利于压缩获得更窄的脉宽。

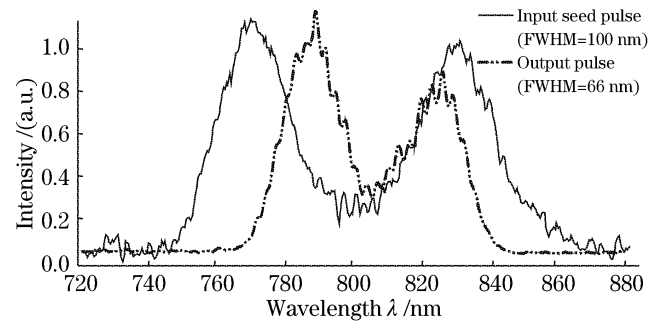


图 8 利用可编程声光色散滤波器整形后种子光谱和系统输出光谱

Fig. 8 Spectrum of seed and output pulse after application of AOPDF

用自相关仪测得系统消除谱线增益窄化后输出脉冲脉宽为 31 fs,和用可编程声光色散滤波器整形前输出脉冲脉宽 35 fs 相比,虽然在放大系统中克服了增益窄化效应,在频域上得到了很宽的光谱,但在时域上并没有把它压缩到理想的光脉冲。这主要是因为激光系统中还存在由于光学元件不匹配和元件本身带来的各阶残留色散。通过调整晶体中声波信号的空间分布,就能调制每个光谱成分在晶体中发生衍射的纵向位置,从而调谐光谱的相位色散。所以,可以利用可编程声光色散滤波器控制软件对系统中各阶色散进行预补偿编程。在实验中,首先粗略估计了原激光系统中各阶残留色散的大小,同时考虑到长度为 25 mm 的 TeO₂ 晶体引入的二阶色散为 12500 fs²。以此来设定各阶色散的扫描范围,通过自相关仪输出信号及时反馈在扫描范围内各点相应的脉冲宽度。通过反复实验,我们在可编程声光色散滤波器控制软件中合理设置了预补偿激光系统各阶残留色散的值:延迟,2700 fs;二阶色散, -4000 fs²;三阶色散, -1500 fs³;四阶色散, -

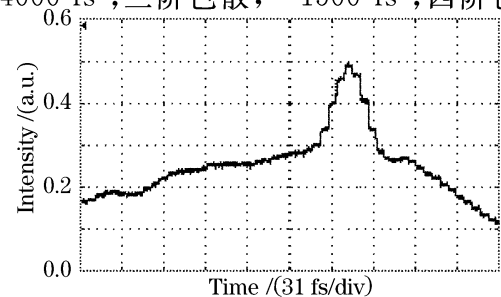


图 9 利用可编程声光色散滤波器整形后的压缩后激光脉冲时域波形

Fig. 9 Temporal pulse profiles of compressed pulse after application of AOPDF

1900 fs⁴。压缩后的光脉冲利用自相关仪测量得到其时域波形如图 9 所示,本底相对强度最大值约 0.3,信号相对强度最大值约为 0.5,在信号强度 0.3 到 0.5 的中间位置处测得脉宽约为 20 fs。如果能够利用精度更高的脉宽测量仪,将能够得到信噪比较高的脉冲时域波形图。

实验中,可编程声光色散滤波器对种子光脉冲的透射率仅为 10%左右,这主要是因为我们一直把声波功率限制在其最大功率一半处,防止可编程声光色散滤波器饱和或产生热效应。虽然这样使得入射种子光的能量有所降低,但其还是足够使后续的放大器、压缩器正常运行。我们测得压缩后输出能量为 13.5 mJ,是原系统输出能量的 67%。

4 结 论

针对超快激光系统中存在的增益窄化效应和残留色散使光脉冲谱宽变窄、脉冲宽度变宽的问题,我们利用可编程声光色散滤波器对输出谱线半峰全宽 38 nm、脉宽 35 fs 的激光系统进行光谱整形和色散补偿,获得了谱线半峰全宽 66 nm、脉宽 20 fs 的激光脉冲。实验结果表明,可编程声光色散滤波器不仅可以通过将种子光谱调制成驼峰形来克服啁啾脉冲放大过程中存在的增益窄化效应,同时也可以通过调制相位色散对系统中残留色散进行补偿,为我们进一步研制小于 20 fs,10 TW 量级激光系统奠定了基础。另外,在实验中如果能提高可编程声光色散滤波器的衍射效率,同时降低其热效应,相信能够得到更强的放大效果和更光滑的脉冲光谱,最后得到信噪比更高的压缩脉冲。对于整个实验系统,如果能研制成自适应系统将更有利于整个激光系统的运行。

致谢 作者真诚感谢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 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 160~162
- 2 Richard F. Herzog, Daniel Kaplan, Christian Spielmann *et al.*. Sub-10-fs, terawatt-scale Ti:sapphire laser system[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1832~1834
- 3 Erik Zeek, Kira Maginnis, Sterling Backus *et al.*. Pulse compression by use of deformable mirrors[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(7): 493~495
- 4 Anatoly Efimov, Mark D. Moores, Nicole M. Beach *et al.*. Adaptive control of pulse phase in a chirped-pulse amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(24): 1915~1917
- 5 C. P. J. Barty, G. Korn, F. Raski *et al.*. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 219~221
- 6 Leng Yuxin, Lin Lihuang, Xu Zhizhan. Spectrum shaping in a Ti:sapphire regenerative amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 170~173 (in Chinese)
冷雨欣, 林礼煌, 徐至展. 掺钛蓝宝石再生放大器的光谱整形[J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 170~173
- 7 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
- 8 Frédéric Verluise, Vincent Laude, Jean-Pierre Huignard *et al.*. Arbitrary dispersion control of ultrashort optical pulses with acoustic waves[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(1): 138~145
- 9 Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. Compensation of gain narrowing by using AOPDF in high-power ultra-short pulse laser systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6): 2764~2768 (in Chinese)
刘兰琴, 彭翰生, 魏晓峰等. 高功率超短脉冲激光系统中用 AOPDF 实现增益窄化补偿的实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(6): 2764~2768
- 10 Wei Xiaofeng, Lü Zhiwei, Liu Lanqin *et al.*. Acousto-optic programmable dispersive filter for spectral shaping and group-delay control in ultra-short pulse laser systems[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(3): 30~34 (in Chinese)
魏晓峰, 吕志伟, 刘兰勤等. 超短脉冲激光系统中用于光谱整形和群延迟控制的可编程声光色散滤波器[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(3): 30~34