

# 频域低相干光干涉的折射率三维重建系统

周红仙<sup>1a</sup>, 张璐英<sup>2</sup>, 王毅<sup>2,1b</sup>

(1. 东北大学 秦皇岛分校 a. 实验教育中心; b. 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

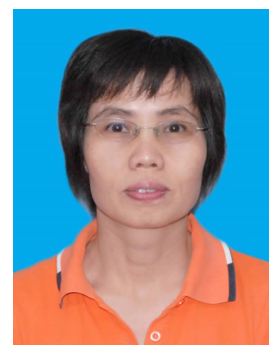
2. 佛山科学技术学院 理学院, 广东 佛山 528000)

**摘要:**结合频域低相干光干涉及计算机断层重建技术,建立了光学折射率三维重建系统,系统主要包括宽带光源、光纤迈克尔逊干涉仪、光谱仪。由光谱仪采集探测光和参考光的干涉光谱,经傅里叶变换计算样品折射率的直线投影,利用滤波反投影算法进行折射率重建,得到样品的三维折射率分布。用塑料管对本方法进行了实验验证,该系统适合于对折射率均匀和非均匀的样品进行三维成像,该系统能检测到的折射率灵敏度约为0.01。本实验系统适合于作为本科生综合设计性物理实验项目。

**关键词:**折射率; 三维成像; 低相干光干涉; 滤波反投影

**中图分类号:**O 436.1 **文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7167(2017)05-0061-03



## Three-dimensional Imaging of Optical Refractive Index by Low-coherence Interferometry in Fourier Frequency Domain

ZHOU Hongxian<sup>1a</sup>, ZHANG Luying<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>2,1b</sup>

(a. Experiment Education Center; b. School of Control Engineering; 1. Northeastern University at

Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 2. School of Science,

Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China)

**Abstract:** Optical refractive index (ORI) is one of the most important physical parameters for the description of the characterization of optical material, and measurement of ORI is crucial for research and industrial applications. We demonstrate establish an experimental system for three-dimensional imaging of ORI by combining low-coherence interferometry in frequency domain and computed tomography. The experimental system mainly consists of a broadband light source, an optical fiber Michelson interferometer and a spectrometer. The interference spectra of the detection light and reference light are acquired with the spectrometer, and the parallel projection of optical refractive index is calculated from the acquired interference spectra by Fourier transformation. The three-dimensional distribution of refractive index is reconstructed by the filtered back-projection algorithm. We experimentally demonstrate this system by cross-sectional imaging of a plastic tube. The present system is suitable for three-dimensional imaging of samples with homogeneous and inhomogeneous ORI distributions, and the ORI sensitivity is 0.01. The imaging system is suitable to be used as a synthetic and designing experiment in physical experiment teaching for undergraduates.

**Key words:** optical refractive index; three-dimensional imaging; low-coherence interferometry; filtered back-projection algorithm

收稿日期:2016-06-08

基金项目:国家自然科学基金(61275214); 广东省自然科学基金  
(S2013010012973); 河北省自然科学基金(S2013010012973)

作者简介:周红仙(1969-),女,陕西勉县人,高级实验师,现主要从事光学成像及检测研究。

Tel.: 15233551072; E-mail: 15233551072@163.com

## 0 引言

折射率是表征光学介质特性的基本参量之一,折射率的测量具有重要的意义;且密度、浓度、温度、应力等物理量的变化均会引起折射率的相应变化,通过测定折射率的变化,可以确定这些相关物理量,因此,在生物、医学、食品、环境科学、石油化工等领域,对折射率的检测具有重要的意义及应用价值,如通过测量液体折射率进行纯度鉴别、浓度的定量分析等<sup>[1-4]</sup>。目前测量物质折射率的方法很多,一般分为两类:一类是通过几何光学的方法,以折射和反射定律为理论基础,通过测量光通过材料时的偏折角度确定材料的折射率;另一类是波动光学方法,主要利用介质对透射光相位的影响测定折射率,具有代表性的测量方法有最小偏向角法、掠入射法、布儒斯特角法、干涉法等,这些方法只适合于折射率均匀的样品<sup>[5-9]</sup>,不能用于折射率非均匀样品。

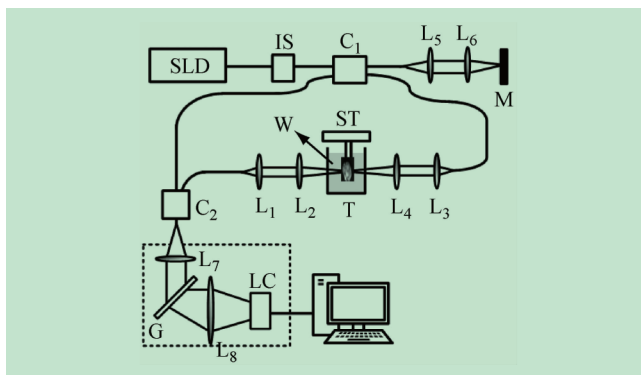
近几年,结合低相干光干涉技术及计算机三维重建技术,发展了多种折射率三维重建方法,用于非均匀介质的折射率三维重建,如用数字全息显微镜法对细胞折射率层析成像<sup>[10]</sup>,用 OCT 的双焦光学相干折射测量法对浑浊介质成像<sup>[11]</sup>,用反射和透射 OCT 重建折射率的空间分布<sup>[12-14]</sup>,折射率三维重建已经成为一种新的成像方法。

本文介绍一种基于频域低相干光干涉的折射率三维重建实验系统,该系统主要由宽带光源、光纤迈克尔逊干涉仪、自制光栅光谱仪组成,由光谱仪采集穿过样品的前向散射光和参考光的干涉光谱,经傅里叶变换计算样品折射率的投影,利用滤波反投影算法进行折射率重建,得到样品的三维折射率分布,用 LabVIEW 和 Matlab 进行实验系统控制及折射率重建,该系统适合于对折射率均匀和非均匀的样品进行三维成像。

## 1 实验装置

本文建立的基于频域低相干光干涉的折射率三维重建实验系统如图 1 所示,该系统主要由宽带光源、光纤迈克尔逊干涉仪、自制光栅光谱仪组成。宽带光源为超辐射发光二极管(SLD),中心波长为 840 nm,带宽为 62 nm,宽带光源发出的光耦合进入光纤,经过隔离器进入耦合器,从耦合器出来后分成探测光和参考光,参考光经过准直器  $L_5$  形成平行光,经透镜  $L_6$  会聚于反射镜 M 表面;探测光经过准直器  $L_3$  形成平行光,经透镜  $L_4$  汇聚,汇聚的探测光经过透镜  $L_2$  形成平行光,再经过透镜  $L_1$  进入光纤,透镜  $L_2$  和  $L_4$  形成的焦点作为成像区域,选择合适的透镜  $L_2$  和  $L_4$  在焦点处形成较大景深,当穿过样品的光的锥角比较小时,光锥近似为平行直线,和光学投影层析的原理类似<sup>[15]</sup>,如

图 2 所示。参考臂反射的光和透过样品的光由耦合器  $C_2$  进入自制的光栅光谱仪,如图 1 中点线框所示,由线阵相机记录探测光和参考光的干涉光谱,并由此计算样品的折射率投影值,用一个一维电动平移台移动样品(见图 2 中  $x$  方向),得到样品折射率的平行直线投影。



SLD - 超辐射二极管光源, IS - 隔离器,  $C_1$ 、 $C_2$  - 耦合器,  $L_1 \sim L_8$  - 透镜, M - 反射镜, W - 水, ST - 平移-旋转平台, T - 水槽, G - 光栅, LC - 线阵相机

图 1 折射率三维重建实验系统

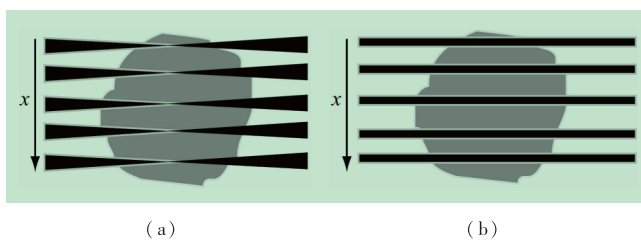


图 2 当穿过样品的光锥角比较小时(a),聚焦的光锥近似为平行直线投影(b)

为了采集样品不同方向的投影,用一个一维电动平移台和一个步进电动机带动样品平移和转动。首先选定样品的一个横截面(和  $z$  方向垂直, $z$  方向为步进电动机转轴方向),用电动平移台沿  $x$  方向以一定步距平移样品,在每个平移位置采集干涉光谱,得到折射率平行投影,以  $1.8^\circ$  的步距使样品转过  $360^\circ$ ,在每一角度,重复样品平移及采集过程,得到样品不同方向的平行投影数据。

## 2 重建方法

为减小样品—空气界面的光折射,把样品浸入水中进行测量,假设沿探测光的折射率分布为  $n(r)$ ,则加样品前后探测光的光程改变量为:

$$\Delta z = \int [n(r) - n_w] dl \quad (1)$$

式中:  $n_w$  表示水的折射率。积分沿探测光的方向进行。

图 3(a) 中曲线 1 和 2 分别表示未加样品、加样品后典型的干涉光谱,其理论表达式可近似表示为:

$$S(\lambda) = F(\lambda) \cos(2\pi k \Delta z') \quad (2)$$

式中:  $F(\lambda)$  为光谱形状的函数;  $\Delta z'$  表示参考臂和样品

臂的光程差; $k$ 为波数,即波长的倒数。图3(a)中曲线1和2的傅里叶变换的幅度谱如图3(b)中曲线1和2所示,其极大值所对应的横坐标则分别为加样品、未加样品时参考臂和探测臂的光程差,而这两者之间的距离即为加样品前后探测光的光程改变量,如式(1)所示。

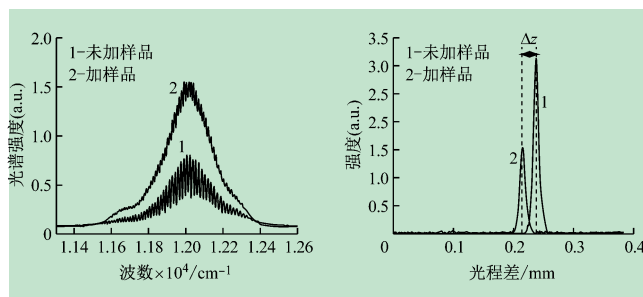


图3 典型干涉光谱(a),及其傅里叶变换的幅度谱(b)

平移和转动样品,能采集到样品一截面内足够方向的平行直线投影,调用 Matlab 的 `iradon()` 函数,用滤波反投影算法重建出样品的折射率分布  $n(r)$ <sup>[14]</sup>。

### 3 实验结果

用图1所示的基于频域低相干光干涉的折射率三维重建实验系统对一塑料管进行实验。把塑料管嵌入一透明凝胶圆柱体中,置于图1中平移-旋转平台,塑料管沿步进电动机转轴方向放置,以  $20 \mu\text{m}$  的步距平移样品,以  $1.8^\circ$  的步距使样品转过  $360^\circ$ ,由光谱仪采集干涉光谱,经傅里叶变换计算样品折射率平行投影,共采集到 400 组平行投影数据,用 Matlab 的 `iradon()` 函数进行重建,选取 Shepp-Logan 滤波器及线性插值。由于塑料管的各个横断面为形状近似相同的圆环,故图4显示了其中一个横断面重建结果。重建结果和样品完全吻合,验证了建立的基于频域低相干光干涉的折射率三维重建实验系统及重建算法的正确性。图4(b)中,塑料管外的完全透明的凝胶也清晰可见,凝胶由 2% 琼脂制成,其折射率约为 1.343,而水的折射率为 1.33,所以可断定用该系统测量样品折射率时的精度至少为 0.01。

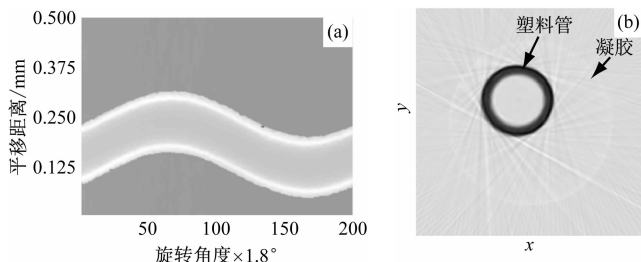


图4 (a)折射率的投影,(b)横断面折射率重建结果

### 4 结 语

建立的基于频域低相干光干涉的折射率三维重建

实验系统可以对均匀及非均匀样品进行折射率分布成像,该系统能检测到的折射率灵敏度约为 0.01。样品的对比度及形状和重建结果都基本吻合,边缘清晰。通过对一塑料管进行成像,验证了所建立的基于频域低相干光干涉的折射率三维重建实验系统及重建算法的正确性。从重建结果来看,存在较大的伪迹,这是因为为了提高实验速度,在平移和旋转样品时,选择了较大的步长,如果减小步长,同时优化系统,减小探测光斑的尺寸可进一步提高系统的空间分辨率。

本实验系统包括光学、图像重建及计算机控制多学科知识,该系统可利用实验室常用设备建立,用 LabVIEW 和 Matlab 进行实验系统控制及折射率重建,成本较低,设计新颖,物理思想清晰,非常适合于作为综合设计性物理实验项目。

### 参考文献 (References):

- [1] 郑小兵,之己. 测量液体浓度的折射率方法[J]. 光电子技术与信息, 1998, 11(4): 35-36.
- [2] 张志伟,尹卫峰,温廷敦,等. 溶液浓度与其折射率关系的理论和实验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2009, 30(3): 281-285.
- [3] 虞波,王维明,蔡再生. 活性染料染色废水中盐浓度的光折射率法测试[J]. 纺织学报, 2015, 36(1): 114-118.
- [4] 潘中达,赵保丹,周进. 水溶液中染料吸光度与浓度的非线性关系[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(2): 22-26.
- [5] 张明霞. 干涉对比法测液体折射率的一种简易方法[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(3): 9-11.
- [6] 周凯宁,肖宁,陈棋,等. 3种测量三棱镜折射率方法的对比[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(4): 22-25.
- [7] 马晓航,熊畅,陈楷东,等. 利用白光的双缝干涉测量介质薄膜的折射率[J]. 物理实验, 2016, 36(8): 35-38.
- [8] 林春丹,杨冠,焦梦瑶,等. 基于迈克耳孙干涉仪及劈尖测量透明液体折射率[J]. 物理实验, 2016, 36(8): 13-15.
- [9] 李宇,李强,孙丽存,等. 测量微量液体折射率的新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2012(2): 68-74.
- [10] Charrière F, Marian A, Montfort F, et al. Cell refractive index tomography by digital holographic microscopy [J]. Optics Letters, 2006, 31(2): 178-180.
- [11] Zvyagin A, Silva K K M B, Alexandrov S, et al. Refractive index tomography of turbid media by bifocal optical coherence refractometry [J]. Optics Express, 2003, 11(25): 3503-3517.
- [12] Zysk A M, Reynolds J J, Marks D L, et al. Projected index computed tomography [J]. Optics Letters, 2003, 28(9): 701-703.
- [13] 周振明,丁志华,杨亚良. 基于光学相干层析成像的投影折射率计算机层析成像系统研制[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 833-836.
- [14] Wang Y, Wang R K. High-resolution computed tomography of refractive index distribution by transillumination low-coherence interferometry [J]. Optics Letters, 2010, 35(1): 91-93.
- [15] Sharpe J, Ahlgren U, Perry P, et al. Optical projection tomography as a tool for 3D microscopy and gene expression studies [J]. Science, 2002, 296(5567): 541-545.