

文章编号: 0253-2239(2003)08-0926-5

利用全息干涉层析重构三维折射率场的新方法*

雷 华¹ 鲁 阳² 潘勤敏^{1,4} 谢芳宁¹ 刘正东³ Rempel G L⁴

1 浙江大学高分子工程研究所, 杭州 310027
2 浙江大学力学系, 杭州 310027
3 浙江大学物理系, 杭州 310027
4 滑铁卢大学化工系, 加拿大 滑铁卢, ON, N2L 3G1

摘要: 介绍了一种新的重构三维折射率场的方法。该方法利用一个共焦检测系统对被测对象的像面全息干涉图进行三维扫描,并记录干涉强度,通过对强度数据的处理,可以重构出三维折射率场。这种方法原理简单,不需要进行多方向的全息干涉记录和复杂的重构过程。给出了初步的试验结果,证明该方法是可行的。

关键词: 全息干涉; 层析; 折射率; 共焦系统

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

1 引 言

折射率是表征光透明物质光学性质的基本物理量之一。各种光透明物质中,诸如密度、浓度、温度、应力等物理量的变化,均会引起折射率的变化。根据折射率的空间分布和时间变化,可以分析乃至确定其它多种“场量”。因此,对折射率的测量是具有基本意义的测量,并且有广泛的应用价值。通过光学方法测定介质内的折射率分布,进而定性或定量分析其它各种物理场量,已经获得许多实际应用,是发展潜力极大的无损检测手段。全息干涉度量术具有三维记录与再现的特性,但却不能以通常所用的简单方式测得三维折射率。Sweeney 和 Vest^[1]首先提出了利用多方向全息干涉构建三维折射率场,通过对被测对象进行多方向的全息干涉测量,然后应用一定的算法重构出三维的折射率场。以后出现了一些这方面的应用和一些新的重构算法来提高测量的精度,Sweeney 和 Vest^[2]把它应用于三维温度场的测量,Vukicevic^[3]等人也利用多方向双曝光全息干涉数据层析重构出对流热流中的温度分布,Bahl 和 Liburdy^[4]利用三维实时全息干涉度量技术构建了加热水平板上空气中的温度分布,并且还从温度分布中确定了局部的传热系数,并算出了

Nusselt 准数,其试验结果与其它文献报道的模拟结果吻合得很好。Hunter 和 Collins^[5]则提出了一些新的重构算法。Mewes 和 Fellhelter^[6]利用光学层析(Optical Tomography)的方法测量了一个固定床催化反应器入口处混合气体的浓度分布,其原理是利用了多方向的全息干涉图,并进行反演得到。因此利用全息干涉可以实现三维折射率场的重构,并且具有一定的应用价值。但多方向的全息干涉记录装置复杂,重构过程是一个近似的过程,而且复杂,在反演光程数据时通常忽略光线的折射,因此被测量的梯度变化一定要小,当对全息图进行扫描时它还不能判断条纹级数是增大还是减小,还必须借助其它的测量方法作为辅助手段,而且多方向全息层析有一定的视角限制,这将限制其在一些工业背景中的应用。

基于此,我们提出了一种新的通过全息干涉构建三维折射率场的方法。

2 原 理

该方法的测量过程分为两步,即像面双曝光全息图的记录与全息再现像的层析探测分析。设被测介质的初始状态是均匀的,折射率为 n_1 ,将其置入全息光路中(图 1),记录下第一幅全息图。保持被测介质的位置不变,当由于某种原因介质的折射率发生变化后,在同一块全息干版上记录下第二幅全息图。此时,介质内的折射率分布用 $n(x, y, z)$ 表示,为了讨论的方便,在这里我们假定同时只出现以下两种情况之

* 国家自然科学基金(29676037)及浙江省自然科学基金(100048)资助课题。

E-mail: hualei@yahoo.com

收稿日期:2002-07-11; 收到修改稿日期:2002-08-15

—: $n(x, y, z) > n_1$, 或者 $n(x, y, z) < n_1$ 。

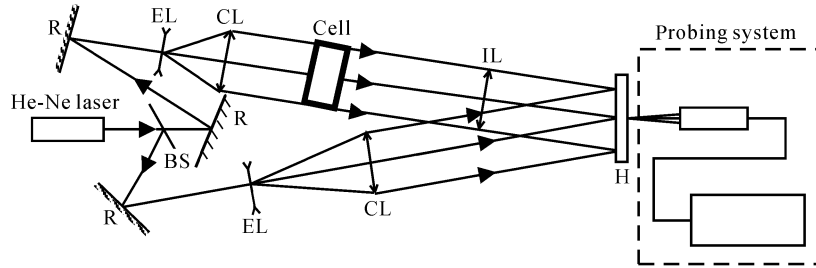


Fig. 1 Schematic of optical system. BS: beam splitter; EL: expansion lens; H: hologram; IL: image lens

将干版按全息冲洗工艺进行处理,然后按原位放回光路,并用参考光照明全息图,使前后两个状态的物光同时再现。由于两个不同折射率状态的介质再现象完全重叠,介质内两束物光将发生空间干涉,如图 2 所示。对 z 轴方向的干涉效应可作如下分析:

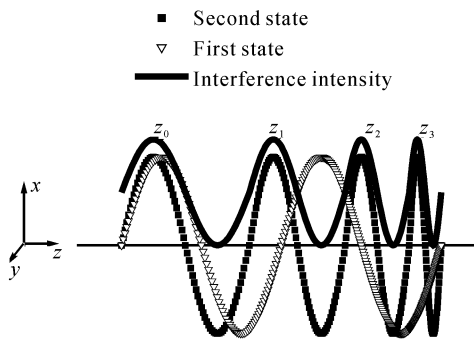


Fig. 2 Schematic of two object beam wave to interfere in space

设前后两次曝光时,介质内任意一点 P 处物光的复振幅分别为

$$E_1 = a_1 \exp(ik_1 z), \quad E_2 = a_2 \exp(ik_2 z),$$

式中 a_1 和 a_2 为振幅, k_1 和 k_2 是波数。

则两束光叠加后的光强度为

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(k_1 - k_2)z. \quad (1)$$

通常振幅

$$a_1 = a_2 = a,$$

则(1)式简化为

$$I = 4a^2 \cos^2 \frac{(k_1 - k_2)z}{2}, \quad (2)$$

当

$$\frac{(k_1 - k_2)z}{2} = \frac{2\pi/\lambda_1 - 2\pi/\lambda_2}{2} z = N\pi, \quad (3)$$

$$(N = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

时, P 点出现干涉极大值, 式中 N 为干涉级序数, λ_1 和 λ_2 分别为状态 1 和状态 2 时的波长。将

$$l_1 = \lambda_0/n_1, \quad l_2 = \lambda_0/n,$$

代入(3)式(λ_0 为真空中的光波长), 得到折射率 n 的计算公式

$$n = n_1 \pm N\lambda/z. \quad (4)$$

这里 n 是介质中的平均折射率, 如果 $n > n_1$ 则取“+”, 相反则取“-”。

为了能够探测介质内部干涉场的强度分布, 我们利用被测介质的光散射性质, 设计了一种层析探测装置(见图 3)。该装置由探测光组(包括透镜 L_1 、 L_2 和针孔滤波器 F)和光电探测器两部分组成, 其实这儿的探测原理类似于光学相干层析(optical coherence tomography, OCT)的探测原理^[7~9]。由图 3 可以看出, 只有 L_1 前焦点附近微小区域内散射的光能够通过位于 L_2 后焦点的针孔。当探测光组沿 z 轴移动时, 光电探测器所接收的光能量将会随着前焦点处干涉强度的不同而连续地变化。如果观测光组的前焦点位于介质内部某一点 z_0 时(见图 2), 出现一个亮度极大值, 而当探测光组沿 z 轴移动距离 $\Delta z = z_n - z_0$ 至点 z_n 时, 出现第 N 个亮度极大值, 根据(4)式, 可以得到从 z_0 到 z_n 间的平均折射率

$$n_{z_n} = n_1 \pm \frac{N\lambda}{z_n - z_0}, \quad (5)$$

如果已知 $n(x, y, z) > n_1$, 上式右边取“+”号, 反之取“-”号。在实际测量中, N 与 z_n 相对应, 要确定 N , 先定下 z_0 , 即开始有光强变化的位置, 然后根据光强分布图, 确定下与 z_n 对应的 N 来, 从图 2 中可以看出确定 N 是很直观的。

一般来说, 折射率的改变是连续的, 因此在一个相对小的区间内折射率可以认为是常量。这样, 如果在 z 轴上一个点附近取一个很小的距离(Δz), 并且限制 $\Delta N \leq 1$, 那么在那个点的折射率可以用方程(5)计算。实际测量中, 为了获得任意一点的折射率, 不能只测定亮度极大值, 因此 N 并不一定是整数。由(5)式容易看出, N 和 Δz 的计量精度直接决定着折射率 n 的

测量精度。以上仅讨论了沿 z 轴方向的测量,显然,只要改变横向坐标 x 和 y ,再进行 z 轴方向的扫描,即进

行三维扫描,就可以实现三维场的测量。

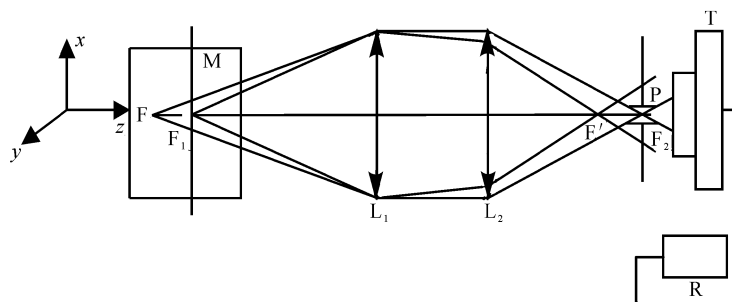


Fig. 3 Schematic of tomographic detection system. F1, F2: focus plane; L1, L2: lens; P: pinhole; T: transduce; R: recorder; M: media

3 初步试验结果

为了说明我们所提出的方法的可行性,我们进行了一些初步的试验。首先,按照前面的描述,记录下 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时纯水 ($n=1.3323, \lambda=632.8\text{ nm}$) 的状态,接着在液池中滴入几滴氯化钾溶液,几分钟后,记录下第二个状态,然后再重现干版上的两个状态,沿 z 轴的干涉波形如图 4 所示。从这个图中,按方程 (5) 可以计算沿 z 方向的折射率分布,标识在图 4 中的一些点的计算结果在表 1 中示出。

Table 1 The results for points marked in Fig. 4

Point	Position /mm	Refractive index
A	0.24	Reference
B	0.52	1.3346
C	0.78	1.3347
D	1.04	1.3347
E	1.32	1.3346
F	1.56	1.3349
G	1.82	1.3347
H	2.08	1.3347

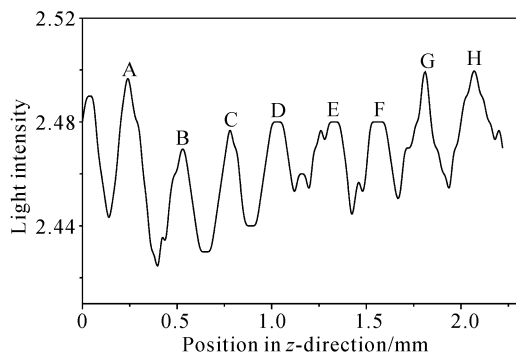


Fig. 4 Light intensity distribution along z -direction

这些结果显示氯化钾在水中的扩散非常迅速,在液池中已几乎接近均匀状态。最后,液池中的折

射率用阿贝折光仪(WZS-I型,上海光仪厂生产,精度为小数点后四位)测量,折射率为 1.3350,其结果非常接近表 1 所示数据。

4 讨 论

在前面的分析中,我们假定了折射率的变化只有一种可能,即要么 $n(x, y, z) > n_1$, 或者 $n(x, y, z) < n_1$ 。实际上,即使两种情况都发生,该方法仍然有效,可以通过测量干涉强度分布的空间频率的变化而得以确定。即首先确定出折射率没有发生变化时的干涉强度分布的空间频率如图 5 所示,然后再测出变化后的干涉强度分布的空间频率,如果第二状态的折射率大于第一状态,在其空间频率明显要密,如图 2 所示,相反,其空间频率要变疏,如图 6 所示。

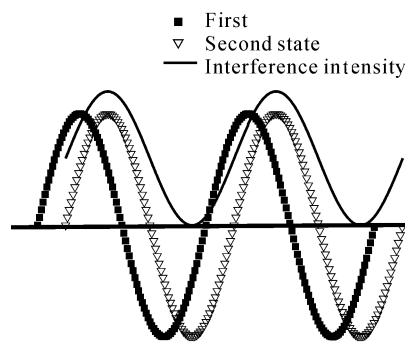


Fig. 5 Schematic of two object beam wave without change of Refractive Index to interfere in space

如果被测体系是均相系统,则其空间频率分布是均匀的,如图 7 所示。

除此以外,还可以借助其它辅助测量方法来进行判断,例如使用阿贝折光仪等,因为在很多的传递过程中,折射率的变化通常也只向一个方向进行。

由(5)式可以看出,位移 Δz 和条纹级数 N 的测

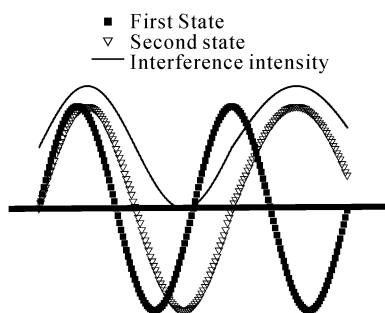


Fig. 6 Schematic of two object beam wave with change of Refractive Index $n(x, y, z) < n_1$ to interfere in space

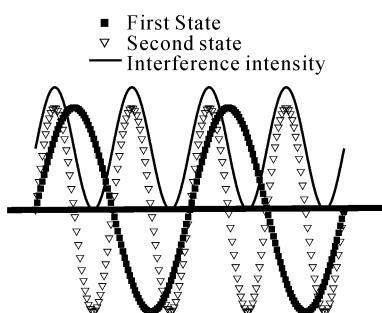


Fig. 7 Schematic of two object beam waves with homogeneous second state to interfere in space

量水平直接影响测量灵敏度和精度。按比较普通的实验条件, Δz 的测量灵敏度可以达到 $0.1 \mu\text{m}$, ΔN 可以分辨到 $1/20$ 根条纹, 即 0.05 级, 这时 ΔN 将构成制约因素。例如, 对于 He-Ne 激光, $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$, 由 (5) 式可以算出, 这时能够测得折射率 n 在相距 $316.4 \mu\text{m}$ 的两点之间 10^{-4} 大小的变化; 如果 ΔN 的分辨率达到 0.01 级, 则可以测出相距 $63.3 \mu\text{m}$ 两点之间 10^{-4} 大小的折射率变化。通过这里的分析可以看出, 要想使测量灵敏度达到 $10^{-4}/10 \mu\text{m}$, 干涉级分辨率应该达到 0.001 级。由图 3 可知, 除了在前焦点 L_1 附近一个非常小的区域(微分区域)内的散射光外, 还有其它的光进入针孔, 形成噪音, 因此针孔滤波器通光孔的直径和长度也是影响测量精度的重要因素。目前我们使用的滤波器孔径为 $15 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 。因此, 为了得到高的精度和灵敏度, 还需要建立高精度的试验装置, 这些是需要完善的地方。

在多方向全息层析方法中, 由于涉及多方向全息干涉数据的重构, 在这些重构算法中, 都假定了光线的折射很小, 因此把光线通过物体后的折射忽略了^[2], 因此如果被测对象变化明显, 则折射就不可忽视, 因此将带来明显的误差。另外也不能区别变化的方向是增大还是减小^[2], 还需要借助其它手段, 而

且多方向全息层析有一定的视角限制, 这将限制其在一些工业背景中的应用。而在我们的方法中, 由于不存在重构过程, 因此突破了被测对象变化明显的限制, 而且也可以区别变化的方向。因此该方法明显优于多方向全息层析。

如果要检测对象是非稳态场, 则可以使用实时全息方法, 实时地测量非稳态场。

结论 这种结合了全息干涉度量术和层析探测的新方法, 其原理简单, 不需要复杂的传感器设备及复杂的重构算法, 在实现上, 需要三维的移动机构以及共焦检测系统对全息干涉图进行三维探测, 实现了三维折射率场的重构, 因此测量过程也相对简单, 而且它不破坏测量场, 也是一种无损检测。文中初步的试验结果证明该方法是可行的。

参 考 文 献

- 1 Sweeney D W, Vest C M. Reconstruction of three-dimensional refractive index fields from multidirectional interferometric data. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(11): 2649~2664
- 2 Sweeney D W, Vest C M. Measurement of three-dimensional temperature fields above heated surfaces by holographic interferometry. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1974, **17**(12): 1443~1454
- 3 Dalibor Vukicevic, Helmut Jäger, Theo Neger *et al.*. Tomographic reconstruction of the temperature distribution in a convective heat flow using multidirectional holographic interferometry. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(8): 1508~1516
- 4 Bahl S, Liburdy J A. Measurement of local convective heat transfer coefficients using three-dimensional interferometry. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1991, **34**(4~5): 949~960
- 5 Hunter J C, Collins M W. Three-dimension refractive index field reconstruction from holographic interferograms. *International J. Optoelectronics*, 1989, **4**(2): 95~132
- 6 Mewes D, Fellhélter. Visualization of the concentration profiles in the entrance section of a fixed bed catalytic reactou-premixing of two gaseous components. *Chem. Engng. Sci.*, 1994, **49**(24B): 5243~5255
- 7 Huang David, Swanson E A, Lin C P *et al.*. Optical coherence tomography. *Science*, 1991, **254**: 1178~1181
- 8 Chen Yi, Xue Ping, Yuan Tao *et al.*. Simulation of light scattering in optical coherence tomography. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(4): 486~490
- 9 Yuan Tao, Xue Ping, Chen Yi *et al.*. Experimental research of optical coherence tomography. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(10): 1386~1389 (in Chinese)

A New Method for Reconstructing Three-Dimensional Refractive Index Field Through Holographic Interferometric Tomography

Lei Hua¹ Lu Yang² Pan Qinmin^{1,4} Xie Fangning¹
Liu Zhengdong³ Rempel G L⁴

1 *Institute of Polymer Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027*

2 *Department of Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027*

3 *Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027*

4 *Department of Chemical Engineering, University of Waterloo,
Waterloo, ON, N2L 3G1, Canada*

(Received 11 July 2002; revised 15 August 2002)

Abstract: A new technique for reconstructing three-dimensional refractive index field was proposed, which utilized a confocal system to scan the reconstructed holographic interferogram of a measured object in three dimension, and the recorded interference intensity was processed to obtain three-dimensional refractive index field. For this method, the mechanism is very simple, and the multidirectional holographic interferometric scan and complex reconstruction algorithm are not needed, also not interfere the measured field and is a non-intrusive measurement method. The preliminary experimental result was given to demonstrate the feasibility of this method.

Key words: holographic interferometry; tomography; refractive index; confocal system