

引用格式: ZHA Jianjiang, WANG Yuanda, HE Xuerong, et al. Design and Fabrication of a Non-zero Dispersion Shifted Fiber with Low Dispersion Slope in S+C+L Band and Large Effective Area Based on Outside Vapor Deposition[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0206003

查健江,王元达,何学荣,等. 基于外部气相沉积的S+C+L波段低色散斜率大有效面积非零色散位移光纤的设计与制备[J]. 光子学报, 2024, 53(2):0206003

基于外部气相沉积的S+C+L波段低色散斜率 大有效面积非零色散位移光纤的设计与制备

查健江¹,王元达¹,何学荣¹,侯伟¹,王敬胜¹,文建湘²

(1 山东富通光导科技有限公司, 济南 250119)

(2 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:针对现有光纤无法满足宽带光密集波分复用系统传输和S+C+L波段粗波分复用的要求,设计了一种具有中心凹陷的三角形芯+环形的折射率剖面,利用外部气相沉积工艺制备了一种非零色散位移光纤,并通过调整第一芯层的相对折射率和第二芯层与第一芯层的半径比,探究了其对光纤衰减、色散斜率和有效面积等参数的影响。研究发现,当第一芯层的相对折射率逐渐增大且第二芯层与第一芯层半径比逐渐减小时,零色散波长和有效面积逐渐减小。当第一芯层的相对折射率在0.52%~0.53%,芯层半径比在2.6~2.7时,光纤的有效面积接近70 μm^2 ,零色散波长在1420 nm附近,在1550 nm波段的色散系数大于8 $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,色散斜率为0.059 $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$,可以较好地抑制传输过程中光非线性效应,满足长途干线网与城域网的使用要求。

关键词:光纤通信;非零色散位移光纤;外部气相沉积工艺;S+C+L波段;低色散斜率;大有效面积;波分复用

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20245302.0206003

0 引言

随着城域网业务的飞速发展,系统要求传输数据量呈爆炸式增长,在传输网上需要利用光纤波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)传输方式^[1]。和骨干网不同的是,光纤波分复用传输的主要方式是采用廉价的粗波分复用(Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM),而不是骨干网上的密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)^[2]。CWDM的信道间隔较为松散,可以减少DWDM信道密集引起的四波混频等非线性效应^[3-4]。城域网的传输距离不远,一般不采用光放大器及色散补偿模块等元器件,因此需要在S+C+L宽波长范围内具有低色散斜率的非零色散位移光纤(None Zero Dispersion Shifted Fiber, NZDSF),而不是骨干网上在C+L波段内使用的大有效面积非零色散位移光纤。

现有商用光纤种类中,G.652光纤的零色散波长在1310 nm附近,在L波段的色散系数偏大,色散斜率也偏大,增加了色散补偿成本。G.654.E光纤截止波长比S波段长,且L波段色散比G.652.D还要大,弯曲损耗大。因此,2010年国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)修订了G.656光纤标准,明确G.656光纤在1460~1625 nm波长范围内具有相对中等的色散斜率和宽带传输波长下的正色散,且斜率更低,可以满足城域网传输系统使用要求^[5]。目前国际上较知名的非零色散位移光纤有Corning的LEAF光

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61935002, 61635006)

第一作者:查健江, jj_zha@163.com

通讯作者:文建湘, wenjx@shu.edu.cn

收稿日期:2023-07-14;录用日期:2023-10-11

<http://www.photon.ac.cn>

纤、OFS的 TrueWave-REACH 光纤和 Prysmian 的 TeraLight-Ultra 光纤等。2016年土耳其的 KARLIK S E 教授研究了各种 NZDSF 光纤的不同信道输入功率对四波混频串扰功率的影响,以及不同信道间距、光纤链路长度和信道波长对信噪比的影响^[6]。研究发现在各种输入功率、信道数量和信道间隔的条件下, Teralight 光纤的四波混频最小, LEAF 光纤次之, TrueWave-RS 光纤最大。KARLIK S E 认为 DWDM 系统中以 1 550 nm 为中心的信道数量增加过多会引起四波混频对信号的极大干扰,因此需要一定的色散系数、较大的有效面积以及适宜的信道间隔,以抑制各种非线性效应。几种光纤中 TeraLight 光纤的 1 550 nm 色散系数达到 7~8 ps·nm⁻¹·km⁻¹, LEAF 光纤的有效面积达到 72 μm²。虽然国内一直有研究宽带波长范围内适度色散、低偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)和低衰减等特性的光纤^[7],但目前市场上商用 G.656 光纤仍主要依赖于进口,国内除采用等离子化学气相沉积(Plasma Chemical Vapor Deposition, PCVD)工艺制备的 G.656 光纤外^[8],尚未有其他工艺制备的 G.656 光纤。此外,业内曾开发出双包层型色散平坦光纤^[9-10],该光纤两个零色散点位于 1 210 nm 和 1 550 nm,在 1 210~1 550 nm 波长范围内色散呈平坦分布。双包层型色散平坦光纤有内外两个包层,内包层要比外包层的折射率低,从而形成一个折射率下凹的深沟,限制了色散的扩展,但缺点是弯曲损耗较大且色散系数普遍较低^[11]。另有公司开发了三包层型和四包层型光纤^[12],该结构特点是在双包层型的内外包层加入一层凸起的折射率,其色散性能和抗弯曲能力优于双包层型,但是三包层型和四包层型结构复杂,有效面积 A_{eff} 偏小,色散系数偏低,制造难度大,成本较高^[13]。

然而无论是多包层的色散平坦光纤,还是如 LEAF 光纤的大有效面积 G.655.D,因其模场直径(Mode Field Diameter, MFD)没有和普通 G.652.D 兼容且差异很大,在地面光缆系统的安装中存在熔接损耗大的问题,同时大有效面积 G.655.D 光纤在 S 波段(1 460~1 530 nm)没有足够的色散用以有效抑制四波混频^[14]。因此,大有效面积的宽带非零色散位移光纤被认为是下一代城域网高速率、大容量通信的理想选择。其零色散波长位于 S 波段以外,色散斜率相对较低,使 C 和 L 波段的色散不会增加太多。在设计制造宽带用低色散斜率、大有效面积非零色散位移光纤时,截止波长 λ_{cc} 和优化弯曲损耗性能是关键技术。为了实现 ITU-T 建议的 G.656 光纤的要求,首先光纤在 1 550 nm 波段的色散系数约大于 8 ps·nm⁻¹·km⁻¹ 以抑制四波混频,其次零色散波长 λ_0 应小于 1 460 nm 以便在 S 波段进行 WDM 应用,第三是光纤的有效面积 A_{eff} 必须尽可能大以减小非线性效应。

为此本文提出一种具有中心凹陷的三角形芯+双包层的折射率剖面设计的光纤,在 S+C+L 波段具有低色散斜率的正色散和较大的有效面积,在抑制光纤非线性效应的同时,还可以降低光纤的制作难度,彻底去除光纤中的水峰,保证光纤的质量和性能。

1 光纤结构与基本理论

1.1 光纤色散的构成

业内普遍认为城域网用光纤需要具有宽波长的低衰减和适合的色散系数特点,有利于抑制光纤的非线性效应等问题^[15]。石英玻璃单模光纤的总色散主要由材料色散和波导色散构成^[16],总色散为

$$D_{(\lambda)} = D_m + D_w + D_p \quad (1)$$

式中, $D_{(\lambda)}$ 为总色散, D_m 为材料色散, D_w 为波导色散, D_p 为折射率剖面色散。具体表达式为

$$D_m \approx -\frac{\lambda}{c} \left[\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} H + \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2} (1-H) \right] \quad (2)$$

$$D_w \approx -\frac{\Delta}{c\lambda} n_1 V \frac{d^2(bV)}{dV^2} \quad (3)$$

$$D_p \approx -\frac{1}{c} \left[\frac{\lambda n_1}{4\Delta} \left(\frac{d\Delta}{d\lambda} \right)^2 - n_{g1} \frac{d\Delta}{d\lambda} \right] \left[V \frac{db}{dV} + V \frac{d^2(bV)}{dV^2} \right] \quad (4)$$

式中, λ 为传输光波长, c 为光速, n_1 、 n_2 为光纤芯层和包层的折射率, H 为光传播分数, Δ 为相对折射率差, b 为归一化传播常数, V 为归一化介质频率, n_{g1} 为芯区群折射率。由于 $D_p \approx 0$, $n_1 \approx n_2$, 总色散可简化为

$$D_{(\lambda)} = D_m + D_w \approx -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2} - \frac{n_2 \Delta}{c\lambda} V \frac{d^2(bV)}{dV} \quad (5)$$

已知常规 G.652 光纤的材料色散 D_m 在 1 270 nm 附近为零,掺杂浓度越高,材料色散 D_m 越向长波长方向移动。在宽带波长范围内,波导色散 D_w 和材料色散 D_m 具有相反的符号,在 1 310 nm 附近材料色散 D_m 与波导色散 D_w 相互抵消为零。通常情况下,波导色散 D_w 的大小由光纤纤芯 n_1 的半径 R 、相对折射率差 Δ 及剖面图形状决定,半径 R 越小,相对折射率差 Δ 越大,波导色散 D_w 就越负。改变光纤的折射率分布和剖面图结构,就可以改变波导色散 D_w ,从而在工作波长范围内得到合适的色散系数。

图 1 给出了几种常用的单模光纤的色散系数曲线。在 ITU-T 标准中,相比于普通 G.652 光纤,大有效面积 G.655.D 光纤的零色散波长 λ_0 从 1 310 nm 移动到 1 500 nm 处,1 550 nm 处的色散系数 D_{1550} 从 17 ps·nm⁻¹·km⁻¹ 降低到 4 ps·nm⁻¹·km⁻¹,零色散斜率 S_0 略低于 0.078 ps·nm⁻²·km⁻¹。而超低损耗 G.654.E 光纤的 λ_0 在 1 200 nm 附近, D_{1550} 在 18~23 ps·nm⁻¹·km⁻¹ 范围,比普通 G.652.D 光纤增加约 20%。而相比于 G.655 光纤,低色散斜率的 G.656 光纤的 λ_0 移至 1 420 nm 附近,1 500 nm 处的色散系数 D_{1500} 达 5 ps·nm⁻¹·km⁻¹,可以较好地抑制四波混频等非线性效应, D_{1550} 达到 8 ps·nm⁻¹·km⁻¹ 左右,可以使信号传输足够远并且不需要色散补偿,零色散斜率 S_0 降低至 0.059 ps·nm⁻²·km⁻¹,随波长的变化幅度要小 35%~55%,因而在 S+C+L 三个波段均可以实现低成本的色散管理和波分复用。

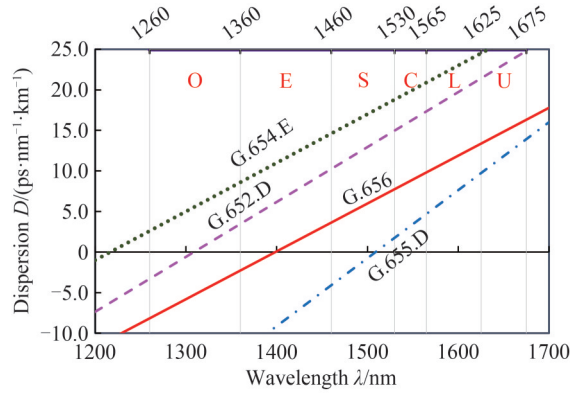


图 1 几种单模光纤的色散曲线

Fig. 1 Dispersion curves of several single mode optical fibers

此外,色散斜率是波长范围内色散曲线的斜率,用来描述随波长不同而引起的色散变化,其公式为

$$S = \frac{dD_{(\lambda)}}{d\lambda} \quad (6)$$

用 S_0 表示零色散波长处的色散斜率,有

$$S_0 = \frac{4\lambda^3 dD_{(\lambda)}}{\lambda^3 - \lambda_0^4} \quad (7)$$

1.2 光纤中的模场直径、有效面积和波长关系

单模光纤是光学的弱波导介质,光纤中传播的光能量一部分在包层传输,其传播特性不能用纤芯的几何尺寸简单描述,因此用 MFD 来衡量光传输的能量集中特征。根据国标^[17],MFD 可在远场用远场光强分布 $P_F(\theta)$ 、互补孔径功率传输函数 $\alpha(\theta)$ 和在近场用近场光强分布 $f^2(r)$ 来测定,且不同试验方法之间可以进行数学等效变换。目前的试验方法一般是由远场光强分布确定 MFD 的彼得曼第二定义(Peterman II),MFD 的计算公式为

$$\text{MFD} = 2w = \frac{2 \int_0^\infty E^2(r) r dr}{\sqrt{\int_0^\infty [dE(r)/dr]^2 r dr}} = \frac{\sqrt{2} \lambda}{\pi} \frac{\int_0^{\pi/2} P_F(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} P_F(\theta) \sin^3 \theta \cos \theta d\theta} \quad (8)$$

式中, w 是 MFD 的半径, $E(r)$ 是电场分布, r 是半径方向的距离, θ 是光纤远场侧视角,单位为弧度(rad)。根据光纤传播理论,MFD 不仅依赖折射率剖面图,也依赖于传输波长。同一种光纤中的传输波长越短,MFD

越小,其原因是光的波长越短,频率越高,光子的能量越大,光强分布在芯层周围更加集中,光纤的波导结构对光的限制作用也会变得越不明显。不同的光纤设计虽然影响特定波长的MFD,但不会改变对波长依赖的趋势。

有效面积 A_{eff} 是一个与光纤非线性紧密相关的参数,它会影响到光纤系统的传输质量,特别是在长距离光放大系统中的传输质量。有效面积越大,光纤内部的功率密度就越低。光纤非线性很大程度上取决于光纤内部的功率密度,因此有效面积的增加会导致光纤非线性及其对信号传输的影响的减少。有效面积定义为

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \frac{\left[\int_0^{\infty} |E(r)|^2 r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} |E(r)|^4 r dr} \quad (9)$$

式中, r 是距离光纤中心的距离。研究发现, A_{eff} 是MFD的几何变换(有时称为模场面积[MFA= $(\pi/4) \cdot \text{MFD}^2$]),可以理解为光传输面积的数学表示。每种类型的光纤的有效面积不同,主要决定于该光纤的折射率剖面图和输入波长 λ 。 A_{eff} 经验典型值的范围在95%~104%的MFA。根据经验确定 A_{eff} 和MFA之间一般关系为

$$A_{\text{eff}} = k_{(\lambda)} \text{MFA} = k_{(\lambda)} \left(\frac{\pi}{4} \right) \text{MFD}^2 = k_{(\lambda)} \pi \tau \omega^2 \quad (10)$$

式中, $k_{(\lambda)}$ 是和 λ 相关的修正因子。在非线性效应对系统性能有重大限制的应用中, A_{eff} 是光纤中载光区域的更合适的表示。因此, A_{eff} 和MFD一样,其依赖于传输波长 λ ,且随着 λ 的缩小而减小。

1.3 光纤波导结构设计

光纤的波导结构决定光纤性能,其主要参数是芯层及包层结构(折射率高度和宽度),进而调整其色散特性。相对于G.655.D光纤,G.656需要增加 Δn_1 、减小光纤芯径 R_1 ,以得到合适的波导色散 D_w ,进而使零色散波长 λ_0 平移至1460 nm以下。如图2所示,业内G.656光纤有三角形芯+环型、基座型、梯型+环型、三包层型、四包层型和五包层型的结构^[18]。

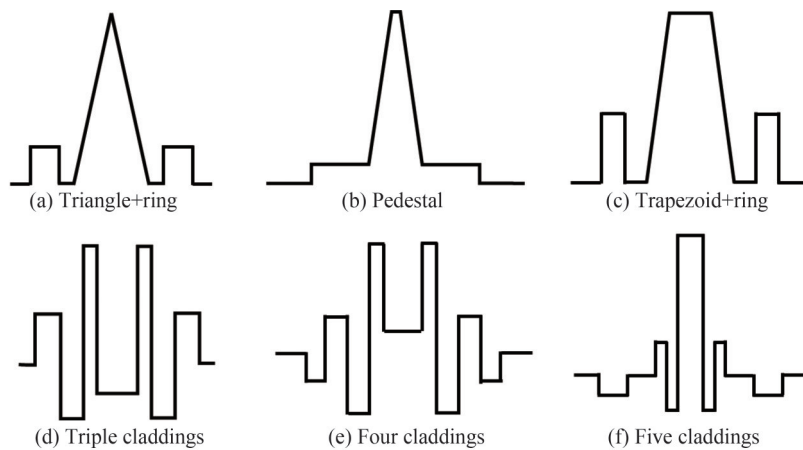


图2 几种S+C+L非零色散位移光纤的折射率剖面示意图

Fig. 2 Refractive index profile schematic diagrams of several S+C+L non-zero dispersion shifted fibers

与类似的阶跃型光纤相比,在不损害其他传输参数的情况下,三角形芯(a)、基座型(b)及梯型芯(c)光纤的芯部折射率采用三角型或梯型设计,可以降低由于芯/包层边界造成的较低的吸收、散射损耗和熔接损耗,较小的色散系数和色散斜率值^[19-21]。选择合适的芯部的相对折射率和三角形折射率剖面斜率,光纤在1.3~1.5 μm 波长范围内可以获得相比于阶跃型光纤较低的损耗和较大的光纤芯径,而剖面图中心形成的凹陷并不会对传输过程产生不利影响,也可以避免中央的光强分布过于集中而导致的非线性效应^[22-24]。采用三包层型(d)、四包层型(e)和五包层型(f)的折射率剖面图,虽然可以获得100~150 μm^2 的有效面积^[25-26],但截止波长达到1.4~1.6 μm ,工艺上需要制作较深的凹陷层才能控制宏弯损耗,增加了工艺难度^[27]。图3显示了阶跃型光纤与三角形芯型光纤在有效面积和色散系数两个参数方面的变化。当光在短波长上传输时,

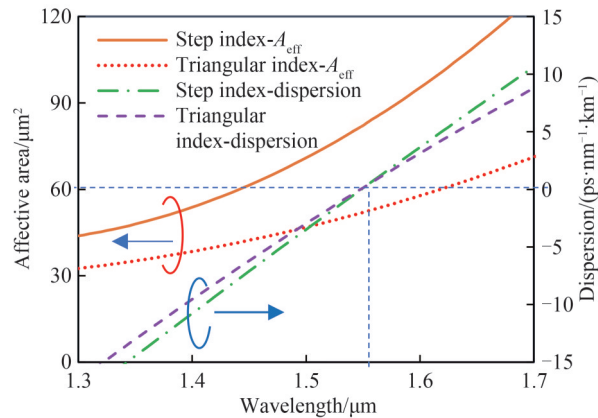


图3 三角形芯和阶跃型芯光纤的有效面积和色散系数对比

Fig. 3 Affective area and dispersion contrast of triangular index fiber and step index fiber

三角形芯光纤的有效面积略低于阶跃型光纤,而当光在长波长上传输时,三角形芯光纤的有效面积和阶跃型光纤的差异更大。在整个传输波段,三角形芯光纤的色散斜率要低于阶跃型光纤。因此,为了实现更低的色散斜率,采用中央三角形芯之外,在外部增加一个上凸的环形结构,可以将光从中心尖峰处吸收出来,以达到较大的光场分布,从而增大光纤的有效面积。该三角形芯+环型结构的重要作用是通过降低中央纤芯功率而增大有效面积,防止光泄露到包层进而改善弯曲损耗,同时可以降低光纤色散斜率,起到移动零色散波长到S波段以外的作用。

本实验采用“两步法”的工艺路线,以外部气相沉积(Outside Vapor Deposition, OVD)法制备光纤的芯层和内包层,同时以OVD法沉积外包层,制备出低衰减、耐弯曲和大有效面积的G.656光纤。图4中显示了实验采用的剖面图结构,第一芯层、第二芯层和第三芯层的折射率(Δn_1 、 Δn_2 、 Δn_3)是相对于纯硅外包层的相对折射率值,各层的半径由 R_1 、 R_2 、 R_3 表示。

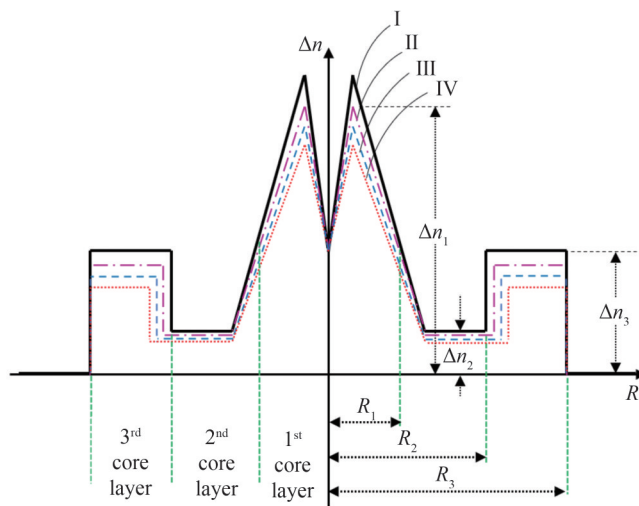


图4 不同折射率剖面示意图

Fig. 4 Different refractive index profile schematic diagram

实验通过调整芯部掺杂量,改变第一芯层的相对折射率 Δn_1 和半径 R_1 ,使剖面图为三角形结构,同时调节第三芯层的相对折射率 Δn_3 和厚度 $R_3 - R_2$,从而形成不同的折射率波导结构,实现低衰减、大有效面积、低色散斜率和适宜的零色散波长之间的平衡。图4中, I 的设计结构具有最高的第一芯层、第三芯层的相对折射率 Δn_3 和最宽的第三芯层厚度 $R_3 - R_2$,其余 II - IV 的设计结构中,上述参数逐渐降低。表1列出了根据图4中 I - IV 所设计波导结构制成的4种光纤样品的折射率剖面参数。

表1 设计光纤的剖面图参数
Table 1 Profile parameters of designed fibers

Sample	1	2	3	4
Profile type	I	II	III	IV
$R_1/\mu\text{m}$	2.3	2.3	2.3	2.3
$\Delta n_1/\%$	0.57	0.55	0.53	0.52
$R_2/\mu\text{m}$	5.2	5.5	5.8	6.2
$\Delta n_2/\%$	0.05	0.05	0.04	0.04
$R_3/\mu\text{m}$	8.6	8.6	8.7	8.7
$\Delta n_3/\%$	0.17	0.15	0.14	0.13

2 实验部分

光纤预制棒的制作工艺主要有改进化学气相沉积(Modified Chemical Vapor Deposition, MCVD)工艺、PCVD工艺、OVD工艺和轴向气相沉积(Vapor Axial Deposition, VAD)工艺,并且采用“两步法”混合工艺技术,即先制作决定光纤光学性能的芯棒,再制作决定光纤成本的外包层。MCVD和PCVD等管内法均可以制作较复杂的折射率剖面图的光纤,如G.655和G.656光纤。但由于管内法的入口锥度效应(沉积厚度和折射率分布不均匀),影响了芯棒的纵向均匀性,减少了有效长度,不利于大规模低成本地生产光纤。虽然通过优化参数可以减少锥度效应,但对于必须精确控制的折射率剖面图的G.656光纤来说,不仅增大了工艺难度,而且降低了成品的合格率。而OVD法也可以制作精细的剖面图且纵向更加均匀,如图5所示,其原理是将 SiCl_4 等反应物蒸发后通入氢氧火焰后发生水解反应,生成细微的混合颗粒,再经过数千层的往复运动,将混合颗粒沉积到靶棒上逐渐形成松散体,再经过脱水、烧结等工序制成芯棒,每根芯棒重量可以达到15 kg,延伸后得到若干根出发棒(外径 $\Phi 40\text{ mm}$ X长度1.5 m),最后经过外沉积和烧结后,得到成品的光纤预制棒^[28]。

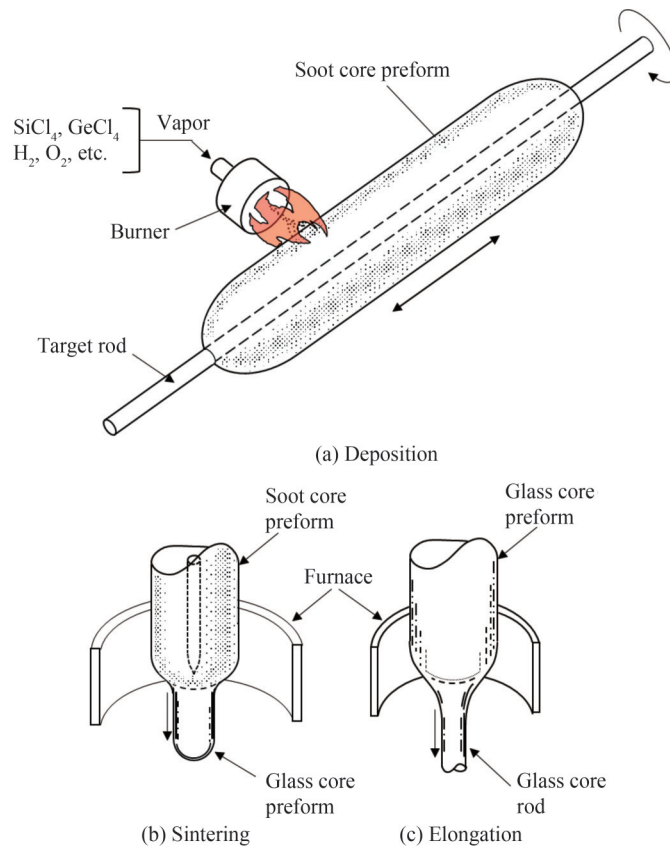


图5 外部气相沉积工艺

Fig. 5 Outside vapor deposition process

在OVD工艺制备中,通过加入Ge等掺杂剂来提高纤芯的折射率,在烧结过程中 GeO_2 由于易反应为GeO而挥发和扩散,造成芯部折射率凹陷,以及原设计中的阶跃结构形成弧形结构。其次由于 GeO_2 掺杂量远大于普通的G.652光纤,在预制棒拉丝过程中需要控制温度、速度、张力等参数,避免折射率剖面图发生其他变化。本实验光纤拉丝时采用 $1800\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度、 800 m/min 的速度以及 100 g 左右的拉丝张力,尽量保证实际光纤的纤芯折射率剖面图与理论设计的剖面图一致。图6为设计的折射率剖面图结构通过OVD工艺制备预制棒及拉丝后得到的实际光纤纤芯折射率剖面图结构。经过优化预制棒制备和拉丝工艺,得到的光纤剖面图与设计的剖面图具有较高的匹配性,第一芯层的三角型结构具有较笔直的斜率,且 Δn_1 在 $0.52\%\sim 0.57\%$,而第三芯层中因 GeO_2 扩散而形成略有弧形结构的上凸型结构,且 Δn_3 在 $0.13\%\sim 0.17\%$,第二芯层因 GeO_2 扩散而形成略有弧形的下凹型结构,且 Δn_2 在 $0.04\%\sim 0.05\%$ 。

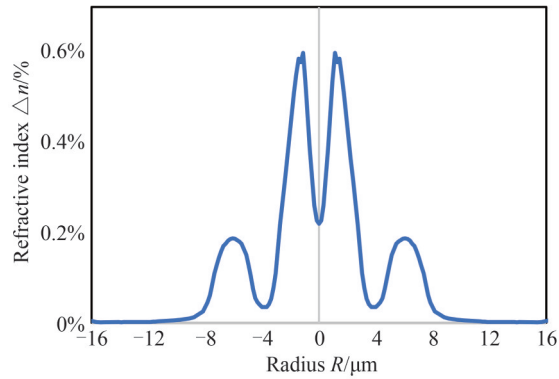


图6 制备的非零色散位移光纤的实际折射率剖面图
Fig. 6 The real refractive index profile of fabricated NZDSF

3 结果与讨论

3.1 折射率剖面结构对光纤参数的影响

将实验所设计的光纤预制棒进行拉丝和测试,结果见表2。对比结果可见,随着纤芯部分第一芯层的相对折射率 Δn_1 逐步降低,光纤的 1383 nm 、 1550 nm 和 1625 nm 的衰减系数 α 逐渐降低,这主要是由于减少了芯层中Ge的掺杂,从而降低了瑞利散射引起的衰减。

表2 设计光纤的参数
Table 2 Parameters of designed fibers

Sample	1	2	3	4
Profile type	I	II	III	IV
MFD@ $1550\text{ nm}/\mu\text{m}$	9.12	9.18	9.26	9.35
$A_{\text{eff}}@1550\text{ nm}/\mu\text{m}^2$	65.3	66.1	67.3	68.6
$\lambda_{\text{cut}}/\text{nm}$	1341	1305	1266	1222
$\alpha_{1383}/(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$	0.304	0.294	0.285	0.276
$\alpha_{1550}/(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$	0.197	0.196	0.194	0.195
$\alpha_{1625}/(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$	0.207	0.205	0.204	0.205
$D_{1460}/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	3.58	2.88	2.32	1.74
$D_{1530}/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	7.78	7.04	6.48	5.9
$D_{1565}/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	9.91	9.12	8.56	7.98
$D_{1625}/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	13.37	12.68	12.12	11.54
λ_0/nm	1400	1411	1419	1432
PMD/ $(\text{ps}\cdot\text{km}^{-0.5})$	0.03	0.04	0.03	0.03

图7显示了样品1至样品4的色散系数随波长变化的曲线。当相对折射率差由 0.57% 逐步下降至 0.52% ,模场直径MFD由 $9.18\text{ }\mu\text{m}$ 逐步增加至 $9.35\text{ }\mu\text{m}$,同时 1530 nm 的色散系数由 $7.78\text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 降低至 $5.9\text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。这主要是通过降低相对折射率 Δn_1 和 Δn_3 ,逐步降低了光纤的色散系数,零色散波长 λ_0 。

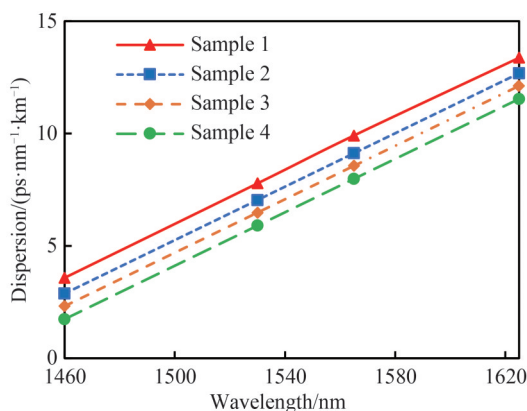


图7 制备的非零色散位移光纤(样品1~4)的色散曲线
Fig 7 Dispersion of fabricated NZDSF (Sample 1~4)

逐步从 1 400 nm 增长至 1 432 nm,同时截止波长 λ_{cut} 逐步由 1 341 nm 缩短至 1 222 nm。

图 8 显示光纤的第一芯层的相对折射率 Δn_1 及第二芯层与第一芯层的半径比 R_2/R_1 对零色散波长 λ_0 有效面积 A_{eff} 产生的影响。根据实验结果可发现,若第一芯层半径 R_1 、第三芯层 R_3 和第二芯层相对折射率 Δn_2 相对固定,当 Δn_1 逐渐增大和 R_2/R_1 逐渐减小时,零色散波长 λ_0 逐渐减小,有效面积 A_{eff} 也逐渐减小。实验的目标零色散波长 λ_0 小于 1460 nm,甚至接近 1 420 nm,同时具有较大的有效面积 A_{eff} ,因此稍微降低 Δn_1 到 0.52%~0.53%,调整 R_2/R_1 到 2.6~2.7,以便达到有效面积 A_{eff} 和零色散波长 λ_0 之间的平衡。

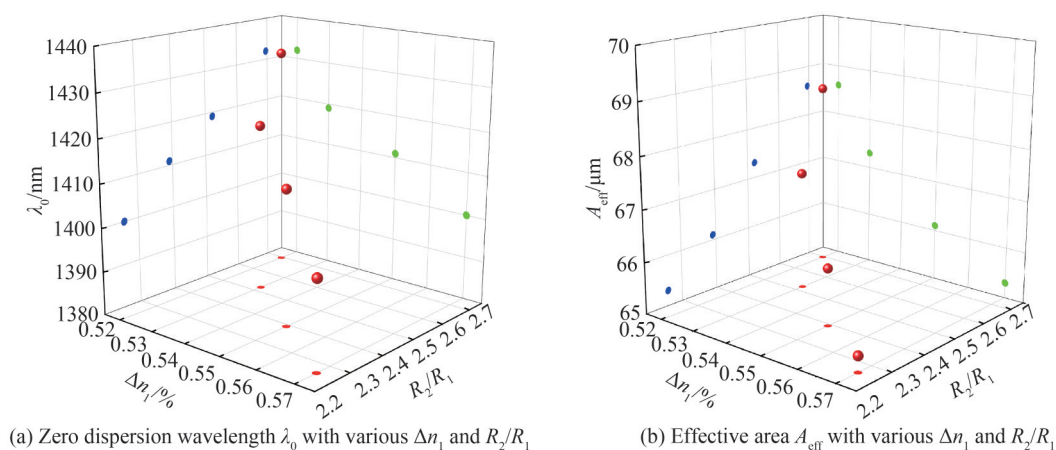


图 8 不同 Δn_1 和 R_2/R_1 时的零色散波长 λ_0 和有效面积 A_{eff}
Fig. 8 Zero dispersion wavelength λ_0 and effective area A_{eff} with various Δn_1 and R_2/R_1

3.2 光纤性能测试与对比分析

表 3 显示了制备的非零色散位移光纤在 S+C+L 三波段的光纤参数,图 9 展示了制备的非零色散位移光纤的色散特性和衰减图谱。其零色散波长为 1 411 nm,尤其是三个典型波长 1 500 nm、1 550 nm 和 1 600 nm 的色散系数是 $5.3 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $8.2 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $11.2 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,可以较好地抑制 S 波段四波混频的影响。制备的光纤在 S、C 和 L 波段具有 $65 \mu\text{m}^2$ 左右的较大的有效面积。该光纤在 1 500 nm、1 550 nm 和 1 600 nm 波长的衰减系数是 $0.211 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $0.195 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $0.193 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$,优于业内其它 G.656 光纤水平。图 10 显示了光纤绕半径为 25 mm 的圆柱体 100 圈时 1 550 nm 和 1 625 nm 波长处的宏弯损耗值分别为 0.022 dB 和 0.047 dB。

表 4 列出了实验制备的光纤和其他 G.656 光纤的对比。可以发现,实验设计的光纤的模式直径 MFD 达到 $9.35 \mu\text{m}$,有效面积 A_{eff} 达到 $68 \mu\text{m}^2$,优于其余光纤。其次,其 1 460 nm 波长的色散系数超过 $1.5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,可以较好地满足 S 波段 WDM 应用,并抑制 S 波段的四波混频,同时色散斜率仅 $0.059 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$,在 C 和 L 波段具有相对适宜的色散系数。再次,1 383 nm 的衰减系数优于其余光纤,仅有 $0.276 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$,较好地解

表3 制备的非零色散位移光纤的S+C+L三波段的特性
Table 3 The S+C+L characteristics of fabricated NZDSFs

Parameter	Unit	S band	C band	L band
		1 500 nm	1 550 nm	1 600 nm
Dispersion, D	$\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$	5.3	8.2	11.2
Dispersion slope, S	$\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$	0.059 4	0.059 4	0.059 4
Effective area, A_{eff}	μm^2	63	68	73
Attenuation, α	$\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$	0.211	0.195	0.193

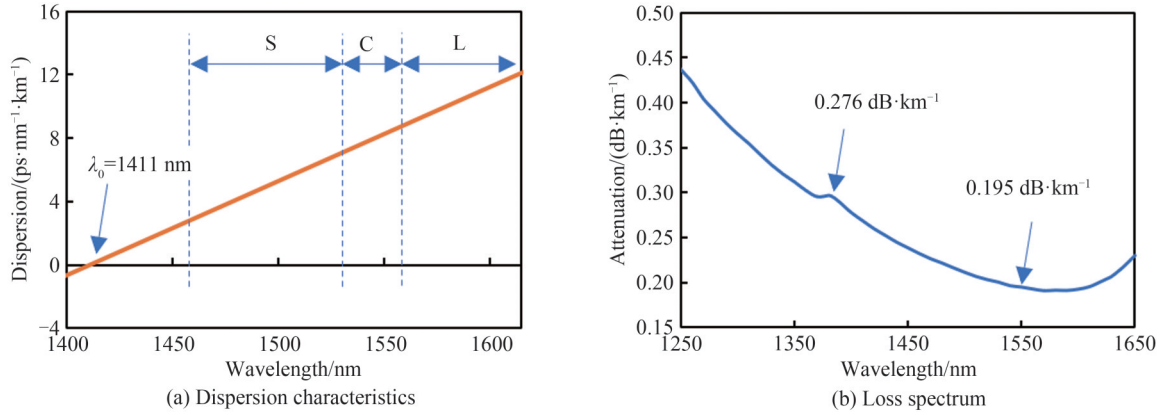


图9 制备的非零色散位移光纤的色散特性和衰减图谱

Fig. 9 Dispersion characteristics and loss spectrum of fabricated NZDSF

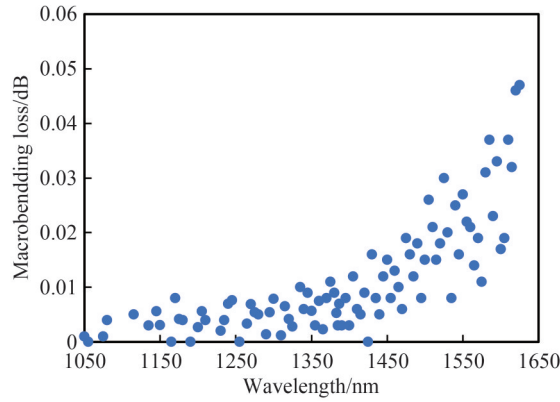


图10 制备的非零色散位移光纤的宏弯损耗(半径25 mm, 100圈)

Fig. 10 The macrobanding loss parameters of fabricated NZDSF ($R=25\text{ mm}$, 100 turns)

表4 制备的光纤和其他宽带用非零色散位移光纤指标对比
Table 4 Fabricated fiber parameters compared with other NZDSFs for wideband

Item	$D/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$			$\alpha/(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$		
	1 460 nm	1 530~1 565 nm	1 565~1 625 nm	1 383 nm	1 550 nm	1 625 nm
This paper	≥ 1.5	5.5~10.0	8.0~13.4	0.276	0.195	0.205
TrueWave REACH	≥ 2.0	5.5~8.9	6.9~11.4	0.35	0.2	0.21
HiPosh	≥ 2.0	5.0~10.0	7.5~13.4	≤ 1.0	0.195	0.21
TeraLight Ultra	≥ 2.0	5.5~10.0	7.5~13.4	≤ 0.7	≤ 0.22	≤ 0.25

Item	λ_0/nm	$S_0/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1})$	MFD/ μm	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	$\lambda_{\text{cut}}/\text{nm}$
			1 550 nm	1 550 nm	
This paper	1 411	0.059	9.35	68	1 222
TrueWave REACH	$\leq 1 405$	≤ 0.045	8.6 ± 0.4	55	$\leq 1 310$
HiPosh	1 395	0.052	9 ± 0.5	63	1 200
TeraLight Ultra	$\leq 1 425$	0.052	9.2 ± 0.5	63	$\leq 1 300$

Note: D : Dispersion coefficient; α : Attenuation coefficient; MFD: Mold field diameter; A_{eff} : Effective area; λ_0 : Zero dispersion wavelength; S_0 : Zero dispersion slope; λ_{cut} : Fiber cutoff wavelength

决水峰影响的问题,同时 1 550 nm 和 1 625 nm 波长的衰减系数分别是 $0.195 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $0.205 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$, 有助于传输距离的延长。经过对比,证实了这种新型 S+C+L 三波段的低色散斜率大有效面积 NZDSF 可以用于高速率、大容量和长距离的新一代光纤通信系统。

4 结论

本文设计了一种具有中心凹陷的芯+环形结构的低色散斜率非零色散位移光纤,并采用外部气相沉积工艺进行制备。该结构对有效面积、色散和色散斜率的适度优化能够减少色散恶化,适用于 S+C+L 波段的波分复用。经检测设计的光纤在 1 460~1 625 nm 波长范围内的色散为 $1.5\sim 13.4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 零色散波长为 1 420 nm 附近,在 1 550 nm 和 1 625 nm 波长处的衰减分别是 0.195 dB/km 和 0.205 dB/km , 为长距离应用进行了最佳化设计。此外该光纤有效面积达到 $68 \mu\text{m}^2$, 可以较好地抑制非线性效应,同时宏弯损耗达到并超过了 ITU-T G.656 的标准要求,是一种新型的 S+C+L 低斜率非零色散位移光纤。此剖面图结构实现了宽带范围内适度的正色散,较低的宏弯损耗,适合的有效面积和极低的 PMD,适用于 S+C+L 波段的 CWDM 和 DWDM 应用,具有较好非线性效应抑制作用。

参考文献

- [1] DENG N, ZONG L, JIANG H, et al. Challenges and enabling technologies for multi-band WDM optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(11): 3385-3394.
- [2] MA Ziyang, WU Qiongqiong, LI Qihua, et al. Ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500006.
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.
- [3] ALSOWAIDI N, ELTAIF T, MOKHTAR M R. Suppression of inter and intra channel four wave mixing effects in optical CDMA over DWDM hybrid system[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 156-166.
- [4] SALEEM A, XU Y, WANG S. Research of fiber nonlinear effects in WDM-PON based 5G fronthaul networks[J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2023, 32(2): 2350018.
- [5] ITU-T Recommendation G.656. Characteristics of a fiber and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport[S]. 2010.
- [6] KARLIK S E. Analysis of the four-wave mixing impact on the most heavily affected channels of dense and ultra-dense wavelength division multiplexing systems using non-zero dispersion shifted fibers[J]. *Optik*, 2016, 127(19): 7469-7486.
- [7] WU Jindong, LI Qingguo, WU Wenwen, et al. Study of novel fabrication process for non-zero dispersion-shifted fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806008.
吴金东, 李庆国, 吴雯雯, 等. 非零色散位移光纤的制造新工艺研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806008
- [8] CHENG Yu, ZHAO Xiujian. The design and properties of G.656 optical fiber waveguide design[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, 2007, 22(1): 70-73.
- [9] EID M, SORATHIYA V, LAVADIYA S, et al. Technical specifications and spectral performance characteristics of Dispersion Flattened Fiber (DFF) in optical fiber systems [J]. *Journal of Optical Communications*, 2021: 000010151520210063.
- [10] WANG Xiao, ZHU Longyang, ZHENG Hongjun, et al. A dispersion flattened fiber front-haul transmission system with high bitrate signal at low input optical power[J]. *Optoelectronics Letters*, 2019, 15(1): 31-34.
- [11] ZHENG S, LIU Y, CHANG G. Design and analysis of three-layer-core optical fiber[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(3): 036111.
- [12] ZHANG Xiaoping, WANG Xin. The study of chromatic dispersion and chromatic dispersion slope of W I -and W II -type triple-clad single-mode fibers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, 37(2): 167-172.
- [13] SELVENDRAN S, AVANINATHAN S. New refractive index profiles of dispersion-flattened highly nonlinear fibers for future all-optical signal processing in WDM optical networks[J]. *Photonic Network Communication*, 2016, 33: 217-230.
- [14] DURAK F E, SADIK S A, BOUMEDIENE K, et al. Characterization of four wave mixing effect in dense wavelength division multiplexing systems [C]. 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, 2020: 1-4.
- [15] HOSHIDA T, CURRI V, GALDINO L, et al. Ultrawideband systems and networks: Beyond C+L-band [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(11): 1725-1741.
- [16] 胡先志. 光纤与光缆技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [17] GB/T 15972.45-2021, 光纤试验方法规范 第45部分: 传输特性的测量方法和试验程序模场直径[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

- [18] GARCIA S, GASULLA I. Universal characteristic equation for multi-layer optical fibers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(4): 1-11.
- [19] BEHERA B, MOHANTY M N. Design of bend-limited large-mode area dispersion shifted few-mode fiber for fast communication[C]. 2019 International Conference on Applied Machine Learning (ICAML), IEEE, 2019: 277-281.
- [20] WANG Yajie, HOU Shanglin, XIE Caijian, et al. Bend-resistant stress-type segmented cladding large-mode-area single-mode fibers[J]. Applied Optics, 2023, 62(9): 2218-2226.
- [21] MAKOU EI S. Characteristics comparison of the ZDSFs based on the triangular graded index and step index single-mode optical fibers[J]. Optics Communications, 2013, 291: 202-206.
- [22] PALODIYA V, RAGHUWANSHI S K. Design and parametric study of depressed core optical fiber [J]. Procedia Computer Science, 2015, 46: 1385-1392.
- [23] DEMIDOV V V, TER-NERSESYANTS E V, BOURDINE A V, et al. Methods and technique of manufacturing silica graded-index fibers with a large central defect of the refractive index profile for fiber-optic sensors based on few-mode effects[C]. SPIE, 2017: 1034218.
- [24] PALODIYA V, RAGHUWANSHI S K. Comparative study of triple-clad dispersion-shifted, dispersion-flattened and dispersion-compensated fiber for broadband optical network application [J]. Journal of Optical Communications, 2015, 37(2): 193-198.
- [25] ZHANG Yining, LIAN Yudong. Design and analysis of a large mode field area and low bending loss multi-cladding fiber with comb-index core and gradient-refractive index ring[J]. Sensors, 2023, 23(11): 5085.
- [26] TONG Y, CHEN S, TIAN H. A bend-resistant low bending loss and large mode area two-layer core single-mode fiber with gradient refractive index ring and multi-trench[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45(NOV.):235-243.
- [27] SHE Shengfei, LIU Bo, CHANG Chang, et al. Characterization and properties of large-core fluorine-doped fibers based on depressed inner cladding design[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11):1148013.
折胜飞, 刘波, 常畅, 等. 基于下陷内包层设计的大芯径掺氟光纤表征及性能[J]. 光子学报, 2019, 48(11):1148013.
- [28] ZHA Jianjiang, CHEN Qiang, LAN Xinglin, et al. Design and fabrication of novel large effective area non-zero dispersion shifted optical fiber based on outside vapor deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 2306004.
查健江, 陈强, 兰兴铃, 等. 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[J]. 中国激光, 2022, 49(23): 2306004.

Design and Fabrication of a Non-zero Dispersion Shifted Fiber with Low Dispersion Slope in S+C+L Band and Large Effective Area Based on Outside Vapor Deposition

ZHA Jianjiang¹, WANG Yuanda¹, HE Xuerong¹, HOU Wei¹,
WANG Jingsheng¹, WEN Jianxiang²

(1 Shandong Futong Optelecom Science & Technology Co., Ltd., Jinan 250119, China)

(2 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: Existing optical fibers struggle to support broadband dense wavelength division multiplexing and coarse wavelength division multiplexing transmissions, necessitating the development of optimized fibers with moderate dispersion, low dispersion slope, enlarged effective area, and low attenuation. Currently, None Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF) fibers have a small effective area incompatible with conventional fibers, emphasizing the need for precise design control of the refractive index profile. Therefore, creating a S+C+L band NZDSF with a large effective area and low slope is crucial for meeting the escalating demand for bulk data transmission.

The dispersion slope, a crucial parameter in optics, is determined by the interplay between waveguide and material properties. The effective area, a metric that signifies the fiber's optical performance, relies heavily on the refractive index profile and the chosen input wavelength. In order to find the appropriate dispersion slope and effective area, we need to find a suitable refractive index profile. In our research, we have employed a refined profile structure modal, featuring a triangular+ring core configuration embellished by a central depression and fabricated by a two-step process to prepare the core and cladding by using the

Outside Vapor Deposition (OVD).

Through experiments, adjustments were made to the doping levels in the core, thereby modifying the relative refractive index Δn_1 and radius R_1 of the first core layer. This enabled the formation of a triangular cross-sectional structure. Simultaneously, the relative refractive index Δn_3 and thickness R_3-R_2 of the third core layer were also adjusted, resulting in distinct refractive index waveguide configurations. This approach strikes a balance between achieving low attenuation, a large effective area, a reduced dispersion slope, and an appropriate zero dispersion wavelength. After optimizing the preform preparation and drawing process, the optical fiber cross-section obtained has a high matching with the designed cross-section. The triangular structure of the first core layer has a relatively straight slope, and Δn_1 is between 0.52% and 0.57%. In the third core layer, a slightly curved convex structure is formed due to the diffusion of GeO_2 , and Δn_3 is between 0.13% and 0.17%. In line with the experimental findings, it has been observed that when the first core layer radius R_1 , the third core layer R_3 , and the second core layer's relative refractive index Δn_2 remain relatively constant, an increase in Δn_1 and a subsequent decrease in R_2/R_1 lead to a gradual reduction in the zero dispersion wavelength λ_0 and a corresponding decline in the effective area A_{eff} . Our experimental target is to achieve a zero dispersion wavelength λ_0 below 1460 nm, even approximating 1 420 nm, while maintaining a significant effective area A_{eff} . To balance these parameters, it is necessary to slightly reduce Δn_1 to the range of 0.52% to 0.53% and adjust R_2/R_1 to approximately 2.6 to 2.7. By these adjustments, we can achieve a suitable equilibrium between the effective area A_{eff} and the zero dispersion wavelength λ_0 .

The experimental fiber design achieved a mode field diameter of 9.35 μm and an effective area A_{eff} of 68 μm^2 . Additionally, the zero dispersion coefficient exceeding 1.5 $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ at 1 460 nm, well-suited for S-band wavelength division multiplexing applications while effectively suppressing four-wave mixing in the S-band. Furthermore, the fiber exhibited a low dispersion slope of only 0.059 $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$, providing relatively suitable dispersion characteristics in the C and L bands. The fiber also exhibited superior attenuation coefficients of 0.276 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ at 1 383 nm, effectively mitigating the impact of water absorption peaks. The attenuation coefficients at 1 550 nm and 1 625 nm were 0.195 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ and 0.205 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$, respectively, facilitating extended transmission distances. Through comparison, it was confirmed that this S+C+L band NZDSF with low dispersion slope and large effective area is well-suited for high-speed, high-capacity, and long-distance optical communication systems.

Key words: Optic fiber communication; None zero dispersion shifted fiber; Outside vapor deposition process; S+C+L band; Low dispersion slope; Large effective area; Wavelength division multiplexing

OCIS Codes: 060.2270; 060.2280; 060.2330; 060.2430