



一种新型超低损耗大有效面光纤的技术研究

韩镒¹, 肖华², 钟媛², 劳雪刚², 韩超¹

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100191; 2. 江苏亨通光导新材料有限公司, 江苏 苏州 215200)

摘要: 采用双包层的波导结构结合纯二氧化硅芯的技术方案, 通过包层氟掺杂的设计与芯/包层之间粘度匹配的优化, 实现了超低损耗大有效面积 ULA-130 型 G.654.E 光纤的制造, 然后利用自行搭建的光纤非线性系数测量系统和自主设计的光纤宏弯损耗松绕设备, 结合现有技术对 ULA-130 光纤的各项性能技术指标进行了研究。该光纤在 1 550 nm 波长的衰减系数为 0.159 dB/km, 有效面积为 133 μm^2 , 非线性系数为 $1.67 \times 10^{-10} \text{ W}^{-1}$ 。理论计算与技术研究结果表明, 该光纤具有优异的衰减系数和非线性性能, 适用于大容量、高速率和长距离光通信骨干网传输系统, 相对于常规的 G.652.D 光纤, 可以显著改善系统的光信噪比, 提升系统的传输性能。

关键词: 超低损耗; 大有效面积; G.654.E; 非线性系数; 骨干网系统

中图分类号: TN818

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020312

Technical research of a new type of optical fibre with ultra-low-loss and large effective area

HAN Di¹, XIAO Hua², ZHONG Yuan², LAO Xuegang², HAN Chao¹

1. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

2. Jiangsu Hengtong Optical Material Co., Ltd., Suzhou 215200, China

Abstract: The technical solutions of double-cladding waveguide structure and pure SiO_2 core were taken, the G.654.E type ULA-130 fibre ultra-low-loss and large effective area was realized by F-doping design and optimization of the viscosity match between core and cladding. Then the study on various optical characteristics of the ULA-130 fibre was carried out, utilizing self-built optical fibre nonlinear coefficient measurement system and self-designed optical fibre macro-bending loss winding device, as well as the available techniques. The attenuation coefficient, effective area and nonlinear coefficient at 1 550 nm of the ULA-130 fibre was 0.159 dB/km, 133 μm^2 and $1.67 \times 10^{-10} \text{ W}^{-1}$ separately. According to the theoretical calculation and technical analysis, the ULA-130 fibre possesses excellent attenuation and nonlinear performance, which is applicable in high capacity, high bitrate and long-range optical backbone network system. Compared to conventional G.652.D fibre, the ULA-130 fibre could improve the optical signal-noise ratio and the performance of transmission system dramatically.

Key words: ultra-low-loss, large effective area, G.654.E, nonlinear coefficient, backbone network system



1 引言

在我国“网络强国”战略和以 5G、云计算、工业互联网等为代表的新型基础设施建设的推动下,数字化社会的发展对有线和无线接入带宽的需求呈现爆炸式增长^[1-3],在当前骨干网带宽已捉襟见肘的情况下,400 Gbit/s/1 Tbit/s (简称为 400G/1T) 传输系统正加速成为下一代骨干网的现实。在 400G/1T 时代,随着信号调制阶数的上升、无中继传输距离要求的提高,光纤衰减系数和非线性效应成为制约系统光信噪比优化、传输性能提升的关键因素^[4-6]。在发射端注入光功率较高的情况下,光通信系统易受到非线性光学效应的影响,如受激布里渊散射、自相位调制、四波混频、交叉相位调制等,非线性效应会产生其他频率的光信号,导致系统光信噪比劣化,影响网络质量。根据既有理论分析与传输实验,在长距离干线网络中采用 400 Gbit/s 波分复用技术,增大光纤的有效面积是提升光通信系统传输性能的主要因素,降低光纤衰减系数为次要因素^[7-11]。非线性系数是用于评估非线性效应造成的系统性能优劣的参数,其定义如式(1)所示,可以看出增大光纤有效面积 A_{eff} 可以有效降低光纤非线性系数,从而抑制非线性效应。

$$\text{nlc} = n_2 / A_{\text{eff}} \quad (1)$$

其中, nlc 为光纤的非线性系数; n_2 为光纤的非线性折射率,与光纤材料的固有性质相关; A_{eff} 为光纤的有效面积。

与当前应用最广泛的 G.652D 光纤相比,具有低损耗和大有效面积特性的 G.654 光纤可以有效提升 400G/1T 系统的传输性能。根据 ITU、IEC 和我国行业标准^[12-14], G.654.A/B/C/D 光纤均适用于海底光缆,为适应陆地网络的复杂环境,针对骨干网用 G.654.E 光纤,标准提高了其弯曲性能的要求。随着骨干网带宽的升级,超低损耗、大有效面积 G.654.E 光纤的制备与技术研究已经成为

国内外行业的技术研究热点。在光纤制造技术方面,目前光纤的波导结构设计已存在三角型、基座型、三包层型、环型及沟槽型等多种技术路线^[15],在工艺方面则有纯硅芯与掺杂等实现方法;而在光纤性能研究方面,除衰减系数性能外,对于非线性性能的研究仍缺为欠缺。本研究采用双包层的波导结构结合纯硅芯的技术方案,包层采用掺氟技术降低折射率,并调节内包层宽度优化了弯曲性能,同时通过碱金属的均匀掺杂改善了芯层与包层之间的粘度匹配,实现了超低损耗大有有效面积 ULA-130 型 G.654.E 光纤产品的制造,然后利用自行搭建的光纤非线性系数测量系统和自主设计的光纤宏弯损耗松绕设备,结合现有技术对 ULA-130 光纤的各项性能技术指标进行了研究。

2 ULA-130 光纤的制造技术要点

2.1 改善光纤传输系统的光信噪比

光信噪比是指在有效带宽为 0.1 nm 的范围内光信号功率峰值与噪声功率的比值,其大小决定了信号质量,改善光信号的信噪比是提升光纤传输系统性能最直接和有效的方式。光通信系统光信噪比的计算方法如式(2)^[16]所示,式(2)中入纤光功率 P_{ch} 与光纤的非线性系数 $\text{nlc}(n_2/A_{\text{eff}})$ 成反比,再生段损耗 S 与光纤衰减系数 α 成反比。可见,提高光纤的有效面积,同时降低光纤的衰减系数,可以增大光传输系统的光信噪比,提升系统质量。本研究对 ULA-130 光纤的波导结构和掺杂方式进行了技术与模拟分析,一方面增加了光纤的有效面积,降低了光纤的非线性系数;另一方面降低了光纤的衰减系数,从而提升光传输系统的光信噪比,达到改善系统传输性能的目的。

$$\text{OSNR}_{\text{out}} = P_{\text{ch}} / (S \cdot P_{\text{ph}} \cdot \text{NF} \cdot N_{\text{spans}}) \quad (2)$$

其中, OSNR_{out} 为光传输系统的光信噪比, P_{ch} 为入纤光功率, S 为再生段的损耗, P_{ph} 为放大器自发辐射噪声, NF 为放大器噪声系数, N_{spans} 为系

统的跨段数目。

2.2 光纤波导结构设计

光纤的波导结构是决定有效面积、衰减系数和弯曲性能的关键因素，其中有效面积与折射率分布和芯层直径相关，衰减系数与折射率大小、掺杂种类与掺杂浓度、芯层与包层界面的粘度匹配等相关，弯曲性能与折射率分布相关。新型 ULA-130 光纤的典型折射率剖面分布如图 1 所示，光纤的波导结构由芯层、内包层和外包层 3 部分组成。与常规的 G.652.D 光纤相比，ULA-130 光纤的波导结构主要有以下特点：增大了芯层直径，提升光纤的有效面积；芯层采用纯硅芯的技术方案，降低了整体的折射率，一方面可以减少因高折射率物质掺杂引起的瑞利散射，从而有效改善光纤的衰减特性，另一方面可以增强纤芯结构稳定性，提升光纤的耐辐照特性；内包层与外包层均通过氟掺杂来降低折射率，其中内包层折射率低于外包层，通过调节内、外包层掺杂氟的浓度，对二者折射率差和内包层宽度的精确调整，进而实现光纤在 C+L 波段（1 530~1 625 nm）良好的宏弯性能，以满足陆地复杂环境下光通信系统密集波分复用的技术要求。根据光纤波导结构进行模拟分析计算，ULA-130 光纤芯层与内包层的相对折射率差为 0.25%~0.28%，在 1 550 nm 波长处的理论有效面积为 $130 \mu\text{m}^2$ 。

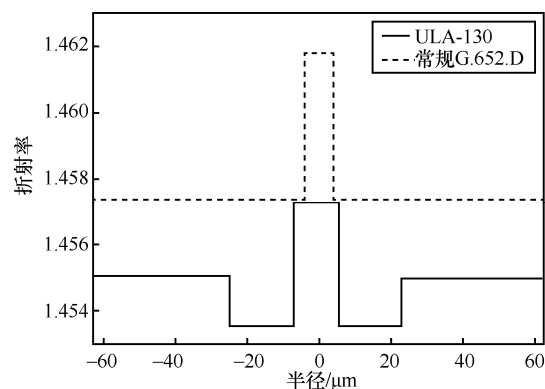


图 1 ULA-130 光纤的折射率剖面分布

2.3 超低损耗光纤的掺杂实现

由于光纤芯层采用纯硅芯、内包层采用掺氟的技术方案，芯层的粘度要远高于内包层的粘度，进而会引起芯/包层的粘度失配。粘度失配严重时，在光纤拉丝过程中的拉丝张力作用下，芯层与包层易产生相对的粘滞流动，从而在芯/包层的界面上产生缺陷和断键，对光纤的衰减系数等光纤与机械性能产生严重影响^[17-20]。本研究中，为防止由于芯/包层粘度失配可能导致的光纤性能劣化，采用钾掺杂的技术方案来降低芯层粘度，通过对钾掺杂温度、掺杂时间的研究，获得了钾元素掺杂的最优条件。

ULA-130 光纤预制棒芯棒的钾掺杂分布情况如图 2 所示。从图 2 可以看出，钾元素在径向和轴向的分布基本是均匀的，同时芯层钾掺杂浓度可达 400 mg/kg，一定量的钾掺杂使芯层粘度降低，实现了芯/包层粘度匹配。表 1 给出了 ULA-130 光纤芯层钾掺杂量与 1 550 nm 波长处衰减系数的关系。可以看出，当不进行钾掺杂时，芯/包层粘度失配导致光纤的衰减系数高达 0.189 dB/km；随着钾掺杂量的增加，衰减系数逐渐降低，表明增加钾掺杂含量能够有效降低芯层的粘度，从而显著改善芯层与包层之间的粘度差异，使光纤获得良好的光学性能。从本研究的结果来看，当芯层钾掺杂浓度在 400 mg/kg 的水平时，ULA-130 光纤可获得最优的衰减系数，若钾掺杂量继续增加，芯层会产生析晶效应导致衰减系数性能的劣化。

表 1 ULA-130 光纤不同钾掺杂量对应的
1 550 nm 衰减系数

序号	芯层钾掺杂量/(mg·kg ⁻¹)	1 550 nm 衰减系数/(dB·km ⁻¹)
1	0	0.189
2	92	0.177
3	167	0.169
4	324	0.160
5	413	0.153

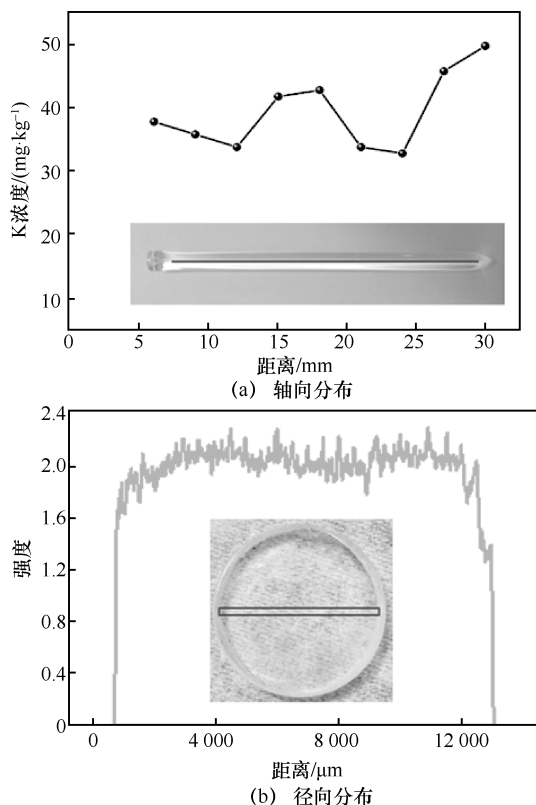


图2 芯棒钾掺杂浓度分布

3 ULA-130 光纤性能技术研究

3.1 光纤衰减性能

为表征该新型 ULA-130 光纤的低损耗性能, 根据 GB/T 15972.40-2008《光纤试验方法规范 第 40 部分: 传输特性和光学特性的测量方法和试验程序 衰减》中规定的截断法, 本研究对 ULA-130 光纤和常规 G.652.D 光纤的衰减特性进行了测量分析, 结果如图 3 所示。由于 G.654.E 光纤主要应用于长途骨干网的密集波分复用, 传输波段为 C+L 波段, 因此不对 1 530 nm 以下波长的衰减系数进行考察。从两种光纤的衰减曲线可以看出, 相对于 G.652.D 光纤, ULA-130 光纤在 1 530~1 625 nm 波段的衰减系数显著降低, 1 550 nm 波长的衰减系数达到了 0.159 dB/km。通过在光通信网络中部署 ULA-130 光纤, 可以有效降低系统的线路损耗, 提升系统的光信噪比与光信号的无中继传输距离。

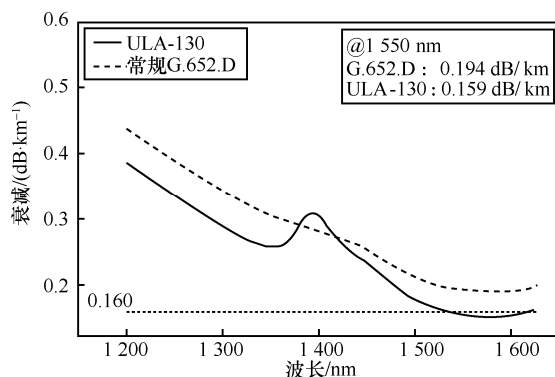


图3 新型 ULA-130 光纤与常规 G.652.D 光纤的衰减曲线

3.2 光纤弯曲性能

ULA-130 光纤主要应用于陆地骨干网的长距离信号传输, 为确保光纤满足陆地复杂布线环境的要求, 本研究根据 GB/T 15972.47-2008《光纤试验方法规范 第 47 部分: 传输特性和光学特性的测量方法和试验程序 宏弯损耗》, 采用芯轴松绕结合后向散射法对光纤的宏弯损耗性能进行测量。光纤松绕是宏弯损耗测试中的重要步骤, 松绕质量直接影响到测试结果的准确性。在中国专利文献中记录的基于芯轴松绕法的宏弯损耗装置^[21-23]主要有两种实现方案: 一是将光纤的两端都作为自由端, 同时转动光纤盘和芯轴以达到消除扭转应力的目的, 但该方案需要对光纤端面进行二次处理切割或熔接处理, 引入由于重复处理产生的衰减误差, 当光纤样品本身的宏弯损耗较小时, 衰减误差对结果造成的影响会比较大, 由于现有的测试方法并没有针对这种衰减误差进行修正, 因而会得出不可信的测试结果; 二是固定光纤盘, 将光纤一圈一圈地从盘上褪下后松绕到芯轴上, 该方案无法有效消除松绕过程中产生的光纤扭转应力, 当松绕圈数在 100 圈以上时, 扭转应力的积累会对测试结果产生显著影响, 导致结果的不准确性。为实现宏弯损耗测试中, 消除光纤松绕可能会产生的扭转应力同时仅对光纤端面进行一次处理, 本研究自主设计了光纤松绕的专利设备^[24], 如图 4 所示, 通过光纤松绕过程中光纤盘具的自转, 实现了整个过程中光纤扭转的

消除，并且可以在仅处理一次端的情况下完成测试。利用该设备对 ULA-130 光纤的宏弯损耗进行了测试，结果见表 2。从结果可以看出，ULA-130 光纤具有优异的弯曲性能，可以确保光纤在陆地敷设和使用中不会因为弯曲而引起显著的附加损耗，使系统的传输性能产生劣化。

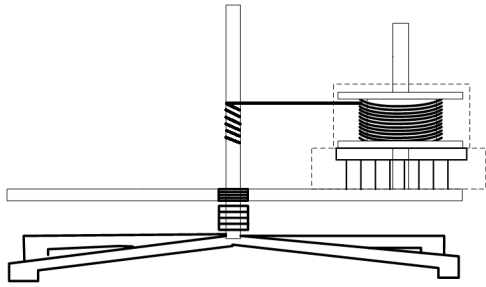


图 4 光纤宏弯损耗的松绕设备

表 2 ULA-130 光纤宏弯损耗测量结果

松绕圈数	芯轴半径	测量波长	宏弯损耗
1	10 mm	1 550 nm	0.02 dB
100	30 mm	1 625 nm	0.006 dB

3.3 光纤非线性性能

为表征 ULA-130 光纤优异的非线性性能，本研究自行搭建了图 5 所示的光纤非线性系数测量系统，采用连续波双频法对 ULA-130 光纤和 G.652.D 光纤的非线性系数进行测量分析。在光纤中注入波长相近、功率水平一致的两束连续光，

同时在输出端采用光谱仪对光纤的输出光谱进行测量，通过调节光衰减器，使注入被测光纤的光功率发生变化，根据不同输入功率下光纤由于自相位调制效应产生的非线性相移，结合式 (3) 对两种光纤在 1 550 nm 波长的非线性系数进行计算。

$$n_{lc} = \frac{\phi\lambda}{2\pi L_{\text{eff}} P_{\text{peak}}} \quad (3)$$

其中， n_{lc} 为光纤非线性系数； ϕ 为非线性相移； λ 为测试波长，取连续波激光器输出光波长的平均值； L_{eff} 为被测光纤有效长度； P_{peak} 为注入光纤的峰值功率。

测量所采用的参数见表 3。测量选取的两束输入光的波长分别为 λ_1 (1 549.96 nm) 和 λ_2 (1 550.26 nm)，波长间隔为 0.30 nm，功率差最大值不超过 0.1 dB。为确保测量过程中光纤本身的色散特性不会对结果产生显著影响，所选用的测量参数应满足式 (4) 的要求，结合光纤的色散系数和预期最大非线性相移进行理论计算，确定两盘被测光纤样品长度均为 0.5 km。另外，为保证在测量过程中光纤中产生显著自相位调制效应的同时，不会引起受激布里渊散射使测量结果受到影响，ULA-130 光纤的注入功率范围为 4~17 mW，G.652.D 光纤为 6~19 mW。

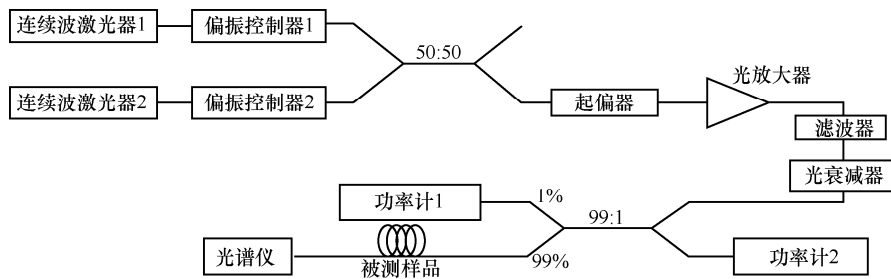


图 5 非线性系数测量系统配置示意图

表 3 测量采用的参数

光纤长度/km	测量光波长/nm	波长间隔/nm	功率差最大值/dB	注入功率范围/mW
0.5	λ_1 : 1 549.96; λ_2 : 1 550.26	0.30	0.1	4~17 (ULA-130); 6~19 (G.652.D)



$$2\pi c \cdot \left(\frac{\Delta\omega_0}{\omega} \right) \cdot \phi_{\max} \cdot |D| \cdot L \ll 1 \quad (4)$$

其中, c 为真空中光速, $\Delta\omega_0$ 为两束输入光的频率差, ω 为两束输入光的频率平均值, $\phi_{\max}$ 为自相位调制效应产生的预期最大非线性相移, $|D|$ 为 1 550 nm 波长光纤色散系数的绝对值, L 为待测光纤长度。

两种光纤的非线性测量结果见表 4, 其中模场直径与有效面积均通过直接远场光分布法测量得出。从表 4 可以看出, ULA-130 光纤的有效面积为 $133 \mu\text{m}^2$, 远大于 G.652.D 光纤, 与理论设计基本一致, 其非线性系数远小于 G.652.D 光纤。图 6 给出了在入纤功率相当时, ULA-130 光纤与常规 G.652.D 光纤产生非线性效应大小的对比。从图 6 可以看出, 在注入光纤功率均为 14 dBm 的条件下, ULA-130 光纤由于非线性效应产生的新频率分量, 其功率峰值比常规的 G.652.D 光纤降低 4.79 dB, 表明有效面积大、非线性系数小的新型 ULA-130 光纤具有更优异的非线性性能。在线路跨距相同、发射光功率相当的密集波分复用通信系统中, 相对于 G.652.D 光纤, 采用 ULA-130 光纤承载光信号, 光纤线路中因非线性效应产生的信号间串扰导致的系统光信噪比劣化的情况可以得到明显改善。在未来 400G/1T 等超高速传输系统中, 随着密集波分复用系统传输速率提升, 高调制阶数下入纤功率较高时, 采用 ULA-130 光纤可有效抑制因自相位调制、交叉相位调制、四波混频、受激布里渊散射等非线性效应带来的系统性能劣化, 提升系统的性能。

4 ULA-130 光纤对系统品质因数的改善

第 3 章主要从实验室测试技术的角度对

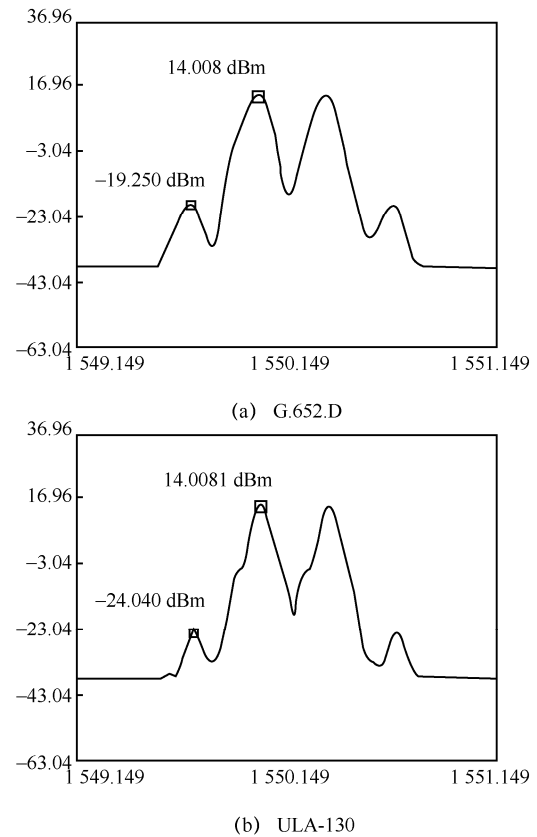


图 6 ULA-130 光纤与 G.652.D 光纤非线性效应对比

ULA-130 光纤的衰减系数、非线性性能和弯曲性能进行了研究, 同时与常规 G.652.D 光纤进行了对比。通常在实际的工程中, 通常采用传输系统品质因数来比较不同类型光纤的传输性能的差异^[25], 如式 (5) 所示。

$$\text{FOM} = 10 \times \log \left[\frac{A_{\text{eff}} \times n_{2,\text{ref}}}{A_{\text{eff,ref}} \times n_2} \right] - (\alpha - \alpha_{\text{ref}}) \cdot L - 10 \times \log \left(\frac{L_{\text{eff}}}{L_{\text{eff,ref}}} \right) \quad (5)$$

其中, FOM 为传输系统的品质因数; A_{eff} 为光纤有效面积, $A_{\text{eff,ref}}$ 为参考光纤的指标; n_2 为光纤非线性折射率, $n_{2,\text{ref}}$ 为参考光纤的指标; α 为光

表 4 新型 ULA-130 光纤与常规 G.652.D 光纤参数对比 (@1 550 nm)

	模场直径/ μm	有效面积/ μm^2	非线性系数/ 10^{-10} W^{-1}	非线性折射率/ $10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$
G.652.D 光纤	10.42	83	2.94	2.45
ULA-130 光纤	12.43	133	1.67	2.23

纤衰减系数, α_{ref} 为参考光纤的指标; L_{eff} 为光纤有效长度, $L_{\text{eff,ref}}$ 为参考光纤的指标; L 为光纤长度。

采用常规 G652.D 光纤为参考光纤, 在 1 550 nm 波长处按照单跨距 80 km、100 km 和 120 km 的长度, 对新型 ULA-130 光纤带来的性能提升进行测算, 按照式 (5) 计算得出 FOM 值分别为 4.51 dB、5.16 dB、5.83 dB, 如图 7 所示。可见, 在上述不同长度的跨距长度下, 相对于常规 G652.D 光纤, ULA-130 光纤可使光传输系统的光信噪比获得显著提升, 有效提升系统的传输性能。

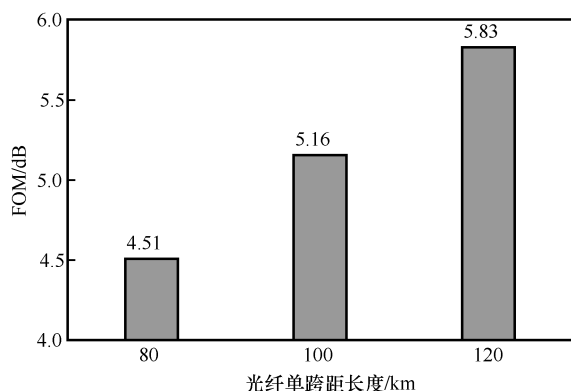


图 7 ULA-130 光纤对系统品质因数的改善

5 结束语

本研究采用双包层的波导结构结合纯二氧化硅芯的技术方案, 通过包层氟掺杂的设计与芯/包层之间粘度匹配的优化, 实现了超低损耗大有效面积 ULA-130 型 G654.E 光纤的制造, 对比结果表明, ULA-130 光纤相对于常规 G652.D 光纤具有更加优异的衰减特性和非线性性能, 可有效提升光传输系统的光信噪比, 同时其弯曲性能也达到了陆地骨干网敷设使用的要求。随着我国“网络强国”战略的深入实施和新型基础设施建设的全面开展, 数字化社会对网络带宽容量的需求将进一步上升, 该新型 ULA-130 光纤可较好地应对下一代大容量、高速率和长距离光通信骨干网传输系统性能提升的需求。

参考文献:

- [1] 孙卫强, 胡卫生. 大数据时代的数据传输网[J]. 大数据, 2015, 1(2): 56-65.
SUN W Q, HU W S. Networking challenges in the big data era[J]. Big Data Research, 2015, 1(2): 56-65.
- [2] 罗松, 贾雪琴, 续合元, 等. 全球物联网发展态势及我国推进建议[J]. 物联网学报, 2017, 1(1): 7-12.
LUO S, JIA X Q, XU H Y, et al. Global IoT development status and development proposals of IoT in China[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(1): 7-12.
- [3] 王庆扬, 谢沛荣, 熊尚坤, 等. 5G 关键技术与标准综述[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 112-122.
WANG Q Y, XIE P R, XIONG S K, et al. Key technology and standardization progress for 5G[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 112-122.
- [4] 陈伟, 袁健, 贺作为. 400 Gbit/s 骨干网用超低损耗超大有效面积光纤的开发[J]. 光通信研究, 2016(1): 25-28.
CHEN W, YUAN J, HE Z W. Development of the ultra-low-loss super large area optical fibres for 400 Gbit/s backbone networks[J]. Study on Optical Communications, 2016(1): 25-28.
- [5] ELLIS A D, ZHAO J, COTTER D. Approaching the non-linear Shannon limit[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 423-433.
- [6] MITRA P P, STARK J B. Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications[J]. Nature, 2001, 411(6841): 1027-1030.
- [7] WOOD W A, TEN S Y, ROUDAS I, et al. Relative importance of optical fiber effective area and attenuation in span length optimization of ultra-long 100 Gbit/s PM-QPSK systems [EB]. 2018.
- [8] MAKOVEJS S, DOWNIE J D, HURLEY J E, et al. Towards superior transmission performance in submarine systems: leveraging ultralow attenuation and large effective area[J]. Journal of Light wave Technology, 2016, 34(1): 114-120.
- [9] ESSIAMBRE R J, KRAMER G, WINZER P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 662-701.
- [10] SHEN S, WANG G, WANG S, et al. First 400G system field tests on terrestrial multi-vendors G. 654. E fibres[C]// Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference. [S.l.: s.n.], 2017.
- [11] 易准. 400 Gbit/s WDM 技术方案及应用场景分析[J]. 电信快报, 2016(6): 13-15.
YI Z. Technical solution and application senario of 400 Gbit/s WDM[J]. Telecom Express, 2016(6): 13-15.
- [12] ITU-T. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable: G. 654[S]. 2016.
- [13] IEC. Optical fibres-part 2-50 product specifications-sectional



- specification for class B single-mode fibres: 60793-2-50[S]. 2015.
- [14] 截止波长位移单模光纤特性: YD/T 3328[S]. 2018.
Characterics of a cut-off wavelength shifted single-mode optical fibre: YD/T 3328[S]. 2018.
- [15] 高雄. 大有效面积超低损耗新型光纤及其应用[J]. 江苏通信, 2018, 34(1): 65-69.
GAO X. New type large effective area and ultra-low-loss optical fibre and application[J]. Jiangsu Communication, 2018, 34(1): 65-69.
- [16] 白新宇, 高军诗. 低损耗大有效面积光纤在新一代海缆系统中的应用[J]. 电信工程技术与标准化, 2014(5): 1-3.
BAI X Y, GAO J S. Ultra low loss and large effective area fiber for the new generation submarine cable system[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2014(5): 1-3.
- [17] TATEDA M, OHASHI M, TAJIMA K. Design of viscosity-matched optical fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 4(9): 1023-1025.
- [18] OHASHI M, TATEDA M, SHIRAKI K. Imperfection loss reduction in viscosity-matched optical fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7): 812-814.
- [19] 劳雪刚, 肖华, 沈震强. 一种长距离通信用的低成本 G₆₅₄. E 光纤制造方法[C]//光纤材料产业技术创新战略联盟. 光纤材料产业技术创新战略联盟一届七次理事会暨技术交流会会议文集. 光纤材料产业技术创新战略联盟: 中国电子材料行业协会, 2017: 92-102.
LAO X G, XIAO H, SHEN Z Q. A manufacturing method of low cos G₆₅₄. E optical fibre for long range communication[C]//Proceedings of the 7th Council and Technical Exchange Meeting of the First Session of the Strategic Alliance for Technological Innovation of Optical Fiber Materials Industry. Technology Innovation Strategic Alliance of Optical Fiber Material Industry: China Electronics Materials Industry Association, 2017: 92-102.
- [20] 肖华, 劳雪刚, 沈震强, 等. 超低损耗光纤的制造工艺研究[J]. 现代传输, 2019(1): 73-76.
XIAO H, LAO X G, SHEN Z Q, et al. Research on manufacturing process of ultra-low-loss optical fibre[J]. Modern Transmission, 2019(1): 73-76.
- [21] 陈明, 殷国亮, 李强, 等. 一种光纤的宏弯损耗测试工装: CN204241188U[P]. 2015-04-01.
CHEN M, YIN G L, LI Q, et al. A device for fiber macro-bending loss test: CN204241188U[P]. 2015-04-01.
- [22] 雷琼, 莫琦, 陈伟, 等. 用于光纤宏弯损耗测量时弯曲光纤的装置和方法: CN103776617B[P]. 2016-11-30.
LEI Q, MO Q, CHEN W, et al. A device and method of fiber bending for fiber macro-bending loss test: CN103776617B[P]. 2016-11-30.
- [23] 谢云, 吴迪, 刘沛东, 等. 一种光纤宏弯损耗检测装置及其检测方法: CN106092522A[P]. 2016-11-09.
XIE Y, WU D, LIU P D, et al. A device and test method for fiber macro-bending loss test: CN106092522A[P]. 2016-11-09.
- [24] 韩超, 刘泰, 吕捷, 等. 一种用于光纤宏弯损耗测量的光纤缠绕装置及方法: CN107179178A[P]. 2019-04-19.
HAN C, LIU T, LV J, et al. A loose winding device and method for measurement of macro-bending loss of optical fibre: CN107179178A[P]. 2019-04-19.
- [25] 孟凡, 王玮, 宋占娜, 等. 超高速、超长距传输系统性能分析[J]. 电信工程技术与标准化, 2017, 30(7): 78-81.
MENG F, WANG W, SONG Z N, et al. Analysis of performances for ultra-high speed, ultra-long haul transmission system[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2017, 30(7): 78-81.

[作者简介]



韩超 (1974-), 男, 中国信息通信研究院泰尔系统实验室高级工程师、副主任, 长期从事光纤光缆测试技术研究以及标准化工作。



肖华 (1972-), 男, 江苏亨通光导新材料有限公司高级工程师、总工程师, 长期致力于光纤预制棒的研发与应用工作。



钟媛 (1984-), 女, 博士, 江苏亨通光导新材料有限公司中级工程师、光棒产品工程师, 主要从事低损耗、抗弯曲类光纤预制棒产品的研发和应用工作。

劳雪刚 (1984-), 男, 江苏亨通光导新材料有限公司中级工程师, 长期从事各类光纤预制棒产品的研发和应用工作。

韩超 (1989-), 男, 现就职于中国信息通信研究院, 长期从事光纤光缆的设计、测试技术研究以及标准化工作。