

# 用相位恢复方法测量多孔光纤的三维折射率分布<sup>\*</sup>

黄燕萍<sup>†</sup> 祁春媛

(华东师范大学物理系, 光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

(2006 年 2 月 20 日收到, 2006 年 6 月 28 日收到修改稿)

结合计算机断层成像方法, 提出了一种新的相位恢复显微测量实验技术. 应用该技术测量了多孔光纤的三维折射率分布. 这种技术是基于强度传递方程的理论, 对相位的测量是直接的, 测量对光纤无损害. 这是一种测量多孔光纤的三维折射率分布的有效方法.

关键词: 断层法, 相位恢复, 显微测量, 多孔光纤

PACC: 4230, 4281C, 4225F

## 1. 引言

多孔光纤又称光子晶体光纤(PCF), 是基于光子晶体技术发展起来的新一代传输光纤<sup>[1-3]</sup>. 多孔光纤的横截面由非常微小的孔阵列组成, 类似于晶体中的晶格, 这些小孔是一些直径为光波长量级的毛细管, 平行延伸在光纤中. 多孔光纤和普通单模光纤相比有三个突出的优点: 第一, 多孔光纤可以在很大的频率范围内支持光的单模传输; 第二, 多孔光纤允许改变纤芯面积, 以削弱或加强光纤的非线性效应; 第三, 多孔光纤可灵活地设计色散和色散斜率, 提供宽带色散补偿, 并且可以把零色散波长的位置移到  $1 \mu\text{m}$  以下. 多孔光纤由于具备上述优异的潜在性能而受到广泛关注. 近年来, 人们从各个方面寻求开发应用多孔光纤的途径. 为此, 有必要对多孔光纤的折射率分布做充分的了解.

光纤的折射率分布是表征光纤传输特性的重要参数, 不少文献报道了光纤折射率分布的测量方法<sup>[4-8]</sup>. 如文献 [8] 的方法可用于测量多孔光纤的折射率分布. 它是用光聚焦的方法, 测量光束通过光纤横截面光程的变化, 获得折射率分布. 但这种方法要求有很高的光对准精度. 本文采用相位恢复的方法测量多孔光纤折射率分布.

恢复相位信息, 已发展了包括干涉仪法、泽尼克相位衬度法、衍射增强相衬法<sup>[9-12]</sup>等技术. 这些技术

都需要添置附加的光学元件, 对实验器件的精度和光源的相干性等要求很高. Nugent 等<sup>[13]</sup>报道了在光学显微镜中, 用非相干光获得物体相位分布的方法. 测量传统光纤的折射率分布. 此方法简单直接, 不损伤样品. 本文用强度传递方程的相位恢复方法, 结合计算机断层(CT)成像技术, 测量了多孔光纤的折射率分布.

## 2. 理论

用折射率与硅玻璃相匹配的液体填充到多孔光纤的小孔中, 可假设  $\Delta n(x, y, z)$  为多孔光纤的折射率分布, 如图 1 所示. 图 1(a) 为半径为  $R$  的光纤的横截面, 图 1(b) 为光纤的轴向剖面图. 设  $y$  轴沿光纤轴向,  $x$  轴沿光纤径向,  $z$  轴沿测量光束的传播方向. 光束传播方向垂直于光纤轴向.

光纤的相位可以用光场强度传递方程求解. 设光场沿  $z$  轴方向传播, 在近轴近似下, 通过光纤的光场强度和相位满足下列公式<sup>[14]</sup>:

$$\nabla_{\perp} \cdot (\mathcal{K}(x, y, z) \nabla_{\perp} \phi(x, y, z)) = -k \frac{\partial \mathcal{K}(x, y, z)}{\partial z}. \quad (1)$$

这里,  $k = 2\pi/\lambda$  是光场的波数,  $\lambda$  是光波波长;  $\mathcal{K}(x, y, z)$  和  $\phi(x, y, z)$  分别是光场的光强和相位,

$$\nabla_{\perp} = \frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y}$$

是垂直于  $z$  轴的梯度算符. 首先用分离变量法将变

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10405010)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yphuang@phy.ecnu.edu.cn

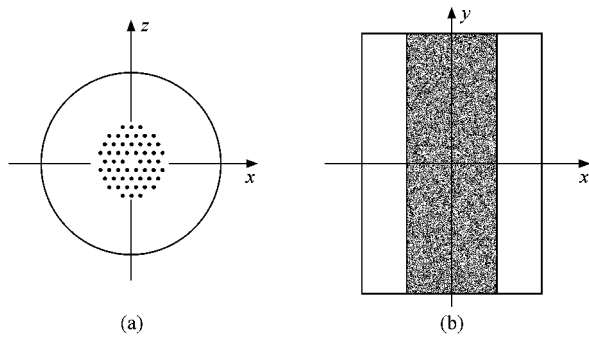


图1 多孔光纤的折射率分布. 深色表示匹配的液体折射率, 白色表示硅玻璃折射率. (a) 多孔光纤的截面图, (b) 多孔光纤的轴向剖面图

量  $x, y$  分开, 然后利用反拉普拉斯算符与傅里叶逆变换对应, 得到相位的梯度表示<sup>[15]</sup>, 即

$$\nabla_{\perp} \phi(x, y) = -\frac{ik}{K(x, y)} \left[ F^{-1} \left( \frac{k_x}{k_r^2} F \left( \frac{\partial K(x, y)}{\partial z} \right) \right) \hat{x} + F^{-1} \left( \frac{k_y}{k_r^2} F \left( \frac{\partial K(x, y)}{\partial z} \right) \right) \hat{y} \right]. \quad (2)$$

这里  $F$  和  $F^{-1}$  表示傅里叶变换和傅里叶逆变换,  $k_x$  和  $k_y$  是  $x$  和  $y$  的傅里叶共轭变量,

$$k_r^2 = k_x^2 + k_y^2.$$

我们测出焦面上的光强以及有适当离焦量的像面上的光强, 由(2)式就可以计算出通过光纤的光场的相位. 用(2)式计算时, 不会出现无穷循环迭代. 用这种方法可以精确地计算出光场通过样品产生的相位变化, 再由这个相位变化折算出样品的折射率分布.

多孔光纤可近似为轴对称, 利用阿贝逆变换, 由测出的相位分布可求出样品的折射率分布<sup>[16]</sup>

$$\Delta n(r, y) = -\frac{\lambda}{2\pi^2} \int_r^R \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} (x^2 - r^2)^{-1/2} dx. \quad (3)$$

这样得到的只是二维折射率分布, 要测量得到多孔光纤的三维折射率分布, 还必须应用 CT 成像技术.

CT 成像技术基本原理是中心截面定理: 在三维实空间中, 物体沿光束方向投影的傅里叶变换是该物体三维傅里叶变换后倒易空间的一个中心截面, 而且中心截面垂直于投影方向. 由于一般的相位物体满足弱相位近似的条件, 只要在成像时选择适当的欠焦距, 得到的显微图像即可直接表示样品中原子势场分布即原子密度分布的投影. 此投影的傅里叶变换就是样品三维空间密度分布的傅里叶变换在垂直于入射光束方向的中心截面. 如果能获得样品相对测量光束不同方向的显微像, 也就等于获得了

样品在其三维空间的傅里叶变换的各个方向的中心截面. 当所取的投影方向足够多时, 就可以将这些中心截面合并起来, 通过傅里叶逆变换获得实空间中样品的三维结构信息.

将有较大旋转角度的样品台安装在奥林巴斯显微镜工作台上, 对同一个样品每隔一定的角度间隔 (如  $1.8^\circ$ ) 拍一幅图形, 这样就得到了 100 幅代表同一结构在不同角度下的投影像, 然后对这一系列的投影校正后, 用加权背向投影的方法得到原来样品的结构. 用电荷耦合器件 (CCD) 相机进行实时拍摄后, 用交互式数据处理语言 (interactive data language, 简记为 IDL) 读取数据, 参照 Mark River 的 CT 程序, 编制断层成像处理软件, 对实验结果进行处理.

### 3. 实 验

实验光纤是 ASCO-01-BFa 型的多孔光纤, 由悉尼光纤技术研究所提供. 用涂料去除剂 (paint remover) 去除光纤的塑料保护层. 把它截成 2—3 cm 长, 浸泡在折射率匹配的溶液里, 使溶液均匀充满每个小孔. 对光纤作横向投影的是 BX-60 型奥林巴斯光学显微镜, 采用 40 倍 UPlanApo 型物镜, 数值孔径为 0.85, 并用 Kodak KAF1400 型 CCD CH250A 型照相机 (像素数为  $500 \times 500$ ) 对显微成像作同步测量. 实验装置框图如图 2.

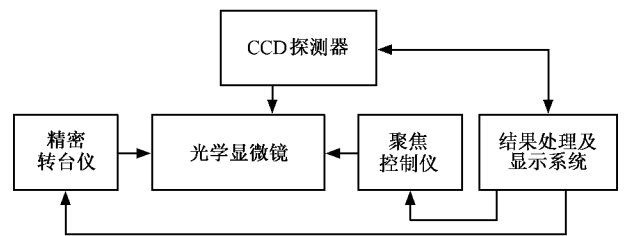


图2 实验装置框图

使用该实验系统, 每次测量得到聚焦像和两个正负离焦量为  $1.1 \mu\text{m}$  的离焦像, 用强度传递方程的理论可测得光纤的相位. 转动装置由步进马达控制, 每转过  $1.8^\circ$  成像一次. 在  $180^\circ$  内共获得 100 幅像面数据, 用 CT 技术编程, 对实验数据进行处理后即可获得多孔光纤的三维折射率分布.

### 4. 结果和讨论

图 3(a) 是光纤截面的显微成像, 显然我们的实

验结果显示的结构与实际结构是一致的. 该光纤有 54 个小孔, 均匀分布成正六边形, 其中截面上过中

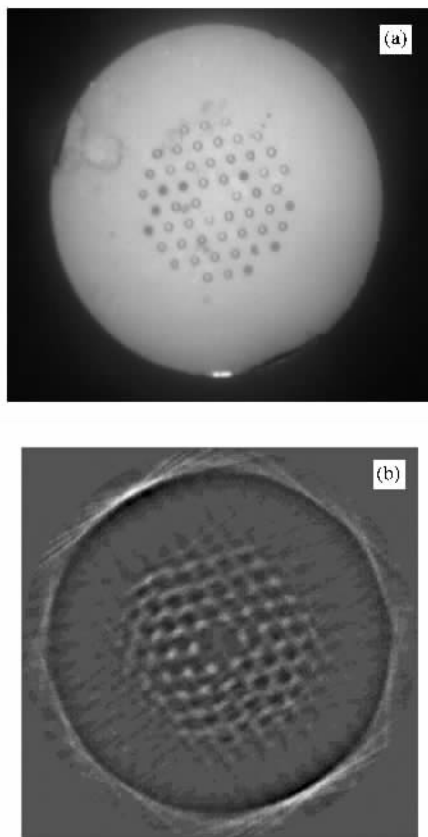


图3 多孔光纤的折射率分布 (a)多孔光纤截面成像图, (b)多孔光纤横截面上的折射率分布

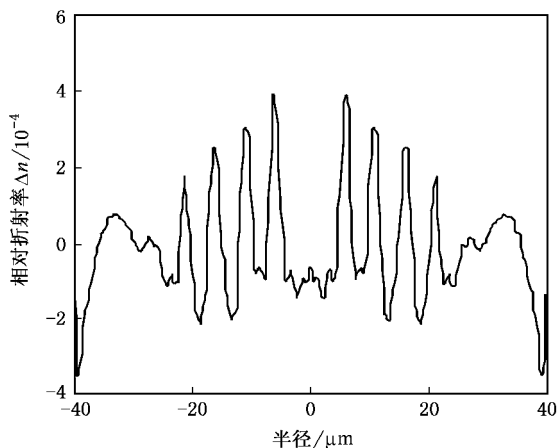


图4 多孔光纤截面上过中心一个方向的折射率分布

心一个方向的折射率分布如图 4 所示. 多孔光纤的几何尺寸如表 1 所示. 表 1 中,  $D$ ,  $D_1$  和  $D_0$  分别是光纤的外径、孔分布范围的直径和中心正六边形外接圆直径,  $\Delta$  是两孔间距离,  $2r_0$  是小孔直径.

表 1 多孔光纤的几何尺寸测量结果比较

	$D/\mu\text{m}$	$D_1/\mu\text{m}$	$D_0/\mu\text{m}$	$\Delta/\mu\text{m}$	$2r_0/\mu\text{m}$
测量结果	90.71	48.73	12.68	5.93	2.54
实际尺寸	107.61	50.70	13.52	6.76	2.45

这里所用的匹配液体的折射率在 521 nm 波长下为 1.4616, 而硅玻璃在该波长下的折射率为 1.4613, 两者非常接近, 所以光纤内部的结构能以最大的清晰度显示出来.

图 3 (b) 是多孔光纤三维折射率的截面分布. 实验结果表明, 该多孔光纤的折射率分布由均匀分布在四层同心圆上的 54 个小孔组成, 等效折射率差值在 0.00038—0.00041 之间. 四层孔的折射率数值略有不同, 这是因为它们离中心的距离不同而由 CT 成像方法造成的, 我们主要关心的是它们的相对值. 实验结果与理论计算的结果非常符合, 这证明用此方法可以比较精确地测定多孔光纤的三维折射率分布.

在我们的实验中, 采用部分相干光, 波长为 521 nm, 是非干涉法测量物体相位的方法. 这种方法对物体无损伤, 对物体相位测量又是直接的, 所以是一种测定多孔光纤三维折射率分布的有效方法.

CT 扫描成像技术的应用, 能够减小光束造成的样品漂移, 从而有效提高了信噪比. CCD 相机在光学显微镜上的应用, 使得实时拍摄图像、评估样品质量成为可能. 而实验室里所用的全自动物镜, 使物镜调节、样品寻找、图像记录都可通过计算机控制的光学显微镜自动进行, 从而能迅速获得大量高质量的样品显微图像. 近年来, 运算速度、存储能力、图形显示功能等迅猛发展的计算机系统, 大大提高了后期图像分析处理的效率.

作者黄燕萍在澳大利亚墨尔本大学物理系作访问学者期间, 得到 Keith A. Nugent 教授的热情指导和帮助, 在此表示衷心感谢.

- [ 1 ] Monro T M , Richardson D J 2003 *Comp. Rendus Phys.* **4** 74
- [ 2 ] Monro T M , Richardson D J , Broderick N G R *et al* 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 1093
- [ 3 ] Ren G B , Wang Z , Lou S Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 484  
[ 任国斌、王 智、娄淑琴等 2004 物理学报 **53** 484 ]
- [ 4 ] Chu P L 1977 *Electron. Lett.* **13** 736
- [ 5 ] Marcuse D 1979 *Appl. Opt.* **18** 9
- [ 6 ] Sasaki I , Payne D N , Adams M J 1980 *Electron. Lett.* **16** 219
- [ 7 ] White K I 1979 *Opt. Quantum Electron.* **11** 185
- [ 8 ] Zhao Y , Lyytikainen K , Eijkelenborg M A *et al* 2003 *Opt. Express* **11** 2474
- [ 9 ] Gao D C , Pogany A 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2368 ( in Chinese )  
[ 高大超、Pogany A 2000 物理学报 **49** 2368 ]
- [ 10 ] Huang W X , Yuan Q X , Tian Y L *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 677 ( in Chinese ) [ 黄万霞、袁清习、田玉莲等 2005 物理学报 **54** 677 ]
- [ 11 ] Shu H , Zhu P P , Wang J Y *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1099  
( in Chinese ) [ 舒 航、朱佩平、王 越等 2006 物理学报 **55** 1099 ]
- [ 12 ] Zhu P P , Wang J Y , Yuan Q X *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 58  
( in Chinese ) [ 朱佩平、王 越、袁清习等 2005 物理学报 **54** 58 ]
- [ 13 ] Barty A , Nugent K A , Roberts A *et al* 1998 *Opt. Lett.* **23** 817  
Paganin D , Nugent K A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 2586
- [ 14 ] Barrett H H , Swindell W 1981 *Radiological Imaging ( Vol 2 )* ( New York : Academic Press )
- [ 15 ] Barone-Nugent E D , Barty A , Nugent K A 2002 *J. Microsc.* **206** 194
- [ 16 ] Roberts A , Ampem-Lassen E , Barty A *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 2061

## Measurement of refractive index profile of holey fiber using quantitative phase tomography<sup>\*</sup>

Huang Yan-Ping<sup>†</sup> Qi Chun-Yuan

( *Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy of Ministry of Education ,  
Department of Physics , East China Normal University , Shanghai 200062 , China* )

( Received 20 February 2006 ; revised manuscript received 28 June 2006 )

### Abstract

A method to determine three-dimensional refractive index profile of holey fiber using a combination of quantitative phase microscopy and tomographic reconstruction techniques is described. Results show that the method based on the transport-of-intensity equation for phase retrieval is straightforward to measure phase profile , nondestructive to the measured fiber , and valuable to determine three-dimensional refractive index profile of holey fiber.

**Keywords :** tomography , quantitative phase retrieval , microscopy , holey fiber

**PACC :** 4230 , 4281C , 4225F

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10405010 ).

<sup>†</sup> E-mail : yphuang@phy.ecnu.edu.cn