

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0769-05

# 利用梳状色散光纤实现光脉冲压缩的特性研究\*

张 帆 伍 剑 林金桐

(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘要: 提出了一种采用梳状色散光纤(CDPF)实现光脉冲压缩的设计方法,并给出了相应的适于模拟梳状色散光纤压缩器的数值模型,主要研究了不同入射峰值功率下,梳状色散光纤输出脉冲宽度及时域波形与脉冲峰值处非线性相移 $\Delta\phi_{NL}$ 之间的变化关系。结果表明,在设计适用于超高速光时分复用系统的梳状色散光纤压缩器时,应当综合考虑脉冲峰值功率和非线性相移对压缩后脉冲的影响。

关键词: 超高速光时分复用;脉冲压缩;梳状色散光纤

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## 1 引 言

为了获得皮秒和亚皮秒量级的超短光脉冲,以利于超高速(大于 100 Gbit/s)光时分复用通信系统应用,采用基于光纤的非线性光脉冲压缩技术是一种行之有效的。目前,光脉冲压缩技术主要包括:高阶孤子效应压缩技术<sup>[1,2]</sup>、非线性光纤环镜(NOLM)脉冲整形技术<sup>[3]</sup>和色散递减光纤(DDF)中的绝热压缩技术<sup>[4]</sup>。这些光脉冲压缩技术中,采用色散递减光纤方案被证实是一种有效的脉冲压缩机制<sup>[5]</sup>,通过色散递减光纤,已经成功地实现了把 6 ps 光脉冲到压缩产生 1.2 ps 和 0.19 ps 近变换极限的超短光脉冲<sup>[6,7]</sup>。然而,采用色散递减光纤实现光脉冲压缩的主要受限因素是色散递减光纤在实际中不易制造,理想情况下,在拉制光纤时需要时时监测光纤的色散系数,因此很难获得预定的色散随光纤长度的变化曲线;同时,在低阶孤子情况下,色散递减光纤可实现的最大压缩比率受限于该光纤光注入端与输出端群速度色散系数的比值,采用高阶孤子压缩虽然可以提高压缩比率,但输出光脉冲却具有较高的本底功率<sup>[8]</sup>,不利于实际应用。

一种可替代色散递减光纤脉冲压缩技术是采用梳状色散光纤。所谓梳状色散光纤是由若干段高色散系数光纤和低色散系数光纤交替连接构成,光脉冲在梳状色散光纤中传输时,由于高色散系数光纤具有较小的非线性系数,而低色散系数光纤具有较

大的非线性系数,因此,非线性效应(自相位调制效应 SPM)和群速度色散效应(GVD)在空间上交替占据主导地位。在光纤的反常色散区,自相位调制效应和群速度色散效应的相互作用即可实现脉冲压缩。采用梳状色散光纤已经成功地实现了光拍频信号到高速脉冲码流的转换<sup>[9]</sup>和光脉冲压缩<sup>[10,11]</sup>。

梳状色散光纤的一个突出优点在于可以采用 1550 nm 窗口的标准单模光纤(SMF-高色散、低非线性)和色散位移光纤(DSF-低色散、高非线性)交替衔接构成,因此在实现上比色散递减光纤容易得多,且造价低。本文提出了采用梳状色散光纤实现光脉冲压缩的简单数值模型,并基于该模型,主要研究了梳状色散光纤输出脉冲宽度及时域波形在不同的注入功率下,随梳状色散光纤每段光纤中非线性相移的变化关系。

图 1 给出了我们设计的梳状色散光纤压缩器的结构,图 2 为初始脉冲宽度为 15 ps、峰值功率为 0.4 W 时,梳状色散光纤压缩器输出脉冲波形与初始波形之间的对比。压缩后脉宽为 1 ps。结果表明梳状色散光纤可以应用到脉冲压缩领域,是一种简

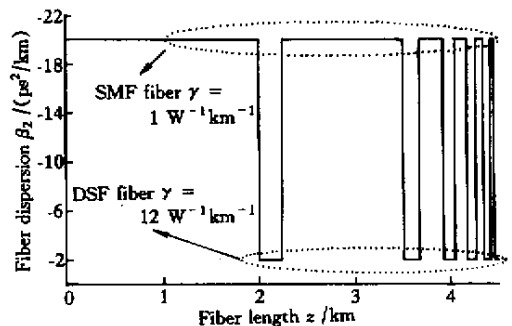


Fig.1 The dispersion map of CDPF compressor

\* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期 2000-01-17;收到修改稿日期 2000-07-10

单且易于实现的光脉冲压缩方法。

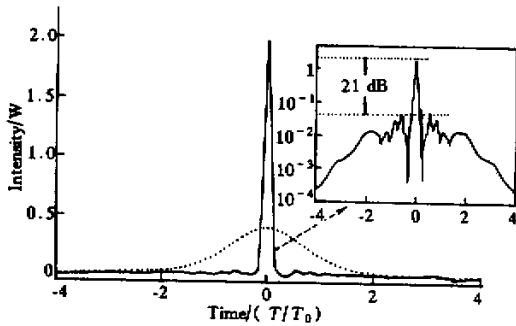


Fig.2 Comparison between incident waveform (·····) and output waveform (—) from CDPF compressor

## 2 描述梳状色散光纤中光脉冲演化的基本方程

当脉冲宽度大于  $0.1 \text{ ps}$  时,光脉冲在梳状色散光纤中的传输可以用色散系数  $\beta_2$  随传输距离  $z$  变化的非线性薛定谔方程来描述<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A + \frac{i}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} = i\chi(z) |A|^2 A, \quad (1)$$

式中  $A$  为光脉冲时域电场幅度,  $\alpha$  为光纤衰减系数,  $\beta_2(z)$  与  $\chi(z)$  为光纤中的群速度色散系数和非线性系数, 随着传输距离的变化, 光脉冲将经历梳状色散光纤中标准单模光纤与色散位移光纤,  $\beta_2(z)$  与  $\chi(z)$  也将取不同的值;  $T$  是以群速度  $v_g$  为移动参考系(所谓的延时系)下的时间参量, 即有

$$T = t - z/v_g.$$

采用分步傅里叶算法可以对(1)式进行数值求解, 从而可研究梳状色散光纤压缩脉冲的特性。在对梳状色散光纤压缩器设计时, 可以引入两个辅助参量:  $\Delta\phi_{\text{NL}}$  和  $\Delta\phi_{\text{D}}$ , 分别对应光脉冲在每段色散位移光纤中的非线性相移和每段标准单模光纤中的色散相移。 $\Delta\phi_{\text{NL}}$  和  $\Delta\phi_{\text{D}}$  可以表示为:

$$\Delta\phi_{\text{NL}} = (2\pi n_2 I_0 / \lambda) dz, \quad (2)$$

$$\Delta\phi_{\text{D}} = (\beta_2 \Delta\omega^2 / 2) dz, \quad (3)$$

在(2)式和(3)式中,  $n_2$  为非线性折射率系数,  $I_0$  为光脉冲峰值功率密度,  $\lambda$  为中心波长,  $\Delta\omega$  为脉冲频率带宽,  $dz$  为脉冲传输距离。

当初始脉冲宽度和峰值功率给定情况下, 梳状色散光纤压缩器的设计所要解决的问题主要是每一段标准单模光纤和色散位移光纤长度的选取, 及光纤段数的选取。需要说明的一点是, 当  $\Delta\phi_{\text{NL}}$  和  $\Delta\phi_{\text{D}}$

确定后, 在数值模拟中就可以通过监测  $\Delta\phi_{\text{NL}}$  和  $\Delta\phi_{\text{D}}$  的大小来确定每段光纤的长度, 梳状色散光纤压缩器也就随之确定。理想情况下, 光脉冲穿过梳状色散光纤时, 在色散位移光纤中由于自相位调制效应而在光脉冲中心区域引入线性正啁啾<sup>[12]</sup>, 当光脉冲进入标准单模光纤后, 受反常色散的作用, 光脉冲将被压缩, 当  $\Delta\phi_{\text{NL}}$  和  $\Delta\phi_{\text{D}}$  刚好相等时, 将达到最好的压缩效果。实际上, 光脉冲在梳状色散光纤中压缩过程中, 由于脉冲宽度的不断变小而导致其峰值功率不断增大, 因而色散位移光纤中的色散效应和标准单模光纤中的非线性效应都不容忽视, 当  $\Delta\phi_{\text{NL}}$  和  $\Delta\phi_{\text{D}}$  都比较大时, 压缩后的脉冲波形可能存在较大的基座。考虑以上两点, 在梳状色散光纤压缩器数值模拟设计中, 我们将对输出光脉冲的宽度和时域波形进行综合考虑, 设计出能满足光时分复用系统需求的压缩器。

## 3 数值模拟结果与讨论

(1)式、(2)式和(3)式即构成描述梳状色散光纤压缩器的数值模型。非线性折射率系数  $n_2$  为:

$$n_2 = c\gamma A_{\text{eff}}/\omega_0,$$

其中  $c$  为光速,  $A_{\text{eff}}$  为光纤有效纤芯面积,  $\omega_0$  为入射光中心频率。将  $n_2$  代入(2)式, 则可得:

$$\Delta\phi_{\text{NL}} = \gamma P_0 dz,$$

其中  $P_0$  为光脉冲峰值功率。

在本文的数值模拟中, 假定初始脉冲时域波形为 sech 函数形状, 即:

$$A_0(T) = \sqrt{P_0} \text{sech}(T/T_0),$$

其中  $T_0$  与脉宽  $T_p$  (FWHM) 关系为:

$$T_0 = T_p/1.763.$$

采用  $1550 \text{ nm}$  窗口的标准单模光纤和色散位移光纤来构成梳状色散光纤压缩器, 计算中所用到的参数由表 1 给出。

Table 1. Dispersion coefficient, nonlinear coefficient and loss of SMF and DSF

	$\beta_2$	$\gamma$	$\alpha$
SMF	$-20 \text{ ps}^2/\text{km}$	$1 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$	$0.2 \text{ dBkm}^{-1}$
DSF	$-2 \text{ ps}^2/\text{km}$	$12 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$	$0.2 \text{ dBkm}^{-1}$

另外, 在梳状色散光纤压缩器设计中必须考虑标准单模光纤和色散位移光纤熔接点的损耗, 计算中我们假定每一个接点的损耗为  $0.1 \text{ dB}$ 。由于该损耗的存在, 梳状色散光纤压缩器不宜采用太多的段数, 在下面的数值模拟中, 选用的段数为 14(当

然 段数的增多有望进一步提高压缩比率,下面的结果表明,14 段足以满足 100 Gbit/s 以上光时分复用系统需求),即梳状色散光纤压缩器由 7 段标准单模光纤和 7 段色散位移光纤组成。数值模拟中,令每一段色散位移光纤和标准单模光纤中的  $\Delta\phi_{NL}$  和  $\Delta\phi_D$  刚好相等。

梳状色散光纤压缩器第一段光纤的选取对输出波形具有重要影响,图 3 和图 4 给出了第一段光纤分别为单模标准光纤和色散位移光纤时的输出波

形,非线性相移  $\Delta\phi_{NL} = 0.05\pi$ 。可以看出,第一段采用标准单模光纤时,输出脉冲宽度随着峰值功率的提高而减小,脉冲波形变化平坦,未发生脉冲破碎;而当梳状色散光纤压缩器第一段采用色散位移光纤时,随峰值功率的提高,输出脉冲发生了强烈的破碎,使得梳状色散光纤压缩器无法承受较高的峰值功率,反而不利于脉冲的进一步的压缩。可以预见,当非线性相移  $\Delta\phi_{NL}$  增大时,这一点将变得更明显。因此,在我们的设计中,梳状色散光纤压缩器第一段光纤均采用标准单模光纤。

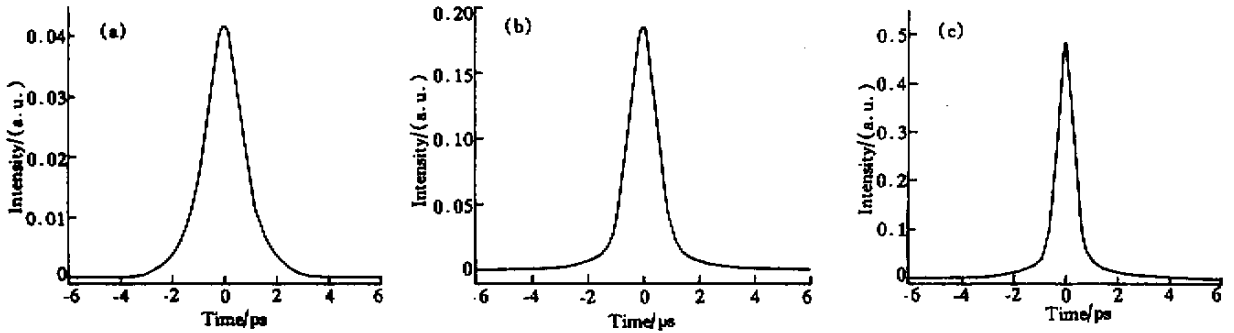


Fig.3 Waveforms from CDPF compressor when the first segment of fiber is SMF,  $\Delta\phi_{NL} = 0.05\pi$ . (a)  $P_{max} = 0.1$  W ; (b)  $P_{max} = 0.3$  W ;(c)  $P_{max} = 0.5$  W

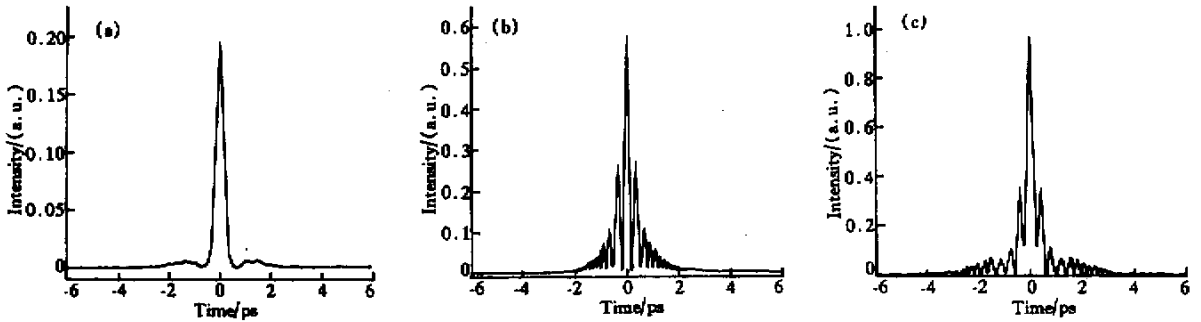


Fig.4 Waveforms from CDPF compressor when the first segment of fiber is DSF,  $\Delta\phi_{NL} = 0.05\pi$ . (a)  $P_{max} = 0.1$  W ; (b)  $P_{max} = 0.3$  W ;(c)  $P_{max} = 0.5$  W

图 5 给出了基于上述考虑的计算结果,纵坐标为梳状色散光纤脉宽压缩因子  $F_c$ ,定义为梳状色散

光纤输出脉冲宽度与初始脉冲宽度之间的比值,横坐标为每段光纤中的非线性相移  $\Delta\phi_{NL}$ 。图中曲线所对应的初始脉冲宽度均为 15 ps,不同曲线对应于不同的脉冲峰值功率。可以看出,在给定脉冲峰值功率情况下,脉宽压缩因子  $F_c$  均随  $\Delta\phi_{NL}$  的增大而增大,峰值功率愈大,  $F_c$  的增大也就愈快。这种变化趋势表现为当非线性相移  $\Delta\phi_{NL}$  相同时,脉冲峰值功率越高,压缩因子  $F_c$  越大,当  $\Delta\phi_{NL}$  增大时,这种变化趋势更为明显。 $\Delta\phi_{NL}$  定义为脉冲峰值中心部分的非线性相移,  $\Delta\phi_{NL}$  和峰值功率的增大都将使脉冲中更多的低功率部分(时域上远离脉冲中心的部分)获得可观的非线性相移,即自相位调制效应,当脉冲进入到下一段自相位调制光纤时,其群速度色散效应同样会对脉冲中的这一部分产生压缩作用。因此,较

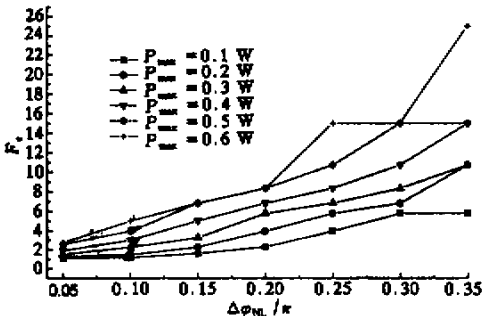


Fig.5 CDPF's compressed factor vs nonlinear phase shift in every DSF fiber under the condition of different pulse peak power. Input pulse  $A_0(T) = \text{sech}^2(T/T_p)$

高的峰值功率和  $\Delta\phi_{NL}$  可获得较大的压缩比率。

在模拟结果中, 获得的最大压缩比为 25( 峰值功率的提高, 有望获得更高的压缩比率), 对应的脉冲宽度为 0.6 ps, 因此梳状色散光纤压缩器完全可以满足 100 Gbit/s( 1/5 码元周期为 2 ps ) 以上的光时分复用光源需求。

从光时分复用系统设计的角度来看, 不仅要求光脉冲具有较小的脉宽, 同时还要求光脉冲应具有较好的消光比, 以降低脉冲码流在传输链路上的相互干扰。图 6 为梳状色散光纤压缩器输出波形, 纵坐标为归一化的光功率( 取对数刻度), 其中的插图为归一化的脉冲波型。图中不同曲线对应不同的脉冲

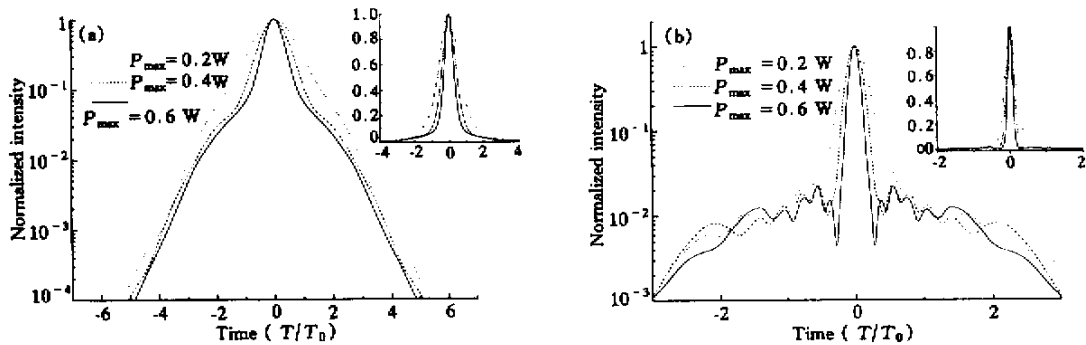


Fig. 6 Waveforms from CDPF compressor under the condition of different pulse peak power,  $T_p$  (FWHM) = 15 ps.

(a)  $\Delta\phi_{NL} = 0.05\pi$ . (b)  $\Delta\phi_{NL} = 0.35\pi$ . Inset was normalized pulse waveform

结论 本文提出了一种采用梳状色散光纤实现光脉冲压缩的设计方法, 并给出了相应的适于模拟梳状色散光纤压缩器的数值模型。基于该模型, 主要研究了不同峰值功率下梳状色散光纤输出脉冲宽度及时域波形与每段光纤中非线性相移  $\Delta\phi_{NL}$  之间的变化关系。结果表明, 梳状色散光纤压缩器的压缩因子  $F_c$  随  $\Delta\phi_{NL}$  的增大而增大, 入射脉冲峰值功率越高,  $F_c$  增大越明显。梳状色散光纤压缩器完全可以满足速率 100 Gbit/s 以上的光时分复用光源需求。另外  $\Delta\phi_{NL}$  的增大可能会使输出波形出现微小的基座, 影响光时分复用传输性能。因此, 从光时分复用系统需求的角度来考虑, 在梳状色散光纤压缩器设计时, 当脉冲宽度满足需求的情况下, 宜采用较小的  $\Delta\phi_{NL}$ 。

### 参 考 文 献

[1] Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P *et al.*. Extreme picosecond pulse narrowing by means of soliton effect in single-mode optical fibers. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(1):289 ~ 291

[2] Ahmed K A, Chan K C, Liu F. Femtosecond pulse

峰值功率。对比图 (a) 和图 (b) 不难看出, 非线性相移  $\Delta\phi_{NL}$  较小时, 梳状色散光纤压缩器输出波形较平滑, 峰值功率的改变对波形平滑性的影响非常小, 同时具有良好的消光比。而当  $\Delta\phi_{NL}$  变大时, 梳状色散光纤压缩器输出波形在脉冲中心附近开始出现强度微小的尖峰, 称之为基座, 这种基座的出现将降低输出脉冲的消光比, 对于光时分复用传输来说, 是一种不利因素。因此, 梳状色散光纤压缩器在输出脉冲宽度和波形质量之间存在一定的权衡关系。针对光时分复用应用来说, 在梳状色散光纤压缩器设计时不宜采用较大的非线性相移。

generation from semiconductor lasers using the soliton-effect compression technique. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, 1995, **1**(2):592 ~ 600

- [3] Simith K, Doran N J, Wigley P G J. Pulse shaping, compression, and pedestal suppression employing a nonlinear-optical loop mirror. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(8):1294 ~ 1296
- [4] Chernikov S V, Mamyshev P V. Femtosecond soliton propagation in fibers with slowly decreasing dispersion. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(6):1633 ~ 1641
- [5] Mark D P, Liu H F. Higher order soliton pulse compression in dispersion-decreasing optical fibers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-33**(8):1430 ~ 1439
- [6] Guy M J, Chernikov S V, Taylor J R *et al.*. 1.2 ps pulses at low base repetition rates for 100 Gbit/s per channel optical communications networks. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(25):2190 ~ 2191
- [7] Guy M J, Chernikov S V, Taylor J R *et al.*. 200 fs soliton pulse generation at 10 GHz through nonlinear compression of transform-limited pulses from an electroabsorption modulator. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(9):740 ~ 741
- [8] Pelosi M D, Matsui Y, Suzuki A. Pedestal suppression form compressed femtosecond pulses using a nonlinear fiber loop mirror. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **QE-35**(6):867 ~ 874
- [9] Chenikov S V, Taylor J R. Comblike dispersion-profiled

- fiber for soliton pulse train generation. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8):539 ~ 541
- [ 10 ] Guy M J, Chernikov S V, Taylor J R. Novel optical pulse compressor with use of a comb-like dispersion profiled fiber. Conference Proceedings-Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-CLEO, Baltimore, Maryland USA. 1997, **11**:18 ~ 23
- [ 11 ] Guy M J, Chernikov S V, Taylor J T. Electroabsorption modulators for high speed ultrashort pulse generation and processing. *IEICE Transactions on Electronics*, 1998, **E81-C**(2):169 ~ 174
- [ 12 ] Agrawal G P 著, 胡国锋 等译. 非线性光纤光学. 天津:天津大学出版社, 1992, **12**:84 ~ 93

## Performance Study of a Comb-Like Dispersion Profiled Fiber Compressor

Zhang Fan Wu Jian Lin Jintong

( *Optical Communication Center of Beijing, University of Post and Telecommunication, Beijing 100876* )

( Received 17 January 2000 ; revised 10 July 2000 )

**Abstract :** A design method for using comb-like dispersion profiled fiber ( CDPF ) to achieve pulse compressing is given , and corresponding numerical model is also presented. Based on this model , the effect of nonlinear phase shift on pulse width and waveform from CDPF compressor was studied under the condition of different pulse peak power. The numerical results reveal that the incident pulse peak power and nonlinear phase shift should be satisfy certain conditions , to get the suited CDPF compressor for using in the ultrahigh speed optical time division multiplexing ( OTDM ) system.

**Key words :** ultrahigh speed optical time division multiplexing ; pulse compress ; comb-like dispersion profiled fiber