

文章编号: 1000-7032(2023)04-0694-07

## 19芯碲酸盐玻璃放大光纤的低串扰结构设计及性能仿真

张 敏<sup>1,2</sup>, 王弦歌<sup>1,2</sup>, 李宁哲<sup>1,2</sup>, 肖 峰<sup>1,2</sup>, 贾金升<sup>1,2</sup>, 黄 庆<sup>1,2</sup>, 白胜闯<sup>1,2</sup>,  
刘自军<sup>1,2</sup>, 沈 祥<sup>1,2,3</sup>, 戴世勋<sup>1,2</sup>, 聂秋华<sup>1,2</sup>, 赵 丹<sup>4</sup>, 秦冠仕<sup>4</sup>, 王训四<sup>1,2\*</sup>

(1. 宁波大学高等技术研究院 红外材料与器件实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211; 3. 浙江省海洋研究院, 浙江 宁波 315211;

4. 吉林大学 集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 基于空分复用技术的多芯光纤通信核心指标之一是信道串扰, 该问题的存在极大地影响着传输距离及信号质量, 尤其是在宽带光纤放大系统中。本文重点讨论了弱耦合19芯光纤的串扰问题, 同时提出了一种利于多组分碲酸盐玻璃挤压制备的沟槽辅助型19芯光纤, 并采用耦合功率理论和有限元法对模型进行了相关性能的数值仿真, 系统研究了沟槽尺寸、折射率分布及相关光纤参数对芯间串扰的影响。仿真结果表明, 优化设计后的光纤在1550 nm处拥有-156 dB/100 m的低串扰值, 可以满足大容量光纤通信用宽带光放大器的应用需求。

**关键词:** 低串扰; 19芯光纤; 沟槽辅助型; 多组分碲酸盐玻璃

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220371

## Low Crosstalk Structure Design and Performance Simulation in 19-core Tellurite Glass Amplification Fiber

ZHANG Min<sup>1,2</sup>, WANG Xiang<sup>1,2</sup>, LI Ningzhe<sup>1,2</sup>, XIAO Feng<sup>1,2</sup>, JIA Jinsheng<sup>1,2</sup>, HUANG Qing<sup>1,2</sup>,  
BAI Shengchuang<sup>1,2</sup>, LIU Zijun<sup>1,2</sup>, SHEN Xiang<sup>1,2,3</sup>, DAI Shixun<sup>1,2</sup>, NIE Qiuhua<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Dan<sup>4</sup>, QIN Guanshi<sup>4</sup>, WANG Xunsi<sup>1,2\*</sup>

(1. Laboratory of Infrared Materials and Devices, Research Institute of Advanced Technology,  
Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Key Laboratory of Photoelectric Detection Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China;

3. Zhejiang Institute of Oceanography, Ningbo 315211, China;

4. State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding Author, E-mail: wangxunsi@nbu.edu.cn

**Abstract:** Channel crosstalk is one important feature of multi-core fiber communication based on space division multiplexing technology, which could affect the signal quality and transmission distance of the broadband fiber amplification system. This paper is focused on the crosstalk problems of a 19-core weak coupling optical fiber, as that can benefit much to develop high-volume communicating fiber based on fiber extrusion technology. Then, the optical coupling theory and finite element method are adopted to complete the numerical simulation of fiber performance, here, key parameters of groove size, core refractive index distribution and their influence on the crosstalk of the fiber are optimized wholly. The simulation results show that the optimized fiber has a low crosstalk of -156 dB/100 m at 1550 nm, which could meet the requirements of future long-distance high-capacity optical fiber communication.

**Key words:** low crosstalk; 19-core fiber; trench assisted; multicomponent tellurite glass

收稿日期: 2022-10-18; 修订日期: 2022-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(61705091, 61875097); 浙江省青年拔尖人才万人计划

Supported by National Natural Science Foundation of China(61705091, 61875097); Zhejiang Provincial Ten Thousand Plan for Young Top Talents

## 1 引言

在带宽需求量迅速增长的通信网络背景下,波分复用与调制技术的结合使得光纤通信容量不断扩大,传统单模单芯光纤(SM-SCF)的容量已接近100 Tb/s的香农传输极限。因此,为了克服当前光纤通信系统面临的容量紧张的问题,空分复用逐渐成为焦点。空分复用技术(SDM)利用空间维度上的信道数量增加来提高单根光纤的传输容量<sup>[1]</sup>,可以分为少模光纤(FMF)和多芯光纤(MCF)。FMF支持多个模式的同步传输且易于制造,但是存在模间串扰<sup>[2]</sup>和多输入多输出(Multiple-input-multiple-output, MIMO)、复杂度高<sup>[3]</sup>等问题;MCF则是通过在固定的包层区域内增加纤芯数量来提高信道数量,具有结构紧凑、效率高等优势。然而,由于在同一包层区域中包含多个纤芯,纤芯间距变窄则会增大芯间串扰(XT)。XT的存在会导致信号失真,从而大大缩短信号传输距离,所以MCF大容量传输的主要问题是——如何在增加纤芯数量的同时保持低的XT,以支持更多信道和更长传输距离<sup>[3]</sup>。为了进一步提高SDM容量,已经提出了通过异质纤芯结构<sup>[4]</sup>、气孔辅助型结构<sup>[5]</sup>和沟槽辅助型结构的MCF来抑制XT<sup>[6]</sup>。这些结构的存在可以减少相邻纤芯模式的电场重叠,增大光场束缚能力<sup>[7]</sup>。异质多芯光纤由于纤芯材质差异大,导致光纤制备难度急剧增加;气孔辅助型多芯光纤存在空气孔易塌陷、引发光纤不易熔接等问题;沟槽辅助型结构的MCF相对来说制备工艺简单,在抑制XT方面也有极大优势。2013年, Sakaguchi等提出了传统的19芯同质纤芯结构单模光纤,其传输容量达到了305 Tb/s,但在有沟槽辅助的情况下串扰值仅降低到了-42 dB/km<sup>[8]</sup>。2017年,印度NIT利用沟槽辅助型9芯光纤探究了光纤各个结构参数对XT的影响,数值模拟出-50 dB/100 km的低串扰值<sup>[9]</sup>。2018年,他们又提出了四种不同晶格结构的12芯5-LP模的MCF,仿真结果表明沟槽辅助型光纤通过改变纤芯排列方式后XT能降低至-138 dB/100 km<sup>[10]</sup>,但其中的少模传输会存在模间串扰问题。

在光纤基质的选择方面,目前多芯光纤的研究均基于石英光纤<sup>[11-12]</sup>。虽然石英基质MC-EDFA可以借助芯数优势提升信息放大容量,但其放大带宽仍局限在单波段<sup>[13]</sup>,无法彻底发挥C+L双波

段超宽带超大容量通信的优势。与石英光纤相比,多组分玻璃光纤具有玻璃组分可调、稀土掺杂浓度高、增益带宽宽、单位长度增益高等诸多优点<sup>[14-16]</sup>。但是,与传统石英光纤成熟的气相沉积制备技术相比,多组分玻璃由于组分复杂、稳定性差等原因无法发展出成熟的光纤制备技术<sup>[17]</sup>。因此,尚未有以硝酸盐为代表的多组分玻璃MCF制备及放大特性方面的报道。但是近年来,硝酸盐单模光纤的损耗研究已降低至1 dB/m以下<sup>[18-19]</sup>。此外,虽然本团队实验室开发了损耗低于0.38 dB/m的7芯<sup>[20]</sup>和13芯<sup>[21]</sup>的硫系玻璃光纤,但是尚未开发出更多纤芯的宽带多组分玻璃光纤。

针对以上问题,本文利用耦合功率理论和有限元方法仿真了硝酸盐玻璃19芯光纤的串扰特性,并采用在抑制串扰方面具有一定优势且易于制备的沟槽辅助型结构进行研究。为了在增加纤芯数量的同时减小相邻纤芯的XT,对光纤结构进行了设计优化,并先后分析了沟槽的存在及各个参数的变化对XT的影响。数值仿真表明,该沟槽辅助型19芯光纤的XT在1550 nm处达到了-156 dB/100 m的低串扰值。

## 2 多芯光纤结构设计

### 2.1 分析方法

基于耦合模理论和耦合功率理论进行MCF弱耦合数值仿真是当前被广泛采用的方法。对于相同纤芯材质的MCF,当弯曲半径小于10 m时,平均芯间串扰几乎是随着 $R_b$ 的增加而线性增加,因此平均功率耦合系数 $\bar{h}_{pq}$ 可以简化为<sup>[22]</sup>:

$$\bar{h}_{pq} = \frac{2(k_{pq})^2 R_b}{\beta_p \Lambda}, \quad (1)$$

其中, $k_{pq}$ 是纤芯p与纤芯q之间的模式耦合系数,沟槽辅助型MCF的 $k_{pq}$ 推导表达式见文献[23]。 $\beta_p$ 是纤芯p的传播常数; $\Lambda$ 为相邻纤芯之间的距离; $R_b$ 是弯曲半径,一般依据光纤绕线盘的半径设置为14 cm。此时光纤长度为 $L$ 的两个相邻纤芯之间的XT(公式中设为 $X$ )可以表示为<sup>[24]</sup>:

$$X = 10 \lg [\tanh(\bar{h}_{pq} L)]. \quad (2)$$

### 2.2 光纤结构设计

从公式(2)可以看出XT随光纤传输长度的变化而增大。因此若要实现信号的长距离传输,必须严格控制XT。弱耦合多芯光纤的XT通常小于-30 dB/100 km<sup>[3,10]</sup>。本研究中的模型选择常用的规则六边形的纤芯排列,这是因为它在制造过程

中更容易保证光纤结构的稳定性。下面以图 1(a)、(b)所示的两种 19 芯光纤的模型为基础,分别探究光纤有无沟槽的 XT 对比及在 1 550 nm 处各个光纤参数(纤芯间距、内包层厚度、沟槽宽度、芯包折射率差、沟槽深度、纤芯半径等)对 XT 的影响,从而选择优化后的结构参数,以达到低串扰长距离传输的水平。本文仿真工作的目的是实现单模 MCF 相邻纤芯的串扰值远低于  $-60$  dB/100 m。图 1(b)为沟槽辅助型 19 芯的剖面图,其中红色部分为掺铒纤芯,白色部分为低折射率环,二者中间部分(内包层)与包层材料相同,均为  $70\text{TeO}_2-15\text{ZnO}-5\text{La}_2\text{O}_3-10\text{WO}_3$ 。图 1(c)给出了无沟槽和有沟槽两种同质光纤的折射率剖面图。 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$  分别为芯包折射率差和沟槽深度,  $n_1$ 、 $n_0$ 、 $n_2$  分别为纤芯、包层和沟槽的折射率,  $r_1$  为纤芯半径,  $W_1$  为沟槽宽度,  $r_2-r_1$  为内包层厚度,  $\Lambda$  为相邻纤芯之间的距离。光纤初始参数设置为:  $\Delta_1=0.35\%$ ,  $\Delta_2=-0.35\%$ ,  $n_0=2.0337$ ,  $r_1=4.5\ \mu\text{m}$ ,  $W_1=4.5\ \mu\text{m}$ ,  $r_2-r_1=4.5\ \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=40\ \mu\text{m}$ 。

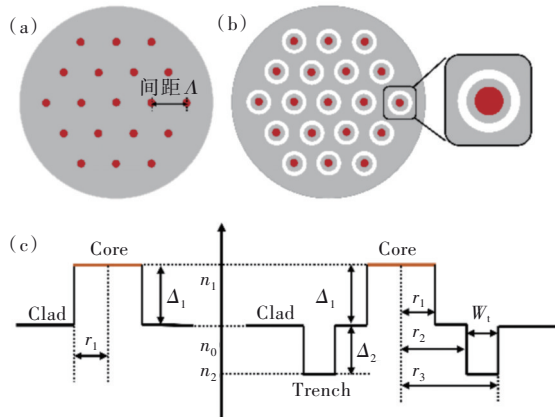


图 1 19 芯光纤剖面图: (a) 阶跃型, (b) 沟槽辅助型; (c) 折射率分布。

Fig. 1 Profile and refractive index distribution of 19-core fiber: (a) step type, (b) trench-assisted type. (c) Refractive index distribution.

## 2.3 光纤性能模拟及优化

### 2.3.1 沟槽的存在及纤芯间距对 XT 的影响

图 2 给出了  $r_1=4.5\ \mu\text{m}$ 、 $W_1=4.5\ \mu\text{m}$ 、 $\Delta_1=0.35\%$ 、 $n_2=2.0337$ 、 $\Delta_2=-0.35\%$  条件下,有沟槽和无沟槽光纤的 XT 随着纤芯间距的变化。可以看出,随着纤芯间距的增大,XT 呈现线性下降的趋势,并且沟槽辅助结构光纤的 XT 明显比无沟槽光纤低 25 dB 左右。因此,在  $220\ \mu\text{m}$  的有限包层区域内,在保证外层纤芯到包层边缘的距离  $\geq 30\ \mu\text{m}$  的标

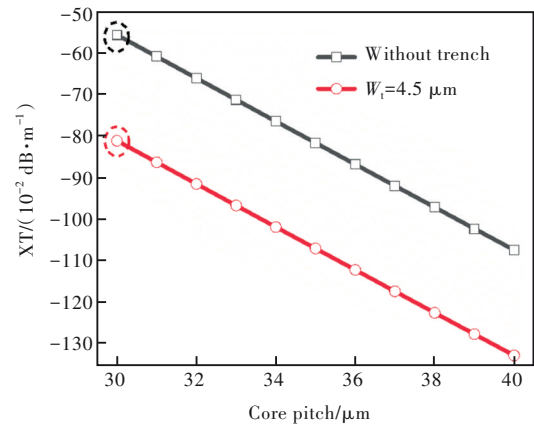


图 2 有无沟槽光纤的 XT 随纤芯间距的变化

Fig. 2 XT as a function of fiber core pitch with and without trench

准<sup>[23]</sup>下可以获得最佳的纤芯间距,即  $\Lambda=40\ \mu\text{m}$ 。

通过 COMSOL 仿真软件分析了图 2 中  $\Lambda=30\ \mu\text{m}$  时带有完美匹配层的两种 MCF 纤芯中的能量分布,对比结果如图 3 所示。图 3(a)、(b)分别为光纤截面  $x$  轴上无沟槽和有沟槽 19 芯光纤中 5 个相邻纤芯的光传输模拟。从图 3(a)可以看出,光入射到无沟槽 19 芯光纤的其中一个纤芯时其相

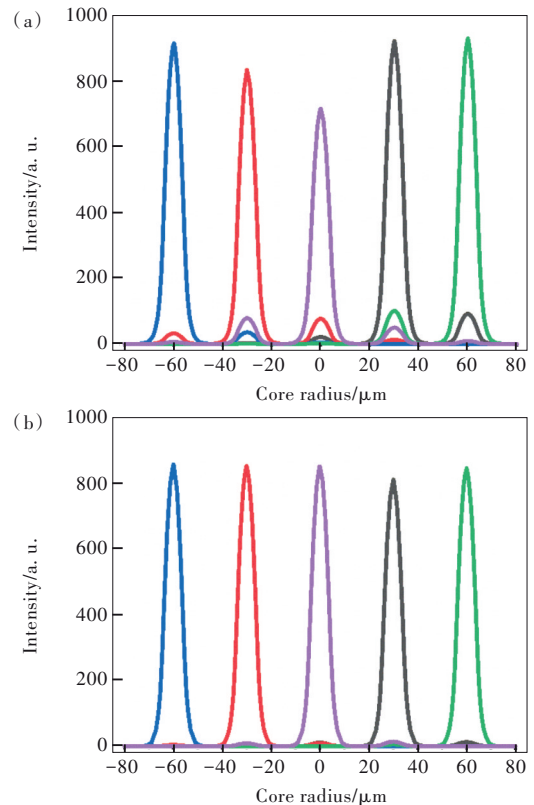


图 3 光纤截面  $x$  轴上各纤芯的能量分布。(a) 无沟槽; (b) 有沟槽。

Fig. 3 Energy distribution in the fiber core. (a) Without trench. (b) With trench.

邻纤芯中也有能量分布;而图 3(b)中有沟槽结构的 19 芯光纤纤芯的能量则几乎被完全束缚在中间纤芯中,同时这种沟槽结构有效地均衡了每个纤芯中的能量分布。结果表明,沟槽的存在可以极大地减小相邻纤芯的能量交叠进而减小 XT。

### 2.3.2 内包层厚度及沟槽宽度对 XT 的影响

图 4 研究了  $r_1=4.5 \mu\text{m}$ 、 $\Delta_1=0.35\%$ 、 $n_2=2.0337$ 、 $\Delta_2=0.35\%$ 、 $\Lambda=40 \mu\text{m}$  的条件下,内包层厚度及沟槽厚度对 XT 的影响。图 4(a)的结果表明,内包层厚度在  $0.5\sim 6 \mu\text{m}$  变化时,XT 呈现急剧下降的趋势并在  $4 \mu\text{m}$  后最终趋于不变。从图 4(b)可以看出,随着沟槽宽度的增加,XT 呈现线性下降的趋势。由于相邻沟槽之间的距离需要大于  $3 \mu\text{m}$ <sup>[23]</sup>,在这个限制范围内,沟槽越宽串扰抑制特性越好,因此  $W_1=4.5 \mu\text{m}$  时已满足光纤的低串扰要求。

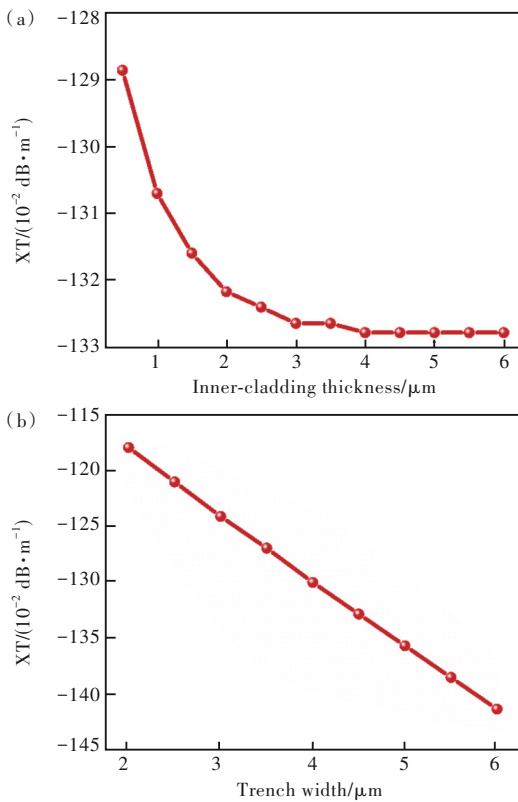


图 4 XT 随内包层厚度(a)和沟槽宽度(b)的变化

Fig.4 Variation of XT with inner cladding thickness(a) and trench width(b)

### 2.3.3 芯包折射率差 $\Delta_1$ 及沟槽深度 $\Delta_2$ 对 XT 的影响

图 5(a)、(b)分别探究了在  $r_1=4.5 \mu\text{m}$ 、 $W_1=4.5 \mu\text{m}$ 、 $n_0=2.0337$  的条件下不同  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  的 XT

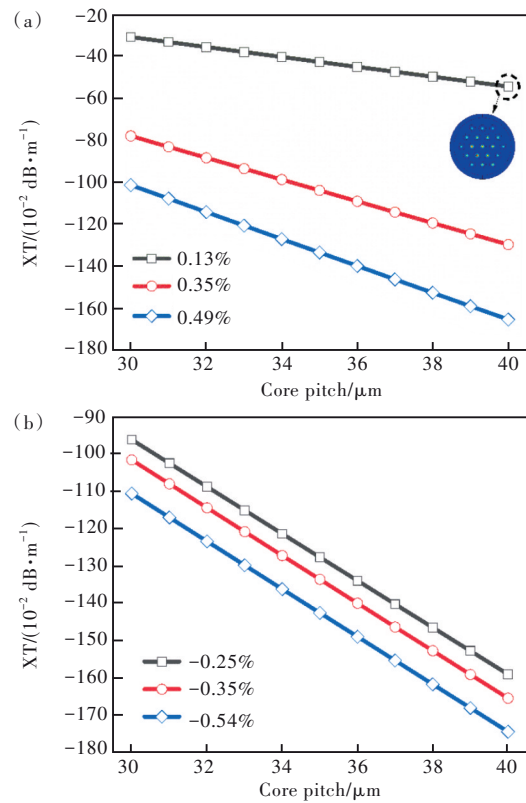


图 5 不同  $\Delta_1$ (a)和  $\Delta_2$ (b)下 XT 随纤芯间距的变化

Fig.5 Variation of XT with core pitch under different  $\Delta_1$ (a) and  $\Delta_2$ (b)

随着纤芯间距的变化情况。图 5(a)表明,在相同的纤芯间距条件下,  $\Delta_1$  越大,XT 越小。这是由于小的  $\Delta_1$  对光的束缚能力弱,如插图光斑所示,因此选择  $\Delta_1=0.49\%$  的掺铒磷酸盐玻璃作为纤芯。图 5(b)表明,  $\Delta_2$  越大,XT 越小,即增大沟槽深度可以抑制 XT,因此选择  $\Delta_2=-0.54\%$  的掺铒磷酸盐玻璃作为纤芯。同时,两图对比可以看出,相对于沟槽材质来说,纤芯材质对 XT 的影响更大。

### 2.3.4 纤芯半径对 XT 的影响

图 6(a)探究了在  $W_1=4.5 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=40 \mu\text{m}$ 、 $\Delta_1=0.49\%$ 、 $\Delta_2=-0.54\%$  的条件下 XT 随着纤芯半径的变化。可以看出,随着纤芯半径的增大,XT 呈现先减小后增大的趋势,且在  $5 \mu\text{m}$  时出现最小值。但图 6(b)的归一化频率表明此时光纤为少模传输,相邻纤芯间存在芯间串扰的同时还有模间串扰。图 6(b)中黑色曲线表明,  $r_1 \leq 2.9 \mu\text{m}$  时归一化频率  $V < 2.405$ ,符合单模传输条件。因此选择  $r=2.9 \mu\text{m}$  作为最佳的纤芯半径参数,此时的串扰值为  $-156 \text{ dB}/100 \text{ m}$ 。

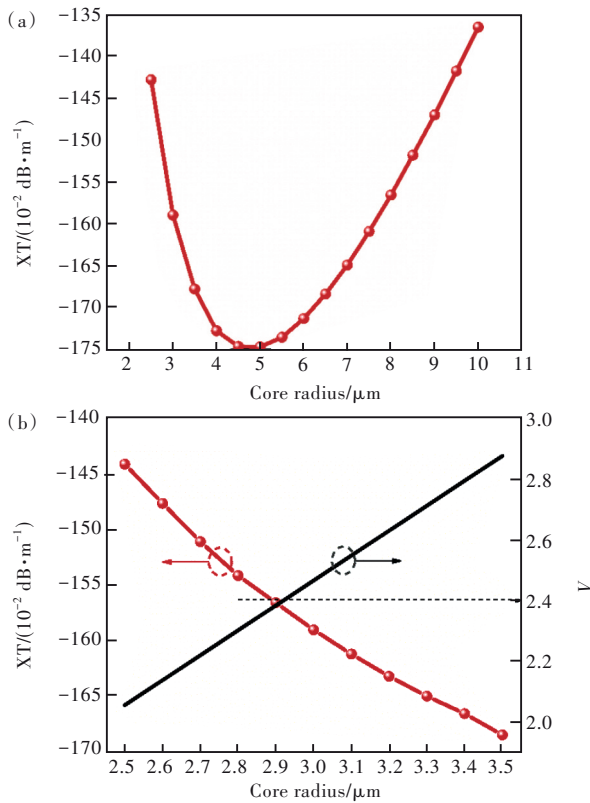


图 6 (a)XT随纤芯半径的变化;(b) $V$ 。

Fig. 6 Variation of XT with core radius(a) and  $V$ (b)

2.3.5 弯曲半径对XT的影响

图 7 研究了在  $r_1=3.4 \mu\text{m}$ 、 $W_1=4.5 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=40 \mu\text{m}$ 、 $\Delta_1=0.49\%$ 、 $\Delta_2=-0.54\%$  的条件下弯曲半径对 XT 的影响,从图中可以看出,XT 随着弯曲半径  $R_b$  的增大而逐渐减小。

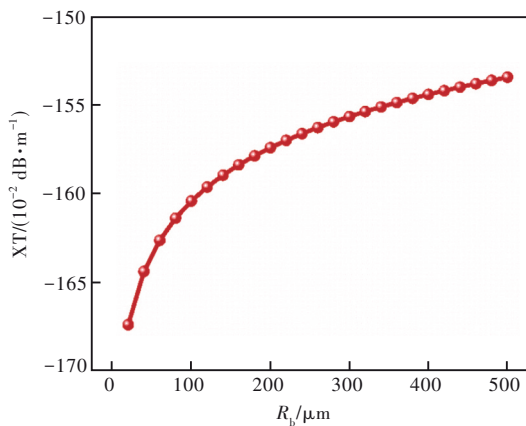


图 7 XT随弯曲半径的变化

Fig. 7 Variation of XT with bending radius

3 最优结构下的其他光学性能

3.1 色散

色散是光脉冲展宽的主要原因,会限制光纤的传输容量、传输带宽和传输距离。图 8 为光纤

总色散的模拟,曲线表明增加沟槽结构使色散曲线略有升高,但沟槽结构不会破坏光纤的色散性能。色散系数可以通过以下公式计算<sup>[25]</sup>:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (3)$$

其中,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为有效模式折射率的实部,  $c$  为真空中的光速。

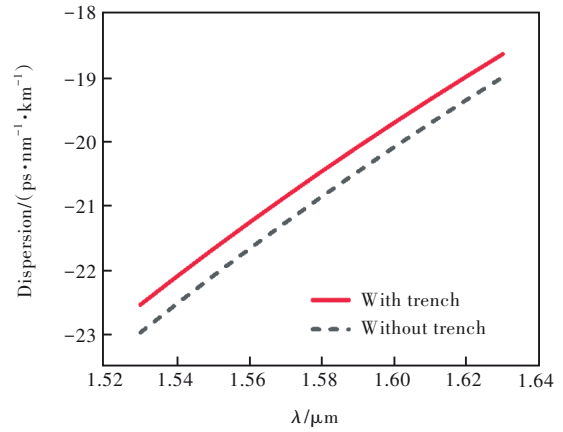


图 8 色散

Fig. 8 Dispersion

3.2 弯曲损耗

光纤弯曲会使纤芯中的能量泄漏到包层,不仅会导致损耗的增加还会导致 XT 的增加。图 9 计算了外层纤芯、次外层纤芯和中心纤芯的弯曲损耗(BL)  $L_B$  随纤芯间距的变化。可以发现,外层纤芯的  $L_B$  随纤芯间距的增大变化最明显,在  $\Lambda=40 \mu\text{m}$  之后呈指数型增长,因此  $40 \mu\text{m}$  的纤芯间距也是图 2 的最佳选择参数。说明外层纤芯到包层边缘的距离需要  $\geq 30 \mu\text{m}$  才能减小外层纤芯能量的泄露<sup>[23]</sup>。次外层纤芯和中心纤芯的变化小,均保持较低的  $L_B$  值。弯曲损耗可以表示为<sup>[3,7,24]</sup>:

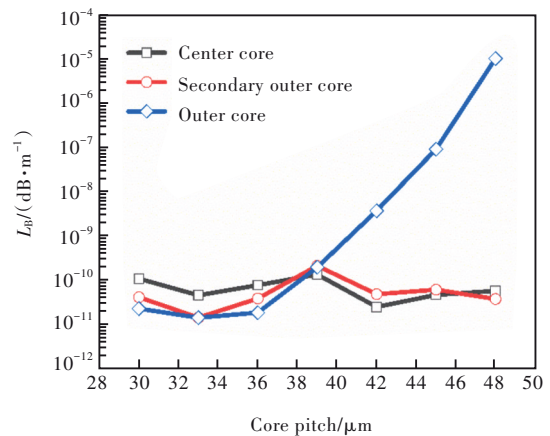


图 9 弯曲损耗随纤芯间距的变化

Fig. 9 Variation of bending loss with core pitch

$$L_B = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (4)$$

其中,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为模式有效折射率的虚部。

### 3.3 C+L波段的XT

图10为XT随波长的变化。曲线表明随波长的增大,XT逐渐变大,说明XT受波长影响较大。

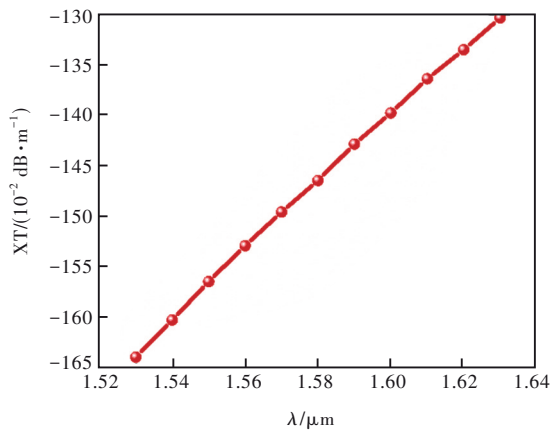


图10 XT随波长的变化

Fig. 8 Variation of bending loss with wavelength

但在C+L波段的串扰值仍低于-60 dB/100 m,因此符合低串扰传输的要求。

## 4 结 论

针对挤压制备型碲酸盐玻璃19芯光纤的XT问题,我们采用了易于光纤成型的沟槽辅助型结构来进行有效的串扰抑制并对光纤的主要参数进行整体优化。数值结果表明,当纤芯半径  $r_1=2.9 \mu\text{m}$ 、沟槽宽度  $W_1=4.5 \mu\text{m}$ 、纤芯间距  $\Lambda=40 \mu\text{m}$ 、芯包折射率差  $\Delta_1=0.49\%$  且沟槽深度  $\Delta_2=-0.54\%$  时,该光纤在1550 nm波长处拥有-156 dB/100 m的低串扰值。基于本实验室团队先前的挤压制备基础,未来我们将基于低串扰的碲酸盐玻璃MCF来进行光纤制备,从而满足未来的多路宽带光纤信号放大应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220371>.

## 参 考 文 献:

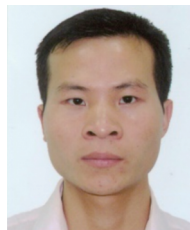
- [ 1 ] SAKAMOTO T, SAITOH K, SAITOH S, *et al.* Six-mode seven-core fiber for repeated dense space-division multiplexing transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2018, 36(5): 1226-1232.
- [ 2 ] WANG L Y, LI S G, MENG X J, *et al.* Low cross talk homogeneous seven-core five-LP mode fiber based on a high and low refractive index double ring [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2021, 38(12): 3849-3857.
- [ 3 ] XIE Y H, PEI L, ZHENG J J, *et al.* Impact analysis of a dense hole-assisted structure on crosstalk and bending loss in homogeneous few-mode multi-core fibers [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(16): 23806-23819.
- [ 4 ] TU J J, SAITOH K, TAKENAGA K, *et al.* Heterogeneous trench-assisted few-mode multi-core fiber with low differential mode delay [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(4): 4329-4341.
- [ 5 ] XIA C, AMEZCUA-CORREA R, BAI N, *et al.* Hole-assisted few-mode multicore fiber for high-density space-division multiplexing [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2012, 24(21): 1914-1917.
- [ 6 ] 涂佳静,李朝晖.空分复用光纤研究综述[J].*光学学报*, 2021, 41(1): 0106003-1-18.  
 TU J J, LI Z H. Review of space division multiplexing fibers [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2021, 41(1): 0106003-1-18. (in Chinese)
- [ 7 ] LI Z H, WANG L Y, WANG Y, *et al.* Manufacturable low-crosstalk high-RCMF 13-core 5-LP mode fiber with graded-index core and stairway-index trench [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(17): 26418-26432.
- [ 8 ] SAKAGUCHI J, PUTTNAM B J, KLAUS W, *et al.* 305 Tb/s space division multiplexed transmission using homogeneous 19-core fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, 31(4): 554-562.
- [ 9 ] KUMAR D, RANJAN R. Crosstalk suppression using trench-assisted technique in 9-core homogeneous multi core fiber [C]. *2017 14th IEEE India Council International Conference, Roorkee*, 2017: 1-4.
- [ 10 ] KUMAR D, RANJAN R. Optimal design for crosstalk analysis in 12-core 5-LP mode homogeneous multicore fiber for different lattice structure [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2018, 41: 95-103.
- [ 11 ] JAIN S, MIZUNO T, JUNG Y, *et al.* 32-core inline multicore fiber amplifier for dense space division multiplexed transmission systems [C]. *Post Deadline Paper; 42nd European Conference on Optical Communication, Dusseldorf*, 2016: 1-3.
- [ 12 ] PUTTNAM B J, RADEMACHER G, LUÍS R S, *et al.* High data-rate and long distance MCF transmission with 19-core

- C+L band cladding-pumped EDFA [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2020, 38(1): 123-130.
- [ 13 ] ABEDIN K S, FINI J M, THIERRY T F, *et al.* Seven-core erbium-doped double-clad fiber amplifier pumped simultaneously by side-coupled multimode fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(4): 993-996.
- [ 14 ] 许晨煜, 崔健, 许彦涛, 等. 用于中红外光纤激光器的高 Pr<sup>3+</sup>掺杂硒化物硫系玻璃和光纤制备及其光谱特性 [J]. *发光学报*, 2022, 43(6): 851-861.
- XU C Y, CUI J, XU Y T, *et al.* Fabrication and spectroscopic properties of heavily Pr<sup>3+</sup> doped selenide chalcogenide glass and fiber for mid-infrared fiber laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(6): 851-861. (in English)
- [ 15 ] HAMIDA B A, CHENG X S, NAJI A W, *et al.* Optical amplifier with flat-gain and wideband operation utilizing highly concentrated erbium-doped fibers [J]. *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.*, 2012, 21(1): 1250005-1-7.
- [ 16 ] JIA Z X, LI H, MENG X W, *et al.* Broadband amplification and highly efficient lasing in erbium-doped tellurite microstructured fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(7): 1049-1051.
- [ 17 ] 汪俊, 冯赞, 吴国林, 等. Pr<sup>3+</sup>掺杂 Ge-Ga-Se-CsI 硫卤玻璃性能及光纤制备 [J]. *发光学报*, 2020, 41(11): 1343-1350.
- WANG J, FENG Z, WU G L, *et al.* Pr<sup>3+</sup> doped Ge-Ga-Se-CsI chalcogenide glass and fiber preparation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(11): 1343-1350. (in Chinese)
- [ 18 ] EBENDORFF-HEIDEPRIEM H, KUAN K, OERMANN M R, *et al.* Extruded tellurite glass and fibers with low OH content for mid-infrared applications [J]. *Opt. Mater. Express*, 2012, 2(4): 432-442.
- [ 19 ] EVRARD M, COMBES T, MALDONADO A, *et al.* TeO<sub>2</sub>-ZnO-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tellurite glass purification for mid-infrared optical fibers manufacturing [J]. *Opt. Mater. Express*, 2022, 12(1): 136-152.
- [ 20 ] WANG X G, JIAO K, SI N, *et al.* Extruded seven-core tellurium chalcogenide fiber for mid-infrared [J]. *Opt. Mater. Express*, 2019, 9(9): 3863-3870.
- [ 21 ] XIAO J, WANG J J, XU T S, *et al.* Large mode-area chalcogenide multicore fiber prepared by continuous two-stage extrusion [J]. *Opt. Mater. Express*, 2021, 11(3): 791-800.
- [ 22 ] TU J J, SAITOH K, KOSHIBA M, *et al.* Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multicore fiber [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(14): 15157-15170.
- [ 23 ] YE F H, TU J J, SAITOH K, *et al.* Simple analytical expression for crosstalk estimation in homogeneous trench-assisted multi-core fibers [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(19): 23007-23018.
- [ 24 ] XIE Y H, PEI L, ZHENG J J, *et al.* Low-DMD and low-crosstalk few-mode multi-core fiber with air-trench/holes assisted graded-index profile [J]. *Opt. Commun.*, 2020, 474: 126155-1-9.
- [ 25 ] KANESHIMA K, NAMIHIRA Y, ZOU N Y, *et al.* Numerical investigation of octagonal photonic crystal fibers with strong confinement field [J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2006, E89-C(6): 830-837.



张敏(1998-),女,山东泰安人,硕士研究生,2021年于山东师范大学获得学士学位,主要从事硫系光纤的制备及性能仿真方面的研究。

E-mail: zhangmin20220205@163.com



王训四(1979-),男,湖南邵阳人,博士,研究员,博士生导师,2007年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事红外光学玻璃、红外光纤器件应用基础研究和关键技术的研究。

E-mail: wangxunsi@nbu.edu.cn