

弯曲不敏感低损耗大有效面积 G.654.E 光纤的研究

吴椿烽, 陈京京, 郑垒垒, 肖少峰, 何亮, 仇春雷, 周建峰, 沈一春*

(中天科技精密材料有限公司, 江苏 南通 226009)

摘要: 针对光纤损耗与非线性效应会导致光纤弯曲性能劣化的问题, 设计了具有沟渠层、过渡层和适宜包芯比的折射率剖面结构 G.654.E 光纤, 研究了 G.654.E 光纤的波导结构对衰减、光学性能的影响。试验结果表明: 在 1550 nm 和 1625 nm 波长处, 光纤的衰减典型值分别是 0.162 dB/km、0.178 dB/km; 弯曲半径为 10 mm、绕 1 圈时的宏弯损耗分别低于 0.04 dB、0.06 dB; 弯曲半径为 30 mm、绕 100 圈时的宏弯损耗典型值分别是 0.008 dB、0.015 dB; 光纤在 1550 nm 波长处的有效面积典型值可达 130 μm^2 。

关键词: 折射率剖面; 衰减; 有效面积; 弯曲损耗; 掺氟

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2022)01-0062-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Study of low loss large effective area G.654.E optical fiber with bending insensitive

WU Chunfeng, CHEN Jingjing, ZHENG Leilei, XIAO Shaofeng, HE Liang,
QIU Chunlei, ZHOU Jianfeng, SHEN Yichun*

(Zhongtian Technology Advanced Material Co., Ltd., Nantong Jiangsu 226009, China)

Abstract: Aiming at the problem that fiber loss and nonlinear effect will degrade the bending performance of optical fiber, a refractive index profile structure G.654.E optical fiber with ditch layer, transition layer and appropriate cladding ratio is designed, and the effects of waveguide structure of G.654.E optical fiber on attenuation and optical performance are studied. The test results show that at 1550 nm and 1625 nm wavelength, the typical attenuation values of optical fiber are 0.162 dB/km and 0.178 dB/km respectively. When the bending radius is 10 mm and one turn is wound, the macro bending loss is lower than 0.04 dB and 0.06 dB respectively. When the bending radius is 30 mm and 100 turns, the typical values of macro bending loss are 0.008 dB and 0.015 dB respectively. The typical effective area of optical fiber at 1550 nm wavelength can reach 130 μm^2 .

Key words: refractive index profile, attenuation, effective area, bending loss, fluorine-doped

0 引言

自 2020 年新冠病毒流行以来, 人们更加重视网络学习与办公, 对光传输网络和云服务的需求与日俱增。目前, 100G、400G 的长距离大容量光通信传输网络正成为运营商骨干网的主导。对于长距离光纤传输系统而言, 其性能好坏取决于信噪比, 光纤的传输速

率越快, 无误码传输所需要的信噪比越大^[1-2], 而光信噪比与信道的发射功率、光学放大器的噪声因数、各跨距损耗以及链接中的跨距总数密切相关。其中, 跨距损耗与光纤的衰减有关, 信道发射功率与光纤中四波混频(FWM)产生的非线性效应有关^[3-5]。因此, 光纤损耗和非线性效应是限制光纤长距离传输的主要因素^[6-8]。

目前, 业界一般通过调节芯层掺铒浓度、芯层直径和增加光纤有效面积 A_{eff} 来解决光纤损耗与非线性效应难题。但是, 由于纤芯中折射率的降低和直径的增加会导致光纤的弯曲性能劣化, 因此研究一种既能满足降低衰减、增加 A_{eff} , 又能实现良好弯曲性能的低损耗、大 A_{eff} 光纤是十分必要的。本文设计一种具有沟

收稿日期: 2021-04-15。

作者简介: 吴椿烽(1982—), 男, 江苏南通人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为光纤预制棒的设计与研发制造, 参与了国家级、省部级项目共 6 项, 获省级科技进步二等奖 1 项、市级科技进步二等奖 2 项和三等奖 1 项。

* 通信作者: 沈一春(1979—)男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向是光纤及光纤预制棒研究与制造。



渠层、过渡层和适宜包芯比的折射率剖面结构 G.654.E 光纤,并研究该光纤的波导结构对衰减、光学性能的影响。

1 光纤波导结构研究及剖面设计

光纤的波导结构决定了其光学性能。由光传输机理^[9-13]可知,折射率剖面结构中从内至外的各层折射率设计值、芯层与各层之间的几何关系、工作波长对产品的衰减、模场直径(MFD)、 A_{eff} 、截止波长 λ_c 和宏弯损耗有着重要的影响。根据光纤的弯曲损耗理论及相关研究^[14-16]可知,单模光纤的弯曲损耗 α_c 计算公式为:

$$\alpha_c = A_c \times R^{-1/2} \times \exp(-KR) \quad (1)$$

$$A_c = 30 \times \Delta n^{1/4} \times \lambda^{-1/2} \times (\lambda_c / \lambda)^{3/2} \quad (2)$$

$$K = 0.705 \times (\Delta n^{3/2} / \lambda) \times (2.748 - 0.996 \times \lambda_c / \lambda)^3 \quad (3)$$

其中, K 为弯曲损耗系数, A_c 为工作波长下基模的振幅, R 为光纤弯曲半径, λ 为工作波长, Δn 为芯/包相对折射率差。由式(1)~式(3)可见,在 R 一定的情况下, Δn 是光纤弯曲损耗 α_c 的主要影响因素。

本文设计多包层结构,通过调节芯层掺锗浓度控制芯层折射率;同时,调节各包层中掺氟量的大小来控制各包层折射率,从而形成不同的折射率剖面结构(I、II、III 和 IV),实现低衰减、大 A_{eff} 和抗弯曲三者之间的平衡。不同光纤折射率剖面的结构示意图如图 1 所示,芯层 Δn_1 、光学层 Δn_2 、沟渠层 Δn_3 和过渡层 Δn_4 是相对于纯硅外包层的相对折射率差, $R_1 \sim R_4$ 为各层的半径。

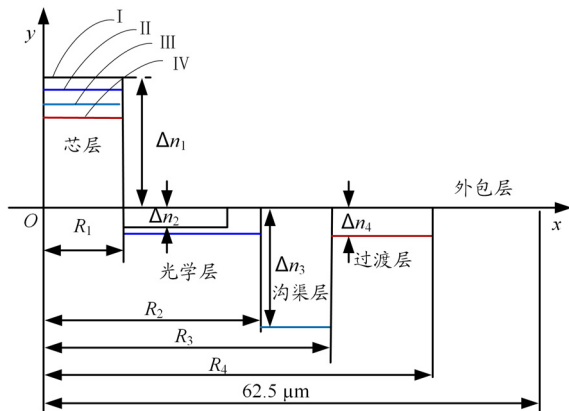


图 1 不同折射率剖面结构示意图

图 1 中, II 的设计结构与 G.652 光纤的折射率剖面结构(图中 I)类似,是通过适量降低芯层掺锗量来实现的,具有较低的制造成本;III 的设计结构是通过大幅降低芯层中 GeO_2 的掺入量,同时调节光学层的折射率和在光学层外匹配沟渠层来实现的,起到对芯层中传输光的约束作用;IV 的设计结构是在 III 的结构

基础上再设计一层掺氟过渡层,目的是为了论证参数变化效果。

2 制备过程

本文制备具有良好抗弯曲性能的低损耗大有效面积 G.654.E 光纤。制备过程如下:首先,以轴向气相沉积(VAD)法沉积芯层和光学层;然后,使用改进的化学气相沉积(MCVD)法沉积沟渠层和过渡层;最后,采用外部气相沉积(OVD)法沉积外包层,通过控制各层中的掺杂种类、掺入量和 SiCl_4 流量实现不同波导结构光纤预制棒的制备。表 1 列出了用不同波导结构光纤预制棒拉制成光纤的折射率剖面结构参数($\gamma_1 \sim \gamma_4$ 为各层的径向尺寸)。

表 1 不同光纤折射率剖面的结构参数

试样	芯层		光学层		沟渠层		过渡层	
	$\gamma_1/\mu\text{m}$	Δn_1	$\gamma_2/\mu\text{m}$	Δn_2	$\gamma_3/\mu\text{m}$	Δn_3	$\gamma_4/\mu\text{m}$	Δn_4
NO.1	7.3	0.28%	16.5	-0.02%	0	0	0	0
NO.2	7.6	0.21%	22.0	-0.09%	0	0	0	0
NO.3	8.1	0.12%	23.1	-0.11%	11.3	-0.33%	0	0
NO.4	7.2	0.19%	20.9	-0.1%	10.3	-0.31%	14.0	-0.07%
NO.5	7.6	0.11%	24.6	-0.15%	10.5	-0.45%	14.4	-0.10%

3 结果与讨论

3.1 折射率剖面结构对光纤性能的影响

本文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(弯曲半径 $R=30\text{ mm}$ 、绕 100 圈),测试结果如表 2 所示。对比 NO.1~NO.3 光纤可见,光纤的衰减呈降低趋势, A_{eff} 逐渐增大,这主要是通过减少芯层掺锗量降低了芯层 Δn_1 ,从而降低了芯层因掺杂引起的瑞利散射影响,同时增加了光纤的 MFD。但是,这 3 种光纤的宏弯性能较差,NO.3 光纤中宏弯性能比 NO.2 光纤有所改善,主要是设计的沟渠层起到了约束光在芯层内传输的作用,减少了光功率的泄漏;对比 NO.3~NO.5 光纤,在剖面结构中设计过渡层后,光纤 λ_c

表 2 不同折射率剖面结构光纤的测试结果

试样	MFD/ μm	$A_{eff}/\mu\text{m}^2$	λ_c/nm	衰减/(dB·km ⁻¹)		宏弯损耗/dB	
				1550 nm	1625 nm	1550 nm	1625 nm
NO.1	12.4	122	1433	0.184	0.195	0.16	0.29
NO.2	12.8	133	1301	0.182	0.194	0.27	0.58
NO.3	13.8	152	1322	0.179	0.191	0.18	0.37
NO.4	12.5	126	1443	0.170	0.187	0.01	0.03
NO.5	13.2	144	1482	0.164	0.178	0.01	0.02

得到有效控制(22 m 光纤测试值),且随着过渡层宽度/深度的增加而增加,宏弯性能也得到显著的改善。

图 2 是 NO.1 光纤的折射率剖面图,其设计结构类似常规 G.652 光纤,通过增加芯层直径、降低芯层和光学层的折射率差($\Delta n_1 - \Delta n_2$)来实现。相对于 G.652 而言,NO.1 光纤具有较低的衰减损耗和更大的 MFD。然而,由于受宏弯损耗因素的限制,光纤衰减的改善空间有限。

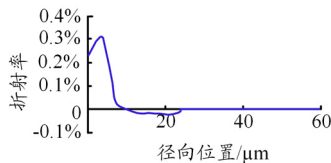


图 2 NO.1 光纤的折射率剖面图

图 3 是 NO.2 光纤的折射率剖面图,本文通过控制芯层 GeO_2 含量来降低 Δn_1 ,同时增加光学层掺氟量来提高 $|\Delta n_2|$,保证光纤芯层和光学层的折射率差($\Delta n_1 - \Delta n_2$)不变。从光纤测试结果可知,与 NO.1 光纤相比,光纤在波长为 1550 nm 时衰减变化不显著,宏弯损耗却大幅增加。这是由于芯层相对于外包层的 Δn_1 降低,且光学层 γ_2 不够宽,即使芯层和光学层的折射率差($\Delta n_1 - \Delta n_2$)不变,也会无法有效约束光在芯层中传输,引起光功率严重泄露,宏弯损耗显著增加。

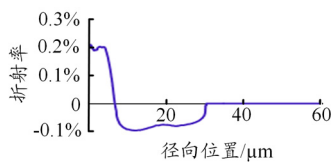


图 3 NO.2 光纤的折射率剖面图

图 4 是 NO.3 光纤的折射率剖面图。为了实现降低衰减与增加光纤 MFD,在大幅降低芯层掺锗量的同时,设计掺氟沟渠层来改善宏弯特性。从光纤测试结果可知,NO.3 光纤的衰减和宏弯损耗得到控制,但是其改善效果有限。这主要是由于芯层 Δn_1 降低后,光纤 MFD 值随之增加;又由于沟渠层可以提高芯层内光的约束能力及增加 λ_c ,在一定程度上起到了缓解光功率泄露的作用,但是仍存在部分光泄露的现象。

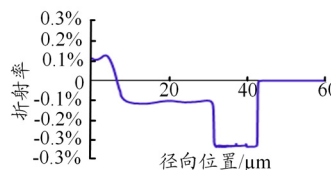


图 4 NO.3 光纤的折射率剖面图

图 5 是 NO.4 光纤的折射率剖面图。为了避免光功率泄露,在基于 NO.3 光纤折射率剖面的基础上,适当提高芯层 Δn_1 值(光学层折射率保持不变),同时设计掺氟过渡层。从光纤测试结果可知,NO.4 光纤的衰减明显改善, A_{eff} 达到 $126 \mu\text{m}^2$, λ_c 为 1443 nm,宏弯损耗也

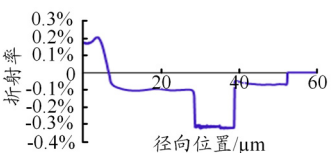


图 5 NO.4 光纤的折射率剖面图

得到较好的控制,说明基本避免了光的泄露。

图 6 是 NO.5 光纤的折射率剖面图。基于 NO.1~NO.4 光纤的试验结果,进一步优化剖面结构。NO.5 光纤在降低芯层 Δn_1 的同时,调节光学层 Δn_2 、沟渠层 Δn_3 和过渡层的 Δn_4 和几何尺寸($\gamma_2 - \gamma_4$)。从测试结果可知,光纤在波长为 1550 nm 时衰减可降低至 0.164 dB/km, λ_c 、 A_{eff} 分别为 1482 nm、 $144 \mu\text{m}^2$;在 $R=30 \text{ mm}$ 、绕 100 圈时,1550 nm、1625 nm 波长处的宏弯分别是 0.01 dB、0.02 dB。

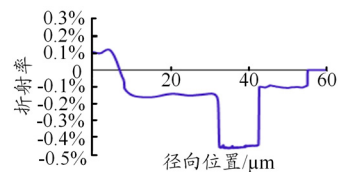
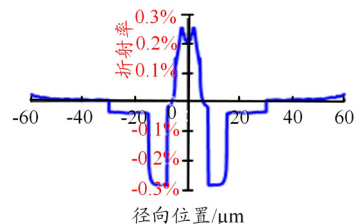


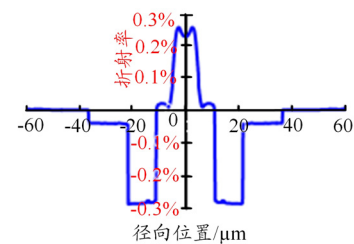
图 6 NO.5 光纤的折射率剖面图

3.2 光纤包芯比 $(\gamma_2 + \gamma_1)/\gamma_1$ 对光学性能影响

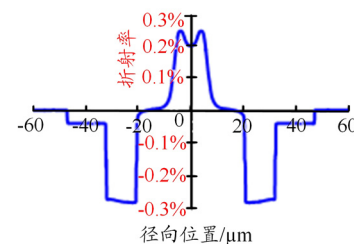
为了进一步验证折射率剖面结构中包芯比 $(\gamma_2 + \gamma_1)/\gamma_1$ 对宏弯损耗的影响,本文在各层折射率固定的条件下,通过调整 VAD 工艺控制光学层的沉积厚度,制备不同包芯比的芯棒。图 7 为光纤的光学层厚度逐渐增加时对应不同包芯比 $(\gamma_2 + \gamma_1)/\gamma_1$ 的光纤折射率剖面图。表 3 列出了光纤在不同包芯比 $(\gamma_2 + \gamma_1)/\gamma_1$ 值条件下的光学参数,其



(a) NO.6 光纤的折射率剖面图



(b) NO.7 光纤的折射率剖面图



(c) NO.8 光纤的折射率剖面图

图 7 不同 $(\gamma_2 + \gamma_1)/\gamma_1$ 值光纤的折射率剖面图

随着 $(\gamma_2 + \gamma_1)/\gamma_1$ 值越小

表 3 不同包芯比 $(\gamma_2+\gamma_1)/\gamma_1$ 值条件下的光纤性能

试样	$(\gamma_2+\gamma_1)/\gamma_1$	MFD/ μm	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	λ_c/nm	衰减/(dB·km ⁻¹)		宏弯损耗/dB	
					1550 nm	1625 nm	1550 nm	1625 nm
NO.6	1.8	11.8	117	1511	0.35	0.38	0.004	0.009
NO.7	2.3	12.1	119	1480	0.19	0.21	0.005	0.011
NO.8	3.2	12.7	126	1485	0.173	0.189	0.009	0.017

越明显。因此,应选择合适的 $(\gamma_2+\gamma_1)/\gamma_1$ 值来平衡衰减和宏弯性能之间的关系。

3.3 光纤性能测试与分析

本文对设计具有沟渠层、过渡层和适宜包芯比的折射率剖面结构的光纤预制棒进行制备、拉丝与测试。图 8 是采用光纤特性分析仪 PK2200 测试的光纤衰减谱损图,在 1383 nm、1550 nm 和 1625 nm 波长处的衰减值分别是 0.453 dB/km、0.163 dB/km 和 0.176 dB/km。当预制棒中包芯比 $(\gamma_2+\gamma_1)/\gamma_1$ 降低时,除了对 1550 nm、1625 nm 波长处的衰减、宏弯损耗有影响外,对光纤的水峰也会产生影响,这是由于当 $(\gamma_2+\gamma_1)/\gamma_1$ 降低后,外层的羟基在制备及拉丝过程中因受热而容易扩散至芯层,从而影响水峰^[17]。图 9 是光纤在弯曲半径 $R=10$ mm、

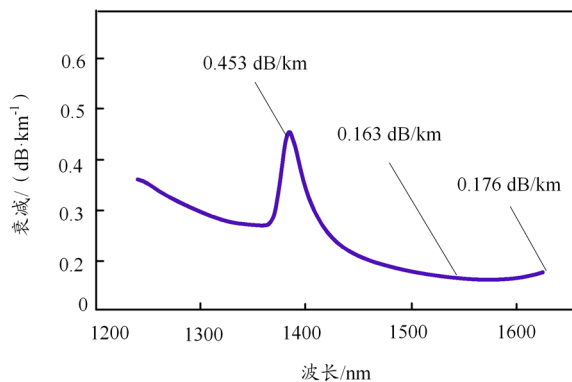


图 8 光纤衰减的谱损图

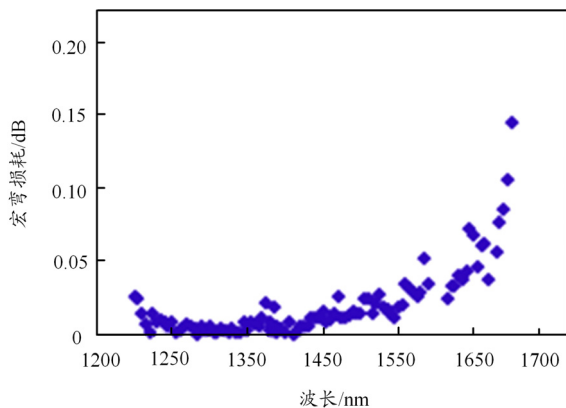


图 9 在弯曲半径 $R=10$ mm、绕 1 圈时，不同波长处光纤宏弯损耗的分布图

绕 1 圈的条件下，不同波长处的宏弯损耗分布图,在 1550 nm、1625 nm 波长处的宏弯损耗分别低于 0.04 dB 和 0.06 dB,具有良好的抗弯曲性能,达到了 G.657.A2 的宏弯水平。图 10 是光纤在 1550 nm、1625 nm 波长处的衰减直方图,其典型值分别为 0.162 dB/km、0.178 dB/km。图 11 是光纤在弯曲半径 $R=30$ mm、绕 100 圈条件下,1550 nm、1625 nm 波长处的宏弯损耗直方图,典型值分别是 0.008 dB、0.015 dB。图 12 是光纤在

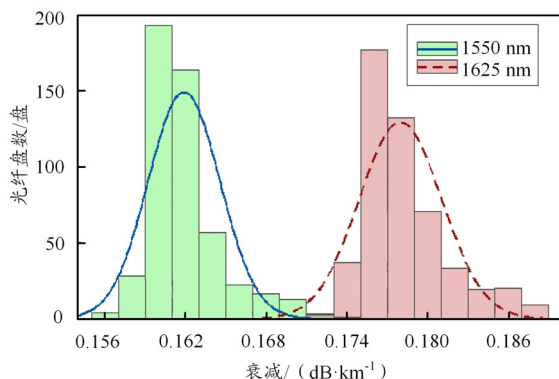


图 10 1550 nm、1625 nm 波长处光纤衰减的直方图

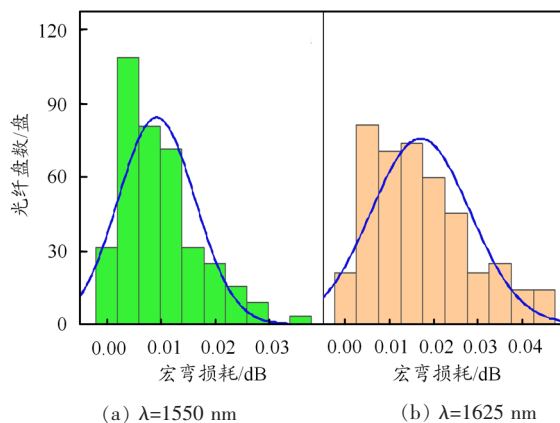


图 11 弯曲半径 $R=30$ mm、绕 100 圈时，1550 nm、1625 nm 波长处光纤宏弯的直方图

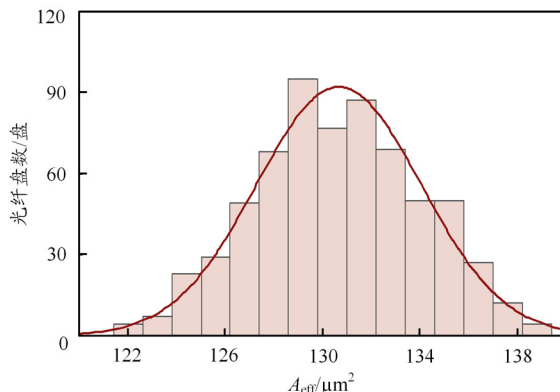


图 12 1550 nm 波长处光纤 A_{eff} 的直方图

吴椿烽,陈京京,郑奎奎,等:弯曲不敏感低损耗大有效面积 G.654.E 光纤的研究

1550 nm 波长处的 A_{eff} 直方图,典型值约为 $130 \mu\text{m}^2$ 。综上所述,基于 VAD、MCVD 与 OVD 工艺制备的 G.654.E 光纤具有抗弯曲、低损耗和大 A_{eff} 的特点,完全满足 100G 以上长途干线的应用要求。

4 结束语

本文通过设计与制备具有不同折射率剖面结构的光纤预制棒并进行拉丝、测试,由光纤的检测指标可知:通过控制光纤芯层、光学层掺杂量,优化芯层/光学层的折射率差($\Delta n_1 - \Delta n_2$),同时匹配设计沟渠层和过渡层,这样更有利于降低光纤的瑞利散射与非线性效应,控制光纤 λ_c 和宏弯性能,使光纤具有衰减损耗低、 A_{eff} 大和弯曲损耗性能良好等特性。同时,应合理控制光学层/芯层的包芯比,避免因沟渠层与光学层之间的边界微缺陷引起衰减增加。研究结果表明:通过优化工艺所制备的光纤,其 1550 nm、1625 nm 波长处的衰减典型值分别是 0.162 dB/km、0.178 dB/km, A_{eff} 典型值为 $130 \mu\text{m}^2$,具有良好的抗弯曲性能,达到了 G.657.A2 的宏弯水平,能够满足长途干线用 G.654.E 光纤的性能要求。

参考文献:

[1] LEE J H, CHOI H Y, SHIN S K, et al. A review of the polarization-nulling technique for monitoring optical-signal-to-noise ratio in dynamic WDM networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(11): 4162–4171.

[2] RAO Y J, RAN Z L, CHEN R R. Long-distance fiber Bragg grating sensor system with a high optical signal-to-noise ratio based on a tunable fiber

ring laser configuration[J]. Optics Letters, 2006, 31(18): 2684–2686.

[3] 李明军, 陈皓. 用于大容量光传输系统的新型光纤 [J]. 电信科学, 2014(6): 1–15.

[4] 贺作为, 陈伟, 张良. 高速传输系统用低损耗单模光纤的研究[J]. 光通信研究, 2015(2): 35–38.

[5] MAKOVEJS S, DOWNIE J, HURLEY J E, et al. Towards superior transmission performance in submarine systems: leveraging ultra low attenuation and large effective area [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 114–120.

[6] 胡先志, 易亚军, 杨博, 等. 采用 G.654.E 光纤的 1234.2 km 和 600 Gb/s 传输实验[J]. 光通信技术, 2020, 44(9): 27–29.

[7] 吴椿烽, 秦钰, 钱宜刚, 等. 长距离通信干线用低损耗大有效面积光纤 G.654.E 的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2021(2): 22–25.

[8] 原荣. 海底光缆通信 - 关键技术、系统设计及 OA&M[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.

[9] 曹骏, 简伟, 简水生. 纯二氧化硅芯光纤的损耗分析[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2005, (4): 5–7.

[10] MAKOVEJS S, DOWNIE J, 董浩, 等. G.654.E 光纤长距离传输性能研究[J]. 邮电设计技术, 2018(6): 10–13.

[11] 曹文聪, 胡先志. 光导纤维[M]. 何书平, 译, 武汉: 武汉工业大学出版社, 1994.

[12] 赵梓森. 光纤通信工程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1994.

[13] 胡先志. 光纤与光缆技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

[14] MARCUSE D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. Journal of the Optical Society of America Optical Physics, 1976, 66(3): 216–220.

[15] WATEKAR P R, JU S, HAN W T. Optimized design of trench optical fiber for ultra low bending loss at 5mm of bending diameter[J]. Applied Optics, 2011, 50(25): 97–101.

[16] 杨祥林. 光纤通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[17] PLOTNICHENKO V G, IVANOV G A, KRYUKOVA E B, et al. Influence of molecular hydrogen diffusion on concentration and distribution of hydroxyl groups in silica fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 341–347.