

# 啁啾光纤光栅在光纤通信系统中的色散补偿\*

刘颂豪<sup>1)</sup> 杜卫冲<sup>1)</sup> 谭华耀<sup>2)</sup> 廖常俊<sup>1)</sup> 秦子雄<sup>1)</sup> 杜 戈<sup>1)</sup> 刘伟平<sup>1)</sup> 余重秀<sup>3)</sup>

1), 华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631  
2), 香港理工大学电子工程系, 九龙, 香港  
3), 北京邮电大学电子工程系, 北京 100064

**摘 要** 报道一个简单而新颖的、能将均匀光栅改变为线性啁啾光栅的方法。此方法可对光纤光栅的啁啾度和中心波长进行独立调节。实验表明, 一长为 10 cm 的均匀光栅其啁啾度可增加至 0.5 nm/cm, 而中心波长独立可调量达 0.7 nm。利用这样的可调啁啾光栅在标准单模光纤(G652)中对一脉宽为 25 ps 的输入信号在 1550 nm 窗口传输, 成功地实现 100 km 的色散补偿。

**关键词** 啁啾光纤光栅, 色散补偿, 光纤通信。

## 1 引 言

线性啁啾光纤布拉格光栅(FBG)已用于高速长距离光纤传输系统的色散补偿和线性产生激光脉冲啁啾的方法。啁啾光纤布拉格光栅在色散补偿方面的应用, 由于它是无源器件, 具有线性和很强的色散而受到极大重视。但是, 光纤光栅的啁啾度和中心波长需精心设计使能补偿光脉冲在光纤传输过程中产生的色散, 因此希望啁啾度和中心波长能独立调节, 以适应不同光纤系统的要求。Garth 等<sup>[1]</sup>和 Leblance 等<sup>[2]</sup>用类似的方法, 将光纤光栅嵌入一悬臂尺中, 然后弯曲尺的一端, 于是沿光栅长度方向产生一近似线性的应力场。此方法可对光栅的啁啾参数进行调节, 但其中心布拉格波长也相应移动。本文提出一种可将均匀光纤光栅改变为线性啁啾光栅, 而它的线性啁啾度和中心波长又可独立调节的方法。此方法为, 首先将均匀光纤光栅嵌入一由玻璃纤维布叠成的多层胶合尺中, 然后用如图 1 所示的装置, 在相对于中心点的光栅长度方向产生一奇数对称的线性应力分布。分别调节尺的水平拉伸量和垂直弯曲位移就可使中心波长和啁啾度独立可调。

## 2 原 理

实验装置如图 1 所示。将一嵌入均匀光纤光栅的纤维布叠成的多层胶合尺的两端 A 和 B 点固定在两个显微镜台上, 其间距离为 L, A 和 B 两点必须妥为固定, 使受弯曲时仍能保持水平位置, 这是最为重要的。在此条件下, 当有一力施加于 A 和 B 之间的  $x = L/2$  点上并使尺

\* 国家高科技 863-317 基金资助项目及广东省 96 重点攻关项目。

收稿日期: 1998-09-01

弯曲时, 位于  $x = L/4$  和  $3L/4$  的两点 ( $C$  和  $D$ ) 将处于“无应力”状态。将均匀光纤光栅的中心点嵌在其中的  $C$  点上, 当尺受力弯曲时, 光栅的中心则保持“无应力”。因此在光栅的此点上, 它的布拉格波长是不变的。但在光栅  $C$  点的一侧将受压应力, 而另一侧将受到拉伸应力。于是, 当尺受力弯曲时, 光栅的反射谱将展宽, 而中心布拉格波长不产生位移。在施力弯曲前, 为调节中心波长, 可沿水平方向移动两个显微台中的一个, 即将尺拉伸, 相当于沿光纤光栅方向引入一外加均匀应力, 于是反射谱就会位移。若在  $x = L/2$  处施力, 则反射谱会在新中心波长处对称加宽。

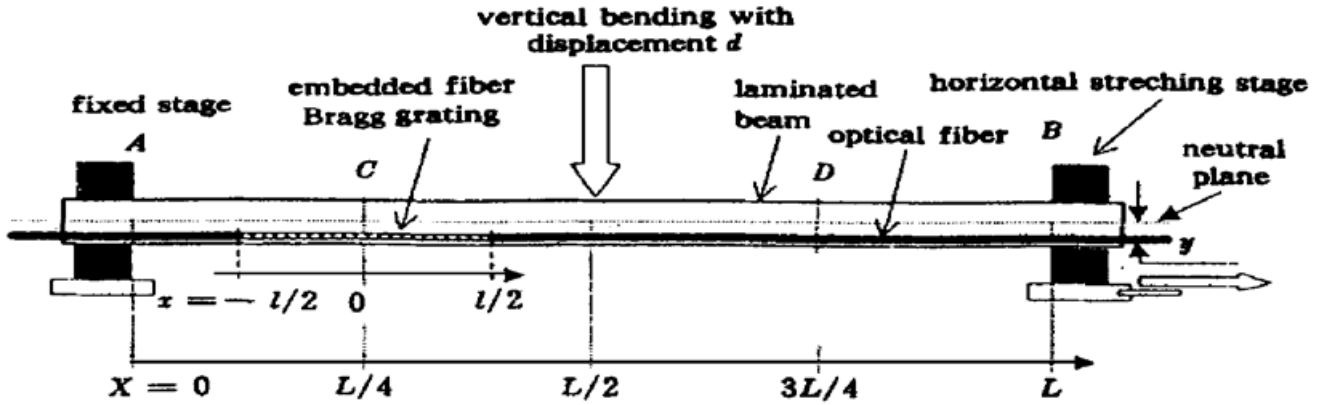


Fig. 1 Three-point-bending and stretching setup for transforming a uniform fiber Bragg grating into a linearly chirped grating and independently tuning its chirp degree and central wavelength

此方法可用弯曲理论予以解释, 在施力弯曲时, 沿长为  $L$  的尺的轴向应力  $\epsilon(x)$  可由下式表示

$$\begin{aligned} \epsilon(x) &= \frac{192dy}{L^3} \left( \frac{x}{2} - \frac{L}{8} \right) + \epsilon_0, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \\ \epsilon(x) &= \frac{192dy}{L^3} \left( \frac{3L}{8} - \frac{x}{2} \right) + \epsilon_0, & \frac{L}{2} \leq x \leq L, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $x$  为沿尺方向的位置,  $y$  为光纤离开尺中性面的垂直距离,  $d$  为在  $x = L/2$  处的垂直弯曲位移,  $\epsilon_0$  为由于拉伸引致的沿尺方向产生的附加应力。(1) 式表示在点  $x = 0$  和点  $x = L/2$  之间的应力围绕  $C$  点呈奇数对称, 即当  $\epsilon_0 = 0$  时,  $\epsilon(L/4) = 0$ 。中心位于  $C$  点的均匀光栅将沿长度方向经受相似的分布。光纤光栅上任何一点的布拉格波长可由(1)式导出

$$\lambda(X) = \lambda_0 \left[ 1 + \beta \left( \epsilon_0 + \frac{96}{L^3} dy X \right) \right], \quad -\frac{l}{2} < X \leq \frac{l}{2}, \quad (2)$$

式中,  $\lambda_0$  为无弯曲及拉伸时均匀光栅的原始布拉格波长,  $l$  为光栅长度 ( $l < L/2$ ),  $X = x - L/4$  表示光纤光栅的位置, 其原点与中心点  $C$  重合,  $\beta$  为光栅布拉格波长位移的应力系数, 对于标准单模光纤其值为 0.79, 对尺施力使之弯曲, 即可使均匀光栅改变为线性啁啾光栅, 其线性啁啾度  $[\Delta\lambda(X)/\Delta X]$  和中心布拉格波长  $\lambda_c$  可由下式给出

$$\frac{\Delta\lambda(X)}{\Delta X} = \beta \lambda_0 \frac{96}{L^3} dy, \quad (3)$$

$$\lambda_c = \lambda_0 (1 + \beta \epsilon_0). \quad (4)$$

由上式可见, 光纤光栅的线性啁啾度和中心波长可独立调节, 前者可由改变位移  $d$  获得, 而后者则由拉伸量  $\epsilon_0$  调节。

### 3 实验和结果

进行了两个实验来验证所提出的方法的可行性。第一个实验用 5 个短的光纤光栅来测量尺的“零应力”位置的应力。光纤光栅长 2 mm，光栅中心之间分隔 25 mm，这 5 个光栅嵌入尺中，居中的光栅(即第 3 个光栅)，其中心落在尺的 C 点上。5 个光纤光栅均在同一平面上，离尺的中性平面约 1.4 mm。尺的尺寸为 400 mm × 20 mm × 3 mm。A 和 B 两点之间的距离为 380 mm。当尺被弯曲时，光纤光栅所受到的应力可由测量这 5 个光栅的布拉格波长的位移量来确定。图 2 所示的是尺受力弯曲 ( $d = 10$  mm) 前后的反射光谱，图 3 表示不同弯曲度 ( $d = 0, 10$  mm 和 16 mm) 时尺位置与布拉格波长位移的关系。结果表明，置于 C 点的光栅是无应力的，甚至尺受弯曲时也是如此；位于 C 点左边的光栅，尺受压应力，而在 C 点右边的光栅则受张应力。长为 100 mm 的光栅，在受相同的弯曲量作用时 ( $d = 16$  mm) 其线性啁啾度约为 0.5 nm/cm，此结果与(2)式所估算的符合得很好。

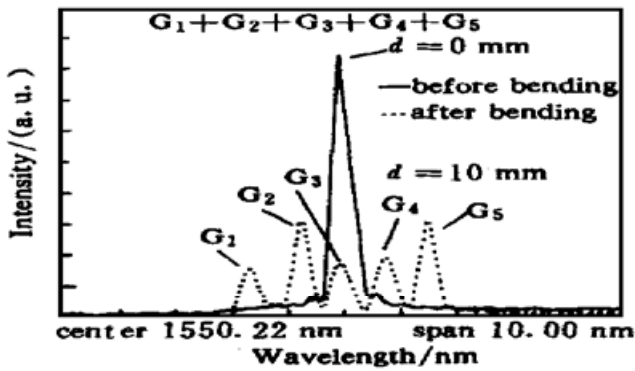


Fig. 2 Spectra of 5 short sampling FBGs spanning 100 mm in length with the equal separation of 25 mm recorded before and after bending, the highest peak is for  $d = 0$  mm, and the five lower peaks is for  $d = 10$  mm.  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$  and  $G_5$  represent the gratings

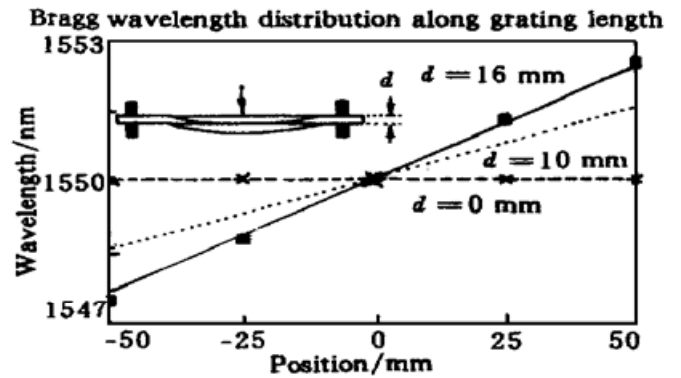


Fig. 3 Bragg wavelength of the five sampling FBGs versus beam position for different degree of bending. The solid and dash lines are the calculated results from equation (2)

第二个实验为将长 100 mm 的均匀光纤光栅(布拉格波长为 1553.3 nm)嵌入另一尺中。光纤光栅的中心置于 C 点，与第一个实验相同。实验中测量了尺受力弯曲时光纤光栅的反射光谱。图 4(a) 表示不同弯曲量时测得光纤光栅的反射光谱。结果清楚表明，虽然反射光谱有

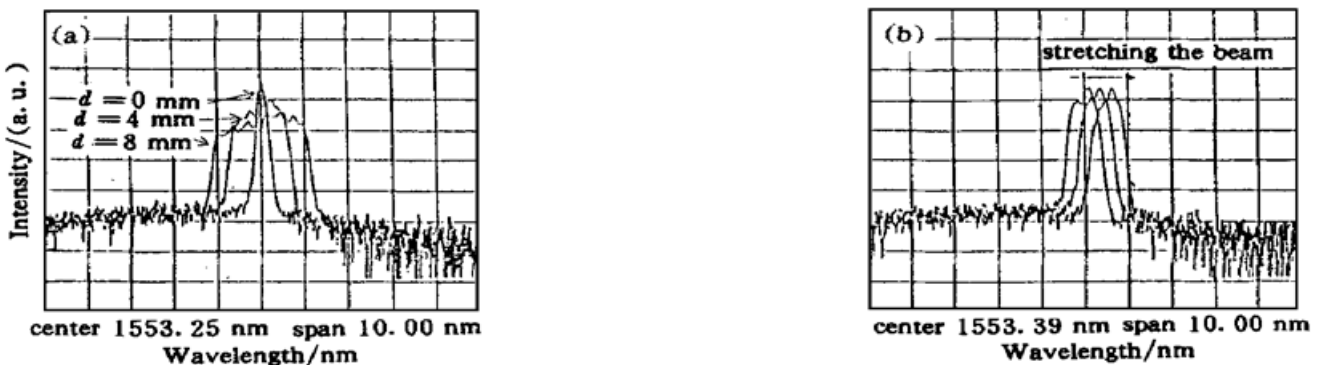


Fig. 4 Spectra of a tunable chirped grating with 100 mm in length. (a) With its linear chirped degree tuned by bending, (b) With the central wavelength tuned by stretching the beam

了明显的加宽, 而中心布拉格波长仍保持不变。但若将尺拉伸, 反射光谱不变, 而中心波长则出现位移, 如图 4(b) 所示。

图 5 演示 10 Gb/s 信号在标准光纤(色散为 17 ps/nm/km) 中传输并用可调啁啾光纤光栅进行色散补偿的模拟实验装置。10 Gb/s 信号用半导体激光器产生的光脉冲信号模拟, 它由电子信号发生器直接驱动, 用光学相关器测得光脉冲的脉宽为 25 ps。其中心波长和谱宽分别为 1554.0 nm 和 0.6 nm。光脉冲信号经 100 km 后引起的总色散为 1020 ps。实验中使用两台掺铒光纤放大器(EDFA), 通带滤波器用以抑制噪声信号, 光学循环器置于其后。调整光纤光栅的中心波长和啁啾度使之与脉冲信号相匹配, 则啁啾光纤光栅提供的反向色散为  $2nl/c$ , 其中有效折射率  $n = 1.46$ , 光纤光栅长度  $l = 100$  mm, 光速  $c = 3 \times 10^8$  m/s, 由此计算得它的反向色散为 970 ps, 与 100 km 光纤的色散极为接近。

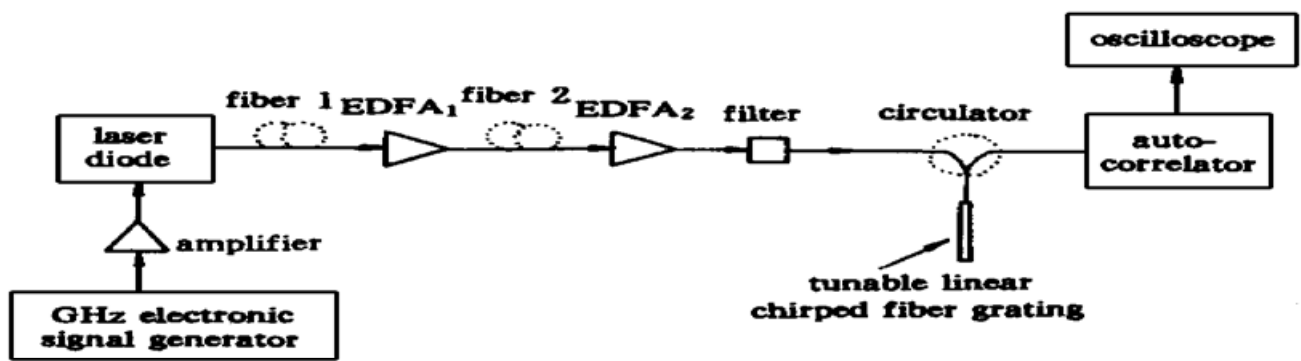


Fig. 5 Experimental setup to demonstrate dispersion compensation of standard single-mode fiber for 10 Gb/s signal over 100 Km using a tunable chirped grating

图 6 表示三个不同阶段测得的光脉冲轮廓: 图 6(a) 为输入脉冲, 其半极大全宽(FWHM) 为 25 ps, 图 6(b) 为经 100 km 光纤传输后的弥散信号, 图 6(c) 表示经啁啾光栅补偿后测得的信号脉宽, 为 40 ps, 展宽了的脉冲几乎完全恢复。实验结果表明, 利用线性啁啾度和中心波长可独立调节的啁啾光纤光栅补偿了 10 Gb/s 信号在 1550 nm 窗口经 100 km 标准光纤(G652) 所产生的色散。

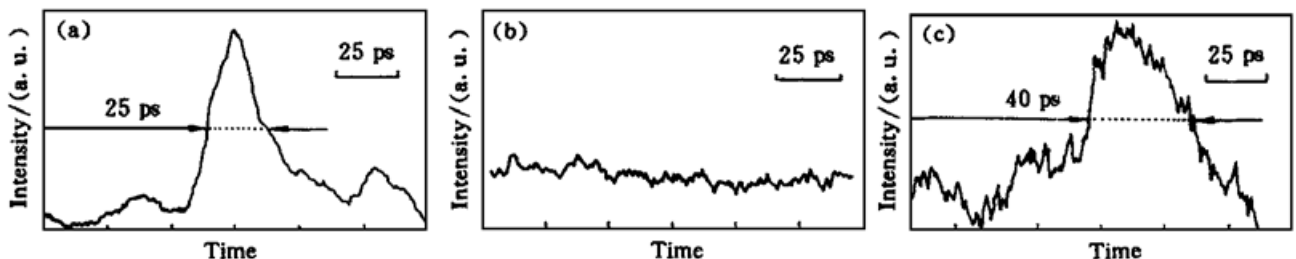


Fig. 6 Temporal profiles of the optical pulse signals, (a) input pulse signal, (b) dispersed pulse signal after traveling 100 km and (c) compressed pulse signal reflected by the tunable chirped grating

### 参 考 文 献

- [1] Blanc M L, Huang S Y, Ohn M M *et al.*. Tunable chirping of a fiber Bragg grating using a tapered cantilever. *Electron. Lett.*, 1994, 30(25): 2163~ 2164
- [2] Grathe D, Epworth R E, Lee W S *et al.*. Adjustable dispersion equalizer for 10 and 20 Gbit/s over

distances up to 160 km. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(25) : 2159~ 2160

- [3] Galvanauskas A, Fermann M E, Harter D *et al.*. All-fibre femtosecond pulse amplification circuit using chirped Bragg gratings. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(9) : 1053~ 1055
- [4] Ohm M M, Alavie A T, Maskant R *et al.*. Dispersion variable fibre Bragg grating using a piezoelectric stack. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(21) : 2000~ 2001
- [5] Macleod I A. *Analytical Modeling of Structural Systems*. New York: Ellis Horwood, 1990. 206

## Dispersion Compensation by Chirped Optical Fiber Grating in Optical Fiber Communication System

Liu Songhao<sup>1)</sup> Du Weichong<sup>1)</sup> Tan Huayao<sup>2)</sup> Liao Changjun<sup>1)</sup>  
Qin Zixiong<sup>1)</sup> Du Go<sup>1)</sup> Liu Weiping<sup>1)</sup> Yu Chongxiu<sup>3)</sup>

1), *Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631*  
2), *Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong*  
3), *Department of Electrical Engineering, Beijing Post and Telecommunication University, Beijing 100064*

(Received 1 September 1998)

**Abstract** A simple and novel method for transforming a uniform fiber grating into a linearly chirped grating is presented. This method permits independent tuning of the chirp degree and the central wavelength of the fiber gratings. It is demonstrated experimentally that the chirp degree of a 100-mm long uniform grating can be increased up to 0.5 nm/cm and its central wavelength can be independently tuned by 0.7 nm. A transmission experiment for compensating the dispersion of a standard single-mode fiber (G652) over a distance of 100 km of a 25 ps input signal in the 1550 nm windows was successfully demonstrated using such a tunable chirped grating of 10 cm in length.

**Key words** chirped fiber grating, dispersion compensation, optical fiber communication.

### 【编者的话】

## 本刊加入《中国学术期刊(光盘版)》和《中国期刊网》的声明

为适应我国信息化建设需要,扩大作者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和《中国期刊网》。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入该数据库,请在来稿时声明,本刊将作适当处理。