



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113568153 B

(45) 授权公告日 2021.12.21

(21) 申请号 202111134261.9

G02B 21/04 (2006.01)

(22) 申请日 2021.09.27

G02B 21/36 (2006.01)

G01B 11/24 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113568153 A

(43) 申请公布日 2021.10.29

(73) 专利权人 板石智能科技(武汉)有限公司

地址 430000 湖北省武汉市东湖开发区关山一路1号华中曙光软件园恒隆大楼F幢207号(自贸区武汉片区)(一址多照)

(72) 发明人 吴征宇

(74) 专利代理机构 武汉智嘉联合知识产权代理事务所(普通合伙) 42231

代理人 黄君军

(51) Int.Cl.

G02B 21/02 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 101021607 A, 2007.08.22

CN 101063743 A, 2007.10.31

CN 101206300 A, 2008.06.25

CN 209044164 U, 2019.06.28

CN 104345438 A, 2015.02.11

CN 104345438 A, 2015.02.11

CN 209690601 U, 2019.11.26

JP H0756084 A, 1995.03.03

JP 2001108897 A, 2001.04.20

US 3652151 A, 1972.03.28

CN 109683282 A, 2019.04.26

CN 205449795 U, 2016.08.10

审查员 徐红梅

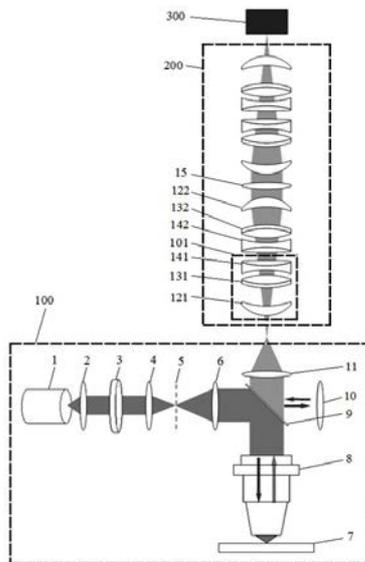
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

一种显微成像设备以及纳米尺度三维形貌测量系统

(57) 摘要

本申请涉及一种显微成像设备以及纳米尺度三维形貌测量系统,显微成像设备包括显微镜、4F系统以及相机;所述4F系统包括两个透镜组以及电控变焦透镜;两个所述透镜组分别为第一透镜组和第二透镜组;两个所述透镜组均为反远距结构的傅里叶变换物镜;所述显微镜的镜片、第一透镜组、电控变焦透镜、第二透镜组以及相机的镜片依次设置于同一光轴上;所述第一透镜组以及所述第二透镜组对称设置于所述电控变焦透镜两侧;所述显微镜的像平面位于所述第一透镜组的前焦面,所述电控变焦透镜位于所述第一透镜组的后焦面以及所述第二透镜组的前焦面,所述相机位于所述第二透镜组的后焦面。本申请具有成像像差小、效率高的技术效果。



1. 一种显微成像设备,其特征在于,包括显微镜、4F系统以及相机;所述4F系统包括两个透镜组以及电控变焦透镜;两个所述透镜组分别为第一透镜组和第二透镜组;两个所述透镜组均为反远距结构的傅里叶变换物镜;

所述显微镜的镜片、第一透镜组、电控变焦透镜、第二透镜组以及相机的镜片依次设置于同一光轴上;所述第一透镜组以及所述第二透镜组对称设置于所述电控变焦透镜两侧;所述显微镜的像平面位于所述第一透镜组的前焦面,所述电控变焦透镜位于所述第一透镜组的后焦面以及所述第二透镜组的前焦面,所述相机位于所述第二透镜组的后焦面;

所述透镜组包括两个对称单元;

所述对称单元包括正弯月透镜、双胶合正透镜以及双胶合负透镜;所述正弯月透镜、双胶合正透镜、双胶合负透镜依次设置于同一光轴上,所述正弯月透镜的凹面朝向所述双胶合正透镜设置,所述双胶合正透镜的冕牌玻璃以及所述双胶合负透镜的冕牌玻璃均朝向所述正弯月透镜设置;

两个所述对称单元对称设置,两个对称单元的正弯月透镜位于外侧。

2. 根据权利要求1所述的显微成像设备,其特征在于,所述显微镜包括依次同轴设置的光源、聚光镜、滤光片、第一中继镜片、孔径光阑、第二中继镜片以及分光镜,所述分光镜的反射光路上设置有物镜,所述分光镜的一个分光光路上设置有反射镜,另一个分光光路上依次设置有成像筒镜、所述4F系统以及所述相机。

3. 一种纳米尺度三维形貌测量系统,其特征在于,包括如权利要求1-2任一所述的显微成像设备,还包括计算机设备;

所述显微成像设备用于沿光轴采集多幅不同焦距的样品图像,通过所述电控变焦透镜进行焦距调节;

所述计算机设备用于获取所述样品图像,并基于所述样品图像进行三维形貌测量。

4. 根据权利要求3所述的纳米尺度三维形貌测量系统,其特征在于,基于所述样品图像进行三维形貌测量,具体为:

基于所述样品图像进行差分估计得到光强轴向微分;

根据光学能量传输方程求得相位分布;

根据所述相位分布求得样品的深度,构建出样品的三维形貌。

5. 根据权利要求4所述的纳米尺度三维形貌测量系统,其特征在于,基于所述样品图像进行差分估计得到光强轴向微分,具体为:

所述样品图像包括一幅正向离焦图像、一幅聚焦图像以及一幅反向离焦图像,进行差分估计;

$$\frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} \approx \frac{I(\mathbf{r}, \Delta z) - I(\mathbf{r}, -\Delta z)}{2\Delta z};$$

其中, $\frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z}$ 为光强轴向微分, $I(\mathbf{r}, \Delta z)$ 为正向离焦图像的光强分布, $I(\mathbf{r}, -\Delta z)$ 为反

向离焦图像的光强分布, Δz 为离焦距离;

$$\Delta z = \frac{f^2(f_{ETL} + f_{OL} - d)}{f_{ETL}f_{OL}};$$

其中, f_{ETL} 为电控变焦透镜的焦距, f 为透镜组的焦距, f_{OL} 为电控变焦透镜中凹透镜的焦距, d 为凹透镜和电控变焦透镜之间的距离。

6. 根据权利要求3所述的纳米尺度三维形貌测量系统, 其特征在于, 通过所述电控变焦透镜进行焦距调节, 具体为:

选择电控变焦透镜电流与焦距成比例的变化区域进行焦距调节。

7. 根据权利要求4所述的纳米尺度三维形貌测量系统, 其特征在于, 基于所述样品图像进行差分估计得到光强轴向微分, 还包括:

进行多次差分估计, 计算多次差分估计得到的光强轴向微分的平均值作为最终的光强轴向微分。

8. 根据权利要求4所述的纳米尺度三维形貌测量系统, 其特征在于, 根据光学能量传输方程求得相位分布, 具体为:

光学能量传输方程为:

$$-k \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} = \nabla \cdot (I(\mathbf{r}) \nabla \phi(\mathbf{r}));$$

其中, k 为波数, $\frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z}$ 为光强的轴向微分, $I(\mathbf{r})$ 为光强分布, ∇ 为作用在 \mathbf{r} 平面的哈密顿算符, $\phi(\mathbf{r})$ 为相位分布;

求得相位分布:

$$\phi(\mathbf{r}) = -k \nabla^{-2} \nabla \cdot \left(I^{-1}(\mathbf{r}) \nabla \nabla^{-2} \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} \right);$$

其中, ∇^{-2} 表示逆拉普拉斯算符, $I^{-1}(\mathbf{r})$ 为光强分布的逆矩阵。

9. 根据权利要求4所述的纳米尺度三维形貌测量系统, 其特征在于, 根据所述相位分布求得样品的深度, 构建出样品的三维形貌, 具体为:

对相位分布中任意两点 $\phi(m_1, n_1)$ 和 $\phi(m_2, n_2)$, 计算两点间的相位差值 $\Delta\phi$, 进而计算两点间的高度差值:

$$\Delta h = \frac{\lambda \Delta\phi}{2\pi};$$

其中, Δh 为高度差值, λ 为波长;

结合各点间的高度差值得到样品表面的相对高度信息, 即样品表面的三维形貌信息。

一种显微成像设备以及纳米尺度三维形貌测量系统

技术领域

[0001] 本申请涉及显微成像技术领域,尤其是涉及一种显微成像设备以及纳米尺度三维形貌测量系统。

背景技术

[0002] 在工业制造领域中,物体三维形貌信息对制造过程控制具有重要意义。光线照射在物体上,物体的三维形貌会影响光波的波前与相位分布。因此,通过计算相位便可以获得物体的深度信息。然而,当前所有的光学信号探测设备,如互补金属氧化物半导体型和电荷耦合器件型相机等设备只能记录光强,不能记录相位信息。因此,必须采用特定的方法从强度探测信号中解调出相位信息。光学能量传输方程技术是一种典型的光学相位提取方法。不同于传统的基于光学干涉技术的相位测量方法,光学能量传输方程本质上是一个偏微分方程,它描述了近轴近似状态下光的相位和强度之间满足的一阶偏导关系。从原理上,可以用多个轴向位移平面上的光场强度,求解光学能量传输方程,即可获得相位信息。这使得基于光学能量传输方程的光学系统设计比基于光学干涉方法的紧凑和简洁的多。

[0003] 目前大多数基于光学能量传输方程的光学成像系统都针对透明或半透明物体,而不适用不透明物体,因此有必要构建一种反射式相位成像系统,用以获取不透明物体的多焦点图像,进而应用基于光学能量传输方程的方法获取物体反射相位以重建待测物体的三维形貌信息。

[0004] 然而,需要指出的是,传统的基于光学能量传输方程的相位测量系统,其往往依赖于电控位移台,通过机械式地移动样品或相机来获取多幅光强图,这极大地降低了系统成像速率,进而难以将光学成像系统运用在工业在线测量场景中。尽管最近有研究报道基于可调变焦透镜的高速相位测量系统,但是其阿贝成像系统中的中继系统,即典型的4F系统对成像质量影响比较大,难以实现纳米量级的深度测量。这是因为,传统的4F系统与可调变焦透镜的组合未能综合考虑系统的像差因素,当可调变焦透镜进行形貌变形以产生不同焦距的同时,其引入的系统像差变化难以减小并消除。此外,4F系统自身的像差会与变焦透镜的相差叠加耦合在一起,进一步降低了相位成像系统的成像质量,进而难以获得高精度的相位测量结果。因此,必须从整体成像系统的角度,设计一套新的光学成像系统以适配可调变焦透镜,以最大限度地降低系统像差,提高相位测量的精度。

发明内容

[0005] 有鉴于此,本申请提供一种显微成像设备以及纳米尺度三维形貌测量系统,用以解决相位测量显微成像像差大、效率低的技术问题。

[0006] 为了解决上述问题,第一方面,本发明提供一种显微成像设备,包括显微镜、4F系统以及相机;所述4F系统包括两个透镜组以及电控变焦透镜;两个所述透镜组分别为第一透镜组和第二透镜组;两个所述透镜组均为反远距结构的傅里叶变换物镜;

[0007] 所述显微镜的镜片、第一透镜组、电控变焦透镜、第二透镜组以及相机的镜片依次

设置于同一光轴上；所述第一透镜组以及所述第二透镜组对称设置于所述电控变焦透镜两侧；所述显微镜的像平面位于所述第一透镜组的前焦面，所述电控变焦透镜位于所述第一透镜组的后焦面以及所述第二透镜组的前焦面，所述相机位于所述第二透镜组的后焦面。

[0008] 可选的，所述透镜组包括两个对称单元；

[0009] 所述对称单元包括正弯月透镜、双胶合正透镜以及双胶合负透镜；所述正弯月透镜、双胶合正透镜、双胶合负透镜依次设置于同一光轴上，所述正弯月透镜的凹面朝向所述双胶合正透镜设置，所述双胶合正透镜的冕牌玻璃以及所述双胶合负透镜的冕牌玻璃均朝向所述正弯月透镜设置；

[0010] 两个所述对称单元对称设置，两个对称单元的正弯月透镜位于外侧。

[0011] 可选的，所述显微镜包括依次同轴设置的光源、聚光镜、滤光片、第一中继镜片、孔径光阑、第二中继镜片以及分光镜，所述分光镜的反射光路上设置有物镜，所述分光镜的一个分光光路上设置有反射镜，另一个分光光路上依次设置有成像筒镜、所述4F系统以及所述相机。

[0012] 第二方面，本申请还提供一种纳米尺度三维形貌测量系统，包括显微成像设备，还包括计算机设备；

[0013] 所述显微成像设备用于沿光轴采集多幅不同焦距的样品图像，通过所述电控变焦透镜进行焦距调节；

[0014] 所述计算机设备用于获取所述样品图像，并基于所述样品图像进行三维形貌测量。

[0015] 可选的，基于所述样品图像进行三维形貌测量，具体为：

[0016] 基于所述样品图像进行差分估计得到光强轴向微分；

[0017] 根据光学能量传输方程求得相位分布；

[0018] 根据所述相位分布求得样品的深度，构建出样品的三维形貌。

[0019] 可选的，基于所述样品图像进行差分估计得到光强轴向微分，具体为：

[0020] 所述样品图像包括一幅正向离焦图像、一幅聚焦图像以及一幅反向离焦图像，进行差分估计；

$$[0021] \quad \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} \approx \frac{I(\mathbf{r}, \Delta z) - I(\mathbf{r}, -\Delta z)}{2\Delta z};$$

[0022] 其中， $\frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z}$ 为光强轴向微分， $I(\mathbf{r}, \Delta z)$ 为正向离焦图像的光强分布，

$I(\mathbf{r}, -\Delta z)$ 为反向离焦图像的光强分布， Δz 为离焦距离；

$$[0023] \quad \Delta z = \frac{f^2(f_{ETL} + f_{OL} - d)}{f_{ETL}f_{OL}};$$

[0024] 其中， f_{ETL} 为电控变焦透镜的焦距， f 为透镜组的焦距， f_{OL} 为电控变焦透镜中凹透镜的焦距， d 为凹透镜和电控变焦透镜之间的距离。

[0025] 可选的,通过所述电控变焦透镜进行焦距调节,具体为:

[0026] 选择电控变焦透镜电流与焦距成比例的变化区域进行焦距调节。

[0027] 可选的,基于所述样品图像进行差分估计得到光强轴向微分,具体为:

[0028] 进行多次差分估计,计算多次差分估计得到的光强轴向微分的平均值作为最终的光强轴向微分。

[0029] 可选的,根据光学能量传输方程求得相位分布,具体为:

[0030] 光学能量传输方程为:

$$[0031] \quad -k \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} = \nabla \cdot (I(\mathbf{r}) \nabla \phi(\mathbf{r}));$$

[0032] 其中, k 为波数, $\frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z}$ 为光强的轴向微分, $I(\mathbf{r})$ 为光强分布, ∇ 为作用在 \mathbf{r} 平

面的哈密顿算符, $\phi(\mathbf{r})$ 为相位分布;

[0033] 求得相位分布:

$$[0034] \quad \phi(\mathbf{r}) = -k \nabla^{-2} \nabla \cdot \left(I^{-1}(\mathbf{r}) \nabla \nabla^{-2} \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} \right);$$

[0035] 其中, ∇^{-2} 表示逆拉普拉斯算符, $I^{-1}(\mathbf{r})$ 为光强分布的逆矩阵。

[0036] 可选的,根据所述相位分布求得样品的深度,构建出样品的三维形貌,具体为:

[0037] 对相位分布中任意两点 $\phi(m_1, n_1)$ 和 $\phi(m_2, n_2)$, 计算两点间的相位差值 $\Delta\phi$, 进而计算两点间的高度差值:

$$[0038] \quad \Delta h = \frac{\lambda \Delta \phi}{2\pi};$$

[0039] 其中, Δh 为高度差值, λ 为波长;

[0040] 结合各点间的高度差值得到样品表面的相对高度信息,即样品表面的三维形貌信息。

[0041] 本发明的有益效果是:本发明对4F系统进行优化,采用电控变焦透镜进行调焦,不含有机移动部件,结构简单,测量精确;采用对称结构的反远距组结构的透镜组实现傅里叶变换,优化设计的4F系统对显微镜成像几乎无损,能够实现高质量的光强图像中继,所成显微镜像的像差极小,因此可以实现物体三维形貌的高质量快速成像;同时4F系统和可调变焦透镜所形成的系统可直接与传统明场显微镜继承,无需额外的设备,相比较于基于光学干涉相位测量的技术而言,能够实现最为紧凑的光学结构设计。

附图说明

[0042] 图1为本申请提供的显微成像设备一实施例的原理图;

[0043] 图2为本申请提供的显微成像设备一实施例的结构示意图;

[0044] 图3为本申请提供的显微成像设备一实施例的调制传递函数仿真结果图;

[0045] 图4为本申请提供的显微成像设备一实施例的点列图仿真结果图；

[0046] 图5为本申请提供的显微成像设备一实施例的成像效果仿真结果图。

具体实施方式

[0047] 下面结合附图来具体描述本申请的优选实施例,其中,附图构成本申请一部分,并与本申请的实施例一起用于阐释本申请的原理,并非用于限定本申请的范围。

[0048] 在本申请的描述中,“多个”的含义是两个或两个以上,除非另有明确具体的限定。

[0049] 在本文中提及“实施例”意味着,结合实施例描述的特定特征、结构或特性可以包含在本申请的至少一个实施例中。在说明书中的各个位置出现该短语并不一定均是指相同的实施例,也不是与其它实施例互斥的独立的或备选的实施例。本领域技术人员显式地和隐式地理解的是,本文所描述的实施例可以与其它实施例相结合。

[0050] 本申请提供了一种显微成像设备以及纳米尺度三维形貌测量系统,以下分别进行详细说明。

[0051] 首先,如图1、图2所示,本申请实施例提供了一种显微成像设备,包括显微镜100、4F系统200以及相机300;所述4F系统200包括两个透镜组以及电控变焦透镜15;两个所述透镜组分别为第一透镜组和第二透镜组;两个所述透镜组均为反远距结构的傅里叶变换物镜;

[0052] 所述显微镜100的镜片、第一透镜组、电控变焦透镜15、第二透镜组以及相机300的镜片依次设置于同一光轴上;所述第一透镜组以及所述第二透镜组对称设置于所述电控变焦透镜15两侧;所述显微镜100的像平面位于所述第一透镜组的前焦面,所述电控变焦透镜15位于所述第一透镜组的后焦面以及所述第二透镜组的前焦面,所述相机300位于所述第二透镜组的后焦面。

[0053] 本实施例提供的显微成像设备具体包括:显微镜100、第一透镜组、电控变焦透镜15、第二透镜组、相机300;显微镜100为反射式显微镜;所述第一透镜组、电控变焦透镜15、第二透镜组构成4F系统200,电控变焦透镜15位于第一透镜组的后焦面、第二透镜组的前焦面;显微镜100的像平面位于4F系统200第一透镜组的前焦面;相机300位于4F系统200第二透镜组的后焦面。本实施例在4F系统200设计上,有其特殊之处:两个透镜组采用反远距组结构实现傅里叶变换,且对称设置于电控变焦透镜15的两侧,这种对称形式的傅里叶变换物镜设计,天然消除畸变,提高成像质量,同时使用反远距组,使物镜的像方焦点距离相对物镜焦距缩小,减少光学处理系统的外形尺寸。

[0054] 本实施例与现有技术相比,其显著优点:(1)采用电控变焦透镜15进行调焦,不含有机械移动部件,相比于其它光学能量传输方程的方法,不需要任何机械移动装置,结构简单,测量精确;(2)不同于现有光学能量传输方程计算成像方法,优化设计的4F系统200对显微镜100成像几乎无损,能够实现高质量的光强图像中继,所成显微镜100像的像差极小,因此可以实现物体三维形貌的高质量快速成像;(3)本发明的4F系统200和可调变焦透镜所形成的系统可直接与传统明场显微镜100继承,无需额外的设备。相比较于基于光学干涉相位测量的技术而言,能够实现最为紧凑的光学结构设计。

[0055] 如图1所示,在一实施例中,所述透镜组包括两个对称单元;

[0056] 所述对称单元包括正弯月透镜、双胶合正透镜以及双胶合负透镜;所述正弯月透

镜、双胶合正透镜、双胶合负透镜依次设置于同一光轴上,所述正弯月透镜的凹面朝向所述双胶合正透镜设置,所述双胶合正透镜的冕牌玻璃以及所述双胶合负透镜的冕牌玻璃均朝向所述正弯月透镜设置;

[0057] 两个所述对称单元对称设置,两个对称单元的正弯月透镜位于外侧。

[0058] 本实施例中4F系统200是由四片正弯月透镜、四片双胶合正透镜、四片双胶合负透镜组合而成的对称结构,其中两片正弯月透镜、两片双胶合正透镜、两片双胶合负透镜组合成一个对称的2F结构,这其中由一片弯月透镜、一片双胶合正透镜、一片双胶合负透镜组成一个对称单元,标准4F中继系统的频谱面上放置着电控变焦透镜15。

[0059] 具体的,如图1所示,以第一镜像组为例进行说明,第一镜像组包括第一对称单元和第二对称单元,第一对称单元101包括正弯月透镜121、双胶合正透镜131、双胶合负透镜141,第二对称单元包括正弯月透镜122、双胶合正透镜132、双胶合负透镜142,透镜组的两个焦面分别位于正弯月透镜121外侧以及正弯月透镜122外侧。

[0060] 正弯月透镜,凸面面对光源,以减小场曲,修正球差。双胶合正负透镜,冕牌玻璃靠近正弯月透镜放置,以矫正正弦差与球差,使用正负双胶合透镜组,在矫正正弦差和球差的同时,有效矫正轴外像差和像面弯曲。其余部分采取对称结构,如图1中所示,采用对称结构,有利于天然校正像面畸变。所有镜片设置于同一个光轴上,与显微镜100成像筒镜同轴放置。

[0061] 如图1所示,在一实施例中,所述显微镜100包括依次同轴设置的光源1、聚光镜2、滤光片3、第一中继镜片4、孔径光阑5、第二中继镜片6以及分光镜9,所述分光镜9的反射光路上设置有物镜8,所述分光镜的9一个分光光路上设置有反射镜10,另一个分光光路上依次设置有成像筒镜11、所述4F系统200以及所述相机300。

[0062] 本实施例选用奥林巴斯BX35M型显微镜100,具体由图1中455nm LED光源1,聚光镜2,滤光片3,第一中继镜片4、孔径光阑5,第二中继镜片6,分光镜9,物镜8,反射镜10,成像筒镜11组成。显微镜100上装有上述实施例中4F系统200。显微镜100上装有索雷博相机300,型号为Thorlabs CS165MU1,分辨率为 $1440\text{pixels}\times 1080\text{pixels}$, $3.45\mu\text{m}/\text{pixel}$,相机300实现图像采集。成像时物镜8的后焦面与成像筒镜11的前焦面重合,光源的光线穿过物镜8经样品7反射后经物镜8和成像筒镜11进入4F系统200,构成无穷远矫正成像系统,然后通过电控变焦透镜15调制后照射相机300,可以采集一系列强度图像。

[0063] 为了验证本实施例提供的显微成像设备的成像质量,对其成像进行了仿真,采用不同的调制传递函数MTF进行调制仿真,得到OTF模值仿真结果如图3所示,从OTF模值来看成像质量较好;点列图成像仿真图如图4所示,图4中分别对中心区、带区和边缘区进行了仿真成像,中心区、带区和边缘区分别对应像面 0.000mm 、 1.756mm 、 2.484mm ,仿真成像的光斑均落于艾利斑内,也说明了成像质量较好,艾利斑即图4中圆形部分所示。成像效果仿真结果如图5所示。

[0064] 本实施例还提供一种纳米尺度三维形貌测量系统,包括显微成像设备,还包括计算机设备;

[0065] 所述显微成像设备用于沿光轴采集多幅不同焦距的样品图像,通过所述电控变焦透镜进行焦距调节;

[0066] 所述计算机设备用于获取所述样品图像,并基于所述样品图像进行三维形貌测

量。

[0067] 计算机设备用于基于样品成像进行三维形貌构建,该计算机设备可以是移动终端、桌上型计算机、笔记本、掌上电脑及服务器等设备。

[0068] 在一实施例中,基于所述样品图像进行三维形貌测量,具体为:

[0069] 基于所述样品图像进行差分估计得到光强轴向微分;

[0070] 根据光学能量传输方程求得相位分布;

[0071] 根据所述相位分布求得样品的深度,构建出样品的三维形貌。

[0072] 本实施例是基于光学能量传输方程、电控变焦透镜、高性能阿贝成像光学透镜模组的定量相位成像系统。适用于对微纳米尺度物体的三维形貌进行高速、定量、实时性地测量。

[0073] 本实施例完成一次测量需要以下几个步骤:控制电控变焦透镜,沿光轴采集三幅图像,分别要求一张正向离焦图像,一张聚焦图像,一张反向离焦图像,并利用差分估计得到光强沿轴向的微分;根据光学能量传输方程求得相位分布;根据所得的相位分布,求得样品的深度,构建出样品的三维形貌。

[0074] 通过上述步骤可以精确得到物体引发的相位变化,从而保证重构得到的物体三维形貌的准确性,并且由于电控变焦透镜连续精确变化的特点,可以进行多步的差分估计,更加提高了计算成像的精度。

[0075] 在一实施例中,基于所述样品图像进行差分估计得到光强轴向微分,具体为:

[0076] 所述样品图像包括一幅正向离焦图像、一幅聚焦图像以及一幅反向离焦图像,进行差分估计;

$$[0077] \quad \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} \approx \frac{I(\mathbf{r}, \Delta z) - I(\mathbf{r}, -\Delta z)}{2\Delta z};$$

[0078] 其中, $\frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z}$ 为光强轴向微分, $I(\mathbf{r}, \Delta z)$ 为正向离焦图像的光强分布,

$I(\mathbf{r}, -\Delta z)$ 为反向离焦图像的光强分布, Δz 为离焦距离;

$$[0079] \quad \Delta z = \frac{f^2(f_{ETL} + f_{OL} - d)}{f_{ETL}f_{OL}};$$

[0080] 其中, f_{ETL} 为电控变焦透镜的焦距, f 为透镜组的焦距, f_{OL} 为电控变焦透镜中凹透镜的焦距, d 为凹透镜和电控变焦透镜之间的距离非图。

[0081] 在一实施例中,通过所述电控变焦透镜进行焦距调节,具体为:

[0082] 选择电控变焦透镜电流与焦距成比例的变化区域进行焦距调节。

[0083] 电控变焦透镜ETL根据电流变化来改变焦距,在某一段中会有电流与焦距成比例变化的区域,本实施例选取该区域来对 Δz 进行差分。

[0084] 在一实施例中,基于所述样品图像进行差分估计得到光强轴向微分,具体为:

[0085] 进行多次差分估计,计算多次差分估计得到的光强轴向微分的平均值作为最终的

光强轴向微分。

[0086] 进行多步的差分估计,提高差分估计的精度,进而提高成像精度。

[0087] 在一实施例中,根据光学能量传输方程求得相位分布,具体为:

[0088] 光学能量传输方程为:

$$[0089] \quad -k \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} = \nabla \cdot (I(\mathbf{r}) \nabla \phi(\mathbf{r}));$$

[0090] 其中, k 为波数, $\frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z}$ 为光强的轴向微分, $I(\mathbf{r})$ 为光强分布, ∇ 为作用在 \mathbf{r} 平

面的哈密顿算符, $\phi(\mathbf{r})$ 为相位分布;

[0091] 求得相位分布:

$$[0092] \quad \phi(\mathbf{r}) = -k \nabla^{-2} \nabla \cdot \left(I^{-1}(\mathbf{r}) \nabla \nabla^{-2} \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} \right);$$

[0093] 其中, ∇^{-2} 表示逆拉普拉斯算符, $I^{-1}(\mathbf{r})$ 为光强分布的逆矩阵。

[0094] 在一实施例中,根据所述相位分布求得样品的深度,构建出样品的三维形貌,具体为:

[0095] 对相位分布中任意两点 $\phi(m_1, n_1)$ 和 $\phi(m_2, n_2)$, 计算两点间的相位差值 $\Delta\phi$, 进而计算两点间的高度差值:

$$[0096] \quad \Delta h = \frac{\lambda \Delta\phi}{2\pi};$$

[0097] 其中, Δh 为高度差值, λ 为波长;

[0098] 结合各点间的高度差值得到样品表面的相对高度信息,即样品表面的三维形貌信息。

[0099] 以上所述,仅为本申请较佳的具体实施方式,但本申请的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本申请揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本申请的保护范围之内。

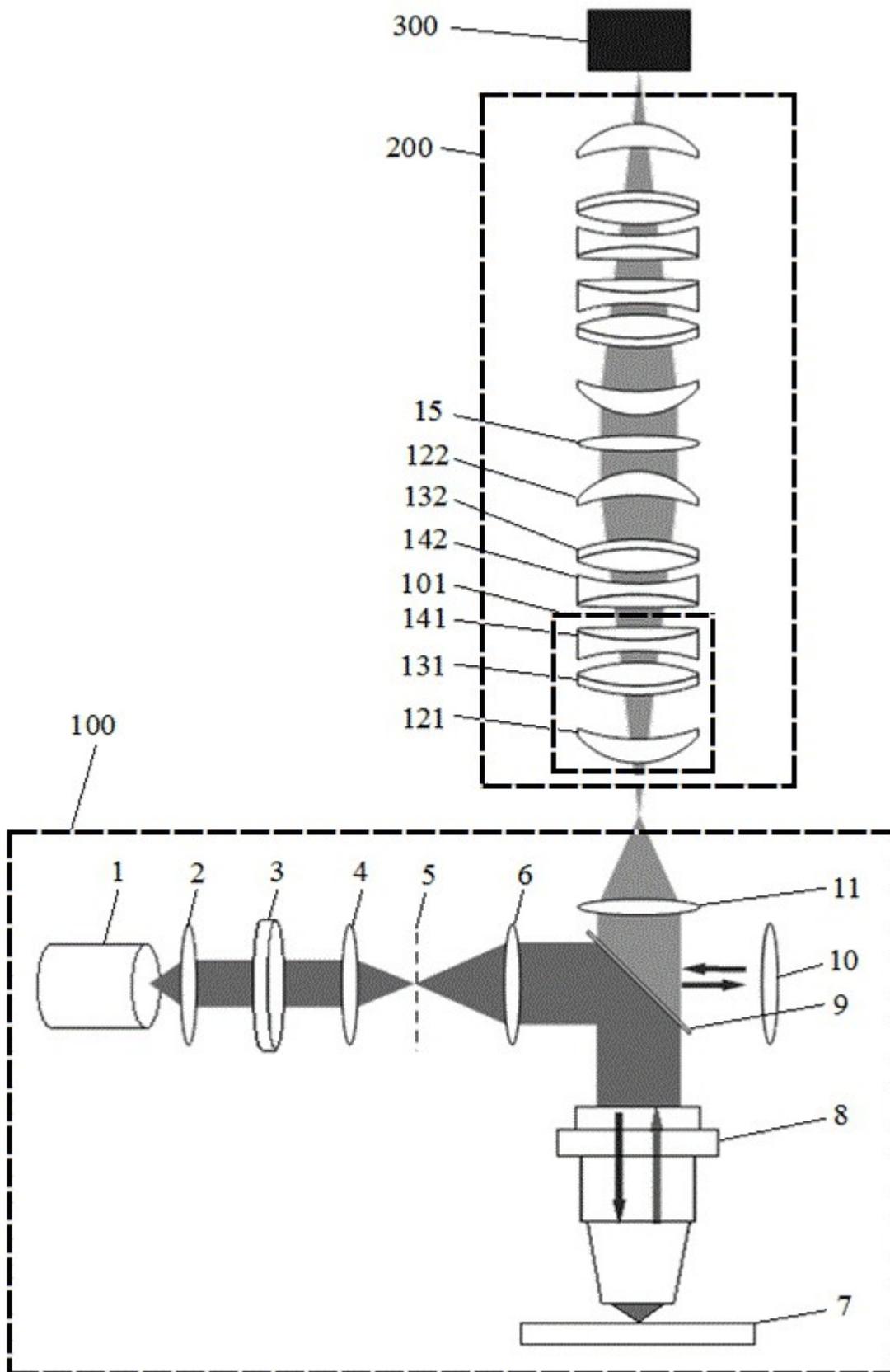


图1

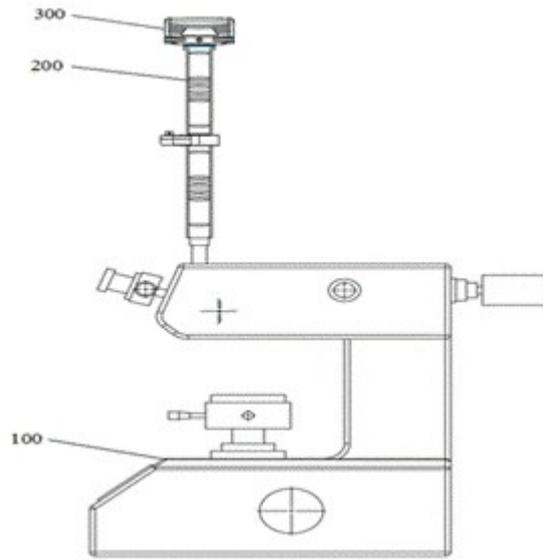


图2

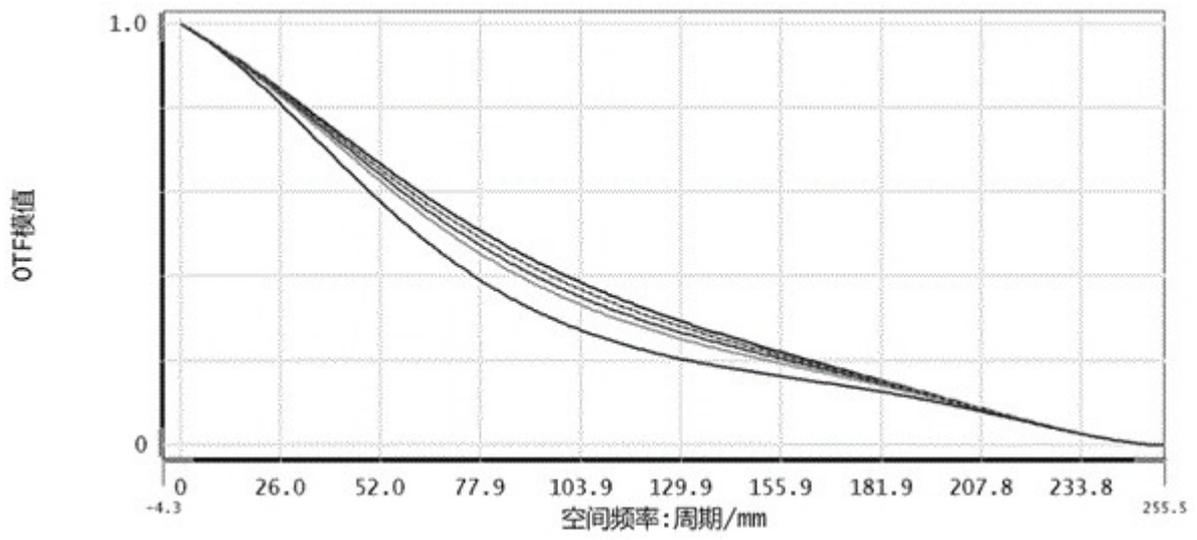


图3

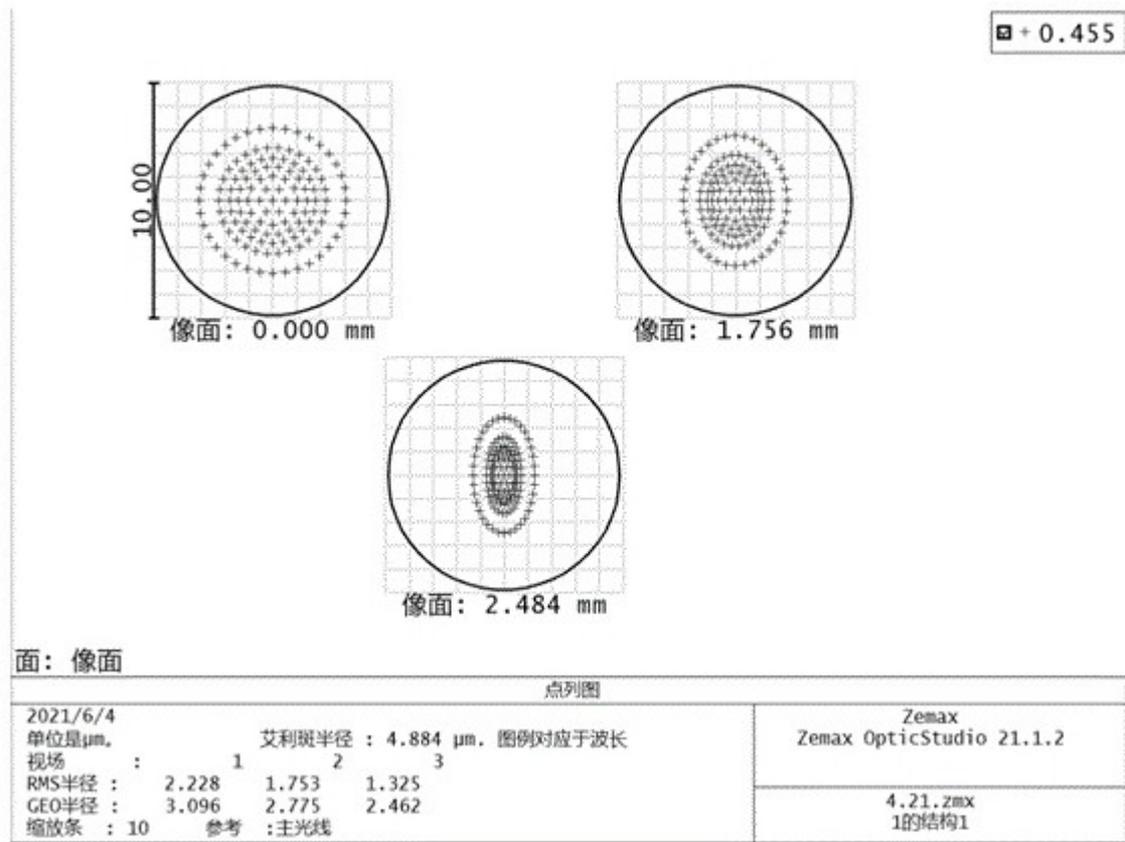


图4

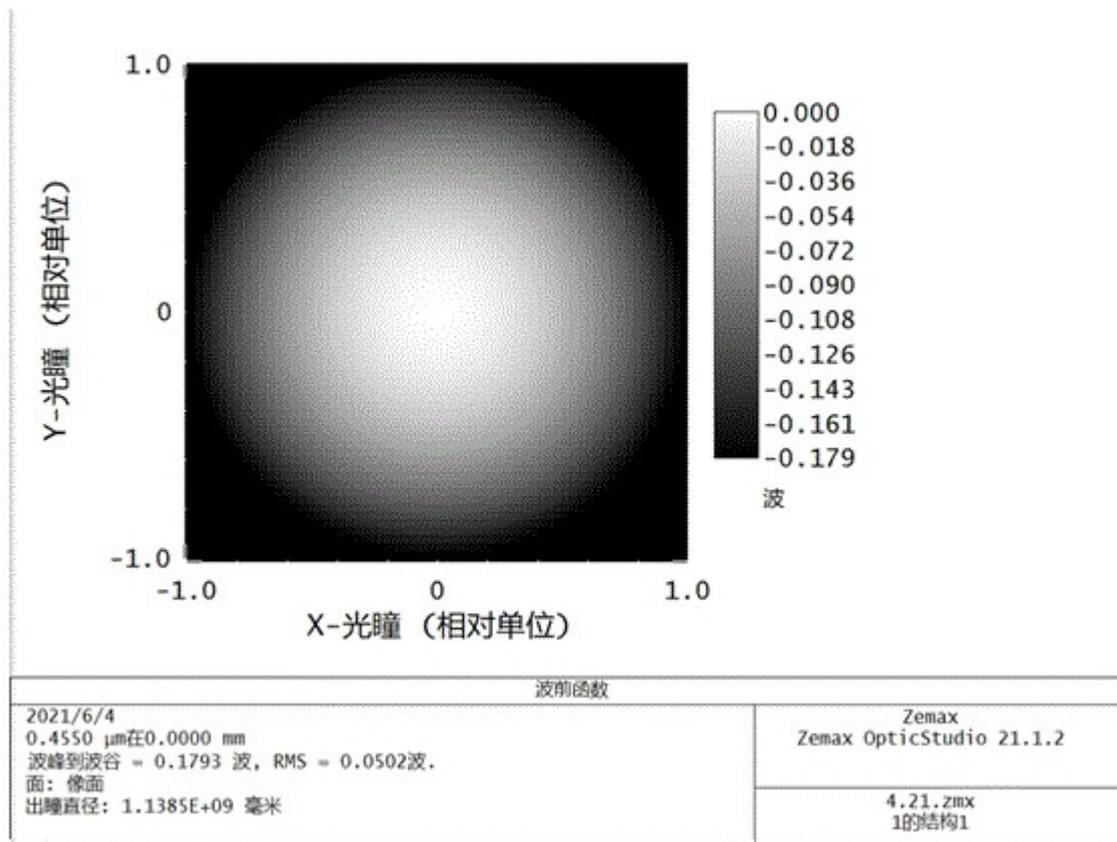


图5