



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103200870 B

(45) 授权公告日 2015. 11. 25

(21) 申请号 201180045975. 0

(22) 申请日 2011. 09. 22

(30) 优先权数据

1016088. 5 2010. 09. 24 GB

1111423. 8 2011. 07. 05 GB

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 03. 24

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/GB2011/051786 2011. 09. 22

(87) PCT国际申请的公布数据

W02012/038749 EN 2012. 03. 29

(73) 专利权人 相位聚焦有限公司

地址 英国南约克郡谢菲尔德

(72) 发明人 约翰·马瑞斯·罗登伯格

安德鲁·梅登 马丁·汉弗莱

(74) 专利代理机构 深圳市千纳专利代理有限公司

司 44218

代理人 张亚宁

(51) Int. Cl.

A61B 6/02(2006. 01)

G01N 21/47(2006. 01)

G01T 1/29(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101820817 A, 2010. 09. 01, 权利要求 1、43.

CN 1985188 A, 2007. 06. 20, 全文.

US 6483891 B1, 2002. 11. 19, 全文.

WO 2010/064051 A1, 2010. 06. 10, 全文.

审查员 叶思

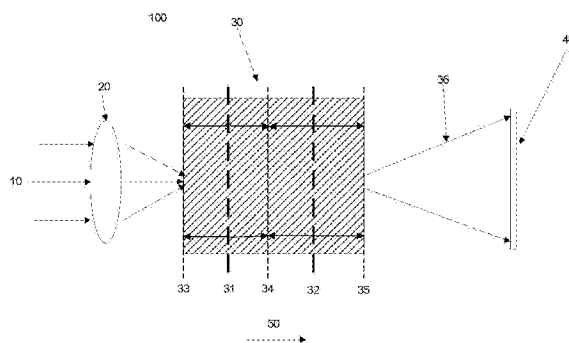
权利要求书3页 说明书11页 附图7页

(54) 发明名称

三维成像

(57) 摘要

一种提供图像数据的方法,所述图像数据用于构造三维目标对象的区域的图像,该方法包括提供来自辐射源的、指向目标对象的入射辐射,检测由所述目标对象散射的辐射的强度,以及确定所述目标对象内相应多个切片中的每个切片的图像数据,各自表示所述目标对象内相应深度处目标对象的一个或多个特征,其中通过迭代过程基于检测的辐射的强度来确定所述图像数据,其中逐步地更新多个切片中的每个切片的图像数据的运行估计。



1. 一种提供图像数据的方法,所述图像数据用于构造三维目标对象的区域的图像,所述方法包括:

提供来自辐射源的、指向目标对象的入射辐射;

检测由所述目标对象散射的辐射的强度;以及

确定所述目标对象内相应多个切片中的每个切片的图像数据,各自表示所述目标对象内相应深度处目标对象的一个或多个特征,其中通过迭代过程基于检测的辐射的强度来确定所述图像数据,其中用每次迭代逐步地更新多个切片中每个切片的图像数据的运行估计。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其中基于第一表面和第二表面之间的对象的性质的积分,确定每个切片的图像数据,其中所述对象的性质是所述对象的光学势或原子势的其中之一。

3. 根据权利要求 1 所述的方法,包括确定指示所述目标对象的至少一个特征的每个切片的传递函数的运行估计。

4. 根据权利要求 2 所述的方法,包括确定指示所述目标对象的至少一个特征的每个切片的传递函数的运行估计,其中所述传递函数基于所述表面之间的对象的性质的积分。

5. 根据权利要求 3 或 4 所述的方法,其中通过每个步骤重新估计传递函数,提高所述传递函数的运行估计的精度。

6. 根据权利要求 1、2、3 或 4 所述的方法,包括至少响应于在相对于所述目标对象的第一位置和 second 位置处检测的所述辐射的强度,来提供所述图像数据。

7. 根据权利要求 6 所述的方法,其中使用柔和变化的透射率函数或照明函数,形成相对于所述目标对象是可移动的第一位置和 second 位置。

8. 根据权利要求 1、2、3 或 4 所述的方法,包括:

确定表示入射在所述多个切片中的每个切片上的入射辐射的一个或多个特征的探测函数;

基于与每个相应切片相关联的探测函数和传递函数,确定所述切片中的每个切片的出射波估计;以及

通过将每个出射波传播到表面并且在该表面组合每个出射波,确定组合的出射波估计。

9. 根据权利要求 8 所述的方法,其中所述探测函数表示与每个切片的深度相对应的、在自由空间中传播的入射辐射的估计。

10. 根据权利要求 9 所述的方法,包括将组合的出射波从所述表面传播到所述检测器以确定所述检测器处的预期的散射图案。

11. 根据权利要求 10 所述的方法,包括根据检测的强度,校正所述预期的散射图案的至少一个特征。

12. 根据权利要求 11 所述的方法,包括逆向传播经过校正的预期的散射图案,以提供所述表面处的组合的出射波的更新估计。

13. 根据权利要求 12 所述的方法,包括确定与每个切片相对应的组合的出射波的更新估计的一部分,以及逆向传播相应的部分至每个切片。

14. 根据权利要求 13 所述的方法,包括基于逆向传播的相应的部分,更新与每个相应

切片相关联的传递函数。

15. 根据权利要求 9 所述的方法,其中通过所述出射波的总和在所述表面处组合所述出射波。

16. 根据权利要求 13 所述的方法,其中通过所述出射波的总和在所述表面处组合所述出射波,以及通过减去从其他切片传播到所述表面的出射波,来确定与每个切片相对应的组合的出射波的部分。

17. 根据权利要求 13 所述的方法,包括基于组合的出射波的更新估计的逆向传播的相应的部分,更新在所述切片中的一个切片处的探测函数。

18. 根据权利要求 1 至 4 中的任何一项所述的方法,包括:

确定表示第一切片上的入射辐射的一个或多个特征的探测函数;

基于与所述第一切片相关联的传递函数和探测函数,确定所述第一切片的第一出射波估计;

传播所述第一出射波至第二切片,其中传播的第一出射波形成所述第二切片的探测函数;以及

基于与所述第二切片相关联的传递函数和探测函数,确定所述第二切片的第二出射波估计。

19. 根据权利要求 18 所述的方法,包括确定所述对象的一个或多个其他切片的探测函数和出射波估计。

20. 根据权利要求 18 所述的方法,包括将出射波从所述对象的最后切片传播到所述检测器,以确定所述检测器处的预期的散射图案。

21. 根据权利要求 20 所述的方法,包括根据检测的强度校正所述预期的散射图案的至少一个特征。

22. 根据权利要求 21 所述的方法,包括逆向传播经过校正的预期的散射图案以提供来自所述最后切片的出射波的更新估计。

23. 根据权利要求 22 所述的方法,包括基于所述出射波的更新估计,更新与所述最后切片相关联的传递函数。

24. 根据权利要求 21 或 22 所述的方法,包括基于所述出射波的更新估计,更新入射在所述最后切片上的探测函数。

25. 根据权利要求 24 所述的方法,包括逆向传播更新的探测函数至先前的切片,作为该切片的更新的出射波。

26. 一种用于提供图像数据的装置,所述图像数据用于生成目标对象的至少一个区域的图像,所述装置包括:

辐射源,用于提供目标对象处的入射辐射;

至少一个检测器设备,用于检测由所述目标对象散射的辐射的强度;以及

处理器,所述处理器响应于检测的散射辐射的强度来提供图像数据,其中所述处理器被配置成提供所述目标对象内相应多个切片中的每个切片的图像数据,各自表示所述目标对象内相应深度处目标对象的一个或多个特征,其中通过迭代过程基于检测的辐射的强度来确定所述图像数据,其中用每次迭代逐步地更新多个切片中的每个切片的图像数据的运行估计。

27. 根据权利要求 26 所述的装置,其中所述处理器被配置成执行根据权利要求 2 至 25 中的任一项所述的方法。

三维成像

技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于提供图像数据的方法和装置,从所述图像数据可生成目标对象的图像。尤其是,虽然不是排他的,本发明的实施例涉及用于获得图像数据的方法和装置,从所述图像数据可生成目标对象的三维图像。

背景技术

[0002] 就所有目的而言,通过引用结合在此的本申请人的专利 W02005/106531 公开了一种用于提供图像数据的方法,可用于基于若干衍射图案的测量的强度来构造对象的图像。这种方法被称为重叠关联迭代引擎(PIE)。在 PIE 中,迭代相位恢复算法被用于确定波场通过对象时或被对象反射时由该对象引起的对波场的吸收和相变的估计。此方法使用多个衍射图案中的冗余来确定所述估计。

[0003] 就所有目的而言,通过引用结合在此的本申请人的专利 W02010/064051 公开了一种增强的 PIE (ePIE) 方法,其中没有必要知道或估计探测函数。取而代之,公开了这样一个过程,其中使用被利用来确定与目标对象相关联的目标函数的运行估计的探测函数的运行估计,逐步地迭代计算探测函数。

[0004] 通过引用结合在此的本申请人的专利 W02008/142360 公开了一种三维成像方法。在该方法中,在照明光源下游多个平面处确定照明的复波场。通常,这些平面横切对象。使用每个平面上的照明的知识,可执行如在 W02005/106531 或 W02010/064051 中公开的迭代过程,以构建在该平面处的对象的估计,由此可产生在该平面处的对象的图像。通过为多个平面中的每个平面重复该迭代过程,可获得对象的三维图像。

[0005] 然而,已经注意到了一些问题,因为与毗邻感兴趣平面的平面(例如感兴趣平面前面(上游)或后面(下游)的平面)相关的菲涅耳型条纹,使得用 W02008/142360 的方法产生的图像复杂化。而且,该方法没有考虑多重散射效应。也就是说,它没有考虑当照明传播通过对象时对象对于照明的影响,例如由于来自照明先前穿越的对象的上游层的散射导致的。

[0006] 本发明实施例的目的是至少减轻现有技术的一个或多个问题。

附图说明

[0007] 现在,仅作为示例的方式,参考附图描述本发明的实施例,其中:

[0008] 图 1 示出了根据本发明实施例的装置;

[0009] 图 2 示出了根据本发明实施例的第一种方法;

[0010] 图 3 示出了根据本发明实施例的与图 2 的方法相关联的装置;

[0011] 图 4 示出了根据本发明实施例的第二种方法;

[0012] 图 5 示出了根据本发明实施例的与图 4 的方法相关联的装置;

[0013] 图 6 示出了根据本发明另一个实施例的装置;

[0014] 图 7 示出了根据本发明其他实施例的装置;

[0015] 图 8 说明了根据本发明实施例确定成多个取向的对象的图像数据;以及

[0016] 图 9 进一步说明了根据本发明实施例确定成多个取向的对象的图像数据。

具体实施方式

[0017] 在本发明的一些实施例中,在多个切片处确定照明波场。在每个切片处确定对象的估计。确定来自每个切片的出射波,作为照明与对象在该切片处相互作用的结果。出射波传播到求和平面,该求和平面可以是也可以不是在其所在之处确定对象的估计的平面,其中确定合成波作为来自传播到该平面的或者在该平面(其中总和场也是在其之处确定出射波的平面)处确定的多个波场的贡献的结果。合成波传播到检测器的平面,在那里确定衍射图案的估计。在反向传播到在其之处将要确定对象的估计的每个切片之前,基于由检测器测量的衍射图案,校正估计的衍射图案。基于反向传播的波,更新对象的估计。迭代地执行该方法,其中用每次迭代逐步地更新对象的多个估计。换句话说,在该方法的每次迭代过程中,连续地更新多个估计。有利地,这允许要考虑的各种平面之间的相互作用。

[0018] 在其他实施例中,在第一切片处确定照明波场,在该第一切片处将要确定对象的估计。确定来自该切片的出射波,并且该出射波传播到在其之处将要确定对象的估计的另一切片。换句话说,来自先前切片的传播的出射波被用作后续切片处的照明波场。可从后续切片确定出射波,并且对所有期望的感兴趣切片重复该过程。在最后切片处,出射波被传播到检测器的平面。在检测器平面处记录的数据被用来调节在检测器处计算的波的模数之后,该波被反向传播到对象的最后切片或出口。以这样的一种方式,即通过对象向回追踪涉及多重散射的顺序传播,基于反向传播的波,更新对象的估计和在对象内传播的波。

[0019] 图 1 说明了根据本发明实施例的装置 100。装置 100 适于提供对象 30 的三维图像数据,虽然不是排他的,其可用于产生对象的至少区域的三维图像数据。关于三维图像数据,它意味着涉及对象 30 的多个切片的图像数据,如切片 31、32,它们横切对象 30。虽然示出了两个切片 31、32,可以设想图像数据可涉及两个以上的切片。尤其是,切片沿光轴 50 的方向可被隔开。虽然切片 31、32 示出为平面,应理解,所述切片并不一定需要是平面,即是平坦的。切片 31、32 可以是其他形状,如弯曲的。

[0020] 虽然在图 1 中未示出,辐射源是辐射 10 的源,其落在聚焦装置 20 上,例如一个或多个透镜,使其照射目标对象 30 的区域。这样的照明不需要通过透镜形成,但可以通过任何种类的光学装置、光阑或源产生,只要所得到的撞击在对象上的波基本是局限化的并且在它里面具有入射光束的角度分布,但可能是任意的角度。

[0021] 要理解的是,术语辐射应被广义地解释。术语辐射包括各种波前。辐射包括来自辐射源的能量。这将包括电磁辐射,所述电磁辐射包含 X-射线、发射的例如电子的粒子。其他类型的辐射包括声辐射,例如声波。这种辐射可以由波前函数 $\psi(x,y)$ 表示。如本领域普通技术人员将理解的那样,这种波函数包括实部和虚部。这可以用波函数的模数和相位来表示。 $\psi^*(x,y)$ 是 $\psi(x,y)$ 的复共轭,并且 $\psi(x,y)\psi^*(x,y) = |\psi(x,y)|^2$,其中 $|\psi(x,y)|^2$ 是强度,其对于波函数是可以测量的。

[0022] 聚焦装置或透镜 20 形成探测函数 $P(x,y)$,其被布置成选择目标对象 30 的区域用于调查。 $P(x,y)$ 是在诸如切片 31 的平面上计算的该波场的复稳定值。可以为多个切片 31、32 中的每个切片计算出相应的探测函数。

[0023] 因此,入射辐射 10 落在目标对象 30 的上游侧,并且在透射时被目标对象 30 散射。目标对象 30 对入射辐射可以是至少部分透明的。目标对象 30 可能会或可能不会具有一些重复的结构。另外,目标对象 30 可以是全部或部分反射的,在这种情况下,基于反射的辐射测量散射图案。

[0024] 在辐射与对象 30 相互作用之后,因此形成出射波 $\psi(x, y)$,这可以近似为一系列的透射率函数,如将要解释的那样。在本发明的实施例中,利用许多二维复透射率函数 $O_n(x, y)$,其中每一个对应于沿光轴 50 的不同距离 z_n 处的对象内的切片,如图 1 中的例子 31 和 32 所示。

[0025] 在将对象 30 近似为两个切片的情况下,则将会理解,第一切片 31 具有相关联的传递函数 $O_1(x, y)$,其与 z 方向上的、在例如与对象 30 的前表面重合的平面 33 与平面 34(例如在 z 方向上通过 $F(x, y, z)$ 的半途)之间的光学势 $F(x, y, z)$ 的积分相关。将会理解,在不平坦的表面之间,如曲面之间,也可以确定该积分。第二切片 32 具有相关联的传递函数 $O_2(x, y)$,其类似地与 $F(x, y, z)$ 的在 z 方向上的、从例如平面 34 至例如与对象 30 的后(下游)表面重合的平面 35 的积分相关。将会理解,在将对象 30 近似为一个系列的切片 31、32 时,这样的切片 31、32 的位置以及在其上进行积分的 z 的范围可以任意选择。

[0026] 可以假设,具有形成的 $O_n(x, y)$,每个这样的二维传递函数模拟在其前表面 33、34 上改变入射波的模数和相位的效果,比如说 $\psi^1(x, y)$,以便通过简单的乘法给出在其后表面 34、35 处的出射波 $\psi^2(x, y)$,使得 $\psi^2(x, y) = \psi^1(x, y) O_n(x, y)$ 。

[0027] 出射波函数 $\psi^i(x, y)$ 是辐射从对象 30 的对应切片(例如切片 31 或切片 32)出射时的出射波函数。这种出射波 $\psi^i(x, y)$ 可至少部分地继续传播通过对象 30,并且可形成一个或多个下游切片的探测函数。因此,对于第一切片 31,将会理解 $\psi^1(x, y) = P(x, y)$,以及对于第二切片 32,在一些实施例中, $\psi^2(x, y)$ 是传播到第二切片 32 的 $P(x, y)$,或者在一些实施例中,是从第一切片 31 传播到第二切片的出射波 $\psi^2(x, y)$,其中下标表示适当的切片。最终,来自末尾的或最后切片的出射波传播 36 到检测器 40,以在衍射平面上形成衍射图案 $\Psi(u, v)$,其中 u, v 是检测器 40 的平面中的二维坐标。

[0028] 将会理解,如果检测到散射辐射的衍射平面移动到更接近试样,则将检测到菲涅耳衍射图案,而不是傅立叶衍射图案,如下面所讨论的那样。在这样的情况下,从出射波 $\psi^i(x, y)$ 到衍射图案 $\Psi(u, v)$ 的传播函数将是菲涅耳变换,而不是傅立叶变换。还将会理解,从出射波 $\psi^i(x, y)$ 到衍射图案 $\Psi(u, v)$ 的传播函数可包括其他物理装置,可以使用其他变换对其进行模拟。

[0029] 为了选择将要被照射或探测的目标对象 30 的区域,可以将透镜 20 或光阑安装在 x/y 平移台上,该平移台使探测函数相对于对象 30 移动。还将会认识到,对象 30 相对于透镜或光阑可移动。按位置的排列,可通过平移台移动探测函数 20。排列可以是栅格,其可以包括例如 20×20 个位置,尽管也可以使用其他数目的位置,此外,栅格可以不包括在 x 和 y 方向上相等数目的位置。还可以设想,排列可以是圆形或其他形状,并且排列的每个位置可以包括相应的偏差。

[0030] 检测器 40 是合适的记录设备,诸如 CCD 相机或类似的装置,它允许记录衍射图案。

该检测器 40 允许检测在衍射平面上的衍射图案。检测器 40 可以包括检测器元件的阵列，如在 CCD 中。

[0031] 根据本发明第一实施例的方法 200 示出在图 2 中，并参照图 3 进行讨论。在本实施例中，在方法 200 的每一次迭代过程中，确定来自多个切片的出射波的运行估计，即以逐步的方式进行更新，并且在被传播到检测器之前在平面处组合来自多个切片的出射波的运行估计。

[0032] 感兴趣的对象 30 被分解成 N 个切片， $n = 1, 2, 3 \dots N$ ，各位于 $z=z_n$ 处，如图 3 所示，对于 $N=2$ ，第一切片用附图标记 340 表示，第二切片用附图标记 350 表示。每个切片具有下述形式的相关联的复值传递函数：

[0033] $O_{n,actual}(x,y) = e^{i\sigma \int_{z_n}^{z_{n+1}} V(x,y,z) dz}$ 方程 1，

[0034] 其中 σ 是散射截面， $V(x,y,z)$ 的虚部与对象 30 的辐射吸收相关，其实部与引入穿过传递函数的波的相关有关。

[0035] 切片 340、350 在 z 上即沿光轴的分隔不需要相等。积分项的界限可从先前的和下一个切片之间中途的平面开始，或者遍布其他区域，只要对象 30 的每个体素仅贡献于一个传递函数。在这个例子中，为了方便说明，第一切片 340 与对象 310 前表面重合，尽管将会理解这并不是必需的。下标“*actual*”表示该传递函数正是我们将要获得的传递函数，如果我们准确地知道物理对象 310 的结构的话。

[0036] 在下面的描述中， $O_n(x,y)$ 将代表第 n 个传递函数的运行估计。根据本发明实施例的重建算法被设计成迭代（即找出）对于至少一些或全部 N 的 $O_n(x,y) \approx O_{n,actual}(x,y)$ 的准确估计。在电子散射的情况下， $V(x,y,z)$ 可对应于原子势，或在电磁辐射的情况下， $V(x,y,z)$ 可对应于光学势，如在光散射的标量理论中所使用的那样，或者 $V(x,y,z)$ 可对应于对象 30 的某些其他属性，在积分时其导致如方程 1 所描述的类似的传递函数，这对于一些其他类型的辐射或例如对于偏振波类型也是真实的。

[0037] 照明函数由二维、复值稳定波场 $P_{actual}(x,y)$ 来描述，其撞击对象 310 的前表面，即朝向照明光源的表面。在以下的描述中， $P(x,y)$ 表示照明函数的估计，它被理解为，根据本发明实施例的重建方法被设计成对 $P(x,y) \approx P_{actual}(x,y)$ 的准确估计进行迭代。

[0038] 由检测器 320 记录多种 J 个衍射图案的强度，其中每个衍射图案由 $j = 1, 2 \dots J$ 指示，我们将其表示为 $I_j(u,v)$ ，当探测在相应的位置 $P_{actual}(x-X_j, y-Y_j)$ 时，收集 J 个衍射图案中的每个衍射图案，其中 X_j 和 Y_j 是 x, y 平面中相对于对象 310 的探测的位移。期望的是，探测的这些位移被布置成使得当探测在一个位置时照明的对象 30 的面积与探测在毗邻位置时照明的面积部分相同，探针相对于对象 310 在 x, y 平面上的位移。期望的是，探测的这些位移被布置成当探测在一个位置时被照射的对象 30 的区域与探测在相邻位置时被照射的对象 30 的区域部分地相同，即探测的位置至少部分地重叠，如在 PIE 的二维实现中通常的那样。还应当理解，还可以用沿 z 方向移动的对象 310 或照明来收集衍射图案数据，所收集的数据用于下面概述的方法的实施例的第二次或进一步重复，以便提炼传递函数估计 $O_n(x,y)$ 。在一些实施例中，如将要解释的那样，可用已经旋转到或倾斜到不同取向的对象 310 收集衍射图案测量的其他这样的数据集。

[0039] 本发明的一些实施例利用四级迭代循环。最低(“最内层”)循环检查从单独的第 j 个探测位置收集的数据,按照“正演”计算和逆的“反演”计算更新 $P(x,y)$ 和 $O_n(x,y)$ 的估计,下面将描述其变体。在这个最内层循环之外,所述方法遍布 j 进行循环,针对 j 个探测位置中的每一个重复最内层循环;这可被称为“视场”循环。在视场循环之外,整个视场循环被重复许多次;这可称为“单方向循环”。视场和单方向循环与先前描述的 PIE 和 ePIE 方法是相同的。本申请人先前的申请讨论了如何改善这种方法的性能,例如通过改变其中在视场循环中布置来自 j 个位置的数据的顺序,或通过优化所选择的位移 X_j 和 Y_j 以最小化重建伪像。这种方法可结合在本发明的实施例中。最后,在对象 30 已被倾斜或旋转到一个或多个新的取向之后,最外层循环可选地可使用从对象 30 收集的数据重复较低级别循环,如下面所述。

[0040] 本发明的实施例更新传递函数 $O_n(x,y)$ 的 N 个运行估计,同时对正演计算和反演计算两者,还保持入射在和出射于每个传递函数 $O_n(x,y)$ 的波函数的记录和 / 或更新所述波函数的运行估计。

[0041] 正演计算模拟散射的辐射 $\Psi_f(u,v)$ 的模数和相位,其是所期望的以获得衍射图案,倘若有针对所有 z_n 各 $O_n(x,y)$ 的当前估计、 $P(x,y)$ 的当前估计、探测探针 X_j 和 Y_j 的已知位置、以及传播函数的形式,所述传播函数将发源于对象 310 的出射波传播到检测器 320,我们称之为 Φ ,并且其可以是菲涅耳传播函数、夫琅和费传播函数或者其他传播函数的形式。

[0042] 在衍射平面中采用强度约束:其中 $\Psi_f(u,v)$ 的模数被 $\sqrt{I_f(u,v)}$ 替代,但其相位保留以给出 $\Psi_b(u,v)$,如在 PIE 或 ePIE 参考文献中所描述的。

[0043] 反演计算使用 $\Psi_b(u,v)$ 以反转散射过程,反向传播辐射到对象 310 并且更新传递函数 $O_n(x,y)$ 的估计。

[0044] 对象 310 的每个切片 340、350 已经与其关联了二维复值波函数 $\psi_{f,n}^i(x,y)$,其入射在切片 340、350 的前表面(面向辐射源)。每个切片还具有相应切片下游的关联的波函数,即出射波,其已经被切片 $\psi_{f,n}^e(x,y)$ 的性质所改变。在这种命名法中,上标 i 和 e 分别标示入射和出射波。下标 f 表示得自正演计算的估计,以及 n 表示该入射或出射波与第 n 个切片相关。同样, $\psi_{b,n}^i(x,y)$ 和 $\psi_{b,n}^e(x,y)$ 描述入射在或出射于第 n 个切片的估计的波函数,在反演计算过程中已经对其进行了计算。

[0045] 菲涅耳或角谱或类似传播函数形式的波传播函数 $\Phi_{\Delta z}$ 和其逆 $\Phi_{\Delta z}^{-1}$ 被用于向前和向后传播各种 $\psi(x,y)$,在对象 30 的体积内通过距离 Δz 。

[0046] 在方程 2 中,定义对象切片更新算符为:

$$[0047] \quad O_n^{\text{next}}(x,y) = O_n(x,y) + \alpha \frac{(\psi_{f,n}^i(x,y))^*}{|\psi_{f,n}^i(x,y)|_{\text{max}}} (\psi_{b,n}^e(x,y) - \psi_{f,n}^e(x,y)) \quad \text{方程 2,}$$

[0048] 其中 α 是 0 到 2 之间的常数,其确定算法的收敛速度,以及 $*$ 表示复共轭。方程 2 可写成紧凑形式 $O_n(x,y) = U_O[O_n(x,y)]$,应理解更新估计 $O_n^{\text{next}}(x,y)$ 现在变成了 $O_n(x,y)$ 的当前估计,即 $O_n(x,y) = O_n^{\text{next}}(x,y)$ 。

[0049] 在方程 3 中,定义照明更新函数为:

$$[0050] \quad \psi_{b,n}^i(x,y) = \psi_{f,n}^i(x,y) + \alpha \frac{(O_n(x,y))^*}{|O_n(x,y)|_{\max}^2} (\psi_{b,n}^e(x,y) - \psi_{f,n}^e(x,y)) \quad \text{方}$$

程 3,

$$[0051] \quad \text{其可以类似地写成 } \psi_{b,n}^i(x,y) = U_{\max} [\psi_{f,n}^i(x,y)].$$

[0052] 现在将参照图 2 和图 3 更详细地解释方法 200。如果对象 30 是弱散射,则该方法尤其适合,虽然本发明的实施例不局限于这个方面。方法 200 如下进行:

[0053] 在步骤 205 中,选择第一或初始探测位置。第一探测位置不必是 $j=1$,但可以是 J 个探测位置中的另一个,可随机选择。

[0054] 在步骤 210 中,移位的探测的当前自由空间估计被传播到 z_n 处的所有平面,即:

$$[0055] \quad \psi_{f,n}^i(x,y) = \rho_{\Delta z_n} [P(x-X_j, y-Y_j)].$$

[0056] 如果 $P(x-X_j, y-Y_j)$ 被定义为处在 $z_0 = 0$ 处,如在图 3 中所示,它本身与对象 310 的第一切片 340 重合,则 $\Delta z_1 = 0$ 和 $\Delta z_2 = z_2$, $\Delta z_3 = z_3$, 等等。在图 3 中示出了使用两个这种切片 340、350 的过程。

[0057] 在步骤 215 中,在每个切片处,出射波被确定为:

$$[0058] \quad \psi_{f,n}^e(x,y) = \psi_{f,n}^i(x,y) O_n(x,y).$$

[0059] 在步骤 220 中,每个这样的出射波然后被传播到对象 310 下游的求和平面 360,它也可以是对象 310 的出射表面,即如由箭头 361 所表示的对象 310 的下游面。

[0060] 在步骤 225 中,传播到求和平面 360 的所有波被加在一起。在求和平面 360 处求和可以被定义为:

$$[0061] \quad \psi_{f,s}(x,y) = \rho_{z_s-z_1} [\psi_{f,1}^e(x,y)] + \rho_{z_s-z_2} [\psi_{f,2}^e(x,y)] + \rho_{z_s-z_3} [\psi_{f,3}^e(x,y)] + \dots + \rho_{z_s-z_n} [\psi_{f,n}^e(x,y)].$$

[0062] 在步骤 230 中,求和的出射波 $\psi_{f,s}(x,y)$ 被传播 370 到检测器 320,以给出 $\Psi_f(u,v) = \Im[\psi_{f,s}(x,y)]$, 其中其相位被保持,但它的模数被设置为 $\sqrt{I_f(u,v)}$ 以给出步骤 235 中的 $\Psi_b(u,v)$ 。

[0063] 在步骤 240 中, $\Psi_b(u,v)$ 被反向传播 380 到求和平面 360,在求和平面 360 处给出波(“反演计算的”波)的不同估计 $\psi_{b,s}(x,y) = \Im^{-1}[\Psi_b(u,v)]$ 。

[0064] 在步骤 246 中,选择重建 $O_n(x,y)$ 的切片。该切片可以被选择为对象的末尾切片 350,即正好在求和平面 360 之前。然而,也可以选择其他切片,如下面所讨论的。

[0065] 在步骤 247 中,从反向传播的求和平面 $\psi_{b,s}(x,y)$ 中减去在正向中计算的所有其他切片(除了所选则的切片 n 之外)的传播的出射波,以给出 $\psi_{b,s,n}(x,y)$ 。于是,例如,如果在步骤 246 选择的切片是 $O_l(x,y)$,则在步骤 247 我们计算:

[0066]

$$\psi_{b,s,l}(x,y) =$$

$$[0067] \quad \psi_{b,s}(x,y) - \rho_{z_s-z_2} [\psi_{f,2}^e(x,y)] - \rho_{z_s-z_3} [\psi_{f,3}^e(x,y)] \dots - \rho_{z_s-z_n} [\psi_{f,n}^e(x,y)].$$

[0068] 类似地,如果在步骤 246 选择的切片是 $O_l(x,y)$,则在步骤 247 我们计算:

[0069]

$$\psi_{b,s_2}(x,y) =$$

$$\psi_{b,s}(x,y) - \rho_{z_s-z_1}[\psi_{f,1}^e(x,y)] - \rho_{z_s-z_2}[\psi_{f,2}^e(x,y)] \dots - \rho_{z_s-z_n}[\psi_{f,n}^e(x,y)]。$$

[0071] 在步骤 248, 剩余出射波(即减去 $\psi_{b,s_n}(x,y)$ 之后) 被反向传播到选择的第 n 个切片, 等等。于是, 例如, 如果在步骤 246 选择 $O_n(x,y)$, 则它被反向传播以给出:

$$[0072] \quad \psi_{b,2}^e(x,y) = \rho_{z_s-z_1}^{-1}[\psi_{b,s_2}(x,y)],$$

[0073] 并且一般而言:

$$[0074] \quad \psi_{b,n}^e(x,y) = \rho_{z_s-z_1}^{-1}[\psi_{b,s_n}(x,y)]。$$

[0075] 在步骤 249 中, 对于出射波已经被反向传播到的所选择的切片, 进行对象传递函数 $O_n(x,y)$ 的更新, 以给出 $O_n(x,y) = U_O[O_n(x,y)]$ 。因此, 例如, 在第一切片 340 处更新相关联的传递函数:

$$[0076] \quad O_1^{next}(x,y) = O_1(x,y) + \alpha \frac{(\psi_{f,1}^i(x,y))^*}{|\psi_{f,1}^i(x,y)|_{\max}^2} (\psi_{b,1}^e(x,y) - \psi_{f,1}^e(x,y)),$$

[0077] 在其之后, 进行赋值 $O_1(x,y) = O_1^{next}(x,y)$, 使得更新的传递函数现在变为该传递函数的当前估计。

[0078] 在步骤 250 中, 确定是否已考虑了所有切片, 即与每个切片相关联的传递函数已经被更新。如果尚未考虑所有切片, 则该方法返回到步骤 246, 并且针对下一个选择的切片重复步骤 246-249, 直到所有切片已被考虑。

[0079] 在步骤 255 中, 在切片 340、350 的其中之一或在求和平面 360 处, 更新探测函数 $P(x-X_j, y-Y_j)$ 的当前估计。在第一切片 340 处, 可更新探测函数, 例如如下:

$$[0080] \quad P(x-X_j, y-Y_j) = \psi_{f,1}^i(x,y) + \alpha \frac{(O_1(x,y))^*}{|O_1(x,y)|_{\max}^2} (\psi_{b,1}^e(x,y) - \psi_{f,1}^e(x,y))。$$

[0081] 如果在另一平面上进行探测更新, 则更新的是在正演计算中所使用的入射探测的传播的估计。对于在自由空间传播的探测(如在本发明的实施例中), 定义任何一个切片处的探测是对于所有其他切片定义了它, 包括在进入平面和求和平面处。

[0082] 可从步骤 210 重复由步骤 210-255 构成的最内层的循环, 尽管一般而言, 现在优选地是, 通过确定是否考虑了所有 J 个探测位置, 在步骤 260-265 中选择新的探测位置 j , 并因此利用每个位置相应的衍射图案, 对所有后续探测位置通过步骤 210-255 继续视场迭代。

[0083] 当所有 J 个探测位置在视场循环中已得到处理时, 可进行进一步的视场循环, 直到条件满足或已经执行了一定数量的视场迭代为止, 如在步骤 270 中所确定的。如果要执行最外层循环的进一步迭代, 则在步骤 275 中可重置探测位置, 例如重置到在步骤 205 中使用的初始探测位置。

[0084] 现在将描述本发明的第二实施例, 它尤其适合的情况是对象 30 是强散射, 虽然本发明的实施例不限于这方面。“强散射”意思是不满足第一玻恩近似。换句话说, 在对象 30 之内的点处的照明已基本上受到了发生在该点上游的试样的层内散射的影响。本发明的第二实施例与第一实施例的不同之处在于, 在算法的最内层循环中所采取的步骤。

[0085] 在本发明的第二实施例中, 通过利用来自一个切片的传播的出射波作为下一个切

片上的入射波,执行前向传播中的散射,而反演计算反转这个过程,在每个切片处更新探测函数和传递函数,然后再反向传播更新的探测函数至先前的切片,如此等等,直到最后得到入射照明函数的新的估计。尽管将会认识到可以考虑其他切片,但是参考图 4 和 5,参考包括对象 510、入射辐射 530、检测器 520 和两个切片 540、550 的例子,第二实施例可以被描述如下。

[0086] 正如在先前参照图 2 描述的实施例,在步骤 405 中选择初始探测位置,如在前面描述的方法的步骤 205 中那样。在步骤 405 中,还选择对象 510 的第一平面 540,其是最前端的平面,即朝向辐射源 530。

[0087] 在步骤 410 中,对象的当前切片上的入射波 530 被确定为 $\psi_{f,n}^i(x,y) = P(x-X_f, y-Y_f)$, 对于步骤 410 的第一次迭代,对于已记录或测量了衍射数据 $I_f(u,v)$ 的第 j 位置处的探测,它是入射在对象的第一切片 540 上的照明波的当前估计。

[0088] 在步骤 415 中,确定来自当前切片的出射波 $\psi_{f,n}^e(x,y) = \psi_{f,n}^i(x,y) O_f(x,y)$ 。

[0089] 在步骤 420 中,如果当前切片不是对象的末尾切片,则该方法移到步骤 425。换言之,如果存在对象的后续切片,则该方法移到步骤 425。后续切片 550 可以是下游方向的下一个、邻近的切片。在步骤 420 的第一次迭代中,对于图 5 的示例,后续切片是第二切片 550。

[0090] 在步骤 425 中,来自切片 540 的出射波被传播到后续切片 550,创建后续入射波 $\psi_{f,n+1}^i(x,y) = \mathcal{P}_{\Delta z_1}[\psi_{f,n}^e(x,y)]$, 其中 $\Delta z_1 = z_2 - z_1$ 。

[0091] 返回到步骤 415,确定来自下一个切片 550 的出射波

$$\psi_{f,n+1}^e(x,y) = \psi_{f,n+1}^i(x,y) O_{n+1}(x,y)。$$

[0092] 在步骤 420 中,如果存在其他后续切片,则出射波被传播到下一个切片,创建后续入射波 $\psi_{f,n+2}^i(x,y) = \mathcal{P}_{\Delta z_2}[\psi_{f,n+1}^e(x,y)]$, 其中 $\Delta z_{n+1} = z_{n+2} - z_{n+1}$ 。对于对象 510 的每个连续的切片 540、550,类似地重复这一过程,直到我们获得最后出射波的估计 $\psi_{f,n}^e(x,y)$ 为止。对于图 5,最后出射波的估计是从切片 550 出射的出射波的估计,其中在步骤 420,确定切片 550 是对象的最后切片,并且该方法移到步骤 430。

[0093] 在步骤 430 中,最后出射波 $\psi_{f,n}^e(x,y)$ 被传播到检测器 40,给出 $\Psi_f(u,v) = \Im[\psi_{f,n}^e(x,y)]$, 其中其相位被保留,但它的模数被设定为 $\sqrt{I_f(u,v)}$ 以给出 $\Psi_b(u,v)$,即在步骤 435 中施加强度约束。

[0094] 在步骤 440,在检测器处的更新的波 $\Psi_b(u,v)$ 被反向传播到出射切片,即在图 5 的例子中的最后切片 550,给出 $\psi_{b,n}^e(x,y) = \Im^{-1}[\Psi_b(u,v)]$ 。

[0095] 在步骤 445 中,更新切片处的传递函数和探测函数。按照下式,如在 ePIE 参考文献中所描述的,可更新传递函数和照明函数:

$$[0096] \quad O_n^{\text{next}}(x,y) = O_n(x,y) + \alpha \frac{\left(\psi_{f,n}^i(x,y)\right)^*}{\left|\psi_{f,n}^i(x,y)\right|_{\max}^2} \left(\psi_{b,n}^e(x,y) - \psi_{f,n}^e(x,y)\right)。$$

[0097] 类似地,还可进行例如在 ePIE 参考文献中描述的照明函数更新,以计算入射在该切片上的波的新的后向估计,即:

$$[0098] \quad \psi'_{b,n}(x,y) = \psi'_{f,n}(x,y) + \alpha \frac{(\psi_n(x,y))^2}{|\psi_n(x,y)|_{\max}^2} (\psi^e_{b,n}(x,y) - \psi^e_{f,n}(x,y)).$$

[0099] 在步骤 450 中, 确定当前切片是否是第一切片, 即对象的最前面的切片。如果当前切片不是第一切片, 则该方法移到步骤 455。

[0100] 在步骤 455 中, 按照下式, 当前切片处的波函数的更新的估计被反向传播到先前的切片:

$$[0101] \quad \psi^e_{b,n-1}(x,y) = P_{\Delta z_{n-1}}^{-1} [\psi'_{b,n}(x,y)],$$

[0102] 其中 Δz_{n-1} 是切片 n 与先前切片 $n-1$ 之间的距离。

[0103] 在步骤 445 中, 更新发生在相关联的传递函数 $O_{n-1}(x,y) = U_o[O_{n-1}(x,y)]$ 和入射在该切片上的照明函数 $\psi'_{b,n-1}(x,y) = U_{illum} [\psi'_{f,n-1}(x,y)]$ 两者上, 如在步骤 445 的先前迭代中那样。

[0104] 在步骤 450 中, 如果还遗留有其他先前的切片, 则新估计的函数 $\psi'_{b,n-1}(x,y)$ 被反向传播到下一个先前的切片, 在那里进行又一对更新, 如此等等, 通过所有切片 540、550, 采用在方程 2 和 3 中归纳的更新函数, 直到最终确定对象 510 的前表面上的照明的新估计, $P(x-X_j, y-Y_j) = \psi'_{b,j}(x,y)$ 。

[0105] 尽管一般来说现在优选的是选择新的探测位置 j , 但是如果所有的探测位置还没有被考虑的话, 如在步骤 460 中那样, 第二实施例最内层的迭代可以从步骤 405 重复。在步骤 465 选择新的探测位置。在步骤 445 中计算的第一平面 $P(x, y)$ 处的照明的更新估计 $P(x,y)$ 被用作步骤 410 中第一平面处的照明, 其在步骤 470 中被重新选择作为当前平面。采用每个位置的相应的衍射图案数据, 对所有后续探测位置重复步骤 410-455。

[0106] 在步骤 460 中, 如果在视场迭代中所有的探测位置已被处理, 则该方法移到步骤 475, 在那里进行其他视场迭代, 直到满足条件或一定数目的视场迭代已经完成为止, 如在引用的参考文献中所讨论的那样。如果重复该方法, 则重置探测位置, 并在步骤 480 重新选择第一平面。

[0107] 正如上面介绍的, 本发明的实施例可以用于确定横切对象的多个切片的传递函数, 其中多个切片中的每一个形成各自的角度。也就是说, 多个切片中的至少一些彼此相交并且倾斜相应的角度, 如将要解释的那样。

[0108] 本发明的实施例确定沿光轴间隔开的多个切片处的传递函数, 例如, 如图 1 中所示。与每个切片相关联的传递函数可以通过任何上述的方法来确定。虽然对象 30 最初可能被布置在相对于光轴的任何取向, 即对象的初始物理取向可以根据需要选择, 图 1 所示的切片的初始取向将被称为相对于对象 30 为 0° 。通过利用上述方法的任一种, 也就是如图 2 或图 4 中所示, 与每个切片 31、32 相关联可以确定相应的传递函数。

[0109] 图 6 说明了根据本发明实施例的如图 1 所示的装置, 其中第一和第二切片 31、32 横切对象 30, 但是其中在图 6 (a) 中对象 30 旋转到第一角并且在图 6 (b) 中对象 30 旋转到第二角。然后, 本发明的实施例可以被用来确定与每个切片相关联的一个或其他的传递函数, 各自与对象 30 的相应旋转相关联。

[0110] 在第一步骤中, 利用本发明的实施例来确定与相对于对象 30 的 0° 处的切片 31、32

相关联的传递函数。参照图 1, 确定与 0° 处的切片 31、32 相关联的两个传递函数。在确定第一多个传递函数后, 对象 30 被旋转到另一个角度, 如在图 6 (a) 中所示。对象 30 的位置相对于光轴 50 保持不变。然后, 本发明的实施例, 优选的是与前面所用的相同的实施例, 被布置成执行第二次迭代, 以确定在切片 31、32 中的每一个处的第二多个传递函数, 但是其中对象 30 成一定角度, 例如 15° 。

[0111] 通过对方程 1 求逆, 并参照图 8, 根据本发明得出两个或更多个二维传递函数 801 和 802, 以分别通过对象 30 的分数深度 (fractional depths) 反向投影光学势 803 和 804。在图 9 中, 根据本发明, 以在不同取向处的对象 30 收集的多重二维传递函数, 可被用来构建对象 30 的各种体积上的反投影。例如, 体积 901 包括得自切片 902 和 903 的两个反投影; 体积 904 包括得自切片 905 和 906 的两个反投影, 等等。通过在占据对象 30 的整个体积的体素上添加经过滤波的反投影, 得到三维对象的估计。熟悉涉及常规 X 射线断层摄影方法的技术领域的那些人将会理解经过滤波的反投影, 其中通过该对象的整个体积只有一个反投影是可用的, 而在这里, 处理了例如 901 和 904 的多重体积。在重建过程进行之前, 可以从许多对象取向收集数据, 并且可随意选择处理来自不同取向的数据的顺序。

[0112] 在一些实施例中, 第二次迭代的输入是从来自第一次迭代的反投影势得到的传递函数。例如, 对于切片 31, 使用在 0° 处确定的反投影的传递函数从方程 1 得到的传递函数被用作该切片 31 的第一传递函数, 其与其中对象成不同角度的第二次迭代中的切片相交。有利的是, 这允许更快地确定第二次迭代中的传递函数。在确定第二对象旋转角处的第二多个传递函数之后, 可在对象 30 的各个角旋转处执行该方法的进一步迭代, 如图 6 (b) 所示, 以确定各自与切片 31、32 的其中之一相关联的第三或其他多个传递函数。此外, 来自每个取向的数据的每个更新迭代可与使用来自其他取向的数据的更新迭代交错进行。

[0113] 不像现有的 X 射线断层摄影技术, 本发明有利地考虑了相干三维散射积分的影响、照明光束传播通过对象时的演变、以及多重散射效应。本领域技术人员将会理解, 精确的常规滤波反投影 X 射线断层摄影重建所需的对象倾斜的数目与对象的厚度成比例地增加。由于在本发明中对象被分解成对象的分数厚度的切片, 所以对象准确的 X 射线断层摄影重建所需的这种倾斜的数目有利地小于本领域当前状态的技术。

[0114] 本发明的实施例还可以与至少部分透明的对象一起使用。图 7 说明了按照本发明实施例的装置, 用于至少部分透明的对象, 以确定与该对象相关联的目标函数。

[0115] 入射辐射 710 朝向聚焦装置 720, 诸如透镜, 如前所述, 它把辐射朝向分束器 730 聚焦。分束器被布置成通过将入射辐射的方向改变 90° 朝向对象 740, 而将来自透镜 720 的入射辐射定向到对象 740。在遇到对象 740 的下游侧的镜面 750 之前, 辐射接着穿透至少部分透明的对象。例如, 对象 740 可被放置在镜面 750 上。辐射被镜面 750 反射回分束器。被反射的辐射不必遇到分束器, 即它可以成一定角度被反射以使它越过分束器 730。然而, 分束器被布置成不对被反射的辐射进行定向, 如在本领域已知的那样。被反射的辐射经过分束器, 由检测器 760 来测量。在一些实施例中, 反射面 750 可被布置成在对象 740 的下面, 而检测器 760 被布置成在对象 740 和分束器 730 之上。这种配置光学上等效于前面描述的透射情况, 但这一次试样出现两次, 一个版本反映在 z 方向, 这是第一版本的下游。

[0116] 将会理解, 本发明的实施例可以以硬件、软件或硬件和软件的组合的形式来实现。任何这样的软件可以被存储在易失性或非易失性存储装置的形式中, 例如像 ROM 的存储设

备,不论是否可擦除或可重写,或者被存储在存储器形式中,例如 RAM、存储芯片、设备或集成电路或者光学或磁可读介质上,例如 CD、DVD、磁盘或磁带。将会理解,存储设备和存储介质是机器可读存储器的实施例,适合于存储一个或多个程序,当被执行时,实现本发明的实施例。因此,实施例提供包括用于实现在前面的权利要求中要求保护的系统或方法的代码的程序以及存储这样的程序的机器可读存储器。另外,本发明的实施例可通过任何介质而以电子方式进行传递,例如通过有线或无线连接传送的通信信号,这些实施例适于包括它们。

[0117] 在本说明书(包括任何所附的权利要求书、摘要和附图)中公开的所有特征和 / 或所公开的任何方法或过程的所有步骤可以以任意的组合相结合,除了其中至少一些这样的特征和 / 或步骤相互排斥的组合。

[0118] 在本说明书(包括任何所附的权利要求书、摘要和附图)中公开的每一个特征可以被起到相同、等同或类似目的的备选特征所替代,除非另有明确说明。因此,除非另有明确说明,公开的每个特征只是通用系列的等同或类似特征的一个例子。

[0119] 本发明并不限于任何前述实施例的细节。本发明扩展到在本说明书(包括任何所附的权利要求书、摘要和附图)中所公开特征的任何新颖的特征或任何新颖的组合,或者所公开的任何方法或过程的步骤的任何新颖的步骤或任何新颖的组合。权利要求书不应该被解释为仅仅涵盖上述实施例,也涵盖落入权利要求书的范围内的任何实施例。

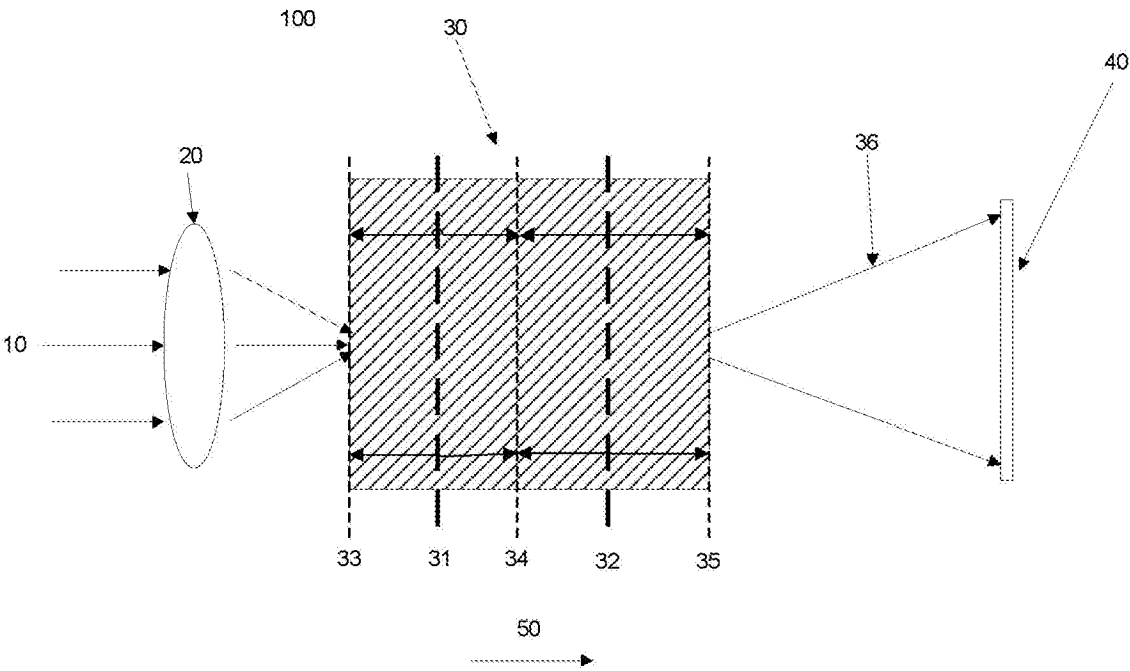


图 1

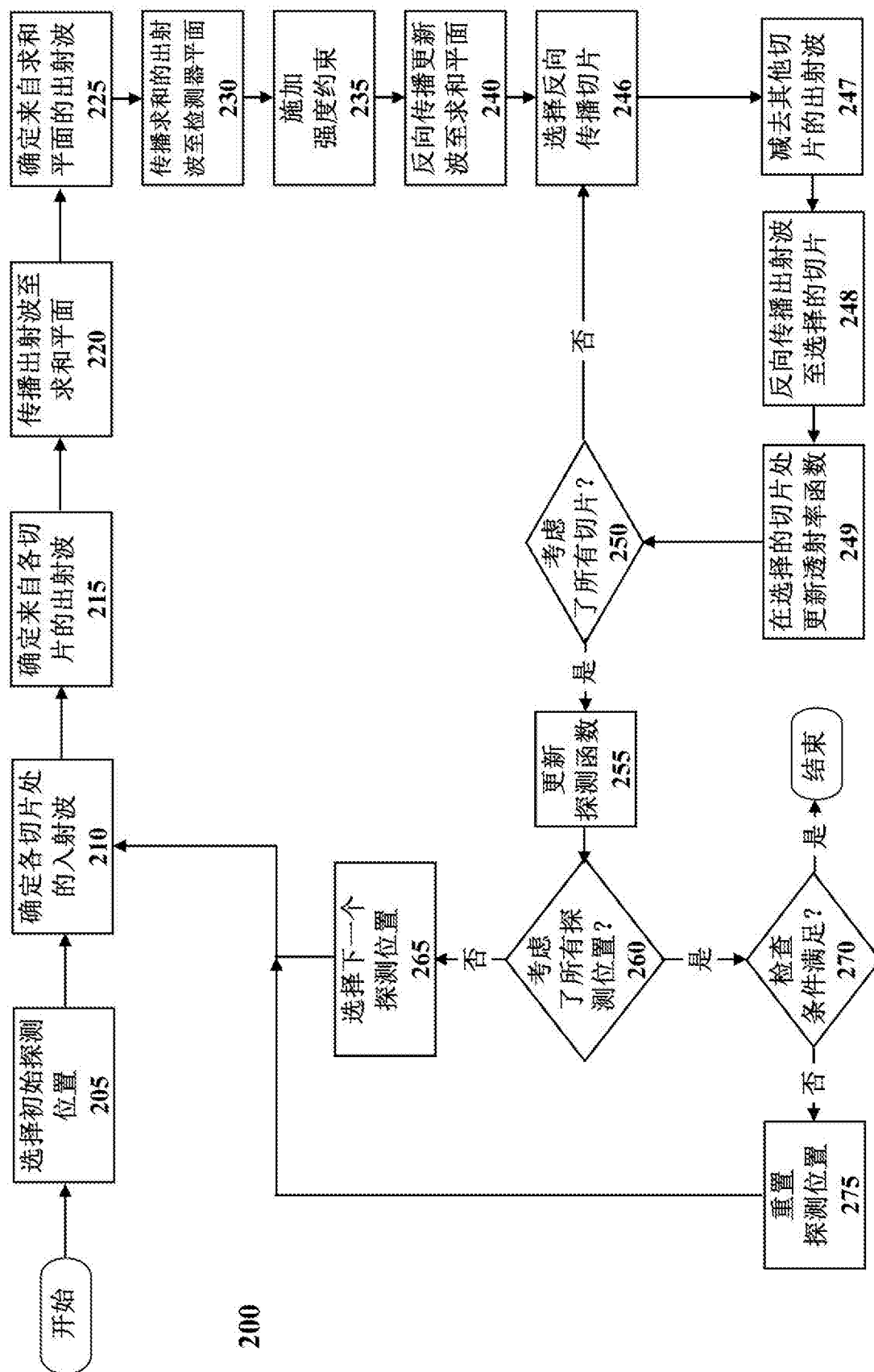


图 2

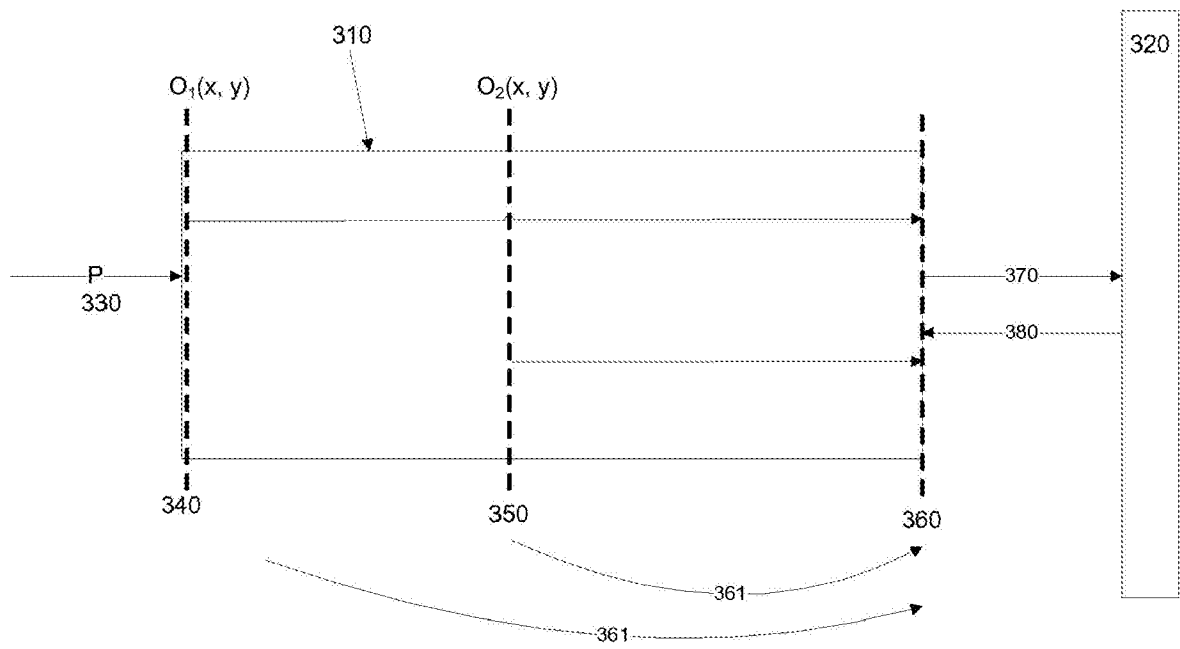


图 3

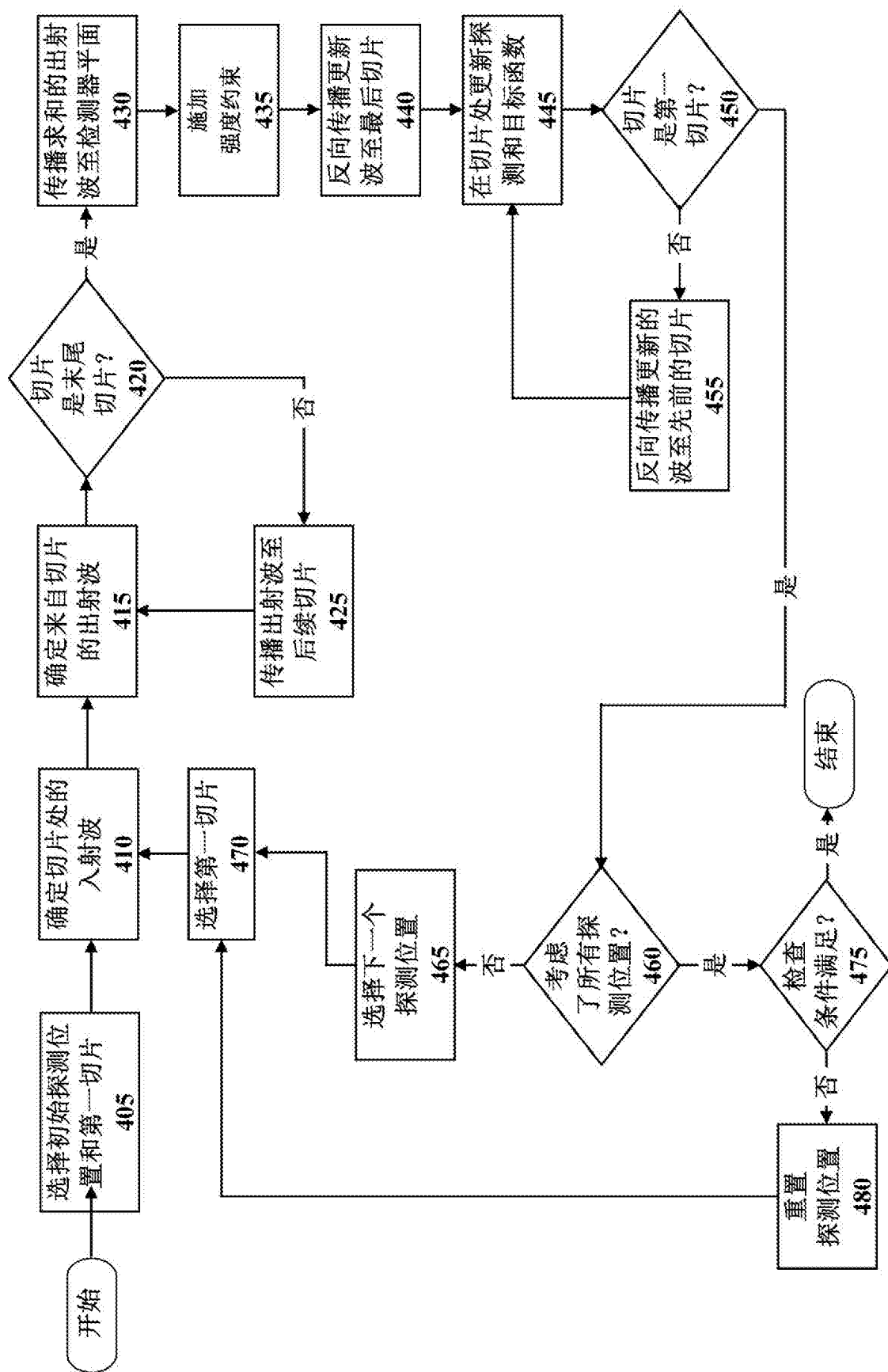


图 4

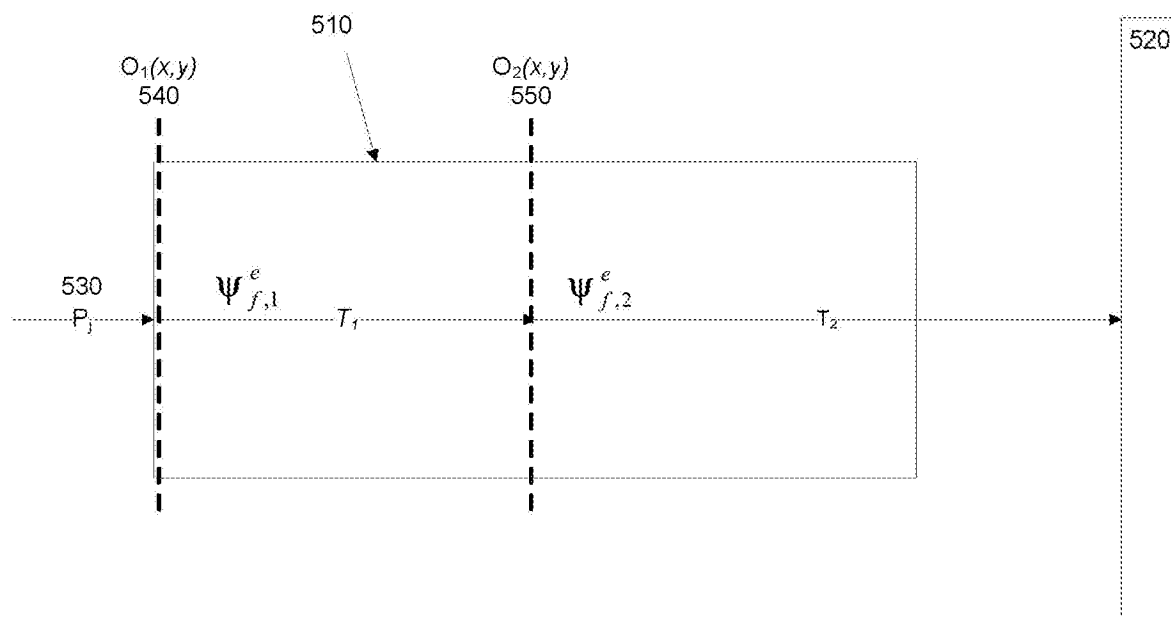


图 5

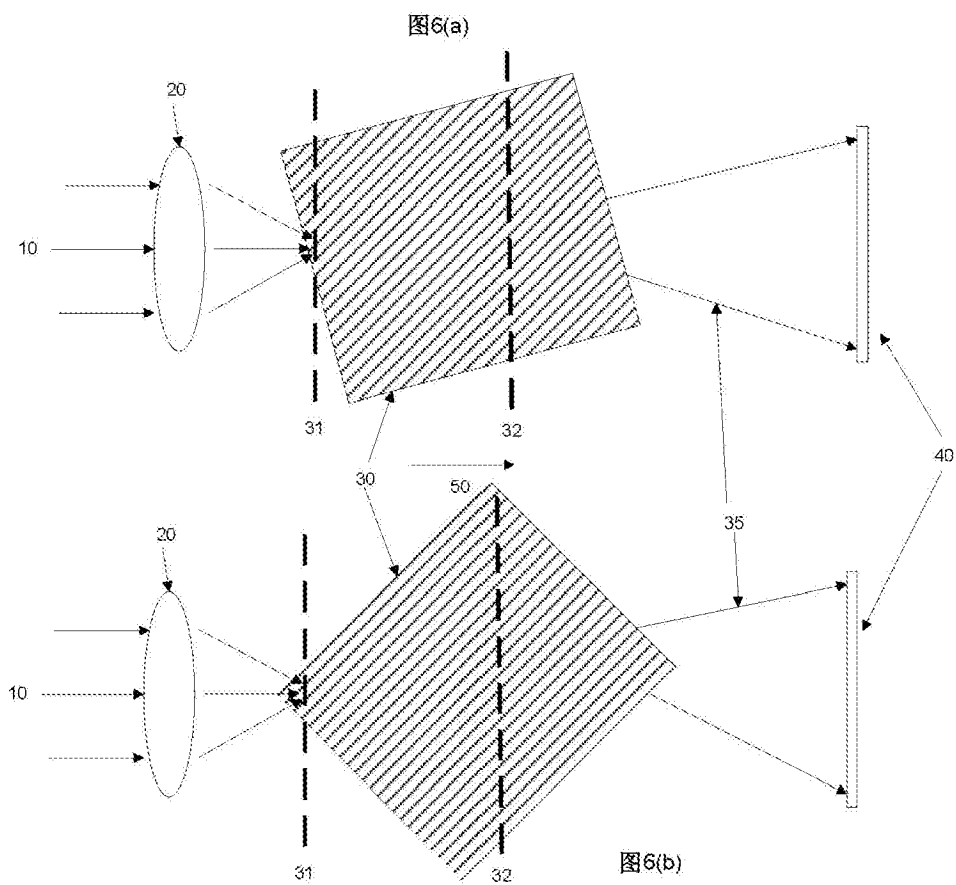


图 6

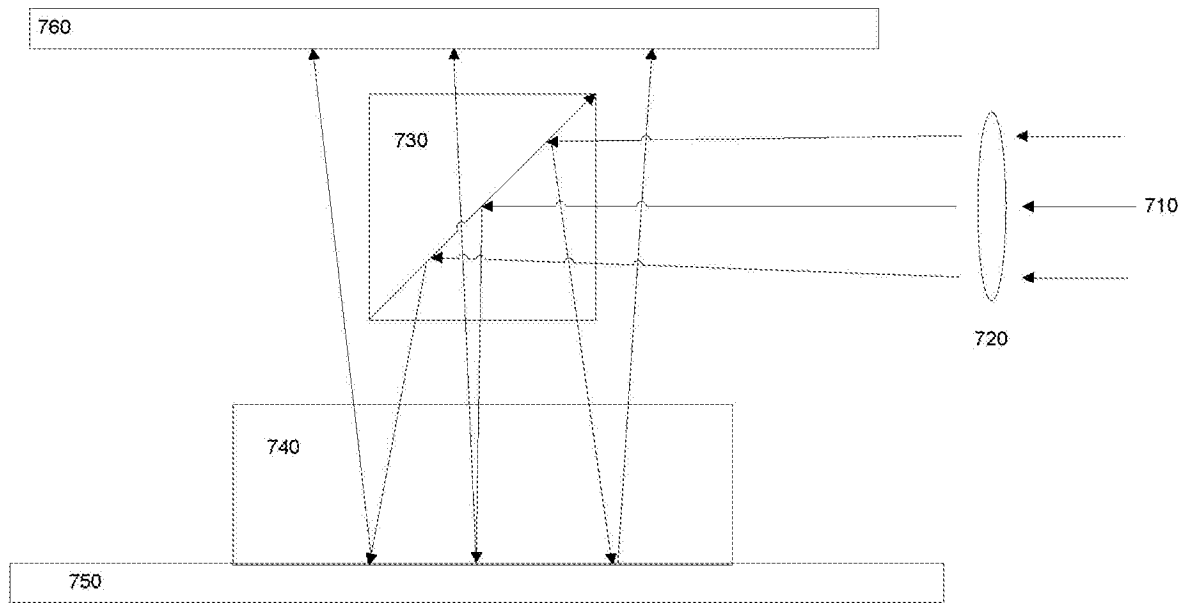


图 7

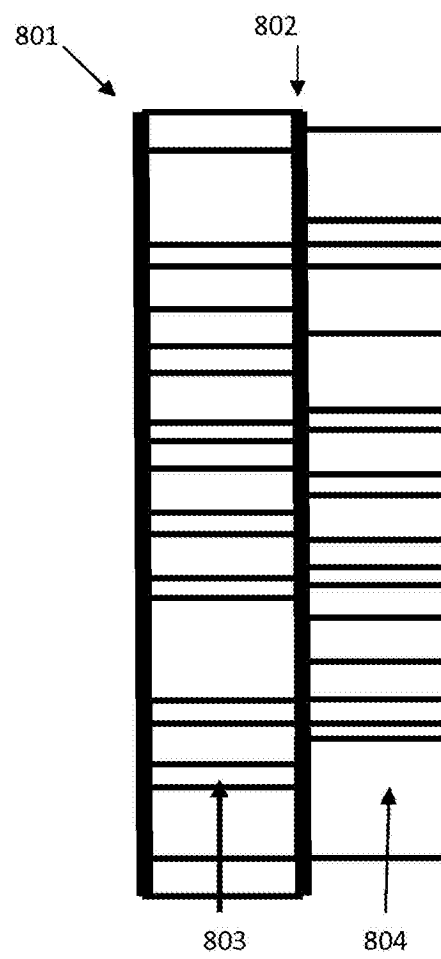


图 8

900

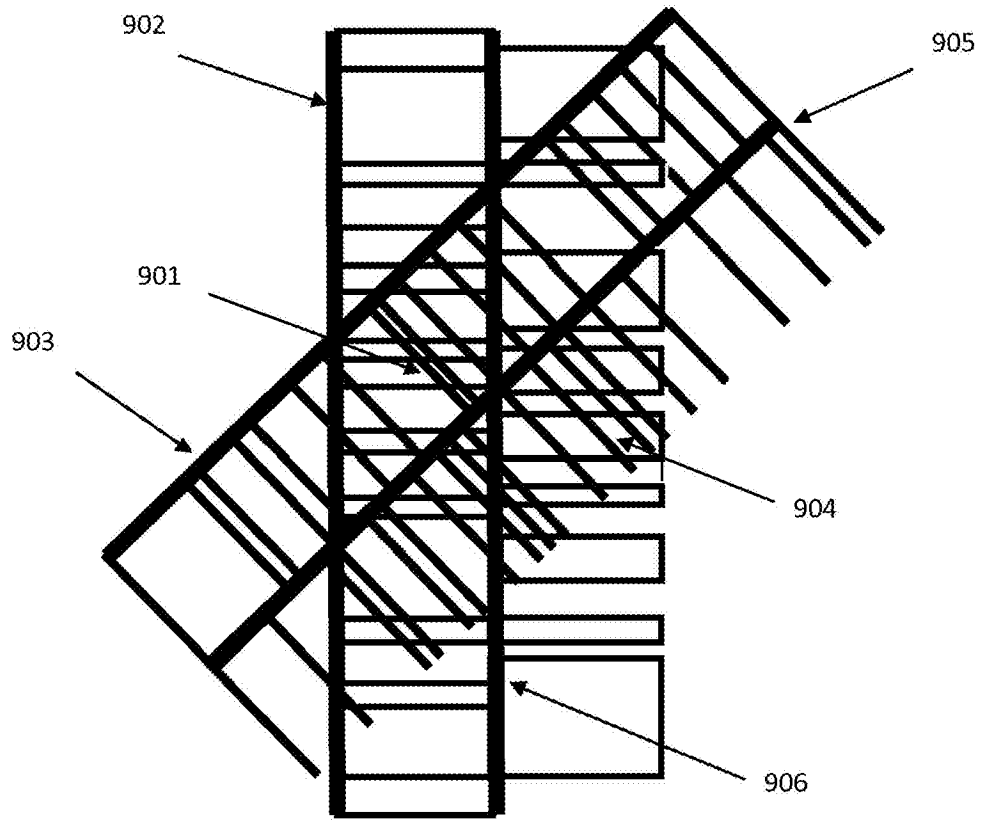


图 9