

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102057269 A

(43) 申请公布日 2011. 05. 11

(21) 申请号 200980120703. 5

莱斯利·L·德克

(22) 申请日 2009. 11. 23

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

(30) 优先权数据

代理人 邱军

61/118, 151 2008. 11. 26 US

12/509, 098 2009. 07. 24 US

12/509, 083 2009. 07. 24 US

(51) Int. Cl.

G01N 21/45 (2006. 01)

G01B 9/02 (2006. 01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 12. 03

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2009/065529 2009. 11. 23

(87) PCT申请的公布数据

W02010/062853 EN 2010. 06. 03

(71) 申请人 齐戈股份有限公司

地址 美国康涅狄格州

(72) 发明人 马克·戴维森 简·莱塞纳

彼得·德格鲁特

泽维尔·科洛纳德莱加

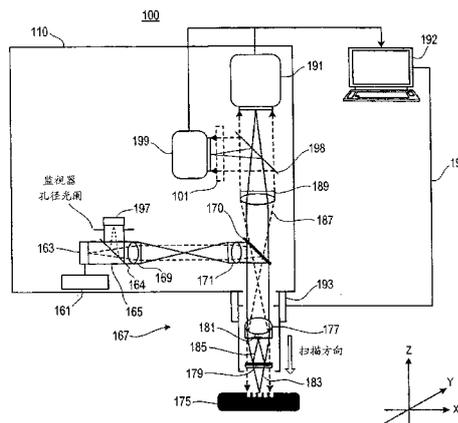
权利要求书 5 页 说明书 49 页 附图 37 页

(54) 发明名称

用低相干扫描干涉测量法的扫描误差校正

(57) 摘要

一种设备包括宽带扫描干涉测量系统,该系统包括光学部件,用以结合来自测试物的测试光和参考光,而在探测器上形成干涉图案。该设备还包括配置为扫描从共用光源至探测器的、所述测试光和参考光之间的光程差(OPD)的台,以及包括探测器的探测器系统,用以纪录一系列的OPD增量的每一者的干涉图案,每一个OPD增量的频率定义帧频。光学部件被配置以产生至少二个监测干涉测量信号,当扫描光程差时,干涉测量信号的每一者表示光程差的变化,探测器系统被配置以纪录监测干涉测量信号。该设备包括处理器,被配置以对于大于所述帧频的OPD增量,决定所述光程差增量对扰动灵敏度的信息。



1. 一种设备,包括:

宽带扫描干涉测量系统,包括干涉测量光学部件,用以结合来自测试物的测试光和来自参考物的参考光,而在探测器中形成干涉图案,其中所述测试光和参考光来自一共用光源,

所述干涉测量系统还包括一扫描台,用以扫描从所述共用光源至所述探测器的、所述测试光和参考光之间的光程差(OPD),以及包括所述探测器的探测器系统,用以纪录一系列的光程差增量的每一者的所述干涉图案,其中每一个所述光程差增量的频率定义一帧频;

所述干涉测量光学部件还用以产生至少二个监测干涉测量信号,当扫描所述光程差时,所述监测干涉测量信号的每一者表示所述光程差的变化,其中所述探测器系统还用以纪录所述监测干涉测量信号;以及

电子处理器,电性耦接于所述探测器系统和扫描台,用以对于大于所述帧频的频率的所述光程差增量,决定所述光程差增量对扰动灵敏度的信息。

2. 如权利要求1所述的设备,其中所述扫描台用以在大于所述共用光源的相干长度的范围中扫描所述光程差。

3. 如权利要求1所述的设备,其中所述扫描台通过改变所述干涉测量光学部件相对于所述测试物的焦点来扫描所述光程差。

4. 如权利要求1所述的设备,其中所述扫描台用以在不改变所述干涉测量光学部件相对于所述测试物的焦点的情况下扫描所述光程差。

5. 如权利要求4所述的设备,其中所述扫描台通过改变与所述干涉测量光学部件有关的所述参考物的位置来扫描所述光程差。

6. 如权利要求1所述的设备,其中所述干涉测量光学部件包括 Mirau 物镜。

7. 如权利要求1所述的设备,其中所述干涉测量光学部件包括 Linnik 物镜。

8. 如权利要求1所述的设备,其中所述干涉测量光学部件用以将所述测试物成像至所述探测器。

9. 如权利要求1所述的设备,其中所述干涉测量光学部件定义一光瞳平面并且用以将所述光瞳平面成像至所述探测器。

10. 如权利要求9所述的设备,其中所述扫描台用以扫描所述光程差,其中所述光程差随着所述光瞳平面中的位置变化,并且决定所述光程差增量的信息包括考虑所述干涉图案的位置相关性。

11. 如权利要求10所述的设备,其中所述扫描台用以在不改变所述干涉测量光学部件相对于所述测试物的焦点的情况下扫描所述光程差。

12. 如权利要求1所述的设备,其中所述干涉测量光学部件包括一光学元件,用以从所述干涉光学部件所提供的输出光中取得一监测光,其中所述输出光包括所述测试光和参考光。

13. 如权利要求12所述的设备,其中所述光学元件是一分束器,用以导引所述输出光的一部分至所述探测器以及导引所述输出光的另一部分至第二探测器以记录所述监测干涉测量信号。

14. 如权利要求12所述的设备,其中所述光学元件是一频谱滤波器,用以导引所述输出光的一部分至所述探测器系统,其中所述监测干涉测量信号是根据所述输出光的所述部

分而被侦测。

15. 如权利要求 14 所述的设备,其中所述部分是所述输出光的一单色光部分。

16. 如权利要求 12 所述的设备,其中所述监测光是来自所述共用光源。

17. 如权利要求 16 所述的设备,其中所述监测光对应于所述测试光和参考光的一频谱分量。

18. 如权利要求 12 所述的设备,其中所述干涉图案对应于所述输出光的强度分布。

19. 如权利要求 12 所述的设备,其中所述监测光来自不同于所述共用光源的第二光源。

20. 如权利要求 19 所述的设备,其中所述监测光的相干长度大于所述共用光源的相干长度。

21. 如权利要求 1 所述的设备,其中所述电子处理器通过将一相应的正弦函数与所述至少二个监测干涉测量信号的每一者相匹配,用以决定所述光程差增量的信息。

22. 如权利要求 21 所述的设备,其中所述监测干涉测量信号的每一者包括多个取样数据点,所述取样数据点是在使用所述探测器扫描所述光程差时取得的,将所述正弦函数与所述监测干涉测量信号相匹配包括内插对所述取样数据点作内插以提供内插信号。

23. 如权利要求 22 所述的设备,其中将所述正弦函数与所述监测干涉测量信号相匹配还包括根据所述内插信号将理论干涉相位与每一个所述干涉测量信号相关联。

24. 如权利要求 23 所述的设备,其中决定所述光程差增量的信息还包括根据相应的所述理论干涉相位来计算所述监测干涉测量信号的测量相位的偏移。

25. 如权利要求 1 所述的设备,其中所述至少二监测干涉测量信号具有不同的干涉相位。

26. 如权利要求 1 所述的设备,其中所述至少二监测干涉测量信号具有不同的频率。

27. 如权利要求 1 所述的设备,其中所述探测器为多元件探测器。

28. 如权利要求 27 所述的设备,其中所述多元件探测器包括用以纪录所述至少二监测干涉测量信号的多个元件。

29. 如权利要求 1 所述的设备,其中所述探测器系统包括与所述主探测器分隔的第二探测器,所述第二探测器用以纪录所述至少二监测干涉测量信号。

30. 如权利要求 29 所述的设备,其中所述第二探测器为多元件探测器,其每一个元件用以纪录一相应的监测干涉测量信号。

31. 如权利要求 1 所述的设备,其中所述电子处理器还用以根据一主干涉测量信号,决定所述测试物的信息,所述主干涉测量信号相应于使用所述探测器所记录的所述干涉图案。

32. 如权利要求 31 所述的设备,决定所述信息包括根据所述光程差增量的信息来减少信息的不确定性。

33. 一种方法,包括:

提供一低相干干涉测量信号,所述低相干干涉测量信号使用一扫描干涉测量系统产生,使用干涉测量光学部件,将来自测试物的测试光和来自参考物的参考光结合以在一探测器上形成干涉图案,所述探测器用以纪录所述干涉图案,同时扫描所述测试光和参考光之间的一光程差,对于一系列的光程差增量的每个,所述扫描干涉测量系统产生所述低相

于干涉测量信号,每一个所述光程差增量的频率定义一帧频;

提供至少二监测干涉测量信号,所述监测干涉测量信号的每一者皆使用所述干涉测量光学部件所产生,当扫描所述光程差时,所述监测干涉测量信号的每一者表示所述光程差的变化;以及

根据所述监测干涉测量信号,用以对于以大于所述帧频的频率的光程差增量,决定所述光程差增量对扰动灵敏度的信息。

34. 一种工艺,用以制造一显示面板,包括:

提供所述显示面板的一元件;

通过权利要求 33 的方法,决定所述元件的信息;以及

使用所述元件来形成所述显示面板。

35. 一种方法,包括:

提供一测试物的一或多个干涉测量信号,其中所述干涉测量信号相应于一序列的光程差(OPD)数值,光程差值由于噪声而不是全部等间距的;

提供未等间距的所述光程差值的序列的信息;

将每一个所述干涉测量信号分解为多个基函数的贡献,每一个所述基函数相应于不同的频率并且以未等间距的所述光程差值取样;以及

将每一个所述基函数的所述贡献的信息用于每一个所述干涉测量信号,用以判断所述测试物的信息。

36. 如权利要求 35 所述的方法,其中所述将每一个所述干涉测量信号分解为所述基函数的所述贡献包括所述基函数的每一者的振幅和相位对于每个干涉测量信号的信息。

37. 如权利要求 35 所述的方法,其中每一个所述基函数是以未等间距的所述光程差值取样的正弦基函数。

38. 如权利要求 35 所述的方法,其中所述分解为一线性分解。

39. 如权利要求 35 所述的方法,其中所述一或多个干涉测量信号包括相应于所述测试物的不同位置的多个干涉测量信号。

40. 如权利要求 35 所述的方法,其中所述一或多个干涉测量信号包括相应于一物镜的光瞳平面的不同位置的多个干涉测量信号,所述物镜用以照射所述测试物以产生所述干涉测量信号。

41. 如权利要求 40 所述的方法,其中每一个所述干涉测量信号被分解为相同的所述多个基函数的贡献。

42. 如权利要求 35 所述的方法,其中对于每一个不同的所述光程差值而言,每一个干涉测量信号对应于多个干涉强度值,所述干涉强度值是当来自所述测试物的测试光和参考光在一探测器上结合时所测量的,其中测试光和参考光来自一共用光源,并且所述光程差是从所述共用光源至所述探测器的、所述测试光和参考光之间的光程差。

43. 如权利要求 35 所述的方法,其中所述多个基函数包括非正交的基函数。

44. 如权利要求 43 所述的方法,其中所述多个基函数包括线性独立的基函数。

45. 如权利要求 35 所述的方法,其中分解所述干涉测量信号的步骤包括:形成一矩阵,所述矩阵的每一行相应于一基函数;求出所述矩阵的逆矩阵;以及将所述逆矩阵用于每一个干涉测量信号。

46. 如权利要求 45 所述的方法,其中每一个基函数的矩阵的单元数目大于基函数的数目。

47. 如权利要求 35 所述的方法,其中对于每一个不同的所述光程差值而言,每一个所述干涉测量信号对应于多个干涉强度值,所述干涉强度值是当来自所述测试物的测试光和参考光在一探测器上结合时所测量的,其中测试光和参考光来自一共用光源,并且每一个基函数考虑测量后的所述干涉强度值相对于理论值之间的变化,所述理论值相应于没有误差的干涉测量信号。

48. 如权利要求 47 所述的方法,其中所述变化起因于所述光源的强度水平的变化。

49. 如权利要求 47 所述的方法,其中所述变化起因于所述探测器的有限帧积分时间。

50. 如权利要求 35 所述的方法,其中提供未等间距的所述光程差值的序列的信息包括产生表示所述光程差的变化至少一监测信号,相应于所述光程差值的序列的所述监测信号被获得时,产生所述监测信号。

51. 如权利要求 50 所述的方法,其中未等间距的所述光程差值的序列的信息包括产生多个监测信号。

52. 如权利要求 51 所述的方法,其中所述监测干涉测量信号是使用相同的所述干涉测量光学部件所产生的,所述干涉测量光学部件用以产生对应于所述光程差值的序列的所述干涉测量信号。

53. 如权利要求 35 所述的方法,其中使用所述信息包括根据所述多个基函数的每一个对每一个所述干涉测量信号的贡献的信息来产生校正后的干涉测量信号,以及根据所述校正后的干涉测量信号来决定所述测试物的信息。

54. 如权利要求 35 所述的方法,其中所述未等间距的所述光程差值的序列的信息使用传感器产生,所述探测器选自于由位移测量干涉测量仪、加速度计、接触探针、电容计、气压计以及光学编码器所构成的组。

55. 一种工艺,用以制造一显示面板,包括:

提供所述显示面板的一元件;

使用权利要求 35 的方法,决定所述元件的信息,其中所述元件相应于所述测试物;以

及

使用所述元件来形成所述显示面板。

56. 如权利要求 55 所述的工艺,其中所述元件包括以一间隙相互间隔的一对基板,且所述信息包括所述间隙的信息,并且形成所述显示面板的步骤包括根据所述信息调整所述间隙。

57. 如权利要求 55 所述的工艺,其中所述元件包括一基板以及所述基板上的一抗蚀剂层,并且所述信息包括所述抗蚀剂层的厚度。

58. 如权利要求 55 所述的工艺,其中所述元件包括一基板,所述基板包括多个间隔物,并且所述信息包括所述间隔物的信息。

59. 如权利要求 58 所述的工艺,其中形成所述显示面板的包括根据所述信息修正所述间隔物。

60. 一种设备,包括:

干涉测量系统,包括干涉测量光学部件,用以结合来自测试物的测试光和来自参考物

的参考光,而在探测器上形成干涉图案,其中所述测试光和参考光来自一共用光源,

所述干涉测量系统还包括一扫描台,用以扫描从所述共用光源至所述探测器的、所述测试光和参考光之间的光程差(OPD),以及包括所述探测器的探测器系统,用以纪录一系列的光程差值的每一者的干涉图案,由此提供一或多个干涉测量信号;以及

电子处理器,耦接于所述探测器系统,根据所述一或多个干涉测量信号来决定所述测试物的信息,

其中所述一系列的光程差值是由于噪声而不是所有均被等间距,并且所述电子处理器通过将每一个所述干涉测量信号分解为来自多个基函数的贡献来决定所述测试物的信息,每一个所述基函数相应于不同的频率并且以未等间距的所述光程差值取样。

61. 一种设备,包括:

扫描干涉测量系统,包括干涉测量光学部件,用以在照射角的一范围上导引测试光至测试物,并且将从所述测试物反射回来的测试光与来自参考物的参考光结合,用以在多元件探测器上形成干涉图案,其中所述测试光和参考光来自一共用光源,并且所述干涉测量光学部件将结合后的光的至少一部分导引至所述探测器,使得所述探测器的不同元件对应于测试光在所述测试物上的不同照射角;

所述干涉测量系统还包括一扫描台,用以扫描从所述共用光源至所述探测器的、所述测试光和参考光之间的光程差(OPD),以及包括所述探测器的探测器系统,用以纪录一系列的光程差增量的每一者的干涉图案;

所述扫描干涉测量系统还用产生至少一个监测干涉测量信号,当扫描所述光程差时,所述监测干涉测量信号表示所述光程差的变化;以及

电子处理器,电性耦接于所述探测器系统和扫描台,用以决定所述光程差增量对扰动灵敏度的信息。

62. 一种设备,包括:

干涉显微镜,包括物镜和相对于所述物镜可移动的台;

传感器,用以从输入辐射导出第一波前和第二波前,并且结合所述第一和第二波前来提供输出辐射,所述输出辐射包括所述第一和第二波前的路径之间的光程差的信息,所述传感器包括设置于所述第一波前的路径中的反射元件,所述反射元件被安装于所述物镜或所述台上;

光纤波导,用以将所述输入辐射传送至所述传感器,或将所述输出辐射从所述传感器传送至相应的探测器;以及

电子控制器,用以根据所述传感器的信息来监测所述台相对于所述物镜的位移。

## 用低相干扫描干涉测量法的扫描误差校正

### 技术领域

[0001] 本发明涉及干涉测量法 (interferometry)。

### 背景技术

[0002] 干涉测量技术 (interferometric techniques) 一般用以取得有关于测试物 (test object) 的信息, 例如测测量试物的表面轮廓。为此, 干涉测量仪 (interferometer) 将从所关注的表面反射回来的测量光 (measurement light) 与从参考面 (reference surface) 反射回来的参考光 (reference light) 结合以产生干涉谱 (interferogram)。干涉谱中的条纹表示关注的表面和参考面之间的空间变化。

[0003] 多种干涉技术已经成功地用于表征测试物。这些技术包括低相干扫描技术和相移干涉测量法 (PSI)。

[0004] 关于 PSI, 对于参考波前和测试波前之间的多个相移的每一者, 记录光学干涉图案, 用以产生一系列的光学干涉图案。举例而言, 一系列的光学干涉图案至少跨越了光学干涉的一半周期 (例如从建设性干涉至破坏性干涉)。对于光学干涉图案的每一个空间位置, 光学干涉图案定义了一系列的强度值, 其中每一系列的强度值都与相移之间都具有正弦关系, 相位偏差 (phase offset) 等于对于该空间位置的结合后的测试波前和参考波前相差。使用数值 (numerical) 技术, 每一个空间位置的相位偏差就能够由强度值的正弦关系求出, 用以提供与参考面有关的测试物表面轮廓。这些数值方法通常称为相移算法。

[0005] PSI 中的相移能够通过改变从测量表面至干涉测量仪与从参考面至干涉测量仪之间的相对光程长度被产生。举例而言, 参考面能够相对于测量表面移动。或者, 可通过改变测量光和参考光的波长, 对于恒定且非零的光程差来产生相移。关于后者的申请已知为波长调整 PSI, 且例如在授予 G. E. Sommargren 的美国专利 No. 4, 594, 003 中。

[0006] 另一方面, 在与相互干涉的测试光和参考光的相干长度可比较 (例如, 使得发生干涉条纹处具有至少某些相干包络线的调制) 或大于其的范围内, 低相干扫描技术扫描干涉测量仪的参考光与测量光程之间的光程差来为每一个相机像素 (camera pixel) 产生扫描式干涉测量信号, 每一个相机像素被用来测量干涉谱。相较于 PSI 通常所使用的光相干长度和测量中扫描的 OPD 的范围, 该光的相干长度是比较短的。举例而言, 通过使用白光光源, 可以产生低相干长度, 这又称为扫描白光干涉测量法 (SWLI)。典型的扫描白光干涉测量 (SWLI) 信号是接近零光程差位置的数个条纹。该信号典型通过具有铃形条纹对比度包络线的正弦载波调制 (即“条纹”) 来表征。低相干干涉测量法的传统构思利用条纹的局部化 (localization) 来测量表面轮廓。

[0007] 低相干干涉测量处理技术包括两个主要的趋势。第一种方法是定位包络线的峰值 (peak) 或中心 (center), 假设这个位置对应于双光束干涉测量仪的零光程差, 其中一个光束反射自物表面。第二种方法是将信号转换至频域 (frequency domain) 并计算相位相对于波长的变化速率, 假设一个大致上线性的斜率正比于物位置。举例而言, 请参考授予 Peter de Groot 的美国专利 No. 5, 398, 113。第二种方法称为频域分析 (FDA)。

[0008] 低相干扫描干涉测量处理技术用以测量具有复杂表面结构的物体的表面形貌和/或其他特性,所述物体例如薄膜、不相似材料的离散结构、或干涉显微镜的光学解析度无法解析的离散结构。这些测量有关于平板显示器元件的表征、半导体晶片的测量,以及原位薄膜或不相似材料分析。举例而言,请参考 Peter de Groot 等人的名为"Profiling Complex Surface Structures Using Scanning Interferometry"的美国专利公开 No. US-2004-0189999-A1(公开日期:2004年9月30日),其内容通过引用合于此,以及 Peter de Groot 的为"Interferometry Method for Ellipsometry, Reflectometry, and Scatterometry Measurements, including Characterization of Thin Film Structures"的美国专利公开 No. US-2004-0085544-A1(公开日期:2004年5月6日),其内容通过引用合于此。

## 发明内容

[0009] 本公开总体涉及用以减少干涉测量中的不确定性的方法和系统。更具体而言,所述方法和系统用以减少可在低相干干涉测量中产生的误差,在测量期间的两个连续的探测器帧之间的实际光程差(OPD)增量背离理论(nominal)光程差增量时产生所述误差。这种误差来自如振动的源并且被称为“扫描误差”。

[0010] 一种解决扫描误差问题的可能方法是表征或监测仪器的真正的扫描历史,并将这些信息用于信号的处理以校正这些信息。一种收集这些信息的方法是使用与干涉测量仪协作的激光位移测量干涉测量仪(DMI)。还一般地说,扫描历史能够使用监测干涉信号而被取得,监测干涉信号使用具有大于光程差扫描范围的相干长度的源来取得。虽然扫描历史的信息可以使用传统的PSI算法而从监测干涉信号被取得,但是申请人认为当振动频率高于干涉测量仪的探测器的帧频时,所述分析将无法取得扫描误差的信息。然而,在多个监测信号被取得且具有不同相位的情况,所述多个监测信号能够用来决定由这样的高频振动导致的扫描误差的信息。

[0011] 因此,在低相干干涉测量数据的获取期间,本公开的系统同时在视场(FOV)中的几点收集干涉数据,干涉数据具有一个范围的相位偏差或干涉频率偏差,使用相同于低相干干涉测量数据获取时所用的干涉测量光学部件,但是采用操作于单一波长(或提供具有足够大的相干长度的光的波段)的分立的探测器或等效的探测装置。处理器根据监测干涉数据来决定扫描移动历史,监测干涉数据包括在一振动频率范围上的振动(包括低或高振动频率)。接着,在进行任何的处理之前,这个信息用来校正宽带的干涉测量数据。

[0012] 普遍而言,本公开的方法和系统能够应用于将测试物成像至探测器的干涉显微镜(传统的成像),或是在探测器上的位置相应于测试物上的特定入射角的干涉显微镜(例如将显微镜的光瞳平面成像在探测器上)。这种后者的配置在此被称为光瞳平面的SWLI(PUPS)。举例而言,传统的成像系统提供测试物的表面特征的三维轮廓。在另一方面,PUPS则提供表面的小区域的详细的结构信息,包括多层膜厚度、折射率分析以及在测量范围中无法被光学解析的特征的尺寸。所述两种测量模式通常在视场中使用多探测器元件(例如摄影机)来收集数据,视场则涵盖了表面图像或光瞳平面图像。

[0013] 在传统的成像或PUPS中,数据通常是在1/10秒至数秒内被取得的,并且所述两种测量模式都对数据获取时发生的机械振动敏感,其中扫描误差造成系统噪声的上升。

[0014] 在使用 PUPS 测量无法被光学解析的特征中,系统的尺寸解析度反比于干涉测量频谱振幅的噪声,其中该噪声是振动和扫描误差的复杂函数。一般认为,若能降低因振动和扫描所造成的噪声,则 PUPS 工具的解析度会大幅地提升,随着特征尺寸的缩小,有助于 PUPS 系统跟上例如半导体工艺测量方法。

[0015] 低相干干涉测量广泛地用于具有极差的环境控制的生产环境中,所述生产环境产生极大的振动噪声。由于需要在所述环境中使用先进的 3D 光学测量,所以亟需振动的解决方案,如本公开所披露的方法和系统。

[0016] 在另一方面中,本方法包括在取得扫描误差的数据之后,校正低相干干涉测量数据的方法。当使用上述技术取得扫描误差信息时,其他方法也是可能的。举例而言,扫描误差的信息能够以多种方法取得,例如使用加速度计、接触探针、电容计、气压计、光学编码器 and / 或基于低相干干涉测量数据自身的解释的技术。

[0017] 普遍而言,当取得扫描误差信息之后,该信息被用于进一步的数据处理,尽可能地产生接近未受扰动的系统的数据的数据。普遍而言,扫描误差的数据具有多种使用方式,用以改善扫描干涉测量的精度。

[0018] 在一些实施例中,数据处理涉及频谱分析方法,所述方法使用扫描移动信息并取代数据处理链的一部分的传统的离散傅立叶算法。然而,频谱分析方法被广泛地应用于各种未均匀间隔取样的数据,并因此非仅限于本申请的一定类型。

[0019] 在一些实施例中,算法始于产生一组基函数,基函数对应于以给定的不均匀增量取样的不同频率的纯振动信号。这些基函数表示失真的波。接下来,类似于使用常规的离散傅立叶转换 (DFT) 计算的均匀取样的数据集的结果,通过求解线性方程系统,发现该关注的信号的频谱分量,该关注的信号被分解为基函数。

[0020] 求解线性方程系统可以通过矩阵求逆的方法而被计算,其中矩阵的列为基函数。接着,逆矩阵被乘上包括频谱分析后的数据的矢量。

[0021] 当分析使用传统成像所获得的低相干干涉信号时,要注意的是,应该对所有的像素使用相同的逆矩阵。因此,频谱分析被简化为一个矩阵求逆以及 P 次将矩阵乘以矢量,其中 P 为像素个数。就计算成本而言,这种方法不比执行常规的 DFT 来的快,这是因为对于离散傅立叶转换 (DFT) 有高度优化的算法。

[0022] 或者,所述方法能够当在干涉测量仪的视场的不同位置记录的信号具有不同 (但已知) 的取样增量时被使用。举例而言,在一些情况中,增量分布能够描述为干涉测量腔的偏转 (tilt) 扰动和活塞移动 (piston) 扰动的组合。

[0023] 通过些许的改变,本方法能够补偿源 (例如显微镜中的光源) 强度波动的效应。基函数则是在已知取样位置被取样的纯振荡信号,其中每一个数值乘上一个正比于相应光源强度的因子,其在一独立的测量中是已知的。

[0024] 在一些实施例中,使用复合参考物来决定有关于扫描误差的信息。复合参考物是具有至少二种参考界面的参考物。举例而言,参考界面为光学元件的表面、两种光学元件之间的界面、光学元件与涂层之间的界面或是光学元件的两种涂层之间的界面。主参考界面作为传统的参考界面,提供干涉测量系统中的参考光来检测物表面,例如表面高度或其他特征。普遍而言,由主参考界面产生的干涉条纹在主相机或其他类型的成像装置上是可见的,主相机或其他类型的成像装置连接到计算机或其他数据获取或处理设备。

[0025] 当扫描干涉显微镜的光程差时,第二参考界面用提供信息,使得测试物相对于干涉显微镜的移动能够被监测。普遍而言,第二参考界面相对于主参考界面机械固定。换言之,在数据获取期间,第二参考界面关于主参考界面的相对位置和偏转是维持不变的。主参考界面和第二参考界面的效应是提供依赖视场的复有效反射率,在系统的视场中,复有效反射率至少在相位上是变化的。普遍而言,有效反射率被构建以有助于决定干涉成像的整体的或低空间频率的相位偏移。

[0026] 在一些实施例中,复合参考物的第二参考界面的干涉结果是能够被第二相机(也称为监测相机)所见的,但却是无法被主相机所见,主相机仅能看到主参考界面反射与例如物体表面反射之间的干涉。

[0027] 在一些实施例中,主参考界面和第二参考界面具有相对的倾斜,因而在倾斜的方向上产生相位骤变的有效反射率。

[0028] 普遍而言,仅根据例如监测相机看到的第二参考界面的干涉结果的分析提供了有助于仅根据主相机看到的主参考界面的干涉效应的解释的信息。

[0029] 为了分辨主参考界面和第二参考界面之间的干涉效果,监测相机能够操作于源频谱,该源频谱不同于主相机操作的频谱。举例而言,监测相机仅能看到频谱上窄带的光(例如单色光),而主相机则能够看到频谱上宽带的光。可替换的或附加的,监测相机可能看到与到达主相机的光的不同波长的光。

[0030] 可替换的或附加的,第二参考界面能够被调整,而使其相对于主参考界面具有足够的角度或其他几何特性,从而其反射可以被分离以仅能被监测相机所探测。举例而言,从第二参考界面反射回来的光会沿着不入射主相机的路径传播。

[0031] 在一些实施例中,扫描误差的信息是使用光纤基的DMI而被获得。光纤基DMI可以包括使用商用元件(例如通讯元件)而形成的简单小型的传感器。普遍而言,光纤基传感器系统可独立于干涉测量系统而被操作,并且可通过使用例如共用处理器而被同步,该共用处理器用以控制系统。独立的传感器可以使用例如共用光源和共用参考腔而被多路化。传感器的例子可包括提供照明、外差、光分布、光探测以及相位提取的元件。在一些实施例中,传感器系统的传感器被附加于干涉测量系统的不同部分,用以监测在测量过程中产生的各种扫描移动(自由度)。来自光纤基DMI的信息能够用于干涉测量系统(例如干涉显微镜)的自动聚焦。

[0032] 本发明的各个方面总结如下。

[0033] 普遍而言,在一方面中,本公开提供一种设备,其包括宽带扫描干涉测量系统,宽带扫描干涉测量系统包括干涉测量光学部件,用以结合来自一测试物的测试光和来自一参考物的参考光,而在探测器上形成干涉图案,其中测试光和参考光来自一共用光源。干涉测量系统还包括一扫描台,用以扫描从共用光源至探测器的、测试光和参考光之间的光程差,以及包括探测器的探测器系统,用以纪录一系列的光程差增量的每一者的干涉图案,其中每一个光程差增量的频率定义一帧频。干涉测量光学部件还用以产生至少二个监测干涉测量信号,当扫描光程差时,监测干涉测量信号的每一者表示光程差的变化,其中探测器系统还用以纪录监测干涉测量信号。该设备也包括一电子处理器,电子处理器电性耦接于探测器系统和扫描台,在大于所述帧频的频率,用以决定光程差增量对扰动灵敏度的信息。

[0034] 本设备的实施例可包括一或多个以下特征和/或其他方面的特征。举例而言,扫

描台可用以在大于共用光源的相干长度的范围中扫描光程差。扫描台可通过改变干涉测量光学部件相对于测试物的焦点来扫描光程差。扫描台可在不改变干涉测量光学部件相对于测试物的焦点的情况下扫描光程差。扫描台可通过改变参考物相对于干涉测量光学部件的位置来扫描光程差。

[0035] 在一些实施例中,干涉测量光学部件包括 Mirau 物镜或 Linnik 物镜。干涉测量光学部件将测试物成像至探测器。

[0036] 干涉测量光学部件可定义光瞳平面并且用以将光瞳平面成像至探测器。扫描台可用以扫描光程差,其中光程差根据光瞳平面中的位置而变化,并且决定光程差增量的信息可包括考虑干涉图案的位置相关性。在一些实施例中,扫描台在不改变干涉测量光学部件相对于测试物的焦点的情况下扫描光程差。

[0037] 干涉测量光学部件可包括一光学元件,用以从输出光产生监测光,输出光是由于干涉测量光学部件所提供的,其中输出光包括测试光和参考光。光学元件为分束器,用以将输出光的一部分导引至探测器,以及将输出光的另一部分导引至第二探测器,第二探测器用以纪录监测干涉测量信号。可替换地或附加地,光学元件包括频谱滤波器,用以将输出光的一部分导引至探测器系统,其中监测干涉测量信号是根据输出光的一部分而被探测的。输出光的该部分可为输出光的单色光部分。监测光可来自共用光源。监测光可相应于测试光和参考光的一频谱分量。干涉图案可相应于输出光的强度分布。监测光可来自一第二光源,该第二光源不同于共用光源。该监测光源的相干长度可大于共用光源的相干长度。

[0038] 在一些实施例中,电子处理器通过将相应的正弦函数与至少二个监测干涉测量信号的每一者匹配,用以决定光程差增量的信息。监测干涉测量信号的每一者可包括多个取样数据点,所述取样数据点是在扫描光程差时使用探测器所取得的,将正弦函数与监测干涉测量信号匹配可包括对取样数据点作内插以提供一内插信号。将正弦函数与监测干涉测量信号匹配还可包括根据内插信号将理论干涉相位与每一个干涉测量信号相关联。决定光程差增量的信息还可包括根据相应的理论干涉相位来计算监测干涉测量信号的测量相位中的偏移。

[0039] 至少二监测干涉测量信号可具有不同的干涉相位。至少二监测干涉测量信号可具有不同的频率。

[0040] 在一些实施例中,第二探测器为多元件探测器,该多元件探测器可包括用以纪录所述至少二监测干涉测量信号的多个元件。

[0041] 探测器系统包括分立主探测器的第二探测器,第二探测器用以纪录至少二监测干涉测量信号。第二探测器为多元件探测器,用以使得每个元件纪录一相应的监测干涉测量信号。

[0042] 电子处理器还可用以根据相应于干涉图案的主干涉信号来决定测试物的信息,干涉图案是使用探测器而被记录的。决定信息可包括根据光程差增量的信息来减少信息的不确定性。

[0043] 普遍而言,在另一方面,本发明的方法包括提供提供低相干干涉测量信号,低相干干涉测量信号使用扫描干涉测量系统产生,其中使用干涉测量光学部件,将来自测试物的测试光和来自参考物的参考光结合以在一探测器上形成干涉图案,所述探测器用以纪录所述干涉图案,同时扫描所述测试光和参考光之间的一光程差,对于一系列的光程差增量的

每个,所述扫描干涉测量系统产生所述低相干干涉测量信号,每一个所述光程差增量的频率定义一帧频。本方法还包括提供至少二监测干涉测量信号,监测干涉测量信号的每一者是由干涉测量光学部件所产生,当扫描光程差时,监测干涉测量信号的每一者表示光程差的变化。本方法还包括根据监测干涉测量信号,决定在大于帧频的频率时光程差增量对扰动灵敏度的信息。

[0044] 本方法的实施例可包括一或多个以下特征和/或其他方面的特征。举例而言,测试光和参考光可产生自一共用光源,并且光程差是在大于共用光源的相干长度的范围被扫描的。扫描光程差可包括改变干涉测量光学部件相对于参考物的位置。提供低相干干涉测量信号可包括将测试物成像至探测器。

[0045] 在一些实施例中,干涉测量光学部件定义光瞳平面,并且提供低相干干涉测量信号包括将光瞳平面成像至探测器。决定光程差增量的信息可包括考虑所述干涉图案的位置相关性。

[0046] 提供至少二监测干涉测量信号可包括由干涉测量光学部件提供的输出光产生监测光,其中输出光包括测试光和参考光。监测光可使用探测器而被探测。监测光可使用第二探测器而被探测,第二探测器不同于用以纪录干涉图案的探测器。产生监测光可包括将输出光进行频谱滤光(spectrally filtering)。在一些实施例中,监测光产生自相同于测试光和参考光的光源。在一些实施例中,监测光产生自不同于测试光和参考光的光源。监测光源的相干长度可大于测试光和参考光源的相干长度。

[0047] 决定光程差增量的信息可包括将一相应的正弦函数与所述至少二个监测干涉测量信号的每一者匹配。每一个监测干涉测量信号可包括多个取样数据点,并且将正弦函数与监测干涉测量信号匹配可包括对取样数据点作内插以提供一内插信号。将正弦函数与监测干涉测量信号匹配还可包括根据内插信号将理论干涉相位与每一个干涉测量信号相关联。绝对光程差增量的信息还可包括基于相应的理论干涉相位,计算监测干涉测量信号的所测量的相位的偏移。

[0048] 至少二监测干涉测量信号可具有不同的干涉相位。至少二监测干涉测量信号可具有不同的频率。

[0049] 本方法还可包括根据相应于干涉图案的主干涉测量信号来决定测试物的信息,干涉图案被记录在探测器中。决定信息可根据光程差增量的信息来减少信息的不确定性。

[0050] 在另一方面中,本发明的工艺用以制造一显示面板,且包括:提供显示面板的元件;通过与前述方面讨论有关的方法或设备来决定元件的信息;以及使用该元件来制造显示面板。此元件可包括以一间隙相互间隔的一对基板,且所述信息包括间隙的信息。形成显示面板的步骤包括根据该信息调整间隙。形成显示面板可包括以一液晶材料填充间隙。

[0051] 所述元件可包括一基板以及基板上的抗蚀剂层。所述信息包括抗蚀剂层厚度的信息。抗蚀剂层可为图案化层,并且信息可包括图案化层的一特征的尺寸误差或重叠误差。形成显示器的步骤可包括蚀刻抗蚀剂层下的一层材料。

[0052] 所述元件包括一基板,且基板包括间隔物。所述信息可包括间隔物的信息。形成显示器可包括根据信息修正间隔物。

[0053] 普遍而言,在另一方面,本发明的方法包括提供测试物的一或多个干涉测量信号,其中干涉测量信号相应于一系列的光程差值,一系列的光程差值因为噪声而未等间距。本

方法还包括提供有关于一系列光程差值的未等间距的信息；将每一个干涉测量信号分解为来自多个基函数的贡献，每一个基函数相应于不同的频率并且以未等间距的光程差值所取样；以及使用多个基函数的每一者对每一个干涉测量信号的贡献的信息来决定测试物的信息。

[0054] 本方法的实施例可包括一或多个以下特征和/或其他方面的特征。将每一个干涉测量信号分解为每个基函数的贡献可包括干涉测量信号的基函数的每一者的振幅和相位的信息。每一个基函数可以未等间距的光程差值所取样的正弦基函数。所述分解可为一线性分解。

[0055] 一或多个干涉测量信号可包括相应于测试物的不同位置的多个干涉测量信号。一或多个干涉测量信号可包括相应于一物镜的光瞳平面的不同位置的多个干涉测量信号，该物镜用以照射测试物以产生干涉测量信号。每一个干涉测量信号可被分解为来自相同多个基函数的贡献。

[0056] 每一个干涉测量信号可相应于干涉测量信号强度值，干涉强度值是当来自测试物的测试光和参考光在一探测器中结合时所测量到的，其中测试光和参考光来自一共用光源，并且光程差是从共用光源至探测器的、测试光和参考光之间的光程差。

[0057] 多个基函数可包括非正交的基函数。多个基函数可为线性独立的基函数。

[0058] 分解干涉测量信号可包括形成一矩阵，矩阵的每一列相应于一基函数；求出矩阵的逆矩阵；以及将逆矩阵应用于每一个干涉测量信号。每一个基函数的矩阵的单元数目大于基函数的数目。

[0059] 每一个干涉测量信号可相应于干涉测量信号强度值，对于不同的 OPD 值的每个，干涉强度值是当来自测试物的测试光和参考光在一探测器中结合时所测量到的，其中测试光和参考光来自一共用光源，并且每一个基函数可考虑测量后的所述干涉强度值相对于理论值的变化，所述理论值相应于没有误差的干涉测量信号。该变化起因于光源的强度水平的变化。变化起因于探测器的有限帧积分时间。

[0060] 提供有关于一系列光程差值的未等间距的信息可包括产生表示光程差变化的至少一监测干涉测量信号，其中相应于所述光程差值的序列的所述监测信号被获得时，产生所述监测信号。未等间距的所述光程差值的序列的信息可包括产生多个监测信号。监测干涉测量信号可使用相同的干涉测量光学部件而产生，该干涉测量光学部件用以产生相应于一系列光程差值的干涉测量信号。

[0061] 使用信息可包括根据每一个多个基函数对每一个所述干涉测量信号的贡献的信息来构建校正后的干涉测量信号；以及根据校正后的干涉测量信号来决定所述测试物的信息。

[0062] 有关于一系列光程差值的未等间距的信息可通过使用传感器产生，该传感器比如位移测量干涉测量仪、加速度计、接触探针、电容计、气压计以及光学编码器。

[0063] 在另一方面，本发明的工艺用以制造一显示面板，其包括：提供显示面板的元件；通过与前述方面讨论有关的方法或下述讨论的设备来决定元件的信息；以及使用元件来形成显示面板。所述元件可包括以一间隙相互间隔的一对基板且所述信息可包括间隙的信息。形成显示面板可包括根据信息调整间隙。形成显示面板可包括以一液晶材料填充间隙。

[0064] 所述元件可包括基板以及基板上的抗蚀剂层。所述信息可包括抗蚀剂层厚度的信

息。抗蚀剂层可为图案化层,并且信息可包括图案化层的一特征的尺寸误差或重叠误差。形成显示器可包括蚀刻抗蚀剂层下的一层材料。

[0065] 所述元件可包括一基板,且基板包括间隔物,所述信息可包括间隔物的信息。形成显示器可包括根据信息来修正间隔物。

[0066] 普遍而言,在另一方面,本发明的设备包括干涉测量系统,其包括干涉测量光学部件,用以结合来自测试物的测试光和来自参考物的参考光,而在探测器上形成干涉图案,其中所述测试光和参考光来自一共用光源。干涉测量系统还包括扫描台,用以扫描从共用光源至探测器的、测试光和参考光之间的光程差;以及包括所述探测器的探测器系统,用以纪录一系列的光程差增量的每一者的干涉图案,由此提供一或多个干涉测量信号;以及电子处理器,耦接于探测器系统,根据所述一或多个干涉测量信号来决定测试物的信息。一系列的光程差增量值因为噪声而未被彼此等间距,并且电子处理器通过将每一个干涉测量信号分解为来自多个基函数的贡献来决定测试物的信息,每一个基函数对应于不同的频率并且以未等间距的光程差值所取样。

[0067] 本设备的实施例可包括一或多个以下特征和/或其他方面的特征。举例而言,干涉测量光学部件可将测试物成像至探测器。干涉测量光学部件可定义一光瞳平面并且将光瞳平面成像至探测器。干涉测量仪可是干涉显微镜的一部分。扫描台可用以在大于共用光源的相干长度的范围扫描光程差。

[0068] 在一些实施例中,本设备还包括与电子处理器通讯的传感器,该传感器提供未等间距的光程差增量的信息至电子处理器。传感器可使用干涉测量光学部件来导引监测光束从测试物反射。传感器可为位移测量干涉测量仪、加速度计、接触探针、电容计、气压计或光学编码器。在一些实施例中,传感器用以从输入辐射导出第一波前和第二波前,并且结合所述第一和第二波前来提供输出辐射,所述输出辐射包括所述第一和第二波前的路径之间的光程差的信息,所述传感器包括设置于所述第一波前的路径中的反射元件,所述反射元件被安装于所述物镜或所述台上,以及光纤波导用以将所述输入辐射传送至所述传感器,或将所述输出辐射从所述传感器传送至传感器探测器。

[0069] 普遍而言,在另一方面,本发明的设备包括扫描干涉测量系统,该扫描干涉测量系统包括干涉测量光学部件,用以在照射角的一范围上将测试光导引至测试物,并且将从测试物反射回来的测试光与来自参考物的参考光结合,用以在多元件探测器中形成干涉图案,其中测试光和参考光来自一共用光源,并且干涉测量光学部件将结合后的光的至少一部分导引至探测器,使得探测器的不同元件相应于测试光照射测试物的不同照射角。干涉测量系统还包括扫描台,用以扫描从共用光源至探测器的、测试光和参考光之间的光程差,以及包括探测器的一探测器系统,用以纪录一系列的光程差增量的每一者的干涉图案,干涉测量光学部件还用以产生至少一个监测干涉测量信号,当扫描光程差时,该监测干涉测量信号表示光程差的变化,以及电子处理器电性耦接于探测器系统和扫描台,用以决定光程差增量对扰动灵敏度的信息。

[0070] 本设备的实施例可包括以下特征和/或其他方面的一或多个特征。举例而言,干涉测量光学部件可定义一光瞳平面并且将光瞳平面成像至探测器。扫描干涉测量系统是宽带的扫描干涉测量系统。扫描台可用以在大于或小于共用光源的相干长度的范围扫描光程差。当扫描光程差时,扫描干涉测量系统还可用以产生至少二监测干涉测量信号,每一个监

测干涉测量信号表示光程差的变化。每一个光程差增量的频率定义一帧频,并且电子处理器可用以决定在大于所述帧频的频率时所述光程差增量对扰动灵敏度的信息。扫描干涉测量系统可使用干涉光学部件来产生至少一监测干涉测量信号。

[0071] 普遍而言,在另一方面中,本公开的设备包括一干涉显微镜,干涉显微镜包括物镜以及相对物镜而可移动的台。本设备也包括一传感器,传感器用以从输入辐射导出第一波前和第二波前,并且结合所述第一和第二波前来提供输出辐射,所述输出辐射包括所述第一和第二波前的路径之间的光程差的信息,所述传感器包括设置于所述第一波前的路径中的反射元件,所述反射元件被安装于所述物镜或所述台上。该设备包括光纤波导,用以将所述输入辐射传送至所述传感器,或将所述输出辐射从所述传感器传送至对应的探测器;以及电子处理器,用以根据传感器的信息来监测所述台相对于物镜的位移。

[0072] 本设备的实施例可包括以下特征和/或其他方面的一或多个特征。举例而言,干涉显微镜可为低相干干涉扫描干涉显微镜。干涉显微镜可包括干涉测量光学部件以及探测器,该干涉测量光学部件用以将设置于所述台上的测试物成像至探测器。干涉显微镜可包括干涉测量光学部件以及探测器,其中干涉测量光学部件定义光瞳平面且用以将光瞳平面成像至探测器。

[0073] 物镜可为 Mirau 物镜或 Linnik 物镜。

[0074] 在另一方面中,本发明的干涉测量系统包括探测器子系统、扫描台以及电子处理器。探测器子系统包括监测探测器以及干涉测量光学部件,干涉测量光学部件将来自测试物的测试光与来自第一参考界面的主参考光和来自第二参考界面的第二参考光结合,用以在监测探测器中形成监测干涉图案,其中第一和第二参考界面相对于彼此机械固定。当探测器子系统纪录一系列的光程差的每一者的监测干涉测量图案时,扫描台用以扫描至监测探测器的、测试光与主参考光和第二参考光之间的光程差。电子处理器电性耦接于探测器子系统与扫描台,电子处理器用以根据探测到的监测干涉图案来决定光程差增量的信息。

[0075] 本干涉测量系统的实施例可包括以下特征和/或其他方面的一或多个特征。举例而言,探测器子系统包括主探测器以及干涉测量光学部件,干涉测量光学部件将测试光和第一参考光结合,用以在主探测器上形成主干涉图案,主干涉图案不同于监测干涉图案。电子处理器可用以根据探测到的主干涉图案来决定测试物的信息。决定测试物的信息可包括根据光程差增量的信息来减少因干涉测量系统中的振动所导致的测试物的信息的不确定性。

[0076] 干涉测量光学部件可被配置使得主探测器无法接收第二参考光。干涉测量光学部件包括孔径光阑,用以将测试光和主参考光传送至主探测器,但是阻挡第二参考光到主探测器。干涉测量光学部件可包括波长滤波器,用以将测试光和主参考光传送至主探测器,但是阻挡第二参考光到主探测器。

[0077] 监测探测器可为多元件探测器,并且第一和第二参考界面可被配置使得主参考光和第二参考光之间的相对相差在多元件探测器的视场中变化。

[0078] 第一和第二参考界面可被排布使得主参考光和第二参考光沿着在监测探测器的非平行路径传播。第一和第二参考界面可为表面。第一和第二参考界面可对应于共用光学元件的相对表面。共用光学元件可为光楔(wedge)。第一和第二参考界面可对应于不同光学元件的表面。

[0079] 第二参考界面可为平面界面。举例而言,主参考界面为平面界面。在一些实施例中,主参考界面为非平界面。非平面的界面可为球面。主参考界面可为非球界面。

[0080] 干涉测量光学部件定义一光轴,且第一和第二参考界面相对于该光轴以不同角度取向。

[0081] 干涉测量系统可包括一照明子系统,用以产生测试光、主参考光以及第二参考光。照明子系统可包括共用光源,用以产生测试光、主参考光以及第二参考光。在一些实施例中,共用光源为宽带光源。照明子系统可包括主光源以及监测光源,主光源用以提供测试光和主参考光,监测光源用以提供第二参考光。主光源可为宽带光源。监测光源可为窄带光源(例如单色光源)。

[0082] 照明子系统可包括光源以及扫描台,光源用以提供至少测试光与主参考光,扫描台用以在大于光源的相干长度的范围扫描光程差。照明子系统可包括光源以及扫描台,光源用以提供至少测试光与主参考光,扫描台用以在小于光源的相干长度的范围扫描光程差。

[0083] 干涉测量光学部件可将测试物成像至探测器子系统中的多元件探测器。干涉测量光学部件可定义一光瞳,并且干涉测量光学部件可将光瞳成像至探测器子系统中的多元件探测器。多元件探测器可为监测探测器。

[0084] 干涉测量光学部件可被设置为Fizeau干涉测量仪、Linnik干涉测量仪或Mirau干涉测量仪。

[0085] 普遍而言,在另一方面中,本发明的方法包括将来自测试物的测试光与来自第一参考界面的主参考光和来自第二参考界面的第二参考光结合,用以在监测探测器上形成第一监测干涉图案,其中第一和第二参考界面相对于彼此机械式固定;扫描至监测探测器的、测试光与主参考光和第二参考光之间的光程差;纪录一系列的光程差增量的每一者的监测干涉图案;以及根据探测到的监测干涉图案来决定光程差增量的信息。本方法的实施例可包括其他方面的特征。

[0086] 普遍而言,在另一方面中,本发明的干涉测量系统包括干涉测量光学部件以及电子处理器。干涉测量光学部件将来自测试物的测试光与来自第一参考界面的主参考光和来自第二参考界面的第二参考光结合,用以在监测探测器上形成第一干涉图案,干涉测量光学部件也将测试光与主参考光结合,用以在主探测器上形成第二干涉图案,其中第一和第二参考界面相对于彼此机械式固定。电子处理器电耦接于主探测器和监测探测器,电子处理器根据第二干涉图案来决定测试物的信息,并且决定测试物的信息包括根据第一干涉图案的信息来减少由于干涉测量系统中的振动所导致的测试物的信息的不确定性。本干涉测量系统的实施例可包括其他方面的特征。

[0087] 普遍而言,在另一方面中,本发明的方法包括将来自测试物的测试光与来自第一参考界面的主参考光和来自第二参考界面的第二参考光结合,用以在监测探测器中形成第一干涉图案;将测试光与主参考光结合,用以在主探测器上形成第二干涉图案,其中第一和第二参考界面相对于彼此机械式固定;以及根据第二干涉图案来决定测试物的信息,其中决定测试物的信息包括根据第一干涉图案的信息来减少由于干涉测量系统中的振动所导致的测试物的信息的不确定性。本干涉测量系统的实施例可包括其他方面的特征。

[0088] 普遍而言,在另一方面中,本发明的设备包括显微镜以及传感器系统。所述显微镜

包括物镜和用以将测试物相对于物镜定位的台,所述台相对于该物镜可移动。传感器系统包括传感器光源、干涉传感器、光纤波导、可调整光学腔以及电子控制器。干涉传感器接收来自传感器光源的光,产生光的第一部分和第二部分之间的光程差,光程差有关于物镜和台之间的距离;以及将光的第一部分和第二部分结合来提供输出光。探测器探测来自干涉传感器的光。光纤波导在传感器光源、干涉传感器与传感器之间引导光。可调整光学腔在从传感器光源至干涉传感器的光路中。电子控制器与探测器通讯,根据所探测到的输出光来决定光程差相关的信息。

[0089] 本设备的实施例可包括以下特征和/或其他方面的特征的一个或多个特征。举例而言,电子控制器可根据信息来调整显微镜的焦点。显微镜可为干涉显微镜。干涉显微镜为扫描白光干涉测量(SWLI)显微镜。干涉显微镜为光瞳平面 SWLI 显微镜。物镜可是 Mirau 物镜、Linnik 物镜或 Michelson 物镜。干涉显微镜可通过用测试光照射测试物并将测试光与来自参考物的参考光结合,以在探测器上形成干涉图案,用以决定设置在台上的测试物的信息,其中测试光和参考光来自共用光源,并且本设备可根据与传感器光程差有关的已决定的信息来减少因扫描误差所导致的测试物的信息的不确定性。

[0090] 在一些实施例中,传感器系统包括一或多个额外的干涉传感器,每一个额外的干涉传感器接收来自传感器光源的光。每一个干涉传感器可产生其相应光在两个分量间的光程差,每一个光程差有关于物镜和台间沿着一相应轴的相应位移。电子控制器可根据决定至少二个干涉传感器的有关于相应光程差的步骤来决定台相对于物镜的倾斜的信息。传感器系统可包括一或多个额外的探测器,每一个探测器从相应的干涉传感器接收输出光。每一个额外的干涉传感器通过相应的光纤波导可从传感器光源接收光并将输出光导引至其相应的传感器。可调整光学腔可在从传感器光源至每个干涉传感器的光路中。

[0091] 干涉传感器可包括透镜,该透镜接收离开光纤波导的光并将光聚焦至腰部。透镜可是渐变折射率透镜。该透镜可被附加于该物镜。或者,该透镜可被附加于台。在一些实施例中,光纤波导是具有热膨胀芯的光纤。

[0092] 显微镜可包括显微镜光源以及物镜,物镜包括一或多个光学元件。显微镜将来自显微镜光源的光引导到测试物,并且一或多个光学元件收集来自测试物的光,并且干涉传感器可通过物镜的一或多个光学元件而将光导引至台。

[0093] 传感器光源可为宽带光源。传感器光源可在波长从 900nm 至 1,600nm 具有峰值强度。传感器光源的半宽高可在 50nm 或以下。传感器光源的相干长度可在约 100 微米或以下。

[0094] 可调整光学腔可包括光的两个光路,每一个路径包括光纤延伸模块。传感器光源和探测器可在一个壳体中,壳体与显微镜分隔开来。

[0095] 所述信息可是物镜透镜和台之间沿着轴的位移的信息。显微镜可扫描平行于所述轴的台。所述信息可是物镜透镜和台之间的绝对位移的信息。或者,信息可是物镜透镜和台之间的相对距离的信息。

[0096] 显微镜可包括显微镜光源,显微镜可将来自显微镜光源的光引导至位于台上的测试物,其中显微镜光源峰值强度的波长约为 100nm 或更大,根据探测器光源的峰值强度的波长。显微镜光源峰值强度的波长范围可从 300nm 至 700nm,并且探测器光源的峰值强度的波长范围为 900nm 至 1,600nm。

[0097] 普遍而言,在另一方面中,本发明的设备包括成像干涉测量仪以及传感器系统。成像干涉测量仪包括一或多个光学元件以及台,该台用以将测试物相对于一或多个光学元件定位,台相对于一或多个光学元件可移动。传感器系统包括传感器光源、干涉传感器、光纤波导、可调整光学腔以及电子控制器。干涉传感器接收来自传感器光源的光,产生光的第一部分和第二部分之间的光程差,光程差有关于一个或多个光学元件和台之间的距离;以及将光的第一部分和第二部分结合来提供输出光。探测器探测来自该干涉传感器的输出光。可调整光学腔在从传感器光源至干涉传感器的光路中。电子控制器与探测器通讯,用以根据所探测到的输出光来决定光程差相关的信息。

[0098] 本设备的实施例可包括以下特征和/或其他方面的特征的一个或多个特征。举例而言,成像干涉测量仪可为干涉显微镜。成像干涉测量仪可为 SWLI 干涉测量仪或 PUPS 干涉测量仪。

[0099] 普遍而言,在另一方面中,本发明的设备包括成像干涉测量仪以及传感器系统。成像干涉测量仪包括一或多个光学元件以及台,台用以将测试物相对于一或多个光学元件定位,台相对于一或多个光学元件而可移动。传感器系统包括传感器光源、多个干涉传感器、多探测器、可调整光学腔以及电子控制器。每一个干涉传感器接收来自传感器光源的光,产生光的相应的第一部分和相应的第二部分之间的光程差,每一个光程差有关于一或多个光学元件和台之间的相应距离;以及将光的第一部分和第二部分结合来提供相应的输出光。每一个探测器探测来自相应干涉传感器的光。可调整光学腔在从传感器光源至干涉传感器的光路中。电子控制器与探测器通讯,用以根据来自每一个干涉传感器所探测到的输出光来决定光程差相关的信息。本设备的实施例可包括其他方面的一或多种特征。

[0100] 普遍而言,在另一方面中,本发明的设备包括显微镜以及传感器系统。显微镜包括物镜以及台,台用以将测试物相对于物镜定位,台相对于物镜而可移动。传感器系统包括传感器光源、多个干涉传感器、多个探测器、可调整光学腔以及电子控制器。每一个干涉传感器接收来自传感器光源的光;产生光的相应的第一部分和相应的第二部分之间的光程差,每一个光程差有关于物镜和台之间的相应距离;以及将光的相应的第一部分和第二部分结合来提供相应的输出光。每一个探测器探测来自相应干涉传感器的光。可调整光学腔在从传感器光源至干涉传感器的光路中。电子控制器与探测器通讯,用以根据来自每一个干涉传感器所探测到的输出光来决定光程差相关的信息。本设备的实施例可包括其他方面的一或多种特征。

[0101] 一些参考文献通过引用被引入本申请。当与上述参考文献冲突时,当以本申请为准。

[0102] 所述一或多个实施例的细节将如所附图示与以下说明书中阐述。根据说明书和所附图示以及权利要求,其他特征和优点是显见的。

## 附图说明

[0103] 图 1 为包括干涉显微镜的低相干干涉测量系统的一实施例的示意图。

[0104] 图 2 为探测器的视场中的干涉图案的图示。

[0105] 图 3 为显示低相干干涉测量信号的强度相对于光程差的曲线。

[0106] 图 4 为显示监测信号的强度相对于光程差的曲线。

- [0107] 图 5 为在一次扫描期间,测试物相对位移作为时间函数的曲线,显示扫描误差的效应。
- [0108] 图 6 为显示系统对扫描误差的灵敏度作为振动频率的函数的曲线。
- [0109] 图 7 为包括干涉显微镜的低相干干涉测量系统的一实施例的示意图。
- [0110] 图 8 为示出像平面内与光瞳平面的光之间关系的示意图。
- [0111] 图 9 包括干涉显微镜的低相干干涉测量系统的一实施例的示意图。
- [0112] 图 10 为包括干涉显微镜的低相干干涉测量系统的一实施例的示意图。
- [0113] 图 11 为 J 矩阵方法的流程图。
- [0114] 图 12A 和图 12B 是 J 矩阵方法的流程图。
- [0115] 图 13A 至图 13E 为将 J 矩阵方法与 DFT 方法作比较的数值实验的曲线。
- [0116] 图 14A 至图 14E 为将 J 矩阵方法与 DFT 方法作比较的数值实验的曲线。
- [0117] 图 15A 至图 15E 为将 J 矩阵方法与 DFT 方法作比较的数值实验的曲线。
- [0118] 图 16A 和图 16B 为说明 J 矩阵方法的数值实验的曲线。
- [0119] 图 17A 至图 17C 为说明 J 矩阵方法的数值实验的曲线。
- [0120] 图 18 为数值实验的干涉测量信号的曲线。
- [0121] 图 19 为具有复合参考物的干涉测量系统的一实施例的示意图。
- [0122] 图 20 为仅根据复合式参考物的强度反射率的模拟图像。
- [0123] 图 21A 显示图 20 的图像的强度反射率的曲线。
- [0124] 图 21B 显示图 20 的图像的相位变化的曲线。
- [0125] 图 22 是根据复合参考面和用监测相机探测到的测试物的模拟强度反射率图像。
- [0126] 图 23 是根据复合参考面和用主探测器探测到的测试物的模拟强度反射率图像。
- [0127] 图 24A 显示图 22 的图像的强度反射率的曲线。
- [0128] 图 24B 显示图 22 的图像的相位变化的曲线。
- [0129] 图 25A 显示图 23 的图像的强度反射率的曲线。
- [0130] 图 25B 显示图 23 的图像的相位变化的曲线。
- [0131] 图 26 是具有复合表面的干涉测量系统的数据处理的流程图。
- [0132] 图 27 是具有复合参考面的干涉测量系统的实施例的示意图。
- [0133] 图 28 是图 8 的干涉测量系统的实施例的示意图,包括光束导引系统。
- [0134] 图 29 是具有复合参考面干涉测量系统的实施例的示意图。
- [0135] 图 30 是具有复合参考面干涉测量系统的实施例的示意图。
- [0136] 图 31 是具有复合参考面干涉测量系统的实施例的示意图。
- [0137] 图 32 是低相干干涉测量系统的实施例的示意图,包括干涉显微镜以及激光位移干涉测量仪。
- [0138] 图 33 是组合后的设备的实施例的示意图,包括传感器系统以及干涉测量系统。
- [0139] 图 34 是传感器的实施例的示意图。
- [0140] 图 35 是参考腔的示图。
- [0141] 图 36 是组合后的设备的操作的流程图,该设备包括传感器系统以及干涉测量系统。
- [0142] 图 37 是组合后的设备的自动聚焦模式的示意图,包括传感器系统以及干涉测量

系统。

[0143] 图 38 是组合后的设备的移动监测模式的示意图,包括传感器系统以及干涉测量系统。

[0144] 图 39 图是显示 Mirau 物镜和两个传感器的组合的示意图。

[0145] 图 40 是显示 Michelson 物镜和一个传感器的组合的示意图。

[0146] 图 41 是显示 Linnik 物镜和两个传感器的组合的示意图。

[0147] 图 42A 是显示一物镜和一传感器的配置的示意图。

[0148] 图 42B 是显示一物镜和一传感器的配置的示意图。

[0149] 图 42C 是显示一个物镜和一个传感器的配置的示意图。

[0150] 图 43A 是显示 Michelson 物镜和两个传感器的组合的示意图。

[0151] 图 43B 是显示 Michelson 物镜和两个传感器的组合的示意图。

[0152] 图 43C 是显示 Linnik 物镜和一个传感器的组合的示意图。

[0153] 图 43D 是显示 Linnik 物镜和一个传感器的组合的示意图。

[0154] 图 44A 是显示 Michelson 物镜和一个传感器的组合的示意图。

[0155] 图 44B 是显示 Linnik 物镜和一个传感器的组合的示意图。

[0156] 图 45A 是显示 Michelson 物镜和两个传感器的组合的示意图。

[0157] 图 45B 是显示 Linnik 物镜和两个传感器的组合的示意图。

[0158] 图 45C 是显示 Linnik 物镜和三个传感器的组合的示意图。

[0159] 图 46 是显示物镜和具有传感器的扫描器的配置的示意图。

[0160] 图 47 是显示具有传感器的物镜以及分立的参考镜的配置的示意图。

[0161] 图 48A 是显示具有两个传感器的转台物镜以及两物镜的配置的示意图。

[0162] 图 48B 是显示具有一个传感器的转台物镜以及两物镜的配置的示意图。

[0163] 图 49A 是膜结构的示例性装置的示意图,由基板上沉积的铜特征上沉积电介质形成。

[0164] 图 49B 是图 49A 所示的装置在进行化学机械处理之后的示意图。

[0165] 图 50A 是物体的俯视示意图,物体包括基板(例如晶片,和覆盖层,如抗蚀剂层)。

[0166] 图 50B 是物体的侧视示意图。

[0167] 图 51A 是适用于焊料凸块工艺的结构示意图。

[0168] 图 51B 是图 51A 的结构在焊料凸块工艺之后的示意图。

[0169] 图 52A 是 LCD 面板的示意图,LCD 面板由数层所构成。

[0170] 图 52B 是制造 LCD 面板的各种步骤的流程图。

[0171] 图 52C 是 LCD 面板的检查站的实施例的示意图,检查站包括干涉传感器。

[0172] 在多种示图中的相似的参考符号表示相似的元件。

## 具体实施方式

[0173] 参考图 1,低相干干涉测量系统 100 包括干涉显微镜 110,干涉显微镜 110 用以研究测试物 175。干涉显微镜 110 是与通用型的计算机 192 作通讯,计算机 192 用以分析来自干涉显微镜 110 的数据信号,以便提供关于测试物 175 的信息。笛卡尔座标 (Cartesian coordinate) 系统被提供来作为参考座标。

[0174] 干涉显微镜 110 包括干涉物镜 167 和分束器 170, 分束器 170 将来自干涉显微镜 110 的光源子系统的照明光经由干涉物镜 167 反射至测试物 175, 并将从测试物 175 反射的照明光束传送至探测器子系统以供后续的探测。干涉物镜 167 是 Mirau 型物镜并且包括物镜透镜 177、分束器 179 以及参考面 181。

[0175] 光源子系统包括主光源 163、第二光源 197、以及光束结合器 164, 光束结合器 164 将来自主光源 163 和第二光源 197 的光结合之后, 再将结合后的光经由中继光学部件 169 和 171 导引至分束器 170。如同稍后的详细说明, 主光源 163 提供低相干的光以进行低相干干涉测量, 而第二光源 197 提供具有较长的相干长度的光, 用以在扫描期间监测扫描历史。

[0176] 主光源 163 是空间扩展宽带 (spatially-extended broadband) 光源, 提供具有宽带的波长范围的照明光束 (例如具有半高全宽 (FWHM) 超过 50nm 的发射光谱, 或是优选超过 100nm)。举例而言, 主光源 163 可是白光发光二极管、卤素灯的灯丝、弧光灯 (例如氙弧灯), 或是被称为超连续光源的光源, 超连续光源利用光学材料的非线性效应来产生非常宽带的光源光谱 (例如 FWHM 在约 200nm 或以上的光谱)。

[0177] 第二光源 197 的相干长度大于主光源 163 的相干长度。在一些实施例中, 第二光源 197 是高相干的光源, 例如单模激光光源。光源 197 是单色光源。

[0178] 探测器子系统也包括强度监测器 161, 耦接于主光源 163。监测器 161 提供主光源 163 的强度信息, 使得系统 100 考虑该强度的波动。

[0179] 探测器子系统包括主探测器 191、第二探测器 199, 以及分束器 198, 被配置以将来自干涉物镜 167 的光导引至主探测器和第二探测器。主探测器 191 和第二探测器 199 都是多元件探测器 (例如多元件 CCD 或 CMOS 探测器)。可选地, 探测器子系统包括带通滤波器 101, 带通滤波器 101 将射入第二探测器 199 的光加以滤波, 使得只有来自第二光源 197 的光能够到达第二探测器 199。

[0180] 在系统 100 的操作期间, 主光源 163 提供输入光 165, 经由中继光学部件 169 和 171 和分束器 170 至干涉物镜 167。来自第二光源 197 的光通过光束结合器 164 而与输入光 165 结合。物镜 167 和中继光学部件 189 将从测试物 175 反射的光 183 和 187 导引至探测器 191 上, 在探测器 191 的视场 (FOV) 中形成测试物 175 的图像。分束器 198 也将来自物镜 167 的部分的光导引至第二探测器 199。要注意的是, 边缘光线以 183 表示, 主光线以 187 表示。

[0181] 分束器 179 导引部分的光 (以光线 185 表示) 至参考面 181, 并且将从参考面 181 反射的光与从测试物反射的光线 185 重新结合。在探测器 191, 从测试物 175 反射的光 (称为测试光) 与从参考面 181 反射的光 (称为参考光) 的结合光在探测器 191 上形成光学干涉图案。因为干涉显微镜 100 用于传统成像, 所以光学干涉图案 (又称为干涉谱或干涉图像) 对应于测试物表面的图像。

[0182] 干涉显微镜 110 也包括驱动器 193, 驱动器 193 控制干涉物镜 167 相对于测试物 175 的位置。举例而言, 驱动器 193 可以是耦接于干涉物镜 167 的压电换能器, 用以调整测试物 175 和干涉物镜 167 之间在 Z 方向的距离。这种类型的测试物 175 和干涉物镜 167 之间的相对移动被称为焦点扫描, 因为其所扫描的是干涉物镜 167 的焦平面相对于测试物 175 的位置。

[0183] 在操作期间, 驱动器 193 相对于测试物 175 扫描干涉物镜, 由此改变测试光和参考

光之间的 OPD, 在每个探测器元件产生干涉测量信号。驱动器 193 通过连接线 195 连接于计算机 192, 其中计算机 192 可控制数据获取期间的扫描速度。附加地或者替换地, 驱动器 193 可提供扫描移动的信息 (例如预期的扫描增量) 至计算机 192。

[0184] 图 2 显示对于单一扫描位置, 探测器 191 的典型的光学干涉图案, 显示有关于测试物在 X 和 Y 方向的表面高度调制的干涉条纹。光学干涉图案在探测器 191 上的强度值由探测器 191 的不同元件所测量, 并且被提供至计算机 192 的微电子处理器以进行分析。每一个探测器元件在帧频 (例如约 30Hz 或以上、约 50Hz 或以上、约 100Hz 或以上) 下取得光强度数据, 在扫描期间帧频通常不变。强度值形成低相干干涉信号, 强度值由探测器元件测量的并且与测试光和参考光之间的 OPD 值序列相关。

[0185] 图 3 显示对于探测器 191 的单一元件, 探测到的强度 ( $I_i$ ) 作为扫描位置的函数的曲线。该曲线显示在测试光和参考光的零 OPD 位置的典型的低相干干涉信号, 具有被高斯包络线调制的正弦干涉条纹。高斯包络线的宽度取决于主光源 163 的相干长度。OPD 扫描长于光源的相干长度。

[0186] 当主探测器 191 取得低相干干涉信号时, 第二探测器 199 根据来自第二光源 197 的相干光来取得干涉信号。图 4 显示第二探测器 199 的单一像素的这样的干涉信号作为扫描位置 Z 的函数的曲线。使用第二探测器 199 所取得的干涉信号称为监测信号。

[0187] 典型的, OPD 以恒定速度扫描, 并且数据点是以等时距取得。理论上来说, 每一个数据点是在 OPD 的等位移增量的情况下所取得的。然而, 虽然扫描通常被假设是恒定速度进行的, 但是由于机械的缺陷或移动的干扰振动, 所以扫描移动经常相对于线性移动偏移。因此, 取得的干涉测量信号可包括有关于非均匀扫描的误差, 这造成实际扫描位置从与测量的强度值相关的理论扫描位置的偏移。

[0188] 这种误差称为“扫描误差”, 如图 5 的曲线图示。图 5 显示 z 为时间的函数的曲线, 其中 z 为测试物 175 和干涉物镜 167 之间的相对位移。本质而言, z 对应于测试光和参考光之间的 OPD。图 5 显示代表恒定速度扫描的一直线。显示了 4 个取样时间 ( $t_1-t_4$ )。在不发生扫描误差的情况下, 测试物的位置 z 会位于直线上。然而, 扫描误差造成在取样时, 测试物的该理论位置和实际位置之间的偏移, 使得测试物的实际位置偏离了直线, 如曲线图中的数据点所示。在每一个取样时, 扫描误差的大小被显示为  $\epsilon_i$ , 其中  $i = 1 \dots 4$ 。

[0189] 普遍而言, 使用系统 100 进行测量相对于扫描误差的灵敏度根据扫描误差源的频率而变化。举例而言, 系统灵敏度可根据系统的振动频率而变化。举例而言, 如图 6 所示, 对于低相干系统而言, 对于振动的相对灵敏度  $S_v$  被绘制为振动频率  $f_{vib}$  的函数, 该系统的操作参数为: 平均波长为 570nm、FWHM 为 200nm、低 NA 物镜、取样扫描间距为 71.5nm, 且主探测器的帧频为 100Hz。当频率在 20-30Hz 和 70-80Hz 时, 灵敏度很低, 当在那些频带之间时, 灵敏度相对较高。对于 SWLI 而言, 典型的条纹载波频率约为 25Hz, 因此主探测器对每一个条纹每秒取样大致 4 次。一般认为, 图 6 所示的频率小于 25Hz 的高灵敏度区域可有扫描速度的误差, 而大于 25Hz 的高灵敏度区域可有扫描增量中由振动所导致的失真。当获取数据时, 失真会在相邻的扫描位置 (例如逐记录的相机帧) 之间快速地改变符号。普遍而言, 本文所谓“低频”扫描误差源 (例如低频振动) 指的是小于或等于取得低相干干涉信号的探测器的帧频的频率。“高频”扫描误差源 (例如高频振动) 指的是高于取得低相干干涉信号的探测器的帧频的频率。

[0190] 为了减少使用系统 100 进行测量时的扫描误差的影响,计算机 192 使用来自监测信号的信息,监测信号使用第二探测器 199 取得,用以减少使用主探测器 193 来取得低相干信号的扫描误差的影响。因为监测信号基于相干光源(第二光源 197),所以条纹在扫描长度上扩展并在整个扫描范围上提供相位信息(以及相应地相对位移信息)的解释。如同稍后的所讨论的,普遍而言,对于第二探测器 199 的 FOV 中的许多点的监测信号的分析允许决定扫描误差,此误差包括由振动造成的扫描误差,特别是在以上定义的高频区域中。

[0191] 假设扫描后的监测信号相位在 FOV 中显示某些不同,该相位不同(即至少一些监测信号的不同相位偏移)允许在可能逐扫描位置快速变化的扫描误差的解释中校正系统误差。因此,当被恰当分析时,所述特征使得能够精确地测量高频振动,其在没有提供相位不同的多个测量的情况下不能被正确地测量。对监测信号而言,提供图像点的大范围选择也适应于高度图案化的表面,例如半导体晶片。

[0192] 因此,在计算机 192 已经决定扫描移动历史之后,例如,真正的(或至少较正确的)扫描移动就能够根据监测信号的解释而对于低相干信号而被决定。由主探测器 191 所收集的低相干数据的进一步处理(例如三次样条内差法或其他算法)减少该数据中的扫描误差的影响。监测信号数据和低相干信号数据的数据分析如以下更详细地描述。

#### [0193] PUPS 干涉测量系统

[0194] 虽然前述讨论有关于将测试物成像至探测器的干涉显微镜,但是扫描误差校正也能用于其他配置。举例而言,在一些实施例中,干涉显微镜可将显微镜的光瞳平面成像于探测器。这种配置称为 PUPS 配置。这种操作模式可以是有用的,例如其可以用来决定测试表面上复反射率。

[0195] 图 7 显示 PUPS 干涉测量系统 200,其引入了与图 1 所示的系统 100 相关的在前描述的大量元件。然而,与系统 100 不同,系统 200 包括用于光瞳平面成像的管状透镜 213 和偏振器 215,偏振器 215 设置于物镜透镜 167 和分束器 170 之间。在系统 200 中,光瞳平面 217 被成像至探测器 191 上。视场光阑 219 将样品照明限制为测试物 175 上的小区域。系统 200 取得数据的方式和如上所述的系统 100 取得数据的方式相同。

[0196] 为了分析,电子计算机 192 将来自主探测器 191 的干涉测量信号转换至频域,并且提取主光源 163 的不同波长分量的相位和振幅信息。因为光源频谱可以是宽的,所以能够计算出许多独立的频谱分量。振幅和相位的数据直接相关于测试表面复反射率,其可以被分析以决定测试物的信息。

[0197] 因为系统 200 的设置方式,主探测器 191 的每一个探测器元件对于特定入射角和偏振状态在多个波长提供测量(根据偏振器 215)。因此,将探测器元件集涵盖一个范围的入射角、偏振状态、以及波长。

[0198] 图 8 显示光在焦平面 229(例如测试物)上和光瞳平面 217 之间的关系。因为照明光瞳平面 217 的每一个光源点对于照射测试物的测试光产生平面波前,光瞳平面 217 中光源点的径向位置定义出照射光束相对于物法线之间的入射角。因此,距离光轴的给定距离  $r$  的所有光源点均对应固定的入射角  $\theta$ ,物镜透镜由此将测试光聚焦至测试物。具有数值孔径 NA 和对于透射光的最大径向距离为  $r_{\max}$  的光瞳平面成像的管状透镜来说,在光瞳平面 217 上距离光轴 OA 的距离为  $r$  的点与焦平面 229 上的入射角  $\theta$  的关系可以由  $\sin(\theta) = (r/r_{\max})NA$  给出。

**[0199] 光程长度扫描**

[0200] 关于图 1 和图 6 描述的前述实施例都是使用提供焦点扫描的 Mirau 物镜。然而, 普遍而言, 其他配置也是可行的。举例而言, 包括 Linnik 物镜的干涉测量系统也可以被使用。这种系统如图 9 所示。具体而言, 系统 300 包括干涉显微镜 310, 显微镜 310 将测试物 175 成像至主探测器 191。系统 300 包括与图 1 所示的系统 100 相关的在前描述的大量元件。然而, 系统 300 包括 Linnik 干涉物镜 325, 而非 Mirau 物镜, 其中分束器 379 将来自分束器 170 的光, 沿着该物镜的不同光臂, 分成测试光和参考光。物镜 325 包括在测试光臂中的测试物镜 327, 以及在参考光臂中的参考物镜 329。参考物 381 被设置于参考光臂中并且将参考光反射回分束器 379。

[0201] 参考物镜 329 和参考物 381 被安装在一组件中, 然后通过驱动器 331 耦接至物镜 325 的其他元件。在操作期间, 驱动器 331 通过相对于分束器 379, 移动参考光物镜 329 和参考面 381 来调整测试光和参考光之间的 OPD。在扫描期间, 参考物镜 329 和参考面 381 之间的光程长度保持不变。因此, 测试光和参考光之间的 OPD 改变就与物焦无关。这种扫描模式称为“光程长度”扫描。在系统 300 中, 在扫描期间, 光程长度扫描增加 Linnik 配置的参考光臂中的准直空间的长度, 而在测试光臂中该物则留在相同的焦点位置。

[0202] 以 Linnik 物镜为特征的干涉测量系统也能够用于 PUPS 操作模式。举例而言, 参考图 10, 系统 400 包括干涉显微镜 410, 用以将光瞳平面成像至主探测器 191, 且干涉显微镜 410 包括 Linnik 物镜 325, 如同上述的系统 200。

[0203] 普遍而言, 当校正扫描误差时, 扫描移动分析应该根据干涉测量系统的扫描模式 (例如焦点或光程长度的扫描) 和成像模式 (例如物成像或 PUPS)。举例而言, 低相干信号中的载波条纹频率可根据系统的操作模式而改变。举例而言, 对于以 PUPS 模式操作的 Linnik 干涉测量系统而言, 光程长度的扫描模式使得对于光瞳平面图像中所有位置的条纹载波频率均相同。另一方面, 对于以 PUPS 模式操作的 Mirau 干涉测量系统而言, 焦点扫描 (与 OPD 同时扫描物体焦点) 导致载波条纹频率随着在光瞳平面上距光轴的距离正比于  $\cos(\theta)$  增加而减少, 其中  $\theta$  为光线在物平面上与光轴形成的角度 (参考图 8)。

[0204] 要注意的是, 虽然 Linnik 情形中的光程长度扫描通常在光瞳上产生不变频率的监测信号, 但仍有来自干涉测量腔的两种扰动。一种扰动是不期望的扫描移动 (例如非线性) 所造成的振动, 其发生于参考分支, 当物镜 329 和参考镜 381 整体移动时。在这种情况下, 扫描误差在监测信号中产生光程变化, 其与在光瞳中测量监测信号的位置无关。另一种扰动是在物分支中发生的振动, 其导致透镜 127 和物表面 175 之间距离的变化。在这种情况下, 这种振动使得在监测信号中引入光程变化, 其是在物空间的入射角的函数 (或等效地是光瞳中的径向位置的函数)。在这种配置中, 有必要将两种振动分量区分开来, 以便在后续的信号校正时合适地加以考虑。

[0205] 在一些实施例中, 条纹载波频率的变化能够用在以下情形, 其中在 PUPS 模式的 FOV 中, 在零 OPD 位置的多个监测信号相位不同是小的。条纹载波频率随径向位置的变化在 PUPS 模式的 FOV 中在零 OPD 位置的两侧都产生相位不同, 提供精确地决定在高频和低频振动的情况下的扫描增量的必要信息。

[0206] 普遍而言, 本文讨论的扫描误差校正技术能与两种扫描方法以及传统的成像和光瞳平面的成像相容, 在数据处理上有些不同, 特别是 PUPS 的操作模式。若以适于 PUPS 测量

Linnik 物镜显微镜进行光程长度扫描（参考例如图 10），则对光瞳图像的所有像素而言，条纹载波频率都是相同的。若以图 7 的 Mirau 物镜显微镜同时扫描测试物焦和 OPD，则条纹载波频率随着光瞳平面上距光轴的距离正比于  $\cos(\theta)$  增加而减少，其中  $\theta$  为光线在物平面上与光轴形成的角度。该频率变化的优点在于在零 OPD 位置，在 PUPS 模式的 FOV 中的相位不同小。频率随径向位置的变化在零 OPD 位置的两侧在 PUPS 模式的 FOV 中产生相位不同，提供精确地决定所有振动频率的扫描增量的必要信息。

[0207] 根据监测数据决定扫描位置

[0208] 普遍而言，目前已有多种方法能够根据监测数据来决定扫描位置。举例而言，若将分析限制于扫描误差的低频来源，则施加传统的相移干涉测量 (PSI) 算法便足以估计在特定的相机帧和特定的像素的监测信号的相位。举例而言，若相机帧之间的理论相移为  $\pi/2$ ，则一种已知的相移算法具有形式

$$[0209] \quad \tan[\Phi(\mathbf{r})] = \frac{2(g_2 - g_4)}{-(g_1 + g_5) + 2g_3} \quad (1)$$

[0210] 这里， $\mathbf{r}$  为指定像素位置的矢量，并且  $g_{1,2, \dots, 5}$  为在数据获取扫描期间对于一系列相机帧获得的在该像素的相应强度测量（请参考例如 Schwider 等, 1983 ;Encyclopedia of Optics, p. 2101, Table 2）。等式 (1) 理论上提供居间的帧  $g_3$  的相位  $\Phi$ 。作为另外一个例子，由 Deck (L. Deck, “Vibration-resistant phase-shifting interferometry”, Appl. Opt. 35, 6655-6662 (1996)) 以及 Olszak 和 Schmit (US 6, 624, 894) 提出的 PSI 算法能够用以决定扫描位置。然而，PSI 算法仅适用于低频振动，因为该算法自身以与低相干信号相同的方式对高频振动敏感。

[0211] 为了补偿高频振动以及低频振动，使用了测量在两个不同像素位置的最小值的相位  $\Phi(\mathbf{r})$  的方法。举例而言，当使用 PSI 算法的特定情况下（例如使用等式 (1) 等），认为在决定  $\Phi(\mathbf{r})$  时的误差在  $\Phi(\mathbf{r})$  频率的 2 倍是周期性的。因此，将两个或以上的正交（相差  $90^\circ$ ）的相位作平均测量能够抵消有关于高频振动的误差。

[0212] 更一般地说，几种方法在 PSI 的背景下发展，根据干涉数据归纳地决定实际扫描位置。普遍而言，若存在有效的一个范围的相位  $\Phi(\mathbf{r})$  和 / 或频率，则这些方法是最有效地，这例如可以通过利用多元件探测器来获取监测信号（例如，如在以上的实施例所描述的）以及在多元件探测器的 FOV 中的干涉谱中引入一些相位不同（在所有监测频率具有相同频率的情形）的特征来提供。

[0213] 举例而言，相位不同可以通过当系统以传统的成像模式操作时的测试物的自然高度变化而引入。在另外一个例子中，相位不同可以通过在传统的成像模式中通过倾斜测试物或参考物来引入干涉条纹而被引入。在 PUPS 模式下，在使用 Mirau 物镜等的系统中，该系统几何结构在探测器的 FOV 中自然地引入一个范围的干涉条纹频率。

[0214] 下列讨论将提供一种使用一个范围的相位  $\Phi(\mathbf{r})$  来决定扫描位置的示例性方法。首先考虑一种 PUPS-Linnik 系统（例如，如图 10 所示），其中参考镜和物镜透镜作为刚体沿着光轴一起移动以实现光程长度扫描，光瞳平面中不同点的镜面反射的光程差为  $z(t, \mathbf{r})$ ，其中  $t$  表示扫描期间的的时间参数。该光程差是由理想扫描加上误差项所组成：

$$[0215] \quad z(t, \mathbf{r}) = z_0(t, \mathbf{r}) + \epsilon(t, \mathbf{r}) \quad (2)$$

[0216] 其中  $z_0$  表示理想扫描且  $\varepsilon$  表示误差项或噪声项。干涉测量仪的相位为：

$$[0217] \quad \Phi(t, r) = \Phi_0(r) + 2\pi z(t, r) / \lambda \quad (3)$$

[0218] 其中  $\Phi_0$  为相位偏差, 对于像素平面中不同点给出可能的相位差。第二光源的光的波长为  $\lambda$ , 并且假设  $\lambda$  与  $r$  无关。

[0219] 选择  $r$  的原点为光瞳平面对应于光轴的点, 并且  $\theta(r)$  表示在光瞳平面上穿过  $r$  的反射光线的物焦平面上的入射角, 其应符合 Abbé 正弦条件, 即

$$[0220] \quad \sin[\theta(r)] = \kappa |r|, \text{ 对于某些常数 } \kappa \quad (4)$$

[0221] 如在 Linnik 系统中当物和参考镜一起移动时, 光程差的扫描将不取决于  $\theta$ , 由此实现准直空间中的扫描。但是当物焦如 Mirau 系统中被扫描时, OPD 取决于  $\theta$ 。因此, 可以得到两种限制情况：

$$[0222] \quad z_0(t, r) = z_0(t), \text{ 若扫描光程长度, 则 } r \text{ 无关} \quad (5)$$

$$[0223] \quad z_0(t, r) = \cos(\theta(r)) z_0(t, 0), \text{ 若扫描焦点}$$

[0224] 若扫描光程长度和焦点两者 (这例如在 Linnik 系统中是可能的), 则  $z_0$  为这两种类型的移动的线性和。

[0225] 如以上讨论的, 在一些实施例中, 扫描理论上是  $t$  的完美线性函数, 当扫描开始时, 光瞳平面的所有点都具有相同的理论 OPD, 并且随着扫描进行, 物或参考在理想上没有任何倾斜。在这种情况下, 可写：

$$[0226] \quad z_0(t, 0) = c + \dot{z}_0 t \quad (6)$$

[0227] 其中  $c$  为常数且可随着扫描变化, 并且  $\dot{z}_0$  也是常数。作为  $r$  的函数的扫描则取决于扫描的类型 (等式 (5))。

[0228] 普遍而言, 误差项  $\varepsilon$  可取决于  $t$  和  $r$  两者。但是因为当扫描时该物被假设是刚体而且没有任何旋转, 所以误差可以更简单表示为：

$$[0229] \quad \varepsilon(t, r) = \varepsilon_p(t) + \cos(\theta(r)) \varepsilon_f(t) \quad (7)$$

[0230] 该表达式的第一项表示准直空间中的振动或扫描误差, 而正比于  $\cos(\theta)$  的第二项表示由焦点误差所造成的干涉测量仪的高数值孔径空间中的振动或扫描误差。假设  $\varepsilon$  很小。

[0231] 在光瞳平面被第二探测器探测到的监测信号干涉强度与时间有关, 并且也取决于干涉测量仪中的相位差, 如以下公式

$$[0232] \quad I(t, r) = [A(r) + dA(t, r)] \cos[\Phi(t, r)] + c(r) + dc(t, r) \quad (8)$$

[0233]  $A(r)$  表示在点  $r$  的干涉谱的平均振幅。  $dA(t, r)$  表示在点  $r$  的干涉谱振幅的平均的波动。  $\Phi(t, r)$  表示在  $r$  的相位, 作为时间  $t$  的函数。  $c(r)$  表示干涉谱信号的平均偏差, 其通常与  $r$  相关。  $dc(t, r)$  表示该偏差的平均的波动。这典型地是时间的缓变函数。

[0234] 强度  $I(t, r)$  是以时间的离散集  $\{t_i\}$  和光瞳平面中点的离散集  $\{r_i\}$  而被取样。理想时间取样点是等距的, 使得

$$[0235] \quad t_{i+1} = t_i + \delta t, \text{ 其中 } \delta t \text{ 与 } i \text{ 无关} \quad (9)$$

[0236] 对于一个点  $r$  而言, 可以先将全部的时间集  $\{t_i\}$  视为一维阵列, 然后作误差项  $\varepsilon_p(t)$  和  $\varepsilon_f(t)$  的估计。如上所述, 在高频振动的情况下, 单一像素无法给出这些误差项的可靠估计。但是, 由于在不同点  $\{r_i\}$  的多个这样的矢量, 对于每一个这些误差项可以作



$$[0256] \quad \varepsilon_n(t) = \varepsilon_p(t) + \cos(\theta_n) \varepsilon_f(t)$$

[0257] 这提供了方程的过定的 (overdetermined) 系统, 其轻松地被求解, 以提供  $\varepsilon_p(t)$  和  $\varepsilon_f(t)$  的估计。所述过程例如在 Linnik 架构中光程长度扫描的情形需要, 其中在参考分支和物分支两者中振动均是可能的。对于使用焦点扫描的 Linnik 或 Mirau 干涉测量仪而言, 以上的数学可简化为:

$$[0258] \quad \varepsilon_1(t) = \cos(\theta_1) \varepsilon_f(t)$$

[0259] M

$$[0260] \quad \varepsilon_n(t) = \cos(\theta_n) \varepsilon_f(t)$$

[0261] 在这种情况下, 可以仅计算  $\varepsilon_f(t)$  的最终  $n$  个估计值的中位值。

#### [0262] 低相干信号数据的校正

[0263] 普遍而言, 在已知扫描误差之后, 低相干干涉测量数据就能够对于误差进行校正。以下是一个更详细的例子, 说明在进一步处理之前, 低相干信号自身的校正。在扫描位置被测量之后, 低相干扫描数据可通过三次方内插法或者其他类型的内插法而被校正。 $I_w(t, r)$  表示低相干扫描数据。由扫描误差分析可知, 该数据并非在时间点  $\{t_i\}$  取样, 而是在这些时间点加上误差项的时间点被取样。因此实际的取样时间点为

$$[0264] \quad T_i(r) = t_i + \Delta_i(r) \quad (16)$$

[0265] 其中

$$[0266] \quad \Delta_i(\mathbf{r}) = [e_p(t_i) + \cos(\theta(\mathbf{r}))e_f(t_i)] / \frac{dz_{ideal}(\mathbf{r})}{dt} \quad (17)$$

[0267] 其中

$$[0268] \quad \frac{dz_{ideal}(\mathbf{r})}{dt} = \dot{z}_0 \quad \text{对于光程长度扫描} \quad (18)$$

$$[0269] \quad \frac{dz_{ideal}(\mathbf{r})}{dt} = \cos(\theta(\mathbf{r})) \dot{z}_0 \quad \text{对于物焦点扫描}$$

[0270] 这样,  $I_w(T_i, r)$  值已经被测量, 但是还期望测量  $I_w(t_i, r)$ , 且可以使用三次方样条内插法来大致计算  $I_w(t_i, r)$ , 通过使用下式

$$[0271] \quad I_w(t_i, r) = I_w(T_i - \Delta_i(r), r) \quad (19)$$

[0272] 为了进行三次方样条, 建立了点  $[T_i, I_i]$  的表, 其中  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  且函数  $I = I(t)$ 。这形成了  $n+1$  个点以及它们之间的  $n$  个间隔。三次方样条内插法的典型曲线是分段连续曲线, 通过表中的每个值。对于每个间隔有一个独立的三次方多项式, 每个有自己的系数:

$$[0273] \quad S_i(t) = a_i(t-T_i)^3 + b_i(t-T_i)^2 + c_i(t-T_i) + d_i, \quad t \in [T_i, T_{i+1}] \quad (20)$$

[0274] 这些多项式部分一起被表示为样条  $S(t)$ 。

[0275] 因为有  $n$  个间隔且每个间隔有 4 个系数, 所以总共需要  $4n$  个参数定义样条  $S(t)$ 。需要  $4n$  个独立的条件来确定它们。因为三次方多项式在间隔的两个端点匹配表的值, 对于每个间隔, 可以得到两个条件:

$$[0276] \quad S_i(T_i) = I_i \quad S_i(T_{i+1}) = I_{i+1} \quad (21)$$

[0277] 要注意的是, 这些条件导致了分段连续函数。仍然还需要  $2n$  个条件。因为希望使

得内插曲线尽可能的平滑,所以可以要求第一阶和第二阶导数也是连续的:

$$[0278] \quad S'_{i-1}(T_i) = S'_i(T_i) = S''_{i-1}(T_i) = S''_i(T_i) \quad (22)$$

[0279] 这些条件适用于  $i = 1, 2, \dots, n-1$ , 产生  $2n-1$  个限制。因此, 还需要另外 2 个条件来完全确定样条。有一些标准选择提供给使用者:

$$[0280] \quad S''_0(T_0) = 0 = S''_{n-1}(T_n) = 0, \text{ 称为“自然的”} \quad (23)$$

$$[0281] \quad S'_0(T_0) = I'_0 = S'_{n-1}(T_n) = I'_n, \text{ 称为“箱位的”} \quad (24)$$

[0282] 若函数是周期性的, 其他选择也是可能的。何者为佳需视应用而定。

[0283] 具有  $4n$  个系数和  $4n$  个线性条件的情况下, 求解方程组是很容易的, 例如使用传统的算法求解它们。

[0284] 由此方式校正的低相干干涉信号则根据其应用而被进一步处理, 如表面结构的 PUPS 分析或传统的表面形貌测量。

[0285] J 矩阵方法

[0286] 在一些实施例中, 一种称为“J 矩阵方法”的方法能够用来校正干涉测量数据, 其使用来自监测信号的扫描误差信息。这种方法描述如下。

[0287] 在没有扫描误差的测量中 (其提供信号的严格均分的取样点), 所得的未被干扰的信号可以由  $M$  个元素的矢量  $\mathbf{a}$  表示, 其通过离散傅立叶转换 (DFT) 进行频谱分析。DFT 在数学上等效于求解一个矩阵形式的线性方程系统

$$[0288] \quad \underline{\underline{F}} \cdot \vec{s} = \vec{u} \quad (25)$$

[0289] 其中  $M \times M$  矩阵  $\underline{\underline{F}}$  的列是代表纯振荡信号的基函数, 并且将信号  $u$  被解释为这些基函数的线性组合。复数记法的矩阵  $\underline{\underline{F}}$  的元素为:

$$[0290] \quad F_{m,n} = \frac{1}{M} e^{2\pi i \cdot (m-1) \cdot (n-1) \cdot \frac{1}{M}} \quad (26)$$

[0291] 对于矢量  $\vec{s}$  包含的频谱系数, 求解该方程系统:

$$[0292] \quad \vec{s} = \underline{\underline{F}}^{-1} \cdot \vec{u} \quad (27)$$

[0293]  $\underline{\underline{F}}^{-1}$  成为

$$[0294] \quad (F^{-1})_{m,n} = e^{2\pi i \cdot (m-1) \cdot (n-1) \cdot \frac{1}{M}} \quad (28)$$

[0295] 使得矢量  $\vec{s}$  的第  $m$  个元素成为

$$[0296] \quad s_m = \sum_{n=0}^{M-1} u_n \cdot e^{2\pi i \cdot (m-1) \cdot (n-1) \cdot \frac{1}{M}} \quad (28)$$

[0297] 其具有离散傅立叶转换的传统定义的形式 (除了解析指数偏移, 因为解析指数始

于 1, 而非 0)。矢量  $\vec{s}$  的 M 个元素表示未干扰的信号  $\vec{u}$  的第 0 个、第 1 个、...、第 (M-1) 个谐波的频率分量。要注意的是, 第 (m-h) 个谐波与第 (-h) 个谐波是等效的。这意味着在频谱的上端的频谱分量实际上是负的频谱分量。

[0298] 现在考虑取自于不均匀取样增量的信号, 例如被扫描误差 (例如由测量系统的振动所引起) 或错失数据点损害的理论上均匀的取样增量。通过常规 DFT 进行该干扰信号的频谱分析必然产生被干扰的频谱。

[0299] 若取样增量已知, 则 Lomb-Scargle 法是一种对被不均匀取样数据进行频谱分析的方法。通常而言, Lomb-Scargle 法代表了正弦曲线对于数据的最小二乘法拟合。对于每个关注的频率独立地计算功率频谱估计。拟合函数彼此不正交的事实可以导致不同频率分量之间的某些遗漏。因此, 该方法通常而言并非是一种准确的方法, 但无论如何, 其在高噪声水平的情况下是一个很强大的方法。

[0300] 在一些实施例中, 可以采取接近于 DFT 的方法来进行被不均匀取样的数据的频谱分析。通常而言, 与在前建立的 DET 方法相比, 一组修正后的基函数被用来形成一个新的  $M \times M$  矩阵  $\underline{J}$ 。每一个基函数 (矩阵的列) 包含在已知扫描位置取样的纯振荡信号的值。如在 DFT 的情形, 目标是将所测量的信号构建为基函数的线性组合, 新矩阵的元素为

$$[0301] \quad J_{m,n} = c \cdot e^{2\pi i \cdot X_m \cdot Y_n} \quad (29)$$

[0302] 函数  $X_m$  保留了被不均匀取样的扫描位置的信息。举例而言, 在干涉测量仪的 OPD 扫描中,  $X_m$  表示取得数据的 M 个扫描位置, (例如,  $X_m = \frac{z_m}{\text{理论扫描增量}}$ , 其中  $z_m$  为实际的物理扫描位置, 考虑了等式 (7) 的角度相关性)。普遍而言, 多种技术能够被用来取得  $X_m$  的值, 例如上述的技术。以下将讨论另外一种技术。

[0303] 函数  $Y_n$  定义了关注的频率。对于以频率分析取代 DFT 的应用, 函数  $Y_n$  举例而言成为

$$[0304] \quad Y_n = \begin{cases} (n-1) \cdot \frac{1}{M}, & \text{对于 } (n-1) \leq \frac{M}{2} \\ (n-1-M) \cdot \frac{1}{M}, & \text{对于 } (n-1) > \frac{M}{2} \end{cases} \quad (30)$$

[0305] 且由此表示在该扫描内, 范围由 0 至相当于  $\frac{M}{2}$  周期的正频率和负频率。频率上限通常称为 Nyquist 频率, 它是 DFT 的一般限制, 而在特殊情况下, 使用 J 矩阵方法能够用以分析超过该限制的频率, 如以下数值例子的讨论。若期望一个接近于 DFT 的定义, 则常数 c 是一个可供选择为 1 或  $\frac{1}{M}$  的因子。

[0306] 新的线性方程系统的矩阵形式为

$$[0307] \quad \underline{J} \cdot \vec{s} = \vec{d} \quad (31)$$

[0308] 对于矢量  $\vec{s}$  的频谱分量, 求解为:

$$[0309] \quad \vec{s} = \underline{\underline{J}}^{-1} \cdot \vec{d} \quad (32)$$

[0310] 若矢量  $\vec{d}$  的所有数据点是相互独立的 (即  $X_m$  的  $M$  个数值都是唯一的), 则该方法得到精确解。

[0311] 要注意的是, 普遍而言, 矩阵  $\underline{\underline{J}}$  的该组基函数并未正交。然而, 对于精确解, 基函数的线性独立性是足够的。

[0312] 在类似于低相干干涉测量方法的应用中, 通常需要频谱分析大量的数据集 (例如, 每一个相机像素一个数据集), 因为对所有像素而言不均匀的 OPD 取样都是相同的, 所以相同的  $J$  矩阵的逆矩阵  $\underline{\underline{J}}^{-1}$  能够应用于所有数据集。这使得该方法合理地快, 因为计算被限于一个矩阵求逆和  $P$  个矩阵和矢量的乘积, 其中  $P$  是相机像素的数目。

[0313] 如前述讨论, 实际的测量系统不仅受到例如由振动造成的扫描误差的影响, 而且也受到测量噪声的影响 (例如干涉测量仪的相机中的脉冲噪声或数字化误差), 其中测量噪声对一或多个的已记录的数据点增加一未知的值。

[0314] 普遍而言, 使用  $J$  矩阵进行频谱分析的精度可以被很多因素影响。举例而言, 使用  $J$  矩阵进行频谱分析的结果被噪声影响的程度取决于信噪比以及  $J$  矩阵和其逆矩阵的条件。

[0315] 普遍而言, 对于不同的  $m$  值而言,  $X_m$  几乎相同的值的极不均匀的扫描增量导致几乎不能独立的基函数与条件很差的矩阵, 并因而在有噪声的情况下, 导致计算出来的频谱具有非稳态解。

[0316] 一般认为, 若稳定度问题源于噪声, 通过将频谱分析限制于期望大于零的频谱振幅的频带, 则可以实现高度的稳定度。  $J$  矩阵则变成矩形矩阵 (列数少于行数)。因此, 线性方程系统是过定的。在最小二乘的意义上计算出最佳解。因为矩形矩阵不具有逆矩阵, 所以应计算该矩阵的假逆矩阵, 这可以例如利用奇异值分解法 (SVD) 或 Moore-Penrose 的逆矩阵形式进行:

$$[0317] \quad J^{\dagger} = (J^T J)^{-1} J^T \quad (33)$$

[0318] 其中上标  $T$  表示矩阵的转置。除了更稳定之外, 使用矩形  $J$  矩阵的方法具有更快的优点, 尤其如果逆矩阵必须乘上许多数据矢量。

[0319] 这种体系现在能够对在不均匀取样位置所取得的数据进行频谱分析, 也能够延伸到更为普遍的信号失真的补偿。这些额外的失真可以是相机帧  $m$  的函数 (例如干涉测量应用中的波动光源)、频率分量  $n$  的函数 (例如测量设置中的频谱滤波效应), 或是所述两者的组合 (例如频谱波动光源)。这些效应被结合到函数  $I_{m,n}$  中。监测该函数需要独立的测量。潜在地, 函数  $I_{m,n}$  和包含取样位置的信息的函数  $X_m$  可以比被干扰的信号  $\vec{d}$  (必须进行频谱分析的数据) 以更高的速率测量。  $J$  矩阵的元素则成为等式 (29) 等号右边上显示的项目的加权平均。  $S$  是在测量  $\vec{d}$  的元素的传感器的积分时间内 (例如在相机的帧积分时间内) 监测的  $I$  和  $X$  值的数量。使用一组新的基函数来形成  $J$  矩阵的通式。

$$[0320] \quad J_{m,n} = \frac{1}{S} \cdot \sum_{s=1}^S c \cdot I_{m,n,s} e^{2\pi i \cdot X_{m,s} \cdot Y_n} \quad (34)$$

[0321] 对于各种失真监测情形,该 J 矩阵的通式可以进一步简化,以下概述了两个情形。

[0322] 在一些实施例中,强度和扫描器位置是每一个相机帧监测一次,在一个相机帧内强度变化小(例如,给定短的相机快门时间)并且光源强度的变化同等地影响所有频率。等式 (34) 的平均的计算被限于一个被加数 (summand)。I 仅为帧 m 的函数。等式 (34) 被简化为表示光源强度波动的 J 矩阵的形式。

$$[0323] \quad J_{m,n} = c \cdot I_m e^{2\pi i \cdot X_m \cdot Y_n} \quad (35)$$

[0324] 在一些实施例中,强度和扫描器位置是每一个相机帧监测一次,在一个相机帧内,由扫描导致的强度变化显著,并且强度波动与频率有关。虽然在每一个相机帧测量仅一个扫描器位置,但是在帧积分期间的扫描器移动以及对于测量的随之发生的结果仍然可以给出估计。假设扫描器在帧 m-1 和 m+1 之间线性移动,则在相机帧 m 内,量 X 将从  $X_m - T \cdot FR \cdot (X_{m+1} - X_{m-1})/4$  到  $X_m + T \cdot FR \cdot (X_{m+1} - X_{m-1})/4$ , 其中 T 是相机帧的积分时间并且 FR 是相机的帧频(单位:Hz (1/s))。在求解后,等式 (34) 中的和由积分取代,其在求解后得到

$$[0325] \quad J_{m,n} = c \cdot I_{m,n} \cdot \text{sinc}\left(T \cdot FR \cdot \frac{X_{m+1} - X_{m-1}}{2} \cdot Y_n\right) \cdot e^{2\pi i \cdot X_m \cdot Y_n} \quad (36)$$

[0326] 其中使用了定义  $\text{sinc}(x) = \sin \pi x / \pi x$  且在相机帧积分时间内假设不变的光源强度。由于相机的有限的帧积分时间,等式 (36) 的表达式反映了条纹对比的降低与频率有关。对于第一个和最后一个相机帧,分别以  $X_{m+1} - X_m$  和  $X_m - X_{m-1}$  取代 sinc 函数中的分数。

[0327] 在一些干涉应用中,等式 (34) 中的函数 I 或等式 (29) 或等式 (34) 的函数 X 不能对于全部的相机像素同等地表达。在这种情况下,必须为单独的像素或一组像素计算 J 矩阵。像素相关的变化的可能原因包括干涉测量腔的倾覆 - 倾斜 (tip-tilt) 式移动干扰了活塞式移动,晕影 (vignetting) 最显著地影响了在视场的边缘的像素,变化相对于扫描移动的表面的法线角度(例如使用 Fizeau 式干涉测量仪用参考球测量球形表面时)。

[0328] 不需要信号的频谱分析的应用也可以受益于使用 J 矩阵方法的信号分析。因为所述的过程可被视为 DFT 的替代,将计算得到的频谱的逆 DFT 将产生等效于以均匀增量所取样的原始信号的信号,并且该信号不受 J 矩阵计算中所考虑的任何其他影响(光源波动、因有限帧积分时间造成的条纹对比度降低等)。

[0329] 图 11、图 12A 和图 12B 所示的流程图总结了 J 矩阵方法的三种变型。具体而言,图 11 的流程图示出了使用 J 矩阵方法的频谱分析,图 12A 的流程图示出补偿进一步信号失真的扩展 J 矩阵 (extended J-matrix)  $\underline{J}^{ext}$ , 而图 12B 的流程图示出使用 J 矩阵形式来重建校正后的干涉测量信号。

[0330] 参考图 11, J 矩阵方法涉及数据生成部分 (1151) 和频谱分析部分 (1133), 产生 N 个频谱 (1159)。数据生成 1151 举例而言包括数据获取和扫描移动决定 (1153), 其对于频谱分析部分 (1133) 提供 N 个扫描位置 (1155) 和 N 个干涉数据集 (1157)。N 个扫描位置 1155 未必是等距离的,但是其偏移由已判断的扫描移动历史所得知。N 个干涉数据集 1157 对应

于使用干涉测量系统的主光源和探测器所取得的低相干干涉测量信号。

[0331] 频谱分析 1133 涉及  $N$  个干涉测量数据集 1157 的频谱分解, 并且提供  $N$  个频谱 1159 作为输出以进一步分析。具体而言, 频谱分析 1133 包括构成  $J$  矩阵 (1161)、求  $J$  矩阵的逆矩阵 (1163), 以及将  $J$  矩阵的逆矩阵乘以数据集 1157 (1165)。

[0332] 为了构成  $J$  矩阵, 首先计算对应于不同频率的基函数 (1161A), 然后以基函数作为列来形成  $J$  矩阵 (1161B)。普遍而言, 基函数对应于给定被干扰的扫描位置的纯振荡信号的值。

[0333]  $N$  个频谱 1159 可以直接用于扫描的评估; 或可替换地或附加地, 根据例如 DFT 的 (未修正的) 基函数, 用来重建校正后的干涉测量信号。

[0334] 参考图 12A, 对于扩展的  $J$  矩阵, 数据生成部分 (1271) 类似于  $J$  矩阵方法的数据生成部分, 除了该部分附加地还测量信号失真影响 1273, 其对于构成  $J$  矩阵也被考虑。具体而言, 扩展的  $J$  矩阵的基函数对应于在给定的被干扰的扫描位置的纯振荡信号, 其根据进一步的信号失真影响 1273 而被修改。频谱分析 1233 包括相似于  $J$  矩阵方法的步骤, 然而, 构成  $J$  矩阵的计算涉及计算对应于不同频率的基函数, 其根据进一步的信号失真影响 1273 的记录而被修改。

[0335] 图 12B 所示的流程图说明扩展的  $J$  矩阵的应用, 其中  $N$  个频谱 1159 以相同于图 12A 的过程而被计算。接着, 校正后的频谱用以重建  $N$  个已校正的干涉测量数据集 1211, 其由施加逆 DET 推导出。

[0336] 图 13A ~ 15C 通过数值实验示出当应用于不同的低相干信号时,  $J$  矩阵方法与传统的 DFT 比较如何进行。

[0337] 图 13A ~ 13E 示出振动和没有相机噪声的信号 (即不具有扫描误差的信号) 的数据。图 13A 显示信号本身, 其为具有高斯包络线的合成产生的余弦。实线是未被干扰的连续信号, 而实际的数据点由多个点表示。这些信号曲线仅显示整个 SWLI 信号的四分之一。图 13B ~ 13E 显示使用 DFT 和  $J$  矩阵方法获得的频谱振幅和频谱的误差幅度。具体而言, 图 13B 和 13D 显示了使用 DFT 的频谱和频谱误差, 而图 13C 和 13E 是使用  $J$  矩阵方法的频谱和频谱误差。在没有扫描误差的情况下, DFT 和  $J$  矩阵的频谱是相同的高斯分布, 并且都具有零的频谱误差。

[0338] 图 14A ~ 14E 显示了与图 13A ~ 13E 所示相似的数据的曲线, 然而这里数据点仍位于理想曲线上, 但是却是在不均匀分布的扫描位置取得。如图 14B 所示, 当使用 DFT 法时, 扫描误差使得频谱偏移理想的高斯曲线。当使用标准的 DFT 法时, 准确的取样位置的信息就被丢失了, 并因而导致频谱误差, 如图 14D 所示。然而, 图 14C 和图 14E 显示  $J$  矩阵方法仍可以取得没有误差的频谱。

[0339] 图 15A ~ 15E 显示类似于图 13A ~ 13E 所示的曲线, 但除了不均匀取样和基线噪声 (floor noise) 影响信号之外。如图 15A 所示, 数据点由理想高斯曲线偏离并以不均匀扫描增量分布。参考图 15B ~ 15E, 基线噪声使得 DFT 和  $J$  矩阵计算的频谱由缓变函数偏离并在频谱中产生误差。然而, 普遍而言, DFT 法的误差值大于  $J$  矩阵方法的误差值。

[0340] 在有关于图 13A ~ 15E 的讨论的示例中, 取样位置被设定为从严格等间隔的位置偏离了约一个周期 RMS (均方根值) 的 16 分之一, 并且图 15A ~ 15E 中的相机噪声水平为整个信号范围的 1% RMS。

[0341] 实际上,使用 J 矩阵的好处取决于误差的来源的混合。举例而言,当振动是误差的主要来源且该振动能够被监测时, J 矩阵可以导致测量精度的显著改善。当无法监测的误差为主要来源时, J 矩阵方法可能就帮助有限。

[0342] 虽然 J 矩阵方法已经就与改善使用低相干干涉测量仪(如 SWLI 干涉测量仪)进行的测量的精度而言进行了讨论,但是更普遍而言, J 矩阵方法也能适用于其他类型的干涉测量数据。举例而言, J 矩阵方法能够用来分析使用长相干长度干涉测量仪(即包括正弦条纹,但是不用类似 SWLI 信号的高斯包络线调制)所取得的信号。在不希望被理论限制的情况下,使用数值实验展示了对于这样的信号使用 J 矩阵。参考图 16A ~ 16B,举例而言,一个由 80 个纯正弦波所组成的信号仅以给定的间隔完全随机的取样位置被取样 100 个。图 16A 显示该信号的曲线,其中正弦曲线上的点表示取样数据点。就 Nyquist 而言,该信号是取样不足的。具体参考图 16B,100 个数据点用  $100 \times 100$  的 J 矩阵分析,其中该 J 矩阵由对应于给定间隔的 50-99 个周期和它们的负本(negative counterpart)的基函数构成。假设了解一些与频率内容有关的信息。选择性的频带被用来定义基函数。数据是没有噪声的。J 矩阵频谱显示在每一个间隔的 80 个周期有一个明显的峰值,这表示 J 矩阵方法能够可靠地被执行。

[0343] 参考图 17A ~ 17C,使用图 16 所示的相同数据来进行第二次数值实验,并且对应于信号范围的 2% 的额外噪声被加入信号。对该数据进行两次 J 矩阵分析。具体参考图 17B,当第一次分析时,使用条件很差(badly-conditioned)的  $100 \times 100$  的 J 矩阵方法,因此产生充满误差的频谱。参考图 17C,当第二次分析时,使用  $100 \times 80$  的 J 矩阵来分析数据,因此在正确的频率产生了明显的峰值。

[0344] 参考图 18,进行了数值实验,其中相较于仅计算信号的校正频谱,扩展的 J 矩阵被用来恢复失真的干涉测量信号。本例显示低相干干涉测量仪的六种可能信号(以(a)-(f)标示),其中由信号(b)至信号(f),越来越多的信号失真影响被加入。这一系列的信号由信号(a)开始,其显示一个未失真的干涉测量信号。信号(b)对应于具有不均匀扫描增量的扫描。一定程度的光源波动被加入信号(c),而有限帧积分时间的影响被加入信号(d)。该影响帧 128 帧附近最为明显。最后加入的噪声来源是相机噪声,并且产生失真的干涉测量信号(e)。扩展的 J 矩阵的基函数包括除了相机噪声之外的所有信号失真影响,因为相机噪声无法独立地监测。在频谱计算之后,逆 DET 方法产生校正后的干涉测量信号(f)。将最初的未失真信号作为虚线与信号(f)重叠并加以比较。在本实验中,使用了高频范围去除后的  $256 \times 181$  的矩形扩展的 J 矩阵。

[0345] 如前所述,关于不均匀取样的扫描位置  $X_m$  的信息可以由多种来源提供。当然,在一些实施例中,该信息基于监测系统的测量被提供,例如与图 1、图 7、图 9 和图 10 有关的实施例。然而,更普遍而言,该信息可由其他来源提供。举例而言,所述信息可以使用加速度计、接触探针、电容计、气压计、光学编码器(例如光学线性编码器),或是使用低相干干涉数据本身来获得。

#### [0346] 复合参考物

[0347] 在一些实施例中,使用复合参考面来决定有关于扫描误差的信息。复合参考物是具有至少二种参考界面(主参考界面与第二参考界面)的参考物。

[0348] 主参考界面被配置为传统的参考界面,而第二参考界面用以提供允许当扫描干涉

显微镜的 OPD 时, 监测测试物相对于干涉显微镜的位移的信息。普遍而言, 第二参考界面相对于主参考界面机械固定。

[0349] 主参考界面和第二参考界面的效应是提供场相关的复有效反射率, 其在系统的视场中至少在相位上变化。普遍而言, 有效反射率被构建以助于决定干涉图像的整体或低空间频率的相位偏移。

[0350] 结合图 19 ~ 31 描述复合参考物的操作原理。

[0351] 图 19 显示激光 Fizeau 干涉测量系统 2000 的实施例简图, 其包括光源 2163、分束器 2198、由测试物 2175 和复合参考物 2100 形成的干涉测量腔, 复合参考物 2100 具有反射率为  $r_1$  的主参考面 2181A 和反射率为  $r_2$  的第二参考面 2181B。复合参考物 2100 用驱动器 2193 (也称为移相器) 在 Z 方向可移动以进行干涉测量扫描。干涉测量系统 2000 还包括主相机 2191、孔径 2106, 以及第二相机 2199 (也称为监测相机)。图 19 并未显示附加的光学元件, 例如透镜或成像干涉测量系统的其他特征, 其中有些将结合图 28 解释。

[0352] 第二参考面 2181B 被取向, 使得从第二参考面 2181B 反射的光被阻挡不入射主相机 2191, 但是却可以入射第二相机 2199。监测相机 2199 和复合参考物 2100 一起用来决定干涉测量腔的特性, 例如相对于用驱动器 2193 初使化的扫描移动的初使位置的瞬时平均光程长度变化 (也称为活塞)。

[0353] 监测相机 2199 探测由复合参考物 2100 的主参考面 2181A、第二参考面 2181B, 以及测试物 2175 所形成的干涉图案; 而主相机 2191 仅探测主参考面 2181A 和测试物 2175 所形成的双面干涉。即使在有振动或空气扰动, 通过提供至测试物 2175 的全部光程的相关信息, 监测相机 2199 所收集的干涉测量腔的相关信息有助于例如生成物的三维表面高度。

[0354] 不期望被理论所限制, 使用系统 2000 如下产生干涉信号。假设在图 19 中, 测试物 2175 的表面具有复反射率  $r_0$ , 主参考面 2181A 具有反射率  $r_1$ , 并且第二参考界面 2181B 具有反射率  $r_2$ 。所有这些反射率可具有对于横向座标  $x$ 、 $y$  的相关性。来自光源 2163 的光部分从主参考面 2181A 和第二参考面 2181B 反射, 也部分从测试物 2175 的表面反射。然而, 因为第二参考面 2181B 以使其反射被孔径光阑 2106 阻挡的方式而被倾斜, 所以主探测器 2191 仅探测从主参考面 2181A 和测试物 2175 反射的光。另一方面, 监测相机 2199 不具有孔径, 所以其能探测到所有三种反射光。

[0355] 主探测器 2191 所探测到的干涉可以被描述为:

[0356]

$$I = R_0 + R_1 + 2\sqrt{R_0 R_1} \cos(\theta - \varphi) \quad (37)$$

[0357] 其中强度的反射率为

$$[0358] \quad R_0 = |r_0|^2 \quad (38)$$

$$[0359] \quad R_1 = |r_1|^2 \quad (39)$$

[0360] 并且相位  $\theta$  正比于物的表面高度  $h$ ,

$$[0361] \quad h = \frac{\lambda}{4\pi} \theta \quad (40)$$

$$[0362] \quad \theta = \arg(r_0) \quad (41)$$

[0363] 并且与参考物相关的相位分布偏差为

[0364]

$$\varphi = \arg(r_1) \quad (42)$$

[0365] 对于监测相机 2199, 干涉可以描述为:

[0366]

$$I = P + R_0 + 2\sqrt{R_0P} \cos(\theta - \vartheta) \quad (43)$$

[0367] 其中

$$P = |\rho_1|^2 \quad (44)$$

[0369]

$$\vartheta = \arg(\rho) \quad (45)$$

[0370] 给定复合参考物的有效反射率为

$$\rho = r_1 + r_2 \quad (46)$$

[0372] 作为例子, 图 20 示出了对  $100 \times 100$  像素的网格进行模拟而计算得到的复合强度反射率分布  $P$ , 其中没有设置测试物 2175, 且主参考面 2181A 和第二参考面 2181B 之间的相对倾斜累积至 OPD 的两个波长, 在整个视场中, 主反射率  $R_1$  为 4% 且第二反射率  $R_2$  为 0.4%。

[0373] 图 21A 显示图 20 的图像在  $x$  (即水平方向) 方向的截面图, 更定量地显示由两个参考面的组合所产生强度分布  $P$  (44)。图 21B 显示复合参考物 2100 的复相位  $\vartheta$  如何在与图 21A 的强度分布相同的横截面变化。

[0374] 引入测试物 2175, 图 22 显示监测相机 2199 所监测到的监测干涉图案  $I$ , 其中引入的测试物 2175 的反射率  $R_0$  为 2%, 并且相对于主参考面 2181A 沿着对角线而从监测干涉图案  $I$  的左上至右下稍微倾斜。强度变化主要与复合参考物 2100 有关, 并且无法用主相机 2191 所探测。

[0375] 主相机 2191 所探测到的模拟干涉图像在图 23 显示。在图 24A、图 24B、图 25A 和图 25B 所示的横截面分布中可见用主相机 2191 探测到的干涉和用监测相机 2199 所探测到的干涉之间的差异。具体而言, 对于如图 19 的复合参考物和具有 2% 反射率的稍微倾斜的测试物而言, 图 24A 显示监测相机 2199 的干涉变化, 并且图 24B 显示监测相机 2199 中相应的相位变化。

[0376] 对于相同的参数, 对于复合参考物和稍微倾斜的测试物 2175 而言, 图 25A 显示主相机 2191 中的干涉变化, 并且图 24B 显示主相机 2191 所探测到的相应的相位变化。

[0377] 在操作期间, 相对于测试物 2175, 移相器 2193 机械式位移复合参考物 2100。这对于监测相机 2199 和主相机 2191 所探测到的信号造成一系列的相移。即使干涉测量信号极不相同, 两种相机的相移却是相同的, 如图所示。因此, 决定监测相机 2199 所探测到的相移可有助于正确解释从主相机 2191 所取得的数据中的相移。

[0378] 决定随着时间取得的单色干涉数据的相移的数种示例性数据处理技术已经说明如上, 并且显示: 在所有的振动频率上, 一个范围的起始相位值改善了干涉测量腔的瞬时全部光程长度的决定。

[0379] 比较图 24B 和图 25B 显示复合参考物 2100 在整个 FOV 中具有与测试物 2175 的结构无关的相位变化, 这是与监测相机 2199 一起使用复合参考物 2100 的结果。

[0380] 参考图 26 的流程图,根据复合参考物 2100 操作干涉测量系统(如干涉测量系统 2000)可包括测试物 2175 的监测数据和干涉测量数据的数据获取步骤、监测数据的数据处理,以及使用监测数据的数据处理结果的干涉测量数据的数据处理。

[0381] 具体而言,在赋予相移的范围中用监测相机取得监测信号且用主相机取得的干涉信号(步骤 2010)。监测相机探测到由主参考界面和第二参考界面所贡献的干涉图案,而主相机仅探测到由主参考界面所贡献的干涉图案。

[0382] 接着,分析监测相机的干涉信号以决定在数据获取期间产生的相移(步骤 2020)。

[0383] 使用从监测相机的干涉信号决定的有关于相移的信息,接着分析用主相机探测到的干涉信号,例如测试物表面的三维表面高度(步骤 2030)。

[0384] 在图 26 中概述的数据处理示出了使用在干涉测量仪中引入的复合参考物所取得的数据的示例性方法。然而,其他类型的数据处理亦可利用复合参考物来被用于决定测试物的表面特性。举例而言,图 20 中显示的强度图案包括密集的干涉条纹,其能够使用诠释干涉条纹位置的空间法而被分析。披露了另外的例子,例如, M. Kujawinska 提出的空间相位测量法;D. W. Robinson 和 G. T. Reid 等人的“干涉谱分析”第 145-166 页,版本(Bristol and Philadelphia, Inst. of Physics Publishing, 1993),其内容通过引用并入于此。

[0385] 虽然在图 19 中,使用单一光学元件来提供第一和第二参考面,但是其他配置也是可能的。举例而言,在一些实施例中,第一和第二参考界面各自是不同光学元件的一部分,但在所述部分光学元件相对于彼此机械固定。

[0386] 举例而言,图 27 显示包括结合图 19 所讨论的许多元件的干涉测量系统 2001。然而,取代复合参考物 2100,使用了复合参考物组件 2200,其中主参考面和第二参考面是分立光学元件的一部分。具体而言,复合参考物组件 2200 包括第一光学元件 2202A 和第二光学元件 2202B,每个光学元件借着共用的安装法兰 2204 而相对于彼此彼此机械固定。

[0387] 参考图 28,在一些实施例中,干涉测量系统 2001 可包括光源和探测单元 3210,其包括各种光束导引元件。举例而言,中继光学部件 2169 和 2171 将来自光源 2163 的光导向分束器 2164,然后光通过孔径光阑 2106 并且被准直光学部件 2177 准直。从干涉测量腔返回后,光被部分用成像透镜 2189 成像至主探测器 2199 上。光也被分束器 2198 拾取并导向到监测相机 2199,光在监测相机 2199 上由透镜 2190 成像。

[0388] 虽然干涉测量系统 2001 被用来研究平面的测试物,但是其他配置也是可能的。

[0389] 举例而言,图 29 显示干涉测量系统 2002,其包括光源和探测单元 3215 以及复合参考物 2250。光源和探测单元 3215 类似于光源和探测单元 3210。然而,复合参考物 2250 和复合参考物 2200 的不同在于复合参考物 2250 用来形成球形波前(而非平面波前)以照射弯曲的测试物 3175。具体而言,复合参考物 2250 包括第一光学元件 2252A、透镜 2258,以及第二光学元件 2252B。透镜 2258 和第二光学元件 2252B 被安装在一起作为单一的单元,透镜 2258 经由安装法兰 2204 而被机械固定于第二光学元件 2252B。第一光学元件 2252A 提供弯曲的第一参考面 2181A,并且第二光学元件提供平面的第二参考面 2181B,由此提供干涉测量腔的场相关的复有效反射率,其在干涉测量系统 2002 的 FOV 中在相位上变化。

[0390] 在一些实施例(例如图 20 和图 27 所示的实施例)中,虽然监测图像在几何上与主图像分离(例如通过阻挡来自第二参考界面的光进入主相机),但是其他配置也是可能的。举例而言,在一些实施例中,监测图像可以在波长上与主图像分离。

[0391] 作为例子,图 30 显示干涉测量系统 2003,当进行干涉显微镜的 OPD 扫描时,干涉测量系统 2003 使用监测图像(例如单色监测图像)来监测测试物相对于干涉显微镜的位移。

[0392] 具体而言,干涉测量系统 2003 包括干涉测量平台 3310、监测器组件 3300,以及干涉物镜 3167。干涉测量平台 3310 包括宽带光源 3163、分束器 3170,以及成像透镜 3189,成像透镜 3189 将干涉图案成像至白光相机 3191 上。此外,干涉测量平台 3310 包括拾取镜 3308、监测图像透镜 3190,以及监测相机 3199。

[0393] 干涉测量平台 3310 通过机械扫描器 3193 而被附加于监测器组件 3300 和干涉物镜 3167,机械扫描器 3193 相对于测试物 2175 位移监测器组件 3300 和干涉物镜 3167 的子系统。

[0394] 监测器组件 3300 包括第二光源 3197(例如窄带光源,例如单色光源)、仅对(多)监测波长的部分反射镜(partial mirror)3304(如 50/50 的镜子)、参考透镜 3306,以及具有第二参考面 2181B 的第二参考物 3302B。

[0395] 干涉物镜 3167 包括物镜透镜、干涉测量仪分束器 3179,以及提供主参考面 2181A 的主参考镜 3302A。

[0396] 依靠分立的第二光源 3197,监测测试物 2175 的位移是凭借着监测图像而被完成的。监测图像通过三面干涉(3-surface interference)而被形成,三面干涉包括主参考面 2181A 和第二参考面 2181B 的有效参考面的固定的复反射率。监测图像用来决定相移校正。在一些实施例中,监测图像的品质低于 SWLI 干涉图像。

[0397] 普遍而言,相位调制历史能够在监测图像的每一个像素上被独立地估计,例如通过余弦求逆。为了校正 SWLI 的数据获取,相移的知识能够接着被用来正确地解释白色 SWLI 图像。这种监测方法的好处是可以使用传统的干涉物镜而不需加以修改(或是仅需稍加修改)。因此,这种监测机制的配置能够相容于标准的物镜设计。

[0398] 虽然结合图 19 ~ 30 描述的干涉测量系统是用于 SWLI,替代的操作模式也是可能的。举例而言,参考图 31,干涉测量系统 2004 用于 PUPS 成像。此处,监测图像在波长上与 PUPS 图像分离,类似于干涉测量系统 2003。通过共用的光源单元来产生宽带和窄带的光,共用的光源单元经由共用的分束器 5170 采用透镜 5177 将光耦合至干涉物镜 5167。光源单元包括宽带光源 5163、透镜 5169 和 5171、监测光源 5197,以及分束器 5164。光束被聚焦至测试物 2175 上的单个点 5400。干涉物镜 5167 利用平移台 5193 而进行扫描。

[0399] 在干涉测量系统 2004 中,光学元件(例如管状透镜 5198 和分束器 5189)被设置,使得主相机 5191 和监测相机 5199 均位于与测试物 5167 的光瞳共轭的表面上。具有第二参考面 2181B 的第二参考物被设置,使得第二参考面 2181B 相对于主参考面 2181A 倾斜。第二参考面 2181B 对于(多个)监测波长是部分反射的,因此对于最终的三面干涉产生一个范围的相位偏差。

[0400] 主相机 5191 和监测相机 5199 的图像信息被提供至具有处理器的控制计算机 5192。控制计算机 5192 也与平移台 5193 互动。

[0401] 虽然包括复合参考物的某些实施例已经被描述,普遍而言,其他类型的结果也是可能的。举例而言,虽然以复合参考物为特征的所述实施例都包括用来记录监测信息的第二相机,但是在一些实施例中,可以使用单个相机。举例而言,第二相机和主相机被组合为单个相机,而对于主图像和监测图像具有分开的 FOV。

[0402] 再者,也能使用时间多路的 (time-multiplexed) 获取,或仅使用单一的图像,该单一的图像被处理,用以在分开或同时的数据处理步骤中同时决定全部的干涉相位偏差和物表面特性。

[0403] 复合参考物可以由任何所需形状的两种或更多的参考反射面构建,例如平面、球面、非球面或其他形状。再者,复合参考物可在整个 FOV 或仅部分的 FOV 中作用。

#### [0404] 位移测量干涉测量仪

[0405] 在一些实施例中,有关于扫描误差的信息是使用位移测量干涉测量仪 (DMI) 而被决定的,DMI 与干涉显微镜是分开的 (例如不使用共用的光学元件),并且当干涉显微镜进行 OPD 扫描时,DMI 用以监测测试物相对于干涉显微镜的位移。这种系统的例子如图 19 所示,图 19 显示修改的干涉显微镜 110,其不再包括第二光源 197 和第二探测器 199。而是,利用激光光源的位移测量干涉测量仪 1801 被安装在 Mirau 物镜 167, Mirau 物镜 167 用来导引光束,使光束从测试物 175 表面反射。DMI 1801 连接至计算机 192 并在操作期间传送干涉信号至计算机 192。计算机 192 根据干涉信号监测 Mirau 物镜 167 和测试物 175 之间的相对位移,并且配合干涉显微镜 110 的操作,提供有关于扫描误差的信息,扫描误差与使用干涉测量系统 110 进行的测量有关。

[0406] 普遍而言,多种 DMI 能够被使用。商用的 DMI 的例子包括例如由 Zygo Corporation (Middlefield, CT) 所制造的 ZMI 系列的位移测量干涉测量仪。DMI 的另一个例子也披露在美国专利申请 No. US 11/656,597 中 (发明名称为 "Interferometer System for Monitoring an Object", 申请日为 2007 年 1 月 23 日),其全部内容通过引用并入于此。

[0407] 在一些实施例中,DMI 1801 所使用的光源被包括于安装到 Mirau 物镜 167 的组件中。在一些实施例中,光源可以远离物镜封装,并且 DMI 的光源能够经由例如光纤波导而被导向至 DMI。这种系统的例子例如披露于美国专利申请 No. 11/656,597 中。这种设置的优点是安装到物镜的实际组件可以是小的且相对不醒目,而且处理的电子装置和光源都远离物镜。

[0408] 在一些实施例中,多个 DMI 系统能在扫描期间用来监测测试物的位移。举例而言,美国专利申请 No. 11/656,597 披露包括多个探测通道的系统,每一个探测通道均使用 DMI 来测量不同位置的 (例如相对或绝对的) 位移。

#### [0409] 光纤基传感器系统

[0410] 结合图 33 ~ 48B 描述了光纤基 DMI 系统 (也称为传感器系统) 的实施的多种例子,其用于扫描误差的监测。

[0411] 在一些实施例中,将传感器系统实施为干涉测量系统能够进一步用来决定监测面的位置,例如测试物或参考物的表面。举例而言,这可以用来在干涉测量系统的自动聚焦机制内决定测试物与内部参考界面之间的相对距离。

[0412] 图 33 显示传感器系统 4000 的例子,其包括子系统 4010,以及附加至干涉测量系统 4110 的 Mirau 物镜的传感器 4099A 和 4099B。

[0413] 子系统 4010 包括宽带光源 4020、被光源 4020 的光照射的可宽调的内腔 4030、光分配布模块 4040 (其接收来自内腔 4030 的光并且在各种通道 4050-4053 之间分配光),以及探测和相位测量计电子装置 4060,对于通道 4050-4053 的每个分别具有单独的探测模块

4070-4073(例如光电探测器)。

[0414] 更具体而言,宽带光源 4020 可以例如是面射型 LED,其中心波长远离干涉测量系统 4110 所使用的波长。举例而言,光源 4020 的功率约 9mW、中心波长为 1550nm、在半峰全宽的光谱宽度为 30nm,并且相干长度为约 50nm。

[0415] 使用光纤光缆 4012 来导引来自光源 4020 的光,使用隔离器 4014 和 4016 来分别避免因为光从内腔 4030 回至光源 4020,以及从光分配模块 4040 至内腔 4030 所导致的系统失真。举例而言,隔离器 4014 和 4016 可提供返回光 30dB 的抑制。

[0416] 在传感器系统内,50/50 的光纤耦合器可被设置在几个位置,用以分隔、分配和/或结合入射光和/或出射光。举例而言,内腔 4030 包括 50/50 的光纤耦合器 4095,50/50 的光纤耦合器 4095 在一侧连接于光源 4020 和光分配模块 4040。在另外一侧,耦合器 4095 连接于 OPD 可被变化的内腔 4030 的两路分支。每一路分支包括 10m 光纤的光纤延伸模块 (fiber stretching module,FSM) 4032A 和 4032B,每一个 FSM 设定为推拉模式 (push-pull mode) 以产生可调整的 OPD。每一路分支分别包括 Faraday 镜 4034B 和 4034B,其可以减少因为光纤光路中的偏振改变所导致的对比度衰减。

[0417] 对于沿着内腔的两路分支传播的光而言,其 OPD 是可控的,举例而言,通过使用 FSM 4032A 和 4032B 来延伸或缩短光程。在一些实施中,举例而言,OPD 能够在至少 3mm(例如 10mm) 的范围中被变化。当离开内腔时,来自两路分支的光在耦合器 4095 中被重新结合。

[0418] 作为另一个例子,50/50 的光纤耦合器用以在多种通道 405-5053 内分离入射光和反射光,使得从传感器返回的光在通过耦合器之后被导向相位测量计电子装置 4060。具体而言,耦合器 4090 将来自光分配模块 4040 的通道 4050 的光提供给参考腔 4080,并且将来自参考腔 4080 的光导向探测模块 4070。相似地,50/50 的光纤耦合器 4091 将来自光分配模块 4040 的通道 4051 的光提供给传感器 4099A,并且将来自传感器 4099B 的光导向探测模块 4071。通过相同的方式,耦合器 4092 和 4093 与来自其相关的通道的光和传感器互动。

[0419] 关于移动测量,传感器可通常贴附于实体物以单独地监测,或结合合适的(多个)自由度(例如相对于参考位置)监测。举例而言,通道 4051 和 4052 分别连接至传感器 4099A 和 4099B,其测量测试物 4175 和传感器 4099A 和 4099B 之间的距离,并由此测量测试物 4175 和 Mirau 物镜 4167 之间的距离。通道 4051 和 4052 也称为测量通道。结合图 34 描述了传感器配置的例子(参考以下)。

[0420] 为了提供参考信号,参考腔 4080 连接于通道 4050。如结合图 35 中的讨论(参考以下说明),参考腔 4080 具有类似于传感器 4099A 和 4099B 的配置。通道 4050 也称为参考通道。

[0421] 每一个传感器 4099A 和 4099B 被配置来观察传感器腔,传感器腔与内腔 4030 一起形成独立的耦合腔干涉测量仪 (coupled-cavity interferometer)。举例而言,传感器腔形成于传感器的反射面与被观察部分的反射面之间。在图 33 的配置中,传感器的反射面是传感器的最后面,且被观察部分的反射面是测试物的表面。在这种配置中,传感器腔的 OPD 正比于沿着 Mirau 物镜 4167 的轴的扫描移动而改变。

[0422] 图 34 中示出传感器 4100 的配置例子。热膨胀纤芯 (TEC) 光纤 4102 贴附于渐变折射率 (GRIN) 透镜 4104。传感器 4100 设计为在光束腰部位置 4106 提供特定宽度的光束。GRIN 透镜 4104 和 TEC 光纤 4102 之间的可调间隙可以在制造过程中被加入,用来相对于传

感器 4100 的最后面 4108 设定光束腰部位置 4106,以便在传感器制造过程中有助于设置光束腰部位置。在操作期间,传感器 4100 与目标物 4114 的目标面 4112 形成传感器腔。举例而言,目标物 4114 可以是测试物 4175 或光学元件或所述元件的其中一个的基座的一部分。

[0423] 在传感器 4000 的配置中,若有需要,GRIN 透镜 4104 的最后面 4108 可以当成参考面。接着,最后面 4108 和目标面 4112 形成传感器腔。可替代地,最后面 4108 可以被抗反射 (AR) 涂布,用以减少表面反射。根据应用,传感器 4100 可以也可不使用最后面作为参考面。传感器 4100 是一种简单的配置,可以在尺寸和成本上减小。

[0424] 因为照射光的受限的相干长度可排除来自不期望表面的干涉,所以通过调整耦合腔干涉测量仪的架构,就可以选择贡献于传感器腔的期望的表面。

[0425] 图 35 显示参考腔 4200 的配置例子。参考腔 4200 包括光纤光缆 4202,用以接受来自分配器 4040 的光。GRIN 透镜 4204 将光束准直到固定 OPD 的 Fabry-Perot (FP) 腔。在一些实施例中,参考物的 OPD 被调整为例如平衡距离 D(如图 34 所示)的两倍,对于物镜的最佳聚焦的情况,平衡距离 D 等于从最后面 4108 到测试表面的距离。

[0426] 再参考图 33,在传感器系统 4000 操作期间,具有合适的相干度和强度的光被提供至内腔 4030,内腔 4030 在两路分支之间提供可控的 OPD。在光通过内腔 4030 之后,光分配模块 4040 将光分配于各个测量通道 4051-4052 和参考通道 4050 之间。隔离器 4014 和 4016 确保照射效能不会因为光学反馈而降低。测量通道 4051-5042 将光导引至传感器 4099A 和 4099B,且从传感器 4099A 和 4099B 导引回来,传感器 4099A 和 4099B 贴附于干涉测量系统 4110 以形成传感器腔,使得传感器腔的 OPD 取决于由各传感器监测的自由度。光沿着相同照射光纤 4012 在测量通道 4051-4052 内返回并且被导向电子装置 4060,电子装置 4060 探测和处理一或多个通道的信号,以导出被监测的(多个)自由度的信息。

[0427] 调整内腔 4030 的 OPD 改变了相位调制,其被用于决定测量通道中的传感器腔的(多个)干涉测量相位和(多个)OPD。传感器系统 4000 能对以下的测量模式使用相位调制:相干扫描模式和移动(或相位)监测模式。如所需,传感器系统 4000 可用以在这些模式之间快速地切换。

[0428] 在相干扫描模式中,通过找出内腔调整中的点,传感器的 OPD 能够在内腔 4030 的调整范围内被决定,其中在各通道中的调制为最大值。举例而言,相干扫描模式能够用于自动聚焦机制,如结合图 38 和图 39 在以下所述。

[0429] 在相干扫描模式中,当相位测量计电子装置 4060 例如同时和实时寻找测量通道 4051-4053 的相干峰值时(最大干涉调制),内腔 4030 的 OPD 大幅度地变化。当通道相干为最大值时,内腔 4030 的 OPD 决定与该通道相关的传感器腔的 OPD。具体而言,在参考 OPD 的适当设置的情况下,参考通道 4050 的峰值干涉位置和测量通道 4051 或 4052 的峰值干涉位置之间的距离显示偏离例如最佳聚焦位置的测试物 4175 的相对位置。

[0430] 移动监测模式可用于例如振动监测。在移动监测模式中,测量通道 4051-4053 的干涉测量相位是以高速测量。因此,若测量通道 4051-4053 在在照射光的相干峰值内,则可以监测一个通道相对于任何其他通道的 OPD 变化。

[0431] 在移动监测模式中,内腔 4030 的 OPD 以小幅度高频地变化,允许传感器腔或多个腔的干涉相位用相位提取算法以高的更新速率计算。假设传感器腔的变化率是足够小的,使得相邻取样之间的干涉测量相位变化小于  $\pi$ ,允许使用标准相位连接法进行连续相位内

插。

[0432] 在移动监测模式中,参考通道 4050 可以被用于将内腔 4030 中的光程变化从所测量的相位移除,所测量的相位对应于所观察的测试表面的移动。举例而言,参考通道 4050 可以容许内腔的漂移 (drift),只要该漂移相对于所测量的相位的更新频率是慢的。

[0433] 在一些实施例中,从传感器发出的光束大致上平行于监测轴传播,以减少对准误差 (misalignment),对准误差在测量到的移动中产生误差,而该误差正比于对准误差角度的余弦值。传感器的返回损耗也取决于照射光在测试表面上的入射角,具体而言,该入射角可随着目标面倾斜而增加。普遍而言,传感器的倾斜灵敏度与传感器设计的细节有关,且可以例如取决于 GRIN 透镜和光束腰部位置之间的距离,称为传感器工作距离。普遍而言,将传感器发射垂直于所观察的部分的理论表面可放大可用的倾斜相空间。

[0434] 在图 33 所示的实施例中,当 FSM 未启动 (energized) 时,内腔 4030 的 OPD 被定义为“理论 OPD”。若传感器是用于自动聚焦,则当物镜达到最佳聚焦时,传感器腔的 OPD 应该接近理论 OPD。由此方式,干涉峰值的对比度位置可用以识别最佳聚焦。

[0435] 用来控制内腔的 OPD 的 FSM 可以是温度敏感的,举例而言,FSM 的 OPD 温度系数约为 10ppm/C。将两个 FSM 紧密热接触可以最小化因为温度差异导致的 OPD 变化。此外,FSM 可被经历蠕变 (creep) 的 PZT 驱动。蠕变由 PZT 畴的重新对准由于热扰动下的静电应力导致,蠕变通常具有关于时间的对数关系。最终,在制造时难于物理匹配内腔的两路分支的光纤长度。

[0436] 就 OPD 的变化能力而言,可以使用一个通道作为补偿机制的固定的参考腔。在一些实施例中,参考腔的 OPD 被设定为等于内腔的理论 OPD。一个固定的参考腔的例子被显示在图 35 中。

[0437] 参考通道能够与其余的测量通道同时且同步地被获取。当分析监测通道的信号时,可以从相位测量结果减去参考相位。因此,就参考腔 OPD 是固定的而言,只要内腔的 OPD 变化小于相干长度而使参考信号绝不会丢失,则内腔的 OPD 任何变化就可以通过减法得到。

[0438] 参考腔还可用以定义理论 OPD 位置,理论 OPD 位置可对应于自动聚焦的物镜的最佳聚焦位置。

[0439] 作为例子,结合图 36 ~ 38 描述具有传感器系统的显微镜的操作。举例而言,传感器系统可是结合图 33 上述的传感器系统。所述操作包括传感器系统的自动聚焦功能和移动 (或相位) 监测功能。

[0440] 如图 36 的流程图 4300 所示,显微镜头 (例如干涉显微镜的物镜) 是被设置于放置测试物的测量部分上方 (步骤 4310)。测试物具有一个被显微镜检视的测试表面。

[0441] 一旦传感器系统的自动聚焦模式启动 (步骤 4320),进行 OPD 扫描。

[0442] 图 37 示意性显示监测腔的测试信号的调制峰值 4410,以及在自动聚焦的 OPD 扫描期间所测量的参考腔的参考信号的调制峰值 4420。举例而言,所测量的信号使用电子处理器分析,电子处理器用来识别调制峰值的位置,以及计算测试物表面相对于最佳聚焦位置的位置 (步骤 4330)。在本例子中,参考信号的调制峰值 4420 的位置表示最佳聚焦位置。

[0443] 根据已决定的相对位置,显微镜接着将测试表面朝向最佳的表面位置移动所测量的距离 (步骤 4340)。如图 38 示意性所示,测试表面的所得位置可以被验证 (步骤 4350),

其中监测腔的调制峰值 4410' 和参考腔的调制峰值 4420 发生在 OPD 扫描的约相同 OPD。为了确保正确地定位或精确定位,可以进行步骤 4330 和 4340 的循环 4355。

[0444] 在显微镜聚焦之后(当测试腔和参考腔的相干函数重叠时),且在确认定位正确之后,将 OPD 扫描的自动聚焦的 DC 电压设定为最大调制(步骤 4360)。图 38 示意性显示,在传感器系统中这种 OPD 的快速正弦扫描的监测信号 4510 和参考信号 4520。在一些实施例中,可进一步箝位在最大干涉条纹对比度的点的 FSM 电压。

[0445] 接着,将振动模式启动(步骤 4370),其监测测试表面的移动,且开始采用显微镜的测试物的 SWLI(或 PUPS)扫描测量。移动的同步测量允许计算并且输出真实的移动分布,其与 SWLI(或 PUPS)数据同步。

[0446] 根据真实的移动,所测量的相位变化与 SWLI(或 PUPS)分析可以一起被用来移除扫描误差的影响(步骤 4395)。这可以实时完成或当进行 SWLI(或 PUPS)数据的数据的后处理时。

[0447] 虽然在前述示例中,自动聚焦和移动监测的功能顺序进行,但是每一种这些功能的每个都能被单独或多次使用。

[0448] 在一些使用自动聚焦模式的实施例中,传感器系统的 OPD 扫描和参数被选择,以提供工作范围(例如大于 1mm 的工作距离;例如大于 5mm 的工作距离);例如 100nm 的位置解析度;(在具有结构的部分上)例如约 250nm 的位置再现性(position repeatability);例如约为 0.5mm 直径的斑点尺寸;以及大于例如 10Hz 的速度。

[0449] 当自动聚焦功能被用于具有 FSM(例如如图 33 所示的的干涉测量系统中的 FSM 4032A 和 4032B)的传感器系统时,FSM 可以例如以相对慢的(例如约 10Hz)且振幅较大的正弦电压所启动,并且测试表面的位置能够根据测试和参考的相干峰值之间的相对延迟而被决定。总体的 OPD 扫描范围取决于 FSM 4032A 和 4032B 的卷轴(spools)中的光纤长度以及 FSM 4032A 和 4032B 的 PZT 的最大延伸量。蠕变和温度灵敏度可以直接取决于光纤长度,从而光纤的最佳用量通常是拖曳长度和可接受的灵敏度之间的折中。举例而言,使用 18m 的光纤的 FSM 提供 6.6mm 的 OPD 扫描、 $9.5 \mu\text{m}/\text{V}$  的转换系数以及  $254 \mu\text{m}/\text{C}$  的温度灵敏度。

[0450] 在一些使用移动监测模式的实施例中,传感器系统的 OPD 扫描和参数被选择以提供:小于 0.2nm 的移动解析度、(在具有结构的部分上)小于 1nm 的再现性、约 200kHz 的采样率,以及大于 5kHz 的更新频率。

[0451] 此外,当自动聚焦功能被用于具有 FSM(例如如图 33 的干涉测量系统所显示的 FSM 4032A 和 4032B)的传感器系统时,FSM 会被高频(例如约 10kHz)且具有使得能够高速计算腔干涉相位的振幅的波形(提供最佳干涉的 DC 箝位电压)所启动。在一些实施例中,若使用的是标准的线性相移算法,则这能够通过锯齿或三角的调制分布来完成。在其他实施例中,调制是正弦的和且使用 SinPSI 算法。举例而言,在正弦相移算法上,可以使用 P. J. De Groot 的美国专利申请 No. US-2008/0180679-A1(名为"Sinusoidal Phase Shifting Interferometry";),和/或美国专利申请 No. 12/408,121(名为"Error Compensation in Phase Shifting Interferometry",申请日:2009 年 3 月 20 日)所披露的,其内容通过引用并入于此。

[0452] 通道能够以合适的频率和相位相对于该调制同时取样,使得每一个周期取得一次新相位。通过乘上  $\lambda/4\pi$ ,可将相位变化转换成为物理长度变化。在所述速度,计算的负担

是很小的,且能够使用标准的微处理器来为所有通道同时容易地实时进行。

[0453] 在干涉测量期间(例如 SWLI 或 PUPS),腔的移动能够被控制干涉测量系统的微处理器所读取。移动数据能够经由反馈机制来实时校正干涉测量系统的扫描移动,或对干涉数据印时戳、保持并在干涉数据的后处理过程中使用,校正不期望的扫描移动,例如使用本文所述的 J 矩阵方法。

[0454] 普遍而言,有多种类型的干涉测量物镜能够与具有传感器的传感器系统结合使用,用以在操作期间,与监测面形成监测腔。以下说明了一些例子,其中传感器被安装于干涉测量物镜,从而使用由干涉测量物镜检视的测试物来形成监测腔。

[0455] 作为放大图,图 39 显示了图 33 中所示的物镜单元 4540,其包括 Mirau 物镜 4167 和传感器环 4545。Mirau 物镜 4167 包括透镜 4550 和反射镜 4560,对于干涉测量提供了测试光程和参考光程。传感器环 4545 包括传感器 4099A 和 4099B,传感器 4099A 和 4099B 通过光纤 4012 连接至子系统 4010,如图 33 所示。传感器 4099A 和 4099B 发出辐射垂直照射在测试物 4175 上,由此在没有在 Mirau 物镜 4167 的视场内的区域,与测试物表面形成监测腔。

[0456] 图 40 示出传感器 4570 和 Michelson 物镜 4580 的组合。通过分束器 4585,传感器 4570 大致上在 Michelson 物镜 4580 的视场内照射测试物 4175。

[0457] 图 41 显示在 Linnik 物镜 4592 内的两个传感器 4590A 和 4590B 的实施方式。在测试物分支 4596A 和参考分支 4596B 的每个中,Linnik 物镜 4592 包括 Schwarzschild 光学部件 4594A 和 4594B 以及偏振器 P。传感器 4590A 和 4590B 设置在 Linnik 物镜 4592 的中间位置。传感器 4594A 以 90 度的角度(例如在 Linnik 物镜 4580 的 FOV 内)照射测试物 4175,由此与测试物 4175 的表面形成第一监测腔。类似地,传感器 4590B 以 90 度的角度照射测试物 4181,由此与参考物 4181 的表面形成第二监测腔。如所述,参考物 4181 可移位来提供例如干涉测量的 SWLI 测量的相移。

[0458] 如上所述,传感器系统能够根据所使用的干涉测量物镜而以多种方式被实施。此外,传感器系统能够根据干涉测量所使用的扫描模式而以多种方式被实施。举例而言,根据扫描的是焦点还是维持焦点位置时扫描光程长度,可以区分焦点扫描和光程长度扫描。

[0459] 在焦点扫描中,干涉物镜的焦平面位置相对于测试表面是变化的,通常通过整体地移动物镜。焦点扫描可以与其参考面不可接近的干涉测量物镜(例如 Mirau 型物镜)来使用。

[0460] 在光程长度扫描中,参考面被移动(例如其位置被正弦调制),而焦平面是固定的。光程长度扫描能够与 Linnik 或 Michelson 物镜使用,其中参考界面可以被接近并且可以进行 SWLI 和 PUPS 干涉测量。

[0461] 如适用于焦点扫描的例子,图 42A ~ 42C 显示具有通用型物镜 4600 的传感器的实施例。虽然在图 42A ~ 42C 以及在大多数随后的图中仅显示一个传感器,可以使用多于一个的传感器,作为冗余或提供角度的移动信息。

[0462] 在图 42A 中,传感器 4610 被埋入用来承载测试物的台 4620 中,并且传感器 4610 监测通用型物镜 4600 相对于台 4620 的移动。在图 42B 中,传感器 4630 附加于通用型物镜 4600,并且传感器 4630 监测通用型物镜 4600 相对于台 4620 的移动(若台的表面部分形成监测腔),或直接监测通用型物镜 4600 相对于测试物的移动(若测试物的表面部分形成监

测腔)。在图 42C 中,传感器 4640 被安装于通用型物镜 4600,使得传感器 4640 发射出传感器光束 4650,其被倾斜地反射离开台 4620 或测试表面,然后再从安装在通用型物镜 4600 的另一侧的反射镜 4660 反射回到传感器 4640。当传感器光束 4650 从通用型物镜 4600 的测量点 4670(如图 42C 所示)反射时,图 42C 的配置能够减少 Abbé 误差,但是可具有减小的垂直移动的灵敏度。

[0463] Michelson 和 Linnik 物镜运行尤其简单的传感器配置来进行焦点扫描,通过使用 Michelson 和 Linnik 物镜的光学部件来定义传感器光束的光程,用减少了 Abbé 误差而不损害垂直灵敏度。

[0464] 举例而言,图 43A 所示的传感器 4570 与 Michelson 物镜的组合对应于图 41 所示的配置,其中传感器 4570 的传感器光束 4680 被分束器 4585 垂直地反射至测试物 4175。传感器 4570 能够包括内置的参考物,例如结合图 34 所述的,以提供干涉测量腔。

[0465] 相较于图 43A 所示的配置,图 43B 所示的配置能够以不提供内置参考物的传感器 4570A 操作,因为 Michelson 物镜的参考分支 4686 提供了参考物 4688,其也用以传感器 4570A 的参考物。具体而言,分束器 4585 和传感器光束 4680 的交互作用使得参考光束 4690 被传送至参考物 4688,并由参考物 4688 反射回。分束器 4585 可以例如基于偏振状态或波长分离。

[0466] 作为另一例子,图 34C 中显示了具有传感器 4700 的 Linnik 物镜以及透镜基的测试物镜 4715 和透镜基参考物镜 4718 的结合。如图 34A 所示,传感器 4700 的传感器光束 4710 被分束器 4720 垂直地反射至测试物 4175 上。传感器 4700 能够包括内置的参考物,例如结合图 34 所述,以提供干涉测量腔。

[0467] 相较于图 34C 所示的配置,图 43D 所示的配置能够以不提供内置参考物的传感器 4700A 操作,因为 Linnik 物镜的参考分支 4730 提供了参考物 4740,其也用作传感器 4700A 的参考物。具体而言,分束器 4720 和传感器光束 4710 的交互作用使得参考光束 4750 被传送至参考物 4740,并由参考物 4740 被反射回。分束器 4720 可以例如基于偏振状态或波长分离。

[0468] 虽然图 43A ~ 43D 被描述为使用焦点扫描的配置,但是在一些实施例中,传感器系统也能够与以光程长度扫描操作的干涉测量系统结合。在光程长度扫描中,扫描物镜参考面而非目标表面,从而在干涉测量过程中变化 OPD。

[0469] 例如,如图 44A 所示,Michelson 物镜可与传感器 4800 结合,传感器 4800 与参考物 4810 的背侧表面形成监测腔。被参考物 4810 反射的传感器 4800 的传感器光束 4820 对参考物 4810 的移动是敏感的,并且能够用来校正移动误差,而非用于校正自动聚焦。传感器 4800 能够包括内置的参考物,例如结合图 34 所述,以提供干涉测量腔。

[0470] 在另一个例子中,图 44B 显示 Linnik 物镜与传感器 4830 的组合。在图 44A 中,传感器 4830 的传感器光束 4840 被参考物 4686 反射。而且传感器 4830 能够包括内置的能够包括内置的参考物,例如结合图 34 所述,以提供干涉测量腔。

[0471] 作为使用不具有内置参考物的传感器的例子,结合图 43B 和图 43D 所述的配置能够用于光程长度扫描。接着,并非扫描在测试分支中的测试物 4175 或 Linnik 测试物镜 4715,可保持测试分支中的焦点位置,并且在图 34B 中改变参考物 4686 的位置且在图 43D 中改变参考物 4740、Linnik 参考物镜 4718 或两者(同步)的位置。

[0472] 在一些应用中,参考面和目标面同时被扫描。接着,可使用传感器系统来同时监测两种移动。此外,额外的自由度也能够被监测,例如参考面倾斜,其例如对 PUPS 的应用可以有。

[0473] 采用两个或更多的分立的传感器可以进行同时监测两种以上的移动,举例而言,传感器被连接至结合图 33 所述的子系统 4010 的分立的通道。图 45A ~ 45C 显示如何可将两个以上的传感器设置在 Michelson 或 Linnik 干涉测量仪的例子。

[0474] 图 45A 是图 42B 与图 44A 所示的实施例的组合,其中安装在 Michelson 物镜的第一传感器 4630A 监测测试物 4175 相对于 Michelson 物镜的移动,而第二传感器 4800A 用来监测参考物 4686 的移动。

[0475] 图 45B 是图 42B 与图 44B 所示的实施例的组合,其中安装在 Linnik 物镜的第一传感器 4630B 监测测试物 4175 相对于 Linnik 物镜的移动,而第二传感器 4830B 探测参考物的移动 4740。

[0476] 图 45C 所示的配置类似于图 45B 所示的配置,其中除了参考物 4740 的移动以外,还由两个传感器 4830C 和 4830D 监测了参考物 4740 的参考面的倾斜和活塞移动。图 46 显示一实施例,其中传感器 4800 直接探测扫描器 4810 的移动,而非探测干涉测量腔。若扫描器 4810 是移动不确定性的最大来源,则可进行扫描器 4810 的监测,且可以使得能够使用较粗略且便宜的扫描机制。

[0477] 图 47 显示一实施例,若测试物 4175 的测试表面 4820 太小而无法用离轴(off-axis)传感器 4830 直接探测,或测试物 4175 的测试表面 4820 具有一表面斜率,而该表面斜率无法提供可靠的返回信号至传感器 4830,则图 47 所示的实施例可允许监测干涉测量腔。在该情形,测试物 4175 被安装在特别部件台 4840 上,台 4840 具有被传感器 4830 探测的反射镜 4850。镜面被安装使得镜面高度对应于测试物 4175 的期望的表面高度。举例而言,这种配置能够用于装配产线,在装配产线上,测试物都是非常类似的。图 48A 和图 48B 显示引入物镜转台(objective turret)4900 的配置,物镜转台 4900 具有可旋转部件 4930 与不可旋转部件 4940。举例而言,转台能用于显微镜以提供不同类型(例如具有不同测量放大率)的物镜 4910A 和 4910B。在图 48A,每一个物镜 4910A 和 4910B 都具有自带的传感器 4920A 和 4920B,而在图 48B,单个传感器 4920C 附加于转台 4900 的不可旋转部件 4940 上。图 48A 的配置不受(或至少较少受)转台 4900 的可旋转部件 4930 与不可旋转部件 4940 之间的机械联接的不可预期移动的影响,因为机械联接的移动至少理论上由传感器 4920A 和 4920B 所考虑。然而,图 48B 所示的配置可能需要较少数量的传感器,并且当转台 4900 旋转时,也不需考虑缠绕返回的光纤。

#### [0478] 替代实施例

[0479] 虽然所述一些实施例中的光源子系统包括主光源 163 和第二光源 197,但是其他配置也是可能的。普遍而言,第二光源 197 所发出的光波长是能够按期望改变,只要该波长可被第二传感器探测。所选择的波长可能落于主光源 163 的带宽内,或为完全不同的波长。举例而言,主光源 163 可被选择来提供白色可见光源;而第二光源 197 提供在光谱的 UV 或 IR 部分的光。此外,第二光源 197 可以或者一起(或依序地)提供具有一系列离散波长的光。

[0480] 此外,在一些实施例中,光源子系统包括单一光源,而非分立的主光源和第二光

源。单一光源产生作为主探测器 191 的辐射的光源,也产生作为第二探测器 199 的辐射的光源。举例而言,与第二探测器 199 搭配使用的滤波器 101 能够被选择以从光源至第二探测器 199 通过单一波长(或窄波段)。

[0481] 普遍而言,第二光源 197 可以被扩展或是点光源,并且第二光源的成像可以是 Koehler 或临界(critical)。普遍而言,当在 PUPS 模式中使用点光源时,临界照明是优选的以照射光瞳;而对于 SWLI, Koehler 照明通常是优选的以照射大面积的部分。

[0482] 主光源 163 可以为 LED、弧光灯、白炽灯、白光激光,或适用于宽带干涉测量的其他光源。

[0483] 在一些实施例中,孔径光阑看用以控制光源的空间范围。使用中间面照明也是可能的。

[0484] 探测器子系统的各种配置也是可能的。举例而言,第二探测器 199 通常可以被描述为最小具有两个探测点或像素的探测器。因此,第二探测器 199 能够是具有集成的探测器元件(如所述实施例所示)的单一探测器,或可由多个分立的单个探测器构成。

[0485] 在一些实施例中,单一探测器能够取代主探测器 191 和第二探测器 199。举例而言,主探测器 191 可包括数个探测器元件,其专用于取得监测信号。举例而言,这可以包括在相应探测器元件前方设置分立的窄带滤波器,或可包括选择的光学部件以将监测信号的光引导至主探测器 191 的特定元件。

[0486] 在监测信号间产生相位不同的多种方法已经讨论如上。产生相位不同的其他方法也是可能的。举例而言,除了在参考光和测量光之间引入相对的倾斜而在第二探测器 199 的 FOV 中产生条纹以外,额外的光学元件也可用来实现相同的效果。举例而言,在一些实施例中,偏振元件可用来偏移探测器 199 的光的相位。这包括例如单一测量点的情况下,通过偏振元件来产生测量光束和参考光束之间的相对相移。

[0487] 在所述实施例中,探测器和光源子系统分别包括主探测器/第二探测器和主光源/第二光源。其他实施例也是可能的。举例而言,在一些实施例中,第二光源和第二探测器被绑定在一起而成为分立的子系统,该子系统与主系统共用一些光学部件。举例而言,第二光源和第二探测器可被封装在一起而成为一个模块,其装配在主探测器和系统的其他元件之间,或在物镜和系统的其他元件之间。

[0488] 此外,虽然前述讨论假设扫描分布理论上对于时间是线性的,但是扫描误差的校正技术也能够用于其他扫描分布。

[0489] 虽然上述实施例的特征是具有 Linnik 或 Mirau 物镜的干涉显微镜,但是扫描误差的校正技术也能够用于其他类型的干涉显微镜(例如使用 Michelson 干涉测量仪的显微镜)。更普遍而言,所述技术不限于干涉显微镜,也能够用于非显微镜式的干涉测量仪。

#### [0490] 计算机程序

[0491] 所述任何计算机的分析方法可以实现为硬件或两者的组合。根据本文所述的方法和图,所述的方法可以利用标准的编程技术而实现为计算机程序。将程序码应用于输入数据以执行本文所述的功能,且产生输出信息。输出信息施加至一或多个输出装置,例如显示器监视器。每一种程序可以被实现为高水平处理或面向对象的程序语言,以便与计算机系统通讯。然而若有需要,该程序也能被实现为汇编语言或机器语言。在任何情况,该语言可以被编译或解译的语言。此外,该程序也能够为了该目的在预先编程的专用集成电路中运

行。

[0492] 每种这样的计算机程序优选地存储于存储介质或装置（例如 ROM 或磁碟）上，存储介质或装置可由通用型或专用型可编程的计算机读取，当存储介质或装置由计算机读取以执行本文描述的程序时，用以配置或操作计算机。当程序执行时，计算机程序也能够存储在高速缓冲存储器或主存储器中。分析方法也能够被实现为计算机可读取存储介质，并用计算机程序配置，其中存储介质被配置使得计算机以特定和预定的方式来执行本文所述的功能。

[0493] 所述实施例涉及干涉测量系统和方法，用以决定与测试物有关的信息。关于合适的低相干干涉测量系统、电子处理系统、软件、以及相关处理算法的附加信息均披露于共有的美国专利申请 US-2005-0078318-A1，名称为“Method and System for Interferometric Analysis of Surfaces and Related Applications”；以及 US-2004-0189999-A1，名称为“Profiling Complex Surface Structures Using Scanning Interferometry”；以及 US-2004-0085544-A1，名称为“Interferometry Method for Ellipsometry, Reflectometry, and Scatterometry Measurements, including Characterization of Thin Film Structures”，其内容通过引用合并于此。

#### [0494] 示例性应用

[0495] 引入上述的扫描误差校正的低相干干涉测量方法可用于下列各种表面分析问题：简单薄膜、多层薄膜、衍射或以其他方式产生复杂干涉效应的锐利的边缘和表面特征、未解析的表面粗糙度、未解析的表面特征（例如在平滑表面上的次波长宽度的沟槽）、非相似材料、与偏振有关的表面特性，以及表面或可变形的表面特征的偏转、振动或移动，其导致干涉现象的与入射角有关的扰动。以薄膜为例，关注的可变参数可以为膜厚度、膜的折射率、基板的折射率、或所述参数的组合。表现出所述特性的物或装置的示例性应用将在以下讨论。

#### [0496] 半导体工艺

[0497] 上述的系统和方法能够用于半导体工艺中，用于工具的特定监测，或是控制工艺流程本身。在工艺监测的应用中，单 / 多层的膜通过相应的工艺工具而在未图案化的硅晶片上（监测晶片）被生长、沉积、抛光或是蚀刻，然后使用采用本公开所述的扫描误差校正技术的干涉测量系统来测量厚度和 / 或光学特性。这些监测晶片的厚度（和 / 或光学特性）平均以及晶片内的均匀度被用以决定相关工艺工具是否以目标规格而被操作，或者是否应该被重定确定目标、调整，或者不再使用。

[0498] 在工艺控制的应用中，接着，单 / 多层的膜通过相应的工艺工具而在图案化的硅生成晶片上被生长、沉积、抛光或是蚀刻，然后使用具有本公开所述的扫描误差校正技术的干涉测量系统来测量厚度和 / 或光学特性。用于工艺控制的生产测量通常包括一个小的测量部件，以及将测量工具对准关注的取样区域的能力。这个部件由多层膜的堆叠所组成（其自身可能被图案化），因此需要复杂的数学模型来提取相关的物理参数。工艺控制测量决定了整体工艺流程的稳定度，也决定整体工艺是否应该继续、重定确定目标、重新导向至其他设备，或完全停机。

[0499] 具体举例而言，本公开所述的干涉测量系统能够用于监测以下设备：扩散、快速热退火、化学气相沉积工具（高压或低压均可）、介电层蚀刻、化学机械抛光机、等离子体沉

积、等离子体蚀刻、光刻跟踪 (lithography track), 以及光刻曝光工具。此外, 本公开所述的干涉测量系统能够用于控制以下工艺: 沟槽和隔离、晶体管形成, 以及层间电介质形成 (例如双金属镶嵌)。

#### [0500] 铜互连结构与化学机械抛光

[0501] 目前, 芯片制造商通常使用一种称为“双金属镶嵌铜”的工艺来制造芯片不同部分之间的电互连。这是可以使用合适的表面形貌系统来高效表征的工艺的示例。双金属镶嵌工艺可被认为具有六个部分: (1) 层间电介质 (ILD) 沉积, 其中介电材料层 (例如聚合物或玻璃) 被沉积在晶片 (包括多个独立的芯片) 表面; (2) 化学机械抛光 (CMP), 其中介电层被抛光以产生平滑的表面, 以便进行精确的光学光刻; (3) 光刻图案化和反应离子蚀刻步骤的结合, 其中复杂的网路被生成, 包括平行于晶片表面延伸的窄沟槽, 以及由沟槽底部至 (先前定义的) 下层导电层延伸的小通路孔; (4) 金属沉积的工艺步骤的结合, 其中产生铜沟槽和通路孔的沉积; (5) 电介质沉积步骤, 其中电介质被沉积在铜沟槽和通路孔的上; 以及 (6) 最后的 CMP 步骤, 其中多余的铜被移除, 留下由铜填充的沟槽 (和可能的通路孔) 的网路, 由介电材料围绕。

[0502] 参考图 20A, 装置 500 是示例性膜结构, 其由在沉积于基板 501 上的铜特征 502 上沉积电介质 504 形成。电介质 504 具有不均匀的外表面 506, 且沿着外表面 506 具有高度变化。由装置 500 获得的干涉信号可包括上表面 506 的干涉图案、铜特征 502 与电介质 504 之间的界面 508 干涉图案, 以及铜特征 502 与基板 501 之间的界面 510 的干涉图案。装置 500 可包括也产生干涉图案的多个其他特征。

[0503] 参考图 20B, 装置 500' 示出了装置 500 经最后的 CMP 工艺步骤之后的状态。上表面 506 已被平面化为表面 506', 且界面 508 可能现在暴露于环境。界面 510 在基板表面仍维持原状。装置效能和均匀度关键取决于对电介质 504 的表面平坦化监测。重要的是, 抛光速率和抛光后残存的铜 (和电介质) 厚度强烈并以复杂的方式取决于抛光条件 (例如对垫压力与研磨浆成分)、以及铜和其周围电介质区域的局部细致排布 (例如取向、接近度和形状)。因此, 表面 506 在铜元件 502 上方的部分与表面 506 的其他部分可以不同的速率蚀刻。另外, 一旦铜元件 502 元件的界面 508 被暴露, 则电介质和铜元件可以表现出不同的蚀刻速率。

[0504] 众所周知, 这种“与位置有关的抛光率”会在许多横向长度尺度上导致可变的表面形貌。举例而言, 这可能意味着更靠近晶片边缘的芯片整体上比更靠近晶片中心的芯片抛光速率更快, 因而使得铜区域靠近边缘比期望的薄, 且在中心比期望的厚。这是一种“晶片尺度”的工艺不均匀性的例子, 即一种与晶片直径可比较的长度尺度上发生的工艺不均匀性。此外, 众所知的是, 铜沟槽密度较高的区域比铜沟槽密度较低的邻近区域的抛光速率快。这导致在高铜密度区域中的所谓“CMP 诱导侵蚀 (CMP induced erosion)”的现象。这是一种“芯片尺度”的工艺不均匀性的例子, 即一种与单个芯片的线性维度可比较 (且有时远小于) 的长度尺度上发生的工艺不均匀性。另一种芯片尺度的不均匀性, 称为“碟型化 (dishing)”, 其发生于铜填充的单沟槽区域中 (这导致该区域比周围电介质区域的蚀刻速率高)。对于宽度大于几个微米的沟槽, 碟型化可能变得严重, 导致受影响的线后来表现出过度的电阻, 引起芯片失效。

[0505] 由 CMP 导致的晶片和芯片尺度的工艺不均匀性本质上难于预测, 且随着 CMP 工艺

系统内的条件演变,它们经历随时间的改变。为了有效地监测与合适地调整工艺条件,用以确保不均匀性保持在可接受的限度内,对于工艺工程师重要的是,在芯片上在大量各种不同位置进行频繁的非接触表面形貌的测量。这可以使用上述的干涉测量方法和系统的实施例。

[0506] 在一些实施例中,在 CMP 之前和 / 或期间,通过从该结构获得低相干干涉信号,监测了一种或更多的空间特性,例如表面 506 的形貌和 / 或电介质 504 的厚度。根据空间特性,抛光条件能够被改变以实现期望的平面表面 506'。举例而言,垫压力、垫压力分布、抛光剂特性、溶剂的成份和流量,以及其他条件能够根据空间特性而被调整。在经过抛光一些时间之后,空间特性能够再次被决定,并且抛光条件能够视需要而改变。形貌和 / 或厚度也是例如获得表面 504' 的终点的指标。因此,低相干干涉信号能够用来避免物的不同区域因过度抛光而导致的凹陷。低相干干涉信号和系统在该方面有优势,因为即使存在多个界面,装置的空间特性(例如(a)在铜元件 502 和(b)在基板表面 510 上方的电介质表面的相对厚度)仍可被决定。

[0507] 光刻

[0508] 在许多微电子应用中,光刻工艺用以图案化基板上的光致抗蚀剂层,例如硅晶片上的光致抗蚀剂层。参考图 20A 和图 20B,物 30 包括基板(例如晶片 32)与覆盖层(例如光致抗蚀剂层 34)。物 30 包括多个界面,如在不同折射率材料之间的界面。举例而言,在物周围的界面 38 被界定,其中光致抗蚀剂层 34 的外表面 39 接触围绕物 30 的环境(例如液体、空气、其他气体或真空。基板层界面 36 被界定在晶片 32 的表面 35 和光致抗蚀剂层 34 的下表面 37 之间。晶片的表面 35 可包括多个图案化的特征 29。这些特征中的一些特征具有与基板的相邻部分相同的高度,但是具有不同的折射率。其它的特征可能相对于基板的相邻部分向上或向下延伸。因此,界面 36 在光致抗蚀剂层外表面的下方表现出复杂且变化的形貌。

[0509] 光刻设备将图案成像于物上。举例而言,该图案可对应于电子电路的元件(或电路的负片)。在成像之后,部分光致抗蚀剂层被移除,露出在已移除的光致抗蚀剂层下方的基板。露出的基板可被蚀刻、覆盖上沉积材料或进行其他修正工艺。残余的光致抗蚀剂保护其他部分的基板,使其不受这样修正工艺的影响。

[0510] 为了增加制造效率,有时候在单个晶片上制造多于一个的装置。这些装置可能是相同的或不同。每一个装置都需要将图案成像于晶片的一个子区域。在一些情况中,图案被顺序地成像于不同的子区域。为了几个原因可以进行顺序的成像。光学像差可导致在晶片的大范围面积上无法实现合适的图案聚焦品质。即使没有光学像差,晶片和光致抗蚀剂的空间特性也可能导致在晶片的大范围面积上无法实现合适的图案聚焦。晶片 / 抗蚀剂的空间特性与聚焦品质之间的关系将以接下来讨论。

[0511] 参考图 20B,物 30 显示具有 N 个子区域  $40_i$ , 每个小于欲成像的物的总区域 41。在每个子区域  $40_i$  内,空间性质的变化(例如晶片或光致抗蚀剂的高度和斜率变化)通常小于总区域 41 的空间性质的变化。尽管如此,不同子区域  $40_i$  的晶片或光致抗蚀剂通常具有不同的高度和斜率。举例而言,层 34 表现出厚度  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ , 其改变了表面 39 的高度和斜率。因此,该物的每个子区域可以与光刻成像仪(photolithography imager)具有不同的空间关系。聚焦的品质与该空间关系(例如物和光刻成像仪之间的距离)有关。让物的

不同子区域具有合适的焦距需要物和光刻成像仪的相对重新定位。因为物高度和斜率的变化,不可能仅通过决定物就相对于物远离成像的子区域的部分((例如物的边缘 43))而言的位置和曲线,就达到合适的物体聚焦。

[0512] 通过决定欲成像(或其他处理)的物的子区域内的物的空间特性,便能够达到合适的聚焦。在子区域的位置决定之后,物(和/或光刻成像仪的一部分)就可以被移动(例如平移、旋转和/或倾斜),用以修正该子区域相对于参考物(例如光刻成像仪的一部分)的位置。(如有需要),对于每个欲成像的子区域可以重复进行所述决定和移动。

[0513] 子区域的空间特性的决定可包括决定该物的薄层的外表面的一点或多点的位置和高度,所述一点或多点位于欲进行成像的子区域内。举例而言,子区域 40<sub>2</sub>(图 20A)的外表面 39 的位置和取向能够根据子区域内的点 42<sub>1</sub>-42<sub>3</sub> 的位置而被决定。欲进行成像的子区域的空间特性的决定可包括使用干涉测量仪以光来照射子区域并且探测干涉信号,该信号包括从被照射的子区域反射的光。在一些实施例中,多个子区域同时用光成像以取得多个干涉信号。每个干涉信号均表示一个子区域的一个或多个空间特性。因此,干涉信号能够用来形成表示在多个子区域上的物的形貌的图像。在多个子区域的光刻期间,晶片是根据由多个干涉信号所决定的个别子区域的形貌而被定位。因此,每个子区域能够相对于光刻设备的最佳聚焦而被定位。

[0514] 探测欲成像的物的每个子区域的干涉信号包括在一个 OPD 范围内,探测从子区域反射的光与参考光,OPD 至少等于所探测的光的相干长度。举例而言,光可至少是在其相干长度被探测。在一些实施例中,干涉测量仪被配置,使得从被照射的子区域反射的光由外界面(例如外表面 39)或由内界面(例如界面 36)反射的光占主导。在一些实施例中,物的空间特性仅根据干涉信号的一部分而被决定的。举例而言,若干干涉信号包括两个或以上重叠的干涉图案,物的空间特性能够根据其中干涉测量信号的其中之一的一部分而被决定,其由来自物的单个界面的贡献所主导。

[0515] 焊料凸块工艺

[0516] 参考图 21A 和图 21B,结构 1050 是焊料凸块工艺期间所制造的结构示例。结构 1050 包括基板 1051、焊料不可湿润的区域 1002,以及可焊料湿润的区域 1003。区域 1002 具有外表面 1007。区域 1003 具有外表面 1009。因此,界面 1005 形成于区域 1002 和基板 1001 之间。

[0517] 在处理期间,焊料 1004 被放置接触可润湿区域 1003。在流动焊料之后,焊料与可湿润区域 1003 形成牢固的接触。邻接的不可湿润区域 1002 的作用像坝,防止在本结构中流动的焊料进行不期望的迁移。希望能够知道该结构的特性,包括表面 1007、1009 的相对高度,以及焊料 1004 相对于表面 1002 的大小。如根据本公开其他讨论所决定的,结构 1050 包括多个界面,每个界面形成一干涉条纹。干涉图案之间的重叠使得使用传统的干涉技术无法准确决定空间特性。本公开所讨论的系统和方法的应用使得空间特性能够被决定。

[0518] 由结构 1050 所决定的空间特性能够用以改变制造条件,例如层 1002、1003 的沉积时间,以及区域 1003 每单位面积的焊料 1004 的用量。此外,用来流动焊料的加热条件也能根据空间特性而被改变,用以达到充分的流动和/或避免焊料的迁移。

[0519] 平板显示器

[0520] 本公开的干涉测量系统和方法能够用于平板显示器的制造,例如液晶显示器(LCD)。

[0521] 普遍而言,许多不同的应用中使用多种不同类型的 LCD,例如 LCD 电视、桌上型电脑的监视器、笔记本电脑、移动电话、汽车 GPS 导航系统,或车用和飞机上的娱乐系统(仅列举几例)。虽然 LCD 的特定结构可能会有所变化,但是大部分 LCD 都使用类似的面板结构。参考图 23A,举例而言,在一些实施例中,LCD 面板 450 是由几层构成,包括两片玻璃板 452 和 453,以边缘密封 454 连接。玻璃板 452 和 453 以间隙 464 相互间隔,间隙 464 填充液晶材料。偏振片 456 和 474 分别施加于玻璃基板 453 和 452 的外表面。当集成为 LCD 后,其中一个偏振片用以偏振来自显示器光源(例如背光,未显示)的光,另一个偏振片作为分析片(analyzer),仅允许被偏振至平行于偏振片透射轴的光分量通过。

[0522] 彩色滤光片 476 的阵列形成于玻璃板 453 上,且图案化的电极层 458 形成于彩色滤光片 476 上,电极层 458 由透明导体形成,例如氧化铟锡(ITO)。钝化层 460(有时称为硬涂层,通常基于  $\text{SiO}_x$ ) 被涂布在电极层 458 上,用以跟表面电性绝缘。配向层 462(例如聚酰亚胺层)沉积在钝化层 460 上,配向间隙 464 中的液晶材料。

[0523] 面板 450 还包括形成于玻璃板 452 上的第二电极层 472。另一硬涂层 470 形成于第二电极层 472 上,且另一配向层 468 设置在硬涂层 470 上。在有源式矩阵 LCD(AM LCD)中,电极层的其中之一通常包括薄膜晶体管(TFT)的阵列(例如对于每个子像素有一或多个 TFT)或其他集成电路结构。

[0524] 液晶材料是双折射的且改变通过 LCD 面板的光的偏振方向。液晶材料也具有电介质各向异性,且因此对施加于间隙 464 的电场是敏感的。因此,当施加电场时,液晶分子改变取向,因而改变面板的光学特性。通过控制液晶材料的双折射和电介质各向异性,通过面板的光量能够被控制。

[0525] 液晶材料的单元间隙(cell gap)  $\Delta g$ ,即液晶材料的厚度由间隔物(spacer) 466 所决定,间隔物 466 将两个玻璃板 452 和 453 保持在固定的距离。普遍而言,间隔物可以为预形成的圆柱体或球体颗粒,其直径等于期望的单元间隙,并且可以使用图案化技术(例如传统的光刻技术)而形成于基板上。单元间隙影响光通过面板时的光学推迟的量和将液晶材料的分子配向的粘弹性反应,且因此单元间隙是在 LCD 面板制造时精确控制的重要参数。

[0526] 普遍而言,LCD 面板制造涉及形成各种层的多个工艺步骤。举例而言,参考图 23B,工艺 499 包括并行地在每一个玻璃板上形成多种层,并且将玻璃板接合以形成一个单元。如所示,首先,TFT 电极形成于第一玻璃板上(步骤 499A1)。钝化层形成于 TFT 电极上(步骤 499A2),然后配向层形成于钝化层上(步骤 499A3)。接着,间隔物沉积在配向层上(步骤 499A4)。第二玻璃板的工艺通常涉及形成彩色滤光片(步骤 499B1)与在彩色滤光片上形成钝化层(步骤 499C1)。接着,电极(例如公共电极)形成于钝化层上(步骤 499B3),然后配向层形成于电极上(步骤 499B4)。

[0527] 接着,通过将第一和第二玻璃板接合在一起来形成单元(步骤 499C1),接着将液晶材料填入单元并加以密封(步骤 499C2)。在密封之后,偏振片被施加于每一片玻璃板的外表面(步骤 499C3),提供完整的 LCD 面板。流程图所示的步骤的次序和组合是说明性的,普遍而言,其他步骤组合和它们的相对序是可变的。

[0528] 此外,图 23B 所示的每一个步骤都可包括许多工艺步骤。举例而言,在第一玻璃板上形成 TFT 电极(通称为“像素电极”)涉及许多不同的工艺步骤。类似地,在第二玻璃板上形成彩色滤光片可包括多种不同的工艺步骤。举例而言,形成像素电极通常包括多个步骤以形成 TFT、ITO 电极,以及耦接至 TFT 的汇流线。事实上,形成 TFT 电极层本质上就是形成一个大型的集成电路,并且涉及传统的集成电路制造时所使用的许多相同的沉积和光刻图案化工艺。举例而言,通过首先沉积一层材料(例如半导体、导体或电介质),在所述材料层上形成光致抗蚀剂层,并将抗蚀剂曝光于图案化辐射,从而构建 TFT 电极层的各个部分。光致抗蚀剂层接着被显影,其产生图案化的光致抗蚀剂层。接着在蚀刻工艺中,在图案化的光致抗蚀剂层下的材料层被移除,由此将光致抗蚀剂中的图案转移至材料层。最后,残余的光致抗蚀剂从基板被剥离,留下以图案化的材料层。这些工艺步骤能够被重复多次以形成 TFT 电极层的不同元件,并且通常也使用类似的沉积和图案化步骤来形成彩色滤光片。

[0529] 普遍而言,本公开所披露的干涉测量技术能够用于在不同生产阶段监测 LCD 面板的生产。举例而言,干涉测量技术可用以监测 LCD 制造期间使用的光致抗蚀剂层的厚度和/或均匀度。如先前的说明,光致抗蚀剂层用于 TFT 元件和彩色滤光片的光刻图案化。对于一些工艺步骤,在将光致抗蚀剂层曝光于图案化辐射之前,可以先用低相干干涉测量系统检视光致抗蚀剂层。低相干干涉测量系统可以在玻璃板的一个或多个位置测量光致抗蚀剂层的厚度分布。可替换地或附加地,该技术可以被用于决定光致抗蚀剂层的表面轮廓。在任一情形,在所测量的光致抗蚀剂层的特征在指定的公差窗口内的情况下,光致抗蚀剂层可以曝光于期望的图案化的辐射。在光致抗蚀剂层不在指定的窗口内的情况下,可以从玻璃板剥离该光致抗蚀剂层并沉积新的光致抗蚀剂层。

[0530] 在一些实施例中,干涉测量技术用以监测图案化后的光致抗蚀剂层的特性。举例而言,图案化后的特征的关键尺寸(例如线宽)能够被检视。可替换地或附加地,干涉测量技术可用以决定图案化抗蚀剂层中的特征与光致抗蚀剂层下方的特征之间的覆盖误差。并且,在所测量的临界尺寸和/或覆盖误差在工艺窗口之外的情况下,图案化的抗蚀剂可以从基板剥离,并且形成新的图案化的光致抗蚀剂层。

[0531] 在一些实施例中,干涉测量技术可以结合半色调光刻(half-tone photolithography)使用。在期望图案化后的抗蚀剂层的特征中特定的厚度变化的情况下,日益多地使用了半色调光刻。本公开所披露的低相干干涉测量技术可用以监测在半色调区域中的光致抗蚀剂图案的厚度分布。此外,该技术也可以用以决定这些特征的覆盖和关键尺寸。

[0532] 在一些实施例中,干涉测量技术可用以探测在生产工艺的不同阶段中,在玻璃板上在不同阶段留下的污染物(例如外来颗粒)。这些污染物可引起显示面板中可见的缺陷(即 Mura 缺陷),并且最终影响制造商的良率。这种缺陷经常仅以目视检查,通常在在面板组装之后进行。本公开所披露的干涉测量技术可以用于在生产过程中在玻璃基板的一或多点进行自动化的检查。在探测污染物的情况下,玻璃板的被污染的表面能够在进行下一道生产步骤之前被清洁。因此,使用本技术能够减少面板中 Mura 缺陷的发生,改善面板品质并减少制造成本。

[0533] 在其他因素中,电光特性(例如对比度和亮度)也与单元间隙  $\Delta g$  有关。在制造期间的单元间隙控制对于得到均匀和品质佳的显示器经常是很关键的。在一些实施例中,

本公开的干涉测量技术可以用以保证单元间隙具有希望的均匀度。举例而言,本技术可以用以监测玻璃板上间隔物的高度和 / 或位置。监测并控制间隔物的高度例如可以减少显示器上的单元间隙的变化。

[0534] 在一些情况中,实际的单元间隙可与间隔物的大小不同,因为在组装期间,压力和真空被施加以引入液晶介质,边缘密封固化且可能改变大小,并且加入的液晶可以在玻璃板之间产生毛细作用力。在液晶材料填充前后,玻璃板上的暴露的层的表面反射光,形成指示单元间隙  $\Delta g$  的干涉图案。即使有单元的其他层形成的界面,干涉信号的低相干固有特性自身或与描述的干涉信号处理技术结合可以被用于在制造期间监测单元的特性(包括单元间隙  $\Delta g$ )。

[0535] 一个示例性方法可以包括在加入液晶材料之前获得低相干干涉信号,其包括指示单元间隙  $\Delta g$  的干涉图案。单元间隙(或单元的其他空间特性)根据干涉图案而决定,且可以与特定值作比较。若特定值与所决定的单元间隙  $\Delta g$  之间的差超过公差,则工艺条件(例如施加于玻璃板的压力和真空度)可以被改变以修正单元间隙  $\Delta g$ 。这种过程可以被重复直到达到所需的单元间隙为止。接着,液晶材料被引入单元中。所加入的液晶介质的量可以根据单元的所测量的空间特性所决定。这可以避免单元过填充或者欠填充。通过观察来自玻璃板上的暴露层的表面的干涉信号,也可以监测填充工艺。在单元填充完成之后,获得另外的低相干干涉图案以监测单元间隙  $\Delta g$ (或其他空间特性)。再次,制造条件能够被改变,使得单元间隙被维持或修正在公差内。

[0536] 在一些 LCD 中,配向层包括突起的结构,其为液晶材料提供期待的配向特征。举例而言,一些 LCD 对于显示器的每一个像素具有多于一个的配向域,其中突起的配向结构提供不同的配向域。低相干干涉测量可以用于测量突起的多种特性,例如它们的形状、线宽、高度和 / 或相对于 LCD 面板的下面的特征的覆盖误差。在突起被决定为不满意的情况下,突起可以被修复或移除,并且视需要重新制造。

[0537] 普遍而言,低相干干涉测量系统能够视需要地被建立以监测 LCD 面板生产的不同阶段。在一些实施例中,包括干涉测量系统的检查站可以设置在生产线上自身中。举例而言,监测站能够被安装在进行光刻步骤的清洁制造环境中。将玻璃板传递至检查站或是从检查站取回可以完全被自动化,通过机器人进行。可替换地或附加地,检查站能够设置在生产线上。举例而言,若仅需对显示器的取样进行测试,则样品能够从生产线上被取出,并且在生产线上进行测试。

[0538] 参考图 23C,示例性的检查站 4000 包括台 4030,台 4030 包括托架 4020,在托架 4020 上安装干涉测量传感器 4010(例如在前披露的的干涉测量显微镜)。台 4030(其可包括隔振轴承)支持 LCD 面板 4001(或玻璃板)且将面板 4001 相对于传感器 4010 定位。传感器 4010 通过滑轨而被安装在托架 4020 上,使得传感器能够沿着箭头 4014 的方向来回移动。由此方式,检查站 4000 能够移动传感器 4010 以检查显示面板 4001 上的任何位置。

[0539] 检查站 4000 也包括电子控制装置 4050,其控制传感器 4010 的定位系统,并且从传感器 4010 取得有关于面板 4001 信息的信号。由此方式,电子控制装置 4050 能够协调传感器的定位和数据的获取。

[0540] 激光刻划和切割

[0541] 激光能够用以刻划物体,用于准备分离不同且同时制造的结构,例如微电子结构。

分离的品质与刻划条件有关,例如激光的焦点尺寸、激光功率、物体的平移速率,以及刻划深度。因为结构的特征密度可能很高,所以刻划线可能邻接于结构的薄膜或层。当用干涉测量技术来决定刻划深度时,与薄膜和层相关的界面可能产生干涉图案。即使存在这样的相邻的膜或层,本公开的方法和系统可以用于决定刻划深度。

[0542] 一个示例性方法可包括刻划一个或多个电子结构,并且沿着刻划线将多个电子结构分开。在分开之前和/或分开之后,低相干干涉信号能够用以决定刻划深度。其它的刻划条件是已知的,例如激光斑点尺寸、激光功率、平移速率。刻划深度能够根据干涉信号而被决定。通过估计已分开的结构,可以决定根据刻划条件(包括刻划深度)的分离品质。根据所述决定,实现期望的分离品质所需的刻划条件能够被决定。在后续的制造期间,低相干干涉信号能够从被刻划的区域取得以监测工艺。刻划条件能够被改变以将刻划特性维持或修改到公差内。

[0543] 已经描述了本发明的大量实施例。其他实施例在权利要求中。

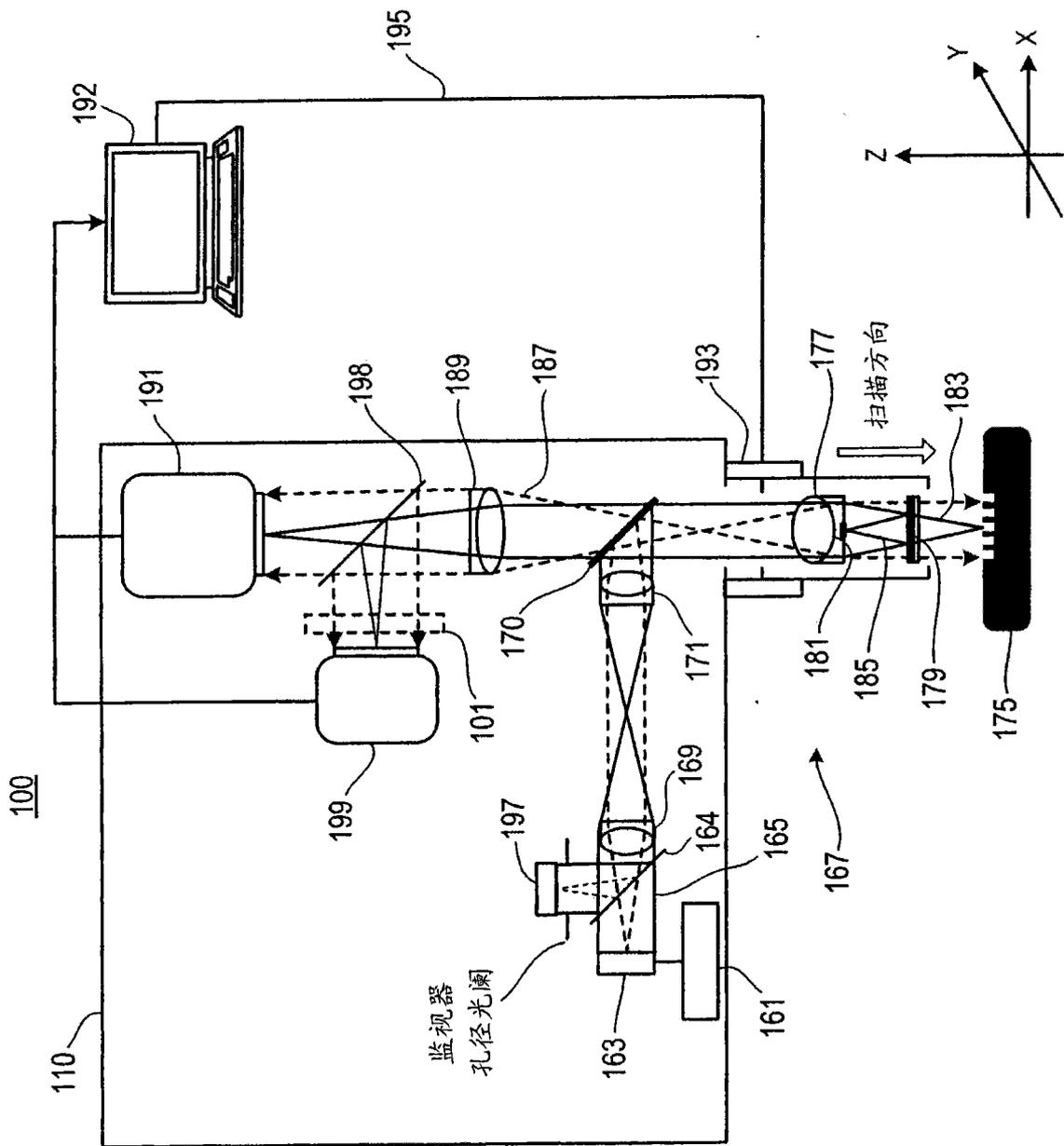


图 1

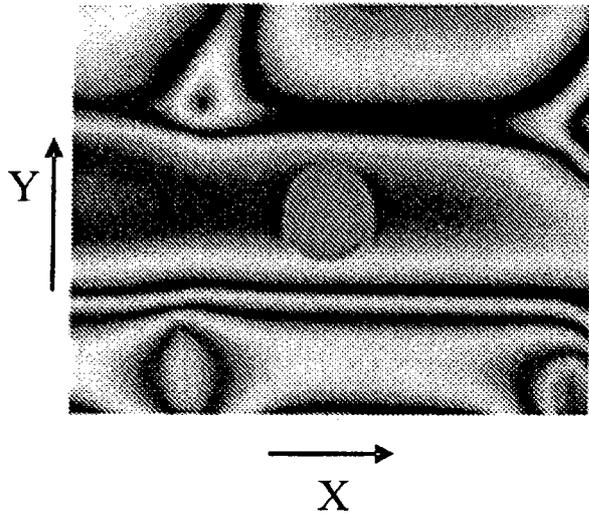


图 2

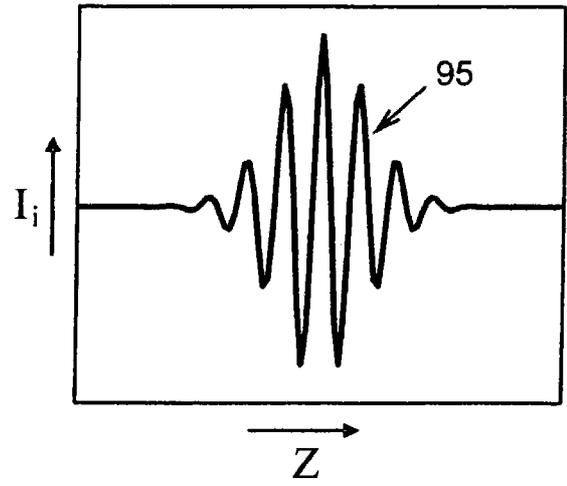


图 3

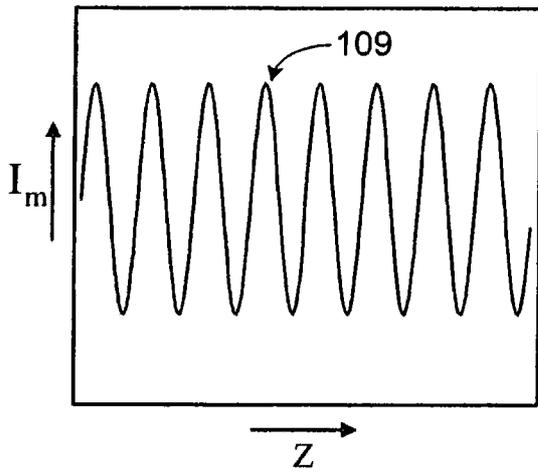


图 4

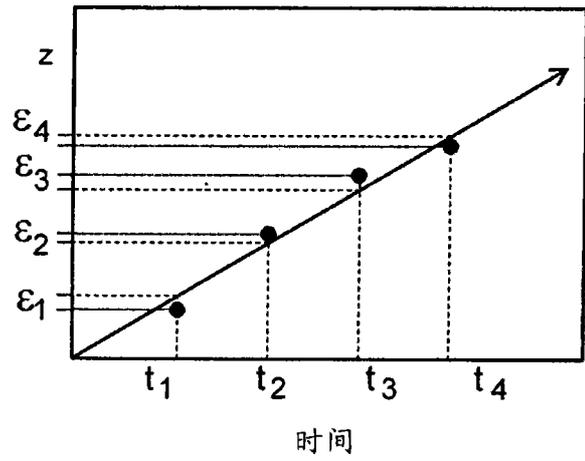


图 5

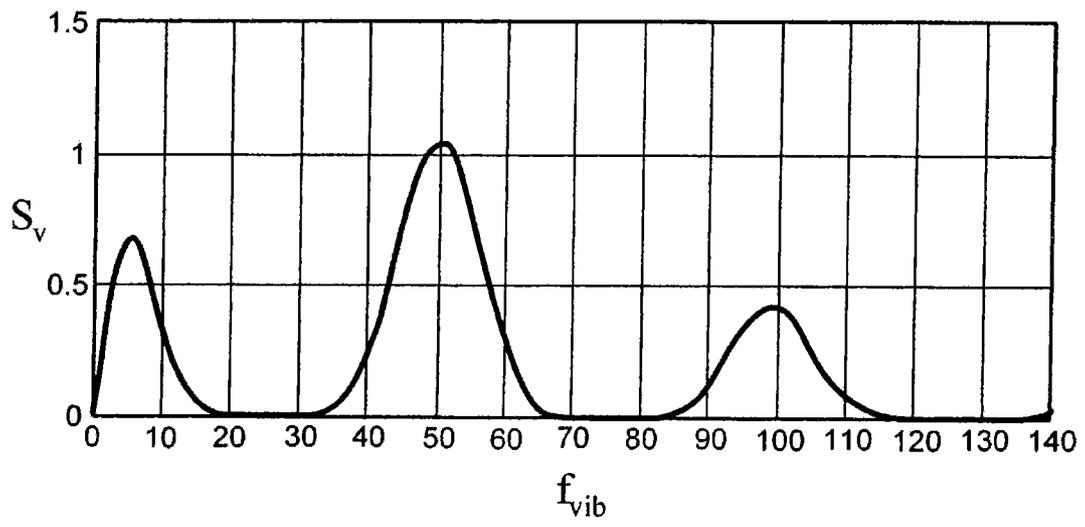


图 6

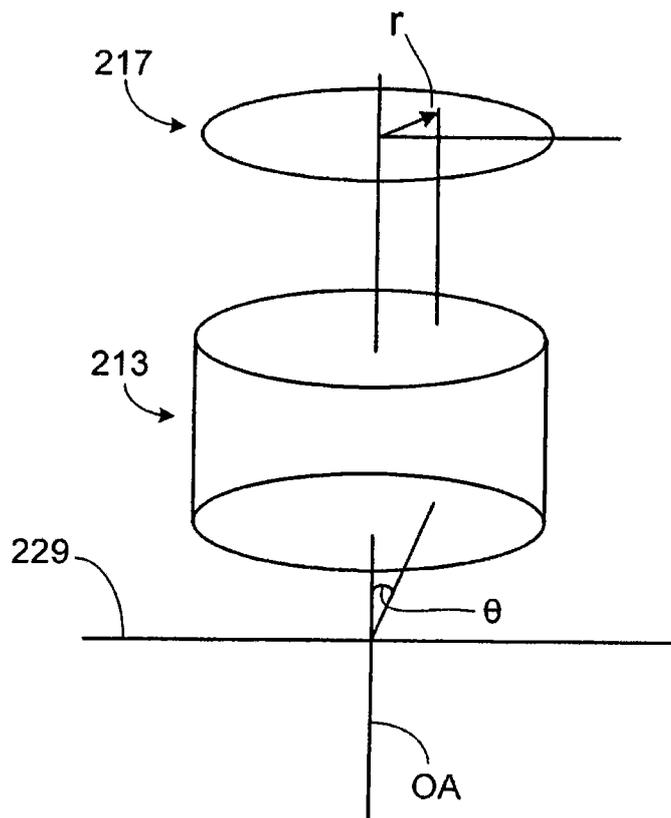


图 8

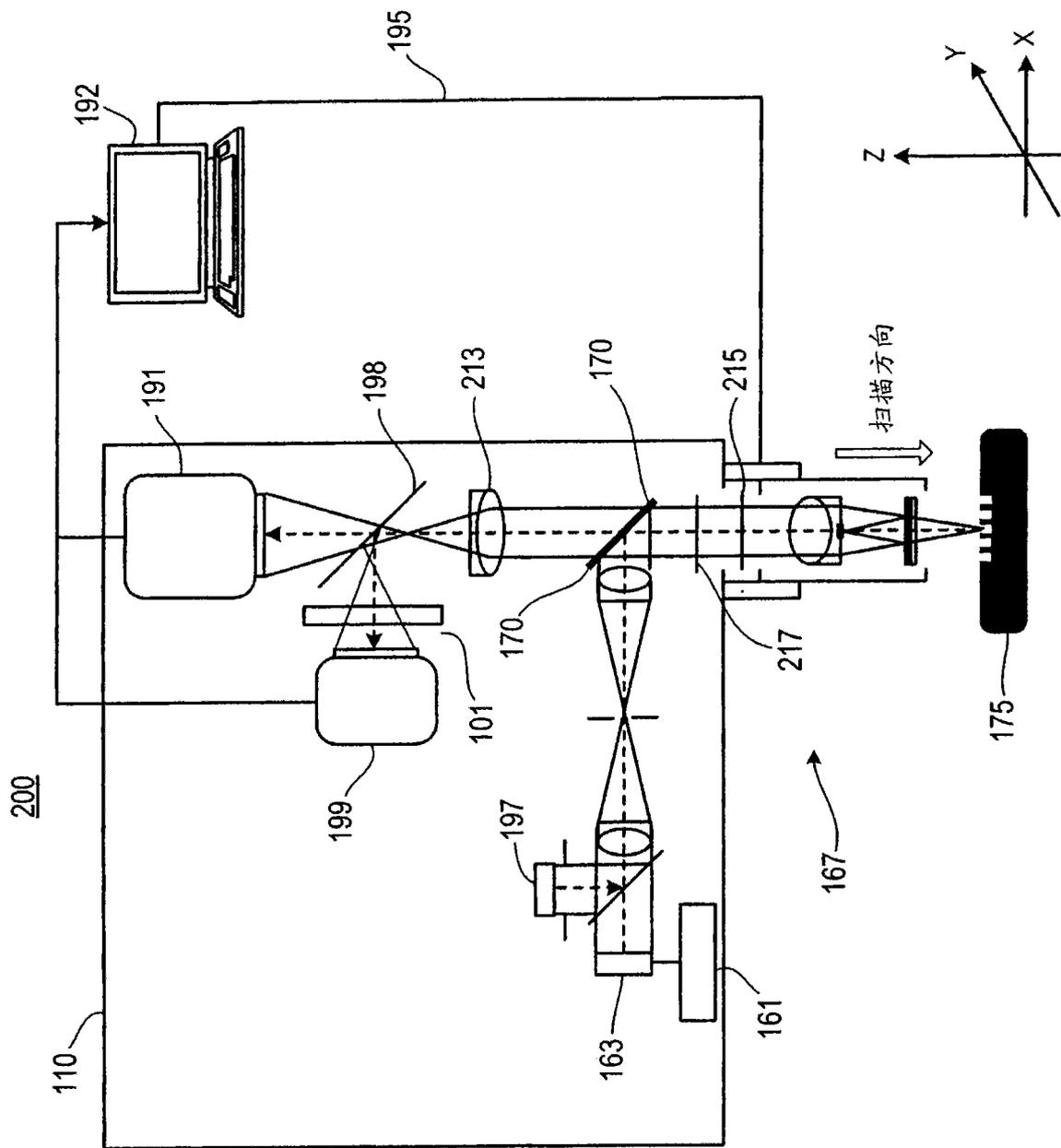


图 7

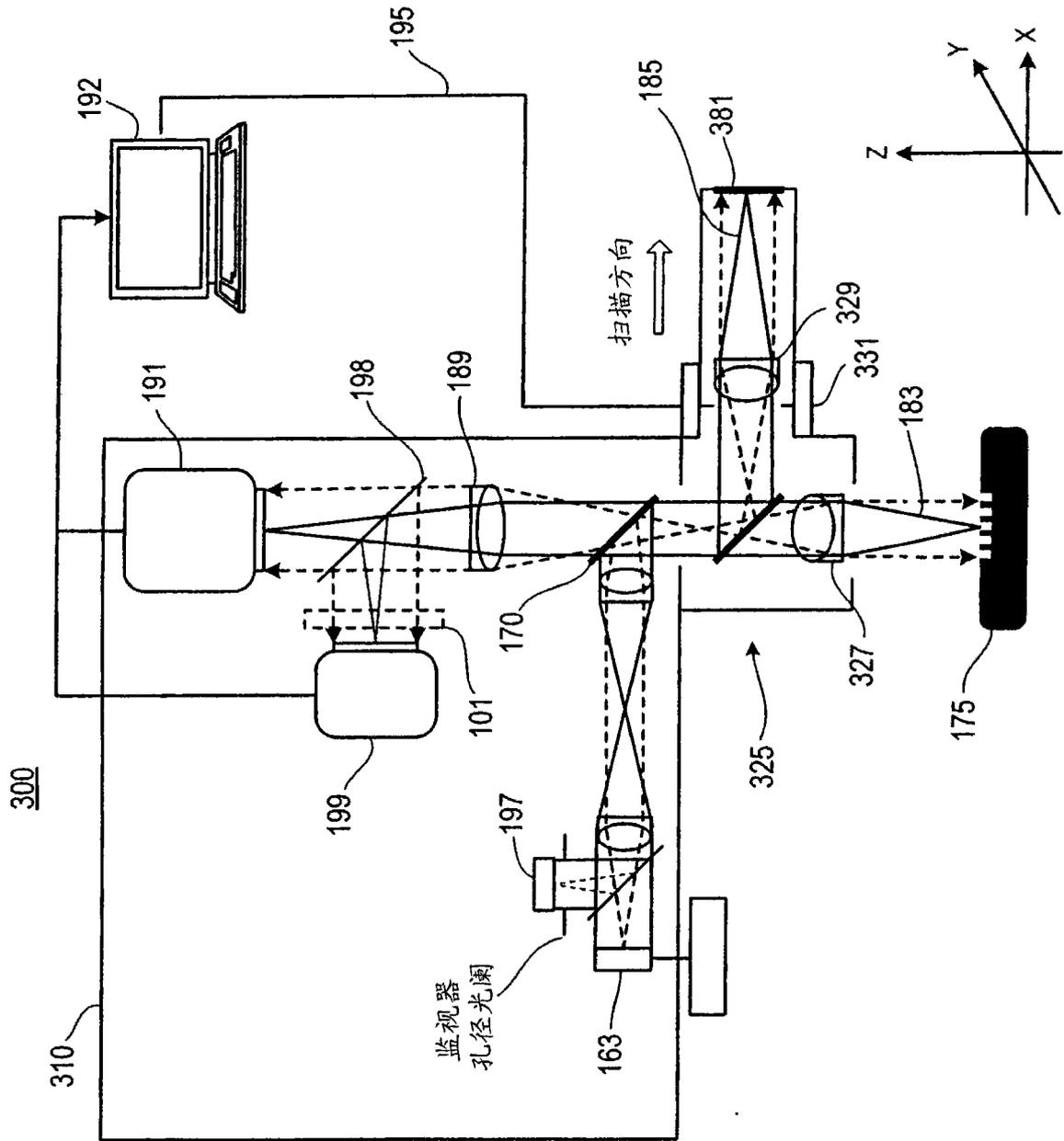


图 9

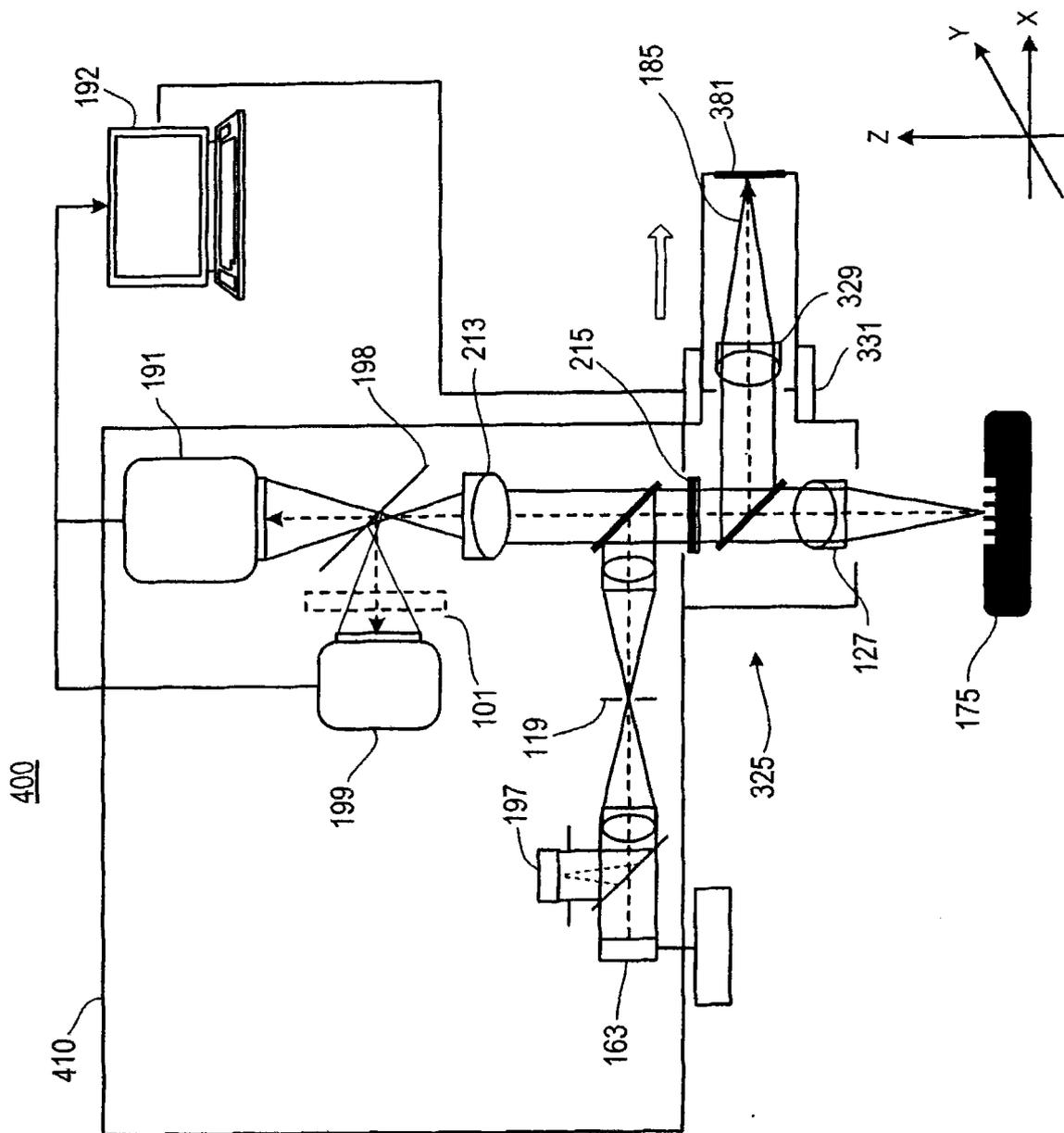


图 10

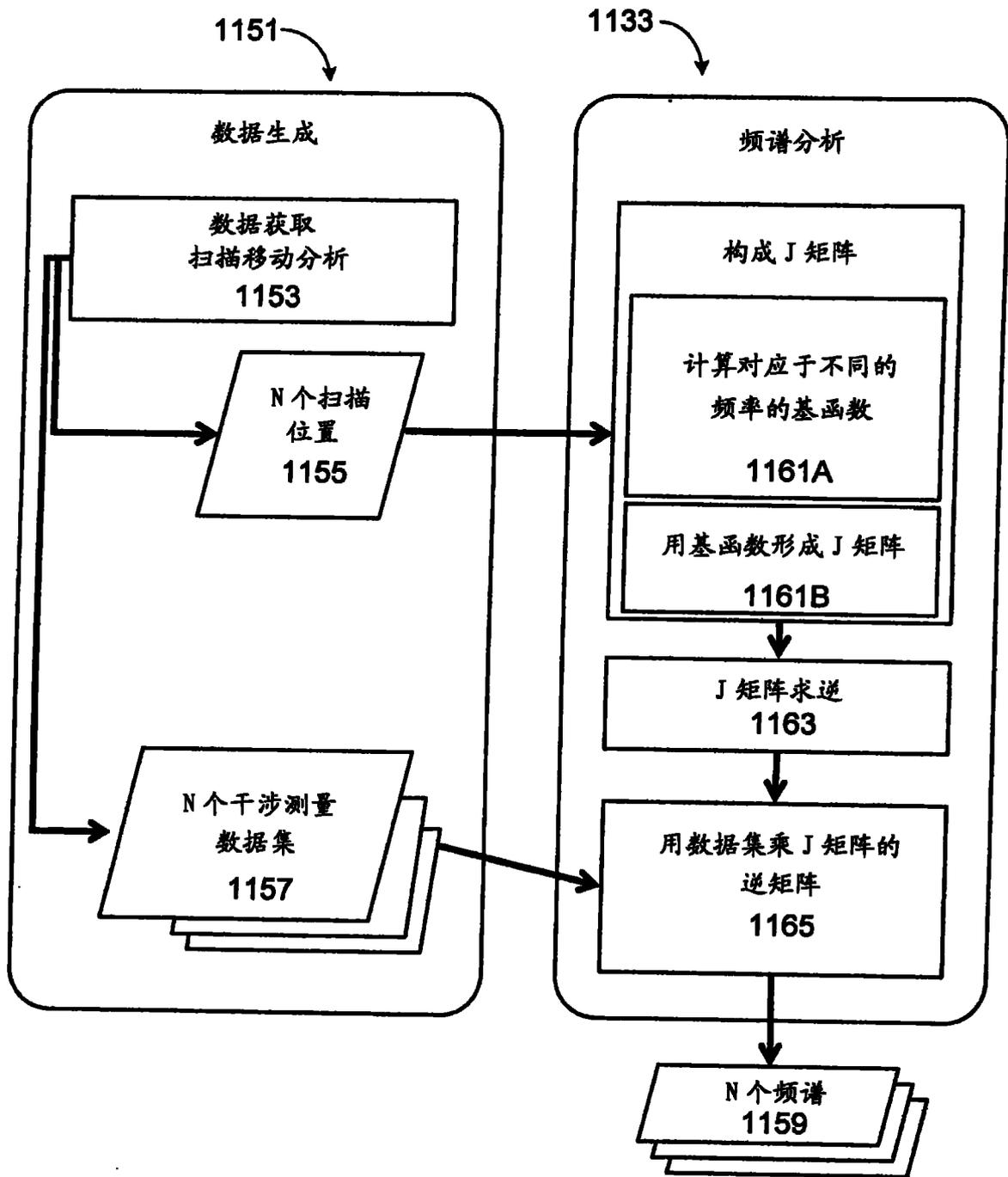


图 11

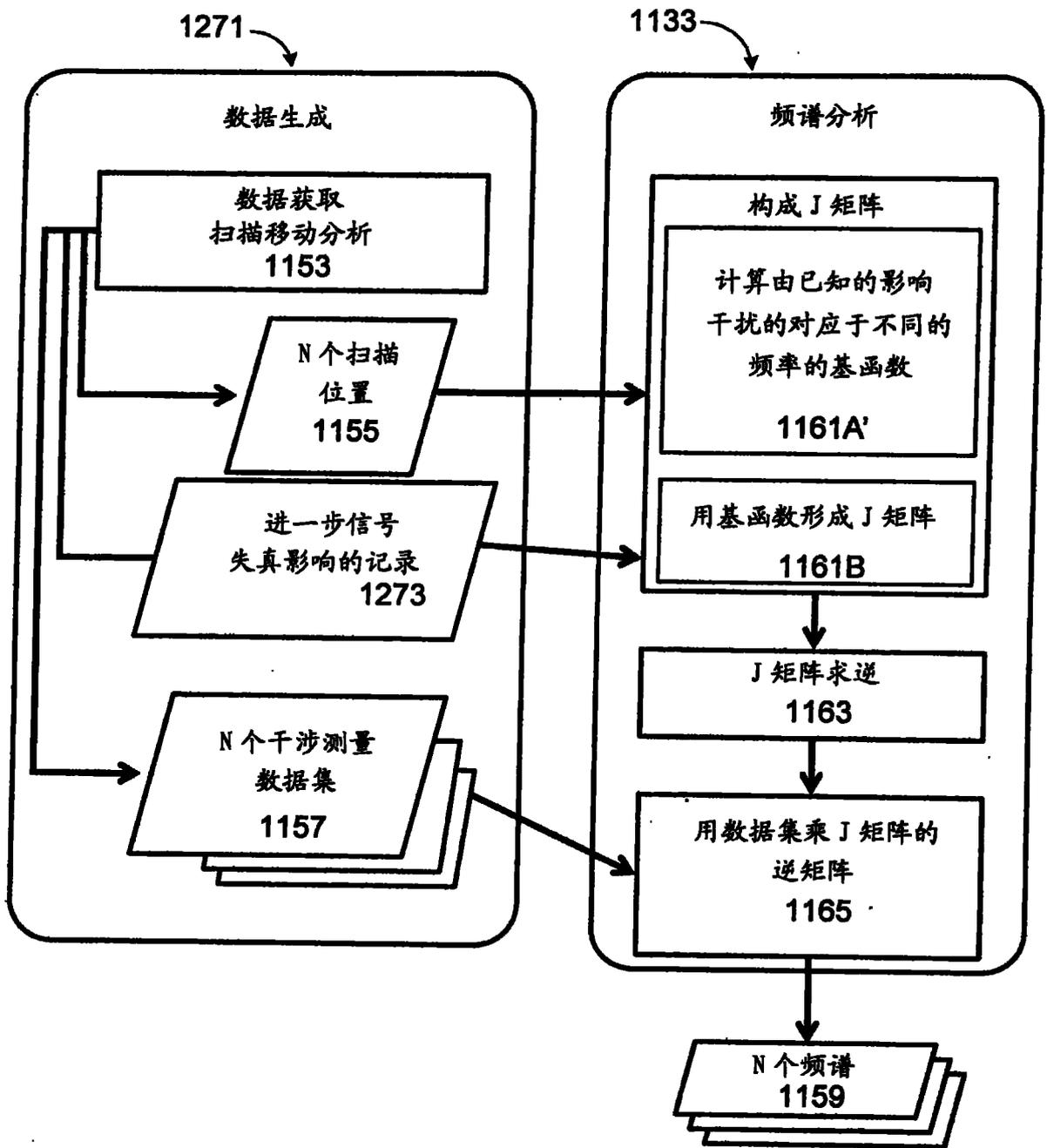


图 12A

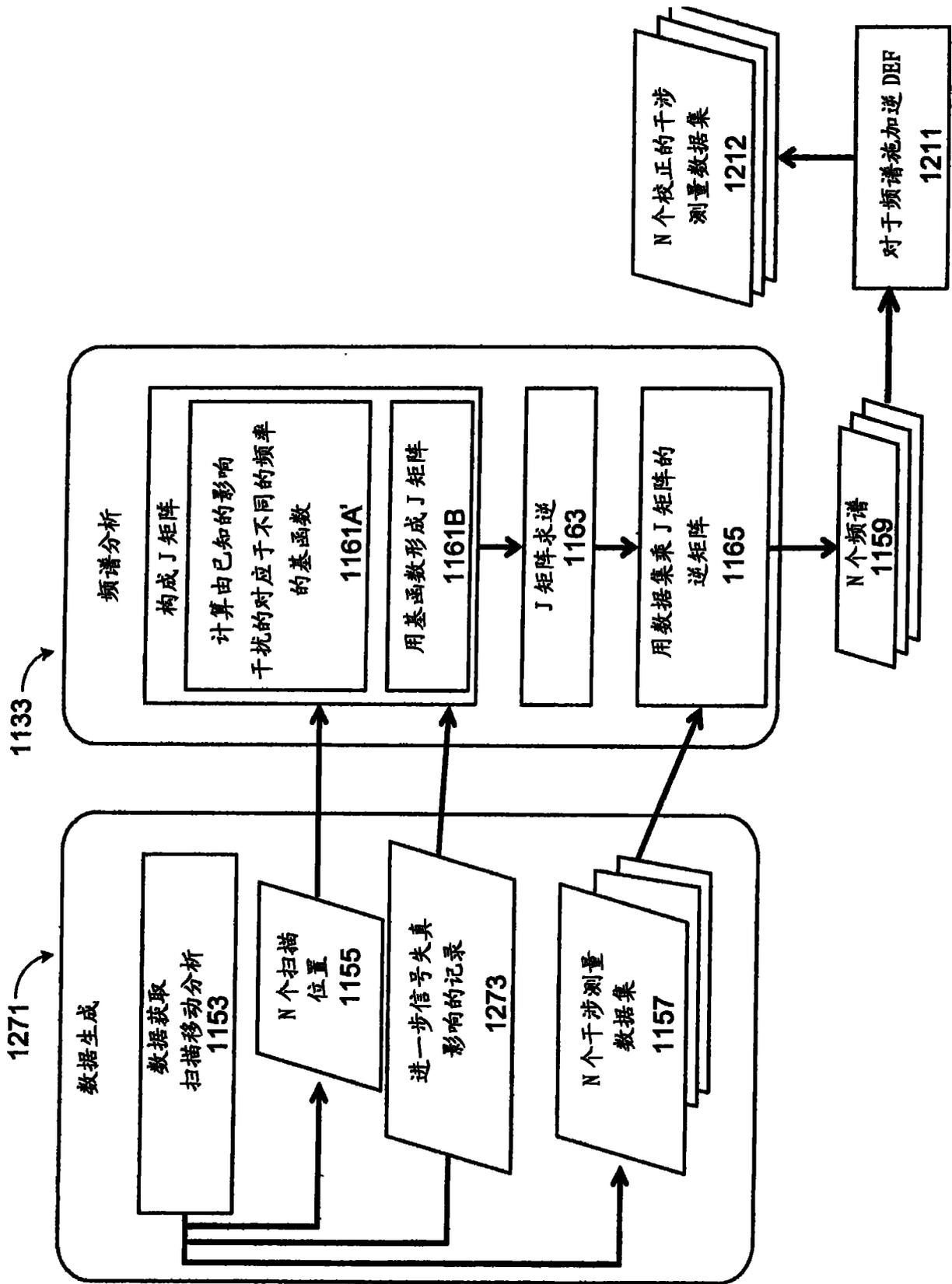


图 12B

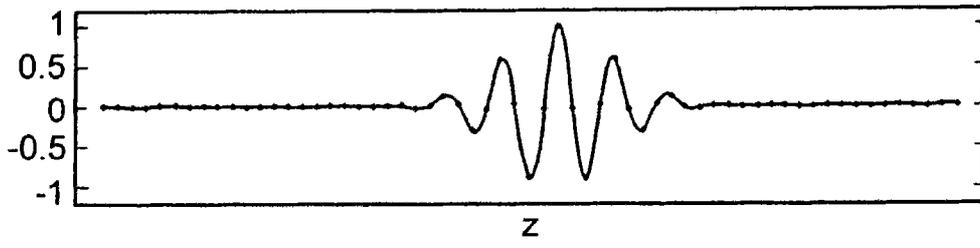


图 13A

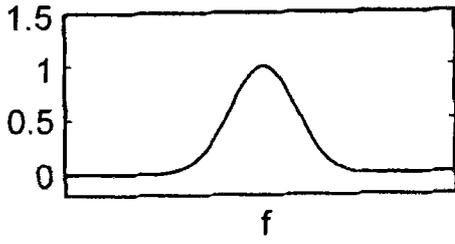


图 13B

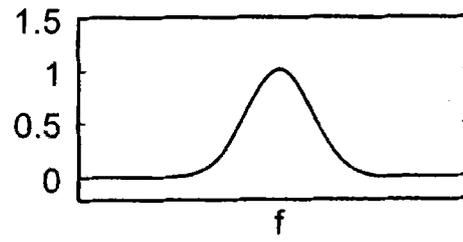


图 13C

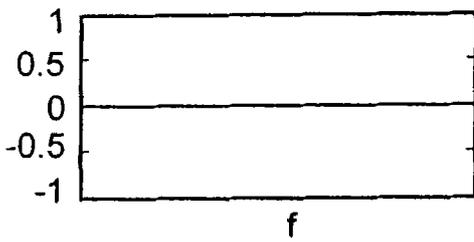


图 13D

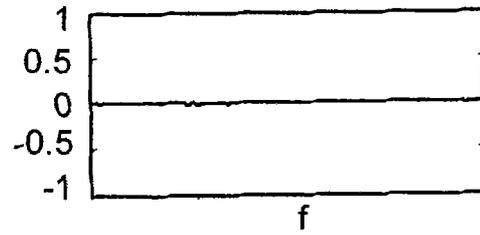


图 13E

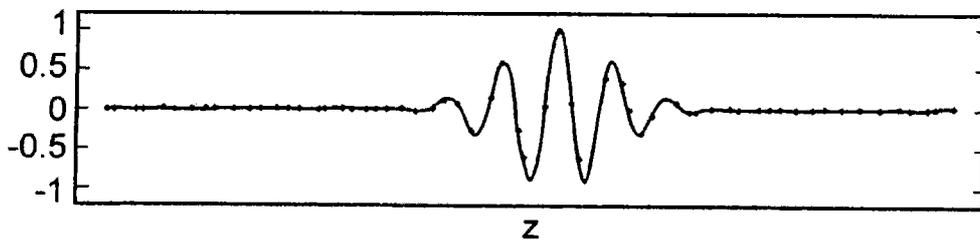


图 14A

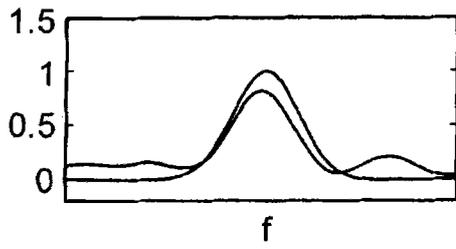


图 14B

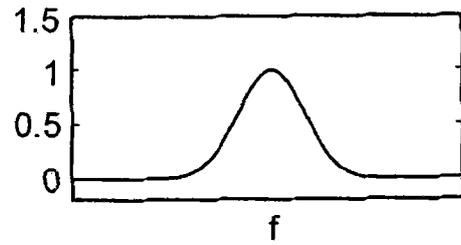


图 14C

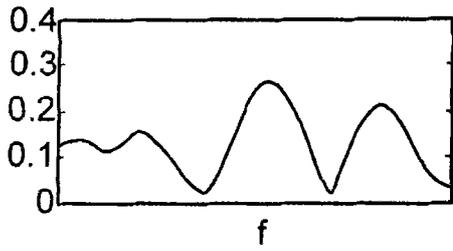


图 14D

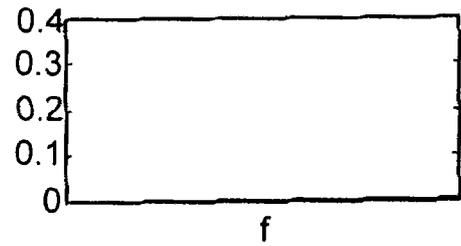


图 14E

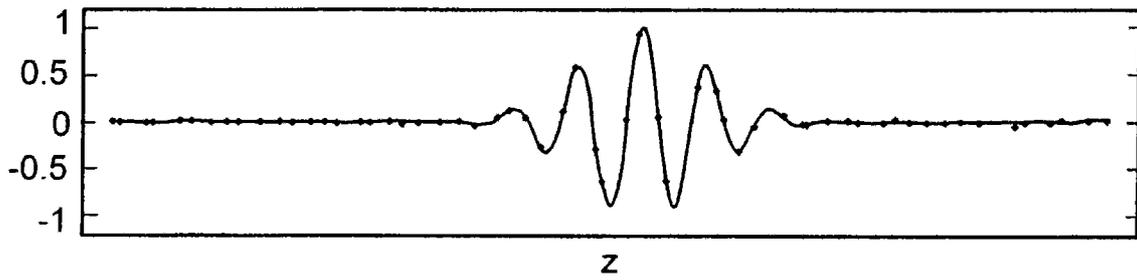


图 15A

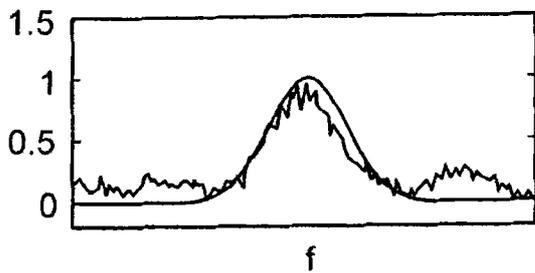


图 15B



图 15C

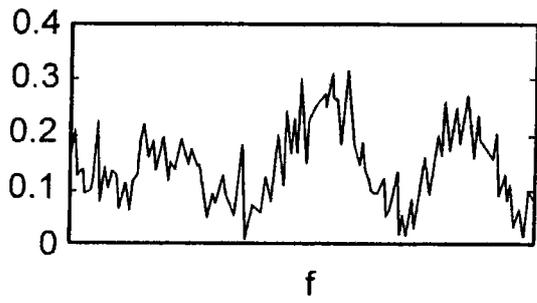


图 15D

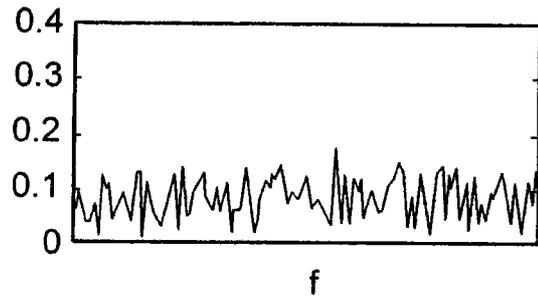


图 15E

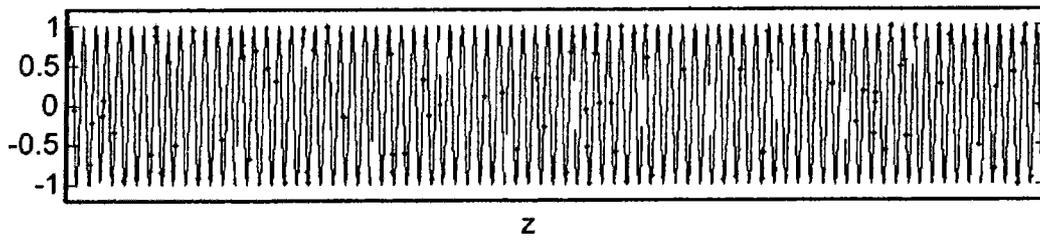


图 16A

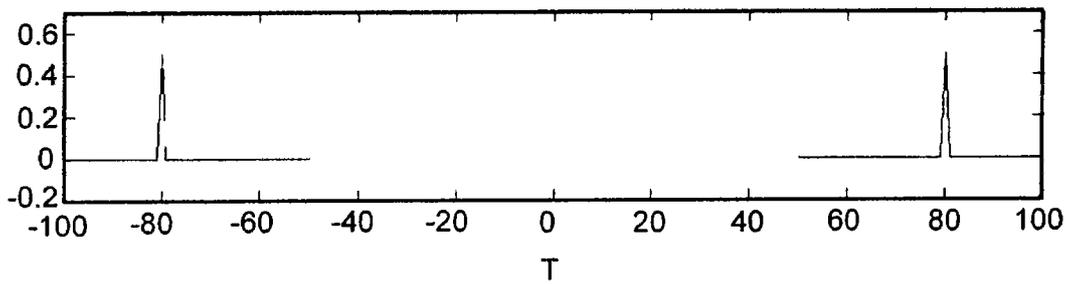


图 16B

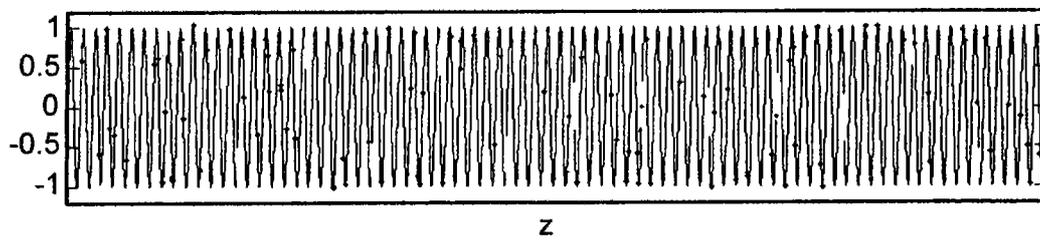


图 17A

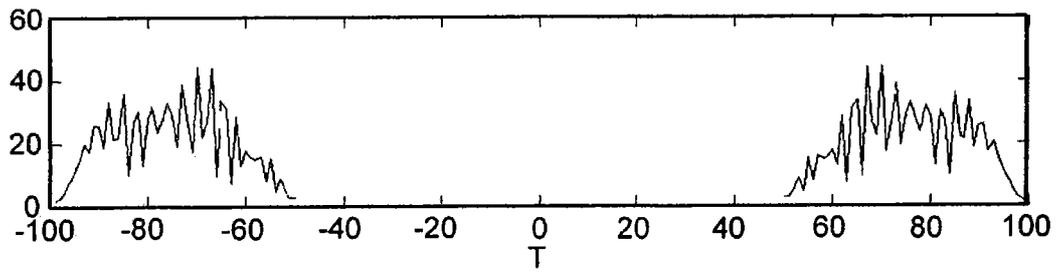


图 17B

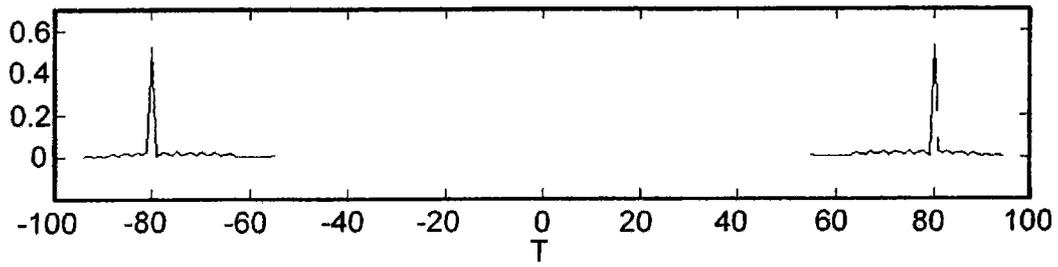


图 17C

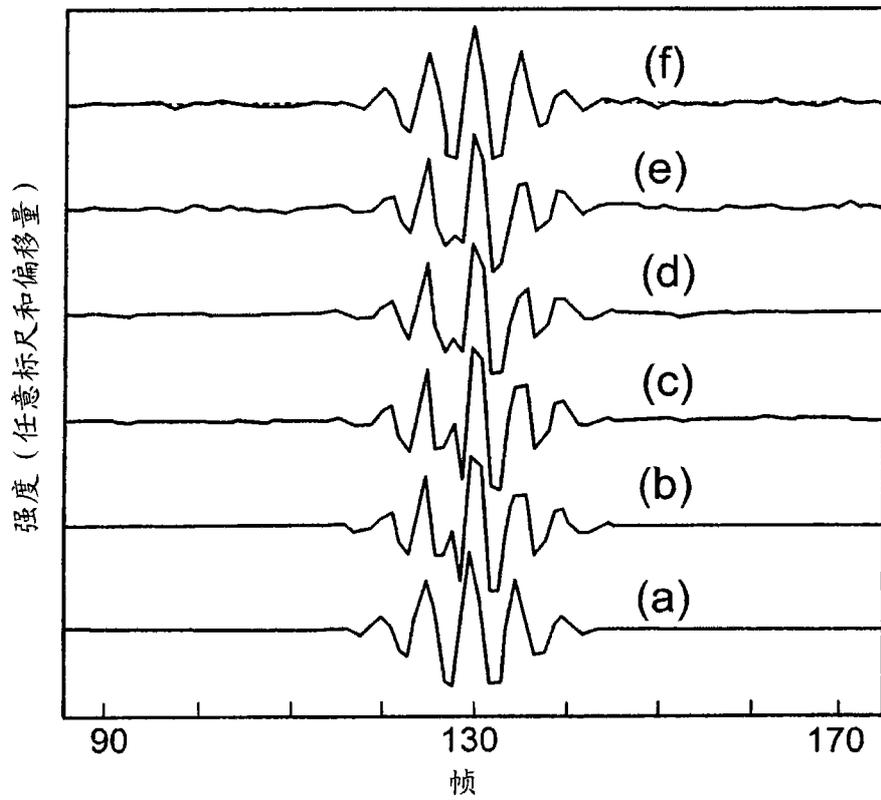


图 18

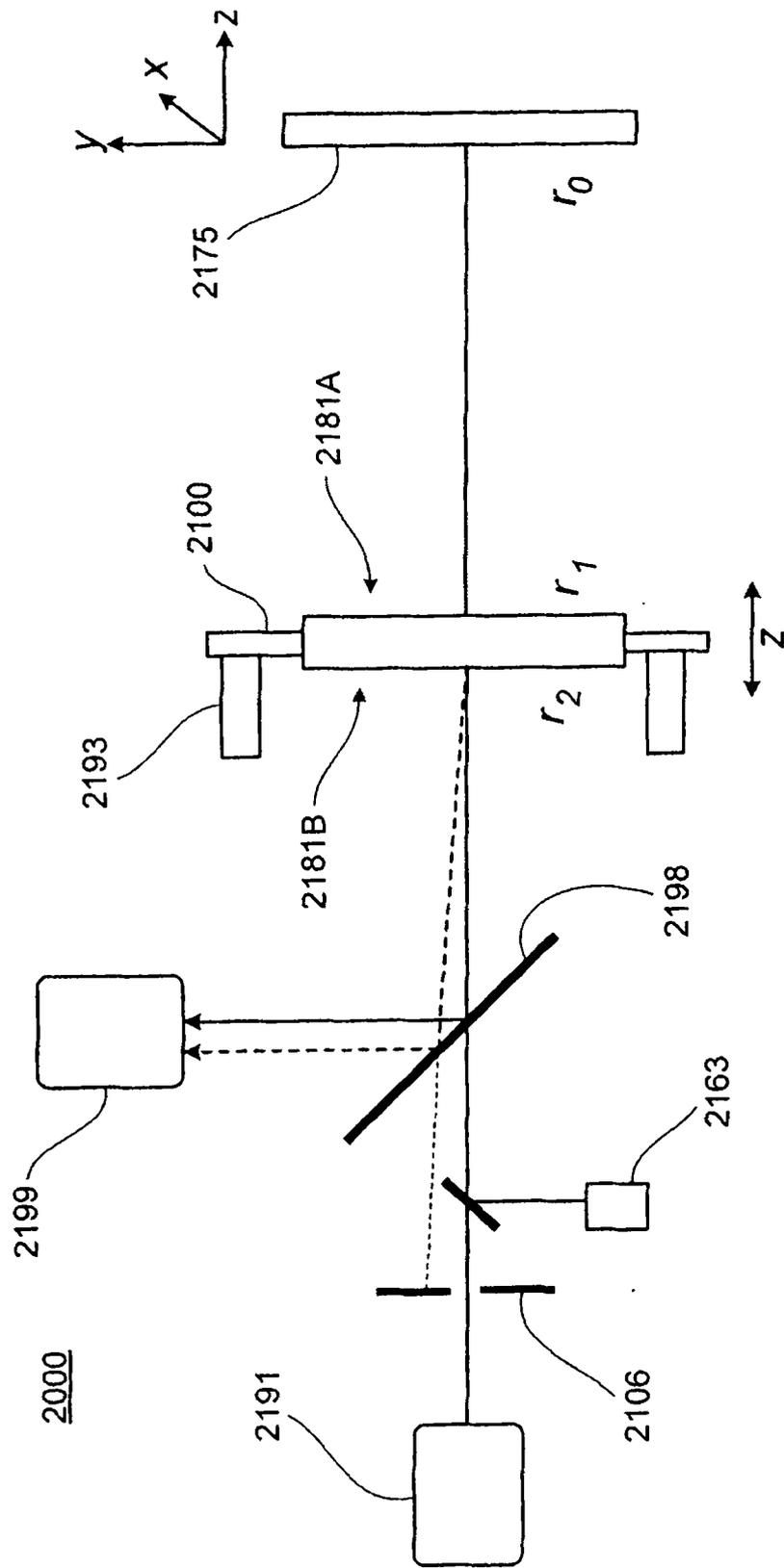


图 19

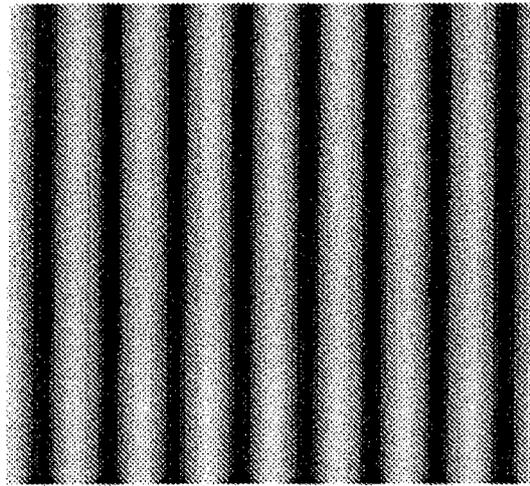


图 20

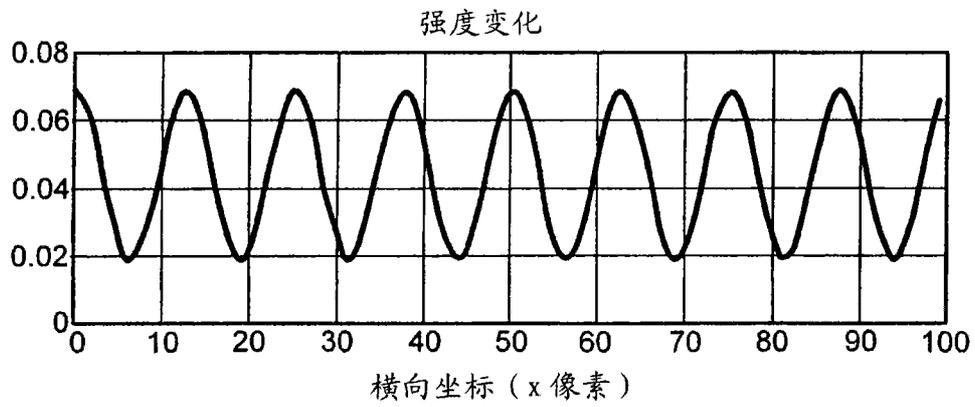


图 21A

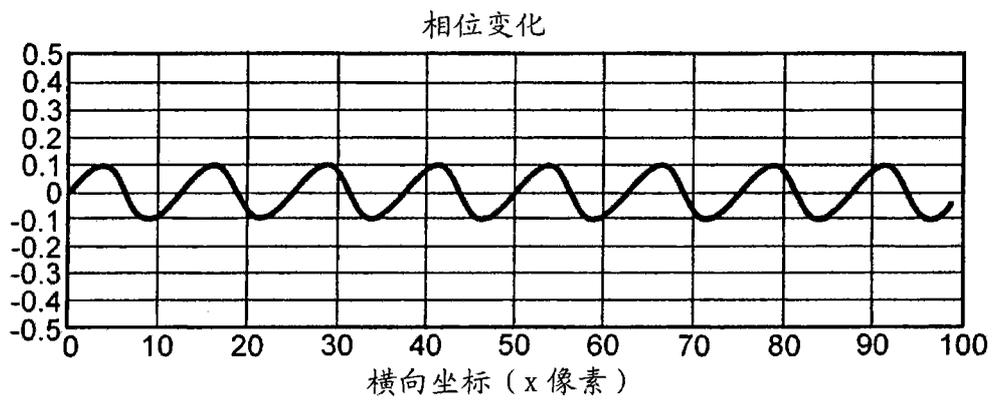


图 21B

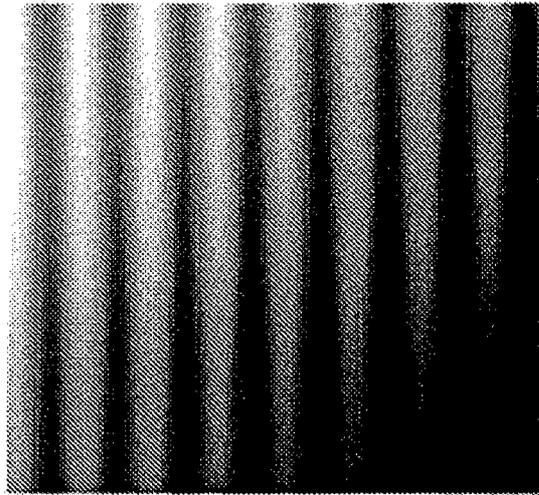


图 22

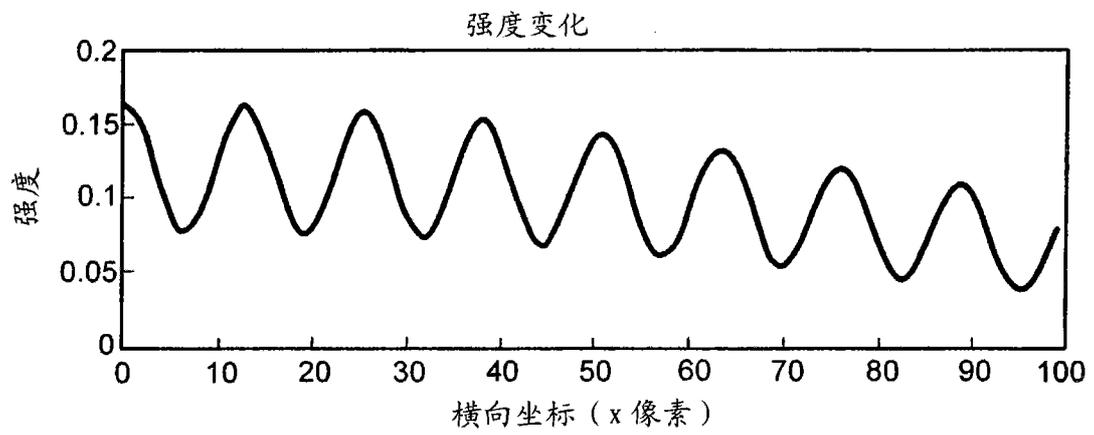


图 24A

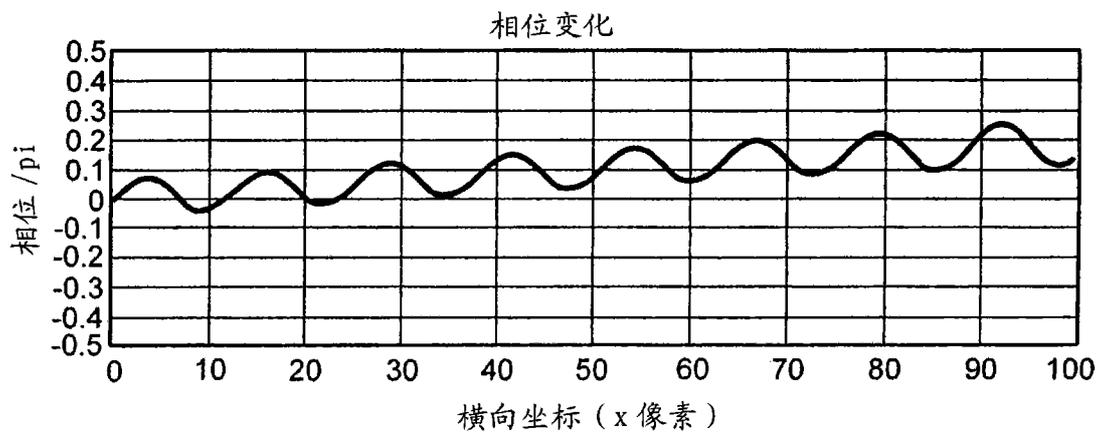


图 24B

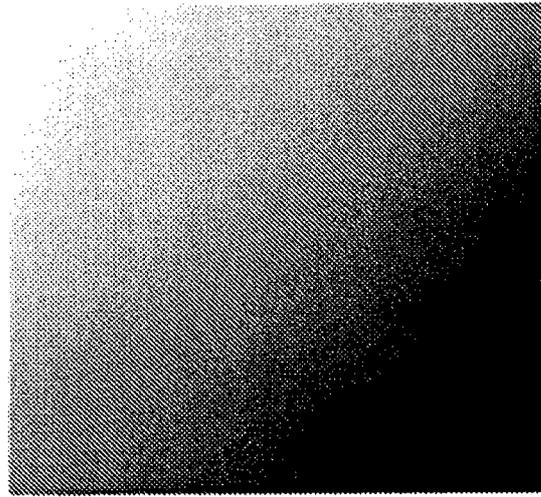


图 23

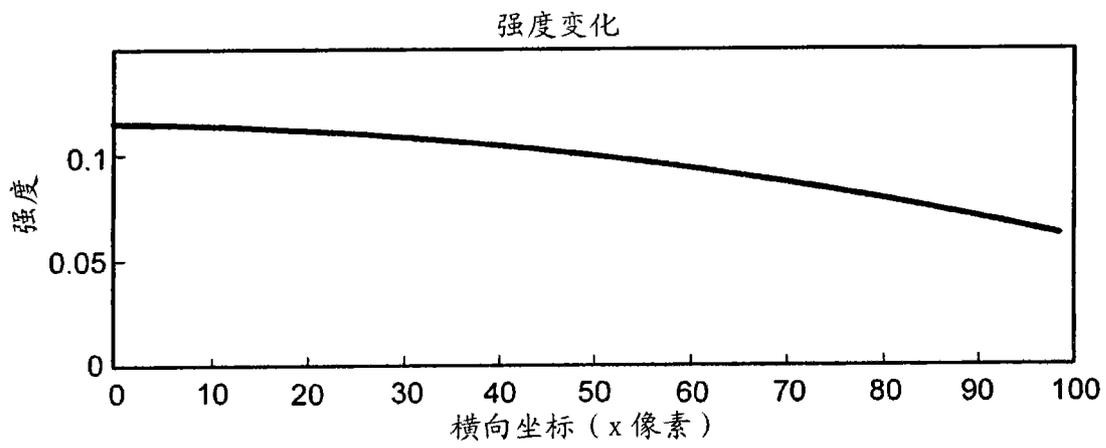


图 25A

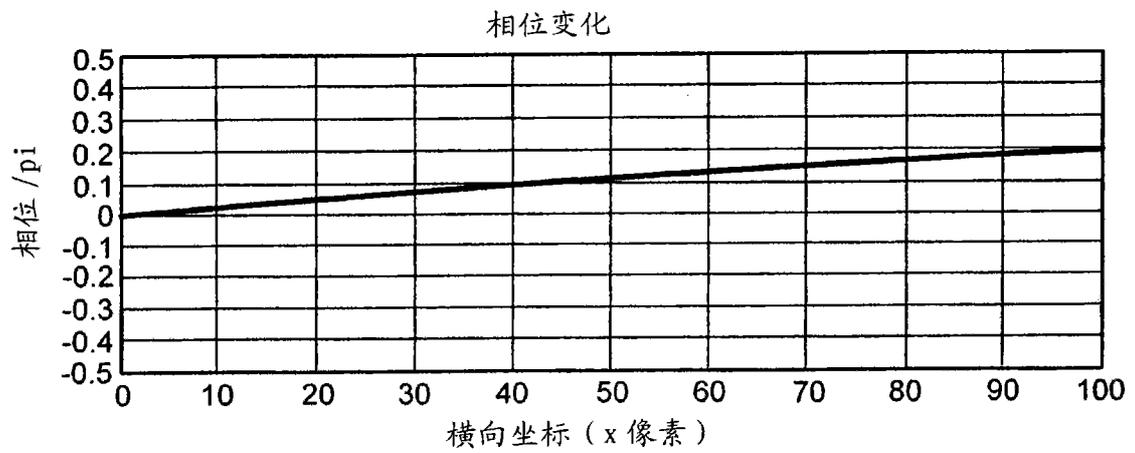


图 25B

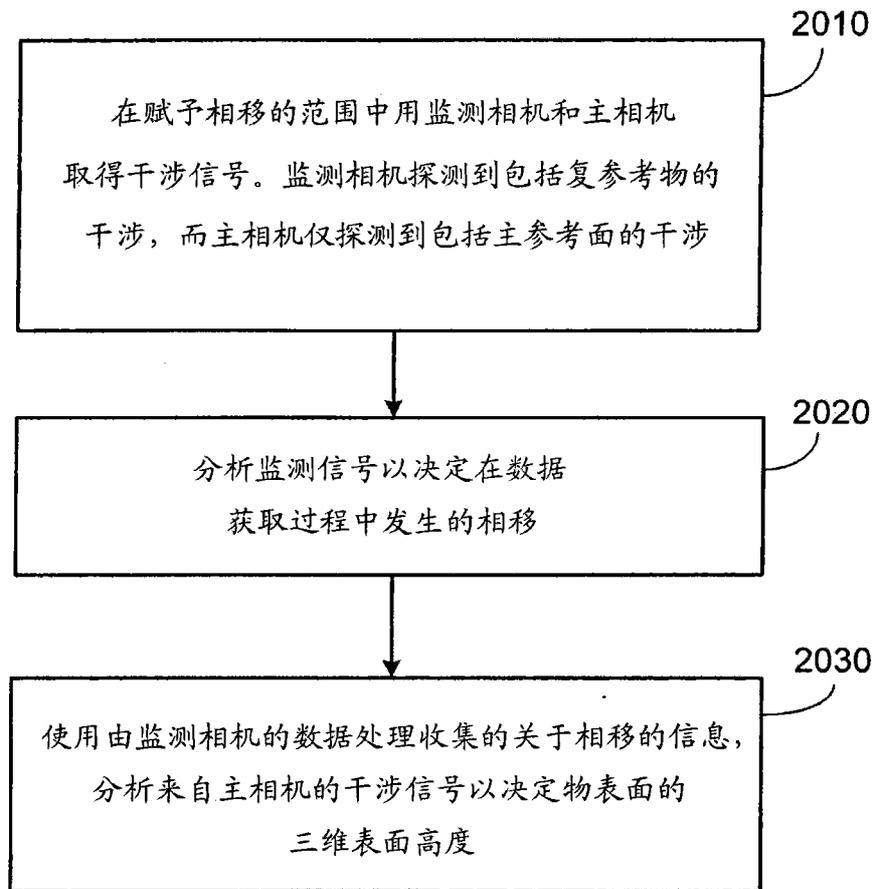


图 26

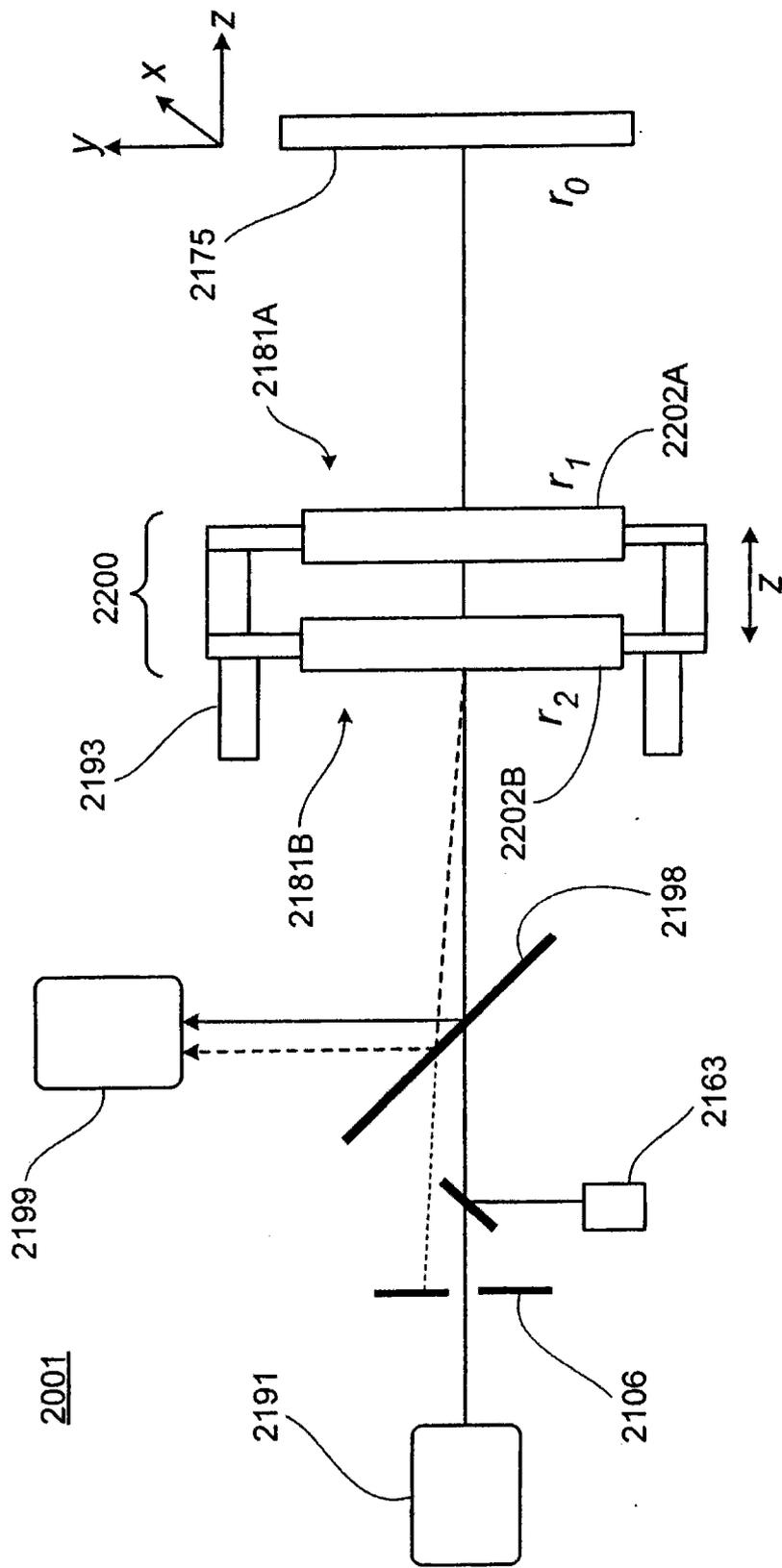


图 27

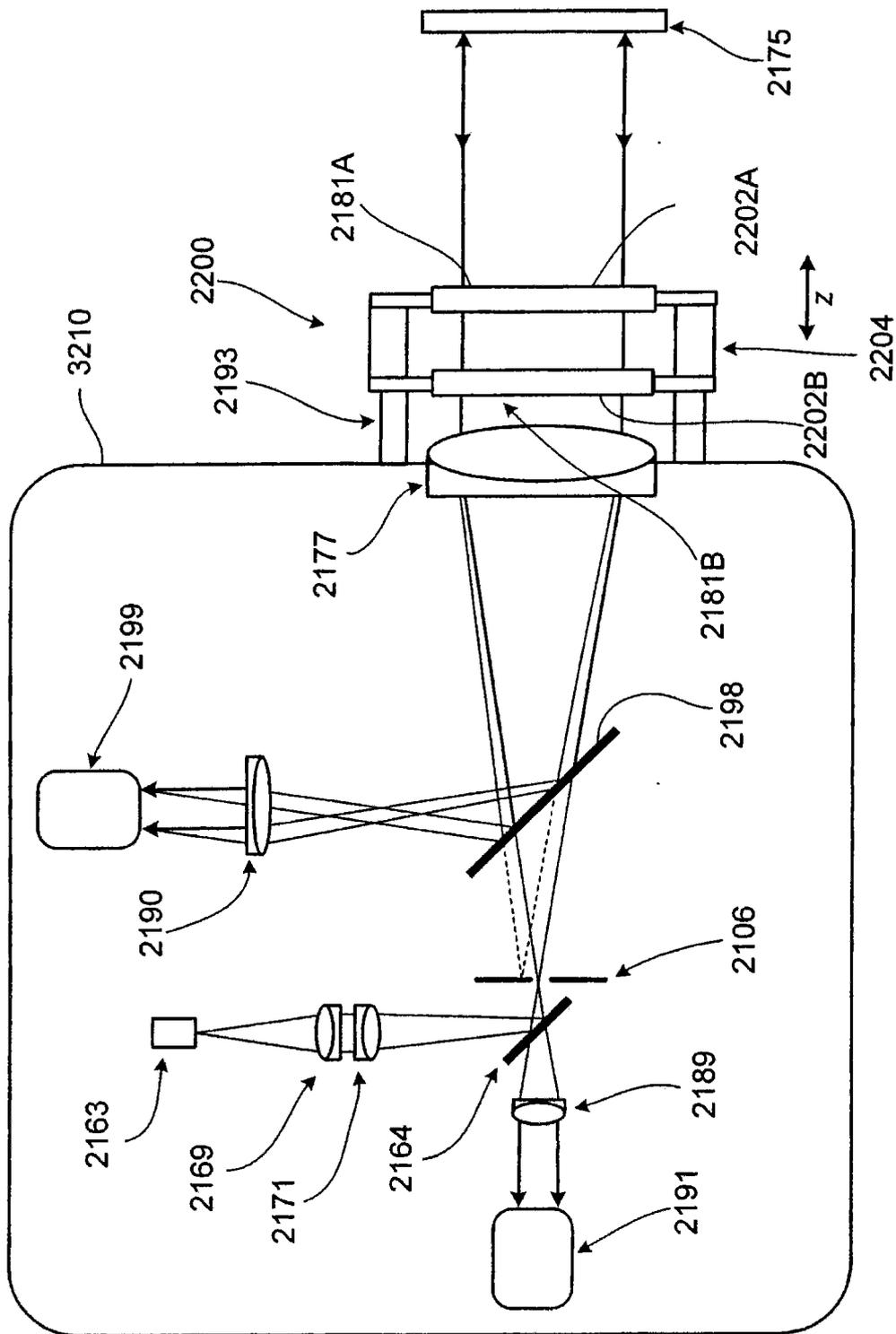


图 28

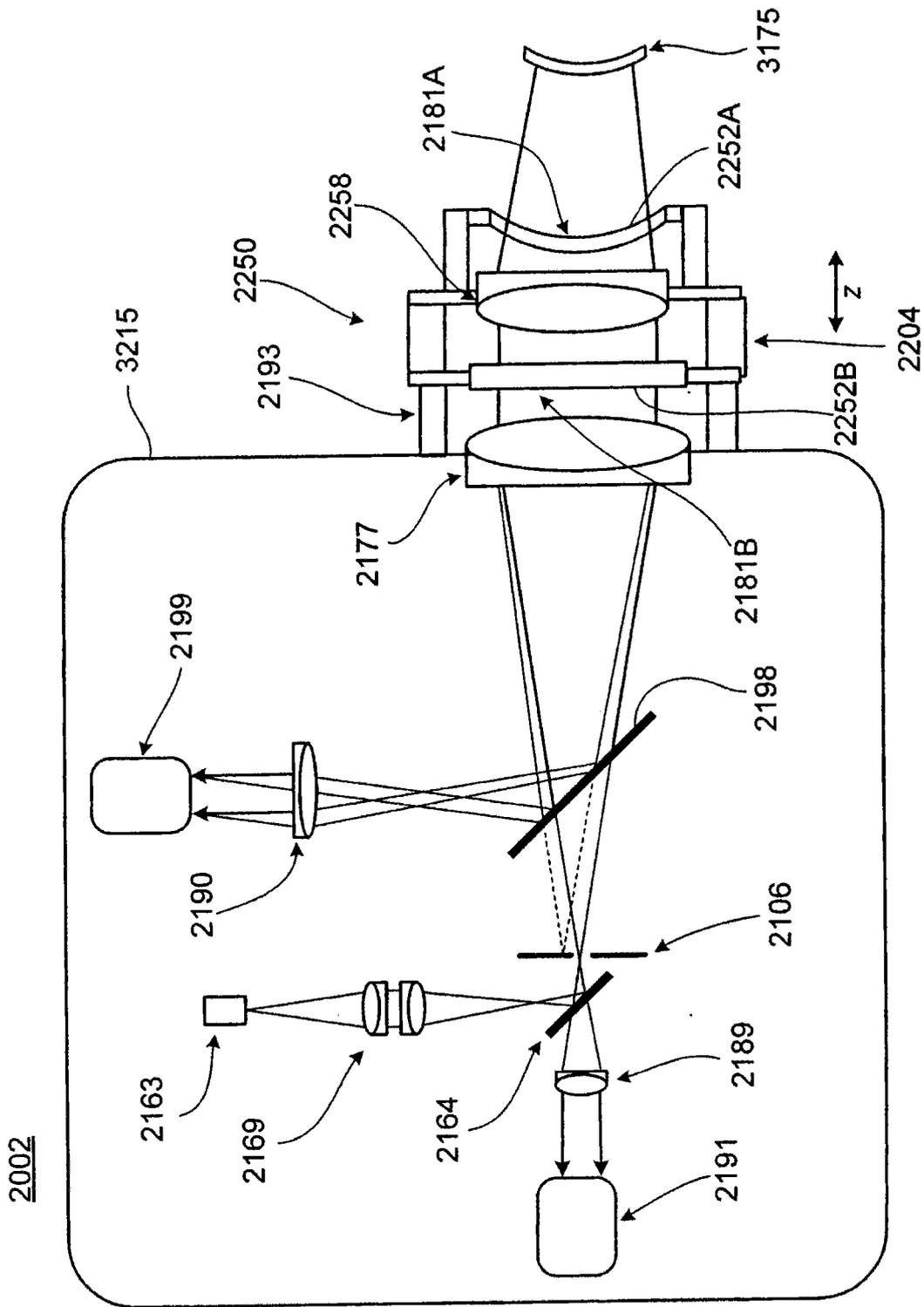


图 29

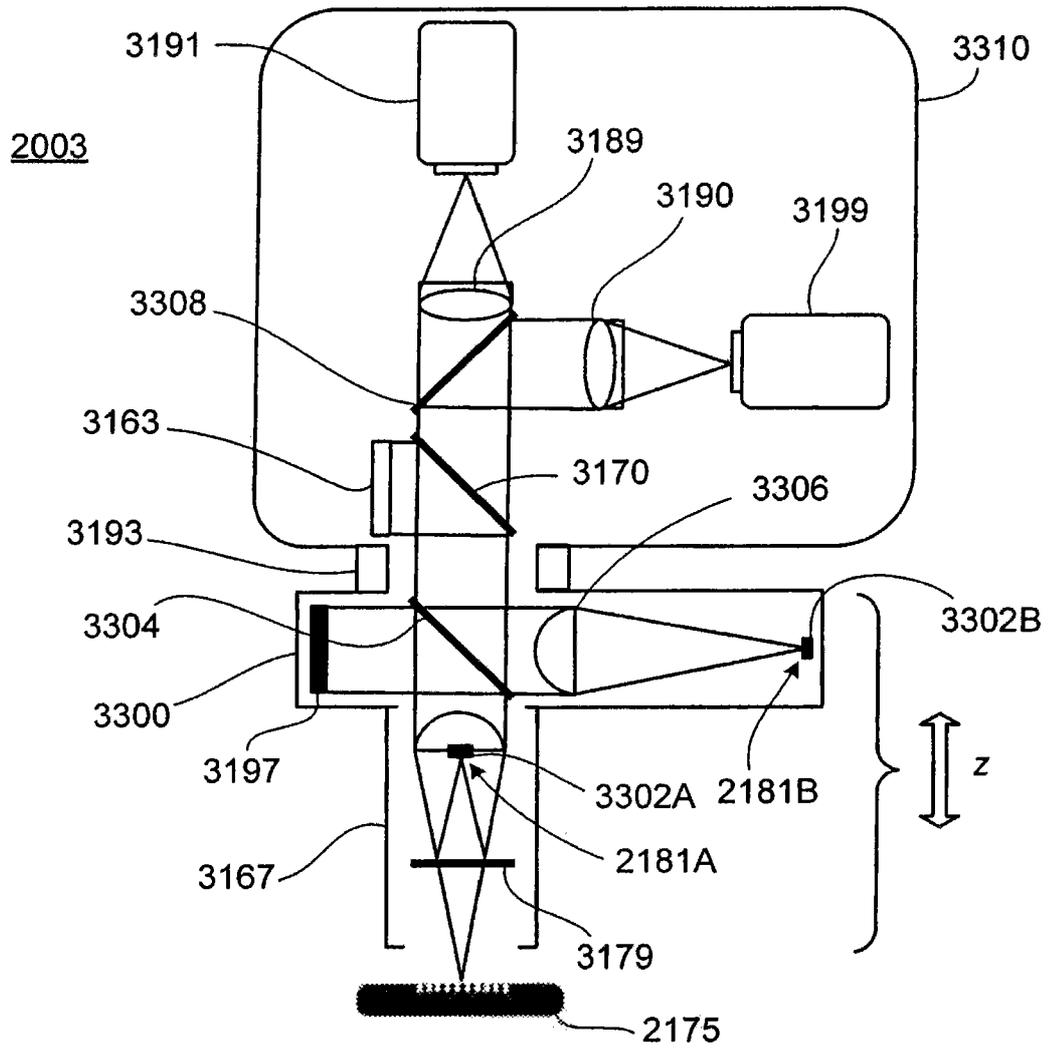


图 30

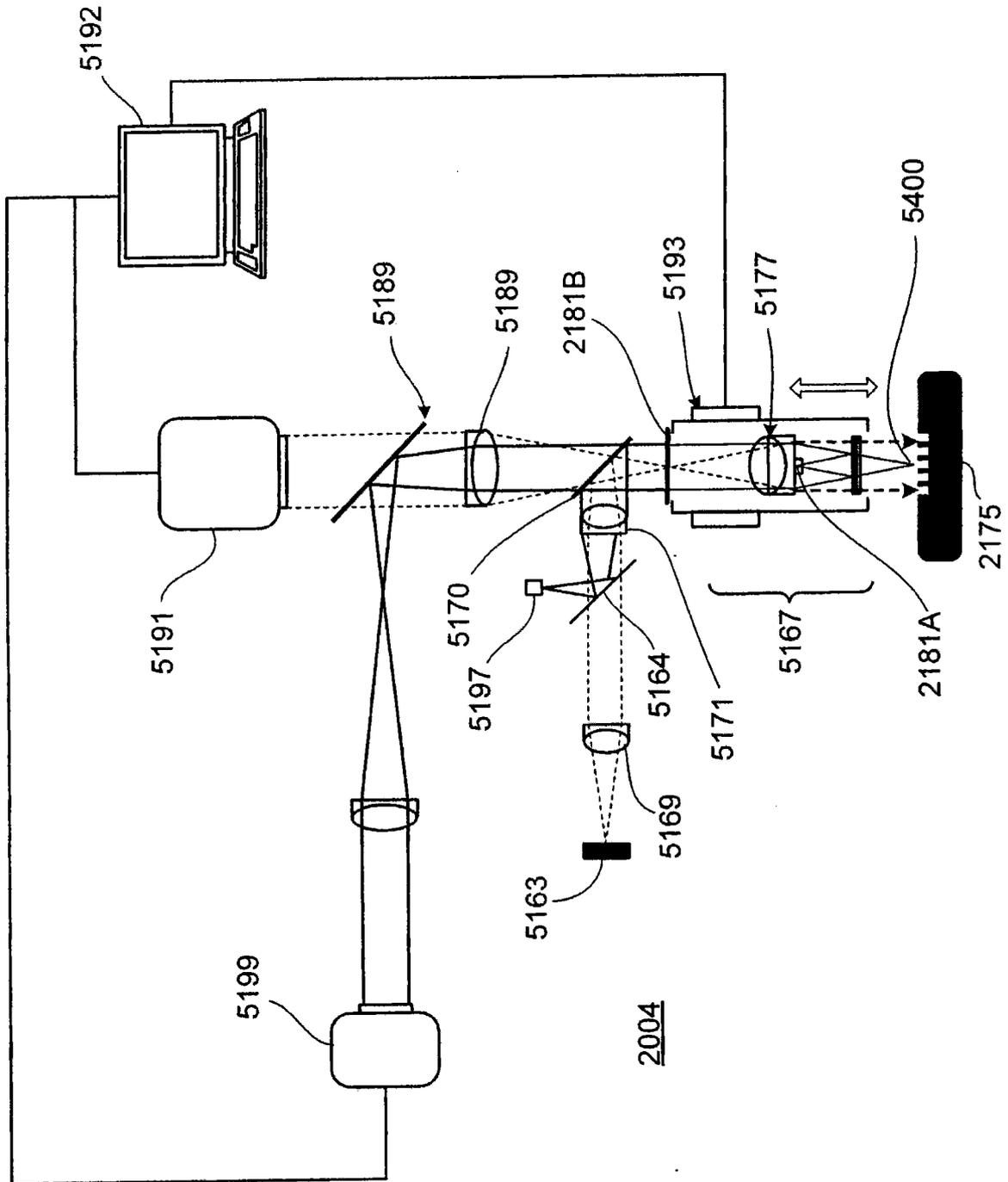


图 31

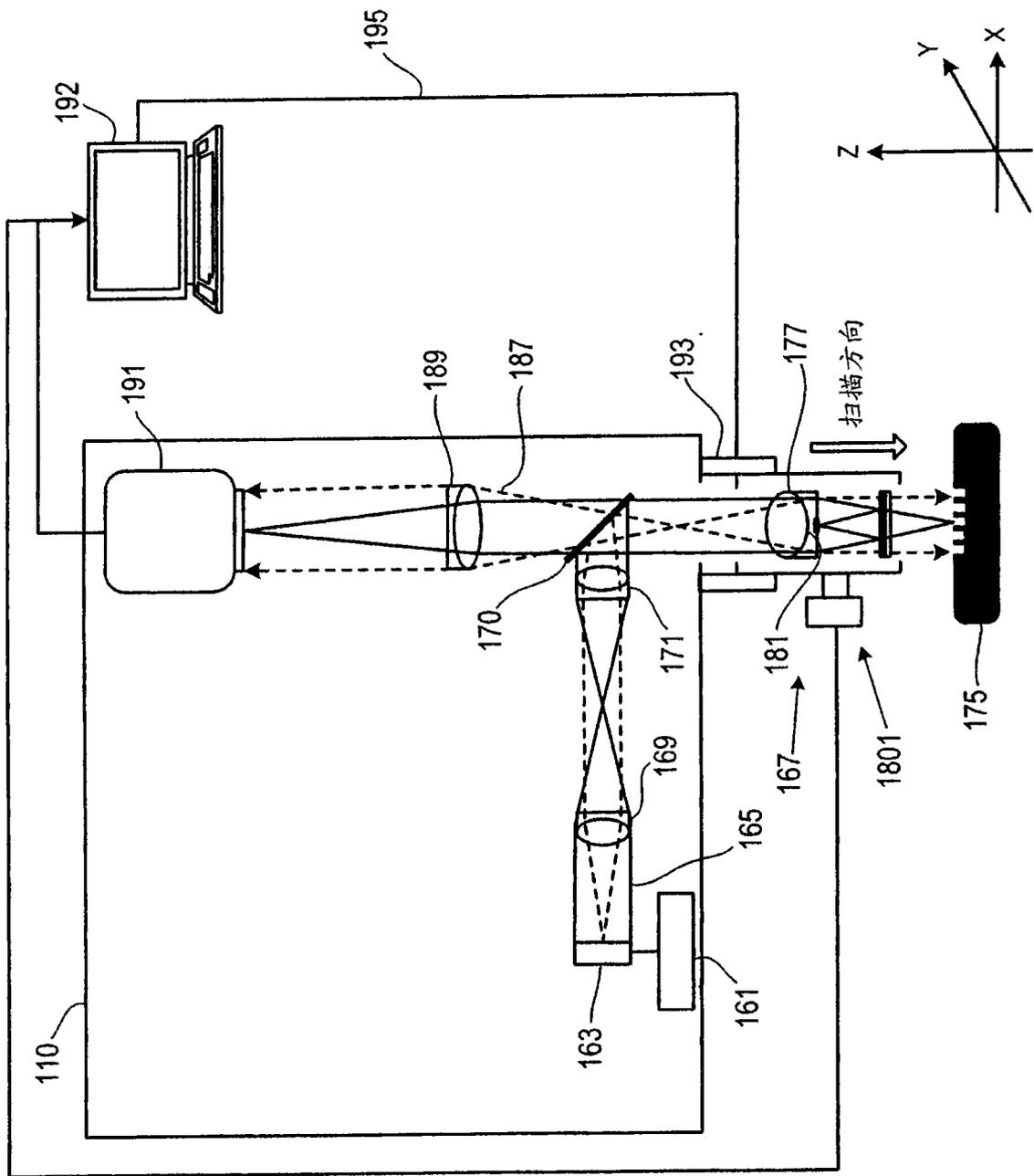


图 32

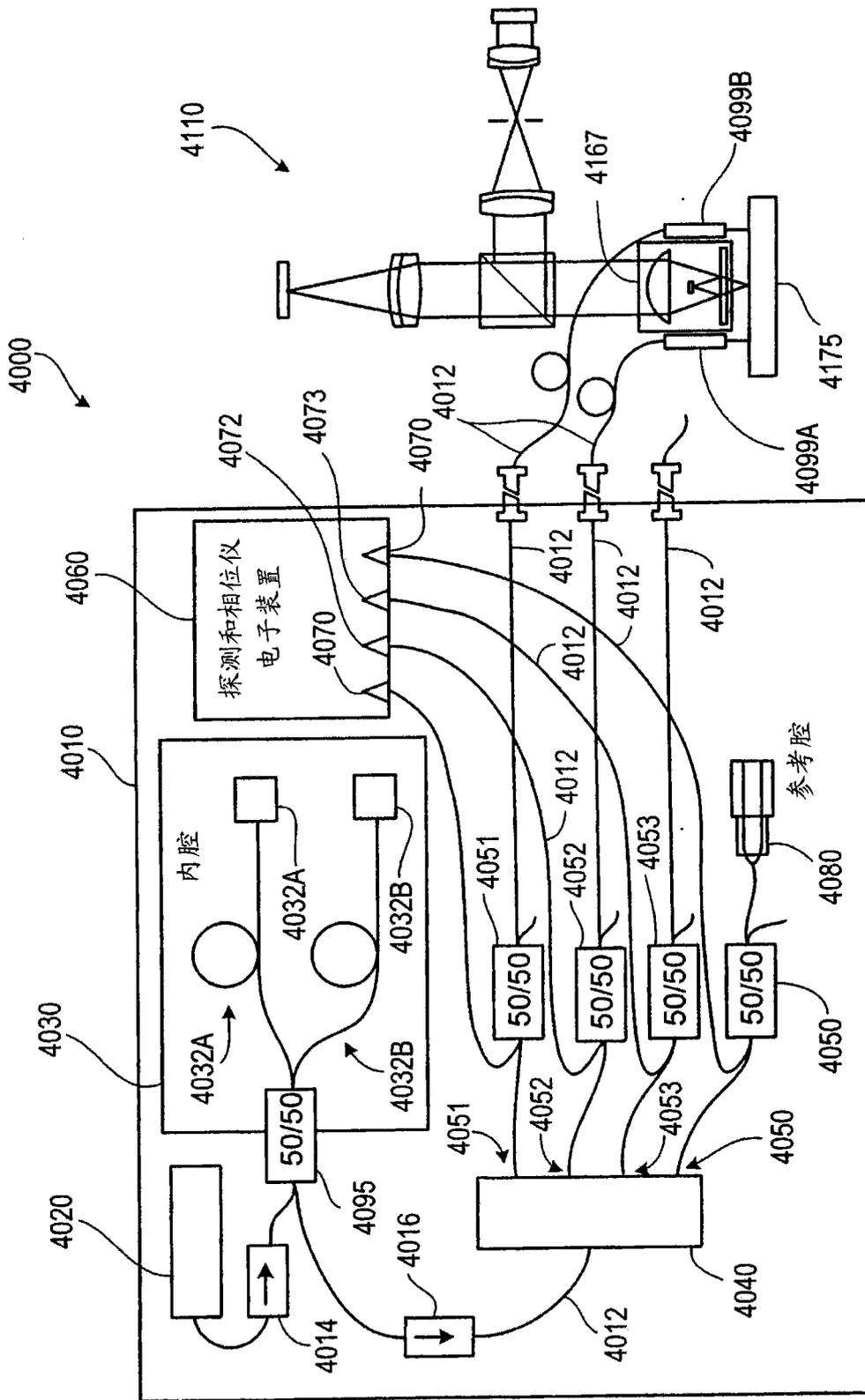


图 33

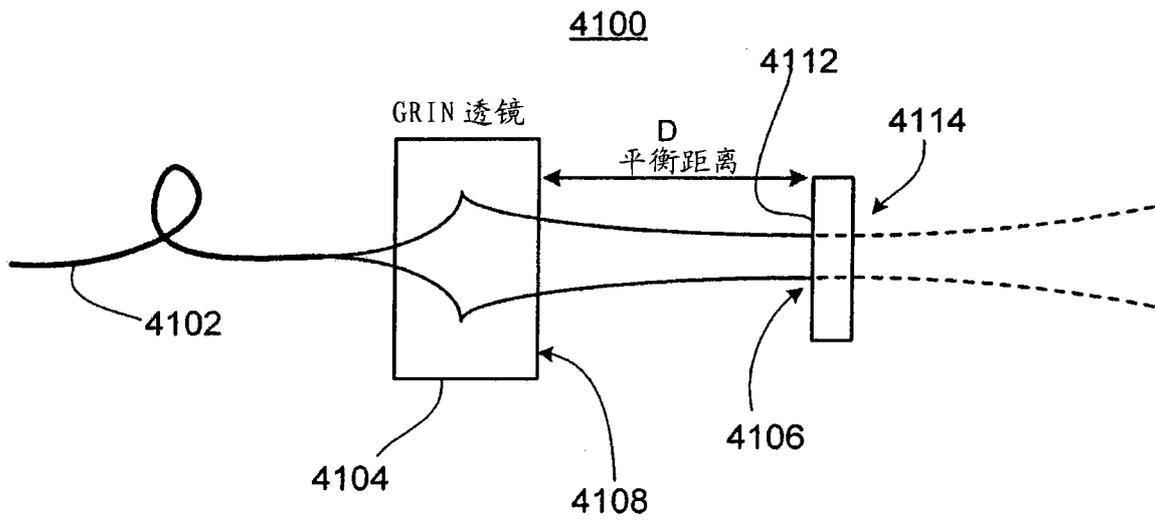


图 34

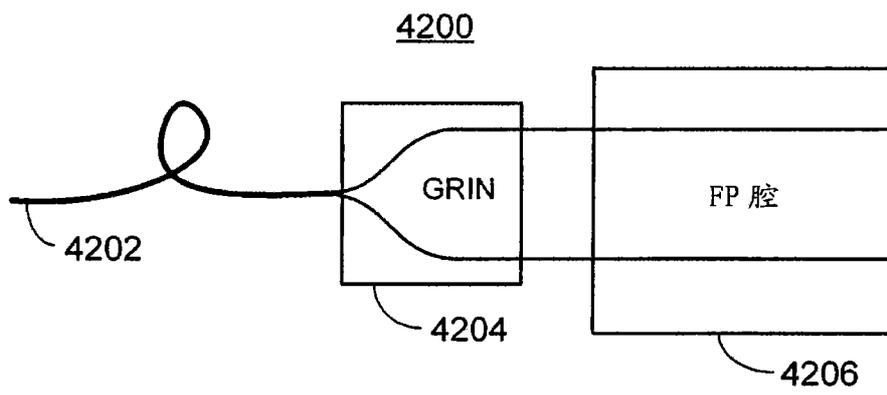


图 35

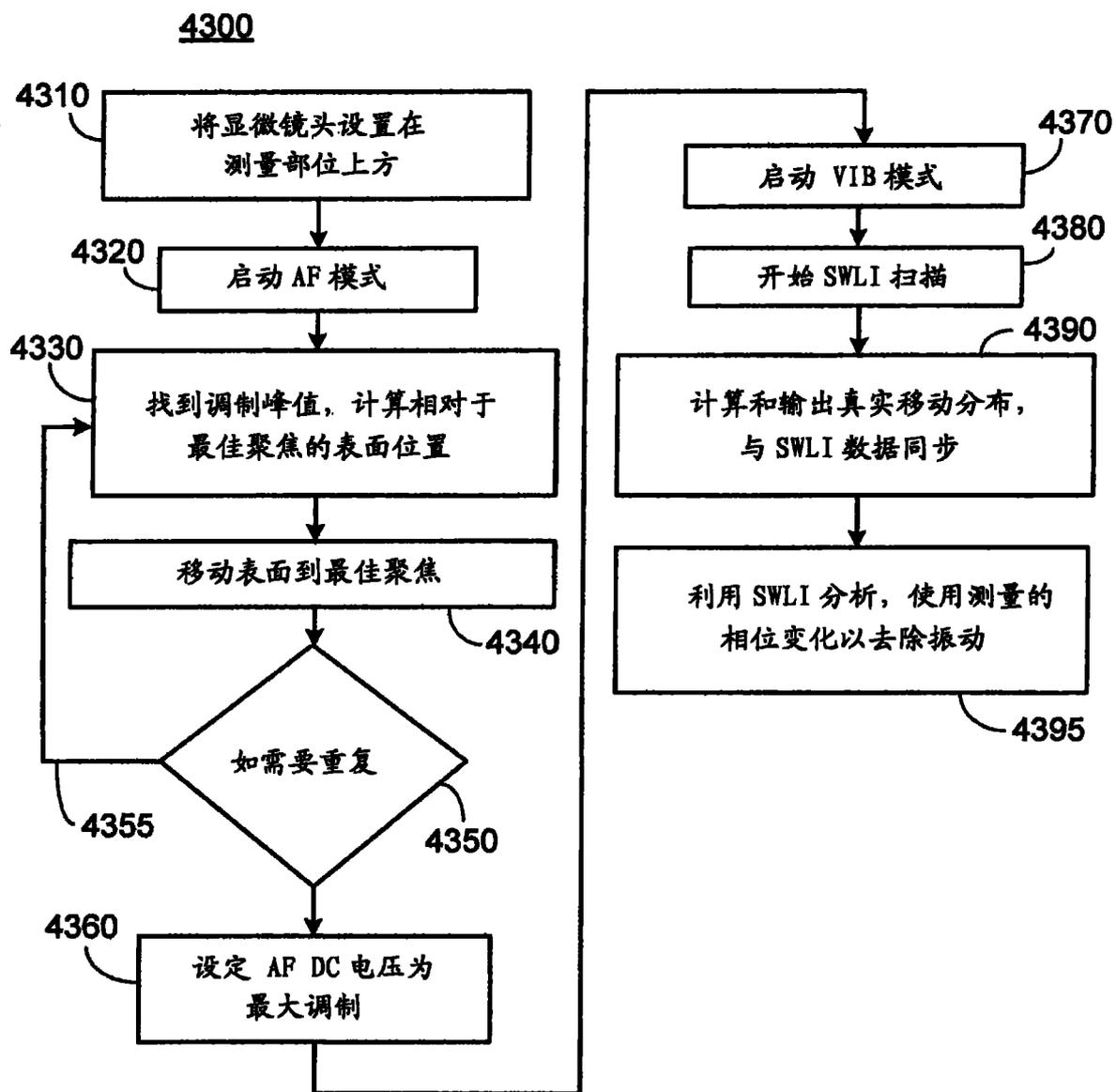


图 36

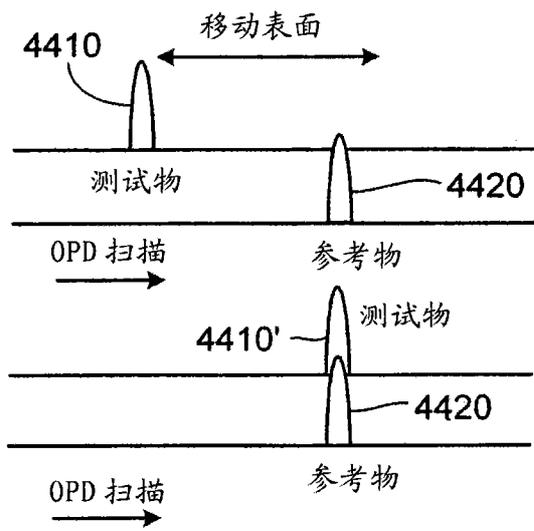


图 37

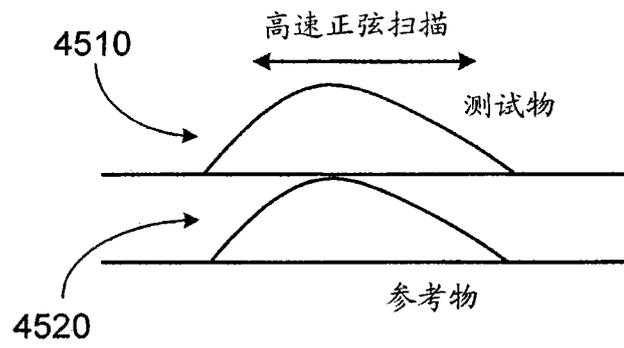


图 38

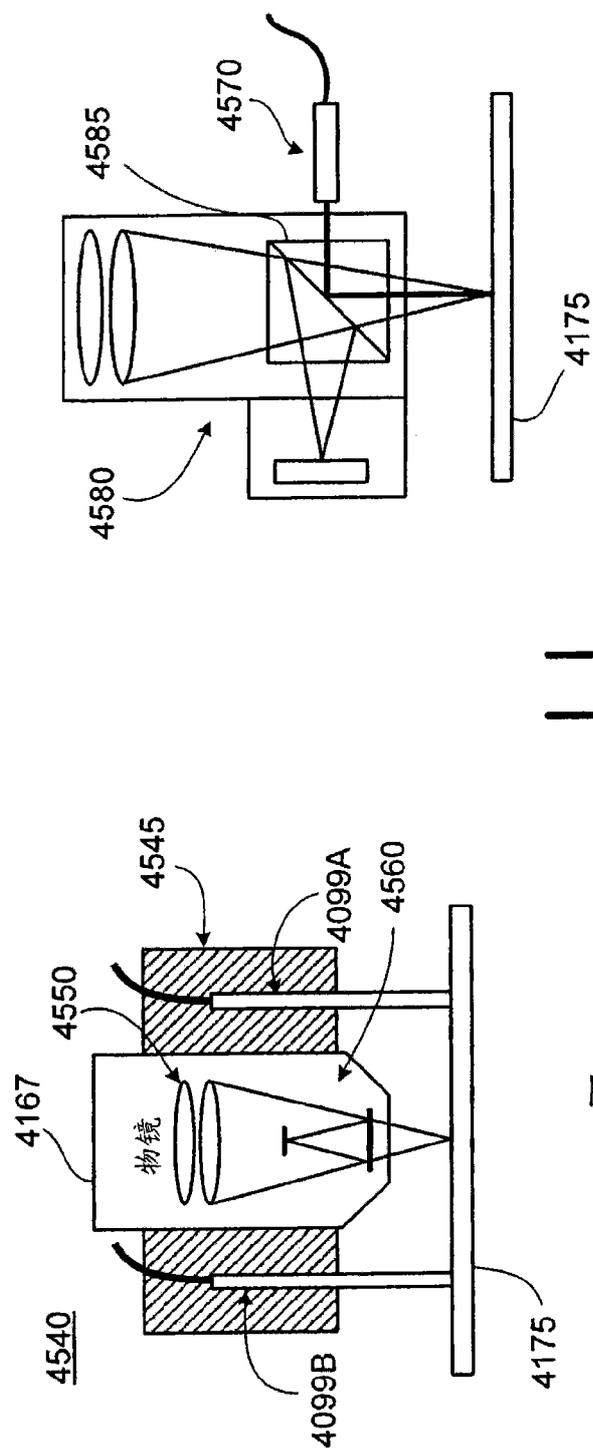


图 39

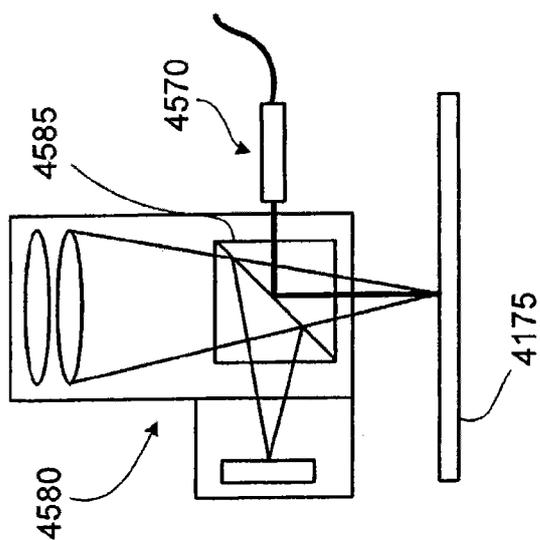


图 40

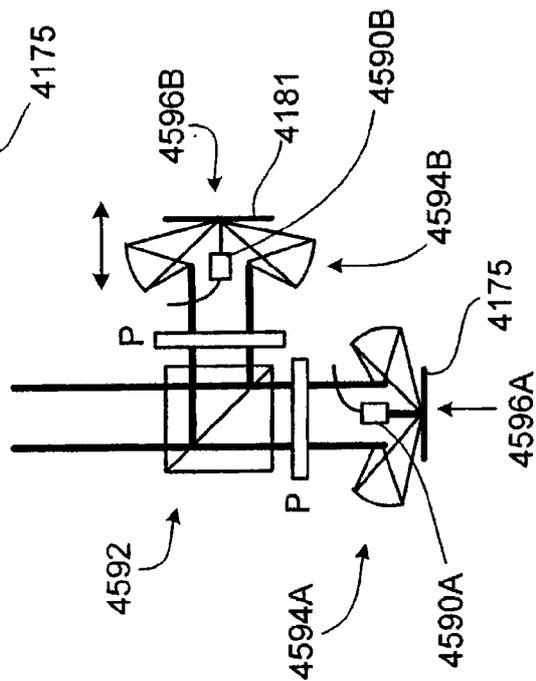


图 41

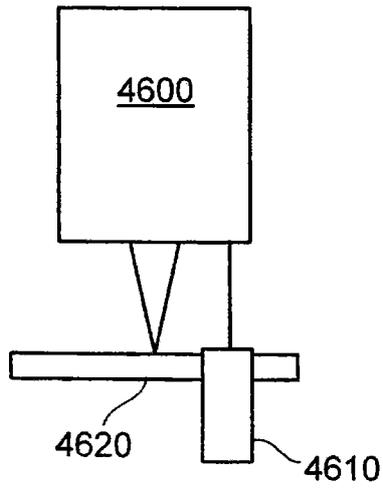


图 42A

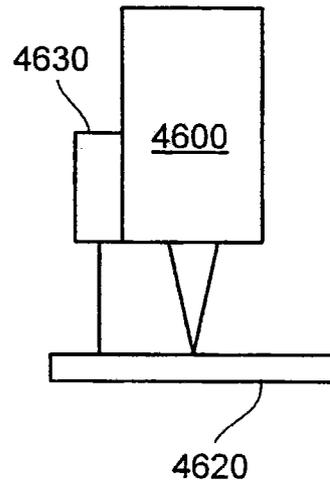


图 42B

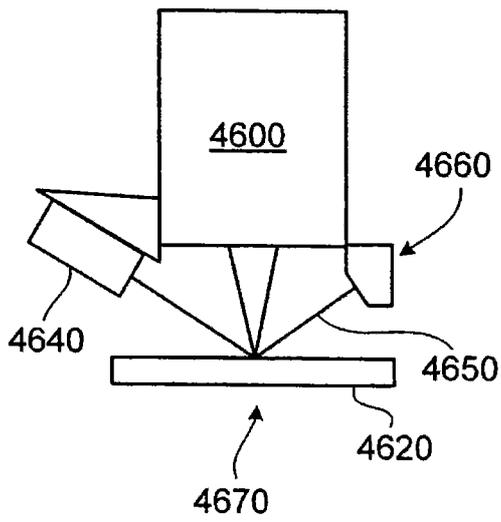


图 42C

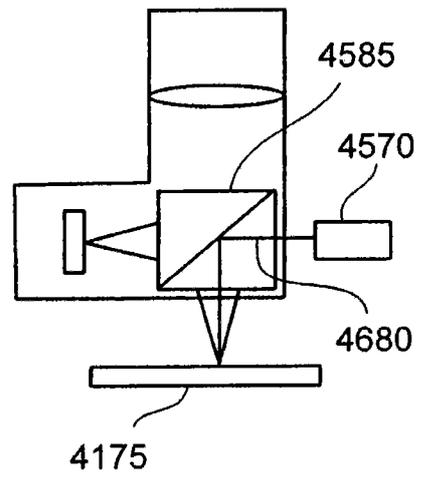


图 43A

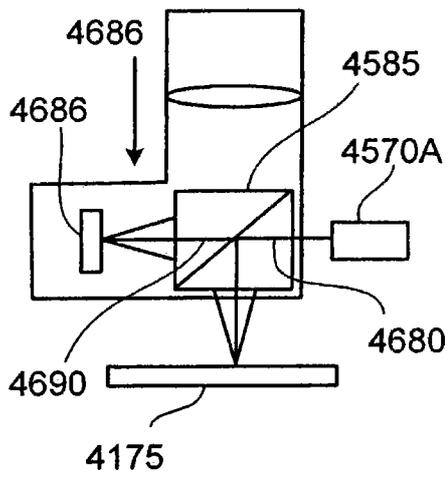


图 43B

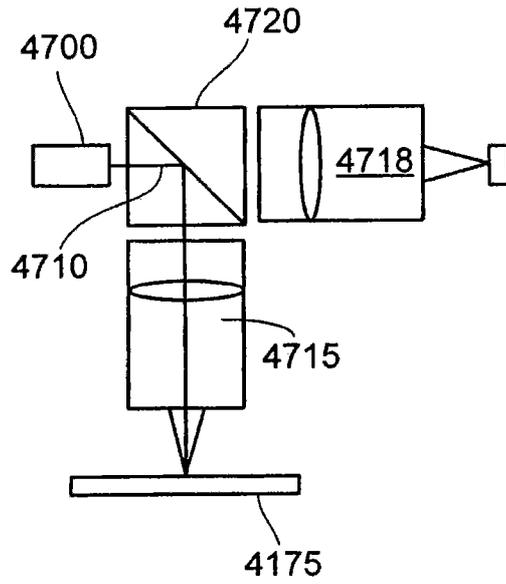


图 43C

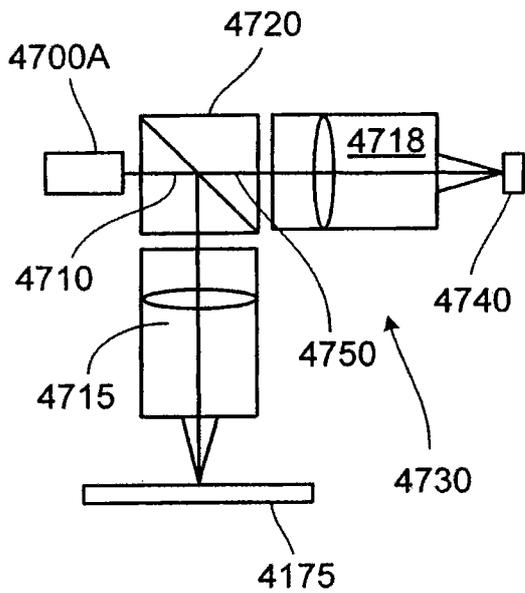


图 43D

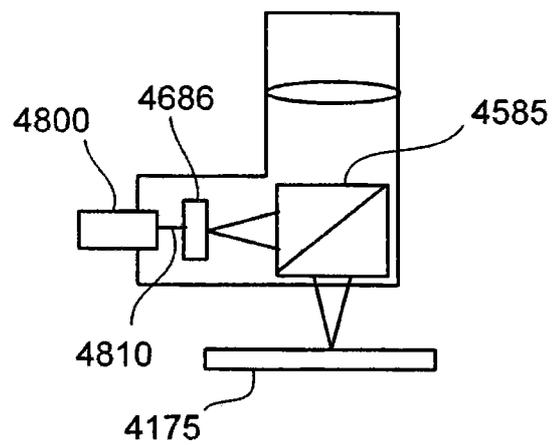


图 44A

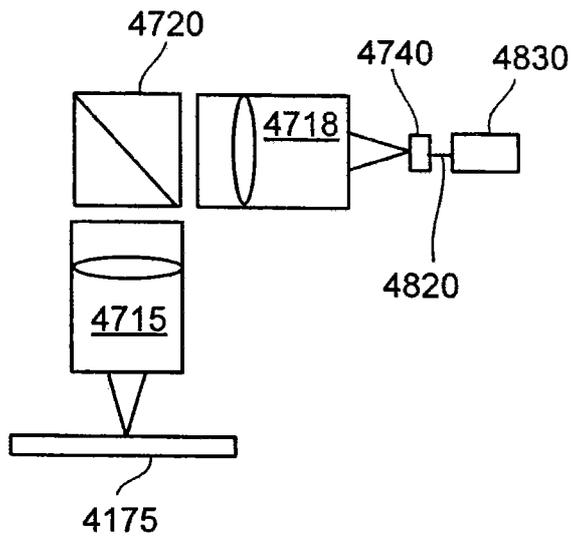


图 44B

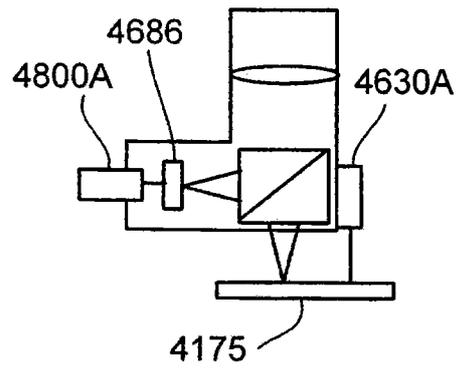


图 45A

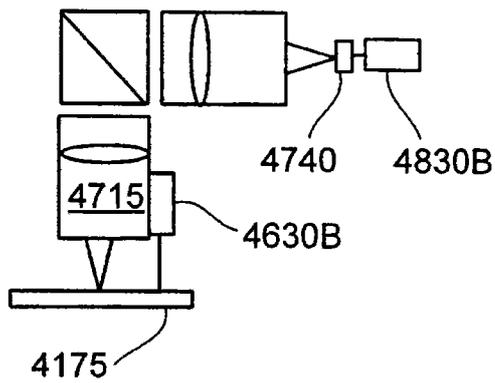


图 45B

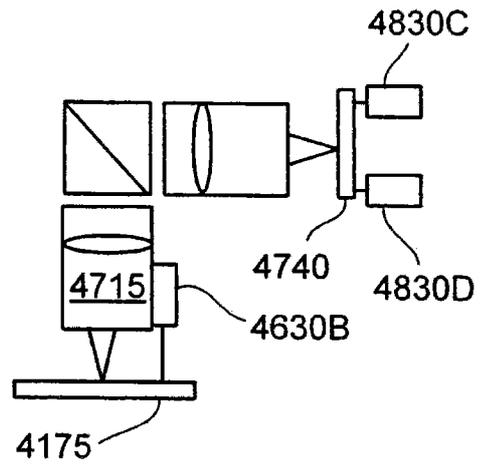


图 45C

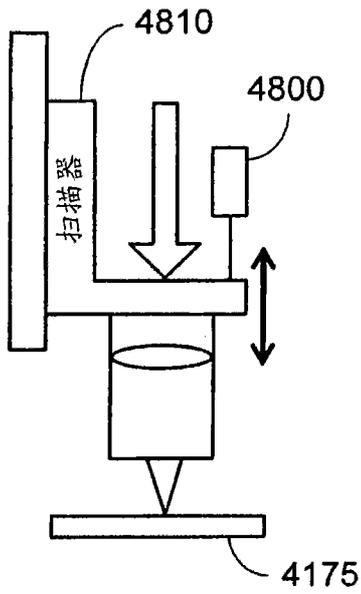


图 46

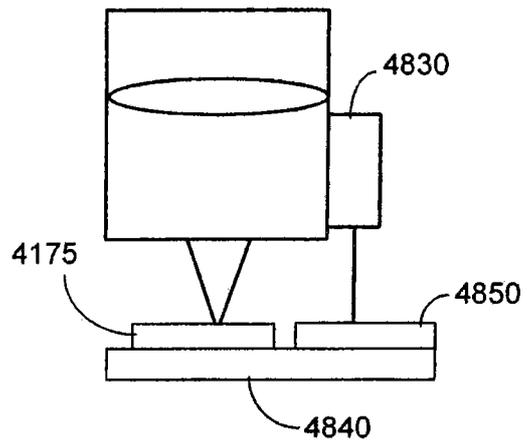


图 47

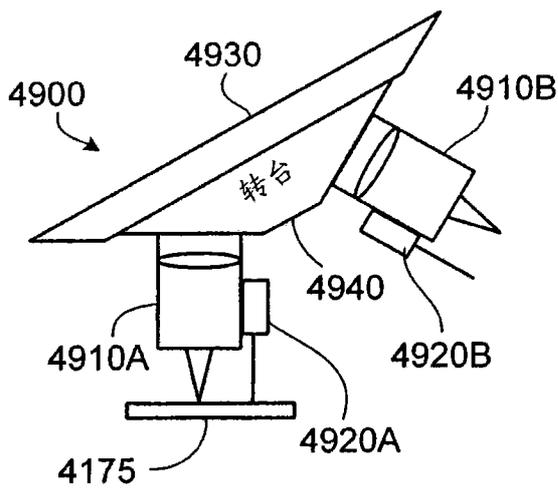


图 48A

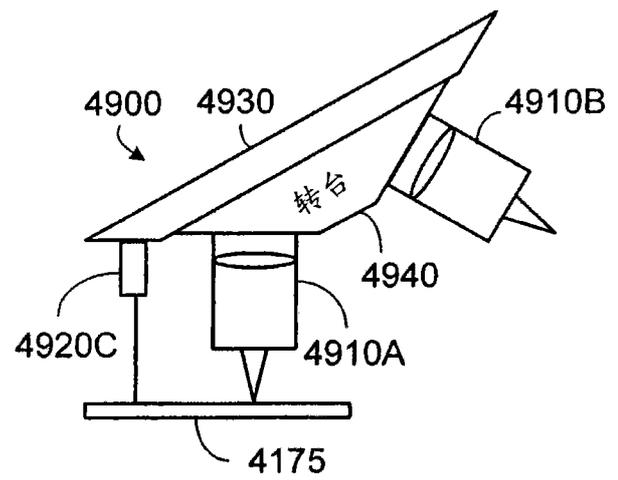


图 48B

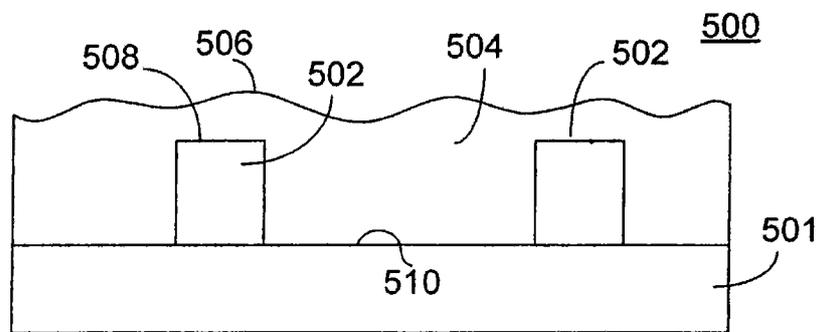


图 49A

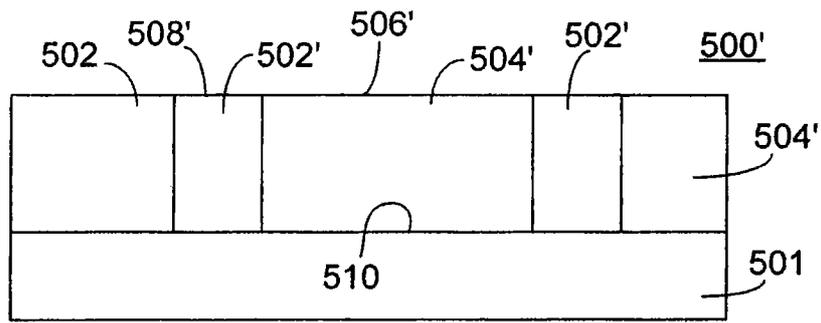


图 49B

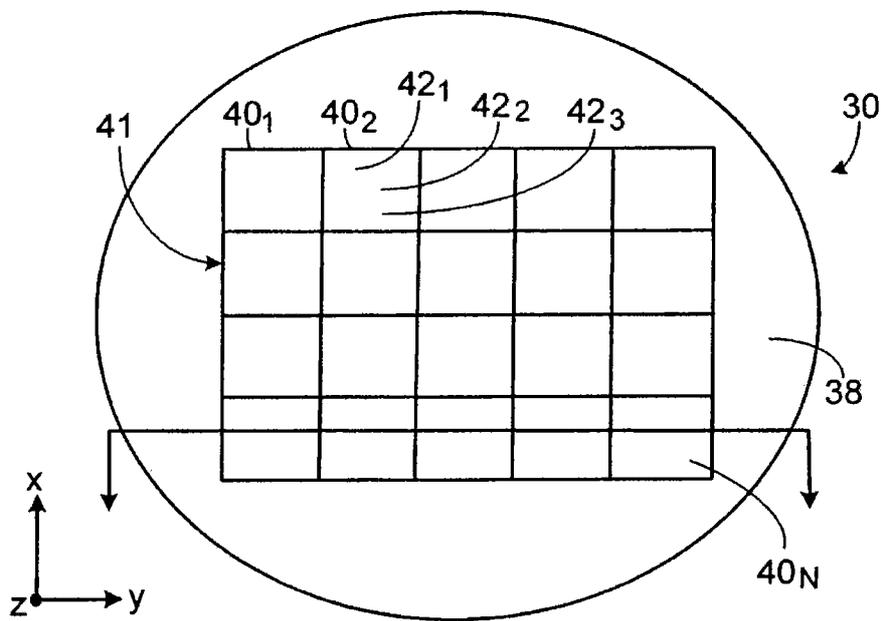


图 50A

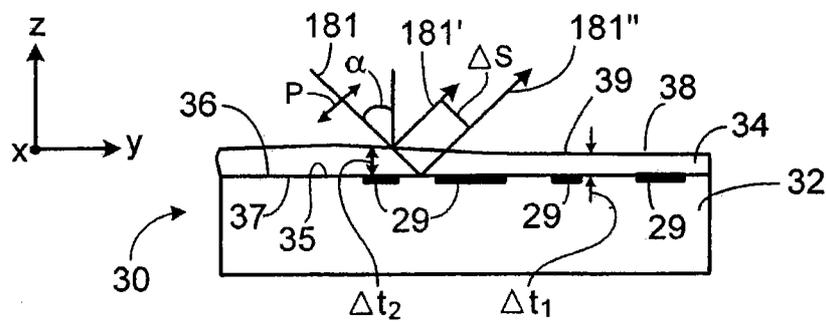


图 50B

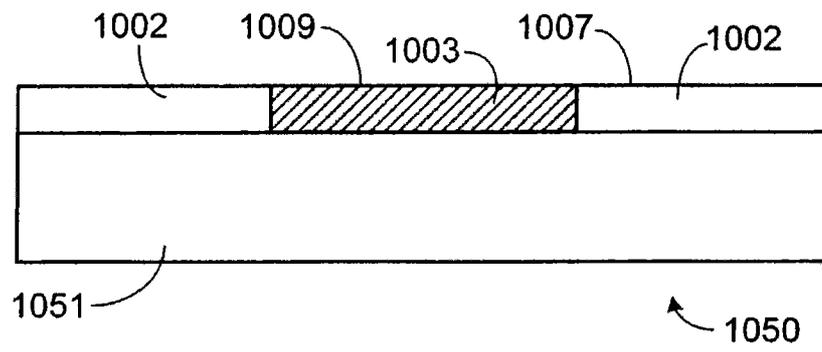


图 51A

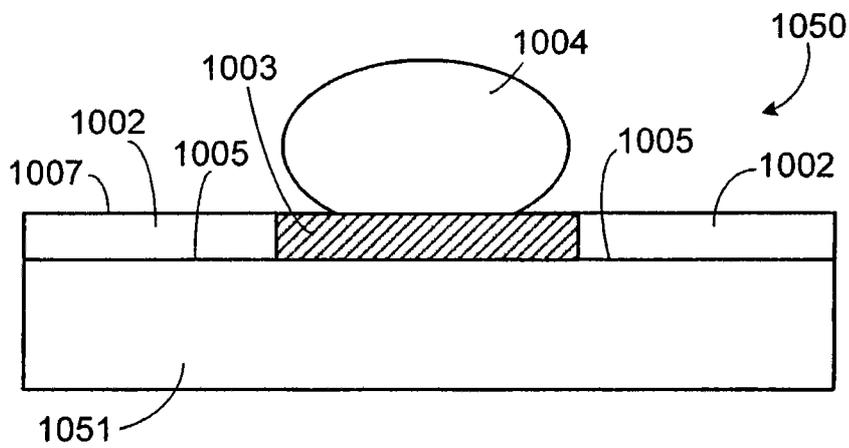


图 51B

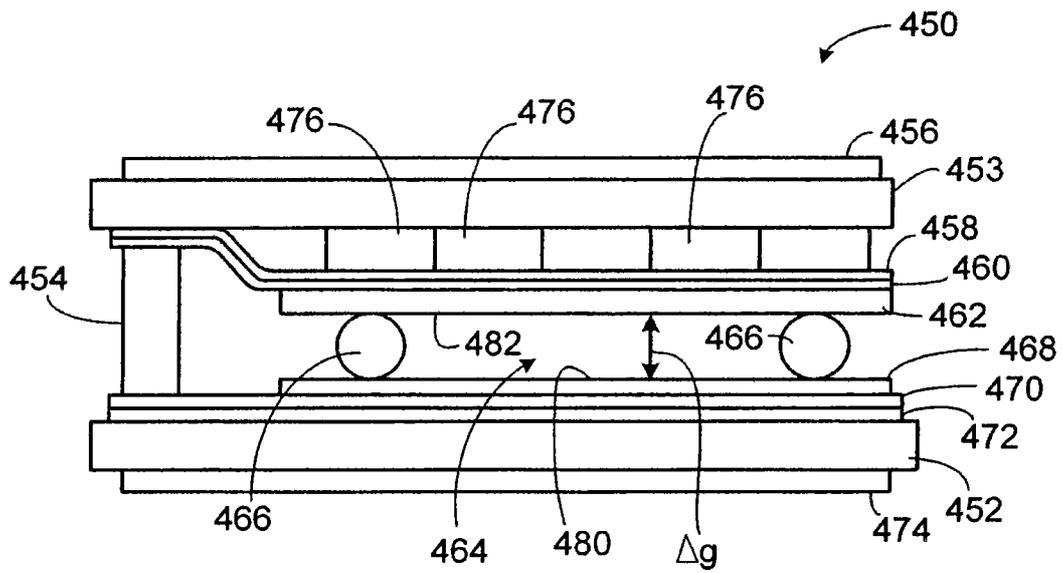


图 52A

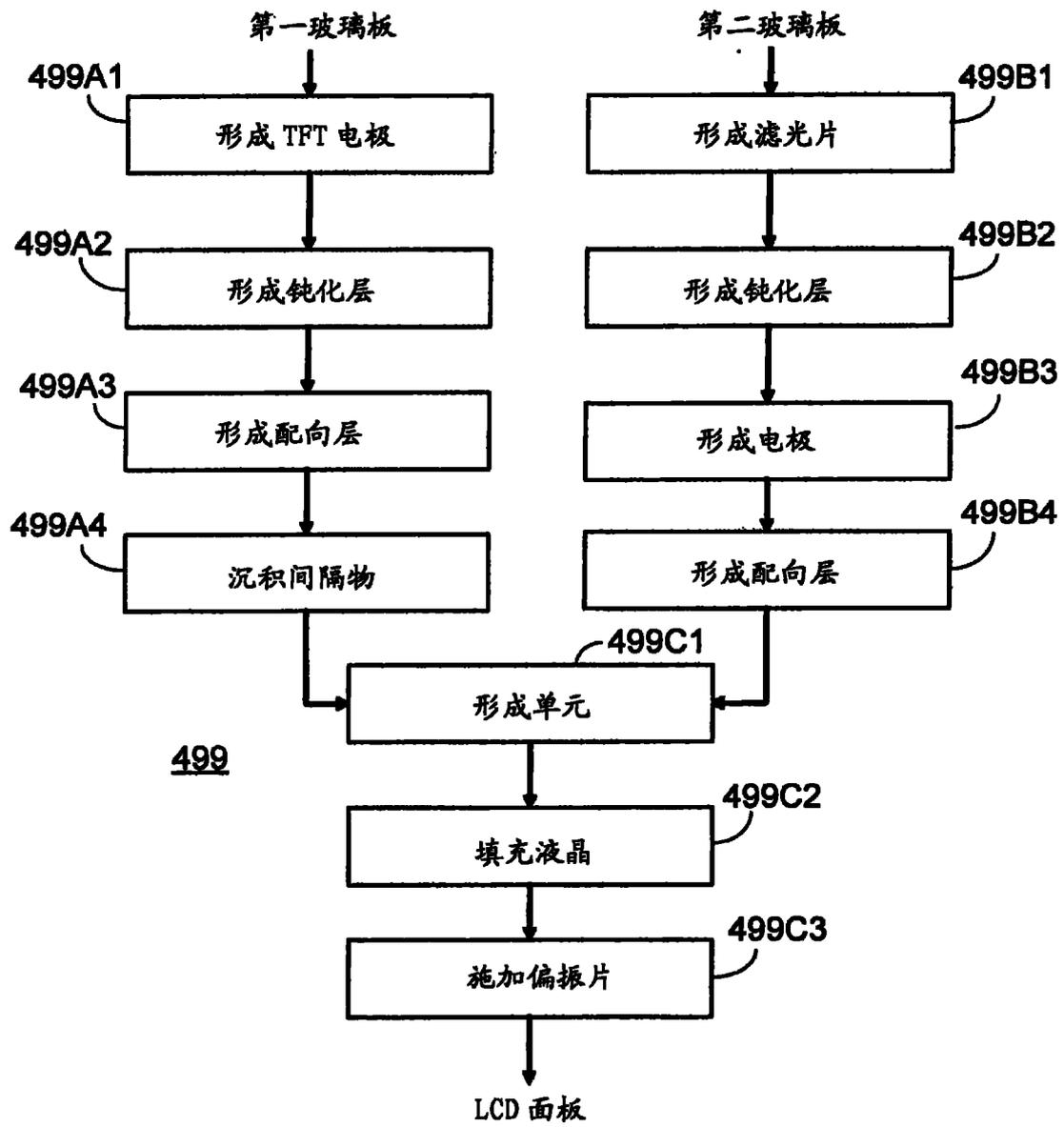


图 52B

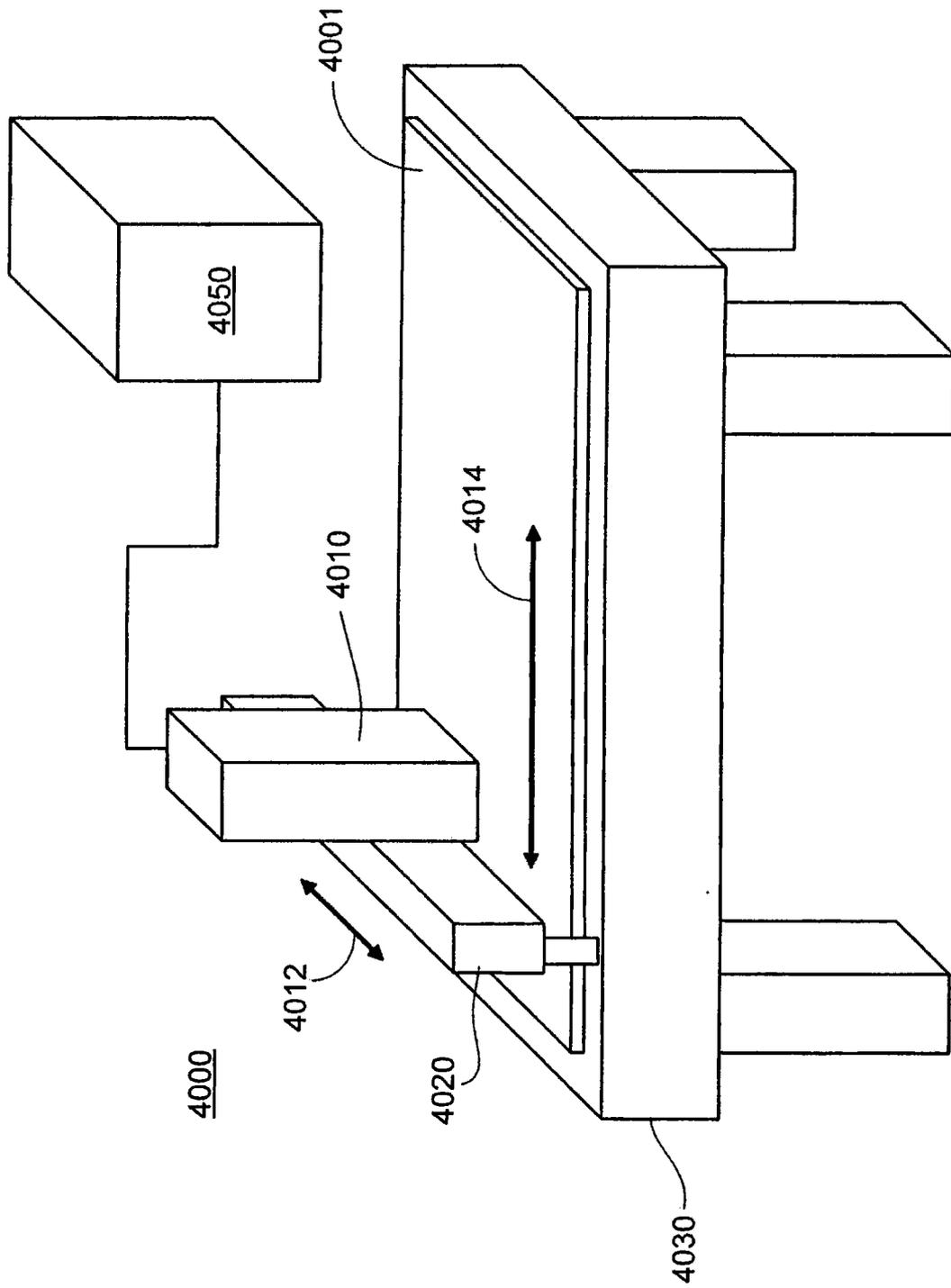


图 52C