



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106123770 A

(43)申请公布日 2016.11.16

(21)申请号 201610445233.1

(22)申请日 2016.06.20

(71)申请人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市碑林区友谊西路127号

(72)发明人 赵建林 张继巍 马超杰 邸江磊

(51) Int. Cl.

G01B 9/023(2006.01)

G01B 11/24(2006.01)

G01N 21/45(2006.01)

权利要求书1页 说明书4页 附图1页

(54)发明名称

一种折射率与形貌同时动态测量的方法

(57)摘要

本发明涉及一种二维折射率分布与三维形貌同时动态测量的方法,利用数字全息显微术全场、高分辨率及动态测量的优点,将短边抛光的道威棱镜引入到测量光路,实现全内反射数字全息显微光路与透射式数字全息显微光路的集成。借助角度复用与偏振复用技术,利用透射式数字全息显微光路动态记录包含物体折射率和厚度分布(或形貌)信息的物光波相位分布信息,利用全内反射数字全息显微光路同步记录物体的二维折射率分布信息,通过简单的数学运算,从而实现物体二维折射率分布与三维形貌的同时动态测量。所涉及的测量方法无需额外的填充溶液,适用于透明/半透明液体或固体的测量,克服了已有方法的不足。

1. 一种二维折射率分布与三维形貌同时动态测量的方法,其特征在于步骤如下:

步骤1:一束竖直偏振的平行光(波长为 λ)从道威棱镜的一个斜边入射,进而以入射角 θ 在道威棱镜的长边中心与空气界面处发生全内反射,然后从另一斜边出射并经显微放大后作为物光波1。

步骤2:来自同一激光器的另一束水平偏振的平行光从道威棱镜的短边中心垂直入射,进而从道威棱镜的长边中心出射并经显微放大后作为物光波2。

所述道威棱镜的短边被抛光。

步骤3:来自同一激光器的另两束竖直、水平偏振的平行光,分别作为参考光波1、2与相应的物光波1、2在图像采集器件靶面上相遇并发生干涉,由图像采集器件记录得到参考数字全息图 H_0 。

步骤4:紧贴道威棱镜长边表面中心区域放置待测样品,由于棱镜长边表面外侧介质折射率的改变,全内反射光波(物光波1)将产生附加的相位变化(即附加相移)。假设样品与棱镜长边表面紧密接触的一面为平面,并且样品的折射率沿棱镜长边表面法线方向(即纵向)呈现均匀分布,则附加相移的大小和分布与入射角 θ 和棱镜长边表面两侧介质的折射率 n_1 和 n_2 有如下关系:

$$\Delta\phi_{O1}(x, y) = -2 \arctan \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2(x, y)}}{n_1 \cos \theta} + 2 \arctan \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - 1}}{n_1 \cos \theta} \quad (1)$$

由于待测样品的存在,透射光波(物光波2)将产生附加相位变化,并且附加相位变化的大小和分布与样品的折射率分布 $n_2(x, y)$ 和厚度分布(反映了样品的几何形貌) $h(x, y)$ 有如下关系:

$$\Delta\phi_{O2}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [n_2(x, y) - 1] h(x, y) \quad (2)$$

步骤5:上述全内反射光波产生的附加相移分布携带了样品二维折射率分布 $n_2(x, y)$ 的信息;透射光波产生的附加相位变化分布携带了样品折射率分布 $n_2(x, y)$ 与厚度分布 $h(x, y)$ 的信息。保持参考光波不变,在样品的折射率分布与厚度分布动态变化过程中连续记录 N 幅数字全息图 $H_i (i = 1, 2, 3 \cdots N)$ 。

步骤6:借助频谱提取技术,根据标量衍射理论,数值模拟光波经全息图 H_0 和 H_i 的衍射传播过程,分别对相应物光波进行数值重建,得到放置样品前后两物光波的相位差分布 $\Delta\phi_{O1}(x, y)$ 、 $\Delta\phi_{O2}(x, y)$ 。根据式(1)与式(2),样品的二维折射率分布可表示为

$$n_2(x, y) = n_1 \sqrt{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta \tan^2 \left[\arctan \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - 1}}{n_1 \cos \theta} - \frac{1}{2} \Delta\phi_{O1}(x, y) \right]}, \quad (3)$$

厚度分布可表示为

$$h(x, y) = \frac{\Delta\phi_{O2}(x, y) \lambda}{2\pi [n_2(x, y) - 1]} \quad (4)$$

一种折射率与形貌同时动态测量的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种折射率分布与三维形貌同时动态测量的方法,尤其涉及一种将全内反射数字全息显微术与透射式数字全息显微术相结合,借助角度复用与偏振复用技术,对透明/半透明液体或固体样品的折射率分布与三维形貌同时动态测量的方法。

背景技术

[0002] 数字全息显微术凭借其对微小物场的振幅及相位分布进行全场、非破坏性、快速且高分辨率定量测量的优点,为材料内部折射率分布和活体细胞样本形貌测量、材料表面分析和MEMS器件检测等提供了新的有效途径。然而,针对透明/半透明物体,利用透射式数字全息显微术测量得到的物光场相对相位分布与待测物折射率和几何厚度(形貌)同时有关。如何从所测得的物光场相对相位分布中提取待测物折射率和形貌信息,实现待测物二维折射率分布与三维形貌的同时测量,成为一个亟待解决的科学问题。

[0003] 利用共聚焦显微术测量物体的形貌,再结合相位显微术可以实现折射率与形貌的同时测量(C.Curl,et al.“Refractive index measurement in viable cells using quantitative phase-amplitude microscopy and confocal microscopy,”Cytom Part A,65(1),88-92(2005))。但是,共聚焦显微术需要对物体进行扫描测量,不适用于随时间变化物体的动态测量。在待测物周围分别填充不同折射率的溶液,测量相应情况下的相对相位分布,通过定量的数值计算便可以实现折射率与形貌的同时测量(B.Rappaz,et al.“Measurement of the integral refractive index and dynamic cell morphometry of living cells with digital holographic microscopy,”Opt.Express 13(23),9361-9373(2005))。然而,这种方法需要更换填充溶液,操作过程容易改变待测物的原始状态,并且不能实现动态测量和对液态物体的测量。为解决该问题,一种利用高色散填充液的双波长数字全息显微术被提出(M.Jafarfard,et al.“Dual-wavelength diffraction phase microscopy for simultaneous measurement of refractive index and thickness,”Opt.Lett.39(10),2908-2911(2014))。不过,这种方法仍然需要额外的填充溶液,不能应用于液态物体的测量。另外,该方法在数值计算中引入了假设近似,使最终的测量精度降低。

发明内容

[0004] 要解决的技术问题

[0005] 为了避免现有方法和技术的不足,本发明提出一种二维折射率分布与三维形貌同时动态测量的方法。该方法将全内反射数字全息显微术与透射式数字全息显微术相结合,借助角度复用与偏振复用技术,利用透射式数字全息显微术测量包含物体折射率和厚度分布(或形貌)信息的物光波相对相位分布,同时利用全内反射数字全息显微术测量物体的二维折射率分布。进而通过简单的数学运算,便可实现对透明/半透明液体或固体的二维折射率分布与三维形貌的同时动态测量。

[0006] 技术方案

[0007] 本发明的思想在于:将短边抛光的道威棱镜引入到测量光路,借助角度复用与偏振复用技术,实现全内反射数字全息显微光路与透射式数字全息显微光路的集成。利用透射式数字全息显微光路动态记录包含物体折射率和厚度分布(或形貌)信息的物光波相位分布信息,利用全内反射数字全息显微光路同步记录物体的二维折射率分布信息,从而实现对物体二维折射率分布与三维形貌的同时且动态测量。

[0008] 一种二维折射率分布与三维形貌同时动态测量的方法,其特征在于步骤如下:

[0009] 步骤1:一束竖直偏振的平行光(波长为 λ)从道威棱镜的一个斜边入射,进而以入射角 θ 在道威棱镜的长边中心与空气界面处发生全内反射,然后从另一斜边出射并经显微放大后作为物光波1。

[0010] 步骤2:来自同一激光器的另一束水平偏振的平行光从道威棱镜的短边中心垂直入射,进而从道威棱镜的长边中心出射并经显微放大后作为物光波2。

[0011] 所述道威棱镜的短边被抛光。

[0012] 步骤3:来自同一激光器的另两束竖直、水平偏振的平行光,分别作为参考光波1、2与相应的物光波1、2在图像采集器件靶面上相遇并发生干涉,由图像采集器件记录得到参考数字全息图 H_0 。

[0013] 步骤4:紧贴道威棱镜长边表面中心区域放置待测样品,由于棱镜长边表面外侧介质折射率的改变,全内反射光波(物光波1)将产生附加的相位变化(即附加相移)。假设样品与棱镜长边表面紧密接触的一面为平面,并且样品的折射率沿棱镜长边表面法线方向(即纵向)呈现均匀分布,则附加相移的大小和分布与入射角 θ 和棱镜长边表面两侧介质的折射率 n_1 和 n_2 有如下关系:

$$[0014] \quad \Delta\phi_{01}(x, y) = -2 \arctan \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2(x, y)}}{n_1 \cos \theta} + 2 \arctan \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - 1}}{n_1 \cos \theta} \quad (1)$$

[0015] 由于待测样品的存在,透射光波(物光波2)将产生附加相位变化,并且附加相位变化的大小和分布与样品的折射率分布 $n_2(x, y)$ 和厚度分布(反映了样品的几何形貌) $h(x, y)$ 有如下关系:

$$[0016] \quad \Delta\phi_{02}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [n_2(x, y) - 1] h(x, y) \quad (2)$$

[0017] 步骤5:上述全内反射光波产生的附加相移分布携带了样品二维折射率分布 $n_2(x, y)$ 的信息;透射光波产生的附加相位变化分布携带了样品折射率分布 $n_2(x, y)$ 与厚度分布 $h(x, y)$ 的信息。保持参考光波不变,在样品的折射率分布与厚度分布动态变化过程中连续记录 N 幅数字全息图 $H_i (i = 1, 2, 3 \cdots N)$ 。

[0018] 步骤6:借助频谱提取技术,根据标量衍射理论,数值模拟光波经全息图 H_0 和 H_i 的衍射传播过程,分别对相应物光波进行数值重建,得到放置样品前后两物光波的相位差分布 $\Delta\phi_{01}(x, y)$ 、 $\Delta\phi_{02}(x, y)$ 。根据式(1)与式(2),样品的二维折射率分布可表示为

$$[0019] \quad n_2(x, y) = n_1 \sqrt{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta \tan^2 \left[\arctan \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - 1}}{n_1 \cos \theta} - \frac{1}{2} \Delta\phi_{01}(x, y) \right]}, \quad (3)$$

[0020] 厚度分布可表示为

$$[0021] \quad h(x, y) = \frac{\Delta\phi_{02}(x, y)\lambda}{2\pi[n_2(x, y) - 1]} \quad (4)$$

[0022] 有益效果

[0023] 本发明提出的二维折射率分布与三维形貌同时动态测量方法,利用了数字全息显微术全场、高分辨率及动态测量的优点,将短边抛光的道威棱镜引入测量光路,实现全内反射数字全息显微光路与透射式数字全息显微光路的集成。通过同时记录两组数字全息图,并经过适当的数值计算与数学运算,便可实现对透明/半透明样品的二维折射率分布与三维形貌的同时动态测量。所述测量方法无需额外的填充溶液,可测量的样品可以是透明/半透明的液体或固体介质。

附图说明

[0024] 图1:是本发明同时动态测量二维折射率分布与三维形貌的光路图;

[0025] 图中:1-半导体激光二极管泵浦固体激光器,2-光纤耦合器,3-第一光纤分束器,4-第二光纤分束器,5-第一光纤,6-第二光纤,7-第三光纤,8-第四光纤,9-第一准直透镜,10-半波片,11-第一偏振分光棱镜,12-第一反射镜,13-第二反射镜,14-道威棱镜,15-样品,16-第一显微物镜,17-第二显微物镜,18-第三反射镜,19-第四反射镜,20-第一分光棱镜,21-成像透镜,22-孔径光阑,23-第二准直透镜,24-第三准直透镜,25-第二偏振分光棱镜,26-第二分光棱镜,27-图像采集器件。

具体实施方式

[0026] 现结合实施例、附图对本发明作进一步描述:

[0027] 本发明涉及的一种二维折射率分布与三维形貌同时动态测量的光路系统如图1所示,包括:半导体激光二极管泵浦固体激光器1,光纤耦合器2,第一光纤分束器3,第二光纤分束器4,第一光纤5,第二光纤6,第三光纤7,第四光纤8,第一准直透镜9,半波片10,第一偏振分光棱镜11,第一反射镜12,第二反射镜13,道威棱镜14,样品15,第一显微物镜16,第二显微物镜17,第三反射镜18,第四反射镜19,第一分光棱镜20,成像透镜21,孔径光阑22,第二准直透镜23,第三准直透镜24,第二偏振分光棱镜25,第二分光棱镜26,图像采集器件27。

[0028] 所述一种二维折射率分布与三维形貌同时动态测量方法的工作流程如下:

[0029] 自半导体激光二极管泵浦固体激光器1(波长为532nm)发出的线偏振光经光纤耦合器2耦合,通过第一光纤分束器3将光束分为第一光束和第二光束。

[0030] 其中,第一光束经第一准直透镜9、半波片10后变为沿45°方向偏振的平行光,该平行光经第一偏振分光棱镜11分为竖直偏振的反射光束和水平偏振的透射光束:反射光束经第一反射镜12反射后,从道威棱镜14(ZK9玻璃, $n_1=1.6204$)的一个斜边表面以45°角入射,并在其长边表面中心处发生全内反射($\theta=70.8728^\circ$),再经第一显微物镜16预放大后作为第一物光波,然后被第三反射镜18反射后到达第一分光棱镜20;透射光束经第二反射镜13反射后,从道威棱镜14的短边表面中心入射,进而自长边表面中心出射,以透射方式照明样品15,再经第二显微物镜17预放大后作为第二物光波,然后被第四反射镜19反射后到达第一分光棱镜20。两物光波经成像透镜21、孔径光阑22及第二分光棱镜26后成像于图像采集器件27(像素数:1600H×1200V,像素尺寸:4.4μm)上。

[0031] 第二光束经第二光纤分束器4分为两束,两光束分别经第二、三准直透镜23、24后变为平行光,再分别经第二偏振分光棱镜25反射、透射后作为竖直、水平偏振的第一、二参考光波,然后经第二分光棱镜26反射后以不同的夹角分别与同偏振方向的第一、二物光波干涉,形成包含复合频谱的离轴数字全息图。

[0032] 在道威棱镜14的长边表面中心放置样品之前,拍摄一幅全息图作为参考数字全息图 H_0 ;紧贴道威棱镜14的长边表面中心放置样品后,依次连续拍摄 N 幅反映样品二维折射率分布 $n_2(x,y)$ 与厚度分布(形貌) $h(x,y)$ 动态变化的系列全息图 $H_i(i=1,2,3\cdots N)$;利用数值重建算法,分别得到样品动态变化过程中两组物光波的系列附加相移(相位变化)分布 $\Delta\phi_{01i}(x,y)$ 、 $\Delta\phi_{02i}(x,y)$;根据全内反射物光波的附加相移分布与样品二维折射率分布的关系(式(3)),以及透射物光波的附加相位变化分布与样品二维折射率、厚度分布(形貌)的关系(式(4)),最终得到被测样品二维折射率分布与厚度分布(形貌)的动态测量结果。

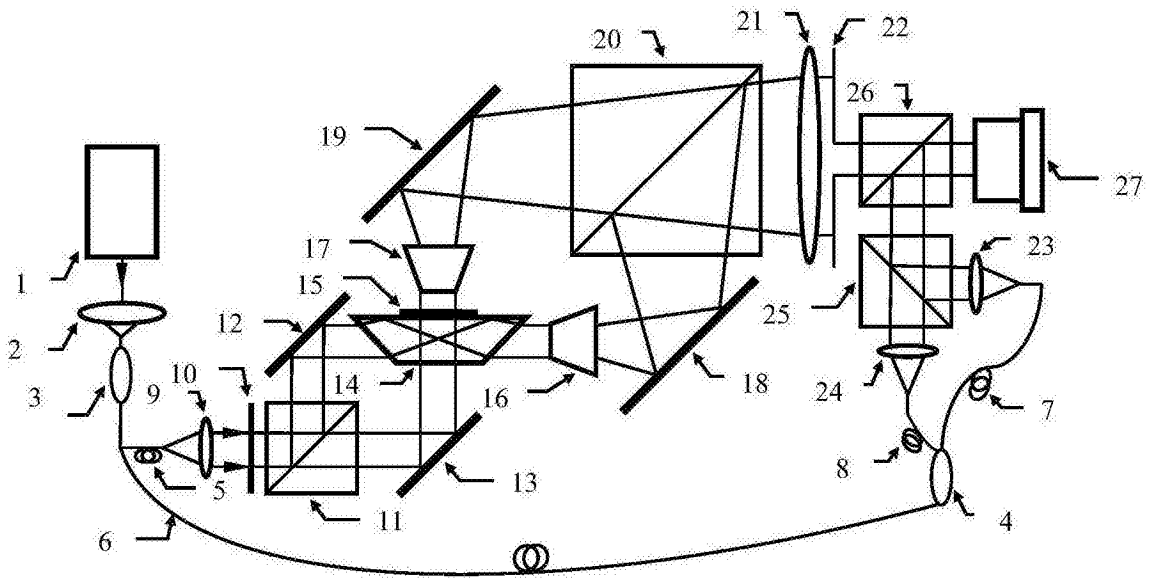


图1