

高速光通信系统中光纤光栅色散补偿研究*

裴 丽 宁提纲 李唐军 董小伟 简水生

(北京交通大学光波技术研究所,北京 100044)

(2004 年 8 月 4 日收到 2004 年 11 月 21 日收到修改稿)

通过对光栅制作过程的优化设计,解决了光纤光栅温度稳定性、纹波系数、带宽、偏振模色散补偿等关键技术,所制作光纤光栅已经达到温度系数小于 $0.0005 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,带宽大于 1.4 nm ,纹波系数小于 50 ps ,色散量超过 $-1000 \text{ ps}/\text{nm}$ 的先进水平.采用琼斯矩阵本征值法较精确地测量了光栅的偏振模色散,并对其进行了补偿,光纤光栅色散补偿器的偏振模色散由补偿前的 9.1406 ps 改善为补偿后的 0.1521 ps .在此基础上,成功地建立了一个稳定可靠、速率为 40 Gb/s ,传输链路为 122 km G652 光纤并采用 2 个宽带啁啾光纤光栅作为色散补偿器件的光时分复用实验系统,传输部分的功率代价仅为 1.4 dB .

关键词:高速光通信系统,普通单模光纤,光纤光栅,色散补偿

PACC:4282D,4281,4230Q

1. 引 言

随着光器件和系统技术的不断发展以及人们对带宽技术无止境的追求,光网络面临着不断的挑战.光纤将承载更多传输信道、更高光功率,传输的速率更高、距离也更远.随着传输速率的提高,光脉冲越来越窄,以 40 Gb/s 的系统为例,光脉冲宽度仅为 $4\text{--}5 \text{ ps}$,普通单模光纤在 1550 nm 的高色散将对光脉冲产生严重的展宽和畸变并产生码间干扰,结果导致接收机误码率增大,严重阻碍了光纤高速系统的发展^[1,2].显然,G652 光纤的色散问题已成为对现有光纤通信系统进行升级扩容的主要障碍,如何解决这一问题已成为瞩目的研究课题.

目前,人们已提出一些可能的技术方案来解决这一问题,包括色散补偿光纤(DCF)、激光预啁啾、中点光谱反转、色散管理传输和啁啾光纤光栅(FBG)等.在已提出的这些技术中,一种常用的方案是采用 DCF 色散管理来解决这一问题,DCF 的应用简便,但其价格昂贵、损耗较大,利用其他色散补偿时,往往还需增加掺铒光纤放大器来补偿插入损耗.此外,DCF 的纤芯半径很小容易产生非线性,DCF 不能完全消除高阶色散,并且偏振模色散(PMD)通常较大^[3].这些缺陷限制了 DCF 在未来高速、大容量

光通信系统中的推广应用.

另一种发展比较成熟的技术是利用 FBG 色散补偿,这是应用前景最好的一种方案.因为 FBG 与现有的光纤系统兼容性好、具有较低的传输损耗和插入损耗、色散补偿量大、能够实现光纤色散和色散斜率的同时补偿,且价格低廉、易于大批量生产.可以说 FBG 技术是光纤通信领域继光纤放大器之后的又一个里程碑,由此产生的全光纤光子线路及其集成将对光纤通信的发展产生重大的推动作用^[4-11].

本文介绍在 40 Gb/s 的光时分复用(OTDM)系统中,通过解决 FBG 的温度稳定性、带宽、纹波系数以及 PMD 的补偿等关键问题,采用两个宽带啁啾 FBG,成功补偿了 122 km G652 光纤的色散.传输部分的功率代价仅为 1.4 dB .

2. 原 理

光纤中传播光波的长、短波长分别在 FBG 的起始端和远端反射,即光波经过 FBG 后起到色散均衡的作用,从而实现色散补偿.可用耦合模方程建立线性啁啾 FBG 的理论模型^[2].

首先,线性啁啾 FBG 的周期沿轴向线性变化,其折射率结构可由下式描述:

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

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2004AA31G200)、国家自然科学基金(批准号 60477017)、北京市自然科学基金(批准号 4052023)和霍英东教育基金(批准号 91062)资助的课题.

式中 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 FBG 的空间频率, Λ_0 为 FBG 中点处的周期, 相位函数 $\Phi(z)$ 是轴向的缓变函数.

对于(1)式所描述的波导结构, 通常采用耦合模方程进行计算, 由 Maxwell 方程出发, 可得

$$\frac{dA^+}{dz} = K(z) \exp\left[-j \int_0^z B(z') dz'\right] A^-, \quad (2)$$

$$\frac{dA^-}{dz} = K(z) \exp\left[j \int_0^z B(z') dz'\right] A^+,$$

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 FBG 传播方向变化的耦合系数. 对于线性啁啾 FBG 有

$$\int_0^z B(z') = 2\delta\beta z - \Phi(z), \quad (3)$$

式中 $\delta\beta$ 为传播常数的失谐量. FBG 长度为 L , 取 FBG 耦合区为 $-L/2 \leq z \leq L/2$, 则边界条件为

$$\begin{aligned} A^+(-L/2) &= 1, \\ A^-(L/2) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

引入相位共轭变换

$$\begin{aligned} A^+ &= T(z) \exp(-j\delta z), \\ A^- &= R(z) \exp(j\delta z). \end{aligned} \quad (5)$$

定义 FBG 本地反射系数

$$\chi(z) = \frac{R(z)}{T(z)} \exp(j\Phi). \quad (6)$$

对(6)式求导整理后得 Riccati 微分方程

$$\gamma' = K(z) \chi(1 - \gamma^2) + [2\Delta\beta - \Phi'(z)]\gamma, \quad (7)$$

并且由(4)式可得边界条件为

$$\chi(L/2) = 0. \quad (8)$$

FBG 的反射谱响应 $R = \chi(-L/2) \times \gamma^*(-L/2)$. 因此由(7)和(8)式就能进一步得出线性啁啾 FBG 的反射谱特性和色散、时延特性. 这里 γ^* 代表函数 γ 的共轭.

图 1 为 FBG 对应不同啁啾的反射谱和时延特性. 实验中所用 FBG 长度为 $L = 4$ cm, 折射率调制为 1×10^{-4} . 由图 1 可见, 反射带宽是 FBG 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. 增加 FBG 长度, 反射率增大, 同时对增大其色散很有利. FBG 长度一定, 啁啾系数增大, 则带宽增大, 其反射率和平均色散均变小.

图 2 为 FBG 对应不同切趾函数的反射谱和时延特性. 实验中 FBG 的中心波长为 $\lambda_B = 1550$ nm, 长度 $L = 14$ cm, $\delta n_{eff} = 10^{-4}$, 啁啾量 $C = 5 \times 10^{-4}$. 由图 2 可见, 由于 FBG 两端的法布里-珀罗效应, 导致时

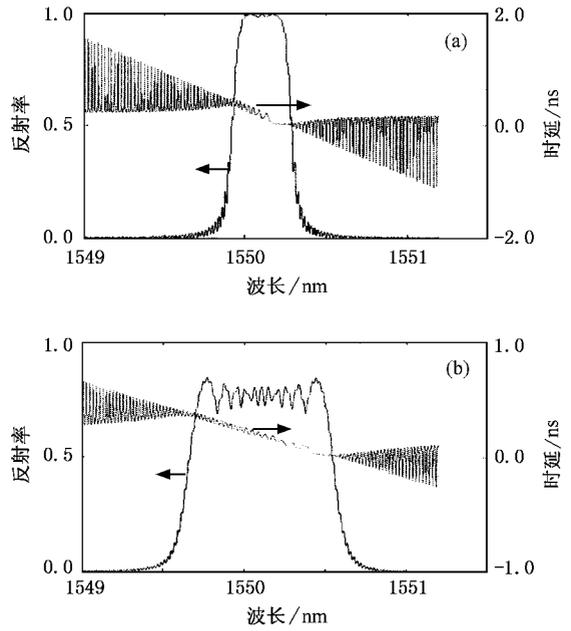


图 1 不同啁啾光纤光栅的反射谱和时延特性(未切趾) (a)啁啾量为 1×10^{-4} (b)啁啾量为 1×10^{-3}

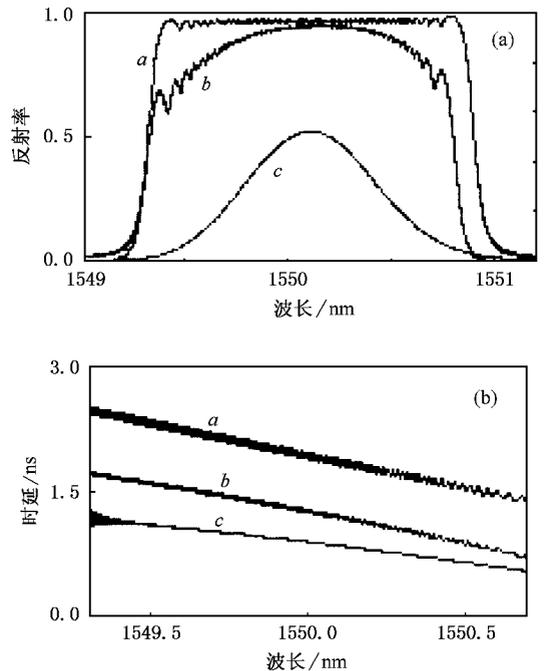


图 2 光纤光栅的反射谱(a)和时延(b)曲线. 曲线 a 为未切趾, 曲线 b 为升余弦切趾, 曲线 c 为高斯切趾

延曲线波动. 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. 采用折射率切趾的方法可有效抑制反射谱的边峰以及时延波动, 但 FBG 的带宽和补偿量减小, 反射率下降. 切趾程

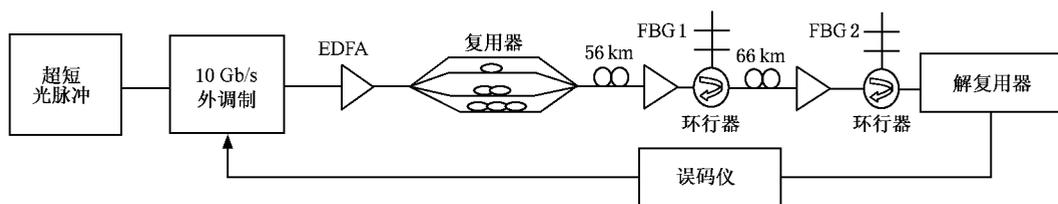


图3 40 Gb/s OTDM 实验系统示意图

度越大,这几个参量的变化越大.

可见,要获得优质的FBG色散补偿器必须保证FBG具有最佳组合的色散、带宽和反射率,并且时延波动尽可能小.

3. 实 验

3.1. 实验系统

系统所用传输光纤为G652光纤,采用FBG色散补偿,实验系统示意图见图3^[5,6].

经优化设计增益开关DFB激光器的工作状态、DCF压缩长度、梳状色散光纤压缩长度及压缩功率,可获得脉冲宽度约为5 ps、时间抖动约为1.3 ps的超短光脉冲,脉冲中心波长为1545.8 nm,谱宽在1 nm左右.在该40 Gb/s(4×10 Gb/s)的OTDM系统中,支路信号的速率为10 Gb/s,因此需要采用调制速率能够达到10 Gb/s的高速调制器.根据系统要求,采用光纤分路、合路及光纤精确时延方式实现 4×10 Gb/s时分复用.10 Gb/s原始信号脉冲和 4×10 Gb/s时分复用后的信号波形见图4.

脉冲宽度约为5 ps的超短光脉冲经LiNbO₃调制器调制产生10 Gb/s归零伪随机码(码序列为 $2^{23}-1$)信号.调制后的光信号经EDFA放大后注入光时分复用器,复用成40 Gb/s的信号,复用后的40 Gb/s信号首先经过一段长为56 km的G652光纤传输并用一个宽带啁啾FBG进行色散补偿,然后再经过另一段长为66 km的G652光纤传输并用啁啾FBG色散补偿.光纤的平均色散为17 ps/(nm·km),损耗为0.189 dB/km.

传输并补偿后的40 Gb/s信号经一个3 dB耦合器分成两路光信号,其中一路信号进入时钟提取单元提取10 GHz电时钟,另一路信号进入解复用器,解复用后的10 Gb/s信号进入误码仪的光接收机进行误码测量.

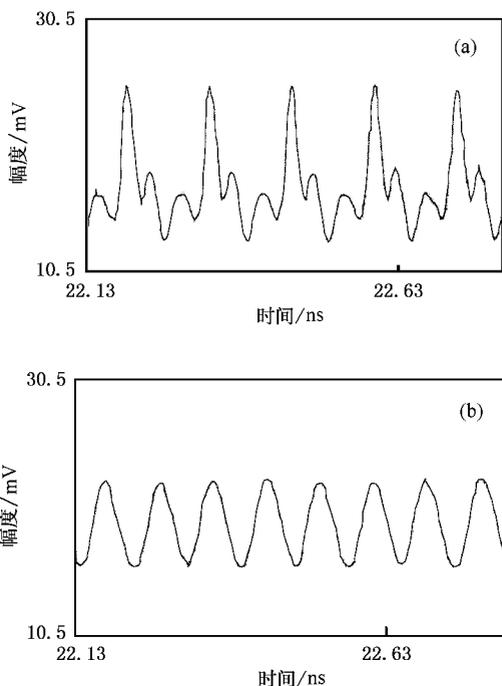


图4 OTDM前后的信号波形图 (a)OTDM前 (b)OTDM后

3.2. 关键技术

在利用FBG的色散补偿传输技术中,解决了FBG的温度稳定性、带宽和PMD补偿等关键技术问题^[7,8].

3.2.1. 光纤光栅的温度特性

FBG中心反射波长的漂移量一般是 0.014 nm/°C.为获得高的温度稳定性,国外虽有专利报道用施加应力封装的方法进行温度补偿,但FBG由于静态疲劳易于损坏.美国康宁公司为解决这个问题,特别研究一种负温度系数的晶体,但也仅仅得到了温度系数变化 0.002 nm/°C的温度稳定性.国外目前大多采用易碎的陶瓷材料对FBG进行封装.我们采用了与国外截然不同的技术,经过4年多的努力,研究出了一种强度很高的高分子特殊材料,并研制成功配套的加工工艺设备.所制成的FBG封装管

材具有较大的负温度系数,保证了 FBG 中心波长的稳定性. 封装后的 FBG 温度系数已经可以小于 $0.0005 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 达到实用化的程度,这就为 FBG 补偿 40 Gb/s 光脉冲传输系统的色散奠定了技术基础. 图 5 为一个 FBG 封装后的温度系数测试图.

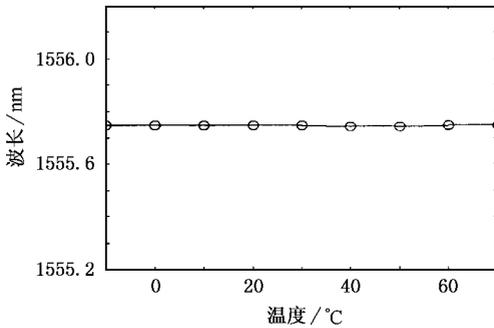


图 5 光纤光栅波长随温度的变化关系

3.2.2. 光纤光栅的带宽

40 Gb/s 光脉冲的谱线宽度在 1.0 nm 左右,而制作 FBG 的掩模板最长仅为 140 mm ,在此长度限制下,FBG 的带宽与色散补偿量互相制约. 如果要在 40 Gb/s 传输光脉冲的 1.0 nm 谱线宽度范围内,FBG 通带平坦,掩模板的设计带宽要达到 1.0 nm 以上,而在 1.0 nm 带宽做到很大的色散补偿量非常困难. 我们通过定制特殊设计的掩模板,所制作 FBG 已达到带宽大于 1.4 nm ,纹波系数小于 50 ps ,色散量超过 $-1000 \text{ ps}/\text{nm}$ 的先进水平. 制作过程中,我们还成功解决了 FBG 与系统光源中心波长的对准、色散量的微调、纹波系数的优化等一系列 FBG 色散补偿的关键技术问题. 实验系统中所采用的两个 FBG 的中心波长分别为 1545.816 nm 和 1545.838 nm ,其反射谱和时延曲线见图 6.

3.2.3. 光纤光栅的 PMD^[9,40]

由于 40 Gb/s OTDM 系统中光源脉冲宽度仅为 $4\text{--}5 \text{ ps}$,所以 FBG 的 PMD 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 FBG 器件本身的 PMD,传输皮秒量级的光脉冲将很困难. 国内目前还未见对色散补偿 FBG 的 PMD 测量和补偿的报道. 我们采用琼斯矩阵本征值法较精确地测量了其 PMD,并对 FBG 进行了 PMD 补偿的研究,取得了重大进展. 图 7(a)为 PMD 补偿前 FBG 色散补偿器的群时延差 (DGD)大小,图 7(b)为 PMD 补偿后 FBG 色散补偿器的 DGD 大小. 由图 7 可见,补偿的效果十分显著. 补偿前的平均 DGD 为

9.1406 ps ,补偿后的平均 DGD 仅为 0.1521 ps .

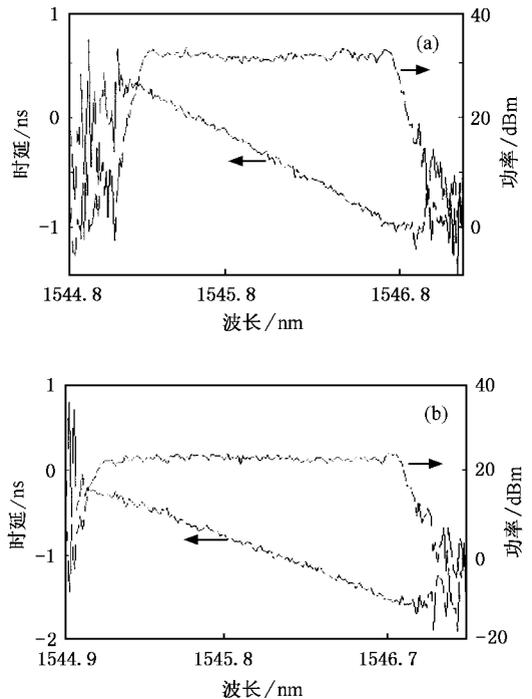


图 6 色散补偿光纤光栅的反射谱和时延曲线 (a)FBG1, (b)FBG2

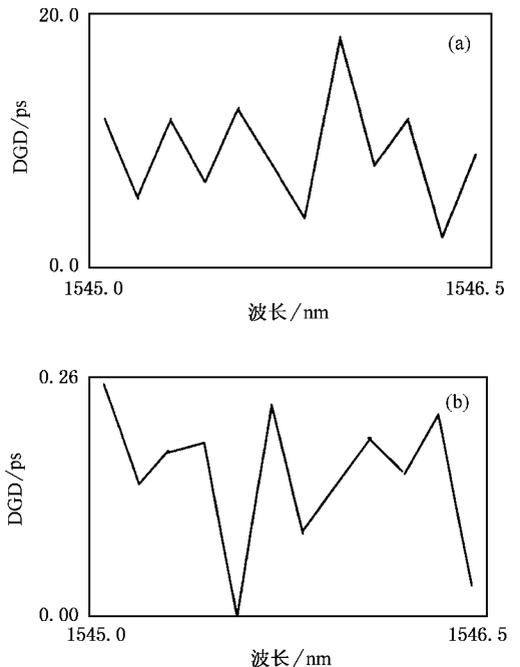


图 7 补偿前后光纤光栅的 PMD (a)补偿前,(b)补偿后

3.3. 实验结果

图 8 为 40 Gb/s 调制信号的眼图. 40 Gb/s 信号

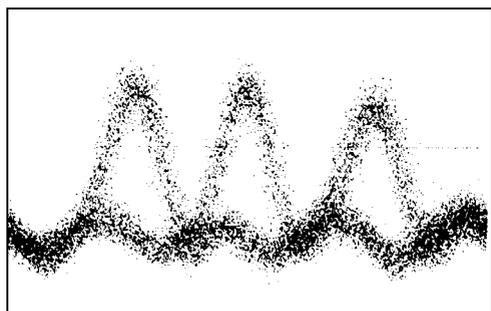


图 8 40 Gb/s 调制信号眼图

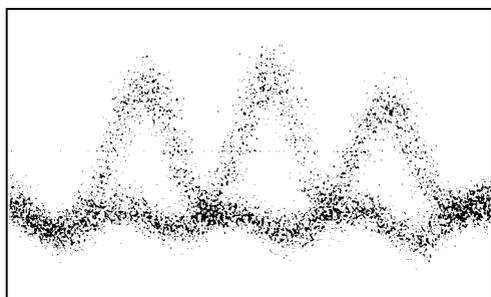


图 9 40 Gb/s 信号 122 km 传输后的眼图

经 122 km G652 光纤传输并补偿后的眼图见图 9. 由图 8 和图 9 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 FBG 同时也起到滤波器的作用,抑制了传输链路上 EDFA 自发辐射噪声(ASE)的累积.未对 FBG 色散补偿器的 PMD 补偿前,测得该传输系统在误码率 $B_{ER} = 10^{-10}$ 时,传输部分无误码传输的功率代价大于 3 dB.对 FBG 色散补偿器的 PMD 补偿后,在其他条件相同的情况下,该传输系统的误码测试结果如图 10 所示.由图 10 可见,当 $B_{ER} = 10^{-10}$ 时,传输部分的功率代价仅为 1.4 dB.

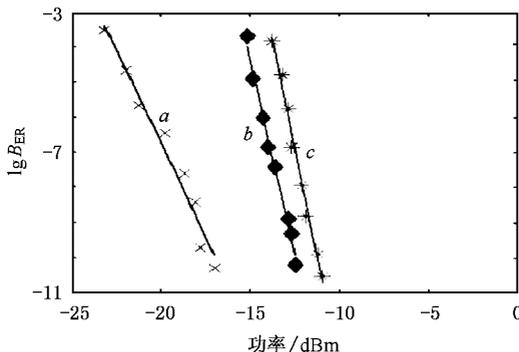


图 10 误码率测试曲线 曲线 a 为 10 Gb/s 背靠背,曲线 b 为 40 Gb/s 背靠背,曲线 c 为 122 km G652 光纤传输后

由于采用了偏振无关的解复用器件以及对 FBG 的 PMD 进行了补偿,整个系统在测试过程中很稳定,没有观察到传输链路上 PMD 对系统性能的影响.

4. 结 论

本文成功地建立了一个稳定可靠、速率为 40 Gb/s,传输链路为 122 km G652 光纤并采用宽带啁啾 FBG 作为色散补偿器件的 OTDM 实验系统,说明了 FBG 色散补偿的可行性.由于国际互联网的迅速发展和各种通信容量的剧增,全世界都在加快高速光纤通信系统的建设,但目前全世界已经铺设的光纤 87% 以上都是 G652 光纤.所以,如何解决 G652 光纤的色散补偿是一个非常重要的问题.利用 FBG 补偿高速率传输 G652 光纤的色散是国际上研究的热点,它不仅可以使全国已敷设的 100 多万公里光缆的升级扩容成为可能,而且对于全世界光通信系统的发展,都具有重要的意义.

[1] Capmang J, Pastor D, Sales S *et al* 2000 *26th European Conference on Optical Communication* (Berlin : VDE VERLAG Offenbach) p59
 [2] Pei L, Jian S S, Yan F P *et al* 2003 *Opt. Commun.* **222** 169
 [3] Galtarossa A, Someda C G 1994 *Fiber Integ. Opt.* **13** 215
 [4] Shu X W, Huang D X, Deng G H *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文、黄德修、邓桂华等 2000 物理学报 **49** 1731]
 [5] Gnauck A H, Wiesenfeld J M, Garrett L D *et al* 1999 *IEEE Phot. Tech. Lett.* **11** 1503
 [6] Ramachandran S, Mikkelsen B, Cowsar L C *et al* 2000 *26th European Conference on Optical Communication* (Berlin : VDE

VERLAG Offenbach)
 [7] Kazunori M, Ryuichi S, Takeshi Y *et al* 2000 *26th European Conference on Optical Communication* (Berlin : VDE VERLAG Offenbach) p95
 [8] Ning T G, Pei L, Tan Z W *et al* 2003 *SPIE* **5279** 135
 [9] Cameron J, Chen L, Bao X Y 2000 *IEEE Phot. Tech. Lett.* **12** 47
 [10] Dong X Y, Ngo N Q, Shum P *et al* 2004 *IEEE Phot. Tech. Lett.* **16** 846
 [11] Wang M G, Wei H, Jian S S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 609 (in Chinese) [王目光、魏 淮、简水生 2003 物理学报 **52** 609]

Studies on the dispersion compensation of fiber Bragg grating in high-speed optical communication system *

Pei Li Ning Ti-Gang Li Tang-Jun Dong Xiao-Wei Jian Shui-Sheng
(*Institute of Light-wave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China*)
(Received 4 August 2004 ; revised manuscript received 21 November 2004)

Abstract

By optimizing the fabrication process of the chirped optical fiber Bragg grating (FBG) , some key problems of FBG are solved , such as the temperature stability , time delay ripple coefficient , bandwidth , compensation of polarization mode dispersion (PMD) , and so on. The FBG we fabricated can attain the temperature coefficient less than $0.0005 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, its bandwidth is bigger than 1.4 nm , time delay ripple is less than 50 ps , and the dispersion is higher than -1000 ps/nm . The average PMD of the FBG dispersion compensator is measured by the Jones matrix eigenvalue method , and is compensated. Its PMD is improved from 9.1406 ps to 0.1521 ps . With dispersion compensation by two wide-band FBGs we fabricated , we have implemented a 40 Gb/s 122 km conventional single-mode optical fiber (G652) systems , with a power penalty being only 1.4 dB .

Keywords : high speed optical fiber transmission system , single-mode optical fiber , optical fiber grating , dispersion compensation

PACC : 4282D , 4281 , 4230Q

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2004AA31G200) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60477017) , the Natural Science Foundation of Beijing , China (Grant No. 4052023) and the Fok Ying-Tong Educational Foundation (Grant No. 91062).