

非轴对称光纤三维折射率测量

何学兰 李佳慧 王铁滨 李文超 邢键 崔双龙 孟令知

Research on three dimensional refractive index measurement of non-axisymmetric fiber optics

HE Xuelan, LI Jiahui, WANG Tiebin, LI Wenchao, XING Jian, CUI Shuanglong, MENG Lingzhi

引用本文:

何学兰, 李佳慧, 王铁滨, 等. 非轴对称光纤三维折射率测量[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1314–1320. DOI: 10.5768/JAO202445.0608001

HE Xuelan, LI Jiahui, WANG Tiebin, et al. Research on three dimensional refractive index measurement of non-axisymmetric fiber optics[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1314–1320. DOI: 10.5768/JAO202445.0608001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0608001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器

High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure

应用光学. 2023, 44(2): 462–468 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208002>

用于铝板缺陷无损检测的激光超声有限元模拟研究

Finite element simulation in laser ultrasound for non-destructive testing of aluminum defect materials

应用光学. 2019, 40(1): 150–156 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107004>

螺旋形塑料光纤表面等离子体共振折射率传感器

Plasmon resonance refractive index sensor of spiral-shaped plastic optical fiber surface

应用光学. 2023, 44(1): 226–233 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0108002>

基于傅里叶变换频谱分析的液体折射率实时测量系统

Real-time measuring system for liquid refractive index based on Fourier transform spectrum analysis

应用光学. 2023, 44(5): 1061–1067 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503001>

数字全息显微中相位像差校正技术综述

Review of phase aberration correction technology of digital holographic microscopy

应用光学. 2024, 45(2): 249–261 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0209002>

三维人脸测量与分割系统研究

Research on three-dimensional face measurement and segmentation system

应用光学. 2021, 42(4): 664–670 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1314-07

非轴对称光纤三维折射率测量

何学兰¹, 李佳慧¹, 王铁滨¹, 李文超¹, 邢 键¹, 崔双龙¹, 孟令知²

(1. 东北林业大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工程大学
物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 针对光纤非轴对称的特点, 利用数字全息显微层析技术搭建了测试的光路系统, 以物光波携带被测样品的相位信息为依据, 对其在 CCD 上的信息进行提取。由于光纤非轴对称的特点, 采集了 360° 的数字全息图, 采用角谱理论的算法提取出每一幅全息图物光波的相位分布信息, 通过层析重建算法得到三维折射率分布, 然后分别以长盈通和康宁光纤为测试样本, 测得光纤纤芯与包层折射率的差值分别为 0.005 和 0.006, 与厂家提供的参数基本一致。为了进一步验证所提测试方法的有效性, 对焊点处进行折射率测量研究, 实验结果表明, 该测量方法的准确性优于以往的光纤测量方法, 具有对光纤样品无损、测量方法简单、测量速度快等优点。

关键词: 数字全息; 非轴对称光纤; 无损检测; 非侵入式测量; 三维折射率

中图分类号: TN253; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0608001

Research on three dimensional refractive index measurement of non-axisymmetric fiber optics

HE Xuelan¹, LI Jiahui¹, WANG Tiebin¹, LI Wenchao¹, XING Jian¹,
CUI Shuanglong¹, MENG Lingzhi²

(1. School of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150006, China)

Abstract: According to the characteristics of non-axisymmetric optical fiber, the optical path system was built by using digital holographic microtomography. Based on the phase information of the measured sample carried by the object light wave, the information of the object light wave on the CCD was extracted. Due to the characteristics of non-axisymmetric optical fiber, a 360° digital hologram was collected. The phase distribution information of object light wave of each hologram was extracted by the reconstruction algorithm of angular spectrum theory, and the three-dimensional refractive index distribution was obtained by the reconstruction algorithm of tomography. Then, the Changying Tong and Corning fibers were used as test samples, the difference in refractive indices between the fiber core and cladding was measured to be 0.005 and 0.006, respectively, which was basically consistent with the parameters provided by the manufacturer. In order to further verify the effectiveness of the proposed testing method, the refractive index measurements were conducted at the solder joints. The experimental results show that the accuracy of the proposed measurement method is superior to previous fiber optic measurement methods, and it has advantages such as non-destructive testing of fiber optic samples, simple measurement methods, and fast measurement speed.

Key words: digital holography; non-axisymmetric fiber; non-destructive testing; non-invasive measurement; three dimensional refractive index

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-01-25

基金项目: 国家自然科学基金 (62205087, 62005064); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2572023CT16)

作者简介: 何学兰 (1988—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感技术研究。E-mail: chongjing2046@126.com

通信作者: 李文超 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感技术研究。E-mail: liwenchao@hrbeu.edu.cn

引言

随着现代社会科学技术的不断发展,信息的传输量、交换量需求不断增大,光纤通信技术具有高速率、大容量的特点,是重要的传输媒介。光纤通信是以光纤作为传输媒介,对信息进行传输^[1]。在传输过程中,光纤参数直接影响着光纤通信的性能和效果,例如光纤折射率的分布是影响带宽、衰减、色散、损耗等参数的关键因素^[2],因此对光纤折射率进行准确测量,成为目前研究者关注的热点。为了准确测量光纤内折射率的分布,研究者们提出多种测试方法,主要有聚焦法^[3]、原子刻蚀法^[4]、折射近场法^[5]和全息测量法^[6]。其中,原子刻蚀法和折射近场法需要切断光纤,并且对光纤切断的端面质量以及机械扫描装置的精度具有较高的要求,无法进行无损、快速、在线的实时测量;聚焦法虽然可以进行无损、快速的测量,但是对测试光源的稳定性及均匀性要求较高。

数字全息显微技术是近年来提出的一种实时、非接触、无损、高精度的三维测量技术,不仅可以实现三维折射率的测量,而且还可以实现活体细胞显微观察、微电子元器件三维形貌还原以及微观粒子位置追踪。数字全息显微技术是基于干涉测量相位的成像技术,干涉得到的数字全息图具有物光波振幅和相位的全部信息。通过数字全息显微成像技术与计算机断层扫描技术,可以获取样品的相位信息,通过一定的还原算法可以重建出样品的三维折射率分布。国外很多研究者将数字全息显微技术应用于三维微结构的测量,例如用于微结构光学元器件的检测^[7-10]、生物细胞形态监测^[11-13]和微粒子的动力学分析^[14-16]等。国内研究者利用数字全息显微技术实现光纤三维折射率的测量,谷婷婷等以单模光纤和多模光纤为实验对象,利用光纤的圆对称特点,由单幅全息图提取相位信息,再结合光纤的多层模型,对光纤折射率进行重建^[17]。邓丽军对单模光纤折射率三维分布的重构进行了研究,利用轴对称特点,通过单模光纤单一角度的全息图,获得单模光纤的断层折射率^[18]。黄素娟等采用滤波反投影算法和傅里叶衍射算法对保偏光纤进行三维折射率的测量,通过边缘检测算法对光纤进行三维重建,实现光纤内部折射率的三维测定^[19]。

本文基于数字全息显微成像技术搭建了光路系统,通过光路系统对待测光纤实现任意角度的全息图测量,通过对360幅数字全息图进行频域变

换并滤波,采用角谱理论算法得到相位信息,并对相位信息进行解包裹,还原出光纤内部沿直径方向的折射率分布。本文以偏心光纤为试验样品进行了测量,测量结果与厂家提供的参数符合。本文还对双包层光纤与单模光纤焊接后焊点位置的折射率进行了测量。测试结果表明,本文提出的测试方法不仅可以实现非对称光纤三维折射率的测量,还可以实现光纤内部均匀性的检测。该方法可以无损获取材料的折射率信息,并为其光学应用提供了有价值的信息。

1 光纤折射率测量基本原理

本文采用基于数字全息图记录和再现的原理对光纤折射率进行记录和再现。数字全息图记录的是物光和参考光干涉之后的条纹信息,物光中携带了待测样品的全部信息,假设 xoy 平面为记录物光和参考光的平面,设该平面上的物光和参考光的复振幅分别为

$$O(x,y) = o(x,y)\exp[-j\phi(x,y)] \quad (1)$$

$$R(x,y) = r(x,y)\exp[-j\varphi(x,y)] \quad (2)$$

式中: $o(x,y)$ 是物光波的振幅分布; $\phi(x,y)$ 表示物光波的相位分布; $r(x,y)$ 表示参考光的振幅分布; $\varphi(x,y)$ 则表示参考光的相位分布。那么物光波与参考光干涉后的总强度分布为

$$I(x,y) = |R(x,y) + O(x,y)|^2 = |R(x,y)|^2 + |O(x,y)|^2 + 2r(x,y)o(x,y)\cos[\phi(x,y) - \varphi(x,y)] \quad (3)$$

式中:前2项分别表示参考光波和物光波的强度值,只含有振幅大小的信息,不含相位分布的信息;第3项 $2r(x,y)o(x,y)\cos[\phi(x,y) - \varphi(x,y)]$ 为干涉像,里面包含了物光波的振幅和相位信息。因此,对第3项进行记录及还原就可以得到待测物体的信息。本文对记录的数字全息图进行傅里叶变换到频域,并对其进行滤波,将零级项与共轭项进行消除,然后采用角谱法^[20]进行再现,获得物光场的复振幅分布 $O'(x,y)$,即包含物体的强度和相位信息。可以通过数值计算获得待测样品的相位分布:

$$\varphi(x,y) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[O'(x,y)]}{\text{Re}[O'(x,y)]} \right\} \quad (4)$$

式中: $\text{Im}[]$ 为取虚部; $\text{Re}[]$ 为取实部。所获得的相位区间为 $(-\pi, \pi)$,所以需要对其进行解包裹处理后,才能得到真实的相位分布。

本文采用基于马赫-曾德尔的透射式数字全息成像系统,其光路系统原理图如图1所示。激光

器(波长为 532 nm)发出的光经分光镜 1 后分为两束,一束光经反射镜 1 反射后透过光纤,并经过 16 倍的显微物镜放大成为携带光纤信息的物光;另一束光经反射镜 2 反射后,也经 16 倍的显微物镜放大作为参考光。2 束光经分光镜 2 合束在 CCD 分辨率为 $2\,452 \times 2\,054$, 像元尺寸为 $3.125\,\mu\text{m} \times 3.125\,\mu\text{m}$ 的感光界面上发生干涉,形成全息图。实验中,通过调节分束器 2,可以获得清晰的全息图。由于本文测试的是非轴对称光纤,需要对光纤每一个角度的全息图像进行采集,另外,考虑到旋转电机的精度以及同轴性,我们采用骏河精机生产的电机来旋转光纤,每次旋转 1° , 旋转 360 次,得到 360 幅光纤全息图,对其进行还原,得到光纤三维折射率。此外,在测试系统实际搭建过程中,会出现光路偏移,使光束不在同一个平面上,这时需要反复平移 2 个反射镜,确保光束在分束器 2 处产生干涉。

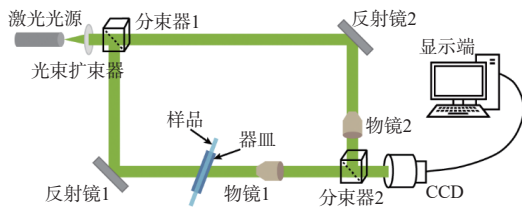


图 1 光路系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system

数字全息显微技术所获得的单幅相位图是二维分布,且其相位分布是光纤样品的折射率与光所经路径积分的结果^[19],即有:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_l [n(x, y, z_0) - n_0] dl \quad (5)$$

式中: n_0 为光纤放置在旋转装置中匹配液的折射率; l 为光通过样品的几何路径; λ 为光波波长; $n(x, y, z_0)$ 为被测光纤在断面 z_0 处的折射率分布。由式(5)可以得到光纤的投影值为

$$p(\theta_i, z_0) = \frac{\varphi(x_i, y_i)}{2\pi} \lambda = \int_l [n(x_i, y_i, z_0) - n_0] dl \quad (6)$$

式中 $p(\theta_i, z_0)$ 为被测光纤转动 θ_i 角度后在 z_0 断面处的投影数据,通过旋转光纤得到 360° 视角的投影数据 $p(\theta_i, z_0)$, 其中 $\theta_i = 1^\circ \sim 360^\circ$ 。采用滤波反投影算法可以得到光纤的三维折射率分布^[21]:

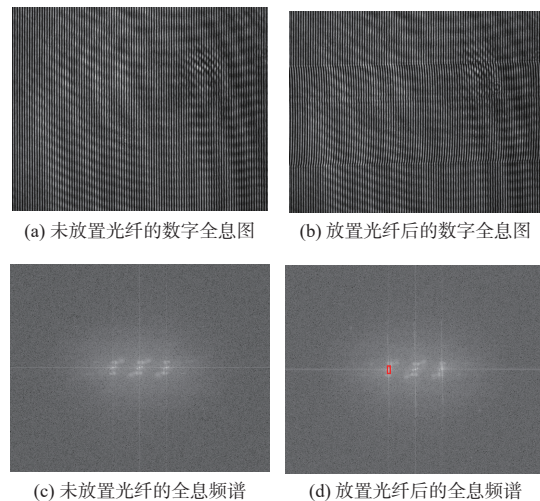
$$n(x, y, z_0) = \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta, \omega, z_0) |\omega| \exp(j2\pi \omega(x \cos \theta + y \sin \theta)) d\omega d\theta + n_0 \quad (7)$$

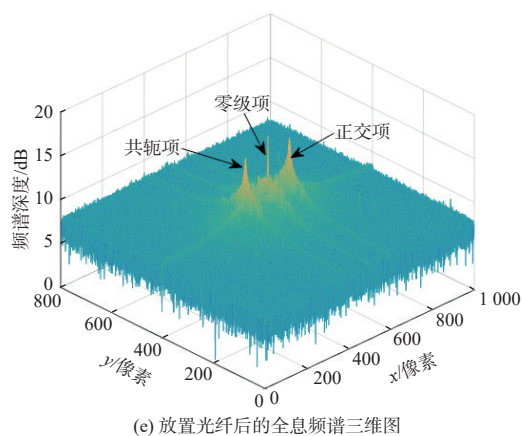
式中: $P(\theta, \omega, z_0)$ 为 $p(\theta, z_0)$ 的傅里叶变换; ω 为频域函数 $P(\theta, \omega, z_0)$ 的频率。通过式(7)可以得到光纤的三维折射率分布。

2 测量结果与数据分析

本实验采用的光纤为长盈通公司生产的偏心光纤(ECF15G-125-U16, 包层直径为 $125.13\,\mu\text{m}$, 纤芯直径为 $8.12\,\mu\text{m}$, 纤芯折射率为 1.466 7, 包层折射率为 1.461 3), 由于光纤是圆柱形状, 为了防止光纤产生柱面效应, 将光纤放在装有匹配液的透明比色皿中, 将匹配液的折射率尽量调制到与光纤包层折射率相近, 实验中匹配液的折射率为 1.464 0。

在实验中, 为了通过观测得到最优全息图, 调节各个光学元器件的角度以及距离, 确保得到高质量的数字全息图。被测光纤每旋转 1° 记录 1 次, 一共记录 360 幅不同角度的光纤最优全息图。在测量过程中, 为了避免光学元器件产生的附加相位, 本文将记录的 360 幅数字全息图重构出的相位, 与没有放置样品的全息图重构出的相位相减, 利用相位相减法消除附加相位。图 2(a) 和图 2(b) 为未放置光纤的数字全息图和放置光纤后的数字全息图, 通过图 2(b) 图可以明显看出, 放置光纤后, 全息图上包含了光纤的信息, 光纤与纤芯的轮廓呈现得非常清晰。为了提取数字全息图的相位, 需要将图 2(a) 和图 2(b) 变换到频域并进行滤波处理, 因此将全息图 2(a) 和图 2(b) 进行傅里叶变换, 得到其频谱图如图 2(c) 和图 2(d) 所示。在频谱图中选取出物光波所对应的频谱, 对于无光纤的全息图进行傅里叶变换后得到的频谱图, 也选取相对应的部分, 分别做傅里叶逆变换得到滤波后的复振幅分布。通过图 2(c) 和图 2(d) 可以看出, 没有放入光纤和放入光纤的不同之处, 因此可以准确地确定物光波的频谱范围, 图 2(d) 中矩形框部分为本文选择进行变换的区域, 将零级项以及共轭项(如图 2(e) 所示)进行滤除。





(c) 放置光纤后的全息频谱三维图

图2 实验全息图和频谱图

Fig. 2 Experimental holograms and frequency spectrograms

数字全息图经过频域滤波, 角谱法数值再现, 相位解包裹以及相位相减得到的偏心光纤相位分布如图3所示, 其中图3(a)为偏心光纤解包裹二维相位分布; 图3(b)为其三维显示。

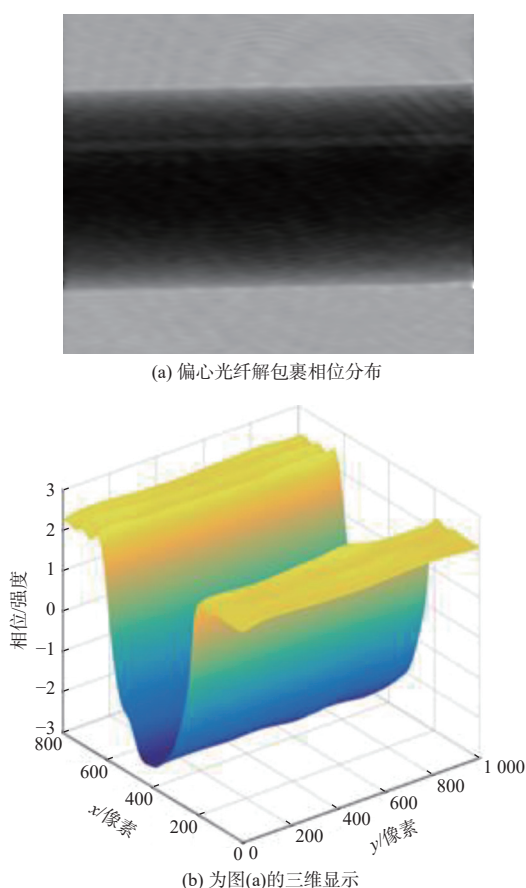
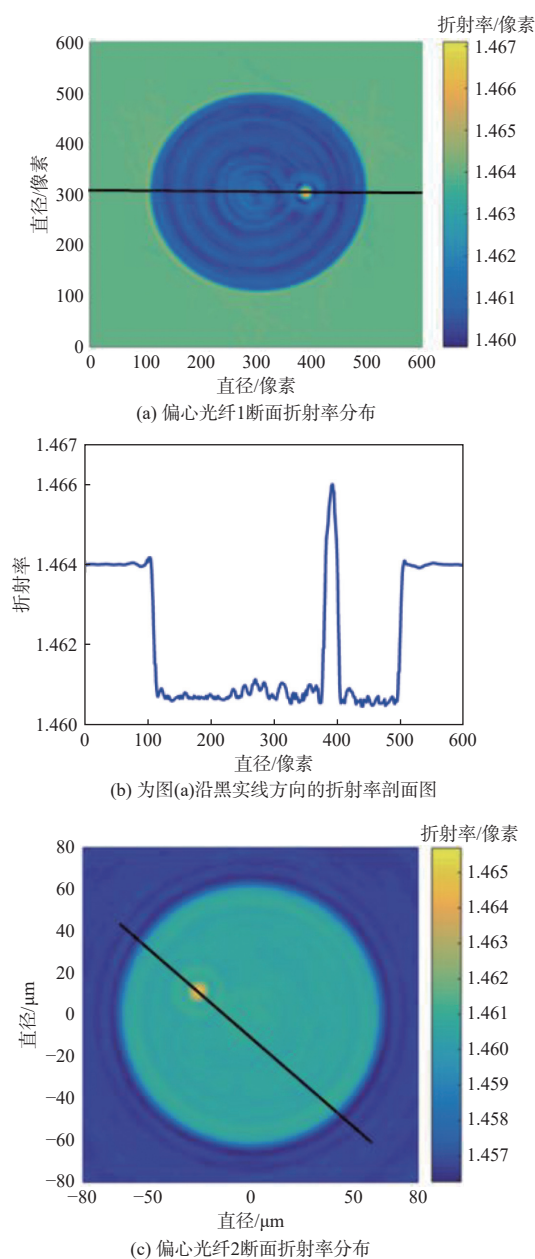


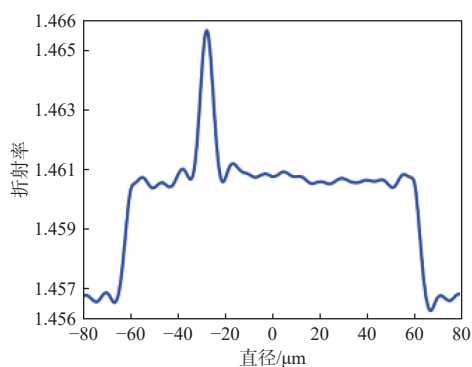
图3 偏心光纤解包裹相位图

Fig. 3 Phase distribution diagram of unwrapping of eccentric fiber optic

根据偏心光纤旋转 360° 的数字全息图得到相位信息。通过式(6)得到待测光纤每个角度下的折

射率积分投影数据, 然后利用滤波反投影算法还原出偏心光纤端面的折射率分布, 图4(a)所示为实验测得的偏心光纤1端面折射率分布, 纤芯和包层的边界, 以及包层与匹配液的边界均比较清晰。图4(b)为沿着纤芯径向的折射率分布。可以看出, 包层和纤芯的折射率分别为 1.461 和 1.466, 两者的折射率差值为 0.005。另外, 我们对康宁公司提供的偏心光纤也进行了三维折射率测量, 断面折射率分布如图4(c)所示, 图4(d)为过纤芯沿径向的折射率分布。计算得出包层与纤芯的折射率差值为 0.006, 2 根被测光纤的折射率差值都与厂家给出的包层和纤芯的折射率差值接近, 由此可以证明, 本文搭建的透射式数字全息成像系统的光路以及重建算法是可行的。





(d) 为图(c)沿黑实线方向的折射率剖面图

图4 偏心光纤折射率测量结果

Fig. 4 Measurement results of refractive index of eccentric optical fiber

3 光纤焊接点处三维折射率的测试

为了验证上述搭建的光路系统和重建算法的有效性,本文对光纤焊接点处光纤折射率的变化进行了测试。为了制造光纤的非对称性,可采用加热的方式。在对光纤加热时,由于热梯度的不同,会对光纤折射率造成不同程度的变化,从而导致光纤端面折射率的非均匀分布。将双包层光纤与单模光纤进行熔接,并加热2 h后进行测试。图5所示为焊接后样品的数

字全息图。

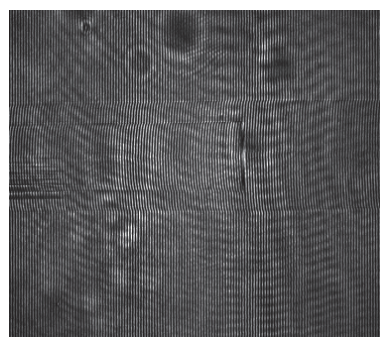


图5 焊接后样品数字全息图

Fig. 5 Digital hologram of sample after welding

图6为采用本文方法测得的距离焊接点不同距离处双包层光纤折射率的分布。可以看出,在焊接之后,光纤折射率的分布是不均匀的,这是由于在熔接的过程中,光纤所处的温度区域是不同的。而且从图6中可以看出,离焊点越近,纤芯与包层的折射率差值越小,由0.007变为0.001,这与文献[22]研究结果一致,这是因为高温加热使纤芯中的掺杂发生了扩散,从而重建了折射率分布。此实验结果表明,本文方法不仅可用于测试非轴对称光纤的横向折射率分布,还可用于检测光纤长度方向折射率的均匀性。

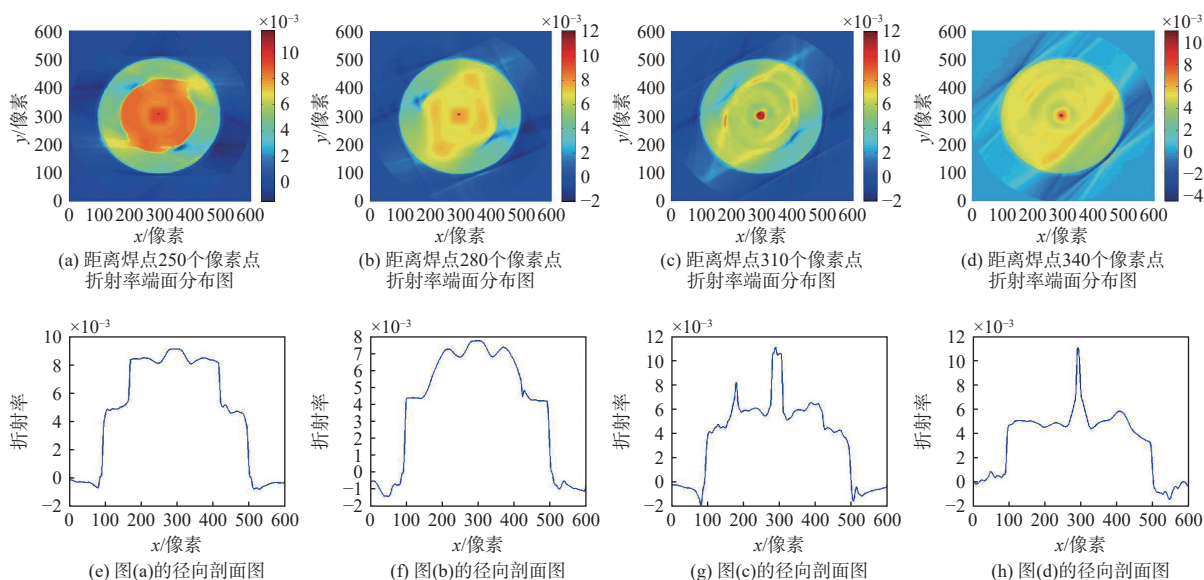


图6 离焊接点不同列数的折射率分布及其径向折射率剖面图

Fig. 6 Refractive index distribution and radial refractive index profile of different columns from welding point

4 结论

本文根据光纤非对称性的特点,采用360°的数字全息图对折射率进行还原,基于数字全息显微

技术搭建了硬件光路系统。对偏心光纤以及焊接后加热2 h的双包层光纤的内部折射率分布进行了检测,将得到的数字全息图在频域进行滤波处

理, 采用滤波反投影算法进行重建, 最终得到了光纤内部的折射率分布。采用基于数字全息显微层析的横向干涉系统, 既不破坏光纤样品并且测量操作简单, 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。该方法与传统的光纤折射率测量方法相比, 具有非破坏性、高精度和高分辨率的优点, 为光学元件的设计和应用提供了重要的折射率数据。本研究为光学研究和应用领域提供了一种全新的折射率测量方法, 具有广阔的应用前景。在未来的研究中, 可以进一步优化该方法, 并拓展其在光学领域的应用。

参考文献:

- [1] BELOVA O S, BOLOTOV D V, KAZANTSEV S Y, et al. Experimental study of the effect of electric fields of thunderclouds on fiber-optic communication lines[J]. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, 50(10): 429-433.
- [2] HORSLEY S A R. Tutorial: topology, waves, and the refractive index[J]. *International Journal of Theoretical Physics*, 2023, 62(6): 135-1-57.
- [3] LI C Y, LI G P, LIU J H, et al. Influence of eccentricity and tilt of radial GRIN lens on its thickness measurement by chromatic confocal technology[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(9): 94107.
- [4] KIM D, BIN KIM J, AHN D, et al. Atomic layer etching applications in nano-semiconductor device fabrication[J]. *Electronic Materials Letters*, 2023(5): 424-441.
- [5] HASAN M R, HELLESØ O G. Materials for dielectric nanotweezers in the near-visible region[J]. *ACS Applied Optical Materials*, 2023, 1(4): 832-842.
- [6] ZHENG J J, GAO P, SHAO X P, et al. Refractive index measurement of suspended cells using opposed-view digital holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(32): 9000-9005.
- [7] ERMATOV T, NOSKOV R E, MACHNEV A A, et al. Multispectral sensing of biological liquids with hollow-core microstructured optical fibres[J]. *Light, Science & Applications*, 2020, 9: 173-1-12.
- [8] WANG W P, HUANG S J, CHEN Y, et al. Three-dimensional refractive index measurement of special optical fiber based on optical vortex phase-shifting digital holographic microscopy[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58: 034108.
- [9] CASTANEDA R, TRUJILLO C, DOBLAS A. Video-rate quantitative phase imaging using a digital holographic microscope and a generative adversarial network[J]. *Sensors*, 2021, 21(23): 8021-1-18.
- [10] WANG Y X, WANG D Y, ZHAO J, et al. 3D profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412003.
- [11] SINGH A S G, ANAND A, LEITGEB R A, et al. Lateral shearing digital holographic imaging of small biological specimens[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23617-23622.
- [12] MOON I, DANESH PANAH M, ANAND A, et al. Cell identification computational 3D holographic microscopy[J]. *Optics and Photonics News*, 2011, 22(6): 18-23.
- [13] YU X, CROSS M, LIU C G, et al. Measurement of the traction force of biological cells by digital holography[J]. *Biomedical Optics Express*, 2012, 3(1): 153-159.
- [14] DUBOIS F, CALLENS N, YOURASSOWSKY C, et al. Digital holographic microscopy with reduced spatial coherence for three-dimensional particle flow analysis[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 864-871.
- [15] SINGH V R, DARAKIS E, HEGDE G, et al. A new methodology for pixel size retention in lensless digital holographic microscopy applied to micro-particle analysis[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(3): 035704.
- [16] USTABAS KAYA G, KOCABAS S, KARTAL S, et al. Detection of airborne nanoparticles with lateral shearing digital holographic microscopy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106934.
- [17] 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*, 2015, 64(6): 157-166.
GU Tingting, HUANG Sujuan, YAN Cheng, et al. Refractive index measurement research for optical fiber based on digital hologram[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(6): 157-166.
- [18] 邓丽军, 杨勇, 盖琦, 等. 基于数字全息层析术对单模光纤折射率三维分布的重构研究[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(9): 1774-1778.
DENG Lijun, YANG Yong, GAI Qi, et al. The investigation for reconstructing the three dimensional distribution of the refractive index of single-mode fibers based on the digital holographic tomography[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2013, 24(9): 1774-1778.

- [19] 黄素娟, 曾俊璋, 闫成, 等. 扭转保偏光纤的三维折射率测量[J]. *光子学报*, 2017, 46(6): 0612001.
HUANG Sujuan, ZENG Junzhang, YAN Cheng, et al. 3D refractive index measurement for spun polarization-maintaining optical fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(6): 0612001.
- [20] 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.
LI Junchang. 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.
- [21] 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.
- [22] MENG L Z, CHEN G D, WANG D H, et al. Thermal diffusion technique for in-fiber discrete waveguide manipulation and modification: a tutorial[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2021, 39(12): 3638-3653.