

文章编号: 1001-3806(2004)03-0303-03

## 高阶模补偿单模光纤色散技术研究

吴维丽, 邱 琪

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网络技术实验室, 成都 610054)

**摘要:** 在分析计算高阶模色散特性的基础上, 论述了利用高阶模大的负色散系数和色散斜率实现了对单模光纤补偿的可行性, 着重研究了 LP<sub>02</sub>模作为高阶模色散补偿的性能, 结果表明, 高阶模色散补偿技术是一种高品质因素的补偿方案。最后设计了基于 LP<sub>02</sub>模的高阶模色散补偿方案, 并详细描述了模式转换器的工作原理。

**关键词:** 色散; 色散补偿; 高阶模; 品质因素

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

### Research of the technology of compensating single mode fiber dispersion by high order mode

WU Wei-li, QIU Qi

(Laboratory of Optical Fiber Transmission and Communication Network, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** On the basis of high order mode dispersion analysis, the feasibility of taking use of the high order mode, which has negative chromatic dispersion, to realize compensation of single mode fiber has been discussed. This paper focuses on study the performance of using LP<sub>02</sub> mode as the dispersion compensation of high order mode and the results indicate that high order mode dispersion compensation is the high figure of merit scheme. Finally the compensation project of higher order mode based on LP<sub>02</sub> mode is designed, moreover the principle of mode transformer is described in detail.

**Key words:** dispersion; dispersion compensation; higher order mode; figure of merit

### 引 言

现今的光纤通信正在朝长距离、高速率系统演进。限制光纤传输的主要因素是色散和损耗, 掺铒光纤放大器的出现基本上解决了损耗问题, 因此, 色散就成为限制光纤通信系统的主要因素。色散导致了脉冲的展宽, 使传输和容量距离受限。传输速率在 2.5Gbit/s 时, 系统中容许存在的色散值(用  $DL$  表示,  $L$  为传输距离) 范围为:  $12000\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \sim 16000\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1}$ ; 当传输速率增加到 40Gbit/s 时, 系统中容许存在的色散值范围仅为:  $60\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \sim 100\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1}$ , 严重限制了传输距离。目前, 全世界大约有  $5000 \times 10^4 \text{km}$  的光纤, 其中大多数是常规单模光纤(G. 652), 在工作窗口 1550nm 处, 常规单模光纤有  $+17\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$  的色散。

**作者简介:** 吴维丽(1979), 女, 硕士研究生, 现主要从事光纤色散补偿方面的研究。

E-mail: wtwl@sohu.com

收稿日期: 2003-07-18; 收到修改稿日期: 2003-09-23

针对色散补偿, 人们提出了多种色散补偿技术, 其中最为常用的技术就是色散补偿光纤(DCF)技术, 其补偿原理就是利用单模光纤中的正色散值与补偿光纤中的负色散值相互抵消, 减少色散对系统的影响<sup>[1]</sup>。DCF 技术有两种, 一种就是基于基模补偿。一般来说, 基于基模补偿的 DCF 可达到的色散值在  $-70\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1} \sim -90\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ , 好的可以达到  $-100\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 。可见, 基于基模补偿的 DCF 的色散值与在工作窗口 1550nm 处的单模光纤的色散值相差不多, 并且它的插入损耗比较大, 必须用功率放大器和前置放大器, 提高了系统的功率代价。另一种就是高阶模补偿。从文中分析可以得出, 高阶模具有很大的负色散系数, 因此, 就可以用较短的有很大负色散光纤补偿较长的光纤通信线路。本文中主要对高阶模的色散特性问题及补偿方案进行了分析和讨论。

### 1 高阶模色散特性

在普通单模光纤中, 光纤色散是由波导色散和

材料色散组成的,其表达式为:

$$D = D_m + D_w = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} - \frac{n\Delta v}{c\lambda} \frac{d^2(\nu b)}{d\nu^2} \quad (1)$$

式中,  $D_m$  是材料色散系数,  $D_w$  是波导色散系数。常规单模光纤中  $LP_{01}$  模在工作窗口 1550nm 处, 材料色散占主导地位且为正值。在弱导理论下, 高阶模在截止附近波导色散比材料色散要大的多, 因此, 通常只考虑波导色散<sup>[2~4]</sup>, (1) 式可以表示为:

$$D \approx -\frac{n\Delta v}{c\lambda} \frac{d^2(\nu b)}{d\nu^2} \quad (2)$$

式中,  $\nu = 2\pi a n \sqrt{2\Delta} / \lambda$  称为归一化频率,  $\Delta$  称为相对折射率差,  $b$  为归一化传播常数。通过上式可以得到色散系数  $D$  与波长  $\lambda$  的关系, 图 1 中给出了几种模式与波长的关系。

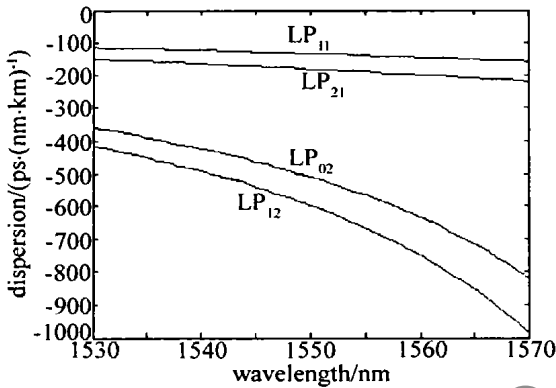


Fig. 1 Plot of dispersion coefficient as a function of wavelength

从图 1 可以看出, 随着  $\lambda$  的增大, 色散系数  $D$  随着增大, 同时模式的模阶数越高, 色散系数随波长  $\lambda$  变化就越明显。波导色散值与各参数取值有关, 图 1 中各模式的截止波长都在 1600nm 处,  $\Delta = 0.65\%$ 、纤芯折射率  $n = 1.5106$ ; 半径  $a$  对于不同模式在相同截止波长处取不同值。由上式参数计算出  $LP_{02}$  模在波长 1570nm 处的波导色散值为  $-819 \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 。从图 1 中还可以看出,  $LP_{12}$  模的波导色散值要比  $LP_{02}$  模的波导色散值要大, 这是因为模式的模阶数越高群时延就越大, 而色散就是由群时延引起的, 所以, 色散值也就越大, 因此模阶数越高的模式色散系数就越大。但是在选取某一模式用来色散补偿时, 并不是色散值越大越好, 还要同时考虑损耗、模式转换等多种因素, 而且模阶数越高, 存在的低阶模就越多, 在进行模式转换时能量耦合率就越低。此外, 高阶模还可以对单模光纤实现色散斜率的补偿。

DCF 对传输光纤色散的补偿能力可用品质因素 (FOM) 来描述:

$$X_{\text{FOM}} = D/\alpha \quad (3)$$

式中,  $D_\lambda$  为光纤在某一波长处的色散系数,  $\alpha$  是单

位损耗。基于基模补偿的 FOM 的值最好的可以达到  $200 \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{dB})^{-1}$  以上, 但用于商用化的只有  $150 \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{dB})^{-1}$ 。不论是基模补偿还是高阶模补偿, 其插入损耗都差不多约为  $0.9 \text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ , 由图 1 可计算出用高阶模补偿的 FOM 的值比基模 FOM 的值大得多(详见表 1, 其中,  $\alpha$  为光纤纤芯半径;  $\alpha$  称为插入损耗)。不论从上述图中分析出的色散系数还是品质因素, 高阶模都比基模具有优势, 故用高阶模色散补偿单模光纤色散是一种更有效的方法。

Table 1 Fiber characteristics and FOM

	$\alpha$ (dB· km <sup>-1</sup> )	$D_\lambda$ (ps·(nm· km) <sup>-1</sup> )	$X_{\text{FOM}}$ (ps·(nm· dB) <sup>-1</sup> )	$\Delta$	$N$ nm	$a$ $\mu\text{m}$
$LP_{02}$	0.9	-819	910	0.0065	1570	5.7
$LP_{12}$	0.9	-985	1094	0.0065	1570	8.2

## 2 $LP_{02}$ 模用于色散补偿的研究

对于色散补偿光纤来说, 总的要求就是负色散系数越大越好, 品质因素越高越好, 插入损耗越小越好。负色散系数越大, 需要插入 DCF 的长度就越短, 损耗也就越小。在此基础上, 通过理论分析, 人们提出了高阶模色散补偿光纤技术。在众多的高阶模模式中, 提出了  $LP_{02}$  模用于色散补偿, 主要原因是与其它高阶模相比其能量分布比较集中, 易实现模式之间的转换, 图 2 中给出了  $LP_{02}$  模和其它几种高

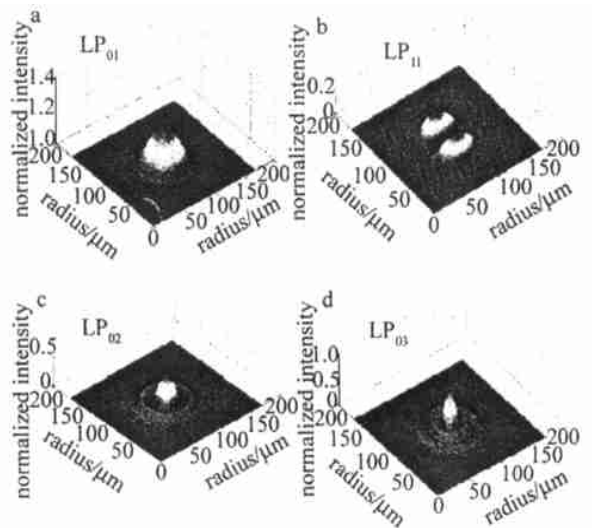


Fig. 2 Light intensity distribution of  $LP_{02}$  mode and others modes

阶模的能量分布, 图中横坐标表示光纤半径, 纵坐标表示归一化能量分布。从图中可以看出,  $LP_{11}$  存在两个峰值, 而其它高阶模的模式数越高, 存在的次波峰就较多, 这样, 在进行模式转换时, 实现模式之间的转换率就越低。

LP<sub>02</sub>模除了上述所说的能量分布集中的优势外,还具有很多优点。与基模 DCF 相比,LP<sub>02</sub>模色散补偿光纤具有以下几种优点<sup>[5]</sup>:(1)它能同时实现宽带色散和色散斜率补偿;(2)可以输入较大光功率,且有效面积较大,能减少光纤的非线性效应;(3)插入的 DCF 长度相对要短,减少了插入损耗,降低了系统的功率代价。与其它高阶模相比,LP<sub>02</sub>模具有的优点有:(1)存在的低阶模较少,在模式转换时,能实现很高的能量耦合且能量分布集中;(2)在系统补偿方案中最关键的就是模式转换器,但已有一些专利文献对 LP<sub>02</sub>模的模式转换器作出了报道<sup>[6,7]</sup>,它是采用光学原理实现了从基模转换到 LP<sub>02</sub>模并再转换回来。其它的高阶模虽然存在更大的负色散值,但是由于存在的低阶模较多,很难实现模式转换且转换效率很低。1994 年,POOLE 提出了双模(LP<sub>11</sub>模)光纤补偿技术,由于 LP<sub>11</sub>模能量分布存在两个峰值及其它因素,到目前为止,还没有一种有效的方法使光脉冲从基模传输转换到高阶模 LP<sub>11</sub>模并再转换回来<sup>[8]</sup>。

### 3 LP<sub>02</sub>模色散补偿方案

与基模色散补偿技术相比,高阶模色散补偿技术要复杂些。整个色散补偿系统包括色散补偿光纤和两个模式转换器(见图 3)。需要模式转换器是因为单模光纤中传输的基模与色散补偿光纤中传输的高阶模的模式不匹配。光信号从单模光纤输出经过第 1 个模式转换器转换成高阶模后,进入到色散补偿光纤中传输,通过设计 DCF 参数使光信号在色散补偿光纤中产生的色散系数与它在单模光纤(SMF)中产生的色散系数相反。光信号在 DCF 中传输一段距离后进入第 2 个模式转换器,经转换器转换后又转换成基模进入 SMF 中传输。这样,光信号在 DCF 中产生的色散值就会与 SMF 中产生的色散值相互抵消,从而达到了色散补偿的目的。在高阶模色散补偿方案中关键技术有两点:(1)模式转换器;(2)色散补偿光纤参数的设计。

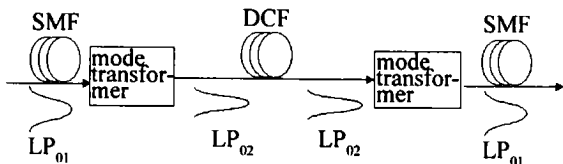


Fig. 3 High order mode dispersion management device

图 4 中画出的模式转换器可将 LP<sub>01</sub>模转换成 LP<sub>02</sub>模<sup>[6,7]</sup>。图中透镜 1 首先将单模光纤输出的光进行准直。位相元件 2 和 5 对透镜 1 输出的准直光

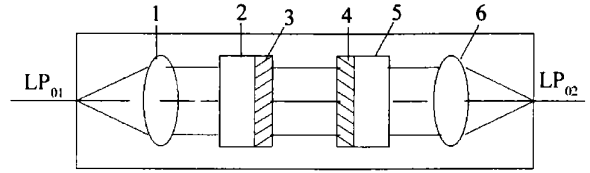


Fig. 4 Mode transformer device

在预先设定的一个或多个区域进行选择空间延迟,这样,就可以将 LP<sub>01</sub>模转换成 LP<sub>02</sub>模。需要指出的是,LP<sub>01</sub>模和 LP<sub>02</sub>模的空间模式虽然在光纤外部物理意义上不存在,但是存在着对应的场分布,位相元件 2 和 5 将 LP<sub>01</sub>模对应的场分布转换成 LP<sub>02</sub>模对应的场分布,因此,实现了 LP<sub>01</sub>模到 LP<sub>02</sub>模的转换。掩模 3 和 4 的作用是有选择的吸收透镜 1 输出准直光的空间模式,即滤掉由于空间耦合特别是因模式变换而带来的不需要的空间模式如 LP<sub>11</sub>, LP<sub>21</sub>等,使模式转换器尽量只输出 LP<sub>02</sub>模以避免各模式之间产生多路径干涉(MPI)带来的光信号质量降低。掩模材料的选择既可以是吸收材料,又可以是散射材料或者是两者的混合使用。最后,透镜 6 将转换后的光耦合进色散补偿光纤,这样,LP<sub>01</sub>模转换到 LP<sub>02</sub>模的整个转换过程就完成了。

同样,色散补偿光纤参数的设计也很重要,它决定了色散系数的大小。通过正确地选择光纤剖面折射率,可以使色散系数或色散斜率为正值或为负值,也可以为 0,利用这两个特性就能解决任何通信系统中色散问题。在图 3 的两个转换器之间可以放入两根 DCF,一根用于色散补偿,另一根用于色散斜率补偿,但一般来说,色散补偿光纤都设计成 W 型(双包层),因为这样不仅实现了单模光纤色散补偿,同时还能实现色散斜率补偿。

### 4 结论

在宽带光纤传输系统中,基模色散补偿光纤技术最为常用,且技术也相对成熟。然而,要想进一步提高色散值必须减小纤芯半径,增大相对折射率  $\Delta$ ,这样就会增大非线性效应,使输入光纤的光功率受到限制。高阶模 LP<sub>02</sub>模色散补偿技术不仅具有宽带补偿、低的非线性效应、大的输入功率等优点,还有低的插入损耗、高品质因素、模式间的转换也较易实现的优势。因此,利用高阶模 LP<sub>02</sub>补偿单模光纤色散是一种可行的、高效的色散补偿方案。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈永诗, 邹林森. 色散补偿光纤及其应用前景 [J]. 光通信研究, 1994, 69~70(Z1): 83~90.

(下转第 311 页)

中心波长  $\lambda_c$  的总漂移量为  $\Delta\lambda_c = 3.190\text{nm}$ 。

实验得到如下结果: (1) 图 4 中是升温过程和降温过程反射波长与温度的关系曲线, 两条曲线的重合性非常好, 说明光纤光栅波长漂移与温度的变化方向无关; (2) 升温过程每度反射波的中心波长平均漂移量  $\overline{\Delta\lambda_{e1}} = 0.0133\text{nm}/^\circ\text{C}$ , 降温过程每度反射波的中心波长平均漂移量  $\overline{\Delta\lambda_{e2}} = 0.0132\text{nm}/^\circ\text{C}$ , 两者差值  $\overline{\Delta\lambda_{e1}} - \overline{\Delta\lambda_{e2}} = 0.0001\text{nm}/^\circ\text{C}$ , 相对误差为 0.8%; (3) 测得光纤光栅温度灵敏度系数  $\eta$  在  $20^\circ\text{C} \sim 260^\circ\text{C}$  的平均值的值为  $\eta \approx 8.508 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , 与理论值吻合得比较好; (4) 实验中光谱仪每次扫描时间为  $2\text{s} \sim 4\text{s}$ , 反映了光纤光栅温度传感器的响应速度很高; (5) 不论是升温过程还是降温过程, 等间隔温度变化所对应的反射波长漂移量基本相同, 所以波长漂移与温度线性关系较好。

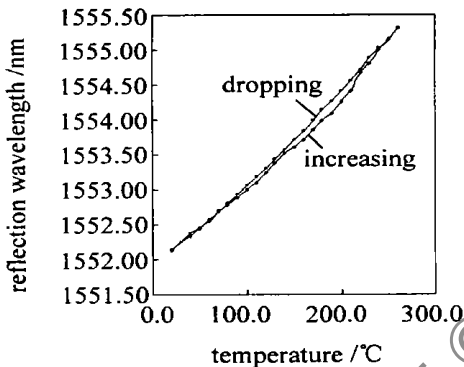


Fig. 4 Reflection wavelength shift versus temperature

## 4 结论

分析研究了温度对光纤光栅反射波长漂移量的影响, 结果表明: 光纤光栅反射波长漂移量与温度的变化方向无关, 且具有比较好的线性关系; 光纤光栅温度传感器具有很高的响应速度; 光纤光栅温度灵敏度系数的实验值与理论值吻合得比较好, 表明光纤光栅温度传感的理论模型具有良好的实验基础。

### 参考文献

[1] 鲍吉龙, 章献民, 陈抗生 *et al.* 光纤光栅传感器及其应用 [J].

激光技术, 2000, 24(3): 174~179.

- [2] 王启明, 魏光辉, 高以智. 光子学技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 广州: 暨南大学出版社, 2002. 91~107.
- [3] GUAN B O, TAM H Y, TAO X M *et al.* Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(6): 675~677.
- [4] AFERREIRA L, SANTOS J L, FARAH F *et al.* Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors [J]. Opt Engng, 2000, 39(8): 2226~2233.
- [5] MOREY W W. Fiber optic Bragg grating sensors [J]. Proc SPIE, 1989, 1169: 98~107.
- [6] RAO Y J. Ir fiber Bragg grating sensors [J]. Meas Sci & Technol, 1997, 8(4): 355~375.
- [7] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J *et al.* Fiber grating sensors [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1442~1463.
- [8] 贾宏志, 李育林, 忽满利. 光纤光栅制作技术 [J]. 激光技术, 2001, 25(1): 23~26.
- [9] 谢芳, 张书练, 李岩 *et al.* 光纤光栅反射波长移动研究 [J]. 激光技术, 2002, 26(2): 84~85.
- [10] 夏光琼, 吴正茂, 陈建国. 光纤光栅的长度对其反射率的影响 [J]. 激光技术, 2002, 26(2): 106~107.
- [11] 张永胜, 刘爱萍, 郁可. 布喇格光纤反射特性及制作的理论研究 [J]. 激光技术, 1998, 22(6): 367~370.
- [12] 张书练, 李相培, 谢芳 *et al.* 用于测量液面高度的光纤光栅传感器 [J]. 激光技术, 2001, 25(1): 7~10.
- [13] RAO Y J. Recent progress in application of ir fiber Bragg grating sensors [J]. Opt & Las, 1999, 31: 297~324.
- [14] QIAO X G, LI Y L. Hybrid FBG/LPFG sensor for simultaneous measuring strain and temperature of oil/gas bottomline [J]. J of Optic electronics Laser, 1999, 10(1): 42~45.
- [15] SPRIRIN V V, SHLYAGIN M G, MIRDONOV S B *et al.* Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon lake detection [J]. Opt Lasers Engng, 2000, 32: 497~503.
- [16] 万里冰, 武湛君, 张博明 *et al.* 应用光纤 Bragg 光栅测量混凝土结构内部应变 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(7): 722~725.
- [17] 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420~430.
- [18] DU W Ch, TAM H Y, DEMOKAN M S *et al.* A simple method to enhance temperature sensitivity of fiber grating [J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(1): 75~77.
- [19] REID M B, ZCAN M. Temperature dependence of fiber optic Bragg gratings at low temperature [J]. Opt Engng, 1998, 37(1): 237~240.
- [20] 廖延彪. 光纤光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 200~204.

(上接第 305 页)

- [2] GLOGE D. Weakly guiding fiber [J]. Appl Opt, 1971, 10: 2252~2258.
- [3] GLOGE D. Dispersion in weakly guiding fibers [J]. Appl Opt, 1971, 10: 2442~2445.
- [4] POOLE C D, WIESSNFELD J M, DIGIOVANNI D J *et al.* Optical fiber based dispersion compensation using higher order modes near cutoff [J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(10): 1746.
- [5] LI M J. Recent progress in fiber dispersion compensators [J]. Opt Commun, 2001, 4: 486~489.

- [6] DANZIGER Y, le ZION R, BRAUDE O *et al.* Transverse mode transformer [P]. U S Patent: US6377726 B1, 2002 04 23.
- [7] DANZIGER Y, le ZION R. Optical communication system with chromatic dispersion compensation [P]. U S Patent: US640952 B1, 2002 06 11.
- [8] DANZIGER Y, ASKEGARD D. High order mode fiber: an innovative approach to chromatic dispersion management that enables optical networking in long haul high speed transmission systems [J]. Optical Networks, 2001, 2(1/2): 40~50.