



·强激光物理与技术·研究快报·

国产啾啾布拉格光纤光栅在飞秒激光系统中的应用

林庆典^{1,2,3}, 陈业旺⁴, 余 军^{1,2,3}, 郭晓杨^{1,2,3,5}, 周沧涛^{1,2,3,5}, 阮双琛^{1,2,4}

(1. 深圳技术大学 先进材料测试技术研究中心, 广东 深圳 518118; 2. 深圳技术大学 深圳市超强激光与先进材料技术重点实验室, 广东 深圳 518118; 3. 深圳技术大学 工程物理学院, 广东 深圳 518118; 4. 深圳技术大学 中德智能制造学院, 广东 深圳 518118; 5. 工物科技(深圳)有限公司, 广东 深圳 518118)

摘 要: 利用自行研制的啾啾布拉格光纤光栅(CFBG)刻写系统完成 CFBG 样品制作, 成功应用于光纤锁模振荡器和啾啾脉冲放大(CPA)系统中。振荡器可输出 19.4 nm 带宽、18 mW 平均功率激光, 并可压缩至 143 fs, 经时域展宽、功率放大、时域压缩后, 脉冲宽度可至 264 fs。实验结果初步证明了国产 CFBG 在飞秒激光系统应用的可行性。

关键词: 啾啾光纤光栅; 啾啾脉冲放大; 光纤锁模振荡器; 飞秒激光; 超快激光

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220058

Application of domestic chirped fiber Bragg gratings in femtosecond laser systems

Lin Qingdian^{1,2,3}, Chen Yewang⁴, Yu Jun^{1,2,3}, Guo Xiaoyang^{1,2,3,5}, Zhou Cangtao^{1,2,3,5}, Ruan Shuangchen^{1,2,4}

(1. Center for Advanced Material Diagnostic Technology, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;
2. Shenzhen Key Laboratory of Ultraintense Laser and Advanced Material Technology, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;
3. College of Engineering Physics, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;
4. Sino-German College of Intelligent Manufacturing, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;
5. Engineering Physics Technology (Shenzhen) Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: Applying the home made chirped fiber Bragg grating (CFBG) writing system, CFBGs are successfully fabricated and applied in fiber mode-locked oscillator and chirped pulse amplification (CPA) systems. The oscillator can output 19.4 nm bandwidth, 18 mW average power laser, and can be compressed to 143 fs. With pulse stretching, power amplification and compression, 264 fs pulse width can be obtained. The experimental results initially demonstrate the feasibility of the domestic CFBG in femtosecond laser systems.

Key words: chirped fiber Bragg grating, chirped pulse amplification, fiber mode-locked oscillator, femtosecond laser, ultrafast laser

飞秒激光是指脉冲宽度在 fs(10^{-15} s)量级的激光, 由于其峰值功率极高、持续时间极短, 在 3C 产业(包括计算机、通信和消费电子产品)、增材制造、精准医疗、微纳加工、超快检测等领域拥有广阔的应用前景。光纤啾啾脉冲放大技术(CPA), 由于其成本低廉、结构稳定等优势, 逐渐成为工业级飞秒激光的主流方案^[1-3]。图 1 是典型光纤 CPA 系统示意图, 可以看出啾啾布拉格光纤光栅(CFBG)是调控色散的关键器件。在光纤锁模振荡器中, 需要补偿的色散量较小, 通常在 1 ps/nm 以下, 亦被称之为色散管理反射器(DMR)。用作展宽器(Stretcher)时, 需要提供的色散量较大, 通常在 10 ps/nm 以上。CFBG 作为飞秒激光系统的核心器件, 长期依赖进口, 使得我国飞秒激光产业面临不可控风险。

近期深圳技术大学经过技术攻关, 研制出 CFBG 刻写系统所需要的紫外光源、光路整形系统、自动化控制系

* 收稿日期: 2022-03-01; 修订日期: 2022-03-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(12004262); 深圳市高层次人才项目(202024555101039)
联系方式: 林庆典, linqingdian@sztu.edu.cn。
通信作者: 郭晓杨, guoxiaoyang@sztu.edu.cn;
周沧涛, zhoucangtao@sztu.edu.cn;
阮双琛, ruanshuangchen@sztu.edu.cn。

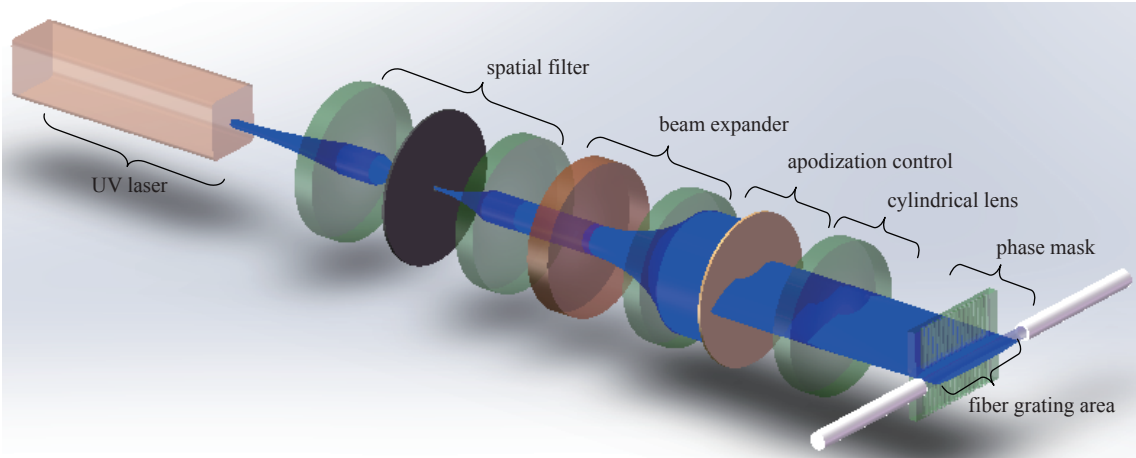


Fig. 1 Schematic diagram of CFBG writing system

图1 CFBG刻写系统示意图

统、在线测量系统,掌握了相位模板设计能力。利用自研的CFBG刻写系统,制备出系列CFBG,并成功应用于光纤锁模振荡器及光纤CPA系统。

图1是CFBG刻写原理示意图,激光器输出的紫外激光经过空间滤波、光束整形后过滤高阶模式以及杂散光,得到较为纯净、均匀的光束;经过扩束系统后得到所需光斑尺寸的准直光束;为实现切趾功能,准直光束之后安装切趾控制模块;经过切趾控制模块后的准直光束经过平凸柱透镜聚焦后到达相位模板,相位模板的 ± 1 级衍射干涉形成条纹照射到载氢后的光敏光纤上,当该干涉条纹照射光纤纤芯一定时间后,明条纹照射处的折射率将上升,明暗条纹也相应地调制到光纤纤芯中,形成布拉格光栅。

基于上述CFBG刻写系统,进行了样品试制,图2(a)是刻写的CFBG-DMR样品反射光谱图,中心波长1032.5 nm,半高全宽光谱带宽为20.7 nm,图2(b)是CFBG-Stretcher样品反射光谱及色散参数,中心波长1032.9 nm,半高全宽光谱带宽为12.6 nm。

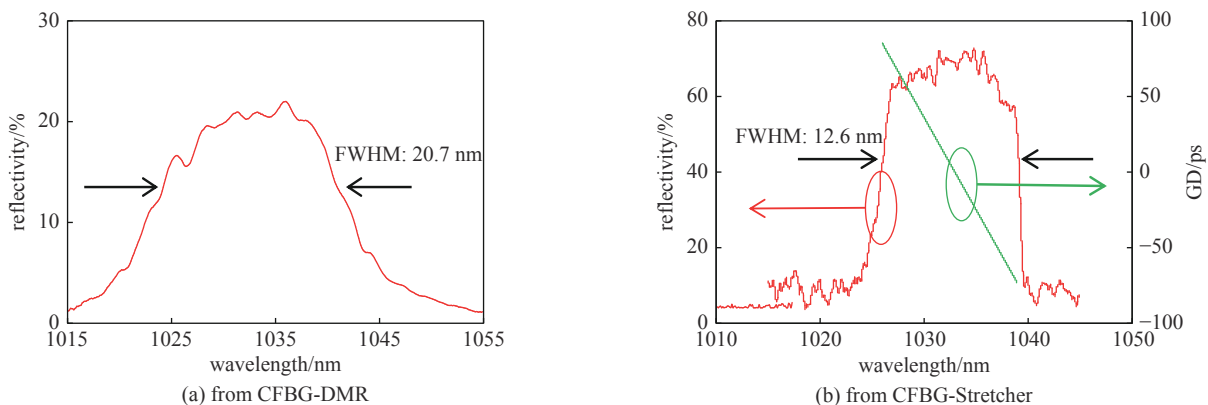


Fig. 2 Reflection spectrum from CFBG-DMR and CFBG-Stretcher

图2 CFBG-DMR样品和CFBG-Stretcher样品反射光谱

使用CFBG-DMR样品按照图3所示光路搭建光纤锁模振荡器,获得重复频率40.4 MHz、中心波长1034.4 nm、光谱带宽19.4 nm、平均功率18 mW的激光输出,图4(a)为实验得到的振荡器光谱波形。将振荡器输出的激光输入到Treacy型双光栅(透射光栅)压缩器,光栅刻线数为1000 lines/mm,入射角为利特罗角,光栅斜距约为5 cm,压缩后脉宽为143 fs(双曲正割拟合),脉冲干净无旁瓣,脉宽压缩测试结果如图4(b)所示,初步证明了该CFBG-DMR在飞秒锁模振荡器应用的可行性。

根据图3光路搭建了光纤CPA系统。种子源采用基于自研CFBG-DMR的光纤锁模振荡器,展宽器采用上述自研的CFBG-Stretcher样品,展宽器的色散量约为12 ps/nm,种子经展宽放大后进入Treacy型双光栅(透射光栅)压缩器,光栅斜距约1.4 m,得到输出平均功率1 W、脉宽264 fs(双曲正割拟合)的激光输出,图5(a)为CFBG展宽后的光谱,(b)为压缩后的脉冲波形。

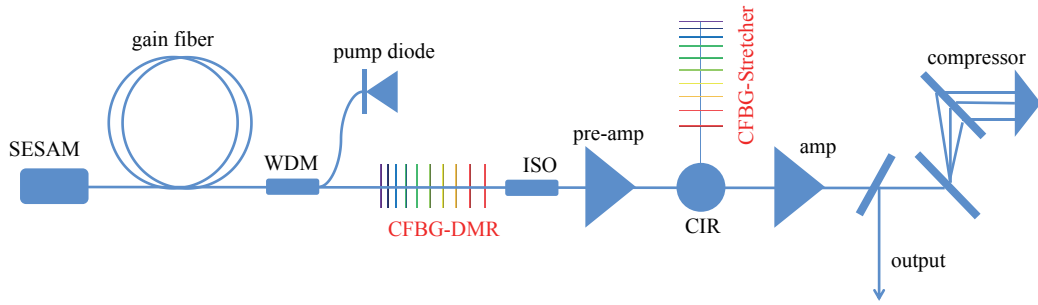


Fig. 3 Fiber chirped pulse amplification system

图3 光纤啁啾脉冲放大系统

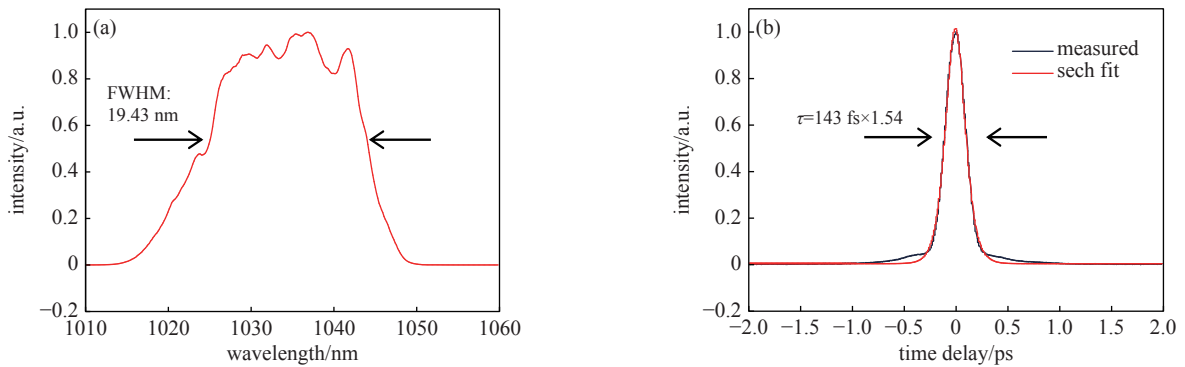


Fig. 4 Output spectrum from fiber mode-locked oscillator and its compressed pulse shape

图4 光纤锁模振荡器输出光谱和激光压缩后时域波形

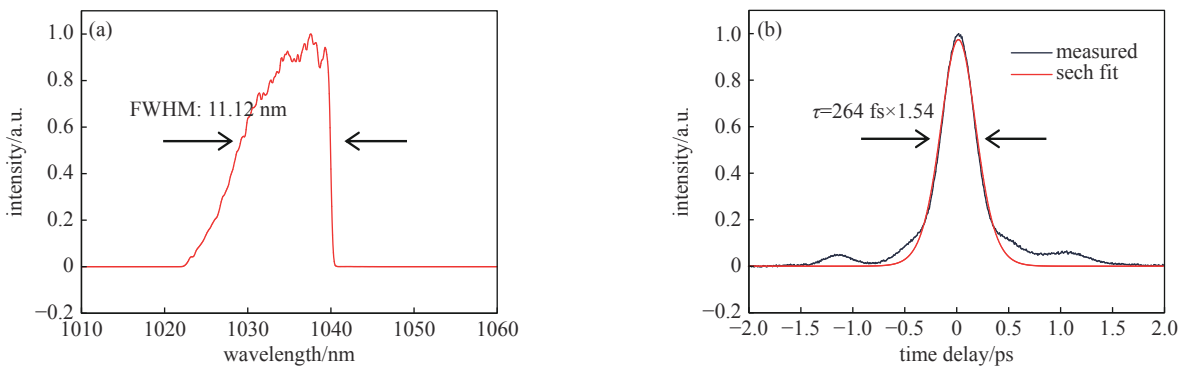


Fig. 5 Output spectrum from fiber chirped pulse amplification system and its compressed pulse shape

图5 光纤啁啾脉冲放大系统压缩后光谱和时域波形

自研 CFBG-DMR 和 CFBG-Stretcher 的性能初步得到证明。以后将进一步对 CFBG 的类型进行扩充,在振荡器方面,实现多种色散量、多种波长的 CFBG 制备;在展宽器方面,实现大色散量(>100 ps/nm)、色散可调节的 CFBG 制备。

参考文献:

[1] 余霞, 罗佳琪, 肖晓晨, 等. 高功率超快光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46: 0508007. (Yu Xia, Luo Jiaqi, Xiao Xiaosheng, et al. Research progress of high-power ultrafast fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46: 0508007)

[2] 闫东钰, 刘博文, 宋寰宇, 等. 高功率光纤飞秒激光放大器的研究现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2019, 46: 0508012. (Yan Dongyu, Liu Bowen, Song Huanyu, et al. Research status and development trend of high power femtosecond fiber laser amplifiers[J]. Chinese Journal Lasers, 2019, 46: 0508012)

[3] 刘一州, 乔文超, 高空, 等. 高功率超快光纤激光技术发展研究[J]. 中国激光, 2021, 48: 1201003. (Liu Yizhou, Qiao Wencao, Gao Kong, et al. Development of high-power ultrafast fiber laser technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48: 1201003)