



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102656420 B

(45) 授权公告日 2015. 06. 03

(21) 申请号 201080042357. 6

(22) 申请日 2010. 07. 20

(30) 优先权数据

0912799. 4 2009. 07. 23 GB

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012. 03. 22

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/GB2010/001379 2010. 07. 20

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/010092 EN 2011. 01. 27

(73) 专利权人 拉夫伯勒大学

地址 英国莱斯特郡

(72) 发明人 J·M·亨特利 P·D·鲁伊兹

T·威查纳尔科

(74) 专利代理机构 北京泛华伟业知识产权代理

有限公司 11280

代理人 王勇

(51) Int. Cl.

G01B 9/02(2006. 01)

G01B 11/24(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101076705 A, 2007. 11. 21, 全文.

US 2005/0001172 A1, 2005. 06. 06, 全文.

US 2007/0002327 A1, 2007. 01. 04, 全文.

CN 1623085 A, 2005. 06. 01, 全文.

US 2008/0123103 A1, 2008. 05. 29, 全文.

审查员 孙博思

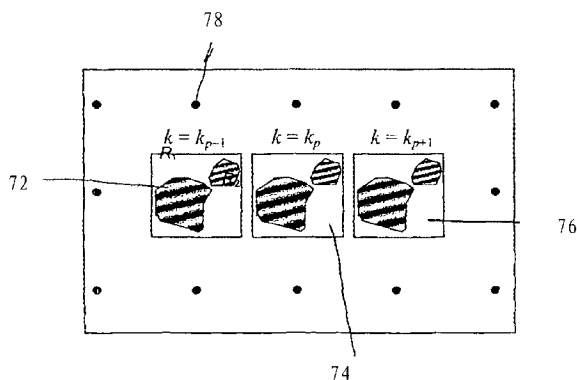
权利要求书2页 说明书11页 附图8页

(54) 发明名称

使用干涉法的用于二维光程分布的绝对测量的装置

(57) 摘要

一种用于二维光程分布的绝对测量的装置, 包括:光源 (4), 用于以具有多个波长的光照明物体 (26);干涉仪 (12), 用于形成物体的至少一部分的图像, 该图像包括宽带干涉图;高光谱成像器 (30), 与干涉仪光学连接, 用于将宽带干涉图光谱地分成多个窄带二维干涉图 (72, 74, 76);寄存器 (38), 用于空间地记录窄带干涉图;提取器, 用于从每个窄带干涉图中相应的像素中提取一维光强信号;以及计算器 (100), 用于针对对象上的每一点, 根据与该点关联的一维光强信号计算出频率。



1. 一种用于二维光程分布的绝对测量的装置,包括:  
光源,用于以具有多个波长的光照明物体;  
干涉仪,用于形成物体的至少一部分的图像,该图像包括宽带干涉图;  
高光谱成像器,与干涉仪光学连接,用于将宽带干涉图光谱地分成多个窄带二维干涉图;  
寄存器,用于空间地记录窄带干涉图;  
提取器,用于从每个窄带干涉图中相应的像素中提取一维光强信号;以及  
计算器,用于针对对象上的每一点,根据与该点关联的一维光强信号计算出频率。
2. 根据权利要求 1 的装置,其中光源包括与频率调制器操作地连接的窄带光源。
3. 根据权利要求 1 的装置,其中光源包括光频梳源。
4. 根据权利要求 1 或 2 的装置,其中高光谱成像器进一步地包括标准器。
5. 根据权利要求 1-3 之一的装置,其中高光谱成像器包括设置在干涉仪下游的色散元件。
6. 根据权利要求 1-3 之一的装置,其中高光谱成像器包括设置在干涉仪下游的已写入多个布拉格光栅的反射型立体全息图。
7. 根据权利要求 1-3 之一的装置,进一步地包括与高光谱成像器可操作地连接的数据处理器。
8. 根据权利要求 1-3 之一的装置,其中高光谱成像器包括光电探测器阵列。
9. 根据权利要求 1-3 之一的装置,包括用于照明物体的多个光源。
10. 根据权利要求 9 的装置,其中多个光源生成的光的带宽彼此之间光谱地隔开。
11. 一种用于二维光程分布的绝对测量的方法,包括下述步骤:  
通过将光透过干涉仪,以具有多个波长的光照明物体以生成物体的宽带干涉图;  
光谱地分隔宽带干涉图,以形成多个二维窄带干涉图;  
空间地记录二维干涉图;  
从每个窄带干涉图中相应的像素中提取一维光强信号;以及  
针对对象上的每一点、根据与该点关联的一维光强信号计算出频率。
12. 根据权利要求 11 的方法,其中以具有多个波长的光照明物体的步骤包括以高频率调制窄带光的步骤,以产生合成的或表观的宽带光源。
13. 根据权利要求 11 或 12 的方法,其中空间地记录二维干涉图的步骤包括在所有窄带干涉图中辨识样本上共同点的像素位置的步骤。
14. 根据权利要求 11 或 12 的方法,其中空间地记录二维干涉图的步骤包括形成二维窄带干涉图的三维光强分布的步骤。
15. 根据权利要求 14 的方法,其中形成二维窄带干涉图的三维光强分布的步骤包括根据干涉图的  $x$  和  $y$  坐标记录单个窄带干涉图,沿着  $k$  轴堆叠记录的干涉图以形成样本高光谱立体图像的步骤,其中  $k$  轴表示每一干涉图的波数。
16. 根据权利要求 11 或 12 的方法,其中从每一干涉图中相应的像素中提取一维光强信号的步骤包括通过一维傅立叶变换,测量沿着  $k$  轴穿过空间记录的干涉图的频率。
17. 根据权利要求 13 的方法,其中以具有多个波长的光照明物体的步骤包括以来自多个光源的宽带光照明物体以产生宽带光的多个带宽,其中每一带宽与其它带宽之间光谱地

隔开。

## 使用干涉法的用于二维光程分布的绝对测量的装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及用于二维光程分布的绝对测量的装置,以及,特别地但不唯一地涉及用于测量三维轮廓的这种装置。

### 背景技术

[0002] 使用干涉法测量绝对光程差是已知的。干涉法是一种用于测量物体和参考表面之间距离的完善的光学技术,精确度能达到光的波长的几分之一。虽然有些时候用在逐点或逐线的配置中,但其用于以干涉图的形式提供二维信息时是最强大的。商用的示例包括光源元件测试、使用散斑干涉法的位移场测量以及使用扫描白光干涉法(SWLI)的小尺寸机械和电子器件的轮廓测定法。

[0003] 用于根据双光束干涉仪的光强分布的一般方程由下式给出:

$$[0004] \quad I(x, y, k) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos[kz(x, y) + \phi_0] \quad (1)$$

[0005] 其中,  $x$  和  $y$  是图像平面坐标系,  $z$  是物体和参考表面之间的光程差,  $\phi_0$  是波之间的相位差,  $k$  是波数  $2\pi/\lambda$ , 其中  $\lambda$  是光束的波长, 以及  $I_0$  和  $I_1$  分别是直流 ( $I_0$ ) 和调制 ( $I_1$ ) 强度。如果使用例如激光器的窄带光源, 方程 (1) 可应用于不同类型的双光束干涉仪 (例如, 迈克尔逊、马赫-泽德, 等), 不论波前是平滑还是有散斑的。

[0006] 一种已知的分析使用单波长干涉仪生成的干涉图的方法是引入已知的相位差  $\phi_0$ 。通过随着时间改变  $\phi_0$ , 记录一系列干涉图, 可记下一组方程, 从中可提取出包络的相位分布  $\phi_w = W\{kz(x, y)\}$ , 其中  $W$  表示在  $-\pi$  至  $\pi$  的范围上包络给定的相位值的包络操作。

<sup>1</sup>另一方面, 真正的光程差函数  $z(x, y)$  与展开的相位分布  $\phi_u$  成正比:

$$[0007] \quad z(x, y) = \phi_u(x, y)/k \quad (2)$$

[0008] 反过来,  $\phi_u$  与  $\phi_w$  相关, 关系如下:

$$[0009] \quad \phi_u(x, y) = \phi_w(x, y) + 2\pi v(x, y) \quad (3)$$

[0010] 其中,  $v(x, y)$  是整数场变量。

[0011] 相位展开的过程, 即确定  $v(x, y)$  场, 对光程差沿着  $x$  和  $y$  平滑变化的情形是非常简单的。然而, 大多数时候并不是这种情况。一旦空间相位梯度超过每像素一个  $\pi$  值, 则仅基于相位数据,  $v(x, y)$  没有唯一的解, 因而相位展开是不可能的。即使相位场是连续的, 相位分布的展开对  $2\pi$  的常量整数倍也是不确定的。这被称为现有单波长干涉法的唯一性问题。

[0012] 第二难题是, 测量多个干涉图 (或光强图像) 和执行它们之间的相位漂移需要的有限的获取时间。外界扰动 (振动, 湍流, 等) 在施加的相位差中会导致大的误差, 因而在测量的相位上也导致了大的误差。<sup>2,3</sup>通过使用空间的 (与时间的相反) 相位漂移技术和脉冲激光照明, 可有效地消除第二难题。然而, 这些技术并没有克服唯一性问题。

[0013] 解决前述对于唯一性问题的部分措施是记录两个波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  上的干涉图。鉴于采用单波长干涉仪, 光程差对  $\lambda$  的整数倍是未知的, 采用双波长, 光程差对合成波长  $\lambda_s$  的整数倍是未知的, 合成波长由下式给出:

$$[0014] \quad \lambda_s = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2| \quad (4)$$

[0015] 虽然这种方法可将清楚的光程差提高一个量级,但在可见波长上这仍相应于亚  $10 \mu\text{m}$  级的清楚的光程差范围。通过减少  $|\lambda_1 - \lambda_2|$  增加  $\lambda_s$ , 则增加了展开误差的风险,因此需要更多数量的光强测量值来获得足够的信噪比。获得足够的点需要的时间意味着这种全场双波系统对外界扰动是非常敏感的。

[0016] 另一解决方案涉及在被称为波长扫描干涉法 (WSI) 的技术中使用可调激光源。使用视频摄像机来记录在一组离散波长上的干涉图序列。<sup>4-6</sup>与双波长干涉法相比,多波长方法提供了显著地更好的动态范围,但需要记录较长时间的序列仍使得该技术易受外界扰动。

[0017] 第三种解决方案被称为扫描白光干涉法 (SWLI),其构成了许多现有商用绝对光程长度测量仪器的原理。<sup>7-9</sup>在 SWLI 中,使用宽带照明灯照明样本。仅在样本上光程差接近于零的区域上观察到高可视度的条纹。通过机械地扫描样本或参考镜,最大条纹可视度的位置记录在像素基上,这允许了当视场内的所有点通过零光程差表面时,生成完全的光程差地图。这种技术的问题在于对昂贵的机械扫描装置的需要。另外,这种技术也易受到外界扰动的影响。

## 发明内容

[0018] 根据本发明的第一方面,提供用于二维光程分布绝对测量的装置,其包括:

[0019] 光源,用于以具有多个波长的光照明物体;

[0020] 干涉仪,用于形成物体的至少一部分的图像,该图像包括宽带干涉图;

[0021] 高光谱成像器,与干涉仪光学连接,以将宽带干涉图光谱地分隔成多个窄带二维干涉图;

[0022] 寄存器,用于空间地记录窄带干涉图;

[0023] 提取器,用于从每个窄带干涉图中相应的像素中提取一维光强信号;以及

[0024] 计算器,用于针对物体上的每一点,根据与该点关联的一维光强信号计算出频率。

[0025] 根据本发明的第二方面,提供用于测量物体的三维形状的装置,该装置包括根据本发明第一方面的装置。

[0026] 因而,本发明提供了适于以具有多个波长的光同时照明待测物体的 2-D 干涉仪。随后,采用构成本发明一部分的高光谱成像系统分隔出不同的波长带宽。

[0027] 本文中使用的术语“高光谱成像器”描述用于执行高光谱成像的装置。

[0028] 本文中使用的术语“高光谱成像”描述同时获得同一区域在多个窄的、连续的频带上的图像的过程。

[0029] 通过高光谱成像过程获得的高光谱数据包括多个连续的频带。高光谱成像器可用于获得包括多个连续光谱带的高光谱数据。

[0030] 由于入射光中包含有多个波长,上文提及的唯一性问题得到了解决。此外,由于以具有多个波长的光同时照明待测物体,在单次照明中即可测定物体表面的轮廓,在实践中这消除或减弱了外界扰动对测量值的影响。

[0031] 通过本发明,可产生表示被照明的物体表面上的点的多个二维窄带干涉图。

[0032] 如果照明的物体是光学平滑的,由于对生成的每个干涉图都使用了窄带宽照明,

产生的干涉图将包括条纹。

[0033] 如果物体是光学粗糙的,则可见一散斑场,而不是干涉条纹。这是由于反射光的初相位是随机的。

[0034] 在每种情况下,一窄带干涉图和下一干涉图上给定像素上的干涉图相位差为与该像素上的  $z$  值成正比的量。

[0035] 光源可包括适于以具有连续宽带光谱中的多个波长的光照明物体的宽带光源。

[0036] 在另一实施例中,光源可包括与频率调制器操作地连接的宽带光源。

[0037] 在本发明其它的实施例中,光源可包括光频梳源。光频梳定义为包含多个窄谱线的光。通常,窄谱线在频率上均匀地间隔开,但是在一些实施例中,窄谱线在频率上也可不均匀地间隔开。

[0038] 本发明的一个实施例中,高光谱成像器包括适于在多个相邻模式上同时操作的锁模激光器。通过以这种方式操作激光器,可生成光频梳。

[0039] 在本发明的其它实施例中,宽带光源可包括波长可调的窄带光源,其可操作地与高频调制器连接,例如高频阶跃函数发生器。通过对波长可调窄带光源的波长进行高频地阶跃 (stepping),可产生合成的、或表观的光频梳源。在本发明的这种实施例中,调制器可适于产生比物体被照明的时间的倒数高的频率。此外,调制器,例如阶跃函数发生器,可适于在物体被照明或记录宽带干涉图需要的时间期间阶跃通过需要的波长。

[0040] 具有包括光频梳源的光源的优点是,仅产生需要频率上的光。

[0041] 因此可以理解,在本说明书中,术语“宽带光源”可被解释为包括与频率调制器可操作地连接的窄带光源,其中频率调制器适于以高频调节窄带光源的波长。例如,曝光时间为 1ms,则几 KHz 或更多的调制频率可满足需求。

[0042] 在本发明的实施例中,光源包括产生具有连续波长带宽中的多个波长的光的宽带光源,高频成像器可进一步包括标准器。标准器作为梳滤波器,使得一组在波数上均匀隔开的离散波长进入高频成像系统。

[0043] 在上文描述的产生光谱梳的实施例中,装置适于将宽带干涉图光谱地切分 (slice) 并生成多个窄带二维干涉图。光谱切分可被描述为在用于照明物体的光的光谱分布中制造非连续。然后同一波长、但来自不同空间位置的光被放置在光谱分布中所制造的间隙之间。

[0044] 在本发明可选的实施例中,高光谱成像器可包括取样器,而不产生光谱梳,用以对宽带干涉图的区域进行空间取样和分隔,输入至高光谱成像器的不同部分上。

[0045] 取样器可包括例如一组透镜。在其它实施例中,取样器可包括一组光纤。在另外的实施例中,装置可包括一组镜子。

[0046] 在所有这些实施例中,例如个别透镜的取样器元件的尺寸小于物体上感兴趣的区域。

[0047] 在本发明的这种实施例中,任何高光谱成像器可用来图像切分 (imageslice) 宽带干涉图。图像切分可被认为是光在物体成像面上的空间分布中制造非连续的过程。不同波长、但来自同一空间位置的光被放置在空间分布中所产生的间隙之间。

[0048] 有关整数场光谱学的进一步的信息可参见 J.Allington Smith 著的“Basic principles of integral field spectroscopy(整数场光谱学的基本原理)”,《新天文学》

期刊 (New Astronomy Reviews)50 244-251(2006)、LiangGao, Robert T.Kester, Nathan Hagen 及 Tomasz S.Tkaczyk 著“Snapshot Image Mapping Spectrometer(IMS)with high sampling density forhyperspectral microscopy(用于高光谱显微术的采用高取样密度的快照成像绘图光谱仪)”, Optics Express 18(14)14330-14344(2010)。

[0049] 寄存器可适于空间地记录二维干涉图,使得每一 2D 干涉图内、在特定像素上测绘的样本图区域在所有其它的干涉图中也可被辨识。

[0050] 在一些实施例中,取样的  $k$  值均匀地隔开,其中相继的干涉图之间的  $K$  阶差值由  $\Delta k$  表示。

[0051] 提取器适于根据每一相应的像素和每个干涉图提取一维光强信号。换言之,每一窄带干涉图可被认为是一图像,或者由多个像素组成的子图像。每一像素反过来对应于被照明物体上的点。由于每个 2D 干涉图都是有标引的,因此提取器能够从每一干涉图中,提取出与一像素相关的一维光强信号,该像素对应于被照明物体上的一特定点。

[0052] 计算器适于根据提取器获得的一维光强信号,计算出每个像素的频率。

[0053] 由于每个像素的频率与该像素处的光程差成正比,因而能推导出绝对光程分布。

[0054] 高光谱成像器可包括光电探测器阵列。

[0055] 窄带干涉图可设置为光电探测器阵列上空间地隔开的阵列。

[0056] 高光谱成像器可包括设置在干涉仪和物体下游的衍射光栅。衍射光栅用于隔开不同。

[0057] 高光谱成像器可包括设置在干涉仪和物体下游的色散元件。色散元件用于隔开宽带干涉图内不同的波长以生成三维立体图像 (image volume)。

[0058] 色散元件可包括任何合宜的元件,例如包括衍射光栅或棱镜。

[0059] 可选地,高光谱成像器可包括设置在干涉仪下游的反射立体全息图,在反射立体全息图中写入了多个布拉格光栅。

[0060] 装置可进一步包括数据处理器,例如具有关联的内存的数字电脑。在这种实施例中,窄带干涉图阵列可被读出输入数据处理器,用于进一步地处理以计算光程差。

[0061] 寄存器可适于参照图像的  $x$  和  $y$  坐标记录单个子图像,以形成三维光强分布。在这种实施例中,窄带干涉图被堆叠以形成沿着  $z$  轴、 $x$  轴和  $y$  轴延伸的高透视立体图像。 $z$  轴表示每一干涉图的波数。高光谱立体图像可被定义为  $I(x_m, y_n, k_p)$ , 下标  $m, n$  和  $p$  分别取值  $m = 0, 1, 2, \dots, N_x - 1, n = 0, 1, 2, \dots, N_y - 1$ , 以及  $p = 0, 1, 2, \dots, N_k - 1, N_x, N_y$  和  $N_k$  为沿着各个轴的取样点的个数。

[0062]  $N_x$  和  $N_y$  选择为保证整个视场上有充足数量的空间取样点 (即,  $N_x, N_y$  的结果是光程差的最终图像中的像素的数量)。相邻干涉图之间的空间间隔必须充足以确保不会重叠 (例如,高光谱图像沿着  $x$  轴分隔图像时被至少  $N_x$  个像素隔开)。相邻干涉图之间的  $k$  间隔 ( $\Delta k$ ) 被选择为使得系统可通过方程 (5) 覆盖给定的需要的深度范围。

[0063] 根据方程 (1), 给定  $x_m = x_0, y_n = y_0$  位置处 (像素) 所测量的光强以  $k$ 、角度频率  $z(x_0, y_0)$  余弦地变化。通过对光强值  $I(x_0, y_0, k)$  执行参考  $k$  的一维傅里叶变换可测量频率, 在减去平均值之后, 寻找位于  $z = z(x_0, y_0)$  处的变换的峰值。在所有  $(x_m, y_n)$  像素位置处重复这种处理, 因而根据单次照明测量提供了绝对二维光程差分布。

[0064]  $K$  轴所提供的其它信息可靠地确定了绝对光程长度, 即使视场可能包含空间隔开

的区域——这种情况下无法仅根据单次窄带成像正确地进行展开。

[0065] 最大的清楚的深度范围由香农取样定理给出, 香农取样定理规定了为确保  $I(x_0, y_0, k)$  信号有充足的取样, 方程 (1) 中的  $kz(x, y)$  项在相继的  $k$  取样之间的变化不得超过  $\pi$ 。这导致了允许的最大  $z$  值  $z = z_m$ , 其中

$$[0066] \quad z_m = \frac{\pi}{\Delta k} \quad (5)$$

[0067] 任何更大的  $z$  值都将走样 (aliased) 为较低的  $z$  值, 因而生成了欠取样的伪像 (artefact)。

[0068] 另一方面, 允许的最小  $z$  值  $z = 0$ , 由于方程 (1) 中的余弦函数是偶函数。因而, 负的  $z$  值无法区别于正值。因此, 允许的光程差范围由下式给出:

$$[0069] \quad 0 \leq z \leq z_m \quad (6)$$

[0070] 离散傅里叶变换  $\tilde{I}(x_m, y_n, z)$  包含  $N_k/2$  个正的频率成份, 其中样本点之间的间隔为

$$[0071] \quad \Delta z = \frac{1}{N_k \Delta k} \quad (7)$$

[0072] 对于光谱轮廓一致的情形, 光谱峰值的宽度 (即, 零线交叉点之间的距离) 为  $2 \Delta z$ 。如果光谱不是一致的, 而具有轮廓  $W(k)$ , 或者如果  $I(x_0, y_0, k)$  与窗函数  $W(k)$  相乘以减少光谱泄露, 则峰值的宽度由  $W(k)$  的傅里叶变换给出, 由  $\tilde{W}(k)$  表示。通常, 光谱峰值的宽度为

$$[0073] \quad \delta z = \gamma \Delta z \quad (8)$$

[0074] 其中, 例如, 对于矩形窗常量  $\gamma$  取值 2, 对于汉明窗  $\gamma$  取值 4。

[0075] 然而, 确定  $z$  值需要的精确度可能远高于方程 (7) 和 (8) 给出的值。可插补傅里叶变换以提供子像素分辨率, 例如, 通过傅里叶变换长度  $N_z > N_k$  的矢量, 其中的第一  $N_k$  分量为  $I(x_0, y_0, k)$  矢量, 而剩余的  $N_z - N_k$  分量为零 (“补零”)。Kaufmann 等人提出了在一维信号的傅里叶变换中寻找最大峰值的有效算法, 其能达到亚像素精确度。<sup>10</sup> 限制了这种方法精确度的根本因素在于光强信号中的噪音。

[0076] 高光谱成像器的  $z$  分辨率与方程 (7) 给出的  $N_k \Delta k$  成反比。为了提高分辨率可增加  $\Delta k$ 。然而, 根据方程 (5), 这样以相同因子降低了清楚的光程差范围  $z_m$ 。一种可选的方法是增加  $N_k$ 。然而这又牺牲了横向分辨率。例如, 对 16M 像素的图像传感器,  $N_x = N_y = 256$ , 最大值  $N_k = 256$ , 假定高光谱成像器可使用传感器的全部像素, 可增大  $N_k$  至 4 倍, 但高光谱图像尺寸会降低为  $128 \times 128$ 。需要同时获得好的光程差 ( $z$ ) 分辨率和好的横向 ( $x, y$ ) 分辨率。实现该目的的一个方法基于使用两个或更多个光谱不重叠的宽带光源, 宽带光源之间被已知的波数间隔开。

[0077] 因此, 装置可包括用于照明物体的多个宽带光源。多个宽带光源产生彼此光谱不重叠的光频带, 且宽带光源彼此之间被一已知的波数间隔开。

[0078] 多个宽带光源可产生光谱彼此相邻的频带。可选地, 宽带光源可产生光谱彼此隔开的频带。间隔可为任何需要的间隔。

[0079] 由于上述 SWLI 技术的缺点, SWLI 通常被认为是离线质量控制工具。虽然 SWLI 具有缺陷, 但其广泛地用于测量小尺寸元件的 3D 轮廓, 这是由于 SWLI 能够清楚地测量非连续物体并且具有优异的高度分辨率。

[0080] 然而, 通过本发明, 使用仅需较短曝光时间的技术就能获得小尺寸元件 (测量体

积的尺寸可典型地从数十  $\mu\text{m}$  到数十  $\text{mm}$ ) 的 3D 轮廓。所需的曝光延时基于下述因素:例如光源的能量,照明的视场,光电探测器阵列的光谱敏感度,样本反射率等。对于  $1\text{mm}$  级的反射样本,采用  $10\text{mW}$  超辐射二极管交叉照明,典型的曝光延时值将低于  $1\text{ms}$ ,当采用多瓦超连续光源照明,典型的值将降低至少于  $1\mu\text{s}$ 。在  $1\mu\text{s}$  的延时中,采用低于  $1\mu\text{m}$  的波长,在样本的运动显著地影响条纹可视度之前,样本能以高达  $250\text{mms}^{-1}$  的速度移动。通过使用脉冲光源,甚至可接纳更高的速率。因此本发明可作为在线质量控制工具使用,即使是在通常被认为是碍于精确干涉测量的环境中。

[0081] 由于光程差是零光程差平面  $L$  与测量的样本之间的本地距离的两倍,因此本发明可用于测量小尺寸元件的 3D 轮廓,光程差由下式给出:

$$[0082] \quad z = 2[h_0 - h(x, y)] \quad (9)$$

[0083] 其中  $h_0$  是已知的样本基准表面与零光程差平面之间的距离,  $h(x, y)$  是相对基准面测量的样本的本地高度。因此,采用本发明实施例,对绝对光程 ( $z$ ) 分布的测量通过方程 (9) 提供了绝对高度分布。

[0084] 本发明也用于光学相干断层扫描 (OCT) 中,在 OCT 中测量弱散射媒介中的内部结构。

[0085] 根据本发明的第三方面,提供一种用于二维光程分布的绝对测量的方法,包括以下步骤:

[0086] 通过将光透过干涉仪,以具有多个波长的光照明物体以生成物体的宽带干涉图;

[0087] 光谱地分隔宽带干涉图,以形成多个二维窄带干涉图;

[0088] 空间地记录二维干涉图;

[0089] 从每个窄带干涉图中相应的像素中提取一维光强信号;以及

[0090] 针对对象上的每一点、根据与该点关联的一维光强信号计算出频率。

[0091] 空间地记录二维干涉图的步骤可包括在所有窄带干涉图中辨识样本上普通点的像素位置。

[0092] 在本发明的一些实施例中,空间地记录二维干涉图的步骤包括形成二维窄带干涉图的三维光强分布。这可包括根据干涉图的  $x$  和  $y$  坐标,记录单个窄带干涉图,沿着  $k$  轴堆叠记录的干涉图以形成样本的高光谱立体图像的步骤,其中  $k$  表示每个干涉图的波数。

[0093] 从每一干涉图中相应的像素中提取一维光强信号的步骤可包括通过一维傅立叶变换、或通过对来自样本表面上给定点的全部  $k$  数据的一维信号进行傅立叶变换,测量沿着  $k$  轴穿过空间记录的干涉图的频率。

[0094] 以具有多个波长的光照明物体的步骤可包括,用来自多个光源的多个光频带照明物体,其中多个光频带中的每一个与其它光频带之间光谱地隔开。

[0095] 光频带可在光谱上彼此相邻。可选的,光频带和其它光频带之间可隔开适当的间距。

[0096] 本发明的方法可应用于测量物体的表面轮廓。此外,该方法也应用于光学相干断层扫描领域。

## 附图说明

[0097] 参考下列附图,以示例的方式进一步地描述本发明。

- [0098] 图 1a 是根据本发明用于测量物体的三维轮廓的装置的示意图。
- [0099] 图 1b 是根据图 1a 的装置的模块图。
- [0100] 图 2 是高光谱干涉图像的示意图,该高光谱干涉图像由采用图 1 的装置、以不同的  $k$  值记录的样本上感兴趣区域的子图像组成。
- [0101] 图 3 是形成高光谱立体干涉图的图 2 的子图像的示意图。
- [0102] 图 4a 和 4b 是取自图 3 的一维信号的示意图。
- [0103] 图 5a 和 5b 是来自图 4a 和 4b 的两个一维信号  $I(x_0, y_0, k)$  各自的傅立叶变换  $\tilde{I}(x_0, y_0, z)$ 。
- [0104] 图 6 是样本的横截面示意图。
- [0105] 图 7 是阶跃表面的一组  $N_k = 62$  的高光谱图像,沿着形成图 1 装置的一部分的摄像机的水平轴展开。
- [0106] 图 8 是采用图 1 的装置测量的  $11 \times 19$  像素网格上的表面轮廓。
- [0107] 图 9 是形成根据本发明的第二实施例的装置的一部分的高光谱成像元件的示意图。
- [0108] 图 10a-10c 是采用两个光谱相邻的光源  $LS_1$  和  $LS_2$ 、根据权利要求 1 的装置的模拟光强数据的图示。
- [0109] 图 10b 是仅来自  $LS_1$  的数据的傅立叶变换的图示。
- [0110] 图 10c 是来自组合的  $LS_1$  和  $LS_2$  数据的傅立叶变换的图示。
- [0111] 图 11a 是采用两个光谱隔开的光源  $LS_1$  和  $LS_2$ 、图 1 的装置的模拟光强数据的图示。
- [0112] 图 11b 是仅来自  $LS_1$  的数据的傅立叶变换。
- [0113] 图 11c 是来自组合的  $LS_1$  和  $LS_2$  数据的傅立叶变换。

### 具体实施方式

- [0114] 参考附图 1a 和 1b,用于测量样本 26 的三维轮廓的装置通常由附图标记 2 标记。该装置通过首先测量二维光程分布来测量样本 26 的三维轮廓,下文中将会进行详细的描述。
- [0115] 装置 2 包括宽带光源 4,在该实施例中,包括超辐射 LED 光源 (Superlum Diodes 有限公司, HP1),该光源中心波长为 840 纳米,谱线半高宽值为 50 纳米。光纤 6 导引来自光源 4 的光至准直光束的透镜 8。准直光束在进入干涉仪之前,通过由虚线 12 示出的标准器 10。标准器 8 作为梳滤波器,仅透过宽带光中的一组离散的波长,以在准直光束进入干涉仪 12 之前形成具有均匀波数间隔  $\Delta k$  的宽带梳。
- [0116] 装置 2 进一步的包括窄带光源 40,例如具有 633 纳米波长的氦-氖激光器所制成的。该窄带光源对于对准装置和样本 26 是有益的,但对于装置 2 并没有其它目的。因此在本发明的一些实施例中,可以没有窄带光源 40。
- [0117] 由于在该实施例中存在两个光源 4,40,装置进一步地包括光纤耦合器 42。然而,在没有窄带光源 40 的本发明的实施例中,不需要光纤耦合器 42。
- [0118] 干涉仪可以为任何合宜的干涉仪,在这种情况下该干涉仪包括林尼克干涉仪。正如所属领域中已知的,干涉仪包括分束器 14,第一透镜 16,第二透镜 18 和参考镜 20。在一种已知的方式中,干涉仪 12 将入射光分成参考光束 22 和测量光束 24。测量光束 24 在 P 点上照明样本 26 的一部分。样本 26 被放置在移动台 28 上以允许样本被移动,从而可照明任

何感兴趣的给定区域,也允许了样本和干涉仪之间的距离 ( $h_0$ ) 可被调整。

[0119] 装置 2 进一步地包括由虚线 30 示出的高光谱成像系统,其包括标准器 10、分束器 32、衍射光栅 34、透镜 36 和摄像机 38。在该实施例中,衍射光栅 34 是布置在利特罗配置中的闪耀光栅以最大化衍射效率。

[0120] 摄像机 38 包括光电探测器阵列。

[0121] 样本 26 反射的光与参考镜 20 反射的光组合并被导引至高光谱成像器 30。来自样本 26 上单个点 P 的光产生进入高光谱成像系统 30 的一束平行光线。衍射光栅 34 可用于选择性地过滤来自干涉仪的不同波长的光,从而通过分束器 32 可将每个波长导引至摄像机 36 的不同区域。以这种方式,可生成落入宽带波长包络的多个不同波长上的多个窄带干涉图,这将在下文中进行详细的描述。

[0122] 光电探测器阵列上的窄带干涉图将被处理以提供与物体 26 的三维轮廓相关的信息,这将在下文中进行详细的描述。

[0123] 在该实施例中,装置 2 进一步包括第二摄像机 50 和透镜 52 用于生成物体的一帧高分辨率宽带图像,以辅助装置的对准,但其并不是本发明的必要部分。

[0124] 宽带干涉图被光学地分成其干涉图成份,每一成份都由光源 4 产生的宽光谱照明包络中的窄频带形成。为此,光栅 34 将宽带干涉图光学地分开从而生成了由不同波长或波长频带形成的连续的干涉图。高光谱成像器随后将窄带干涉图导引至二维光电探测器阵列 38 上的离散位置。相邻干涉图之间的光谱间隔由标准器 10 的自由光谱区 (FSR) 决定,在该实施例中在 840nm 波长上为 0.5nm。光谱带宽由标准器的精细度决定,在该实施例中大于 15。为了获得空间锋利的窄带干涉图,需要将标准器精细度设置为大约、或大于  $N_k$ ,  $x$  为附图 1A 平面中的光电探测器的轴。

[0125] 图 2 示出物体 26 感兴趣的区域的三个具有不同  $k$  值的窄带干涉图 72、74 和 76。这三个代表性的干涉图 72、74 和 76 示出为干涉图的矩形阵列的一部分,每一个以形成在二维光电探测器阵列上的圆 78 为中心。在此处描述的装置 2 中,阵列仅包含一行干涉图。

[0126] 干涉图 72、74、76 中的每一个可包含空间隔开的区域  $R_1$ 、 $R_2$ 。但通过本发明仍可可靠地确定出绝对光程长度。

[0127] 图 3 是已通过电脑 100 空间地记录并堆叠的图 2 示出的多个干涉图,以形成三维光强分布从而生成在多个不同波长上的多个窄带干涉图。

[0128] 图 4a 和 4b 是在  $N_k = 16$ 、及全  $k$  带宽等于中心  $k$  值的 20% 的情况下,两个  $z$  值  $z = 0.23z_m$  和  $z = 0.65z_m$ , 取样的  $I(x_0, y_0, k)$  分布的示意图。相应的傅立叶变换分别  $\tilde{I}(x_0, y_0, z)$  在图 5(a) 和 (b) 中示出。

[0129] 确定  $z$  值需要的精确度可能远高于方程 (7) 和 (8) 给出的值。如图 5a 和 5b 中的垂直虚线所示出的,可插补傅里叶变换以提供子像素分辨率,例如,通过对  $k$  矢量进行补零。Kaufmann 等人提出了在一维信号的傅里叶变换中寻找最大峰值的有效算法,其能达到子像素精确度。

[0130] 参考附图 6,图解地示出样本 26 的表面 60。可使用绝对光程差的确定来测定样本 26 表面的轮廓,下文中将陈述。从图 6 和方程 (9) 中可看出,光程差是零光程差平面 L 与样本之间本地距离的两倍。两倍的因子是由于光的两次通过 (光沿向下的竖直方向入射、沿向上的竖直方向离开),并且假定样本前方媒介的折射率是均匀的。

[0131] 因此,使用前述的方程 9,采用装置 2 对绝对  $z$  分布的测量提供了绝对高度分布。

[0132] 参考附图 7,示出被分割成多个图 2 所示类型的单个干涉图的图像。干涉图的间隔与光栅 34 的频率、透镜 36 的焦距和标准器 10 的自由光谱区成正比,且被调节以匹配由样本 (26) 上照明点的尺寸和成像系统的放大率所定义的视场。通过电脑 100 进行组装并形成图 3 示出的高光谱立体图像。遵循寻峰算法、沿  $k$  轴的一维傅立叶变换提供了基于按像素对齐的绝对光程长度,使用方程 9 根据绝对光程长度计算出高度分布。

[0133] 结果在图 8 中示出,可以看到采用本发明的装置,在单次照明中测量的在  $11 \times 19$  像素网格上的表面 60 的表面轮廓。样本的照明部分范围内表面轮廓上的阶梯 (step) 在计算的三维轮廓中再生成,且计算的阶梯高度在实验误差范围内是吻合的。

[0134] 参考附图 9,描述本发明的第二实施例。图 9 图解地示出替代高光谱成像器 30 形成图 1 中的装置 2 的一部分的高光谱成像器 300。

[0135] 图 1 示出的高光谱成像器 30 采用平面衍射光栅 34 以沿着一条线隔开高光谱图像成份。因而需要与其高相比为长的图像传感器,以避免在单行高光谱图像之上和之下占据图 7 的暗区域的浪费的像素。然而,大部分商用的图像传感器具有  $1 : 1, 4 : 3$  或  $16 : 9$  的长宽比,因此需要一种可选的方法以将宽带图像分成多行窄带图像。

[0136] 根据图 9 所示的本发明实施例,代替衍射光栅,高光谱成像器 300 包括已写入一组布拉格光栅的反射型立体全息图 92。

[0137] 每一布拉格光栅 92 由以特定光栅节距和关于  $x_g$  和  $y_g$  轴的特定倾斜角度对材料折射率的低振幅正弦调制组成,其中  $(x_g, y_g, z_g)$  是图 9 中定义的本地坐标系。每一光栅高效地反射来自自由布拉格条件定义的窄光谱窗内的光,<sup>12,13</sup>因而将点的图像发送至光电探测器阵列 38 的隔开的部分。由于可相对  $x_g$  和  $y_g$  轴都倾斜地将光栅写入全息元件中,这就意味着光电探测器阵列的全部区域都可用,区别于图 1a 中采用平面光栅的情形。

[0138] 在这种实施例中,不再需要标准器 10。此外,通过采用弯曲的布拉格光栅,由图 1 的装置中上游和下游的透镜执行的成像功能原理上可被立体光栅元件执行,因而潜在地避免了对透镜 16 和 30 的需求。

[0139] 除了有效使用图 1a 的传感器 38 的全部可用像素之外,这种方法也允许了定制地放置来自任意光盘轮廓的光源的图像。这种特征对下述使用两个光谱隔开的光源的本发明实施例是特别有益的。

[0140] 在附图 10 和 11 中解释这一概念,考虑两种情形:(i) 两个光谱带宽紧密相邻(图 10(a));(ii) 被 6 倍于每一带宽的宽度隔开(图 11(a))。在这两种情形中,模拟中真是使用的  $z$  值为  $z/z_m = 0.23$ 。两种情形都需要获得相同数量的高光谱图像(从每一光源获得 16 帧)。

[0141] 图 10(a) 和 11(b) 示出的来自第一光源的信号的傅立叶变换对两种情形都是相同的。如果对来自两个光源的信号都进行傅立叶变换,对光源光谱地相邻的情形(图 10(c)),峰值宽度被降低至约  $1/2$ 。另一方面,在光源空间隔开的情形中,主峰的宽度与单一光源情形的宽度一样,但由频率正比于两光源之间间隔的信号进行调制。若在主峰中选择正确的子峰,峰的“锐度”的增加意味着与相邻带宽的情形相比  $z$  分辨率显著地提高,而获得的子图像的数量不变。

[0142] 识别子峰位置的算法由以下步骤组成:

[0143] 1. 获得  $z$  的第一估值 ( $z = z_1$ ), 作为来自第一光谱带的未平均 (mean-free) 信号的离散傅立叶变换 (图 11(b) 中的圆) 的系数的最大值 (图 11(b) 中的圆)。

[0144] 2. 使用  $z = z_1$  作为  $z$  的初始估值, 以反复地寻找来自第一光谱带的未平均信号的连续傅立叶变换 (图 11(b) 中的实线) 的峰值 (位于  $z = z_2$  处)。

[0145] 3. 使用  $z = z_2$  作为  $z$  的初始估值, 以反复地寻找来自两个光谱带的未平均信号的连续傅立叶变换 (图 11(c) 中的实线) 的峰值 (位于  $z = z_3$  处)。

[0146] 上述算法应用于由条纹数据组成的模拟数据, 图 11(a) 示出条纹数据, 但对每个测量的光强值加入了标准方差的独立高斯噪音, 0.01。光强噪音的影响是为了在计算的  $z$  值中引入波动。针对三种情形, 下文的表 1 中列出被  $z_m$  归一化的计算的  $z$  的平均和标准方差: (i) 单一光源 (一共 16 个数据点); (ii) 光谱相邻的双光源 (32 个数据点) 和 (iii) 光谱隔开的双光源 (32 个数据点)。共运行 1024 次以产生这些值。与来自空间相邻的光源相比, 来自空间隔开的光源的计算的  $z$  值的标准方差缩小了约 1 个数量级, 为全部深度测量范围的约  $1/60000$ 。

[0147] 针对三种不同的高光谱干涉仪光源的光谱, 光强噪音对计算的归一化  $z$  值的影响 (真实值为  $z/z_m = 0.23$ )。

[0148]

	平均差	标准方差
单光谱带	0.2315	$2.67 \times 10^{-4}$
两个相邻的光谱带	0.2288	$1.01 \times 10^{-4}$
两个隔开的光谱带	0.2299	$0.15 \times 10^{-4}$

[0149] 通过将光谱范围的上半部分和下半部分分开, 可提高本发明的性能。通常, 分得越开, 深度分辨率越高。在一些点上, 分辨率的提高被探测的可靠性的降低抵消了, 这是由于对在主峰中的正确的子峰的误辨识。通过将光谱范围分成三个或更多个带宽, 可获得性能的进一步改进。

[0150] 光学相干断层扫描 (OCT) 是一种干涉技术, 主要应用在医学领域, 用于测量弱散射媒介中的内部结构。光谱 OCT 涉及使用光谱仪用以测量来自逐点照明样本的背向散射光的光谱内容。<sup>14</sup>从逐点延伸到线形照明允许了在单次照明中测量样本平面上的结构 (来自振幅信息) 和位移场 (来自相位信息)。<sup>15</sup>然而, 为了空间地记录二维信息, 例如采用逐点和逐线照明以建立 3D 立体图, 需要执行跨越样本的点或线的扫描。因此, 现有的光谱 OCT 存在相同移动的伪像 (artefact) 问题, 正如 WSI 和其它上述涉及测定 3D 形状轮廓的干涉技术。因此实践中, 活体中测量通常被限制为 2D 测量。

[0151] 本发明可直接地应用于 3D 振幅和相位的立体图的单次照明测量。测量的光强数据的傅立叶变换  $\tilde{I}(x_m, y_n, z)$  的振幅提供了对散射的直接测量, 散射可能沿着自像素 ( $x_m, y_n$ ) 发散的线、穿过摄像机透镜的中心并入射到样本表面上。同样地, 傅立叶变换的相位可用于测量 3D 立体图中的位移, 采用与参考文献 15 描述的 2D 技术相似的方式。采用前述的测定 3D 轮廓的实施例, 通过减少照明脉冲的延时来移除移动伪像, 并且为实现扫描也不需要移

动部件。

[0152] 参考文献

[0153] 1. Huntley, J. M., "Automated analysis of speckle interferograms", in "Digital speckle pattern interferometry", ed. P. K. Rastogi, John Wiley & Sons Ltd., Chichester (2001).

[0154] 2. P. de Groot, "Vibration in phase-shifting interferometry," J. Opt. Soc. Am. A 12, 354-365 (1995).

[0155] 3. J. M. Huntley, "Suppression of phase errors from vibration in phaseshifting interferometry," J. Opt. Soc. Am. A 15(8) 2233-2241 (1998).

[0156] 4. S. Kuwamura and I. Yamaguchi, "Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement," Appl. Opt. 36, 4473-4482 (1997).

[0157] 5. F. Lexer, C. K. Hitzenberger, A. F. Fercher, and M. Kulhavy, "Wavelength-tuning interferometry of intraocular distances," Appl. Opt. 36, 6548-6553 (1997).

[0158] 6. P. de Groot, "Measurement of transparent plates with wavelength-tuned phase-shifting interferometry," Appl. Opt. 39, 2658-2663 (2000).

[0159] 7. T. Dresel, G. Häusler, and H. Venzke, "Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar," Appl. Opt. 31, 919-925 (1992).

[0160] 8. P. Sandoz and G. Tribillon, "Profilometry by zero-order interference fringe identification", J. Mod. Opt. 40 1691-1700 (1993).

[0161] 9. L. Deck and P. de Groot, "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry", Appl. Opt. 33 7334-7338 (1994).

[0162] 10. G. H. Kaufmann, A. Ennos, B. Gale and D. J. Pugh, "An electro-optic readout system for analysis of speckle photographs," J. Phys. E: Sci Instrum. 13579-84 (1980).

[0163] 11. J. Schwider and L. Zhou, "Dispersive interferometric profilometer," Opt. Lett. 19, 995-997 (1994).

[0164] 12. P. Hariharan, "Basics of Holography", Cambridge University Press, Cambridge, (2002).

[0165] 13. L. C. Cao, X. S. Ma, Q. S. He, H. Long, M. X. Wu and G. F. Jin, "Imaging spectral device based on multiple volume holographic gratings", Opt. Eng. 432009-2016 (2004).

[0166] 14. A. F. Fercher, C. K. Hitzenberger, G. Kamp, and S. Y. El-Zaiat, " Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry, " Opt. Commun. 117, 43-48 (1995).

[0167] 15. M. H. De la Torre-Ibarra, P. D. Ruiz, and J. M. Huntley, "Double-shot depth-resolved displacement field measurement using phase-contrast spectral optical coherence tomography", Opt. Express 149643-9656 (2006).



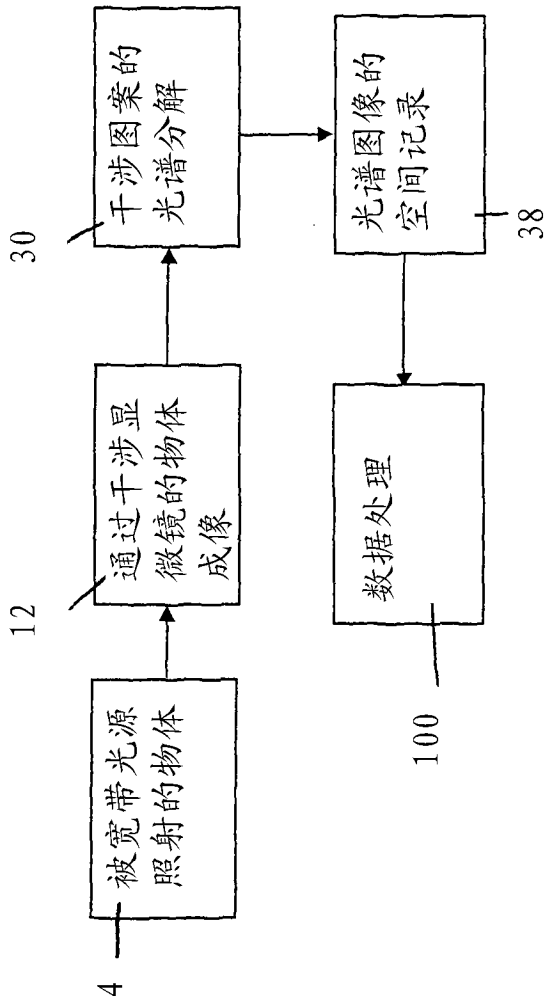


图 1B

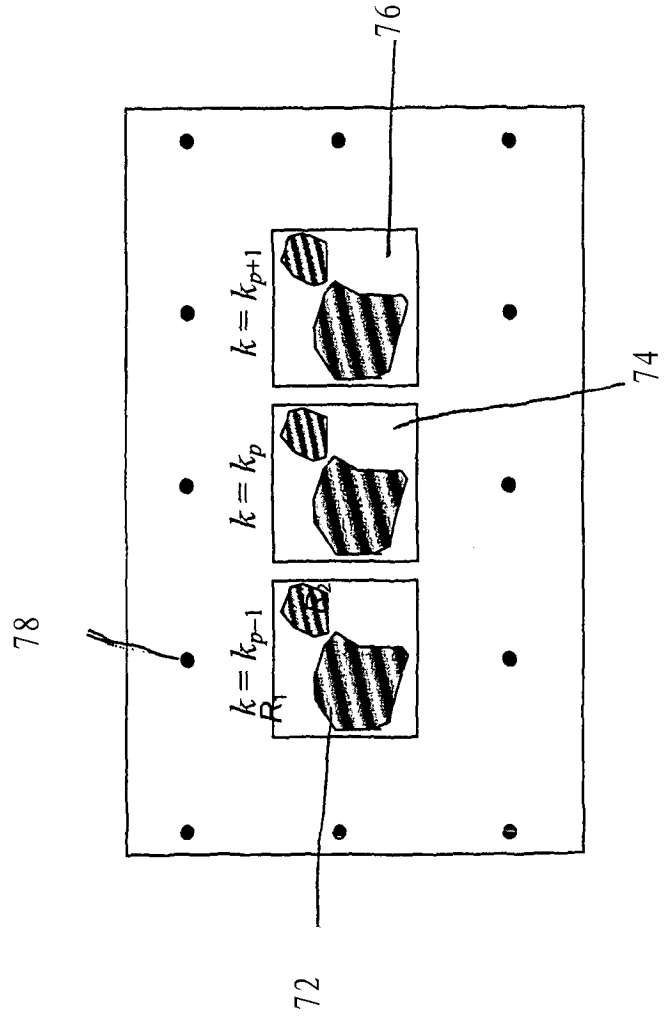


图 2

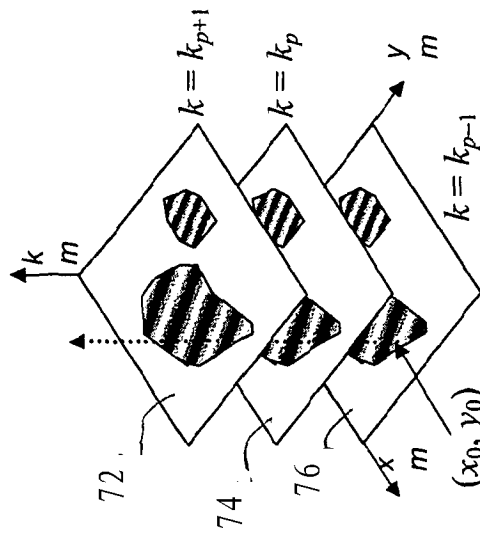


图 3

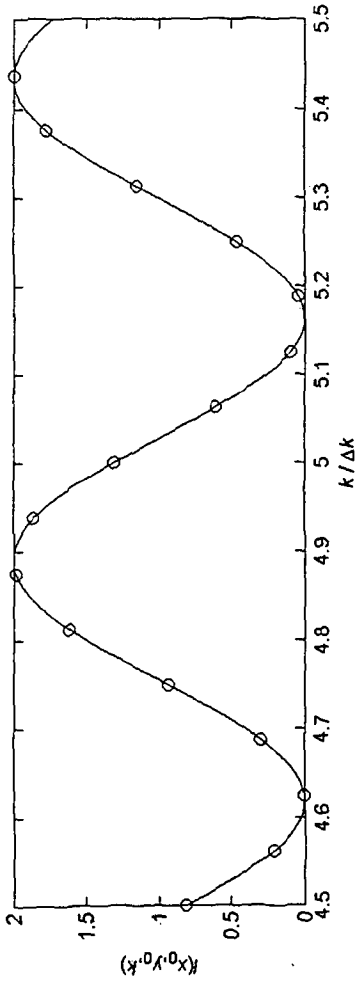


图 4A

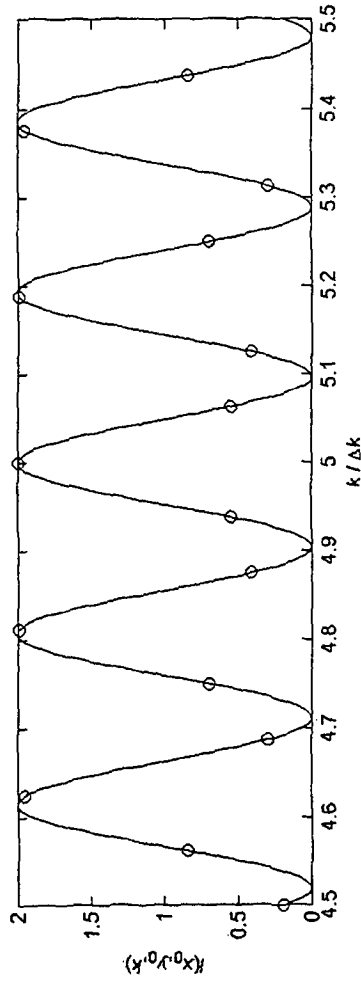


图 4B

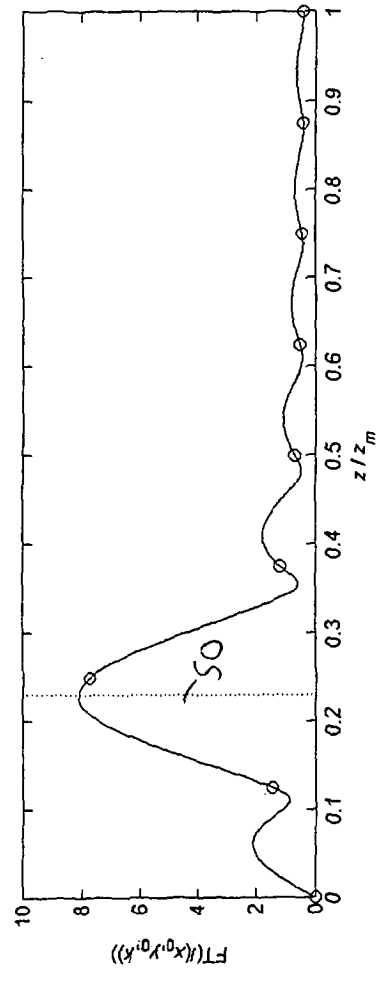


图 5A

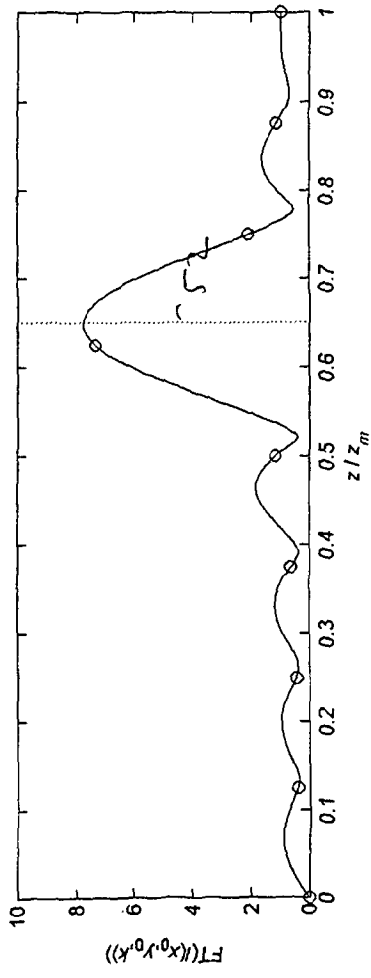


图 5B

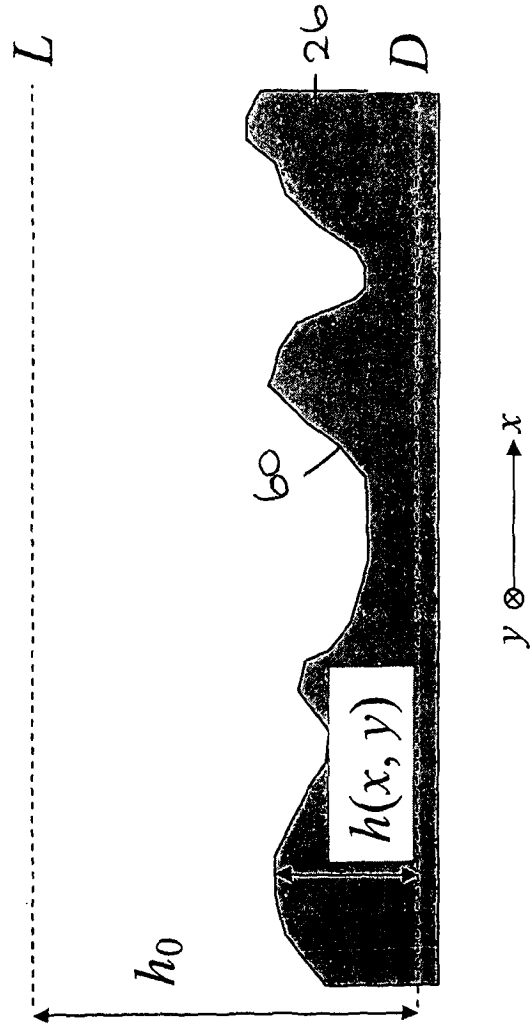


图 6

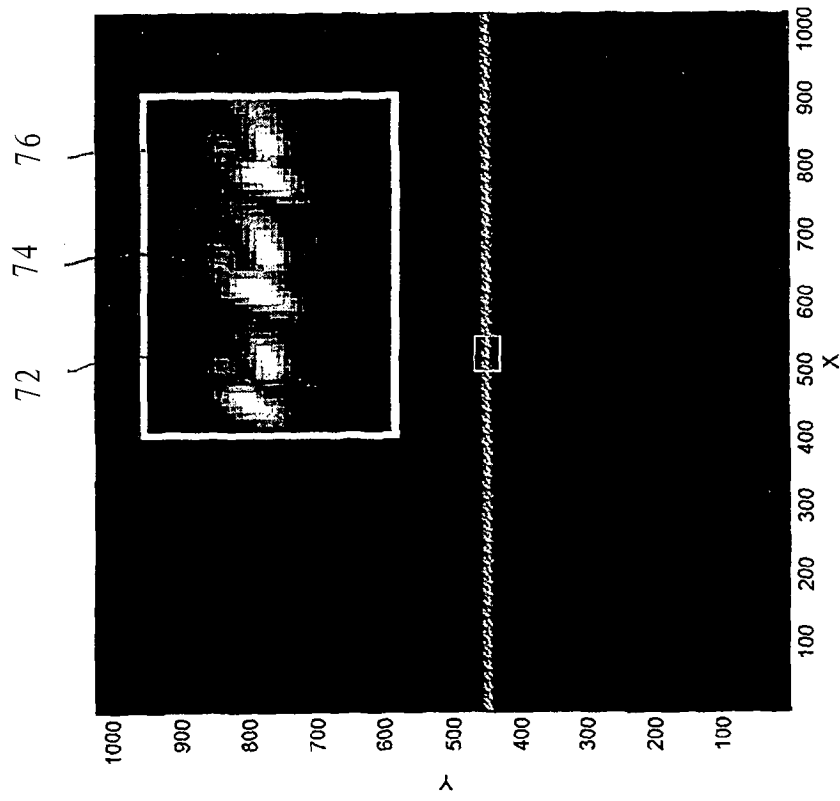


图 7

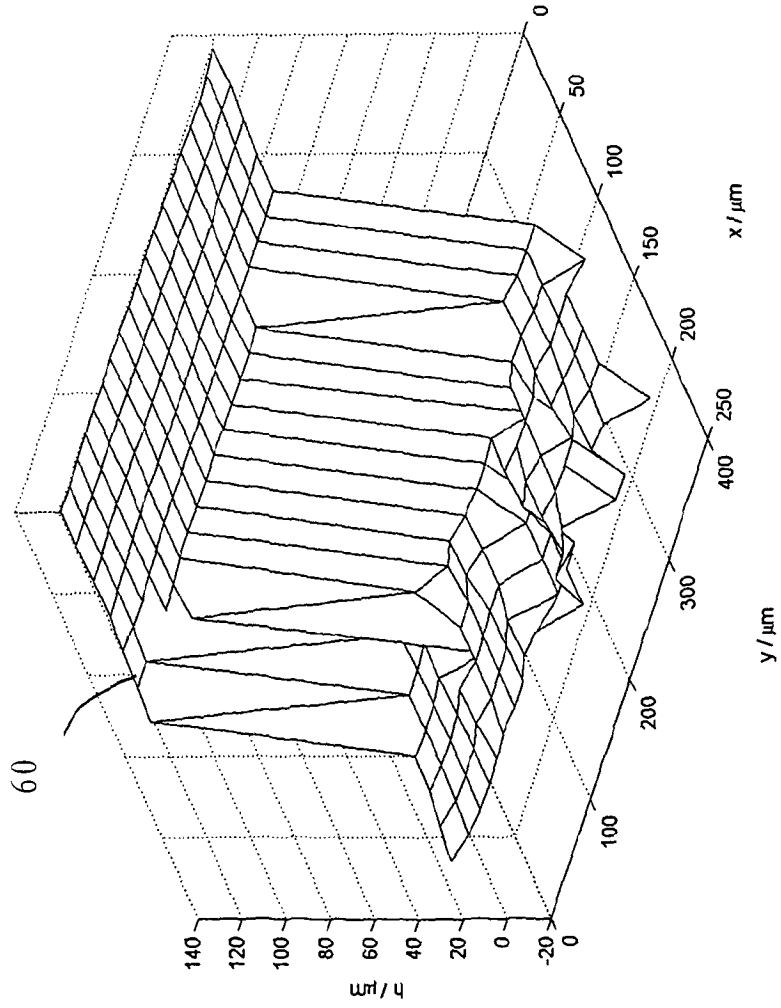


图 8

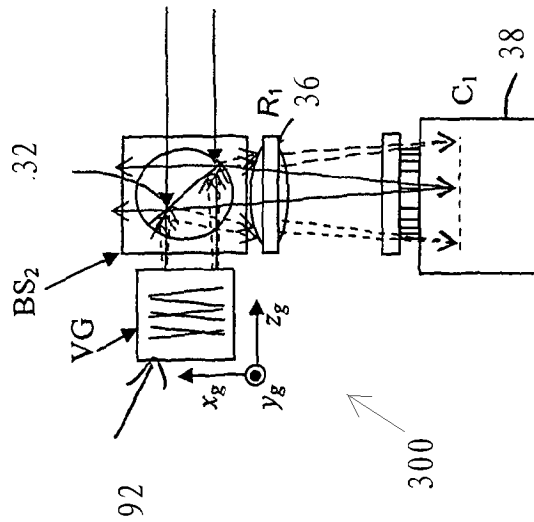


图 9

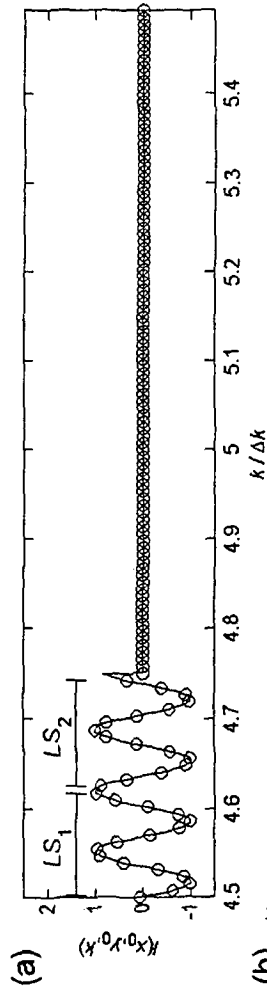


图10A

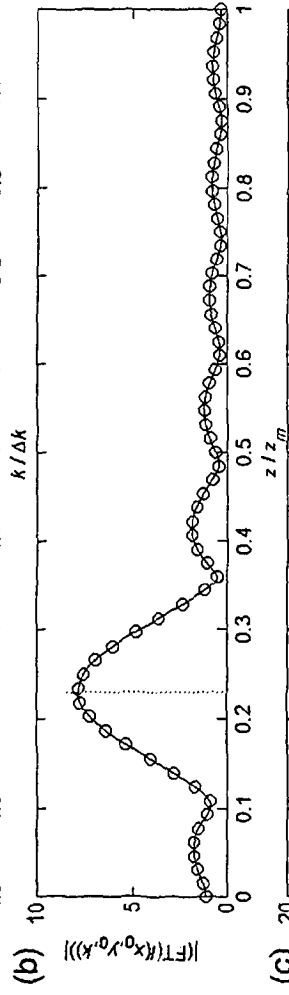


图10B

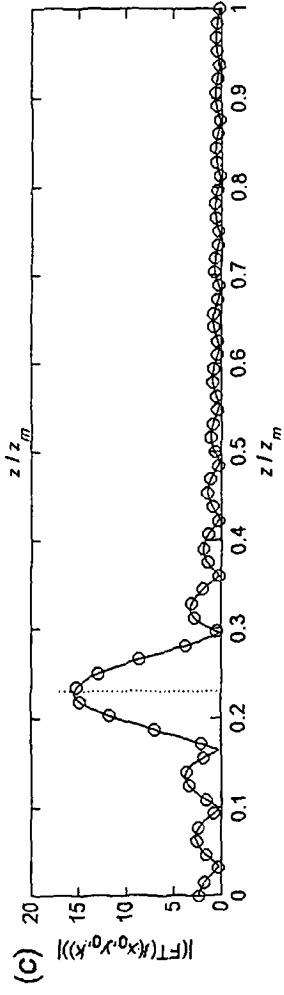


图10C

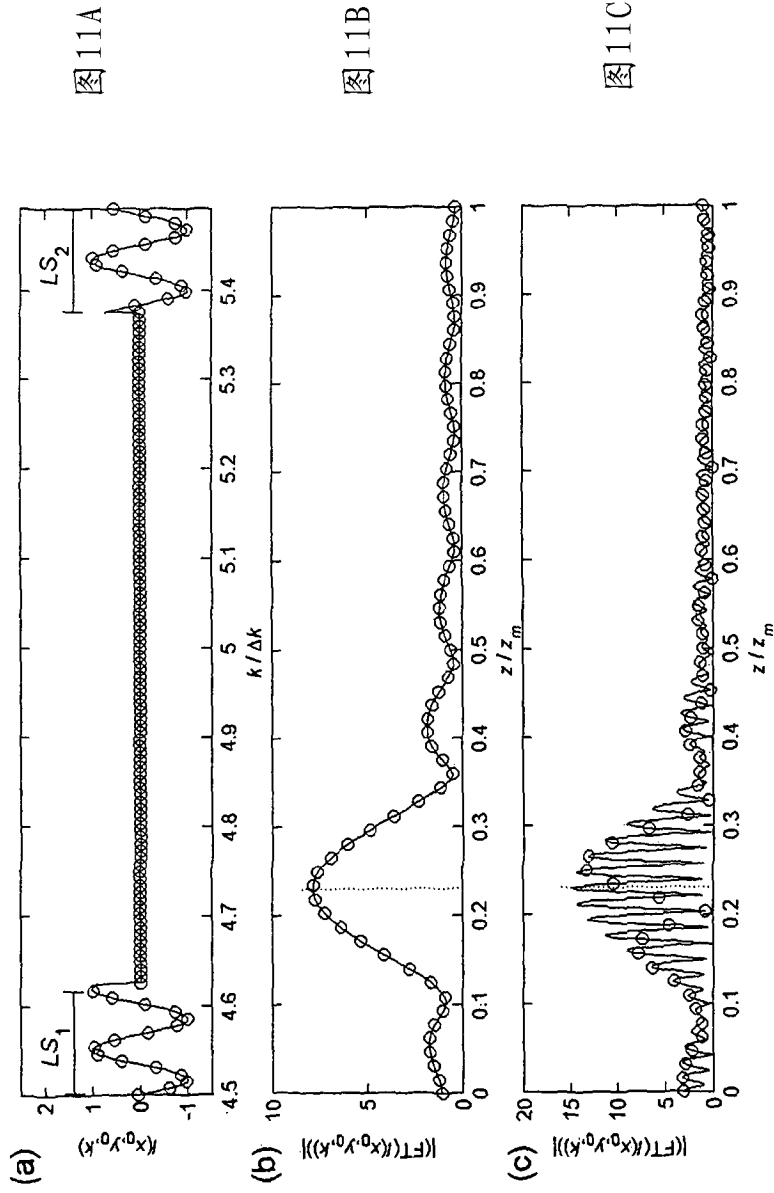


图11A

图11B

图11C