

飞秒激光啁啾脉冲放大中脉冲展宽技术研究

赵尚弘 王屹山 陈国夫 王贤华 侯洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室 西安 710068)

摘 要 计算了啁啾脉冲放大技术中光栅展宽器对钛宝石飞秒脉冲的时域展宽量,并从实验
中进行了观测. 计算了放大器腔内元件的群色散量,进而提出了省略腔外展宽器的可能性.

关键词 脉冲展宽;钛宝石激光器;啁啾脉冲放大

0 引言

近年来人们利用啁啾脉冲放大技术(chirped-pulse amplification 简称 CPA)在钛宝石激光系统中成功地获得了脉宽在飞秒量级、峰值功率达埃(=T=10¹²)瓦量级的脉冲,该系统在诸如高次谐波的产生,高密度等离子体研究,强场物理研究和超快 X 射线产生等领域内有很多应用. CPA 技术克服和减弱了飞秒脉冲在放大过程中极高的峰值功率给放大器光学元件带来的损伤和各种可能产生的非线性效应. 此技术要求在脉冲放大前先用正群色散(GVD)给种子脉冲引入频率啁啾,使它在时域内展宽,然后再注入放大器,最后再将放大后的脉冲压缩到尽可能接近初始脉宽. 目前进行的各种超短脉冲放大实验,不论是再生放大还是多通放大,都采用了各种形式的展宽措施,最常用的展宽形式是光栅展宽^{1~3}. 本文明确给出了光栅展宽器中脉冲展宽量的定量计算,并从实验中进行了观测,对这种展宽器进行了较全面的研究. 在此基础上计算了放大器中各色散元件引入的正群色散量,指出了单脉冲能量的为×100μJ 级的再生放大实验中省略腔外展宽器而直接依靠腔内元件色散使脉冲展宽实现有效放大的可能性.

1 飞秒脉冲在光栅展宽器中的展宽量

我们设计的展宽器如图 1 所示,由一个衍射光栅,一个球面镜和两个平面镜组成. 从振荡器中输出的自锁模飞秒脉冲以利特罗(Littrow)角入射到光栅 G 上,一级衍射到球面镜 M₁ 上,光束即在水平方向展宽,在垂直方向错开光栅入射到位于 M₁ 焦平面处的平面镜 M₂ 上,经反射镜 M₁,再入射到光栅上,衍射光线被平面镜 M₃ 反射到光栅上再开始一个循环,最后使空间尺度上无色散的光束偏出展宽器,由此完成脉冲展宽.

光脉冲在该过程中由于不同频谱成分的角色散而引入的群延迟为

$$T(\omega)=-\frac{d\varphi}{d\omega} \tag{1}$$

$\varphi(\omega)$ 是整个过程中引入的相位改变. 色散定义为单位频谱宽度上的脉冲展宽量,则

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta\omega}=\frac{d}{d\omega}(T(\omega))=-\frac{d^2\varphi}{d\omega^2} \tag{2}$$

或者

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda}=-\frac{2\pi c}{\lambda^2}\cdot\frac{d^2\varphi}{d\omega^2} \tag{2}$$

经推算可求得光栅展宽器中引入的色散量为

* 国家攀登计划—飞秒激光技术和超快过程研究资助项目

收稿日期:1996—05—23

$$\frac{d^2\varphi}{d\omega^2}=-\frac{\lambda^2b}{2\pi c^2d^2\cos^3\alpha}$$

(3)

其中 b 是光栅展宽器的有效距离,即平面镜 M_1 到光栅距离的二倍(四次经过光栅), d 是光栅常数, α 是一级衍射角,可用光栅公式 $\sin\alpha+\sin\beta=\lambda/d$ 求得, β 是入射角. 由式(2)和式(3)可求得初始谱宽为 $\Delta\lambda_0$ 的自锁模飞秒脉冲展宽为

$$\tau=\frac{\lambda b}{cd^2\cos^3\alpha}\cdot\Delta\lambda_0$$

(4)

实验中所用的光栅为镀金 1200 条/mm,一级衍射效率为 70%,尺寸为 $(10\times5)\text{cm}^2$,球面镜焦距为 50cm,平面镜 M_1 和 M_2 尺寸为 $(6.5\times4.5)\text{cm}^2$,飞秒脉冲由实验室自行设计的自锁模钛宝石激光器输出,以 28° 角入射光到光栅上,入射前由二次谐波自相关仪测得脉宽为 15.6fs,中心波长为 $0.8\mu\text{m}$,其干涉自相关曲线如图 2 所示.

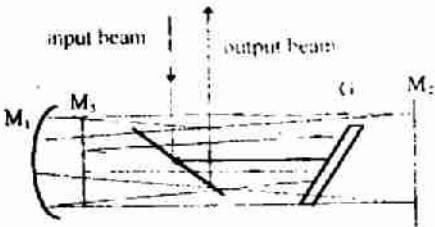


图 1 光栅展宽器示意图
Fig.1 Schematic illustration of grating pulse-stretcher



图 2 注入展宽器前种子脉冲的实验自相关曲线
Fig.2 Experimental autocorrelation trace of seed pulse before inputing stretcher

假定为 sech^2 型脉冲,可求得在变换限制下的脉冲谱宽为 $\Delta\lambda_0=43\text{nm}$,考虑到放大实验中所用钛宝石的损伤阈值,要求把脉冲展宽到皮秒量级.若将脉冲展宽 1000 倍,则由式(4)可求得 $b=7\text{cm}$,即 M_2 和光栅之间的距离为 3.5cm.根据这一数据设计的展宽器,种子脉冲在其中的空间展宽形状可用 CCD 相机拍摄如图 3 所示.



图 3 在光栅(下)和平面镜(上)展宽脉冲的光斑形状
Fig.3 Light spot shape of stretched pulses on the grating(down)and the flat mirror(up)

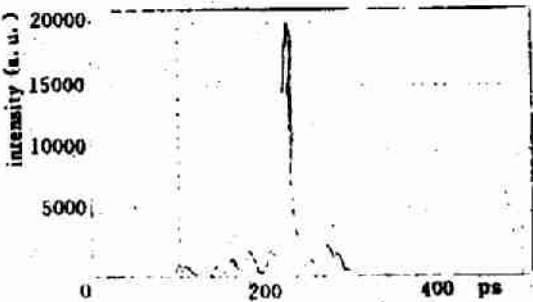


图 4 用高速条纹相机测得的展宽脉冲,脉冲宽度为 24ps
Fig.4 Stretched pulse measured by streak camera,pulse width is 24ps

实验中观察到,当调节振荡器腔内的色散补偿棱镜时,看到展宽图样随之变化.这是由于调节棱镜的插入深度时,改变了自锁模脉冲的谱宽,则由式(4)可知,脉冲的展宽程度就会不同.其实,在注入展宽器前,已测得脉冲谱宽为 79nm,远大于 43nm,根据变换限制条件可支持脉宽 9.7fs,但实际测得为 15.6fs.这是由于在振荡器腔内 GVD 以及高阶色散补偿不够彻底所致.由此可知,由于实际谱宽大于

43nm,则脉冲在展宽器内会有足够展宽,用高速条纹相机测得展宽后脉冲形状如图 4 所示.

实验发现,由于各种损耗包括空间散开尺度过大而超出平面镜等因素的影响,光栅展宽器的效率较低,约为 15%(小于理想值 24%). 但由于再生放大实验中小信号的增益更大,因而对放大实验不会有影响. 事实上,我们已用展宽后功率约为(1~2)mW的脉冲实现了再生放大,关于放大结果将另文报道.

2 放大器中各色散元件对种子脉冲的展宽

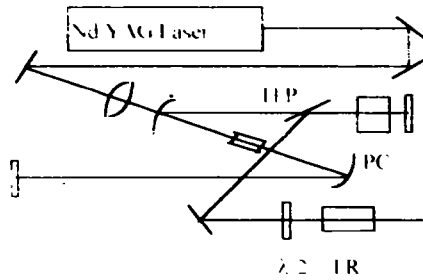


图 5 啁啾脉冲再生放大器示意图. TFP 是薄膜偏振片, P.C. 是普克尔盒, FR 是法拉第旋转载

Fig. 5 Schematic diagram of chirped-pulse regenerative amplifier. TFP: thin film polarizer, P.C.: Pockels cell, FR: Faraday rotator

由上可知,展宽器是利用光栅引入的正 GVD 使脉冲展宽;另一方面我们注意到,在放大器腔内有各种色散元件,如用于单脉冲选择的普克尔(Pockels)盒(其中为 KD^*P 晶体),放大介质钛宝石和镀膜腔镜等都会对脉冲引入正的 GVD. 在再生放大的多次循环中会对种子脉冲形成累积展宽效果. 在我们设计的再生放大器(如图 5)中,腔内提供正 GVD 的元件有:

10mm 的钛宝石: $\frac{d^2\varphi}{d\omega^2} \approx 600\text{fs}^2$; 2cm 的 KD^*P 晶体: $\frac{d^2\varphi}{d\omega^2} \approx 300\text{fs}^2$; 4 个单层镀膜腔镜: $\frac{d^2\varphi}{d\omega^2} \approx 1200\text{fs}^2$.

另外,经计算可知,用于种子脉冲注入的 1mm 厚 TFP(熔石英)引入约 3fs^2 的 GVD 可忽略不计. 则整个放大过程的一次循环中可引入总计 3600fs^2 的群色散. 考虑到在放大循环过程中脉冲宽度变化已不再符合变换限制条件,故由(2)计算相应的单位频谱宽度上的脉冲宽度展宽量为

$$\Delta\tau/\Delta\lambda=10.6\text{fs/nm}$$

对谱宽为 70nm 的种子脉冲,经一次循环后展宽到 700fs. 若要将脉冲放大到单脉冲能量达到 $100\mu\text{J}$ 时,要求脉冲展宽到 20ps 才可避免引起放大损伤和过强的非线性效应⁴. 因此,若经过 30 次循环就可达到这一要求. 由此可见,只需用放大器腔内引入的正 GVD 就已可将脉冲展宽,这样一来,就有可能省略腔外脉冲展宽器. 为安全起见,可在腔外设置一段色散介质例如玻璃使种子脉冲产生正 GVD,同时再计及 FR 的色散贡献,就可使脉冲有足够的宽度,实现不采用专用脉冲展宽器的 $100\mu\text{J}$ 飞秒啁啾光脉冲的再生放大. 在完成本文时我们已注意到国外一家研究组确实采用省略腔外展宽器方法实现了飞秒脉冲的放大,只不过该实验在放大器腔内加入棱镜对以提供色散.

感谢本室赵卫、杨斌洲二位老师在测量中的帮助.

参考文献

- 1 Wynne K, et al. regenerative amplification of 30-fs pulses in Ti:Sapphire at 5kHz. Opt Lett, 1994, 19(7): 895~897
- 2 Backus S, et al. Ti:Sapphire amplifier producing millijoule-level, 21-fs pulses at 1kHz. Opt Lett, 1995, 20(16): 2000~2002
- 3 Zhou J, et al. Amplification of 26-fs, 2TW pulses near the gain-narrowing limit in Ti:Sapphire. Opt Lett, 1995, 20(1): 64~66
- 4 Joo T, et al. Ti:Sapphire regenerative amplifier for ultra-short high-power multikilohertz pulses. Opt Lett, 1995, 20(3): 389~391

STUDY OF LASER PULSE-STRETCHING FOR CHIRPED-PULSE AMPLIFICATION OF FEMTOSECOND PULSE

Zhao Shanghong, Wang Yishan, Chen Guofu, Wang Xianhua, Hou Xun

State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710068

Received date: 1996-05-23

Abstract The pulse - stretching in chirped - pulse amplification is investigated theoretically and experimentally. The possibility of omitting ultra-cavity stretcher is pointed out on the basis of taking the total dispersion in the amplifier into account.

Keywords Pulse-stretching; Ti:sapphire laser; Chirped-pulse amplification



Zhao Shanghong was born in 1964. He got B. S. and M. S. degree from Lanzhou University in 1984 and 1989 respectively. About ten of his research papers were published on journals. Now he is a Ph. D. candidate on transient optics in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics.