

基于数字全息图的光纤折射率测量研究

谷婷婷 黄素娟 闫成 缪庄 常征 王廷云

Refractive index measurement research for optical fiber based on digital hologram

Gu Ting-Ting Huang Su-Juan Yan Cheng Miao Zhuang Chang Zheng Wang Ting-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 064204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.064204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I6>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

数字全息术测定涡旋光束拓扑电荷数

[Measuring topology charge of vortex beam using digital holography](#)

物理学报.2014, 63(24): 244202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244202>

像面数字全息的重建相位误差分析和改善

[Analysis and improvement of reconstruction phase error in the image plane digital holography](#)

物理学报.2014, 63(24): 244201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244201>

基于涡旋光照明的暗场数字全息显微方法研究

[Dark-field digital holographic microscopy by using vortex beam illumination](#)

物理学报.2014, 63(22): 224202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224202>

基于多角度无透镜傅里叶变换数字全息的散斑噪声抑制成像研究

[Research on speckle denoising by lensless Fourier transform holographic imaging with angular diversity](#)

物理学报.2014, 63(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154205>

双Lloyd镜数字全息显微测量术

[Digital holographic microscope employing dual-Lloyd's mirror](#)

物理学报.2014, 63(10): 104207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104207>

# 基于数字全息图的光纤折射率测量研究\*

谷婷婷 黄素娟<sup>†</sup> 闫成 缪庄 常征 王廷云

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

(2014年9月1日收到; 2014年9月18日收到修改稿)

利用数字全息显微层析技术构建了光纤折射率测量的测试系统, 包括光路系统与软件系统. 以物光波的相位分布曲线为依据由 CCD 记录最优的数字全息图; 在优化频谱图的基础之上对全息图做频域滤波, 准确选取物光波所对应的频谱范围; 使用基于角谱理论的再现算法提取出物光波的相位分布信息, 并通过模拟全息图验证相位提取的准确性; 由单幅全息图提取的相位分布信息, 结合光纤的多层模型, 还原出光纤断面沿直径方向的折射率分布. 以单模、多模光纤为实验样品进行了测量, 测量结果与 S14 折射率测量仪的测量结果吻合, 精度可达  $10^{-4}$ . 实验对比结果表明本文方法可简单、快速、准确地测量光纤内部的折射率. 本文还对特种光纤的折射率进行了测量研究.

**关键词:** 数字全息, 相位分布, 光纤折射率分布, 特种光纤

**PACS:** 42.40.-i, 42.30.Rx, 42.81.cn, 42.81.-i

**DOI:** 10.7498/aps.64.064204

## 1 引言

光纤作为光纤通信的传输媒介, 随着光纤通信的迅速发展而得到了广泛的应用. 光纤内部的折射率分布是影响光纤带宽、损耗和色散等光学特性的关键因素, 光纤折射率分布成为衡量光纤性能好坏的最为关键因素<sup>[1,2]</sup>. 因此, 如何准确可靠地检测出光纤内部的折射率分布, 一直是光纤性能和检测的研究热点. 基于不同的原理有各种不同的光纤折射率测量方法, 现有的测量方法主要有折射近场法<sup>[3,4]</sup>、原子力蚀刻法<sup>[5]</sup>、聚焦法<sup>[6,7]</sup>和全息测量法<sup>[8,9]</sup>. 折射近场法与原子力蚀刻法都需要对光纤进行横向切断, 且对环境要求高、设备复杂、测量速度慢; 聚焦法虽然无需切断光纤, 但是它对光源的照明均匀性及稳定性要求很高, 从而制约了该方法的应用.

数字全息显微层析成像技术是数字全息显微成像技术与计算机断层扫描技术相结合的产物, 是

近年提出的一种测量样品三维折射率的新技术, 并因其可以快速、非接触以及无损地获取被测样品内部的折射率分布而得到高度关注. 该技术利用数字全息显微技术获得不同角度下样品的数字全息图, 从而重建出样品的断层折射率分布. 国外在数字全息显微层析成像技术方面主要研究生物组织三维折射率重建<sup>[10,11]</sup>、光纤折射率测量<sup>[8,9]</sup>或与折射率相关的物理量测量及重建误差分析<sup>[12]</sup>等. 国内在该领域也取得了一定的成果, 周文静等<sup>[13]</sup>以相位光栅为实验对象, 开展了相位物体三维显微结构信息的再现研究, 提出了少量投影数字全息层析三维折射率重建技术, 并通过理论与实验改进提出了三视角数字全息层析重建光纤折射率<sup>[14,15]</sup>. Pan 等<sup>[16]</sup>对单模光纤的折射率进行了测量, 采用由单幅全息图获取的物光波复振幅信息来模拟不同角度下的投影数据, 基于傅里叶衍射算法重建出光纤三维折射率, 并由此计算出光纤的半径. 邓丽军等<sup>[17]</sup>也对光纤折射率三维分布的重构进行了研究, 它由单个角度提取的相位分布信息, 利用傅里

\* 国家自然科学基金(批准号: 61178088, 61475098)、上海市科技创新行动计划(批准号 14511100100)和上海市科委科研项目(批准号: 14440500100)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: sjhuang@shu.edu.cn

叶变换投影算法重构出光纤折射率的断层分布. 文献 [18, 19] 通过记录光纤多个角度的全息图, 实现了光纤内部折射率的三维测定.

本文基于数字全息显微层析技术构建了光纤折射率测量的光路系统与软件系统. 可通过软件系统实时观测物光波的相位分布, 并以相位分布曲线为依据由 CCD 记录最优的数字全息图. 基于全息图的优化频谱图, 准确确定物光波对应的频谱范围. 用基于角谱理论 [20] 的数值再现法再现出物光波的相位分布信息, 还原出光纤断层面上沿直径方向的折射率分布. 以单模、多模光纤为试验样品进行了测量, 测量结果与 S14 折射率测量仪器的测量结果符合. 通过实验结果对比验证了本文所提方法在光纤折射率测量上的精度可达  $10^{-4}$ . 针对普通单模、多模光纤的圆柱对称分布特点, 由单幅全息图对光纤内部三维折射率分布进行了重建. 本文还对特种光纤的折射率进行了测量研究.

## 2 理论分析

### 2.1 基于数字全息显微层析成像技术的光纤折射率测量基本原理

数字全息显微成像技术是根据数字全息的成像原理发展出的一种新的显微成像技术, 该技术利用显微物镜将物光波放大, 并将此放大的物光波与参考光在 CCD 面上干涉形成显微全息图. 由传统的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线在所经路径积分的结果, 如下式所述 [18]:

$$\varphi(x_i, y_i) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_l [n(x, y) - n_0] dl, \quad (1)$$

式中  $n(x, y)$  是样品的折射率分布,  $n_0$  是周围介质的折射率,  $l$  是通过样品的几何路径,  $\lambda$  是光波波长. 因此, 为了获得光纤内部的折射率分布, 需要将

数字全息显微成像技术与光纤内部的具体结构相结合.

本文所研究的单模与多模光纤均为圆柱对称型结构, 因此采用如图 1 所示的多层模型 [8,9] 模拟光在光纤中的传播路径. 该模型将光纤分成  $N$  层以光纤中心为中心的等厚度的同心圆环, 假定每一层折射率相同, 不同层的折射率不同, 但是每层之间折射率变化很小. 每层的折射率对应  $n_i$ , 从外往里  $i = 1 \rightarrow N$ , 光纤半径为  $R$ , 每层厚度为  $\Delta d = R/N$ . 如果将光纤放置在折射率为  $n_0$  的匹配液中, 那么光线在液体与包层间将会发生折射. 若选取的匹配液的折射率  $n_0$  与包层折射率相近, 那么可将这种折射忽略. 由于光纤内部折射率的变化很小, 可近似认为光在光纤内部是沿直线传播的. 任意一束穿过光纤的光线距离光纤中心轴线的距离为  $d_i$ , 光线经过光纤的  $Q$  层后产生的光程 (光纤样品的折射率与光线所经路径积分) 为  $h_Q$ , 通过数学推导可得折射率  $n_i$ , 光程  $h_Q$ , 半径  $R$  以及层数  $N$  之间的关系 [21]:

$$d_i = (N - i - 0.5)\Delta d, \quad (2)$$

$$h_Q = \sum_{i=1}^{Q-1} 2n_i \left[ \sqrt{(R - (i - 1)\Delta d)^2 - d_Q^2} - \sqrt{(R - i\Delta d)^2 - d_Q^2} \right] + 2n_Q \left[ \sqrt{(R - (Q - 1)\Delta d)^2 - d_Q^2} \right]. \quad (3)$$

定义如下矩阵,

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \dots \\ n_N \end{bmatrix}, \mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \dots \\ h_N \end{bmatrix}, \boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \dots \\ \varphi_N \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2\sqrt{R^2 - d_1^2} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 2[\sqrt{R^2 - d_2^2} - \sqrt{(R - \Delta d)^2 - d_2^2}] & 2\sqrt{(R - \Delta d)^2 - d_2^2} & 0 & \dots & 0 \\ 2[\sqrt{R^2 - d_3^2} - \sqrt{(R - \Delta d)^2 - d_3^2}] & 2[\sqrt{(R - \Delta d)^2 - d_3^2} - \sqrt{(R - 2\Delta d)^2 - d_3^2}] & 2\sqrt{(R - 2\Delta d)^2 - d_3^2} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 2[\sqrt{R^2 - d_N^2} - \sqrt{(R - \Delta d)^2 - d_N^2}] & 2[\sqrt{(R - \Delta d)^2 - d_N^2} - \sqrt{(R - 2\Delta d)^2 - d_N^2}] & 2[\sqrt{(R - 2\Delta d)^2 - d_N^2} - \sqrt{(R - 3\Delta d)^2 - d_N^2}] & \dots & \dots & 2\sqrt{[R - (N - 1)\Delta d]^2 - d_N^2} \end{bmatrix}.$$

由(1)和(3)式可得,

$$\mathbf{h} = \boldsymbol{\varphi} \cdot [\lambda / (2\pi)], \quad (4)$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{M} \cdot (\mathbf{n} - n_0), \quad (5)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{h} + n_0, \quad (6)$$

式中  $\boldsymbol{\varphi}$  为物光波的相位分布矩阵,  $\mathbf{M}$  为系数矩阵. 在  $N$ ,  $\boldsymbol{\varphi}$  与  $R$  确定的情况下, 由(6)式便可计算出光纤的折射率分布. 由于单模、多模光纤的圆柱对称结构, 它在不同角度的折射率分布可近似认为相同, 因此, 由单幅数字全息图提取出物光波的相位分布, 并与光纤的多层模型相结合, 便可获得光纤断层面的二维折射率分布.

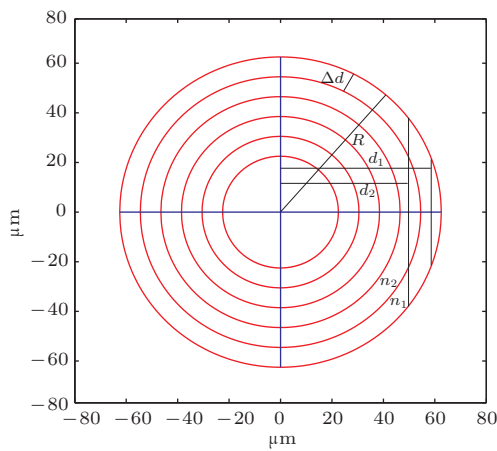


图1 光纤多层模型

## 2.2 数字全息图相位分布提取的基本原理

由上述内容可知, 要得到光纤折射率的分布, 准确地从实验所记录的数字全息图中提取出相位分布图是非常重要的. 相位提取的过程为: 首先采用数字图像处理技术对数字全息图进行频域滤波等预处理, 以消除零级项与共轭项; 然后用基于基尔霍夫理论的衍射积分公式, 数值再现出物光波的

复振幅分布. 常见的数值再现方法有菲涅尔再现法、角谱再现法和卷积再现法<sup>[22]</sup>, 本文采用角谱法进行数值再现, 实验中准确记录全息图的记录距离, 再现时使再现距离等于记录距离, 以实现物光波的准确再现. 由再现的物光波可提取出物光波的振幅与相位分布:

$$I(x_i, y_i) = |U(x_i, y_i)|^2, \quad (7)$$

$$\varphi(x_i, y_i) = \arctan \left[ \frac{\text{Im}U(x_i, y_i)}{\text{Re}U(x_i, y_i)} \right], \quad (8)$$

式中  $U(x_i, y_i)$  为再现物光波的复振幅,  $\varphi(x_i, y_i)$  为所提取出的相位分布. 但是由(8)式所获得的相位只在  $(-\pi, \pi)$  区间取值, 因此需要对其进行解包裹处理, 才能获得真实的相位分布.

## 3 实验装置与相位分布信息提取

### 3.1 实验装置

本文采用基于马赫-曾德尔的透射式数字全息成像系统, 光路系统原理图如图2示.

MSL-FN-532 nm 绿光单纵模激光器(激光波长为 532 nm, 输出功率为 50 mW)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. 两束光经分光镜2合束在 CCD(分辨率为  $2452 \times 2054$ , 像元尺寸为  $3.25 \mu\text{m} \times 3.25 \mu\text{m}$ ) 感光界面上发生干涉, 形成全息图. 两个连续衰减片用来调节物光波与参考光波的强度, 以获得最清晰的数字全息图. 实验中调节分光镜 BS2 可以调节物光波与参考光波的角度, 实现离

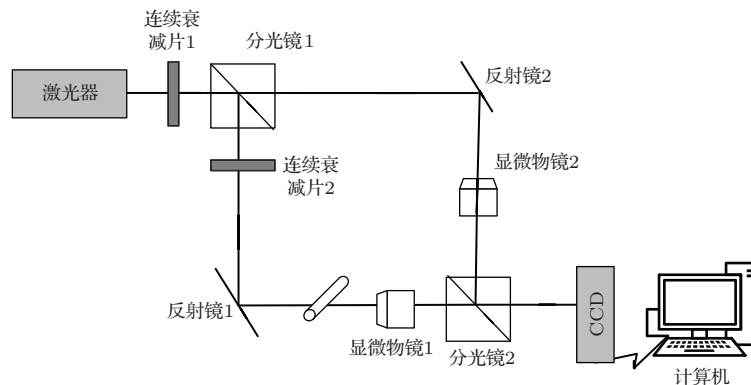


图2 光路系统原理图

轴全息图的记录. 干涉图经图像采集卡记录, 并在计算机中保存数字全息图. 由于光纤的结构是对称型圆柱, 因此为了防止其产生柱面透镜效应, 发生散光, 本实验将光纤放入一个装有匹配液的光谱比色皿中, 比色皿正交于光轴放置. 为了尽量保证光线水平射入光纤, 匹配液的折射率与光纤包层的折射率越接近越好. 本文所用的匹配液是折射率为 1.4640 的甘油与等离子水的混合溶液.

在折射率的测量过程中, 单幅相位图的质量好坏对折射率的测量精度影响很大, 而在获取数字全息图的实验装置中, 任何元件都不可避免地产生附加相位, 因此相位校正是必不可少的. 本文分别记录加入样品前后的全息图, 重构出这两幅全息图的相位分布, 并利用其相位分布相减的方法来消除附加相位<sup>[23]</sup>.

为了记录最优的数字全息图, 本文通过软件系统对数字全息图包含的物光波的相位信息进行实时观测. 软件系统通过对 CCD 记录的全息图进行

实时的数字图像处理, 提取出物光波的相位分布信息. 实验中, 当调节试验系统中的任一元件, 相位分布都会发生相应的变化. 从相位分布可以判断两个显微物镜与分光镜 BS2 的距离是否相等、光纤的放置是否恰当(包括光纤水平放置、与显微物镜的距离)、物光波与参考光波夹角是否适中等细节信息. 以此为依据做相应的调节, 从而确保记录下最优的数字全息图. 图 3 为软件调节过程中的相位分布: (a) 为单模光纤的相位分布曲线, (b) 为多模光纤的相位分布曲线. 当相位分布曲线呈现左右对称且无倾斜现象时则表明: 光纤, 显微物镜等元件均放置得当, 此时可记录最优数字全息图.

以上述相位分布为依据记录加入光纤样品前后的最优数字全息图, 如图 4 所示. 图 4(a), (b) 分别为单模光纤加入样品前后的数字全息图; 图 4(c), (d) 分别为多模光纤加入样品前后的数字全息图.

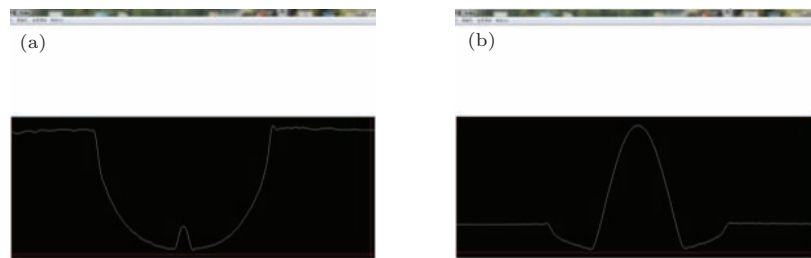


图 3 软件记录相位分布曲线 (a) 单模光纤相位分布曲线; (b) 多模光纤相位分布曲线

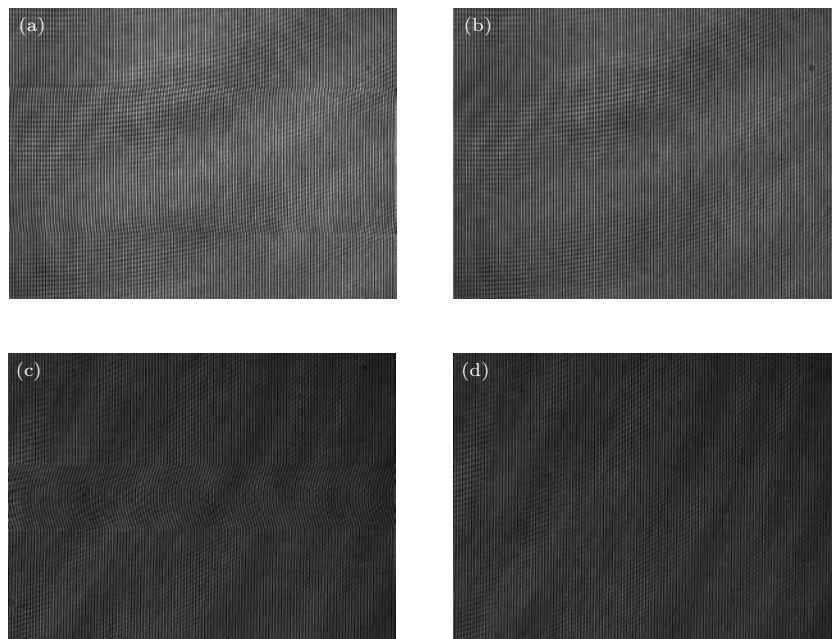


图 4 实验全息图 (a), (b) 单模光纤加入样品前后的数字全息图; (c), (d) 多模光纤加入样品前后的数字全息图

### 3.2 数字全息图相位分布的提取

以单模光纤为例来说明数字全息图相位分布的提取, 对图 4(a), (b) 两幅全息图分别进行频域滤波处理, 即将全息图做傅里叶变换得到其频谱图; 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; 利用基于角谱理论的角谱法分别对滤波后的复振幅分布进行数值再现, 获得两幅数字全息图各自包含的相位分布信息, 对所得的相位分布做相位解包裹处理后再相减得到物光波的相位分布. 其中频谱的选取正确与否对再现的相位分布影响很大, 从而

影响最终的折射率分布. 本文通过对全息图的傅里叶频谱图进行处理获得优化频谱图, 该优化频谱图可比较明显地显示出加入光纤样品前后的两张全息图频谱的不同之处, 因此可准确地确定频谱的选择范围. 图 5(a), (b) 分别为图 4(a), (b) 全息图的部分频谱图, (a) 中矩形框内为通过比较选择的区域.

由单幅数字全息图, 通过上述的频域滤波、角谱法数值再现、相位解包裹以及相位相减处理后得到的单模光纤与多模光纤的相位分布如图 6 所示. 图 6(a), (c) 分别为单模与多模光纤样品的解包裹二维相位分布; 图 6(b), (d) 为图 6(a), (c) 的三维显示.

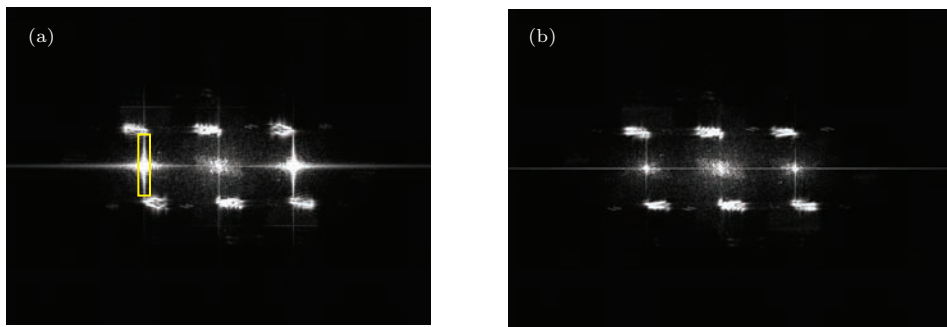


图 5 (网刊彩色) 全息图的频谱 (a) 有光纤样品全息图频谱; (b) 无光纤样品全息图频谱

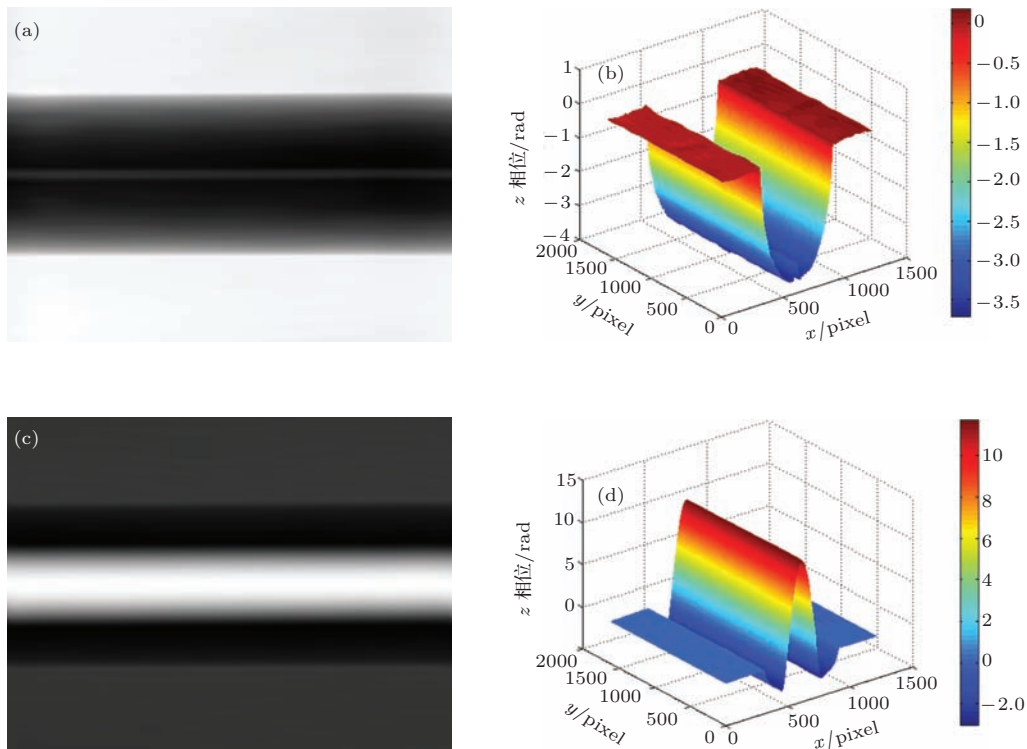


图 6 (网刊彩色) 相位分布 (a) 单模光纤解包裹相位分布; (b) 为 (a) 图的三维显示; (c) 多模光纤解包裹相位分布图; (d) 为 (c) 图的三维显示;

### 3.3 相位信息的模拟验证

物光波相位信息提取的精度对所得光纤折射率精度的影响很大. 为了验证相位提取算法的准确性, 本文通过软件编程的方法得到加入光纤样本前后的模拟全息图, 使用本文算法处理此模拟全息图提取出其相位分布信息, 并与已知相位分布信息进行了对比. 全息图的模拟过程为: 基于光纤的多层模型并在假定光纤折射率已知的情况下, 编程模拟光线在光纤中的传播路径, 得到光线经过光纤后的相位变化; 由于全息图既包含振幅信息又包含相位信息, 而本文方法主要是从全息图中提取物光波的相位信息, 因此, 由此相位信息模拟了放置光纤样本前后的全息图, 如图7所示.

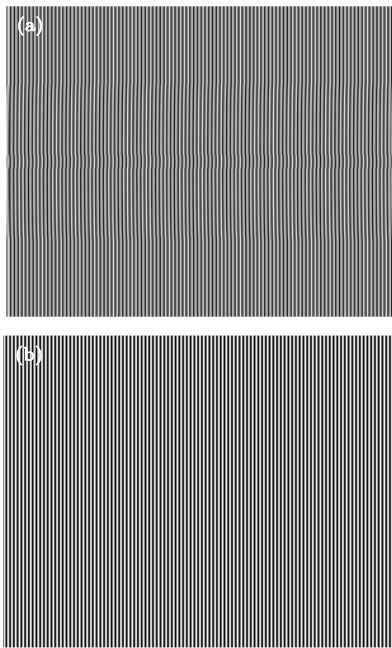


图7 模拟全息图 (a) 有光纤样品全息图; (b) 无光纤样品全息图

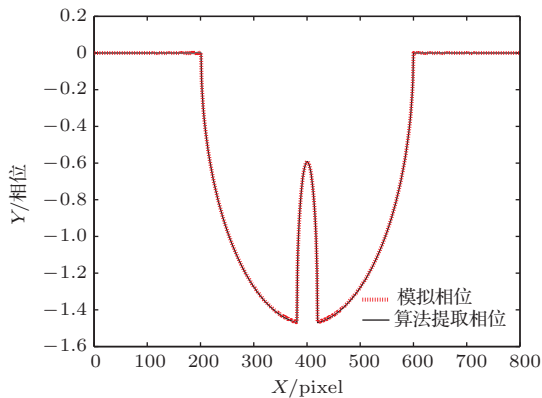


图8 模拟相位与算法提取相位对比

图7中所模拟的光纤由包层与纤芯两部分组成, 光纤直径为  $125\ \mu\text{m}$ , 其中纤芯部分占十分之一. 包层折射率为 1.4640, 纤芯部分的折射率为 1.470. 图8所示为理论模拟的相位分布与采用本文算法对模拟的光纤全息图处理所得的相位分布. 对比结果显示算法提取的相位分布与理论模拟的结果非常符合, 误差在  $10^{-3}$  rad 级别. 由此可知本文算法对于相位分布的提取是精确的.

## 4 折射率测量结果及S14对比结果

### 4.1 单模、多模光纤折射率测量结果

采用本文方法对单模与多模光纤的折射率分布进行了测量. 由图6所示的相位分布信息可以看出, 相位分布在纵向(沿光纤中心轴方向)是分布均匀的, 由于折射率的分布取决于相位分布, 因此光纤在纵向的折射率分布也是均匀的. 以图6(a)解包裹相位中的任一列相位分布结合上述光纤多层模型, 由(4)式和(6)式得到光纤断层面上沿直径方向的折射率分布, 如图9(a)所示. 同理, 以图6(c)解包裹相位的任一列相位分布曲线可得如图9(b)所示的多模光纤沿光纤断层面直径方向的折射率分布.

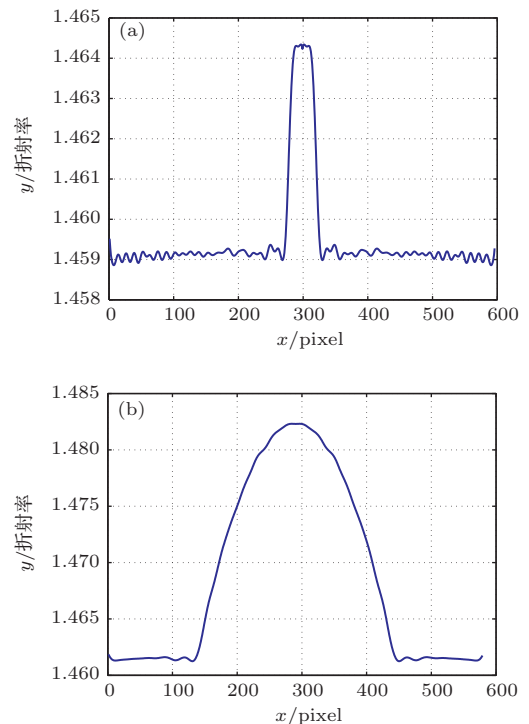


图9 折射率测量结果 (a) 单模光纤沿断面直径方向的折射率分布; (b) 多模光纤沿断面直径方向的折射率分布

### 4.2 与S14测量结果对比

使用 Photon Kinetics Ink 的 S14 Refractive Index Profiler 对上述单模与多模光纤样品的折射率进行了测量. S14 折射率测量仪基于的原理为目前国际上最成熟可靠的光纤折射率测量方法——折射近场法, 使用此仪器可以获得光纤样本横截面的折射率分布和沿横截面直径方向的折射率分布.

本文方法的光纤折射率测量结果与 S14 测量结果的对比如图 10 所示. 图 10 (a), (d) 分别为 S14 测量的单模、多模光纤样品横截面上的折射率分布; 图 10 (b), (e) 分别为 S14 测量的单模、多模光纤样品横截面折射率图上沿直径方向的折射率分布; 图 10 (c), (f) 为本文方法测量得到的单模光纤与多

模光纤沿断面直径方向的折射率分布. 为了比对方便, 使用了相同的坐标尺度. 通过对比发现, 本文方法的测量结果与 S14 的测量结果符合: 本文所测单模光纤的纤芯与包层的折射率差值为 0.0052, 与 S14 的测量结果 0.0050 基本一致; 本文所测多模光纤的纤芯折射率最大值与包层的折射率差值为 0.0210, 与 S14 的测量结果 0.0209 基本一致.

S14 折射率测量仪虽然精度比较高, 但是具有一定的局限性: 首先它需要对待测光纤进行切断处理且对截面的要求很高, 每次只能测量一个截面的折射率分布; 其次它的测量速度慢; S14 的测量结果还具有不稳定性, 需要测量者熟练掌握操作步骤. 与 S14 相比, 本文方法可以同时测量一段光纤的折射率分布, 并且无需切断光纤, 操作简单, 速度也很快.

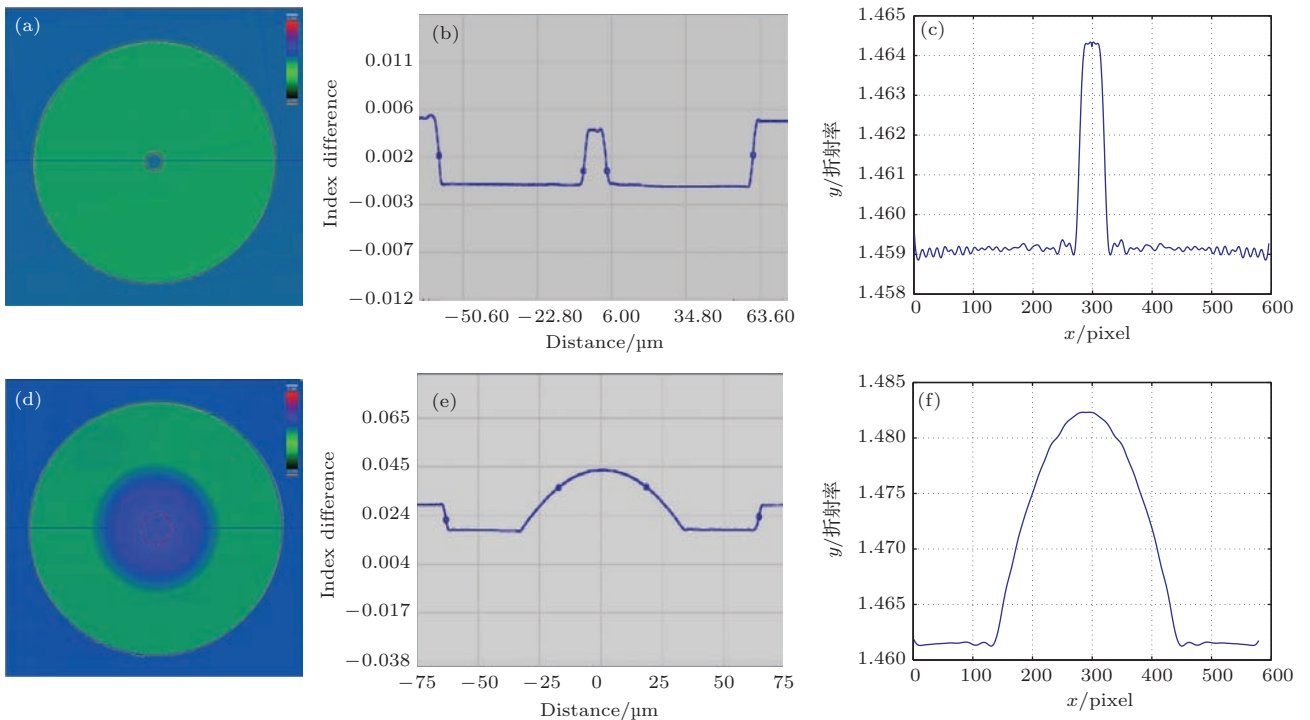


图 10 (网刊彩色) S14 测量结果与本文方法测量结果对比 (a) S14 测量单模光纤横截面折射率分布; (b) S14 测量单模光纤横截面沿直径方向的折射率分布曲线; (c) 本文方法测量的单模光纤沿断面直径方向的折射率分布; (e) S14 测量多模光纤横截面折射率分布; (d) S14 测量多模光纤横截面沿直径方向的折射率分布曲线; (f) 本文方法测量的多模光纤沿断面直径方向的折射率分布

### 4.3 三维折射率分布研究

由于标准单模与多模光纤的圆柱对称特点, 因此以图 9 (a) 所示的单模光纤单个角度断层面上沿直径方向的折射率分布作为光纤各角度直径方向上的折射率分布, 重建出单模光纤断层面上的二维

折射率分布, 进而得到其三维折射率分布. 同理, 以图 9 (b) 的折射率分布可得多模光纤断层面上的二维折射率分布与多模光纤三维折射率分布, 结果如图 11 所示. 图 11 (a), (c) 分别为单模光纤与多模光纤的断面折射率分布; 图 11 (b), (d) 分别为单模光纤与多模光纤 1/4 部分的三维折射率分布.



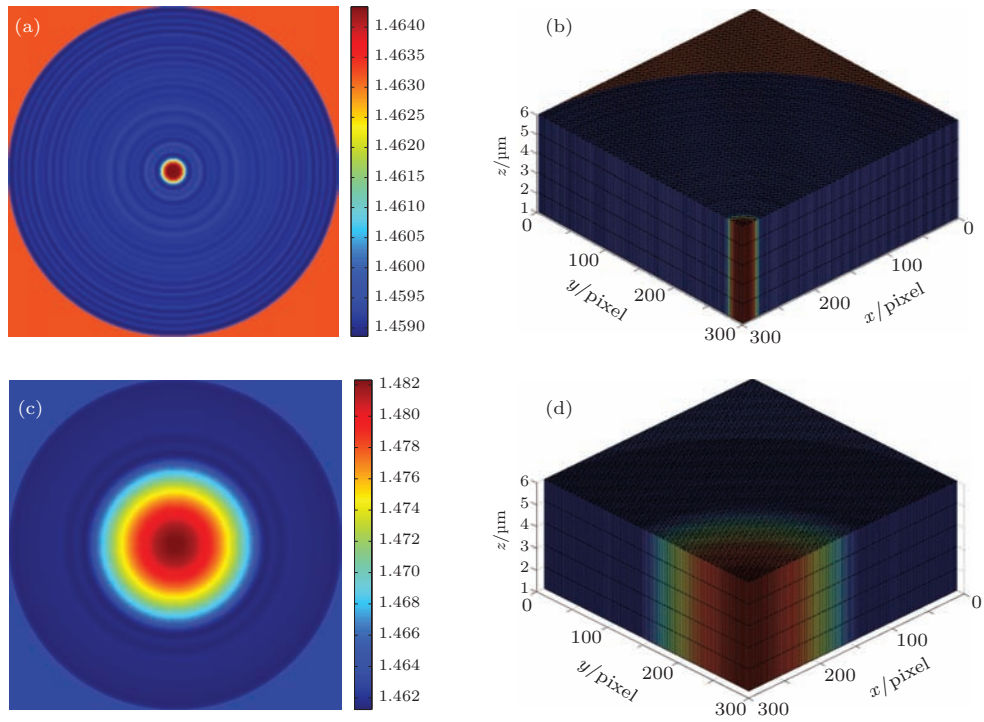


图 11 (网刊彩色) 三维折射率模拟结果 (a) 单模光纤断面折射率分布; (b) 单模光纤三维折射率分布; (c) 多模光纤断面折射率分布; (d) 多模光纤三维折射率分布

## 5 特种光纤折射率测量研究

我们对特种光纤的折射率分布进行了研究, 以上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验

室控制的某特种光纤为实验样品. 实验中采用的匹配液仍为折射率为 1.4640 的甘油与等离子水的混合溶液. 图 12 (a) 为实验所得样品光纤的数字全息图; 图 12 (b) 为采用本文方法测得的一段特种光纤

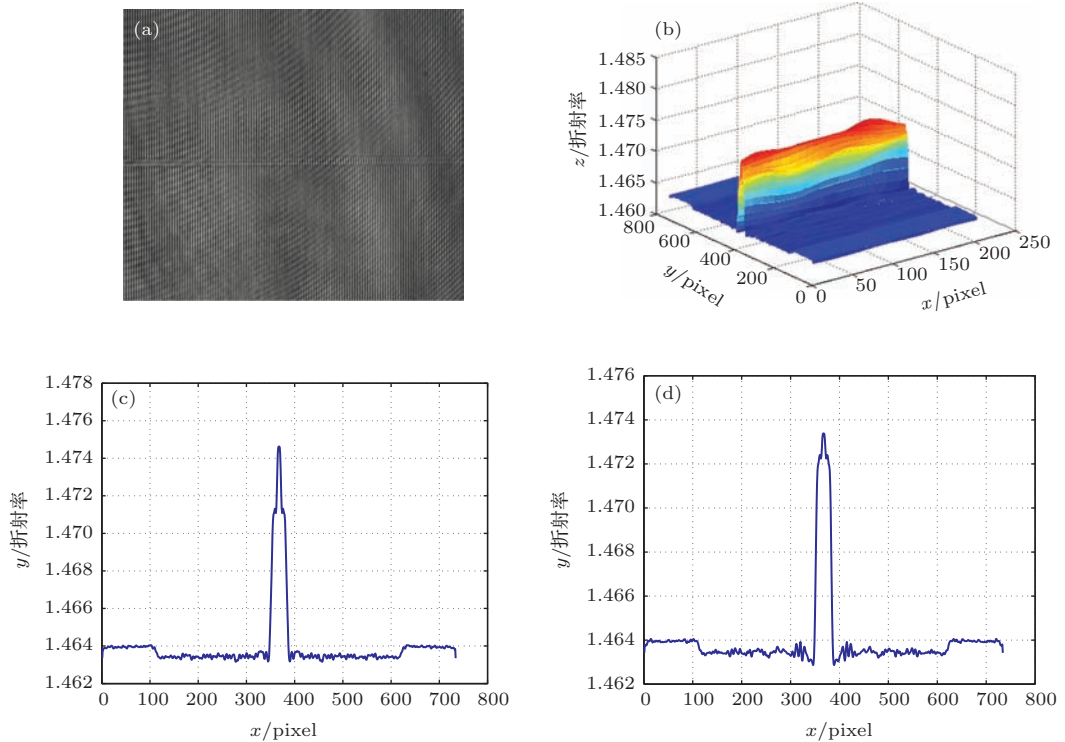


图 12 (网刊彩色) 特种光纤测量结果 (a) 样品光纤数字全息图; (b) 纵向三维折射率图; (c) 第 50 列折射率分布曲线; (d) 第 150 列折射率分布曲线

的纵向折射率三维分布,由图中的灰度分布可以看出,光纤在纵向的折射率分布是不均匀的;图12(c), (d)分别为对应(b)图中第50列与第150列的折射率分布曲线:(c)图中纤芯处折射率最大值为1.4743, (d)图中纤芯处折射率最大值为1.4727,二者分布存在明显不同.由此表明本文方法还可以用于检测光纤长度方向均匀性.

## 6 结 论

本文针对光纤内部折射率分布的检测,基于数字全息显微层析技术构建了光纤折射率测量的光路系统与软件系统.对实验系统所获取的最优全息图进行频域滤波,基于优化频谱图,准确地选择物光波所对应的频谱范围,再通过角谱法数值再现和相位解包裹等处理获得物光波的相位分布信息,结合光纤的多层模型,最终得到光纤内部折射率分布.以单模、多模为样品进行测量,与S14的测量结果对比表明本文方法可快速、准确地测量光纤内部的折射率分布,精度可达 $10^{-4}$ .基于标准光纤的圆柱对称结构,由单幅全息图得到的折射率分布对光纤的三维折射率进行了重建.本文方法还可用于检测光纤长度方向分布的均匀性.

## 参考文献

- [1] Kruhlak R J, Wong J S, Wardle D A, Harvey J D 2005 *Opt. Lett.* **30** 462
- [2] Dong H, Wu C Q 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 1312 (in Chinese) [董晖, 吴重庆 2002 光学学报 **22** 1312]
- [3] White K I 1979 *Opt. Quantum Electron.* **11** 185
- [4] Gisin N, Passy R, Perny B 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 1875
- [5] Huntington S T, Mulvaney P, Roberts A, Nugent K A, Bazyleenko M 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 2730
- [6] Marcuse D 1979 *Appl. Opt.* **18** 9
- [7] Saekeang C, Chu P L, Whitbread T W 1980 *Appl. Opt.* **19** 2025
- [8] Wahba H H, Kreis T 2009 *Appl. Opt.* **48** 1573
- [9] El-Din M A, Wahba H H 2011 *Opt. Commun.* **284** 3846
- [10] Charrière F, Marian A, Montfort F, Kuehn J, Colomb T, Cuche E, Depeursinge C 2006 *Opt. Lett.* **31** 178
- [11] Charrière F, Pavillon N, Colomb T, Depeursinge C, Heger T J, Mitchell E A, Rappaz B 2006 *Opt. Express* **14** 7005
- [12] Kou S S, Sheppard C J R 2008 *Opt. Lett.* **33** 2362
- [13] Zhou W J, Hu W T, Guo L, Xu Q S, Yu Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8499 (in Chinese) [周文静, 胡文涛, 郭路, 徐强胜, 于瀛洁 2010 物理学报 **59** 8499]
- [14] Han B, Zhou W J, Li H P, Yu Y J 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** s209001 (in Chinese) [韩冰, 周文静, 李海鹏, 于瀛洁 2013 光学学报 **33** s209001]
- [15] Zhou W J, Hu W T, Qu H, Zhu L, Yu J J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 164212 (in Chinese) [周文静, 胡文涛, 瞿惠, 朱亮, 于瀛洁 2012 物理学报 **61** 164212]
- [16] Pan Z L, Li S P, Zhong J G 2013 *Opt. Eng.* **52** 035801
- [17] Deng L J, Yang Y, Gai Q, Ma Z H, Wu Y L 2013 *J. Opt. Laser.* **24** 1774 (in Chinese) [邓丽军, 杨勇, 盖琦, 马忠洪, 吴永丽 2013 光电子 **24** 1774]
- [18] Su L L, Ma L H, Wang H, Li Y 2013 *Chin. J. Lasers* **40** 1008002 (in Chinese) [苏玲珑, 马利红, 王辉, 李勇 2013 中国激光 **40** 1008002]
- [19] Ma L H, Wang H, Jin H Z, Li Y 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0309002 (in Chinese) [马利红, 王辉, 金洪震, 李勇 2012 中国激光 **39** 0309002]
- [20] Li J C 2009 *Acta Opt. Sin.* **5** 1163 (in Chinese) [李俊昌 2009 光学学报 **5** 1163]
- [21] Dong X M, Liu Z Y, Chen Y L, Zheng Y J, Yin C Y, Xu Y X 2004 *Opt. Tech.* **30** 515 (in Chinese) [董小满, 柳忠尧, 陈永良, 郑颖君, 殷纯永, 徐毓娴 2004 光学技术 **30** 515]
- [22] Chen L P, Lü X X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 189
- [23] Ferraro P, de Nicola S, Finizio A, Coppola G, Grilli S, Magro C, Pierattini G 2003 *Appl. Opt.* **42** 1938

# Refractive index measurement research for optical fiber based on digital hologram\*

Gu Ting-Ting Huang Su-Juan<sup>†</sup> Yan Cheng Miao Zhuang Chang Zheng Wang Ting-Yun

(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

( Received 1 September 2014; revised manuscript received 18 September 2014 )

## Abstract

A test system including light path system and software system is built for measuring the refractive index of fiber by using the digital holographic tomography technology. Based on the phase distribution curve of object wave the optimal hologram is recorded. The spectral range corresponding to the object wave is selected accurately based on the optimization of the spectrum. The phase distribution information of object wave is extracted with the angular spectrum reconstruction. The accuracy of extracted phase information has been verified through the simulation holograms of optical fiber. Combined with the multilayers model of fiber, the refractive index distribution along the diameter direction of fiber tomogram is recovered from a single hologram. Single-mode and multi-mode optical fiber are tested as samples. The experiment results are consistent with the results of S14 refractive index profiler, the precision is  $10^{-4}$ . The compare result shows that our method is simple, fast and accurate for the measurement of the refractive index of fibers. We have also studied the measurement of the refractive index distribution of the special optical fiber.

**Keywords:** digital holographic, phase distribution, refractive index distribution of optical fiber, special optical fiber

**PACS:** 42.40.-i, 42.30.Rx, 42.81.cn, 42.81.-i

**DOI:** [10.7498/aps.64.064204](https://doi.org/10.7498/aps.64.064204)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178088, 61475098), Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan, China (Grant No. 14511100100), and the scientific research plan of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality, China (Grant No.14440500100).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [sjhuang@shu.edu.cn](mailto:sjhuang@shu.edu.cn)