

引用格式: HUANG Hangdong, LIU Jiaying, WANG Jianqiang, et al. Dispersion Design of Nonlinear Chirped Fiber Bragg Grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(12):1205001

黄杭东, 刘家兴, 王健强, 等. 非线性啁啾光纤光栅的色散设计[J]. 光子学报, 2023, 52(12):1205001

非线性啁啾光纤光栅的色散设计

黄杭东^{1,2}, 刘家兴², 王健强², 许义², 吉贵军²

(1 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2 珠海光库科技股份有限公司, 珠海 519080)

摘 要: 针对光纤激光中的高阶色散失配问题, 基于传统光脉冲群延迟原理, 提出了一种非线性啁啾光纤光栅的色散分析数学模型, 推导了布拉格反射波长与色散参量及色散斜率的数值关系。同时, 利用该模型研制了两款用于 1 μm 波段超快光纤激光的非线性啁啾光纤光栅, 可将入射脉冲宽度分别展宽至 150 ps 或 1 ns 以上, 并通过光谱干涉法获得了两款光纤光栅的色散曲线。研究结果表明, 两款光纤光栅的色散参量实测值分别为 -10.3 ps/nm 和 -107 ps/nm , 色散斜率实测值分别为 -0.013 ps/nm^2 和 -0.087 ps/nm^2 , 与设计参数具有良好的一致性。这可为啁啾光纤光栅的设计分析和生产测试提供新的解决思路和参考依据。

关键词: 光纤光栅; 色散; 色散测量; 超快光学; 非线性

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235212.1205001

0 引言

啁啾光纤光栅是一种优异的色散管理器件, 它具有体积小、补偿量大、插入损耗低、光纤兼容性好等特点, 广泛应用于光纤激光、光纤通信及光纤传感等重要领域。作为一种非均匀光栅, 啁啾光纤光栅的主要特征是纤芯的折射率调制周期和振幅沿着光纤轴向呈一定规律变化, 从结构上可以看作是多个不同周期的均匀光栅的有序组合。通常情况下, 光脉冲在光纤光栅中传输, 由于光波导的模式耦合效应会在特定波长下产生布拉格反射。该波长与光栅的周期呈线性关系。由于啁啾光纤光栅每段的周期不同, 对应的布拉格波长也会发生变化, 从而具有较大的反射光谱宽度, 同时伴随光程差的引入还会产生一定的脉冲延迟。利用该光学特性, 加拿大渥太华通信研究中心的 OUELLETTE F 教授在 1987 年首次提出了利用线性啁啾光纤光栅进行在线色散补偿的概念^[1]。如今, 光纤光栅色散补偿技术已在超快光纤激光和高速长距离光纤通信等方向发挥着重要作用^[2-5]。

对于脉冲宽度小于 300 fs 的超快激光, 以及传输速率达到 40 Gb/s 以上的超高速光纤通信系统^[6-7], 除了要匹配光路中常规的二阶线性色散, 还需要解决由高阶色散引起的脉冲畸变和信号失真等问题, 于是科研人员进一步提出了非线性啁啾光纤光栅(Nonlinear Chirped Fiber Bragg Grating, NCFBG)色散补偿技术^[8]。例如天津大学的研究人员通过合理设置 NCFBG 的二阶色散和三阶色散来补偿光路的整体色散, 使系统净色散量趋于零, 最终获得脉冲宽度仅为 198 fs 及 217 fs 的飞秒激光输出^[9-10]。北京交通大学课题组使用 2 个级联的宽带 NCFBG 作为色散补偿器, 成功搭建了通信速率为 40 Gb/s, 传输链路为 122 km G652 光纤的光时分复用实验系统^[11]。然而在实际应用场景中, 一旦光纤光栅色散参数与系统色散没有完全匹配, 就需要重新设计光栅周期, 或增加外部控制机制来实现中心波长和色散的调谐^[12-13]。例如唐书奎等为了提升啁啾脉冲光纤放大器的飞秒激光时域特性, 需要将 NCFBG 作为脉冲展宽器置于连续温度梯度场中, 通过调节两端的温度差来改变光栅的色散参量和色散斜率^[14]。MATSUMOTO S 等为了在单通道中实现 160 Gb/s 超

基金项目: 广东省“珠江人才计划”引进领军人才项目(No. 2016LJ06D531)

第一作者: 黄杭东, hangdonghuang@fiber-resources.com

收稿日期: 2023-05-04; 录用日期: 2023-05-29

<http://www.photon.ac.cn>

高速的信号传输,以及 $-20\sim 20$ ps/nm²的色散斜率调谐范围,利用32组独立的薄膜加热器建立一套NCFBG色散补偿装置^[15]。QIN Z等在100 km标准单模光纤中,利用磁致伸缩效应对NCFBG施加外部磁场,实现10 Gb/s的传输速率^[16]。以上研究工作都需要在系统中引入额外的温度场或应力装置。这类设计不仅导致研发成本大幅增加,同时使系统复杂度和故障风险率升高。因此,为了准确匹配系统光路中的色散参数,如何分析和设计NCFBG的色散特性具有重要指导意义。

本研究基于光脉冲延迟原理提出了一种NCFBG高阶色散的数学模型,推导得到布拉格反射波长与色散量及色散斜率之间的数值关系,可针对实际应用场景直接分析所需的色散参数,从而制备相应的光纤光栅。最后根据理论模型研制了两款不同色散参数的NCFBG,并进行了实验。

1 数学模型与公式推导

在光纤光栅的理论分析中,通常有两种表示啁啾的方式,一种是将光栅周期 $\Lambda(z)$ 看作是与 z 无关的常数,相位 $\varphi(z)$ 随着 z 变化;另一种则是将相位 $\varphi(z)$ 看作常数,光栅周期 $\Lambda(z)$ 随着 z 变化。区别于传统的光纤光栅耦合模理论,本模型采用第二种方式。

为简化分析,可认为在长度为 L 的栅区范围内,光纤光栅的有效折射率 n_{eff} 基本保持不变,则布拉格反射波长 $\lambda_B(z)$ 可表示为

$$\lambda_B(z) = 2n_{\text{eff}}\Lambda(z) \quad (1)$$

不失一般性的,假设NCFBG具有负色散特性,即短波长脉冲反射距离更短,栅区分布结构如图1所示。取栅区的中心作为初始位置,令光栅周期在 $\left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right]$ 的定义域内单调递增,且分布函数有

$$\Lambda(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 \quad (2)$$

式中, a_0 、 a_1 和 a_2 分别为栅区中心的光栅周期、线性啁啾系数以及非线性啁啾系数,单位分别为nm、nm/cm以及nm/cm²。当 $z=0$,布拉格波长 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}a_0$,此时的反射波长对应光栅中心波长 λ_0 。

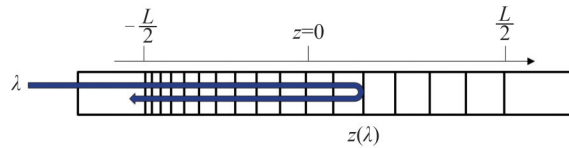


图1 啁啾光纤光栅的结构示意图
Fig. 1 Geometry of chirped fiber Bragg gratings

经分析可知,NCFBG的周期分布函数包含4种类型,即抛物线开口朝上或朝下,二次函数的对称轴大于 $\frac{L}{2}$ 或小于 $-\frac{L}{2}$,同时所有类型满足 $\left|\frac{a_1}{a_2}\right| > L$ 。

联立式(1)、(2),根据二次函数的逆变换运算可得到光栅位置与反射波长之间的关系为^[17]

$$z(\lambda) = -\frac{a_1}{2a_2} \pm \frac{1}{2a_2} \left[a_1^2 - 4a_2 \left(a_0 - \frac{\lambda}{2n_{\text{eff}}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由数学换算的定义可知,当啁啾光栅提供负色散时, $a_1 > 0$,式(3)中的符号为+;反之当光栅提供正色散时, $a_1 < 0$,符号为一。

根据光信号在光纤中的传输路径,光栅中不同波长群延迟 $\tau(\lambda)$ 的计算公式可表示为

$$\tau(\lambda) = \frac{2z(\lambda)}{c/n_{\text{eff}}} \quad (4)$$

式中, c 为真空中的光速。

考虑负色散情况,对式(4)分别求得一阶导数和二阶导数,并联立式(3)可得到NCFBG的色散参量 D_2 和色散斜率 D_3 的表达式分别为

$$D_2 = \frac{1}{c} \left[a_1^2 - 4a_2 \left(a_0 - \frac{\lambda}{2n_{\text{eff}}} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$D_3 = -\frac{a_2}{cn_{\text{eff}}} \left[a_1^2 - 4a_2 \left(a_0 - \frac{\lambda}{2n_{\text{eff}}} \right) \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (6)$$

已知光栅在中心位置 $z=0$ 处的反射中心波长为 λ_0 , 代入式(5)、(6)解出多项式待定系数 a_0 、 a_1 和 a_2 , 即

$$a_0 = \frac{\lambda_0}{2n_{\text{eff}}}, a_1 = \frac{1}{cD_2}, a_2 = -\frac{n_{\text{eff}}D_3}{c^2D_2^3} \quad (7)$$

由此得到的 NCFBG 布拉格反射波长与色散量的数值关系为

$$\lambda_B(z) = \lambda_0 + \frac{2n_{\text{eff}}}{cD_2} z - \frac{2n_{\text{eff}}^2 D_3}{c^2 D_2^3} z^2 \quad (8)$$

此外, 已知光纤光栅的色散参量 D_2 、色散斜率 D_3 和二阶色散 β_2 、三阶色散 β_3 有如下变换关系

$$D_2 = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (9)$$

$$D_3 = \frac{4\pi c}{\lambda^4} (\lambda\beta_2 + \pi c\beta_3) \quad (10)$$

通过二阶色散 β_2 和三阶色散 β_3 的数值也能得到所需 NCFBG 的周期分布。

值得注意的是, 此数学模型同样适用于其他相似结构的光栅器件, 如体光栅、复合光纤光栅等。

2 光谱干涉法测量色散原理

色散测量的实质是测量不同波长或频率的光脉冲在相同传输距离下所用的时间延迟或对应频域上的相位差。相较于脉冲扫描法、调制相移法以及激光拍频法^[18]等技术, 光谱干涉法装置简易, 而且测量精度高、范围宽, 实用性强。

图2是基于迈克尔逊干涉仪设计的光纤光栅色散测量系统, 其中 HR 表示反射镜, OSA 表示光谱分析仪, 黑色实线表示光纤, 蓝色实线表示空间光。首先光源自左向右经过一个光纤耦合器 Coupler 分成两束, 熔接有光纤光栅的一路作为待测臂, 另一路通过一个光纤准直器 Collimator 由光纤转为自由空间光传输, 配合前后移动的 HR 延迟线作为参考臂。两束光经各自光路反射后在光纤耦合器处重新汇合, 由于满足相干条件而发生光谱干涉。

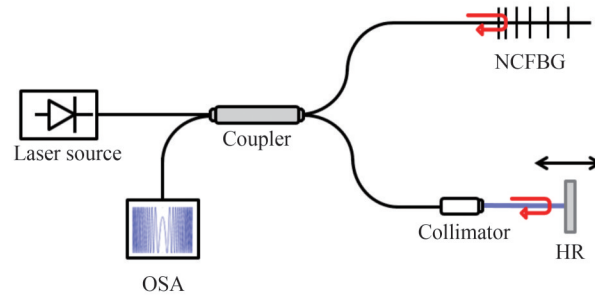


图2 光谱干涉测量光纤光栅色散的原理

Fig. 2 Schematic of spectral interferometry for measuring fiber Bragg grating dispersion

干涉光谱的总光强 I 和相位差 $\varphi(\lambda)$ 可以描述为

$$I = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \cos[\varphi(\lambda)] \quad (11)$$

$$\varphi(\lambda) = \beta_s L_s - \beta_r L_r = 2\pi(n_{\text{eff}} L_s - L_r)/\lambda \quad (12)$$

式中, I_s 和 I_r 分别表示待测臂和参考臂的光场强度, β_s 和 β_r 分别表示待测臂和参考臂的传播常数, L_s 和 L_r 分别表示光纤光栅的栅区长度和延迟线位移量。由式(12)可知 $\beta_r = 2\pi/\lambda$ 。

当参考臂延迟线 L_r 微调至某一位置时,光谱干涉图样周期宽度最大的波长称为反射中心波长 λ_c , 此时有 $\left. \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} \right|_{\lambda_c} = 0$ 。图 3 为某次色散测量时的干涉光谱条纹,此时延迟线移动到 233 ps,对应反射波长为 1 031.05 nm。光源为实验室自制的锁模光纤激光器,输出光谱覆盖 1 025~1 040 nm。

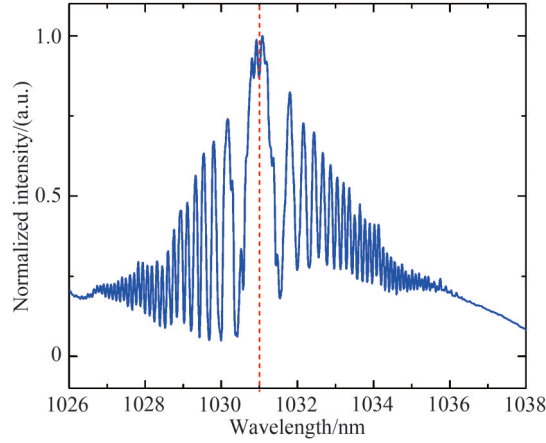


图 3 光纤光栅的光谱干涉条纹
Fig. 3 Spectral interference fringe of fiber Bragg grating

通过不断调节 L_r 的数值,可以得到一系列对应的反射波长 λ_c ,记录并描绘测量数据,便能得到光信号的延迟曲线。图 4 为整个光栅反射光谱对应的扫描结果,其中红色标记点对应中心波长 1 031.05 nm 的延迟线位置 233 ps。最后利用式(13)得到色散参量 D_2 ,以及色散关于波长变化的曲线。

$$D_2 = \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} \quad (13)$$

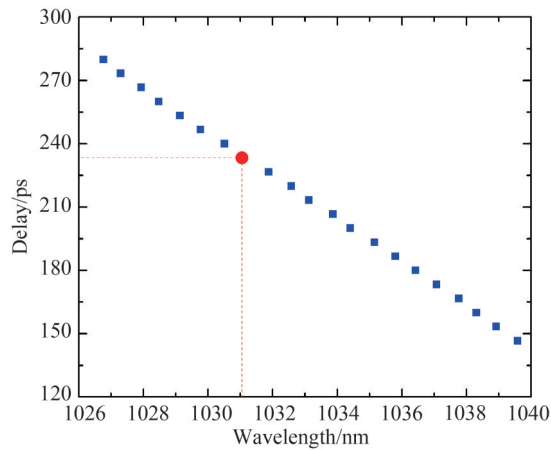


图 4 延迟线随反射中心波长的变化
Fig.4 Variation of the delay line with the center wavelength of reflection

3 实验结果与分析

在高功率超快光纤激光的应用中,NCFBG的工作波长通常在 1 020~1 040 nm 范围。当被用于补偿负色散时,光纤光栅可以平衡谐振腔内的净色散,实现激光脉冲特性的优化;用于增加正色散时,可以对种子光进行时域上展宽,避免信号在后续的功率放大过程中积累过多非线性相移。本研究以 1 μm 波段飞秒光纤激光的脉冲展宽为例。

一般而言,光纤光栅作为展宽器需要将脉宽为几个 ps 的种子光展宽至百 ps 甚至 ns 量级,反射谱的带宽通常要满足 10 nm 以上。针对目前主流的飞秒光纤激光指标,设计 NCFBG1 将入射脉冲展宽至 150 ps 以

上,NCFBG2实现大于1 ns的展宽量,具体设计规格参数如表1。

表1 两款NCFBG的设计参数
Table 1 The designed parameters of two nonlinear chirped fiber gratings

Parameter	Unit	NCFBG 1	NCFBG 2
Center wavelength	nm	1 030	1 030
Reflection bandwidth	nm	>15	>10
Dispersion parameter	ps/nm	-10	-100
Dispersion slope	ps/nm ²	-0.01	-0.1
Reflectivity	%	>60	>60

基于表1中的参数要求,利用式(8)计算得到两款NCFBG的周期分布,并同时设计对应的相位掩模板,即

$$\lambda_{\text{NCFBG1}}(z) = 1030 - 9.67 \times 10^{-1}z - 4.67 \times 10^{-4}z^2 \quad (14)$$

$$\lambda_{\text{NCFBG2}}(z) = 1030 - 9.67 \times 10^{-2}z - 4.67 \times 10^{-6}z^2 \quad (15)$$

采用紫外扫描曝光技术结合相位掩模板进行光纤光栅的研制,刻写光源为193 nm准分子激光器,光纤类型为常见的PM980保偏光纤。通过优化光源参数与系统光路,NCFBG1和NCFBG2写入的栅区长度分别为2 cm和13 cm,两者的光谱特性如图5所示。从红色反射谱曲线可以看出,NCFBG1的反射带宽达到17 nm,NCFBG2的带宽为11 nm。在相同反射带宽情况下,啁啾光纤光栅的脉冲展宽量取决于光栅的长度。换言之,反射带宽正比于栅区长度与线性啁啾系数 a_1 的乘积,这与实际测量结果一致。此外,由于NCFBG2的栅区较长,在刻写过程中更容易受到光学平台及电动位移台稳定性的影响,导致反射光谱出现些许波纹。另一方面,由图5的蓝色透射谱曲线可知,两款NCFBG的最大刻写深度均为5 dB,对应的反射率接近70%。根据耦合模理论可知,光纤光栅的反射率与栅区长度及光栅耦合系数有关。然而当光栅长度超过5 mm后,它对反射率的影响基本不变。光栅耦合系数对应纤芯的折射率的调制深度,它主要由光纤的光敏特性以及紫外刻写光源的性能决定。

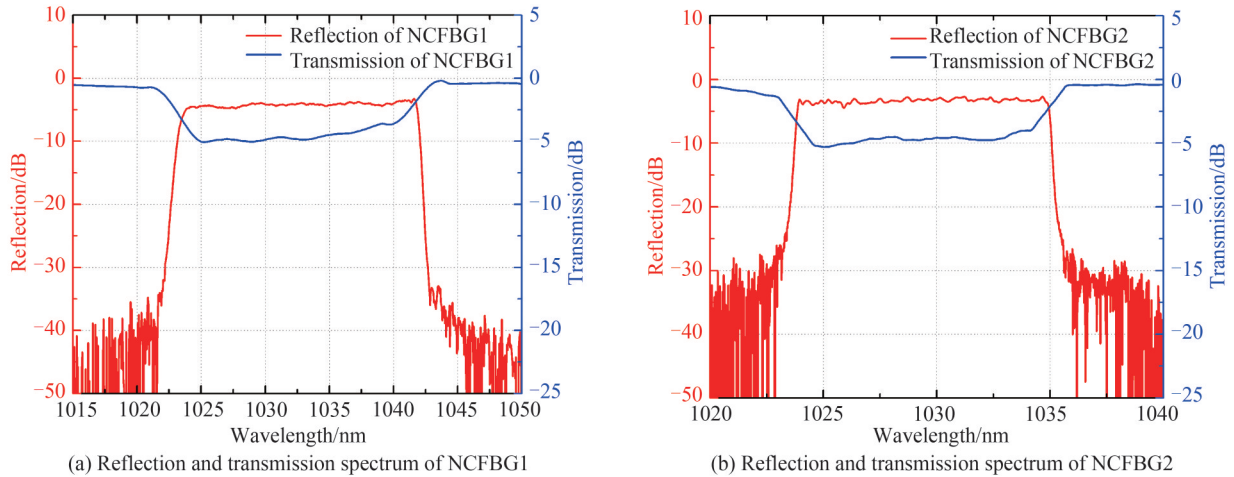


图5 两款NCFBG的反射谱和透射谱

Fig. 5 The reflection spectrum and transmission spectrum of two NCFBG

利用自行搭建的光谱干涉装置对两款NCFBG的色散性能进行测量,得到其扫描延迟数据,并通过式(13)计算得到两者的色散曲线,同时包含了色散参量 D_2 和色散斜率 D_3 的信息,如图6和7所示。

从测量结果可得出,NCFBG1在中心波长1 032.09 nm处的色散参量 D_2 为-10.3 ps/nm,色散斜率 D_3 为-0.013 ps/nm²;NCFBG2在中心波长1 029.23 nm处的 D_2 为-107 ps/nm, D_3 为-0.087 ps/nm²。考虑到光纤光栅及相位掩模板的加工精度,以及色散测量装置引入的系统误差和理论计算的近似,该实验结果与设计参数基本吻合。表2列出了两款光纤光栅的实测数据。

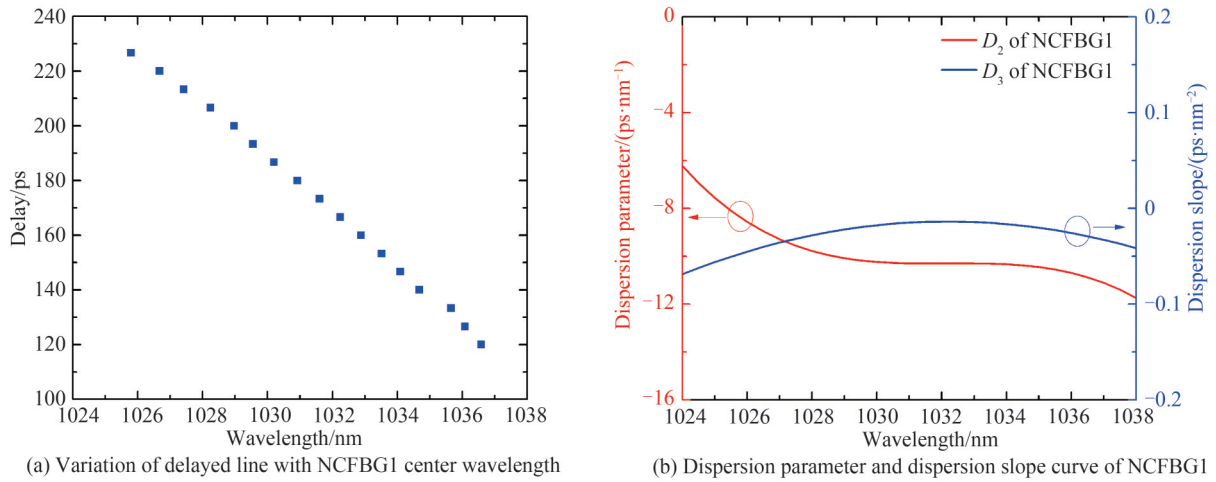


图6 NCFBG1的色散测量结果
Fig. 6 Dispersion measurement results of NCFBG1

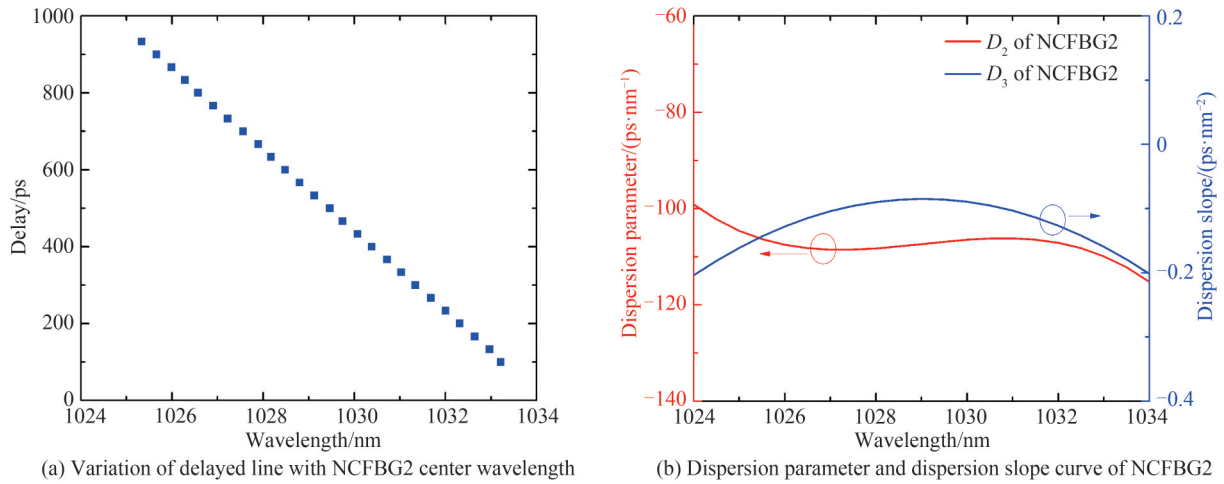


图7 NCFBG2的色散测量结果
Fig. 7 Dispersion measurement results of NCFBG2

表2 两款非线性啁啾光纤光栅的实测参数
Table 2 The measured parameters of two nonlinear chirped fiber gratings

Parameter	Unit	NCFBG1	NCFBG2
Center wavelength	nm	1 032	1 029
Reflection bandwidth	nm	17	11
Dispersion parameter	ps/nm	-10.3	-107
Dispersion slope	ps/nm ²	-0.013	-0.087
Reflectivity	%	68.1	67.3

4 结论

本文从光脉冲群延迟原理出发,提出了一种非线性啁啾光纤光栅色散分析的数学模型,推导得到光纤光栅与色散参量以及色散斜率的数值关系。根据此模型,设计并制备了两款用于高功率飞秒光纤激光脉冲展宽的非线性啁啾光纤光栅,可分别将 $1\ \mu\text{m}$ 波段入射种子脉冲展宽至150 ps或1 ns以上,同时匹配系统中的三阶色散。此外,基于迈克尔逊干涉原理研制了一套光谱干涉色散测量系统,对所制光纤光栅进行了实际测试。实验结果表明,两款光纤光栅的反射带宽分别达到了17 nm和11 nm,色散参量和色散斜率分别为 $-10.3\ \text{ps/nm}$ 和 $-107\ \text{ps/nm}$ 以及 $-0.013\ \text{ps/nm}^2$ 和 $-0.087\ \text{ps/nm}^2$,反射率达到60%以上,与设计参数基

本一致。研究成果可为非线性啁啾光纤光栅的设计分析和生产测试提供新的解决思路和参考依据,同时所建模型可推广至啁啾体光栅以及其他相同结构的复合光栅,有助于促进国内超快光学与超高速光纤通信的快速发展。

参考文献

- [1] OUELLETTE F. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(10): 847-849.
- [2] LV R, TENG H, SONG J, et al. All-fiber laser seeded femtosecond Yb: KGW solid state regenerative amplifier [J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(9): 094206.
- [3] ZENG Jianghui, ZHANG Peiqing, ZHANG Qian, et al. Dispersion compensation of chirped fiber grating in chalcogenide fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1005007.
曾江辉, 张培晴, 张倩, 等. 啁啾光纤光栅在硫系光纤激光器中的色散补偿 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(10): 1005007.
- [4] MEENA M L, GUPTA R K. Design and comparative performance evaluation of chirped FBG dispersion compensation with DCF technique for DWDM optical transmission systems [J]. *Optik*, 2019, 2019(188): 212-224.
- [5] RANATHIVE S, VINOTH KUMAR K, RASHED A N Z, et al. Performance signature of optical fiber communications dispersion compensation techniques for the control of dispersion management [J]. *Journal of Optical Communications*, 2022, 43(4): 611-623.
- [6] HUANG Ping, CHEN Xu. Simulation research on optical characteristics of linearly chirped fiber grating for dispersion compensation [J]. *Optical Communication Technology*, 2022, 46(3): 89-92.
黄平, 陈旭. 用于色散补偿的线性啁啾光纤光栅光学特性的仿真研究 [J]. *光通信技术*, 2022, 46(3): 89-92.
- [7] WEI Daoping, WANG Zhi, JIAN Shuisheng. Numerical analysis on dispersion compensation characteristic of linearly chirped fiber gratings [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(5): 438-440.
魏道平, 王智, 简水生. 线性啁啾光纤光栅色散补偿性能的数值分析 [J]. *光学技术*, 2001, 27(5): 438-440.
- [8] LI Wencai, YANG Xingyu. Effect of nonlinearity of fiber Bragg grating on dispersive properties [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(5): 789-792.
李文材, 杨性愉. 光纤光栅非线性对色散特性的影响 [J]. *光子学报*, 2007, 36(5): 789-792.
- [9] NIU Jia, LIU Bowen, SONG Huanyu, et al. Femtosecond chirped-pulse amplifier system based on spectrum control and dispersion optimization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0101006.
牛佳, 刘博文, 宋寰宇, 等. 基于光谱控制与色散优化的飞秒啁啾脉冲放大系统 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0101006.
- [10] HAO Jingyu, LIU Bowen, SONG Huanyu, et al. Femtosecond fiber amplification system based on third-order dispersion compensation technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051404.
郝静宇, 刘博文, 宋寰宇, 等. 基于三阶色散补偿的光纤飞秒激光放大系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051404.
- [11] FEI Li, NING Tigang, LI Tangjun, et al. Studies on the dispersion compensation of fiber Bragg grating in high-speed optical communication system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(4): 1630-1635.
裴丽, 宁提纲, 李唐军, 等. 高速光通信系统中光纤光栅色散补偿研究 [J]. *物理学报*, 2005, 54(4): 1630-1635.
- [12] MIN R, KORGANBAYEV S, MOLARDI C, et al. Largely tunable dispersion chirped polymer FBG [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5106-5109.
- [13] VENKATRAO P, SB B P. Nonlinear chirped grating based tunable dispersion compensation using strain [J]. *Optik*, 2018, 2018(175): 181-188.
- [14] TANG Shukui, YANG Zhi, LI Feng, et al. Dispersion adjustment effect of the chirped fiber gratings in chirped pulse amplification system by continuous linear temperature gradient field [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(5): 0514005.
唐书奎, 杨直, 李峰, 等. 连续线性温度梯度场对啁啾脉冲放大系统中啁啾光纤光栅的色散调节效应 [J]. *光子学报*, 2018, 47(5): 0514005.
- [15] MATSUMOTO S, TAKABAYASHI M, YOSHIARA K, et al. Tunable dispersion slope compensator with a chirped fiber grating and a divided thin-film heater for 160-Gb/s RZ transmissions [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(4): 1095-1097.
- [16] QIN Z, ZENG Q, FENG D, et al. A novel strain method for precisely adjusting the grating chirp and center wavelength [J]. *Smart materials and Structures*, 2000, 9(6): 985.
- [17] MAO D, HE Z, GAO Q, et al. Birefringence-managed normal-dispersion fiber laser delivering energy-tunable chirp-free solitons [J]. *Ultrafast Science*, 2022, 2022(4): 9760631.
- [18] WANG Xu, LI Xiaokang, ZHANG Haojie, et al. Dispersion measurement of chirped fiber Bragg grating based on laser beat frequency [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(2): 0214001.
王旭, 李小康, 张豪杰, 等. 基于激光拍频实现啁啾光纤光栅色散的测量 [J]. *光子学报*, 2017, 46(2): 0214001.

Dispersion Design of Nonlinear Chirped Fiber Bragg Grating

HUANG Hangdong^{1,2}, LIU Jiaying², WANG Jianqiang², XU Yi², JI Guijun²

(1 School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 Advanced Fiber Resources (Zhuhai), Ltd., Zhuhai 519080, China)

Abstract: In ultra-high-speed large-capacity optical fiber communications and high-power ultra-fast fiber laser systems, chirped fiber gratings are widely used to compensate and manage dispersion. The dispersion coefficient matching degree directly determines the output quality and application range of the optical pulse signal. Compared with other dispersion compensation technologies, the fiber grating preparation process is simple, has good repeatability, and can be flexibly designed according to actual needs, which has great advantages. However, previous fiber grating dispersion analysis usually only considers the influence of second-order linear dispersion and ignores issues such as pulse distortion caused by high-order nonlinear dispersion mismatch, resulting in unsatisfactory actual use results. Different from the traditional coupling mode theory and transmission matrix analysis method, this paper establishes a new set of dispersion analysis mathematical models for nonlinear chirped fiber grating based on the group dispersion delay principle of optical fiber. The numerical relationship between the Bragg reflection wavelength, the dispersion parameter and the dispersion slope is deduced, which greatly reduces the complexity of the previous calculation process and has strong practicality. In practical application scenarios, as long as the specific dispersion parameters that need to be compensated in the fiber laser system are understood, this numerical relationship can be used to calculate the corresponding chirped fiber grating period distribution, thereby achieving the best system output. Based on this mathematical model and the current common femtosecond fiber laser product specifications on the market, we used UV scanning exposure technology combined with the phase mask method to design and prepare two nonlinear chirped fibers for high-power femtosecond fiber laser pulse broadening. The grating can respectively stretch the incident seed pulse in the 1 030 nm band to more than 150 ps or 1 ns, while meeting the third-order dispersion matching requirements in the optical system. In addition, based on the classic Michelson interference principle, we built a set of spectral interference dispersion measurement devices and conducted actual dispersion tests on the two nonlinear chirped fiber gratings we produced. Compared with other measurement methods, this device has simple principle, low cost, high measurement accuracy, wide range and strong practicability. It is very suitable for dispersion measurement of special optical fibers such as fiber gratings and photonic crystal fibers. Experimental results show that the reflection bandwidths of the two nonlinear chirped fiber gratings have reached 17 nm and 11 nm respectively, the dispersion parameters are -10.3 ps/nm and -107 ps/nm respectively, the dispersion slopes are -0.013 ps/nm² and -0.087 ps/nm² respectively, and the reflectivity reaches more than 60%, which basically meets the requirements of practical applications. Taking into account the processing accuracy of fiber gratings and phase masks, as well as the systematic errors introduced by the dispersion measurement device and the approximation of theoretical calculations, the experimental results are basically consistent with the design parameters, proving the correctness and feasibility of this mathematical model. The research results can provide new solutions and references for the design, analysis and production testing of nonlinear chirped fiber gratings. It is foreseeable that the model established can be extended to chirped volume gratings and other composite gratings with the same structure.

Key words: Fiber Bragg grating; Dispersion; Dispersion measurement; Ultrafast optics; Nonlinear

OCIS Codes: 050.2770; 060.3735; 260.2030; 130.4310