

啾啾光纤光栅的温度调谐特性研究

张新杨直* 李强龙 李峰 杨小君 王屹山 赵卫

中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 根据啾啾光纤光栅的温度可调谐性这一原理, 提出通过控制啾啾光纤光栅的温度, 改变其色散量, 从而获得最小输出脉宽的方案, 并通过实验验证了这一想法的可行性。利用啾啾光纤光栅作为啾啾脉冲放大(CPA)系统中的脉冲展宽器, 用空间光栅对作为脉冲压缩器, 通过压缩器为脉冲提供的负色散来补偿展宽器为脉冲引入的正色散。利用自相关仪测量压缩输出脉冲宽度随温度的变化情况, 间接反映啾啾光纤光栅色散量随温度的变化情况。从实验所得数据可以得知, 当温度从 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 脉宽从 1057 fs 先下降到 764 fs 后又上升到 910 fs , 共变化了 439 fs 。在此过程中, 随温度的上升, 啾啾光纤光栅的色散由补偿不足变为过补偿。

关键词 光栅; 啾啾光纤光栅; 超短脉冲; 温度可调谐; 色散量

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0505002

Research on Temperature Tuning Properties of Chirped Fiber Grating

Zhang Xin Yang Zhi Li Qianglong Li Feng Yang Xiaojun Wang Yishan Zhao Wei

State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract According to the temperature tenability of chirped fiber grating, the minimum output pulse width can be obtained by controlling the fiber grating's temperature to change the dispersion of the chirped fiber grating, and the feasibility of this idea is demonstrated through experiments. The chirped fiber grating is used as the stretcher in the fiber chirped pulse amplification (CPA) system, and the gratings-pair is used as compressor. The positive dispersion brought by the stretcher is compensated by the negative dispersion provided by the compressor. The output pulse width is measured by the auto-correlation for denoting the dispersion of the chirped fiber Bragg grating indirectly as a function of temperature. It can be seen from the obtained experimental data that, when the temperature rises from $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the pulse width falls from 1057 fs to 764 fs , and then rises to 910 fs , with a total change of 439 fs achieved. In the experiment, dispersion increases with temperature rising, changing from insufficient dispersion compensation to over dispersion compensation.

Key words gratings; chirped fiber grating; ultra-short pulse; temperature tuning; dispersion

OCIS codes 050.1590; 260.2030; 050.2770; 060.4080

1 引 言

随着光纤写入技术的不断发展, 啾啾光纤光栅因其独特的优点而被应用到光纤激光器^[1-2]、光纤通信^[3]和光纤传感^[4]等方面。啾啾光纤光栅调谐技术是光纤光栅应用中的一项关键技术, 通过控制光纤光栅的应变或温度, 可对啾啾光纤光栅的波长和色散量进行调谐^[5]。目前实现啾啾光纤光栅的调谐方法主要有 3 种。第 1 种调谐方法是利用拉力调谐, 将制作好的非线性啾啾光栅的两端固定在可控拉伸器上, 只要调节拉伸器施加的拉力就可以实现非线性啾啾光纤光栅的调谐; 也可以在光纤光栅表面镀上一层均匀的磁致伸缩薄膜

收稿日期: 2015-12-14; **收到修改稿日期:** 2016-01-05

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(KZFS061410)

作者简介: 张新(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事超快激光器方面的研究。E-mail: zhangxin114@mailsucas.ac.cn

导师简介: 杨小君(1978-), 男, 博士, 特聘研究员, 硕士生导师, 主要从事超快激光微加工方面的研究。

E-mail: yxj@opt.ac.cn

* **通信联系人:** E-mail: yangzhi@opt.ac.cn

材料,在外加磁场的作用下,将引起磁致伸缩,从而使得光纤光栅在轴向上产生应变^[6]。第2种方法是利用弹光效应实现调谐,在垂直于啁啾光纤光栅的表面施加一定的应力^[7],由于光弹效应会使有效折射率发生变化,从而实现光栅的调谐^[8]。第3种方法是通过改变光纤光栅的温度而实现可调谐,温度的变化会导致光栅周期和有效折射率的变化,从而导致中心波长的漂移和色散量的变化^[9-10]。温度调谐具有结构简单、成本低、精度高、线性度高和不需要温度补偿等优点。本文利用半导体制冷器(TEC)改变啁啾光纤光栅温度,进而改变其色散量;验证了啁啾光纤光栅色散量的温度可调谐性,并提出可以将其应用到啁啾脉冲放大(CPA)系统中,实现对输出超短脉冲宽度的精密调谐。

2 基础理论

啁啾光纤光栅的栅格周期不是常数,而是轴向变化的,最常见的啁啾光纤光栅是线性啁啾光纤光栅,这种光栅的周期沿轴向呈线性单调变化,如图1(a)所示,其有效折射率变化可表示为

$$\delta n_{\text{eff}} = \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \Phi(z) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 表示直流有效折射率变化, Λ 是光栅周期, $\Phi(z)$ 描述光栅啁啾。

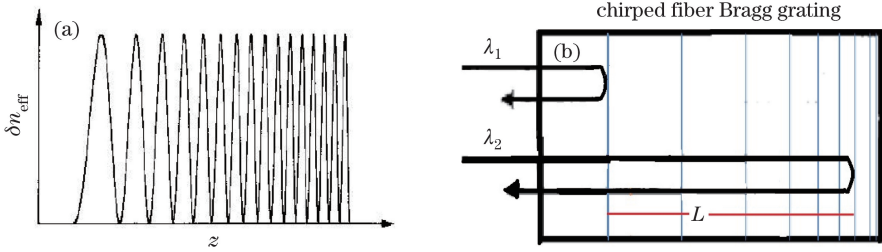


图1 (a)啁啾光纤光栅折射率调制波形;(b)脉冲在光栅内的反射位置

Fig. 1 (a) Modulation waveform of chirp fiber grating refractive index; (b) refractive position of pulse in chirped fiber grating

啁啾光纤光栅的特点是光栅的折射率非周期性变化,实质就形成一个带宽滤波器,光栅的不同位置对应于一个不同的 Bragg 反射波长:

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

式中 n_{eff} 是纤芯的有效折射率。当光脉冲信号通过长度为 L 的啁啾光栅时,假设信号的长波长分量(λ_1)和短波长分量(λ_2)分别在光纤的头和尾部反射,如图1(b)所示,则短波长分量比长波长分量多走了 $2L$ 的路程,两波长之间产生的延时差为^[11]

$$\tau = \frac{2L}{v} = D \cdot (\lambda_2 - \lambda_1), \quad (3)$$

式中 v 是光在纤芯中的传播速度,并且 $v = \frac{c}{n}$, c 是真空中光速, n 是纤芯的折射率; D 是啁啾光纤光栅的色散量。

当改变温度时,中心波长的改变量为

$$\Delta\lambda_T = (T_f + a) \cdot \Delta T \cdot \lambda_B, \quad (4)$$

式中 ΔT 表示的是温度的改变量; T_f 表示温度膨胀系数,反映了温度对光栅周期的调制; a 表示热光系数,反映了温度对有效折射率的调制。当温度改变时,会改变 λ_2 和 λ_1 之间的路程 $L(T)$,同时也会改变纤芯的折射率 $n(T)$,也就改变了光速 $v(T)$ 。所以(3)式可以写为

$$2L \cdot (1 + T_f \cdot \Delta T) \cdot (n + a \cdot n \cdot \Delta T) / c = D(T) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1). \quad (5)$$

因色散量 $D(T)$ 也是随温度变化的,故通过改变光纤光栅的温度,可实现其色散量的调谐。

3 实验装置与结果分析

3.1 啁啾光纤光栅反射谱随温度的变化

将啁啾光纤光栅放到 TEC 的温控板上,通过改变 TEC 温度而改变光纤光栅的温度。图2为啁啾光栅

反射谱随温度变化的测试结构,采用脉宽为 5 ps 的锁模光纤激光器作为光源,中心波长为 1032 nm,光谱宽度为 10 nm,将环形器和啁啾光栅组合,以便测试啁啾光栅的反射谱(见图 3)。实验中设定温度变化范围为 $-10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图 3 中可以看出,随着温度的升高,光谱的中心波长不变,但是光谱的下降沿向长波长方向移动,移动幅度为 $0.005\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。实验中用的啁啾光栅在室温下的反射谱范围为 $1025\sim 1035\text{ nm}$,而光源的中心波长为 1032 nm,光谱宽度为 10 nm。光源的中心波长落在啁啾光纤光栅的反射谱中心,当温度升高时啁啾光栅的反射谱范围会有微小的漂移,但不会影响到中心波长,所以光谱的中心波长不变。光源的长波光不能被啁啾光栅全反射,当温度升高时,啁啾光栅的反射谱范围发生微小变化,使得光谱的下降沿随温度的升高而向长波长方向移动。

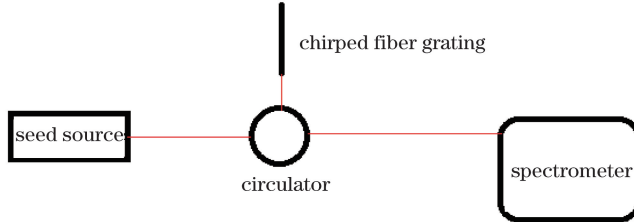


图 2 啁啾光纤光栅反射谱测试实验装置

Fig. 2 Experimental setup of reflective spectrum test of chirped fiber grating

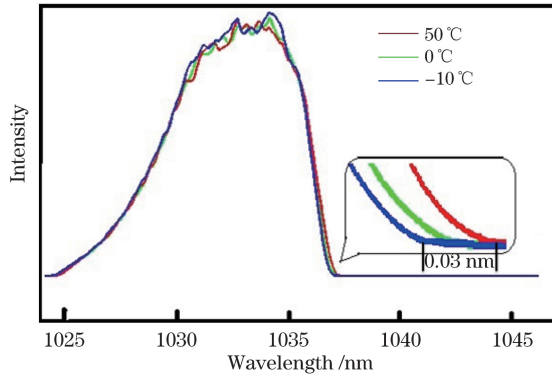


图 3 温度分别为 -10 、 0 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时啁啾光栅的反射光谱(插图为光谱下降沿的放大图)

Fig. 3 Reflective spectra of the chirped fiber grating under the temperatures of -10 , 0 , $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

(The illustration is an enlarged view of the falling edge of spectra)

3.2 啁啾光纤光栅的补偿色散量随温度的变化

实验装置如图 4 所示,采用脉宽为 5 ps 的锁模光纤激光器作为光源,采用啁啾光纤光栅和环形器组合实现对脉冲的展宽,然后利用光栅对脉宽进行压缩。光栅的位置是相对固定的,即光通过光栅所产生的色散量是一定的。通过改变啁啾光栅温度,进而改变其色散补偿量,使输出脉冲的脉宽发生变化。利用自相关仪测量并记录温度从 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对应的脉冲宽度。

图 5 是实验测得的自相关曲线,并用 Lorentz 曲线拟合计算出相应的脉冲宽度。图 6 是实验测量得到的脉冲宽度随温度变化的曲线。从曲线中可以看出,当温度在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,脉宽达到最小值,约为 790 fs。但是当温度超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着温度的增加,脉宽呈现上升的趋势,这是因为温度上升导致啁啾光纤光栅的色散补偿量增加,超出光栅对的色散量,所以最终压缩后的脉宽变宽。同样当温度降低到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时脉宽也呈现上升的趋势,这是因为温度降低导致啁啾光纤光栅的色散补偿量不足,不能补偿光栅对的色散量,导致脉宽也变宽。实验中采用的光纤光栅的纤芯折射率 n 为 1.5,热膨胀系数 $T_f = 5 \times 10^{-7}\text{ K}^{-1}$,热光系数 $a = 5.75 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ 。当温度改变 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,由(4)式可以计算出波长的漂移量为 0.464 nm,而实验中当温度从 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,光谱下降沿的漂移量约为 0.3 nm。实验中用的啁啾光纤光栅在室温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)下的色散量 $D = 200\text{ ps}/\text{nm}$,其总长为 20 cm。利用(5)式可以算出当温度改变量为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,对应的色散量改变量为 $\Delta D = 75\text{ fs}/\text{nm}$,光谱宽度为 6 nm,故对应的脉宽变化应为 450 fs。实测中脉宽随着温度的上升,由 1057 fs 先下降到 764 fs 后又上升到 910 fs,共变化了 439 fs,基本与理论值相符合。

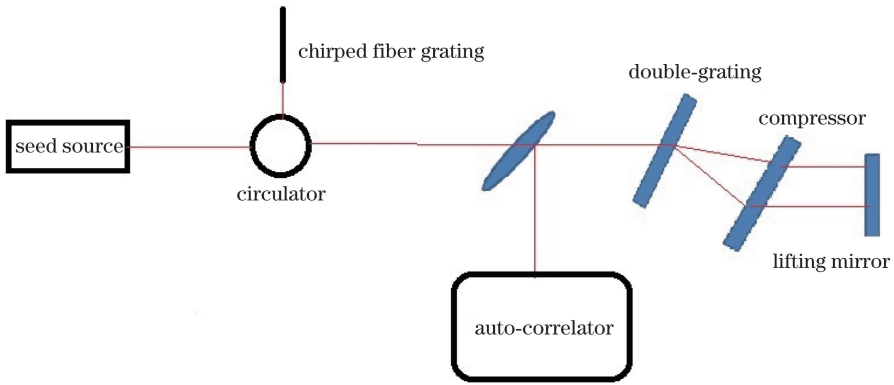


图 4 啁啾光纤光栅色散量随温度变化性质测试装置

Fig. 4 Experimental setup of dispersion of the chirped fiber grating with temperature change

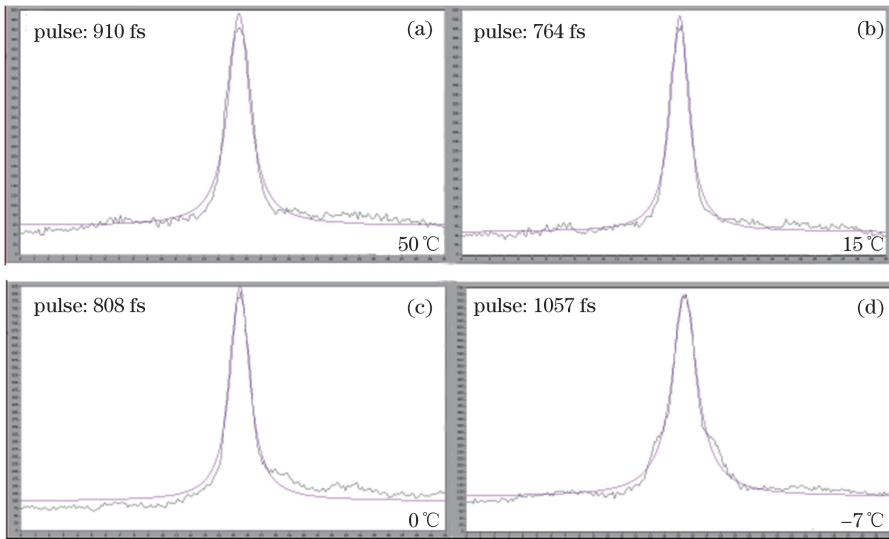


图 5 不同啁啾光纤光栅温度下测得的自相关曲线及计算的脉冲宽度。(a) 50 °C, 910 fs;
(b) 15 °C, 764 fs; (c) 0 °C, 808 fs; (d) -7 °C, 1057 fs

Fig. 5 Auto-correlator curve with different chirped fiber grating temperatures and the calculated pulse width.
(a) 50 °C, 910 fs; (b) 15 °C, 764 fs; (c) 0 °C, 808 fs; (d) -7 °C, 1057 fs

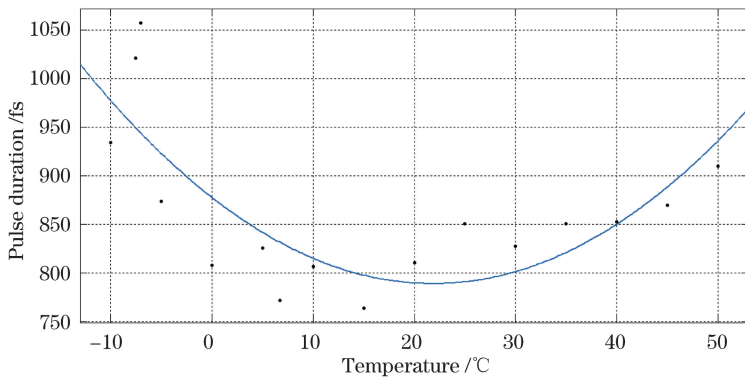


图 6 测量的脉冲宽度随啁啾光纤光栅温度变化

Fig. 6 Measured pulse width versus chirped fiber grating temperature

4 结 论

经实验验证可知,通过改变啁啾光纤光栅的温度,能够改变光纤光栅的色散补偿量。虽然啁啾光纤光栅的反射光谱会随着温度的升高而向长波长方向缓慢移动,但是光源的光谱范围依然在啁啾光纤光栅的反射

谱之内,所以温度升高不会影响到整个系统的反射光谱。实验中,利用 TEC 改变啁啾光纤光栅的温度,用自相关仪测量输出脉冲的宽度。从实验结果可以看出,随着啁啾光纤光栅温度的升高,脉冲的宽度先变小然后又增大。由于光栅对的位置是固定的,所以压缩的色散量是固定的。温度升高使啁啾光纤光栅的色散量增加,啁啾光纤光栅的色散量由不足以补偿光栅对的色散量上升到过色散补偿。将这一原理应用到 CPA 放大系统中,可以提高其色散量的可调谐性,以获得最小的脉冲宽度。

参 考 文 献

- 1 Yakovlev I V. Stretchers and compressors for ultra-high power laser system[J]. Quantum Electronics, 2014, 44(5): 393-414.
- 2 Wang Zhaokun, Du Songtao, Wang Ziwei, *et al.*. Passive mode-locked Yb³⁺-doped laser based on chirped fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802002.
王兆坤, 杜松涛, 王子薇, 等. 基于啁啾光纤光栅的被动锁模掺Yb³⁺激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802002.
- 3 Jia Dagong, Guo Qiang, Ma Caibin, *et al.*. Tunable dispersion compensation on optical fiber communication system[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(1): 15-22.
贾大功, 郭 强, 马彩宾, 等. 光纤通信系统中的可调谐色散补偿技术[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 15-22.
- 4 Won Pei Chin, Leng Jinsong, Lai Yicheng, *et al.*. Distributed temperature sensing using a chirped fibre Bragg grating [J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(8): 1501-1505.
- 5 Frazao O, Melo M, Marques P V S, *et al.*. Chirped Bragg grating fabricated in fused fibre taper for strain-temperature discrimination[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(4): 984-988.
- 6 Zhou Jianhua, Ren Guorong, Yang Jianjun, *et al.*. Time-delay line of chirped fiber grating tuned by magnetic fields[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(1): 152-156.
周建华, 任国荣, 杨健君, 等. 磁场调谐的啁啾光纤光栅延迟线[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(1): 152-156.
- 7 Du W, Liu W P, Du David G, *et al.*. Tunable chirped fiber Bragg grating embedded in a textile laminated beam for fiber dispersion compensation[C]. SPIE, 1996, 3420: 266-231.
- 8 Liu Feng, Ma Wenlong, Guo Xuan. Study on radial pressure sensing characteristics of EVA sensitivity enhanced fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1006001.
刘 丰, 马文龙, 郭 璇. EVA 增敏的光纤光栅径向压力传感器特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1006001.
- 9 Mandal Jharna, Sun Tong, Grattan Kenneth T V, *et al.*. A wide temperature tunable fibre laser using a chirped grating and a type IIA fibre Bragg grating[J]. Institute of Physics Publishing, 2004, 15(6): 1113-1119.
- 10 Tian Xiaocheng, Zhang Kun, Zhu Na, *et al.*. Research on linear chirped pulse generated by direct phase modulation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0302002.
田小程, 张 崑, 朱 娜, 等. 直接相位调制产生线性啁啾脉冲特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302002.
- 11 Morten Ibsen, Durkin M K, Feced R, *et al.*. Dispersion compensating fibre Bragg gratings[C]. SPIE, 2001, 4532: 540-551.