

一种新型的基于 LP_{01} 模的双模 色散补偿光纤*

龚岩栋 关雅莉 江中澳 李唐军 简水生
(北方交通大学光波技术研究所 北京 100044)

提要 通过计算机模拟发现在可传输双模的三包层色散补偿光纤中如果抑制 LP_{02} 模, 而仅传输 LP_{01} 模时能在一个较窄的带宽内产生大于数千 $ps/nm \cdot km$ 的负色散, 并且具有较大的模场直径、较小的弯曲损耗和偏振模色散, 另外还具有较小的温度波长漂移以及同其它色散补偿光纤一样大小的损耗, 是一种非常有前途的新型色散补偿光纤。

关键词 光纤, 光纤通信, 色散, 色散补偿

由于掺铒光纤放大器(EDFA)的出现, 目前光纤通信的使用波长已移到了具有低损耗的 $1.55 \mu m$ 窗口处, 但全世界已经铺设的上亿公里的普通单模光纤(SMF)其零色散点在 $1.31 \mu m$ 处, 在 $1.55 \mu m$ 窗口处色散较大, 约 $17 ps/nm \cdot km$, 这就严重影响了在 $1.55 \mu m$ 窗口使用 SMF 开通大于 $10 Gbit/s$ 的高速大容量光纤通信系统。扩大通信容量, 最好的解决方法之一就是应用色散补偿光纤 DCF(Dispersion Compensating Fiber), OFC'96 和 ECOC'96 上报道的 $1.1 Tbit/s$ 和 $2.6 Tbit/s$ 的波分复用器(WDM)系统就是采用了色散补偿光纤方案^[1], 色散补偿光纤已是目前国际上的研究热点。

目前的色散补偿光纤主要有双模色散补偿光纤和单模色散补偿光纤, 双模色散补偿光纤是利用 LP_{11} 模在接近截止时有很大的负色散^[2]; 而单模色散补偿光纤则是利用波导结构尽量扩大基模的波导色散达到的, 从结构上分有单阶跃型^[3,4]、W 型^[5]、三包层型^[6-10]和多包层型^[11], 其中三包层型基模型色散补偿光纤是目前性能最优的色散补偿光纤, 它的品质因素 FOM 值可达 $418 ps/nm \cdot dB$, 色散达到 $-300 ps/nm \cdot km$ ^[10]。即便如此, 要补偿长途干线时也需数公里到数十公里的色散补偿光纤, 使用起来很不方便。因此我们提出了一种新型的可传双模的三包层色散补偿光纤, 在抑制掉 LP_{02} 模后, 其基模能在一个较窄的带宽内产生大于数千 $ps/nm \cdot km$ 的负色散, 类似于一宽带的、啁啾的 Bragg 色散补偿光纤光栅。

1 新型光纤设计原理

可传输双模的三包层色散补偿光纤称为双模光纤, 是因为该光纤结构本身能支持传输两

* 国家 863 项目和国家自然科学基金项目共同资助。

个模式,但新型光纤结构使 LP₀₂模截止波长大于 LP₁₁模截止波长,因此两个模式为 LP₀₁模和 LP₀₂模。但是如果抑制 LP₁₁模而仅传输 LP₀₁模时(如光纤两端拉细),能在一个较窄的带宽内产生大于数千 ps/nm·km 的负色散,比同等折射率高度的其它类型色散补偿光纤的负色散值大一个数量级以上,在集成光波导结构中,文献[12]从耦合模理论发现了这一点。我们提出的三包层双模色散补偿光纤的折射率剖面类似于三包层基模色散补偿光纤的剖面,只是下陷宽度略宽、第二包层(肩膀层)高度略高一些,如图1所示。其中定义 a, b, c 分别为纤芯和各包层的半径,定义 $\Delta_i = (n_i^2 - n_3^2)/2n_3^2 (i = 0, 1, 2)$, $n_i (i = 0, 1, 2, 3)$ 为纤芯和各包层的折射率,这样通过优化各参数便可以调节色散下陷区的位置和大小,从而获得在 1.55 μm 波长处的大负色散值和负色散斜率(由于在 1.55 μm 处 SMF 具有正的色散斜率,约为 0.065 ps/nm²·km)。

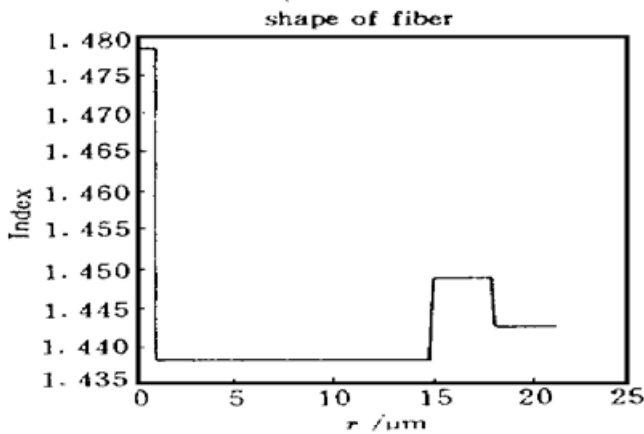


图1 新型色散补偿光纤的折射率剖面
Fig. 1 Index profile of the novel DCF

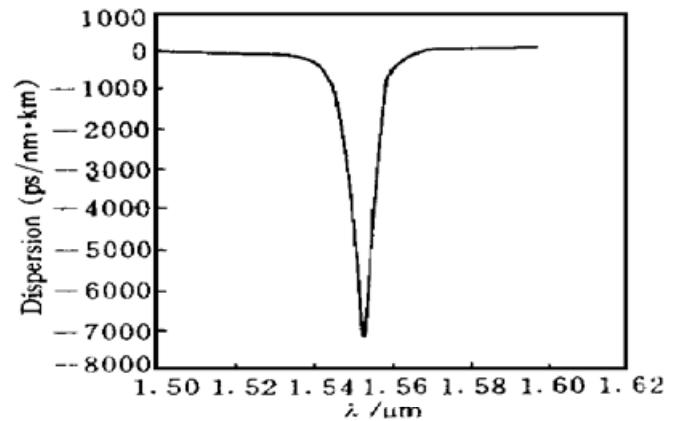


图2 色散曲线(光纤参数见表1)
Fig. 2 Dispersion relationship of the novel fiber

采用 Galerkin 法^[13]数值模拟该波导结构的色散,在考虑了国内 MCVD 工艺研制光纤的局限性后,我们设计了一组适合的优化参数,其各项计算结果如表1所示。它在 1.552 μm 波长处色散值为 -7171 ps/nm·km,色散斜率为 -27 ps/nm²·km,如图2所示,其分别为 SMF 的色散值和色散斜率的 422 倍和 416 倍。在现场使用时能减小相当大的体积,补偿效果更明显,并且这是在纤芯折射率高度为 $\Delta_0 = 2.4\%$ 和掺氟下陷深度仅为 $\Delta_1 = -0.3\%$ 时得到的指标,这对我国生产光纤时不能获得较深下陷的 MCVD 工艺来说更为有用。由于此光纤与其它色散补偿光纤具有一样的纤芯折射率高度,所以其损耗应该不大于其它色散补偿光纤,而且由于此光纤的色散值约比其它色散补偿光纤大一个数量级,所以此光纤的 FOM 值应该比现有的一般色散补偿光纤的 FOM 值大一个数量级以上。同时经过计算 LP₀₂模的截止波长位于波长 1.76 μm 处,说明其工作于双模状态;而较大的模场直径 w_0 又说明它具有较小的非线性,且在与 SMF 连接时有较小的模场失配,从而可减小接头损耗;而较大的模场直径又可使纤芯偏心、椭圆程度相对减小,从而降低光纤偏振模色散。

表1 光纤参数

Table 1 Optical fiber parameters

Δ_0	Δ_1	Δ_2	a / μm	b / μm	c / μm	D /ps/nm·km (1.552 μm)	slope / $\text{ps/nm}^2 \cdot \text{km}$	λ_c / μm	w_0 / μm
2.4%	-0.3%	0.43%	1.2	15	18	-7171	-27	1.76	12.7

新型色散补偿光纤的纤芯与其它类型的色散补偿光纤相比, 纤芯都需较高的折射率, 并且折射率高低和芯径大小对 1.55 μm 处的光纤色散值非常敏感, 微小的芯径变化会使色散最低点处波长漂移数纳米。要使色散达到较优值, 拉丝时应使最内一层纤芯芯径的偏差小于 $\pm 0.01 \mu\text{m}$, 如果芯径波动过大, 会使色散曲线明显升高、变缓, 补偿效果减弱; 两个下陷区的折射率应该做得尽量深, 这样才会产生大的负波导色散, 同时它可以使纤芯的折射率降低一些, 达到降低损耗的目的; 下陷层的宽度越宽则色散值越负, 但它会减小色散的补偿带宽, 使曲线变得更尖锐; 两个肩膀层(第二包层)的折射率与基模型色散补偿光纤相比要高 1~2 倍, 它的高低和宽窄可以调节色散曲线的形状, 使色散最低点位于 1.55 μm 波长区, 并有负的色散斜率。由于该结构光纤具有较大的负色散值, 较窄的色散补偿带宽, 所以它对各参数非常敏感, 制棒和拉丝的难度都应较大, 尤其是光纤的拉丝芯径要严格控制, 才能精确地将色散最低点控制在 1.55 μm 波长处。制成后的光纤, 即使温度变化造成光纤长度发生变化, 也不会像 Bragg 光纤光栅那样中心波长温度漂移严重, 而最大负色散处波长几乎不会有变化。另外该光纤的补偿带宽和负色散值是一对矛盾的指标, 在增大其中一个的时候必然以牺牲另外一个指标为代价。

该结构色散补偿光纤的 LP₀₁模的 V - B 曲线和纯弯曲损耗曲线分别见图 3 和图 4。它工作于较大的 V 值下, 但同时从图 4 可知, 该结构的色散补偿光纤在弯曲半径为 5 cm 时, 弯曲损耗也仅为 0.046 dB/km, 与其它色散补偿光纤相比可以忽略。三包层型双模色散补偿光纤的另一个优点是它在 LP₀₁模获得较大的负色散的时候, 由于纤芯和不对称结构使 LP₀₂模能同时具有较大的正色散, 因此可以采取抑制其中的一个模式而获得所需要的色散。

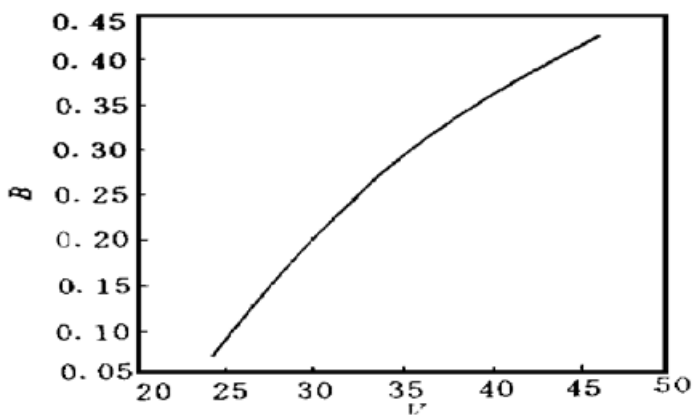


图 3 LP₀₁模的 V - B 曲线(光纤参数见表 1)

Fig. 3 V - B relationship of LP₀₁ mode of the novel fiber

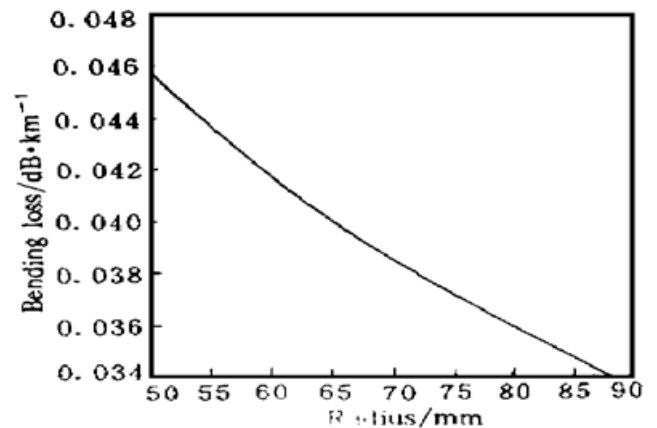


图 4 纯弯曲损耗曲线(光纤参数见表 1)

Fig. 4 Bending loss of the novel fiber

通过计算发现, 上面介绍的这种双模型色散补偿光纤的剖面结构不仅可以是三包层的阶跃型, 也可以是抛物线型、梯形型和三角形型等, 同时也可以是更多包层型的折射率结构, 但对单包层和 W 型光纤结构, 经仔细计算不能产生上面所述的极大负色散效应。另外从光纤传输模式上考虑, 这种色散补偿光纤也可以在支持传输两个模式以上的多模光纤中产生。

色散补偿光纤的指标品质因素 FOM 值是光纤色散值和光纤损耗之比, 有人提出应当把非线性考虑进去^[14], 但是简水生院士认为更全面的品质因素的定义还应当把二阶色散(色散斜率)也考虑进去, 这样才能全面评价一根色散补偿光纤的宽带色散补偿能力。很明显我们设计的这种光纤可以具有很大的负色散斜率。

通过计算机模拟发现在三包层双模色散补偿光纤中如果抑制其高阶模, 而仅传输 LP₀₁模

时能在一个较窄的带宽内产生大于数千 $\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 的负色散和能具有数千 $\text{ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ 的 FOM 值,同时它具有较大的模场分布、较小的弯曲损耗和偏振模色散值;与 Bragg 光栅相比,它又具有小的温度漂移,因此这是一种非常有前途的新型色散补偿光纤。

参 考 文 献

- 1 H. Onaka, H. Miyata, G. Ishikawa *et al.*. 1.1 Tbit/s WDM transmission over a 150 km 1.3 μm zero-dispersion single-mode fiber. OFC'96, Washington D. C, American, 1996: Postdeadline Paper: PD19
- 2 Craig D. Poole, Jay M. Wiesenfeld, D. J. DiGiovanni *et al.*. Optical fiber-based dispersion compensation using higher order modes near cutoff. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(10): 1746~ 1758
- 3 Kazuhiko Aikawa, Tetsuya Sakai, Akira Wada *et al.*. Low loss dispersion compensating optical fibers and their applications. *Fujikura Technical Review*, 1995, (1): 1~ 6
- 4 Anders Bjarklev, Thomas Rasmussen, Ole Lumholt *et al.*. Optimal design of single-cladded dispersion-compensating optical fibers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(7): 457~ 459
- 5 Y. Akasaka, R. Sugizaki, A. Umeda *et al.*. High-dispersion-compensation ability and low nonlinearity of W-shaped DCF. OFC'96 Washington, D. C, American. 1996: 201~ 202
- 6 A. V. Belov, S. L. Miroshnichenko, V. A. Semenov. Single-mode dispersion compensator for 1.31/1.55- μm long-haul communication lines. OFC/IOOC'93 Technical Digest. Washington D. C, American. 1993: 203~ 204
- 7 A. M. Vengsarkar, A. E. Miller, M. Haner *et al.*. Fundamental-mode dispersion-compensating fibers: design considerations and experiments. OFC/IOOC'03 Technical Digest. Washington, D. C, American. 1996: 225~ 227
- 8 V. A. Semenov, A. V. Belov, E. M. Dianov *et al.*. Broadband dispersion-compensating fiber for high-bit-rate transmission network use. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(24): 5331~ 5337
- 9 Gong Yandong, Guan Yali, Jiang Zhongao *et al.*. Dispersion compensating fiber with negative dispersion slope. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(3): 330~ 333 (in Chinese)
- 10 D. W. Hawtof, G. E. Berkey, A. J. Antos. High figure of merit dispersion compensating fiber. OFC'96, Washington, D. C, American. 1996: Postdeadline Paper: PD6
- 11 A. Goel, R. K. Shevgonkar. Wide-band dispersion compensating optical fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(12): 1668~ 1670
- 12 U. Peschel, T. Peschel, F. Lederer. A compact device for highly efficient dispersion compensation in fiber transmission. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(15): 2111~ 2113
- 13 Anurag Sharma, Swagta Banerjee. Chromatic dispersion in single-mode fiber with arbitrary index profiles: a simple method for exact numerical evaluation. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(11): 1921~ 1923
- 14 Fabrizio Forghieri, R. W. Thach, A. R. Chraplyvy *et al.*. Dispersion-compensation fiber: is there merit in the figure of merit? OFC'96, Washington, D. C, American. 1996: 255~ 257

A novel Two-mode Dispersion Compensating Fiber Based on LP₀₁ Mode

Gong Yandong Guan Yali Jiang Zhong'ao Li Tangjun Jian Shuisheng
(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract Computer stimulation shows if the LP₀₂ mode is suppressed and only the LP₀₁ mode is transmitted in a two-mode dispersion compensating fiber of three claddings, more than thousands $\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ negative dispersion values can be achieved. Having a large mode field, small bending loss, small polarization mode dispersion and small temperature drift, and the loss value as other dispersion compensated fibers, the fiber of this kind appears to be a promising dispersion-compensating fiber.

Key words fiber, optical fiber communication, dispersion, dispersion compensation