

引用本文:何春安,熊俊杰,白林滨,等.低损耗七芯光纤扇入扇出器设计与制备研究[J].光通信技术,2022,46(5):89-93.

低损耗七芯光纤扇入扇出器设计与制备研究

何春安¹,熊俊杰¹,白林滨²,马麟^{1*},何祖源¹

(1.上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240;2.上海光织科技有限公司,上海 200240)

摘要:多芯光纤具有集成度高、传输容量大等优点,为了实现其与单芯光纤阵列的连接,提出一种基于高精度陶瓷插芯的自组装型低损耗多芯光纤扇入扇出(FIFO)器的设计及制备方法。通过仿真和实验确定了拉锥功率和拉锥速度等拉锥光纤的最优参数,成功制备出高性能的七芯光纤 FIFO 器。实验采用的传输链路包含 1 对 FIFO 器及 5 m 长的七芯光纤,得到 7 个通道的平均损耗为 0.9 dB,平均串扰为 -52 dB。另外,该 FIFO 器在波长为 1550 nm 处、长 1 km 的七芯光纤中实现了 7×10 Gb/s 无误码传输,且各个通道具有良好的一致性。

关键词:空分复用;多芯光纤;扇入扇出器件;插入损耗

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)05-0089-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and fabrication study of low loss seven-core fiber fan-in and fan-out device

HE Chun'an¹, XIONG Junjie¹, BAI Linbin², MA Lin^{1*}, HE Zuyuan¹

(1.State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Optoweave Technology Co. Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: Multi-core fiber has the advantages of high integration and large transmission capacity. In order to realize its connection with single-core fiber array, a self-assembled ultra-low loss multi-core fiber fan-in and fan-out (FIFO) device design and preparation method based on high-precision ceramic ferrule is proposed. Through simulation and experiments, the optimal parameters of the taper fiber, such as taper power and taper speed were determined, and a high-performance seven-core fiber FIFO device is successfully fabricated. The transmission link used in the experiment includes a pair of FIFO devices and a 5 m long seven-core fiber. The average loss of the seven channels is 0.9 dB and the average crosstalk is -52 dB. In addition, the FIFO device achieves 7×10 Gb/s error-free transmission in a seven-core fiber with a wavelength of 1550 nm and a length of 1 km, and the consistency of each channel is good.

Key words: space division multiplexing, multi-core fiber, fan-in and fan-out device, insertion loss

0 引言

空分复用技术通过增加信道的数量来实现传输容量的提升,多芯光纤作为空分复用技术的一种实现

收稿日期:2021-12-21。

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1801000)资助;国家自然科学基金项目(NSFC)(61775138、61835006)资助。

作者简介:何春安(1996—),男,山东潍坊人,硕士研究生,现就读于上海交通大学电子信息与电气工程学院电子科学与技术专业,主要研究方向是特种光纤,参与过国家自然科学基金项目,并成功制备出了低损耗七芯光纤扇入扇出器件。

***通信作者:**马麟(1980—),博士生导师,副教授,主要研究方向为特种光纤、新型光纤器件、高速光互连与光传输技术。



方法,其光纤横截面有多个纤芯可以作为传输信号的通道,可大幅提高传输容量,并且具有高集成度的优点,在数据中心、大数据无源光网络等方面具有良好的应用前景^[1-3]。多芯光纤的结构和尺寸与标准单芯光纤不同,无法与其直接连接。多芯光纤扇入扇出(FIFO)器通过特殊的结构设计,可以实现多芯光纤(MCF)与单芯光纤阵列之间的低损耗耦合,成为多芯光纤在实际应用中的关键器件。国际上有数家科研机构就如何制备高性能的 FIFO 设备开展了广泛的研究^[4-7],目前主流的制备方法有 4 种:空间光透镜耦合法、化学腐蚀法、直写波导法和熔融拉锥法^[8-11]。2012 年,TOTTORI Y 等人^[12]采用空间光透镜耦合法设计透镜,完成了七芯

何春安,熊俊杰,白林滨,等:低损耗七芯光纤扇入扇出器设计与制备研究

光纤与单芯光纤阵列的连接,成功制备出了七芯光纤 FIFO 器,插入损耗小于 0.6 dB,芯间串扰为 -60 dB。2014 年,埃因霍温理工大学的 RYF R 等人使用了直写波导方法成功制备出了 9 芯 FIFO,平均插入损耗为 2.5 dB^[11]。2014 年,UEMURA H 等人^[13]基于熔融拉锥法,将单芯光纤拉锥到需要的尺寸,并采用熔接的方法将单芯光纤阵列与多芯光纤连接,成功制备了十二芯 FIFO 器,损耗最大为 4.7 dB,串扰为 -45 dB。2015 年,华中科技大学^[10]基于化学腐蚀法,将单芯光纤腐蚀到需要的内径,再通过陶瓷插芯束缚成功制备了七芯光纤 FIFO 器,损耗为 1.2 dB,串扰低于 -50 dB。2019 年,ALVARADO-ZACARIAS J C 等人^[14]基于同样的方法,结合打孔法,成功制备了十九芯 FIFO 器,其中一对器件的损耗为 0.81~1.62 dB。以上算法中,空间光透镜耦合法由于制备成本高、体积大,目前发展较为缓慢;化学腐蚀法损耗低、工艺简单,但支持的通道数较少;使用比较多的是熔融拉锥法,其制备成本低,工艺简单,损耗低,但难以满足绝热拉锥条件,串扰较大,且工艺不够稳定;近几年直写波导法发展迅速,它可以实现多种几何形状,具有较高的灵活性,但是受限于工艺和材料,制备方法还不够成熟,损耗比较大。

因此,本文提出一种基于高精度陶瓷插芯的自组装型低损耗 FIFO 器的制备方法,以制备出高性能的七芯光纤 FIFO 器。

1 七芯光纤 FIFO 器的设计与制备

1.1 七芯光纤 FIFO 器设计

本文将单芯光纤拉锥成特定的结构,并通过陶瓷插芯将拉锥后的光纤束束缚在一起使其形成自组合稳定结构与七芯光纤端面对准,完成连接。七芯光纤的 FIFO 器扇入端结构图如图 1 所示。左端是拉锥后的单芯光纤阵列,右端是七芯光纤。另外,为了制备出低串扰、低损耗的七芯光纤 FIFO 器,采用的拉锥光纤是经过特殊设计的多包层结构^[15],拉锥前 r_1 为纤芯, r_2 、 r_3 和 r_4 构成内包层, r_5 、 r_6 构成外包层, r_7 为最外侧包层。

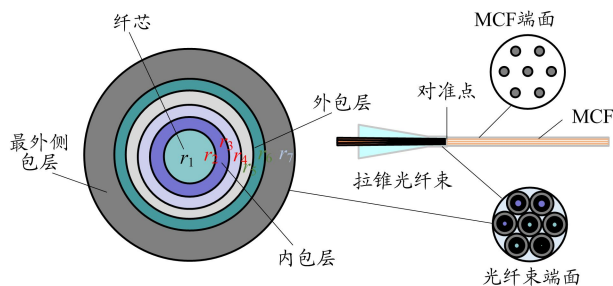


图 1 FIFO 扇入端结构图

层,该结构可以有效抑制串扰。

本文基于该结构仿真计算了光纤偏移量和端面之间的间隙对器件性能的影响,仿真结构图如图 2 所示。七芯光纤中每根纤芯的参数按照标准单模光纤 (SSMF) 设计,芯间距为 41.5 μm 。SSMF 的纤芯直径为 8.2 μm ,纤芯折射率为 1.449,包层折射率为 1.444,即相对折射率差为 0.36%。拉锥光纤的包层直径为 125 μm ,因此需要将光纤拉锥到 41.5 μm ,即拉锥比近似为 3:1。芯 1 是七芯光纤中与该拉锥光纤对准的纤芯,芯 2 是芯 1 的相邻芯。通过监测输入功率以及芯 1、芯 2 中的功率来计算光纤的偏移量和间隙对器件损耗和串扰的影响,结果如图 3 所示。

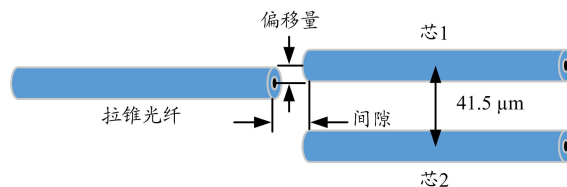
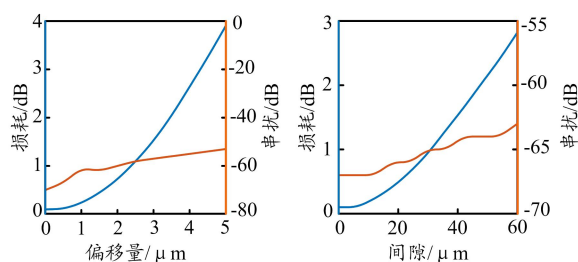


图 2 仿真结构图



(a) 偏移量对器件损耗和串扰的影响 (b) 间隙对器件损耗和串扰的影响

图 3 偏移量和间隙对器件性能的影响

图 3(a)中,偏移量在 2 μm 以内时,损耗低于 1 dB,并且随着偏移量的增加损耗增长缓慢;当偏移量大于 2 μm 后,损耗随着偏移量的增加迅速增长。这是因为光纤拉锥之后的模场直径约为 8 μm ,但是由于模场呈高斯分布,能量基本都集中在 2 μm 半径之内,所以偏移量在 2 μm 之内的模场耦合损耗比较小。在串扰方面,当偏移量为 0 时,串扰低于 -70 dB,随着偏移量的增加,串扰始终低于 -50 dB。主要原因是采用的多包层结构,在拉锥之后 r_1 和 r_2 、 r_3 、 r_4 组成的内侧包层一起构成新的纤芯, r_5 和 r_6 组成的外包层会形成一个折射率沟槽,增大了纤芯与最外侧包层的折射率差,减小了模场直径,从而减少了模场的交叠面积,降低了串扰。

图 3(b)中,当间隙小于 10 μm 时,间隙对器件损耗的影响非常小,插损在 0.1 dB 左右;当间隙增大时,损耗随着间隙的增大急剧增大。这是因为从光纤中出射的光具有一定的发散角,因此增大了模场面积,与

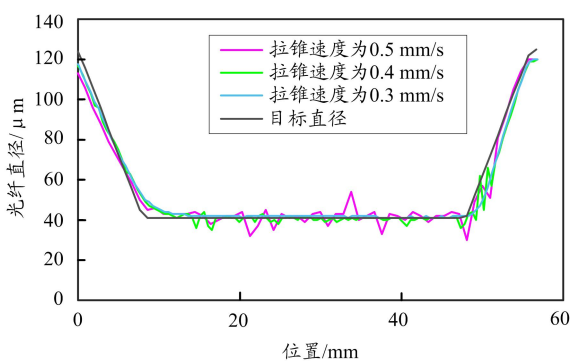
单芯光纤的模场面积不匹配,从而导致损耗产生;串扰随着间隙的增大而增长缓慢。这是因为虽然模场面积增大,与相邻的纤芯光场产生交叠,但是交叠部分的模场强度非常微弱,因此对于串扰的影响相对较小。

1.2 七芯光纤 FIFO 器制备

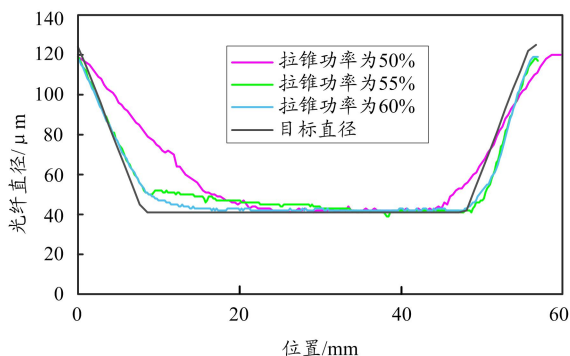
七芯光纤 FIFO 器制备包括光纤拉锥、组装单芯光纤阵列以及抛光打磨三部分。

①光纤拉锥。本文选用沟道辅助型多包层光纤,拉锥后的光纤纤芯与最内侧的包层共同形成纤芯,外侧的包层形成折射率沟槽,可以有效抑制串扰。实验中所用的拉锥机以二氧化碳激光器为光源。光纤的拉锥参数包括旋转速度、拉锥速度、拉锥功率和预热时间等。本文研究了拉锥速度和拉锥功率对光纤拉锥的影响,确定使用的最优值。

不同拉锥速度(0.5 mm/s、0.4 mm/s 以及 0.3 mm/s)时光纤的拉锥情况如图 4(a)所示。可以看出,拉锥速度较快时,拉锥后的光纤结构非常不均匀,光纤的直径变化比较大。这是因为拉锥速度过快,会使得光纤受热不均,通常在一个小区域光纤未受热完全(有的部分软化的程度比较大,有的部分还没有软化),随着光纤的移动,光源就开始对下一个区域进行加热,而上一个区域被软化的部分冷却后就会形成一个小结,



(a) 不同拉锥速度对光纤的拉锥影响



(b) 不同拉锥功率对光纤的拉锥影响

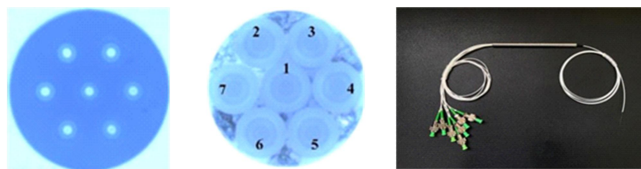
图 4 拉锥速度和功率对光纤的拉锥影响

拉锥后使纤芯的直径大小不一。而当拉锥的速度比较慢时,光纤被拉锥时受热更充分、更均匀,拉锥完成后光纤也更加平稳。但是,拉锥速度越慢,对于单根光纤拉锥的时间也越长,因此需要在拉锥时间和拉锥速度上寻找一个平衡。

不同拉锥功率(由于拉锥机的功率单位有其特定的定义,在此对功率进行归一化,分别为 50%、55%和 60%)对光纤拉锥的影响如图 4(b)所示。当功率较小时,拉锥后的光纤直径偏离目标直径较大,这是由于直径约为 40 μm 的腰区的光纤较细,吸收热量不充分,因此要额外增加功率,使其受热充分且均匀。当功率逐渐增加时光纤直径曲线越来越靠近目标直径曲线,并在功率为 60%时达到最佳吻合。

②组装单芯光纤阵列。由于七芯光纤是稳定结构,可以实现高精度自组装。本文选用陶瓷插芯作为圆形套管束缚 7 根单芯光纤阵列。具体操作如下:首先,将光纤阵列穿入陶瓷插芯并对端面进行抛光打磨,同样处理七芯光纤后采用物理方法将两端陶瓷插芯对齐;然后,旋转陶瓷插芯,使每根纤芯对齐并在连接处点胶固化,封装完成后便可以得到七芯光纤 FIFO 器。采用传统熔融拉锥法制备多芯光纤 FIFO 器时需要将玻璃管和光纤一起拉锥(对玻璃管的拉锥难以满足绝热拉锥条件),与之相比,本文的制备方法无需对玻璃管进行拉锥,而且提高了工艺的稳定性,避免了熔接带来的损耗。

③抛光打磨。对七芯光纤 FIFO 器抛光打磨处理后,分别束缚有七芯光纤、拉锥光纤束的陶瓷插芯端面图如图 5(a)和图 5(b)所示。可以看出,7 根拉锥后的光纤被束缚而自组合,形成了与七芯光纤相匹配的结构。封装后的七芯光纤 FIFO 器成品图如图 5(c)所示。



(a) 七芯光纤端面 (b) 拉锥后光纤束端面 (c) 七芯光纤 FIFO 器成品

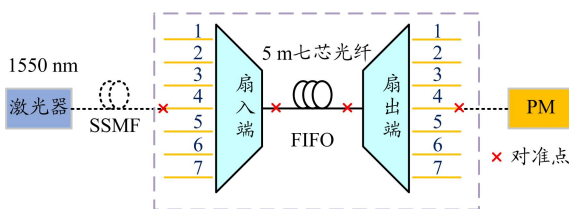
图 5 七芯光纤 FIFO 器

2 性能测试与讨论分析

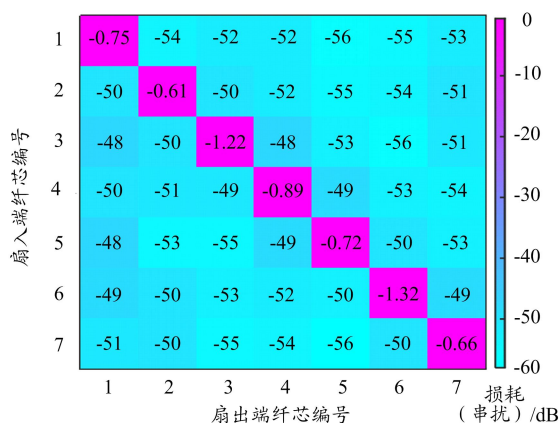
衡量多芯光纤 FIFO 器性能最重要的 2 个指标是损耗和串扰。本文对制备的七芯光纤 FIFO 器进行了串扰和损耗的测试,同时还测试了其高速传输性能。图 6(a)为测试七芯光纤 FIFO 器串扰和损耗的实验框

何春安,熊俊杰,白林滨,等:低损耗七芯光纤扇入扇出器设计与制备研究

图。入射光源使用波长为 1550 nm 的激光,通过 SSMF 跳线连接 7 根光纤作为 FIFO 器的扇入端,扇入、扇出端之间连接一段 5 m 长的七芯光纤,七芯光纤的另一端同样连接 7 根拉锥光纤作为 FIFO 的扇出端,扇出端接入了多通道功率计(PM)。为了方便测试,在实验过程中对扇入端和扇出端都进行了编号,测试结果如图 6(b)所示。横纵坐标分别代表扇出端与扇入端 7 个通道的纤芯编号,扇入端与扇出端纤芯编号相同时对应的数值代表该链路通道的插入损耗,扇入端与扇出端的纤芯编号不同时对应的数值代表扇出端通道对扇入端通道的串扰。测试中 7 个通道的平均损耗为 0.9 dB,平均串扰为-52 dB。



(a) 测试七芯光纤 FIFO 器串扰和损耗的实验框图



(b) 七芯光纤 FIFO 器测试结果图

图 6 七芯光纤 FIFO 器测试框图及结果

FIFO 器的损耗主要包括光纤接头连接处的端面损耗、陶瓷插芯端面与七芯纤芯微小错位带来的耦合损耗、七芯光纤的固有损耗以及拉锥时引入的波导损耗等。预计采用更高位置精度的七芯光纤、优化拉锥参数和改进附加工艺都可以进一步降低损耗。引起串扰的因素主要跟拉锥和光纤的设计有关。拉锥光纤的多包层设计可以使得拉锥后的内侧包层起到折射率沟槽的作用,而每层包层的半径、折射率等参数则可以通过仿真计算优化,对满足拉锥光纤绝热拉锥条件的参数也可以进一步优化。

本文对制备的 FIFO 器在实际高速互连中的传输

性能进行了验证,其实验框图结构如图 7 所示。实验中采用波长为 1550 nm 的激光作为光源,入射光纤为 SSMF,信号发生器(AWG,型号为 N4960A)产生速率为 10 Gb/s、序列长度为 2^7-1 的伪随机二进制码(PRBS)模拟实际系统中的数据,并将其与直流(DC)电源产生的偏置电压一起调制到马赫-曾德尔干涉仪(MZM)上;MZM 将输入的光路分成 2 路,由于折射率不同,2 路信号发生相位变化,在输出端产生一个强度大小变换的干涉信号;把电信号调制到光信号上,实现了电信号到光信号的转变。输出端接入一个 1×7 分束器,分束器的另一端连接 FIFO 扇入端(即 7 根拉锥光纤),FIFO 器中间接入一段 1 km 长的七芯光纤。为了减少扇出端输出信号进入光电探测器(PD)和误码仪(BERT,型号为 ML4000-8B)的功率,本文在 PD 之前接入一个 1550 nm 的可调衰减器(VOA)。从 VOA 出来的信号进入 PD 被接收解调,被解调的电信号经过放大增益为 4 倍的射频放大器(RAF)进行信号放大,接入到 BERT 或者示波器(型号为 DCA-X 86100D)进行误码率和眼图的分析。

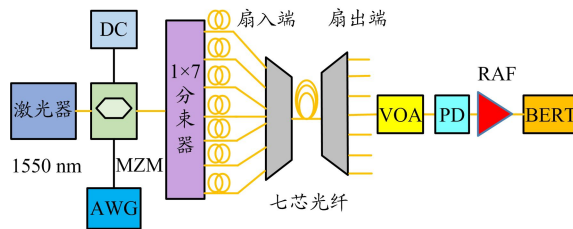
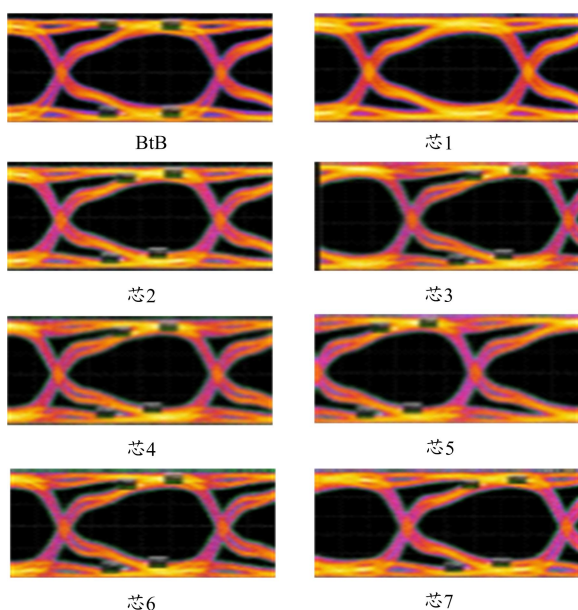


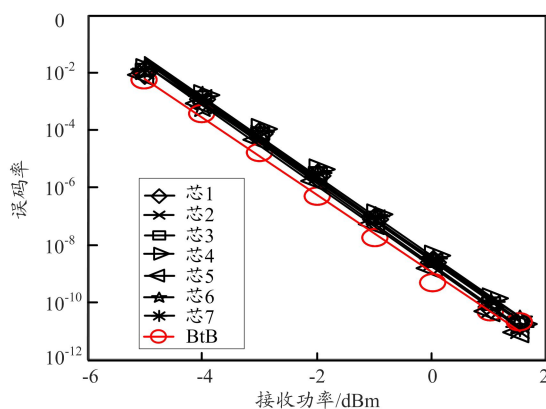
图 7 七芯光纤 FIFO 器传输性能测试装置

本文首先对测试系统进行了背靠背(BtB)的眼图测试,即在测试时不接入 FIFO 器和七芯光纤,直接将 MZM 调制后的光信号接到示波器上,测试其眼图后再接入 FIFO 器和七芯光纤。BtB 和 7 个通道的眼图测试结果如图 8(a)所示。可以看出,所有眼图均张开,并且 7 个通道与 BtB 的眼图相比几乎没有变化。然后,对 BtB 与各个通道的误码率进行了测试,结果如图 8(b)所示。与 BtB 相比,由于 1 km 七芯光纤的色散引入的功率代价,7 个通道误码率曲线有少许的右移。此外,7 个通道彼此的误码率曲线几乎重合,表明各个通道具有良好的-致性,均实现了 7×10 Gb/s(误码率小于 10^{-10} ,接收功率大于 1 dBm)的传输。由于实验所使用的 BERT 在小于 10^{-12} 时显示值为 0,因此,可以认为是无误码传输。

眼图和误码率测试结果均表明,本文制备的 FIFO 器在实际应用中没有造成传输信号的劣化,满足高速互连的要求。



(a) 眼图测试结果



(b) 误码率测试结果

图8 测试得到的误码率与眼图

3 结束语

本文提出了一种基于高精度陶瓷插芯的自组装型低损耗七芯光纤 FIFO 器设计制备方法, 仿真和实验结果表明: 制备的 FIFO 器 7 个通道的平均损耗为 0.9 dB, 平均串扰为 -52 dB; 同时, 还具有较好的传输性能, 各个通道接收功率大于 1 dBm 时, 误码率小于 10^{-10} 。本文设计的 FIFO 器体积小、集成度高, 适用于七芯光纤的实际应用, 具有良好的应用前景。但该器件的制备方法只适用于具有稳定紧密堆积纤芯排布结构的多芯光纤, 对于非稳定结构的光纤而言制备具有一定难度。

参考文献:

[1] INAO S, SATO T, SENTSU S, et al. Multicore optical fiber[C]//OSA.

何春安, 熊俊杰, 白林滨, 等: 低损耗七芯光纤扇入扇出器设计与制备研究

Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. Washington: OSA, 1979: WB1-46-WB1-48.

[2] BERDAGUÉ S, FACQ P. Mode division multiplexing in optical fibers [J]. Applied optics, 1982, 21(11): 1950-1955.

[3] INAO S. High density multi-core-fiber cable [C]//IWCS. Proceedings of the 28th International Wire & Cable Symposium (IWCS). New Jersey: IWCS, 1979: 370-384.

[4] GAO Y Y, CUI J, JIA J C, et al. Weakly-coupled 7-core-2-LP-mode transmission using commercial SFP+ transceivers enabled by all-fiber spatial multiplexer and demultiplexer[J]. Optics express, 2019, 27(11): 16271-16280.

[5] JUNG Y, HAYES J R, ALAM S U, et al. Multicore fiber fan-in/fan-out device using fiber optic collimators [C]//IEEE. 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). Gothenburg: IEEE, 2017: 1-3.

[6] SHIMAKAWA O, SHIOZAKI M, SANO T, et al. Pluggable fan-out realizing physical-contact and low coupling loss for multi-core fiber [C]//OSA. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. California: OSA, 2013: OM3I. 2-1-OM3I.2-3.

[7] YOSHIDA M, HIROOKA T, NAKAZAWA M. Low-loss and reflection-free fused type fan-out device for 7-core fiber based on a bundled structure[J]. Optics express, 2017, 25(16): 18817-18826.

[8] NEUGROSCHL D, KOPP V I, SINGER J, et al. "Vanishing-core" tapered coupler for interconnect applications [C]//International Society for Optics and Photonics. Proceedings of Photonics Packaging, Integration, and Interconnects IX. California: International Society for Optics and Photonics, 2009: 72210G-1-72210G-8.

[9] KOPP V I, PARK J, WLODAWSKI M, et al. Pitch reducing optical fiber array and multicore fiber for space-division multiplexing [C]//IEEE. 2013 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. Waikoloa: IEEE, 2013: 99-100.

[10] LI B R, FENG Z H, TANG M, et al. Experimental demonstration of large capacity WSDM optical access network with multicore fibers and advanced modulation formats [J]. Optics express, 2015, 23(9): 10997-11006.

[11] RYF R, FONTAINE N K, MONTOLIU M, et al. Space-division multiplexed transmission over 3x3 coupled-core multicore fiber[C]//IEEE. OFC, San Francisco: IEEE, 2014: 1-3.

[12] TOTTORI Y, KOBAYASHI T, WATANABE M. Low loss optical connection module for seven-core multicore fiber and seven single-mode fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(21): 1926-1928.

[13] UEMURA H, OMICHI K, TAKENAGA K, et al. Fused taper type fan-in/fan-out device for 12 core multi-core fiber[C]//IEEE. Proceedings of 2014 Opto Electronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fiber Technology. Melbourne: IEEE, 2014: 49-50.

[14] ALVARADO-ZACARIAS J C, ANTONIO-LOPEZ J E, HABIB M S, et al. Low-loss 19 core fan-in/fan-out device using reduced-cladding graded index fibers[C]//OSA. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. San Diego: Optical Society of America, 2019: Th3D. 2-1-Th3D. 2-3.

[15] GAN L, ZHOU J J, SHEN L, et al. Ultra-low crosstalk fused taper type fan-in/fan-out devices for multicore fibers[C]//IEEE. Proceedings of 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego: IEEE, 2019: 1-3.