

文章编号 : 0253-2239(2002)02-0170-04

掺钛蓝宝石再生放大器的光谱整形*

冷雨欣 林礼煌 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 采用腔内和腔外两种方法对激光脉冲进行光谱整形。在掺钛蓝宝石再生放大器中插入一定厚度的石英双折射晶体片, 通过调节晶体光轴的空间取向, 对再生放大器输出的脉冲光谱进行腔内整形, 使再生放大器输出脉冲的谱宽从 20 nm 左右增加到 35 nm 左右, 接近进入再生放大器的激光种子脉冲的谱宽。另外用镀反射膜的平板滤光片进行了腔外光谱整形的实验, 使再生放大器输出脉冲谱宽展宽到 28 nm 左右。

关键词: 掺钛蓝宝石再生放大器; 光谱整形; 双折射晶体片

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引 言

啁啾脉冲放大技术和再生放大技术已经广泛地用于带宽很宽的飞秒激光脉冲放大系统^[1]。啁啾脉冲(或称为种子脉冲)在放大的过程中, 许多因素都可能导致激光脉冲光谱宽度变窄^[2]。啁啾脉冲光谱变窄将最终导致光栅压缩后的超短脉冲宽度增加。为了获得尽可能短的脉冲, 在飞秒激光系统中已经广泛地应用光谱整形技术^[3]。

光谱整形技术一般分成腔内和腔外两种方式^[4,5]。根据我们目前现有的掺钛蓝宝石(Ti:S)振荡器输出脉冲的带宽度和波长, 通过在掺钛蓝宝石再生放大器中插入一定厚度的石英双折射晶体片, 调节晶体光轴的空间取向, 对再生放大器中脉冲的光谱进行腔内整形, 使输出脉冲的光谱带宽展宽。通过光谱整形, 再生放大器输出脉冲的谱宽已从原来的 20 nm 左右增宽到 35 nm 左右, 接近振荡器输出脉冲展宽后进入再生放大器的种子脉冲的谱宽。另外, 我们也在种子脉冲进入再生放大器之前进行

了腔外光谱整形的实验, 利用插入脉冲宽度展宽器中的镀一定反射率的玻璃膜板滤光片先将脉冲的光谱分布进行整形, 从而使激光再生放大器输出脉冲谱宽展宽到 28 nm 左右。

2 腔内光谱整形理论

目前, 一般对激光脉冲光谱整形使用的方法是在增益中心附近的波长范围内引入一定比例的衰减, 使得激光脉冲在光谱顶端变平或者在光谱中心产生凹陷, 结合激光脉冲放大过程的增益作用从而令光谱变宽。采用腔内整形的方案, 是当种子脉冲在再生放大器中放大时, 利用置于再生放大器中的双折射晶体片和偏振片对种子脉冲中心波长的强度进行衰减, 使脉冲光谱展宽^[4]。双折射晶体片使入射光束中不同波长分量的激光偏振状态改变, 与偏振片构成一个波长选择滤光器。对于单轴晶体, 例如石英, 种子脉冲在再生放大器中往返一次的透过率 T 与晶体光轴方向和晶体厚度 t 有关^[6]

$$T(\lambda) = 1 - \sin^2(2\phi) \frac{n_o^4 - n_e^2 \cos^2 \theta}{(n_o^2 - \cos^2 \phi \cos^2 \theta)} \sin^2 \left[\frac{\pi t n_e (1 + \cos^2 \theta \cos^2 \phi / n_e^2 - \cos^2 \theta \cos^2 \phi / n_o^2)}{\lambda (1 - \cos^2 \theta \sin^2 \phi / n_e^2 - \cos^2 \theta \cos^2 \phi / n_o^2)^{1/2}} - \frac{\pi t n_o}{\lambda (1 - \cos^2 \theta / n_o^2)^{1/2}} \right], \quad (1)$$

式中 n_o 和 n_e 分别是波长为 λ 的 o 光和 e 光在石英晶体中的折射率, ϕ 为晶体光轴和入射面之间的夹角, θ 为晶体表面和入射光线之间的夹角。从(1)式

可见, 通过选择不同厚度 t 的双折射晶体片, 将其按一定的光轴角度 θ 和 ϕ 放置, 可以对特定波长范围的激光进行衰减[见图 1(a)]。对于一定厚度 t 的双折射晶体片, 可通过在空间旋转晶体 θ 和 ϕ , 调节衰减的中心波长和衰减的大小[见图 1(b)和图 1(c)]。从图 1(a)中可见, 晶体光轴方向 θ 和 ϕ 不变

* 国家 973 项目资助课题。

时随着晶体厚度 t 的增加,损耗中心波长移动,损耗曲线的宽度变窄。不同厚度的晶体的损耗中心波长可能相同,但是损耗曲线的宽度不同,晶体越厚损耗曲线的宽度则越窄。对于同一块晶体,旋转晶体改变 ϕ 主要影响损耗的大小[见图 1(b)],而调节晶

体改变 θ 主要影响损耗中心波长[见图 1(c)]。因此,根据需要衰减的中心波长和衰减的光谱宽度,利用(1)式可以选择一定厚度的晶体。在实际使用中可以通过调节晶体光轴在空间的位置来细微调整损耗曲线。

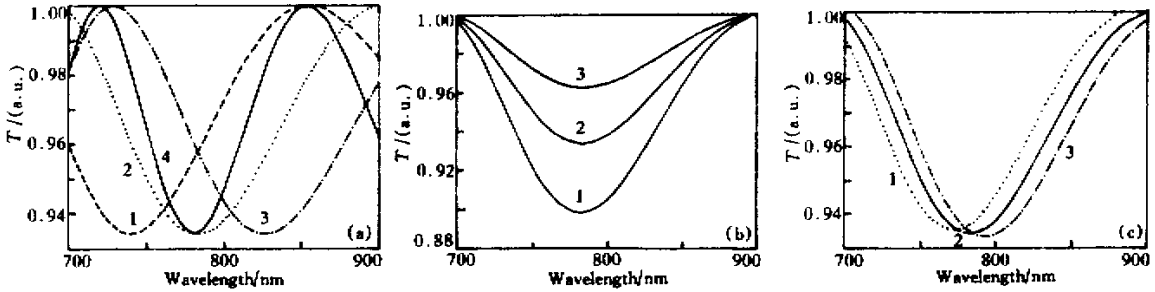


Fig. 1 The theoretical single-pass transmission curves for the quartz birefringent filter with the different parameters and the polarizer in the cavity of the regenerative amplifier, according to Eq.(1). (a) $\theta = 55^\circ$, $\phi = 82^\circ$, 1: $t = 0.32$ mm, 2: $t = 0.34$ mm, 3: $t = 0.36$ mm, 4: $t = 0.5342$ mm; (b) $\theta = 55^\circ$, 1: $\phi = 80^\circ$, 2: $\phi = 82^\circ$, 3: $\phi = 84^\circ$, $t = 0.34$ mm; (c) $\phi = 82^\circ$, 1: $\theta = 53^\circ$, 2: $\theta = 55^\circ$, 3: $\theta = 57^\circ$, $t = 0.34$ mm

3 腔内光谱整形实验

实验装置如图 2 所示。将一片没有镀膜的 x -切石英晶片插入再生放大腔中,石英晶片足够薄,因此对再生放大腔形状的影响可以忽略,从自锁模 Ti:S 振荡器输出的种子脉冲经过光栅展宽器展宽到 200 ps,单个脉冲能量大约为 4 nJ,重复频率为 78 MHz,脉冲谱宽约为 36 nm。当腔内没有插入双折射晶体时,再生放大器输出的单个脉冲能量约为 1 mJ,重复频率为 10 Hz,脉冲谱宽约为 20 nm。图 2 中再生放大器腔镜后的 PIN 探头和示波器用于从腔镜的漏光来监视脉冲在再生放大器中的放大过程。

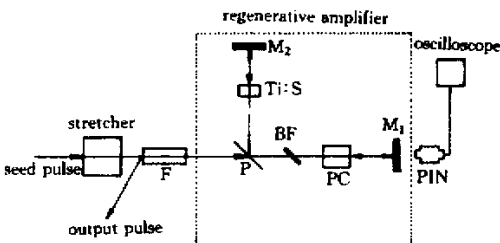


Fig. 2 The scheme of experiment. P: polarizer; PC: Pockels cell; M_1, M_2 : plane mirrors; BF: quartz birefringent filter; F: Faraday isolator

首先调整 Ti:S 再生放大器,使其工作在最佳状态,然后取一系列不同厚度的石英双折射晶体片中的一片插入再生放大腔中,通过光纤光谱仪(SD2000 型, Ocean Optics 公司生产)监视输出激光脉冲的光谱,调节双折射晶体的再生放大器中的角

度 θ 和 ϕ , 令损耗中心处于再生放大器增益的中心,使得输出激光脉冲的光谱带宽最大。调节时通过 PIN 探头和示波器监视脉冲再生放大器中多程放大的情况,并且确定放大脉冲倒出的时间。根据理论公式(1)和图 1,选择特定厚度的石英双折射晶体插入再生放大器中,在再生放大器增益中心附近引入不同的损耗曲线,使输出的脉冲光谱展宽。利用不同厚度的石英双折射晶体获得光谱整形后放大的脉冲光谱,如图 3 所示。

从图 3 中可见,对于带宽为 36 nm 的种子脉冲,在没有插入石英双折射晶体片时,再生放大器输出脉冲谱宽约为 20 nm[见图 3(a)],当使用厚度为 0.34 mm 的石英片后,获得了带宽约为 35 nm 的再生放大器输出脉冲[见图 3(b)],输出脉冲的光谱带宽展宽了约 1.75 倍。更换不同厚度的石英片导致不同程度的衰减和不同宽窄的放大脉冲带宽[见图 3(c)]。当损耗太大时,再生放大器输出脉冲的光谱分裂成两个部分[图 3(d)]。由于实验中使用的石英晶片没有镀膜,而且利用空间旋转石英晶片来调节损耗中心位置和损耗大小,使石英片未按布儒斯特角摆放,因此在再生放大腔中引入的晶体表面反射损耗较大。当插入 0.3 mm 和 0.5324 mm 厚的石英双折射晶体片,再生放大器输出的脉冲能量约为 0.4 mJ,大约是不加双折射晶体片的 40%。而插入 0.93 mm 厚的石英双折射晶体片后,由于损耗曲线的宽度窄和中心损耗大,导致再生放大器输出脉冲光谱分裂成两部分[图 3(d)]。由于石英双

折射晶片没有镀膜,存在法布里-珀罗效应,使得再生放大器输出的脉冲光谱存在一些尖峰。

由图 3 可见,在再生放大器中插入石英双折射晶体后,输出脉冲的光谱曲线中心,相对于不加双折

射晶体时的输出脉冲光谱峰值附近产生下陷,使得整个光谱宽度展宽。输出脉冲光谱的下陷和理论计算的损耗基本符合。

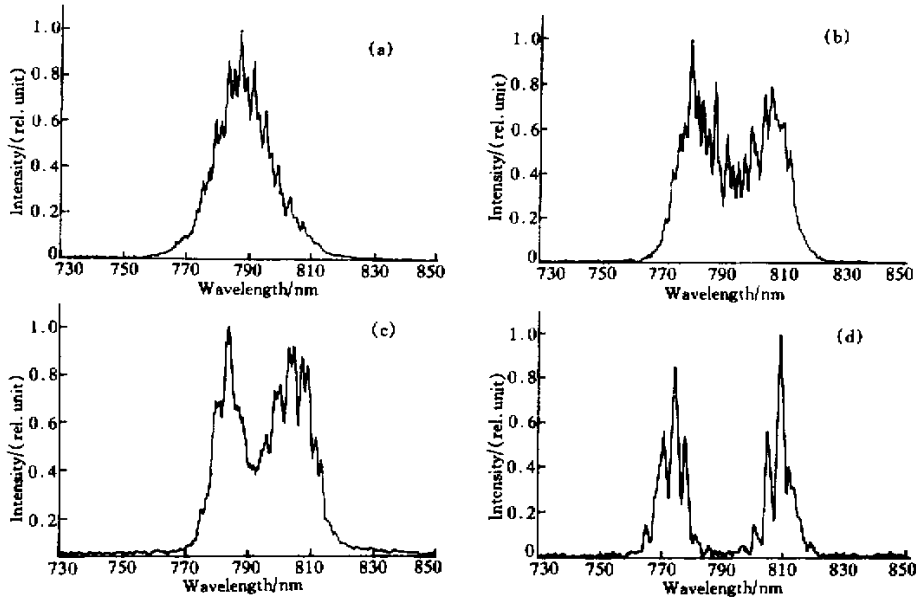


Fig. 3 The experimental result of the spectrum shaping in cavity. The spectrum of the output pulse from the regenerative amplifier. (a) Without the quartz birefringent filter, the bandwidth is 20 nm (FWHM); (b) With the quartz birefringent filter ($t = 0.34$ nm), the bandwidth is 35 nm (FWHM); (c) With the quartz birefringent filter ($t = 0.5342$ nm), the bandwidth is 30 nm (FWHM); (d) With the quartz birefringent filter ($t = 0.93$ nm)

4 腔外光谱整形实验

相对于激光光谱的腔内整形,另外设计了一个腔外整形的实验。脉冲光谱的腔外整形,一般是在种子脉冲进入再生放大器之前,在种子脉冲中心波长附近对其衰减,使得种子脉冲光谱中在再生放大器中增益高的波段强度被衰减,而使得在再生放大器中增益低的波段强度相对比较大。这样经过衰减的种子脉冲经过再生放大器放大后,增益窄化效应可以得到补偿,使得最后再生放大器输出脉冲的带宽相对于没有对种子脉冲衰减时的输出脉冲光谱要宽^[6]。

由于按照计算得到的透过率曲线制作滤光片比较困难,所以使用现有一片在 730 nm~830 nm 附近透过率约为 40%、直径为 30 mm 的镀反射膜的平板作为滤光片。利用展宽器中脉冲频谱在空间展开的特点,将滤光片插入展宽器,调节滤光片的位置,使其对种子脉冲的中心波长进行部分衰减。根据再生放大器输出脉冲的光谱,调节滤光片对种子脉冲光谱损耗的位置和带宽,使得再生放大器输出脉冲

带宽最大。同样用示波器监视脉冲在再生放大腔中的放大过程,在放大到最高峰值时倒出脉冲,得到的再生放大器输出脉冲带宽约为 28 nm(见图 4)。

从图 4 可见,用腔外滤光片做光谱整形的实验结果和腔内光谱整形的实验结果类似,输出脉冲的光谱曲线中心,相对于不加双折射晶体时的输出脉冲光谱峰值附近产生下陷,使得整个光谱宽度得到展宽。但是在腔外光谱整形时,光谱展宽后的带宽比腔内光谱整形得到的带宽窄。

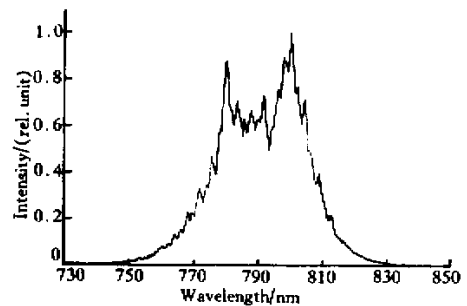


Fig. 4 The experimental result of the spectrum shaping outside the cavity. The bandwidth of the output pulse from the regenerative amplifier is 28 nm (FWHM)

从理论和实验的结果来看,由于在再生放大器腔内放置一定厚度的石英双折射晶体片,可以通过调节晶体光轴空间取向方便地调节衰减曲线的位置、形状和宽度,因此脉冲整形的效果要比利用镀膜滤光片的效果好。

5 讨 论

理论计算了放置在再生放大器腔内的石英双折射晶体片的衰减曲线。对于一定波长的激光,选取不同厚度的石英晶体片,通过调节晶体光轴的空间取向,可以获得不同的衰减曲线,据此对再生放大器输出脉冲进行光谱整形。在实验中采用一系列不同厚度的石英双折射晶体片对脉冲进行腔内光谱整形,光谱整形结果与理论计算基本相符,对于带宽为 36 nm 的种子脉冲,采用 0.34 mm 的石英双折射晶体片获得了 35 nm 左右的带宽(根据变换极限,对应于 26 fs 的高斯脉冲),远超过光谱整形前再生放大器输出的 20 nm 左右的带宽(根据变换极限,对应于 46 fs 的高斯脉冲),放大后输出的脉冲能量约为 0.4 mJ。利用镀膜滤光片进行了腔外光谱整形的实验,也得到了 28 nm 左右的再生放大器输出脉冲带宽(根据变换极限,对应于 33 fs 的高斯脉冲)。

如果采用镀膜的石英双折射晶体片,降低晶体的反射损耗和法布里-珀罗效应,相信可以获得更强

的放大效果和更光滑的脉冲光谱,最后得到信噪比更高的压缩脉冲。对于腔外光谱整形,如果可以获得具有合适的透过率曲线的镀膜滤光片,也可以得到更好的结果。

本文实验中王文耀、江云华同志运转激光器件,张正泉研究员和杨晓东博士与作者进行了有益的讨论,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Xu Zhizhan, Luc V, Frederic S *et al.*. Ultrashort pulse high power Ti:sapphire laser system of 2 TW/45 fs. *Science in China (A)* (中国科学), 1997, 27(7):640~645 (in Chinese)
- [2] Cha Yong-Ho, Young H Kang, Chang Hee Nam. Control of spectral narrowing for broad amplified spectrum in a chirped pulse amplification terawatt Ti:sapphire laser. *Review Laser Engng.*, 1998, 26(1):114~116 (in Japanese)
- [3] Barty C P J, Korn G, Raski F *et al.*. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses. *Opt. Lett.*, 1996, 21(3):219~221
- [4] Barty C P, Guo T, Blanc C L *et al.*. Generation of 18-fs multiterawatt pulses by regenerative pulse shaping and chirped-pulse amplification. *Opt. Lett.*, 1996, 21(9):668~670
- [5] Backus S, Durfee C G, Mourou G *et al.*. 0.2 TW laser system at 1 kHz. *Opt. Lett.*, 1997, 22(16):1256~1258
- [6] Preuss D R, Gole J L. Three-stage birefringent filter tuning smoothly over the visible region: Theoretical and experimental design. *Appl. Opt.*, 1980, 19(5):702~710

Spectrum Shaping in a Ti:Sapphire Regenerative Amplifier

Leng Yuxin Lin Lihuang Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 15 January 2001; revised 12 March 2001)

Abstract: Two methods were used to shape the spectrum of laser pulse. The birefringent filter of quartz crystal with the certain thickness was inserted into the Ti:sapphire regenerative amplifier cavity for the regenerative amplifier intracavity spectrum shaping by adjusting the optic axis orientation of the crystal. Through the spectrum shaping, the bandwidth of the regeneratively amplified pulse was increased from approximately 20 nm to approximately 35 nm, which is near the bandwidth of the seed pulse. As a comparison, by using a coated filter outside the regenerative amplifier cavity, the bandwidth of the regeneratively amplified pulse was stretched to approximately 28 nm.

Key words: Ti:sapphire regenerative amplifier; spectrum shaping; birefringent filter