

啾啾光纤布拉格光栅展宽器的设计与制作

王鸣晓, 李平雪*, 许杨涛, 李舜, 姚传飞

北京工业大学材料与制造学部超短脉冲激光及应用研究所, 北京 100124

摘要 为获得较大展宽量的光纤器件,在相位掩模版刻写技术的基础上设计并制作了两种啾啾光纤布拉格光栅(CFBG)展宽器。基于相位掩模版刻写技术的原理和 CFBG 的色散补偿理论,提出了两种展宽器的制作方法,并优化了刻写光路,获得了高反射率、大反射带宽的 CFBG。通过拉力传感器控制 CFBG 的反射谐振波长,通过改进刻写方式制作了大色散量的 CFBG 级联展宽器和大反射带宽的 CFBG 串联展宽器。搭建了两种展宽器的测试光源,通过直接测量的方式得到 CFBG 级联展宽器所提供的展宽量约为 345 ps,这与理论结果相符;通过正、反接的方式间接推算了 CFBG 串联展宽器所提供的展宽量约为 278.7 ps,这小于理论结果。

关键词 光纤光学; 相位掩模版刻写技术; 啾啾光纤布拉格光栅色散管理; 光纤布拉格光栅级联展宽器; 光纤布拉格光栅串联展宽器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0706002

Design and Fabrication of Chirped Fiber Bragg Grating Stretchers

Wang Mingxiao, Li Pingxue*, Xu Yangtao, Li Shun, Yao Chuanfei

Institute of Ultrashort Pulsed Laser and Application, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract To obtain fiber devices with large stretched amount, we designed and fabricated two kinds of chirped fiber Bragg grating (CFBG) stretchers with the phase mask inscription technology. According to the theories of the phase mask inscription technology and dispersion compensation with CFBGs, the fabrication methods for the two stretchers were proposed and the optical paths were optimized to obtain CFBGs with high reflectivity and wide reflection bandwidth. The reflective resonance wavelength of CFBG was controlled by the tension sensor, and the inscription method was improved. A cascaded CFBG stretcher with large dispersion and a series CFBG stretcher with large reflection bandwidth were fabricated. Fiber sources were then built to test the two kinds of stretchers. The stretched amount provided by the cascaded CFBG stretcher was directly measured to be 345 ps, which was consistent with the theoretical result. The stretched amount provided by the series CFBG stretcher was indirectly calculated through direct and reverse connections. The calculated result, being about 278.7 ps, was smaller than the theoretical result.

Key words fiber optics; phase mask inscription technique; dispersion management of chirped fiber Bragg grating; cascaded fiber Bragg grating stretcher; series fiber Bragg grating stretcher

1 引言

随着光纤激光功率的逐步提升,高功率所激发的光纤非线性效应会造成脉冲的劈裂和光束的

劣化,影响激光系统的转换效率,降低输出的光束质量^[1-3]。因此,需要在光纤激光系统中进行色散管理以展宽脉冲,降低峰值功率,减小非线性效应所带来的影响。

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(62005004)、国家博士后科学基金(212423)、北京市自然科学基金重点项目(KZ201910005006)、北京市自然科学基金(4204091)

通信作者: *pxli@bjut.edu.cn

光纤激光系统中常用的色散管理器件是单模光纤和光栅对^[4-5]。单模光纤可以展宽光脉冲,但是其色散量有限,例如常用的 HI1060 光纤(Corning)在 980 nm 波段的色散为 53 ps/(nm·km),在 1060 nm 波段的色散仅为 38 ps/(nm·km)。自相位调制(SPM)使得光纤在展宽脉冲的同时也会对频谱进行同步展宽^[4,6],即在有色散管理的同时会给系统带来附加效应。而相比于单模光纤,透射式或者反射式光栅对是根据不同波长的光发生衍射时的衍射角不同将光束分离,从而在空间产生不同的时延以管理色散,且没有附加效应。通过改变两片光栅之间的空间距离可以提供较大的展宽量^[7-8]。但是,光栅对的空间结构复杂,会破坏系统的全光纤结构,也不是光纤系统中最佳的色散管理器件。

带有线性啁啾的光纤布拉格光栅即 CFBG,既符合全光纤系统的要求,又具有较大的色散量^[9],cm 量级长度的 CFBG 所提供的展宽量即可与 km 量级长度的单模光纤相当^[10],能够有效避免光纤的 SPM 所造成的频谱展宽^[1],并且 CFBG 体积小、插入损耗低,是近年来光纤系统中进行色散管理的一种新选择。Bartulevicius 等^[11-12]报道了一个飞秒激光系统,采用色散为 24.3 ps/nm 的 CFBG 作为脉冲展宽器件,将 3 dB 带宽约为 10 nm 的脉冲从 13 ps 展宽至 230 ps,经激光放大器后获得了 7.8 nJ 的脉冲输出。Štěpánková 等^[13]采用色散为 205 ps/nm 的 CFBG,将亚皮秒的脉冲展宽至接近 0.5 ns,放大后的平均输出功率为 270 W。可见,CFBG 具有较大的色散,并能提供大的展宽量,有利于光纤激光系统获得高的输出功率,是比较优质的光纤类脉冲展宽器件。

CFBG 的常用刻写技术有两种:逐点刻写法^[14-15]能够灵活调整 CFBG 的参数,获得不同色散的 CFBG,但是受刻写光源光斑聚焦时衍射极限的影响,逐点刻写法多用于高阶 CFBG 或者长周期光纤光栅(LPFG)的刻写^[14,16],对刻写光路和刻写环境稳定性的要求也比较高;相位掩模版刻写法^[17-18]不受上述条件的限制,能实现低阶 CFBG 的高质量刻写,应用更为广泛,但该方法存在一定的局限性,所获得的 CFBG 参数完全依赖于所用的相位掩模版。为弥补这个缺陷,吕京生等^[19]将相位掩模版的位置按照一定的函数进行调制,使光纤光栅的相位随之发生变化,以增加所刻写的光纤光栅的色散量。但这种方法仅能在均匀相位掩模版的基础上增加色散量,对提高本身就带有啁啾的 CFBG 的色散量还

存在一定的困难。Frankinas 等^[20]根据 CFBG 的参数可随温度变化的特点,采用半导体制冷片温度控制器(TEC)控制 CFBG 的温度以实现色散的调整,所获得的最大色散调整量约为 2.75 ps/nm,对光谱宽度有限的光源来说,可获得的脉冲展宽量非常有限。

为提高基于同一相位掩模版所制作的 CFBG 展宽器对脉冲的展宽量,本文结合相位掩模版刻写 CFBG 的基本原理,优化刻写系统,实现了高反射率、宽反射带宽的 CFBG 刻写。设计并制作了两种基于 CFBG 的展宽器,分别从增大色散和拓宽反射带宽两个角度对展宽量进行提升。经过测试发现,两种展宽器所提供的展宽量从单一 CFBG 的 180 ps 分别提高到了 345 ps 和 278.7 ps,并且两种展宽器的制作方法相对简单,能够广泛应用于科研和生产中。

2 CFBG 展宽器的原理和设计

2.1 CFBG 的色散理论

光在均匀光纤布拉格光栅(FBG)中传输时,纤芯内的光将在每个光栅面处发生反射,若波长不满足布拉格条件,则依次排列的光栅面反射光的相位均不相同,最后相互抵消;若波长满足布拉格条件,则每个光栅面反射的光相位相同,光强逐步累加,最后形成一个反射峰,即布拉格反射。根据光发生干涉的基本原理,即光程差等于波长整数倍时干涉相长,得到

$$2n_{\text{eff}}\Lambda = m\lambda_{\text{B}}, \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为有效折射率; Λ 为 FBG 的周期; m 为光栅阶数,取正整数; λ_{B} 为布拉格反射谐振波长。均匀 FBG 的周期 Λ 为一个常数,根据(1)式, λ_{B} 也为一个常数。而 CFBG 一般指的是线性啁啾 FBG,即周期 Λ 沿光纤方向呈线性变化,则布拉格反射谐振波长 λ_{B} 也沿光纤方向呈线性变化。假设一束光从短周期方向耦合进 CFBG,则短波长的光在 CFBG 的近端发生反射,而长波长的光在远端发生反射,长、短波之间存在时间延迟,产生色散,如图 1 所示。则 CFBG 的色散^[9],即相隔单位波长的两束光经 CFBG 反射后所产生的时延,可表示为

$$D = \frac{2n_{\text{eff}}L}{c} \frac{1}{\Delta\lambda}, \quad (2)$$

式中: L 为 CFBG 的长度; c 为真空中的光速; $\Delta\lambda$ 为 CFBG 两端反射的波长差。若光从长周期方向耦合进 CFBG,则长波长的光先反射,短波长的光后反

射,即 CFBG 既可以对脉冲进行展宽,也可以对其进行压缩。并且,展宽量与压缩量理论上是相同的,均等于 $D \cdot d\lambda$,其中 $d\lambda$ 为补偿带宽。若光源的光谱

宽度大于 CFBG 的反射带宽,则 $d\lambda$ 取 CFBG 的反射带宽;若光源的光谱宽度小于 CFBG 的反射带宽,则 $d\lambda$ 取光源的光谱宽度。

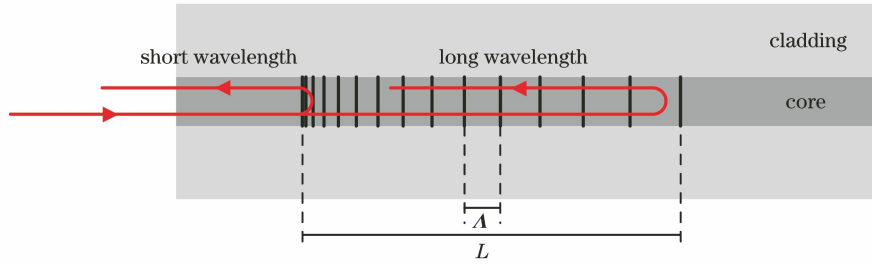


图 1 不同波长的光在 CFBG 中反射的示意图

Fig. 1 Schematic of light with different wavelengths reflected in CFBG

根据(1)式,1阶 CFBG 的波长差为

$$\Delta\lambda = 2n_{\text{eff}}\alpha L, \quad (3)$$

式中: α 为 CFBG 的啁啾率,即单位长度内周期的变化量。将(3)式代入(2)式,并进行化简,得到

$$D = \frac{1}{c\alpha}, \quad (4)$$

即 CFBG 的色散 D 与啁啾率 α 成反比。

本文所采用的相位掩模版(Ibsen)的中心周期为 732.37 nm,啁啾率为 1.25 nm/cm,栅区长度为 2 cm。根据相位掩模版的刻写理论^[21],所获得的 CFBG 的中心周期为 366.185 nm,啁啾率为 0.625 nm/cm,最大长度为 2 cm。根据(4)式,其色散理论上为 53 ps/nm。依据耦合模理论^[9]对上述 CFBG 的反射光谱进行了模拟,结果如图 2 所示,3 dB 带宽约为 4.1 nm,则该 CFBG 能够提供的最大展宽量理论上为 217 ps。

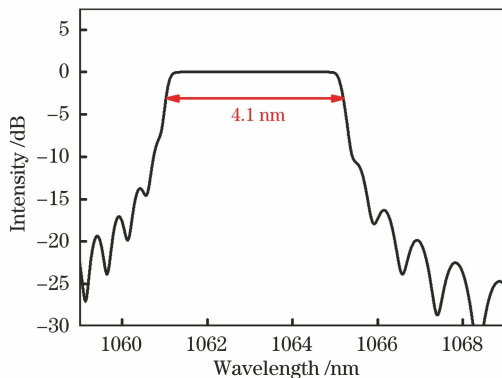


图 2 CFBG 的反射光谱模拟结果

Fig. 2 Simulation result of reflective spectrum for CFBG

2.2 基于 CFBG 的展宽器设计

为增大基于同一相位掩模版所制作的 CFBG 展宽器对相同光谱宽度的光脉冲的展宽量,设计了 CFBG 级联展宽器,结构如图 3(a)所示。CFBG 级联展宽器由多只 CFBG 通过多个光纤环形器构

成,其中每只 CFBG 均连接本级环形器的 2 口,前一级环形器的 3 口连接后一级环形器的 1 口,依此类推。光从展宽器的输入端即第一个环形器的 1 口输入,经第一级 CFBG 反射后,通过环形器的 3 口进入下一级环形器的 1 口,并耦合进该级的 CFBG 中被再次反射,最后从展宽器的输出端即最后一级环形器的 3 口输出。假设多只 CFBG 的中心反射谐振波长、光栅长度和啁啾率均相同,即经每一只 CFBG 反射后的脉冲光的光谱均完全匹配,则这部分脉冲光经过该展宽器后被多次展宽,总的展宽量成倍于单只 CFBG 的展宽量,而反射带宽不变,则总的色散成倍于单只 CFBG 的色散。由于每级联一只 CFBG 必须通过一个光纤环形器实现,损耗会成倍增加,则在给定功率的条件下,级联展宽器可连接的最大级数受限于展宽器的损耗。所以,级联展宽器对光脉冲的展宽量与其自身的损耗呈正比关系。

为克服上述缺陷,设计了 CFBG 串联展宽器,结构如图 3(b)所示。不同于级联展宽器,CFBG 串联展宽器由多只 CFBG 和一个光纤环形器构成。多只 CFBG 按照同一方向串联,即前一只 CFBG 的短周期端与后一只 CFBG 的长周期端相连,依此类推。最终统一连接环形器的 2 口,环形器 1 口和 3 口分别为展宽器的输入端与输出端。不同于 CFBG 级联展宽器,CFBG 串联展宽器中每只 CFBG 的反射光谱不能相同,否则光经第一只 CFBG 后即被全部反射并从环形器的 3 口输出,不会再有光耦合进入其他的 CFBG 中,并且所有 CFBG 的反射光谱应首尾相连,即第一只 CFBG 反射光谱的最大波长对应第二只 CFBG 反射光谱的最短波长,在色散不变的情况下通过增加反射带宽来增加总的展宽量。对于在单模光纤上刻写的 CFBG 来说,通过给光纤施

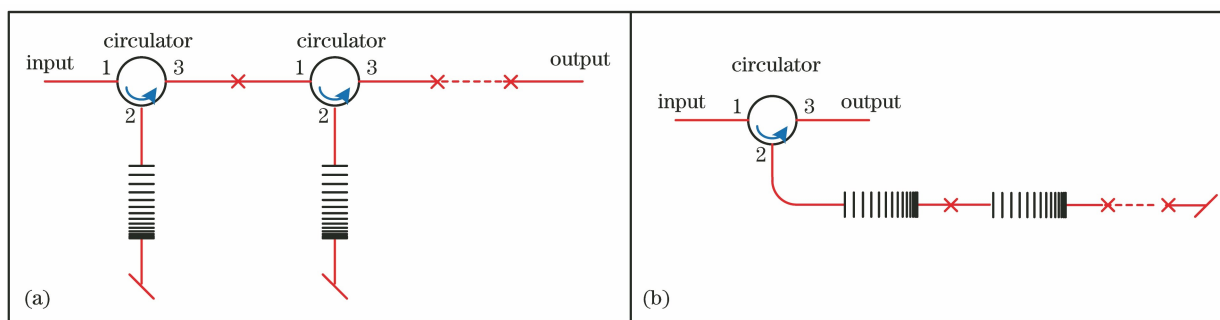


图 3 CFBG 级联展宽器和 CFBG 串联展宽器的示意图。(a)CFBG 级联展宽器;(b)CFBG 串联展宽器

Fig. 3 Schematics of cascaded CFBG stretcher and series CFBG stretcher. (a) Cascaded CFBG stretcher; (b) series CFBG stretcher

加拉力的方法可以对布拉格反射谐振波长进行调谐^[22]。理论上,单模光纤能承受的最大拉力约为 500 g,对应约为 5 nm 的波长调谐量^[22]。因此,基于同一块相位掩模版,通过给光纤施加不同的拉力,可以获得光谱首尾相连的不同波段的 CFBG。由于串联展宽器只需要一个光纤环形器,损耗不会随级数的增加而成倍增大,但不能对 CFBG 的反射谐振波长进行无限制的调谐,因此串联展宽器的最大级数受限于光纤可承受的最大拉力。另外,宽的反射带宽需要与同样宽度光谱的光源进行匹配才能获得较大的展宽量,因此在实际应用时还需考虑光源的光谱宽度等因素。根据图 2 的模拟结果,在上述条件下最多能串联三级 CFBG,反射光谱如图 4 所示。其中点线反射谱对应的是拉力为 0 g 时的 CFBG,实线对应的是拉力为 500 g 时的 CFBG,二者的中心波长相距 5 nm。而虚线所对应的是拉力为 250 g 的 CFBG,其可保证展宽器的反射光谱连续。则该展宽器的反射光谱应为三只 CFBG 反射光谱的总包络线,其 3 dB 带宽理论上为 9.1 nm。

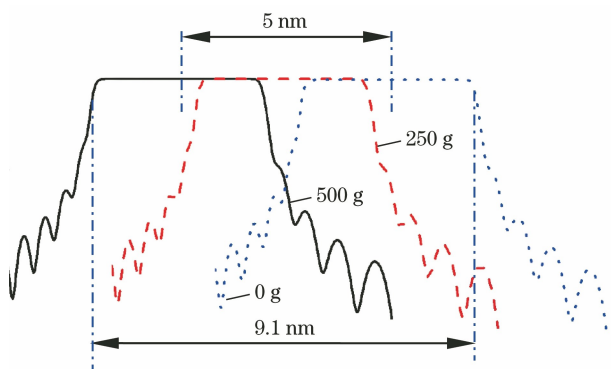


图 4 模拟 3 级串联 CFBG 展宽器的反射光谱

Fig. 4 Simulated reflective spectra of three stage series CFBG stretcher

3 CFBG 展宽器的制作

实验所采用的刻写光源为德国 Xiton 公司生产的调 Q Nd:YVO₄ 五倍频激光器,型号为 Impress 213,输出波长为 213 nm,重复频率为 12.5 kHz,平均功率在 0~130 mW 范围内可调,脉冲宽度为 6.1 ns,发散角为 0.6 mrad,所输出的椭圆光斑在距离激光头 110 cm 处的直径为 770 μm 和 890 μm。图 5 为刻写光路的示意图。为实现将亚毫米量级输出光斑聚焦到单模光纤纤芯尺寸的目的,采用双柱透镜聚焦系统,利用 168 mm 焦距的柱透镜对输出光束进行第一次聚焦,以增大光束的发散角,再用 46 mm 焦距的柱透镜进行第二次聚焦。将 46 mm 焦距的柱透镜和 45°全反射镜同时固定在 Newport

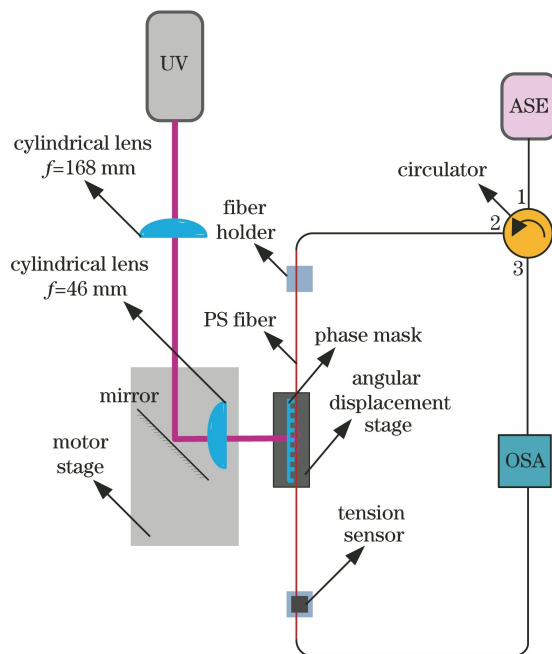


图 5 刻写光路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of inscription of optical path

电动位移台上,理论上可实现 0~100 mm(电动位移台的最大位移)内不同长度 CFBG 的扫描刻写。光敏光纤(PS1060, Nufern)置于 46 mm 柱透镜的后焦点位置,相位掩模版平行于光纤并置于其前方 0.5 mm 处。宽光谱光源(ASE)连接环形器 1 口,环形器 2 口连接光敏光纤的一端,光敏光纤另一端连接光谱仪(OSA),同时环形器 3 口也连接 OSA,以实现反射光谱和透射光谱的实时监测。在一侧的光纤夹持器上设置拉力传感器,实现拉力的调控,以调谐 CFBG 的布拉格反射谐振波长^[22]。

3.1 CFBG 刻写光路的优化与级联展宽器的制作

采用具有 2.1 节中所述参数的相位掩模版进行扫描刻写,扫描长度设置为相位掩模版的栅区长度 2 cm,即所刻写的 CFBG 的长度为 2 cm,总的刻写时间约为 2 min。所获得的 CFBG 的反射光谱如图 6(a)中实线所示,其 3 dB 反射带宽仅约为 1.6 nm,远小于理论模拟的 4.1 nm 的结果。分析其原因是刻写光路所在的光学平台存在一定的倾斜误差,导致刻写时光敏光纤没有垂直于相位掩模版的栅齿,实际上刻写得到的是啁啾倾斜光纤布拉格光栅(CTFBG)。而根据 CTFBG 的原理^[23],某些波长的入射光在还没有到达满足布拉格条件的栅区时就由倾斜的光栅面耦合进了包层,造成了光波的损耗,导致反射带宽变窄。为弥补系统的倾斜误差,获得较宽的反射光谱,在相位掩模版下设置高精度角位移台,以实现相位掩模版倾斜角的精确调整,保证光敏光纤严格垂直于掩模版的栅齿。为保证经双柱透镜聚焦后微米级宽的线状光斑能够精准聚焦到光敏光纤的纤芯上,设置高倍 CCD 相机进行辅助的光路调整。经上述优化后的光路所刻写的 CFBG 的反射光谱明显展宽,如图 6(a)中虚线所示。虽然色散同样为 53 ps/nm,但其 3 dB 带宽展宽至约 3.4 nm,则理论上能够提供的展宽量约为 180 ps。

在此基础上,刻写了两只 2 cm 长的 CFBG,并通过两个光纤环形器制成两级 CFBG 级联展宽器。通过施加拉力的办法将两只 CFBG 的中心波长均调谐到 1064 nm,反射光谱如图 6(b)所示,3 dB 带宽均为 3.4 nm 左右,该展宽器的色散理论上为单只 CFBG 的两倍,即 106 ps/nm,则其能提供的最大展宽量约为 360 ps。

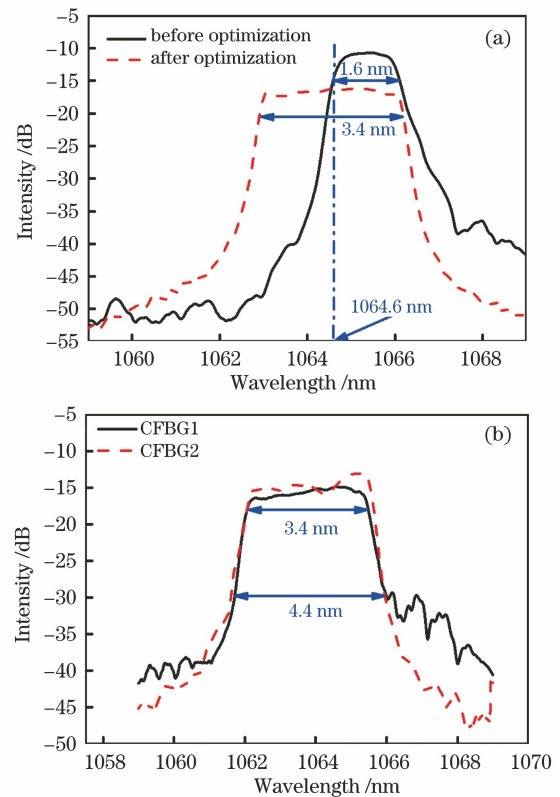


图 6 刻写光路优化前后所获得的 CFBG 反射光谱和级联展宽器中 CFBG 的反射光谱。(a)刻写光路优化前后所获得的 CFBG 反射光谱;(b)级联展宽器中 CFBG 的反射光谱

Fig. 6 Reflective spectra of CFBGs before and after optimization of optical path and reflective spectra of CFBGs in cascaded CFBG stretcher. (a) Reflective spectra of CFBGs before and after optimization of optical path; (b) reflective spectra of CFBGs in cascaded CFBG stretcher

3.2 CFBG 串联展宽器的制作

根据 2.2 节的分析,刻写了三只反射光谱有重叠的 CFBG 并将其串联,CFBG 自身的长度均为 2 cm,分别刻写在三根 40 cm 长的光敏光纤中间位置。由于给光纤施加拉力后进行紫外光曝光刻写时,光敏光纤折射率的光致折变量达到饱和的值小于未施加拉力时的值^[24],而光致折变量与光栅的反射率成比例^[9]。因此,所施加的拉力越大,获得的 CFBG 的反射率越低^[24]。当所施加的拉力接近 400 g 时,反射率过低导致刻写失败。因此,在保证刻写质量的前提下,选择的拉力(F)分别为 340 g、170 g 和 0 g,所获得的 CFBG 的中心波长分别为 1060.6 nm、1062.5 nm 和 1064.6 nm,3 dB 带宽均

为 3.4 nm, 反射光谱如图 7(a) 所示。施加 340 g 拉力时 CFBG 的反射谱高度最低, 如图 7(a) 中实线所示; 而施加 0 g 拉力的 CFBG 反射谱高度最高, 如图 7(a) 中点线所示; 反射谱的高度对应 CFBG 的反射率, 即反射率随所施加拉力的增加而减小。将三只 CFBG 按照统一的方向依次熔接, 中心波长短的在前, 中心波长长的在后, 再将 CFBG 与光纤环形器相连, 制成三级 CFBG 串联展宽器, 其反射谱为三只 CFBG 反射谱的包络线, 如图 7(a) 中点划线所示。但将该展宽器接入光纤激光器中, 脉冲经展宽后却劈裂为三个, 如图 7(b) 所示。根据 2.1 节中光在 CFBG 中传播的原理, 虽然光经该串联展宽器后的反射谱是连续的, 但由于展宽器中的三只 CFBG 之间存在约 40 cm 的距离 [图 7(b) 中插图所示], 则经不同的 CFBG 后发生反射的光之间存在不连续的时延, 这导致时域上出现三个脉冲。由于在熔接时将反射率最低的 CFBG 设置在前, 则其所对应的脉冲在前且幅值最低; 而反射率最高的 CFBG 在最

后, 对应的脉冲在最后且幅值最高。

针对上述问题, 调整了刻写方法, 在一根较长的光敏光纤上完成一次刻写后平行移动相位掩模版 2 cm, 并同时调整光敏光纤上所施加的拉力, 以保证三次所刻写的 CFBG 在同一根光纤上紧密相连, 避免多余的光纤所造成的时间延迟, 结构如图 7(c) 中插图所示。改进方法所制作的展宽器再次与光脉冲相互作用, 作用后的脉冲没有发生分裂, 如图 7(c) 所示。改进后展宽器的反射光谱如图 7(d) 中实线所示, 3 dB 带宽增至约 7.2 nm。由于其色散量仍为 53 ps/nm, 则理论上该展宽器可提供的展宽量为 382 ps, 等效于由一块相应参数相位掩模版所刻写的反射带宽为 7.2 nm 的 CFBG。从图 7 中可见, 在刻写每段 CFBG 时施加的不同拉力造成了锯齿状反射光谱的顶部最大差值约为 5 dB^[9, 24]。考虑到 CFBG 的反射率与光栅刻写时的紫外光曝光剂量成比例, 可通过调整刻写时的光源功率来调整三段 CFBG 的反射率, 得到更平滑的反射光谱。为继续

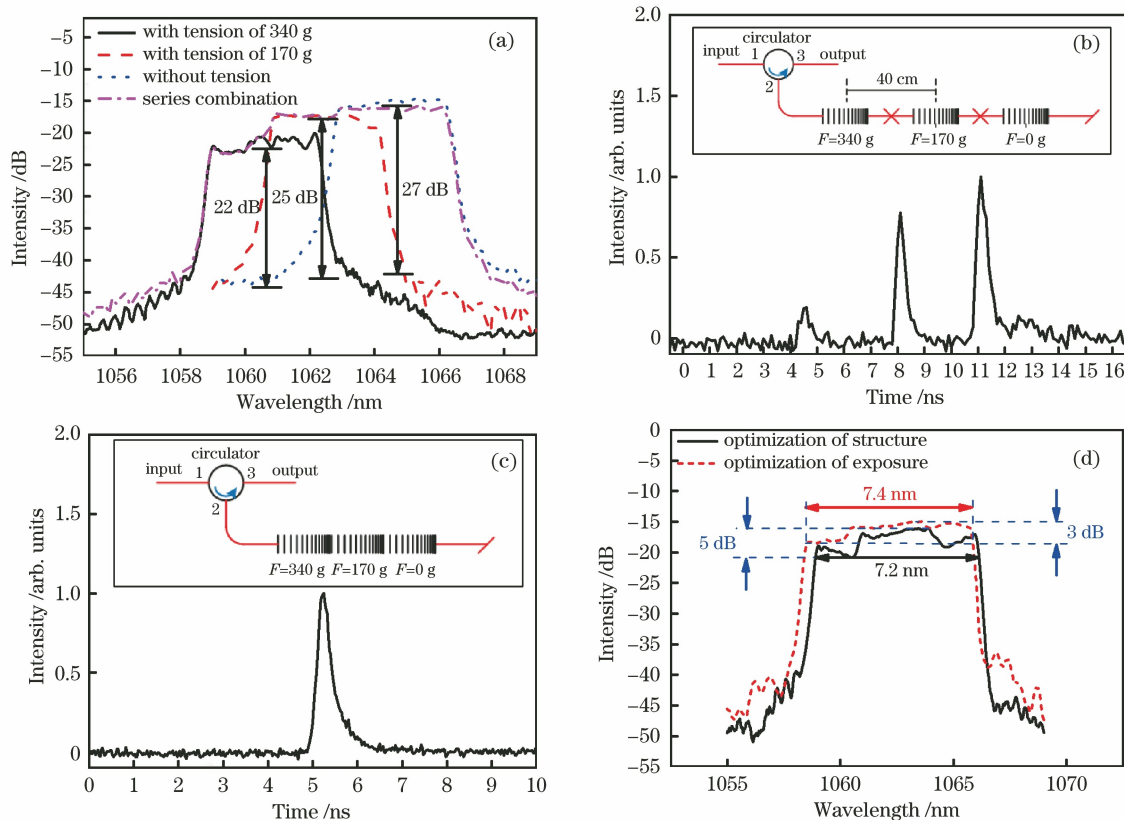


图 7 结构优化前、后 CFBG 串联展宽器的反射光谱和展宽的脉冲结构(插图分别为结构优化前后串联展宽器中 CFBG 的排列示意图)。结构优化前 CFBG 串联展宽器的 (a) 反射光谱和 (b) 展宽脉冲; 结构优化后 CFBG 串联展宽器的 (c) 展宽脉冲和 (d) 反射光谱
 Fig. 7 Reflection spectra and broadband pulse structure of series CFBG stretcher before and after structure optimization (insets are schematic diagrams of CFBG arrangement in series CFBG stretcher). (a) Reflective spectra and (b) stretched pulses before structural optimization of series CFBG stretcher; (c) stretched pulses and (d) reflective spectra after structural optimization of series CFBG stretcher

拓宽反射光谱的宽度,适当增大了所施加的拉力值并重新进行刻写。在第一段 CFBG 上所施加的拉力为 360 g,采用 130 mW 的功率进行刻写;在第二段 CFBG 上所施加的拉力为 180 g,采用 110 mW 的功率进行刻写;在最后一段 CFBG 上所施加的拉力为 0 g,采用 90 mW 的功率进行刻写。最终得到的串联 CFBG 的反射光谱如图 7(d)中虚线所示,反射谱顶端相对更平滑。虽仍保留锯齿状的特点,但最大差值已由原来的 5 dB 降为 3 dB,3 dB 带宽也增加至 7.4 nm。理论上,该串联 CFBG 展宽器可提供的展宽量应为 392 ps。

4 CFBG 展宽器的测试及讨论

4.1 CFBG 级联展宽器的测试

为测试 CFBG 级联展宽器,搭建了中心波长为

1064.1 nm、平均输出功率为 115 mW 的光纤激光源,输出光谱如图 8(a)所示。虽然光源的 3 dB 带宽(3 nm)略小于级联展宽器,但整体光谱均处于级联展宽器的有效工作波段内。用自相关仪(FR-103XL, Femtochrome)测量其脉冲的结果与所拟合的高斯曲线如图 8(b)所示,3 dB 带宽约为 34 ps。在该光源后熔接级联展宽器以对脉冲进行展宽[图 8(c)],展宽后的平均输出功率为 22 mW,采用高速示波器(LeCroy,采样频率为 13 GHz)测量得到展宽后的脉冲宽度约为 379 ps。则级联展宽器所提供的总展宽量约为 345 ps,其光谱宽度为 3.4 nm,通过计算可得色散为 101.5 ps/nm,这与理论结果基本相符。但是整体损耗约为 7.2 dB,其中包括每只光纤环形器的损耗(0.8 dB)以及光纤的熔接损耗(0.2 dB)等。

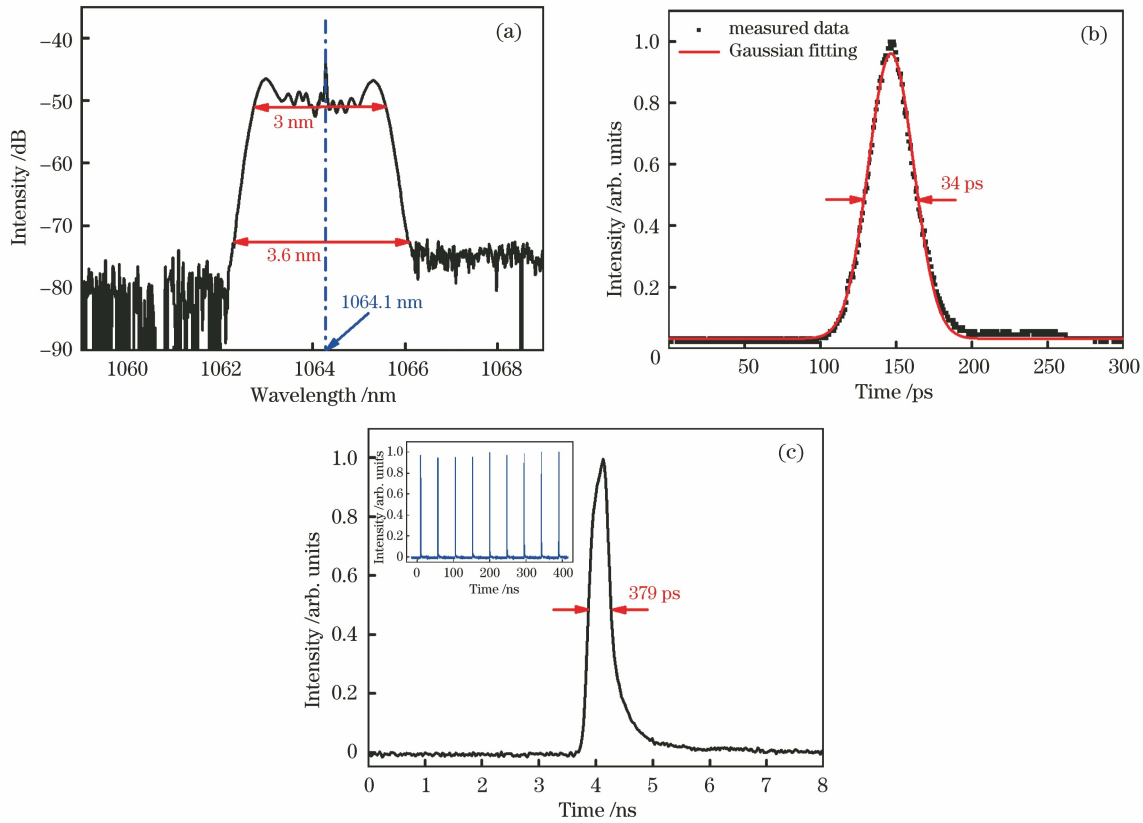


图 8 光纤光源的输出光谱和脉冲,以及连接 CFBG 级联展宽器后的脉冲。光纤光源的(a)输出光谱和(b)脉冲;(c)连接 CFBG 级联展宽器后的脉冲(插图:脉冲序列)

Fig. 8 Spectra and pulse of fiber source, and pulse after cascaded CFBG stretcher. (a) Output spectra and (b) pulse of fiber source; (c) pulse after cascaded CFBG stretcher (inset: pulse sequence)

根据所测量到的级联展宽器的实际损耗,如果采用相同参数的光纤环形器,在现有的光源下,连接 3 级展宽器后的功率应为 9.6 mW,连接 4 级展宽器后的功率应为 4.2 mW,连接 5 级展宽器后的功率应为 1.8 mW。功率继续降低会超出一些测试仪器

的响应极限,因此在现有条件下最大的级联展宽器级数为 5 级,展宽量可达 862.5 ps。但光通过每一级展宽器后功率的降低令光谱变窄,导致展宽量的逐级减小,因此实际的展宽量应该小于 862.5 ps。若只考虑展宽的结果,忽略展宽效率和光纤环形器

的成本问题,则通过提升光源的输出功率,可以继续增加级联展宽器的级数,获得更大的展宽量。

4.2 CFBG 串联展宽器的测试

针对串联展宽器更宽的工作波段,对上述光源进行调整,获得了光谱范围大于串联展宽器工作波段的脉冲光源,如图 9(a)中实线所示。光源的宽光谱虽然能保证串联展宽器的最大展宽量,但是由于连接展宽器后,部分光谱会被展宽器滤除,脉冲

宽度也会受到影响,因此不能通过将接入展宽器前后所测量到的脉冲宽度直接作差来计算其所提供的展宽量。考虑到同一光源在正、反接入同一个串联展宽器后的输出光谱基本相同,如图 9(a)中虚线和点线所示,将两次测得的脉冲宽度作差能够抵消光谱变化对脉冲宽度所带来的影响,然后将差值除以 2,即可推算出串联展宽器所提供的展宽量。

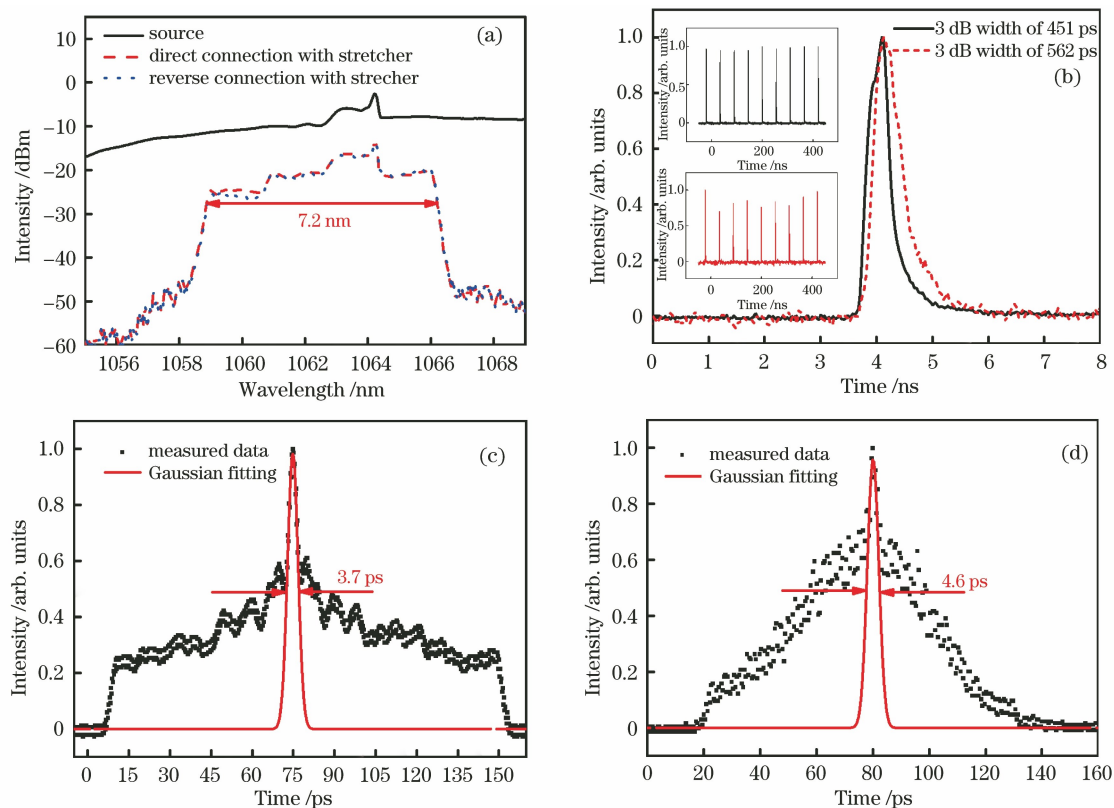


图 9 光纤光源的光谱和接入串联展宽器后的光谱与脉冲。(a)光源的输出光谱以及正、反接入 CFBG 串联展宽器后的光谱;(b)正接入两只串联展宽器后的脉冲(插图为脉冲序列);(c)曝光优化前和(d)曝光优化后反接入串联展宽器后的脉冲

Fig. 9 Spectra of fiber laser and spectra and pulses after connection with series CFBG stretcher. (a) Spectrum of source and spectra after direct connection and reverse connection with series CFBG stretcher; (b) pulses after connection with two series extenders (inset is pulse train); pulses of reverse connection with series CFBG stretcher (c) before and (d) after exposure optimization

根据上述方法,将结构优化后所刻写的两只串联展宽器分别正、反接入两个光纤光源以对脉冲进行展宽和压缩,两光源的输出光谱波段范围均远大于串联展宽器的工作波段。用高速示波器(LeCroy, 采样频率为 13 GHz)测量展宽后的脉冲结果,如图 9(b)所示,未经曝光优化的串联展宽器展宽后的脉冲 3 dB 宽度为 451 ps,而经曝光优化的展宽器展宽后的脉冲 3 dB 宽度为 562 ps。用自相关仪(FR-103XL, Femtochrome)测量压缩后的脉冲,结果如图 9(c)和(d)所示。峰值的两侧均可见

对称分布的基座,这是由于光源的光谱是通过非线性效应进行展宽的,而 CFBG 串联展宽器所提供的线性色散无法对原有色散进行完全补偿,因此在自相关信号中的窄脉冲下存在较宽的基座,且光源结构的差异造成了基座形状的不同。用高斯函数对窄脉冲数据进行拟合,拟合曲线的半峰全宽分别为 3.7 ps 和 4.6 ps,这表明被压缩后的脉冲宽度为 3.7 ps 和 4.6 ps。然后经推算得出两只展宽器所提供的展宽量;未经曝光优化的串联展宽器可提供的展宽量约为 223.7 ps,光谱 3 dB 宽度为 7.2 nm,则

实际色散为 31.1 ps/nm;经过曝光优化的串联展宽器可提供的展宽量约为 278.7 ps,光谱 3 dB 宽度为 7.4 nm,则实际色散为 37.7 ps/nm。可见,两只展宽器所提供的展宽量和色散均小于理论结果,其中经过曝光优化后的串联展宽器由于具有更为平坦的反射光谱,展宽效果和色散均优于前者。若能继续优化串联展宽器的反射光谱,令其顶部的平坦度继续增加,则最终的展宽效果应与单只具有相同反射带宽和色散的 CFBG 相当。

另外,测试串联展宽器的工作效率需要有与其工作光谱刚好匹配的光源。较宽光谱的光源会有光在测量范围之外被滤除,这会影响测试结果的准确性,而由于展宽器反射光谱的顶端非绝对平坦,较窄光谱的光源无法准确表征展宽器整体的工作效率。但是,受限于实际条件,采用了输出功率为 15 mW、3 dB 带宽为 0.07 nm 的光纤光源进行测试。光纤光源的中心波长为 1063.9 nm,该波长所对应的串联展宽器的顶部高度处于平均水平,则测量的结果可以大致反映串联展宽器整体的工作效率。将光源接入曝光优化的串联展宽器,输出功率为 6.4 mW,则损耗为 3.7 dB。忽略光纤环形器的损耗(0.8 dB)和光纤的熔接损耗(0.2 dB)等,串联 CFBG 的实际

损耗约为 2.7 dB。

综上所述,相比单只 CFBG 理论上 180 ps 的展宽量,级联展宽器和串联展宽器所提供的展宽量均有所提升,并且级联展宽器的展宽量大于串联展宽器,但是这两种展宽器的损耗大,效率相对较低。而串联展宽器的反射光谱虽然足够宽,但刻写 CFBG 的过程中需要施加拉力来调节其反射谐振波长,从而造成展宽器不同波段所对应的反射率存在差异,即使通过调整刻写光源的功率对反射光谱进行优化,串联展宽器的顶部依然保留了轻微的锯齿状,这在一定程度上会降低串联展宽器的展宽效果。另外,在实际刻写时,级联展宽器中的 CFBG 由于波长统一,制作过程较为简单,而串联展宽器中的 CFBG 需逐段对拉力和刻写光源功率进行调整,并需保证多段 CFBG 无缝衔接地刻写在同一根光纤上,该制作过程相对繁琐,因此在实际应用时应综合多种因素来选择最合适的展宽器。表 1 列出了基于同一相位掩模版制作的级联型、串联型和普通型 CFBG 展宽器的性能对比,其中 D' 代表单只 CFBG 的色散, $\Delta\lambda'$ 代表单只 CFBG 的反射带宽, n 代表级联或串联的展宽器级数。

表 1 基于同一相位掩模版制作的不同类型 CFBG 展宽器的性能对比

Table 1 Performance comparison among different types of CFBG stretchers based on phase mask with fixed parameters

Stretcher type	Dispersion D / (ps·nm ⁻¹)	Bandwidth $\Delta\lambda$ /nm	Stretching accumulation $D \cdot \Delta\lambda$ /ps	Advantage	Disadvantage
Cascaded CFBGs	$n \cdot D'$	$\Delta\lambda'$	$n \cdot \Delta\lambda' \cdot D'$	Adjustable stretching accumulation	Large loss
Series CFBGs	D'	$n \cdot \Delta\lambda'$	$n \cdot \Delta\lambda' \cdot D'$	Adjustable stretching accumulation	Complex fabrication
Single CFBG	D'	$\Delta\lambda'$	$\Delta\lambda' \cdot D'$	Low loss	Unadjustable stretching accumulation

5 结 论

制作大展宽量的光纤展宽器件对超短脉冲光纤激光系统的发展具有非常重要的意义。结合 CFBG 色散的基本原理和 CFBG 的相位掩模版刻写技术,设计了两款基于 CFBG 的展宽器。在对 CFBG 的反射光谱进行理论模拟的基础上,通过优化 CFBG 的刻写光路,实现了高反射率、宽反射带宽的 CFBG 刻写,并克服了掩模版刻写技术的局限性。在同一相位掩模版的基础上,分别制作了更大色散的 CFBG 级联展宽器和更宽反射带宽的 CFBG 串联展宽器。针对两款展宽器分别搭建了相应的测试光源。通过直接测量光源在接入 CFBG 级联展宽器

前后的脉冲宽度,得到级联展宽器所提供的展宽量约为 345 ps,实际的色散为 101.5 ps/nm,这与理论结果相符。同时,计算得到级联展宽器的损耗约为 7.2 dB,并得出在相同条件下可以连接的最大展宽器级数为 5 级。通过正、反接入串联展宽器的方式,在光源光谱宽度超过展宽器工作波段的基础上间接推算出曝光优化前后的两只串联展宽器所提供的展宽量分别为 223.7 ps 和 278.7 ps,色散分别为 31.1 ps/nm 和 37.7 ps/nm,这些均小于理论结果。采用一个窄光谱的光源测试了曝光优化后的串联展宽器的损耗约为 3.7 dB。两种展宽器均成功实现了基于单一相位掩模版刻写的 CFBG 展宽器展宽量的有效增加,为实现更大色散和更多参数 CFBG

展宽器的制作提供了很好的解决方案。

下一步工作计划将两种展宽器应用到光纤激光系统中,并进行后续的放大及压缩实验,以获得更多展宽器的评价参数,并对其结构进行更好的优化和调整。

参 考 文 献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. Jia D F, Ge C F, Transl. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2014: 9-14.
Govind Agrawal. 非线性光纤光学 [M]. 贾东方, 葛春风, 译. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 9-14.
- [2] Xu Y, Peng Z G, Cheng Z C, et al. Research progress of ytterbium-doped fiber-solidhigh-power ultrashort pulse amplification [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501003.
徐岩, 彭志刚, 程昭晨, 等. 掺镱光纤-固体高功率超短脉冲放大研究进展 [J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501003.
- [3] Feng J S. Study on the pulse stretching and compression with large dispersive delay based on chirped volume Bragg gratings [D]. Suzhou: Soochow University, 2015: 1-4.
封建胜. 基于大色散延迟量的啁啾布拉格光栅脉冲展宽与压缩研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2015: 1-4.
- [4] Chi J J. A study on all-fiber ultra-short pulse ytterbium-doped fiber laser and generating supercontinuum [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015: 69-70.
池俊杰. 全纤化超短脉冲掺镱光纤激光器及产生超连续谱的研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015: 69-70.
- [5] Röser F, Eidam T, Rothhardt J, et al. Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. Optics Letters, 2007, 32(24): 3495-3497.
- [6] Li S, Li P X, Wang K X, et al. Sub-picosecond all-fiber chirped-pulse amplification system based on photonic crystal fibers' spectral broadening and chirped-volume Bragg grating compression [J]. Applied Physics B, 2020, 126(1): 1-5.
- [7] Chi J J, Shi H X, Fu C, et al. Passive harmonic mode-locked ytterbium-doped fiber laser with chirped pulse amplification [J]. Optik, 2019, 183: 1133-1139.
- [8] Papadopoulos D N, Hanna M, Druon F, et al. Compensation of gain narrowing by self-phase modulation in high-energy ultrafast fiber chirped-pulse amplifiers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(1): 182-186.
- [9] Rao Y J, Wang Y P, Zhu T. Principle and application of fiber grating [M]. Beijing: Science Press, 2006: 240-243.
- 饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 240-243.
- [10] Wang K, Yu J, Yu L Y. Research on dispersion compensation with chirped fiber grating [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2008, 36(1): 77-80.
王亢, 余俊, 俞凌云. 啁啾光纤光栅的色散补偿研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2008, 36(1): 77-80.
- [11] Bartulevicius T, Frankinas S, Michailovas A, et al. Compact fiber CPA system based on a CFBG stretcher and CVBG compressor with matched dispersion profile [J]. Optics Express, 2017, 25(17): 19856-19862.
- [12] Bartulevicius T, Veselis L, Madeikis K, et al. Compact femtosecond 10 μ J pulse energy fiber laser with a CFBG stretcher and CVBG compressor [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 77-80.
- [13] Štěpánková D, Mužík J, Novák O, et al. Experimental study on compression of 216-W laser pulses below 2 ps at 1030 nm with chirped volume Bragg grating [J]. Applied Optics, 2020, 59(26): 7938-7944.
- [14] Chah K, Kinet D, Wuilpart M, et al. Femtosecond-laser-induced highly birefringent Bragg gratings in standard optical fiber [J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 594-596.
- [15] Salter P S, Woolley M J, Morris S M, et al. Femtosecond fiber Bragg grating fabrication with adaptive optics aberration compensation [J]. Optics Letters, 2018, 43(24): 5993-5996.
- [16] Zheng Z M, Yu Y S, Zhang X Y, et al. Femtosecond laser inscribed small-period long-period fiber gratings with dual-parameter sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1100-1103.
- [17] Gagné M, Kashyap R. New nanosecond Q-switched Nd:VO₄ laser fifth harmonic for fast hydrogen-free fiber Bragg gratings fabrication [J]. Optics Communications, 2010, 283(24): 5028-5032.
- [18] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [19] Lü J S, Song Z Q, Qi H F, et al. Chirped fiber grating fabrication based on dynamic phase mask method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 020603.
吕京生, 宋志强, 祁海峰, 等. 基于动态相位掩模板法的啁啾光纤光栅的制作 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020603.
- [20] Frankinas S, Michailovas A, Rusteika N, et al. Efficient ultrafast fiber laser using chirped fiber Bragg grating and chirped volume Bragg grating stretcher/

- compressor configuration [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9730: 973017.
- [21] Zhang Y S, Yu K, Jiang D S, et al. Fabrication technology of fiber grating with phase masks [J]. Optical Technology, 1999, 27(1): 24-27.
张永胜, 郁可, 姜德生, 等. 用相位掩模法制作光纤光栅的技术 [J]. 光学技术, 1999, 25(1): 24-27.
- [22] Song Z Q, Qi H F, Li S J, et al. Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706009.
- 宋志强, 祁海峰, 李淑娟, 等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术的研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706009.
- [23] Liu F, Guo T, Wu C, et al. Wideband-adjustable reflection-suppressed rejection filters using chirped and tilted fiber gratings [J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24430-24438.
- [24] Zhang Q, Brown D A, Reinhart L, et al. Tuning Bragg wavelength by writing gratings on prestrained fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(7): 839-841.