

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^{*}

刘兰琴^{1)2)†} 彭翰生¹⁾ 魏晓峰¹⁾ 朱后华¹⁾ 黄小军¹⁾ 王晓东¹⁾ 周凯南¹⁾
曾小明¹⁾ 王 逍¹⁾ 郭 仪¹⁾ 袁晓东¹⁾ 彭志涛¹⁾ 唐晓东¹⁾

¹⁾ (中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

²⁾ (中国工程物理研究院研究生部, 绵阳 621900)

(2004 年 8 月 4 日收到, 2004 年 11 月 8 日收到修改稿)

超短脉冲激光系统中, 足够宽的带宽是获得超短脉冲的先决条件. 高增益放大器, 特别是再生放大器的增益窄化效应严重制约着输出激光脉冲的时间特性. 将可编程声光色散滤波器(AOPDF)应用到高功率激光系统中, 能有效地克服增益窄化效应. 实验表明, 再生放大器的光谱宽度由未应用前的 27 nm 增加到了 44 nm, 压缩脉冲的宽度减小了一半, 从而使峰值功率提高了一倍.

关键词: 超短脉冲, 增益窄化, 光谱整形, 可编程声光色散滤波器

PACC: 4280W, 0660, 4260F

1. 引 言

超高功率、超高强度激光装置是开展激光聚变“快点火”探索极端条件下物质行为等重大科学研究的基本手段^[1]. 啁啾脉冲放大技术^[2] (chirped pulse amplification, CPA) 的提出极大地促进了高功率超短脉冲激光系统的发展. 到目前为止, 世界各国已经建成或正在建造中的峰值功率大于 100 TW 的激光系统有十多个, 其中具有代表性的是美国利弗莫尔实验室(LLNL)研制成的 1.5 PW 的亚皮秒钽玻璃系统^[3] 和日本原子能研究所(JEARI)建成的 0.85PW 的飞秒掺钛蓝宝石系统^[4], 聚焦功率密度达到 10^{21} W/cm² 量级. 啁啾脉冲放大技术的基本原理是在放大前先将飞秒脉冲展宽成几百皮秒乃至几个纳秒, 使其峰值功率降低 3—5 个数量级, 经过放大后再压缩, 这样一方面可避免在放大过程中由于极高的峰值功率对放大器光学元件的损伤, 提高放大器能量的提取, 另一方面克服了高功率条件下由于介质的非线性效应而使得压缩后的脉冲质量下降. 对于强场物理相关的研究而言, 激光的功率密度是最重要的物理量, 因此希望激光脉冲宽度尽可能短. 获得短

脉冲的核心问题是保持激光光谱的带宽. 然而, 在啁啾脉冲脉冲放大过程中, 由于增益窄化、增益饱和、自相位调制以及光学介质所附加的高阶色散等因素的影响, 将会使输出压缩脉冲的脉宽加宽.

对于掺钛蓝宝石放大器, 减小增益窄化^[5] 的主要办法是引入增益损耗, 使增益曲线在峰值处的损耗大于两翼的损耗, 通常在再生放大腔中加入可调谐空气隙标准具^[6]、薄膜标准具^[7] 以及双折射滤光片^[8] 等元件来补偿增益窄化效应, 或通过蓝移种子脉冲使红端得到较多放大^[9] 而补偿增益窄化. 但是, 这些方法都具有局限性, 前者不仅增加了再生放大腔内的损耗, 而且调节复杂, 不能用于多通放大, 后者除了补偿有限外, 蓝移也降低了种子脉冲的平均功率. Tournois 于 1997 年研制了一种可编程的声光色散滤波器^[10-14] (acousto-optic programmable dispersive filter, AOPDF), 不仅能够提供较大的增益补偿能力, 而且能提供大的色散补偿范围. 在 Tournois 的设计中, AOPDF 基于共线的声光相互作用, 衍射光脉冲的谱振幅由声波信号的强度来控制, 通过调制声波信号的强度可以控制光波的衍射效率, 从而控制光脉冲的频谱幅度. 同时, 声波的频率是时间的函数, 对衍射光脉冲的群延迟进行控制, 则

^{*} 中国工程物理研究院预研基金项目, 中国工程物理研究院行业科学技术预先研究基金(批准号 20030218)资助的课题.

[†] E-mail: ly_ly2008@yahoo.com.cn

可以控制声波和光波在晶体中相互作用的位置,从而达到控制脉冲光谱的群延迟.可编程声光色散滤波器的一个显著特征是,其光谱与色散的补偿都是通过计算机软件的控制来实现的,可视化强,操作简单,且器件结构紧凑,在不同的 CPA 激光系统中使用只需要一些很小的改变.

中国工程物理研究院激光聚变研究中心在国内首次引进一台可编程声光色散滤波器,用于 200 TW 超短脉冲激光装置.实验表明它对增益窄化效应起到了非常好的补偿作用,极大地改善了压缩脉冲的宽度,脉冲宽度由原来的 60 fs 减小到了 30 fs 左右,从而使得输出脉冲的峰值功率提高了一倍.本文首先阐述 AOPDF 的原理,并简单介绍 200 TW 超短脉冲激光装置,然后给出 AOPDF 在高功率激光系统中用于增益窄化补偿的实验结果,并对实验结果进行分析和讨论.

2. AOPDF 的基本原理

AOPDF 的基本原理^[10-12]如图 1 所示.假设一束声波由射频发生器入射到一个声光器件中并以特定速度 V 沿 z 轴传播,则会产生行波式的介质光栅.当光波沿 z 轴入射到声光器件中时,由于光波的速度通常远远大于声波的速度,而且假设超短光脉冲是在皮秒或飞秒量级,因而可以认为光波在此声光器件内遇到的是一个静止的介质光栅.若射频信号是啁啾的,那么声波会将这种啁啾转化在空间上,其空间频率也会是啁啾的.众所周知,两束光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.因此,通过控制声波的频率特性,可以控制光波不同频率成分发生衍射的位置.光栅中某处 z 只有一种声波频率,只有与其匹配的光频率才能在位置 z 被衍射,见图 1.入射光波的光谱从 ω_a 到 ω_b ,初始模式为模式 1.每个在 ω_a, ω_b 之间的频率 ω ,在声波光栅中遇到与其相位匹配的空间频率之前,都要传输一定的距离,在位置 $z(\omega)$,模式 1 的部分能量被衍射成模式 2,随后以模式 2 传输.以模式 2 离开器件的脉冲将由不同位置衍射的所有光谱成份组成.通过调整声波的振幅形状,就能改变每个相位匹配的光谱成份的衍射效率,或者,通过调整声波的频率,就能调整每个光谱成份在晶体中发生衍射的纵向位置以调谐相位色散.

AOPDF 的光输出 $E_{out}(t)$ 是输入光 $E_{in}(t)$ 和电

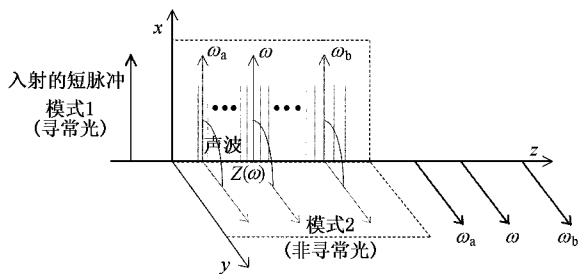


图 1 AOPDF 的原理图

信号 $S(t)$ 的函数,如文献[10,13]给出的,它正比于输入光和一定比例的电信号的卷积:

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

其中比例因子

$$\alpha = \Delta n(V/c) \quad (2)$$

是声波速度与光波速度的比值乘以寻常波和非寻常波之间的折射率差. α 是声波频率与光波频率的比值,关系式(1)在频域可写成:

$$E_{out}(\omega) \propto E_{in}(\omega) S(\alpha\omega), \quad (3)$$

可以看到,衍射波信号是入射波信号与声波信号的卷积,是声波信号对入射波信号的可编程的滤波结果.

3. 200TW 激光系统与增益窄化补偿实验布局

中国工程物理研究院激光聚变研究中心正在建造中的百太瓦超短脉冲激光装置具有三级输出:5 TW、30 TW 和大于 200 TW,每级都配有靶室,可以满足不同物理实验需求,见图 2.其中,5 TW 台面激光系统的种子光源来自于商用的钛宝石飞秒振荡器(C20, Femtolasers, GmbH),输出 75 MHz 的锁模脉冲序列,光谱宽度约 55 nm.然后光脉冲通过一个八通的 Offner 构型展宽器,光栅刻线密度为 1200 线/mm,将激光脉宽展宽至约 450 ps.然后被展宽后的脉冲进入再生放大器、多通预放大器、多通主放大器进行充分放大,放大脉冲的能量可达 300 mJ.输出脉冲可以通过光栅压缩器压缩为 50 fs 到 60 fs,用于物理实验打靶;也可直接作为 30 TW 的前级信号进行放大.30 TW 放大系统,采用一块 $\phi 30$ mm 的钛宝石晶体作为放大介质,它由 6 台 10 Hz Nd:YAG 激光器作为抽运光源对其双面抽运,进行四程离轴放大,放大后的脉冲能量范围为 1.5—2.5 J.为充分有效的提取能量,30 TW 采用了超高斯全像传递四程放大技术.

200 TW主放大器由一块 $\phi 80\text{ mm}$ 的钛宝石晶体作为放大介质,抽运光由新建的钕玻璃激光系统提供,绿光输出能量为 80 J 到 90 J,对晶体进行双面抽运.放

大后的脉冲能量可达 20 J—30 J,目前已经获得大于 10 J 的能量,在没有使用 AOPDF 时压缩脉冲宽度大于 60 fs.

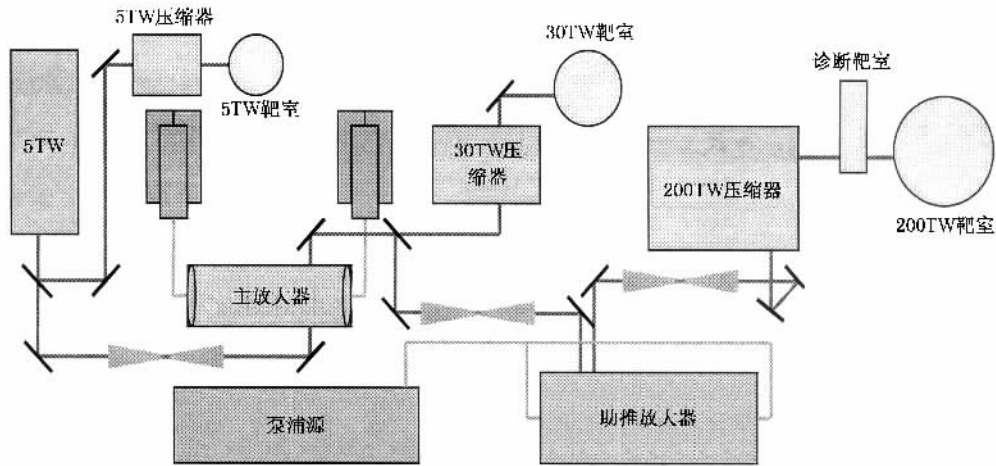


图 2 200TW 超短脉冲激光装置示意图

在 CPA 激光系统中,增益窄化效应存在于激光放大的整个过程中,是影响激光放大器输出脉冲质量的重要因素.在放大过程中,由于增益曲线是近高斯曲线分布,使得光脉冲在多次经过放大器放大后,靠近增益曲线中心频率的放大高于两侧其他频谱成分,输入光脉冲中心波长得到的放大远比偏离这一波长的其它光谱成份大,从而形成光谱变窄.增益变窄与放大器的发射线宽和输入的激光谱宽有关,不同谱宽的信号经放大后其增益变窄的程度也不一样.另外,它还与放大器的增益倍数有关.在啁啾脉冲放大系统中,再生放大器的增益通常高达 10^6 倍,增益窄化效应最为严重.因而 AOPDF 主要用来补偿再生放大器的增益窄化效应. AOPDF 在啁啾脉冲放大系统中的应用如图 3 所示,其工作晶体置于飞秒振荡器与展宽器之间,就象在光路中插入一个透射元件一样,在完成光路的准直调节之后,所有的工作将通过计算机软件来完成.计算机控制射频信号发生器产生射频信号,入射光波和声波在晶体中满足相位匹配条件的位置发生相互作用,若不同位置的声波功率不同,则衍射效率不同,从而产生不同形状的输出光脉冲.

通过计算机合理设置 AOPDF 的参数,使激光脉冲与声波发生相位匹配的相互作用后,远离中心波长的光谱成份的衍射效率高于中心波长处的衍射效率,即光谱中心位置产生一个适当宽度和适当深度的凹陷^[14],见图 4.则光脉冲通过再生放大器后将

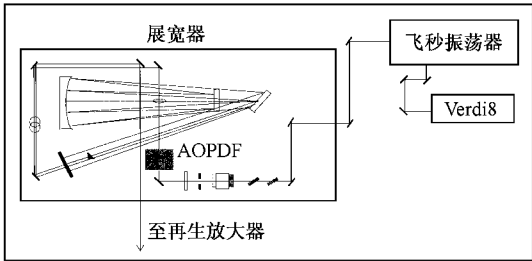


图 3 实验布局图

克服增益窄化效应而保持较宽的光谱,最后通过压缩器后获得更窄的压缩脉冲. AOPDF 可以工作在连续波状态或脉冲状态,一般以一个与激光脉冲同步的 TTL 信号来外触发 AOPDF.一般地 AOPDF 使用的是 TeO_2 晶体,其损伤阈值为 0.1 GW/cm^2 ,为了防止损伤晶体,入射光的平均功率须低于声波峰值功率的 $1/3$.

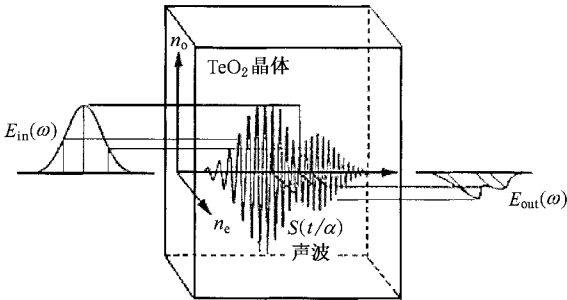


图 4 AOPDF 产生调制函数的示意图

4. 实验结果

可编程声光色散滤波器补偿增益窄化的实验结果见图 5. 其中, 振荡器输出的种子脉冲的光谱宽度为 54 nm(图 5 点线). 当激光系统中没有应用 AOPDF 时, 由于再生放大器强烈的增益窄化效应, 从再生放大器输出的光谱宽度只有 27 nm(图 5 虚线), 远小于种子脉冲的光谱, 放大后的脉冲通过压缩器压缩后, 脉冲宽度大于 60 fs. 当在再生放大器前应用 AOPDF 对种子脉冲的光谱进行预调制, 通过编程 AOPDF 的参数, 光谱调制为 6 阶超高斯轮廓, 宽度为 100 nm, 中心处形成一个高斯型的凹陷, 如图 6. 经过调制的激光脉冲进入再生放大器进行放大后, 对增益窄化效应起到了很好的补偿效果, 保持了较宽的光谱宽度, 再生输出的光谱宽度为 44 nm(图 5 实线), 明显大于没有应用 AOPDF 时的光谱宽度.

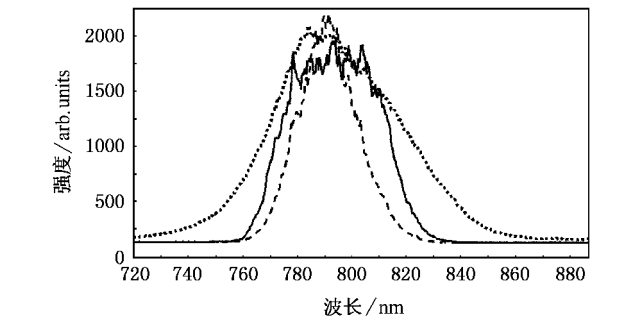


图 5 应用 AOPDF 补偿增益窄化实验测得光谱(···为振荡器输出光谱 54 nm;---为再生放大器输出光谱 27 nm(未应用 AOPDF);—为经过 AOPDF 补偿后的光谱 44 nm)

另外, 我们还利用 AOPDF 设置了二阶、三阶色散, 以对放大过程的色散进行预控制. 通过增益窄化补偿以及色散控制, 最终在压缩后获得了小于 30 fs 的脉冲宽度, 从而使峰值功率提高了一倍. 关于色散控制的详细研究是我们下一部将要进行的工作.

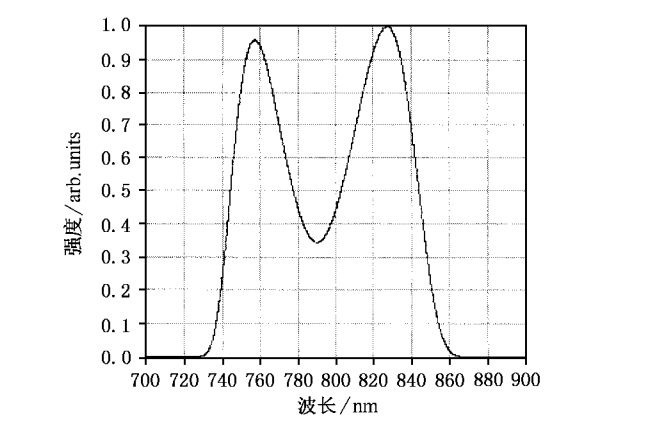


图 6 光谱调制曲线

对于不同的啁啾脉冲激光系统, 可以对 AOPDF 的参数, 如其脉冲宽度、凹陷的位置、深度及宽度进行不同的设置.

5. 结 论

AOPDF 不仅可以通过对脉冲光谱振幅的调制来完成 CPA 系统中的增益窄化补偿, 还可以通过对位相的调制对放大过程中引入色散进行补偿, 以获得最窄的压缩脉冲. 与其它补偿增益窄化的技术相比, 标准具只能对光谱进行选择性的滤波而不能对位相进行控制, 液晶光阀受限于其动态范围很小, 而 AOPDF 可以通过编程实时调制脉冲的光谱和位相, 且不存在动态范围的限制. 在本系统中, 应用 AOPDF 后, 再生放大器输出的光谱宽度达 44 nm, 远大于没有 AOPDF 时的 27 nm, 克服增益窄化的效果非常明显. AOPDF 在高功率超短脉冲激光装置中起到了非常重要的作用.

附 在本文初审期间, 由中国工程物理研究院激光聚变研究中心研制的百太瓦级超短脉冲激光装置已经获得了 286 TW 的输出峰值功率, 脉宽小于 30 fs, 聚焦功率密度大于 10^{20} W/cm².

[1] Zhang J 1997 *Physics* **26** 643 (in Chinese) [张 杰 1997 *物理* **24** 643]

[2] Strickland D and Mourou G 1985 *Opt. Comm.* **56** 219

[3] Perry M D *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 160

[4] Aoyama M *et al* 2003 *Opt. Lett.* **28** 1594

[5] Cao D M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **6** 1202 (in Chinese) [曹东茂等 2002 *物理学报* **6** 1202]

[6] http://physics.indiana.edu/~p451_s03/experiments/Fabryperot.pdf

[7] Barty C P J, Gordon III and C L Lemoff B E 1994 *Opt. Lett.* **19** 1442

[8] <http://www.nsu.ru/srd/lls/english/amet-bft.htm>

[9] Chambaret J P *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 1921

[10] Tournois P 1997 *Opt. Commun.* **140** 245

[11] Verluise F, Laude V, Huignard J P and Tournois P 2000 *J. Opt.*

Soc. Am. B **17** 138

- [12] Wei X F *et al* 2004 *Laser & Optoelectronics Progress* **40** 1 (in Chinese) [魏晓峰等 2004 *激光与光电子学进展* **40** 1]

[13] Verluise F, Laude V, Cheng Z, Spielmann Ch and Tournais P 2000 *Opt. Lett.* **25** 575

[14] Pittman M *et al* 2002 *Appl. Phys. B* **74** 529

Compensation of gain narrowing by using AOPDF in high-power ultra-short pulse laser systems^{*}

Liu Lan-Qin^{1)2)†} Peng Han-Sheng¹⁾ Wei Xiao-Feng¹⁾ Zhu Qi-Hua¹⁾ Huang Xiao-Jun¹⁾ Wang Xiao-Dong¹⁾
Zhou Kai-Nan¹⁾ Zeng Xiao-Ming¹⁾ Wang Xiao¹⁾ Guo Yi¹⁾ Yuan Xiao-Dong¹⁾ Peng Zhi-Tao¹⁾ Tang Xiao-Dong¹⁾

¹⁾ (Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

²⁾ (Graduate Department, CAEP, Mianyang 621900, China)

(Received 4 August 2004 ; revised manuscript received 8 November 2004)

Abstract

Laser pulse durations are dominated by the spectral bandwidths in chirped pulse amplification systems. Therefore, gain narrowing during amplification is one of the most important factors that limits the minimal pulse durations of compressed pulses in high-power ultrashort-pulse laser systems. The gain narrowing can be compensated by applying an acousto-optic programmable dispersive filter (AOPDF) to the laser system. Here we present the experiments and results with an AOPDF for the 200-TW Ti : sapphire laser. The spectral bandwidth is increased from the original 27 nm to 44 nm. The pulse duration correspondingly is decreased from 60 fs to 30 fs and thus the output pulse power is doubled.

Keywords : ultra-short pulse laser, gain narrowing, spectral shaping, acousto-optic programmable dispersive filter (AOPDF)

PACC : 4280W, 0660, 4260F

^{*} Project supported by the Pre-research Foundation of China Academy of Engineering Physics, and the Science and Technology Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 20030218).

[†] E-mail ly-ly2008@yahoo.com.cn