

文章编号 : 0253-2239(2002)10-1206-05

采用光谱展宽技术的钛宝石飞秒激光放大器^{*}

邢岐荣 张 宁 吴元生 柴 路 张伟力 张志刚 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 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)

摘要: 报道了飞秒激光啁啾脉冲放大器中的激光脉冲光谱展宽技术, 实验中使用了几种光谱展宽元件, 结果表明使用激光光谱展宽元件能有效地将飞秒激光脉冲光谱展宽, 抑制了飞秒激光放大器中常见的激光脉冲光谱增益窄化现象, 从飞秒放大系统的振荡级输出 28 fs 种子脉冲, 放大后得到了重复频率为 10 Hz、峰值功率 1.6 TW、脉冲宽度 37.5 fs 的超短超强飞秒激光脉冲。

关键词: 飞秒; 啁啾脉冲放大; 光谱增益窄化; 光谱展宽

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引 言

近年来, 台式飞秒激光啁啾脉冲放大器(chirped pulse amplification, 简称 CPA)的研究取得了惊人的成果, 其输出的峰值功率高达 10^{12} W 量级^[1,2], 正在向 10^{15} W 量级推进^[3], 这是近年来激光物理领域最令人瞩目的成就之一, 在科学和技术的广阔领域已显示出诱人的应用前景。啁啾脉冲放大技术不仅是激光技术研究中的重大成果, 而且也为其学科的发展提供了必要的技术研究手段, 如高次谐波的产生^[4], 激光粒子加速器^[5], X 射线激光^[6], 惯性约束核聚变等强场物理研究。飞秒激光啁啾脉冲放大技术是先利用脉冲展宽器将飞秒激光脉冲展宽, 然后送入放大器中进行放大, 被放大的啁啾激光脉冲输入到与展宽器具有相反色散特性的脉冲压缩器中压缩为飞秒光脉冲, 从而获得高功率的飞秒激光脉冲。然而, 由于放大系统的增益很高, 放大过程中的光谱窄化效应严重制约窄脉冲的获得。因此, 为获得更窄的放大飞秒激光脉冲, 就须采取相应的技术手段, 有效地抑制增益光谱窄化效应。于是, 研究飞秒激光放大过程中的激光增益光谱展宽技术, 以便获得更窄的太瓦级飞秒激光脉冲, 就成为当前飞秒激光放大领域关注的一个焦点。

本文首先分析了飞秒激光放大器光谱展宽理论, 然后针对飞秒激光放大器的特性, 研制了几种飞秒激光脉冲光谱展宽元件, 用于飞秒激光放大器中。部分实验结果表明, 我们研制的飞秒激光脉冲光谱展宽元件, 能较好地展宽飞秒激光脉冲光谱, 在飞秒激光放大过程中能有效地克服飞秒激光放大器中常见的激光脉冲光谱增益窄化效应。用我们自行研制的自启动飞秒激光放大系统的振荡级输出 28 fs 的种子脉冲, 通过放大器后输出了峰值功率为 1.6 TW、脉冲宽度为 37.5 fs、重复频率为 10 Hz 的超短超强飞秒激光脉冲。

2 飞秒激光放大器光谱展宽理论分析

根据飞秒放大器的工作原理, 在啁啾脉冲放大过程中, 经过放大后的飞秒激光脉冲光谱可表示为

$$I_{\text{out}}(\omega) = I_{\text{in}}(\omega) G^n(\omega) [1 - B(\omega)]^n, \quad (1)$$

其中 $I_{\text{out}}(\omega)$ 为放大后的激光脉冲光谱, $I_{\text{in}}(\omega)$ 为输入的种子激光脉冲的光谱, $G(\omega)$ 是放大系统的增益光谱特性, $B(\omega)$ 则为放大系统损耗的光谱特性。 n 为光脉冲在放大系统中的往返次数。如果不采取特殊的措施, $I_{\text{in}}(\omega)$, $G(\omega)$ 和 $[1 - B(\omega)]$ 都为钟型光谱特性, 放大器输出的激光脉冲光谱便表现出严重的光谱窄化效应, 如图 1 所示。由 (1) 式可以看出, 适当控制种子激光脉冲 $I_{\text{in}}(\omega)$ 的光谱形状, 如设法使种子光脉冲中心波长处的光强弱于两侧的光强, 使其光谱呈马鞍形状, 或在放大器中插入具有特定光谱损耗特性的光谱展宽元件, 使 $B(\omega)$ 的中心波

^{*} 国家自然科学基金(69878020)、天津市自然科学基金(013800311)、国家重点基础研究专项经费(973)、教育部高等学校优秀青年教师教学和科研奖励基金部分资助课题。

E-mail: zhangninghk@263.com

收稿日期: 2001-11-05; 收到修改稿日期: 2001-12-24

长处损耗大于两边的损耗,两种途径都能均衡放大系统的光谱净增益,从而达到抑制脉冲经过放大器时的光谱窄化效应,实现飞秒放大系统的光谱展宽。此外,如能调节种子光谱中心波长与增益介质中心波长有一合适的偏移量,亦能展宽光谱。若放大系统的脉冲展宽器采用正色散系统,那么输入放大器的光脉冲的前沿为光谱的长波部分,后沿为短波部分。因此,其长波部分首先进入放大介质而获取能量得到放大,而短波部分仅得到较小增益,若调整控制种子脉冲的中心波长,使其小于增益介质的中心波长(对于钛宝石激光器,应小于 780 nm)并有一合适的偏移量,则放大后光谱将被展宽,若中心波长长于增益介质的中心波长,则光谱将被窄化^[7]。另外,根据激光器最佳耦合输出的理论,设计具有驼峰状反射光谱特性的输出镜,以此输出镜构成激光器,也可得到具有驼峰形光谱特性的飞秒种子脉冲^[8]。

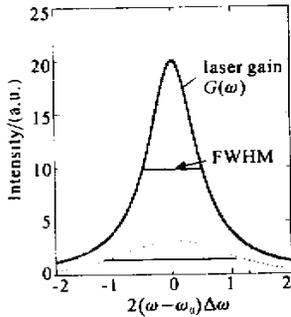


Fig. 1 Gain narrowing effect

3 飞秒激光放大器光谱展宽技术

从飞秒激光放大器光谱展宽理论分析中可知,如能用特殊的激光元件调节好飞秒放大系统的振荡级,使之输出驼峰形种子光谱,或在飞秒激光放大器中插入具有不同光谱损耗特性的光谱展宽元件,对从飞秒激光器(飞秒激光放大器的振荡级)输出的激光脉冲光谱进行调制,使放大器的损耗特性 $B(\omega)$ 呈驼峰状,都可展宽光谱,抑制光谱窄化。实验中我们主要采用了以下四种光谱展宽方法。

3.1 用半导体可饱和吸收镜优化飞秒激光脉冲光谱

我们在实验中发现,适当地调整含有半导体可饱和吸收镜(SESAM)的自启动自锁模钛宝石激光器,控制半导体可饱和吸收镜上激光束腰的大小,结合调整腔内色散棱镜对,可以使输出的飞秒光脉冲的光谱呈驼峰状,如图 2 所示。我们将其输入放大系统,发现对增益变窄有相当的抑制作用。

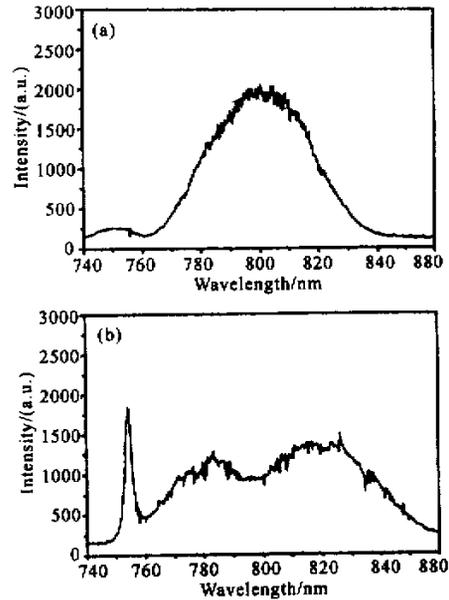


Fig. 2 Spectrum without SESAM (a), and spectrum with SESAM (b)

3.2 法布里-珀罗标准具

利用法布里-珀罗标准具的光学特性,在放大器中插入法布里-珀罗标准具也可展宽光谱。由物理光学可知,间距为 d 的法布里-珀罗标准具,其光谱透过率为

$$T(\nu) = 2 / \left[2 + F + F \cos \left(2\pi \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \right) \right], \quad (2)$$

$$\text{其中, } F = \frac{4r}{(1-r)^2}, \quad \Delta\nu = \frac{c}{2nd \cos\theta}, \quad (3)$$

上面公式中, F 为精细度, $\Delta\nu$ 为自由光谱范围, r 为反射率, n 为标准具的折射率, c 为光速, θ 为光线对标准具的入射角, ν_0 为标准具的中心频率。调节标准具间隔 d , 可方便地调节自由光谱范围, 改变反射率 r , 可以改变光谱的调制深度。间隔为 $5 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$ 的低反射率法布里-珀罗标准具的光谱透过率曲线如图 3 (a) 所示。中心波长定在 800 nm 。当把法布里-珀罗标准具插入放大器的脉冲展宽器前, 可将种子脉冲的光谱调制成驼峰状, 如图 3 (b) 图 3 (c) 所示。

3.3 介质膜滤光片

我们在飞秒钛宝石放大系统中插入一种特殊镀制的介质膜滤光片, 可以对种子脉冲的光谱进行展宽。滤光片具有驼峰状光谱透过特性, 这种滤光片是在玻璃基片上镀制类似吉莱-图努瓦干涉仪的膜层结构, 其光谱透过特性曲线呈驼峰状, 如图 4 (a), 中心波长 790 nm 处较两侧具有较高反射损耗, 而中心波长两边的光谱具有较高透射率。将其放在脉冲展宽器

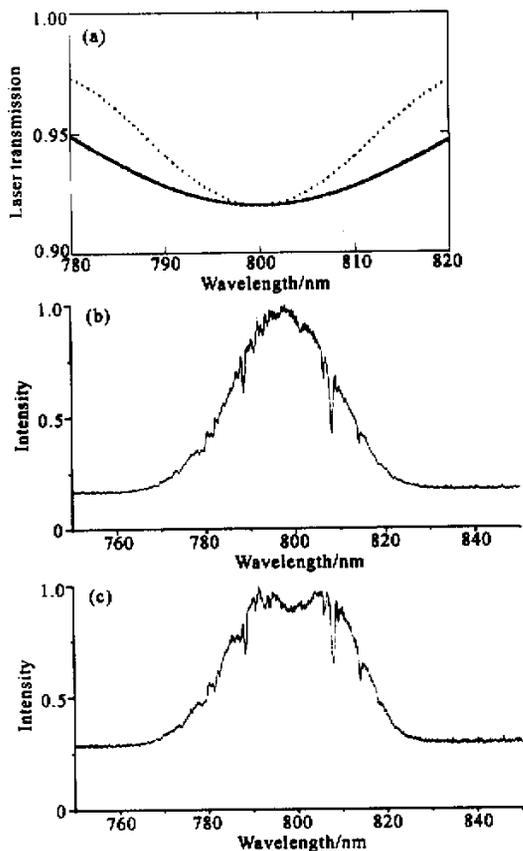


Fig.3 (a) The transmission of the etalon, solid and dot denote $d = 3 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, respectively; (b) Original spectrum; (c) The spectrum with the etalon

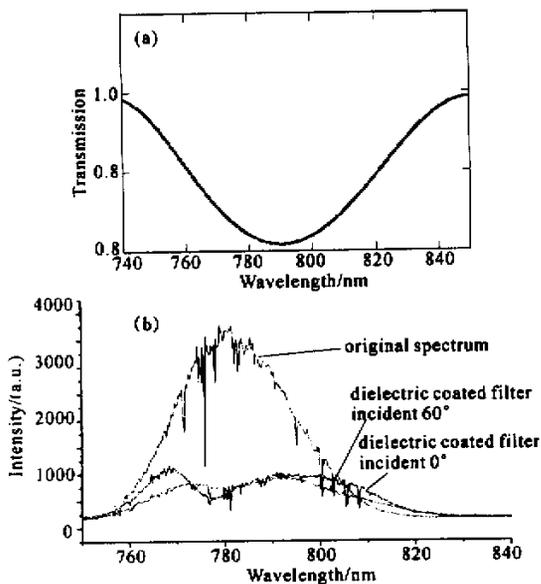


Fig. 4 (a) The transmission of the dielectric-coated filter; (b) The spectrum broadening with the dielectric-coated filter

前的光路中,可对种子脉冲的光谱展宽。光束对滤光片的不同入射角所产生的光谱如图4(b)所示。

3.4 空间无像差光谱调制器

空间无像差光谱调制器是由两个圆弧形切割片组成,如图5(a)所示。在飞秒钛宝石放大系统中,由振荡级输出的种子脉冲,在展宽器的光谱面上会形成一个长椭圆状的光谱带,若平行于椭圆状光谱的长轴,插入空间无像差光谱调制器,将部分光谱峰值切掉,则可将光谱展宽。

精心设计具有不同曲率半径的弧形切割片,用来调制光谱带,可形成不同的效果。图5(b)、图5(c)分别表示直接从放大系统振荡级出来的飞秒激光原始光谱和通过空间调制器后的光谱。从图5(c)中可见,光谱两侧陡直,这是由于所用展宽器的光栅宽度不够,因而切掉了光谱带的两翼;此外,光谱中部产生的许多小尖峰,是因为所用空间光谱调制器切片边缘加工精度不够,边缘表面粗糙而造成了衍射的原因。

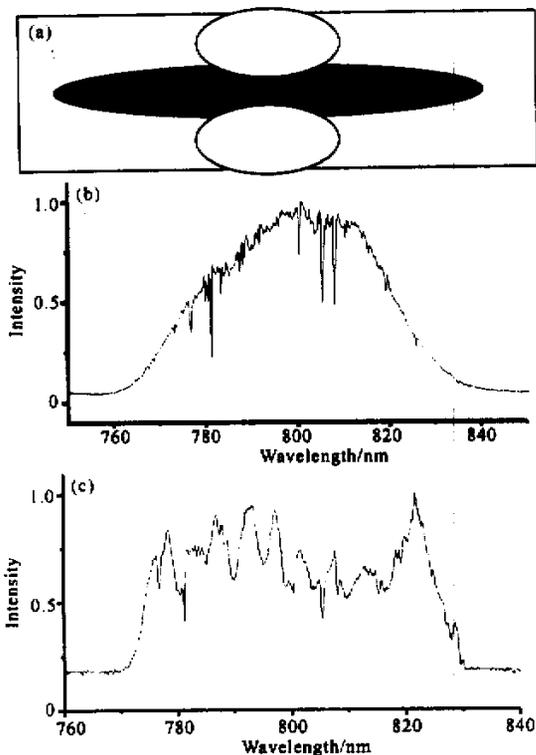


Fig.5 (a) Spectrum broadening by a grating, the ellipses denote the spatial aberrationless spectrum modulator; (b) Femtosecond pulse spectrum from the oscillator; (c) Spectrum of passing through the spatial modulator

4 采用光谱展宽技术的飞秒放大器实验结果

我们自行研制的自启动太瓦级飞秒钛宝石放大系统如图 6 所示。

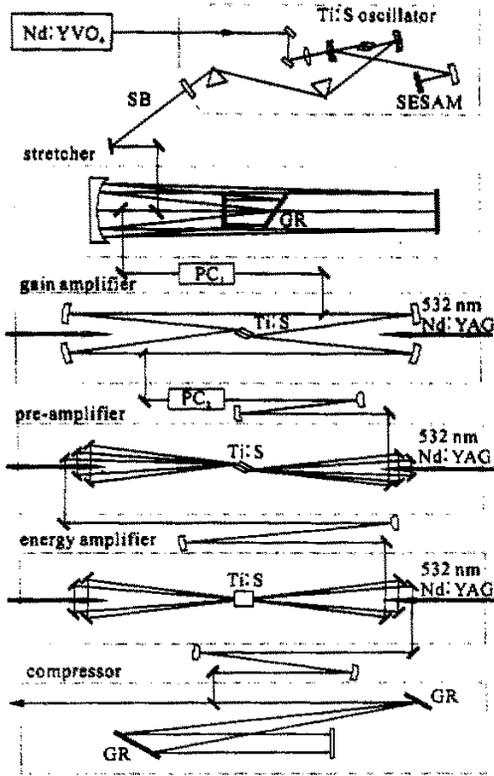


Fig. 6 Schematic diagram of Ti: sapphire amplifying system. Ti: s denotes Ti: sapphire, SESAM is semiconductor saturable absorber mirror, GR denotes grating, PC is Pockel cell, SB is spectrum broadening element

放大器由三级组成,即增益放大级、功率预放大级和功率放大级。我们的增益放大级是一个 8 次通过的多通放大器,放大器由四个相同的凹面反射镜组成。曲率半径为 950 mm,四个凹面镜均镀以带宽为 750 nm~850 nm 的高反介质膜。所用钛宝石晶体为 5 mm×5 mm×10 mm(由上海光机所提供),两端面均以布儒斯特角切割,将晶体置于四个凹面镜的共焦位置。通过调节凹面反射镜和 45°反射输出镜来确定多通次数。抽运源为倍频 Nd:YAG 激光器,波长为 532 nm,重复频率为 10 Hz。几种光谱展宽元件均能将放大系统振荡级输出的飞秒光脉冲光谱调制成中部下凹、具有抑制放大器中的增益光谱窄化效应的驼峰状光谱。

我们以半导体可饱和吸收镜优化展宽的飞秒激

光脉冲的光谱为代表,进行了放大实验研究。通过仔细调试含有半导体可饱和吸收镜的自启动钛宝石飞秒激光器,结合腔内色散补偿棱镜对的调节,使其输出具有驼峰状光谱特性的飞秒光脉冲,如图 2 所示。实验中用脉冲宽度 28 fs 的激光作为种子脉冲,如图 7 所示,被导入放大器,通过放大器放大的光脉冲经压缩器压缩后,被引入光栅光谱仪中进行实时监测,得到的飞秒脉冲光谱如图 8 所示;用我们自行研制的低重复率非共线二次谐波自相关仪对飞秒脉冲进行实时测量,得到的脉冲自相关曲线如图 9 所示,脉宽为 37.5 fs,峰值功率为 1.6 TW,重复频率为 10 Hz。飞秒放大器的增益窄化效应得到了有效抑制。

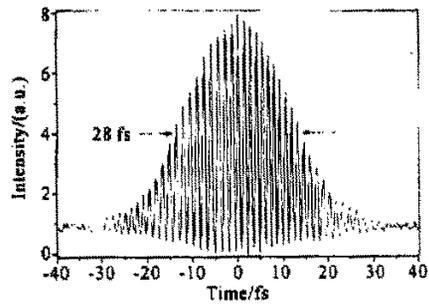


Fig. 7 Interferometric autocorrelation trace of femtosecond seed pulse by the adjustment of SESAM

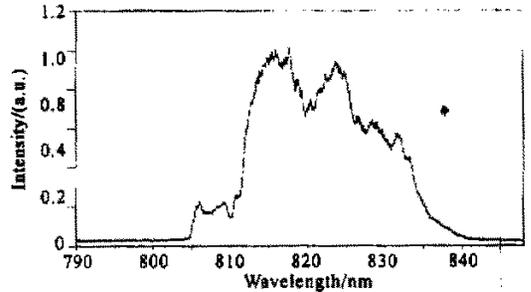


Fig. 8 Output pulse spectrum after amplification

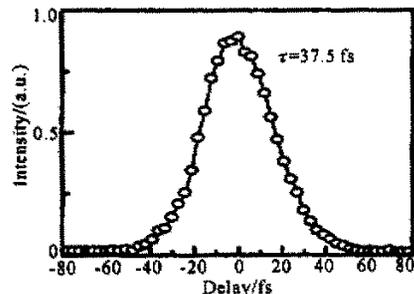


Fig. 9 Single shot autocorrelation trace of amplified and compressed femtosecond pulse

结论 本文报道了采用光谱展宽技术的飞秒激光啁啾脉冲放大器,研制了几种光谱展宽光学元件,并给出了部分实验结果。实验中以半导体可饱和吸收镜激光元件为例,用从半导体可饱和吸收镜优化展宽的飞秒激光脉冲作为种子脉冲送入放大器中进行放大,实现了飞秒钛宝石啁啾脉冲放大系统的光谱展宽,抑制了飞秒激光放大器的增益光谱窄化效应。用从飞秒放大系统振荡级输出的 28 fs 种子光脉冲送入飞秒激光放大器中,经脉冲压缩器压缩后得到了重复频率为 10 Hz、峰值功率为 1.6 TW、脉冲宽度为 37.5 fs 的超短超强飞秒脉冲激光。如能进一步选用脉宽更短的飞秒脉冲,则有望得到小于 30 fs 的太瓦级超短超强飞秒激光脉冲。

参 考 文 献

- [1] Barty C P J, Gordon III C L, Lemoff B E. Multiterawatt 30-fs Ti:sapphire laser system. *Opt. Lett.*, 1994, **19** (18):1442~1444
 [2] Bagnoud V, Salin F. Amplifying laser pulses to the

- terawatt level at a 1-kilohertz repetition rate. *Appl. Phys. (B)*, 2000, **70**(Suppl.) S165~S170
 [3] Perry M D, Pennington D, Stuart B C *et al.*. Petawatt laser pulses. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(2):160~162
 [4] Zhang Weili, Xing Qirong, Wang Qinyue *et al.*. Terawatt femtosecond Ti:sapphire amplifier system. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1996, **16**(4):399~402 (in Chinese)
 [5] Zhang Weili, Wang Qinyue, Xing Qirong *et al.*. Experimental study on supercontinuum spectrum by TW (10^{12} W) femtosecond laser. *Science in China, Series (A)*(中国科学 A 辑), 1997, **27**(2):180~184 (in Chinese)
 [6] Xu Zhizhan, Vignon L, Saviot F *et al.*. Ti:sapphire ultrashort pulse strong laser system at the output 2 TW/45 fs. *Science in China, Series (A)*(中国科学 A 辑), 1997, **27**(7):640~645 (in Chinese)
 [7] Rundquist A, Durfee C, Chang Z *et al.*. Ultrafast laser and amplifier sources. *Appl. Phys. (B)*, 1997, **65**(2):161~174
 [8] Cao Dongmao, Wei Zhiyi, Teng Hao *et al.*. Control the gain-narrowing in femtosecond Ti:sapphire amplifier by shaping oscillator pulse. *Acta Physica Sinica*(物理学报), 2000, **49**(6):1202~1205 (in Chinese)

Ti:Sapphire Femtosecond Laser Amplifier with Spectrum Broadening Techniques

Xing Qirong Zhang Ning Wu Yuansheng Chai Lu Zhang Weili
 Zhang Zhigang Wang Qinyue

(Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, MOE, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 5 November 2001; revised 24 December 2001)

Abstract: Several techniques of femtosecond pulse spectrum broadening in the chirped pulse amplifier of femtosecond laser are reported, and a few spectrum broadening elements are used. The results show that the spectrum of femtosecond pulse laser can be broadened effectively by using the laser spectrum broadening elements, and at some extent the spectrum gain narrowing effect of laser pulse can be effectively suppressed in the femtosecond laser amplifier. The seed pulse output of 28 fs is obtained from the oscillator in the femtosecond amplifying system. After amplification, an ultrashort ultra-intensity laser pulse with the repetition rate 10 Hz, peak power 1.6 TW, pulsewidth 37.5 fs is achieved.

Key words: femtosecond; chirped pulse amplification; spectrum gain narrowing; spectrum broadening