

# 新型聚合物传像光纤制作方法探索

孔德鹏<sup>1</sup> 王丽莉<sup>1</sup> 贺正权<sup>1</sup> 储九荣<sup>2</sup> 李育林<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)  
(<sup>2</sup>四川汇源塑料光纤有限公司塑料光纤制备与应用国家地方联合工程实验室, 四川 成都 611230)

**摘要** 探索了新型聚合物传像光纤的制备方法。阐述了传像光纤中的光线传输理论及光纤设计理论, 为传像光纤的研制提供理论指导。借助聚合物微结构光纤制作技术, 在正六边形聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 微结构光纤预制棒的孔洞内填充高折射率的聚苯乙烯 (PS) 纤维, 形成一次预制棒, 热拉伸后熔并再拉伸, 研制出直径为 0.22 mm, 单丝直径为 3  $\mu\text{m}$  的超高分辨率传像光纤。经过测试, 该传像光纤可以分辨 10  $\mu\text{m}$  的微刻度。探索用直径为 0.25 mm 的特制 PMMA 芯/氟塑料包层光纤经过一步排列堆积制作传像光纤预制棒, 拉伸制成直径为 2 mm, 7200 pixel, 单丝直径为 20  $\mu\text{m}$  的传像光纤。实验发现, 吸附于光纤表面的灰尘对传像光纤的结构和图像质量有严重影响。

**关键词** 光纤光学; 聚合物光纤; 传像光纤; 微结构光纤; 制备

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0105004

## Development of the Fabrication Method for Novel Polymer Imaging Fiber

Kong Depeng<sup>1</sup> Wang Lili<sup>1</sup> He Zhengquan<sup>1</sup> Chu Jiurong<sup>2</sup> Li Yulin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

<sup>2</sup> Production and Application of Plastic Optical Fiber National and Local Engineering Laboratory, Sichuan Huiyuan Plastic Optical Fiber Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611230, China

**Abstract** The fabrication method for novel polymer imaging fiber is developed. The theory of light propagation in fiber and fiber design is expatiated, which is the guide for developing imaging fiber. The material of polymethyl methacrylate (PMMA) is heated and extruded in a hexagon mold as microstructured fiber preform. The holes in it are filled with polystyrene (PS) fibers. It is the first preform used for heat-stretch and stack-fusion to form a second preform. Then the second preform is heat-stretched to obtain imaging fiber with diameter of 0.22 mm and single fiber diameter of 3  $\mu\text{m}$ . It is ultrahigh resolution imaging fiber, by which the microscale of 10  $\mu\text{m}$  can be discerned. The method of one-step stack is used to stack 7200 pieces of customized polymer fibers as the multicore imaging fiber preform. The customized fiber with diameter of 0.25 mm and coating thickness of 20  $\mu\text{m}$  is fused together. The preform is heat-stretched to form imaging fiber of 2 mm diameter and 20  $\mu\text{m}$  single fiber diameter. It is found that the dust adsorbed on the fiber face seriously affects fiber's structure and image quality.

**Key words** fiber optics; polymer fiber; imaging fiber; microstructured fiber; fabrication

**OCIS codes** 060.2350; 110.2350; 060.4005

## 1 引言

传像光纤是一种具有与传统光纤传像束一样的图像传输功能, 而在结构上又略有区别的无源

器件。传像光纤包含几千至几万根直径为微米量级的光纤, 所有光纤沿着轴向相互平行地紧密排列, 具有整体结构, 可根据使用需求截取任意长度。新型

收稿日期: 2012-07-13; 收到修改稿日期: 2012-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(61275106, 61275086)资助课题。

作者简介: 孔德鹏(1982—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事聚合物光纤及其器件等方面的研究。E-mail: kongdp@opt.ac.cn

导师简介: 王丽莉(1957—), 女, 博士, 研究员, 主要从事特种聚合物光纤方面的研究。

E-mail: liliwang@opt.ac.cn(通信联系人)

的聚合物传像光纤与传统的玻璃和石英光纤传像束相比,具有柔软易弯曲、质量轻、结构紧凑、成本低、损耗小和使用方便等优点,在医学、工业、科研和军事等许多领域具有广泛的应用前景<sup>[1~3]</sup>。近几年,国际上出现了少量聚合物光纤传像器件<sup>[4]</sup>,制造技术主要被少数发达国家垄断。国内对传像束的研究主要集中于玻璃光纤<sup>[5~7]</sup>,关于聚合物传像光纤的报道很少。为此,本文开展了新型聚合物传像光纤的研制工作,从两个方向探索其制作方法和工艺:1) 结合聚合物微结构光纤技术,一次拉伸熔融合并,然后二次拉伸制作出 3829 pixel 的超高分辨率传像光纤;2) 探索数千根聚合物光纤一次集合形成预制棒的方法,然后拉伸预制棒制作 7200 pixel 的传像光纤。

## 2 聚合物传像光纤的设计理论

实验所用的聚合物光纤为阶跃型(SI),光纤芯和包层材料的折射率呈高-低分布。图 1(a)为阶跃型光纤的结构及光线传播示意图,光线由空气(折射

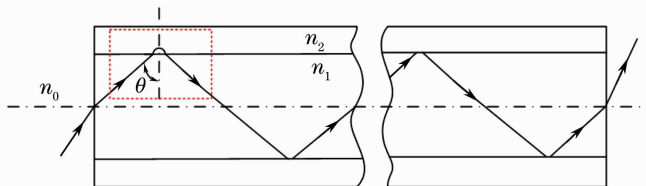


图 1 阶跃型光纤中光线传播图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of waveguiding in step-index fiber

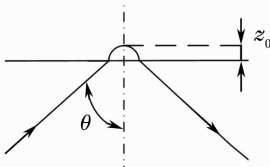


图 2 光纤包层中倏逝波示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the evanescent wave in the fiber coating

传像光纤是多根多模光纤的集合体,为了提高图像的分辨率和对比度,必须最大限度地把光线限制在各根多模光纤的纤芯内部,减小交叉干扰,即提高光纤中的模式数量。多模光纤中模式的数量与归一化频率  $V$  的平方成正比, $V$  值可描述为<sup>[10]</sup>

$$V = 2\pi \frac{R}{\lambda} NA, \quad (2)$$

式中  $R$  为光纤芯的半径, $NA$  为光纤的数值孔径, $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 。可见,光纤芯和包层材料的折射率对传像光纤的质量有直接影响。特别是为了提高分辨率而使单丝直径较小时,必须借助增大  $NA$  来提

率  $n_0$ ) 进入光纤芯(折射率  $n_1$ ),在光纤芯与包层(折射率  $n_2$ )的界面上,如果光线入射角  $\theta$  大于临界角,则发生受抑全内反射,折回光纤芯,经过多次反射后从光纤端面射出<sup>[8]</sup>。实际中由于倏逝波的存在,光线并不是中断在纤芯与包层的界面上,而是以一定的穿透深度  $z_0$  进入包层材料,如图 2 所示,其振幅随倏逝波场的穿透深度  $z_0$  按指数规律减小。在传像光纤中,各根光纤相互紧密排列,倏逝波的穿透深度  $z_0$  与其性能息息相关,光线的泄漏直接影响传输图像的质量,因此必须选择合适的包层厚度来减少光线泄漏。穿透深度  $z_0$  与光线波长  $\lambda$ 、折射率  $n_1$  和  $n_2$  及入射角  $\theta$  的关系为<sup>[9]</sup>

$$z_0 = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{\sin^2 \theta - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}. \quad (1)$$

经计算,在可见光范围内,倏逝波的最大穿透深度约为  $0.5 \mu\text{m}$ 。因此,传像光纤中单丝的包层厚度必须大于  $0.5 \mu\text{m}$ 。

高  $V$  值。因此分别选择聚苯乙烯(PS)芯/聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)包层和 PMMA 芯/氟塑料包层两种光纤,PS、PMMA、氟塑料的折射率分别为 1.59、1.49、1.40,两种光纤的  $NA$  分别为 0.55 和 0.5,远大于单模光纤的数值孔径,有利于对光线的限制。

## 3 聚合物传像光纤研制

### 3.1 聚合物微结构传像光纤

微结构光纤是近些年才发展起来的一种特殊光纤,不同折射率的材料(包括空气)在光纤横截面按照某种规律分布,形成光波传导的光纤结构。已有报道介绍过关于聚合物微结构光纤的制作方法<sup>[11,12]</sup>,但是其工序复杂,不利于传像光纤的实际制作和应用。针对聚合物微结构光纤在传像光纤方面的应用,借助聚合物微结构光纤的加工成型方法,设计并制作了易于拼接的正六边形预制棒,在聚合物微结构光纤预制棒的空气孔内填充高折射率材

料,建立光波传导所需的全内反射条件,形成聚合物微结构传像光纤。图3是所设计的聚合物微结构光纤预制棒的端面结构示意图,预制棒横截面是正六边形,边长为34.25 mm,其中以正三角形方式排列空气孔洞547个,孔洞直径为1.5 mm,孔间距为2.5 mm,预制棒用折射率为1.49的光学级PMMA在热挤出设备上成型。然后,在空气孔洞内填充直径为1.5 mm的光学级PS(折射率1.59)纤维,在真空模具内加热至180℃,保温5 h,冷却后形成聚合物微结构传像光纤一次预制棒。

一次预制棒拉伸后也可用于传像,但是只包含547 pixel,传输的图像质量较差。为提高传像光纤的像素数,采用拉伸熔并再拉伸的方法。如图4所示,一次预制棒经过热拉伸形成对角线直径约10 mm的二次预制棒,并保持截面的正六边形,然后

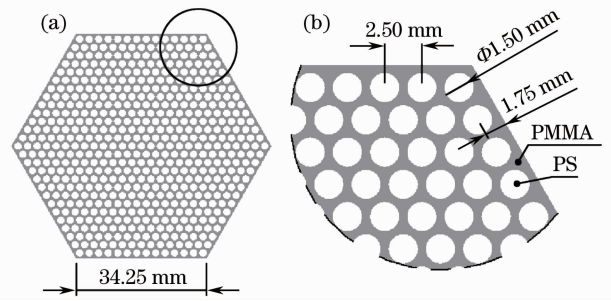


图3 聚合物微结构光纤预制棒端面结构示意图。

(a)端面全图;(b)局部放大图

用7根二次预制棒紧密堆积并热熔定型,形成三次预制棒。三次预制棒共包含3829 pixel,热拉伸后成为传像光纤。

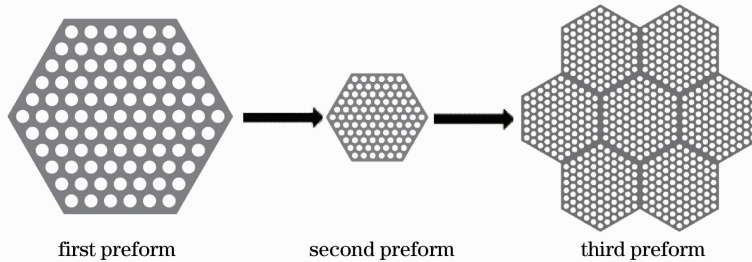


图4 聚合物微结构传像光纤预制棒熔并过程

Fig. 4 Schematic diagram of fusion for polymer microstructured imaging fiber preform

在实验中,三次预制棒被拉伸为直径0.22 mm的传像光纤,单个像元直径约为3 μm,单根光纤的包层厚度约0.6 μm,满足(1)式计算的理论包层厚度。同时,根据(2)式可以计算出V值为6.22,远大于单模光纤的截止频率2.405,有利于光线的传播。此传像光纤的理论极限分辨率<sup>[13]</sup>高达192 lp/mm。为进一步验证传像光纤的图像传输能力,从传像光纤的输出端面上采集到微型刻度尺的刻度照片。如

图5所示,图5(a)为直接拍摄的微型刻度尺照片,最小刻度为10 μm,图5(b)为经过微结构传像光纤传输出的微型刻度尺照片,从照片中仍可以清楚分辨出最小刻度为10 μm的微型刻度尺。但是,由于一次预制棒的边缘较厚,经过一次拼接后在边缘处厚度叠加,形成明显的正六边形网格,对图像质量有所影响,需要进一步改善。用截断法测试该传像光纤的传输损耗,如图6所示,传像光纤在可见光波段

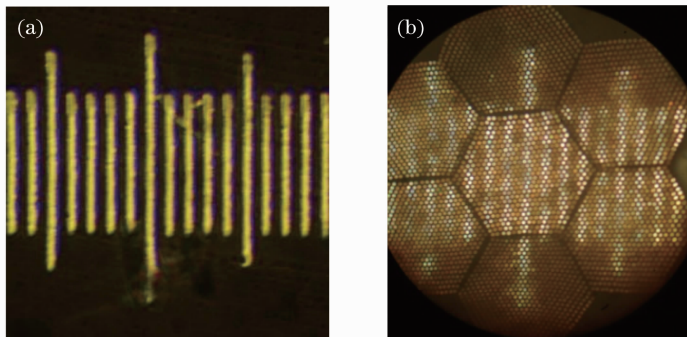


图5 微型刻度尺照片。(a)未经过传像光纤和(b)经过传像光纤传输的刻度尺照片

Fig. 5 Image of the micro scale. (a) Micro scale snapped directly and (b) image transmitted by microstructured imaging fiber

的传输损耗在 1.5~2.4 dB/m 范围, 相对比较大。造成损耗大的原因有三点: 1) 一次预制棒的边缘较厚, 形成的正六边形网格降低了传像光纤的有效像素占整个光纤端面的比例, 引起透射率降低; 2) 单丝直径较细, 为限制光线在纤芯中传播, 所需的包层厚度占光纤端面的比例较大, 也增加了传输损耗; 3) 传像光纤制作过程中聚合物材料经过多次加热, 使材料有一定程度的老化, 透光性下降, 不利于传输损耗的降低。在以后的工作中还需进一步探索具体的降低传像光纤损耗的途径和方法, 如减少成型步骤和时间、加工过程中通入惰性气体保护等。

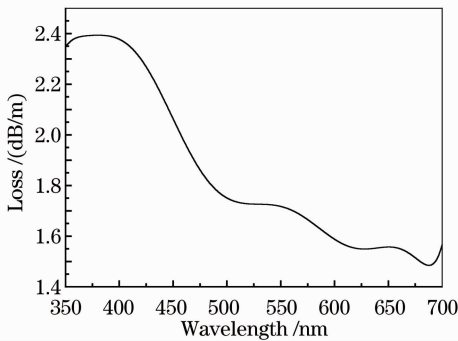


图 6 聚合物微结构传像光纤传输损耗曲线  
Fig. 6 Attenuation of microstructured polymer imaging fiber

### 3.2 整体式聚合物传像光纤

为避免聚合物微结构传像光纤带来的问题, 实验尝试采用一次并丝, 然后热熔, 再拉伸的方法制作整体多芯式聚合物传像光纤。由于聚合物光纤的特殊性质, 有两点不利于传像光纤的制作: 1) 柔性, 直径较细的光纤在自然状态下柔软易弯曲, 不利于大量光纤的整齐堆积排列; 2) 低导热系数, 聚合物材料的导热系数大约只有金属的千分之一, 如果用直径较粗的成千上万根光纤堆积成预制棒, 大直径预制棒不利于加热拉伸。为此, 本实验定制直径为

0.25 mm 的 PMMA 芯/氟塑料包层聚合物光纤, 包层厚度为 20  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.5, 在特制模具中紧密堆积排列光纤, 然后在 180  $^{\circ}\text{C}$  真空加热 5 h, 熔接形成传像光纤预制棒。预制棒直径为 25 mm, 长度为 210 mm, 总像素数为 7200 pixel。热拉伸到 2 mm 直径, 形成传像光纤(如图 7 所示), 像元直径约为 20  $\mu\text{m}$ , 理论极限分辨率约 29 lp/mm, 传像光纤结构完整, 完全避免了微结构传像光纤中的六边形大网格缺陷, 具有广阔的开发应用前景。

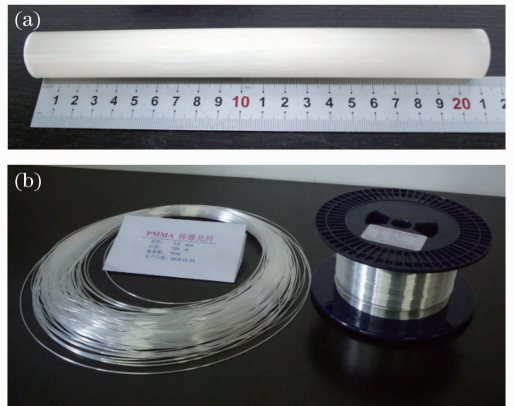


图 7 (a)整体多芯式聚合物传像光纤预制棒和(b)整体多芯式聚合物传像光纤  
Fig. 7 (a) Multicore polymer imaging fiber preform and (b) multicore polymer imaging fiber

预制棒制作过程中, 光纤表面的洁净程度对预制棒质量有严重影响。图 8 是聚合物光纤在非超净环境分别暴露 2 h 后, 制作成的预制棒的端面显微照片。由于非超净环境中灰尘吸附到光纤表面, 在高温加热过程中灰尘或分解、或与材料发生反应, 对光纤间的界面损伤严重。可以看出, 随着光纤表面的洁净程度提高, 光纤的界面逐渐变清晰, 在超净环境下的光纤制作的预制棒质量优良。同时, 在图 8(b)和(c)中, 可看出光纤截面已由原来的圆形变成正六边形, 各光纤紧密整齐排列。这是由于聚

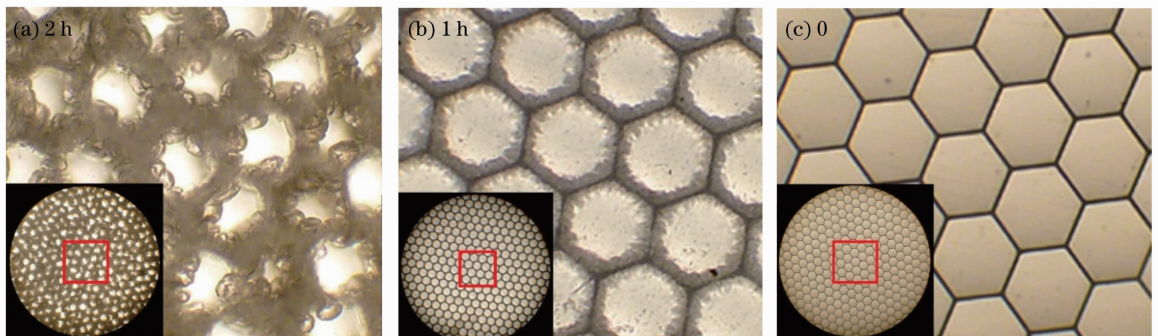


图 8 不同暴露时间下聚合物光纤的表面洁净度对传像光纤预制棒结构的影响  
Fig. 8 Micrographs of imaging fiber preforms fabricated with fibers with different exposure times

合物光纤在制作时经过热拉伸并降温定型,高分子链存在一定程度的取向,在预制棒加热熔并时,光纤再次受热,发生解取向,自然回缩变粗,各根光纤相互挤压,变成正六边形。这种变形更加有利于传像光纤的结构稳定。

## 4 结 论

结合聚合物微结构光纤技术和单丝直接堆积技术探索了整体式聚合物传像光纤的制作方法。研制出 3829 pixel,单丝直径为 3  $\mu\text{m}$ ,理论极限分辨率高达 192 lp/mm 的超高分辨率聚合物微结构传像光纤。探索解决细径柔性聚合物光纤排列堆积的方法,用特制聚合物光纤一步堆积制作预制棒,然后热拉伸形成传像光纤,含有 7200 pixel,单丝直径约 20  $\mu\text{m}$ ,光纤结构完整。聚合物微结构传像光纤技术有利于拼接制作多像素数、高分辨率的传像光纤,但是由于六边形微结构一次预制棒的边缘厚度的影响,传像光纤中呈现出清晰的大六边形网格,影响图像质量;一步堆积法制作的预制棒结构相对完整,但是由于聚合物光纤的柔性,一步排列堆积更多的光纤难度较大。对聚合物传像光纤的制作技术进行了探索性研究,要想实际应用还需开展更深入的工作,进一步解决其中存在的其他难题。

## 参 考 文 献

- Zhou Dechun, Yu Fengxia, Tan Fang. Preparation and optical performance of high resolution optical fiber image bundle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 723~726  
周德春,于凤霞,谭芳. 高分辨率光纤传像束的制备及其光学性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 723~726
- Fang Fang, Lin Meirong, Li Yingjie *et al.*. Design and study of micro-fiber imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 654~658  
房芳,林美荣,李英杰等. 微型光纤图像传输系统的设计与研究

- 究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 654~658
- Yu Zhu, Song Wei, He Guangyu *et al.*. Effect of single fiber core diameter of image-carrying optical fiber bundle on optical fiber image plane hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(10): 1341~1346  
于助,宋伟,贺光裕等. 传像光纤束单丝芯径大小对光纤像面全息图的影响[J]. *光学学报*, 1997, **17**(10): 1341~1346
- B. Lee, W. Y. Choi, J. K. Walker. Ultrahigh-resolution plastic graded-index fused image plates[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(10): 719~721
- Zhou Dechun, Yu Fengxia, Tan Fang *et al.*. Study and synthesis of large section soft image transfer fiber photonic material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **36**(3): 836~841  
周德春,于凤霞,谭芳等. 大截面柔性传像光纤光子材料的研制[J]. *中国激光*, 2010, **36**(3): 836~841
- He Xu, Xiang Yang. Study on contrast transfer function of fiber-optic image bundles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706006  
何煦,向阳. 线列光纤传像束对比度传递函数研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706006
- Zhou Dechun, Yu Fengxia, Tan Fang *et al.*. Preparation and optical performance of large numerical aperture image transfer fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(12): 120605  
周德春,于凤霞,谭芳等. 大数值孔径传像光纤的制备及其光学性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(12): 120605
- Liu Desen, Yin Zongmin, Zhu Songlai. Fiber Optics [M]. Beijing: Science Press, 1987. 23~26  
刘德森,殷宗敏,祝颂来. 纤维光学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 23~26
- M. Ahmad, L. L. Hench. Effect of taper geometries and launch angle on evanescent wave penetration depth in optical fibers[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2005, **20**(7): 1312~1319
- H. F. Ghaemi, Y. Li, T. Thio *et al.*. Fiber image guide with subwavelength resolution [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(10): 1137~1139
- J. Wang, X. Yang, L. Wang. Fabrication and experimental observation of monolithic multi-air-core fiber array for image transmission[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7703~7708
- D. Kong, L. Wang. Ultrahigh-resolution fiber-optic image guides derived from microstructured polymer optical fiber preforms[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(16): 2435~2437
- Jiang Yuan, Zou Ningyu. Polymer Fiber[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 263~264  
江源,邹宁宇. 聚合物光纤[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 263~264

栏目编辑:王晓琰