

# 基于外部气相沉积工艺的新型大有效面积非零色散位移光纤的设计与制备

查健江<sup>1\*</sup>, 陈强<sup>1</sup>, 兰兴铃<sup>2</sup>, 张俊<sup>2</sup>, 文建湘<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 山东富通光导科技有限公司, 山东 济南 250119;

<sup>2</sup> 成都富通光通信技术有限公司, 四川 成都 611731;

<sup>3</sup> 上海大学特种光纤与光接入网省部共建国家重点实验室培育基地/特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444

**摘要** 采用一种具有中心凹陷的三角芯+环型的折射率剖面设计,利用外部气相沉积(OVD)工艺制备了新型非零色散位移 G. 655. D 光纤。实验结果表明:在 1550 nm 和 1625 nm 波长处,光纤的衰减值分别为 0.195 dB/km 和 0.203 dB/km,截止波长为 1200 nm;将光纤绕在半径为 25 mm 的圆柱体上 100 圈,此时其在 1550 nm 和 1625 nm 波长处的宏弯损耗值分别低于 0.027 dB 和 0.045 dB;该光纤在 1530~1625 nm 波段的色散为 1.6~9.5 ps/(nm·km),尤其是在 1550 nm 波长处,其有效面积达到 72  $\mu\text{m}^2$ ,比常规 G. 653 光纤大 1.4 倍。通过这种设计和方法制备的光纤可以实现零色散波长的平移,获得良好的纵向色散均匀性、较低的弯曲损耗以及较大的有效面积,适用于 1530~1625 nm 波段的密集波分复用应用,在长距离光纤通信中对四波混频(FWM)、交叉相位调制(XPM)等非线性效应具有较好的抑制作用,可以减少色散管理成本,具有重要的应用价值。

**关键词** 光纤光学; 外部气相沉积工艺; G. 655. D 光纤; 大有效面积; 非零色散位移; 密集波分复用; 光纤设计与制造

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2306004

## 1 引言

随着数据中心和云计算业务的飞速发展,传输网数据流量爆炸式增长,高速、大容量和更高性价比的光网络成为迫切需求。目前,电信运营商、设备厂家正在积极推进 400G 及超 400G 技术的应用部署<sup>[1]</sup>。光传输领域的主流复用技术是密集波分复用(DWDM)技术,其他的复用技术包括时分复用(TDM)、码分复用、模分复用等技术<sup>[2-4]</sup>,这些技术可以解决色散、偏振模色散和非线性效应等传输损伤。复用信道数过多会导致严重的非线性效应,而非线性效应与有效面积成反比,因此,可以通过增大光纤的有效面积来提高光纤的传输带宽,进而降低光纤的非线性效应。

1985 年,英国南安普敦大学的 Payne 教授团队<sup>[5]</sup>、美国 Bell 实验室的 Desurvire 教授<sup>[6]</sup>和 Giles 博士<sup>[7]</sup>合作研究掺铒光纤放大器(EDFA),实现了对光信号在 1550 nm 波长的放大。EDFA 被誉为光通信行业的重大发明之一,它使得长距离光纤传输成为可能。2008 年,这三位科学家因发明 EDFA 对光通信技术的发展作出了突出贡献而荣获“千年技术奖”<sup>[8]</sup>。他

们发现 EDFA 的光谱增益频谱和光纤的低损耗波段正好匹配,经过色散平坦化管理可以提供 1530~1565 nm 的光功率放大。20 世纪 90 年代中期,Bell 实验室<sup>[9]</sup>以及 Ciena 公司、北电网络公司、Lucent 公司等开始研发波分复用系统,即把多个波长复合到同一根光纤上,从而实现多通道信号传输。分布式反馈激光器(DFB)、分布式布拉格反射激光器(DBR)和各种窄线宽激光器的问世,大大促进了波分复用(WDM)技术的成熟<sup>[10]</sup>。然而,随着网络速率的不断提升以及商用化 TDM 系统的出现,普通的 G. 652 光纤在传输过程中遇到严重的色散问题,严重限制了高速传输系统的开发<sup>[11]</sup>。科研人员一直在寻找既能承载高速率 TDM 系统又能承载多通路 WDM 系统的载体。20 世纪 80 年代,光纤研发人员将零色散波长从 1310 nm 移动到 1550 nm,开发出了 G. 653 色散位移光纤<sup>[12]</sup>,但在使用过程中发现该光纤会出现严重的四波混频(FWM)效应,导致 WDM 信道间发生串扰。为此,人们试图将零色散波长偏移一定距离,从而研发出了非零色散位移光纤(NZDSF)。1993 年,美国 Bell 实验室的科学家研发出 TrueWave 光纤<sup>[13]</sup>。TrueWave 光

收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2022-06-25; 录用日期: 2022-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(61935002,61635006)

通信作者: \*jj\_zha@163.com

纤的零色散波长在 1530 nm 以下,在 1530~1565 nm 波段的色散为 1.3~5.8 ps/(nm·km),在 1549~1561 nm EDFA 光谱增益平坦区的色散为 2.0~4.0 ps/(nm·km),消除了四波混频的相位匹配效应,避免了非线性效应的影响。1996 年,美国康宁公司的刘燕明博士<sup>[14]</sup>发明了大有效面积(LEAF)光纤。该光纤的特点是具有特殊的光纤折射率剖面设计,这一特点可使材料色散和波导色散达到平衡,零色散波长移动到 1500 nm;同时,该光纤利用了最小色散和最小衰减的 1550 nm 窗口,实现了色散和衰减的最优化配置。LEAF 光纤在 1550 nm 窗口的衰减系数小于 0.2 dB/km,可使 1530~1565 nm 区间的色散绝对值保持在 1.0~6.0 ps/(nm·km) 范围内,维持一定的正色散值,避免了四波混频<sup>[15]</sup>。国际电信联盟(ITU)定义这种光纤为 G.655 光纤,它主要被应用于 WDM 系统。2009 年 11 月,ITU 修订了 G.655 光纤规范<sup>[16]</sup>。至此,EDFA、DWDM、G.655 光纤的组合成为国际上长途干线光通信传输的重要发展方向之一。

为了进一步提高单根光纤的传输能力,使其逼近香农定理极限,光传输的研究方向主要是进一步提升单信道容量、压缩传输信道间隔和增加信道数量。为此,选择哪种光纤用于超密集波分复用无源光网络(UDWDM-PON)<sup>[17]</sup>也是下一步的研发任务。G.655 光纤的最新研究方向是开发低色散斜率和大有效面积光纤,例如将 1530~1565 nm 波段色散绝对值提高到 6~10 ps/(nm·km)的中等色散与低色散斜率结合的 C+L 波段低色散斜率光纤,或中等色散与大有效面积结合的大有效面积光纤,甚至是 S+C+L 波段超低色散斜率光纤<sup>[18]</sup>,以满足长途大容量宽带传输需求。采用的方法主要是优化折射率剖面图,降低光纤水峰,缩短截止波长,缩短零色散波长等。2010 年 7 月,ITU 修订了 G.656 宽带传输用非零色散光纤的规范<sup>[19]</sup>。目前,国产 G.655 光纤和 G.656 光纤的生产尚未形成规模,国内使用的这两种光纤仍依赖进口。近几年,国内光纤光缆股份有限公司的大保实光纤已经占有一定的市场份额,但在未来几年,G.655 光纤市场供应量的 50% 仍依赖进口。因此,努力开发具有自主知识产权的 G.655 光纤和 G.656 光纤,具有重要的实际应用价值。

## 2 光纤波导结构设计

### 2.1 光纤在光通信系统中的主要限制因素

对于高速光纤通信系统,光纤的衰减、色度色散、偏振模色散和非线性效应是限制其性能的主要因素<sup>[20]</sup>。衰减可以通过提升光纤制备材料的纯度、改进制备工艺进行改善;色散可以采用色散补偿的方式进行消除,如采用色散补偿光纤和反射光栅进行消除;偏振模色散可以在光纤拉丝和成缆工序中进行优化;非线性效应与光纤信息传输的功率密度相关,降低功率密度是解决非线性效应的最有效方法。高速率、大容

量光纤通信系统要求密集波分系统能够实现多信道传输,以提高使用波段的效率。啁啾现象引起的色散受限距离的估算公式为

$$L = 71400 / (C \times D \times \lambda^2 \times B^2), \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为工作波长,单位为 nm; $C$  为啁啾系数; $D$  为色散,单位为 ps/(nm·km); $B$  为线路的比特率,单位为 Tbit/s。对于普通 G.652 光纤,1550 nm 色散值可达到 17 ps/(nm·km),必须引入色散补偿模块,以解决积累的色散问题。

当 EDFA 放大器将光信号放大并在多个信道同时传输时,会产生各种非线性效应。其中四波混频对 DWDM 系统的影响最大<sup>[21]</sup>。当三个不同频率的光波在光纤中传播时,它们之间的相互作用会产生新的光频率分量  $P_{\text{(FWM)}}$ ,称为四波混频光。四波混频光的功率与入射光功率  $P_1$ 、色散  $D$ 、波分复用的波长间隔  $\Delta\lambda$ 、光纤的有效面积  $A_{\text{eff}}$  的关系为

$$P_{\text{(FWM)}} \propto P_1 / (D \times \Delta\lambda \times A_{\text{eff}}). \quad (2)$$

当  $P_1$ 、 $A_{\text{eff}}$  一定时,调整  $\Delta\lambda$  使信道间隔不均匀分布,从而使四波混频无法达到相位匹配,可以在一定程度上减小四波混频效应,但光纤传输波段的利用率会有所下降;当  $P_1$ 、 $\Delta\lambda$  一定时,提高  $A_{\text{eff}}$  并保证具有一定的色散  $D$  可以有效减小四波混频效应;增大有效面积,可以降低光纤中传输信号的光功率密度,从而减小四波混频效应<sup>[22]</sup>。

因此,使用大有效面积和低色散光纤是减小 DWDM 系统中四波混频效应的最佳方法。同时,对现有 G.652 光纤线路进行升级扩容,将 G.652 光纤与 G.655 光纤混合使用,可以在降低光纤色散的同时减小四波混频的影响<sup>[23]</sup>。

### 2.2 光纤波导结构设计

光纤的波导结构决定了其光学性能,尤其是光纤剖面结构中各层之间的相对折射率和宽度决定了光纤的有效面积  $A_{\text{eff}}$ 、波导色散  $D_w$  和模场直径  $2\omega$  等重要参数。根据研究结果,非零色散位移光纤的重要参数——有效面积的计算公式为

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \frac{\int_0^{\infty} \varphi^2 r dr^2}{\int_0^{\infty} \varphi^4 r dr} \quad (3)$$

式中: $\varphi$  为光纤中的模场分布; $r$  是到光纤中心的距离。在弱波导近似条件下,光纤的波导色散近似为

$$D_w = \frac{\lambda}{2\pi^2 c} \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{\lambda}{n_1 \omega^2} \right), \quad (4)$$

式中: $\lambda$  是光纤的工作波长,单位为 nm; $\omega$  是用 Peterman II 方法度量的模场半径,单位  $\mu\text{m}$ , $2\omega$  即为模场直径; $c$  为光速; $n_1$  为光纤纤芯折射率。光纤中的波导色散由纤芯结构包层导向结构中的模场分布控制。根据研究结果,模场半径  $\omega$  的计算公式可表示为

$$\omega^2 = \frac{2 \int_0^\infty \varphi^2 r dr}{\int_0^\infty \left[ \frac{d\varphi}{dr} \right]^2 r dr} \quad (5)$$

根据推导,单模光纤的有效面积  $A_{\text{eff}}^{[22]}$  可以简单地表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\pi k \omega^2}{4}, \quad (6)$$

式中:  $k$  是常数。因此,光纤的模场半径  $\omega$  决定了光纤的有效面积  $A_{\text{eff}}$ ,通过增加光纤的模场半径  $\omega$  可以增大光纤的有效面积  $A_{\text{eff}}$ 。光纤的模场分布由纤芯的折射率分布决定,即由折射率分布决定。将光纤的零色散波长平移到 1550 nm 同时提高模场直径(MFD)

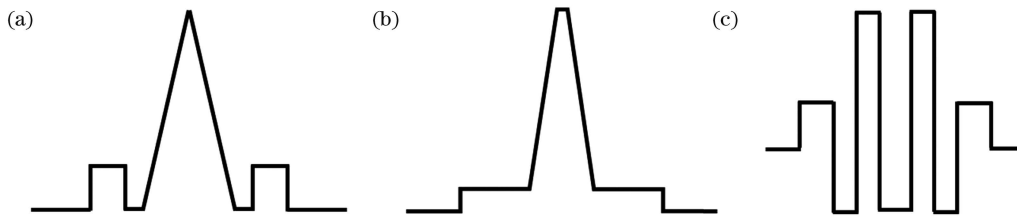


图 1 几种非零色散位移光纤的折射率剖面示意图。(a)三角芯+环型;(b)基座芯型;(c)双环型

Fig. 1 Refractive index profile schematics of several non-zero dispersion shifted fibers. (a) Triangle core + ring; (b) pedestal core; (c) dual-ring

根据光纤传输原理,与普通 G. 652 光纤相比, G. 655 光纤需要通过提高  $\Delta n_1$  来增大波导色散  $D_w$ , 进而使零色散波长平移至 1500 nm 附近。但是,增大  $\Delta n_1$  必然会减小光纤芯层半径。芯层半径过小会导致色散增加以及高功率密度引起的非线性效应。业内大多采用三角芯+环型的剖面图结构,即式(7)中的折射率分布指数  $g=1$ 。因此,本次实验选择的剖面图结构是具有中心凹陷的三角芯+环型结构,如图 2 所示。仿真结果表明,通过调节第一芯层的掺锗浓度控制芯层折射率,同时调节第二芯层和第三芯层的掺锗浓度和宽度,可以形成新型剖面波导结构,进而实现大有效面积、波长色散、抗弯曲性能三者的平衡。图 2 给出了 2 种剖面模型,  $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2$ 、 $\Delta n_3$  分别为第一芯层、第二芯层和第三芯层的相对折射率,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分别为光纤中心到各层折射率中值半径(即各芯层半径)。4 种剖面图结构的区别在于:

- a) 剖面图 I 采用三角芯剖面结构的第一芯层和环型结构的第三芯层;
- b) 剖面图 II 与剖面图 I 类似,通过适当降低第一芯层和第三芯层的掺锗浓度,同时增大第二芯层的宽度  $R_2 - R_1$  和第三芯层的宽度  $R_3 - R_2$  来增大模场直径;
- c) 剖面图 III 是基于剖面图 II 设计而成的,通过进一步降低第一芯层和第三芯层的掺锗浓度,同时增加第二芯层的宽度  $R_2 - R_1$  和第三芯层的宽度  $R_3 - R_2$  来增大模场直径;
- d) 剖面图 IV 是基于剖面图 III 设计而成的,通过进

的关键是选择合适的光纤折射率分布。光纤的折射率分布可以表示为

$$\Delta(r) = \left\{ 1 - \left[ \frac{|r - r_0|}{(r_1 - r_0)} \right]^g \right\} \Delta(r_0), \quad (7)$$

式中:  $g$  表示折射率分布指数;  $r$  是到光纤中心的距离;  $r_0$  是相对折射率最大的点到光纤中心的距离;  $r_1$  是相对折射率为 0 的点到光纤中心的距离。  $g$  不同,折射率的分布就会不同。

根据芯层结构形态,业内制备非零色散位移光纤通常使用的折射率剖面图结构基本可分为三角芯+环型、基座型、双环型<sup>[24]</sup>,如图 1 所示。但是,目前业内采用最普遍的是三角芯+环型(LEAF)和基座型(TrueWave)两种。

一步降低第一芯层和第三芯层的掺锗浓度,同时减小第二芯层的宽度  $R_2 - R_1$  和第三芯层的宽度  $R_3 - R_2$  来控制模场直径。

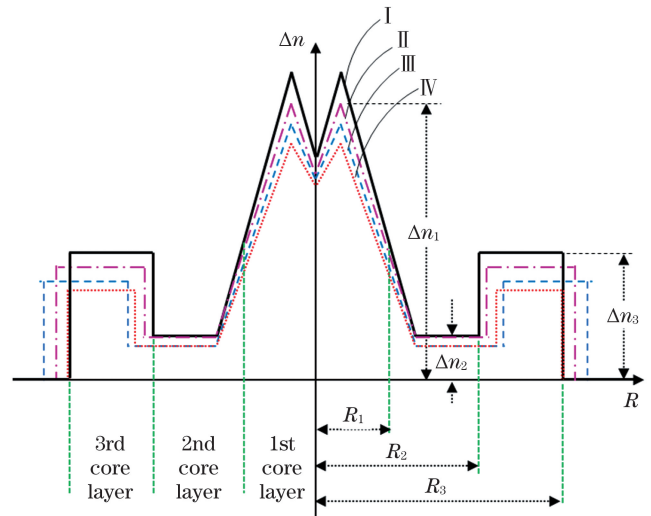


图 2 不同折射率剖面示意图

Fig. 2 Schematic of different refractive index profiles

### 3 实验部分

目前,国内鲜有采用外部气相沉积(OVD)工艺<sup>[25]</sup>制备 G. 655. D 光纤的报道,国内制备 G. 655 光纤一般采用等离子体化学气相沉积(PCVD)工艺<sup>[26-27]</sup>或者改进的化学气相沉积(MCVD)工艺<sup>[28-29]</sup>。这两种工艺可以精确控制折射率剖面。实际上,OVD 工艺同样也可以精确控制折射率剖面,而且该工艺适合制造各

种波导结构的光纤<sup>[30]</sup>, 制备过程如图 3 所示。OVD 工艺制备光棒的过程如下:  $\text{SiCl}_4$  和  $\text{GeCl}_4$  等反应物与氧气混合后在灯头表面发生水解反应, 生成  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{GeO}_2$  细微颗粒; 这些颗粒通过火焰导向一根往复运动的靶棒, 逐渐形成粉末疏松体, 再经过烧结、延伸、外包等工序制成预制棒。OVD 工艺包括粉末沉积、整体脱水和烧结过程, 其中: 采用较低温度烧结可以避免  $\text{GeO}_2$  等掺杂材料的挥发; 脱水过程去除羟基, 不会出现管内法制棒工艺中塌缩带来的 1383 nm 羟基吸收峰问题。现代 OVD 芯棒沉积速率已经从 80 年代的 1.3 ~ 4 g/min<sup>[31]</sup> 提升到 12 ~ 15 g/min, 芯棒质量达到 12 ~ 16 kg, 外径为 8 ~ 10 cm, 长度为 80 cm。芯层沉积层数达到数千层。经过纵向延伸后, 每根芯棒可纵延为数根, 光纤的纵向均匀性非常好。

采用 OVD 工艺制作光纤的芯层、内包层和外包层, 通过控制各层的掺杂浓度、厚度等, 对光纤的有效面积  $A_{\text{eff}}$ 、零色散斜率  $S_0$ 、零色散波长  $\lambda_0$  等参数进行优化, 研制出了新型大有效面积非零色散位移光纤。对该光纤的光学特性和传输性能等进行评估, 评估结果显示: 该光纤在 1550 nm 和 1625 nm 波长处的衰减典型值分别是 0.195 dB/km 和 0.203 dB/km, 有效面积的典型值为  $72 \mu\text{m}^2$ ; 该光纤具有良好的抗弯曲性能, 达到并超过了 ITU-T G. 655. D 的宏弯水平。评估结果证实了这种新型光纤可以用于高速率、大容量、

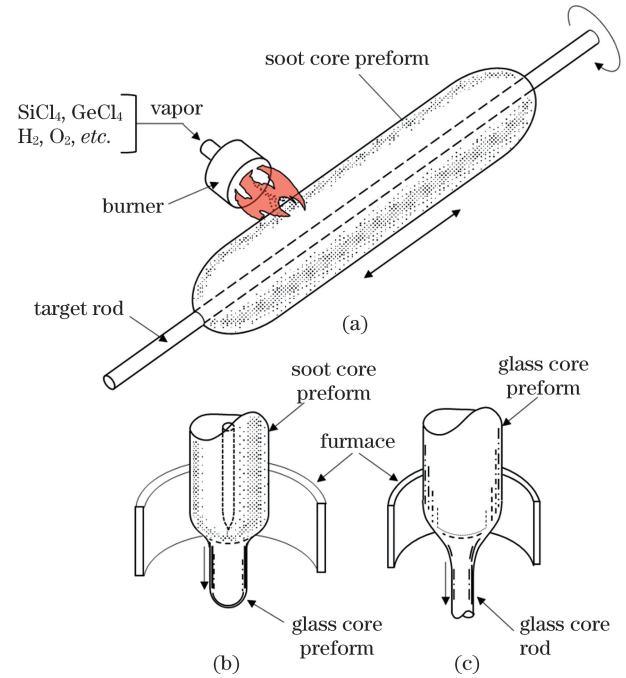


图 3 光棒的 OVD 制备过程。(a) 疏松层沉积; (b) 烧结固化; (c) 芯棒延伸

Fig. 3 Preparation of preform with outside vapor deposition (OVD) technology. (a) Soot deposition; (b) sintering; (c) elongation

长距离光纤通信系统。表 1 列出了具有不同波导结构的光纤预制棒拉制而成的光纤的折射率剖面参数。

表 1 不同光纤的波导结构参数

Table 1 Waveguide structural parameter of different fibers

Sample	Profile type	$R_1/\mu\text{m}$	$\Delta n_1/\%$	$R_2/\mu\text{m}$	$\Delta n_2/\%$	$R_3/\mu\text{m}$	$\Delta n_3/\%$
1	I	2.3	0.59	5.2	0.05	8.2	0.17
2	II	2.3	0.54	5.3	0.05	8.3	0.16
3	III	2.3	0.53	5.7	0.04	8.6	0.15
4	IV	2.3	0.52	5.6	0.04	8.2	0.14

Notes:  $R_1$ ,  $R_2$ , and  $R_3$  represent radius of 1st, 2nd, 3th core layers, respectively;  $\Delta n_1$ ,  $\Delta n_2$ , and  $\Delta n_3$  represent refractive index difference (RID) of 1st, 2nd, and 3th core layers, respectively.

## 4 结果与讨论

### 4.1 折射率剖面结构对有效面积的影响

将具有不同折射率剖面结构的光纤预制棒进行拉丝与测试分析, 实验结果如表 2 所示。对比光纤样品 1 和样品 2 可以发现, 样品 2 的衰减减小, 有效面积  $A_{\text{eff}}$  增大。这主要是由于减小芯层的掺锗浓度降低了

第一芯层的相对折射率  $\Delta n_1$  和第三芯层的相对折射率  $\Delta n_3$ , 从而增加了模场直径, 同时降低了光纤的色散。样品 3 的色散相比样品 2 进一步降低, 这主要是由于相对折射率降低的同时增加了第二芯层的厚度。对比样品 3 和样品 4 可以发现, 样品 4 的芯层厚度比较适宜, MFD 更佳, 色散和截止波长  $\lambda_c$  在较为合适的范围内。

表 2 不同折射率设计得到的光纤参数

Table 2 Fiber parameters based on different refractive index profiles

Sample	Profile type	MFD / $\mu\text{m}$	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	$\lambda_c/\text{nm}$	$\alpha_{1550}/(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$	$\alpha_{1625}/(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$	$D_{1530}/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	$D_{1565}/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	$D_{1625}/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	$\lambda_0/\text{nm}$
1	I	8.90	62.2	1406	0.219	0.220	3.41	6.46	11.51	1438
2	II	9.31	68.0	1211	0.197	0.210	1.50	4.18	8.74	1511
3	III	9.92	77.2	1222	0.194	0.210	2.40	5.44	10.46	1503
4	IV	9.62	72.0	1217	0.195	0.205	2.05	4.84	9.57	1505

Notes: MFD represents mold field diameter;  $\alpha_{1550}$  and  $\alpha_{1625}$  represent attenuation value at wavelengths of 1550 nm and 1625 nm, respectively;  $D_{1530}$ ,  $D_{1565}$ , and  $D_{1625}$  represent dispersion at wavelengths of 1530, 1565, and 1625 nm, respectively.

由图 4 所示的样品 1 的折射率分布 I 的剖面图及表 2 可知,由于折射率偏高,MFD 仅为  $8.90 \mu\text{m}$ ,同时  $1550 \text{ nm}$  波长处的衰减偏高(达到了  $0.219 \text{ dB/km}$ ),  $A_{\text{eff}}$  偏小(为  $62.2 \mu\text{m}^2$ ),截止波长  $\lambda_c$  偏高(达到  $1406 \text{ nm}$ ),零色散波长  $\lambda_0$  偏向短波长,  $1530 \sim 1625 \text{ nm}$  波段的色散值偏大。

样品 2 相比样品 1 进一步降低了第一芯层的相对折射率  $\Delta n_1$  和第三芯层的相对折射率  $\Delta n_3$ ,增大了第二芯层的厚度  $R_2 - R_1$  和第三芯层的厚度  $R_3 - R_2$ 。测试结果显示,样品 2 的 MFD 增大至  $9.31 \mu\text{m}$ ,  $A_{\text{eff}}$  达到  $68.0 \mu\text{m}^2$ ,  $1550 \text{ nm}$  波长处的衰减偏下降至  $0.197 \text{ dB/km}$ ,截止波长  $\lambda_c$  缩短至  $1211 \text{ nm}$ 。可见,降低折射率可以增大光纤的 MFD 并减小其衰减偏。

样品 3 在样品 2 的基础上进一步降低了第一芯层的相对折射率  $\Delta n_1$  和第三芯层的相对折射率  $\Delta n_3$ ,并在一定程度上增加了第二芯层的厚度  $R_2 - R_1$  和第三芯层的厚度  $R_3 - R_2$ 。测试结果显示,样品 3 的 MFD 达到了  $9.92 \mu\text{m}$ ,  $A_{\text{eff}}$  达到  $77.2 \mu\text{m}^2$ ,  $1550 \text{ nm}$  波长处的衰减偏降低到  $0.194 \text{ dB/km}$ ,截止波长  $\lambda_c$  降低到  $1222 \text{ nm}$ 。

样品 4 在样品 3 的基础上适当减小了第一芯层的相对折射率  $\Delta n_1$  和第三芯层的相对折射率  $\Delta n_3$ ,同时减小了第三芯层的厚度  $R_3 - R_2$ 。从测试结果来看,其 MFD 达到了  $9.62 \mu\text{m}$ ,  $A_{\text{eff}}$  达到  $72.0 \mu\text{m}^2$ ,  $1550 \text{ nm}$  波长处的衰减偏维持在  $0.195 \text{ dB/km}$ ,截止波长  $\lambda_c$  控

表 3 芯层半径对光纤性能的影响

Table 3 Influence of core radius on optical fiber performance

Sample	$R_1/\mu\text{m}$	$R_2/\mu\text{m}$	$R_3/\mu\text{m}$	MFD / $\mu\text{m}$	$\lambda_c/\text{nm}$	$D_{1550}/$ ( $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ )	$\lambda_0/\text{nm}$	$S_0/$ ( $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$ )	$\alpha_{1550}/$ ( $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ )
1	2.25	5.71	8.30	9.53	1201	3.37	1512	0.079	0.195
2	2.26	5.76	8.36	9.51	1233	3.43	1511	0.078	0.196
3	2.28	5.80	8.42	9.45	1260	3.55	1508	0.076	0.198
4	2.32	5.93	8.61	9.31	1298	3.90	1497	0.071	0.206
5	2.37	6.09	8.85	9.13	1338	4.34	1483	0.065	0.208

由图 5 可知,光纤芯层半径对于 MFD、零色散斜率  $S_0$  和零色散波长  $\lambda_0$  都有重要影响。在一定范围内,第一芯层半径的增大对于零色散斜率  $S_0$  的降低、零色散波长  $\lambda_0$  的减小、截止波长  $\lambda_c$  的增大以及 MFD 的快速减小。当芯径较小时,光纤各项性能的变化趋势较缓;当芯径较大时,芯径的增加会导致零色散波长  $\lambda_0$  快速减小和色散  $D_{1550}$  显著增大。

### 4.3 光纤性能测试与对比分析

图 6 给出的是利用 OVD 工艺制备的非零色散位移光纤的连续光谱损耗、色散特性和宏弯损耗测试结果。图 6(a)是采用 PK2300AG 测试得到的谱损耗曲线图,可见,  $1383$ 、 $1550$ 、 $1625 \text{ nm}$  波长处的衰减偏分别为  $0.296 \text{ dB/km}$ 、 $0.195 \text{ dB/km}$ 、 $0.203 \text{ dB/km}$ 。图 6(b)是采用 PK2880 测试得到的波长色散图,其中虚线是 G. 655. D 光纤标准中的色散最大值和最小值,实线为

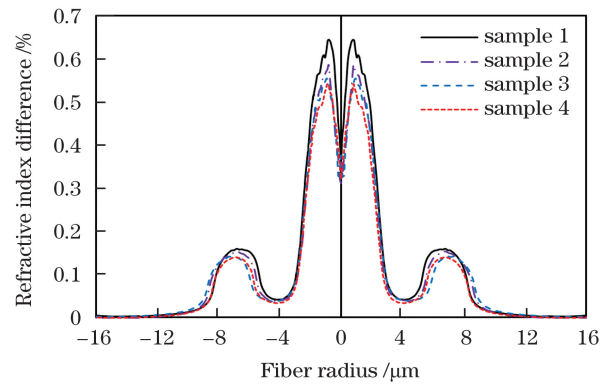


图 4 样品 1~4 的折射率剖面图

Fig. 4 Refractive index profile of samples 1-4

制在  $1217 \text{ nm}$ 。

### 4.2 光纤芯层半径对光纤传输性能的影响

选取  $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2$ 、 $\Delta n_3$  分别为  $0.54\%$ 、 $0.05\%$ 、 $0.16\%$  的 5 根芯棒进行拉丝测试,测试结果如表 3 所示。对比样品 1~5 可以发现:随着芯层半径 ( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ) 逐渐减小, MFD 逐渐增大,零色散波长  $\lambda_0$  缓慢增大,零色散斜率  $S_0$  也缓慢上升,而截止波长  $\lambda_c$  以及  $1550 \text{ nm}$  波长下的色散  $D_{1550}$  和衰减偏  $\alpha_{1550}$  逐渐减小。这主要是因为光纤第三芯层对光的约束作用使得光能量随着芯层半径减小更多地分布到第二、第三芯层中,从而使得 MFD 增大,同时使得截止波长  $\lambda_c$  发生轻微变化,如图 5 所示。

实验中采用 OVD 工艺制备的非零色散位移光纤在各波长下的色散值。将所制备的光纤以  $25 \text{ mm}$  为半径绕 100 圈,测试其宏弯损耗,测试结果如图 6(c)所示。测试结果显示,  $1550 \text{ nm}$  和  $1625 \text{ nm}$  波长处的附加损耗分别低于  $0.027 \text{ dB}$  和  $0.045 \text{ dB}$ 。这一结果说明本实验制备的光纤具有良好的抗弯曲性能。

采用 OVD 工艺制备的非零色散位移光纤具有优异的色散纵向均匀性,模场直径和截止波长均具有较好的一致性。通过拉制获得了  $24 \text{ km G. 655. D}$  光纤,其在  $1550 \text{ nm}$  处的衰减偏低至  $0.195 \text{ dB/km}$ ,在  $1550 \text{ nm}$  处的 MFD 为  $9.6 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ,光纤截止波长小于  $1260 \text{ nm}$ ,零色散斜率达到了  $0.079 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ,在  $1530 \sim 1625 \text{ nm}$  波长范围的色散值为  $1.6 \sim 9.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,零色散波长在  $1480 \sim 1510 \text{ nm}$  波段,可适用于 C+L 波段的 WDM 系统。

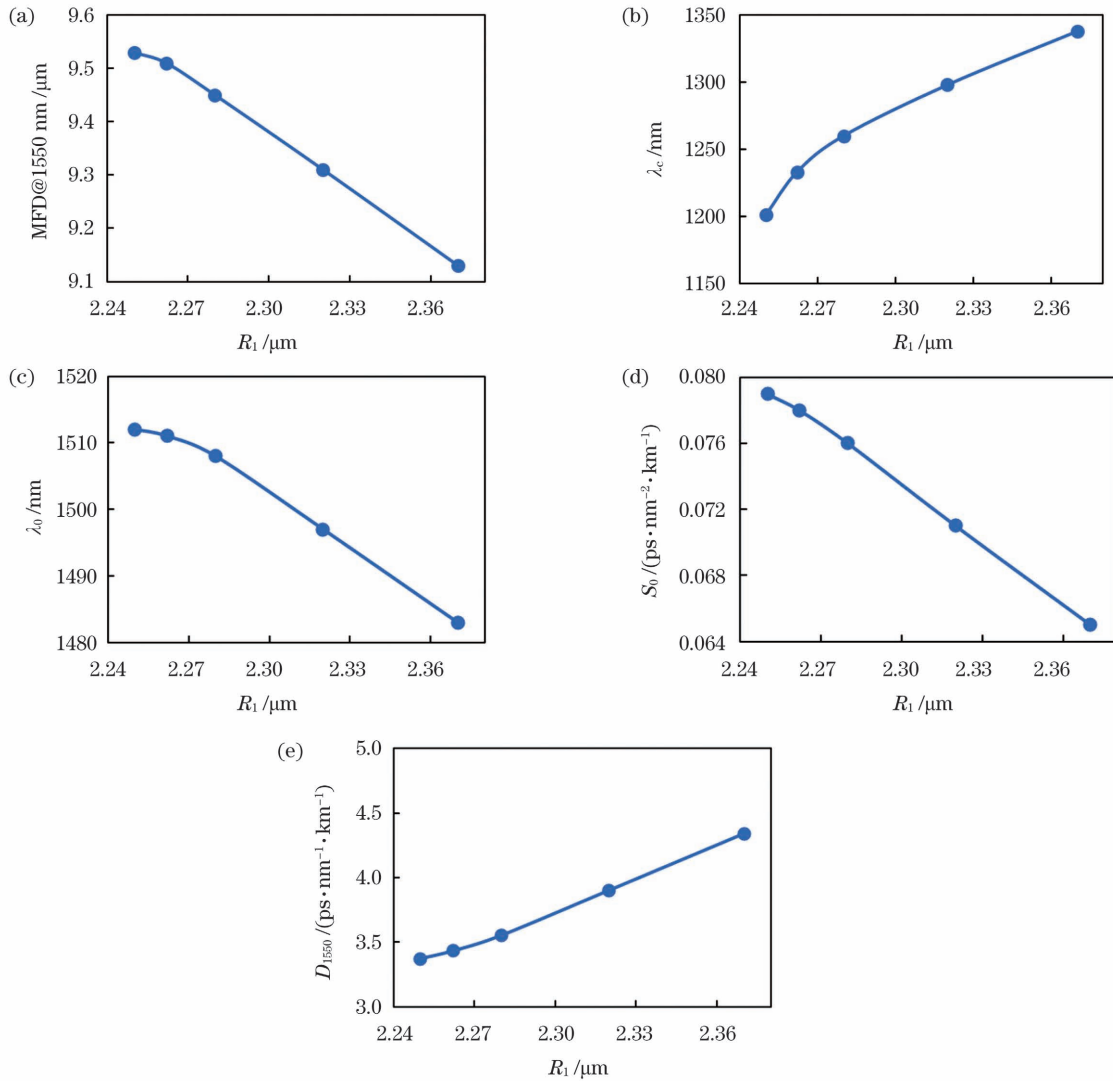


图 5 第一芯层半径  $R_1$  对光纤各项性能的影响。(a)  $R_1$  对 MFD 的影响;(b)  $R_1$  对  $\lambda_c$  的影响;(c)  $R_1$  对  $\lambda_0$  的影响;(d)  $R_1$  对  $S_0$  的影响;(e)  $R_1$  对  $D_{1550}$  的影响

Fig 5 Effects of 1st core radius  $R_1$  on optical fiber performance. (a) Effect of  $R_1$  on MFD; (b) effect of  $R_1$  on  $\lambda_c$ ; (c) effect of  $R_1$  on  $\lambda_0$ ; (d) effect of  $R_1$  on  $S_0$ ; (e) effect of  $R_1$  on  $D_{1550}$

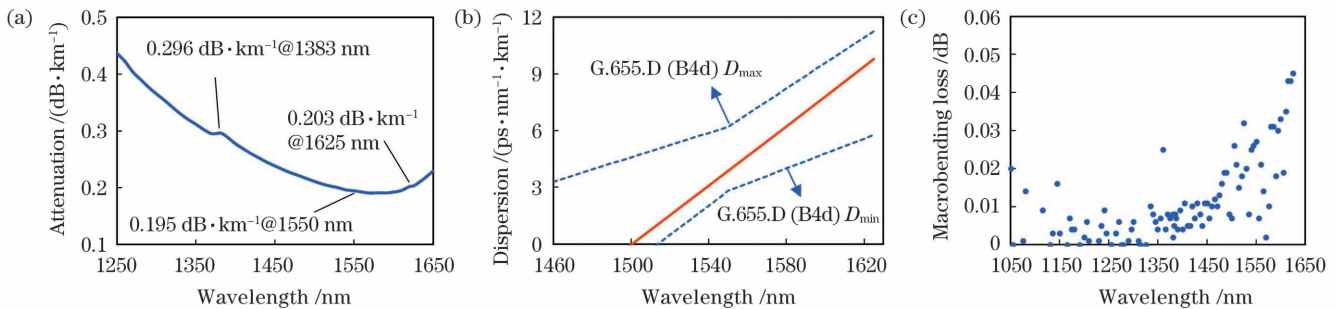


图 6 采用 OVD 工艺制备的光纤的测试结果。(a) 谱损耗曲线;(b) 色散曲线;(c) 宏弯损耗( $R=25 \text{ mm}$ , 100 turns)

Fig. 6 Testing results of fiber prepared with outside vapor deposition technology. (a) Spectrum loss curve; (b) dispersion curve; (c) macrobending loss ( $R=25 \text{ mm}$ , 100 turns)

从表 4 所示的指标对比中不难发现,采用 OVD 工艺制备的光纤在衰减、色散、模场直径、有效面积和零色散波长等指标方面等同甚至优于其他光纤,尤其是其在 1383 nm 波长下的衰减值低至 0.296 dB/km。本次实验通过 OVD 工艺精确控制各层的掺杂浓

度、沉积厚度来优化设计光纤的有效面积  $A_{\text{eff}}$ 、零色散斜率  $S_0$  和零色散波长  $\lambda_0$  等参数,研制出了新型大有效面积非零色散位移光纤。对该光纤的光学性能、几何参数、熔接性能、机械强度和色散等进行综合评估,评估结果证实了这种新型大有效面积非零色散位移光

表 4 采用 OVD 工艺制备的光纤与其他非零色散位移光纤的指标对比

Table 4 Parameters comparison between the fiber prepared with outside vapor deposition technology and other non-zero dispersion shifted fibers

Fiber	Process	$D /(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$		$\alpha /(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$			
		1530–1565 nm	1565–1625 nm	1310 nm	1383 nm	1550 nm	1625 nm
Our fiber	OVD	1.5–6.0	4.0–11.2	0.34	0.296	0.195	0.203
TrueWave LA	MCVD	2.0–6.0	4.5–11.2		0.4	0.19	0.2
LEAF	OVD	2.0–6.0	5.0–11.2		0.33	0.19	0.2
LAPOSH <sup>[32]</sup>	PCVD	2.0–6.0	4.5–11.2	0.354	0.4	0.197	0.212

Fiber	MFD@1550 nm/ $\mu\text{m}$	$A_{\text{eff}}@1550 \text{ nm}/\mu\text{m}^2$	$\lambda_0/\text{nm}$	$S_0/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1})$	$\lambda_c/\text{nm}$
Our fiber	9.6±0.1	72	1502	0.079	1200
TrueWave LA	9.6±0.4	72	1527.3	0.0767	≤ 1450
LEAF	9.6±0.4	72	1500	0.078	1150
LAPOSH <sup>[32]</sup>	9.6±0.5	72	1500	0.078	1530

纤可以用于高速率、大容量、长距离新一代光纤通信系统。

## 5 结 论

本团队设计了一种具有中心凹陷的三角芯+环型结构的非零色散位移光纤,并通过 OVD 工艺实现了光纤的制备。实验结果表明,具有中心凹陷的三角芯结构有助于降低光纤中心的光功率密度和传输衰减,而环型结构有助于增大模场直径和提高光纤的抗弯曲性能。当芯层半径一定时,控制相对折射率  $\Delta n_1$  在 0.5%~0.55% 范围、 $\Delta n_2$  在 0.04%~0.06% 范围、 $\Delta n_3$  在 0.14%~0.16% 范围,可以增大模场直径、减小传输衰减、缩短截止波长、降低光纤的色散。当相对折射率一定时,适当减小第一芯层的半径  $R_1$ ,并控制  $R_1:R_2:R_3=1:2.5:3.8$ ,可以缩短截止波长、减小光纤衰减、增大模场直径、减小 1550 nm 波长下的色散、增大零色散波长和零色散斜率。

实验结果表明,此种新型剖面结构光纤的有效面积为  $72 \mu\text{m}^2$ ,在 1530~1625 nm 波长范围的色散值为 1.6~9.5 ps/(nm·km),在 1550、1383、1625 nm 波长处的衰减分别为 0.195 dB/km、0.296 dB/km、0.203 dB/km,优于 ITU-T G. 655. D 的水平,是一种新型的大有效面积非零色散位移光纤。整体而言,利用此新设计的剖面结构,可以实现零色散波长的平移、较低的宏弯损耗以及大的有效面积,适用于 C+L 波段的 DWDM 应用,在长距离光纤通信中对四波混频、交叉相位调制等非线性效应具有较好的抑制作用,减少了色散管理成本,具有非常重要的实际应用价值。

## 参 考 文 献

[1] Qin H Q, Xiao X S. Influence of the nonlinear propagation effect on the optical signal-to-noise ratio of 400G optical fiber communication systems[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15

(3): 030604.  
 [2] 陈祖峰,左发兴,胡亮,等.基于双向时分复用同纤同波传输的时间同步系统[J].中国激光,2021,48(9):0906005.  
 Chen Z F, Zuo F X, Hu L, et al. Time synchronization system based on bidirectional time-division multiplexing transmission over single fiber with same wavelength[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906005.  
 [3] 胡进坤,郭晓洁,李建平,等.基于深度学习的多模光纤通信系统的模式与模群识别[J].光学学报,2022,42(4):0406004.  
 Hu J K, Guo X J, Li J P, et al. Deep learning-based recognition of modes and mode groups in multimode optical fiber communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0406004.  
 [4] 涂佳静,李朝晖.空分复用光纤研究综述[J].光学学报,2021,41(1):0106003.  
 Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003.  
 [5] Mears R J, Reekie L, Jauncey I M, et al. High-gain rare-earth-doped fiber amplifier at 1.54  $\mu\text{m}$  [C] // Optical Fiber Communication, January 19, 1987, Reno, Nevada, Washington, D.C.: OSA, 1987: W12.  
 [6] Desurvire E. Erbium-doped fiber amplifiers for new generations of optical communication systems [J]. Optics and Photonics News, 1991, 2(1): 6.  
 [7] Giles C R, Desurvire E, Talman J R, et al. 2-Gbit/s signal amplification at  $\lambda = 1.53 \mu\text{m}$  in an erbium-doped single-mode fiber amplifier [J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(4): 651-656.  
 [8] Science Business. Four innovations shortlisted for 2008 millennium technology prize [EB/OL]. (2008-04-16) [2021-05-04]. <https://sciencebusiness.net/news/70751/Four-innovations-shortlisted-for-2008-Millennium-Technology-Prize>.  
 [9] Chraplyvy A R, Gnauck A H, Tkach R W, et al. 160-Gb/s (8 × 20 Gb/s WDM) 300-km transmission with 50-km amplifier spacing and span-by-span dispersion reversal [C] // Optical Fiber Communication Conference 1994, February 20, 1994, San Jose, California, USA. Washington, D.C.: OSA, 1994: PD19.  
 [10] Brackett C A. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(6): 948-964.  
 [11] Forghieri F, Tkach R W, Chraplyvy A R. Fiber nonlinearities and their impact on transmission systems [M] // Kaminow I P, Koch T L. Optical fiber telecommunications IIIA. Amsterdam: Elsevier, 1997: 196-264.

- [12] ITU-T Publications. Characteristics of dispersion shifted optical fiber cable: ITU-T Recommendation G. 653[S]. Geneva: ITU-T.
- [13] Chraplyvy A R, Tkach R W. Optical fiber for wavelength division multiplexing: US6011892[P]. 2000-01-04.
- [14] Liu Y M, Antos A J, Newhouse M A. Large effective area dispersion-shifted fibers with dual-ring index profiles [C] // Optical Fiber Communications, OFC, February 25-March 1, 1996, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 1996: 165-166.
- [15] 张成良. 一种新型光纤: G.655 光纤[J]. 电信技术, 1999(3): 12-14.  
Zhang C L. A new type of optical fiber—G.655 optical fiber[J]. Telecommunications Technology, 1999(3): 12-14.
- [16] ITU-T Publications. Characteristics of a non-zero dispersion shifted optical fiber cable: ITU-T Recommendation G. 655[S]. Geneva: ITU-T.
- [17] 马子洋, 吴琼琼, 李启华, 等. 超密集波分复用无源光网络的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500006.  
Ma Z Y, Wu Q Q, Li Q H, et al. Ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500006.
- [18] 李进延, 李诗愈, 李海清, 等. S-C-L 三波段传输新型单模光纤的设计和研制[J]. 光通信研究, 2004(2): 45-47.  
Li J Y, Li S Y, Li H Q, et al. Design of new S-C-L band single mode fiber[J]. Study on Communications, 2004(2): 45-47.
- [19] ITU-T Publications. Characteristics of a fiber and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport: ITU-T Recommendation G.656[S]. Geneva: ITU-T.
- [20] 门巴耶夫, 沙伊纳. 光纤通信技术[M]. 徐公权, 段鲲, 廖光裕, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
Mynbaev D K, Scheiner L. Fiber-optic communications technology[M]. Xu G Q, Duan K, Liao G Y, et al., Transl. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [21] 毛昕蓉, 寇召飞, 张建华. 抑制光纤传输中四波混频效应的两种改进方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 080601.  
Mao X R, Kou Z F, Zhang J H. Two improved methods of suppression four wave mixing effect in optical fiber transmission [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 080601.
- [22] 龚岩栋, 简水生. 大有效面积光纤的研究[J]. 光通信技术, 1999, 23(2): 126-130.  
Gong Y D, Jian S S. Research on large effective area fiber[J]. Optical Communication Technology, 1999, 23(2): 126-130.
- [23] 沈建华, 邵钟浩. 四波混频对 DWDM 系统的影响[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2001(4): 6-9.  
Shen J H, Shao Z H. Effect of four-wave mixing on DWDM systems [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2001(4): 6-9.
- [24] Nouchi P. Maximum effective area for non-zero dispersion-shifted fiber [C] // OFC '98. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Technical Digest. Conference Edition. 1998 OSA Technical Digest Series Vol. 2 (IEEE Cat. No. 98CH36177), February 22-27, 1998, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 1998: 303-304.
- [25] Vandewoestine R V, Morrow A J. Developments in optical waveguide fabrication by the outside vapor deposition process [J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(8): 1020-1025.
- [26] 靳伟, 鲍海泓, 齐云, 等. 微纳结构光纤光谱学[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0130002.  
Jin W, Bao H H, Qi Y, et al. Micro/nano-structured optical fiber laser spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0130002.
- [27] Wang T J, Zhang M. Study on PMD of large effective area G655 fiber [C] // 49th International Wire and Cable Symposium. IWCS. Wuhan: [s.n.], 2000: 376-379.
- [28] 叶慧琪, 黄凯, 肖东, 等. 光纤扰模技术实验研究[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0606001.  
Ye H Q, Huang K, Xiao D, et al. Experimental investigation of fiber scrambling [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0606001.
- [29] 王迪, 应康, 李文屏, 等. 多相移光纤光栅滤波器的设计与制备[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2206002.  
Wang D, Ying K, Li W P, et al. Design and inscription of optical filters based on multi-phase-shifted fiber Bragg gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2206002.
- [30] Croft T D, Ritter J E, Bhagavatula V A. Low-loss dispersion-shifted single-mode fiber manufactured by the OVD process[J]. Journal of Lightwave Technology, 1985, 3(5): 931-934.
- [31] Blankenship M G, Deneka C W. The outside vapor deposition method of fabricating optical waveguide fibers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(10): 1418-1423.
- [32] 张树强, 韩庆荣, 曹宇青, 等. 长飞 G.655 光纤系列产品性能特点与比较[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2003(6): 8-11.  
Zhang S Q, Han Q R, Cao Y Q, et al. The performance and comparison of YOFC G.655 serial products[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2003(6): 8-11.

## Design and Fabrication of Novel Large Effective Area Non-Zero Dispersion-Shifted Optical Fiber Based on Outside Vapor Deposition

Zha Jianjiang<sup>1</sup>, Chen Qiang<sup>1</sup>, Lan Xingling<sup>2</sup>, Zhang Jun<sup>2</sup>, Wen Jianxiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Shandong Futong Optelecom Science & Technology Co., Ltd., Jinan 250119, Shandong, China;

<sup>2</sup> Chengdu Futong Optical Communication Technologies Co., Ltd., Chengdu 611731, Sichuan, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China

### Abstract

**Objective** Transmission networks are facing explosive growth in data traffic owing to the rapid developments in data centers and cloud computing services. Optical networks with high speeds, large capacities, and high-cost performances are now in urgent demand. Telecom operators and equipment manufacturers are actively promoting the application and deployment of 400G technologies. To further develop and utilize the transmission capacity of a single fiber and approach the limit of Shannon's theorem, the next research direction of optical transmission is prioritizing further improvements in the capacity of a single channel, compressing the transmission channel interval, and increasing the number of channels. However, increasing the number of multiplexed channels leads to a serious nonlinear effect, which is inversely



proportional to the effective area of the fiber. Therefore, the transmission bandwidth and nonlinear effect of the fiber can be improved and reduced, respectively, by increasing the effective area of the fiber. Consequently, the development of next-generation G.655 and G.656 fibers, particularly for broadband transmission DWDM systems, has important practical application value.

**Methods** In this experiment, outside vapor deposition (OVD) was used to fabricate a non-zero dispersion-shifted fiber (Fig. 3). According to the transmission principle of optical fibers, G.655 must increase the refractive index difference (RID) of the 1st core layer  $\Delta n_1$  to increase the waveguide dispersion and shift the zero dispersion wavelength to 1500 nm, but the increase in  $\Delta n_1$  leads to a decrease in the fiber core radius. However, a core radius that is extremely small results in an increase in the dispersion and nonlinear effects caused by high power density. Therefore, the profile structure selected in this experiment is a triangular core and ring structure with a central depression (Fig. 2). First, by decreasing the RID and gradually increasing the thickness of the 2nd/3rd core radii, the mold field diameter (MFD), zero-dispersion wavelength, and other parameters of the optical fiber were measured and analyzed based on this structure (Table 1). Second, in Table 3, by increasing the 1st core radius alone, the influences of the 1st core radius on the optical fiber parameters were investigated.

**Results and Discussions** This study investigates optical fibers' optical properties, geometric parameters, and dispersion performance by varying the refractive index profile structure and core radius (Fig. 4). The refractive index profile structure can significantly affect the cutoff wavelength, effective area, and dispersion values. In the optimized profile-type study, when the core radius of  $R_1$ ,  $R_2$ , and  $R_3$  are approximately 2.3, 5.6, and 8.2  $\mu\text{m}$  and the RID of each layer is 0.52%, 0.04%, and 0.14%, respectively, the MFD can reach 9.6  $\mu\text{m}$ , and the dispersion value ranges from 1.6 to 9.5  $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  in the C + L band. Furthermore, the results indicate that the core radius of the fiber has an important influence on the MFD and zero-dispersion wavelength (Table 3). The decrease in the 1st core radius is proven beneficial for enlarging the MFD, shortening the cutoff wavelength, extending the zero-dispersion wavelength, increasing the zero-dispersion slope, and lowering the dispersion (Fig. 5). The spectral loss diagram, dispersion curve, and macrobending loss diagram of the designed optical fibers were comprehensively evaluated (Fig. 6). The test results indicate that the attenuation values are 0.296 dB/km, 0.195 dB/km, and 0.203 dB/km at 1383, 1550, and 1625 nm, respectively, and the dispersion is within the standard of the G.655.D fiber. The macrobending losses at 1550 and 1625 nm are lower than 0.027 dB and 0.045 dB, respectively, demonstrating a good bending resistance.

**Conclusions** In this study, a non-zero dispersion-shifted fiber with a triangular core and annular structure was designed and fabricated using OVD. Based on this structure, the fiber exhibited a shorter cutoff wavelength, lower attenuation, larger MFD, and lower dispersion at 1550 nm. The results show that the MFD is 72  $\mu\text{m}^2$ , and the dispersion value is 1.6–9.5  $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  in 1530–1625 nm. The attenuation at 1550, 1383, and 1625 nm excelled that of the ITU-T G.655.D standard. Overall, the proposed profile structure realizes a translation of the zero-dispersion wavelength, low macrobending loss, and large effective area, which is suitable for DWDM applications in the C + L band. In long-distance optical fiber communication, nonlinear effects, such as FWM and XPM, can be suppressed well, and the cost of dispersion management can be reduced, which has important practical application value.

**Key words** fiber optics; outside vapor deposition technology; G.655.D optical fiber; large effective area; non-zero dispersion-shift; dense wavelength division multiplexing; optical fiber design and fabrication