

引用格式: LI Min, SONG Wuzhou, ZHAN Wei, et al. Measurement of Optical Fiber Refractive Index Distribution Based on White Light Scanning Interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0406004

李敏,宋五洲,湛位,等.基于白光扫描干涉法的光纤折射率分布的测量[J].光子学报,2021,50(4):0406004

基于白光扫描干涉法的光纤折射率分布的测量

李敏,宋五洲,湛位,吴荣耀,邱锦华

(华中科技大学 材料科学与工程学院 连接与电子封装中心, 武汉 430074)

摘 要:提出了一种光纤折射率分布的测量方法,采用白光扫描干涉技术,并在参考镜上构造与光纤样品相同的结构来克服白光相干长度短的限制,优化了光路,提高了干涉条纹间的对比度。采用与白光干涉信号的包络线呈高斯分布的 Morlet 小波作为小波变换的母小波进行拟合处理,得到光纤与已知折射率的匹配液之间的相对高度。通过计算获得光纤的折射率分布,并对获得的数据采用光纤折射率分布的经典函数进行拟合,得到多模光纤和单模光纤的决定系数分别为 0.997 2 和 0.996 4。最后将实验获得的结果与官方参数进行比较,误差为 0.01%,表明该方法测量的精度较高,完全可以用来测量光纤的折射率。

关键词:干涉仪;扫描显微镜;折射率剖面;光纤测量;条纹分析

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215004.0406004

Measurement of Optical Fiber Refractive Index Distribution Based on White Light Scanning Interferometry

LI Min, SONG Wuzhou, ZHAN Wei, WU Rongyao, QIU Jinhua

(Center for Joining and Electronic Packaging, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A method for measuring the refractive index distribution of optical fibers is presented, which uses the white light scanning interference technology and builds the same structure on the reference mirror as the optical fiber sample to overcome the limitation of the short white light coherence length, optimizes the optical path and improves the contrast between the interference fringes. For white light interference signals, Morlet wavelet which has Gaussian distribution like envelope of white light interference fringes is used as the mother wavelet of wavelet transform for fitting processing, and the relative height between the fiber and the matching fluid with known refractive index is obtained. The refractive index distribution of optical fiber can be obtained by calculation, and fitting the obtained data with the classical function of the refractive index distribution of the fiber core, the coefficients of determination of the multi-mode fiber and single-mode fiber are 0.997 2 and 0.996 4 respectively. Finally, the experimental results are compared with the official parameters, and the error is 0.01%, which shows that this method has a high precision and can be used to measure the refractive index of optical fiber.

Key words: Interferometry; Scanning microscopy; Refractivity profiles; Fiber measurements; Fringe analysis

OCIS Codes: 060.2300; 120.3180; 170.5810; 280.5715; 120.2650

基金项目:华中科技大学人才引进基金(No. 3004110112)

第一作者:李敏(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为基于白光干涉法的光学材料折射率的测量。Email: limin_2018@hust.edu.cn

导师(通讯作者):宋五洲(1982—),男,教授,博士,主要研究方向为光电子器件与系统。Email: wsong@hust.edu.cn

收稿日期:2020-12-17;录用日期:2021-01-26

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

0 引言

光纤由于其频带宽、损耗低、抗干扰性强、工作性能可靠、重量轻体积小等优点在通信传输^[1]、数据中心^[2]、医学内窥镜^[3]、传感器^[4]等领域应用广泛。而光纤折射率作为光纤的固有属性,决定了光纤模式、光纤宽带、光纤畸变以及光纤损耗等传输特性,同时也反映了光纤的几何大小、截止波长、数值孔径等光学参数^[5],所以能精确测量光纤的折射率分布,准确评价光纤的质量,对于光纤技术的发展具有重大意义。目前,光纤折射率测量的主要方法有近场折射法^[6]、聚焦法^[7]、薄片干涉法^[8-9]和横向干涉法^[10-11]等。STEWART W J^[15]于1977年提出使用近场折射法来测量光纤的折射率分布,经过不断发展,到目前为止,近场折射法已成为光纤折射率测量的基准测试方法,该方法测量精确、重复性好、分辨率高,可达到 10^{-4} ,但是在测量之前需要对光纤端面进行处理,光纤端面的平整度直接影响了测量精度,且操作复杂、对环境要求高、测量速度慢^[12]。AMPEM LASSEN E等^[7]提出采用聚焦法测量光纤的折射率分布,灵敏度优于 10^{-4} ,但是这受限于离焦距离,且聚焦法是通过测量光线通过光纤后的光强分布从而得到光纤的折射率分布,所以要求使用的光源稳定且均匀性好,但在实际运用中难以控制。干涉法是测量光纤折射率最为灵敏的一种方法,分为薄片干涉法和横向干涉法,薄片干涉法在垂直于光纤剖面的方向进行观察,测量精度较高,但需要对光纤进行切片处理,制样过程复杂。

为此,本文提出一种基于白光扫描干涉技术(White Light Scanning Interferometer, WLSI)的横向干涉法来测量光纤折射率的分布,该方法无需破坏光纤,制样过程简单方便。白光扫描干涉法采用迈克尔逊干涉仪结构,是一种无损、快速、无接触的测量方法,且白光干涉抗干扰能力强、精度高,相比于激光干涉,白光没有 2π 的模糊相位差,不用进行相位解包裹,减少了数据处理难度,也克服了单色光不能用来测量高度大于 $\lambda/4$ 三维台阶、沟槽等不连续表面的限制。通过压电陶瓷位移平台的垂直步进运动与16bit的sCMOS相机采集图片相结合,获得光纤样品的干涉条纹信息,结合小波算法,获取光纤与匹配液的相对高度,从而计算出光纤的折射率分布,实验精度可达 10^{-4} 。

同时,对于本文提出方法的拓展应用,为提高玻璃盖板、PDMS、PMMA等透明材料下物体的折射率分布或是三维表面形貌的测量精度提供了一种有效的方法,即通过对反射镜的创新处理,在反射镜上添加一块与样品中玻璃盖板、PDMS等材料大小相同的补偿片来抵消样品中玻璃盖板、PDMS等对光路的影响来优化光路。与此同时,也通过对机械、相机和算法等方面的优化来提高测量精度,使得整套设备具备高分辨率、高灵敏度、同时观察多点和极低样品消耗量等优点。该方法可用于封装好的玻璃盖片下的MEMS等器件的三维表面形貌测量,也可以测量微流体通道内液体折射率的分布^[14]或是细胞的折射率,更为平面光波导(Planar Lightwave Circuit, PLC)的折射率测量提供一种参考方法。

1 白光扫描干涉系统的搭建

采用迈克尔逊白光扫描干涉仪来测量光纤与匹配液的相对高度,根据公式推导出光纤折射率的分布。系统搭建如图1(a)所示,光源是中心波长为 $\lambda_0=500$ nm的卤钨灯,光源通过镜筒透镜(Tube Lens)后经过分束器1(Beam Splitter, BS1)、物镜(Objective Lens)到达分束器BS2,其中分束器的分光比例为1:1,BS2将光分为两路,一路光透过光纤样品到达硅片后发生反射,光纤样品的处理如图1(c)所示,将光纤沉浸在匹配液中,且在光纤上盖一块石英盖玻片(Quartz Coverslip),一是为了构造出被测物体在透明材料下的结构,二是为了限定匹配液的高度,使其等于光纤的直径;另一路光经过参考镜(Reference Mirror)反射,在反射镜上构造与光纤样品类似的结构,使用硅片作为反射镜,在反射镜上固定一块与样品中石英盖玻片相同尺寸和材料的石英片作为补偿片来抵消样品上的石英盖玻片对光路的影响,反射镜和石英玻璃之间为匹配液,且匹配液的高度等于光纤直径,如图1(b)所示,反射镜与光纤样品结构的区别在于有无光纤。调节反射镜的位置,使两束光满足光程差的关系,从而产生干涉条纹。接着,使用MATLAB控制承载有光纤的压电平台(Piezoelectric Transducer, PZT)的步进运动和sCMOS相机(Thorlab, CS2100M-USB)的图像采集相配合,PZT沿Z轴步进移动一次,sCMOS相机便采集一帧的干涉图像,PZT的扫描步长设定为白光光源中心波长的 $1/8$,即 $\Delta Z=62.5$ nm。最后获得一系列的扫描干涉图,通过Morlet小波算法,获得样品各点的零光程差点,从而建立光纤相对于匹配液的相对高度图。

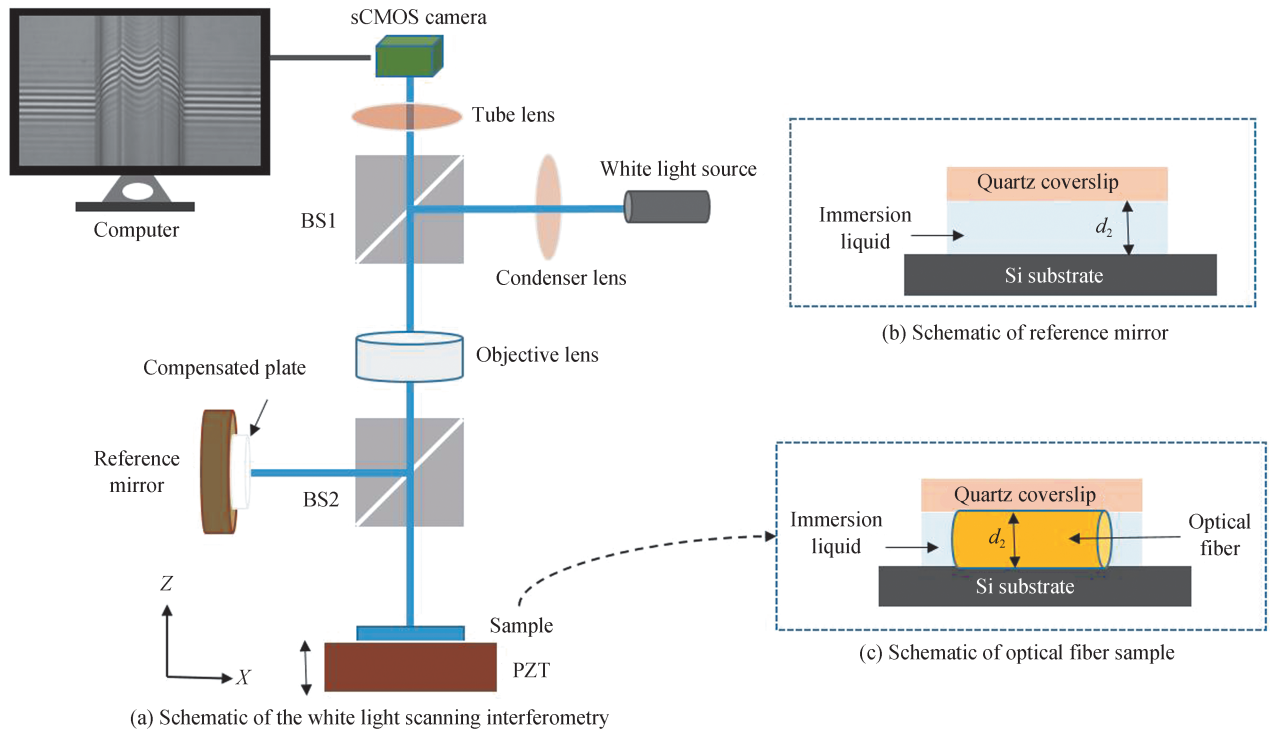


图1 实验装置与样品处理图
Fig.1 Experimental setup and sample processing diagram

系统使用采样位数 $N=16$ 的 sCMOS 相机来检测白光干涉光强的变化,根据干涉光强与相位差的关系,求出系统的理想垂直分辨率 $\Delta h = \lambda_0 / (4 \times 2^{16}) = 0.0019 \text{ nm}$,虽然实际测量时垂直分辨率会略低于计算的分辨率,但这直接体现了系统能够测量的最小高度变化为亚纳米级,甚至更小。同时,物镜的数值孔径 $NA = 0.45$,因此横向分辨率为 $\Delta r = 0.61\lambda_0 / NA = 0.68 \mu\text{m}$,远小于光纤的尺寸,说明本系统完全可以用来测量光纤的折射率分布。

2 折射率测量原理

根据光学干涉的原理,当空间中的两束光满足干涉条件时,就会发生干涉现象。白光包含了可见光中所有的光谱,白光干涉条纹也是由其包含的光谱中的单色光干涉条纹叠加而成,光强值在零光程差处达到最大值。通过获取各点的零光程差位置,得到被测样品各点的相对高度,进而得到被测物体的表面形貌。白光干涉光强的分布表示为^[13]

$$I = I_0 [1 + m \times \nu \times \cos(\varphi + 2\pi\delta/\lambda_0)] \quad (1)$$

式中, I_0 为干涉光强的直流分量,反映了图像的背景光强, λ_0 为白光光源的中心波长, φ 为两束光的初始相位差, δ 为光程差, ν 表示相干包络,光源为单色光时 $\nu=1$,表示干涉信号的包络线为一条直线;光源为白光时,其干涉信号的包络线随光程差的变化呈高斯分布,并在零光程差处达到最大值,这里定义 $m \times \nu$ 为白光光源的相干调制度。因为 Morlet 小波是一种高斯包络复调制的信号,与白光扫描干涉信号的包络线相似,所以本文采用了 Morlet 小波作为小波变换的母小波,母小波 $\Psi(t)$ 表示为

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} e^{j\omega_0 t} \quad (2)$$

式中, ω_0 为母小波的中心频率,则 Morlet 小波族可以表示为

$$\Psi(t, a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

式中, a 为尺度参数,它决定了子小波的中心频率和带宽, b 为位置参数,改变 b 值,将实现子小波位置的平移。不同的 a, b 构成不同的小波函数,即小波族。对白光干涉信号进行分析时,设置采用的母小波中心频率

与白光干涉信号的中心频率一致,即 $a=1$,此时只需变化参数 $b(1,2,3,\dots,N)$ 使子小波左右平移,当 Morlet 小波函数与白光干涉信号重叠度最高时,认为此时的 b 值为干涉信号调制度最大的位置,结合小波变换的相位 $\varphi(b)$,则该点对应的高度为

$$h = \frac{1}{8} \lambda_0 b - \frac{\lambda_0}{4\pi} \varphi_b \quad (4)$$

当 PZT 位移平台的沿 Z 轴垂直运动时,sCOMS 相机拍摄到一系列的干涉条纹图,经过 Morlet 小波算法处理后,可获得样品各点的零光程差处,如图 2(a)、(b)所示,求出匹配液与光纤的相对高度 Δh 为

$$\Delta h = r_2 - r_1 \quad (5)$$

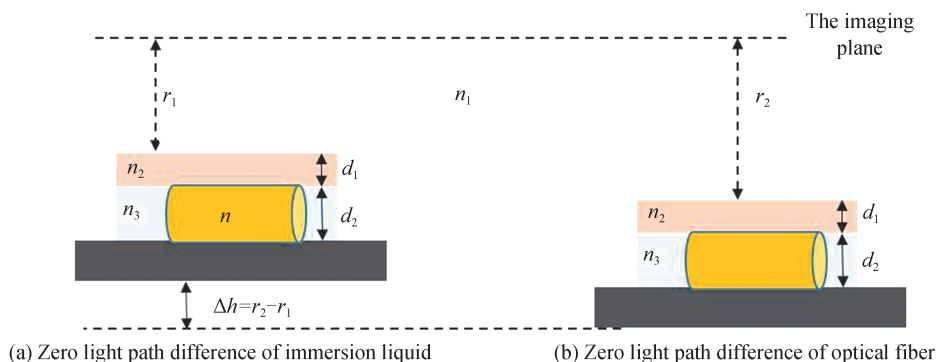


图2 样品零光程差位置

Fig.2 Zero light path difference of fiber sample

此时,经过分束镜 BS2 分成的两束光分别经过样品和反射镜后反射回来到达分束镜 BS2 的光程相等,由于反射镜的位置没有改变,只有样品随着 PZT 位移平台垂直运动,所以经过匹配液的光程等于经过光纤的光程,可表示为

$$r_1 \times n_1 + d_1 \times n_2 + d_2 \times n_3 = r_2 \times n_1 + d_1 \times n_2 + (d_2 - l) \times n_3 + l \times n \quad (6)$$

式中, r_1, r_2 为光在空气中的几何路径, n_1 为空气的折射率,约等于 1, d_1, n_2 为石英盖片的厚度和折射率, d_2, n_3 为匹配液的厚度和折射率, d_2 为光纤的直径, n 为光纤的折射率, l 为光在光纤中的路径。因此,由式(5)、(6)可得出光纤的折射率为

$$n = n_3 + \Delta h / l \quad (7)$$

3 实验结果及分析

采用 MATLAB 软件编程实现对干涉图像的获取和处理,实验扫描 500 张图像来获得各像素点光强值随帧数变化的曲线图,并采用 Morlet 小波作为母小波进行拟合来获得每个像素点最大调制度的位置,即为该点的相对高度值,图 3 表示多模光纤像素点 (20, 300) 处白光干涉信号及其 Morlet 小波包络。

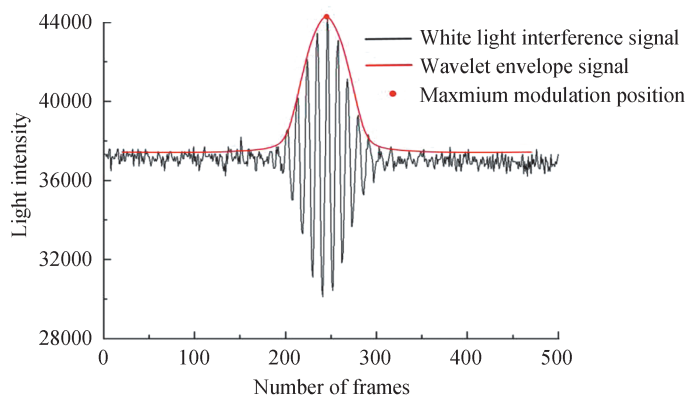


图3 多模光纤像素点(20,300)处白光干涉信号及其 Morlet 小波包络

Fig.3 Morlet wavelet envelopment of white light interference signal of multi-mode fiber at pixel point (200, 300)

使用阿贝折射仪测得光纤匹配液的折射率为 1.468 5,光纤包层直径均为 125 μm ,对应 sCMOS 相机 186 个 pixel。被测量的光纤样品为亨通光电公司的 OM3 多模光纤,光纤外径为 50/125 μm 和康宁公司的 SMF-28+ULL 型号的单模光纤,光纤外径为 9/125 μm 。实验在 20 $^{\circ}\text{C}$ 恒温的环境下进行,图 4(a)、(b) 为多模光纤和单模光纤的干涉图,从干涉图中可清晰看到干涉条纹在匹配液与光纤的界面处和纤芯的位置发生明显的变形,且以光纤中轴线为轴呈对称分布。图 4(c)、(d) 是通过式 (7) 求出的光纤折射率的分布图,为了更加直观地显示,分别选取多模光纤 $Y=15$ 和单模光纤 $Y=20$ 时观察光纤的折射率分布,如图 4(e)、(f) 所示,由图可知,两种光纤均为渐变光纤,且折射率呈对称分布。

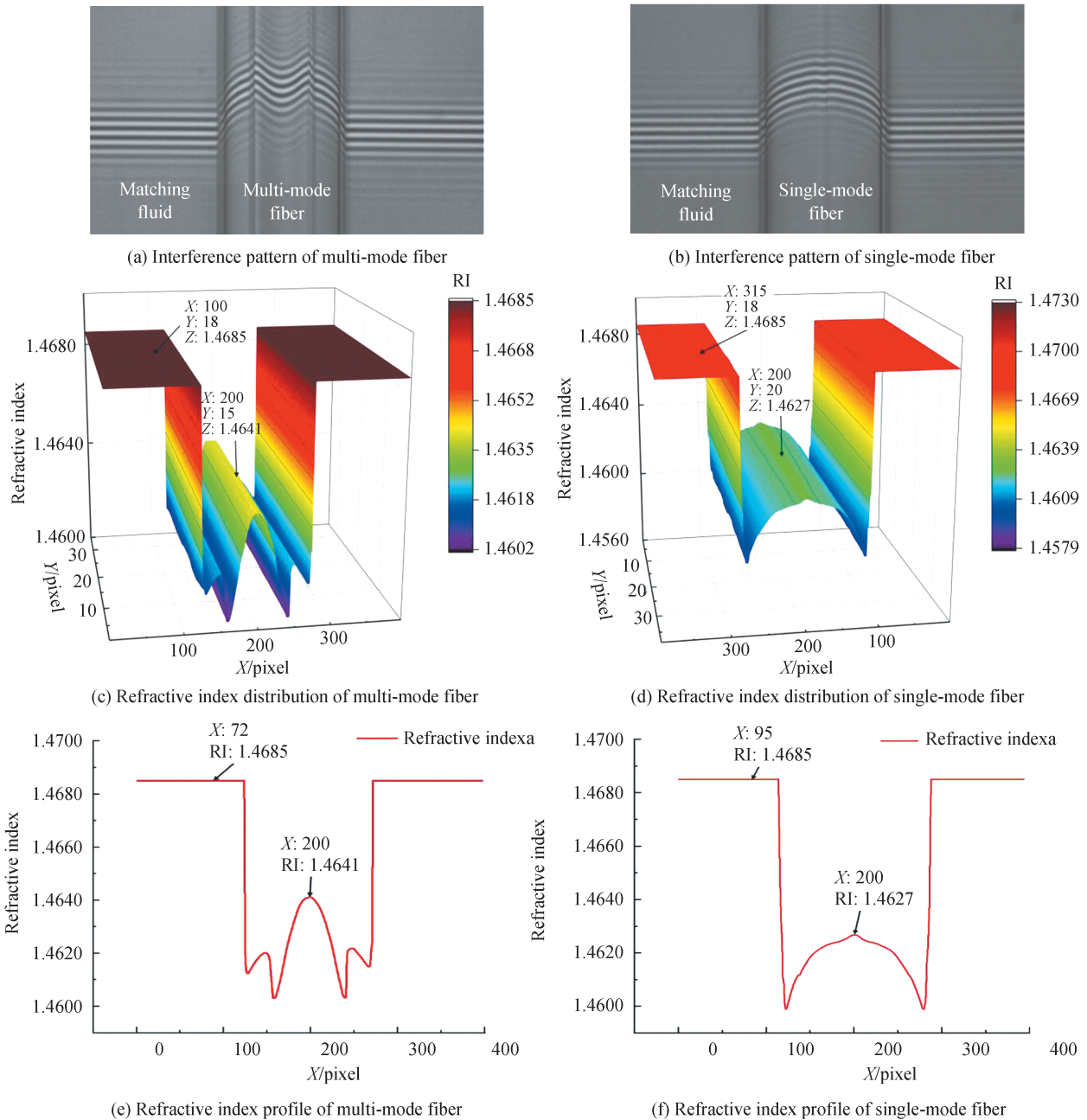


图 4 实验结果图

Fig.4 Experimental result diagram

进一步对光纤纤芯的数据进行拟合,采用典型的光纤折射率分布函数作为评价函数,如式(8)所示,其中 a 为纤芯半径, n_1 为纤芯的折射率, r 为距离纤芯的距离, Δ 为相对折射率差。

$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad 0 \leq r \leq a \quad (8)$$

拟合的结果如图5所示,获得的的多模光纤纤芯的方程为

$$n^2(r) = 1.4642^2 \left[1 - 5.1539 \times 10^{-3} \left(\frac{r}{37.5} \right)^2 \right] \quad 0 \leq |r| \leq 37.5 \quad (9)$$

获得的单模光纤纤芯的方程为

$$n^2(r) = 1.4625^2 \left[1 - 0.1108 \times 10^{-3} \left(\frac{r}{6.6} \right)^2 \right] \quad 0 \leq |r| \leq 6.6 \quad (10)$$

拟合的决定系数分别为 0.997 2 和 0.996 4。

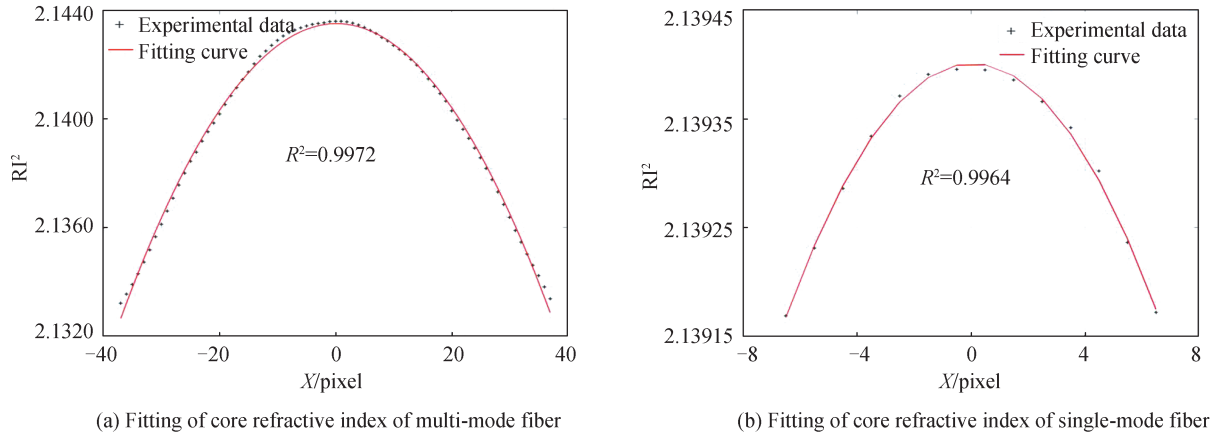


图5 光纤纤芯折射率拟合曲线
Fig5 Fitting curve of refractive index of fiber core

单模光纤为康宁公司生产的 SMF-28+ULL 型号的超低损耗光纤,该光纤纤芯采用纯硅技术^[16],纤芯中没有掺杂,即为纯 SiO₂,纯硅光纤减少了由于瑞利散射导致的衰减从而降低光纤损耗。查询文献可知^[17],在使用光源的中心波长 λ₀=500 nm 时,石英玻璃的折射率为 1.462 33,本实验测出的单模光纤的纤芯折射率为 1.462 5,误差为 0.01%,表明了系统测量的精确性较高。

4 结论

本文提出了一种基于白光扫描干涉仪的横向测量光纤折射率分布的方法,通过在反射镜上构造与测量样品的相似结构来增大白光干涉条纹的对比度,提高成像质量。采用 Morlet 小波变换法对获得的干涉图进行处理,获得了光纤相对于匹配液的相对高度的三维轮廓图,由已知折射率的匹配液求出光纤的折射率分布,并将获得的纤芯折射率曲线采用光纤经典折射率分布的公式进行拟合,拟合的决定系数均为 0.996 以上。将测得的单模光纤折射率与官方参数进行对比,得到的测量误差为 0.01%,表明了该方法的精确性。

参考文献

- [1] GOELL J E, KAO C K. Communication applications of optical Fibers [C]. Fibers & Integrated Optics. International Society for Optics and Photonics, 1976.
- [2] HU Xianzhi, YANG Bo, LIAO Boxun. Types evolution and properties analysis of multi-mode optical fibers[J]. Optical Communication Technology, 2019,43(4):29-33.
胡先志,杨博,廖伯勋.多模光纤的类型演进和性能特点分析[J].光通信技术,2019,43(4):29-33.
- [3] TEARNEY G J, BOPPART S A, BOUMA B E, et al. Scanning single-mode fiber optic catheter-endoscope for optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 1996, 21(7):543-545.
- [4] GIALLORENZI T G, BUCARO J A, DANDRIDGE A. Optical fiber sensor technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1982, 30(4):472-511.
- [5] HAO Aihua, GAO Yingjun, RUAN Chi, et al. Automatically profiling refractive index of a large sample by using reflection method [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(7):856-859.

- 郝爱花, 高应俊, 阮驰, 等. 用反射法自动测量大尺寸样品的折射率分布[J]. 光子学报, 2003, 32(7):856-859.
- [6] WHITE K I. Practical application of the refracted near-field technique for the measurement of optical fibre refractive index profiles[J]. Optical & Quantum Electronics, 1979, 11(2):185-196.
- [7] AMPEM LASSEN E, HUNTINGTON S 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.
- [8] PRESBY H M, MAMMEL W, DEROSIER R M. Refractive index profiling of graded index optical fibers[J]. Review of Scientific Instruments, 1976, 47(3):348-352.
- [9] PRESBY H M, MARCUSE D, ASTLE H W. Automatic refractive-index profiling of optical fibers[J]. Applied Optics, 1978, 17(14):2209-2214.
- [10] BOGGS L M, PRESBY H M, MARCUSE D. Rapid automatic index profiling of whole-fiber samples: part I[J]. Bell System Technical Journal, 2013, 58(4):867-882.
- [11] PRESBY H M, MARCUSE D, ASTLE H W, et al. Rapid automatic index profiling of whole-fiber samples: part II[J]. Bell System Technical Journal, 1979, 58(4):883-902.
- [12] 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.
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.
- [13] LEHMANN P. Vertical scanning white-light interference microscopy on curved microstructures[J]. Optics Letters, 2010, 35(11):1768.
- [14] XIA Mengrou, WU Rongyao, ZHAN Wei, et al. Measuring the refractive index and its two-dimensional distribution of picoliter microfluidics with the Scanning White Light Interference microscopy method[J]. IEEE Access, 2020, 8:190553-190558.
- [15] STEWART W J. A new technique for measuring the refractive index profiles of graded optical fibers[J]. Tech Dig Iooc, 1977, 395-398.
- [16] CHEN Hao, QI Shaofeng, ZHOU Xiaodong. Introduction of ultra-low loss fiber technology and its application[J]. OE Product & News, 2012, 3(6):23-24.
陈皓, 祁劭峰, 周晓栋. 超低损耗光纤技术及其应用介绍[J]. 光电产品与资讯, 2012, 3(6):23-24.
- [17] 王玉芬, 刘连城. 石英玻璃[M]. 化学工业出版社, 2007.