

文章编号: 0253-2239(2004)07-893-4

大容量长距离传输用低非线性效应非零色散位移光纤

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(PCVD)工艺制备了一种适合于大容量高速率长途干线网与城域网的中芯下陷型纤芯结构非零色散位移光纤。该光纤的有效面积大于 $95 \mu\text{m}^2$, 在 1550 nm 波段的色散值约为 $9 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 有效的抑制了传输过程中光非线性效应的产生。通过对光纤剖面结构的优化设计, 光纤的 1550 nm 处的传输损耗降到约 0.21 dB/km, 与传统单模光纤的熔接损耗低于 0.11 dB, 且在直径为 60 mm 圆筒上绕 100 圈后在 1460 nm 到 1625 nm 波长范围所引起的附加弯曲损耗均低于 0.02 dB/km。同时, 该光纤色散斜率低于 $0.065 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 偏振模色散(PMD)小于 $0.05 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1/2}$ 。此外, 由于光纤的零色散点移到了 1430 nm 以下, 使波分复用(WDM)传输在 S 波段(1460~1530 nm)、C 波段(1530~1565 nm)、L(1565~1625 nm)波段上都兼容。

关键词: 导波与光纤光学; 非零色散位移光纤; 色散斜率; 波分复用

中图分类号: TN929 文献标识码: A

Non-Zero Dispersion-Shifted Optical Fibers with Low Nonlinearity for Large Capacity and Long-Haul Transmission System

Jiang Xiaoqiang¹ Wang Ruichun²

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

(Received 16 April 2003)

Abstract: A non-zero dispersion-shifted fiber with core-depressed profile for large capacity and high bit rate backbone network and metropolitan area network is designed and fabricated by plasma chemical vapor deposition (PCVD) process. The designed fiber has the effective-core-area of more than $95 \mu\text{m}^2$ and the dispersion of about $9 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ at 1550 nm, which can suppress the nonlinearity on the transmission system effectively. Meanwhile, the attenuation at 1550 nm is reduced to around 0.21 dB/km, and the splice loss with conventional single mode fiber is less than 0.11 dB while keeping the good bending performance (bending loss is less than 0.02 dB/km on the wavelength range from 1460 nm to 1625 nm with 60 mm bending diameter and 100 turns). The fiber also has a low dispersion slope of less than $0.065 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ and a low polarization mode dispersion (PMD) of less than $0.05 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1/2}$. Furthermore, the fiber can be used on the S-band (1460~1530 nm), C-band (1530~1565 nm) and L-band (1565~1625 nm) for wavelength division multiplexing (WDM) system because the zero-dispersion wavelength is shifted to lower than 1430 nm.

Key words: guided wave and fibre optics; non-zero dispersion-shifted optical fiber; dispersion slope; wavelength division multiplexing

1 引 言

随着光纤传输技术的迅猛发展,特别是掺铒光纤放大器的开发及波分复用技术在 90 年中期的商用,大容量,高速率传输系统对光纤的发展提出了新的要求。光纤非线性效应与色散被认为是限制光纤向大容量高速率发展的主要因素^[1,2],尤其是在 40 Gb 高速率波分复用传输系统中,非线性效应显得更为明显,同时系统的色散容限也会大大降低^[3],对光纤偏振模色散值的要求也更高^[4]。因此增大光纤纤芯有效面积、降低在传输窗口的色散斜率,被认为是降低光非线性效应的产生及增大光传输速率与距离的有效途径^[5]。此外,随着分布式拉曼放大器的开发与进入商用,使得在传输中同时使用 S 波段(1460~1530 nm)、C 波段(1530~1565 nm)与 L 波段(1565~1625 nm)成为可能。而传统的非零色散位移光纤的零色散点由于处于 S 波段,限制了该波段在波分复用中的应用。

本文通过对光纤纤芯折射率剖面结构的设计,并利用等离子体化学气相沉积工艺对折射率剖面精确控制的优点,成功开发出一种在保持良好抗弯曲性能与较低的本征传输损耗的同时,具有超大有效面积低色散斜率的非零色散位移光纤。通过降低零色散波长至 1430 nm 以下,使该光纤适合于同时在 S、C、L 波段作传输用。

2 光纤剖面设计与制备

本设计旨在保证光纤具有良好的抗弯曲性能及较低的偏振模色散值的同时具有大有效面积与低色散斜率。获得大有效面积的光纤折射率剖面结构大致可以分为两种,一种是中心折射率高于其他纤芯层的中心突出结构,另一种是中心折射率低于其周边纤芯层的中心下陷结构。前者光纤纤芯有效面积能达 $85 \mu\text{m}^2$ 左右,色散斜率约 $0.085 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。中心折射率下陷结构光纤有效面积很容易达到 $100 \mu\text{m}^2$ 以上^[6],且色散斜率保持在 $0.08 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 左右。图 1 为 Alcatel 公司所设计的纤芯下陷型光纤剖面结构^[7]。其中 r_1, r_2, r_3, r_4 , 分别为各纤芯芯层外周边到纤芯轴线的距离。 n_1, n_2, n_3, n_4 , 分别为各层所对应的折射率, n_c 为光纤外包层折射率。设各纤芯层相对于外包层的相对折射率分别为 $\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3, \Delta n_4, \Delta n_5, \Delta n_i$ 由下式定义:

$$\Delta n_i = \frac{n_i^2 - n_c^2}{2n_c^2}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

其中 Δn_1 小于 0, Δn_3 约为 1.1%, 色散斜率为 $0.081 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 有效面积大于 $100 \mu\text{m}^2$ 。然而该剖面结构带来的一个问题即是由于较大的 Δn_3 值会导致瑞利散射的增加。另外由于 Δn_1 与 Δn_2 相差较大,这使得在第一芯层与第二芯层之间存在较大的粘度差,在拉丝过程中光纤纤芯内部会产生大量的残留应力。而光纤中的应力不但会导致光纤传输损耗的增加,而且直接响着光纤的偏振模色散值。

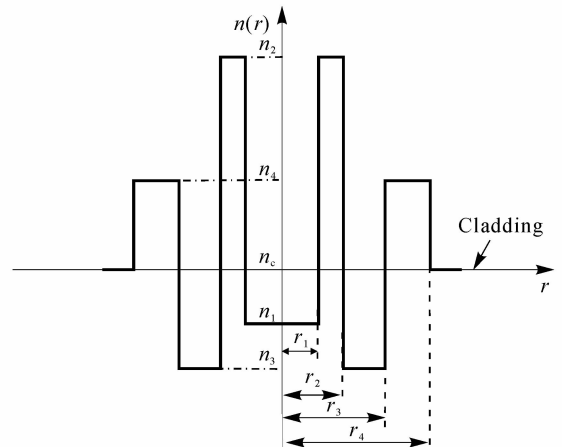


Fig. 1 Refractive index profile with depressed core-index

本文中的光纤纤芯剖面采用中芯下陷型结构,如图 2 所示。光纤纤芯共有五层组成,通过增加第一纤芯层折射率及降低第二纤芯层折射率来降低光纤在拉丝过程中产生的机械应力,同时通过增加第二纤芯层厚度($r_2 - r_1$)来降低色散斜率、增加光纤的抗弯曲性能。光纤的有效面积可以通过调节第一纤芯层的半径 r_1 及第三纤芯层的相对折射率 Δn_3 来获得,而光纤截止波长可以通过调节第五纤芯层的相对折射率 Δn_5 来完成。

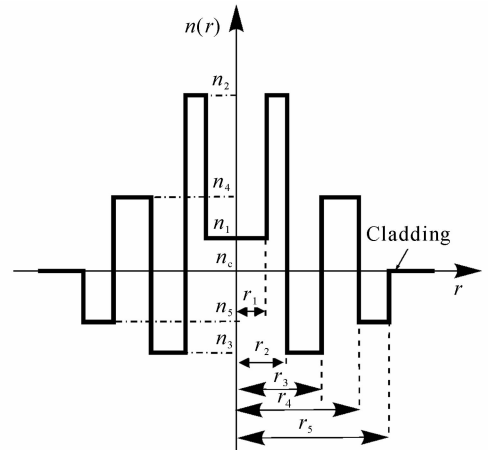


Fig. 2 The designed refractive index profile with five core layers based on the depressed core-index

图 3 为根据图 2 所设计的折射率剖面结构在经等离子体化学气相沉积工艺制备预制棒及拉丝成纤后的光纤实际纤芯折射率剖面结构图。在等离子体化学气相沉积制备预制棒的过程中,通过加入 Ge 掺杂剂来增加纤芯折射率,加入 F 掺杂剂降低纤芯折射率。由于在预制棒制备及拉丝过程中,高温下 Ge, F 掺杂原子易于发生扩散,使实际的光纤的纤芯折射率剖面结构与理论计算的纤芯剖面结构有所出入。

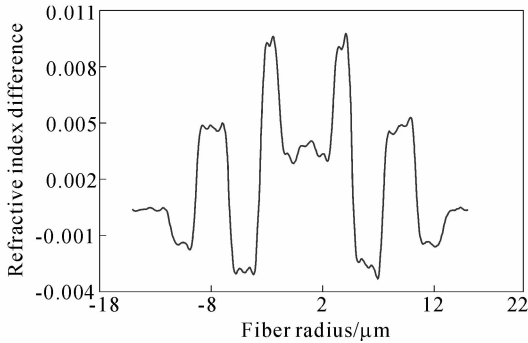


Fig. 3 The real refractive index profile of designed fiber

3 结果与讨论

表 1 列出了根据设计的纤芯折射率剖面结构所制备光纤的各种传输参量。光纤在 1550 nm 波长处的色散斜率低于 $0.065 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,有效面积大于 $100 \mu\text{m}^2$,偏振模色散值为 $0.04 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1/2}$ 。1550 nm 波长处的传输损耗降到了 0.21 dB/km ,低于其他报道中的数值。

Table 1 Optical characteristics of the fabricated fiber

Parameters item	Wavelength /nm	Typical value
Dispersion / $[\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})]$	1460	3.465
	1550	9.569
	1625	14.324
Dispersion slope / $[\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})]$	1550	0.0648
Cable cut-off wavelength λ /nm	/	1390
Attenuation / (dB/km)	1550	0.210
MFD / μm	/	10.2
$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	1550	105.6
$A_{\text{eff}} \times \text{Dispersion}$	1550	1010.5
RDS / nm^{-1}	1550	0.0068
PMD / $(\text{ps} \cdot \text{km}^{-1/2})$	1550	0.04
Macro-bending loss for 100 turns on the 60 mm diameter mandrel /dB	1550	<0.02
	1625	<0.02

图 4 为光纤在直径为 60 mm 圆筒上绕 100 圈后在不同波长所引起的附加弯曲损耗谱,由图可知在波长从 1460 nm 到 1625 nm 波段的弯曲损耗均小于 0.02 dB ,具有较好的抗弯曲性。图 5 为光纤在不同波长下的色散曲线图,光纤的零色散点移到了 1430 nm 以下,且在 1460 nm、1550 nm、1625 nm 波长处的色散值分别为 $3.465 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 、 $9.569 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 、 $14.324 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,该光纤不但能在传统的 C 波段传输,同时 S 波段与 L 波段也兼容,特别适合优化的城域网与大容量高速率传输的干线网。另外由于纤芯有效面积增大到 $95 \mu\text{m}^2$ 以上,在 1550 nm 处的色散值增大到约 $9 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,因此在保证充分抑制非线性的前提下能在 C 波段承载多达 160 个通道间隔为 25 GHz 的信道。

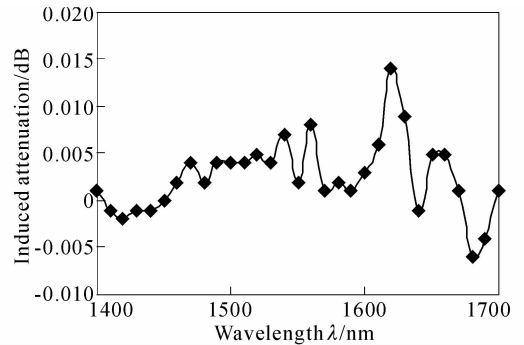


Fig. 4 Induced bending loss at different wavelength

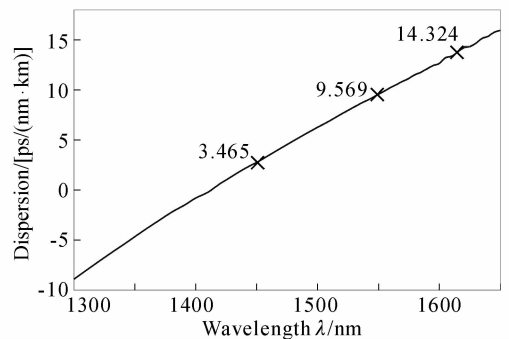


Fig. 5 Dispersion at different wavelength of fabricated fiber

此外,我们对该光纤与其自身及普通匹配包层单模光纤(长飞公司生产)经熔接后对其进行了双向光时域反射测试。发现这种光纤与自身的熔接损耗约为 0.01 dB ,与普通匹配包层单模光纤的熔接损耗为 0.11 dB ,稍高于传统大有效面积非零色散位移光纤与普通匹配包层单模光纤的熔接损耗,但仍在可接收范围之内。这主要是由于在传输过程中该光纤内场分布不是呈现典型的高斯分布,如图 6 所示,由于该光纤的场分布与普通匹配包层单模光纤中具有

高斯分布场的不匹配致使熔接损耗增大。与此同时,由于光纤中电场强度从中心区域向两侧分布,增大了光纤纤芯的有效面积。

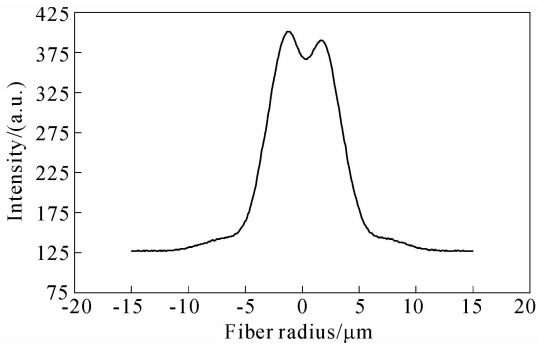


Fig. 6 Field distribution in the fabricated fiber core

结论 设计并利用等离子体化学气相沉积工艺制备了一种具有五层纤芯结构且中芯折射率下陷的非零色散位移光纤。该光纤在保持较好的传输损耗及良好的抗弯曲性能的同时,有效面积大于 $95 \mu\text{m}^2$,色散斜率小于 $0.065 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,偏振模色散值小于 $0.05 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1/2}$,且零色散波长移到了 1430 nm 以下,从而使波分复用在 S 波段、C 波段、L 波段上都兼容。该光纤适合应用于包括大容量高速率的长途干线网与城域网。

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 Baghdadi J A, Safaai-Jazi A, Hattori H T. Optical fibers with low nonlinearity and low polarization-mode dispersion for terabit communications. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(5): 285~291
- 3 Ning Tigang, Jian Shuisheng, Fei Li *et al.*. $4 \times 10 \text{ Gb/s}$ 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 Liu Jianfei, Yu Jilong, Wang Jian *et al.*. Study on effect of PMD-induced pulse broadening on sensitivity and frequency spectrum. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(2): 188~192 (in Chinese)
- 5 Mynbaev D K, Scheiner L. *Fiber-Optic Communications Technology*. Beijing: Science Publishing Company, 2002. 204~206
- 6 Kato M, Kurokawa K, Miyajima Y. A new design for dispersion-shifted fiber with effective area larger than $100 \mu\text{m}^2$ and good bending characteristics. In: Jose S, eds. Paper ThK1, *OFC'1998*, California, 1998. 22~27
- 7 Thones R S, Chatou J R, Marley J C le Roi *et al.*. Phase-shifted monomode optical fiber with large effective area. *US patent*, 6459839B1. Oct. 1, 2002