

文章编号: 0253-2239(2004)08-1091-4

# 40Gb/s 光时分复用传输光纤光栅补偿色散研究\*

宁提纲 简伟 裴丽 谭中伟 刘艳 简水生  
(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要:** 用精密扫描掩模法写入宽带啁啾光纤光栅,掩模板背面两端各 10% 长度处镀有按 4 阶高斯函数透过率的膜,写入的啁啾光栅的时延纹波最大值为 20 ps。为减少写入光纤光栅的偏振模色散,研制了新的低偏振模色散光纤光栅补偿写入法。采用补偿写入法前的平均微分群时延为 9.1406 ps;采用补偿写入法后的平均微分群时延为 0.1521 ps。并利用低偏振模色散光纤光栅对 40 Gb/s 光时分复用系统在普通 G.652 光纤传输 122 km 的色散进行了补偿实验,功率代价为 1.5 dB。

**关键词:** 光纤通信技术; 40 Gb/s 光时分复用; 低偏振模色散啁啾光纤光栅; 偏振模色散补偿写入法  
中图分类号: TN818; TN929.11 文献标识码: A

## Study on Dispersion Compensation of 40 Gb/s Optical Time Division Multiplexing Transmission Over G.652 Fiber

Ning Tigang Jian Wei Pei Li Tan Zhongwei Liu Yan Jian Shuisheng  
(*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044*)  
(Received 17 June 2003; revised 10 October 2003)

**Abstract:** Wide-bandwidth chirped fiber Bragg grating (FBG) has been fabricated using precisely scanning phase-mask technique. Two ends of the mask by ten percent length are coated, whose transmissive characteristics approximate fourth order Gaussian function. The maximum delay ripple of the chirped grating written by such a phase mask is about 20 ps. In order to decrease polarization mode dispersion (PMD) of chirped fiber Bragg grating, a novel method, which is called polarization mode dispersion-compensation written technique, has been developed. Differential group delay of chirped fiber Bragg grating by the former written technique is 9.1406 ps, but with the newly developed method it has been greatly reduced to 0.1521 ps. Such low polarization mode dispersion chirped fiber Bragg gratings were then used to compensate the dispersion of 40 Gb/s optical time division multiplexing transmission over 122 km of G.652 fiber.

**Key words:** optical communication technology; 40 Gb/s optical time division multiplexing; low polarization mode dispersion chirped fiber Bragg grating; polarization mode dispersion-compensation written technique

## 1 引 言

随着社会的信息化,用户对通信容量的需求日益增加,预计将来在全业务服务中每一用户的容量需求可能超过 100 Mb/s。在日益增长需求的推动

下,作为现代长途干线通信主体——光纤通信一直朝着更高速率、更大容量、更长无电中继距离的方向发展。单信道速率不断提升,已从 2.5 Gb/s 提升到 10 Gb/s,并正向 40 Gb/s 方向发展,波分复用(WDM)和密集波分复用(DWDM)也日趋成熟并商用化。光纤色散对光纤通信系统升级扩容的阻碍显得日益突出<sup>[1~3]</sup>。

近年来,对光纤色散补偿的方法是色散补偿光纤(DCF)和啁啾光纤光栅(CFBG);其中色散补偿

\* 国家自然科学基金(69777010)、国家 863 项目、北京交通大学校人才基金(2003RC011)资助课题。

E-mail: ntigang@163.com

收稿日期:2003-06-17;收到修改稿日期:2003-10-10

光纤通过设计光纤结构与折射率分布,使光纤在  $1.55 \mu\text{m}$  窗口具有较大的负色散系数与负色散斜率。色散补偿光纤补偿技术是一种较成熟的技术,目前在全世界的高速通信系统中得到了广泛的应用。但色散补偿光纤有效面积小,有强非线性,损耗大,波分复用(WDM)系统中只能完全补偿一路,残留色散大,并且色散补偿量不可调<sup>[4]</sup>。色散斜率匹配之色散补偿光纤,目前大多数也只针对特定的 G. 655 光纤<sup>[5]</sup>,并且仍然存在残留色散的问题<sup>[6]</sup>,另外,在外界温度发生变化是,色散补偿光纤的色散、色散斜率与普通光纤变化不一样,同样会引起残留色散的问题<sup>[7]</sup>。啁啾光栅具有低的插入损耗,非线性小,可以补偿高阶色散,可以滤除掺铒光纤放大器(EDFA)的自发辐射噪声(ASE),波分复用中色散均衡简单,易于实现动态色散补偿等优点<sup>[1,4]</sup>。从上面分析可以看出,色散补偿光纤和啁啾光纤光栅是两种比较有发展前途的方法,但色散补偿光纤的缺点使其在密集波分复用(DWDM)和 10 Gb/s 以上系统应用受到限制<sup>[4]</sup>。啁啾光纤光栅是一种更有前途的方法。

在高速光时分复用(OTDM)系统中,高速超短光脉冲的传输技术是十分关键的技术。因此,探索和研究在普通单模光纤中传输 40 Gb/s 光脉冲具有重要的意义。在 40 Gb/s( $4 \times 10 \text{ Gb/s}$ )的光时分复用系统中,采用 G. 652 光纤,利用低偏振模色散宽带啁啾光纤光栅进行色散补偿,成功地补偿了 122 km 40 Gb/s 光时分复用传输系统中普通单模光纤的色散。

## 2 光纤光栅

写入光栅的光纤是标准的普通单模光纤(Corning SMF-28<sup>TM</sup>)经 130 MPa,15 天的高纯氢处理得到的,利用普通单模光纤写入光纤光栅具有与传输链路光纤更好的兼容性。写入方法是紫外光精确扫描相位掩模法<sup>[8,9]</sup>,写入的紫外光是由 KrF 准分子激光器产生的,波长为 248 nm,脉冲功率为 130 mJ,脉冲持续时间为 20 ns,脉冲频率选 10 Hz。写入的啁啾光纤光栅的反射率为 65%。

对于 40 Gb/s 光时分复用系统来说,光纤光栅的带宽有特殊要求。40 Gb/s 光时分复用光脉冲传输系统光源脉冲宽度是 4~5 ps,所以光脉冲的谱线宽度超过 1.0 nm,而制作光纤光栅的掩模板最长仅为 140 mm,在此长度限制下,光纤光栅的带宽与色

散补偿量是互相制约的。如果要求在 40 Gb/s 光时分复用传输光脉冲超过 1.0 nm 谱线宽度范围内,光纤光栅阻带内反射谱平坦,掩模板的设计带宽要达到 1 nm 以上,而在 1 nm 带宽做到反射谱平坦比较困难。我们通过定制特殊设计的掩模板来制作光纤光栅,其写入的啁啾光纤光栅 3 dB 带宽已达到 1.3 nm,图 1 为 ANDO 光谱仪 AQ6317 在分辨力为 0.01 nm 时测得的结果;色散达到  $-1038 \text{ ps/nm}$ ,图 2 为用 EG&G 公司的 CD400 色散分析仪测得的结果,测试光源用 HP8167 可调激光器。制作过程中,我们还成功地解决了光纤光栅与系统光源的中心波长的对准、色散量的微调、纹波系数的优化等一系列光纤光栅色散补偿的关键问题。

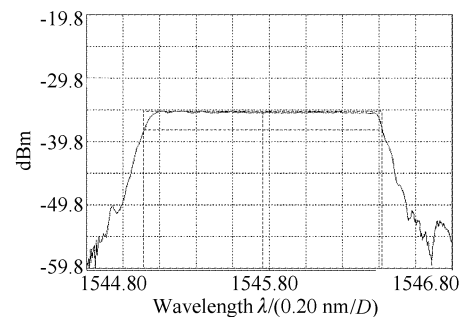


Fig. 1 Spectrum of chirped FBG

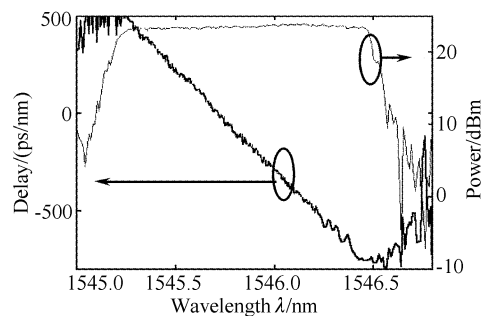


Fig. 2 Measured delay of chirped FBG

光纤光栅的时延纹波是影响补偿性能的一个重要因素,采用的特殊设计的掩模板背面两端各 10% 长度处镀有按 4 阶高斯函数透过率的膜,写入的啁啾光栅的时延纹波最大值为 20 ps。

光纤光栅的偏振模色散。目前,标准单模光纤的偏振模色散小于  $0.5 \text{ ps/km}^{1/2}$ ,对于 10 Gb/s 系统,信号传输的距离限制在 400 km 以内;对于 40 Gb/s 系统,该距离限制变为 25 km。由于 40 Gb/s 光时分复用系统中光源脉冲宽度仅为 4~5 ps,所以光纤光栅的偏振模色散的影响已不可忽略。在普通的一阶色散和高阶色散均被补偿以后,如果不消除光纤光栅器件本身的偏振模色散,传输皮秒(ps)量级的光脉冲将

很困难。目前对色散补偿光纤光栅偏振模色散测量的研究报道还很少。我们用琼斯矩阵本征值法较精确的测量了其偏振模色散,对光纤光栅进行了偏振模色散补偿写入的研究并取得了重大进展。光纤光栅偏振模色散的产生主要是由于纤芯对紫外光的吸收呈指数函数形式,造成光纤光栅横截面折射率调制不对称<sup>[10]</sup>。补偿写入法就是在写入光纤光栅的过程中,使光纤按一定规律绕固定轴旋转,掩模板保持不动。这样就可以大大减少折射率调制的不对称性,从

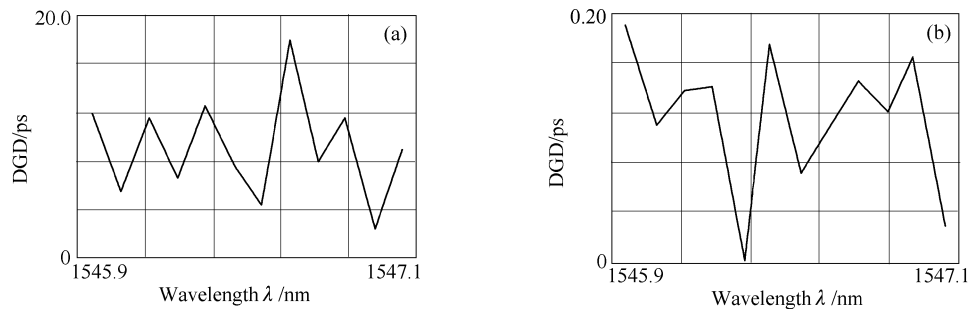


Fig. 3 Measured polarization mode dispersion of chirped fiber Bragg grating, which is written by two differential fabrication techniques

### 3 系统实验

实验系统结构见图 4。其中,增益开关分布反馈激光器在误码仪的输出时钟信号的驱动下,产生重复频率为 10 GHz、脉宽接近 23 ps 的光脉冲(脉冲重复频率与时钟频率相同)。此光脉冲先注入色散补偿光纤(DCF)中进行线性压缩,之后用掺铒光纤放大器放大,放大后的光脉冲注入梳状色散光纤(CDPF)再进行非线性压缩,从而获得系统所需的超短光脉冲。经优化设计增益开关分布反馈激光器的工作状态、色散补偿光纤压缩长度、梳状色散光纤(CDPF)压缩长度及压缩功率,获得了脉宽接近 5 ps 的超短光脉冲,脉冲中心波长为 1545.8 nm,谱宽接近 1 nm。接近 5 ps 的超短光脉冲经 LiNbO<sub>3</sub> 调制器调制产生 10 Gb/s 归零伪随机码流(码序列为  $2^{23} - 1$ )信号。调制后的光信号经掺铒光纤放大器

而减少光纤光栅偏振模色散。图 3(a)为偏振模色散采用补偿写入法前一个光纤光栅色散补偿器的微分群时延(DGD)大小;图 3(b)为采用偏振模色散补偿写入法后光纤光栅色散补偿器的微分群时延大小,其中光纤光栅的微分群时延由 HP8509B 偏振分析仪测试得到。由两图比较可以看出,补偿写入法减少偏振模色散的效果十分显著。采用补偿写入法前的平均微分群时延为 9.1406 ps;采用补偿写入法后的平均微分群时延为 0.1521 ps。

放大后注入光时分复用器,复用成 40 Gb/s 光时分复用的信号,其中第四路信号幅度很低。图 5(a)即为 40 Gb/s 调制信号的眼图。

复用后的 40 Gb/s 光时分复用信号首先经过一段长为 56 km 的 G. 652 光纤传输并用一个宽带啁啾光纤光栅进行补偿,之后再经过另一段长为 66 km 的 G. 652 光纤传输并用啁啾光纤光栅补偿。光纤的平均微分为 17 ps/(nm·km),损耗为 0.20 dB/km。40 Gb/s 信号经 122 km G. 652 光纤传输并补偿后的眼图见图 5(b)。由图可见,脉冲宽度基本恢复到了传输前的宽度,同时眼图张开很好,说明信号的信噪比较好。这是由于光纤光栅同时也起到滤波器的作用,抑制了传输链路上掺铒光纤放大器自发辐射噪声(ASE)的累积。图 6 为此系统的误码测试结果。由图可见,系统能够达到  $10^{-9}$  误码率  $R_{BE}$  的水平。

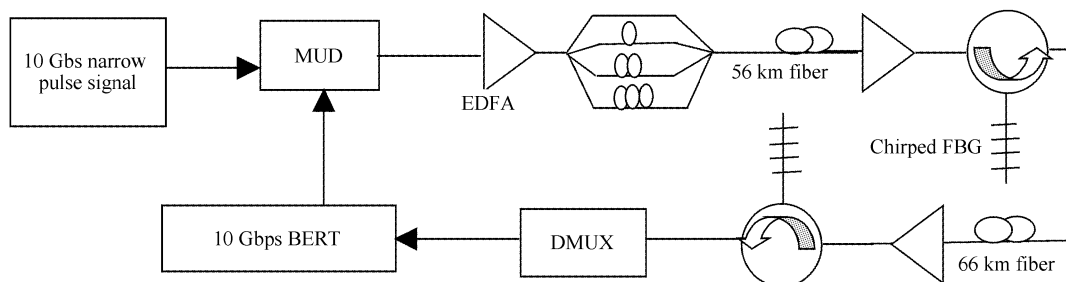


Fig. 4 Schematic of 40 Gb/s optical time division multiplexing system

系统传输功率代价为 1.5 dB。由于采用了低偏振模色散系数的 G. 652 光纤(偏振模色散系数测试为  $0.08 \text{ ps/km}^{1/2}$ )、偏振无关的解复用器件以及对新

型偏振模色散补偿法写入低偏振模色散光纤光栅, 整个系统在测试过程中很稳定, 没有观察到传输链路上偏振模色散对系统性能的影响。

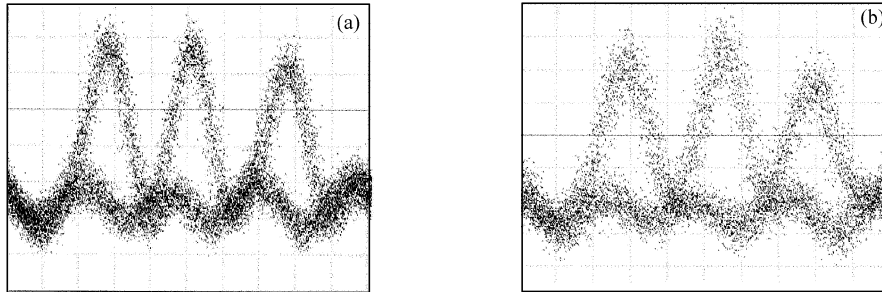


Fig. 5 Eye diagrams (a) back-to-back (b) after transmission over 122 km G. 652 fiber

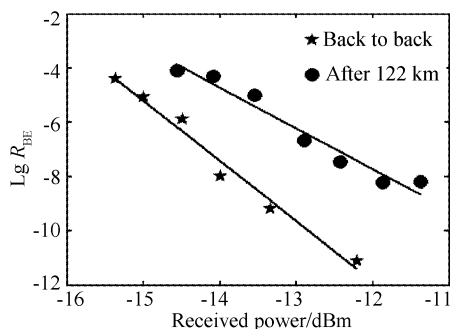


Fig. 6 Measured bit error rate (BER) curves of 40 Gb/s OTDM

**结论** 利用精密扫描掩模法写入宽阻带啁啾光纤光栅, 光栅的反射率为 65%, 为减少写入光纤光栅的偏振模色散, 研制了新的低偏振模色散光纤光栅补偿写入法。采用补偿写入法前的平均微分群时延为  $9.1406 \text{ ps}$ ; 采用补偿写入法后的平均微分群时延为  $0.1521 \text{ ps}$ 。并利用两根低偏振模色散光纤光栅对 40 Gb/s 光时分复用系统在普通 G. 652 光纤传输 122 km 的色散进行了补偿实验, 功率代价为 1.5 dB。

**致谢** 本课题是由北京邮电大学、清华大学、北京交通大学共同研究的 863 计划通信技术主题重大课题“40 Gbit/s 光时分复用关键技术研究”(863-317-02-03-99)。北京交通大学光波所光栅组负责色散补偿部分。在测试时, 对各方给予的帮助和积极的配合表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Ning Tigang, Jian Shuisheng, Pei Li *et al.*.  $4 \times 10 \text{ Gb/s}$  412 km DWDM dispersion compensation using multiwavelength chirped fiber Bragg grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 839~841 (in Chinese)
- 2 Mousavi F M, Kikuchi K. Performance limit of long-distance WDM dispersion-managed transmission system using higher order dispersion compensation fibers. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1999, **11**(5): 608~610
- 3 Pan Z, Song Y W, Yu C *et al.*. Tunable chromatic dispersion compensation in 40-Gb/s systems using nonlinearly chirped fiber Bragg gratings. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(12): 2239~2246
- 4 Gnauck A H, Wiesenfeld J M, Garrett L D *et al.*.  $16 \times 20$ -Gb/s, 400-km WDM transmission over NZDSF using a slope-compensating fiber-grating module. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2000, **12**(4): 437~439
- 5 Pande K, Pal B P. Design optimization of a dual-core dispersion-compensating fiber with a high figure of merit and a large effective area for dense wavelength-division multiplexed transmission through standard G. 655 fibers. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(19): 3785~3791
- 6 Lars Gruner-Nielsen, Bent Edvold. Status and future promises for dispersion compensating fibres. ECOC '2002 paper 6.1.1 2002. 389~392
- 7 Kato T, Koyano Y, Nishimura M. Temperature dependence of chromatic dispersion in various types of optical fiber. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(6): 1156~1158
- 8 Xie Zenghua, Ning Tigang, Pei Li *et al.*. Fabrication of 13 cm linearly chirped fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11): 1381~1383 (in Chinese)
- 9 Ning Tigang, Liu Yan, Tan Zhongwei *et al.*. Impact on dispersion compensated system using chirped fiber Bragg grating with delay ripple. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(9): 1064~1067 (in Chinese)
- 10 Ning Tigang, Fu Yongjun, Liu Yan *et al.*. Theoretic and experimental study on PMD of fiber Bragg grating. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(5): 424~426 (in Chinese)