[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01J 9/00 (2006.01)
G01B 9/02 (2006.01)

[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 99812916.X

[45] 授权公告日 2008 年 7 月 16 日

[11] 授权公告号 CN 100402996C

[22] 申请日 1999.11.1 [21] 申请号 99812916.X

[30] 优先权

[32] 1998.11.2 [33] AU [31] PP6900

[86] 国际申请 PCT/AU1999/000949 1999.11.1

[87] 国际公布 WO2000/026622 英 2000.5.11

[85] 进入国家阶段日期 2001.4.30

[73] 专利权人 墨尔本大学

地址 澳大利亚维多利亚

[72] 发明人 基思·纽金特 戴维·帕加宁
安东·巴蒂

[56] 参考文献

WO9828950A1 1998.7.2

US5367375A 1994.11.22

审查员 刘文治

[74] 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

代理人 李瑞海

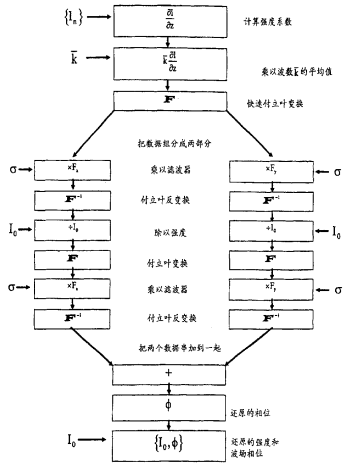
权利要求书 12 页 说明书 19 页 附图 12 页

[54] 发明名称

确定波场相位、物体成象、相位振幅成象的方法和装置

[57] 摘要

在此公开了一种定量判定辐射波场的相位的方法和装置。 对强度变化率的测量进行变换以产生第一积分变换式。 把对应于反映在强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式。 把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式。 根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正。 把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式。 对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。



1. 一种定量确定辐射波场的相位的方法，包括步骤：

（a）在一个基本上横跨波场传播方向的选定表面上进行辐射波场的强度变化率的典型测量；

（b）对选定表面上的辐射波场的强度进行典型测量；

（c）对强度变化率的测量进行变换以产生第一积分变换式，并把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式；

（d）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式；

（e）通过将强度变化率的测量值除以从强度测量得到的值，根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正；

（f）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式，并把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式；

（g）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

2. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述的第一和第二积分变换利用傅立叶变换产生。

3. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，傅立叶变换是快速傅立叶变换。

4. 如权利要求 1 至 3 中任一所述的方法，其特征在于，第一和第二微分算子是二阶微分算子。

5. 如权利要求 1 至 3 中任一所述的方法，其特征在于，第一滤波器基本上与第二滤波器相同。

6. 如权利要求 1 至 3 中任一所述的方法，其特征在于，第一滤波器包括选择性地抑制第一积分变换式的第一较高频率。

7. 如权利要求 1 至 3 中任一所述的方法，其特征在于，至少第一和第二滤波器中的一个包括对强度的典型测量中的噪音校正。

8. 如权利要求 1 至 3 中任一所述的方法，还包括通过对至少两个横跨波

场传播方向的隔开的平面上的强度进行典型测量而对选定面上的强度变化率和强度进行典型测量的步骤。

9. 如权利要求 8 所述的方法，其特征在于，选定的表面位于两个相隔的表面之间。

10. 如权利要求 8 所述的方法，其特征在于，选定的表面是相隔的表面之一。

11. 如权利要求 8 所述的方法，还包括直接探测所述相隔表面上的强度的典型测量值的步骤。

12. 如权利要求 8 所述的方法，还包括通过对表面成象而对至少一个隔开的表面进行典型测量的步骤。

13. 如权利要求 8 所述的方法，其特征在于，隔开的表面基本上是平行的。

14. 如权利要求 13 所述的方法，其特征在于，隔开的表面基本上是平面。

15. 如权利要求 8 所述的方法，其特征在于，通过减去分别在上述隔开表面上的位置处进行的典型测量而进行强度变化率的典型测量。

16. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，通过对在表面上的选定位置处的测量取样而获得强度和强度变化率的典型测量。

17. 如权利要求 16 所述的方法，其特征在于，在所述表面上确定了一个规则阵列的位置上进行测量取样。

18. 如权利要求 2 或 3 所述的方法，其特征在于，辐射波场在卡笛尔坐标系的 z 方向传播，并且该方法还包括分别产生相位的 x 分量和 y 分量的步骤。

19. 如权利要求 18 所述的方法，其特征在于，第一和第二滤波器都具有一个用于产生相位的 x 分量的Ω_x和一个用于产生相位的 y 分量的Ω_y，其中

$$\Omega_x = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_x}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_x^2}$$

$$\Omega_y = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_y}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_y^2}$$

此处，k_x、k_y是 x、y 的共轭傅立叶变量，并且

α是强度测量中由噪音决定的常数。

20. 如权利要求 19 所述的方法，还包括在积分变换之前强度变化率的典

型测量值乘以辐射的平均波数的负数的步骤。

21. 如权利要求 1 至 3 中任一所述的方法，还包括通过获得横跨辐射第一能量的波场传播方向的测量面上强度变化率的第一典型测量值和获得横跨辐射第二不同能量的波场传播方向的测量面上强度变化率的第二典型测量值的步骤。

22. 如权利要求 2 或 3 所述的方法，其特征在于，第一滤波器和第二滤波器中的至少一个包括通过包含至少一个依据于进行典型测量的系统系数，即象差的分量，对强度和强度变化率的典型测量中象差的校正。

23. 如权利要求 22 所述的方法，其特征在于，辐射波场在卡笛尔坐标系的 z 方向传播，并且还包括分别产生相位的 x 分量和 y 分量的步骤。

24. 如权利要求 23 所述的方法，其特征在于，第一和第二滤波器都具有一个用于产生相位的 x 分量的Ω_x和一个用于产生相位的 y 分量的Ω_y，二者的形式为

$$\frac{1}{\sqrt{(-4\pi\partial z\bar{\lambda}(k_x^2+k_y^2)-4\sum_m\sum_n A_{mn}k_x^m k_y^n}}$$

此处

k_x、k_y是 x、y 的共轭傅立叶变量;

$\bar{\lambda}$是辐射的平均波长;

$I_{象差}$（x,y）是在散焦距离δz 处测得的有象差的强度;

A_{mn}有缺陷的成象系统的象差系数。

25. 一种用于对辐射波场相位的定量判定的装置，包括:

（a）在一个基本横跨波传播方向的选定表面上进行辐射波场的强度变化率的典型测量的装置;

（b）对选定表面上的辐射波场的强度进行典型测量的装置;

（c）按序进行下列步骤的处理装置:

（I）变换强度变化率的测量值以产生第一积分变换式;

（II）把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式;

（III）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式;

（IV）通过将强度变化率的测量值除以从强度测量得到的值，根据选定

表面上的强度测量对未变换式进行校正;

（V）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式;

（VI）把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式;

（VII）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

26. 如权利要求 25 所述的装置，其特征在于，第一和第二积分变换利用傅立叶变换进行。

27. 如权利要求 26 所述的装置，其特征在于，所述的变换傅立叶变换是快速傅立叶变换。

28. 如权利要求 25 至 27 中任一所述的装置，其特征在于，第一和第二微分算子是二阶微分算子。

29. 如权利要求 25 至 27 中任一所述的装置，其特征在于，第一滤波器基本上与第二滤波器相同。

30. 如权利要求 25 至 27 中任一所述的装置，其特征在于，第一滤波器包括选择性地抑制第一积分变换式的第一较高频率。

31. 如权利要求 25 至 27 中任一所述的装置，其特征在于，第一和第二滤波器中的至少一个包括对强度的典型测量中的噪音校正。

32. 如权利要求 25 至 27 中任一所述的装置，还包括一个对至少两个横跨波场传播方向的相隔表面上的强度进行典型测量的装置。

33. 如权利要求 32 所述的装置，其特征在于，选定的表面位于两个相隔的表面之间。

34. 如权利要求 32 所述的装置，其特征在于，选定的表面是所述的相隔的表面之一。

35. 如权利要求 32 所述的装置，还包括定位成直接探测相隔表面上的强度的典型测量值的装置。

36. 如权利要求 32 所述的装置，还包括对两个相隔表面中的至少一个上的强度进行典型测量的探测装置和将该表面成象到探测器上的成象装置。

37. 如权利要求 32 所述的装置，其特征在于，相隔的表面基本上平行。

38. 如权利要求 32 所述的装置，其特征在于，相隔的表面基本上是平面。

39. 如权利要求 32 所述的装置，其特征在于，所述的进行强度变化率典

型测量的装置减去分别在所述相隔表面上的位置处得到的强度的典型测量值。

40. 如权利要求 25 至 27 任一所述的装置，其特征在于，所述的进行强度典型测量的装置和所述的进行强度变化率典型测量的装置对所述表面上选定位置进行取样。

41. 如权利要求 40 所述的装置，其特征在于，在所述表面上的一个确定了规则阵列的位置处进行取样。

42. 如权利要求 26 或 27 所述的装置，其特征在于，辐射波场的传播方向选为卡笛尔坐标系的 Z 方向，并且处理装置分别产生相位的 x 分量和 y 分量。

43. 如权利要求 26 或 27 所述的装置，其特征在于，处理装置应用所述的第一和第二滤波器，第一和第二滤波器都具有一个用于产生相位的 x 分量的Ω_x和一个用于产生相位的 y 分量的Ω_y，其中

$$\Omega_x = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_x}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_x^2}$$

$$\Omega_y = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_y}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_y^2}$$

此处，k_x、k_y是 x、y 的共轭傅立叶变量，并且

α是强度测量中由噪音决定的常数。

44. 如权利要求 35 所述的装置，其特征在于，在积分变换之前强度变化率的典型测量值乘以辐射的平均波数的负数。

45. 如权利要求 25 所述的装置，其特征在于，通过获得横跨辐射第一能量的波场传播方向的测量面上的第一典型测量值和获得横跨辐射第二不同能量的波场传播方向的测量面上的第二典型测量值而进行强度变化率的典型测量。

46. 如权利要求 26 或 27 所述的装置，其特征在于，第一滤波器和第二滤波器中的至少一个包括通过包含至少一个依据于进行典型测量的系统系数，即象差的分量，对强度和强度变化率的典型测量中象差的校正。

47. 如权利要求 46 所述的装置，其特征在于，辐射波场在卡笛尔坐标系的 z 方向传播，并且分别产生相位的 x 分量和 y 分量。

48. 如权利要求 47 所述的装置，其特征在于，第一和第二滤波器都具有

一个用于产生相位的 x 分量的Ω_x和一个用于产生相位的 y 分量的Ω_y，二者的形式为

$$\frac{1}{\sqrt{(-4\pi\partial z\bar{\lambda}(k_x^2+k_y^2)-4\sum_m\sum_n A_{mn}k_x^m k_y^n}}$$

此处

k_x、k_y是 x、y 的共轭傅立叶变量;

$\bar{\lambda}$是辐射的平均波长;

$I_{象差}$（x,y）是在散焦距离δz 处测得的有象差的强度;

A_{mn}有缺陷的成象系统的象差系数。

49. 一种对物体成象的方法，包括步骤:

（a）将物体曝光于来自于辐射源的辐射波场;

（b）对横跨物体远离辐射入射一侧波场传播方向的选定面进行强度变化率的典型测量;

（c）对选定面上的辐射波场的强度进行典型测量;

（d）对强度变化率的测量进行变换以产生第一积分变换式，并把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式;

（e）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式;

（f）通过将强度变化率的测量值除以从强度测量得到的值，根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正;

（g）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式，并把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式;

（h）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

50. 如权利要求 49 所述的方法,还包括通过对至少两个横跨波场的隔开的平面上的强度进行典型测量而对选定面上的强度变化率和强度进行典型测量的步骤。

51. 如权利要求 50 所述的方法，其特征在于，选定的表面位于两个相隔的表面之间。

52. 如权利要求 50 所述的方法，其特征在于，选定的表面是相隔的表面之一。

53. 如权利要求 50 至 52 中任一所述的方法，其特征在于，相隔的表面基本上是平行的。

54. 如权利要求 50 至 52 中任一所述的方法，其特征在于，相隔的表面基本上是平面。

55. 如权利要求 50 至 52 中任一所述的方法，其特征在于，通过减去分别在上述隔开表面上的位置处得到的典型测量值而进行强度变化率的典型测量。

56. 如权利要求 49 所述的方法，还包括下面的步骤：通过对横跨波场传播方向的第一表面上的强度进行第一典型测量，改变辐射源和物体之间的距离，并且对于物体和辐射源之间改变距离后对第一表面上的强度进行第二典型测量，从而进行选定表面上的强度和强度变化率的测量。

57. 如权利要求 56 所述的方法，其特征在于，选定的表面是相隔的表面之一。

58. 如权利要求 49 至 52 中任一所述的方法，还包括直接探测所述相隔表面上的强度的典型测量值的步骤。

59. 如权利要求 49 至 52 中任一所述的方法，其特征在于，选定的表面与所述的物体在辐射传播的方向上隔开。

60. 如权利要求 49 至 52 中任一所述的方法，其特征在于，辐射源基本上是一个点辐射源。

61. 如权利要求 49 至 52 中任一所述的方法，其特征在于，第一和第二积分变换利用傅立叶变换进行。

62. 如权利要求 49 至 52 中任一所述的方法，其特征在于，傅立叶变换是快速傅立叶变换。

63. 一种对物体成象的装置，包括：

（a）一个用辐射波场对物体辐射的辐射源；

（b）对一个基本上横跨波场传播方向的选定表面上辐射波场的强度变化率进行典型测量的装置；

（c）对选定表面上的辐射波场的强度进行典型测量的装置；

（d）按序进行下列步骤的处理装置：

（I）变换强度变化率的测量值以产生第一积分变换式；

（II）把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式；

（III）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式；

（IV）通过将强度变化率的测量值除以从强度测量得到的值，根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正；

（V）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式；

（VI）把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式；

（VII）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

64 如权利要求 63 所述的装置，还包括对至少两个横跨波场传播方向的隔开的表面上的强度进行典型测量的装置。

65. 如权利要求 64 所述的装置，其特征在于，选定的表面位于两个相隔的表面之间。

66. 如权利要求 64 所述的装置，其特征在于，选定的表面是相隔的表面之一。

67. 如权利要求 64 至 66 中任一所述的装置，还包括放置成直接探测所述相隔表面上的强度的典型测量的探测器。

68. 如权利要求 64 至 66 任一所述的装置，还包括对两个相隔表面中的至少一个上的强度进行典型测量的探测装置和将该表面成象到探测器上的成象装置。

69. 如权利要求 64 至 66 任一所述的装置，其特征在于，相隔的表面基本上平行。

70. 如权利要求 64 至 66 任一所述的装置，其特征在于，通过减去分别在上述隔开表面上的位置处得到的典型测量值而进行强度变化率的典型测量。

71. 如权利要求 63 所述的装置，还包括通过对横跨波场传播方向的第一表面上强度的第一典型测量而进行选定表面上的强度和强度变化率测量的装置，改变辐射源和物体之间距离的装置，以及对第一表面上关于物体和辐

射源之间改变距离后的强度进行第二典型测量的装置。

72. 如权利要求 71 所述的装置，其特征在于，选定的表面是相隔的表面之一。

73. 如权利要求 63 所述的装置，还包括直接探测所述相隔表面上的强度的典型测量值的装置。

74. 如权利要求 63 至 66 中任一所述的装置，其特征在于，选定的表面与所述的物体在辐射传播的方向上隔开。

75. 如权利要求 63 至 66 中任一所述的装置，其特征在于，辐射源基本上是一个点辐射源。

76. 如权利要求 63 所述的装置，其特征在于，第一和第二积分变换利用傅立叶变换进行。

77. 如权利要求 76 所述的装置，其特征在于，傅立叶变换是快速傅立叶变换。

78. 一种相位振幅成象法，包括步骤：

（a）用辐射波场辐射一个物体；

（b）通过一个成象系统把来自物体的辐射聚焦到成象表面，其中成象表面横跨从物体传播而来的波场；

（c）在成象系统的第一焦点对成象表面上的辐射强度分布进行第一次典型测量；

（d）通过成象系统改变成象表面上图形的焦点；

（e）对成象表面上的辐射强度分布进行第二次典型测量；

（f）利用第一次和第二次的典型测量对横跨波场的选定表面进行强度的典型测量和强度变化率的典型测量；

（g）变换强度变化率的测量值以产生第一积分变换式，并把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式；

（h）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式；

（i）根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正；

（j）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式，并把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分

变换式，以产生一个修正的第二积分变换式；

（k）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

79. 如权利要求 78 所述的方法，其特征在于，辐射波场具有小于成象系统的数值孔径的数值孔径。

80. 如权利要求 78 所述的方法，其特征在于，成象系统的第一焦点在成象表面产生一个处于焦点的图象，成象系统的第二焦点在成象表面产生一个轻微散焦的图象。

81. 如权利要求 78 至 80 任一所述的方法，其特征在于，成象表面基本上是一个平面。

82. 如权利要求 78 至 80 任一所述的方法，其特征在于，成象表面是一个强度探测器。

83. 如权利要求 78 至 80 任一所述的方法，其特征在于，成象表面是一个选定的表面。

84. 如权利要求 78 所述的方法，其特征在于，积分变换是傅立叶变换。

85. 如权利要求 84 所述的方法，其特征在于，傅立叶变换是快速傅立叶变换。

86. 如权利要求 78 至 80 任一所述的方法，其特征在于，通过减去强度的第一和第二典型测量值来产生强度变化率的典型测量值。

87. 如权利要求 78 至 80 任一所述的方法，其特征在于，通过在成象表面上选定位置处的测量取样而得到强度和强度变化率的典型测量。

88. 如权利要求 87 所述的方法，其特征在于，测量取样在成象表面上一个限定了规则阵列的位置进行。

89. 如权利要求 85 所述的方法，其特征在于，辐射波场的传播方向为卡笛尔坐标系的 Z 方向，并且包括分别产生相位的 x 分量和 y 分量的步骤。

90. 如权利要求 89 所述的方法，其特征在于，第一和第二滤波器都具有一个用于产生相位的 x 分量的Ω_x和一个用于产生相位的 y 分量的Ω_y，其中

$$\Omega_x = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_x}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_x^2}$$

$$\Omega_y = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_y}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_y^2}$$

此处，k_x、k_y是x、y的共轭傅立叶变量，并且

α是强度测量中由噪音决定的常数。

91. 如权利要求90所述的方法，还包括在积分变换之前强度变化率的典型测量值乘以辐射的平均波数的负数的步骤。

92. 一种相位振幅成象的装置，包括:

一个辐照物体的辐射波场源;

一个成象系统，把来自物体的辐射聚焦到成象表面，其中成象表面横跨从物体传播而来的波场;

对成象表面上的辐射强度进行典型测量的装置;

所述的成象系统包括选择性地可操作装置，把到达成象表面的辐射至少聚焦到第一焦点和第二焦点;

进行下列步骤的处理装置:

(i) 利用第一焦点和第二焦点处成象表面上的典型测量对横跨波场的选定表面上对强度进行典型测量和沿传播方向对强度变化率进行典型测量;

(ii) 变换强度变化率的测量值以产生第一积分变换式;

(iii) 把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式;

(iv)把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式;

(v) 根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正;

(vi) 变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式;

(vii) 把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式;

(viii) 对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

93.如权利要求92所述的装置，其特征在于，辐射波场具有小于成象系统的数值孔径的数值孔径。

94. 如权利要求92所述的装置，其特征在于，成象系统的第一焦点在成象表面产生一个处于焦点的图象，成象系统的第二焦点在成象表面产生一个轻微散焦的图象。

95. 如权利要求92至94任一所述的装置，其特征在于，成象表面基本

上是一个平面。

96. 如权利要求 92 至 94 任一所述的装置，其特征在于，成象表面是一个强度探测器。

97. 如权利要求 92 至 94 任一所述的装置，其特征在于，成象表面是一个选定的表面。

98. 如权利要求 92 至 94 任一所述的装置，其特征在于，积分变换是傅立叶变换。

99. 如权利要求 98 所述的装置，其特征在于，傅立叶变换是快速傅立叶变换。

100. 如权利要求 92 至 94 任一所述的装置，其特征在于，通过减去强度的第一和第二典型测量值来产生强度变化率的典型测量值。

101. 如权利要求 92 至 94 任一所述的装置，其特征在于，通过对成象表面上选定位置处的测量取样而得到强度和强度变化率的典型测量。

102. 如权利要求 101 所述的装置，其特征在于，测量取样在成象表面上一个限定了规则阵列的位置进行。

103. 如权利要求 99 所述的装置，其特征在于，辐射波场的传播方向为卡笛尔坐标系的 Z 方向，并且包括分别产生相位的 x 分量和 y 分量。

104. 如权利要求 99 所述的装置，其特征在于，第一和第二滤波器都具有一个用于产生相位的 x 分量的Ω_x和一个用于产生相位的 y 分量的Ω_y，其中

$$\Omega_x = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_x}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_x^2}$$

$$\Omega_y = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_y}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_y^2}$$

此处，k_x、k_y是 x、y 的共轭傅立叶变量，并且

α是强度测量中由噪音决定的常数。

105. 如权利要求 104 所述的方法，还包括在积分变换之前强度变化率的典型测量值乘以辐射的平均波数的负数的步骤。

确定波场相位、物体成象、相位振幅成象的方法和装置

技术领域

本发明涉及辐射波场的相位确定。并还涉及关于辐射波场的相位信息的应用范围。在本说明书中，“辐射波场”一词包括所有以波一样的形式传播的辐射，如X射线、可见光和电子束，但不局限于这些形式。

背景技术

测量辐射波场相位的技术在基础物理中有许多用途，并且是众多包括各种物理特性的测量技术的基础。相位测量技术的用途例如包括X射线成象、电子显微镜、光学显微镜以及光学层析成象和X射线相位层析成象等领域。

典型的相位测量是利用各种类型的干涉仪。干涉仪的主要特点在于能够定量地测定波场的相位。虽然基于干涉仪的技术仍保有重要性，但人们已认识到，非干涉仪的技术也可用于提供相位信息。众多非干涉仪的方法包括解辐射波场的强度传递方程。此方程建立了近轴单色波的辐射度和相位与其纵向辐射度导数的关系式，并在 J.Opt.Soc.Am.73 1434-1441（1983）中M.R.Teague的“判定性的相位修正：格林函数解”有所描述。Opt.Comm.49 6-10（1984）中N.Streibl的“利用强度传递方程的相位成象”一文描述了一种基于强度传递方程的方法，该方法通过利用在不同散焦距离处获得的强度数据的散焦和数字减法而使相位结构可视。这种方法只提供使相位可视化但并不提供相移的测量。在 Adaptive Optics,Volume23,(1995)Optical Society of America Technical Digest Series,page 77-79 中 T.E.Gureyev, K.A.Nugent, D.Paganin 和 A.Roberts 的“利用快速傅立叶变换的快速相位修正”和Opt.Comm.133 339-346（1997）中T.E.Gureyev和K.A.Nugent的“利用强度传递方程的快速量化相位成象”等文章中揭示了另一种基于解强度传递方程的方法。此方程使得当照明光束具有随机性、但没有由矩形孔径限制的零强度分布时光场的相位能够从两个相隔很近的强度测量结果中分离出来。虽然此方法可以用于非均匀的强度分布，但非均匀的程度受到限制并导致明显的

计算复杂性。因此，此方法不能够处理由一些样品吸收曲线导致的非均匀性或在一些照明强度分布中的非均匀性。此方法还严格地只适用于相干波场。

K.A.Nugent,T.E.Gureyev,D.F.Cookson,D.Paganin and Z.Barnea 等人在（1996）77Phys.Rev.Lett.2961-2964 中的“利用硬 X 射线的量化相位成象”一文也是基于强度传递方程的解。该技术也不能用于非均匀强度分布。

其它基于强度传递方程的解的限定于要求均匀性的方法在 J.Opt.Soc.Am.A Vol 12,1932-1941（1995）中 T.E.Gureyev,K.A.Nugent,A.Robert 的“Phase retrieval with the transport-of-intensity equation:matrix solution with the use of Zernike polynomias”和 J.Opt.Soc.Am.A Vol 12,1942-1946（1995）中 T.E.Gureyev,A.Roberts 和 K.A.Nugent 的“部分相干场，强度传递方程，和相位唯一性”中有所描述。在 J.Opt.Soc.Am.A Vol 13,1670-1682（1996）中 T.E.Gureyev,K.A.Nugent 的“Phase retrieval with the transport-of-intensity equation.II.Orthogonal series solution for nonuniform illumination”中描述了一种在非均匀照明情况下的相位还原技术。此方法基于正交展开的方法，并且在执行中计算复杂。在很多应用中，这种复杂性使得该项技术不实用。

发明内容

本发明提供一种非干涉测量法和用于相位测量的装置。通过与强度的直接测量相结合，相位测量能够利用已知的技术决定辐射波场中任何其它平面处的相位和强度。本发明还涉及众多测量技术的基础。

根据本发明的第一方面，提供了一种定量确定辐射波场的相位的方法，包括步骤：

（a）在一个基本上横跨波场传播方向的选定表面上进行辐射波场的强度变化率的典型测量；

（b）对选定表面上的辐射波场的强度进行典型测量；

（c）对强度变化率的测量进行变换以产生第一积分变换式，并把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式；

（d）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式；

（e）通过将强度变化率的测量值除以从强度测量得到的值，根据选定

表面上的强度测量对未变换式进行校正;

（f）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式，并把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式;

（g）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

根据本发明的第二方面，提供了一种用于对辐射波场相位的定量确定的装置，包括:

（a）在一个基本横跨波传播方向的选定表面上进行辐射波场的强度变化率的典型测量的装置;

（b）对选定表面上的辐射波场的强度进行典型测量的装置;

（c）按序进行下列步骤的处理装置:

（I）变换强度变化率的测量值以产生第一积分变换式;

（II）把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式;

（III）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式;

（IV）通过将强度变化率的测量值除以从强度测量得到的值，根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正;

（V）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式;

（VI）把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式;

（VII）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

选定的表面可以是横跨辐射传播方向的任何形状，包括平面形状、部分球面和部分柱面的形状。

第一和第二积分变换可以是任何适当的类型，包括出于计算便利、快速和高效考虑而采用的近似。

第一和第二积分变换优选利用傅立叶变换进行。具体地说，该变换是快速傅立叶变换。本发明的方法和装置提供对辐射波场相位的判定，其计算方式远没有现有技术复杂。这致使显著地减少计算时间。在某些实例中已经达

到计算速度提高多个数量级。

第一和第二微分算子最好是二阶微分算子。在该方法和装置的优选实施例中第一滤波器基本上与第二滤波器相同。还优选第一和第二滤波器中的至少一个包括对强度的典型测量中的噪音校正。

在本发明的一种形式中，第一滤波器可以选择性地包括抑制第一积分变换式的第一较高频率。在本发明的此种形式中，第二滤波器可以选择性地包括抑制第二积分变换式的第二较高频率。

对选定表面上基于强度测量的校正在强度变化小于预定量的地方可以是一个零校正。

优选从至少两个横跨波场并沿辐射传播的方向隔开的平面上的强度分布测量值中产生选定面上的强度变化率和强度分布的测量。在本发明另一种形式中，通过获得横跨第一能量辐射传播方向的测量面上的第一典型测量值并获得横跨不同的第二能量辐射传播方向的所述测量面上的第二典型测量值而对辐射传播方向中强度变化率进行典型测量。例如，在X射线辐射的情况下，可以通过改变X射线靶或适当的滤波而实现辐射能量的变化。

进行强度以及强度变化率测量的选定面最好位于两个进行强度分布测量的相隔的表面之间。

在本发明的优选形式中，选定的表面和相隔的表面是平面。还优选这些表面大致垂直于辐射的传播的平均方向。

本发明的方法和装置至少可以利用适当编程的计算机部分地执行。具体地说，处理装置最好包括一个适当编程的计算机，方法的步骤最好利用适当编程的计算机执行。在本发明的这些形式中，强度输入信息可以采取数字化的图象或包含这些图象信息的数据的形式。在本发明的其它实施方案中，至少可以采用专用快速傅立叶变换芯片作为处理装置的一部分。

强度变化率的典型测量最好通过减去在相隔表面上的位置处得到的各个典型测量值进行。在本发明的优选形式中，通过对在表面上的选定位置处的测量取样而获得强度和强度变化率的典型测量。最好在表面上划定出一个规则阵列的位置处进行取样和测量。例如，这可以通过用 CCD（电荷耦合装置）作为探测器很容易地实现。

在优选的方法中，辐射波场的传播方向选为卡笛尔坐标系的Z方向，分别产生相位的x和y分量。

在此卡笛尔坐标系中，z 方向是辐射的传播方向，优选的滤波器的形式为：

$$\Omega_x = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_x}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_x^2}, \quad \Omega_y = \frac{(k_x^2 + k_y^2)k_y}{(k_x^2 + k_y^2)^2 + \alpha k_y^2}$$

此处

k_x、k_y是 x、y 的共轭傅立叶变量，并且

α是强度测量中由噪音决定的常数，在无噪音的情况下为零。

在积分变换到频域之前，最好强度变化率的测量值乘以辐射波数平均值的负数。

相隔表面上的强度的典型测量值可以通过适当的成象系统对表面成象而获得。即强度信息可以成象到探测器而非在表面测得。

所以，本发明的方法提供对横跨辐射传播方向的任何面处的辐射波场相位和强度的定量地和分开地判定。通过此相位和强度确定，可以计算沿传播方向的任何其它面的相位和强度。因此，本发明提供了多种测量技术的基础。

在本发明的另一方面，提供了一种对物体成象的方法，包括步骤：

（a）将物体曝光于来自于辐射源的辐射波场；

（b）对横跨物体远离辐射入射一侧波场的选定面进行强度变化率的典型测量；

（c）对选定面上的辐射波场的强度进行典型地测量；

（d）对强度变化率的测量进行变换以产生第一积分变换式，并把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式；

（e）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式；

（f）根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正；

（g）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式，并把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式；

（h）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

在本发明的另一个方面，提供了一种对物体成象的装置，包括：

（a）一个用辐射波场对物体辐射的辐射源；

（b）对一个基本上横跨波场的选定表面上辐射波场的强度变化率进行典型测量的装置；

（c）对选定表面上的辐射波场的强度进行典型测量的装置；

（d）按序进行下列步骤的处理装置：

（I）变换强度变化率的测量值以产生第一积分变换式；

（II）把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式；

（III）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式；

（IV）根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正；

（V）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式；

（VI）把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式；

（VII）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

用于辐照物体的辐射可以是一个平面波场或球面波场，或任意波场。如果希望在物体平面上再现相位，则反向传播由上述方法和装置确定的相位波场，并且减去用于辐射的波场。

成象方法和装置实际上结合了在本发明第一和第二方面中叙述的关于相位的判定。在以上这些方面描述的本发明的优选方面也可用于成象方法和装置。

在某些应用中，利用一种物体到象平面的零距离，该距离对应于具有零传播距离的接触成象。

如果需要，可以通过向后传播强度和定量的相位信息以数字再现实际物体相位和强度结构的图象而在物平面上再现物体。

在该方法的其它形式中，可以进行不止两个的象平面强度分布测量，以获得强度变化率的更好估算或强度导数。在这种情况下，改变辐射源到物体或物体到象平面等二者或其中之一的距离，并进行另一个强度分布测量。重复此程序直到进行了所需次数的测量。测量提供的数据与用于判定强度变化率的函数拟合。

物体成象方法在利用X射线、可见光或电子束的点投影显微镜中有特殊的应用。

在本发明的另一个方面中，提供了一种相位振幅成象法，包括步骤：

（a）用辐射波场辐射一个物体；

（b）通过一个成象系统把来自物体的辐射聚焦到成象表面，其中成象表面横跨从物体传播而来的波场；

（c）在成象系统的第一焦点对成象表面上的辐射强度分布进行第一次典型测量；

（d）通过成象系统改变成象表面上图形的焦点；

（e）对成象表面上的辐射强度分布进行第二次典型测量；

（f）利用第一次和第二次的典型测量对横跨波场的选定表面进行强度的典型测量和强度变化率的典型测量；

（g）变换强度变化率的测量值以产生第一积分变换式，并把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式，以产生一个修正的第一积分变换式；

（h）把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式，以产生一个未变换式；

（i）根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正；

（j）变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式，并把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式，以产生一个修正的第二积分变换式；

（k）对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换，以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

在本发明的另一方面，提供了一种用于物体的相位振幅成象的装置，包括：

一个辐照物体的辐射波场源；

一个成象系统，把来自物体的辐射聚焦到成象表面，其中成象表面横跨从物体传播而来的波场；

对成象表面上的辐射强度分布进行典型测量的装置；

所述的成象系统包括选择性地可操作装置，把到达成象表面的辐射至少聚焦到第一焦点和第二焦点；

进行下列步骤的处理装置:

(i) 利用第一焦点和第二焦点处成象表面上的典型测量对横跨波场的选定表面进行强度的典型测量和强度变化率的典型测量;

(ii) 变换强度变化率的测量值以产生第一积分变换式;

(iii) 把对应于反映在所述强度变化率测量中的第一微分算子反变换的第一滤波器作用到第一积分变换式,以产生一个修正的第一积分变换式;

(iv)把第一积分变换的反变换作用到修正的第一积分变换式,以产生一个未变换式;

(v) 根据选定表面上的强度测量对未变换式进行校正;

(vi) 变换校正的未变换式以产生一个第二积分变换式;

(vii) 把对应于反映在校正的未变换式中的第二微分算子反变换的第二滤波器作用到第二积分变换式,以产生一个修正的第二积分变换式;

(viii) 对修正的第二积分变换式实施第二积分变换的反变换,以产生选定表面上辐射波场的相位测量值。

最好辐射波场的数值孔径小于成象系统的数值孔径。

最好成象表面是一个探测器。探测器具有合适的形式,如 CCD 摄像机。

最好第一焦点对应于表面上的一个焦点对准的图象,改变的焦点对应于稍稍散焦的图象。正负散焦都可以采用。散焦最好很小,以使得空间分辨率的衰减最小。在某些应用中可以获得不止两个图象,因而可以得到对强度变化率的更好的估算。

相位振幅成象法和装置实际上结合了本发明第一、二方面所述的相位判定。在这些方面描述的本发明的优选方面也可以应用到成象方法和装置。

在一项优选的应用中,该方法用于定量相位振幅显微镜。在这种情况下成象系统是一个放大系统。

在本发明的优选形式中,表面最好是一个平面。

附图说明

下面将参考附图对本发明做进一步地描述,其中:

图 1(a)和图 1(b)分别是物体用平面波辐射和用点辐射源辐射时用于相位判定的布局示意图;

图 2 是根据本发明实施例的相位判定法的实施流程图;

图 3（a）至（f）是图解平面波照射时的相位判定的模拟图象；

图 4（a）至（m）是图解相位判定和向后传播到另一象平面的一系列图象；

图 5 是利用本发明方法的点投影显微镜的布局示意图；

图 6 是利用本发明方法的定量相位振幅显微镜的布局示意图；

图 7 是根据本发明的定量相位振幅显微镜系统的实例简图；

图 8（a）至（d）是利用图 7 所示系统获得的强度图象和相位图象；

图 9 是例 3 中光纤的相位测量值和期望值的比较曲线；

图 10 是根据本发明的三维光学相位层析成象系统的实例简图；

图 11 是图 10 所示部分的放大图；

图 12 是例 4 中产生的相位图象的典型层析成象薄片；和

图 13 是再现的折射率分布和例 4 的已知折射率分布的比较。

具体实施方式

图 1（a）和图 1（b）是根据本发明用于相位判定的布局示意图，其中，图 1（a）是物体用平面波辐射 2，图 1（b）用点辐射源 2 照射，产生反射光束 3。

空间里的光束在每个点拥有两个属性：强度和相位。强度是流过每个点的能量的测量值，而相位是能量流动方向的测量值。

强度可直接测量，如通过在胶片上记录图象。相位主要利用与“参考光束”的干涉而测量。与此相反，本发明的方法给出了非干涉法测定相位。

可以在两个横跨远离辐射入射一侧的波场传播方向的平行平面 A、B 上测量强度。

本发明通过给出强度变换方程的解来确定相位：

（1）$\nabla_{\perp}\cdot(I\nabla_{\perp}\Phi)=-k\frac{\partial I}{\partial z}$，其中，右侧被假定为非旋转的。

此处，I 是在平面中的强度，平面的梯度算子用$\nabla_{\perp}$表示，k 是辐射波数，$\partial I/\partial z$ 是强度导数或强度变化率。注意，$\partial I/\partial z$ 由图 1 中所示的平面 A 和 B 中测量值之差估算，而强度 I 由测量值的平均值给出。

为了得到方程 1 的解，首先确定函数 A：

（2）$\nabla_{\perp}A=I\nabla_{\perp}\Phi$

所以，方程（1）变成：

（3）$\nabla_\perp \cdot (\nabla_\perp A) = -k\partial_z I$

利用标准恒等式$\nabla_\perp \cdot \nabla_\perp = \nabla_\perp^2$，可以写成：

（4）$\nabla_\perp^2 A = -k\partial_z I$

此处，$\nabla_\perp^2$表示对图像表面做二维拉普拉斯变换。此方程有下列本征解：

（5）$A = -k\nabla_\perp^{-2}\partial_z I$

如果把梯度算子$\nabla_\perp$作用在此方程的两侧，则方程变为：

（6）$\nabla_\perp A = -k\nabla_\perp\nabla_\perp^{-2}\partial_z I$

函数 A 的限定方程（2）使（6）变换成：

（7）$I\nabla_\perp\Phi = -k\nabla_\perp\nabla_\perp^{-2}\partial_z I$

方程两端除以 I，得到：

（8）$\nabla_\perp\Phi = -kI^{-1}\nabla_\perp\nabla_\perp^{-2}\partial_z I$

对方程（8）的两端取二维散度$\nabla_\perp \cdot$，并利用标准恒等式$\nabla_\perp \cdot \nabla_\perp = \nabla_\perp^2$，则（8）变成：

（9）$\nabla_\perp^2\Phi = -k\nabla_\perp[I^{-1}\nabla_\perp\nabla_\perp^{-2}\partial_z I]$

此方程有下列本征解：

（10）$\Phi = -k\nabla_\perp(\nabla_\perp \cdot [I^{-1}\nabla_\perp\nabla_\perp^{-2}\partial_z I])$

为了对方程（10）求实解，需要用下列公式。可以将一个便于处理的函数 f(x) (Suitably-well-behaved function f(x))写成二维傅立叶积分的形式：

（11）$f(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\hat{f}(k_x,k_y)e^{i(k_x x+k_y y)}dk_x dk_y$

函数$\hat{f}(k_x,k_y)$称为 f(x,y)的“傅立叶变换”。

对(11)的 x 偏微分：

（12）$\frac{\partial}{\partial x}f(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}[ik_x\hat{f}(k_x,k_y)]e^{i(k_x x+k_y y)}dk_x dk_y$

因此，$\frac{\partial}{\partial x}f(x,y)$的傅立叶变换等于 f（x,y）的傅立叶变换乘以 ik_x。不同的表述，$\frac{\partial}{\partial x} = iF^{-1}k_x F$，这里的 F 表述傅立叶变换，$F^{-1}$表述傅立叶反变换。对$\frac{\partial}{\partial y}f(x,y)$做同样的考虑。

如果得到（11）的拉普拉斯运算$\nabla_\perp^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}$，并进行同样的推导，则得出$\nabla_\perp^{-2} = -F^{-1}k_r^{-2}F$，这里$k_r^2 = k_x^2 + k_y^2$。所以：

（13）$\nabla_{\perp}^{-2} = -F^{-1}k_r^{-2}F$，$\frac{\partial}{\partial x} = iF^{-1}k_xF$，$\frac{\partial}{\partial y} = iF^{-1}k_yF$

这里，F 表示傅立叶变换，F^{-1}表示傅立叶反变换，（k_x,k_y）表示（x,y）的共轭傅立叶变量，并且

$k_r^2=k_x^2+k_y^2$

方程（13）可以用于以下列的方程重写方程（10）:

（14）$\Phi = \Phi^{(x)}+\Phi^{(y)}$，

$$\Phi^{(x)} = F^{-1}k_r^{-2}k_xFI^{-1}F^{-1}k_xk_r^{-2}F\left[k\frac{\partial I}{\partial z}\right]$$

$$\Phi^{(y)} = F^{-1}k_r^{-2}k_yFI^{-1}F^{-1}k_yk_r^{-2}F\left[k\frac{\partial I}{\partial z}\right]$$

在实际当中，如果强度大于一个特定的阈值（如最大值的 0.1%），则只除以强度。

在傅立叶空间的 $k_r = 0$ 处不发生被 k_r 除，而是在此点乘以零。结果取积分算子$\nabla_{\perp}^{-2}$的 Cauchy 主值(principal value)。

为了定量地测定物体的相位，需要把一些物理常数组合到涉及经验设置的方程（14）中给出的相位分离法(phase recovery algorithm)中，以用于量化变量 k_x，k_y。这可以通过以下列适于利用快速傅立叶变换进行的形式重写方程（14）:

$$\Phi = \Phi^{(x)} + \Phi^{(y)},\left\{\begin{array}{l}\Phi^{(x)} = -\frac{2\pi}{\lambda\delta z}\frac{1}{(N\Delta x)^2}F^{-1}\frac{i}{i^2+j^2}F\frac{1}{I(x,y)}F^{-1}\frac{i}{i^2+j^2}F\{I_+ - I_-\}\\ \Phi^{(y)} = \frac{2\pi}{\lambda\delta z(N\Delta x)^2}F^{-1}\frac{j}{i^2+j^2}F\frac{1}{I(x,y)}F^{-1}\frac{j}{i^2+j^2}F\{I_+ - I_-\}\end{array}\right\}$$

这里 $i,j\in\left[\frac{-N}{2},\frac{N}{2}\right]$表示 F（$I_+$-$I_-$）的频率分量，强度偏微分$\partial_z$I（x,y）通过减去两个分开距离δz 的象 I+和 I-而得到，i 和 j 是图象上的象素数量，并且利用傅立叶空间的步进大小为

$$\Delta k = \frac{1}{N\Delta x}$$

这里的图象是大小为Δx 的 N×N 象素阵列。所以，除了测量三个强度分布以外，还需要知道象素的大小Δx，焦距δz 和波长λ以便进行相位的定量测量。所有的这些量可以很容易地确定：象素大小可以直接由例如 CCD 探测器几何形状决定（在直接成象的情况下），或由标定横向距离的现有技术决定（在成象系统的情况下），焦距可以直接测量，照度的频谱分布既可以通过使入射场单色来决定，也可以通过利用现有的分光镜分析法分析辐射的频谱分布来决定。

对方程（14）求解的相位还原法(phase retrieval algorithm)的一个例子可以由图2中所示的流程图表示。如图2所示，辐射波场相位的定量确定从两个相隔平面A和B上的一组强度测量值{In}出发。还可以得出在一个平行于并在平面A和B之间的选定平面上的中心强度I（x,y）测量值。在两个平面A和B中每个上的一个确定的阵列上进行强度测量相减以产生强度导数值。该值乘以平均波数的负数。把数据分成两组并进行快速傅立叶变换以产生频域中的各个x和y分量。然后对频域表达式进行滤波，以与反映在未变换表达式中的微分算子的反变换对应。微分算子由关于x分量的$\partial_x^{-1}\nabla_\perp^2$和关于y分量的$\partial_y^{-1}\nabla_\perp^2$表示。然后对每个x、y分量进行傅立叶反变换以产生一个空间域的值，其中已除去了微分算子。如果强度水平高于一选定的阈值，则用通过对平面A和B上强度测量值平均得到的中心强度I（x,y）相除。最终的数据再进行傅立叶变换并乘以相同的滤波器，再与反映在未变换表达式中的微分算子的反变换对应。微分算子仍由关于x分量的$\partial_x^{-1}\nabla_\perp^2$和关于y分量的$\partial_y^{-1}\nabla_\perp^2$表示。所得的分量再进行傅立叶反变换并相加，从而产生一个还原的相位测量值。很显然，根据本发明的方法一般可以从任何对横跨传播方向的选定表面上的强度导数或强度变化率以及同一平面上的强度的典型判定出发。如同各个实例中解释的那样，这些数据可以通过各种方式以及导出辐射波场相位的方法获得。

用下式重写方程（14）:

$\Omega_x(k_x,k_y,\alpha) = k_x k_r^{-2}$

$\Omega_y(k_x,k_y,\alpha) = k_y k_r^{-2}$

$\Phi(x,y) = \Phi^{(x)}(x,y) + \Phi^{(y)}(x,y)$

得出:

（15）
$$\left\{\begin{array}{l}\Phi^{(x)}(x,y)=F^{-1}\Omega_x(k_x,k_y,\alpha)F\dfrac{1}{I(x,y)}F^{-1}\Omega_x(k_x,k_y,\alpha)F\left[\bar{k}\dfrac{\partial l}{\partial z}\right]\\ \Phi^{(y)}(x,y)=F^{-1}\Omega_y(k_x,k_y,\alpha)F\dfrac{1}{I(x,y)}F^{-1}\Omega_x(k_x,k_y,\alpha)F\left[\bar{k}\dfrac{\partial l}{\partial z}\right]\end{array}\right\}$$

此处:

Φ（x,y）表示恢复的相位，

F表示傅立叶变换，F^{-1}表示傅立叶反变换，

I（x,y）表示有关平面上的强度分布，

（x,y）表示有关平面上的卡笛尔坐标，

（k_x,k_y）表示（x,y）的共轭傅立叶变量，

$\bar{k}=2\pi/\bar{\lambda}$是辐射的平均波数，

$\bar{\lambda}$是辐射的平均波长，

$\partial I/\partial z$是纵向强度导数的估计值，

α是当存在噪音时用于稳定运算的调整参数。

如上所得，强度变换方程（1）的解假定一个理想的成象系统。即，在用于获得加入运算中的强度数据的光学系统中不存在“象差”。当然，没有理想的成象系统。成象系统中存在的缺陷可以由一组数量化:

A1,A2,A3,…（16）

他们是指象差的系数。

如果对有缺陷的设备取得强度数据，设备缺陷的特征在于一组已知的象差系数 A1,A2,A3,…，则（15）中出现的Ω_x（k_x,k_y,α）和Ω_y（k_x,k_y,α）可以用明显依据于象差系数的修正的滤波器代替:

$\tilde{\Omega}_x(k_x,k_y,\alpha,A1,A2,A3,\cdots)$和$\tilde{\Omega}_y(k_x,k_y,\alpha,A1,A2,A3,\cdots)$ （17）

这使得能够明确地考虑成象系统的缺陷，导致利用有象差的成象系统定量地校正相位还原。对于在具有微弱相变（远小于2π弧度）的强度均匀的辐射波场中无吸收相位物体的特殊情况下，适当修正的滤波器产生下列的函数形式进行相位还原运算:

（18）$$\Phi(x,y)=F^{-1}\left\{\frac{F\{I_{象差}(x,y)-1\}}{(-2\pi\partial z\bar{\lambda}(k_x^{\,2}+k_y^{\,2})-2\sum_m\sum_n A_{mn}k_x^m k_y^n}\right\}$$

此处:

$I_{象差}$（x,y）是在焦距δz处有象差的强度，

A_{mn}是象差系数，它是有缺陷的成象系统的特征。

如果滤波器定义为:

（19）$$\tilde{\Omega}(k_xk_y,\alpha,A_1,A_2,A_3,...)=\frac{1}{\sqrt{(-2\pi\partial z\bar{\lambda}(k_x^{\,2}+k_y^{\,2})-2\sum_m\sum_n A_{mn}k_x^m k_y^n}}$$

则（18）变为:

（20）$$\Omega(x,y)=F^{-1}\tilde{\Omega}F\frac{1}{I_0}F^{-1}\tilde{\Omega}F\{I_{象差}(x,y)-1\}$$

{$I_{象差}$（x,y）-1}项是强度变化率的量度。I_0强度对于均匀强度来说是可测常量，这样（20）与（15）总体形式一样。因此，在上述的一般方法中象差的特例可以通过改变滤波器处理。x和y分量的Ωx和Ωy由下式给出:

（21）$\Omega x = \Omega y = \frac{1}{\sqrt{2}}\tilde{\Omega}$

例 1－模拟一般的入射平面波辐射

按照图 1 所示的对应于平面照射的布局进行模拟。该实例展示对模拟的无噪数据的操作方法。利用“角频谱”形式法、正则法计算衍射图案。图 3（a）至 3（f）表示模拟产生的图象。

所有图象的尺寸是 1.00cm×1.00cm，并提供一个在垂直横跨辐射传播方向的平面中的 256×256 象素的取样阵列。光的波长取为 632.8nm。z=0 平面中的强度以任意单位从 0 变到 1，如图 3（a）所示。在非零照度的区域内，最小强度是最大强度的 30%。（强度图象边缘周围的黑边对应于零强度）。从 0 变到π的入射相位示于图 3（b）中。

对应于距离 z=0 平面正负 2mm 的平面的图象分别如图 3（c）和 3（d）所示，并且分别具有任意单位的 1.60 和 1.75 的最大强度；在每个图象中传播导致的象差对比清晰可见。减去两个散焦的图象，产生强度导数，如图 3（e）所示。

然后按照图 2 中所示的计算机求解法对分别提供 z=0 平面中的强度值和强度变化率的图 3（a）和（e）所示的图象进行处理，以产生图 3（f）所示的还原相位图。注意，图 3（b）和 3（f）以相同的灰度等级描绘，表示还原相位在数量上是正确的。

图 4（a）至（h）表示一系列模拟图象，该图象举例说明相位的判定和随后向另一个象平面的反相传播。所有图象都是 256×256 象素，为 1cm×1cm 的尺寸，辐射波长等于 632.8nm。给定平面中辐射的强度和相位分别示于图 4（a）和 4（b）。图 4（c）至（e）分别表示 199,200 和 201mm 传播距离处的传播强度；注意在图 4（c）、（d）至（e）的强度测量中图 4（a）和（b）的信息混合。只利用图 4（c）、（d）至（e）的图象，相位还原算法就可得到图 4（f）中给出的 200mm 距离处传播场的相位图。图 4（d）和 4（f）的图象用于把场数字向后传播到初始平面。这样分别给出图 4（g）和 4（h）关于向后传播的强度和相位。这与图 4（a）和 4（b）非常好地吻合，因而证明了相位还原法能够用于定量地判定远离强度测量区域的场的幅度和相位。还注意到反相传播不局限在自由空间，反相传播也可以在一个已知的光学系统中进行。

例 2－点投影显微镜

如图 5 所示，从点辐射源 10 发出的诸如 x 射线、可见光或电子束的辐射能够穿过自由空间到达位于距点辐射源 d_{so} 的物体 11。该辐射穿过物体 11，并能够传播更远的距离 d_{od} 到达象平面 $I_1,I_2\cdots I_n$ 之一，在该平面中探测强度。这种探测利用标准装置如 CCD 装置、象板或其它能够登记且数字化强度分布的装置进行。然后改变距离 d_{so} 和/或 d_{od}，在图象中产生散焦并再一次测量强度分布。对应于零传播距离的接触式成象的 $d_{od}=0$ 的情况包括在内，作为一次测量。

然后利用上述的相位恢复法处理强度数据，恢复象平面中分离的强度和相位信息。把诸如波长、象素大小和散焦距离的参数加入到如上所述的算法中，产生关于象平面中相移大小的定量信息。

在某些情况下，需要物体重现在与后方的衍射面 $I_1\cdots I_n$ 相对的物平面中。在这种情况下，上面得到的强度和定量的相位信息可以用于把光场反向传播到物平面，由此数字再现实际物体相位和强度结构的图象。这可以利用标准衍射码实现。

在某些情况下，希望取不止两个图象以得到更好的强度导数$\partial I/\partial z$ 推算值，在这种情况下再一次改变距离 d_{so} 和/或 d_{od}，并取另一个图象，重复此过程直到获得所需数目的图象。然后可以使一个函数与这些数据拟合，计算 dI/dz 并用到相位还原算法中，代替常规采用的两个图象的简单相减。

例 3－相位幅度定量显微镜

图 6 是相位幅度定量显微镜的简图。利用白光科勒照明的光源 15 对一个样本进行照明。这种光源在光学显微镜中一般都会找到。光穿过物体 16 并由显微成象系统 17 采集，然后转送到达 CCD 摄像机 18 或其它具有平面成象面的数字成象装置。采集三个图像：一个处于焦点的图象 Io，和两个轻微偏离焦点的图象 I_+ 和 I_-。通过适当的装置如驱动系统 19 得到散焦，以调节显微镜聚焦钮。产生的散焦通常非常小，以致于空间分辨率的衰减非常小，尽管使用的最佳散焦量由样品特性和图象的几何形状如放大率、数值孔径等决定。

当拍摄图象时聚光器的数值孔径选成小于采用的物镜的数值孔径。如果不是这样，则会发生严重的图象衰减，尽管使聚光器和物镜的数值孔径不同的精确量涉及到图象的保真度和空间分辨率之间互相折中，而最佳差异取决

于样品特性和采用的光学器件。

从采集的图象 I_+和 I.减去强度数据以进行强度变化率（强度导数）的典型测量。通过此典型测量以及采集图象 I_0的强度数据，上述的方法可以用于对象平面中相移的幅度产生定量的信息。

作为点投射的例 2，可能有这样的情况：希望取不止两个图象以得到更好的强度导数 dl/dz 推算值。然后可以使一个函数与这些数据拟合，计算 dl/dz 并用到相位判定法中，代替常规采用的两个图象的简单相减。

还可以按反射几何操作此系统以得到表面层析成象。操作原理相同，但光学装置本身必须对折以形成反射几何。除此，该方法是一样的。

对于某些特定的应用，还可以用滤波器把光滤成特定的波长，虽然这对于上述方法并非必须，因为用白光可以一样很好地工作。

图 7 表示一项实验实施过程。奥林巴斯 BX-60 光学显微镜 20 配备有一组 UMPlan 冶金物镜和一个通用聚光器以提供科勒照明。为了能够将结果与现有的成象模式相比较，给此显微镜还提供 Nomarski DIC 光学装置和一组翻盖式校正的 UplanApo 物镜，使得能够利用相位还原和 Nomarski DIC 拍摄相同视场的图象以用于定量比较的目的。把配备有 1300 × 1035 象素的柯达 KAF-1400 CCD 芯片的 12 位科研级（scientific grade）测光 SenSys CCD 摄像机 21 加到显微镜的 0.5x 视频出口以得到样品的数字图象。

本发明此实施例的相位恢复技术需要获取散焦的图象。把步进电机驱动系统 22 连接到显微镜的聚焦钮。此步进电机 22 连接到也用于控制 CCD 摄像机 21 的 133MHz 奔腾 PC23 的并行出口，使得能够全自动地获得经过焦点的图象序列。把此数据获取系统连接到写入的客户软件以从 CCD 图象中还原相位图象，由此能够全自动地获取图象和进行数据处理。

为了证实利用本发明的相位成象可以精确地测量显微镜样品的相位结构，必须有一个具有良好的几何特征和折射率分布的样品。采用一个 3M F-SN-3224 光纤（由 3M 制造的商用光线）。利用原子力显微镜和商业形貌技术而获得的折射率分布的独立测量能够精确地预测出射波场的相位结构。此种光纤的另一个优点在于它有三个不同折射率区域，即内外包层和芯，而大多数光纤只有一个包层和芯。这给相位成象系统提供一项额外的测试，因为它必须精确地对三个而非两个折射率转变段成象。

光纤侧窗式（side-on）成象，从而在光纤结构的所有层获得折射率的投

影。这首先通过把光纤浸泡到丙乙醇中剥去塑料外壳、再用一个商用光纤剥离器除去塑料涂层而完成。把一小段光纤、典型的是一段大约一至两厘米的光纤放在显微镜滑动片上，浸没在折射率匹配液池中并用 0.15m 厚的玻璃盖片覆盖。玻璃盖片的任何倾斜都将在恢复的相位中导致伪倾斜，因此把两小段直径均类似于样品的光纤平行于主光纤放置，并距主光纤任一侧大约 0.5cm。然后把玻璃盖片横跨三段光纤放置，以确保它尽可能地平行于显微镜滑动片。

利用奥林巴斯 40 × 0.7NA UplanApo 物镜拍摄光纤的图象，这意味着 500 × 500 个象素的图象很方便地跨越光纤的整个宽度，并且聚光器设置成 NA=0.2。光纤对于 632.8nm（HeNe 激光器）光的折射率曲线是已知的，所以把 625±10nm 带通干涉滤波器插入到照明系统中以确保在尽可能接近能得到光纤数据的波长处得到恢复的相位曲线。图 8 中示出了此样品在最佳聚焦的平面和在最佳聚焦平面任一侧±2μm 处的强度图象，旁边是利用上述的相位还原算法从两个散焦图象分离出来的相位图象。注意，光纤在位于焦点的图象中实际上是不可视的，在稍稍散焦的图象中才能看见，而光纤和折射率不同的区域、包括 4μm 直径的芯在相位图象中是清晰可见的。

图 9 表示光纤的相位测量值和期望值的比较曲线，图中的误差表示代表沿光纤长度的数据的一个标准偏差。这种变化被认为主要是由于玻璃盖片和显微镜滑动片厚度的空间变化所致。可以看到，恢复的相位曲线和期望的相位曲线彼此很好地吻合，预测的曲线位于本发明技术所产生的曲线的误差带之内。

例 4－三维光学相位层析成象

本例演示了通过利用层析成象计算技术相位定量显微镜在物体三维成象中的应用。这可以利用本发明的技术进行，因为物体导致的相移可以独立于物体的任何强度变化而直接测得，所以反 Radon 变换可以用于直接从投影数据中分离三维结构。虽然提供的实验演示是在光学领域，但此原理同样可以用在 X 射线、电子束和中子相位层析成象。

为了采集三维数据组，除了为了在图 10 所示光学显微镜成象区域内旋转样品的目的而设置的旋转台 24 之外，还使用前面实例中描述的同样的光学显微镜。旋转台 24 在图 11 中有更详细的描述。

前述的配置包括一个连接到用于控制 CCD 摄像机 21 的 133MHz 奔腾

PC 并行出口的步进电机驱动系统，以驱动显微镜的聚焦钮。第二步进电机 25 连接到电机驱动系统 24 的第二通道以出于旋转样品的目的。此数据获取系统连接到写入的客户软件以从 CCD 图象中还原相位图象，由此能够全自动地获取图象和进行数据处理。利用与例 3 中相同的显微镜-配备有一组翻盖式校正的 UplanApo 物镜和通用聚光器的奥林巴斯 BX-60 光学显微镜提供科勒照明而收集每个数据组。利用在显微镜的 0.5x 视频出口配备有 1300 × 1035 象素的柯达 KAF-1400 CCD 芯片的 12 位科研级测光 SenSys CCD 摄像机 21 捕获数字图象。

为了制备成象用的光纤样品 26，通过把光纤浸泡在丙乙醇中、并再用商用光纤剥离器剥去塑料涂层而除去大约为一厘米的一段光纤的端部小区中的塑料外壳。然后把此光纤截成长度约为一英寸的小段，未剥离的端部滑到计量器 26 的 100mm 注射针头 27 的端部中，并用 5 分钟的少量的环氧树脂粘合剂固定到适当的位置。底座 28 用于把针 27 连接到步进电机 25。折射率匹配的溶液池 29 环绕光纤，如图 11 所示，显微镜滑动片 30 用硅润滑脂固定到光纤之下，0.15mm 厚的玻璃盖片 31 放在顶面之上。

利用设置为 NA = 0.1 的聚光器和奥林巴斯 20 × 0.45NA UMPlan 物镜按照与上述例 3 相同的方式采集透射强度图象。拍摄的图象为 500 × 500 个象素大小，它方便地跨越不仅光纤的宽度，而且还是整个行进的区域。因为光纤对于 632.8nm（HeNe 激光器）光的折射率曲线是已知的，所以把 625±10nm 带通干涉滤波器插入到照明系统中以确保在尽可能接近能得到光纤数据的波长处得到还原的相位曲线。在最佳焦点任一侧±2μm 处拍摄的图象上处理每个相位图象，并从两个图象之间以 1.8 度的步长等间隔分布整个 180 度的 100 独立角度中采集数据。在图 12 中示出了典型的层析成象的相位图象。

然后逐层地对滤波的反向投影算法相加，把再现的相位图象形式的投影数据处理成三维数据组，用 IDL/PV-Wave 编程语言写成的编码执行层析成象再现。首先，通过取得相位数据组的曲线并把它们排成正弦图（sinogram）而把数据组与公共旋转轴对齐。然后用一正弦曲线与数据的显著特征拟合以便判定旋转轴的位置，并数字移动数据，使得旋转轴与正弦图的中间纵行重合以简化再现过程。用一条曲线与相位曲线拟合也能够使失准的数据组移动回到一条线上，这样反过来提高再现图象的质量。然后，在对投影滤波后通过向后投影排序的相位数据把此重新校准的投影数据经过物镜变换成一个

单层，以抑制与后投影再现有关的 1/r 点扩散函数。然后把整个物体的这些层叠置在彼此的顶部，从而产生样品的三维折射率分布。

图 13 中示出了经过再现的折射率分布的一片。注意到，不同折射率的三个区域全部可以清晰地分辨，并且这些区域形成同心圆柱，正如对此样品的预料。图 13 中此光纤的已知折射率分布（实线）的旁边是此再现的折射率分布中心的曲线（虚线）。层析成象再现中的值非常接近已知的曲线，这肯定了相位定量层析成象技术。

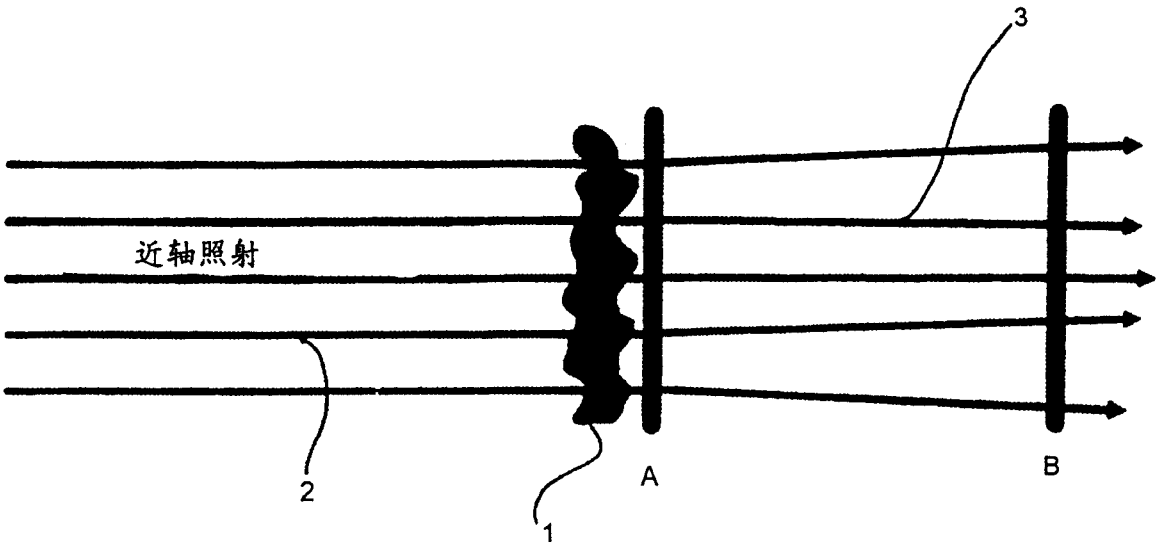


图 1(a)

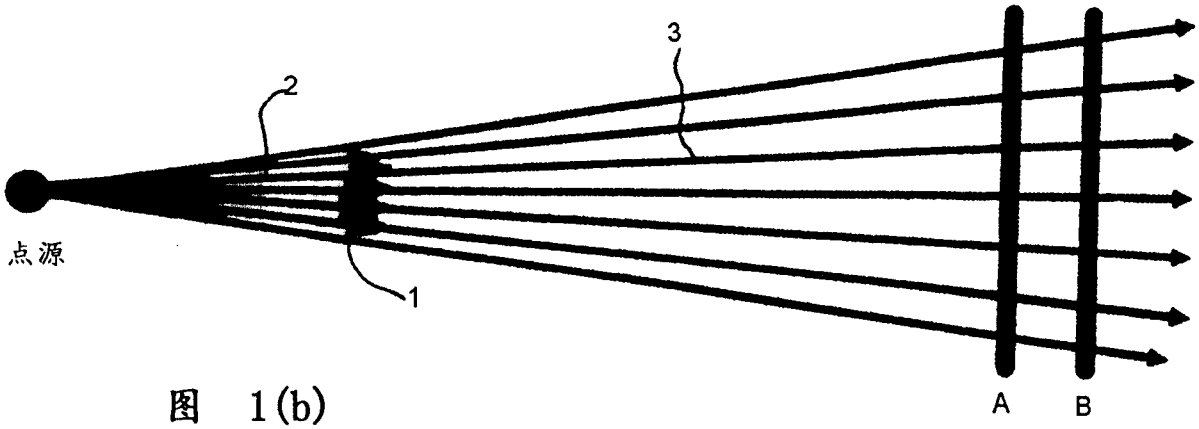


图 1(b)

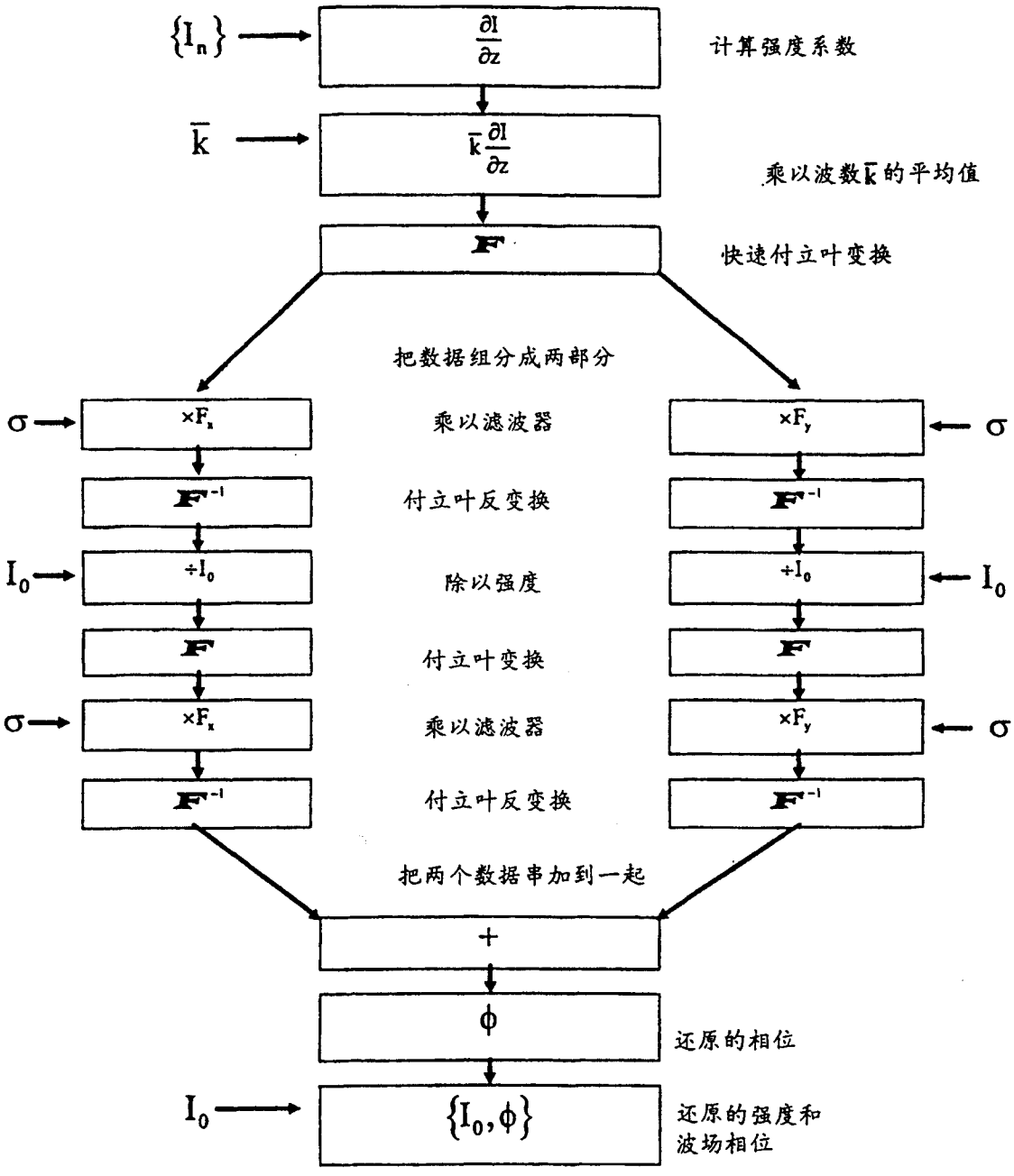
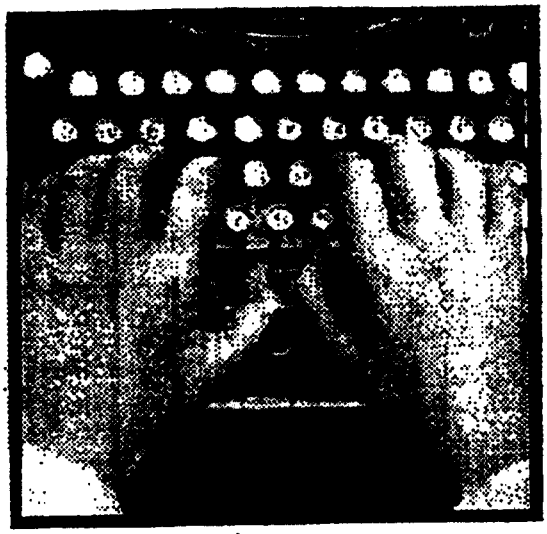
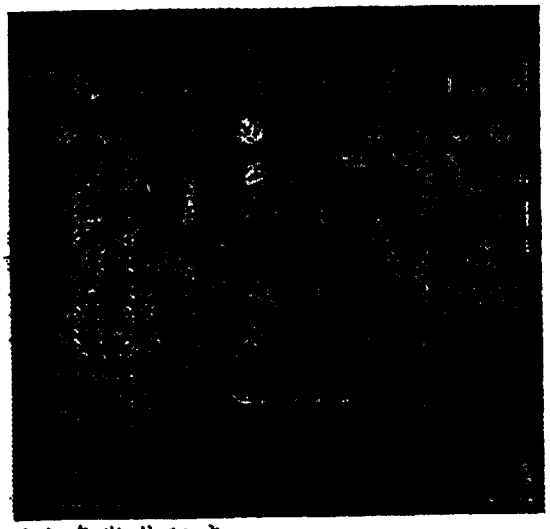

{I_n}
∂I/∂z
计算强度系数
k̄
k̄ ∂I/∂z
乘以波数k̄的平均值
F
快速付立叶变换
把数据组分成两部分
σ
×F_x
乘以滤波器
×F_y
σ
F^-1
付立叶反变换
F^-1
I_0
÷I_0
除以强度
÷I_0
I_0
F
付立叶变换
F
σ
×F_x
乘以滤波器
×F_y
σ
F^-1
付立叶反变换
F^-1
把两个数据串加到一起
+
φ
还原的相位
I_0
{I_0, φ}
还原的强度和
波场相位

图 2

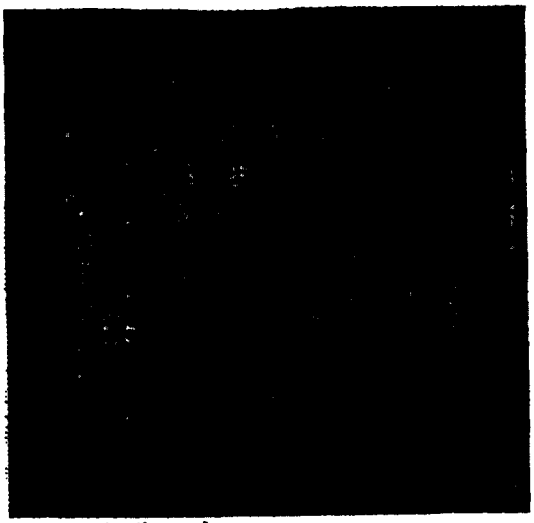


(a)孔径平面强度

(b)孔径平面相位



(c)负散焦强度

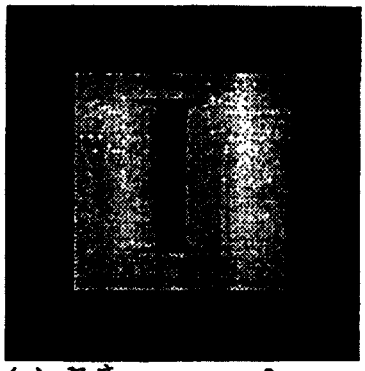


(d)正散焦强度

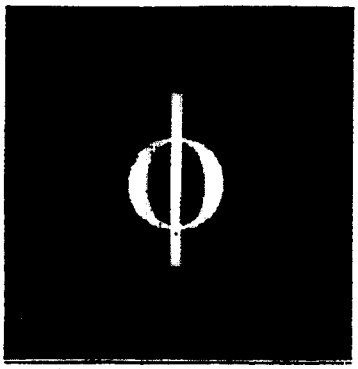
(e)强度导数

(f)分离出的相位

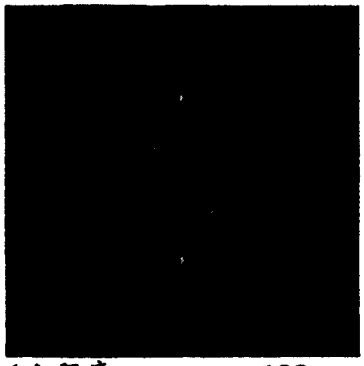
图 3



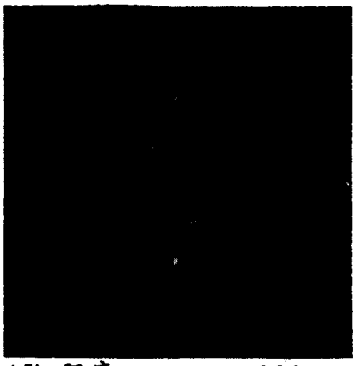
(a) 强度， z = 0 mm



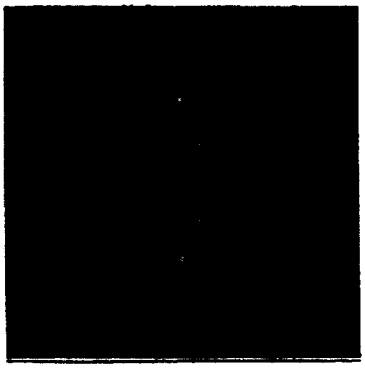
(b) 相位， z = 0 mm



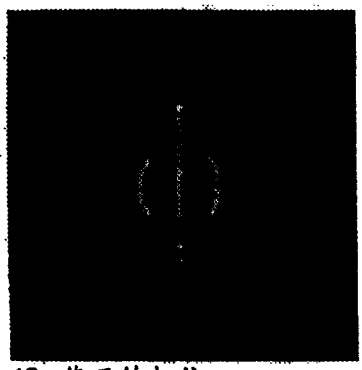
(c) 强度， z = 199 mm



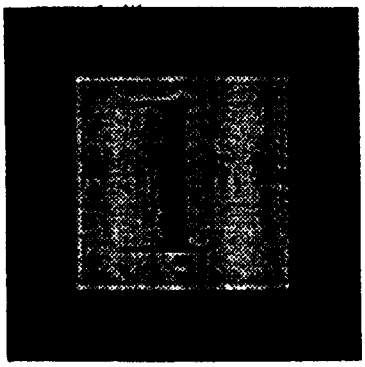
(d) 强度， z = 200 mm



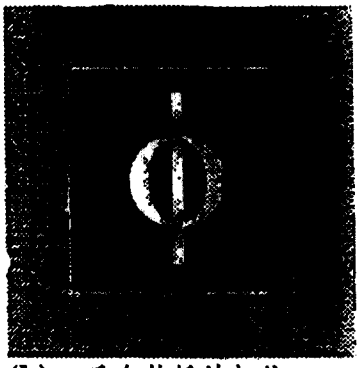
(e) 强度， z = 201 mm



(f) 修正的相位， z = 200 mm



(g) 反向传播的强度， z = 0 mm



(h) 反向传播的相位， z = 0 mm

图 4

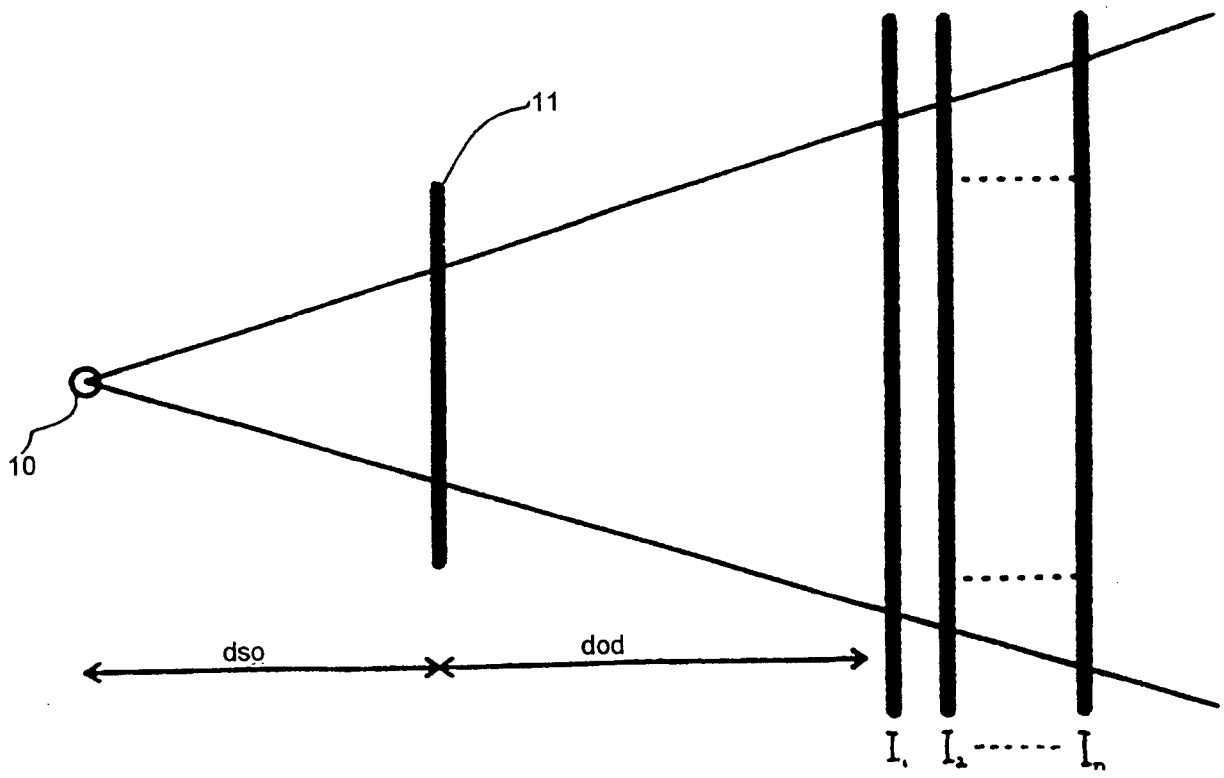


图 5

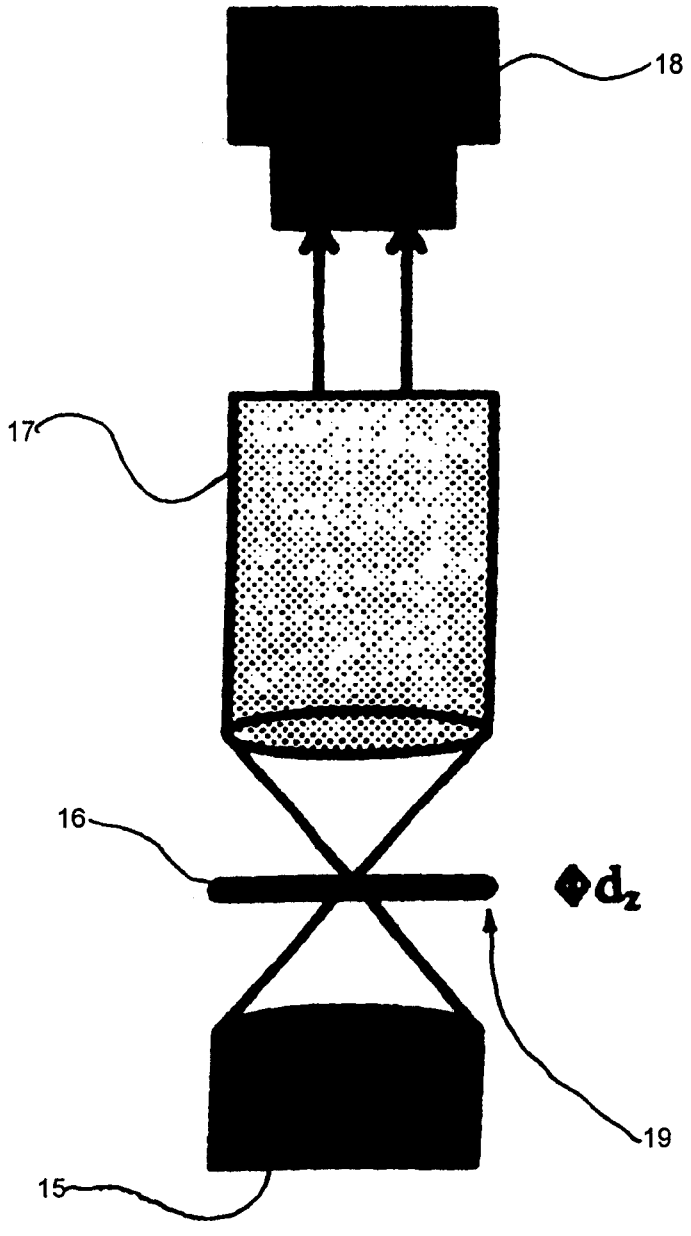


图 6

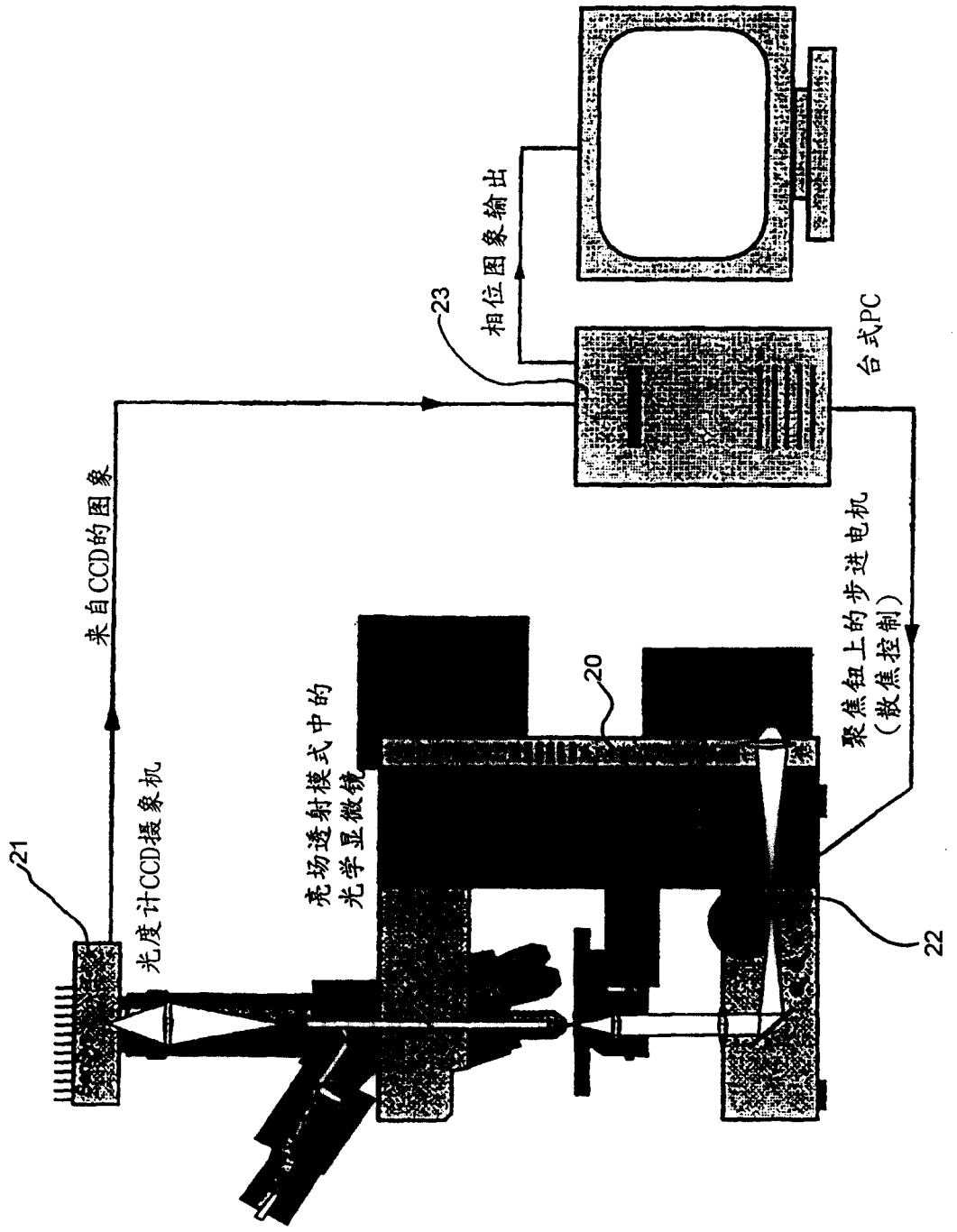

来自CCD的图象
光度计CCD摄象机
21
亮场透射模式中的
光学显微镜
20
聚焦钮上的步进电机
(散焦控制)
22
台式PC
23
相位图象输出

图 7

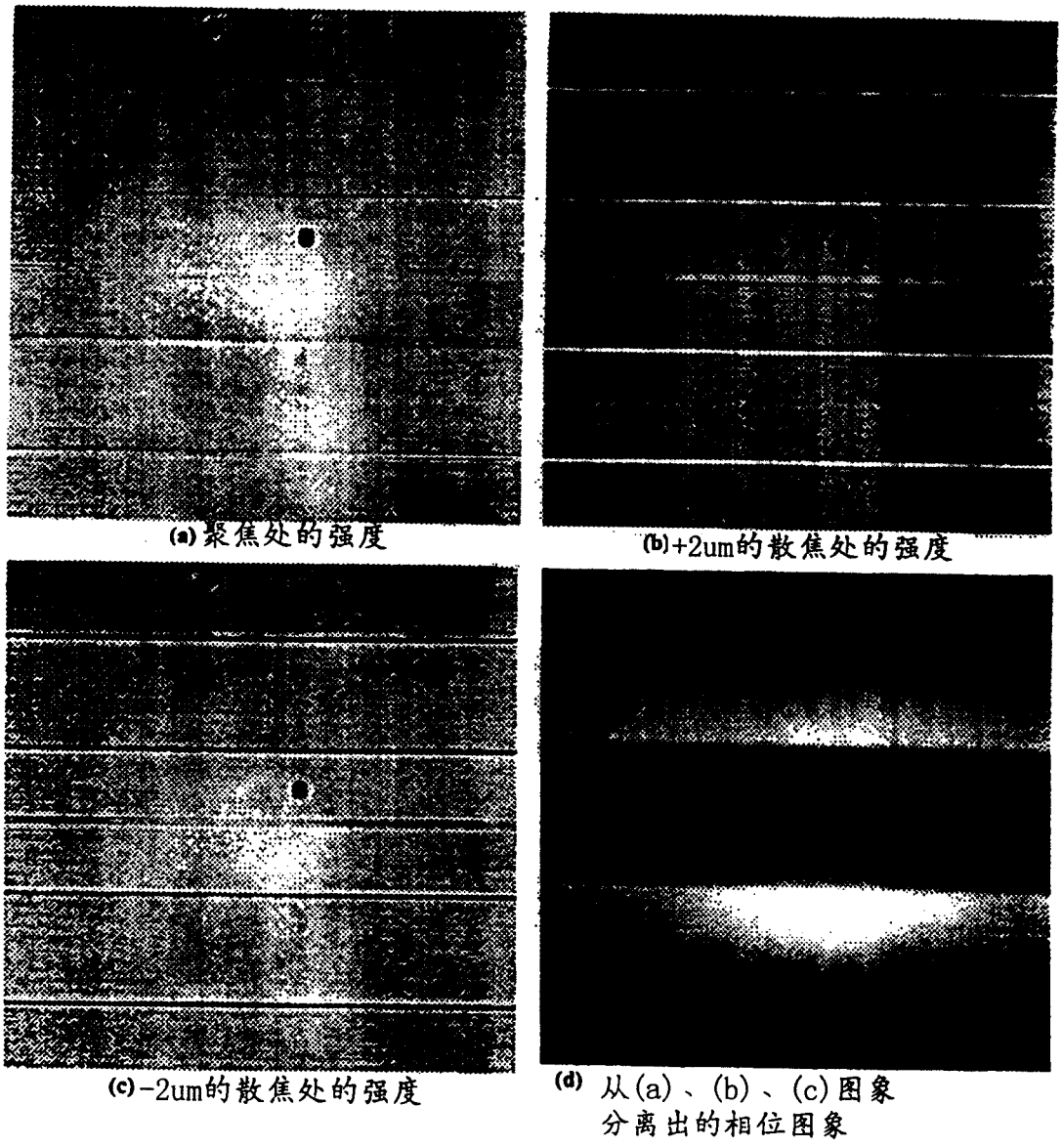


图 8

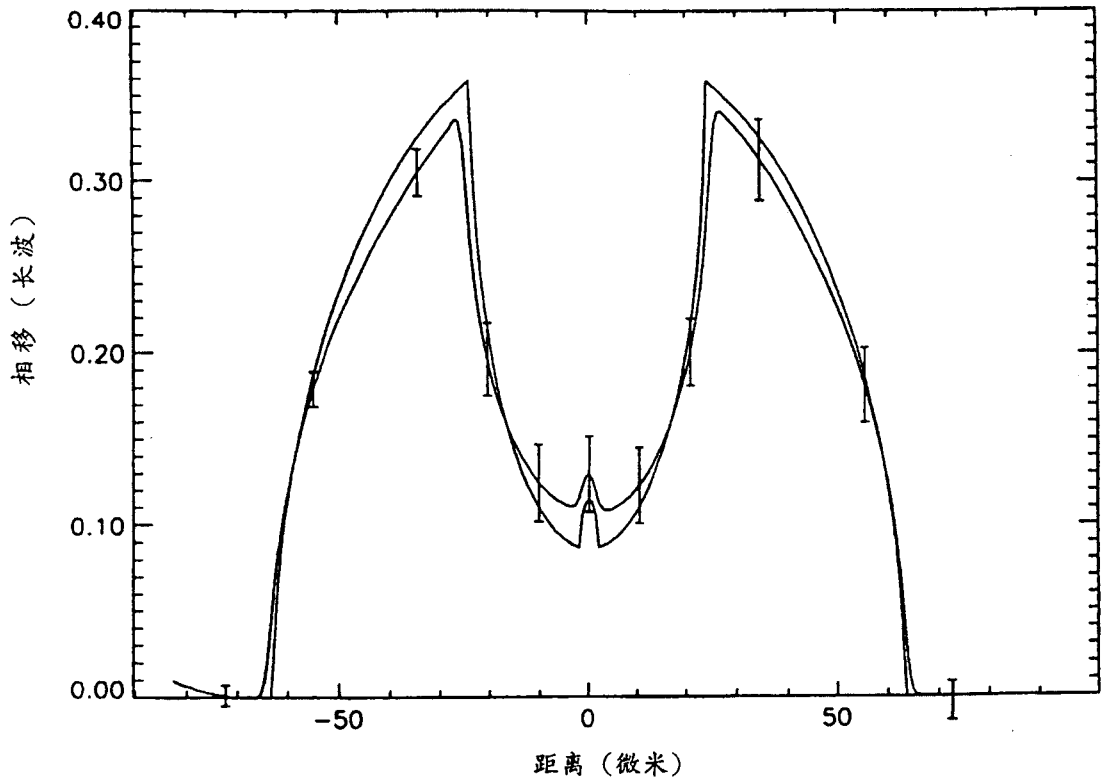


图 9

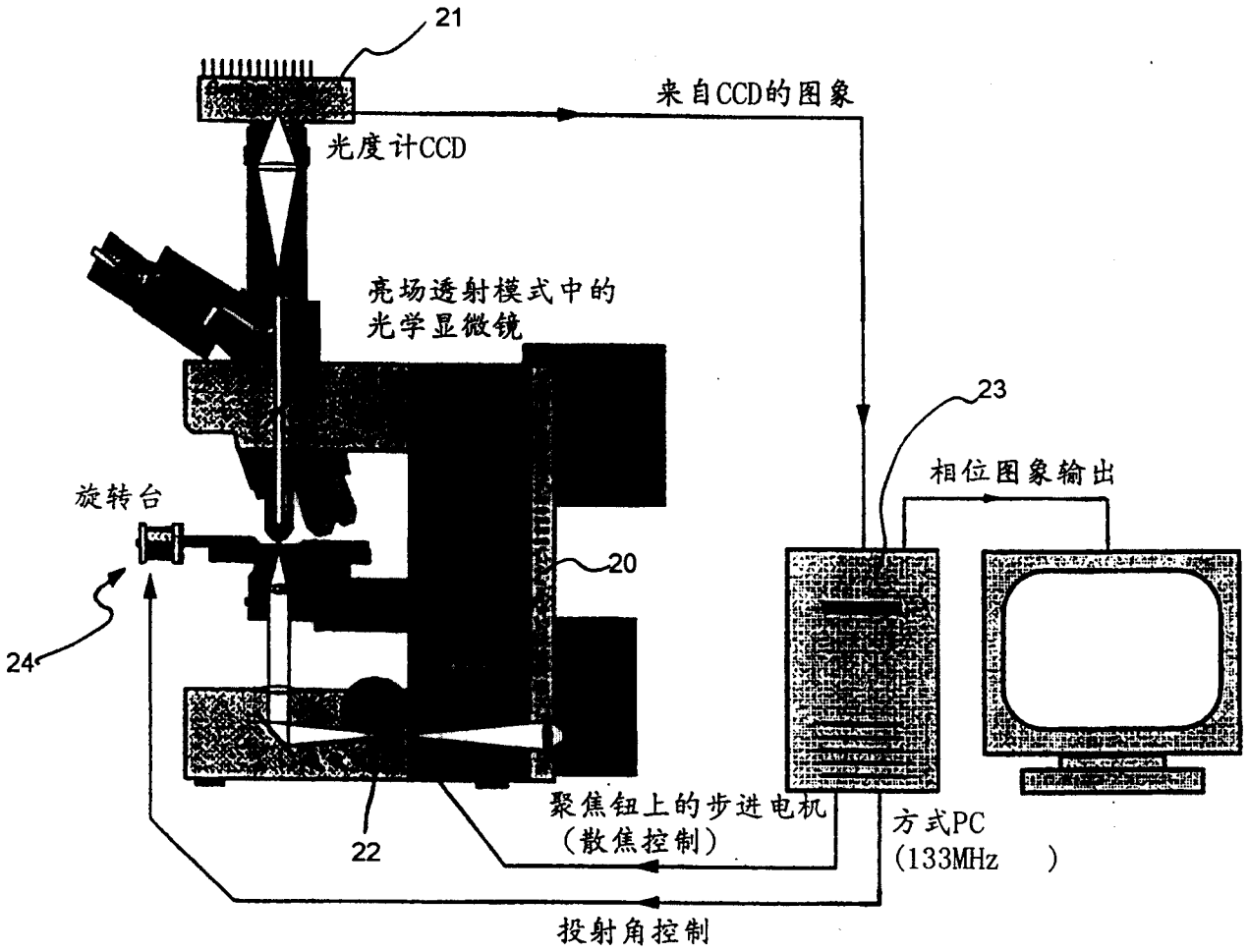

21
来自CCD的图象
光度计CCD
亮场透射模式中的
光学显微镜
23
相位图象输出
旋转台
20
24
聚焦钮上的步进电机
（散焦控制）
方式PC
(133MHz)
22
投射角控制

图 10

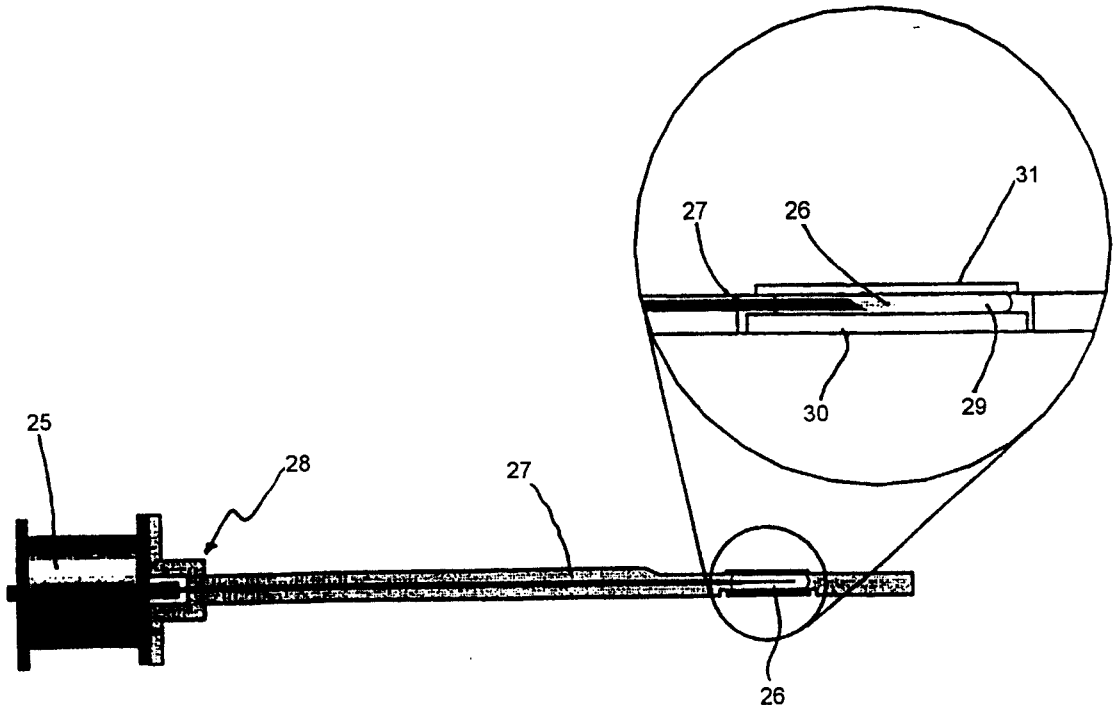


图 11

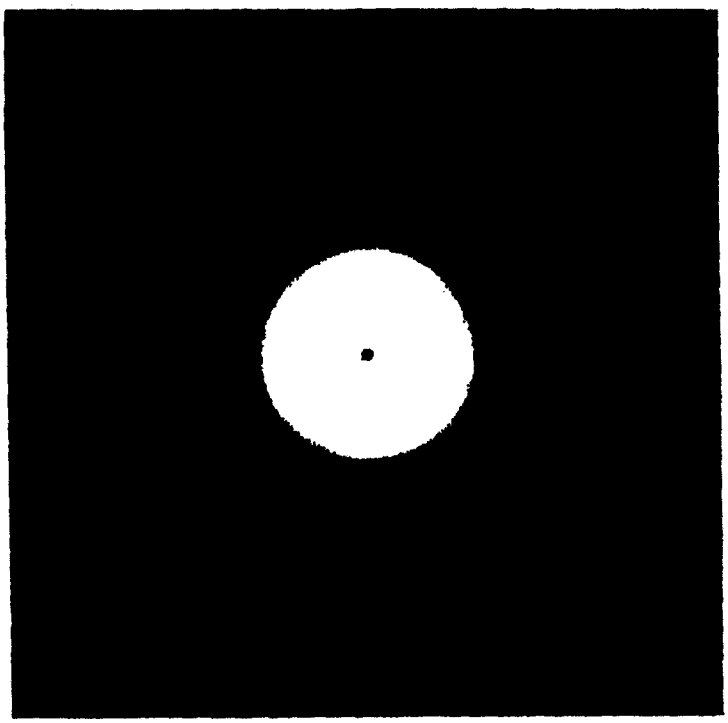


图 12

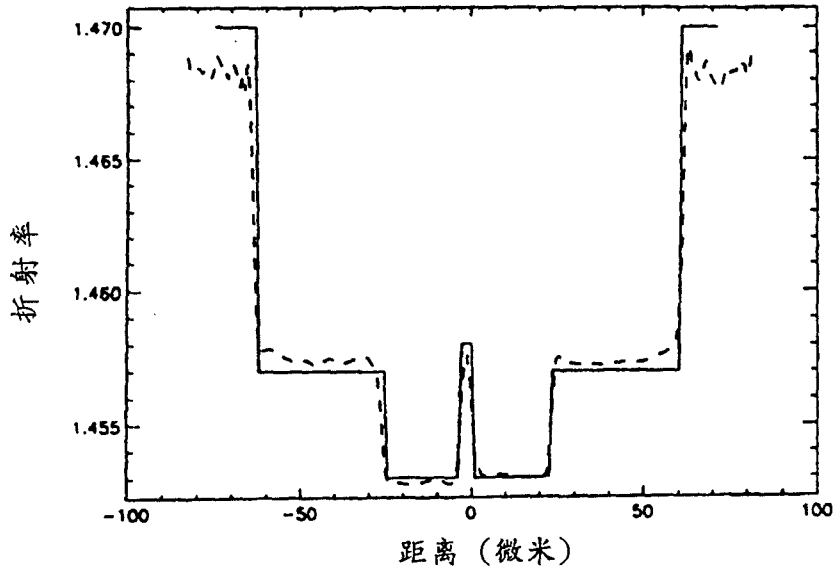


图 13