

啁啾脉冲的光谱整形

郭爱林 杨庆伟 张福领 孙美智 毕群玉 谢兴龙 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 为了获得更高功率的输出激光脉冲, 需要将注入到主放大链的种子脉冲进行光谱整形来补偿放大过程中的增益窄化效应。利用展宽器中啁啾脉冲的光谱具有空间排布的特点, 采用石英晶体平凸透镜空间光强度调制器间接地实现窄带激光脉冲的光谱整形, 在展宽器的输出端获得了光谱呈平顶分布的种子啁啾脉冲。通过调节偏振片的透偏方向, 可方便地调谐输出脉冲光谱的形状。

关键词 激光光学; 啁啾脉冲; 光谱整形; 空间整形; 石英晶体; 旋光

中图分类号 TN243 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1582

Spectrum Shaping of Chirped Pulse

Guo Ailin Yang Qingwei Zhang Fuling Sun Meizhi Bi Qunyu
Xie Xinglong Zhu Jianqiang

(Joint Laboratory on High-Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In order to obtain a higher power laser pulse in the terminal, it is necessary to conduct spectrum shaping before the seed pulse being injected into the main amplifier chain to compensate the effect of gain narrowing. Based on the spatial distribution of the chirped pulse spectrum in the stretcher, a scheme to shape the spectrum of a narrow-band laser pulse by using a quartz crystal plano-convex lens spatial light modulator is proposed. The flat-topped spectrum is obtained at the output of the stretcher. The spectrum profile can be easily switched from one profile to another by regulating the polarizing direction of the polarizer.

Key words laser optics; chirped pulse; spectrum shaping; spatial shaping; quartz crystal; optical activity

1 引 言

啁啾脉冲放大技术是目前获得超短、超强激光脉冲的经典方法, 主要包括脉冲展宽、放大以及压缩三个过程。在啁啾脉冲的放大过程中, 由于增益介质对脉冲中心频谱的增益大于边缘频谱的增益, 而种子脉冲具有中心频谱强度大于边缘频谱强度的特点, 因此, 随着激光脉冲的逐渐放大, 脉冲的谱宽会变得越来越窄^[1]。在傅里叶变换限下激光脉冲的脉宽和谱宽的乘积为一常数, 因此, 激光脉冲光谱宽度的变窄会导致压缩后的超短脉冲脉宽增加, 从而降低超短脉冲激光系统的输出功率。所以, 在高功率超短脉冲激

光放大系统中需要引入种子脉冲的光谱预补偿技术来对种子啁啾脉冲进行光谱整形, 即通过降低种子啁啾脉冲的中心频谱强度来补偿放大器增益介质的光谱增益不均匀性, 从而减小增益窄化的程度^[2~5]。

根据主放大器采用的增益介质, 可将目前常见的高功率超短脉冲激光放大系统分为钛宝石放大系统和钕玻璃放大系统。目前, 文献报道的超短脉冲光谱整形技术通常是针对钛宝石放大系统的宽光谱种子脉冲的光谱整形^[1~9], 受限于光谱分辨率的不足, 还无法有效地应用于钕玻璃放大系统中窄带种子脉冲的光谱整形。为解决窄带脉冲的光谱整形问题, 提出了利用展

收稿日期: 2008-09-22; 收到修改稿日期: 2008-11-04

基金项目: 国家 863 计划(2007AA804801)资助课题。

作者简介: 郭爱林(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事拍瓦超短脉冲激光技术方面的研究。E-mail: gal147@163.com

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光驱动器的总体光学设计、结构设计等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

宽器中啁啾脉冲的光谱具有空间排布的特点,采用空间光强度调制器对该啁啾脉冲进行空间强度整形,从而间接地实现窄带种子脉冲的光谱整形^[10]。

在激光放大系统中光束质量是至关重要的,因此,要求对啁啾脉冲进行光谱整形的同时不能引入破坏光束传输质量的相位畸变^[11]。石英晶体平凸透镜空间光强调制器^[12]是利用石英晶体的旋光效应来实现激光束空间强度整形的,因此不会引起相位畸变,而且该调制器具有空间滤波器的结构,可以提高光束的质量。

目前,在上海光机所联合实验室开展的拍瓦激光工程是以神光 II 第九路作为主放大器的,其增益介质为钕玻璃,因此选取种子脉冲的中心波长为 1053 nm、光谱宽度为 6.5 nm,由于常规的直接光谱整形技术无法实现这种窄带激光脉冲的光谱整形,本文提出利用石英晶体平凸透镜空间光强调制器来实现啁啾脉冲的光谱整形,从而在展宽器的输出端获得光谱呈平顶分布的种子啁啾脉冲。

2 原理和分析

2.1 石英晶体平凸透镜用于啁啾脉冲光谱整形的基本原理

图 1 为高功率啁啾脉冲激光放大系统的四通展宽器^[13,14]。图中 M_1 、 M_2 和 M_3 为平面反射镜,R 为凹面镜,P 和 FR 分别为偏振片和法拉第旋光器。种子光束经光栅两次衍射后在反射镜 M_2 处光谱具有空间排布的特点。因此,可以在 M_2 之前插入空间光强调制器来实现光谱的整形^[10]。

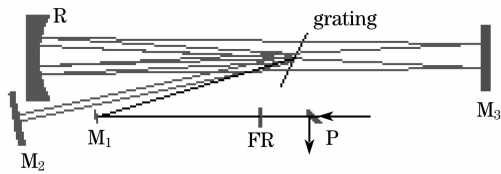


图 1 四通展宽器示意图

Fig. 1 Schematic of the four-pass laser pulse stretcher

用于光谱整形的空间光强调制器结构^[12]如图 2 所示。图中 QCPCPL (Quartz crystal plano-convex lens) 为石英晶体平凸透镜,SF (Spatial Filter) 为空间滤波小孔,偏振片 P_1 的透偏方向与入射光束的偏振方向相同,这样使得光束整形前后的偏振方向保持一致。偏振片 P_2 的透偏方向与 P_1 的透偏方向夹角为 θ ,因此该调制器的空间光强调制函数为

$$M(r) = \cos^4 \{ \alpha(\lambda) [\sqrt{R^2 - r^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}] - \theta \}$$

式中 r 为该点距离中心轴的径向距离(单位: mm), $\alpha(\lambda)$ 为旋光率(单位: $^\circ/\text{mm}$), R 为石英晶体平凸透镜的球面半径(单位: mm), D 为石英晶体平凸透镜的口径(单位: mm)。

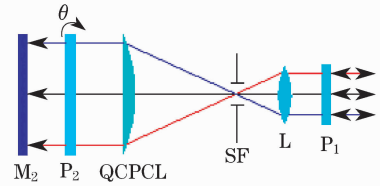


图 2 石英晶体平凸透镜空间光强调制器

Fig. 2 Quartz crystal plano-convex lens spatial light modulator

石英晶体是单轴双折射晶体,光沿着石英晶体的主轴传播时, o 光和 e 光的折射率一致,即不出现双折射现象,而发生旋光现象^[15]。为了避免由双折射现象导致的干涉条纹,要求光束在石英晶体中沿着晶体的主轴传播,所以将石英晶体透镜做成平凸结构,且以凸面迎光的方式放置。

2.2 旋光色散的影响

超短脉冲具有一定的谱宽,而石英晶体的旋光率 $\alpha(\lambda)$ 与波长有关,因此,需要对比分析该空间光强调制器对超短脉冲各光谱成分的调制效果。在常温下,石英晶体的旋光率与波长的关系满足^[16]

$$\alpha(\lambda) = \frac{9.5639}{\lambda^2 - 0.0127493} - \frac{2.3113}{\lambda^2 - 0.000974} - 0.1905,$$

式中入射光波长 λ 的单位是 μm 。取石英晶体平凸透镜口径为 50 mm、凸面曲率半径为 45 mm、 $\theta=0^\circ$ 来模拟计算波长分别为 1047 nm、1053 nm 和 1059 nm 的空间光强调制曲线,计算结果如图 3 所示。计算结果显示空间光强调制器对该种子脉冲的各波长成分的调制曲线形状一致,而不同光谱成分之间存在的微小差异对光谱整形的影响是可以忽略的,为便于分析,可取中心波长 1053 nm 的旋光率来计算调制器对该超短脉冲的整形效果。

基于超短脉冲光谱整形的效率和效果考虑,要求在衰减种子脉冲中心频谱成分的同时,尽可能的保留脉冲的侧翼光谱成分。因此,根据图 3 所示的光强调制函数曲线,要求入射到石英晶体透镜上的光束口径与透镜的口径相当,这样可实现种子脉冲的侧翼光谱成分高效率的通过,而中心频谱成分被大幅衰减。图 2 所示的空间光强调制器中的普通透镜 L 和石英晶体平凸透镜构成一共焦系统,通过匹配两透镜的焦距,该结构可实现任意光束口径的空间啁啾脉冲的光谱整形。

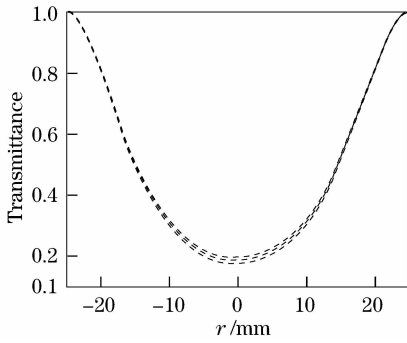


图3 三种入射激光波长分别为 1047, 1053 和 1059 nm 的空间光强调制曲线

Fig. 3 Transmittance curves of the spatial light modulator with three different incident laser wavelengths from 1047 to 1059 nmK)

2.3 光谱整形的可调性

如图 2 所示,在石英晶体平凸透镜空间光强调制器中,偏振片 P_1 的透偏方向固定,保持与原光束的偏振方向一致,而偏振片 P_2 的透偏方向是可变的,通过绕光轴旋转偏振片 P_2 可以方便地改变该光强调制器的调制效果。图 4 为偏振片 P_2 的透偏方向与 P_1 的透偏方向夹角分别为 $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ 时的调制曲线,其中正号表示 P_2 的旋转方向与石英晶体的旋光方向一致,负号表示 P_2 往石英晶体旋光方向相反的方向旋转。可见,通过旋转 P_2 即可方便地改变光强的调制曲线,从而实现光谱整形的可调谐性。

3 实 验

基于上述理论和分析,在上海光机所联合实验室的 20 TW 亚皮秒啁啾脉冲激光系统^[13]的展宽器中进行了石英晶体平凸透镜空间光强调制器应用于窄带啁啾脉冲光谱整形的验证性实验。采用的石英晶体平凸透镜口径为 50 mm、凸面曲率半径为 45 mm,镀有增透膜。

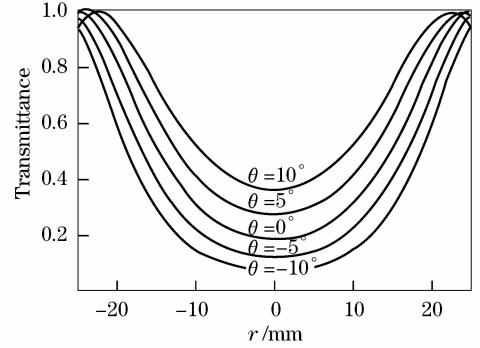


图4 不同 θ 时的调制曲线

Fig. 4 Transmittance curves of the modulator as a function of θ

利用计算机仿真模拟具有高斯型光谱分布的超短脉冲光谱整形的效果如图 5(a)所示,通过光谱整形可获得平顶甚至中心凹陷的输出光谱,通过调节偏振片 P_2 可改变输出光谱的峰值和带宽,降低光谱中心的强度可获得更大的带宽,但降低了光谱整形的效率。

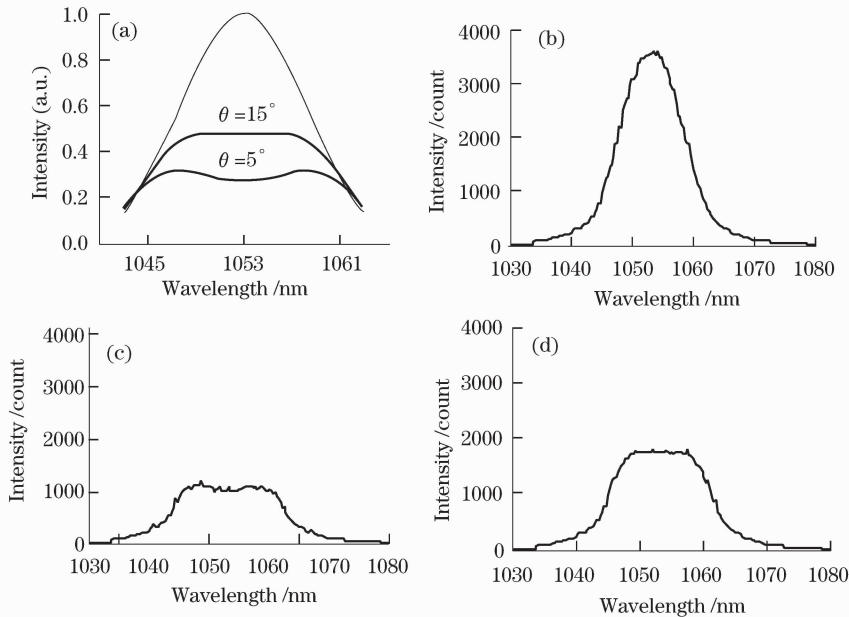


图5 模拟计算及实验结果。(a)光谱整形的模拟计算效果;(b)未经整形的超短脉冲光谱曲线;(c) $\theta=5^\circ$ 时的整形光谱。(d) $\theta=15^\circ$ 时的整形光谱

Fig. 5 Simulated and experimental results. (a) Simulated results of spectrum shaping; (b) spectrum before being shaped; experimental result of spectrum shaping with $\theta=5^\circ$ (c) and $\theta=15^\circ$ (d)

利用光纤光谱仪在展宽器输出端测得的未经光谱整形的实际光谱曲线如图 5(b)所示,光谱中心的强度大于侧翼光谱的强度,具有类似于高斯型的分布。在实验中,对于偏振片 P_2 的透偏方向与 P_1 的透偏方向夹角,选取了仿真模拟中的 5° 和 15° ,经光谱整形后,由于中心光谱的衰减程度大于边沿频谱的衰减,在展宽器输出端获得了平顶光谱的啁啾脉冲,如图 5(c)、(d)所示。对比实验中测得的初始光谱和整形后的光谱,成功地实现了钕玻璃高功率啁啾脉冲激光放大系统中窄带种子脉冲的光谱整形。

4 结 论

利用展宽器中啁啾脉冲的光谱具有空间排布的特点,提出了采用空间光强度调制器对该啁啾脉冲进行空间强度整形,从而间接地实现窄带种子脉冲的光谱整形。利用该方案在实验中获得了光谱呈平顶分布的种子啁啾脉冲。通过旋转偏振片 P_2 的透偏角度可方便地调节整形光谱的峰值强度和谱宽,获得平顶甚至中间凹陷的输出光谱,从而补偿高功率啁啾脉冲放大过程中的增益窄化,降低增益窄化带来的不利影响。

参 考 文 献

- Wei Zhiyi, Zhang Jie, Xia Jiangfan *et al.*. Efficient femtosecond Ti: sapphire system with multipass amplification [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5): 538~542
魏志义,张 杰,夏江帆等. 飞秒激光脉冲的高效率放大研究 [J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(5): 538~542
- Cao Dongmao, Wei Zhiyi, Teng Hao *et al.*. Control the gain-narrowing in femtosecond Ti: sapphire amplifier by shaping oscillator pulse[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(6): 1202~1205
曹东茂,魏志义,滕 浩等. 整形种子脉冲克服放大过程中增益窄化效应的研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**(6): 1202~1205
- 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
- Leng Yuxin, Lin Lihuang, Xhi Zhizhan. Spectrum shaping in a Ti: sapphire regenerative amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 170~173
冷雨欣,林礼煌,徐至展. 掺钕蓝宝石再生放大器的光谱整形[J].

- 光学学报, 2002, **22**(2): 170~173
- Zhu Pengfei, Yang Jingxin, Xue Shaolin *et al.*. Spectrum shaping of the ultrashort pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1075~1078
朱鹏飞,杨镜新,薛绍林等. 超短脉冲的光谱整形[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1075~1078
 - Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. Compensation of gain narrowing by using AOPDF in high-power ultra-short laser systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6): 2764~2768
刘兰琴,彭翰生,魏晓峰等. 高功率超短脉冲激光系统中用 AOPDF 实现增益窄化补偿的实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(6): 2764~2768
 - Liu Xiangmin, Zhu Pengfei, Cao Zhuangqi *et al.*. Spectral shaping of femtosecond pulses with a prism-waveguide coupler [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(5): 454~457
 - Charles G. Durfee, Sudipta Bera, A. J. Sabbah *et al.*. Spectral shaping filter for broadband amplifiers [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **263**(2): 256~260
 - Deng Qinghua, Peng Hansheng, Li Mingzhong *et al.*. Chirped-pulse spectrum shaping using the over-saturating course in optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1527~1531
邓青华,彭翰生,李明中等. 光参量啁啾脉冲过饱和放大实现超短脉冲的频谱整形[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1527~1531
 - Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 272~274
郭爱林,杨庆伟,谢兴龙等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 272~274
 - Ding Lei, Zhao Runchang, Li Mingzhong *et al.*. Feasibility study of liquid crystal light valve on beam-shaping[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(6): 849~852
丁 磊,赵润昌,李明中等. 反射式液晶光阀用于激光束空间整形可行性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(6): 849~852
 - Guo ailin, Yang Qingwei, Zhang Fuling *et al.*. Spatial beam shaping by quartz crystal plano-convex lens [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 586~587
 - Xie Xinglong, Liu Fengqiao, Yang Jingxin *et al.*. Dual sub-picosecond and sub-nanosecond laser system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 658~660
 - Yang Qingwei, Guo ailin, Xie Xinglong *et al.*. Stretcher system in high-energy petawatt laser facility [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 66~71
杨庆伟,郭爱林,谢兴龙等. 高能拍瓦激光装置中的展宽系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(7): 66~71
 - Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Peking University Press, 1984, 215~225
赵凯华,钟锡华. *光学(下册)*[M]. 北京:北京大学出版社,1984, 215~225
 - Chun Ye. Low-loss tunable filter based on optical rotatory[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(6): 1162~1168