

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0336-04

# 低纹波系数色散补偿光纤光栅的研究\*

裴 丽 简水生 谢增华 宁提纲 李唐军

(北方交通大学光波研究所,北京 100044)

摘要: 介绍用扫描法研制成功的长 13.5 cm、带宽 0.447 nm、反射谱平坦的切趾啁啾光纤光栅,功率波动小于 1 dB,用色散分析仪测试得到时延曲线上的纹波系数小于 20 ps,用该光纤光栅对 200 km 的 G.652 光纤色散补偿,补偿量大于 98%(原始脉冲宽度为 36.78 ps,色散补偿后的脉冲宽度为 37.23 ps)。

关键词: 宽带切趾;啁啾光栅光栅;纹波系数;色散补偿

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来全球信息化过程越来越快,从而要求更高的传输速率作为保障,这就对光纤通信提出了更高的要求,对常规单模光纤 G.652,10 Gb/s 的长距离传输是令人关注的,全球已安装了大量这样的光纤。然而 1.55 μm 通信窗口的色散极大地限制了传输距离,如果能够解决色散问题,中继距离就可能增加数倍,由于线性啁啾光栅可作为色散补偿器来补偿光通信中存在的色散,它具有色散补偿能力强、带宽相对较宽等优点,并且结构简单、成本低、无源、与现有光纤通信系统可以很好地兼容,啁啾光栅的研究已日益受到人们的重视。<sup>[1]</sup>

本文介绍了通过控制扫描步长和激光器输出光功率研制成功的啁啾光纤光栅,不仅具有平坦光滑的宽带反射谱,而且色散时延曲线更趋于线性化,其振荡行为被最大限度地抑制。对 200 km 光纤的色散补偿取得了很好的效果。

## 2 基本原理

### 2.1 理论模型

啁啾光栅中,谐振波是位置的函数,因此不同波长的入射光在啁啾光纤光栅的不同位置上反射并具有不同的时延,光纤中传播光波的长波长分量在光栅的起始端被反射,而传播的短波长分量在光栅的

远端反射,即光波经过光栅后起到色散均衡的作用,从而实现色散补偿<sup>[2]</sup>。可用耦合模方程建立线性啁啾光纤光栅的理论模型。线性啁啾光纤光栅的周期沿轴向线性变化,其折射率结构可由下式描述:

$$n(z) = n_0 + \Delta n(z) \cos[\omega z + \Phi(z)], \quad (1)$$

其中,  $n_0$  为未扰动时光纤芯区的折射率,  $\Delta n(z)$  表示折射率扰动,  $\omega = 2\pi/\Lambda_0$  是光栅的空间频率,  $\Lambda_0$  为光栅中点处的周期,相位函数  $\Phi(z)$  是轴向缓变函数,对线性啁啾光纤光栅有:

$$\Phi(z) = (F/2)(z^2/L^2), \quad (2)$$

其中  $F$  为啁啾系数,  $L$  为光栅长度。

计算(1)式所描述的波导结构,通常采用耦合模方程,由麦克斯韦方程出发,可得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA^+}{dz} &= K(z) \exp[-j \int_0^L B(z') dz'] A^-, \\ \frac{dA^-}{dz} &= K(z) \exp[j \int_0^L B(z') dz'] A^+, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $A^+$  和  $A^-$  分别表示前向波和后向波的幅度。 $K(z)$  为沿啁啾光栅传播方向变化的耦合系数,且  $K(z) = K_0 f(z)$ ,  $K_0$  是光栅中点处的耦合系数,  $f(z)$  为折射率切趾函数,对于线性啁啾光栅有:

$$\int_0^L B(z') dz' = 2z\delta\beta - \Phi(z), \quad (4)$$

其中  $\delta\beta$  为传播常数的失谐量。取光栅耦合区为  $-L/2 \leq z \leq L/2$ , 则边界条件为:

$$A^+(-L/2) = 1, \quad A^-(L/2) = 0. \quad (5)$$

引入相位共轭变换:

$$\left. \begin{aligned} A^+ &= T(z) \exp(-j\delta z), \\ A^- &= R(z) \exp(j\delta z), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

\* 国家科委“863”高科技项目(2001AA312090)、国家自然科学基金(6987700)及北方交通大学(论文)攀登基金资助课题。

E-mail: peilip@263.net

收稿日期: 2000-10-30; 收到修改稿日期: 2001-01-27

定义光栅本地反射系数：

$$\chi(z) = \frac{R(z)}{T(z)} \exp(j\Phi), \quad (7)$$

对(7)式求导整理得 Riccati 微分方程：

$$\chi' = K(z)\chi(1 - \chi^2) + [2\delta\beta - \Phi(z)]\chi. \quad (8)$$

并且由(5)式可得边界条件为：

$$\chi\left(\frac{L}{2}\right) = 0. \quad (9)$$

光栅的响应  $R' = \chi(-L/2) \times \chi^*(-L/2)$ , 因此由(8)式和(9)式就能进一步讨论线性啁啾光栅的反射特性和色散、时延特性。

## 2.2 数值结果与讨论

要获得优质的光纤光栅色散补偿器必须保证光纤光栅具有最佳组合的色散、带宽、反射率, 并且时延波动尽可能小<sup>[3,4]</sup>。

采用四阶 Runge-Kutta 法结合(9)式的边界条件就可求解(8)式, 得出光栅的响应。下面讨论数值计算的一些结果。

反射带宽是线性啁啾光纤光栅的一个重要参数, 作为色散补偿器, 必须保证反射带宽大于所补偿光脉冲的带宽。图1给出了光栅长度一定( $L = 10$  cm)光栅色散与相应最大色散补偿带宽的关系, 可见随着带宽的增大, 色散补偿量减小。

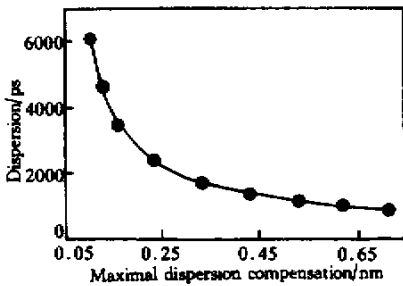


Fig. 1 The OFG dispersion for different maximal dispersion compensation bandwidth

图2所示的是补偿 50 km、100 km 和 200 km 普通光纤的色散、啁啾系数与光栅长度之间的对应关系, 可见, 增加光栅长度, 反射率增大, 同时对增大光纤光栅的平均色散很有利, 啁啾系数增大, 反射率和平均色散均变小<sup>[2]</sup>。

由于光栅两端的法布里-珀罗(F-P)效应导致时延曲线的波动, 在色散补偿时, 较大的时延波动引起脉冲扭曲变形较大, 产生较大的误码率, 因此用于色散补偿的光纤光栅要尽量减小时延波动。采用折射率切趾的方法可抑制反射谱的边峰以及时延波动。

图3给出了四种不同切趾函数的时延波动比较, 可以看出切趾后时延波动大大降低。

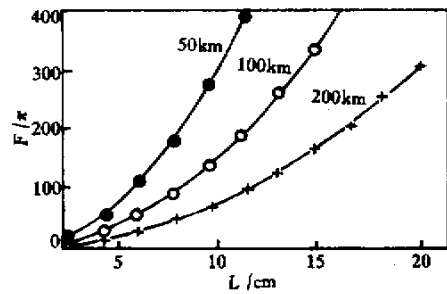


Fig. 2 The relationship between chirp coefficient and OFG length. Compensated optical fiber length are 50 km, 100 km, 200 km from top to bottom respectively

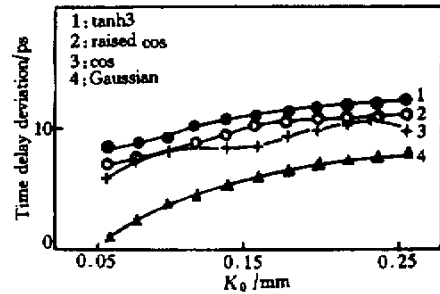


Fig. 3 The time delay deviation with different apodization.  $L = 10$  cm,  $F = 60\pi$

## 3 实 验

已有人对光纤光栅色散补偿进行了研究<sup>[5,6]</sup>。我们采用相位掩膜法, 通过控制扫描步长和  $K_0F$  准分子激光器的输出光功率成功地研制了长度为 13.5 cm 的切趾啁啾光纤光栅。光敏光纤由普通单模光纤在室温、 $1.115 \times 10^7$  Pa 氢气中处理 8 个星期制成。激光脉冲重复频率为 5 Hz, 波长为 248 nm。0~0.5 cm 与 13 cm~13.5 cm 扫描步长为 0.25 mm/s, 0.5 cm~1 cm 与 12.5 cm~13 cm 扫描步长为 1 mm/s, 激光输出能量为 138 mJ, 1 cm~12.5 cm 扫描步长为 0.1 mm/s, 激光输出能量为 168 mJ。这样由于氢载光纤两端曝光量少, 折射率调制形成包络, 达到切趾的目的, 极大地抑制了时延曲线的波动。

用色散分析仪测得的反射谱和时延曲线如图4所示, 中心波长为 1545.35 nm, 带宽为 0.447 nm, 功率谱十分平坦, 最大波动小于 1 dB, 时延曲线基本上呈线性。

图5给出了时延波动图, 纹波系数小于 20 ps。利用上述光栅进行 200 km 光纤色散补偿实验, 实验装置如图6所示。

可调谐激光器的波长为 1545.32 nm,满足 ITU-T 建议的波长标准,通过外调制器实现速率为 10 Gb/s 的光信号传输,入射光脉宽为 36.78 ps,如图 7(a)所示。采用 3 个光放大器来进行光功率补偿,最后加入图 4 所示的光纤光栅进行色散补偿,将

光纤光栅放在尾端能够在对色散补偿的同时,更好地滤除放大器的自发辐射噪声。200 km 传输后色散补偿前的脉冲如图 7(b)所示,脉冲展宽,难于识别。色散补偿后的脉冲如图 7(c)所示,脉冲宽度为 37.23 ps。可见脉冲基本恢复。

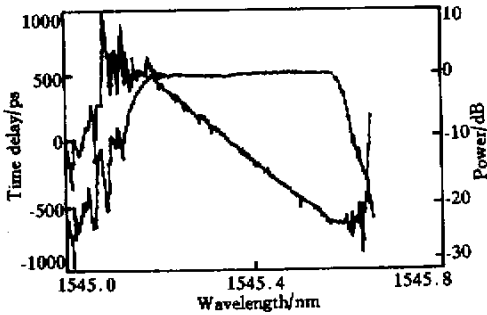


Fig. 4 The reflectivity and time delay of OFG

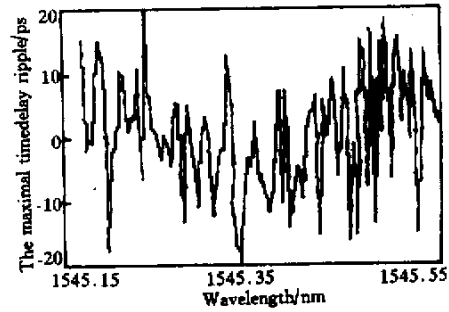


Fig. 5 The time delay ripple of OFG

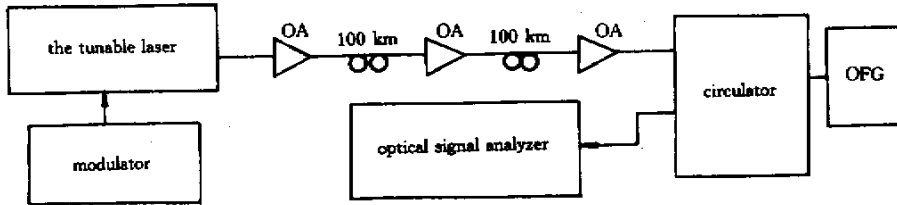


Fig. 6 Experimental setup of 10 Gb/s 200 km dispersion compensation

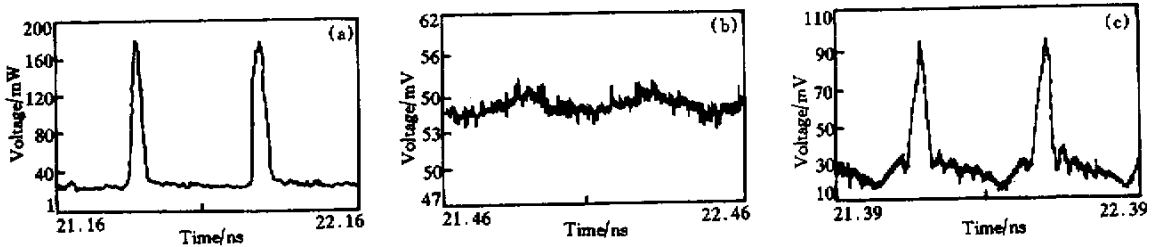


Fig. 7 Experimental results of dispersion compensation. (a) Original pulses ;(b) Optical pulse after 200 km transmission without dispersion compensation ;(c) The pulses after dispersion compensation using the OFG with transmission 200 km

结论 用数值法对线性啁啾光纤的特性作了分析,分析表明,在设计色散补偿器时,必须综合考虑光纤光栅长度、啁啾系数和切趾函数,从而在带宽足够宽、反射率足够大、时延波动尽量小的情况下获得一定量的色散。光纤光栅具有最佳组合的色散、带宽、反射率有很大的实际意义。应用光纤光栅研制出高质量的色散补偿器具有非常高的科研价值和广阔的应用前景。

参 考 文 献

[ 1 ] Jian Shuisheng , Zhao Yucheng , Wei Daoping *et al.* . Dispersion compensation experimental on 19 ps pulse width over 133 km single mode fiber with tunable chirp and

wavelength gratings. *Science in China* , 1999 , 42 ( 2 ) : 165 ~ 170  
 [ 2 ] Su Xueweng , Huang Dexu , Ruan Yu. Charactereritics and design of linearly chirped fiber grating for dispersion compensation. *Laser & Infrared* , ( 激光与红外 ) , 1999 , 29 ( 2 ) : 115 ~ 118 ( in Chinese )  
 [ 3 ] Qing Zixiong , Du Weicong , Zeng Qingke *et al.* . 10 Gb/s 100 km transmission system on G. 652 fiber with tunable dispersion compensation by chirped FBG. *Science in China [ 中国科学 ( A 辑 ) ]* , 1999 , 29 ( 7 ) : 662 ~ 666 ( in Chinese )  
 [ 4 ] Wang Shamino. Group velocity dispersion cancellation and additive group delays by cascaded fiber grating in transmission. *IEEE Microwave & Guided Wave Letters* , 1998 , 8 ( 10 ) : 327 ~ 329  
 [ 5 ] Qing Yuweng , Zhao Yucheng , Li Tangjun *et al.* . Chirped fiber Bragg grating dispersion compensation. *Acta Optica Sinica ( 光学学报 )* , 1998 , 18 ( 11 ) : 1597 ~ 1598 ( in

Chinese)

[6] Komukai T, Nakazawa M. Fabrication of non-linearly

chirped fiber gratings for higher order dispersion compensation. *Opt. Commun.*, 1998, **15**(1): 5~8

## Dispersion Compensation Optical Fiber Grating with Low Ripple Coefficient

Pei Li Jian Shuisheng Xie Zenghua Ning Tigang Li Tangjun  
(*Light-Wave Technology Institute, Northern Jiaotong University, Beijing 100044*)  
(Received 30 October 2000; revised 27 January 2001)

**Abstract:** An apodization chirp optical fiber grating (OFG) is fabricated by scanning method. This OFG is 13.5 cm long with 0.447 nm bandwidth and its reflectivity is flatness with ripple coefficient less than 1 dB, while its ripple coefficient of time delay is less than 20 ps. The dispersion of 200 km G.652 optical fiber is compensated by the grating, and more than 98% dispersion is compensated (the original pulse width is 36.78 ps, after compensation the pulse width is 37.23 ps).

**Key words:** width bandwidth apodization; chirp optical fiber grating; ripple coefficient; dispersion compensation