

均匀光纤光栅 Chirp 化及其用于色散补偿实验研究*

秦玉文** 赵玉成 张劲松 李唐军 简水生

(北方交通大学光波技术研究所 北京 100044)

提要 对均匀光纤光栅进行了线性啾啾(Chirp)化处理,并将由此得到的 Chirp 光纤光栅用于常规的单模光纤通信系统进行色散补偿,给出了均匀光纤光栅 Chirp 化原理和实验结果及 Chirp 光纤光栅色散补偿原理和实验结果。

关键词 光纤光栅,啾啾化,调谐,色散补偿

1 引言

由于光纤光栅在许多领域的实际应用与重要的潜在应用,尤其是在光纤色散补偿方面的重要潜在应用,近年来引起了人们的广泛的兴趣与关注^[1~3],其温度特性、应变特性亦得到了较为深入的研究^[4,5]。在许多实际应用研究中,希望能够把均匀光纤光栅变为啾啾光纤光栅,并使其 Chirp 参数和中心 Bragg 波长能够根据实际需要同时在较大的范围内进行调谐。例如在色散补偿实验研究中,尤其是在没有高精度时延特性测试设备的条件下,为找到最佳补偿长度,就需要反复截断与熔接光纤,多次进行测量,最后才能确定光纤光栅的色散补偿能力。如果能够对 Chirp 参数进行调节,在实验与应用研究中,就可以通过对 Chirp 参数的调节,很快地得到所需要的最佳补偿能力,即可以根据光纤的长度选择 Chirp 参数。因此对光纤光栅进行调谐就具有特别重要的意义。本文给出对均匀光纤光栅进行 Chirp 化调谐研究以及把 Chirp 化的光纤光栅用于色散补偿的实验研究结果。

2 均匀光纤光栅 Chirp 化

从已有的光纤光栅的温度特性与应变特性^[4,5]可知道,如果光纤光栅上某一点的温度发生变化或者是沿轴向发生应变,那么光纤光栅上这一点的本地 Bragg 波长将会发生变化。并且从光纤光栅的温度特性还可以知道,如果用温差方法使均匀光纤光栅 Chirp 化,当光栅两端的温差为 100℃时,光纤光栅的 Chirp 带宽仅变化约为 1 nm。在一些实际应用中,希望光纤光栅有更大的 Chirp 带宽调节范围,这时就必须采用应力或应变的方法使均匀光纤光栅 Chirp 化。

* 国家自然科学基金、863 计划和博士后科学基金资助项目。

** 第一作者联系地址:国家自然科学基金信息学部光学与光电子学科 北京 100083。

收稿日期: 1998-05-18; 收到修改稿日期: 1998-07-13

2.1 Chirp 化原理

在线性 Chirp 化调谐情况下,要求沿光纤光栅产生线性应变;而在非线性 Chirp 化调谐情

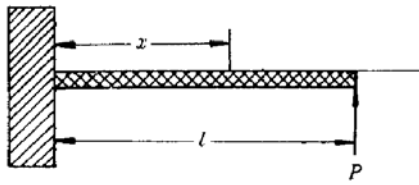


图 1 悬臂梁调谐机构

Fig. 1 Cantilever beam tuning structure

况下,则要求沿光栅方向产生非线性应变。目前我们进行的 Chirp 化研究为线性 Chirp 化,因此应设法沿光栅产生线性应变,且应变本身的变化应能调节。为此我们设计出一种悬臂梁机械调谐机构,可以同时调 Chirp 与 Bragg 波长。其原理如图 1 所示。实验中可以从自由端的上方或下方对悬臂梁加力,以便在粘贴有光纤光栅的上表面产生压应变或张应变,使

光纤光栅的 Bragg 波长能够根据需要向长波方向或短波方向移动。

当应力不超过某一限度时,材料的应变 ε 与应力 σ 成正比关系,即

$$\varepsilon = \sigma/E \quad (1)$$

其中 E 称为材料的弹性模量。对于悬臂梁表面上一点 x (如图 1 所示),应变的大小可以表示为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P(1-x)}{W_x E} \quad (2)$$

其中 P 为在悬臂梁自由端所施作用力的大小, W_x 为弯矩,其值与材料截面的形状和大小有关。由上式可知,只要悬臂梁的弯矩大小不变,在悬臂梁上、下表面上所产生的应变就是线性应变。在进行悬臂梁设计时,应根据所需应变大小、光纤光栅长度、Chirp 调谐范围、所需要调谐精度、材料的弹性模量、材料许应力大小等因素具体决定悬臂梁选用什么材料、横截面形状和加工尺寸大小等。

由(2)式可知,当对悬臂梁的自由端施加作用力时,悬臂梁上、下表面产生的应变沿悬臂梁线性变化。因此当把均匀光纤光栅粘贴在悬臂梁的上表面或下表面,并对悬臂梁自由端施加作用力时,一根均匀光纤光栅将变为 Chirp 光纤光栅,即均匀光纤光栅被 Chirp 化。

2.2 实验结果与讨论

图 2 为采用悬臂梁机构使 10 cm 长的均匀光纤光栅 Chirp 化的实验研究结果。其中图 2 (a) 为处于自由状态时的反射光谱,图 2(b) 为 Chirp 化带宽调到约 2 nm 时的反射光谱,图 2 (c) 为 Chirp 化带宽调到约 2 nm 并对其中心波长进行调谐后的反射光谱。

图 3 为采用悬臂梁机构对另一根 10cm 长的均匀光纤光栅进行 Chirp 化调谐的实验研究结果。其中图 3 (a) 为处于自由状态时的反射光谱,图 3(b) 为施加压应力且 Chirp 化带宽调到

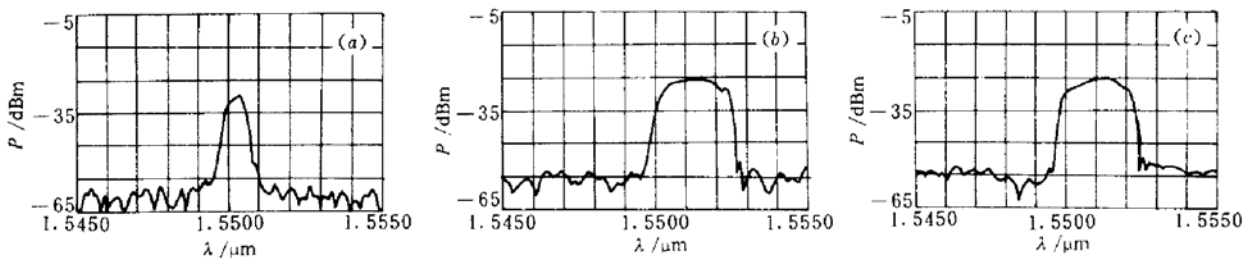


图 2 Chirp 化实验研究结果

(a) 自由状态; (b) 带宽 2 nm; (c) 带宽 2 nm 中心波长变化

Fig. 2 Experimental results of chirpization

(a) free state; (b) bandwidth 2 nm; (c) bandwidth 2 nm with the central wavelength changed

约 3 nm 时的反射光谱,图 3 (c) 为施加张应力且 Chirp 化带宽调到约 4.1 nm 时的反射光谱。

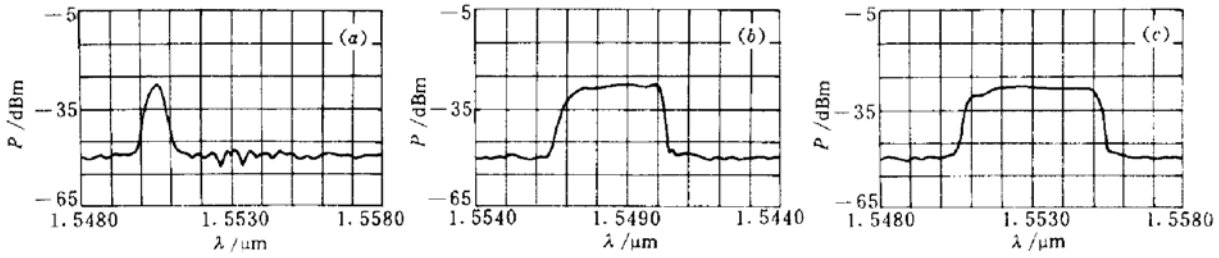


图 3 Chirp 化实验研究结果

(a) 自由状态; (b) 带宽 3 nm; (c) 带宽 4.1 nm

Fig. 3 Experimental results of chirplization

(a) free state; (b) bandwidth 3 nm; (c) bandwidth 4.1 nm

比较图 2 与图 3 中处于自由状态与经 Chirp 调谐后的光纤光栅的反射光谱可以看出,采用我们研制的悬臂梁调谐机构,可以实现 Chirp 与 Bragg 波长同时调谐,对于 10 cm 长的光纤光栅其带宽调节范围可以达到约 4 nm。

3 色散补偿实验研究

3.1 色散补偿原理与实验装置

利用 Chirp 光纤光栅对光纤的色散进行补偿最早由 Ouellette 提出^[6]。其基本思想是,在 Chirp 光纤光栅中谐振波长沿光纤光栅是位置的函数,即沿光纤光栅的每一点都有一个本地 Bragg 波长,因此进入 Chirp 光纤光栅的不同波长的光在不同位置上反射并具有不同的时延。这将导致一个正的或负的时延,而且这一时延的正负可以方便地通过改变 Chirp 光纤光栅的方向进行改变。因而,光纤的色散可以用 Chirp 光纤光栅进行补偿,在光纤中传播而展宽了的光脉冲信号其原始脉冲宽度可以恢复^[7]。

色散补偿实验装置如图 4 所示。实验中所用 10 cm 长 Chirp 光纤光栅由均匀光纤光栅经 Chirp 化处理而来,所用光脉冲由增益开关量子阱 DFB 激光器产生,其重复频率为 2.5 GHz,中心波长为 1551.6 nm。光脉冲的初始 Chirp 由色散补偿光纤 (DCF) 进行补偿后,由通信信号分析仪测得的脉冲宽度约为 40 ps,其带宽为 0.331 nm。

实验中,光脉冲的初始 Chirp 用色散补偿光纤补偿后,首先经过一个限制光脉冲带宽的滤波器送入掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行放大,然后进入 103 km 常规单模光纤进行传输,其输出的光脉冲经环形器进入 Chirp 光纤光栅,使展宽的光脉冲得到压缩。用通信信号分析仪测量被压缩的信号脉冲,并与经过 103 km 传输后的展宽信号脉冲及原始信号脉冲进行比较,以确定 Chirp 光纤光栅的色散补偿能力。

本实验中,与环形器相连的 Chirp 光纤光栅的反射率 > 99%,其带宽可以根据需要进行调

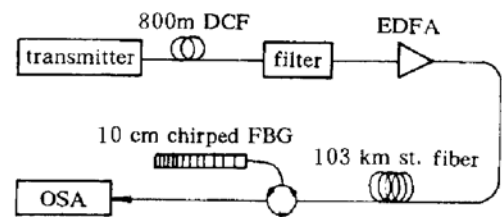


图 4 Chirp 光纤光栅色散补偿实验原理图

Fig. 4 Diagram of optical fiber dispersion compensation with a chirped fiber Bragg grating

实验中,光脉冲的初始 Chirp 用色散补偿光纤补偿后,首先经过一个限制光脉冲带宽的滤波器送入掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行放大,然后进入 103 km 常规单模光纤进行传输,其输出的光脉冲经环形器进入 Chirp 光纤光栅,使展宽的光脉冲得到压缩。用通信信号分析仪测量被压缩的信号脉冲,并与经过 103 km 传输后的展宽信号脉冲及原始信号脉冲进行比较,以确定 Chirp 光纤光栅的色散补偿能力。

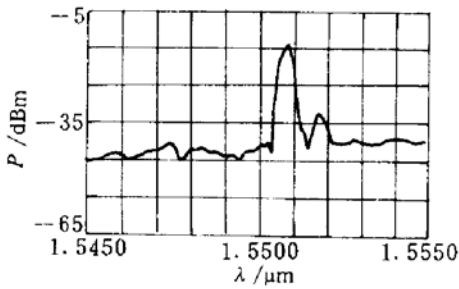


图 5 光脉冲源光谱

Fig. 5 Spectrum of the optical pulse source

约为 225 ps; (c) 为经 103 km 传输并进行色散补偿后的脉冲信号,其脉冲宽度约为 44 ps。

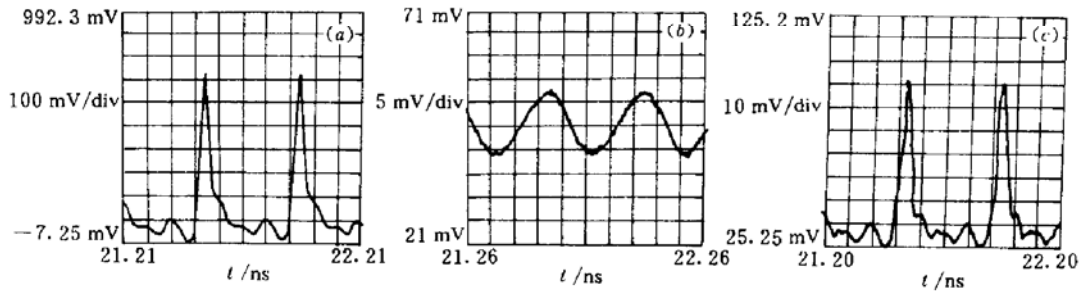


图 6 实验结果

(a) 原始脉冲; (b) 展宽脉冲; (c) 色散补偿后脉冲

Fig. 6 Experimental results

(a) original signal pulse; (b) expanded signal pulse; (c) dispersion compensated signal pulse

比较色散补偿后信号脉冲宽度和原始信号脉冲宽度可以看出,色散补偿后脉冲比起原始脉冲的宽度稍有展宽,但基本上恢复了原始脉冲宽度。光脉冲不能完全恢复原始脉宽的原因有多方面的因素,主要包括光纤光栅 Chirp 参数大小调节不够理想,Chirp 光纤光栅能够提供的色散补偿特性与光纤所需要色散特性不完全一致,存在偏振模色散等。

参 考 文 献

- 1 A. Inoue, M. Shigehara, M. Ito *et al.*. Fabrication and application of fiber Bragg grating—a review. *Optoelectronics-devices and Technologies*, 1995, **10**(1):119~130
- 2 K. O. Hill, S. Theriault, B. Malo *et al.*. Chirped in-fibre Bragg grating dispersion compensators: Linearisation of dispersion characteristic and demonstration of dispersion compensation in 100 km, 10 Gbit/s optical fibre link. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(21):1755~1756
- 3 W. H. Loh, R. I. Laming, A. D. Ellis *et al.*. 10 Gb/s transmission over 700 km of standard single-mode fiber with 10-cm chirped fiber grating compensator and duobinary transmitter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9):1258~1260
- 4 Qin Yuwen, Zhao Yucheng, Chen Genxiang *et al.*. Experimental investigation on temperature characteristic and temperature control of fiber Bragg gratings. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **B7**(6):510~514 (in English)
- 5 S. W. James, M. L. Dockney, R. P. Tatam. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(12):1133~1134
- 6 F. Ouellette. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguide. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10):847~849
- 7 Qin Yuwen, Chen Genxiang, Li Tangjun *et al.*. Optical fiber dispersion compensation by chirped fiber Bragg grating. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **B7**(5):402~406 (in English)

Experimental Investigation on Uniform Fiber Bragg Grating Chirplization and Its Application in Dispersion Compensation

Qin Yuwen Zhao Yucheng Zhang Jinsong Li Tangjun Jian Shuisheng
(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract Linear chirplization of a uniform fiber Bragg grating is reported in this paper. The chirped fiber Bragg grating thus obtained has been used for standard single mode fiber dispersion compensation in an optical communication system. The principle and experimental results of the uniform fiber Bragg grating chirplization and the experimental result of chirped fiber Bragg grating dispersion compensation are presented.

Key words fiber Bragg grating, chirplization, tuning, dispersion compensation

15 W 线列阵连续激光二极管泵浦的 窄脉宽大峰值功率调 Q Nd:YAG 激光器

我们研制的 15 W 连续激光二极管泵浦调 Q Nd:YAG 激光器,重复率 3 kHz 时脉冲宽度为 6.4 ns,峰值功率为 60.4 kW,最大重复率达到 65 kHz。

采用的 15 W 连续激光二极管一维线状排列 24 个发光区,每个发光区面积 $200\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$,相邻区域的间隔 $190\ \mu\text{m}$ 。24 个发光区域的总长度为 10 mm。二极管激光的发散角为 $40^\circ \times 10^\circ$ 。对激光二极管的整形包括两个部分。第一步采用多根光纤耦合,将 24 个光斑分别耦合进直径 $300\ \mu\text{m}$ 的 24 根独立的光纤,将光纤输出端按圆状排列,获得直径约 1.2 mm,发散角 16° 的端面输出。第二步采用组合透镜对该光束耦合,获得直径小于 1 mm,景深约 3 mm 的轴对称空间光会聚区。激光晶体为 $\phi 5\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 的 Nd:YAG 棒。采用声光调 Q 方式,声光晶体使用 SF-6 玻璃,通光长度 12 mm。声光开关的衍射效率 $\eta \approx 40\%$ 。该调 Q 系统电脉冲上升时间 40 ns,电脉冲宽度 3 μs 。将谐振腔后端面设计为凹面镜,输出镜为平面。端面泵浦的热透镜效应也类似于凹面镜,综合效果用激光发散角的值来推测。在我们的试验装置中,使用 15 W 激光泵浦时,由 2.5 mrad 发散角推测出前端面和后端面的高斯半径分别为 0.27 mm 和 0.34 mm。表 1 是泵浦光功率 15 W 时的实验结果。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

Pulse repetition rate/kHz	3	5	8	10	65	free resonator
Peak power/kW	60.4	52.5	35.3	30.3	1.6	
Pulse width/ns	6.4	7.2	7.8	8.0	30	
Average power/W	1.16	1.89	2.20	2.42	3.10	4.50
Slope efficiency/%	12.3	17.3	20.1	24.0	36.0	44.0

西安电子科技大学 西安 710071

王石语 过 振 文建国 蔡德芳 陈 梁

收稿日期:1999-07-19;收到修改稿日期:1999-08-09