

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0166-03

声光光谱色散滤波器对超短脉冲光谱 主动控制技术研究

黄小军, 魏晓峰, 彭翰生, 王晓东, 袁晓东, 刘兰琴, 曾小明, 周凯南, 郭仪, 林东晖, 张小民

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳, 621900)

摘要 报道了声光光谱色散滤波器(AOPDF)对啁啾脉冲放大系统中脉冲光谱整形及控制技术的实验研究。声光光谱色散滤波器基于共线的声光相互作用,通过控制声光相互作用的位置,产生不同光谱的位相延迟。由于声波信号的幅值决定了光谱的散射效率,因此控制声波信号的振幅可以获得光波频谱的幅值整形。将声光光谱色散滤波器应用到啁啾脉冲放大系统中,可以很好克服增益窄化效应,使放大后脉冲的光谱保持足够的宽度,最终获得更窄脉宽的压缩脉冲。

关键词 光谱学; 声光光谱色散滤波器; 光谱整形; 增益窄化; 啁啾脉冲放大; 脉冲宽度

中图分类号 TN713.1

文献标识码 A

Active Control of Ultrashort Pulse Spectrum by Acousto-Optic Programmable Dispersive Filter

HUANG Xiao-jun, WEI Xiao-feng, PENG Han-sheng, WANG Xiao-dong,
YUAN Xiao-dong, LIU Lan-qin, ZENG Xiao-ming, ZHOU Kai-nan,
GUO Yi, LIN Dong-hui, ZHANG Xiao-min

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract It is reported that an acousto-optic programmable dispersive fiber (AOPDF) is applied to an ultrashort pulse in the CPA laser system. The AOPDF is based on a collinear acousto-optic interaction. The acoustic frequency is a variable function of time and provides control over the group delay of the diffracted optical pulse. Simultaneously, the spectral amplitude of the diffracted optical pulse is driven by the acoustic signal's intensity. The AOPDF permits precompensation for gain narrowing through amplitude shaping before amplification. The spectra of the amplified pulse keeps sufficient width after compression, and the ultra-short pulse can be obtained.

Key words spectroscopy; acousto-optic programmable dispersive filter (AOPDF); spectra shaping; gain narrowing; chirped pulse amplification; pulse duration

1 引言

在啁啾脉冲放大(CPA)系统中,钛宝石自锁模振荡器通常可以输出约 10fs 的近变换极限脉冲,然后通过后续的放大链,即脉冲展宽、多级放大和最后的脉冲压缩。压缩后的脉冲通常比最初振荡器输出的脉冲有所加宽,甚至出现脉冲本底,降低脉冲的信噪比。研究发现,这是由于放大过程中的增益窄化效应^[1]及脉冲通过光学介质时所附加的高阶位相不能补偿所致。P. Tournois 等^[2-4]设计的声光光谱色散滤波器(APODF)可以解决这一问题。声光光谱色散滤波器可以提高较大的色散量来预补偿放大过程中的附加色散,同时还可以对光谱的振幅进行整形。

声光光谱色散滤波器基于共线的声光相互作用

可以获得最大的相互作用长度。声波频率随时间而变,即声波是啁啾的,通过调制声波的啁啾频率,则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。同时,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。

2 声光光谱色散滤波器的理论分析

声光光谱色散滤波器的工作原理如图 1 所示,射频信号通过转换器转换成声波进入声光晶体 TeO₂,声波以速度 V 沿晶体 z 轴传播。由于光脉冲的速度远远大于声波速度,相对于光波而言,声波是静止的,声波使晶体介质的介电张量扰动并在晶体

中形成一个固定的介质光栅。声光晶体 TeO_2 是双折射晶体, $n_o < n_e$ 。为了描述方便, 当光波的偏振态沿 O 轴传播时, 称为模式 1, 沿 E 轴传播时, 称为模式 2。设声波是一个啁啾信号, 则其空间频率也是啁啾的。当声波与两模式光波位相匹配时, 则两模式的光波有最大的耦合效率。每一个光波频率 ω 在遇到位相匹配的空间频率之前, 都会在晶体中传输一定的距离, 在位置 $z(\omega)$, 光波与声波耦合, 模式 1 光波的部分能量衍射进入模式 2, 光波沿 E 轴偏振, 然后离开晶体。由于不同光频率在不同位置发生衍射, 因此它们离开晶体时有不同的时间延迟。位置 $z(\omega)$ 处的声波功率决定光波的衍射效率, 最终决定了输出光频率的振幅大小。

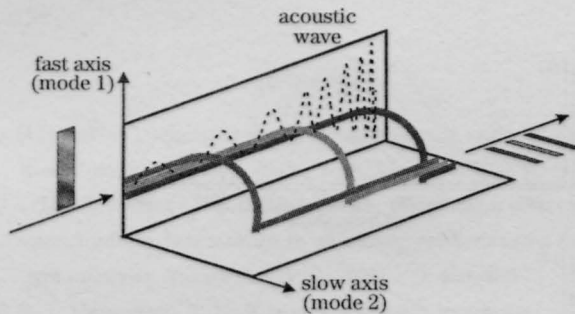


图 1 声光光谱色散滤波器原理示意图
Fig.1 Schematic of an AOPDF principle

实际上声光相互作用满足能量守恒和动量守恒

$$\omega_2 = \omega_1 + \Omega_{ac} \quad (1)$$

$$n_2 \omega_2 / c = n_1 \omega_1 / c + K_{ac} \quad (2)$$

式中, ω_k 代表光频率, n_k 代表晶体折射率, $k=1$ 或 2 ; Ω_{ac} 代表声波频率, K_{ac} 代表声波波矢; c 为真空中的光速。由于声波频率远远小于光波频率, 因此 $\omega_2 \approx \omega_1$ 。

光频率通过晶体的传输时间为

$$\tau_g(\omega) = \frac{z(\omega)}{v_{g1}(\omega)} + \frac{L-z(\omega)}{v_{g2}(\omega)} \quad (3)$$

其中, L 为晶体长度, $z(\omega)$ 为声光相互作用的位置, v_g 为晶体中的光速。

晶体中的声波信号 S 为

$$S(z) = A(z) \cos \left[\int_0^z K_{ac}(z) dz \right] \quad (4)$$

$A(z)$ 为声波的振幅。

通过声光晶体输出的光信号 E_{out} 正比于入射光信号 E_{in} 与声波信号的卷积

$$E_{out}(t) \propto E_{in}(t) \otimes S(t/\alpha) \quad (5)$$

转换到频域:

$$E_{out}(\omega) \propto E_{in}(\omega) \times S(\alpha\omega) \quad (6)$$

其中, $\alpha = \Delta n(V/c) = (n_e - n_o)(V/c)$, 代表两个模式下声速与光速比值之差。

3 实验布局

声光光谱色散滤波器在啁啾脉冲放大系统中的应用如图 2 所示。声光光谱色散滤波器置于飞秒振荡器与展宽器之间, 可用于对后续放大过程中的增益窄化效应及高价色散进行补偿。该啁啾脉冲放大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), 该激光器输出 75MHz 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, 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进行充分放大, 输出脉冲能量约 2 mJ。之后进入预放大器进行放大, 放大脉冲的能量可达 30 mJ。再生放大器与预放大器共用一台 10 Hz 重复频率的 YAG 激光器作为抽运源, 该激光器输出 220 mJ 的倍频光按一定比例分光分别抽运再生放大器及预放大器。最后脉冲通过光栅压缩器进行压缩。

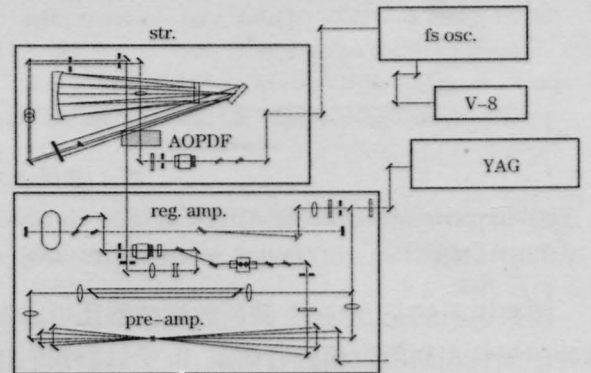


图 2 实验布局
Fig.2 Experiment set-up

入射光垂直于晶体前表面入射, 并要求沿晶体 O 轴偏振(即垂直偏振), 在晶体中与声波相互作用后, 光波将沿晶体 E 轴偏振(即水平偏振), 传输波矢也将与入射光偏离 1° , 如图 3 所示。没有与声波作

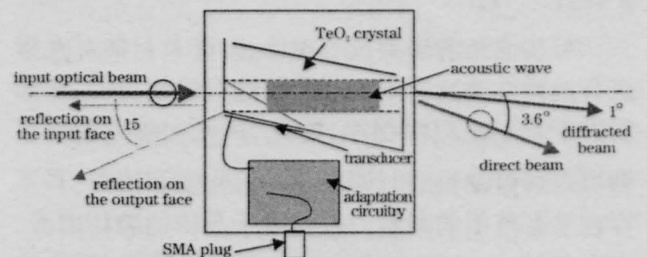


图 3 晶体上的光束方位及偏振
Fig.3 Beam orientation and polarization on the crystal

用的光波保持偏振态不变,并与入射波矢偏离 3.6° 离开晶体。

声光光谱色散滤波器可以工作在连续波状态或脉冲状态,为了减小晶体上的声波功率,一般以一个与激光脉冲同步的 TTL 信号来外触发声光光谱色散滤波器。

3 实验结果及分析

当啁啾脉冲放大系统中没有应用声光光谱色散滤波器时,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不到 30 nm [图 4(c)],远小于种子脉冲的光谱 55 nm [图 4(a)]。当放大后的脉冲通过压缩器进行压缩后,仅能获得约 60 fs 的压缩脉冲。而当我们在再生前应用声光光谱色散滤波器

后,则可以对种子脉冲的光谱进行预调制。通过设置声光光谱色散滤波器,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凹陷。则种子脉冲通过声光光谱色散滤波器,声光相互作用,输出的光谱形状如图 4(b)所示,在中心波长处也形成了一个适当深度和适当宽度的凹陷。根据每个啁啾脉冲放大激光系统的具体情况,可以对超高斯轮廓及凹陷的位置、深度、宽度作不同设置。经过调制后的种子光进入再生放大器进行放大,则可以很好地克服增益窄化效应的影响,保持较宽的光谱宽度,如图 4(d)所示,再生输出的光谱宽度为 47 nm ,明显大于没有声光光谱色散滤波器时的光谱宽度 30 nm 。压缩后获得小于 40 fs 的脉冲宽度。

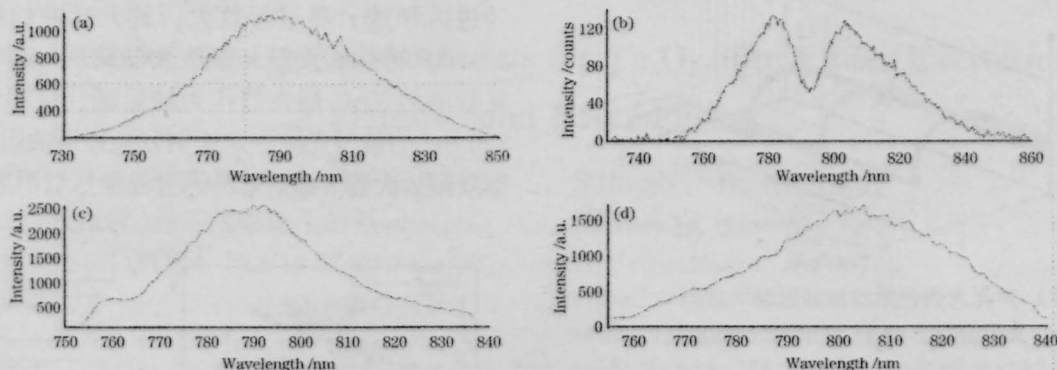


图 4 使用 AOPDF 的实验结果对比

Fig.4 Experiment results by AOPDF applied. (a) Spectrum of Ti:Sapphire fs oscillator; (b) Modulated spectrum by AOPDF before Reg.; (c) Output spectrum from Reg. without AOPDF; (d) Output spectrum from Reg. with AOPDF

需要说明的是,声光光谱色散滤波器还可以对脉冲的线性和高阶位相进行调制,由于目前我们还没有测量光谱位相的工具,故不能对调制后的脉冲位相进行测量,只能通过单次自相关仪测量脉冲宽度,如果自相关信号的主峰前后有旁瓣,则说明脉冲的高阶位相没有补偿完全,需要改变高阶位相的参量,以获得最佳的压缩脉宽。

4 结 论

与其他光谱调制技术相比,标准具只能对光谱进行选择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,因此,声光光谱色散滤波器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,仅受限于晶体的破坏阈值。在本系统中,应用声光光谱色散滤波器后,再生放大器输出的光谱宽度达 47 nm ,远大于没有声光光谱色散滤波器时的 30 nm ,克服增益窄化的效果非

常明显。

致谢:感谢法国 FASTLITE 的工程师 P. Tournios 在安装声光光谱色散滤波器时的指导。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 P. Tournios, Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **140**: 245-249
- 3 F. Verluise, V. Laude, J.-P. Huignard et al. Arbitrary dispersion control of ultrashort optical pulses with acoustic waves[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(1):138-145
- 4 F. Verluise, V. Laude, Z. Cheng et al. Amplitude and phase control of ultrashort pulses by use of an acousto-optic programmable dispersive filter: pulse compression and shaping[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(8): 575-577