

文章编号: 0253-2239(2004)09-1181-4

中心下陷的负色散光纤

蒋小强¹ 王瑞春^{2*}

(¹ 华中科技大学光电系, 武汉 430074
² 长飞光纤光缆有限公司光纤部, 武汉 430074)

摘要: 利用非等温等离子体化学气相沉积成功制得了具有折射率中心下陷的负色散光纤(RDF)。该光纤在保持较好的抗弯曲性能与偏振模色散的同时,有效面积达到 $45 \mu\text{m}^2$,且在 1550 nm 处的色散为 $-19.65 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,色散斜率为 $-0.132 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。此外,通过优化光纤纤芯各层的掺杂原子浓度,在 1530 nm 处光纤的氢损降低到了 $0.01 \text{ dB}/\text{km}$ 。由负色散光纤与具有超大有效面积的非零色散位移光纤(ULAF)组成的色散管理光纤对在 1530 nm 到 1625 nm 波长范围内的色散斜率小于 $0.006 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,且最大色散值小于 $0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。同时, 1550 nm 波长处的衰减为 $0.224 \text{ dB}/\text{km}$,且在 1530 nm 到 1625 nm 波段范围内衰减较为平坦。该色散管理光纤对可以在无需色散补偿模块的前提下应用于大容量高速率的长距离波分复用(WDM)系统。

关键词: 导波与光纤光学; 色散管理; 色散斜率; 波分复用

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Study of the Reverse Dispersion Fiber with Depressed-Core Index Profile

Jiang Xiaoqiang¹ Wang Ruichun²

(¹ *Opto-Electronics Engineering Department, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074*
² *Fiber Department, Yangtze Optical Fiber & Cable Company Ltd., Wuhan 430074*)

(Received 6 May 2003; revised 11 December 2003)

Abstract: Reverse dispersion fiber (RDF) with depressed-core index profile is fabricated successfully by using plasma-activated chemical vapor phase deposition. The fabricated RDF has a core-effective-area of $45 \mu\text{m}^2$, dispersion of $-19.65 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ and dispersion slope of $-0.132 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ while maintaining the low bending induced attenuation and low PMD value. Furthermore, the hydrogen induced attenuation at 1530 nm decreases to the value of less than $0.01 \text{ dB}/\text{km}$ by optimizing the dopant concentration of different core layer. The dispersion managed pairs, consisting of RDF and non-zero dispersion shifted fiber with ultra large effective-core-area (ULAF), have the ultra low dispersion slope of less than $0.006 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ at the wavelength range from 1530 nm to 1625 nm , and the largest dispersion value is lower than $0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$. Moreover, the attenuation characteristic also shows a remarkable flatness over the broad-band wavelength, and the attenuation at 1550 nm is as low as $0.224 \text{ dB}/\text{km}$. The dispersion managed pairs are applicable for large capacity, high bit-rate long-haul wavelength division multiplexing (WDM) transmission system without using dispersion compensation mode.

Key words: guided wave and fiber optics; dispersion-managed; dispersion slope; wave length division multiplexing

* 通信联系人。E-mail: wangruichun@yofc.com

收稿日期: 2003-05-06; 收到修改稿日期: 2003-12-11

1 引 言

随着波分复用(WDM)系统中单信道传输速率向 40 Gb/s 甚至更高发展,以及信道数的成倍增加,信道间隔的减小,色散与非线性效应已成为限制光纤远距离传输的主要因素^[1,2]。因此,如何周期性补偿色散从而精确控制传输链路的累积色散,以及减小光传输过程的非线性效应是提高光纤传输容量与距离的关键^[3]。通过采用由色散补偿模块来管理传输系统中的色散是目前主要的途径^[4,5]。然而由于色散补偿光纤较高的芯层相对折射率以及小的芯径决定了其固有的缺陷:高传输损耗、高偏振模色散(PMD)值及高非线性效应。近年来,人们提出了一种色散管理光纤对^[6,7],即在一有效面积大的正色散光纤后接一具有负色散且相对色散斜率(色散斜率与色散的比值)与正色散光纤相等的负色散光纤,该色散管理光纤对通过自身有效的色散与色散斜率的补偿使其在超长距离传输应用中成为可能。同时,由于负色散光纤相对较大的有效面积以及与正负色散光纤处于相同的外部环境中,有效地解决了光非线性效应及由于外界环境温度变化而产生色散变化的问题。

作者在已成功开发的一种超大有效面积非零正色散位移光纤(ULAF)^[8]的基础上,利用非等温等离子体化学气相沉积工艺(PCVD)设计并制备了一种具有中心下陷的负色散位移光纤(RDF),同时对其光学特性、氢损特性以及与非零正色散位移光纤组成色散管理光纤对后的光学特性进行了研究。

2 负色散光纤设计与制备

高速率大容量波分复用传输系统中,色散容限与传输比特率的平方成反比^[2]。在光纤色散管理对中,越宽的波段范围内色散值越低,色散斜率越平坦,对于提高光纤的可使用波段以及增加光纤传输距离越有利。评价整个色散管理光纤对中的色散平坦性可用色散补偿率 R 来表示, R 定义为

$$R = \frac{S_{\text{RDF}}/S_{\text{ULAF}}}{D_{\text{RDF}}/D_{\text{ULAF}}} = \frac{\eta_{\text{RDF}}}{\eta_{\text{ULAF}}}$$

其中 D_{RDF} 、 S_{RDF} 、 η_{RDF} 分别为负色散光纤对应的的色散、色散斜率与相对色散斜率, D_{ULAF} 、 S_{ULAF} 、 η_{ULAF} 分别为非零正色散位移光纤对应的的色散、色散斜率与相对色散斜率。色散补偿率 R 越接近 100%,色散管理光纤对的色散斜率越平坦,波长使用范围越宽。此外,增大光纤的有效面积能有效抑制光非线性效

应的产生。由于负色散光纤要求光纤芯径较小,且折射率较高,因此传统的 W 型纤芯折射率剖面结构负色散光纤的有效面积一般在 25~30 μm 。在本设计中,基于中心折射率下陷型结构光纤相对于中心折射率凸出光纤来说具有更大有效面积的特点,采用具有中心下陷型的光纤剖面结构,以期能获得较大的有效面积,如图 1 所示。其中各芯层折射率 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 、 n_5 及包层折射率 n_c 分别为 1.4621、1.4706、1.4514、1.4606、1.4569、1.4574,各芯层半径 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 r_5 分别为 0.52 μm 、2.25 μm 、6.08 μm 、9.07 μm 、12.20 μm 。其中光纤预制棒采用非等温等离子体化学气相沉积工艺制得,芯层折射率通过掺入诸如 Ge、F 原子来控制。

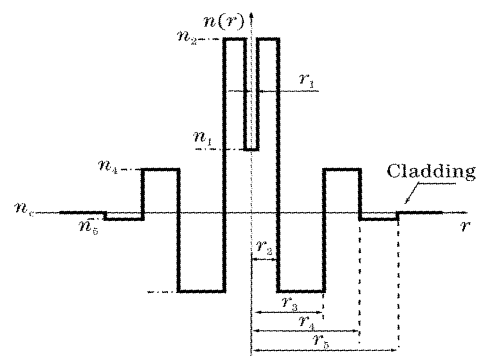


Fig. 1 Refractive index profile of depressed-core reverse dispersion fiber

3 负色散光纤光学特性

3.1 光学传输性能

表 1 为负色散光纤在 1550 nm 波段处的各传输参量。为便于比较,非零正色散位移光纤的传输参量也列于表中。

Table 1 Optical characteristics of the RDF and ULAF at 1550 nm

Parameters	RDF	ULAF
Dispersion / [ps/(nm · km)]	-19.65	9.569
Dispersion slope / [ps/(nm ² · km)]	-0.132	0.0648
Cable cut-off wavelength λ / nm	1280	1390
Attenuation / (dB/km)	0.245	0.210
Mode field diameter / μm	6.30	10.2
$A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	45	105.6
Relative dispersion slope / nm ⁻¹	0.0067	0.0068
Polarization mode dispersion / (ps/km ^{-1/2})	0.05	0.04
Macro-bending loss for 100 turns on the 60 mm diameter mandrel / (dB/km)	0.002	0.006

由表可知,负色散光纤具有较好的抗弯曲性能与低偏振膜色散值,在 1550 nm 处的色散大小为

-19.65 ps/(nm·km), 绝对值大小约为非零正色散位移光纤的两倍, 且相对色散斜率为0.0067, 相对于相对色散斜率为0.0068的非零正色散位移光纤来说色散补偿率 R 为98.5%。此外, 负色散光纤的有效面积为 $45 \mu\text{m}^2$, 远大于常规 W 型结构的负色散光纤。这主要是由于中心下陷型结构光纤的电场能量在纤芯中为非高斯型分布, 电场能量向纤芯两侧扩散, 从而增大了光纤的有效面积, 对应的纤芯电场分布如图 2 所示。

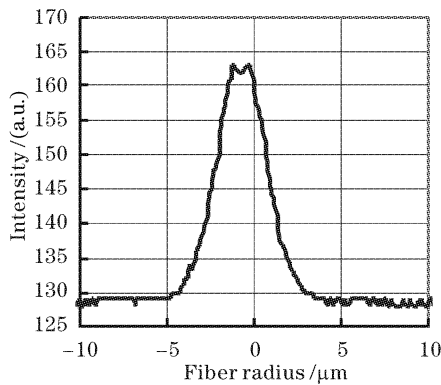
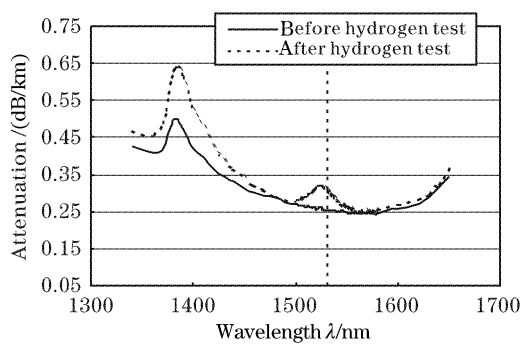


Fig. 2 Electric field distribution of reverse dispersion fiber



3.2 氢损特性

光纤的氢损特性是光纤的一个重要性能。对于掺 Ge 光纤来说, 由于在沿光纤半径方向掺杂原子浓度的不同以及各层间粘度的不匹配, 在拉丝过程中光纤内部将产生一定的热应力与机械应力。应力的存在使得原有的 Ge 与 Si 键易于断裂而产生诸如 $\equiv\text{Ge}\cdot$ 、 $\equiv\text{Si}\cdot$ 等缺陷, 而主要从光缆的塑料构件与油膏中释放而扩散进入纤芯的 H 原子易于与缺陷发生反应而产生如 $\equiv\text{Si}-\text{H}$ 、 $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ 等, 从而使光纤在 1383 nm 与 1530 nm 处的衰减增加。图 3(a) 为未经掺杂优化的负色散光纤在氢损测试前, 以及在 1000 Pa 氢气气氛, 70 °C 环境温度中 16 h 后的衰减谱。显然氢损试验后光纤在 1383 nm 与 1530 nm 波段处衰减均有一定程度的增加。这主要是由于下陷芯层粘度相对于其相邻的外环要高, 拉丝过程中在下陷芯层产生张应力, 而在其相邻的外环产生压应力, 使得在纤芯产生较多的缺陷所致。因此通过同时增加下陷芯层掺杂原子 Ge 与 F 的浓度来降低其粘度而使之与相邻外环匹配, 从而减少在拉丝过程中光纤内部应力的产生, 使在 1530 nm 处的氢损降低到 0.01 dB 以下, 优化后的氢损结果如图 3(b) 所示。

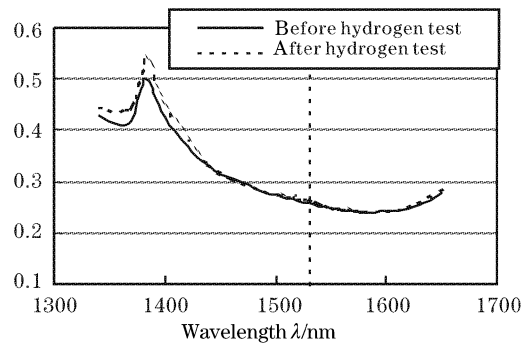


Fig. 3 Loss spectrum of reverse dispersion fiber before hydrogen test and after hydrogen test. (a) Before optimize the dopant concentration, (b) after optimize the dopant concentration

4 色散管理光纤对的光学特性

评价色散管理光纤对的传输特性可以通过连接负色散光纤与非零正色散位移光纤并进行光学测试获得。本实验色散管理光纤对中负色散光纤与非零正色散位移光纤的长度比为 2:1。图 4 为色散管理光纤对以及负色散光纤、非零正色散位移光纤对应的色散谱。由图 4 可知, 负色散光纤表现为负的色散与色散斜率, 色散与色散斜率的绝对值约为非零正色散位移光纤的两倍。色散管理光纤对的色散曲线在较宽的波长范围内表现出很好的色散平坦性, 在 1550 nm

波段处的色散斜率仅约 $0.004 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 且在 1530 nm 到 1625 nm 波长范围内的色散值不超过 $0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。在高速波分复用的应用中, 由于整个链路中相当低的色散斜率及色散值而无需对链路进行额外的色散补偿。此外, 在已报道的色散管理光纤对中的正色散光纤在 1550 nm 处的色散值一般为 $17 \sim 20 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 而在本色散管理光纤对中, 非零正色散位移光纤在 1550 nm 处色散值只有 $10 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 较小的色散值减少了色散管理光纤对中的最大累积色散。

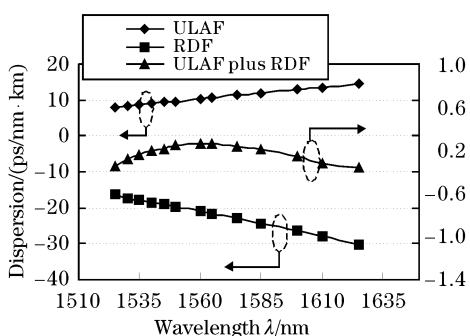


Fig. 4 Dispersion spectrum of ULAF RDF and ULAF plus RDF

图 5 为包括负色散光纤与非零正色散位移光纤熔接损耗的色散管理光纤对的光衰减谱。由于负色散光纤与非零正色散位移光纤纤芯具有相似的非高斯型电场分布,因此负色散光纤与非零正色散位移光纤的平均熔接损耗可降到 0.2 dB 以下。由图可知在 1530 nm 到 1625 nm 波长范围内色散管理光纤对也表现了较好的平坦性,在 1550 nm 处的衰减为 0.224 dB/km。

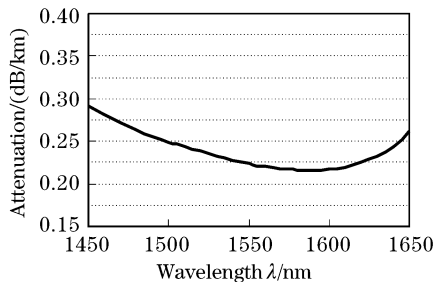


Fig. 5 Loss spectrum of ULAF plus RDF

结论 通过优化设计并利用非等温等离子体化学气相沉积工艺成功制得了具有中心下陷折射率结构的负色散光纤。该光纤在 1550 nm 波段处的色散值约为 19.5 ps/(nm·km),色散斜率约为 0.13 ps/(nm²·km),有效面积达到 45 μm²,且具有好的抗弯曲性能与偏振模色散值。

由负色散光纤与非零正色散位移光纤组成的色散管理光纤对在 1530 nm 到 1625 nm 波段范围的色散斜率小于 0.006 ps/(nm²·km),且最大色散值小于 0.2 ps/(nm·km),在 1550 nm 处的衰减为 0.224 dB/km。该色散管理光纤对在无需色散补偿模块的前提下可适合应用于大容量、高速率的长距离波分复用传输系统。

参 考 文 献

- 1 He Yongzhi, An Honglin, Lin Xiangzhi *et al.*. Effect of longitudinal zero-dispersion wavelength variation along dispersion-shifted fiber on the four-wave mixing conversion. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21** (6): 664~666 (in Chinese)
- 2 Belahou A, Bickham S, Chowdhury D *et al.*. Fiber design considerations for 40 Gb/s systems. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**: 2290~2305
- 3 Ning Tigang, Jian Shuisheng, Fei Li *et al.*. 4×10 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)
- 4 Auguste J L, Blondy J M, Maury J *et al.*. Conception, realization, and characterization of a very high negative chromatic dispersion fiber. *Opt. Fiber Technol.*, 2002, **8** (1): 89~105
- 5 Liu Jianfei, Yu Jinlong, Wang Jian *et al.*. Study on automatic compensation of first order PMD in 10 Gbit/s optical fiber communication system. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(4):349~352 (in Chinese)
- 6 Mukasa K, Imamura K, Yagi T. New type of positive medial dispersion fiber (P-MDF150) with dispersion as 10 /ps/nm/km and Aeff about 150 μm². In: J. E. Berthold eds. *Proc. OFC 2003*, Atlanta, Georgia, 2003. 149~150
- 7 Provost L, Moreau C, Mélin G *et al.*. Dispersion-managed fiber with low chromatic dispersion slope. In: J. E. Berthold, eds. *Proc. OFC 2003*, Atlanta, Georgia, 2003. 151~153
- 8 Jiang Xiaoqiang, Wang Ruichun, Zhang Shuqiang. Non-zero dispersion shift fiber with ultra large effective-core-area and low dispersion slop(超大有效面积低色散斜率非零色散位移光纤). *China Patent*, CN1450369A. 2003-10-22 (in Chinese)