

doi:10.3788/gzxb20174606.0612001

扭转保偏光纤的三维折射率测量

黄素娟, 曾俊璋, 闫成, 林贇怡, 王廷云

(上海大学 通信与信息工程学院, 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

摘 要: 基于数字全息显微层析技术, 采用横向干涉系统, 旋转被测的扭转保偏光纤, 获得光纤 180° 视角下各个角度的全息图并由 CCD 记录, 通过图像处理与再现算法提取物光波的相位分布信息. 利用滤波反投影还原出光纤各个断面的二维折射率分布, 并由此构建扭转保偏光纤的三维折射率分布, 揭示扭转保偏光纤内部的三维信息. 测量结果显示, 扭转保偏光纤的应力柱随着光纤同时扭转, 但包层、应力柱和纤芯的折射率并不改变. 采用边缘检测提取了光纤不同断面应力柱的位置, 并计算了扭转保偏光纤的扭转角度.

关键词: 数字全息; 三维折射率; 扭转保偏光纤; 三维结构; 滤波反投影; 横向干涉系统

中图分类号: TN26

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0612001-7

3D Refractive Index Measurement for Spun Polarization-maintaining Optical Fiber

HUANG Su-juan, ZENG Jun-zhang, YAN Cheng, LIN Yun-yi, WANG Ting-yun

(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks,

School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on digital holographic tomography and transverse interference system, by means of rotating the spun polarization-maintaining optical fiber within 180° viewing angle, optimal digital holograms of a section of spun polarization-maintaining optical fiber were recorded by CCD, and then the phase information was extracted through digital image process and the angular spectrum algorithm. Using the filtered back-projection algorithm, the 2D refractive index distribution of each cross-section was retrieved in order to constitute the 3D refractive index distribution of a section of spun polarization-maintaining optical fiber, which revealed the 3D inner structure of the fiber. The measurement results show that the stress legs rotate synchronously with the spin of polarization-maintaining optical fiber, and the refractive indices of the fiber core, stress legs and cladding are unchanged. Finally, the position of the stress legs was achieved by edge detection algorithm and then the spun angle was computed.

Key words: Digital holography; 3D refractive index; Spun polarization-maintaining optical fiber; 3D inner structure; Filtered back-projection algorithm; Transverse interference system; Edge detection algorithm

OCIS Codes: 120.2880; 090.1995; 110.6960

0 引言

扭转保偏光纤是在高温下对保偏光纤加热软化后, 沿其轴向匀速率或变速率扭转, 冷却后制成的特殊光纤, 被广泛用于光纤传感器^[1-3]. 扭转保偏光纤的内部结构信息是影响其传感特性的主要因素, 因此准确无损地测量出扭转保偏光纤的三维折射率分布和扭转角度对于研究其传感特性具有重要价值. 光纤折射率测量方法主要有聚焦法^[4]、折射近场法^[5-6]和全息测量法. 聚焦法要求用于测量的光源具有很好的均匀性, 但是在

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61178088, 61475098)和上海市科技创新行动计划(No. 14511100100)资助

第一作者: 黄素娟(1968-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光电信息及图象处理. Email: sjhuang@shu.edu.cn

收稿日期: 2017-01-06; 录用日期: 2017-02-28

<http://www.photon.ac.cn>

实际运用中光源的均匀性难以控制. 折射近场法在测量之前, 需要对光纤样品进行切断打磨处理, 使光纤断面平整, 而光纤断面平整度直接影响测量准确度, 且对环境要求高、操作复杂、测量速度慢. 这两种方法只能测量光纤断面的二维折射率分布.

随着光电耦合器件的产生和发展, 数字全息显微层析技术因其具有无损、快速、非接触等优点被用于精密测量. Wahba 等^[7-9]首先将数字全息显微干涉技术用于光纤折射率的测量, 通过全息再现和相移干涉技术并结合光纤模型分别对渐变型光纤、阶跃型光纤以及熊猫型保偏光纤的折射率分布进行了研究; 周文静等^[10]结合数字全息技术对相位光栅的结构进行了研究; 潘哲朗等^[11-12]结合傅里叶衍射算法, 通过复制单角度相位分布得到多角度的相位投影数据, 对单模光纤三维折射率以及毛细血管的壁厚进行了研究; 苏玲珑等^[13]基于数字全息显微断层成像技术, 构建了一套测量光纤折射率的实验系统, 测量了熊猫型保偏光纤的折射率; 谷婷婷等^[14]通过数字全息显微干涉技术获得单角度的光纤样品全息图, 结合光纤分层模型对单模和多模光纤的折射率进行了研究; YAN 等^[15]通过改进马赫曾德干涉系统构建了基于数字全息显微层析的光纤折射率测量系统, 分别测量了熊猫型和椭圆型保偏光纤的折射率. 然而上述研究都是以长度方向折射率均匀的光纤为实验样品, 只测量了光纤断面的二维折射率分布. Sokkar 等^[16]基于数字全息采用单帧断层扫描技术, 通过一个角度的相位投影复制得到多个角度的相位投影, 对等规聚丙烯纤维的三维折射率分布进行了测量研究. 然而单帧断层扫描技术只能测量圆对称光纤的三维折射率分布.

本文测量一段扭转保偏光纤的三维折射率分布, 以表征光纤内部的三维信息. 采用基于数字全息显微层析的横向干涉系统, 不破坏扭转保偏光纤, 通过旋转被测光纤, 记录不同角度的最优数字全息图, 提取物光波的相位分布信息, 结合滤波反投影算法, 还原出扭转保偏光纤的三维折射率分布. 采用边缘检测提取光纤不同断面应力柱的位置, 计算扭转保偏光纤的扭转角度.

1 理论分析

1.1 基于数字全息图的相位提取原理

采用基于数字全息显微层析的横向干涉系统, 该系统利用显微物镜将携带光纤信息的物光波放大, 并与同样放大的参考光波在 CCD 面上干涉形成数字全息图. 对记录的数字全息图进行频域滤波, 消除零级项与共轭项等图像预处理, 然后采用角谱算法^[17]进行数值再现, 可以得到物光波的复振幅分布 $U(x, y)$, 最后由复振幅得到物光波的相位分布为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[U(x, y)]}{\text{Re}[U(x, y)]} \right\} \quad (1)$$

式中, Im 为取虚部, Re 为取实部. 由于式中用了反正切函数, 所以相位取值在 $(-\pi, \pi]$ 之间, 为包裹相位, 采用相位解缠绕算法对其进行解包裹处理, 进而获得正确的光纤相位分布. 通过记录无光纤样品全息图, 提取出背景相位分布, 两者相减得到光纤相位差分布.

1.2 三维折射率测量原理

平行光垂直入射被测光纤时, 由数字全息图提取的相位分布是光纤折射率与厚度的积分结果^[14], 即

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_l [n(x, y, z_0) - n_0] dl \quad (2)$$

式中, $\varphi(x, y)$ 是由式(1)提取的相位分布, $n(x, y, z_0)$ 是被测光纤在 z_0 断面处的折射率分布, n_0 是匹配液的折射率, l 是光线通过被测样品的几何路径, λ 是测量波长. 由式(2)可以获得被测光纤的投影数据为

$$p(\alpha, z_0) = \frac{\varphi(x, y)}{2\pi} \lambda = \int_l [n(x, y, z_0) - n_0] dl \quad (3)$$

式中, $p(\alpha, z_0)$ 为被测光纤转动 α 角度后在 z_0 断面处的投影数据. 通过旋转光纤, 可以获得光纤 180° 视角的投影数据 $p(\alpha, z_0)$, 其中 $\alpha = 1^\circ \sim 180^\circ$. 结合滤波反投影, 被测光纤在 z_0 断面处的二维折射率分布为^[18]

$$n(x, y, z_0) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty P(\alpha, \omega, z_0) |\omega| \exp(j2\pi\omega(x\cos\alpha + y\sin\alpha)) d\omega d\alpha + n_0 \quad (4)$$

式中, $P(\alpha, \omega, z_0)$ 为 $p(\alpha, z_0)$ 的傅里叶变换, ω 为函数 $P(\alpha, \omega, z_0)$ 的空间频率. 通过滤波反投影, 对这段光纤各个断面的折射率进行重建, 最后由这些断面折射率重构出这段光纤的三维折射率分布.

2 实验装置

构建的光路系统原理图如图 1. MSL-FN-532 nm 单纵模激光器的输出经衰减片 NF_1 衰减到合适强度后由分光镜 BS_1 分成两束光,一束光直接穿过被测光纤作为携带光纤信息的物光波,另一束光通过衰减片 NF_2 后经反射镜 M_1 和 M_2 反射作为参考光波.物光波和参考光波分别由 16 倍显微物镜 MO_1 和 MO_2 放大后经分光镜 BS_2 合束在 CCD(像元尺寸为 $3.25 \mu\text{m} \times 3.25 \mu\text{m}$) 感光界面上并发生干涉.调节分光镜 BS_2 改变干涉夹角,以获得清晰的数字全息图.旋转装置(Rotating motor)由计算机控制的步进电机组成,每次旋转 2° .光纤插入比色皿(Cuvette)中并由旋转装置夹持,比色皿正交于光轴放置,其形状为长方体,长宽高分别为 20 mm、2 mm 和 8 mm.

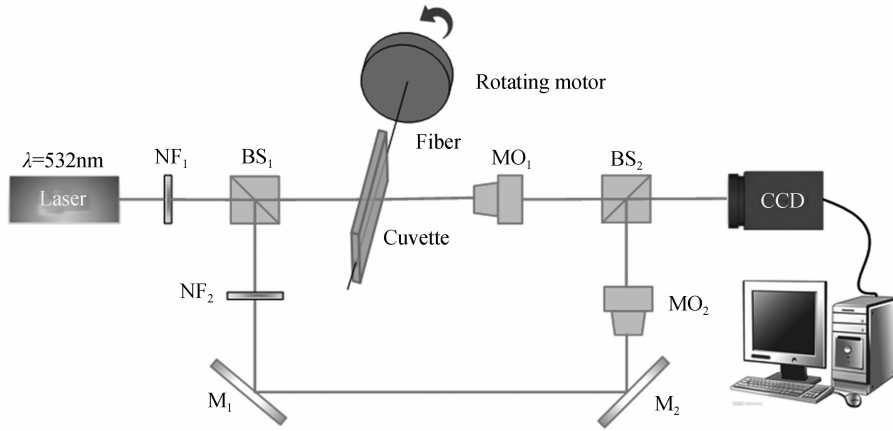


图 1 光路系统原理

Fig. 1 Principle diagram of the optical system

3 三维折射率测量与数据分析

3.1 三维折射率测量结果

扭转保偏光纤直径为 $125 \mu\text{m}$,由旋转装置夹持并插入装有匹配液的比色皿中.匹配液采用甘油与等离子水的混合溶液,其折射率与光纤包层折射率相近,实验中匹配液折射率为 1.464 0.以实时再现提取的物光波相位分布为依据,调节各个光学器件,当物光和参考光只有水平夹角且显微物镜与分束镜的距离恰当,以及光纤在显微物镜的焦平面上时,记录得到最优的数字全息图.被测光纤每转动 2° 记录一次,共记录 90 张不同角度的扭转保偏光纤的最优全息图.图 2 为 0° 、 46° 、 90° 和 136° 所记录的扭转保偏光纤的最优全息图.图中所记录的光纤长度为 $500 \mu\text{m}$,可以看出,扭转保偏光纤的两个应力柱交织在一起,并沿着光纤长度方向扭转.将所记录的全息图进行频域滤波等图像预处理,然后基于角谱算法重建物光波并从中提取出相位信息,解包裹后的相位如图 3,图 3(a)~(d) 分别对应图 2(a)~(d) 全息图提取的相位分布信息.从相位图可以更清晰地看到扭转保偏光纤的扭转结构.

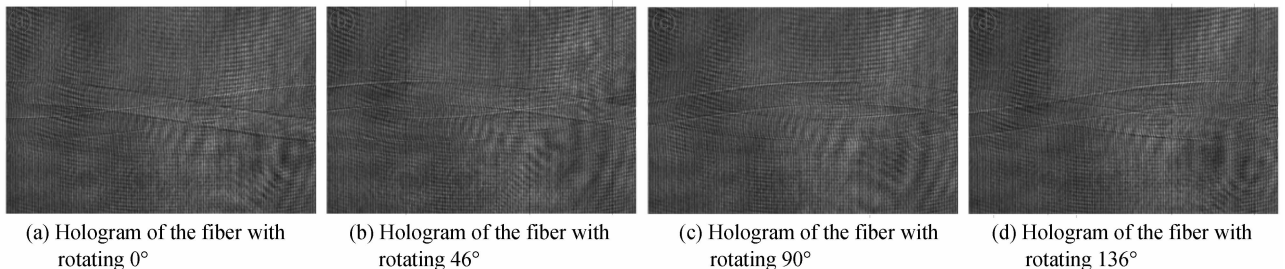


图 2 数字全息图

Fig. 2 Digital holograms

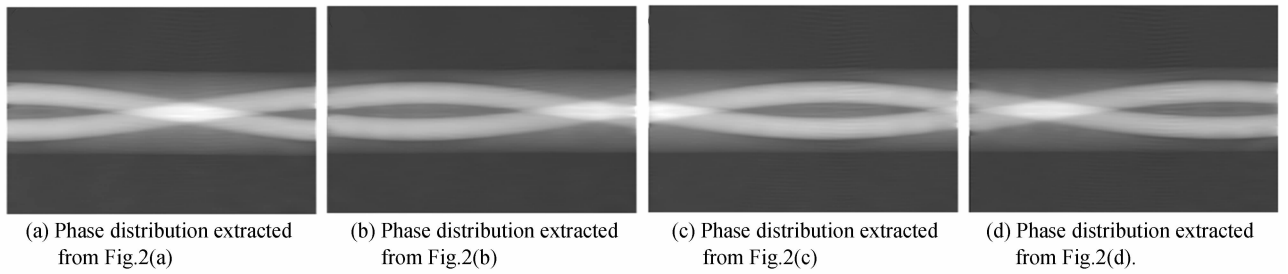


图 3 相位分布
Fig. 3 Phase distribution

根据扭转保偏光纤各个角度的相位信息,由式(3)可得到光纤各个角度下的折射率积分投影数据,利用滤波反投影还原出这段扭转保偏光纤各个断面的折射率分布,图 4 为横切示意图和部分断面的二维折射率分布,其中每个断面相距 $20\ \mu\text{m}$. 从二维断面折射率分布可以看出,扭转保偏光纤的应力柱沿着光纤中心轴做逆时针旋转.

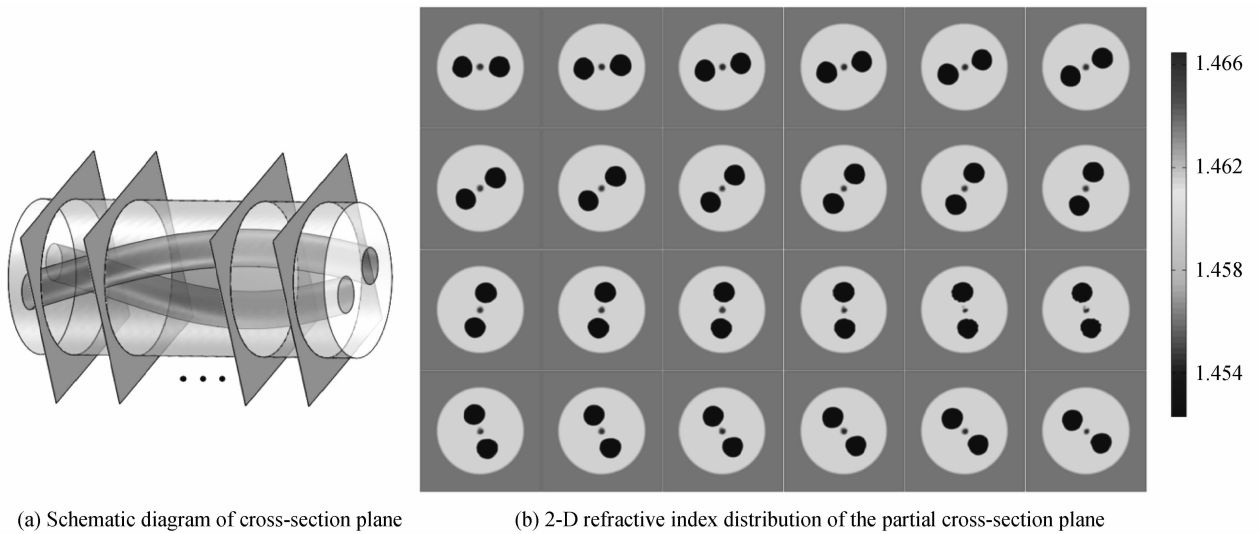
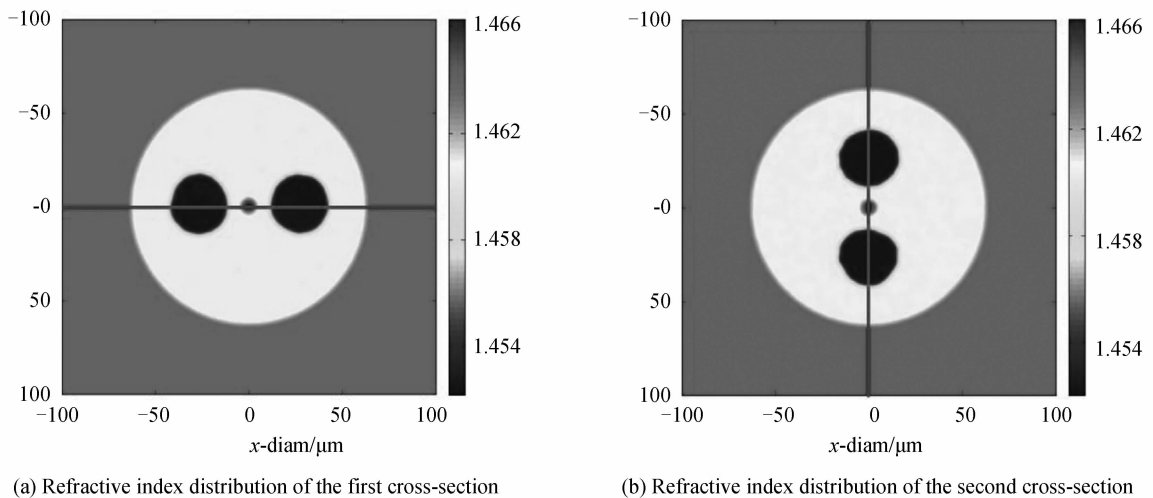


图 4 扭转保偏光纤横向切面折射率分布

Fig. 4 Cross-section refractive index distribution of the spun polarization-maintaining fiber

图 5 为两个断面折射率的测量结果,结果显示:第一个断面的纤芯、应力柱和包层的均值折射率分别为 1.465 9、1.452 4 和 1.460 4;第二个断面的纤芯、应力柱和包层的均值折射率分别为 1.466 0、1.452 2 和 1.460 3. 由此可知,保偏光纤在扭转过程中,虽然应力柱会随着旋转,但并没有改变纤芯、包层和应力柱的折射率. 图 6 显示了这段光纤纵切面的二维折射率分布,纵切从光纤中心轴逐渐往上下切面,每个切面相距 $6\ \mu\text{m}$. 从中可以看出经过应力柱的切面在长度方向不对称,说明每个断面的应力柱的位置在变化.



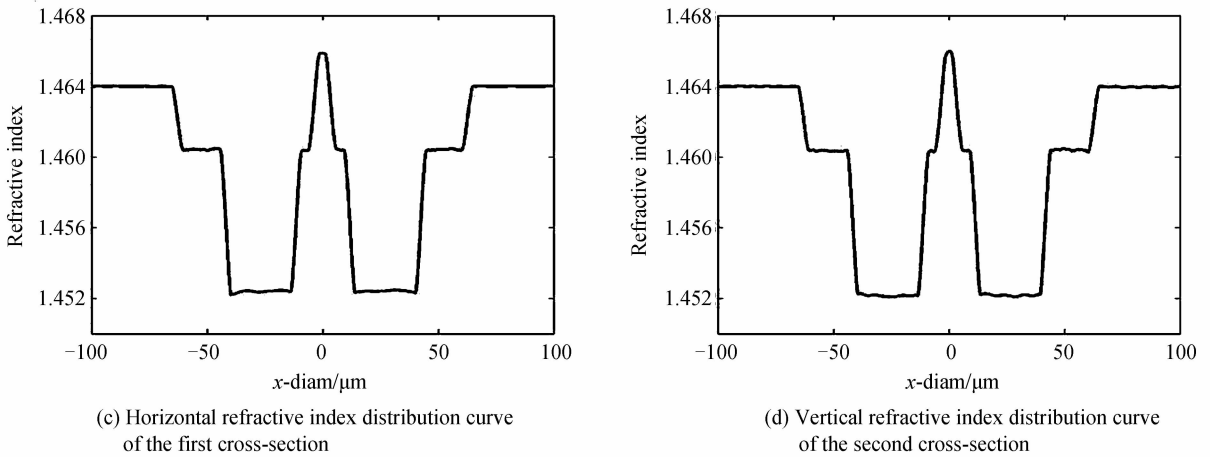


图5 扭转保偏光纤两个断面的折射率测量结果对比

Fig. 5 Comparative results of the measured refractive index of any two cross-section

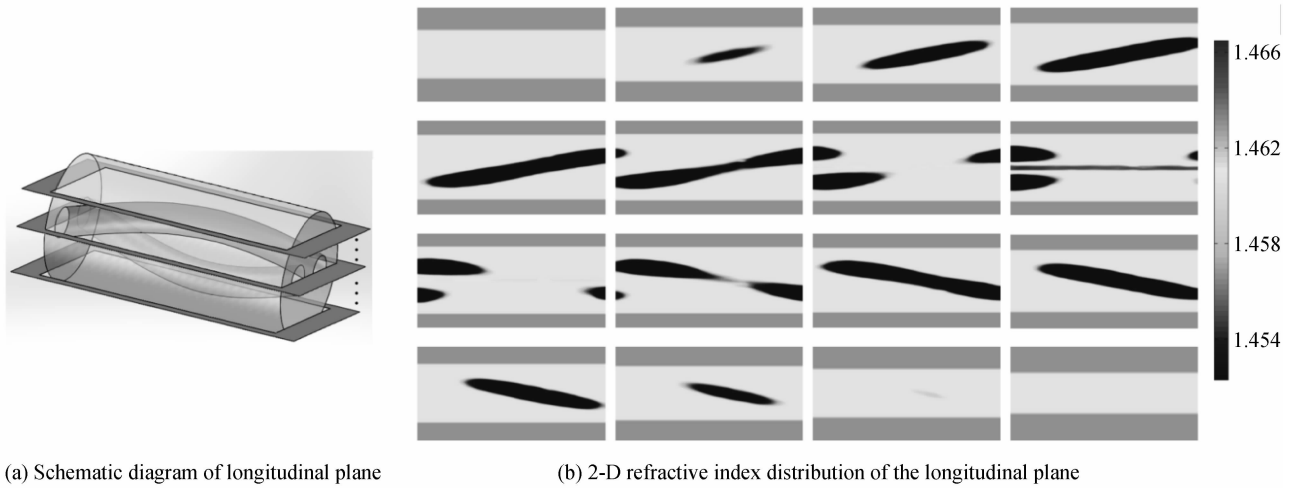


图6 扭转保偏光纤纵向切面折射率分布

Fig. 6 Longitudinal refractive index distribution of the spun polarization-maintaining fiber

由各个断面折射率分布可以构建这段光纤的三维折射率分布,如图7,其中 xyz 轴为光纤的空间坐标轴,即这段光纤任意一点的折射率都可以获得,图的颜色代表光纤的折射率值.从图中可以看到,光纤的两个应力柱呈现螺旋状,清楚地反映出扭转保偏光纤的内部结构.

3.2 数据分析

以两个应力柱圆心之间的连线与水平轴的夹角来表征应力柱的坐标方位角,如图8所示,以右边应力柱为基准,其方位角为 θ .

对扭转保偏光纤的各个断面折射率图进行边缘检测,提取各个断面应力柱的方位角,得到光纤应力柱方位角与光纤断面位置的关系曲线,如图9.从图中可以看出,应力柱在光纤长度方向做线性旋转变

化,表明扭转保偏光纤在拉制扭转过程中是以匀速率扭转的.起始断面的应力柱方位角为 0° ,而终点断面的应力柱方位角为 148.9° ,即这段扭转保偏光纤的扭转角为 148.9° .定义扭转保偏光纤的扭转准确度为光纤每微米扭转的度数,则这段 $500\ \mu\text{m}$ 长度的扭转保偏光纤的扭转准确度为 $148.9^\circ/500\ \mu\text{m}=0.2978^\circ/\mu\text{m}$.

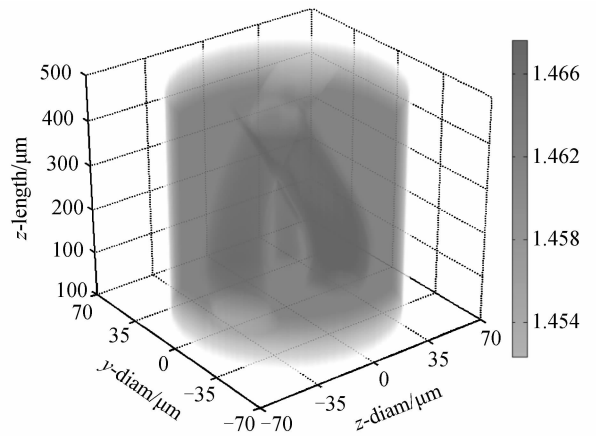


图7 扭转保偏光纤三维折射率分布

Fig. 7 3-D refractive index distribution of the spun polarization-maintaining fiber

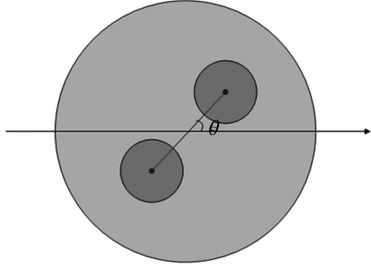


图8 应力柱的坐标方位角示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the coordinate azimuth of stress region

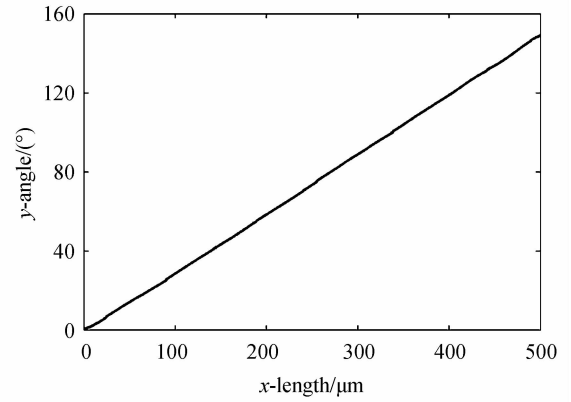


图9 应力柱旋转角与断面位置的关系曲线

Fig. 9 Relation curve between the rotation angle of the stress region and the position of cross-section

4 结论

本文测量了扭转保偏光纤的三维折射率分布,为表征光纤的内部结构提供了新方法.由扭转保偏光纤各个角度的相位分布信息,可以还原这段光纤任意一点的折射率,根据这些折射率可以重构光纤的内部结构.对比扭转保偏光纤任意两个断面的折射率发现,光纤的包层、应力柱和纤芯的折射率并没有变化.采用边缘检测算法计算了扭转保偏光纤的扭转角度以及扭转准确度.采用基于数字全息显微层析的横向干涉系统,既不破坏光纤样品而且测量操作简单,对于复杂结构的光纤也可以快速准确地测量其内部的三维折射率分布以及内部结构参量.

参考文献

- [1] GUBIN V P, ISAEV V A, MORSHNEV S K, *et al.* Use of Spun optical fibres in current sensors[J]. *Quantum Electronics*, 2006, **36**(3): 287-291
- [2] GALTAROSSA A, GRIGGIO P, PALMIERI L, *et al.* Polarization properties of randomly-birefringent spun fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**(3): 205-216.
- [3] PENG N, HUANG Y, WANG S, *et al.* Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(17): 1668-1671.
- [4] AMPEM-LASSEN E, HUNTINGTONS T, DRAGOMIR N M, *et al.* Refractive index profiling of axially symmetric optical fibers: a new technique[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(9): 3277-3282.
- [5] WHITE K I. Practical application of the refracted near-field technique for the measurement of optical fibre refractive index profiles[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1979, **11**(2): 185-196.
- [6] GISIN N, PASSY R, PEMY B. Optical fiber characterization by simultaneous measurement of the transmitted and refracted near field[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, **11**(11): 1875-1883.
- [7] WAHBA H H, KREIS T. Characterization of optical fibers by digital holographic interferometry[C]. SPIE Europe Optical Metrology. International Society for Optics and Photonics, 2009: 73890K.
- [8] WAHBA H H, KREIS T. Characterization of graded index optical fibers by digital holographic interferometry[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(8): 1573-1582.
- [9] WAHBA H H. Reconstruction of 3D refractive index profiles of PM PANDA optical fiber using digital holographic method[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, **20**(5): 520-526.
- [10] ZHOU Wen-jing, YU Ying-jie, XU Qing-sheng. Micro-structure measurement of phase grating based digital micro-holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2234-2238.
周文静, 于瀛洁, 徐强胜. 基于数字显微全息技术的相位光栅结构测量[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2234-2238.
- [11] PAN Z L, LI S P, ZHONG J G. Digital holographic microtomography for geometric parameter measurement of optical fiber[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(3): 035801.
- [12] PAN Zhe-lang, LI Shi-ping, ZHONG Jin-gang. Measurement of inner diameter and wall thickness for micro-capillary by digital holographic tomography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(7): 1643-1650.
潘哲朗, 李仕萍, 钟金钢. 用数字全息层析成像技术测量毛细管的内径及壁厚[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(7): 1643-1650.
- [13] SU Ling-long, MA Li-hong, WANG Hui, *et al.* Three-dimensional refractive index quantitative measurement for optical fiber by digital holographic tomography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(10): 188-193.

- 苏玲珑, 马利红, 王辉, 等. 基于数字全息显微断层成像的光纤折射率三维定量测量[J]. 中国激光, 2013, **40**(10): 188-193.
- [14] GU Ting-ting, HUANG Su-juan, YAN Cheng, *et al.* Refractive index measurement research for optical fiber based on digital hologram[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **64**(6): 064204
谷婷婷, 黄素娟, 闫成, 等. 基于数字全息图的光纤折射率测量研究[J]. 物理学报, 2014, **64**(6): 064204.
- [15] YAN C, HUANG S J, MIAO Z, *et al.* 3D refractive index measurements of special optical fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, **31**: 65-73.
- [16] SOKKAR T Z N, EL-FARAHATY K A, RAMADAN W A, *et al.* Nonray - tracing determination of the 3D refractive index profile of polymeric fibres using single - frame computed tomography and digital holographic interferometric technique[J]. *Journal of Microscopy*, 2015, **257**(3): 208-216.
- [17] LI Jun-chang. FFT Computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1163-1167.
李俊昌. 角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1163-1167.
- [18] WANG T J, SZE T W. The image moment method for the limited range CT image reconstruction and pattern recognition[J]. *Pattern Recognition*, 2001, **34**(11): 2145-2154.