

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0149-03

# 声光可编程色散滤波器用于飞秒脉冲压缩的研究

赵华军, 章若冰, 马晶, 张志刚, 王清月

(天津大学精密仪器与电子工程学院超快激光研究室 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 介绍了一种在飞秒啁啾放大系统中, 用于克服增益窄化和实现脉冲压缩或脉冲整形的新型振幅和位相调制补偿器件——声光可编程色散滤波器(AOPDF), 并数值模拟了用LiNbO<sub>3</sub>作声光晶体的该器件在压缩飞秒脉冲时的工作特性。

**关键词** 脉冲压缩; 声光可编程色散滤波器; 相位匹配; 啁啾脉冲放大

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

## Study of an Acousto-Optic Programmable Dispersion Filter for the Femtosecond Pulse Compression

ZHAO Hua-jun, ZHANG Ruo-bing, MA Jing, ZHANG Zhi-gang, WANG Qing-yue

(School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University; Key Laboratory of Optoelectronic Information and Technical Science, EMC, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Acousto-optic programmable filter (AOPDF) as an amplitude and phase modulator is introduced. It can compensate in real time for dispersion and precompensate for gain narrowing in femtosecond chirp-pulse amplifier (CPA). Numerical simulation shows the characteristic of the AOPDF in the femtosecond pulse compression which utilizes the LiNbO<sub>3</sub> crystal as an acousto-optic crystal.

**Key words** pulse compression; AOPDF; phase-matching; chirp-pulse amplifier

### 1 引言

飞秒脉冲技术发展至今,从染料激光器到掺钛蓝宝石等固体飞秒激光器,不仅脉冲能量越来越大,脉冲宽度也越来越窄。对于一个飞秒脉冲振荡或放大系统,如果具有足够宽的光谱,则总体色散量越小,就越有可能获得更窄的脉冲。因此,色散补偿是获得窄脉宽的一项关键技术。传统的色散补偿器件有光栅对,棱镜对,GT干涉仪以及啁啾镜等。飞秒激光系统在运转过程中色散是会变化的,而上述这些器件不可能实时地适应这种变化。可编程色散滤波器的出现改变了这种状况,它可通过程序控制脉冲的各阶色散,提供色散补偿。目前,基于4f系统的液晶空间光调制器自适应脉冲压缩或整形已经广泛应用,用这种光调制器已经获得了3.4 fs的光脉冲<sup>[1]</sup>。而声光可编程色散滤波器(AOPDF)是另一种类型的可编程色散滤波器件。这种声光器件可以直接插入光路不需要4f系统,避免了像差以及液晶空间间隔带来的工作死区,并且它可以同时提供频域振幅和位相调制,用于飞秒啁啾放大系统中还可

抑制增益窄化<sup>[2]</sup>。

用作AOPDF的声光介质的晶体可以是LiNbO<sub>3</sub>和TeO<sub>2</sub><sup>[3]</sup>。本文将深入讨论AOPDF色散补偿的基本原理,并数值模拟以LiNbO<sub>3</sub>作为AOPDF声光晶体补偿放大系统色散和增益窄化的工作特性。

### 2 原理

AOPDF是利用不同波长、不同模式的光脉冲成分在介质(通常为单轴晶体)中传播速度不同而产生所需要的群速度延迟,其最主要的理论依据是同向耦合模理论<sup>[4]</sup>。若入射光圆频率 $\omega_1$ ,波矢量 $k_1$ ,声波圆频率 $\Omega$ ,波矢量为 $K$ ,出射光圆频率 $\omega_2$ ,波矢量为 $k_2$ ,由耦合波分析<sup>[5]</sup>可写出能量守恒、动量守恒表达式:

$$\omega_2 = \omega_1 + \Omega \quad (1)$$

$$K = k_2 - k_1 \quad (2)$$

由于 $\omega_1 \gg \Omega$ ,故令 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ,可认为声光栅相对光脉冲是静止的,即忽略了多普勒频移,认为光波经过声光晶体之后波长不变,只有模式发生变化,则

基金项目: 国家重点基础研究项目(1999075201)资助课题。

作者简介: 赵华军(1978-),男,天津大学硕士研究生,主要从事飞秒及其相关课题的研究。E-mail: ajun\_zhao@eyou.com

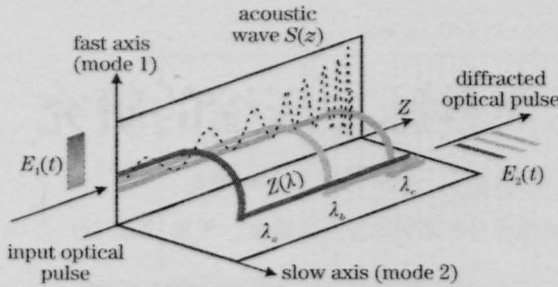


图 1 AOPDF 工作原理图

Fig.1 Schematic representation of the AOPDF

(2)式相位匹配条件可写成

$$K(\omega) = k_2(\omega) - k_1(\omega) = [n_1(\omega) - n_2(\omega)]/c$$

其中  $n_1, n_2$  分别为两种正交模式光波的折射率,令  $\Delta n = |n_1(\omega) - n_2(\omega)|$ ,若  $c$  为光波在真空中的光速,  $V$  为声波在媒质中的声速,则(2)式可改写成:

$$\alpha = \Omega/\omega = \Delta n(V/c) \quad (3)$$

以  $\text{LiNbO}_3$  为声光晶体,  $V=7.4 \text{ km/s}$ ,  $\alpha$  可近似认为常数,约为  $1.2 \times 10^{-6}$ ,这意味着对于光谱宽度内的每一个频率  $\omega$ ,都对应一个声波频率  $\Omega$  来满足相位匹配条件,使该频率光波模式改变(特殊情况下 o 光变成 e 光)。光脉冲经过声光晶体模式变换前后,群速度分别为  $v_{g1}(\omega), v_{g2}(\omega)$ ,若变换位置为  $z(\omega)$ ,晶体长  $L$ ,则群延迟可写成:

$$\tau(\omega) = \frac{z(\omega)}{v_{g1}(\omega)} + \frac{L-z(\omega)}{v_{g2}(\omega)} \quad (4)$$

由于群速度  $v_g(\omega) = c/[n(\omega) + \omega n'(\omega)]$ ,定义

$$\Delta v_g(\omega) = [1/v_{g1}(\omega) - 1/v_{g2}(\omega)]$$

相速度  $v_p(\omega) = c/n(\omega)$ ,  $\Delta v_p(\omega) = c/[n_1(\omega) - n_2(\omega)]$ ,则对于给定的群延迟分布  $\tau(\omega)$ ,可以求出各频率相位匹配的位置:

$$z(\omega) = \Delta v_g(\omega) [\tau(\omega) - L/v_{g2}(\omega)] \quad (5)$$

由(2)式相位匹配条件可写成:

$$K[z(\omega)] = \omega/\Delta v_p(\omega) \quad (6)$$

联合(5)式,(6)式可求出沿声光作用方向的声波波矢  $K(z)$ 。则声波的瞬时频率可表示成  $\Omega(t) = VK(v_i)$ ,而产生该啁啾声波的射频信号:

$$s(t) = A(t) \cos \left[ \int_0^t \Omega(t) dt \right] \quad (7)$$

故由群延迟求解射频信号的过程为:

$$\tau(\omega) \rightarrow z(\omega) \rightarrow K(z) \rightarrow \Omega(t) \rightarrow s(t) \quad (8)$$

### 3 脉冲压缩的数值模拟

当  $\tau(\omega) = T$  为常数,且满足  $L/v_{g2}(\omega) \leq T \leq L/v_{g1}(\omega)$  时,可补偿声光晶体本身的色散。取  $L=2.5 \text{ mm}$  的

$\text{LiNbO}_3$  作为声光晶体,从图 2 可以看出,补偿带宽大于  $200 \text{ nm}$ 。若要提供负色散,只要所需的群延迟曲线  $\tau(\omega)$  在界限  $\tau_2(\omega)$  和  $\tau_1(\omega)$  内都能完全补偿,如图中的曲线 1~3。增加晶体长度,可增加两个光波模式的延迟,从而增加可补偿色散的范围。但是晶体长度增加是有限的,所以 AOPDF 用在需要补偿大的群速度延迟的情况下,补偿带宽会变窄,如图 2 中的曲线 2。因此,宽带 AOPDF 适合补偿较小量色散。若系统色散量较大,则可与其它色散补偿器件组合应用。

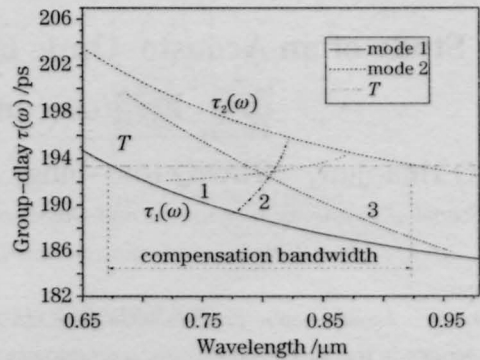


图 2 色散补偿带宽的确定,  $\tau_1(\omega)$  和  $\tau_2(\omega)$  分别为模式 1 和 2 光脉冲通过整个晶体的群延迟

Fig.2 Determination of the compensation bandwidth.  $\tau_1(\omega)$  and  $\tau_2(\omega)$  are the group delay on modes 1 and 2, respectively

若一往返次数为 15 次的再生放大系统,钛宝石晶体长  $9 \text{ mm}$ ,假设入射种子脉冲为中心波长  $800 \text{ nm}$ ,脉宽  $10 \text{ fs}$  的傅里叶变换极限高斯脉冲。将 AOPDF 的声光晶体插入放大系统的前端,没有声光作用时,  $\text{LiNbO}_3$  作为系统内与钛宝石晶体、普克尔盒中的  $\text{KD}^* \text{P}$  晶体 ( $30 \text{ mm}$ )、格兰棱镜 ( $15 \text{ mm}$ )、法拉第旋转器中的 TGG 晶体 ( $13 \text{ mm}$ ) 类似的色散源,当调整普通 Martinez 展宽器和压缩器的参数,

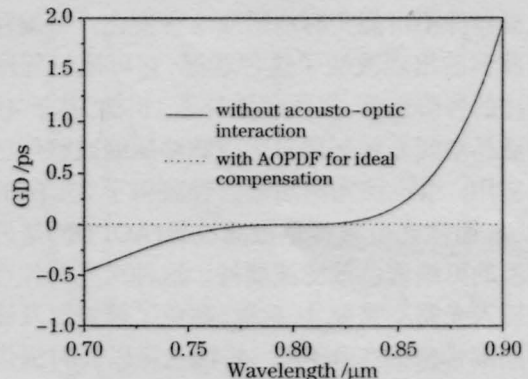


图 3 AOPDF 色散补偿前后 CPA 系统的群延迟曲线 Fig.3 The group delay of the CPA system with and without dispersion compensation of the AOPDF

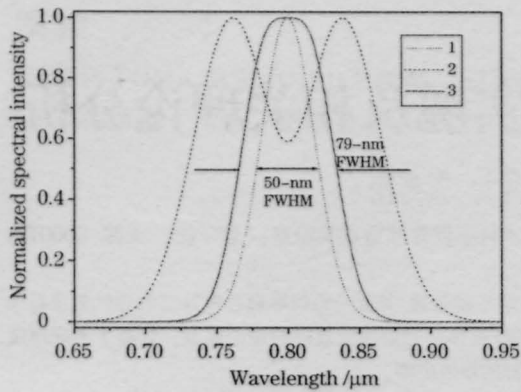


图4 归一化光谱强度曲线

Fig.4 Normalized spectral intensity curves

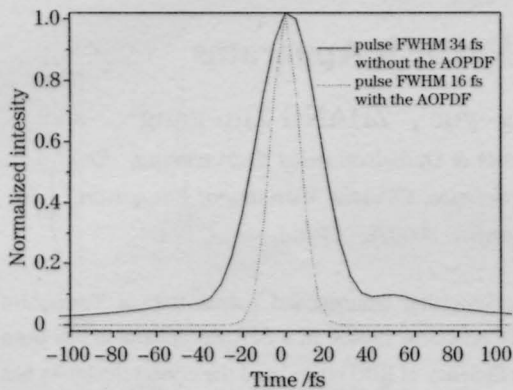


图5 放大系统输出的脉冲时域波形

Fig.5 Temporal profile of output pulses

使系统的二阶色散尽量小。选择展宽器和压缩器光栅常数  $1200 \text{ mm}^{-1}$ , 球面镜的半径  $R$  为  $1 \text{ m}$ , 光栅到球面镜的距离为  $0.35R$ , 计算得到此参数下系统的群延迟曲线如图3所示, 其波动范围在 AOPDF 的最大可编程群延迟  $8 \text{ ps}$  内, 故剩余色散可用 AOPDF 完全补偿。

同时为了克服增益带宽窄化, 可利用 AOPDF

的频域强度调制将种子脉冲光谱整形为马鞍型来实现。如图4所示, 曲线2为预整形后的马鞍型光谱, 对增益介质 Lorentz 线型时, 若中心波长小信号增益系数  $g=1.75 \text{ mm}^{-1}$ , 数值计算得到输出放大脉冲光谱如曲线3所示, 比不预整形种子脉冲直接放大得到的光谱强度曲线1宽了  $29 \text{ nm}$ 。图5显示了 AOPDF 补偿再生放大系统高阶色散后脉冲宽度的压缩作用, 如图补偿前脉冲宽度  $34 \text{ fs}$ , 补偿后脉宽  $16 \text{ fs}$ 。

## 4 结 论

本文对用于补偿飞秒脉冲色散的声光可编程色散滤波器(AOPDF)的工作原理进行了分析, 推导了脉冲经过该器件后群延迟与输入声波信号的关系式, 并针对  $2.5 \text{ cm}$  长的  $\text{LiNbO}_3$  晶体进行了数值模拟, 得出对中心波长为  $800 \text{ nm}$  钛宝石飞秒激光色散补偿和增益窄化预补偿特性。

## 参 考 文 献

- 1 K. Yamane, Z. Zhang, A. Suguro *et al.*. 3.4 fs pulse compression by spatial light modulator[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22):2258-2260
- 2 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**: 575-577
- 3 P. Tournois. Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **140**: 245-249
- 4 A. Yariv, P. Yeh. *Optical Waves in Crystals*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1983. 388-395
- 5 F. Verluise, V. Laude, P. Tournois *et al.*. Arbitrary dispersion control of ultrashort optical pulses with acoustic waves [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**: 138-145