



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105992557 B

(45)授权公告日 2020.01.14

(21)申请号 201580008324.2

(22)申请日 2015.02.12

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105992557 A

(43)申请公布日 2016.10.05

(30)优先权数据

2014-026677 2014.02.14 JP

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2016.08.12

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2015/054503 2015.02.12

(87)PCT国际申请的公布数据

W02015/122542 EN 2015.08.20

(73)专利权人 佳能株式会社

地址 日本东京

(72)发明人 半田宗一郎

(74)专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 欧阳帆

(51)Int.Cl.

A61B 6/00(2006.01)

G01N 23/20(2018.01)

G21K 1/02(2006.01)

(56)对比文件

CN 103460251 A, 2013.12.18,

CN 101873828 A, 2010.10.27,

CN 101257851 A, 2008.09.03,

CN 102197303 A, 2011.09.21,

CN 103364418 A, 2013.10.23,

CN 101495853 A, 2009.07.29,

CN 103068310 A, 2013.04.24,

CN 102197302 A, 2011.09.21,

CN 103356208 A, 2013.10.23,

CN 102413767 A, 2012.04.11,

审查员 胡琴明

权利要求书3页 说明书26页 附图22页

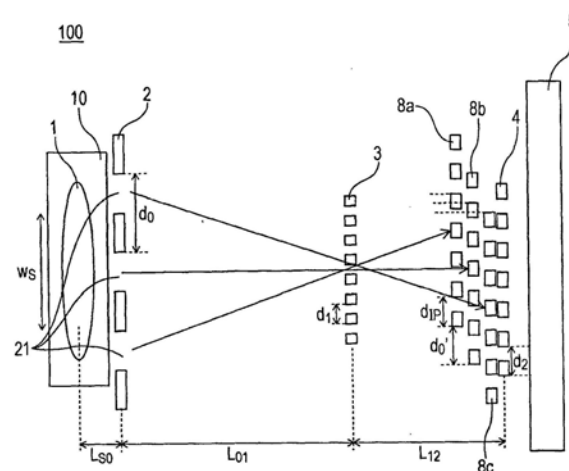
(54)发明名称

X射线Talbot干涉仪和X射线Talbot干涉仪系统

(57)摘要

本发明涉及一种X射线Talbot干涉仪,该X射线Talbot干涉仪包括:包括多个X射线透射部分的源光栅,被配置为允许来自X射线源的X射线中的一些通过;具有周期性结构的分束器光栅,被配置为通过使用所述周期性结构使来自所述X射线透射部分的X射线衍射以形成干涉图案;以及X射线检测器,被配置为检测来自所述分束器光栅的X射线。所述分束器光栅使来自所述多个X射线透射部分中的每个X射线透射部分的X射线衍射以形成各自与所述多个X射线透射部分之一对应的干涉图案。所述多个X射线透射部分被布置为使得各自与所述多个X射线透射部分之一对应的干涉图案相互叠加以增强通过所述干涉图案的

调制而生成的边带中的空间频率分量。



1. 一种X射线Talbot干涉仪,该X射线Talbot干涉仪包括:
包括多个X射线透射部分的源光栅,被配置为允许来自X射线源的X射线中的一些通过;
具有周期性结构的分束器光栅,被配置为通过使用所述周期性结构使来自所述多个X射线透射部分中的每个X射线透射部分的X射线衍射以形成各自与所述多个X射线透射部分之一对应的干涉图案;以及
X射线检测器,被配置为检测来自所述分束器光栅的X射线,
其中,所述多个X射线透射部分被布置为使得所述干涉图案相互叠加以增强特定的空间频率分量,所述干涉图案在按移位量 d_0' 被移位的同时相互叠加,所述移位量 d_0' 略大于或略小于所述干涉图案的图案周期 d_{IP} ,使得位于通过样品对特定于所述干涉图案的空间频率分量的调制而产生的下边带的中心附近或上边带的中心附近的所述特定的空间频率分量被增强,并且
其中,所述特定的空间频率分量是通过样品对特定于所述干涉图案的空间频率分量的调制而产生的边带中的空间频率分量。
2. 根据权利要求1所述的X射线Talbot干涉仪,还包括分析器光栅,所述分析器光栅被配置为遮挡所述干涉图案的一部分,
其中,所述X射线检测器检测来自所述分析器光栅的X射线。
3. 根据权利要求2所述的X射线Talbot干涉仪,还包括移动单元,所述移动单元被配置为使所述分析器光栅相对于所述干涉图案的相对位置移动,
其中,所述X射线检测器在所述移动单元使所述相对位置移动之前和之后执行检测,以在所述分析器光栅相对于所述干涉图案的不同相对位置处获取多个检测结果。
4. 根据权利要求3所述的X射线Talbot干涉仪,其中,所述移动单元使所述分束器光栅和所述分析器光栅中的至少一个的位置移动。
5. 根据权利要求3所述的X射线Talbot干涉仪,还包括包含多个X射线透射部分的源光栅,所述源光栅被配置为允许来自X射线源的X射线中的一些通过,
其中,所述移动单元使所述源光栅的位置移动。
6. 一种X射线Talbot干涉仪系统,该X射线Talbot干涉仪系统包括:
根据权利要求3至5中的任何一个所述的X射线Talbot干涉仪;以及
样品信息获取单元,被配置为通过使用与所述多个检测结果相关的信息来获取关于样品的信息。
7. 根据权利要求1所述的X射线Talbot干涉仪,还包括所述X射线源。
8. 一种X射线Talbot干涉仪系统,该X射线Talbot干涉仪系统包括:
根据权利要求1、2和7中的任何一个所述的X射线Talbot干涉仪;以及
样品信息获取单元,被配置为通过使用与由所述X射线检测器执行的检测的结果相关的信息来获取关于样品的信息。
9. 根据权利要求8所述的X射线Talbot干涉仪系统,其中,所述样品信息获取单元以比所述X射线检测器获取X射线强度分布的采样间隔小的数据间隔显示图像或记录图像信息。
10. 根据权利要求1所述的X射线Talbot干涉仪,
其中,所述源光栅的所述多个X射线透射部分具有用下式表示的间距 d_0 :
[数学式47]

$$d_0 = \frac{n_1 d_1 L_{01} + L_{12}}{m L_{12}} (1 + \alpha_1),$$

其中, d_1 表示所述分束器光栅的光栅周期, n_1 和 m 是正整数, L_{01} 表示所述源光栅和所述分束器光栅之间的距离, L_{12} 表示所述分束器光栅和所述X射线检测器的检测表面之间的距离、或者所述分束器光栅和被放置在所述分束器光栅与所述X射线检测器的检测表面之间的分析器光栅之间的距离, α_1 表示以下范围内的常数:

[数学式45]

$$0.2 \frac{d_1}{mw_s} \frac{L_{01} + L_{12}}{L_{12}} < |\alpha_1| < 1.1 \frac{d_1}{mw_s} \frac{L_{01} + L_{12}}{L_{12}},$$

其中, w_s 表示所述X射线源中的X射线发射点的发光强度分布的半高全宽。

11. 根据权利要求10所述的X射线Talbot干涉仪, 还包括被配置为遮挡所述干涉图案的一部分的分析器光栅,

其中, 所述X射线检测器检测来自所述分析器光栅的X射线。

12. 根据权利要求11所述的X射线Talbot干涉仪, 还包括移动单元, 所述移动单元被配置为使所述分析器光栅相对于所述干涉图案的相对位置移动,

其中, 所述X射线检测器在所述移动单元使所述相对位置移动之前和之后执行检测, 以在所述分析器光栅相对于所述干涉图案的不同相对位置处获取多个检测结果。

13. 根据权利要求12所述的X射线Talbot干涉仪, 其中, 所述移动单元使所述分束器光栅和所述分析器光栅中的至少一个的位置移动。

14. 根据权利要求12所述的X射线Talbot干涉仪, 还包括包含多个X射线透射部分的源光栅, 所述源光栅被配置为允许来自X射线源的X射线中的一些通过,

其中, 所述移动单元使所述源光栅的位置移动。

15. 一种X射线Talbot干涉仪系统, 该X射线Talbot干涉仪系统包括:

根据权利要求12至14中的任何一个所述的X射线Talbot干涉仪; 以及

样品信息获取单元, 被配置为通过使用与所述多个检测结果相关的信息来获取关于样品的信息。

16. 根据权利要求10所述的X射线Talbot干涉仪, 其中, m 为1或2。

17. 根据权利要求10所述的X射线Talbot干涉仪, 还包括所述X射线源。

18. 一种X射线Talbot干涉仪系统, 该X射线Talbot干涉仪系统包括:

根据权利要求10、11、16和17中的任何一个所述的X射线Talbot干涉仪; 以及

样品信息获取单元, 被配置为通过使用与由所述X射线检测器执行的检测的结果相关的信息来获取关于样品的信息。

19. 根据权利要求18所述的X射线Talbot干涉仪系统, 其中, 所述样品信息获取单元以比所述X射线检测器获取X射线强度分布的采样间隔小的数据间隔显示图像或记录图像信息。

20. 根据权利要求1所述的X射线Talbot干涉仪, 还包括:

分析器光栅, 被配置为遮挡所述干涉图案的一部分, 并且

其中, 所述源光栅的所述多个X射线透射部分具有间距 d_0 , 并且所述分析器光栅具有光栅周期 d_2 , 所述间距 d_0 和所述光栅周期 d_2 分别用下式表示:

[数学式47]

$$d_0 = \frac{n_1 d_1 L_{01} + L_{12}}{m L_{12}} (1 + \alpha_1)$$

以及

[数学式49]

$$d_2 = \frac{n_2 d_1 L_{01} + L_{12}}{m L_{01}} (1 + \alpha_1),$$

其中, d_1 表示所述分束器光栅的光栅周期, n_1 和 m 是正整数, L_{01} 表示所述源光栅和所述分束器光栅之间的距离, L_{12} 表示所述分束器光栅和所述分析器光栅之间的距离, α_1 表示以下范围内的常数:

[数学式46]

$$0.2 \frac{d_1 (L_{01} + L_{12})}{m \sqrt{(w_s L_{12})^2 + (w_D L_{01})^2}} < |\alpha_1| < 1.1 \frac{d_1 (L_{01} + L_{12})}{m \sqrt{(w_s L_{12})^2 + (w_D L_{01})^2}}$$

其中, w_s 表示所述X射线源中的X射线发射点的发光强度分布的半高全宽, w_D 表示特定于所述X射线检测器的点扩展函数的半高全宽。

21. 根据权利要求20所述的X射线Talbot干涉仪, 其中, m 为1或2。

22. 根据权利要求20所述的X射线Talbot干涉仪, 还包括所述X射线源。

23. 根据权利要求20所述的X射线Talbot干涉仪, 还包括移动单元, 所述移动单元被配置为使所述分析器光栅相对于所述干涉图案的相对位置移动,

其中, 所述X射线检测器在所述移动单元使所述相对位置移动之前和之后执行检测, 以在所述分析器光栅相对于所述干涉图案的不同相对位置处获取多个检测结果。

24. 根据权利要求23所述的X射线Talbot干涉仪, 其中, 所述移动单元使所述分束器光栅和所述分析器光栅中的至少一个的位置移动。

25. 根据权利要求23所述的X射线Talbot干涉仪, 还包括包含多个X射线透射部分的源光栅, 所述源光栅被配置为允许来自X射线源的X射线中的一些通过,

其中, 所述移动单元使所述源光栅的位置移动。

26. 一种X射线Talbot干涉仪系统, 该X射线Talbot干涉仪系统包括:

根据权利要求23至25中的任何一个所述的X射线Talbot干涉仪; 以及

样品信息获取单元, 被配置为通过使用与所述多个检测结果相关的信息来获取关于样品的信息。

27. 一种X射线Talbot干涉仪系统, 该X射线Talbot干涉仪系统包括:

根据权利要求20至22中的任何一个所述的X射线Talbot干涉仪; 以及

样品信息获取单元, 被配置为通过使用与由所述X射线检测器执行的检测的结果相关的信息来获取关于样品的信息。

28. 根据权利要求27所述的X射线Talbot干涉仪系统, 其中, 所述样品信息获取单元以比所述X射线检测器获取X射线强度分布的采样间隔小的数据间隔显示图像或记录图像信息。

X射线Talbot干涉仪和X射线Talbot干涉仪系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种X射线Talbot干涉仪和X射线Talbot干涉仪系统。

背景技术

[0002] X射线相位成像方法是利用当X射线穿过样品时由该样品引起的相位变化的成像方法。在相关技术中提出的几种X射线相位成像方法之一是例如PTL 1中所述的Talbot干涉仪。

[0003] Talbot干涉仪一般包括两个或三个光栅，每个光栅具有周期性结构。在光栅当中，一般被放置在样品附近的光栅可以被称为“分束器光栅”，一般被放置在X射线检测器附近的光栅可以被称为“分析器光栅”，一般被放置在X射线源附近的光栅可以被称为“源光栅”。上述每个光栅均可以是具有一维周期性图案的光栅或者具有二维图案的光栅。所使用的X射线检测器一般是能够测量入射在X射线检测器的检测表面上的X射线的二维强度分布的检测器。

[0004] 分束器光栅典型地是基于相位调制透射的衍射光栅。入射在分束器光栅上的X射线被光栅的周期性结构衍射，由于所谓的Talbot效应而在预定位置处形成干涉图案（也被称为“光栅的自像”）。干涉图案反映了例如传播的X射线在它们穿过样品并且变形时的相位变化。通过执行干涉图案的强度分布的测量和分析，可以获得关于样品的形状和内部结构的信息。在本发明以及整个说明书中，通过利用由样品引起的X射线的相位变化来获取关于样品的信息的任何方法被称为X射线相衬(phase contrast)成像方法，即使该信息不被转换为图像。

[0005] 分析器光栅典型地是如下光栅，在该光栅中，X射线透射部分和X射线遮挡部分周期性地排列并由此具有周期性透射率分布。分析器光栅被放置在出现上述干涉图案的位置处，并因此被用于使摩尔图案(moiré pattern)出现在已经通过光栅的X射线的强度分布中。摩尔图案反映了干涉图案的变形，并且摩尔图案的周期可以无限制地增大。因此，即使所使用的检测器的空间分辨率并未高到足以确保干涉图案可以被直接检测到，对具有大周期的摩尔图案的检测也将使得能够间接地获得关于干涉图案的信息。例如，PTL 1中描述了利用干涉图案和光栅之间摩尔图案的出现的Talbot干涉仪。

[0006] 如上所述，分析器光栅被用于补偿X射线检测器的不足的空间分辨率。因此，当具有足够高的空间分辨率的检测器被使用时，分析器光栅的使用不是必要的。因为干涉图案一般具有大约几个微米(μm)的周期并且太过于细小以致不能用典型的X射线检测器直接检测到，所以通常使用分析器光栅。

[0007] 类似于典型的分析器光栅，源光栅也是具有其中X射线透射部分和X射线遮挡部分周期性地排列的结构的光栅。源光栅一般被放置在X射线源(X射线生成器)内部的X射线发射点附近，并因此被用于形成虚拟线性发光部分(在二维光栅中，微小的发光点)的阵列。从以上述方式形成的各个线性发光部分发射的X射线形成多个干涉图案，每个干涉图案为上面所述的干涉图案，并且当没有样品等被放置在X射线路径中时，这些干涉图案在以图案周

期的整数倍移位的同时相互叠加。因此,可以形成具有高X射线强度和高条纹可见度的周期性图案。为了实现如上所述的干涉图案的这种叠加,期望的是将每个光栅设计为使得其光栅周期和光栅之间的距离满足预定条件。使用如上所述的这种源光栅的Talbot干涉仪可以被特别地称为“Talbot-Lau干涉仪”。例如PTL 2中描述了使用这种源光栅的Talbot干涉仪。在下文中,术语“Talbot干涉仪”被用于还包括Talbot-Lau干涉仪。

[0008] 使用源光栅使得可以使用具有比较大的发光点尺寸的X射线源。如果发光点尺寸小到足以直接形成高可见度的干涉图案,则源光栅的使用不是必要的。然而,作为最常见的X射线源的X射线管中的这种微小的发光点的形成导致如下趋势:每单位时间的X射线输出减小并且成像时间显著增加。因此,当使用X射线管作为X射线源时,一般使用源光栅。

[0009] 在Talbot干涉仪中,常见的是获取样品的X射线透射率分布,X射线透射率分布是基于与标准X射线成像(吸收衬度成像)的原理类似的原理的图像,并且还获取关于干涉图案的条纹相位分布和干涉图案的可见度分布的信息。一般来说,干涉图案的条纹相位和可见度分别主要反映已经传播通过样品的X射线的相位分布的空间差异性和由细颗粒、纤维结构、物体的边缘部分等引起的X射线小角度散射的程度。

[0010] 引文列表

[0011] 专利文献

[0012] PTL 1日本专利No.4445397

[0013] PTL 2日本专利No.5162453

发明内容

[0014] 本发明的一方面提供了一种X射线Talbot干涉仪,该X射线Talbot干涉仪包括:包括多个X射线透射部分的源光栅,被配置为允许来自X射线源的X射线中的一些通过;具有周期性结构的分束器光栅,被配置为通过使用所述周期性结构使来自所述X射线透射部分的X射线衍射以形成干涉图案;以及X射线检测器,被配置为检测来自所述分束器光栅的X射线。所述分束器光栅通过使用所述周期性结构使来自所述多个X射线透射部分中的每个X射线透射部分的X射线衍射以形成各自与所述多个X射线透射部分之一对应的干涉图案。所述多个X射线透射部分被布置为使得各自与所述多个X射线透射部分之一对应的干涉图案相互叠加以增强特定的空间频率分量。所述特定的空间频率分量是通过样品对特定于所述干涉图案的空间频率分量的调制而产生的边带中的空间频率分量。

[0015] 参照附图阅读对示例性实施例的以下描述,本发明的其他特征将变得清楚。

附图说明

[0016] 图1是根据第一实施例的X射线Talbot干涉仪的示意图。

[0017] 图2A、2B和2C是例示了根据第一实施例和第二实施例的光栅图案的示图。

[0018] 图3例示了在第一实施例中获得的干涉图案的频谱的示例。

[0019] 图4A-1、4A-2、4B-1和4B-2例示了第一实施例中的多条样品信息的示例。

[0020] 图5A-1、5A-2、5B-1和5B-2例示了第一实施例中的多条样品信息的示例。

[0021] 图6是根据比较例1的X射线Talbot干涉仪的示意图。

[0022] 图7例示了在比较例1中获得的干涉图案的频谱的示例。

- [0023] 图8A-1、8A-2、8B-1和8B-2例示了比较例1中的多条样品信息的示例。
- [0024] 图9A和9B例示了第一实施例中的多条样品信息的示例。
- [0025] 图10A至10C例示了在第一实施例中获得的干涉图案的频谱的示例。
- [0026] 图11A至11C例示了在第一实施例中恢复的样品信息的频谱的示例。
- [0027] 图12A和12B例示了在第一实施例中恢复的样品信息的示例。
- [0028] 图13A至13C例示了在比较例1中获得的干涉图案的频谱的示例。
- [0029] 图14A至14C例示了在比较例1中恢复的样品信息的频谱的示例。
- [0030] 图15A和15B例示了在比较例1中恢复的样品信息的示例。
- [0031] 图16是根据第二实施例的X射线Talbot干涉仪的示意图。
- [0032] 图17A至17C例示了在第二实施例中恢复的样品信息的频谱的示例。
- [0033] 图18A和18B例示了在第一实施例中恢复的样品信息的示例。
- [0034] 图19是根据比较例2的X射线Talbot干涉仪的示意图。
- [0035] 图20A至20C例示了在比较例2中恢复的样品信息的频谱的示例。
- [0036] 图21A和21B例示了在比较例2中恢复的样品信息的示例。

具体实施方式

[0037] 通过使用源光栅,Talbot-Lau干涉仪即使在包括具有大的发光点尺寸的X射线源时,也能够形成具有比较高的可见度的周期性图案。然而,使用具有大的发光点尺寸的X射线源会增加要在其位置相互移位(与周期性图案的一个周期对应的量)的情况下叠加的干涉图案的数量。由于几何不清晰度效应(geometric unsharpness effect),这可能导致可以获取样品图像的空间分辨率降低,原因如下:来自源光栅中的不同透射部分的X射线入射在样品上的同一位置,由此在不同位置处形成干涉图案。

[0038] 通过使用分析器光栅,Talbot干涉仪即使在包括不具有高到足以检测干涉图案的空间分辨率的X射线检测器时,也能够通过利用摩尔效应来间接地获得关于干涉图案的信息。然而,样品信息以与用于标准X射线成像的方式类似的方式受到检测器的调制传递函数的影响,并且不一定能实现获取样品图像的足够的空间分辨率。

[0039] 在第一实施例中,将给出对如下Talbot干涉仪和Talbot干涉仪系统的描述:该Talbot干涉仪和Talbot干涉仪系统即使在包括具有与相关技术的Talbot干涉仪的发光点尺寸相同的发光点尺寸的X射线源时,也具有比相关技术的空间分辨率高的空间分辨率。在第二实施例中,将给出对如下Talbot干涉仪和Talbot干涉仪系统的描述:该Talbot干涉仪和Talbot干涉仪系统即使在包括与相关技术的Talbot干涉仪的X射线检测器相同的X射线检测器时,也具有比相关技术的空间分辨率高的空间分辨率。

[0040] 根据第一实施例,可以提供如下Talbot干涉仪和Talbot干涉仪系统:该Talbot干涉仪和Talbot干涉仪系统即使在包括具有与相关技术的Talbot干涉仪的发光点尺寸相同的发光点尺寸的X射线源时,也具有比相关技术的空间分辨率高的空间分辨率。

[0041] 根据第二实施例,可以提供如下Talbot干涉仪和Talbot干涉仪系统:该Talbot干涉仪和Talbot干涉仪系统即使在包括与相关技术的Talbot干涉仪的X射线检测器相同的X射线检测器时,也具有比相关技术的空间分辨率高的空间分辨率。

[0042] 在下文中将参照附图来详细描述本发明的优选实施例。在附图中,相同或基本相

同的组件被分配相同的附图标记,并且不被冗余地描述。

[0043] 第一实施例

[0044] 本实施例提供了包括源光栅的X射线Talbot-Lau干涉仪(在下文中也被简称为“干涉仪”),该源光栅的偏离干涉图案的载波的频率分量被增强。

[0045] 在相关技术的Talbot-Lau干涉仪中,源光栅被配置为增强干涉图案的载波。换句话说,相关技术的干涉仪被配置为使由形成在源光栅中的虚拟X射线源阵列中的各个微小的X射线源形成的干涉图案相互叠加,以使得干涉图案的明亮部分重叠并且干涉图案的黑暗部分重叠,从而提高对比度。相反,根据本实施例的干涉仪被配置为使得干涉图案的明亮部分部分地重叠并且干涉图案的黑暗部分部分地重叠。在下文中将给出更详细的描述。

[0046] 图6是根据比较例1的X射线Talbot-Lau干涉仪1100的示意图,其中X射线Talbot-Lau干涉仪1100是相关技术的X射线Talbot-Lau干涉仪。X射线Talbot-Lau干涉仪1100包括X射线源10、源光栅12、分束器光栅3、分析器光栅4以及X射线检测器5。尽管在图6中未示出,但是样品在被成像时被布置在分束器光栅3的附近。样品可以被布置在分束器光栅3的上游(源光栅12和分束器光栅3之间)或者分束器光栅3的下游(分束器光栅3和分析器光栅4之间)。

[0047] 如之前所述,在相关技术的X射线Talbot-Lau干涉仪中,在没有样品等被放置在从源光栅12延伸到X射线检测器5的X射线路径中时,由从源光栅12中的各个X射线透射部分发射的X射线形成的干涉图案18a、18b和18c在正好移位与图案周期 d_{IPC} 对应的量的同时相互叠加。也就是说,多个干涉图案借以相互叠加的相对移位量 d_{0c} 等于图案周期 d_{IPC} 。因此,由来自各个透射部分的X射线形成的干涉图案叠加,使得干涉图案的明亮部分准确地相互重叠并且干涉图案的黑暗部分准确地相互重叠。因此,具有与由来自单个透射部分的X射线形成的干涉图案的可见度类似的可见度的高强度周期性图案(通过多个干涉图案的叠加而形成的周期性图案)可以形成在分析器光栅上。即使由来自各透射部分的X射线形成的干涉图案在被移位图案周期的整数倍的同时相互叠加,干涉图案也以干涉图案的明亮部分准确地相互重叠并且干涉图案的黑暗部分准确地相互重叠的这种方式叠加。因此,干涉图案之间的移位量可以等于干涉周期的整数倍。

[0048] 为了确保由来自源光栅中的各个透射部分的X射线形成的干涉图案在被正好移位与图案周期相等的量或者与图案周期的整数倍相等的量的同时相互叠加,源光栅可以具有由以下表达式给出的光栅周期 d_{0c} :

[0049] [数学式1]

$$[0050] \quad d_{0c} = n_1 \times d_{IPC} \times \frac{L_{01c}}{L_{12c}},$$

[0051] 其中, n_1 是正整数, L_{01c} 表示源光栅和分束器光栅之间的距离, L_{12c} 表示分束器光栅和分析器光栅之间的距离。注意,元件之间的距离是元件的中心之间的距离。值 n_1 指示干涉图案借以在被移位的同时相互叠加的图案周期的数量。当 $n_1=1$ 时,如图6中所示的干涉图案18a、18b和18c所指示的,干涉图案在被移位与图案周期相等的量的同时相互叠加。

[0052] 相反,在根据本实施例的X射线Talbot干涉仪100中,如图1中所示,由来自源光栅2中的各个透射部分的X射线形成的干涉图案8a、8b和8c在被移位与当未放置样品时获得的图案周期 d_{IP} 不同的距离的同时相互叠加。也就是说,在根据本实施例的Talbot干涉仪100

中,由来自各个透射部分的X射线形成的干涉图案8a、8b和8c被移位的移位量 d_0' 不等于干涉图案周期 d_{IP} 。由来自各个开口的X射线形成的干涉图案8a、8b和8c的明亮部分在它们之间有移位的情况下相互重叠,而不是准确地相互重叠,并且干涉图案8a、8b和8c的黑暗部分在它们之间有移位的情况下相互重叠,而不是准确地相互重叠。源光栅2具有可以通过使用从其中干涉图案8a、8b和8c准确地相互重叠的条件偏离的偏离率 α_1 而由以下表达式表示的光栅周期 d_0 :

[0053] [数学式2]

$$[0054] \quad d_0 = n_1 \times d_{IP} \times \frac{L_{01}}{L_{12}} (1 + \alpha_1) \quad (1)$$

[0055] 其中, L_{01} 表示源光栅和分束器光栅之间的距离, L_{12} 表示分束器光栅和分析器光栅之间的距离。偏离率 α_1 也可以取负值,其中, $\alpha_1 \neq 0$ 。当 α_1 等于0时,源光栅的设计条件与比较例1中的设计条件相同。此外,在典型的Talbot-Lau干涉仪中,干涉图案之间的移位量可以是图案周期的2倍或更大的整数倍。同样地,根据本实施例的Talbot-Lau干涉仪也可以被设计为使得干涉图案之间的移位量是具有一定偏离率的图案周期的2倍或更大的整数倍。然而,这种设计(n_1 是大于或等于2的整数)具有源光栅的总体X射线透射率降低的缺点,这一般不是优选的。以下描述集中于 $n_1=1$ 的情况。在X射线Talbot干涉仪在分束器光栅和X射线检测器之间不包括分析器光栅的情况下,距离 L_{12c} 和 L_{12} 可以表示分束器光栅和X射线检测器的检测表面之间的距离。

[0056] 在图1和图6中,为了便于例示,由来自各个透射部分的X射线形成的干涉图案8a至8c和18a至18c被描绘为也在图1和图6的横向方向上的不同位置处。然而,实际上,干涉图案8a至8c和18a至18c形成在分析器光栅4上(或者如果不包括分析器光栅4,则在X射线检测器的检测表面上)。也就是说,源光栅2和12中的每个与干涉图案8a之间的距离等于源光栅2和12中的每个与干涉图案8b之间的距离。

[0057] 在下文中将更详细地描述本实施例。

[0058] 图1是根据本实施例的X射线Talbot干涉仪(在下文中也被简称为“干涉仪”)的示意图。干涉仪100包括源光栅2和分束器光栅3。源光栅2具有X射线透射部分,并且被配置为允许从X射线源10发射的X射线中的一些X射线从中通过。分束器光栅3通过使用周期性结构来使来自源光栅2中的X射线透射部分的X射线衍射以形成各自与X射线透射部分之一一对应的干涉图案8a至8c。干涉仪100还包括分析器光栅4和X射线检测器5。分析器光栅4阻挡形成干涉图案8a至8c的X射线中的一些X射线。X射线检测器5检测来自分束器光栅3的X射线的强度。干涉仪100可以与样品信息获取单元(其可以是包括处理器和存储装置等的算术单元)构成X射线Talbot干涉仪系统,所述样品信息获取单元被配置为通过使用与X射线检测器5所执行的检测的结果相关的信息来获取关于样品的信息。

[0059] 如上所述,当X射线检测器5具有足以检测干涉图案的高空间分辨率时,分析器光栅4不是必要的。在本发明以及整个说明书中,术语“检测来自分束器光栅的X射线”被用于还包括在X射线入射在分束器光栅上之后检测入射在光学元件、样品等上的X射线。也就是说,对来自分析器光栅4的X射线的检测也被称为对来自分束器光栅3的X射线的强度的检测,如果该X射线是已经传播通过分束器光栅3的X射线的话。在图1中所示的示例中,用X射线照射源光栅2的X射线源10以及上面所述的三个光栅2至4和检测器5构成X射线Talbot干

涉仪100。可替代地,X射线源10可以与Talbot干涉仪100分开,并且X射线源10和Talbot干涉仪100可以被组合使用。在本发明以及整个说明书中,被简称为“Talbot干涉仪”的干涉仪包括包含X射线源的Talbot干涉仪以及不包含X射线源的Talbot干涉仪(Talbot干涉仪可以具有用于安装X射线源的空间)这两者。

[0060] 图2A、2B和2C例示了各个光栅的示例性图案。图2A、2B和2C分别例示了源光栅2的图案、分束器光栅3的图案以及分析器光栅4的图案。源光栅2具有如下的一维周期性结构:在该一维周期性结构中,具有高X射线透射率的X射线透射部分(也被称为开口部分)21和具有低X射线透射率的X射线遮挡部分22被排列在一个方向上。分束器光栅3是具有如下的一维周期性结构的相位调制衍射光栅:在该一维周期性结构中,相位超前部分31和相位延迟部分32被排列在一个方向上。分束器光栅3的特定图案和相位调制量可以选自于适合一般接受的Talbot干涉仪的各种图案当中,并且在这里不受特别限制。分析器光栅4具有如下的一维周期性结构:在该一维周期性结构中,具有高X射线透射率的X射线透射部分41和具有低X射线透射率的X射线遮挡部分42被排列在一个方向上。

[0061] 所例示的光栅图案是示例,并且例如,每个光栅可以具有二维周期性结构。此外,已经通过相位超前部分31的X射线和已经通过相位延迟部分32的X射线之间的相位差不受特别限制。一般使用相位差为 π rad或 $\pi/2$ rad的分束器光栅,或者也可以使用相位差取任何其他值的分束器光栅。

[0062] 类似于相关技术的Talbot-Lau干涉仪,如果考虑当来自源光栅2形成的各个虚拟线性发光部分的X射线被分束器光栅3衍射时产生的Talbot效应,则距离 L_{01} 和 L_{12} 的值优选地满足其中干涉图案可见度在分析器光栅4上特别高的条件。

[0063] 在下面,将用简单的模型来描述当由来自各个虚拟线性发光部分的X射线形成的干涉图案以不等于图案周期的移位相互叠加时产生的效应(即,当偏离率 α_1 不为0时产生的效应)。

[0064] 首先,在分析器光栅上采取坐标系 (x, y) ,并且假定干涉图案的周期性方向与 x 轴方向一致。在这种情况下,分析器光栅上的由来源于源光栅上的单个点的X射线形成的干涉图案的强度分布 $g_{IP0}(x, y)$ 可以用以下表达式表示:

[0065] [数学式3]

$$[0066] \quad g_{IP0}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \left[\frac{2\pi}{d_{IP}} x + \phi(x, y) \right], \quad (2)$$

[0067] 其中, $a(x, y)$ 表示干涉图案的平均强度分布,其反映了样品的X射线透射率分布, $b(x, y)$ 表示干涉图案的振幅分布,其反映了样品的X射线透射率分布和干涉图案的周期性方向上的X射线小角度散射能力分布。另外, $\phi(x, y)$ 表示干涉图案的相位分布,其反映了由已经传播通过样品的X射线的相位分布(波前形状)在干涉图案的周期性方向上的微分而获得的分布。在这种情况下,本实施例中的特定于干涉图案的空间频率分量是其周期性方向为 x 轴方向并且其空间频率由 $1/d_{IP}$ 给出的空间频率分量。也可以认为特定于干涉图案的空间频率分量被用样品信息(即, $b(x, y)$ 和 $\phi(x, y)$)进行振幅调制和相位调制。在整个说明书中,被用样品信息调制的特定于干涉图案的空间频率分量可以被称为载波。可能的是:使用干涉图案的谐波分量而非基波分量作为载波。然而,干涉图案的谐波分量一般比基波分量小得多,并因此很少被用作载波。假定:

[0068] [数学式4]

$$c(x,y) = b(x,y) e^{i\phi(x,y)}, (3)$$

[0070] 表达式(2)可以重写为:

[0071] [数学式5]

$$g_{IP0}(x,y) = a(x,y) + \frac{1}{2} c(x,y) e^{i\frac{2\pi}{d_{IP}}x} + \frac{1}{2} c^*(x,y) e^{-i\frac{2\pi}{d_{IP}}x}, (4)$$

[0073] 其中,*表示复共轭。将二维傅立叶变换应用于两边得到:

[0074] [数学式6]

$$G_{IP0}(\xi,\eta) = A(\xi,\eta) + \frac{1}{2} C\left(\xi - \frac{1}{d_{IP}}, \eta\right) + \frac{1}{2} C^*\left(\xi + \frac{1}{d_{IP}}, \eta\right), (5)$$

[0076] 其中,大写字母表示函数的傅立叶变换(同样适用于下面), ξ 表示x轴方向上的空间频率, η 表示y轴方向上的空间频率。

[0077] 接着,将考虑当具有空间扩展性的X射线发射点以及源光栅的存在被考虑时获得的分析器光栅上的X射线强度分布。样品和分束器光栅被近似为在相同位置。此外,X射线发射点和源光栅被近似为在相同位置。

[0078] 表示X射线发射点的光发射强度分布的形状对于X射线发射点和源光栅的位置的x轴和y轴位置坐标(x_0, y_0)的函数用 $g_s(x_0, y_0)$ 表示。此外,源光栅的透射率分布用 $t_0(x_0, y_0)$ 表示。在这种情况下,X射线发射点的有效光发射强度分布 $g_{s0}(x_0, y_0)$ 可以用以下表达式表示:

[0079] [数学式7]

$$g_{s0}(x_0, y_0) = g_s(x_0, y_0) t_0(x_0, y_0). (6)$$

[0081] 此外,在这种情况下,分析器光栅上的X射线强度分布 $g_{IP}(x, y)$ 可以近似地用以下方程表示为 $g_{IP0}(x, y)$ 和点扩展函数 $h_{s0}(x, y)$ 的卷积,点扩展函数 $h_{s0}(x, y)$ 表示由X射线发射点的有效光发射强度分布引起的模糊:

[0082] [数学式8]

$$g_{IP}(x, y) = g_{IP0}(x, y) * h_{s0}(x, y), (7)$$

[0084] 其中,*表示卷积。与 $g_{IP0}(x, y)$ 不同, $g_{IP}(x, y)$ 表示实际形成在分析器光栅上的干涉图案的强度分布(即,由已经通过源光栅的所有X射线形成的干涉图案)。

[0085] 此外, $h_{s0}(x, y)$ 可以用以下表达式表示:

[0086] [数学式9]

$$h_{s0}(x, y) \propto g_{s0}\left(-\frac{L_{01}}{L_{12}}x, -\frac{L_{01}}{L_{12}}y\right), (8)$$

[0088] 其中, $h_s(x, y)$ 是表示以下表达式的函数:

[0089] [数学式10]

$$h_s(x, y) \propto g_s\left(-\frac{L_{01}}{L_{12}}x, -\frac{L_{01}}{L_{12}}y\right). (9)$$

[0091] 注意, $h_s(x, y)$ 是当不包括源光栅时获得的上述点扩展函数。

[0092] 此外,当源光栅具有简单的正弦透射率分布时, $t_0(x_0, y_0)$ 可以用以下表达式表示:

[0093] [数学式11]

[0094] $t_0(x_0, y_0) = 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{d_0}x_0\right). \quad (10)$

[0095] 此外,干涉图案之间的相对移位量 d_0' 可以通过以下方程、使用源光栅的间距 d_0 以及干涉仪的几何形状(L_{12} 和 L_{01})来表示:

[0096] [数学式12]

[0097] $d_0' = d_0 \frac{L_{12}}{L_{01}}. \quad (11)$

[0098] 在这种情况下,表达式(8)可以重写为:

[0099] [数学式13]

[0100] $h_{s0}(x, y) = h_s(x, y) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{d_0'}x\right) \right]. \quad (12)$

[0101] $g_{IP}(x, y)$ 也可以被认为是作为使由来自源光栅中的多个X射线透射部分的X射线形成的多个干涉图案叠加的结果而生成的强度分布。在这种情况下,作为 $h_{s0}(x, y)$ 的傅立叶变换的 $H_{s0}(\xi, \eta)$ 由以下表达式给出:[数学式14]

[0102] $H_{s0}(\xi, \eta) = H_s(\xi, \eta) + \frac{1}{2}H_s\left(\xi - \frac{1}{d_0'}, \eta\right) + \frac{1}{2}H_s\left(\xi + \frac{1}{d_0'}, \eta\right). \quad (13)$

[0103] 因此,通过使用表达式(5)、(7)和(13)以及卷积定理,作为 $g_{IP}(x, y)$ 的傅立叶变换的 $G_{IP}(\xi, \eta)$ 可以用以下表达式表示:

[0104] [数学式15]

$$\begin{aligned} G_{IP}(\xi, \eta) &= G_{IP0}(\xi, \eta)H_{s0}(\xi, \eta) \\ &\approx A(\xi, \eta)H_s(\xi, \eta) \\ &+ \frac{1}{4}C\left(\xi - \frac{1}{d_{IP}}, \eta\right)H_s\left(\xi - \frac{1}{d_0'}, \eta\right) \\ &+ \frac{1}{4}C^*\left(\xi + \frac{1}{d_{IP}}, \eta\right)H_s\left(\xi + \frac{1}{d_0'}, \eta\right). \quad (14) \end{aligned}$$

[0106] 这里假定:相比于 d_{IP} 和 d_0' , $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ 和 $h_s(x, y)$ 的空间变化速率足够适中。

[0107] 从表达式(14)看出,样品信息 $c(x, y)$ 在该信息的传输期间由于源光栅和具有空间扩展性的X射线发射点的作用而被频率滤波器 H_s 滤波。还看出,滤波器 H_s 的形状由X射线发射点的发光强度分布以及距离 L_{01} 和 L_{12} 确定,滤波器 H_s 相对于 $C(\xi, \eta)$ 的相对位置由干涉条纹的周期 d_{IP} 、源光栅的光栅周期 d_0 以及距离 L_{01} 和 L_{12} 确定。

[0108] 接下来,将考虑当X射线通过分析器光栅并且进入X射线检测器时最终测量的X射线强度分布。分析器光栅的透射率分布 $t_2(x, y)$ 由以下表达式表示:

[0109] [数学式16]

[0110] $t_2(x, y) = 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{d_2}x - \phi_r\right), \quad (15)$

[0111] 其中, d_2 表示分析器光栅的光栅周期, ϕ_r 表示分析器光栅的相位 (对应于该光栅的 x 方向位置)。类似于源光栅, 分析器光栅的光栅周期 d_2 也可以取 d_{IP} 的 2 倍或更大的整数倍或者与之接近的值, 这一般也不是优选的, 因为 X 射线透射率将降低。在下面, 将给出光栅周期 d_2 具有与 d_{IP} 接近的值的情况的描述。此外, 因为分析器光栅一般被放置在 X 射线检测器的检测表面的邻近, 所以分析器光栅和检测表面被近似为在相同位置。在这种情况下, 如果特定于由所使用的 X 射线检测器执行的强度分布测量的点扩展函数 (PSF) 用 $h_D(x, y)$ 表示, 则最终测量的 X 射线强度分布 $g_M(x, y)$ 可以通过以下方程、使用已经通过分析器光栅的 X 射线的强度分布 ($g_{IP}(x, y) t_2(x, y)$) 以及检测器的点扩展函数来表示:

[0112] [数学式 17]

$$[0113] \quad g_M(x, y) = [g_{IP}(x, y) t_2(x, y)] * h_D(x, y). \quad (16)$$

[0114] 因此, 作为 $g_M(x, y)$ 的傅立叶变换的 $G_M(\xi, \eta)$ 可以用以下表达式表示:

[0115] [数学式 18]

$$[0116] \quad \begin{aligned} G_M(\xi, \eta) &= [G_{IP}(\xi, \eta) * T_2(\xi, \eta)] H_D(\xi, \eta) \\ &\approx [A(\xi, \eta) H_S(\xi, \eta) \\ &\quad + \frac{1}{8} C \left(\xi - \frac{1}{d_{IP}} + \frac{1}{d_2}, \eta \right) H_S \left(\xi - \frac{1}{d_0'} + \frac{1}{d_2}, \eta \right) e^{i\phi_r} \\ &\quad + \frac{1}{8} C^* \left(\xi + \frac{1}{d_{IP}} - \frac{1}{d_2}, \eta \right) H_S \left(\xi + \frac{1}{d_0'} - \frac{1}{d_2}, \eta \right) e^{-i\phi_r}] H_D(\xi, \eta). \quad (17) \end{aligned}$$

[0117] 这里, 其中该函数的中心在 (ξ, η) 空间中位于离原点非常远的区域中的项当被用 $H_D(\xi, \eta)$ 滤波时被认为具有足够小的值, 因此被忽略。此外, $|H_D(\xi, \eta)|$ 是与检测器的调制传递函数 (MTF) 对应的函数。

[0118] 在干涉仪正被使用的一种情况下, 分析器光栅沿着 x 轴移动, 以使得强度分布测量可以在 ϕ_r 改变的情况下被执行多次以便获取关于样品的信息。在这种情况下, X 射线检测器在移动单元使相对位置移动之前和之后执行检测以在分析器光栅相对于干涉图案的不同相对位置处获取多个检测结果。作为被执行多次的强度分布测量的结果而获得的信息经历基于所谓的相移方法的原理的预定计算, 以使得关于表达式 (17) 中的方括号中的三项的频谱可以被分别计算。例如, 强度分布测量被执行三次, 并且关于强度分布 $g_M(x, y, k)$ 及其傅立叶变换 (即, $G_M(\xi, \eta, k)$ (其中, $k=1, 2, 3$)) 的信息被获得。在这种情况下, 如果 ϕ_r 以以下表达式给出的方式改变:

[0119] [数学式 19]

$$[0120] \quad \phi_r(k) = 0, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3} (k = 1, 2, 3), \quad (18)$$

[0121] 则作为在频域中表示的样品信息的 $A(\xi, \eta)$ 和 $C(\xi, \eta)$ 的恢复值 (其是指根据测量结果实际获取的值) $A_R(\xi, \eta)$ 和 $C_R(\xi, \eta)$ 可以分别用以下表达式计算:

[0122] [数学式 20]

$$\begin{aligned}
 [0123] \quad A_R(\xi, \eta) &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 G_M(\xi, \eta, k) \\
 &= A(\xi, \eta) H_S(\xi, \eta) H_D(\xi, \eta) \quad (19)
 \end{aligned}$$

[0124] 以及

[0125] [数学式21]

$$\begin{aligned}
 [0126] \quad C_R(\xi, \eta) &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 G_M\left(\xi + \frac{1}{d_{IP}} - \frac{1}{d_2}, \eta, k\right) e^{-i\frac{2\pi}{3}(k-1)} \\
 &= \frac{1}{8} C(\xi, \eta) H_S(\xi - \xi_0, \eta) H_D(\xi - \xi_2, \eta), \quad (20)
 \end{aligned}$$

[0127] 其中, ξ_0 和 ξ_2 分别由以下表达式给出:

[0128] [数学式22]

$$[0129] \quad \xi_0 = \frac{1}{d_0'} - \frac{1}{d_{IP}} \quad (21)$$

[0130] 以及

[0131] [数学式23]

$$[0132] \quad \xi_2 = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_{IP}}, \quad (22)$$

[0133] 从表达式 (19) 和 (20) 看出, 通过上述技术恢复的样品信息最终受两个频率滤波器 (即, H_S 和 H_D) 的影响, 这两个频率滤波器分别是X射线源和X射线检测器的点扩展函数的傅立叶变换。从表达式 (19) 也看出, 所获取的 $A_R(\xi, \eta)$ (以及在 (x, y) 空间中表示的 $a_R(x, y)$) 不受源光栅和分析器光栅的光栅周期的影响, 因为作为样品信息的频谱的 $A(\xi, \eta)$ 的中心位置和将被应用于 $A(\xi, \eta)$ 的两个频率滤波器的中心位置总是匹配。

[0134] 相反, 从表达式 (20) 看出, 对于所获取的 $C_R(\xi, \eta)$ (以及在 (x, y) 空间中表示的 $c_R(x, y)$), 作为样品信息的频谱的 $C(\xi, \eta)$ 的中心位置和将被应用于 $C(\xi, \eta)$ 的两个频率滤波器的中心位置不总是匹配。滤波器的相对移位量根据源光栅和分析器光栅的光栅周期并且根据光栅之间的位置关系而被确定。具体地说, 滤波器 H_S 相对于 $C(\xi, \eta)$ 的移位量 ξ_0 根据 $1/d_0'$ 和 $1/d_{IP}$ 之间的差值而被确定, 并且滤波器 H_D 相对于 $C(\xi, \eta)$ 的移位量 ξ_2 根据 $1/d_2$ 和 $1/d_{IP}$ 之间的差值而被确定。因此, 对值 d_{IP} 、 d_0' 和 d_2 的调整使得能够控制上述频率滤波器的影响。

[0135] 作为根据比较例1的Talbot干涉仪的相关技术的Talbot干涉仪一般被设计为满足 $d_0' = d_2 = d_{IP}$ 。因此, $\xi_0 = \xi_2 = 0$ 成立。这里, 如果将被应用于样品信息的频谱 $C(\xi, \eta)$ 的 H_S 和 H_D 的复合滤波器由 H_C 表示, 并且被定义为:

[0136] [数学式24]

$$[0137] \quad H_C(\xi, \eta) = H_S(\xi - \xi_0, \eta) H_D(\xi - \xi_2, \eta), \quad (23)$$

[0138] 则表达式 (20) 可以重写为:

[0139] [数学式25]

[0140]
$$C_R(\xi, \eta) = \frac{1}{8} C(\xi, \eta) H_C(\xi, \eta). \quad (24)$$

[0141] 虽然前面以在移动分析器光栅的情况下进行强度分布测量的技术作为示例进行了描述,但是该信息也可以通过移动分束器光栅或源光栅来获取。另外,频谱的这种分离可以使用除相移方法之外的方法来执行。例如,频谱的分离可以通过产生具有比较短的周期的摩尔图案、对由X射线检测器检测的强度分布应用傅立叶变换、以及在频率空间中对频谱进行滤波来执行。所述算术在样品信息获取单元中执行。

[0142] 接着,假定X射线发射点具有二维高斯发光强度分布,则 $g_S(x_0, y_0)$ 可以用以下表达式表示:

[0143] [数学式26]

[0144]
$$g_S(x_0, y_0) = e^{-\frac{x_0^2 + y_0^2}{2\sigma_S^2}}, \quad (25)$$

[0145] 其中, σ_S 是定义X射线发射点的空间扩展度的常数。在这种情况下, $h_S(x, y)$ 可以通过使用表达式(9)而被表示为以下表达式:

[0146] [数学式27]

[0147]
$$h_S(x, y) \propto e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_S'^2}}, \quad (26)$$

[0148] 其中, σ_S' 由以下表达式给出:

[0149] [数学式28]

[0150]
$$\sigma_S' = \sigma_S \frac{L_{12}}{L_{01}}. \quad (27)$$

[0151] 在这种情况下,如果系数被忽略,则作为 $h_S(x, y)$ 的傅立叶变换的 $H_S(\xi, \eta)$ 可以用以下方程表示:

[0152] [数学式29]

[0153]
$$H_S(\xi, \eta) = e^{-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2\sigma_{SF}^2}}. \quad (28)$$

[0154] 因此, $H_S(\xi, \eta)$ 也具有高斯形状。在上面给出的方程中, σ_{SF} 是定义 $H_S(\xi, \eta)$ 的宽度的常数,并且由以下表达式给出:

[0155] [数学式30]

[0156]
$$\sigma_{SF} = \frac{1}{2\pi\sigma_S'} = \frac{1}{2\pi\sigma_S} \frac{L_{01}}{L_{12}}. \quad (29)$$

[0157] 类似地,假定特定于X射线检测器的点扩展函数也具有二维高斯形状,则 $h_D(x, y)$ 可以用以下表达式表示:

[0158] [数学式31]

[0159]
$$h_D(x, y) \propto e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_D^2}}, \quad (30)$$

[0160] 其中, σ_D 是定义 $h_D(x, y)$ 的宽度的常数。在这种情况下,如果系数被忽略,则作为 $h_D(x, y)$ 的傅立叶变换的 $H_D(\xi, \eta)$ 用以下表达式计算:

[0161] [数学式32]

[0162]
$$H_D(\xi, \eta) = e^{-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2\sigma_{DF}^2}}, \quad (31)$$

[0163] 其中, σ_{DF} 由以下表达式给出:

[0164] [数学式33]

[0165]
$$\sigma_{DF} = \frac{1}{2\pi\sigma_D}. \quad (32)$$

[0166] 在这种情况下, 将被应用于由表达式 (23) 定义的样品信息的频谱 $C(\xi, \eta)$ 的复合滤波器 $H_C(\xi, \eta)$ 可以用以下表达式表达:

[0167] [数学式34]

[0168]
$$\begin{aligned} H_C(\xi, \eta) &= H_S(\xi - \xi_0, \eta) H_D(\xi - \xi_2, \eta) \\ &= e^{-\frac{(\xi - \xi_0)^2 + \eta^2}{2\sigma_{SF}^2}} e^{-\frac{(\xi - \xi_2)^2 + \eta^2}{2\sigma_{DF}^2}} \\ &= e^{-\frac{(\xi_0 - \xi_2)^2}{2(\sigma_{SF}^2 + \sigma_{DF}^2)}} e^{-\frac{(\xi - \xi_C)^2 + \eta^2}{2\sigma_{CF}^2}}, \quad (33) \end{aligned}$$

[0169] 其中, ξ_C 和 σ_{CF} 分别由以下表达式给出:

[0170] [数学式35]

[0171]
$$\xi_C = \frac{\sigma_{DF}^2 \xi_0 + \sigma_{SF}^2 \xi_2}{\sigma_{SF}^2 + \sigma_{DF}^2} \quad (34)$$

[0172] 以及

[0173] [数学式36]

[0174]
$$\sigma_{CF} = \frac{\sigma_{SF} \sigma_{DF}}{\sqrt{\sigma_{SF}^2 + \sigma_{DF}^2}}, \quad (35)$$

[0175] 从表达式 (33) 看出, 这里, 将被应用于作为样品信息的频谱的 $C(\xi, \eta)$ 的复合滤波器 $H_C(\xi, \eta)$ 具有高斯形状, 并且从表达式 (35) 看出, 表示滤波器宽度的 σ_{CF} 不取决于 ξ_0 或 ξ_2 。因此, 更优选的是满足 $\xi_0 = \xi_2$ 的条件, 以便通过最大化 $|H_C(\xi, \eta)|$ 的积分值来传输 $C(\xi, \eta)$ 的更多分量。此外, 从表达式 (34) 看出, $\xi_C = \xi_0 = \xi_2$ 成立。

[0176] 接下来, 将使用仿真结果来描述根据本实施例的 Talbot 干涉仪和根据比较例 1 的 Talbot 干涉仪之间的差异。根据比较例 1 的 Talbot 干涉仪对应于当光栅周期的偏离率 α_1 为零时的根据本实施例的 Talbot 干涉仪。因此, 可以通过使用与本实施例中的公式类似的公式进行仿真来作出性能比较。如这里所使用的, 根据比较例 1 的 Talbot 干涉仪是被设计为满足 $d_0' = d_2 = d_{IP}$ 的干涉仪。此外, 如这里所使用的, 根据本实施例的 Talbot 干涉仪是被设计为满足 $d_0' = d_2 \neq d_{IP}$ 的干涉仪。这里还假定 h_S 和 h_D 是高斯形状的函数。

[0177] 图 3 和图 7 例示了作为基于前述说明的仿真的结果而获得的频谱形状的示例。在图 3 和图 7 中, 例示了 ξ 轴上的频谱的轮廓。在图 3 和图 7 中, $G_{IP0}(\xi, \eta)$ 表示通过对由来源于源光栅上的单个点的 X 射线形成的干涉图案的强度分布进行傅立叶变换而获得的频谱 (在用 $H_{S0}(\xi, \eta)$ 的滤波被应用之前的频谱)。此外, $H_{S0}(\xi, \eta)$ 表示代表源光栅的作用和 X 射线发射点

的空间扩展性的频率滤波器。 $G_{IP}(\xi, \eta)$ 表示通过对受到源光栅和X射线发射点的空间扩展性影响的干涉图案的强度分布进行傅立叶变换而获得的频谱。

[0178] 图4A-1描绘了该仿真中的 $b(x, y) (=|c(x, y)|)$ 的设置值的图像, 图4B-1描绘了该仿真中的 $\phi(x, y) (=arg[c(x, y)])$ 的设置值的图像。图4A-2和4B-2分别描绘了图4A-1和4B-1中描绘的图像在x轴上的轮廓。如图4A-1、4A-2、4B-1和4B-2所示, 这里, 在x方向上具有关于单个的区域的三个不同的周期, x方向上的具有周期性图案的分布被设置为 $\phi(x, y)$ 。相反, 假定 $b(x, y) = 1$ 。指出, 假定 $a(x, y) = 1$ 。

[0179] 图7例示了对于 $d_{0C} = d_{IP}$, 即, 对于相关技术的X射线Talbot-Lau干涉仪(比较例1)的频谱。所例示的条件是图6中所示的相关技术的Talbot-Lau干涉仪的那些条件, 并且干涉图案中通过多个干涉图案的叠加而被源光栅增强的空间频率分量与样品信息的载波匹配。

[0180] 图7的检查揭示了: 在比较例1中, 作为理想干涉条纹强度分布的频谱的 $G_{IP0}(\xi, \eta)$ 由于用 $H_{S0}(\xi, \eta)$ 滤波而变为 $G_{IP}(\xi, \eta)$ 。作为频谱变形之前的干涉图案的频谱的 $G_{IP0}(\xi, \eta)$ 具有非常高的载波峰以及由于对载波的调制而在附近频域中产生的边带。这里, 样品信息主要被包括在边带中, 其中, 更靠近载波的频率分量对应于 $c(x, y)$ 中的更低频率分量, 更远离载波的频率分量对应于 $c(x, y)$ 中的更高频率分量。一般来说, $c(x, y)$ 包含相位项。因此, 上边带和下边带不总是完全对称的。在许多情况下, 上边带和下边带具有对称性比较高的形状。在根据比较例1的Talbot-Lau干涉仪中, 载波 ($\xi = \pm 1/d_{IP}$) 通过源光栅的作用而被增强。换句话说, 当在 ξ 轴的正侧关注频谱从 $G_{IP0}(\xi, \eta)$ 到 $G_{IP}(\xi, \eta)$ 的变化时, $H_{S0}(\xi, \eta)$ 的与 $(1/2)H_S(\xi - 1/d_0', \eta)$ 项对应的部分起带通滤波器的作用, 并且与 $(1/2)H_S(\xi - 1/d_0', \eta)$ 项对应的高斯形状的部分的中心与载波频率匹配。因此, 鉴于与样品信息 $C(\xi - 1/d_{IP}, \eta)$ 对应的边带中的靠近载波的相当大量的分量被传输, 所传输的远离载波的分量的量显著减少。这意味着样品信息 $c(x, y)$ 中的高频分量大幅度地衰减。被源光栅增强的频率是指这样的频率: 在该频率处, 影响载波的区域(与 $(1/2)H_S(\xi - 1/d_0', \eta)$ 项对应的部分)具有局部极大值。换句话说, 被源光栅增强的频率是指 $1/d_0'$ 。一旦源光栅和分束器光栅的配置以及这些光栅和分析器光栅(或者X射线检测器, 如果不包括分析器光栅的话)的几何形状被确定, 值 d_0' 就可以被计算。

[0181] 图8A-1、8A-2、8B-1和8B-2例示了已经经历了滤波器 $H_{S0}(\xi, \eta)$ 的频谱变形的样品信息 $c(x, y)$ (被称为 $c'(x, y)$) 和x轴上的对应轮廓。图8A-1和8B-1例示了 $|c'(x, y)|/2$ 和 $arg[c'(x, y)]$ 的图像, 图8A-2和8B-2例示了各图像在x轴上的轮廓。在该仿真中, 添加了一定量的噪声。如根据上述频谱的变化而预计的, 比较图8A-1、8A-2、8B-1、8B-2与图4A-1、4A-2、4B-1、4B-2表明: 高频分量在图像中明显地衰减, 并且信噪比降低, 从而导致检测困难。

[0182] 相反, 图3描绘了根据本实施例的X射线Talbot干涉仪中的频谱形状的示例。在所描绘的示例中, d_0' 略大于 d_{IP} 。

[0183] 图3的检查揭示了: 在根据本实施例的Talbot干涉仪中, 出现了频谱从 $G_{IP0}(\xi, \eta)$ 到 $G_{IP}(\xi, \eta)$ 的变化。因为 d_0' 略大于 d_{IP} , 所以通过多个干涉图案的叠加而被源光栅增强的空间频率分量位于由样品对载波的调制而产生的下边带的中心附近。换句话说, 当在 ξ 轴的正侧关注频谱从 $G_{IP0}(\xi, \eta)$ 到 $G_{IP}(\xi, \eta)$ 的变化时, 带通滤波器的中心 ($(1/2)H_S(\xi - 1/d_0', \eta)$ 的局部极大值) 与载波不匹配, 并且位于由样品的调制而产生的边带内的下边带的中心附近。这里, 类似于图7, 带通滤波器是 $H_{S0}(\xi, \eta)$ 的与 $(1/2)H_S(\xi - 1/d_0', \eta)$ 项对应的部分, 并且具有高

斯形状。因此,上边带基本上消失。另一方面,与图7相比,揭示了远离载波的大量下边带分量仍然存在。也就是说,在与样品信息 $C(\xi-1/d_{IP}, \eta)$ 对应的边带中实质上将被传输的分量主要是一个边带中的分量。因此,与图7中所示的比较例中的被传输的频谱 $G_{IP}(\xi, \eta)$ 相比,存在 $c(x, y)$ 中的相当大量的高频分量残留的趋势。将被增强的空间频率分量可以位于通过样品对载波的调制而产生的上边带的中心附近。不是边带的中心附近的分量,而是边带内的分量可以被增强。为此,可能足够的是: $H_{S0}(\xi, \eta)$ 的与 $(1/2)H_S(\xi-1/d_0', \eta)$ 对应的部分的局部极大值与通过样品的调制而产生的边带内的分量匹配。

[0184] 图5A-1、5A-2、5B-1和5B-2例示了 $c'(x, y)$ 和 x 轴上的对应轮廓, $c'(x, y)$ 是已经经历了滤波器 $H_{S0}(\xi, \eta)$ 的频谱变形的样品信息 $c(x, y)$ 。图5A-1和5B-1例示了 $|c'(x, y)|/2$ 和 $\arg[c'(x, y)]$ 的图像,图5A-2和5B-2例示了各图像在 x 轴上的轮廓。同样地在该仿真中,添加了与比较例1中的噪声量相当的噪声量。如从上述频谱的变化预计的,比较图5A-1、5A-2、5B-1、5B-2与图8A-1、8A-2、8B-1、8B-2以及图4A-1、4A-2、4B-1、4B-2表明,与比较例1相比,图像中的大量高频分量残留下来,并且检测性能得到提高。在图5A-1和5A-2中,图4A-1和4A-2中未示出的样品图像出现,因为由于频率滤波器相对于载波的非对称性的效应,关于 $\phi(x, y)$ 的信息也出现在 $c'(x, y)$ 的绝对值侧。也就是说, $|c'(x, y)|$ 和 $b(x, y)$ 之间的相关性以及 $\arg(c'(x, y))$ 和 $\phi(x, y)$ 之间的相关性变弱。同样地,尽管在该仿真结果中未示出,但是本实施例具有如下副效应:关于 $b(x, y)$ 的信息出现在 $c'(x, y)$ 的辐角侧(argument side)。

[0185] 接下来,将给出在假定存在分析器光栅的情况下通过使用如上所述的相移方法来计算样品信息的恢复值 $C_R(\xi, \eta)$ 的所有步骤的仿真的结果的描述。

[0186] 图9A和9B分别描绘了该仿真中的 $|c(x, y)|$ 和 $\arg[c(x, y)]$ 的设置值的图像以及 x 轴上的对应轮廓。注意,假定 $a(x, y) = 1$ 。

[0187] 图13A、13B和13C分别例示了比较例1中的 $|G_{IP0}(\xi, \eta)|$ 、 $|H_{S0}(\xi, \eta)|$ 和 $|G_{IP}(\xi, \eta)|$ 在 ξ 轴上的轮廓。详细的条件不同于上述比较例1中的那些条件。类似于图7,揭示了由于 $|H_{S0}(\xi, \eta)|$ 的影响, $|G_{IP}(\xi, \eta)|$ 表现出 $|G_{IP0}(\xi, \eta)|$ 的增强载波,并且所传输的离载波较远的频率分量的量减少。

[0188] 图14A、14B和14C描绘了在假定存在分析器光栅的情况下通过使用相移方法计算样品信息的恢复值 $C_R(\xi, \eta)$ 的所有步骤的仿真的结果。这里假定分析器光栅具有与载波匹配的间距 d_2 。在图14A和14C中,样品信息的越低的频率分量离原点越近,样品信息的越高的频率分量离原点越远。图14A、14B和14C分别描绘了 $|C(\xi, \eta)|$ 、 $|H_C(\xi, \eta)|$ 和 $|C_R(\xi, \eta)|$ 在 ξ 轴上的轮廓。因为 $H_C(\xi, \eta)$ 是 $H_S(\xi-\xi_0, \eta)$ 和 $H_D(\xi-\xi_2, \eta)$ 的合成,所以 $H_C(\xi, \eta)$ 是相比于单独的 H_S 具有被允许用于传输的更小的宽度和更小的频带的滤波器。从图14A、14B和14C可以理解,在相关技术的Talbot干涉仪中,频率滤波器 $H_C(\xi, \eta)$ 在频率坐标系的原点处具有局部极大值,并且 ξ 轴上的轮廓具有关于原点的对称性(二维地,具有关于原点的点对称性)。因此,在 $C(\xi, \eta)$ 中在离原点越远的区域中的分量在传输期间丢失得越多。换句话说, $c(x, y)$ 中的高频分量大量地丢失。这可以在图15A和15B中观察到,其中图15A和15B例示了与 $C_R(\xi, \eta)$ 对应的 $c_R(x, y)$ 。

[0189] 图10A、10B和10C例示了根据本实施例的 $|G_{IP0}(\xi, \eta)|$ 、 $|H_{S0}(\xi, \eta)|$ 和 $|G_{IP}(\xi, \eta)|$ 在 ξ 轴上的轮廓的单独的部分。不同于上面所述的示例, d_0' 被假定略小于 d_{IP} 。因此,上边带的中

心附近的分量被增强。

[0190] 图11A、11B和11C例示了通过使用相移方法、利用分析器光栅来计算样品信息的恢复值 $C_R(\xi, \eta)$ 的所有步骤的仿真的结果。假定分析器光栅具有与 d_0' 匹配的间距 d_2 。图11A、11B和11C分别描绘了 $|C(\xi, \eta)|$ 、 $|H_C(\xi, \eta)|$ 和 $|C_R(\xi, \eta)|$ 在 ξ 轴上的轮廓。从图11A、11B和11C可以理解,在根据本实施例的Talbot干涉仪中,频率滤波器 $H_C(\xi, \eta)$ 在远离频率坐标系的原点的位置处具有局部极大值。因此,这里,只有 $C(\xi, \eta)$ 中的 $\xi > 0$ 的区域中的分量被实质上传输。比较该结果与图14C中所示的比较例1中的 $|C_R(\xi, \eta)|$ 的形状表明,在 $C(\xi, \eta)$ 中在离原点越远的区域中的越多分量被传输。换句话说, $c(x, y)$ 中有更多的高频分量残留下来。这可以在图12A和12B中观察到,图12A和12B例示了与 $C_R(\xi, \eta)$ 对应的 $c_R(x, y)$ 。

[0191] 接下来,将考虑根据本实施例的值 d_0 和 d_2 的优选范围。

[0192] 首先,将考虑作为理想干涉条纹强度分布的频谱的 $G_{IP0}(\xi, \eta)$ 由于被用 $H_{S0}(\xi, \eta)$ 滤波而变为 $G_{IP}(\xi, \eta)$ 的阶段。在该阶段中,当 $n_1=1$ (其中, $|\alpha_1| \ll 1$) 时,作为 $H_{S0}(\xi, \eta)$ 的与 $(1/2)H_S(\xi-1/d_0', \eta)$ 项对应的部分的中心和载波之间的频率差异的 ξ_0 可以由以下表达式表示:

[0193] [数学式37]

$$[0194] \quad \xi_0 = \frac{1}{d_0'} - \frac{1}{d_{IP}} = -\frac{1}{d_{IP}} \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1} \approx -\frac{\alpha_1}{d_{IP}}, \quad (36)$$

[0195] 此外,表示具有高斯形状的 H_S 的宽度的 σ_{SF} 由表达式(29)表示。另一方面,作为样品信息的频谱的 $C(\xi-1/d_{IP}, \eta)$ 以载波为中心,并且围绕载波二维地分布。如上所述, $\Phi(x, y)$ 反映了通过对已经传播通过样品的X射线在载波的方向上的相位分布的微分而获得的分布。因此, $C(\xi-1/d_{IP}, \eta)$ 的分量明显地出现在特别是 ξ 轴方向上,其中 ξ 轴方向是载波的方向。因此优选的是,滤波器 H_S 沿着 ξ 轴(设置 $\xi_0 \neq 0$)偏移。使 $|\xi_0|$ 较大使得能够传输 $c(x, y)$ 中的大量的较高的频率分量,并且还造成如下缺点:低频分量的缺乏将导致不自然的图像。为了实现在防止缺乏低频分量的同时增大高频分量的传输量的效果,选择 ξ_0 以便满足以下表达式可能是足够的:

[0196] [数学式38]

$$[0197] \quad 0.5\sigma_{SF} < |\xi_0| < 3.0\sigma_{SF} \quad (37)$$

[0198] 令 $g_s(x_0, y_0)$ 的半高全宽为 w_s ,当 $g_s(x_0, y_0)$ 具有高斯形状时, $w_s = 2\sigma_s(2\ln 2)^{0.5}$ 的关系成立。因此,表达式(37)可以重写为:

[0199] [数学式39]

$$[0200] \quad 0.5 \frac{\sqrt{2\ln 2} L_{01}}{\pi w_s L_{12}} < |\xi_0| < 3.0 \frac{\sqrt{2\ln 2} L_{01}}{\pi w_s L_{12}}. \quad (38)$$

[0201] 计算系数部分并且用 α_1 重写表达式(38)得到:

[0202] [数学式40]

$$[0203] \quad 0.2 \frac{d_{IP} L_{01}}{w_s L_{12}} < |\alpha_1| < 1.1 \frac{d_{IP} L_{01}}{w_s L_{12}}. \quad (39)$$

[0204] 表达式(39)是当仅考虑X射线发射点的发光强度分布($g_s(x_0, y_0)$)的宽度时给出本实施例中的用于确定值 d_0 的偏离率 α_1 的优选范围的表达式。虽然描述基于X射线发射点的发光强度分布 $g_s(x_0, y_0)$ 具有高斯形状的假设,但是发光强度分布 $g_s(x_0, y_0)$ 可以具有任何其他

的一般形状,诸如矩形函数的形状。在这种情况下,尽管 H_S 的形状的复杂度提高,但是值 α_1 的优选范围与由表达式(39)给出的范围匹配。

[0205] 接着,将考虑当考虑通过使用相移方法、利用分析器光栅计算样品信息的恢复值 $C_R(\xi, \eta)$ 的所有步骤时值 d_0 的优选范围。

[0206] 当用于X射线检测器的点扩展函数远小于用于X射线发射点的点扩展函数时,可以设置例如 $d_2 = d_{IP} \neq d_0'$ 。然而,一般来说,如上所述,优选的是设置 $d_2 = d_0'$ 。此外,如上所述,当考虑通过使用相移方法的测量的所有步骤时合成频率滤波器 H_C 的宽度 σ_{CF} 由表达式(35)给出。在这种情况下, $\xi_0 (= \xi_2 = \xi_C)$ 的优选范围可以基于与表达式(37)类似的思考方式由以下表达式表示:

[0207] [数学式41]

$$[0208] \quad 0.5\sigma_{CF} < |\xi_0| < 3.0\sigma_{CF}. \quad (40)$$

[0209] 令作为特定于检测器的点扩展函数的 $h_D(x, y)$ 的半高全宽为 w_D ,当 $h_D(x, y)$ 具有高斯形状时, $w_D = 2\sigma_D (2\ln 2)^{0.5}$ 的关系成立。因此,表达式(40)可以重写为:

[0210] [数学式42]

$$[0211] \quad 0.5 \frac{\sqrt{2\ln 2}}{\pi \sqrt{\left(w_S \frac{L_{12}}{L_{01}}\right)^2 + w_D^2}} < |\xi_0| < 3.0 \frac{\sqrt{2\ln 2}}{\pi \sqrt{\left(w_S \frac{L_{12}}{L_{01}}\right)^2 + w_D^2}}. \quad (41)$$

[0212] 计算系数部分并且用 α_1 重写表达式(41)得到:

[0213] [数学式43]

$$[0214] \quad 0.2 \frac{d_{IP}}{\sqrt{\left(w_S \frac{L_{12}}{L_{01}}\right)^2 + w_D^2}} < |\alpha_1| < 1.1 \frac{d_{IP}}{\sqrt{\left(w_S \frac{L_{12}}{L_{01}}\right)^2 + w_D^2}}. \quad (42)$$

[0215] 表达式(42)是给出当考虑X射线发射点的发光强度分布和检测器的点扩展函数时用于确定值 d_0 的偏离率 α_1 的优选范围的表达式。

[0216] 令分束器光栅的光栅周期为 d_1 , d_{IP} 和 d_1 之间的关系一般可以由以下表达式表示:

[0217] [数学式44]

$$[0218] \quad d_{IP} = \frac{d_1 L_{01} + L_{12}}{m}, \quad (43)$$

[0219] 其中, m 是正整数。 m 的优选值根据分束器光栅的图案和干涉图案之间的关系而被确定,并且,一般来说,优选的是设置 $m=1$ 或 2 。在优选设置 $m=1$ 的情况下的典型示例是使用所谓的 $\pi/2$ -调制相位光栅作为分束器光栅。在优选设置 $m=2$ 的情况下的典型示例是使用所谓的 π -调制相位光栅作为分束器光栅。同样地,当干涉图案中的谐波分量被用作载波时, m 取除1之外的值。通过使用表达式(43),表达式(39)和表达式(42)可以分别用 d_1 重写为:

[0220] [数学式45]

$$[0221] \quad 0.2 \frac{d_1}{mw_S} \frac{L_{01} + L_{12}}{L_{12}} < |\alpha_1| < 1.1 \frac{d_1}{mw_S} \frac{L_{01} + L_{12}}{L_{12}} \quad (44)$$

[0222] 以及

[0223] [数学式46]

$$[0224] \quad 0.2 \frac{d_1(L_{01} + L_{12})}{m\sqrt{(w_S L_{12})^2 + (w_D L_{01})^2}} < |\alpha_1| < 1.1 \frac{d_1(L_{01} + L_{12})}{m\sqrt{(w_S L_{12})^2 + (w_D L_{01})^2}}, \quad (45)$$

[0225] 表达式 (44) 和表达式 (45) 是分别给出当考虑检测器的点扩展函数时以及当不考虑检测器的点扩展函数时的值 α_1 的优选范围的表达式。另外,在这种情况下,值 d_0 可以用 d_1 重写为:

[0226] [数学式47]

$$[0227] \quad d_0 = \frac{n_1 d_1 L_{01} + L_{12}}{m L_{12}} (1 + \alpha_1). \quad (46)$$

[0228] 如上所述,当 $\xi_0 = \xi_2$ 时, $|H_c|$ 的积分值最大。因此, d_2 优选地是使用与被定义为针对 d_0 的偏离率的 α_1 相同的 α_1 如下表示的值:

[0229] [数学式48]

$$[0230] \quad d_2 = n_2 d_{IP} (1 + \alpha_1), \quad (47)$$

[0231] 其中, n_2 为正整数,并且如上所述,优选地,就透射率而言, $n_2 = 1$ 。该表达式可以使用表达式 (43) 被写为:

[0232] [数学式49]

$$[0233] \quad d_2 = \frac{n_2 d_1 L_{01} + L_{12}}{m L_{01}} (1 + \alpha_1). \quad (48)$$

[0234] 如上所述,如果X射线检测器具有足够高的空间分辨率,则分析器光栅不是必要的,并且干涉图案的强度分布 $g_{IP}(x, y)$ 可以被直接检测到。在这种情况下,用于X射线检测器的点扩展函数被认为远小于用于X射线源的点扩展函数,并且因此只考虑用于X射线源的点扩展函数。因此,可能足够的是: ξ_0 被确定为落在表达式 (37) 中的范围内并且值 α_1 被确定为落在表达式 (44) 中的范围内。另一方面,对于使用分析器光栅的测量,更优选的是使用示出了更精确的优选范围的表达式 (45) 来确定值 α_1 。具体地说,当表示 h_D 的宽度的 w_D 具有至少与由表示 h_S 的宽度的 $w_S \times (L_{12}/L_{01})$ 给出的值一样大的值时,由表达式 (45) 和表达式 (44) 给出的值 α_1 的范围之间的差异大。因此,特别优选的是使用表达式 (45)。注意,如果值 α_1 甚至不满足表达式 (45),但是满足表达式 (44),则可以传输比相关技术中的分量高的分量 ($\alpha_1 = 0$),从而使得能够提高空间分辨率。

[0235] 此外,用于测量X射线发射点的发光强度分布的方法以及检测器的点扩展函数的方法是众所周知的,并且作为X射线发射点的发光强度分布的半高全宽的 w_S 以及作为检测器的点扩展函数的半高全宽的 w_D 可以被容易地测量。简单方法的示例包括基于用放置在预定位置处的针孔进行成像的结果的测量,其中所述预定位置在成像系统中的X射线路径中。因此,容易验证干涉仪是否满足表达式 (44) 至 (48) 中的条件。

[0236] 有可能的是:由于载波分量的值非常小,所以当 $c_R(x, y)$ 被显示为图像时,将值 $|\alpha_1|$ 设置得比较大将导致图像质量降低。为了解决这个问题,可以执行以下处理:与载波对应的分量被数值地恢复,并且恢复值被加到所计算的函数 $c_R(x, y)$ 。为了对作为复数值分布函数的 $c_R(x, y)$ 进行成像,可以例如执行通过映射实部和虚部的成像,而不是如上以举例的方式描述的通过映射绝对值和辐角的成像。与载波对应的分量可以通过例如 $c_R(\xi, \eta)$ 中的具有

峰值频率的载波分量的常数乘法来恢复。

[0237] 此外,在 $G_{IP_0}(\xi, \eta)$ 的边带当中,上边带中的分量可以通过设置 $\alpha_1 < 0$ 而被传输,或者下边带中的分量可以通过设置 $\alpha_1 > 0$ 而被传输。如上所述,关于样品的信息不仅表现为干涉图案的幅度调制,而且还表现为相位调制。因此,一般来说,上边带的幅度频谱和下边带的幅度频谱不是完全对称的。此外,取决于样品的类型,对用于传输的上边带或下边带的选择可能引起样品的结构的可见度或者检测性能的较大差异。因此,鉴于上述关系,更加优选的是将值 α_1 设置为使得预先预测的边带内的将被传输(增强)的区域可以位于将被应用于载波的频率滤波器 H_S 的区域的局部极大值附近。允许用户设置该用户特别希望观察(增强)的样品的尺寸的另一种配置可以被使用。在这种情况下,可能足够的是提供允许用户设置大小的设置单元、计算装置以及将从所包括的多个源光栅当中确定的源光栅放置在光学路径中的单元。计算装置包括根据所设置的尺寸来确定将被增强的频率的单元、根据所确定的频率和载波之间的距离(ξ_0)来确定值 α_1 的单元、以及根据所确定的值 α_1 来确定将被使用的源光栅的单元。设置单元可以包括例如用于输入值的转盘或按钮、用于显示设置值的显示单元等。将所确定的源光栅放置在光路中的单元可以是响应于来自计算装置的指令移动源光栅的移动单元(其可以是致动器、齿轮等)。代替所述多个源光栅当中正在更换的将被使用的源光栅,其间距能改变的源光栅(例如,日本公开No.2011-153869中描述的源光栅)可以被使用。

[0238] 此外,根据本发明的实施例为了有效地提高空间分辨率,特别地当检测器的空间分辨率不是足够高时,基于多次获得摩尔图像的测量技术(诸如相移方法)优选地被使用,以最大程度地使用检测器的检测空间频率带宽。

[0239] 此外,如在本实施例中以上所述,当通过设置 $d_2 \neq d_{IP}$ 而满足 $\xi_2 \neq 0$ 的条件时,在由检测器获取的X射线强度分布的频谱 $G_M(\xi, \eta, k)$ 的中心和样品信息的频谱 C 的中心之间存在 ξ_2 的移位。频谱的中心之间的移位可以在诸如在计算 C_R 之后的阶段中通过在计算机中进行频移来校正,或者可以通过用作为当未放置样品时的测量的结果而获得的参考数据执行除法运算来进行校正。在这种情况下,因为 C_R 的中心在频率坐标系中移位,所以整个 C_R 一般将超出检测器中固有的检测空间频带。为了解决这种潜在情况,优选地,在计算机中准备比检测器的固有检测空间频带宽的频带,并且将 C_R 包含在该频带内以使得 C_R 的中心与频率坐标系的原点匹配。换句话说,优选地,干涉仪系统所显示或记录的与 $C_R(x, y)$ 对应的图像数据的数据间隔(图像的像素间距)被设置为小于检测器的固有像素间距(采样间隔)。

[0240] 第二实施例

[0241] 将给出根据本实施例的不包括源光栅的Talbot干涉仪的描述,在该Talbot干涉仪中,通过样品的调制引起的边带中的分量被分析器光栅增强。在相关技术的X射线Talbot干涉仪(包括X射线Talbot-Lau干涉仪)中,分析器光栅使得在分析器光栅上形成的干涉图案的载波为中心的带能够被X射线检测器通过频移检测到。在本实施例中,由分析器光栅执行频移以使得X射线检测器能检测到的带的中心从载波偏移,由此实现空间分辨率的提高。在下文中将描述细节。

[0242] 在本实施例中,不包括源光栅。因此,不同于第一实施例,多个干涉图案不相互叠加(即,根据本实施例的Talbot干涉仪不是Talbot-Lau干涉仪),并且分析器光栅具有与在分析器光栅上形成的干涉图案的周期不同的间距 d_2 。其他配置类似于第一实施例中的配

置,并且在此不描述冗余部分。

[0243] 图19是根据比较例2的X射线Talbot干涉仪1300的示意图。X射线Talbot干涉仪1300包括X射线源131、分束器光栅3、分析器光栅4以及X射线检测器5。

[0244] 在相关技术的Talbot干涉仪1300中,如上所述,分析器光栅4被放置在出现干涉图案16的位置处,以使得在已经通过分析器光栅4的X射线的强度分布上产生摩尔条纹以帮助X射线检测器5执行强度分布测量。分析器光栅4一般被设计为具有光栅周期 d_{2c} ,光栅周期 d_{2c} 等于当在从X射线源131到分析器光栅4的X射线路径中未放置样品等时获得的干涉图案16的周期 d_{IPc} 。如果干涉图案16的周期性方向与分析器光栅4的周期性方向一致,则获得无限的摩尔周期。因此,如果X射线检测器5是不能分辨干涉图案本身的周期的检测器,则没有条纹图案被检测到。此外,如果干涉图案16和分析器光栅4的周期性方向在分析器光栅4的表面上相对于彼此略微移位,则出现具有基本上垂直于分析器光栅4的周期性方向的摩尔条纹。一般来说,Talbot干涉仪通过调整干涉图案和分析器光栅的相对旋转角来调整摩尔周期。

[0245] 相反,如图16中所示,根据本实施例的X射线Talbot干涉仪300被设计为使得分析器光栅24具有光栅周期 d_2 ,光栅周期 d_2 不等于当在从X射线31到分析器光栅24的射线路径中未放置样品等时获得的干涉图案6的周期 d_{IP} 。在这种情况下,在检测区域中形成摩尔条纹。不同于上面已描述的由干涉图案6和分析器光栅24的相对旋转引起的摩尔图案,摩尔条纹的周期性方向与分析器光栅24的周期性方向相同。

[0246] 在下文中将更详细地描述本实施例。

[0247] 根据本实施例的X射线Talbot干涉仪300包括分束器光栅3、分析器光栅24和X射线检测器5,其中分束器光栅3形成干涉图案6,分析器光栅24阻挡形成干涉图案6的X射线中的一些X射线,并且X射线检测器5检测来自分析器光栅24的X射线的强度分布。根据本实施例的X射线Talbot干涉仪300可以进一步包括X射线源31,或者X射线源31可以与X射线Talbot干涉仪300分开。类似于第一实施例,分束器光栅3和分析器光栅24分别具有图2B和2C中所示的图案,在此不对它们进行描述。距离 L_{S1} 和 L_{12} 的值也类似于根据第一实施例的Talbot干涉仪和相关技术的Talbot干涉仪中的对应的值。

[0248] 在下面,将用简单的模型来描述当分析器光栅的光栅周期 d_2 具有与本实施例中的干涉图案的周期 d_{IP} 的值不同的值时产生的效果。

[0249] 首先,本实施例中的分析器光栅24的光栅周期 d_2 由以下方程、使用相对于 d_{IP} 的偏离率 α_2 来表示:

[0250] [数学式50]

$$[0251] \quad d_2 = n_2 d_{IP} (1 + \alpha_2) . \quad (49)$$

[0252] 偏离率 α_2 也可以取负值,其中, $\alpha_2 \neq 0$ 。当 α_2 等于0时,分析器光栅的设计条件与比较例2中的设计条件相同。在典型的Talbot-Lau干涉仪和根据第一实施例的Talbot干涉仪中, d_{2c} 可以是 d_{IPc} 的整数倍。同样,在本实施例中, d_2 可以是具有一定偏离率的 d_{IP} 的2倍或更大的整数倍。在这种情况下, n_2 取大于或等于2的整数。然而,上述配置具有如下缺点:分析器光栅的整体X射线透射率减小,这一般不是优选的。因此,优选地, n_2 等于1。在下面,将给出作为示例的其中 d_2 相对于 d_{IP} 具有微小的偏离率 α_2 的情况的描述。

[0253] 接着,在分析器光栅上采取坐标系(x,y),并且假定干涉图案的周期性方向与x轴

方向一致。坐标系 (x, y) 可能不一定与第一实施例中的坐标系 (x, y) 相同。

[0254] 当X射线源很小并且可以被认为是单个点时,类似于表达式(2)中的 g_{IP0} ,分析器光栅上的干涉图案的强度分布 $g_{IP}(x, y)$ 可以用以下表达式表示:

[0255] [数学式51]

$$[0256] \quad g_{IP}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \left[\frac{2\pi}{d_{IP}} x + \phi(x, y) \right]. \quad (50)$$

[0257] 通过使用表达式(3),表达式(50)可以重写为:

[0258] [数学式52]

$$[0259] \quad g_{IP}(x, y) = a(x, y) + \frac{1}{2} c(x, y) e^{i \frac{2\pi}{d_{IP}} x} + \frac{1}{2} c^*(x, y) e^{-i \frac{2\pi}{d_{IP}} x}. \quad (51)$$

[0260] 对两边应用二维傅立叶变换得到:

[0261] [数学式53]

$$[0262] \quad G_{IP}(\xi, \eta) = A(\xi, \eta) + \frac{1}{2} C \left(\xi - \frac{1}{d_{IP}}, \eta \right) + \frac{1}{2} C^* \left(\xi + \frac{1}{d_{IP}}, \eta \right), \quad (52)$$

[0263] 其中, ξ 表示x轴方向上的空间频率, η 表示y轴方向上的空间频率。

[0264] 接下来,将考虑用透射通过分析器光栅并且入射在X射线检测器上的X射线最终测量的X射线强度分布。如第一实施例中所描述的,分析器光栅的透射率分布 $t_2(x, y)$ 用以下表达式表示:

[0265] [数学式54]

$$[0266] \quad t_2(x, y) = 1 + \cos \left(\frac{2\pi}{d_2} x - \phi_r \right), \quad (53)$$

[0267] 其中, ϕ_r 表示分析器光栅的相位(对应于光栅的x方向位置)。一般来说,分析器光栅被放置在X射线检测器的检测表面的邻近。因此,分析器光栅和检测表面被近似为在相同位置。类似于第一实施例,如果特定于由所使用的X射线检测器执行的强度分布测量的点扩展函数(PSF)用 $h_D(x, y)$ 表示,则最终测量的X射线强度分布 $g_N(x, y)$ 由以下表达式给出:

[0268] [数学式55]

$$[0269] \quad g_N(x, y) = [g_{IP}(x, y) t_2(x, y)] * h_D(x, y). \quad (54)$$

[0270] 因此,作为 $g_N(x, y)$ 的傅立叶变换的 $G_N(\xi, \eta)$ 可以用以下方程、使用表达式(52)至(54)来表示:

[0271] [数学式56]

$$[0272] \quad \begin{aligned} G_N(\xi, \eta) &= [G_{IP}(\xi, \eta) * T_2(\xi, \eta)] H_D(\xi, \eta) \\ &\approx \left[A(\xi, \eta) + \frac{1}{4} C \left(\xi - \frac{1}{d_{IP}} + \frac{1}{d_2}, \eta \right) e^{i\phi_r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} C^* \left(\xi + \frac{1}{d_{IP}} - \frac{1}{d_2}, \eta \right) e^{-i\phi_r} \right] H_D(\xi, \eta). \quad (55) \end{aligned}$$

[0273] 这里,其中该函数的中心在 (ξ, η) 空间中位于离原点非常远的区域中的项被认为当被用 $H_D(\xi, \eta)$ 滤波时具有足够小的值,并且被忽略。此外, $|H_D(\xi, \eta)|$ 是与检测器的调制传

递函数 (MTF) 对应的函数。以上述方式, 将理解分析器光栅具有执行关于干涉图案的信息的空间-频移, 以使得干涉图案的某个空间频带的信息通过将频带移至在其内 $H_D(\xi, \eta)$ 具有比零大得多的值的范围而能够被检测到。

[0274] 在这种情况下, 将被使得能够检测到的空间频带的中心频率位于 ξ 轴的正侧的 $(\xi, \eta) = (1/d_2, 0)$ 处。

[0275] 将以如下情况为例给出下面的描述: 在该情况下, 随着 ϕ_r 改变而执行强度分布测量三次, 并且执行基于所谓的相移方法的原理的预定计算来获取关于强度分布 $g_M(x, y, k)$ 及其傅立叶变换 (即, $G_M(\xi, \eta, k)$ (其中, $k=1, 2, 3$)) 的信息。如果 ϕ_r 以由如下表达式给出的方式改变: [数学式57]

[0276] $\phi_r(k) = 0, 2\pi/3, 4\pi/3$ ($k=1, 2, 3$), (56)

[0277] 那么, 作为在频域中表示的样品信息的 $A(\xi, \eta)$ 和 $C(\xi, \eta)$ 的恢复值 $A_R(\xi, \eta)$ 和 $C_R(\xi, \eta)$ 可以分别根据以下表达式计算:

[0278] [数学式58]

$$\begin{aligned} A_R(\xi, \eta) &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 G_M(\xi, \eta, k) \\ &= A(\xi, \eta) H_D(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (57)$$

[0280] 以及

[0281] [数学式59]

$$\begin{aligned} C_R(\xi, \eta) &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 G_M\left(\xi + \frac{1}{d_{IP}} - \frac{1}{d_2}, \eta, k\right) e^{-i\frac{2\pi}{3}(k-1)} \\ &= \frac{1}{4} C(\xi, \eta) H_D(\xi - \xi_2, \eta), \end{aligned} \quad (58)$$

[0283] 如表达式 (22) 中那样, ξ_2 由以下表达式给出:

[0284] [数学式60]

$$\xi_2 = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_{IP}}. \quad (59)$$

[0286] 从表达式 (57) 和 (58) 看出, 通过上述技术恢复的样品信息最终受频率滤波器 H_D 的影响。从表达式 (57) 还看出, 所获取的 $A_R(\xi, \eta)$ (以及在 (x, y) 空间中表示的 $a_R(x, y)$) 不受分析器光栅的光栅周期的影响, 因为作为样品信息的频谱的 $A(\xi, \eta)$ 的中心位置和将被应用于 $A(\xi, \eta)$ 的 H_D 的中心位置总是匹配。

[0287] 相反, 从表达式 (58) 看出, 对于所获取的 $C_R(\xi, \eta)$ (以及在 (x, y) 空间中表示的 $c_R(x, y)$), 作为样品信息的频谱的 $C(\xi, \eta)$ 的中心位置和将被应用于 $C(\xi, \eta)$ 的频率滤波器 H_D 的中心位置不总是匹配。滤波器的相对移位量根据分析器光栅的光栅周期 d_2 和干涉图案的周期 d_{IP} 之间的关系而被确定。具体而言, 滤波器 H_D 相对于 $C(\xi, \eta)$ 的移位量 ξ_2 根据 $1/d_2$ 和 $1/d_{IP}$ 之间的差异而被确定。因此, 对值 d_2 的调整使得能够控制频率滤波器 H_D 的影响。相关技术的 Talbot 干涉仪 (其是根据比较例 2 的 Talbot 干涉仪) 一般被设计为满足 $d_2 = d_{IP}$ 。因此, $\xi_2 = 0$ 成立。

[0288] 接下来,将使用仿真结果来描述根据本实施例的Talbot干涉仪和根据比较例2的Talbot干涉仪之间的差异。当针对光栅周期的偏离率 α_2 为零时,根据比较例2的Talbot干涉仪对应于根据本实施例的Talbot干涉仪。因此,可以通过使用与本实施例中的公式类似的公式的仿真来进行性能比较。也就是说,根据比较例2的Talbot干涉仪是被设计为满足 $d_2 = d_{IP}$ 的干涉仪。此外,这里假定函数 $h_D(x, y)$ 是二维高斯形状的函数。

[0289] 同样,在用于根据本实施例的Talbot干涉仪和根据比较例2的Talbot干涉仪之间的比较的仿真中,类似于第一实施例中的仿真,图9A和9B中所示的图像被使用。

[0290] 图20A、20B和20C描绘了在相关技术的Talbot-Lau干涉仪(其是根据比较例2的Talbot干涉仪)中如上所述通过使用相移方法计算样品信息的恢复值 $C_R(\xi, \eta)$ 的所有步骤的仿真的结果。图20A、20B和20C分别描绘了 $|C(\xi, \eta)|$ 、 $|H_D(\xi - \xi_2, \eta)|$ 和 $|C_R(\xi, \eta)|$ 在 ξ 轴上的轮廓。如上所述,通过分析器光栅的作用而被使得能检测到的空间频带的中心频率位于 ξ 轴的正侧的 $(\xi, \eta) = (1/d_2, 0)$ 处。因此,在根据比较例2的Talbot干涉仪中, $d_2 = d_{IP}$,所检测到的带的中心频率为在 $(\xi, \eta) = (1/d_{IP}, 0)$ 处的分量,并且与载波匹配。此外,作为样品信息的频谱的 $C(\xi - 1/d_{IP}, \eta)$ 被分布为以载波为中心的边带。在这种情况下,如图20B中所示,频率滤波器的 $H_D(\xi - \xi_2, \eta)$ 的局部极大值与 $C(\xi, \eta)$ 的中心匹配。因此,在 $C(\xi, \eta)$ 中离原点较远的区域中的分量在传输期间大量地丢失。换句话说, $C(x, y)$ 中的高频分量大量地丢失。

[0291] 图21A和21B例示了作为仿真的结果而获得的 $C_R(x, y)$ 以及在 x 轴上的对应轮廓。图21A和21B分别例示了 $|C_R(x, y)|$ 和 $\arg[C_R(x, y)]$ 。在该仿真中,添加了一定量的噪声。如根据上述频谱的变化所预计的,比较图21A、21B与图9A、9B表明,高频分量(出现在附图的右边部分中的分量)在图像中明显衰减,并且信噪比降低,从而导致检测困难。

[0292] 图17A、17B和17C例示了通过使用相移方法在根据本实施例的Talbot干涉仪中计算样品信息的恢复值 $C_R(\xi, \eta)$ 的步骤的仿真的结果。图17A、17B和17C分别描绘了 $|C(\xi, \eta)|$ 、 $|H_D(\xi - \xi_2, \eta)|$ 和 $|C_R(\xi, \eta)|$ 在 ξ 轴上的轮廓。在根据本实施例的Talbot干涉仪中, $d_2 \neq d_{IP}$ 成立。因此,由检测器检测到的带的中心频率与载波不匹配,并且是包括样品信息的边带中的频率分量。在这种情况下,如图17B中所示,频率滤波器 $H_D(\xi - \xi_2, \eta)$ 的局部极大值和 $C(\xi, \eta)$ 的中心不匹配,并且在它们之间出现 ξ_2 的移位。因此,这里,在 $C(\xi, \eta)$ 中只有 $\xi > 0$ 的区域中的分量实质上被传输(图17C)。比较该结果与图20C中所示的比较例2中的 $|C_R(\xi, \eta)|$ 的形状表明, $C(\xi, \eta)$ 中离原点越远的区域中的越多分量被传输。换句话说,在 $c(x, y)$ 中有更多的高频分量残留下来。

[0293] 图18A和18B例示了作为仿真的结果而获得的 $C_R(x, y)$ 以及在 x 轴上的对应轮廓。图18A和18B分别例示了 $|C_R(x, y)|$ 和 $\arg[C_R(x, y)]$ 。同样,在该仿真中,与比较例2中的噪声等量的噪声被添加。如根据上述频谱的变化所预计的,比较图18A、18B与图21A、21B以及图9A、9B表明,相比于比较例2,更多的高频分量残留在图像中,并且检测高频分量的能力得到提高。在图18A中,图9A中未示出的样品图像出现,因为由于频率滤波器 $H_D(\xi - \xi_2, \eta)$ 相对于 $C(\xi, \eta)$ 的中心的非对称性的作用,关于 $\phi(x, y)$ 的信息也出现在 $C_R(x, y)$ 的绝对值侧。同样地,尽管在该仿真中未示出,但是本实施例具有如下副效应:关于 $b(x, y)$ 的信息也出现在 $C_R(x, y)$ 的辐角侧。

[0294] 接下来,将考虑本实施例中的值 d_2 的优选范围。

[0295] 首先,如在仿真中那样,假定作为特定于X射线检测器的点扩展函数的 $h_D(x, y)$ 具

有二维高斯形状。在这种情况下,如表达式 (30) 中所给出的, $h_D(x, y)$ 可以用以下表达式表示:

[0296] [数学式61]

$$[0297] \quad h_D(x, y) \propto e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_D^2}}, \quad (60)$$

[0298] 其中, σ_D 是定义 $h_D(x, y)$ 的宽度的常数。在这种情况下,如果系数被忽略,则作为 $h_D(x, y)$ 的傅立叶变换的 $H_D(\xi, \eta)$ 可以用以下表达式表示:[数学式62]

$$[0299] \quad H_D(\xi, \eta) = e^{-\frac{\xi^2+\eta^2}{2\sigma_{DF}^2}}, \quad (61)$$

[0300] 其中, σ_{DF} 是定义 $h_D(\xi, \eta)$ 的宽度的常数,并且由以下表达式给出:

[0301] [数学式63]

$$[0302] \quad \sigma_{DF} = \frac{1}{2\pi\sigma_D}. \quad (62)$$

[0303] 此外,样品信息的频谱 $C(\xi, \eta)$ 的中心和频率滤波器 $H_D(\xi - \xi_2, \eta)$ 的局部极大值之间的移位量 ξ_2 可以用以下方程表示(其中, $|\alpha_2| \ll 1$):[数学式64]

$$[0304] \quad \xi_2 = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_{IP}} = -\frac{1}{d_{IP}} \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2} \approx -\frac{\alpha_2}{d_{IP}}. \quad (63)$$

[0305] 同时,作为样品信息的频谱的 $C(\xi, \eta)$ 关于原点二维地分布。如上所述, $\Phi(x, y)$ 反映了通过已经传播通过样品的X射线在载波的方向上的相位分布的微分而获得的分布。因此,分量 $C(\xi, \eta)$ 明显地出现在特别是 ξ 轴方向上,其中 ξ 轴方向是载波的方向。因此优选的是,滤波器 H_D 的局部极大值沿着 ξ 轴移动。换句话说,优选的是,干涉图案的周期性方向和分析器光栅的周期性方向匹配。使 $|\xi_2|$ 大使得 $c(x, y)$ 中的大量较高的频率分量能够被传输,并且还引起如下缺点:低频分量的缺乏将导致不自然的图像。为了实现在防止缺乏低频分量的同时增加高频分量的传输量的效果,类似于表达式 (40), 将 ξ_2 选择为满足以下表达式可能是足够的:

[0306] [数学式65]

$$[0307] \quad 0.5\sigma_{DF} < |\xi_2| < 3.0\sigma_{DF}. \quad (64)$$

[0308] 令 $h_S(x, y)$ 的半高全宽为 w_D , 当 $h_S(x, y)$ 具有高斯形状时, $w_D = 2\sigma_D(2\ln 2)^{0.5}$ 的关系成立。因此,表达式 (64) 可以重写为:

[0309] [数学式66]

$$[0310] \quad 0.5 \frac{\sqrt{2\ln 2}}{\pi w_D} < |\xi_2| < 3.0 \frac{\sqrt{2\ln 2}}{\pi w_D}. \quad (65)$$

[0311] 计算系数部分并且用 α_2 重写表达式 (65) 得到:

[0312] [数学式67]

$$[0313] \quad 0.2 \frac{d_{IP}}{w_D} < |\alpha_2| < 1.1 \frac{d_{IP}}{w_D}. \quad (66)$$

[0314] 令分束器光栅的光栅周期为 d_1 , d_{IP} 和 d_1 之间的关系一般可以用以下表达式表示:

[0315] [数学式68]

$$[0316] \quad d_{IP} = \frac{d_1 L_{S1} + L_{12}}{m L_{S1}}, \quad (67)$$

[0317] 其中, m 是正整数。 m 的优选值根据分束器光栅的图案和干涉图案之间的关系而被确定, 并且, 一般来说, 优选的是设置 $m=1$ 或 2 。优选设置 $m=1$ 的情况下的典型示例是使用所谓的 $\pi/2$ -调制相位光栅作为分束器光栅。优选设置 $m=2$ 的情况下的典型示例是使用所谓的 π -调制相位光栅作为分束器光栅。同样, 当干涉图案中的谐波分量用作载波时, m 取除 1 之外的值。通过使用表达式 (67), 表达式 (66) 可以用 d_1 重写为:

[0318] [数学式69]

$$[0319] \quad 0.2 \frac{d_1}{mw_D} \frac{L_{S1} + L_{12}}{L_{S1}} < |\alpha_2| < 1.1 \frac{d_1}{mw_D} \frac{L_{S1} + L_{12}}{L_{S1}}. \quad (68)$$

[0320] 表达式 (68) 是当考虑特定于检测器的点扩展函数时给出值 α_2 的优选范围的表达式。在这种情况下, 值 d_2 可以用 d_1 重写为:

[0321] [数学式70]

$$[0322] \quad d_2 = \frac{n_2 d_1}{m} \frac{L_{S1} + L_{12}}{L_{S1}} (1 + \alpha_2). \quad (69)$$

[0323] 用于测量特定于检测器的点扩展函数的方法是众所周知的, 并且作为特定于检测器的点扩展函数的半高全宽的 w_D 可以被容易地测量。简单方法的示例包括基于用被放置在与检测器的检测表面紧邻的位置处的针孔进行成像的结果的测量。因此, 容易验证干涉仪是否满足表达式 (68) 和 (69) 中的条件。

[0324] 虽然前面已经以不包括源光栅的干涉仪为例进行了描述, 但是根据本实施例的 Talbot 干涉仪可以包括源光栅。在这种情况下, 表达式 (68) 和 (69) 中的 L_{S1} 表示源光栅和分束器光栅之间的距离。如第一实施例中那样, 源光栅可以被配置为使得干涉图案的明亮部分以在它们之间有移位的方式相互重叠并且干涉图案的黑暗部分以在它们之间有移位的方式相互重叠 (即, $\alpha_1 \neq 0$), 或者可以是在相关技术的 Talbot-Lau 干涉仪中使用的源光栅 (即, $\alpha_1 = 0$)。

[0325] 有可能的是: 由于载波分量的值非常小, 所以当 $c_R(x, y)$ 被显示为图像时, 将值 $|\alpha_2|$ 设置得比较大将导致图像质量降低。为了解决这个问题, 类似于第一实施例, 可以执行以下处理: 与载波对应的分量被数值地恢复, 并且恢复值被加到所计算的函数 $c_R(x, y)$ 。为了对作为复数值分布函数的 $c_R(x, y)$ 进行成像, 可以例如执行通过映射实部和虚部的成像, 而不是如上以举例的方式描述的通过映射绝对值和辐角的成像。

[0326] 在前面的描述中, 所使用的仿真基于以下假设: 在 $G_{IP}(\xi, \eta)$ 中的边带当中, 上边带中的分量通过设置 $\alpha_2 < 0$ 而被传输。下边带中的分量可以通过设置 $\alpha_2 > 0$ 而被传输。如上所述, 取决于样品的类型, 对于传输的上边带或下边带的选择可能引起样品的结构的可见度或者检测性能的大差异。因此, 鉴于上述关系, 更加优选的是预先预测将由于样品的影响而生成的边带的特征并且将该特征反映到值 α_2 的设置。另外, 类似于第一实施例, 允许用户设置该用户特别希望观察到的频率的配置可以被使用。

[0327] 此外, 类似于第一实施例, 为了有效地提高空间分辨率, 优选的是使用基于多次获得摩尔图像的测量技术, 诸如相移方法。

[0328] 此外,类似于第一实施例,在由检测器获取的X射线强度分布的频谱 $G_M(\xi, \eta, k)$ 的中心和样品信息的频谱 C 的中心之间出现 ξ_2 的移位。频谱的中心之间的移位可以通过在计算机中进行频移来校正,或者可以通过用参考数据执行除法运算来校正。另外, C_R 的中心在频率坐标系中移动,使整个 C_R 超出检测器中固有的检测空间频带。为了解决这种潜在情况,优选地,在计算机中预备比检测器的固有检测空间频带宽的频带,并且将 C_R 包含在该频带内以使得 C_R 的中心与频率坐标系的原点匹配。换句话说,优选地,干涉仪系统所显示或记录的与 $C_R(x, y)$ 对应的图像数据的数据间隔被设置为小于检测器的固有像素间距。

[0329] 在下文中,将描述第一实施例和第二实施例的更为具体的示例。

[0330] 示例1

[0331] 示例1是第一实施例的特定示例。X射线管被用作X射线源。X射线管的阳极由钨制成。通过用管电压或滤波器进行调整,X射线辐射的能量谱在22keV的位置处表现出大致的局部极大值。此外,X射线管的焦点(focal spot)的有效发光强度分布具有二维高斯形状,其半高全宽为300 μm 。源光栅、分束器光栅和分析器光栅的图案分别类似于图2A、2B和2C中所示的那些。分束器光栅是硅相位光栅,并且光栅周期 d_1 等于12.00 μm 。分束器光栅的相位超前部分和相位延迟部分之间的差异由硅基板的厚度的差异来实现,并且分束器光栅被设计为将 π 弧度的相位差应用于透射通过其的22-keV X射线。此外,源光栅和分析器光栅是通过在硅基板上形成厚度为100 μm 的镀金膜作为X射线遮挡部分来制造的。

[0332] 在示例1中, L_{01} 和 L_{12} 的距离分别等于1000.0mm和469.3mm。在这种情况下,从源光栅上的单个点发射的22keV X射线被分束器光栅的周期性结构衍射,由此由于Talbot效应而在与分析器光栅的位置相同的位置处形成高可见度的干涉图案。X射线发射点和源光栅之间的距离 L_{S0} 被设置为100.0mm。

[0333] 在这种情况下,如果条件 $n_1=1$ 和 $m=2$ 被选择,则通过表达式(46)计算的源光栅的光栅周期 d_0 由 $d_0=18.785(1+\alpha_1)\mu\text{m}$ 给出。另一方面,值 $|\alpha_1|$ 的优选范围根据表达式(44)(当 w_S 通过考虑 L_{S0} 的存在而被校正时)来计算以获得 $0.010<|\alpha_1|<0.152$ 。此外,在示例1中,如果条件 $|\xi_0|\approx 2\sigma_{SF}$ 被选择,则 $|\alpha_1|=0.052$ 可能是足够的。因此,在示例1中,正的 α_1 被选择,并且 $d_0=19.755\mu\text{m}$ 被设置。

[0334] 此外,分析器光栅的光栅周期 d_2 根据表达式(47)而被设置为9.271 μm (其中, $n_2=1$ 并且 $\alpha_1=0.052$)。X射线检测器是像素间距为50 μm 的平板检测器,并且被放置在分析器光栅的邻近。在执行成像时,使用基于分束器光栅上的扫描的相移方法来获取作为样品信息的恢复值的 $C_R(x, y)$ 。

[0335] 示例2

[0336] 示例2是第一实施例的具体示例。干涉仪包括具有钨阳极的X射线管作为X射线源。通过调整管电压或滤波器,X射线管从辐射孔径发射具有以大约25keV的光子能量为中心的某个能量带宽的X射线。干涉仪被设计为特别是对具有大约0.05nm的波长的X射线(其光子能量约为25keV)有效地作用。X射线发射点的有效发光强度分布具有二维高斯形状,其半高全宽为500 μm 。源光栅、分束器光栅和分析器光栅的图案分别在图2A、2B和2C中例示出。分束器光栅是硅相位光栅,并且光栅周期 d_1 等于8.0 μm 。分束器光栅在相位超前部分和相位延迟部分之间在光栅基板的厚度上具有32 μm 的差异,由此将大约 π 弧度的相位调制应用于具有大约0.05nm的波长的入射X射线。相位超前部分和相位延迟部分具有相等的宽度。源光栅和

分析器光栅具有如下结构:在该结构中,厚度为 $100\mu\text{m}$ 的镀金膜在硅基板上被形成为X射线遮挡部分。X射线检测器是像素间距为 $50\mu\text{m}$ 的平板检测器。特定于检测器的点扩展函数具有二维高斯形状,其半高全宽为 $100\mu\text{m}$ 。

[0337] 距离 L_{01} 和 L_{12} 分别等于 800mm 和 200mm 。源光栅和X射线发射点被放置在基本上相同的位置处,并且分析器光栅和X射线检测器的检测表面被放置在基本上相同的位置处。在这种情况下,分别根据表达式(46)和(47)按照 $20.0(1+\alpha_1)\mu\text{m}$ 和 $5.0(1+\alpha_1)\mu\text{m}$ 来计算值 d_0 和 d_2 。这里,通过考虑分束器光栅是所谓的 π -调制光栅,设置 $m=2$, $n_1=n_2=1$ 。在示例2中,偏离率 α_1 被设置为 -0.020 。也就是说, d_0 等于 $19.6\mu\text{m}$, d_2 等于 $4.9\mu\text{m}$ 。在这种情况下,根据表达式(44)和表达式(45),值 α_1 的优选范围分别是 $0.008<|\alpha_1|<0.044$ 和 $0.006<|\alpha_1|<0.034$ 。当样品图像将被捕捉时,使用基于分析器光栅上的扫描的相移方法来计算作为样品信息的恢复值的 $c_R(x,y)$ 。

[0338] 示例3

[0339] 示例3是第二实施的具体示例。不同于示例2,干涉仪不包括源光栅,而是包括具有有效尺寸为 $10\mu\text{m}$ 的X射线发射点的X射线源。

[0340] 类似于示例2,干涉仪也被设计为特别是对具有大约 0.05nm 的波长的X射线(其光子能量约为 25keV)有效地作用。分束器光栅和分析器光栅的结构类似于示例2中的那些,并且在此不被描述。X射线检测器是像素间距为 $80\mu\text{m}$ 的平板检测器。特定于检测器的点扩展函数具有二维高斯形状,其半高全宽为 $160\mu\text{m}$ 。

[0341] 距离 L_{S1} 和 L_{12} 分别等于 800mm 和 200mm 。分析器光栅和X射线检测器的检测表面被放置在基本上相同的位置处。在这种情况下,根据表达式(49)按照 $5.0(1+\alpha_2)\mu\text{m}$ 来计算值 d_2 。这里,通过考虑分束器光栅是所谓的 π -调制光栅,设置 $m=2$, $n_2=1$ 。在示例3中,偏离率 α_2 被设置为 -0.020 。也就是说,值 d_2 等于 $4.9\mu\text{m}$ 。在这种情况下,根据表达式(68),值 α_2 的优选范围是 $0.006<|\alpha_2|<0.034$ 。当样品图像将被捕捉时,使用基于分析器光栅上的扫描的相移方法来计算作为样品信息的恢复值的 $c_R(x,y)$ 。

[0342] 其它实施例

[0343] 虽然已经参照示例性实施例描述了本发明,但是要理解本发明不限于所公开的示例性实施例。所附权利要求的范围要被赋予最宽泛的解释以便包含所有这种修改以及等同的结构和功能。

[0344] 本申请要求于2014年2月14日提交的日本专利申请No.2014-026677的优先权,其全部内容通过引用并入于此。

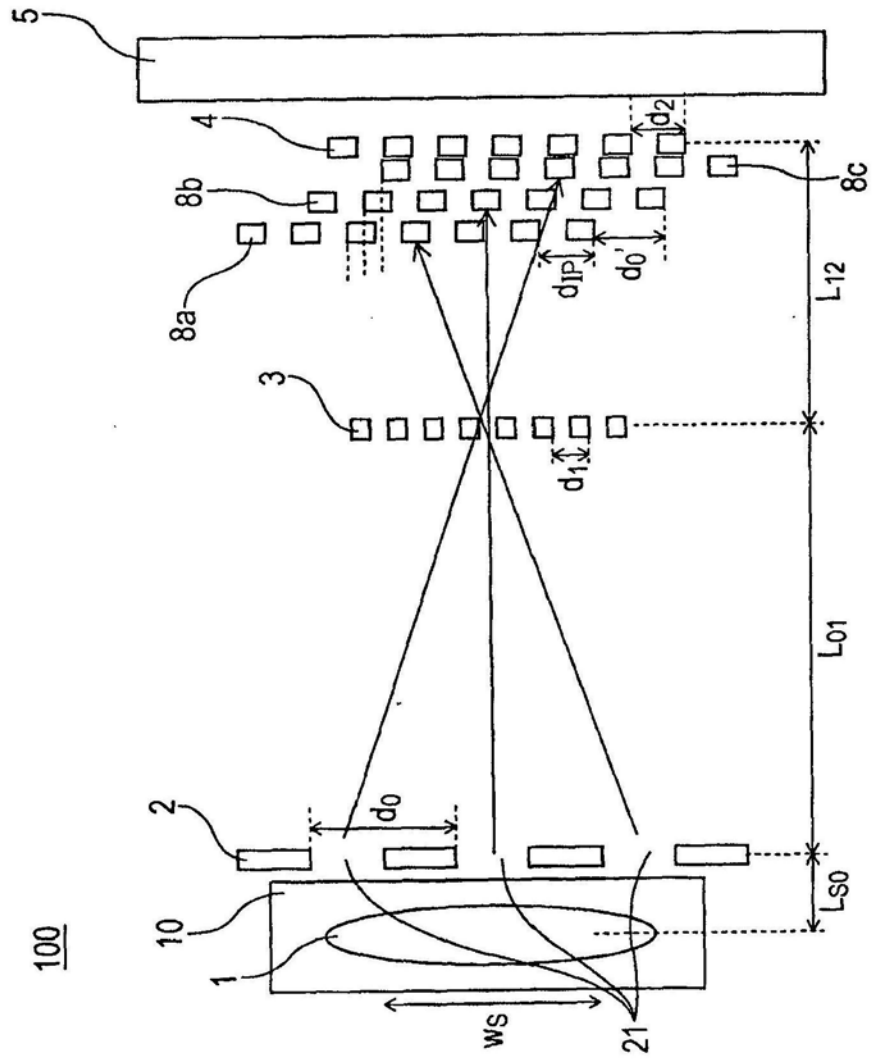


图1

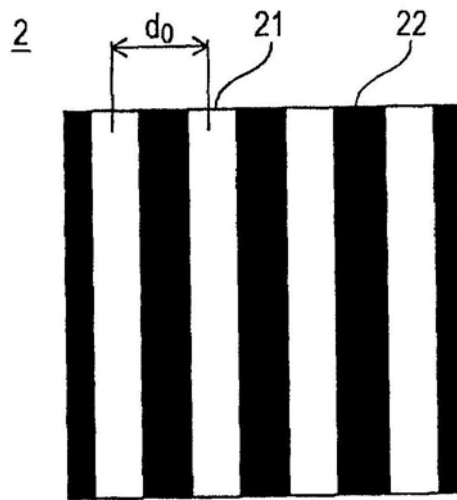


图2A

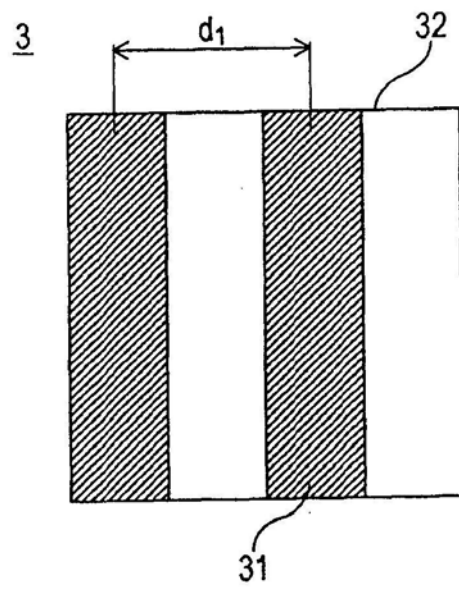


图2B

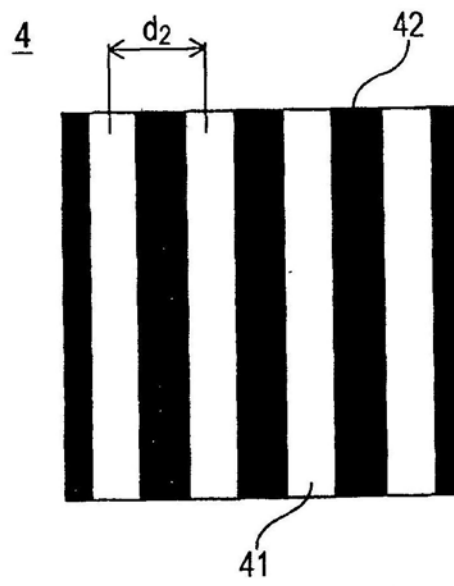


图2C

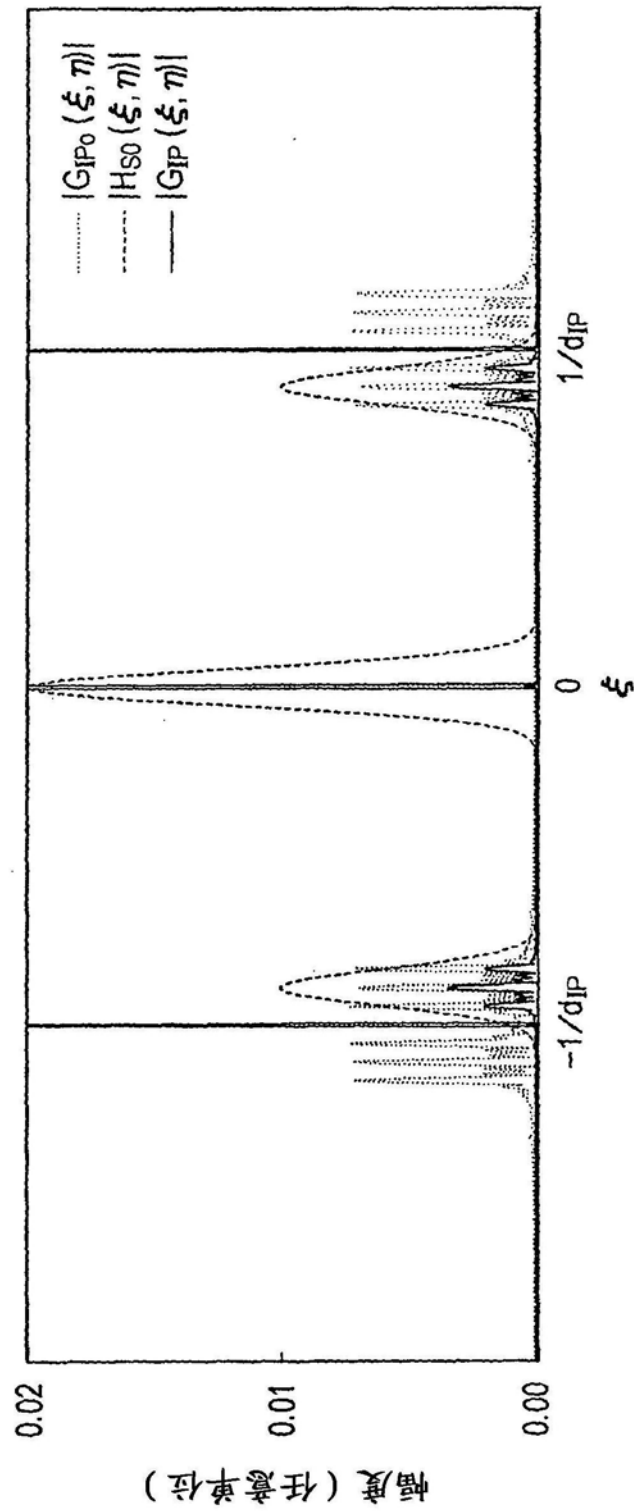


图3

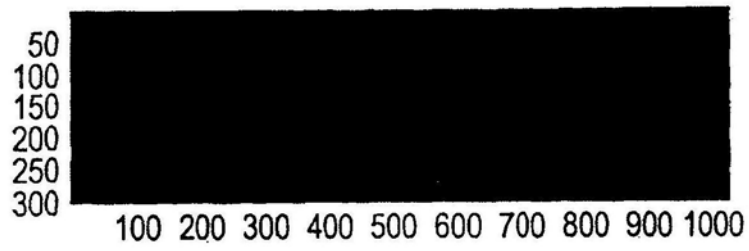


图4A-1

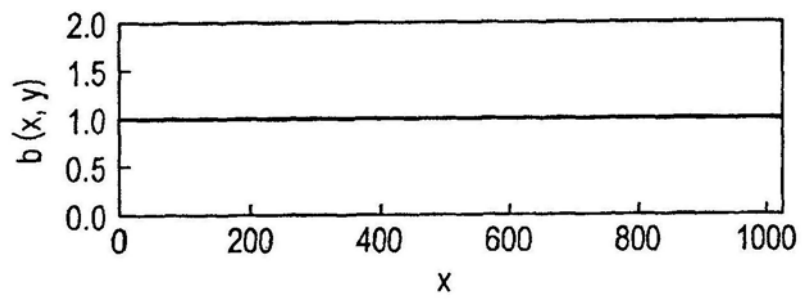


图4A-2

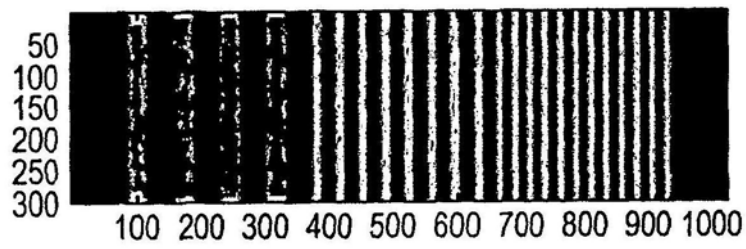


图4B-1

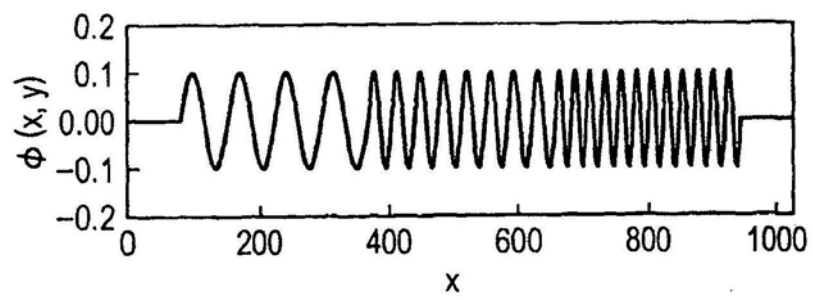


图4B-2

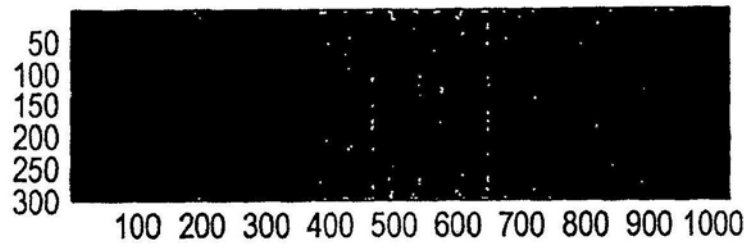


图5A-1

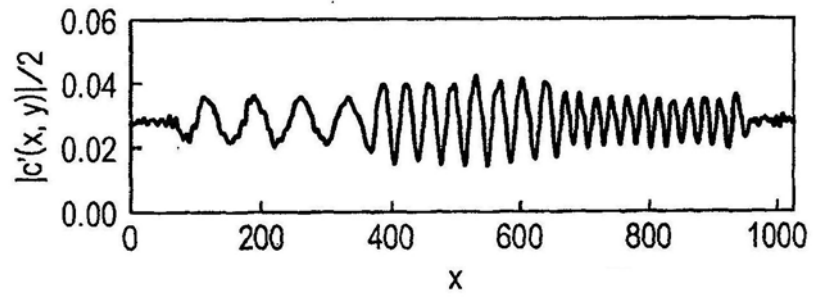


图5A-2

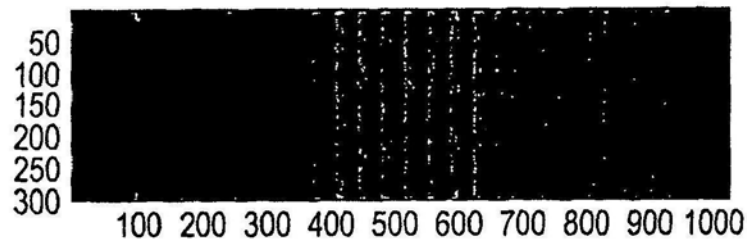


图5B-1

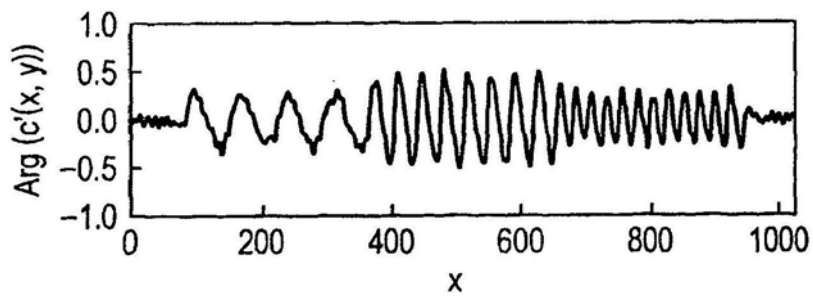


图5B-2

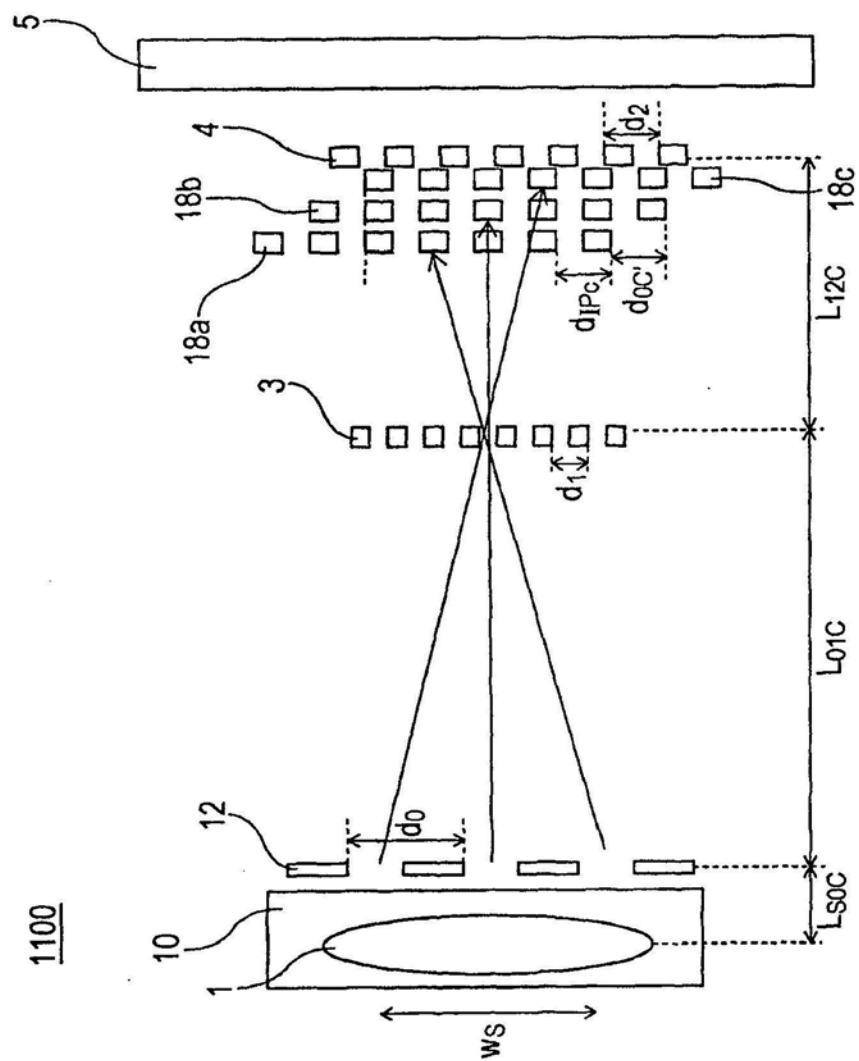


图6

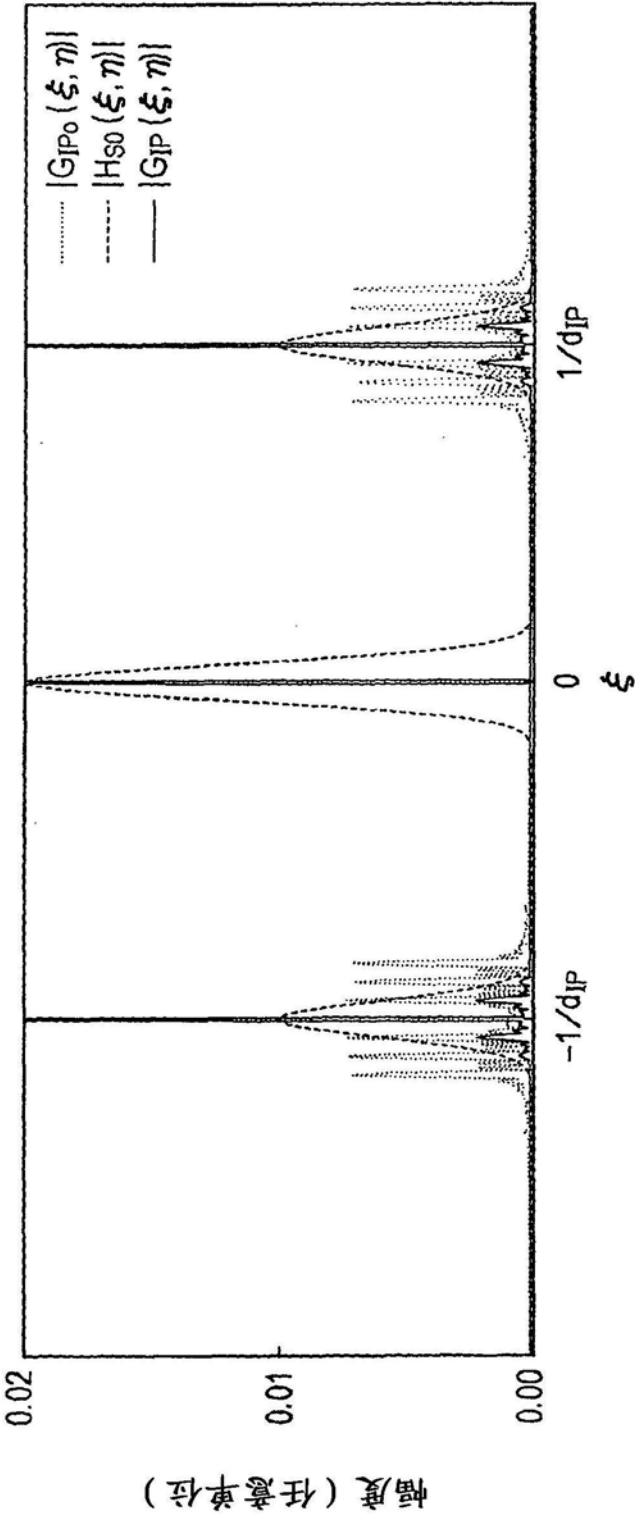


图7

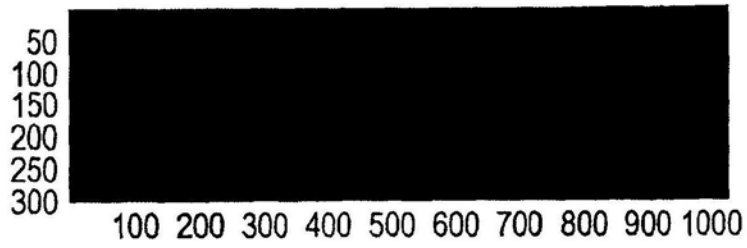


图8A-1

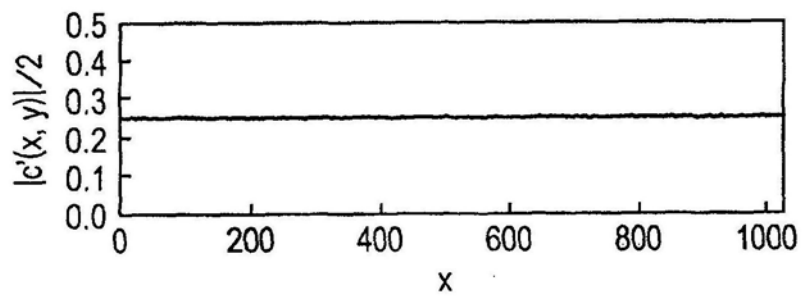


图8A-2

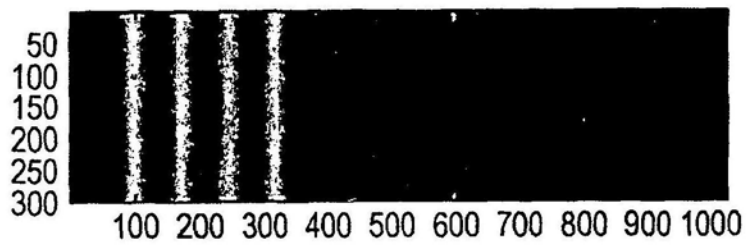


图8B-1

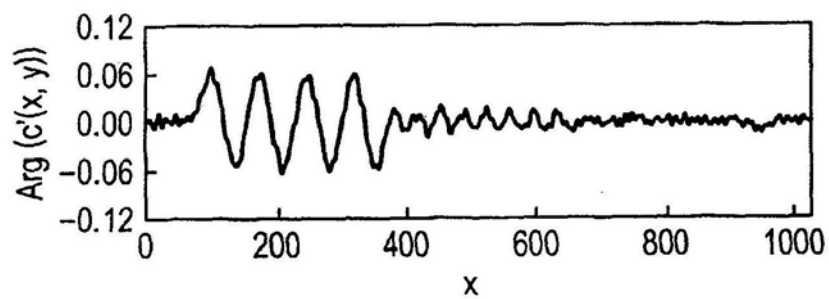


图8B-2

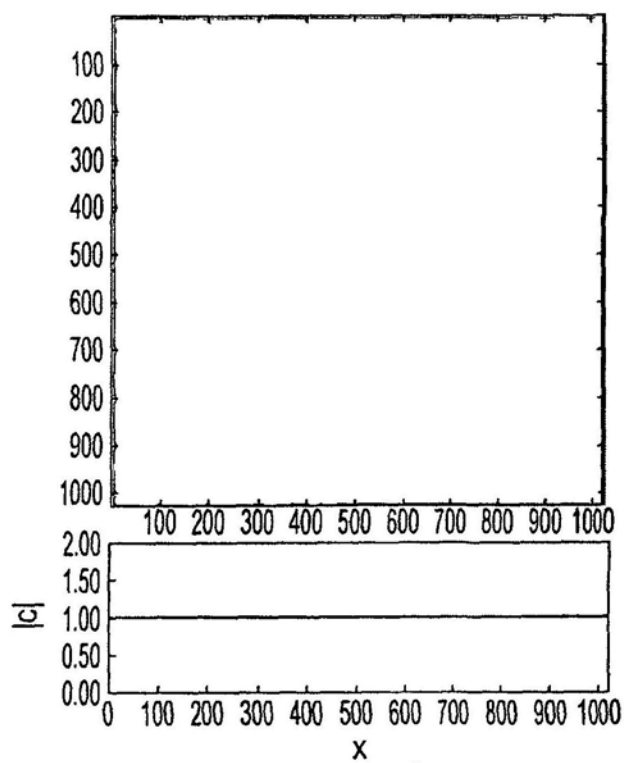


图9A

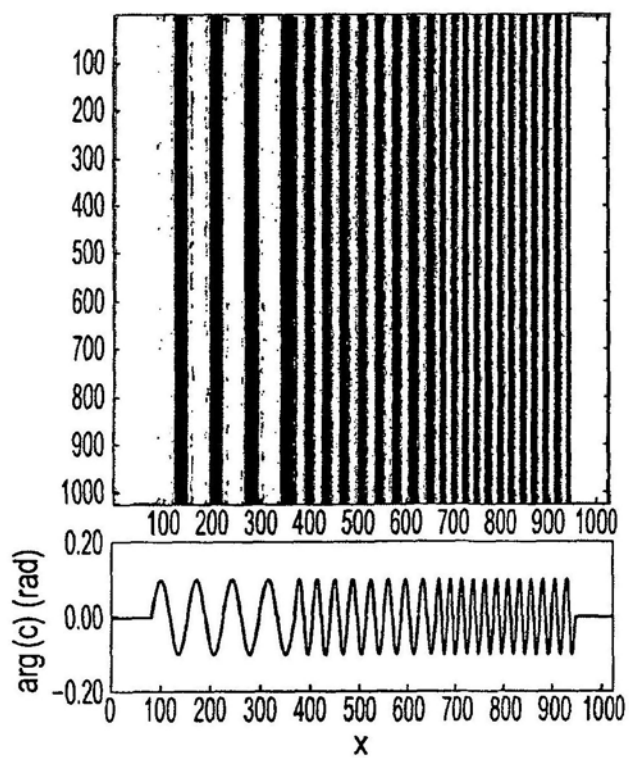


图9B

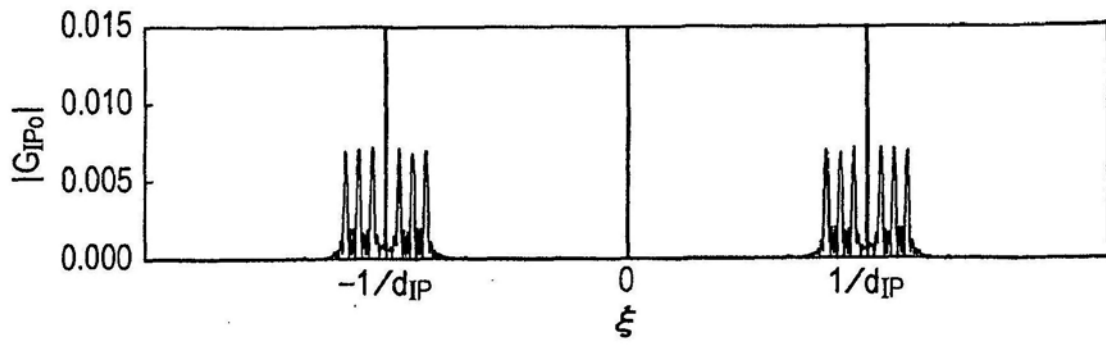


图10A

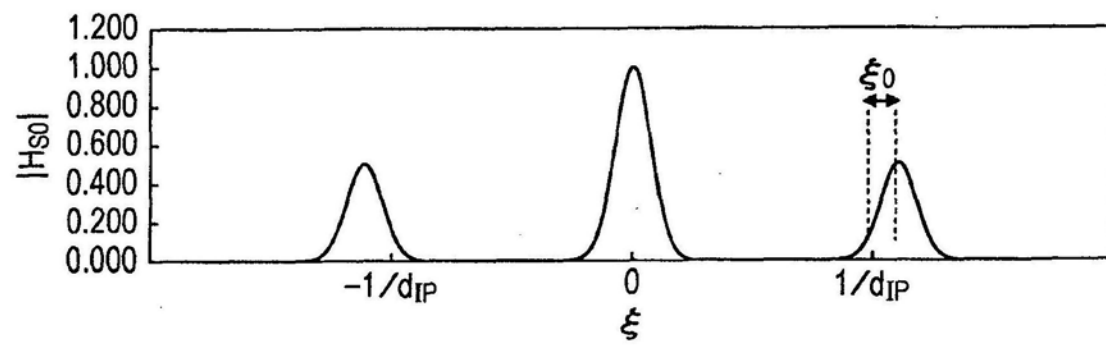


图10B

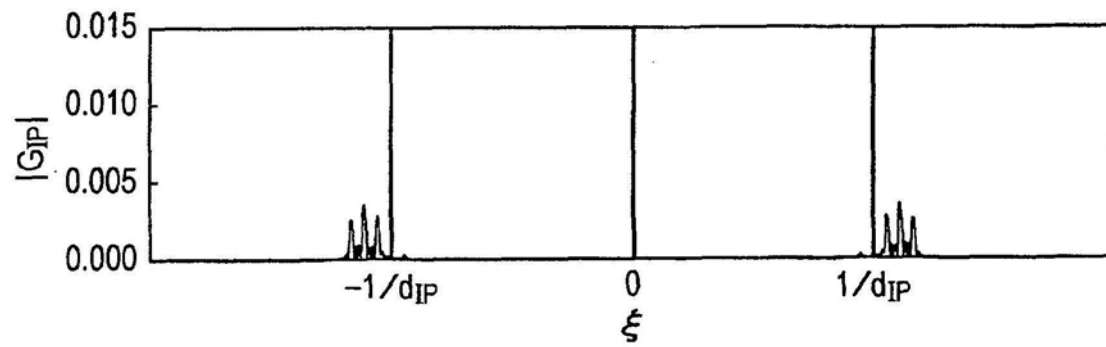


图10C

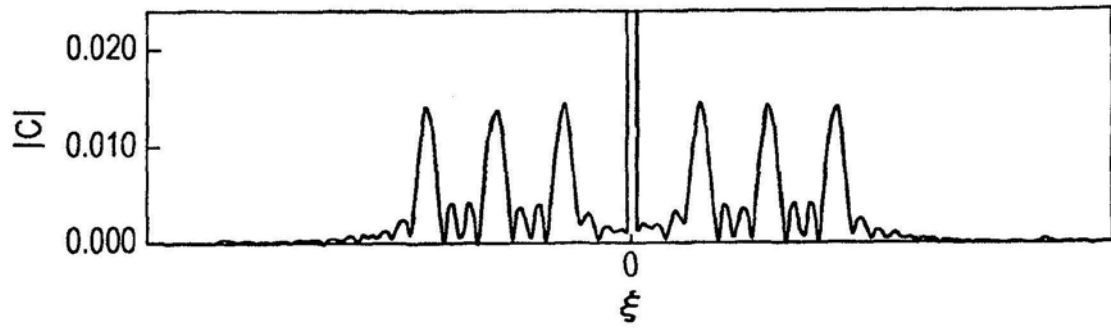


图11A

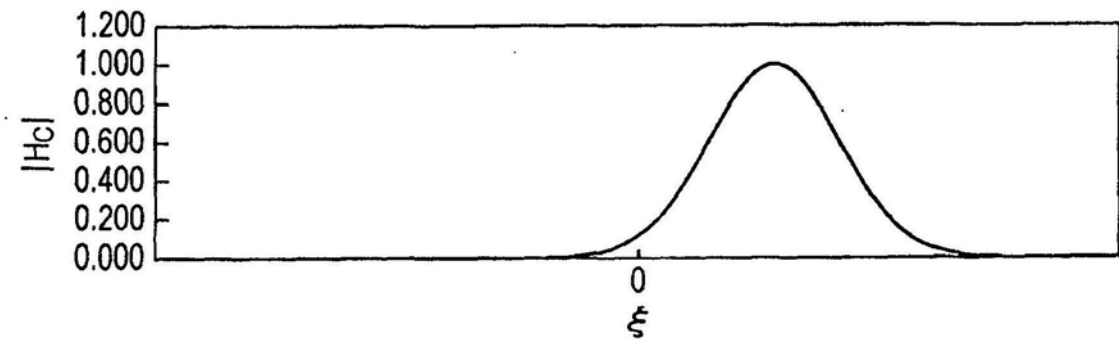


图11B

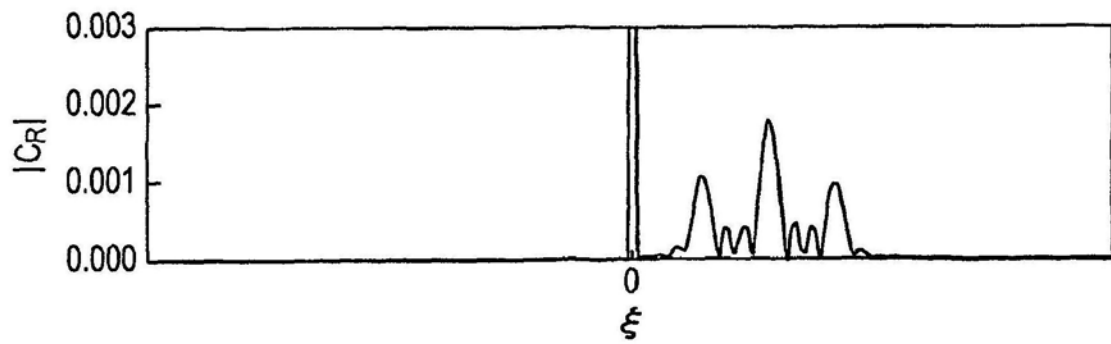


图11C

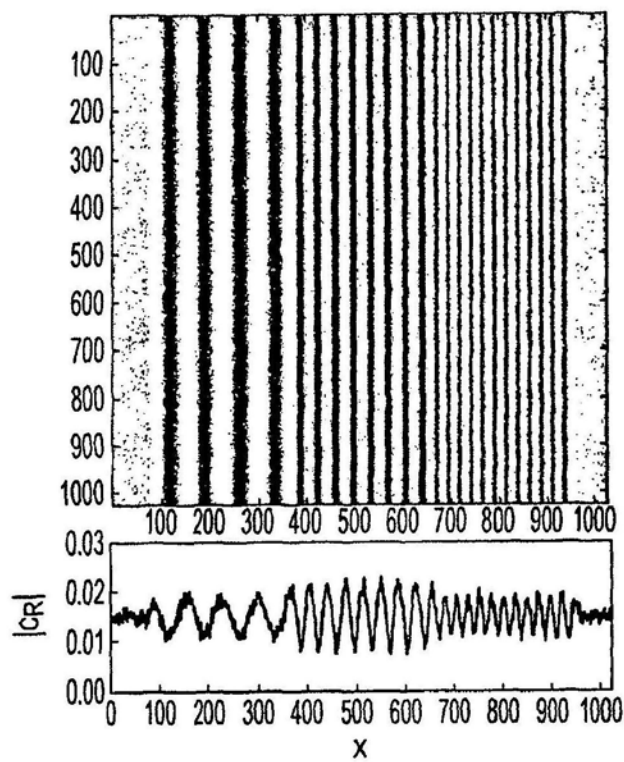


图12A

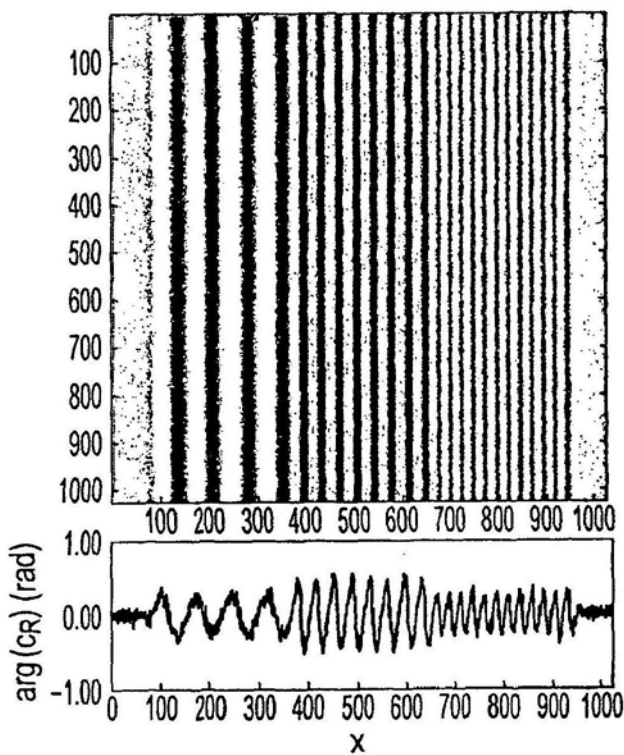


图12B

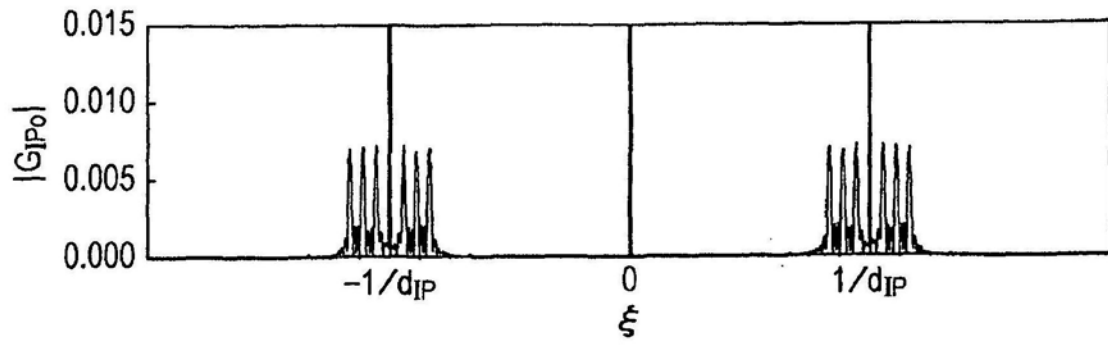


图13A

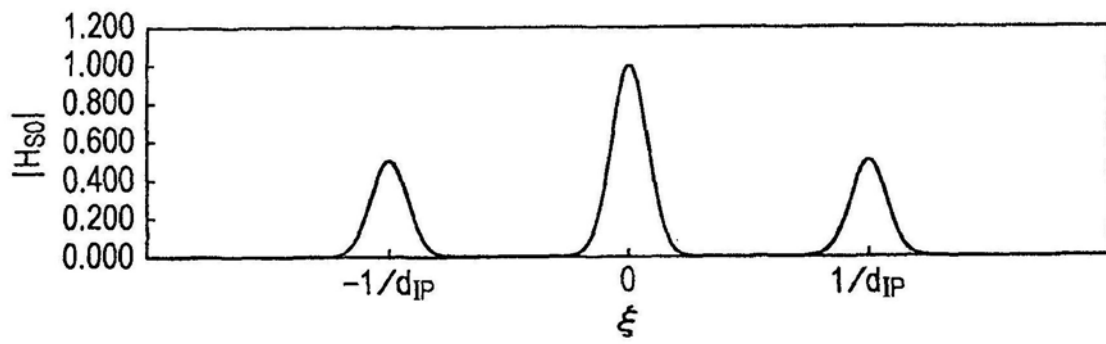


图13B

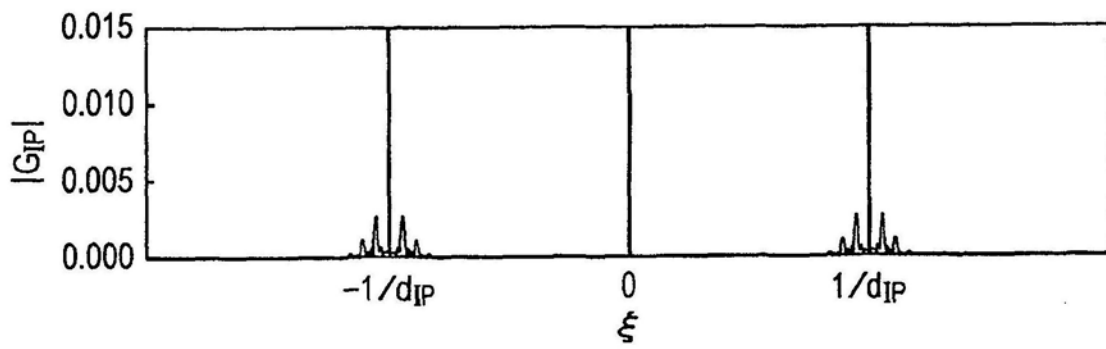


图13C

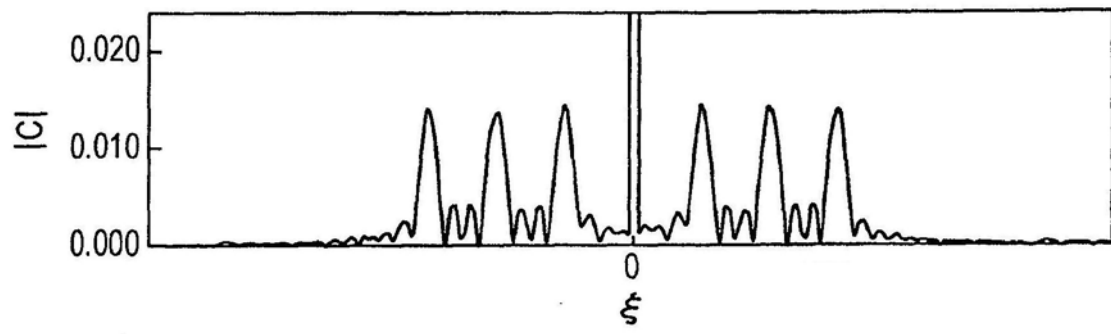


图14A

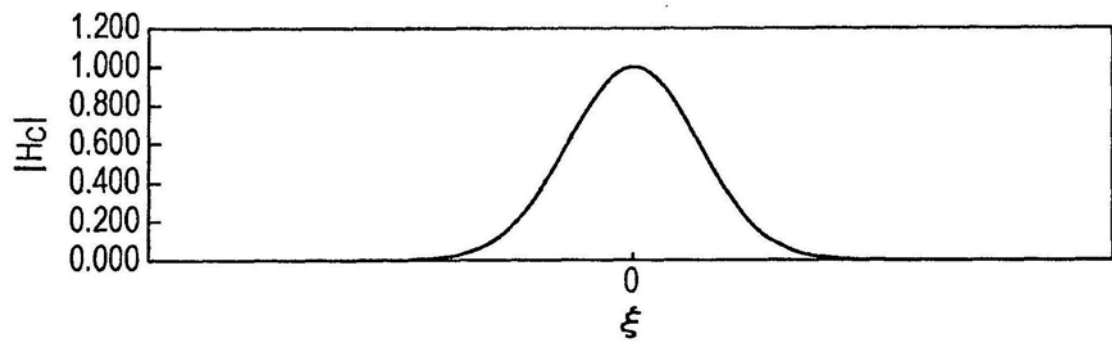


图14B

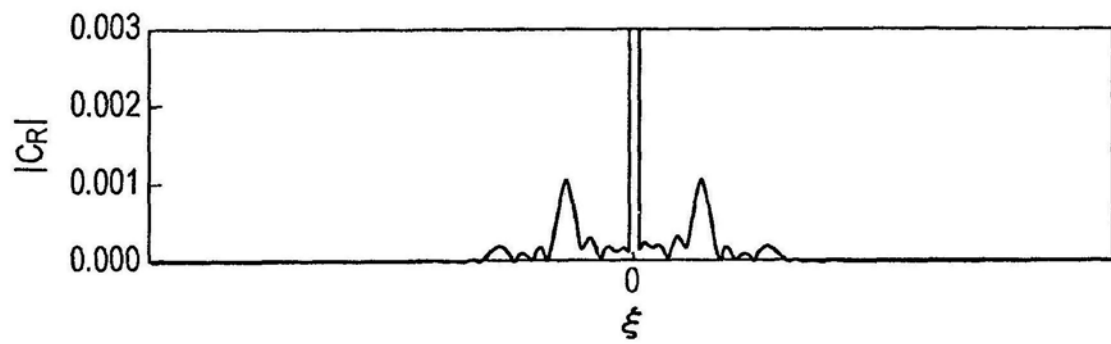


图14C

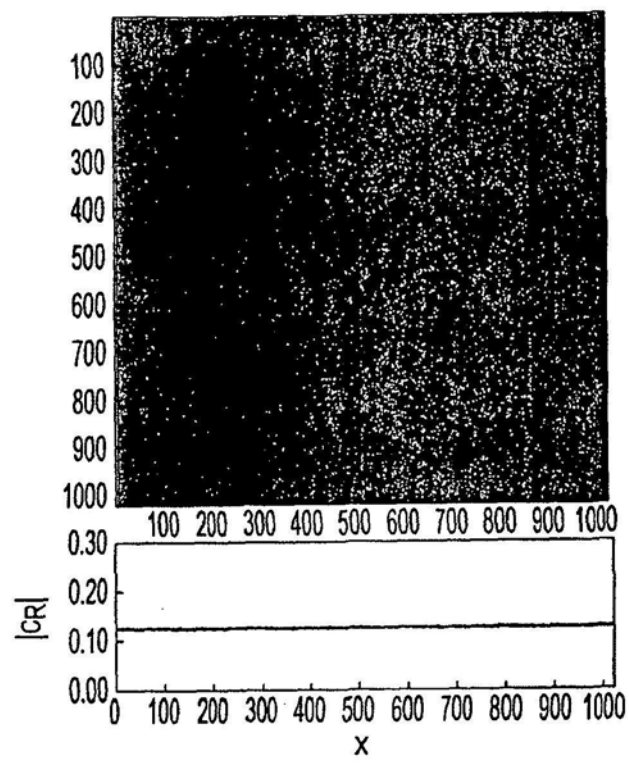


图15A

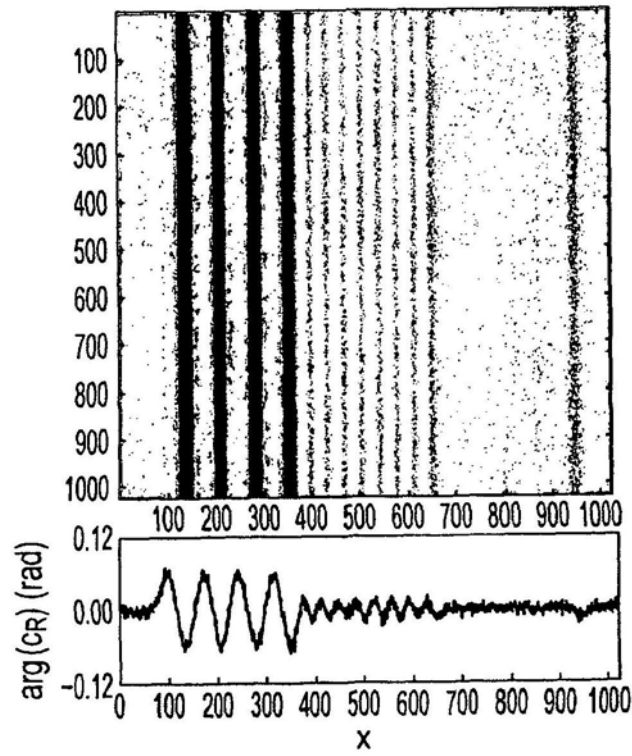


图15B

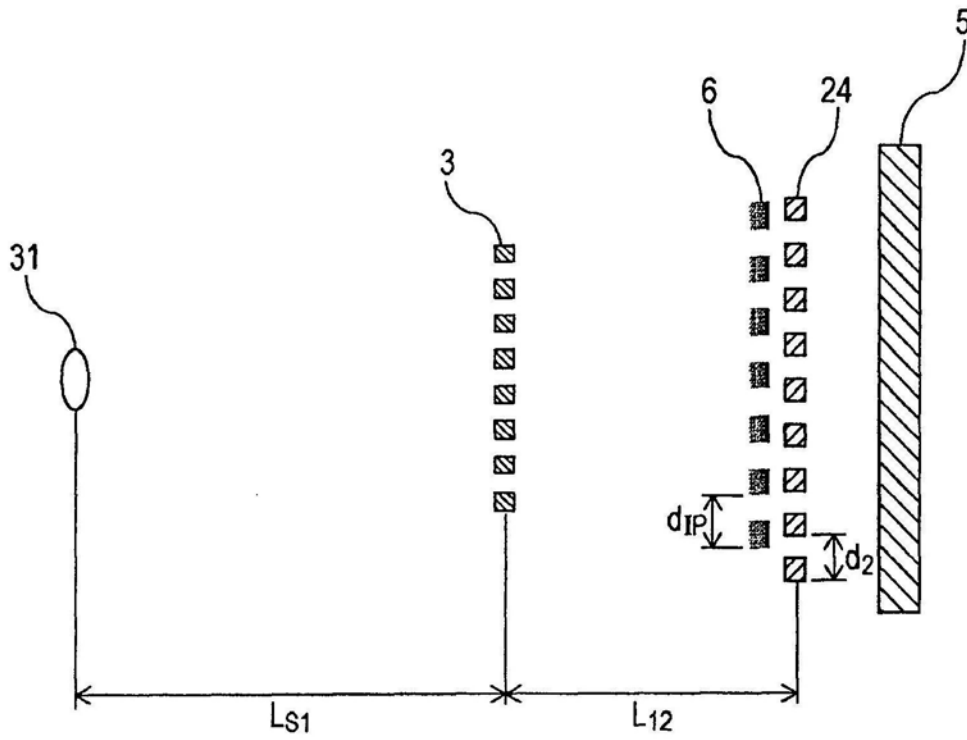
300

图16

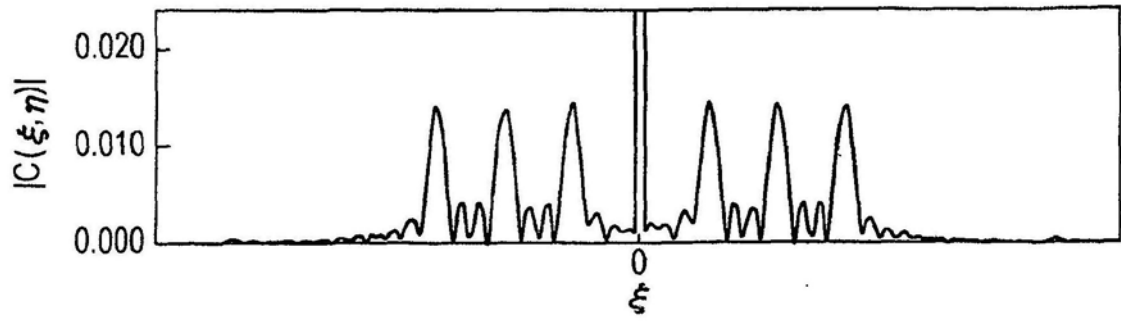


图17A

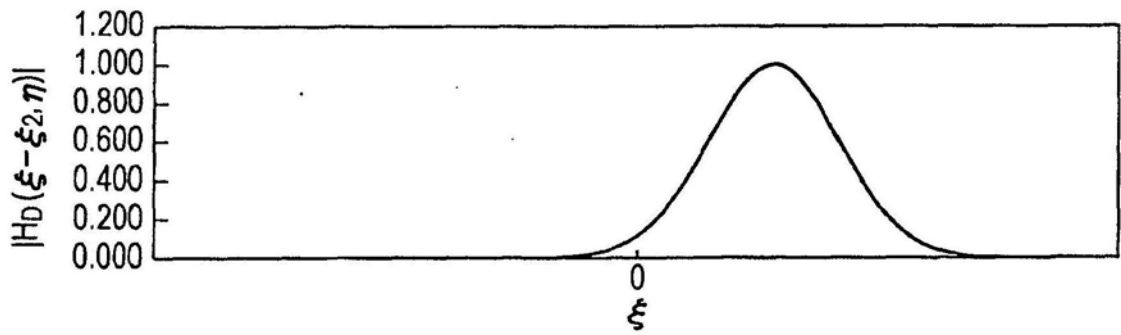


图17B

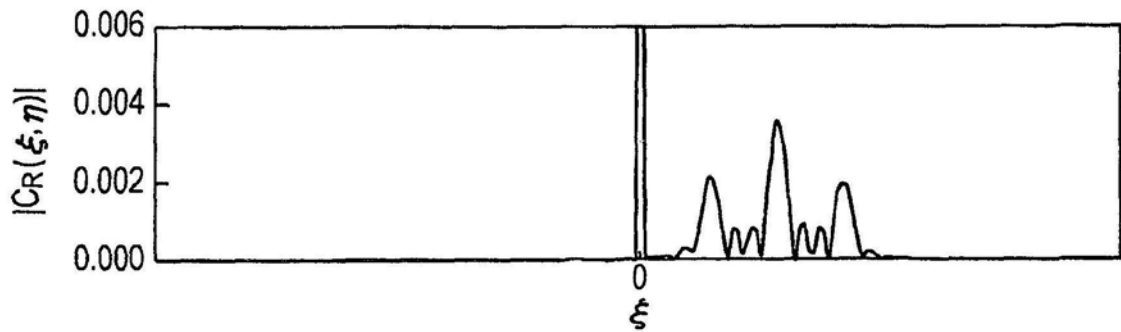


图17C

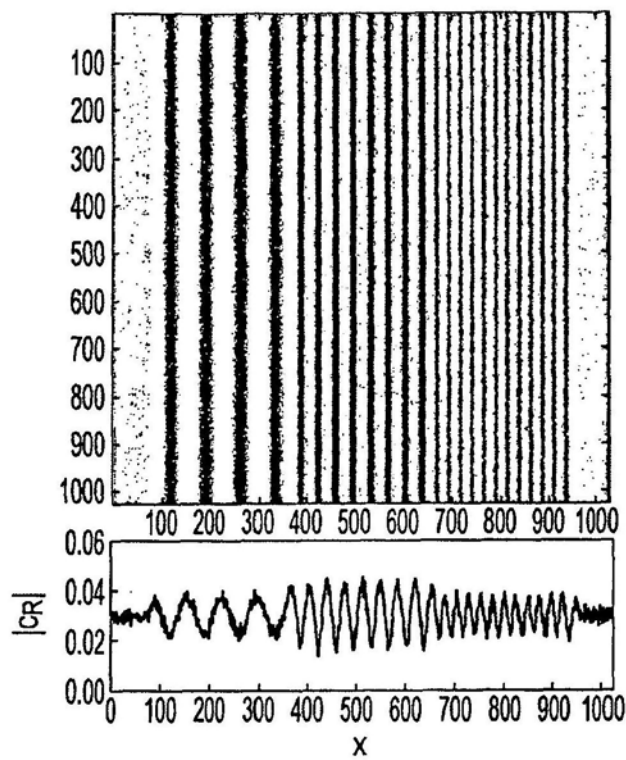


图18A

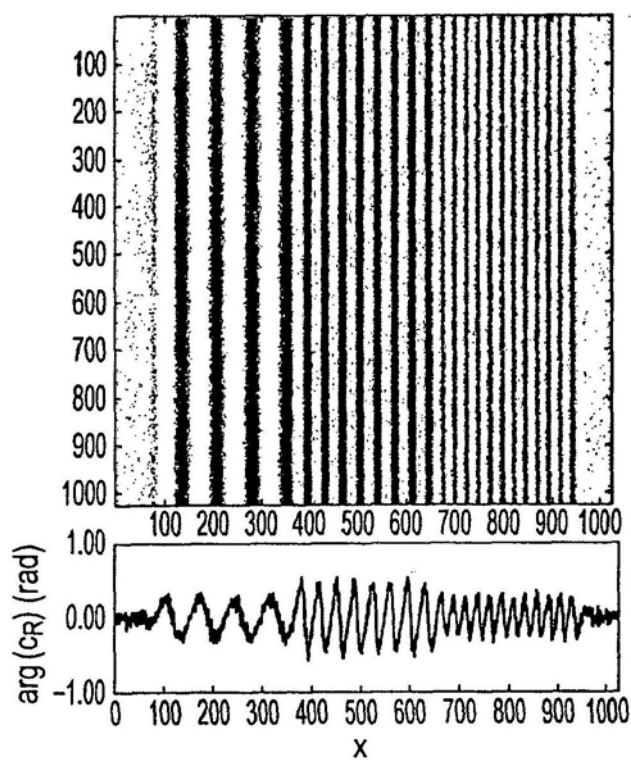


图18B

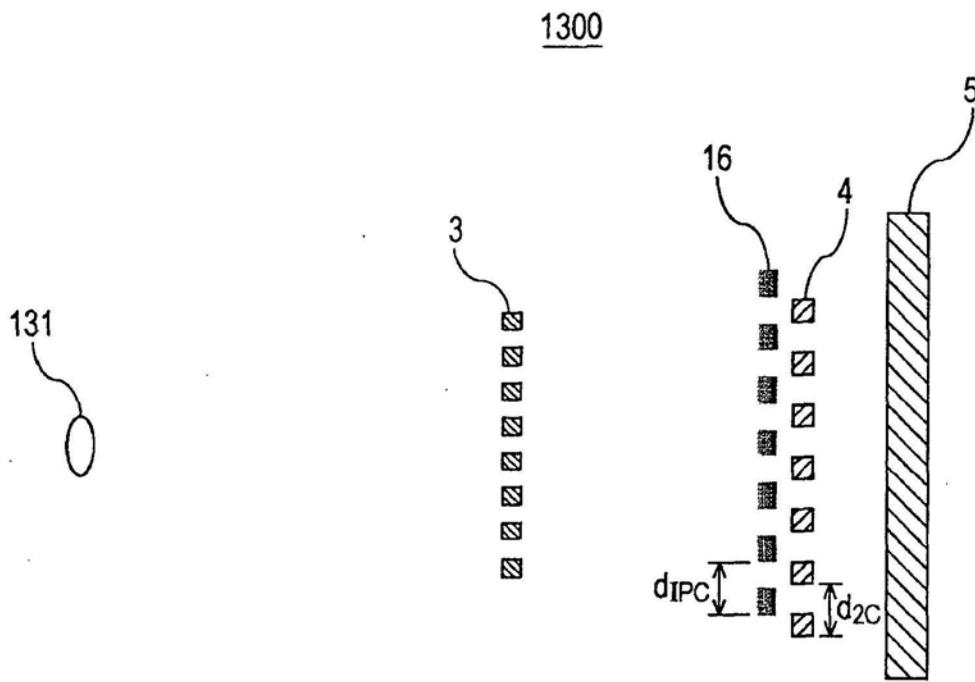


图19

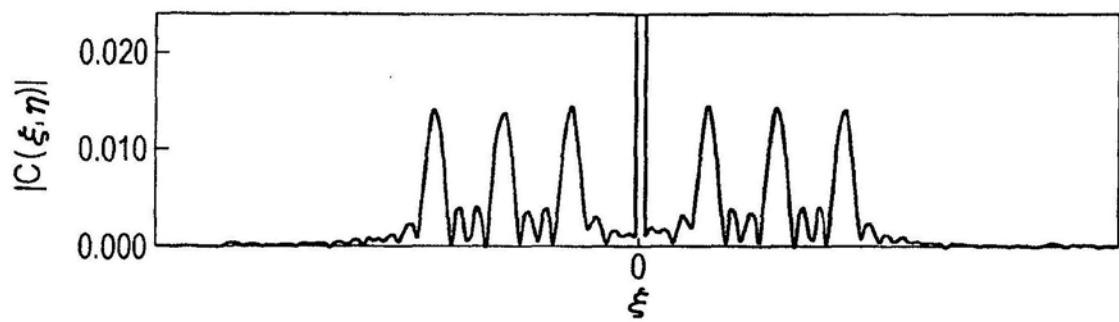


图20A

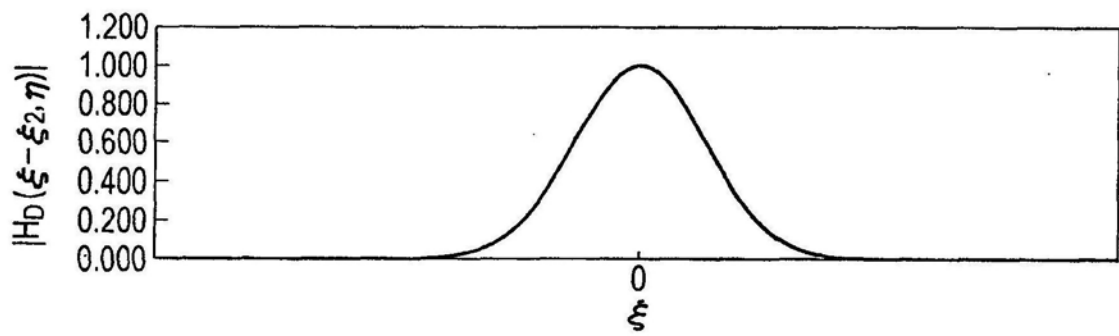


图20B

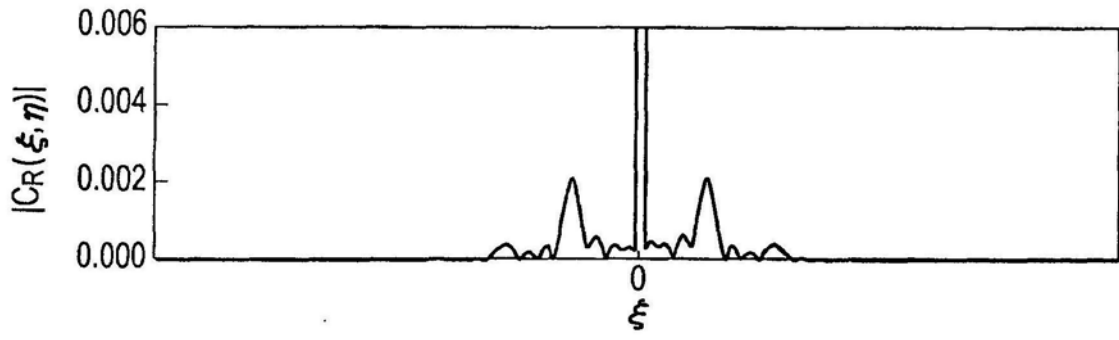


图20C

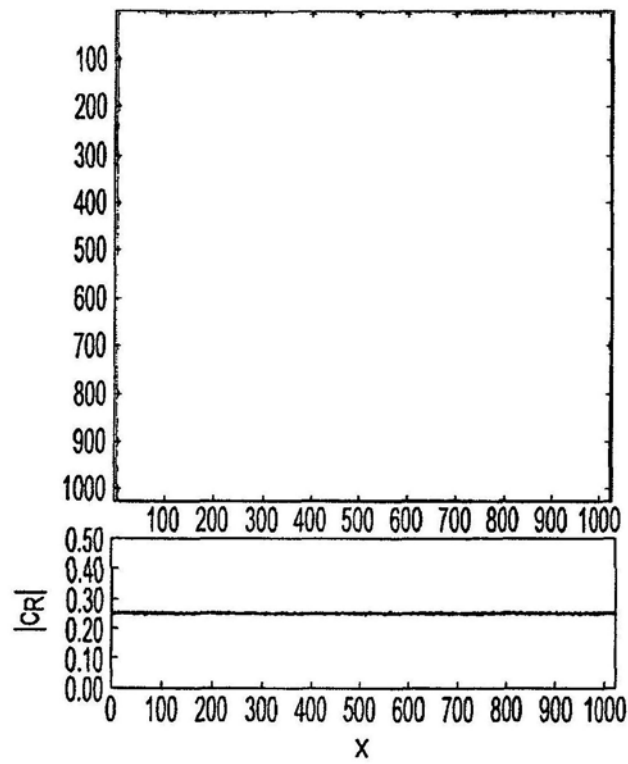


图21A

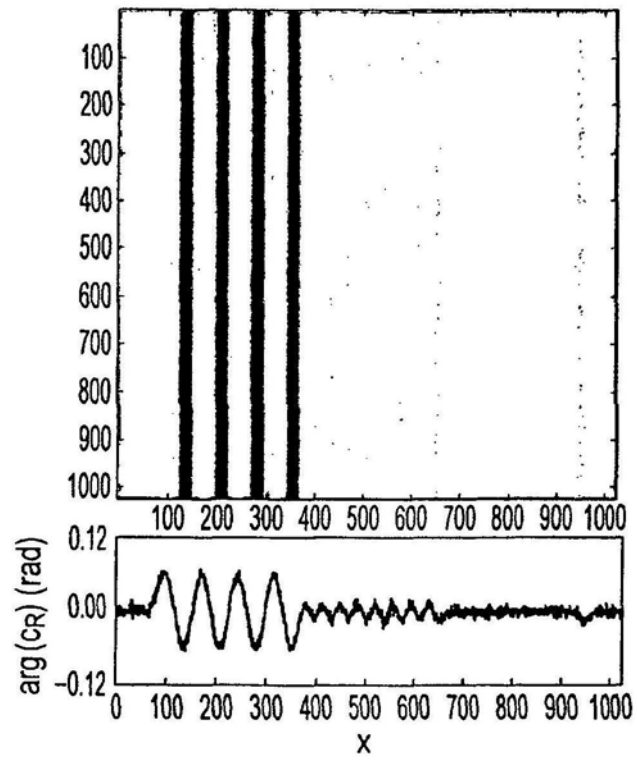


图21B