

文章编号: 0258-7025(2003)12-1075-04

超短脉冲的光谱整形

朱鹏飞¹, 杨镜新², 薛绍林², 李美荣², 林尊琪²

(¹ 上海交通大学物理系, 上海 200240; ² 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要 针对激光放大过程中的增益窄化效应, 采用了窄带干涉滤光片与石英双折射滤光片两种器件对中心波长 1053 nm, 谱宽 13 nm 的超短脉冲进行光谱整形。石英晶片的参数由计算机仿真确定。光谱整形的实验结果与数值模拟的结果吻合较好。整形后的光谱形状变为平顶, 谱宽增加了 2 nm。

关键词 激光技术; 超短脉冲; 光谱整形; 干涉滤光片; 双折射滤光片

中图分类号 O 433 **文献标识码** A

Spectrum Shaping of the Ultrashort Pulse

ZHU Peng-fei¹, YANG Jing-xin², XUE Shao-lin², LI Mei-rong², LIN Zun-qi²

¹Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
²National Laboratory on High Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract To alleviate gain narrowing, the interference filter and the quartz birefringent filter were used to shape the spectrum of ultra-short pulse with the FWHM bandwidth of 13 nm at $\lambda = 1053$ nm. The parameters of quartz plate were decided by simulation with computer. The experimental result is coincident with the simulation of the spectrum shaping. The shape of the spectrum becomes flat at its top and the FWHM bandwidth broadens 2 nm.

Key words laser technique; femtosecond pulse; spectrum shaping; interference filter; birefringent filter

1 引 言

自从啁啾脉冲放大的概念提出以来^[1], 超短超强脉冲技术有了长足的进展^[2], 实验可获得的超短脉冲的功率密度已达到 10^{21} W/cm²^[3], 但是许多因素限制了固体激光器功率的进一步提高, 其中增益窄化效应是一个较为棘手的问题。由于固体激光放大器的带宽有限, 在对激光的放大过程中, 脉冲的中心增益高, 边缘的增益低, 随着激光脉冲的逐级放大, 光谱会变得越来窄, 这就是所谓的增益窄化效应^[4]。增益窄化效应使激光脉冲不能够充分利用放大介质的增益带宽, 从而得不到有效的放大, 且导致放大后的啁啾脉冲不能被压缩还原至种籽脉冲的宽度。

为了补偿激光放大过程中的增益窄化效应, 光谱整形技术已经广泛地应用于高功率激光系统中^[5,6]。光谱整形的原理是使激光脉冲通过一透射

率曲线如图 1 所示的滤光片, 降低激光脉冲光谱中心的透射率, 保持边缘的透射率, 从而使光谱增宽。

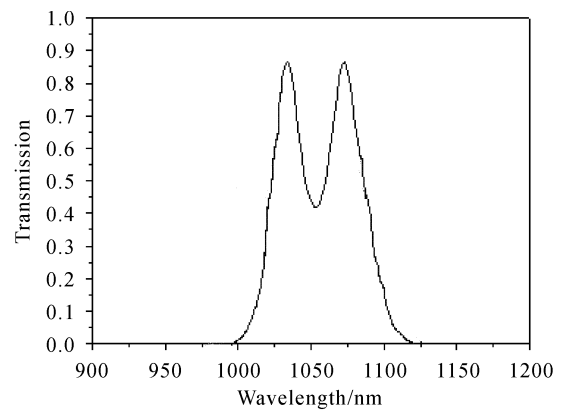


图 1 用于光谱整形的滤光片的透射率曲线
Fig. 1 Transmission function of the filter used for spectrum shaping

收稿日期: 2002-07-10; 收到修改稿日期: 2002-09-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863-804-2)资助课题。

作者简介: 朱鹏飞(1974—), 男, 上海交通大学物理系讲师, 博士, 现从事导波光学研究。E-mail: zhupengfei@hotmail.com

在 10 TW 超短超强激光系统的前端中采用了透射式干涉滤光片与石英双折射滤光片两种器件对中心波长 1053 nm, 谱宽 13 nm 的超短脉冲(图 2)进行了整形。

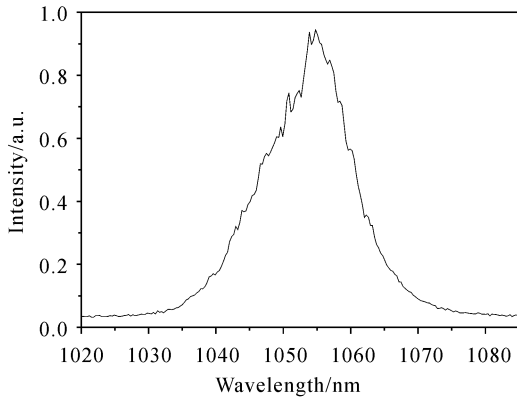


图 2 待整形的超短脉冲光谱
Fig. 2 Spectrum of the ultra-short pulse

2 用窄带干涉滤光片进行光谱整形

通过在玻璃基片上镀多层介质膜,可制作出窄带干涉滤光片。干涉滤光片分为透射式和反射式两种。透射式干涉滤光片比反射式干涉滤光片使用起来方便些,可随意插入和取出而不必重新调整光路。但是从镀膜的角度来说,透射式比反射式要稍微难镀一些。干涉滤光片的带宽要与待整形的光谱宽度相当,透射率曲线中心凹陷的程度要根据需要确定。由于目前的镀膜工艺水平,十几个纳米的窄带干涉滤光片镀得很不理想,无法很好地控制透射率曲线的带宽和中心凹陷的程度。试镀了两片窄带干涉滤光片,均没有达到要求。第一片干涉滤光片的带宽(40 nm)相对于超短脉冲的谱宽(13 nm)太宽,如图 3(a)所示。它对激光脉冲光谱的所有成分都产生衰减,相当于一个衰减片,激光脉冲的能量被衰减了很多(图 3(b)),而谱宽基本上没有增宽。第二片干涉

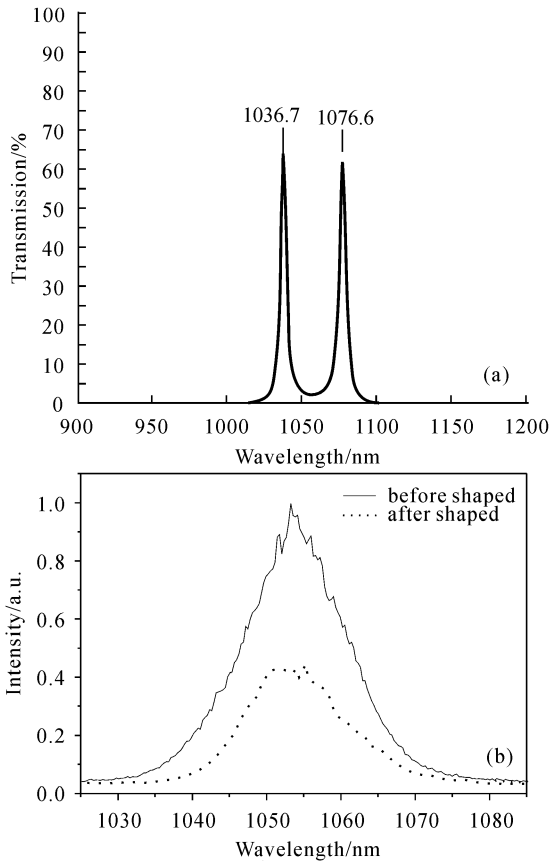


图 3 带宽 40 nm 的干涉滤光片
(a) 透射率曲线;(b) 对超短脉冲整形的实验结果
Fig. 3 Spectrum shaping of the ultra-short pulse with a broad-band 40 nm interference filter
(a) transmission function of the filter;
(b) experimental result

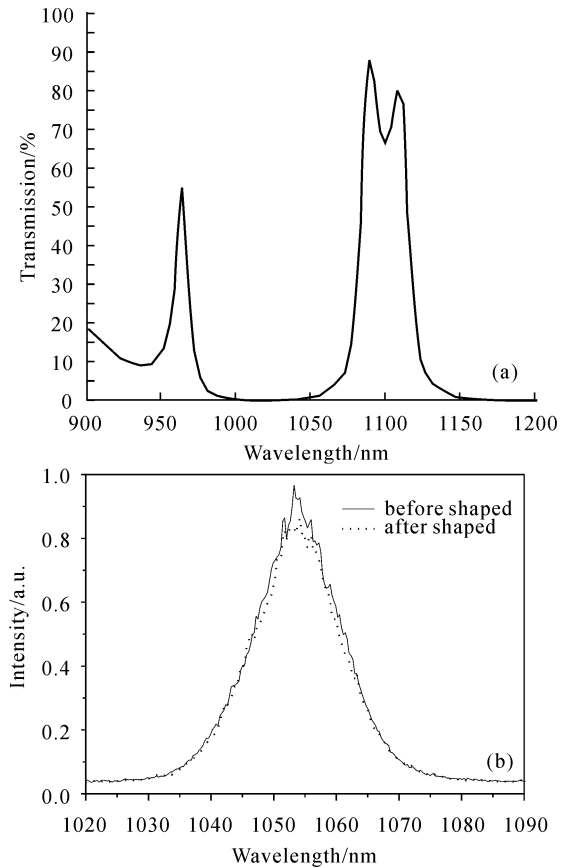


图 4 中心衰减太小的窄带干涉滤光片
(a) 透射率曲线;(b) 对超短脉冲光谱整形的实验结果
Fig. 4 Spectrum shaping of the ultra-short pulse with a narrow-band interference filter
(a) transmission function of the filter;
(b) experimental result

滤光片的透射率曲线中心衰减的程度太小(图 4(a)),所以整形效果不明显,脉冲的光谱形状基本上没有什么变化(图 4(b))。

3 用石英双折射滤光片进行光谱整形

当激光入射到双折射晶体内,分成的非常光和寻常光产生干涉,引起透射率随波长变化。透射率公式可写为^[7]

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

式中 n_o, n_e 分别是 o 光和 e 光的折射率, λ 为激光波长, t 为晶体的厚度, ϕ 为晶体光轴和入射面之间的夹角, θ 为入射光线和晶体表面的夹角。

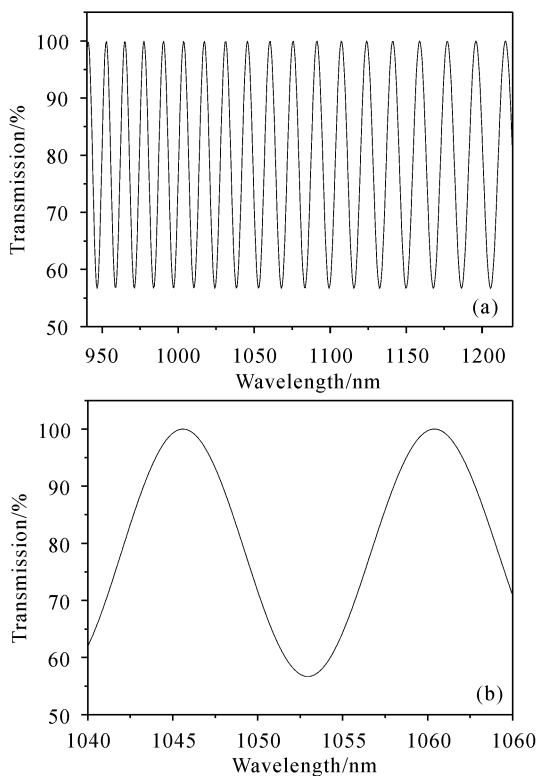


图 5 双折射晶体的透射率曲线

(a) 随波长的变化;(b) 在波长 1053 nm 附近的局部放大图

Fig. 5 Transmission of quartz plate

(a) varies periodically with wavelength;

(b) expanded wavelength axis near at $\lambda = 1053$ nm

双折射晶体的透射率曲线如图 5(a)所示。进行局部放大后,可以看出透射率曲线的中心是凹陷

的(图 5(b))。利用这一特点可对超短脉冲的光谱进行整形。

在加工石英晶片之前,预先用计算机进行了仿真模拟,以确定石英晶体的厚度、光轴角度等。在数值模拟过程中发现^[8]:石英晶体的透射率曲线形状是由 t, ϕ 和 θ 这三个参数决定的。晶片的厚度 t 决定透射率曲线的带宽,带宽与晶体的厚度成反比;调节 θ 的角度可移动透射率曲线的中心波长;调节 ϕ 的角度可控制透射率曲线的中心衰减程度。

根据计算机仿真模拟出的超短脉冲单次通过石英晶片后的理想的光谱整形效果(图 6),确定出石英晶片的厚度为 12 mm,光轴与晶片表面的夹角为 31.75° (图 7)。由于石英双折射滤光片不是按布儒斯特角使用,为了减少损耗,同时也为了消除标准具效应的影响,在晶片的两通光面上镀了增透膜($\lambda = 1053$ nm)。经检测,晶体表面的反射率由镀膜前的 4%降为 0.4%,透过波前畸变为 $\lambda/10$ 。

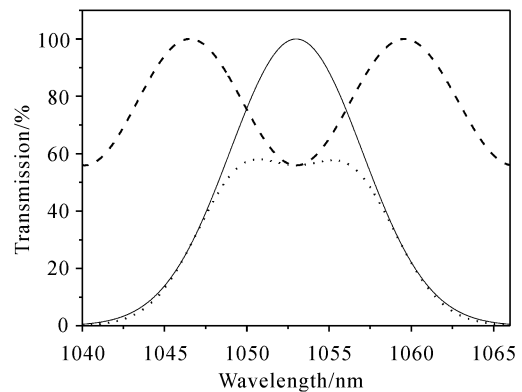


图 6 计算机仿真模拟出的石英双折射滤光片光谱整形效果

实线:整形前的光谱;点线:整形后的光谱;

虚线:石英的透射率曲线

Fig. 6 Simulated effect of spectrum shaping with the quartz birefringent filter

solid curve: the spectrum before shaped; dotted curve: the spectrum after shaped; dashed curve: transmission function of the filter

将石英晶片安装到三维调整架上,插入到啁啾脉冲放大系统的前端(飞秒激光器与再生放大器之间)对超短脉冲进行光谱整形,实验结果如图 8 所示。超短脉冲经过整形后,光谱增加了 2 nm。更为重要的是,脉冲的光谱顶部被削平,可有效地补偿后级放大过程中的增益窄化效应。当然,在以后的放大过程中,脉冲的顶部是会逐渐变尖的。

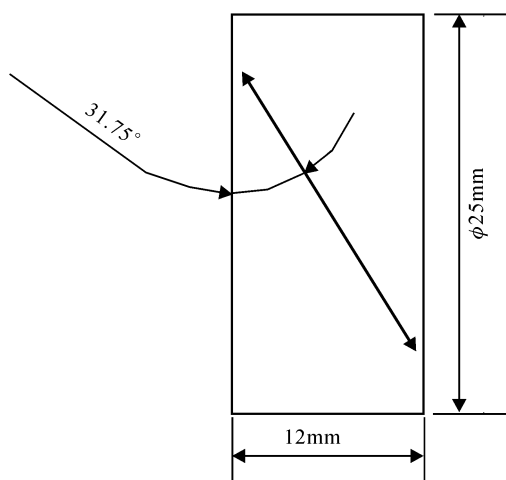


图 7 石英晶片的加工参数

Fig. 7 Machining parameters of the quartz plate

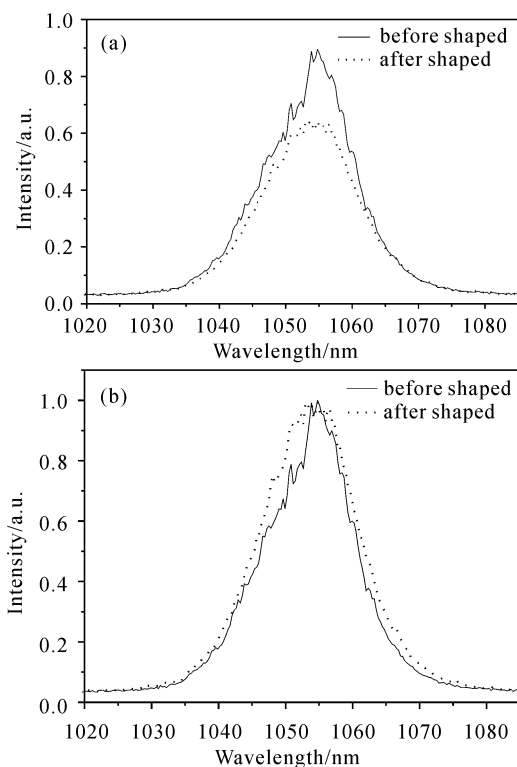


图 8 (a) 石英双折射滤光片对超短脉冲光谱整形的实验结果;(b) 将脉冲的强度做归一化处理以比较整形前后的光谱宽度

Fig. 8 (a) Experimental result of spectrum shaping with the quartz birefringent filter; (b) To compare the width of the spectrum before shaped and after shaped, the intensity is normalized

4 结 论

针对激光放大过程中的增益窄化效应,在 10

TW 超短超强激光系统的前端中采用了透射式干涉滤光片与双折射晶体两种器件对超短脉冲进行了光谱整形。尽管没有成功,但是摸索了一些经验。

根据双折射石英晶体对不同波长光的透射率不同的这一性质,也可对超短脉冲的光谱进行整形。实验发现,通过调节石英晶体的放置角度可控制透射率曲线的中心波长和中心损耗的程度。而干涉滤光片一旦镀好之后,它的透射率曲线就无法改变了,所以双折射滤光片比干涉滤光片要灵活一些。但是,双折射滤光片的透射率曲线形状是中心对称的。为了补偿啁啾脉冲放大过程中的光谱“红移”,需要不对称的透射率曲线形状,即要求对长波长的透射率低,对短波长的透射率高。可将多片双折射滤光片组合起来,得到非中心对称的透射率曲线,但组合滤光片的加工及装卡很困难。

在设计主放大链中所使用的滤光片的透射率曲线时要考虑到后级放大器的放大倍数。由于滤光片是有损耗的,要尽量在放大系统的前端进行光谱整形,在系统的末端尽量减少所使用滤光片的数量。另外,腔内光谱整形的工作有待于开展,因为光脉冲多次通过整形器件,效果会很明显,尽管这会引入腔内损耗和不稳定。

参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulse [J]. *Opt. Comm.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 C. Sauteret, D. Husson, G. Thiell *et al.*. Generation of 20-TW pulses of picosecond duration using chirped-pulse amplification in a Nd:glass power chain [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4):238~240
- 3 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3):160~162
- 4 B. C. Stuart, S. Herman, M. D. Perry. Chirped-pulse amplification in Ti:sapphire beyond 1 μm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(3):528~538
- 5 H. Graener, A. Laubereau. Shorter and bandwidth-limited Nd:YAG laser pulses [J]. *Opt. Comm.*, 1981, **37**(2):138~142
- 6 C. P. J. Barty, G. Korn, F. Raksi *et al.*. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3):219~221
- 7 D. R. Preuss, J. L. Gole. Three-stage birefringent filter tuning smoothly over the visible region; theoretical treatment and experimental design [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(5):702~710
- 8 Leng Yuxin, Lin Lihuang, Xu Zhizhan. Spectrum shaping in a Ti:sapphire regenerative amplifier [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(2):170~173 (in Chinese)