

# 负色散斜率的色散补偿光纤的研制\*

龚岩栋 关雅莉 江中澳 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘 要** 对三包层的大负色散、负色散斜率的色散补偿光纤进行了理论研究, 分析了各个参量对色散曲线的调节作用, 发现色散补偿光纤只有在一定范围的拉丝芯径内, 以牺牲负色散数值才能获得大负色散斜率; 采用在光纤拉丝时旋转预制棒的工艺减小了光纤的偏振模色散, 并进一步改进国内已有的改进的化学汽相沉积(MCVD) 光纤生产工艺, 研制出了较高水平的色散补偿光纤。

**关键词** 色散, 色散补偿, 色散补偿光纤, 改进的化学汽相沉积工艺, 偏振模色散。

## 1 引 言

随着光纤通信的迅速发展, 全世界已经铺设了上亿公里的 G652 光纤, 众所周知, G652 光纤零色散点在  $1.31 \mu\text{m}$ , 而在  $1.55 \mu\text{m}$  处色散约  $17 \text{ ps}/\text{km} \cdot \text{nm}$ , 这就严重影响了利用掺铒光纤放大器(EDFA) 在  $1.55 \mu\text{m}$  窗口使用已有的 G652 光纤开通高速大容量长距离通信系统。解决的最好方法之一就是在线路中插入一段色散补偿光纤(DCF), 96' 光纤通信会议和 96' 欧洲光通信会议上报道的采用 G652 光纤的  $1.1 \text{ Tbit/s}$  和  $2.6 \text{ Tbit/s}$  的波分复用(WDM) 系统就是采用了色散补偿光纤<sup>[1]</sup>, 色散补偿光纤的研究已是目前国际上的热点, 据报道最新的三包层色散补偿光纤的品质因素(FOM) 值已达  $300 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{dB}$ , 色散值低于  $-290 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ <sup>[2]</sup>。因为在国内生产光纤仅有改进的化学汽相沉积工艺可以利用, 但用它生产色散补偿光纤有一些缺点, 最重要的是改进的化学汽相沉积工艺的氟下陷深度不低于  $\Delta n = -4\%$ , 不能达到外部汽相沉积工艺(OVD) 和汽相轴向沉积工艺(VAD) 工艺的  $\Delta n = -8\% \sim -12\%$ , 因此国内尚无较大负色散的色散补偿光纤, 色散仅能低于  $-100 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ 。而我国铺设的 G652 光纤数已达数百万公里, 并且许多干线都采用了 G652 光纤, 而且每年还在继续铺设, 因此色散补偿光纤的研究对我国显得更加迫切和重要。同时由于 G652 光纤具有正的色散斜率(二阶色散), 因此研制的色散补偿光纤应具有负的色散斜率, 对二阶色散也能进行补偿。正是在这种情况下本文作者开始了研究利用国内的改进的化学汽相沉积光纤生产工艺开发高水平的色散补偿光纤的工作。

## 2 色散补偿光纤的研究

采用 Galerkin 法<sup>[3]</sup> 来数值模拟光纤的色散等参数, 经过细致的理论分析, 本文作者摒弃了

\* 国家 863 高技术项目和国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1997-03-01; 收到修改稿日期: 1997-05-22

W 型色散补偿光纤结构<sup>[4]</sup>, 因为这种结构具有较敏感的弯曲损耗和不能产生较大的负色散斜率, 而采用了三包层型利用基模波导色散原理的光纤优化结构<sup>[5,6]</sup>。三包层光纤的折射率剖面示意图, 如图 1 所示, 纤芯的折射率较高, 两个下陷区的折射率较低, 这样才会产生大的负波导色散; 两个肩膀层(第二包层)的折射率的高低和宽窄可以调节色散曲线的形状, 使之产生负色散斜率以及促使场的更大部分分布于下陷层中, 达到更大的波导效应, 但过低、过窄的肩膀层将使截止波长远离  $1.55 \mu\text{m}$ , 而过高的肩膀层又会使光纤成为多模光纤。另外纤芯的折射率高低和芯径大小对  $1.55 \mu\text{m}$  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, 会降低波导效应和减小色散斜率; 而下陷层的宽度也应在较大的波导效应和模式截止问题之间找到一折衷宽度。从光纤损耗角度来讲两个肩膀层的折射率不能太高, 同时下陷层也应该做得尽量深, 这样它就可以使纤芯折射率降低一些, 而达到降低损耗的目的。

通过优化设计, 制出了一根较为理想的预制棒, 纤芯的折射率高度为  $\Delta n = 2.5\%$ , 下陷  $\Delta n = -3\%$ , 用其拉出了五种不同的光纤外径, 测出的色散曲线如图 2 所示。从图中可以看出光纤越细时, 色散值越小, 负色散斜率也越小; 当外径小到  $95 \mu\text{m}$  时, 色散曲线已基本水平, 此时  $1.55 \mu\text{m}$  波长的色散达到最低值; 当光纤外径为  $90 \mu\text{m}$  时, 色散曲线变为正斜率, 并且  $1.55 \mu\text{m}$  处的色散已高于  $95 \mu\text{m}$  外径光纤的色散值, 这说明仅在一定范围内的拉丝芯径才能获得较大负色散斜率, 但它以大的负色散值为代价, 而在负色散较大时, 负色散斜率则较小, 二者在拉丝芯径上是矛盾的。为了减小光纤的损耗, 在拉丝时尽量降低温度、加大速度。经过努力, 制出的部分色散补偿光纤损耗值已低于  $6 \text{ dB}$ , 并拟在纤芯中共掺铈、氟以进一步减小损耗<sup>[7]</sup>。

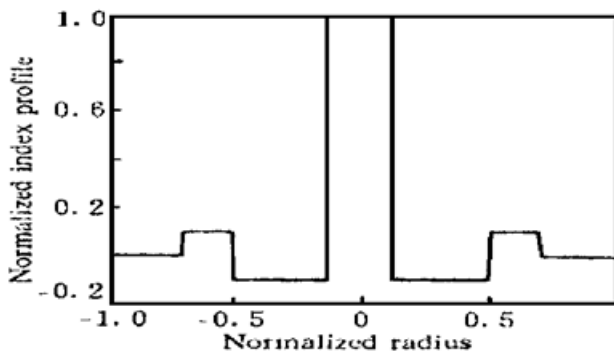


Fig. 1 Index profile of dispersion compensating fiber

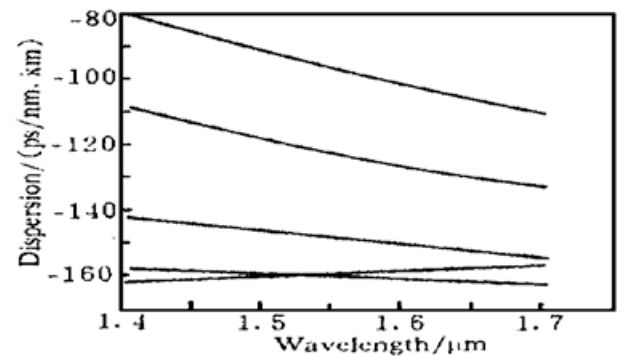


Fig. 2 Dispersion in DCF with different diameters: five lines from top to bottom according to the left side corresponds to fiber diameter of: 120, 110, 100, 95, 90  $\mu\text{m}$  in turn

### 3 减小光纤偏振模色散

随着高速光纤通信系统的迅速发展和传输距离的延长, 偏振模色散(PMD)的影响已不可忽略<sup>[3]</sup>。对于色散补偿光纤, 由于其非常小的芯径, 光纤的偏心、圆不对称等特点更加明显, 所以其偏振模色散值更大, 一般商业得到的色散补偿光纤的偏振模色散值约大于  $2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。因此本文作者也对色散补偿光纤采用了拉丝时同时旋转预制棒的方法来增强模耦合, 以减小偏振模色散<sup>[8]</sup>。

从耦合模理论可知, 在光纤拉丝时若其同时被旋转, 则光纤中的两偏振态之间的时延为<sup>[8]</sup>:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\beta}{2\xi} \Delta\tau_0 \quad (1)$$

其中  $\Delta\beta$  为两偏振模间的传输常数差,  $\Delta\tau_0$  为未旋转预制棒光纤的偏振模时延, 即旋转后拉出的光纤的偏振模色散和未旋转的预制棒拉出的光纤的偏振模色散的比值与预制棒旋转率  $\xi$  (单位是 rad/m) 成反比, 以此为依据, 本文作者改造了国产拉丝塔, 使之在拉丝过程中能同时旋转

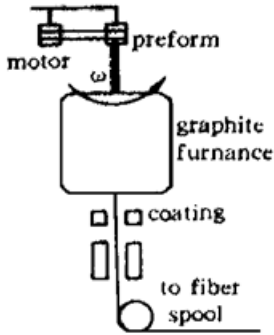


Fig. 3 Configuration of reducing PMD when drawing

预制棒, 如图 3 所示。在其中, 高精度的同心旋转和消除高温对电机的影响是问题的关键。通过摸索将电机放在了旁边, 通过皮带带动预制棒旋转, 从而避免了石墨炉通过预制棒对电机的热传导辐射, 降低了对电机的要求。

经过对不同的光纤在不同的拉丝条件下的多次实验, 发现光纤的偏振模色散值的确可以通过光纤拉丝时旋转预制棒来降低, 旋转速率越高, 则偏振模色散值越小, 但不是象 (1) 式那样与旋转速率成反比, 说明还有其它影响光纤偏振模色散值大小的因素。光纤损耗与拉丝温度、拉丝速率、旋转速率均有关, 但主要与旋转速率相关, 旋转速率越高, 则损耗值越大, 这可能由旋转部分不同

心导致光纤芯径变化过大、过快所致。另外从结果可以看出在低温、高速拉丝时光纤损耗有所降低。总之, 最佳拉丝条件是采用低温、高速拉丝, 而预制棒的旋转速率在不致过大增加损耗的情况下应尽量加大。本文作者把这项成果应用于低偏振模色散值的色散补偿光纤的研究, 在较大的旋转速率情况下得到了偏振模色散最小值小于  $1.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  的色散补偿光纤。但是由于色散补偿光纤较小的芯径以及预制棒旋转调节的不够同心, 致使使用此方法拉出的光纤损耗增大很快。若想进一步减小偏振模色散和损耗而生产出实用的高质量光纤, 关键是提高预制棒旋转的同心精度。

**结 论** 采用三包层模型结构色散补偿光纤作为研究对象, 分析了该光纤的各个参量对色散曲线的调节作用, 并改进国内已有的改进的化学汽相沉积工艺, 研制出较高水平的色散补偿光纤, 同时发现只有在一定范围内的拉丝芯径才能获得较大负色散斜率的色散补偿光纤, 但它以大的负色散值为代价。采用在光纤拉丝时旋转预制棒的工艺减小光纤的偏振模色散, 可使色散补偿光纤的偏振模色散小于  $1.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] H. Onaka, H. Miyata *et al.*. 1.1 Tb/s WDM transmission over a 150 km 1.3  $\mu\text{m}$  zero-dispersion single-mode fiber. *OFC'96, Technical Digest*, Optical Society of America, Washington D. C., PD19
- [2] D. W. Hawtof, G. E. Berkey, A. J. Antos. High figure of merit dispersion compensating fiber. *OFC'96, Technical Digest*, Optical Society of America, Washington D. C., Postdeadline Paper: PD6
- [3] 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(12): 1991~1923
- [4] Y. Akasaka, R. Sugizaki *et al.*. High-dispersion-compensation ability and low nonlinearity of W-shaped dispersion compensating fiber, *OFC'96, Technical Digest*, 1996, Optical Society of America, Washington, D. C., ThA3, 201~202
- [5] A. M. Vengsarkar, A. E. Miller *et al.*. Fundamental-mode dispersion-compensating fibers: design considerations and experiments. *OFC/IOOC'93, Technical Digest*, 1993, Optical Society of America, Washington, D. C., ThK2, 225~227, 1996

- [6] V. A. Swmwnov, A. V. Belov *et al.*. Broadband dispersion-compensating fiber for high-bit-rate transmission network use. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(24) : 5331~ 5337
- [7] A. A. Abramov, M. M. Bubnov *et al.*. Low-loss, high-aperture germanium-fluorine-codoped single-mode fibers. *OFC'95, Technical Digest*, Washington, D. C., Optical Society of America, 1995 : 173~ 174
- [8] 龚岩栋, 简水生. 圆偏振光纤的研究. *光纤与电缆及其应用技术*, 1996, (4) : 28~ 33

## Dispersion Compensating Fiber with Negative Dispersion Slope

Gong Yandong Guan Yali Jiang Zhongao Jian Shuisheng

(*Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044*)

(Received 1 March 1997; revised 22 May 1995)

**Abstract** Theory of three cladding dispersion compensating fiber with negative dispersion slope was analyzed, and the effects of all parameters on the fiber's characteristics were given. We found that the dispersion compensating fiber with negative dispersion slope can be achieved only in limited range and at the cost of larger negative dispersion value. And spinning preform when drawing was adopted to lower the polarization mode dispersion in fiber. The advanced dispersion compensating fiber was made through modifying chemical vapor deposition (MCVD) method.

**Key words** dispersion, dispersion compensation, dispersion compensating fiber, modified chemical vapor deposition (MCVD), polarization mode dispersion.