

光谱调制对放大器脉冲时域特性的影响

薛兴泰, 赵研英*, 李荣凤, 耿易星, 卢海洋, 颜学庆

北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

摘要 在北京大学 200 TW 激光系统上, 测量了经可编程声光色散滤波器不同程度光谱调制后放大器输出脉冲的频域分布, 并设计了一个与脉冲中心波长、光谱宽度等参数相关的光谱调制函数拟合了实验测得的光谱数据。该函数形式简单, 适用于不同的激光系统。对实验系统中种子脉冲经光谱调制后从放大器输出的光谱结果进行了数值模拟, 对比研究了普通种子脉冲和光谱调制脉冲经放大器增益后时域空间内的物理性质; 讨论了光谱调制对系统最终输出脉冲峰值功率的影响。结果表明: 光谱调制会导致脉冲旁瓣的产生, 降低系统输出脉冲的有效能量和飞秒对比度, 系统输出脉冲为平顶光谱时, 其有效输出峰值功率最大。

关键词 超快激光; 时域特性; 调制函数; 光谱调制

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0501001

Effects of Spectral Modulation on Time-Domain Characteristics of Pulses in Amplifier

Xue Xingtai, Zhao Yanying, Li Rongfeng, Geng Yixing, Lu Haiyang, Yan Xueqing

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract The frequency domain distribution of amplified pulse modulated by the acousto-optic programmable dispersive filter is measured on the 200 TW laser system in Peking University. A spectral modulation function related to the pulse central wavelength and spectral bandwidth is established to fit the measured spectral data. The function is simple and suitable for different laser systems. Based on the numerical simulation of the amplifier output pulse's spectra after the seed pulse modulation, the time-domain characteristics of the ordinary seed pulse and the spectrum modulated pulse through the amplifier are compared. The effects of spectral modulation on the peak power of the final output pulse are discussed. The result shows that the spectral modulation can lead to the generation of sidelobes and reduce the effective energy and femtosecond contrast of the system output pulse. When the output pulse has a flat-top spectrum, its effective peak power is the largest.

Key words ultrafast laser; time-domain characteristics; modulation function; spectral modulation

OCIS codes 320.7090; 320.7150; 320.7160

1 引 言

近年来, 随着超快超强激光研究的快速发展, 采用啁啾脉冲放大技术(CPA)已经获得拍瓦量级($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$)激光脉冲输出^[1-6]。在超快超强激光领域, 基于钛宝石的飞秒激光放大系统因重复率高、结构紧凑、易于操作等优点已成为研究热点, 国内外大量研究工作都旨在不断提高钛宝石激光放大系统输出脉冲的性能^[7-10]。研究者通过该类激光系统可在实验室中获得极端的物态条件, 为强场物理领域的进一步研究提供了实验基础^[11-13]。

收稿日期: 2016-12-07; **收到修改稿日期:** 2017-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(11504009, 11535001)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ030142)

作者简介: 薛兴泰(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加速器方面的研究。E-mail: xuexingtai@pku.edu.cn

导师简介: 颜学庆(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光加速器方面的研究。E-mail: x.yan@pku.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zhaoyanying@pku.edu.cn

目前已有的基于钛宝石的飞秒激光放大系统,其输出脉冲能量一般在焦耳量级,最高可达数百焦耳,脉冲宽度几十飞秒。系统设计过程中,缩短输出激光脉冲宽度是提高激光峰值功率的有效途径。基于不确定性原理,要求激光有足够的光谱宽度以支持短脉宽,但是具有一定光谱宽度的脉冲在放大过程中存在着增益窄化现象^[14-15],极大地削减了输出光谱宽度,大大限制了脉冲可压缩宽度。为了克服这一问题,系统中引入了光谱补偿技术对脉冲进行光谱调制,即通过降低高增益部分的波长强度来补偿增益介质的光谱增益不均匀性,从而减小增益窄化导致的光谱宽度损失。针对飞秒激光啁啾脉冲放大系统中增益窄化效应带来的光谱窄化,常在系统中加入标准具^[16]、双折射滤光片^[17]或可编程声光色散滤波器(AOPDF)^[18]等装置来克服。其中,AOPDF 可以同时进行光谱调制和色散补偿,其装置结构紧凑、操作简单,已被广泛应用在超强激光系统中^[19-22]。

目前已有的 AOPDF 在超强激光中的相关研究工作主要着眼于补偿增益窄化效应以及利用数学模型来模拟输出脉冲的光谱宽度变化^[23-26],还没有针对种子脉冲光谱调制所导致的放大系统输出脉冲时域特性变化的相关研究。

在北京大学超小型激光粒子加速器(CLAPA)系统上^[27],研究 AOPDF 产生的种子脉冲光谱不同程度调制对输出脉冲光谱的影响。在此基础上,给出一个高斯形式调制函数描述经 AOPDF 调制和增益介质放大后的输出脉冲的光谱,并研究激光脉冲的时域特性。数值模拟证明,在实验中合理地种子脉冲光谱进行调制可以有效地补偿放大过程中带来的增益窄化,同时优化输出脉冲的飞秒对比度和峰值功率。

2 实验装置与结果

实验在北京大学 CLAPA 系统上进行,该系统主要结构与文献[28]类似,如图 1 所示。激光脉冲经第一级啁啾脉冲放大系统放大后,使用交叉偏振滤波技术(XPW)滤波器进行滤波提高输出脉冲对比度,此时输出脉冲光谱半峰全宽(FWHM)约为 55 nm,此后进入第二级啁啾脉冲放大系统。经展宽器展宽后的脉冲被多个放大器放大,激光最终由光栅压缩输出用于打靶实验,系统输出能量达到 5 J,脉冲宽度为 25 fs。在该激光系统中,加入 AOPDF(谱宽大于 150 nm,效率大于 25%,光谱分辨率为 0.3 nm)来实现对输入放大器的种子脉冲进行光谱调制,以获得更短的脉冲宽度、更高峰值功率的输出脉冲。分别使用光谱仪(HR4000, Ocean, 美国)和脉冲测量装置来诊断输出脉冲的频谱和时域分布。

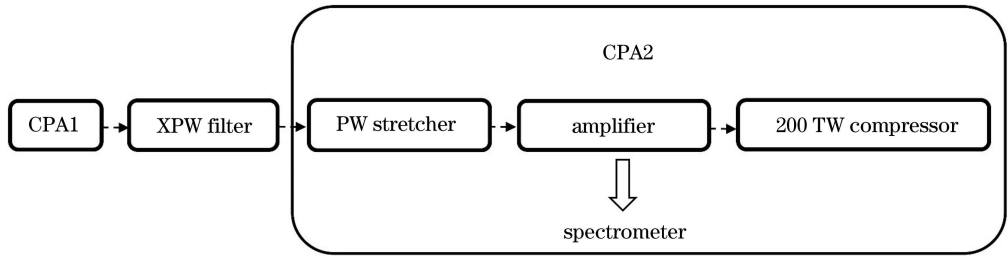


图 1 激光装置的主要结构

Fig. 1 Experimental setup of the laser system

图 2 展示了实验中测得的典型四组经 AOPDF 调制后放大系统输出的光谱数据。图中黑色曲线是未对输入光谱调制时的输出光谱,其形状接近高斯函数形式,光谱宽度为 31.7 nm。使用 AOPDF 对输入种子脉冲光谱中心波长强度进行衰减,以抑制放大过程中光谱中心波长增益高于两侧导致的光谱窄化,得到有更大光谱宽度的输出脉冲。随着对光谱中心波长强度衰减的加大,放大器输出的高斯光谱逐渐由高斯形演化为红色实线表示的平顶光谱,脉冲光谱宽度达到 41.1 nm。继续增大 AOPDF 对光谱中心波长强度的衰减,输入放大器的种子脉冲中心波长强度过低,此时增益不足以补偿中心波长的衰减,如图中蓝色、绿色实线所示,输出脉冲光谱呈现马鞍状,即光谱调制过度。实验中先后测量了不同 AOPDF 调制程度下的输出脉冲光谱,最高可得到光谱宽度为 51.02 nm 的输出脉冲。

图 3(a)和图 3(b)分别是测量马鞍状光谱脉冲的时域分布和光谱相位信息。如图 3(a)所示,该输出脉冲的主脉冲前后约 40 fs 处分别存在两个旁瓣,最高强度约为主脉冲的 20%。这将导致时域空间内激光能

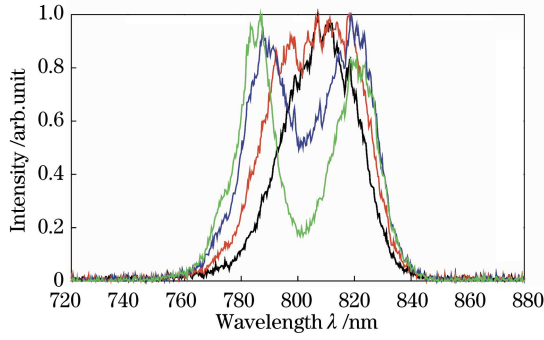


图 2 实验中测得系统的输出脉冲光谱

Fig. 2 Spectra of output pulse in the experiment

量的分散,使主脉冲包含的有效能量降低,并影响激光脉冲飞秒尺度下的对比度。图 3(b)中黑色实线和红色实线分别表示激光脉冲光谱和相位。一般认为这种脉冲旁瓣是由于系统的高阶色散所导致^[29]。但实际测量过程中,在激光脉冲相位基本保持一致的情况下,激光脉冲旁瓣的强度随着光谱调制的加深逐渐升高。从傅里叶变换的观点来看,理想高斯型光谱傅里叶逆变换后的压缩脉冲时域分布应为理想高斯型,故对光谱进行调制也会使时域内激光脉冲出现旁瓣。

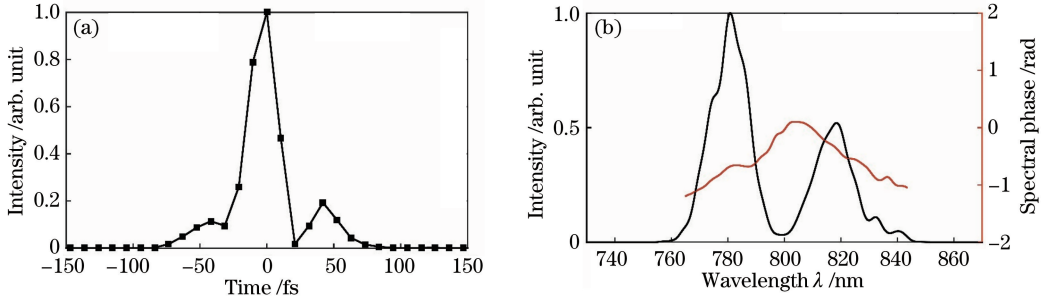


图 3 输出激光脉冲的(a)时域分布和(b)频域分布

Fig. 3 (a) Time domain distribution and (b) frequency domain distribution of output laser pulses

3 光谱调制函数

3.1 调制函数的设计

在实际测量中发现,未经光谱调制的系统输出脉冲,其光谱形状是高斯形;而经不同程度光谱调制后的放大器输出脉冲,其光谱形状逐渐演化为马鞍形。因此采用了高斯函数加上调制项来描述经放大器放大后输出的脉冲光谱,该光谱调制函数可表示为

$$f(\lambda) = \exp\left[\frac{-(\lambda - \lambda_0)^2}{(\Delta/2\sqrt{\ln 2})^2}\right] - A \times \exp\left[\frac{-(\lambda - \lambda_0)^2}{(B \cdot \Delta/2\sqrt{\ln 2})^2}\right], \quad (1)$$

式中 λ_0 为光谱的中心波长, Δ 为光谱的 FWHM, A 和 B 则为调制项的参数。(1)式第一项为高斯函数形式,用来拟合未经调制的输出光谱;第二项则用来描述 AOPDF 对光谱作用并经放大后的光谱调制,其中参数 A 表示光谱调制的深度,参数 B 表示光谱调制的 FWHM,即调制光谱中心凹陷的深度和宽度。通过合理选择参数 A 和 B 的取值可拟合出不同形式的输出光谱。

AOPDF 对种子脉冲调制后会改变种子脉冲能量,考虑到放大器工作在饱和放大状态下,此时可认为放大系统最终输出脉冲能量均相同,故在数值模拟过程中选择参数 A 和参数 B 不同的取值时,需要对光谱函数的幅值进行补偿,即:

$$f(\omega) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} F[f(\omega)_{A=0, B=0}] dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} F[f(\omega)_{A, B}] dt} f(\omega)_{A, B}, \quad (2)$$

式中 $F[f(\omega)_{A,B}]$ 表示对函数进行傅里叶逆变换。这样的处理可以保证数值模拟过程中,所有光谱函数转换至时域后面积相等,即保证了不同光谱函数所代表的脉冲总能量相同。选择合适的参数 B 值后,对影响调制深度的调制项系数 A 进行参数扫描,即可拟合 AOPDF 对种子脉冲进行不同程度光谱调制后放大器输出脉冲的光谱形状,如图 4 所示。

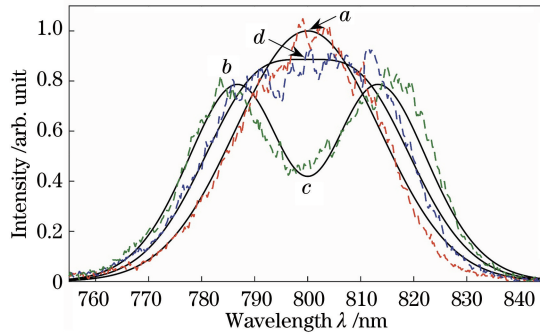


图 4 数值模拟和实际测量的输出光谱

Fig. 4 Simulated spectra and measured spectra of output pulses

图 4 展示了利用光谱调制函数进行数值模拟和实际测量得到的放大器输出脉冲光谱典型的三种情况,数值模拟结果很好地还原了光谱形状随 AOPDF 对种子脉冲中心波长强度衰减的变化。定义了一个参数调制深度 D 来描述放大器输出光谱的形状,其取值为光谱中极大值点 b 到极小值点 c 的距离占整体强度的比例 $D = (b - c) / b$;若调制后光谱未形成马鞍状,则令 D 取负值,其值为平顶光谱的最大值 d 与无调制输出光谱最大值 a 的差占整体强度的比例 $D = (d - a) / d$ 。当调制项参数 $A = 0$ 时, D 有最小值 -0.122 ,对应未经光谱调制的输出光谱。故参数 D 值的大小直接反映 AOPDF 对脉冲光谱的调制程度。

3.2 函数拟合结果

利用(1)式的模型拟合实际测量的光谱数据,选择光谱调制函数中 B 值为 0.65 时可很好地拟合 CLAPA 激光系统的输出脉冲光谱。在此基础上,不考虑光谱相位的影响,计算了拟合光谱的傅里叶转换极限脉冲宽度随 D 值的变化。

输出脉冲光谱的 FWHM 随调制深度 D 的变化如图 5(a)所示,其中实线为数值模拟结果,虚线为根据实际测量光谱分析得到的脉冲光谱宽度。实际测量结果与拟合结果最大相差 5.57%,拟合曲线相关系数 $R^2 = 0.9994$ 。考虑到实际测量过程中光谱信号存在抖动、测量使用的光谱仪分辨率为 0.75 nm 以及光谱信号噪声等带来的误差,认为数值模拟结果与实际测量吻合较好,反映了随着光谱调制的加强,输出脉冲的光谱宽度持续增长,这必然导致图 5(b)中光谱傅里叶转换极限脉宽持续降低。数值模拟结果显示最大程度的光谱调制可以有效地将脉冲宽度由 34.5 fs 改善至 23.8 fs。可见,对光谱中心波长强度的削减可使脉冲光谱宽度增大,从而减小可压缩的脉冲宽度。

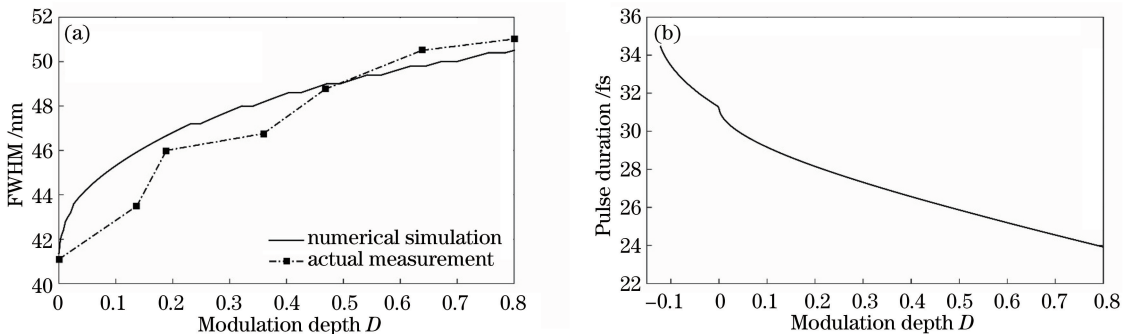


图 5 (a)输出脉冲光谱的 FWHM 随调制深度的变化;(b)脉冲持续时间随调制深度的变化

Fig. 5 (a) FWHM of output laser pulse spectrum versus modulation depth; (b) pulse duration versus modulation depth

4 脉冲时域特性分析

分析基于 CLAPA 激光系统的数值模拟结果并讨论光谱调制对输出脉冲时域特性的影响。

图 6(a)是未调制脉冲和调制深度 D 分别为 0.2 和 0.8 时的脉冲强度时域分布图。红色曲线为调制深度为 0.2 的脉冲时域分布,主脉冲前后约 40 fs 处有两个明显的脉冲旁瓣,强度约为主脉冲的 13%。蓝色曲线显示调制深度为 0.8 的脉冲时域分布,与调制深度为 0.2 时类似,但旁瓣距主脉冲更近,相距约 37 fs,旁瓣强度更高,约为主脉冲的 34%。结果显示光谱调制导致如图 3(a)所示的时域分布中产生脉冲旁瓣。图 6(b)展示了脉冲旁瓣强度与主脉冲强度的比值和光谱调制深度的关系,随着光谱调制深度的增大,脉冲旁瓣强度所占比例逐渐升高,最高强度甚至超过主脉冲的 30%。由此可见,对于输出能量一定的激光系统,脉冲的飞秒对比度反映了主脉冲和旁瓣能量的分布情况。

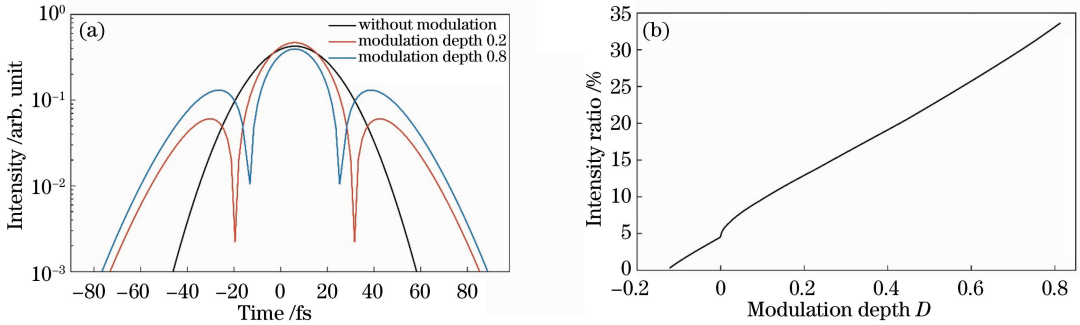


图 6 (a)输出脉冲时域分布;(b)脉冲旁瓣强度与主脉冲强度的比值

Fig. 6 (a) Time domain distributions of output pulses; (b) intensity ratio of sidelobe and main pulse

由于脉冲旁瓣的存在,必然将脉冲能量分散,从而降低主脉冲能量。由图 7(a)可知,系统输出脉冲的主脉冲能量随调制深度的增大而持续下降。这意味着如果为了追求更短的脉冲宽度而不断调节 AOPDF 使得种子脉冲光谱中心波长强度过低,就会牺牲最终系统输出脉冲的有效能量,即主脉冲的能量。由于能量被脉冲旁瓣分散,此时脉冲峰值功率用脉冲总能量除以脉冲宽度已不再准确,可通过主脉冲的能量除以主脉冲脉宽计算脉冲的峰值功率。图 7(b)为脉冲峰值功率随调制深度的变化曲线。在调制深度 D 从负值逐渐增大到 0 时,峰值功率持续上升;而当调制深度 D 从 0 继续增大时,峰值功率持续下降。这说明综合考虑 AOPDF 对种子脉冲光谱调制和增益介质增益窄化的影响,对比未经调制的原始激光(脉冲宽度为 34.5 fs,光谱宽度为 31.7 nm,归一化峰值功率为 1)和调制深度 $D=0.8$ 的激光(脉冲宽度为 23.8 fs,光谱宽度为 50.49 nm,归一化峰值功率为 0.853),当输出脉冲的光谱调制深度为 0 时,输出脉冲峰值功率最大,归一化结果为 1.066。此时,输出脉冲光谱呈平顶状(脉冲宽度为 31.19 fs,光谱宽度为 41.38 nm),AOPDF 对种子脉冲的光谱调制刚好完全抵消了后续脉冲放大过程中增益窄化效应。平顶光谱既实现了对光谱宽度的增大以得到较小的输出脉冲宽度,又较好地保持了光谱形状,使时域空间内主脉冲的能量相对较大,最终得到最高的输出脉冲峰值功率。

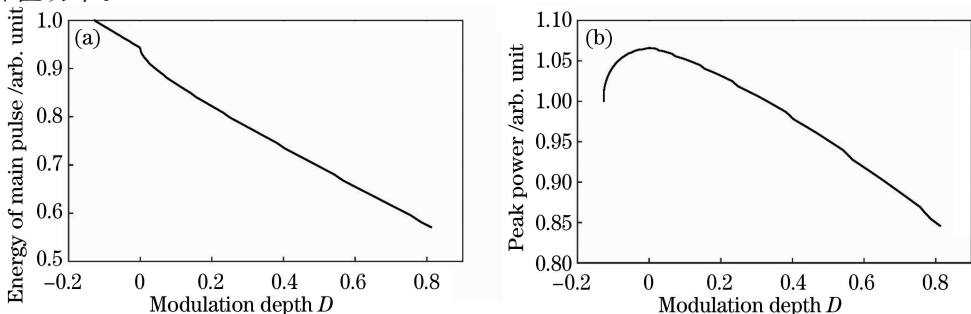


图 7 (a)主脉冲能量和(b)输出脉冲峰值功率随调制深度的变化

Fig. 7 (a) Energy of main pulse and (b) peak power of output pulse versus modulation depth

5 结 论

给出了一个形式简单的光谱调制函数来拟合实验中测得的经 AOPDF 调制和放大器放大后的输出脉冲光谱,并数值模拟了不同程度光谱调制对系统最终输出脉冲的时域特性影响。结果显示,光谱调制会导致脉冲旁瓣的产生,降低系统输出脉冲的有效能量和飞秒对比度,光谱调制过度会导致输出脉冲的峰值功率降低,当光谱调制恰好抵消增益窄化效应时,输出脉冲的峰值功率有最大值。将为不同应用需求(如更短脉冲宽度、更高有效能量或更高峰值功率)激光系统中光谱调制的设计提供理论指导。

参 考 文 献

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219-221.
- [2] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, *et al.* 0.85 PW, 33 fs Ti: sapphire laser[J]. Optics Letters, 2003, 28(17): 1594-1596.
- [3] Kiriya H, Mori M, Nakai Y, *et al.* High temporal and spatial quality petawatt-class Ti: sapphire chirped-pulse amplification laser system[J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1497-1499.
- [4] Yu T J, Lee S K, Sung J H, *et al.* Generation of high-contrast, 30 fs, 1.5 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti:sapphire laser[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10807-10815.
- [5] Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, *et al.* High-energy large-aperture Ti: sapphire amplifier for 5 PW laser pulses[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5011-5014.
- [6] Wang Z H, Liu C, Shen Z W, *et al.* High-contrast 1.16 PW Ti: sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3194-3196.
- [7] Eilanlou A A, Nabekawa Y, Ishikawa K L, *et al.* Direct amplification of terawatt sub-10 fs pulses in a CPA system of Ti: sapphire laser[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13431-13438.
- [8] Mahieu B, Gauthier D, Perdrix M, *et al.* Spatial quality improvement of a Ti: sapphire laser beam by modal filtering [J]. Applied Physics B, 2015, 118 (1): 47-60.
- [9] Nam I, Kim M, Lee T H, *et al.* Highly-efficient 20 TW Ti: sapphire laser system using optimized diverging beams for laser wakefield acceleration experiments[J]. Current Applied Physics, 2015, 15(4): 468-472.
- [10] Liu Cheng, Wang Zhaohua, Li Weichang, *et al.* Enhancement of contrast ratio in chirped pulse amplified laser system by cross-polarized wave generation[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(10): 7036-7040.
刘 成, 王兆华, 李伟昌, 等. 交叉偏振滤波技术提高飞秒超强激光信噪比的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7036-7040.
- [11] Macchi A, Borghesi M, Passoni M. Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction[J]. Reviews of Modern Physics, 2013, 85(2): 751-793.
- [12] Daido H, Nishiuchi M, Pirozhkov A S. Review of laser-driven ion sources and their applications. [J]. Reports on Progress in Physics, 2012, 75(5): 056401.
- [13] Corde S, Phuoc K T, Beck A, *et al.* Femtosecond X rays from laser-plasma accelerators[J]. Reviews of Modern Physics, 2013, 85(1): 1-48.
- [14] Hotz D F. Gain narrowing in a laser amplifier[J]. Applied Optics, 1965, 4(5): 527-530.
- [15] Zhao Shanghong, Wang Yishan, Chen Guofu, *et al.* Gain narrowing in the amplification of Ti: sapphire ultra-short laser pulse[J]. Acta Photonica Sinica, 1997, 26(3): 197-200.
赵尚弘, 王屹山, 陈国夫, 等. 钛宝石超短脉冲放大过程中的增益窄化效应[J]. 光子学报, 1997, 26(3): 197-200.
- [16] Barty C P, Korn G, Raksi F, *et al.* Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses[J]. Optics Letters, 1996, 21(3): 219-221.
- [17] Leng Yuxin, Lin Lihuang, Xu Zhizhan. Spectrum shaping in a Ti: sapphire regenerative amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(2): 170-173.
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.
- [18] Tournois P. Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems[J]. Optics Communications, 1997, 140(4-6): 245-249.
- [19] 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.
- 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.
- [20] Canova L, Chen X, Trisorio A, *et al.* Carrier-envelope phase stabilization and control using a transmission grating compressor and an AOPDF[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1333-1335.
- [21] Seres J, Seres E, Spielmann C, *et al.* A sub-10-femtosecond terawatt-scale Ti: sapphire laser system [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(19): 1832-1834.
- [22] Monmayrant A, Arbouet A, Girard B, *et al.* AOPDF-shaped optical parametric amplifier output in the visible[J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(2): 177-180.
- [23] Papadopoulos D N, Hanna M, Druon F, *et al.* Compensation of gain narrowing by self-phase modulation in high-energy ultrafast fiber chirped-pulse amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 182-186.
- [24] Liu Q, Ye Q, Pan Z, *et al.* Synthesis of fiber Bragg grating for gain-narrowing compensation in high-power Nd:glass chirped pulse amplification system[J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, 17(3): 185-190.
- [25] Cao Dongmao, Wei Zhiyi, Teng Hao, *et al.* Control the gain-narrowing in femtosecond Ti: sapphire amplifier by shaping oscillator pulse[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(6): 1202-1205.
- 曹东茂, 魏志义, 滕浩, 等. 整形种子脉冲克服放大过程中增益窄化效应的研究[J]. *物理学报*, 2000, 49(6): 1202-1205.
- [26] Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng, *et al.* Spectral gain narrowing compensation modulation function in high-power ultrashort-pulse laser system[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2005, 17(6): 856-860.
- 刘兰琴, 彭翰生, 魏晓峰, 等. 高功率超短脉冲激光系统中光谱增益窄化补偿的调制函数[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(6): 856-860.
- [27] Shang Yong, Zhu Kun, Lin Chen, *et al.* Progress of compact laser plasma accelerator in Peking university[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(10): 1282-1287.
- 尚勇, 朱昆, 林晨, 等. 北京大学超小型激光加速器系统研究进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(10): 1282-1287.
- [28] Lureau F, Laux S, Casagrande O, *et al.* High-energy 1 Hz titanium sapphire amplifier for PetaWatt class lasers[C]. SPIE LASE. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8235: 823513.
- [29] Wang Li, Han Xiyou. Ultra-short Gaussian pulse expansion and deformation by high-order group velocity dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 138-142.
- 王丽, 韩秀友. 高阶群速度色散引起的高斯超短脉冲宽度的展宽和形变[J]. *光学学报*, 2007, 27(1): 138-142.