



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107816939 B

(45)授权公告日 2020.04.14

(21)申请号 201711103826.0

(74)专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 张邦帅 邱军

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107816939 A

(51)Int.CI.

G01B 9/02(2006.01)

G01M 11/00(2006.01)

G01M 11/02(2006.01)

(43)申请公布日 2018.03.20

(56)对比文件

(30)优先权数据

102012217800.7 2012.09.28 DE

CN 101495833 A, 2009.07.29, 摘要, 说明书

61/707,014 2012.09.28 US

第5-27页, 附图1-19.

201380051045.5 2013.09.27

US 6005667 A, 1999.12.21, 全文.

(73)专利权人 卡尔蔡司SMT有限责任公司

US 7948638 B2, 2011.05.24, 全文.

地址 德国上科亨

CN 101687302 A, 2010.03.31, 全文.

(72)发明人 J.赫茨勒

CN 1973180 A, 2007.05.30, 全文.

CN 1987341 A, 2007.06.27, 全文.

审查员 郝敏

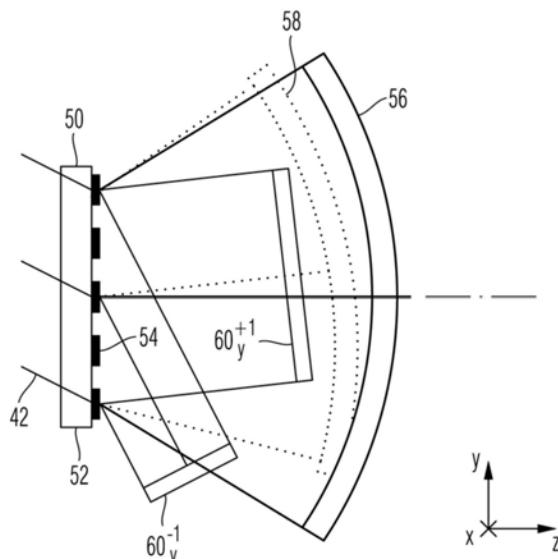
权利要求书1页 说明书15页 附图11页

(54)发明名称

衍射光学元件和干涉测量方法

(57)摘要

提供了一种衍射光学元件(50),具有基板(52)和布置在其上的衍射结构图案(54)。所述衍射结构图案构造为将辐射至其上的平面或球面输入波(42)转换为:1)至少四个分离的输出波,其中,所述输出波中的至少一个是非球面波,所述输出波中的至少另外一个是球面波(58;70),所述输出波中的至少另外两个分别是平面波(60)或球面波(72,74);2)至少三个分离波,其中的至少一个是非球面波,另外两个是球面或平面波;3)至少三个球面波。衍射光学元件用在干涉测量方法和装置中,用于确定光学元件的光学表面的实际形状与预期形状的偏离。光学元件制造成具有光学表面,用上述方法和装置测量的光学表面与预期形状的偏离位于预定水平之下。



1. 一种用于确定光学元件的光学表面的实际形状与预期形状的偏差的方法, 包含以下步骤:

-产生输入波;

-将衍射光学元件布置在所述输入波的光束路径中, 使得通过与所述衍射光学元件的相互作用将所述输入波转换为至少测量波, 所述测量波适配于所述光学表面的预期形状, 并且在衍射光学元件处以Littrow反射从输入波产生参考波;

-将所述光学表面布置在适配的测量波的光束路径中, 并且使用参考波作为参考通过干涉测量在与所述光学表面相互作用之后测量所适配的测量波的波前。

2. 根据权利要求1的方法,

其中, 所述输入波通过与所述衍射光学元件的相互作用还被转换为至少一个校准波。

3. 根据权利要求1或2的方法,

其中, 所述衍射光学元件包含复杂编码的位相光栅。

4. 一种衍射光学元件, 具有基板和布置在其上的衍射结构图案, 其中, 所述衍射结构图案构造为将辐射至其上的平面或球面输入波转换为至少非球面输出波, 所述非球面输出波适配于要测量的光学表面的预期形状, 所述衍射结构还构造为以Littrow反射从输入波产生参考波, 所述参考波构造成用作参考, 以通过干涉测量在与光学表面相互作用之后测量非球面输出波的波前。

5. 如权利要求4所述的衍射光学元件, 构造为将输出波还转换为平面波或球面波形式的至少一个校准波。

6. 一种用于确定光学元件的光学表面的实际形状与预期形状的偏差的干涉测量系统, 包括:

-光源, 用于产生输入波;

-衍射光学元件, 布置在所述输入波的光束路径中, 使得通过与所述衍射光学元件的相互作用将所述输入波转换为至少测量波, 所述测量波适配于所述光学表面的预期形状, 并且在衍射光学元件处以Littrow反射从输入波产生参考波; 以及

-干涉仪, 用于使用参考波作为参考在与所述光学表面相互作用之后测量所适配的测量波的波前。

衍射光学元件和干涉测量方法

[0001] 本申请是申请日为2013年9月27日、申请号为201380051045.5、发明名称为“衍射光学元件和干涉测量方法”的发明专利申请的分案申请。

[0002] 相关申请的交叉引用

[0003] 本申请要求2012年9月28日申请的德国专利申请No.10 2012 217 800.7和2012年9月28日申请的美国临时申请No.61/707,014的优先权。该德国专利申请和该美国临时申请的全部内容通过引用并入本申请。

技术领域

[0004] 本发明涉及一种确定光学元件的光学表面的实际形状与预期形状偏差的方法，执行该方法的衍射光学元件，以及制造光学元件以及该光学元件的方法。

背景技术

[0005] 例如在US 2010/0177321 A1中描述了一种确定实际形状与预期形状的偏差的装置。该装置包含用于产生测量波的干涉仪，测量波的波前通过衍射光栅适配于光学表面的非球面预期形状。适配的测量波的波前在光学表面处的反射之后通过干涉测量法来评估，光学表面的实际形状与其预期形状的偏差在该过程中被确定。

[0006] 在该情况中，衍射光栅例如可为计算机生成的全息图 (CGH)，其通过设计由适合的计算法(例如，光线追迹法)模拟的干涉仪来产生，并且，在该过程中，计算衍射光栅的位相函数，使得衍射光栅在干涉仪布置的光束路径中具有预期功能。那么，可由衍射光栅的计算的位相函数制造衍射光栅。

[0007] 形状测量的精度依赖于CGH的精度。在此，尽可能准确的制造不是决定性的，尽可能准确的测量CGH中所有可能误差是决定性的。已知误差可在测量测试物的形状时通过计算来移除。因此，CGH形成参考。虽然可完全校准旋转对称非球面的情况中的所有非旋转对称误差，所有CGH误差对自由形式表面(即，不具有旋转对称性的非球面表面)情况中的形状测量有影响。因此，关于CGH测量的精度的要求急剧增长。在该过程中，重要的是精确知道CGH的衍射结构的畸变，即衍射结构相对于它们的预期位置的横向位置，以及CGH的轮廓形状。然而，这些参数可通过现有技术已知的测量装备来确定的测量精度不足以用于不断增长的需求。

[0008] 用于高度精确测量光学表面的其它已知设备使用串联布置的两个CGH，由此，测量构造所需的工作量增加。

发明内容

[0009] 本发明的目的是解决上述问题，尤其是提供一种以改善的精度测量任意形状的光学表面、尤其是不具有旋转对称性的非球面表面的方法和衍射光学元件。

[0010] 根据本发明的解决方案

[0011] 举例而言，根据本发明，上述目的可通过衍射光学元件来实现，该衍射光学元件具

有基板和布置在基板上的衍射结构图案。衍射结构图案构造为将辐射其上的平面或球面输入波转换为至少四个分离的输出波，其中所述输出波中至少之一是非球面波，所述输出波中至少另一个是球面波，所述输出波中至少另两个是分别是平面波或球面波。

[0012] 根据本发明，上述输出波因此仅通过单一衍射光学元件(即，布置在单一基板上的衍射结构图案)产生。因此，衍射光学元件可根据几个变型来构造。根据第一变型，辐射其上的波为平面的，输出波包含至少一个非球面波和至少三个球面波。根据第二变型，辐射其上的波为球面的，输出波包含至少一个非球面波和至少三个球面波。根据第三变型，辐射其上的波为平面的，输出波包含至少一个球面波和至少两个平面波。根据第二变型，辐射其上的波为球面的，输出波包含至少一个球面波和至少两个平面波。在第一和第二变型的情况下，根据一个实施例，球面波的强度彼此相差小于30%，尤其小于10%。

[0013] 还可将平面或球面输入波仅称作球面波，在该情况下，平面波计算为具有无限半径的球面波的球面情况。非球面输出波可为适配于要测量的光学表面的测量波，所述测量波在表面由干涉测量设备测量时辐射至表面上。其它输出波还可称为校准波。

[0014] 尤其是，衍射光学元件实施为计算机生成的全息图(CGH)。衍射结构图案还可称为位相光栅或衍射光栅，尽管应注意不必将衍射结构图案理解为表示规则光栅，而是理解为尤其是可具有弯曲的线结构，所述线结构原则上可在它们的形状上彼此偏离并且它们之间的距离是可变的。如上文所述，衍射结构图案布置在衍射光学元件的基板上，即，其仅布置在一个基板上。因此，衍射结构图案不由布置在不同基板上的几个子图案构成。

[0015] 如上所述产生分离的输出波的衍射结构图案可构造为复杂编码的位相光栅。在本申请的含义中，球面波是具有球面波前的波，即，波前由至少球面表面部分形成的波。

[0016] 在本申请的含义中，非球面波是波前具有与任意理想球面、尤其是与最适合于波前的球面至少 10λ 的偏差的波，其中， λ 是辐射其上的输入波的波长。换言之，非球面波具有至少一个点，在该点处，非球面波与非常理想的球面偏离至少 10λ 。如果波长为500nm，则本申请的含义中的非球面波具有与任意理想球面至少 $5\mu\text{m}$ 的偏差。在本申请的含义中，非球面波包含具有旋转对称波前的波(即，传统意义上的非球面波)以及具有非旋转对称波前的波(即，具有所谓自由形式表面的形状的波前的波)。

[0017] 根据一个实施例，非球面波具有自由形式表面形式的波前，其中，所述波前具有与任意理想球面至少1mm的偏差。

[0018] 在此，“分离的输出波”应理解为表示输出波具有不同的传播方向并因此可彼此独立地被检测或反射会衍射光学元件，使得这些分离的输出波可在干涉测量系统中被分离地测量。

[0019] 与干涉测量形状所常规使用的CGH相比，根据本发明，根据本发明的衍射光学元件的区别在于，除了非球面输出波之外，产生为平面或球面的至少三个其它输出波。在上述常规CGH中，在不同的衍射级中，除了一个或多个非球面波之外，只产生两个平面或球面波。

[0020] 如果使用串联布置的两个CGH，由球体形成以及由非球体形成且因此同样是非球面的波通常辐射在第二CGH上。如果平面或球面波辐射至该CGH上，则在该过程中将不会产生单一的平面或球面波。

[0021] 在平面或球面输入波辐射至根据本发明的衍射光学元件上时，除了非球面输出波外产生上述类型的至少三个其它输出波使得可通过其它输出波在制造误差方面测量衍射

光学元件。然后在使用衍射光学元件随后测量光学表面期间,那么再次可通过计算从测量结果移除制造误差的效应。结果,可增加测量形状、尤其是非球面光学表面的测量精度。

[0022] 依据根据本发明的一个实施例,结构图案构造为使得至少两个其它输出波为平面波,其传播方向相对于输入波的入射方向关于彼此对称。根据一个变型,两个平面输出波为线性光栅处的相同衍射级的正级和负级,例如+1st和-1st衍射级。

[0023] 依据根据本发明的另一实施例,结构图案构造为使得,除了形成第一波对的两个平面输出波外,分离的输出波具有第二波对形式的两个其它平面波,其传播方向同样相对于入射方向关于彼此对称,第一波对的传播方向构成的平面与第二波对的传播方向构成的平面偏离。尤其是,第一波对的传播方向构成的平面基本上垂直于第二波对的传播方向构成的平面。在该背景下,基本上垂直表示至少80°、尤其至少85°、至少89°或约90°的角度。

[0024] 依据根据本发明的另一实施例,在衍射结构图案的每一点i处,第一差矢量与第二差矢量之间限定出角度 α_i ,第一差矢量由从点i发出的非球面波的波矢 $k_i(A)$ 与照在点i上的输入波的波矢 $k_i(in)$ 之间的差限定,第二差矢量由从点i发出的至少一个球面波的波矢 $k_i(S)$ 与照在点i上的输入波的波矢 $k_i(in)$ 之间的差限定。另外,结构图案构造为使得在至平行于结构图案的平面上的投影中,在衍射结构图案的点i上平均的角 α_i 的绝对值大于5°,尤其大于10°。波矢还称为“k矢量”,并且是处置与波的波前的矢量。换言之,角 ω 大于5°,其中 ω 被限定为如下:

$$[0025] \omega = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \angle [(k_i(A) - k_i(in)), (k_i(S) - k_i(in))] \right|.$$

[0026] 在此,N表示其上形成平均值的点i的数量。再次换句话表达,角 ω 由衍射光学元件

的空间坐标i上的角 α_i^{xy} 的绝对值的平均值限定,即, $\omega = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\alpha_i^{xy}|$,其中 α_i^{xy} 是投影在

差矢量 $[k_i(A) - k_i(in)]$ 和差矢量 $[k_i(S) - k_i(in)]$ 之间的xy平面上的角。

[0027] 在此,平均数形成在由结构图案覆盖的区域上,即衍射光学元件的光学有效区域。输入波的传播方向称为z方向,因此,xy平面为垂直于输入波的传播方向的平面。

[0028] 依据根据本发明的另一实施例,用于产生非球面波的结构图案的衍射效率比用于产生至少一个球面波的结构图案的衍射效率大至少50%。结果,非球面波的强度比至少一个球面波的强度大至少50%。根据一个实施例变型,用于产生至少一个非球面波的衍射效率比用于产生至少一个球面波的衍射效率大至少70%,尤其是至少100%。这可通过使用金属化校准反射镜来补偿。根据一个实施例,至少四个输出波的衍射效率的和大于30%。

[0029] 依据根据本发明的另一实施例,结构图案构造为使得非球面输出波的辐射功率大于球面或平面输出波的相应辐射功率。也就是说,具有非球面波前的输出波在结构图案中的比重强烈大于具有球面或平面波前的其余三个输出波。根据一个示例性实施例,具有非球面波前的输出波的辐射功率为输入波的辐射功率的至少30%、尤其约40%,具有球面或平面波前的其余三个输出波各具有输入波的辐射功率的15%至25%、尤其约20%。

[0030] 依据根据本发明的另一实施例,结构图案构造为使得辐射其上的输入波转换为至少五个分离的输出波,所述输出波中的四个实施为球面波。至少五个输出波中的另外一个

是非球面波,尤其是自由形式波。

[0031] 依据根据本发明的另一实施例,输出波具有相应平均传播方向,其关于彼此取向为使得成对的四个球面输出波的平均传播方向在各个情况中不布置为相对于由非球面输出波的平均传播方向限定的轴关于彼此对称。在该背景下,“不对称”被理解为表示与对称布置相比偏离至少1°、尤其是至少5°。平均传播方向是由强度加权平均各输出波的不同传播方向出现的传播方向。根据一个实施例变型,该条件应用于衍射光学元件上所有点的至少90%。

[0032] 依据根据本发明的另一实施例,衍射结构图案包含多级位相光栅。如本领域技术人员所熟知,多级位相光栅被理解为表示具有在最高级与最低级之间的至少一个中间级的位相光栅。因此,这种位相光栅具有至少三级。根据不同的实施例,可提供四个或更多的级。所谓的闪耀位相光栅具有许多级,使得轮廓由斜面表示。使用多级位相光栅使得可至少部分补偿以至过补偿由复杂编码导致的衍射效率损失。在本申请的含义中,多级位相光栅应被理解为表示这种闪耀位相光栅。本领域技术人员可由Donald C.O' Shea等人的手册“Diffractive optics:design,fabrication, and test,2004,The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers,第29至35页”获得关于多级位相光栅的背景信息。本申请的含义中的多级位相光栅尤其还被理解为表示横向闪耀位相光栅,例如在H.Kleemann等人的“Combination of blazed and laterally blazed structures, Diffractive Optics and Micro-Optics,OSA Technical Digest (Optical Society of America),paper DTuC7,2004”中所述。

[0033] 根据本发明,另外提供衍射光学元件,其包含基板和布置其上的衍射光栅。衍射光栅具有布置为彼此相隔一距离的光栅线,衍射光栅的平均周期距离由在各相邻光栅线之间在衍射光栅上平均的中心距确定。具有波状形式的光栅线使得光栅线的平均波周期位于衍射光栅的平均周期距离的3倍至20倍之间的区域中,光栅线中横向于它们的纵向范围的变化具有位于衍射光栅的平均周期距离的0.1倍至3倍之间的区域中的范围。

[0034] 在光栅线的横向方向上测量衍射光栅的平均周期距离。光栅线的波形式被理解为表示光栅线相对于相应直线向上和向下(即横向于光栅线的纵向范围)偏离。在此,波周期可随偏转变化。在此,光栅线的横向于其纵向范围的变化的范围应被理解为表示相应光栅线与其想象的直形状(即,与最适于相应光栅线的直线)的偏离范围。尤其是,变化的范围为确定光栅线形状的波的振幅的两倍。

[0035] 依据根据本发明的另一实施例,衍射光栅覆盖基板的至少20%。如果基板具有板状设计,基板的上侧和下侧的20%分别由衍射光栅覆盖。

[0036] 依据根据本发明的另一实施例,衍射光栅的光栅线的至少90%、尤其95%或至少99%实施为连续线,其不间断地延伸在衍射光栅的边缘区域之间,即,这些线不在基板的由衍射光栅覆盖的区域终止。

[0037] 依据根据本发明的另一实施例,衍射光栅构造为使得光栅线的在衍射光栅的具有1mm边缘长度的方形测量区域中平均的条纹密度在具有50μm边缘长度的任意方形部分区域上具有在小于20线对/mm的范围上延伸的变化。根据用于确定方形部分区域内的条纹密度的方法的一个示例,最初沿各光栅线每1μm确定光栅线的宽度和在一侧邻接下一个光栅线的中间空间的宽度的和。形成由此确定的值的倒数,因此,条纹密度在相关测量点处确定。

条纹密度的值在相关部分区域中的所有测量点上平均。这在方形测量区域中的所有部分区域(即, $20 \times 20 = 400$ 个部分区域)中发生,使得针对各部分区域确定平均条纹密度。根据上文讨论的示例性实施例,平均条纹密度的变化具有小于20线对/mm的范围,即,针对测量区域中各部分区域确定的平均条纹密度的变化小于20线对/mm。举例而言,如果条纹密度平均约为200线对/mm,则条纹密度在190至210线对/mm的范围内变化。

[0038] 根据另一实施例,结构图案构造为使得,除了至少四个分离的输出波外,Littrow反射的参考波还作为参考波从辐射其上的输入波产生,所述参考波可用作干涉测量期间的参考。

[0039] 上述实施例和实施例变型中所述的特征可单独或组合地转移至具有波状光栅线的衍射光学元件。

[0040] 另外,根据本发明,提供具有基板和布置其上的衍射结构图案的衍射光学元件。衍射结构图案构造为使得结构图案将辐射其上的平面或球面输入波转换为均具有球面波前的至少三个分离的输出波。

[0041] 上述实施例和实施例变型中所述的特征可单独或组合地转移至具有波状光栅线的衍射光学元件。尤其是,该衍射光学元件可包含来自产生至少四个分离的输出波的衍射光学元件的上述实施例的特征。

[0042] 根据本发明,提供一种用于确定光学元件的光学表面的实际形状与预期形状的偏差的方法。该方法包含以下步骤:产生输入波,将衍射光学元件布置在输入波的光束路径中,以及通过与衍射光学元件的相互作用将输入波转换为至少三个分离的输出波,其中所述输出波之一是具有非球面波前且适配于光学表面的预期形状的测量波,所述输出波的至少另外两个是校准波。所述方法还包含以下步骤:通过至少两个校准波的每一个确定衍射光学元件的校准校正值,将光学表面布置在适配波的光束路径中,以及在与光学表面相互作用之后测量适配测量波的波前,其中,使用相对于所述输入波与在确定所述校准校正值期间取向相同的衍射光学元件测量所述适配测量波的波前。另外,根据上述方法,测量的波前通过确定的校准校正值来校正。

[0043] 换言之,根据上述方法,衍射光学元件相对于输入波的传播方向布置在指定取向上,用于确定校准校正值,其中所述校准校正值通过分析至少两个校准波的每一个来确定。该取向在测量适配波的波前时不改变。再次换言之,在产生和分析测量波时,以及在产生和分析校准波时,输入波在衍射光学元件的局部坐标系统中具有相同入射方向。输出波尤其通过输入波与衍射光学元件的相互作用而同时产生。

[0044] 如上所述,“分离的输出波”被理解为表示输出波具有不同传播方向并因此可彼此独立地被检测并反射回衍射光学元件,使得所述输出波可在干涉测量系统中被分开测量。

[0045] 在衍射光学元件相对于输入波取向与确定校准校正值期间相同的情况下,通过测量适配波的波前允许关于制造误差尤其精确校准衍射光学元件,因为确定的校准校正值可直接应用于适配波的测量波前。因为取向保持不变,确定的校准校正值精确地反映衍射光学元件的与产生测量波有关的制造误差。换言之,由于测量的校准校正值与产生测量波的衍射光学元件上的结构的实际偏差之间的偏差,所述偏差将由衍射光学元件的不同取向导致,没有误差被引入波前的校正。

[0046] 根据一实施例,使用相对于输入波布置与确定校准校正值期间相同的位置的衍射

光学元件来测量适配的测量波的波前。这意味着衍射光学元件的取向和位置在测量适配的测量波时保持不变。

[0047] 至少两个校准波包括第一校准波和第二校准波。衍射光学元件的校准校正值通过第一校准波以及通过第二校准波来确定。

[0048] 根据另一实施例,确定校准校正值包含从校准波中的第一个确定第一校准校正值,以及从校准波中的第二个确定第二校准校正值,其中,使用相对于输入波取向相同的衍射光学元件来确定第一校准校正值和第二校准校正值,即,衍射光学元件的取向在确定第一校准校正值与确定第二校准校正值之间不改变。

[0049] 根据另一实施例,衍射光学元件包含复杂编码的位相光栅。这种复杂编码的位相光栅构造为具有至少三个位相函数 f_1 至 f_3 ,使得针对各位相函数 f_1 至 f_3 中各单独之一产生相应衍射波,所述衍射波形成上述输出波。针对各位相函数 f_1 至 f_3 产生的衍射波为在位相光栅 f_G 处产生的第一衍射级的各个波。根据本申请的复杂编码的位相光栅的性质更详细地描述于对示例实施例的随后详细描述中。使用复杂编码的位相光栅允许将衍射光学元件构造为使得输出波具有不同的强度。这可通过将不同权重分配给复杂编码的位相光栅中的单独位相函数 f_1 至 f_3 来完成。

[0050] 根据一实施例,至少三个输出波中的每一个在衍射光学元件处以相同衍射级产生。尤其是,至少三个输出波中的每一个在衍射光学元件处以第一衍射级产生,尤其是 $+1^{\text{st}}$ 衍射级。在如本申请中所述的复杂编码的光栅的情况下,仅 $+1^{\text{st}}$ 衍射级形成输出波。当产生第一衍射级的输出波时,可产生具有简单几何形状(例如,平面或球面形状)的校准波。在这种简单几何形状的情况下,可实现精确的校准,因为适当校准物可以高精度来制造。

[0051] 根据另一实施例,输出波具有相应的平均传播方向,其关于彼此取向为使得至少两个校准波的平均传播方向不对称布置,即,相对于由测量波的平均传播方向限定的轴关于彼此没有对称布置。在这种不对称布置的情况下,可避免在测量波位置处产生干扰或伪光。

[0052] 根据另一实施例,校准波中的至少一个是球面波。根据本发明的另一实施例,至少两个或至少三个校准波为球面波。

[0053] 根据本发明的一实施例,输入波是平面或球面波,输入波通过与衍射光学元件的相互作用而转换为至少四个分离的输出波,其中输出波中另外的至少一个是具有球面波前的校准波,输出波中另外的至少两个是均具有平面或球面波前的校准波。衍射光学元件的校准校正值通过三个校准波来确定。

[0054] 上文或下文关于根据本发明的所述实施例中任一个的方法所提及的特征可转移至所述实施例中任一个中根据本发明的衍射光学元件,尤其是构造为将输入波转换为至少四个分离的输出波的衍射光学元件,反之亦然。尤其是,根据本发明的衍射光学元件可构造为产生四个分离的输出波,使得在与光学表面相互作用之后的非球面波的波前可以衍射光学元件来测量,所述衍射光学元件相对于输入波取向为与通过其它输出波确定校准校正值期间一样。根据另一实施例,衍射光学元件构造为同时产生四个分离的输出波,尤其是产生第一衍射级的输出波的每一个。

[0055] 另外,根据本发明,提供一种确定光学元件的光学表面的实际形状与预期形状的偏差的方法。在一个实施例中,根据本发明的方法包含以下步骤:产生平面或球面输入波,

将衍射光学元件布置在输入波的光束路径中,以及通过与衍射光学元件的相互作用将输入波转换为至少四个分离的输出波,其中所述输出波中的至少一个是具有非球面波前且适配于光学表面的预期形状的测量波,所述输出波的至少另外一个是具有球面波前的校准波,以及所述输出波的至少另外两个在各个情况中是具有平面或球面波前的校准波。另外,根据本发明的方法,通过校准波确定衍射光学元件的校准校正值,在适配的测量波的光束路径中测量光学表面,以及在与光学表面相互作用之后测量适配的测量波的波前。另外,测量的波前通过确定的校准校正值来校正。现在可通过校正的波前确定光学表面的实际形状与预期形状的偏差。

[0056] 根据本发明的方法中所用的衍射光学元件尤其可根据上述实施例之一来实施。根据本发明的一个实施例,为了确定校准校正值,一个或更多的校准物布置在校准波的光束路径中,并且在与一个或多个校准物相互作用之后干涉测量评估校准波。

[0057] 另外,根据本发明,提供一种用于制造光学元件的方法。在一个实施例中,该方法包含以下步骤:制造具有直径大于500mm的光学表面的光学元件。另外,通过仅使用一个衍射光学元件的干涉测量法相对于预期形状如此准确地测量光学表面的实际形状,使得以0.05nm的精度确定实际形状与预期形状的偏差,其源于以d/100至d/5之间的振动波长的振荡,预期形状为自由形式表面,其具有与各旋转对称非球面的大于5μm的偏差。另外,光学表面通过基于干涉测量结果的光学表面的机械处理而适配于预期形状。在该情况中将光学表面适配于预期形状在干涉测量的测量精度的范围内发生。

[0058] 尤其是,光学表面的实际形状的干涉测量通过执行根据本发明的实施例之一的上述测量方法而进行。尤其是,制造方法中所用的衍射光学元件可实施在上述实施例之一中。

[0059] 另外,根据本发明,提供一种光学元件,其具有直径d大于500mm的光学表面。在此,光学表面的实际形状适配于预期形状,使得实际形状与预期形状的偏差(其源于以d/100至d/5之间的振动波长的振荡)不超过0.05nm,尤其是不超过0.02nm。在此,预期形状是自由形式表面,其与各旋转对称非球面的偏差不超多5μm,尤其不超过10μm。

[0060] 举例而言,光学元件可实施为EUV反射镜。尤其是,预期形状与最适于其的旋转对称非球面的偏差不超过5μm,尤其不超过10μm。根据示例性实施例,光学表面可具有大于1000mm的直径,所有振荡可涉及1mm与50mm之间的振动波长。

[0061] 根据本发明的另一实施例,预期形状与每一个球面的偏差为至少1mm。结果,光学表面为大且强自由形式的表面。

[0062] 根据本发明的另一实施例,实际形状与预期形状的偏差(其源于以d/100至d/5之间的振荡)由在光学表面上任意点处实际形状与预期形状的偏差的最大幅度限定。

[0063] 上述特征与根据本发明的实施例的其它特征在权利要求和附图说明中得到解释。单独特征可独立或组合地实施为本发明的实施例。另外,特征可描述有利的实施例,其被独立保护或视需要仅在本申请未决期间或之后被要求保护。

附图说明

[0064] 在参考所附示意图的根据本发明的示例实施例的以下详细描述中说明本发明的上述和其它有利特征。图中:

[0065] 图1显示具有衍射光学元件的干涉测量系统的截面图;

- [0066] 图2以根据图1的截面图描绘通过在第一实施例的衍射光学元件处衍射输入波而产生的输出波；
- [0067] 图3在方向空间中描绘图2的输出波；
- [0068] 图4(a-b)描绘根据图2的输出波中的两个的波矢的角度关系；
- [0069] 图5描绘根据图2的衍射光学元件的衍射结构图案的成分；
- [0070] 图6描绘通过具有球面波前的输出波之一校准衍射光学元件；
- [0071] 图7(a-b)描绘通过平面输出波进一步校准衍射光学元件；
- [0072] 图8以根据图1的截面图描绘通过在衍射光学元件的另一实施例外处衍射输入波而产生的输出波；
- [0073] 图9在方向空间中描绘图8的输出波；
- [0074] 图10描绘根据图8的衍射光学元件的衍射结构图案的成分；
- [0075] 图11显示描绘在根据图1的干涉测量系统中使用根据图9的衍射光学元件时的衍射效率和对比度的曲线；
- [0076] 图12描绘根据图8的衍射光学元件的位相光栅的截面相对于衍射光学元件整体的尺寸比率；
- [0077] 图13描绘图8的位相光栅的光栅线的波动性；
- [0078] 图14显示图13的位相光栅的光栅线之一；
- [0079] 图15在方向空间中描绘通过在衍射光学元件的另一实施例外处的衍射而产生的输出波；
- [0080] 图16在方向空间中描绘通过在衍射光学元件的另一实施例外处的衍射而产生的输出波；
- [0081] 图17描绘根据本发明的另一实施例中的衍射光学元件的实施为多级位相光栅的衍射结构图案；
- [0082] 图18显示根据本发明的制造的光学元件的顶视图；以及
- [0083] 图19显示图18的光学元件的截面图。

具体实施方式

[0084] 在下文描述的示例实施例或实施例中，功能上或结构上彼此相似的元件尽可能设有相同或相似的参考符号。因此，为了理解特定示例实施例的单独元件的特征，应参考其它示例实施例的描述或本发明的大体描述。

[0085] 为了便于描述，在图中示出笛卡尔xyz坐标系统，该系统显示图中所示部件的相应位置关系。在图1中，x方向垂直于图的平面延伸并进入该平面，y方向向上延伸，z方向向右延伸。

[0086] 图1描绘根据本发明的一个实施例中的干涉测量系统10。测量系统10适合用于确定光学元件14形式的测试物的光学表面12的实际形状与非球面预期形状的偏差。举例而言，光学元件14可实施为光学元件或反射镜的形式。在所示情况中，光学元件14是用于EUV光刻的凹反射镜，即，微光刻投射曝光设备中设计为具有在EUV波长范围中的曝光波长的反射镜。EUV波长范围延伸到在100nm之下的波长，尤其是约13.5nm和/或约6.8nm的波长。光学元件14通过图中未示出的保持体装配在测量系统10中。光学表面12的非球面预期形状可具

有旋转对称非球面或自由形式表面的形状,如在总说明中更详细所述。

[0087] 干涉测量系统10包含干涉仪16,其进而包含光源18、分束器34和干涉仪相机45。光源18产生照明辐射20,并且为此包含产生激光光束22的激光器21,例如氦氖激光器。照明辐射20具有用于执行干涉测量的充分相干光。在氦氖激光器的情况下,照明辐射20的波长约为633nm。然而,照明辐射20的波长还可具有在电磁辐射的可见及非可见波长范围中的不同波长。

[0088] 激光光束22通过聚焦透镜元件24聚焦在光阑26上,使得相干光的发散光束从孔径发出。发散光束28的波前基本上是球面的。发散光束28由透镜元件组30准直,因此,照明辐射20在本情况中由基本平面的波前产生。照明辐射20沿干涉仪16的光轴32传播并通过分束器34。

[0089] 照明辐射20因此入射在具有斐索区域38的斐索元件36上。照明辐射20的一部分光在斐索区域38上反射作为参考波40。照明辐射20的通过斐索元件36的光作为输入波42传播,具有沿光轴32的平面波前44并入射在衍射光学元件50上。在测量系统10的其它实施例中,输入波42的波前还可为球面的。

[0090] 关于照明辐射20的波长,衍射光学元件50包含透射基板52以及布置在基板52上的计算机生成的全息图(CGH)形式的衍射结构图案54。

[0091] 在第一实施例中,结构图案54构造为使得通过在结构图案54处的衍射将输入波42转换为非球面输出波56,球面输出波58和平面输出波60,如图2所描绘。球面输出波和平面输出波60充当校准波,如将在下文阐明的。

[0092] 输出波56还绘制在图1中,并充当测量波,用于测量光学元件14的光学表面12的实际形状。为此,输出波56具有适配于光学表面12的预期形状的波前。因此,输出波56还称为适配的测量波。如上所示,输出波56是非球面的并因此具有旋转对称非球面波前或自由形式表面形式的波前。本申请含义中的自由形式表面不具有旋转对称性,如在说明书的总述部分所说明的。

[0093] 图4以两个截面视图(一次在(a)中以yz截面,以及在(b)中以xy截面)描绘在衍射结构图案54上的空间坐标i(x,y)处输入波42的波矢 k_i (in)、球面输出波58的波矢 k_i (S)以及非球面输出波56的波矢 k_i (A)。在此,衍射结构图案54布置在xy平面中。差分矢量 $[k_i(A) - k_i(in)]$ 与差分矢量 $[k_i(S) - k_i(in)]$ 之间的角称为角 α_i 。(a)中绘制的角 α_i^{xz} 为 α_i 在xz平面中的投影,(b)中绘制的角 α_i^{xy} 为 α_i 在xy平面中的投影。

[0094] 角 α_i^{xy} (即,投影在xy平面中的角 α_i)的绝对值的在衍射结构图案54的空间坐标i(x,y)上的平均值称为角 ω 。根据一个实施例,角 ω 大于5°。因此,以下适用:

$$[0095] \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \angle [(k_i(A) - k_i(in)), (k_i(S) - k_i(in))] \right| > 5^\circ.$$

[0096] 在此,N表示点i的数量,在其上形成平均值。根据另一实施例,ω大于10°或大于15°。

[0097] 如图5所描绘,根据图2的结构图案54包含复杂编码的位相光栅 f_G ,其包含多个位相函数 f_1 至 f_4 ,使得针对多个位相函数 f_1 至 f_4 中的各单独一个产生相应衍射波。图5所描绘的示图显示函数 f_1 至 f_4 的轮廓线。位相函数的这些轮廓线对应于相应衍射光栅的光栅线。图

5所描绘的 f_G 的示图显示根据图2的结果图案54的极度放大的截面。换言之,复杂编码的位相光栅 f_G 影响输入波42,使得第一衍射级的相应互相独立的衍射波通过由位相函数 f_1 至 f_4 限定的衍射光栅的每一个产生。人们可设想复杂编码的位相光栅 f_G 为具有在一个点叠加的单独位相函数 f_1 至 f_4 的几个CGH。该功能性的叠加对应于运算 $S = W_1 * \exp(i * f_1) + W_2 * \exp(i * f_2) + W_3 * \exp(i * f_3) + W_4 * \exp(i * f_4)$ 。单独贡献的强度由权重 W_1 至 W_4 设定。设想的单位为i。根据本发明的一个实施例,二元位相光栅(即, $f_G = 0$ 或 π)用于实现复杂编码的位相光栅 f_G 。

[0098] 以下适用于二元位相光栅:如果 $\operatorname{Re}\{S\} > 0$,那么 $f_G = \pi$,否则 $f_G = 0$ 。根据本发明的另一实施例,连续位相光栅用于实现复杂编码的位相光栅 f_G 。该情况中以下适用: $f_G = \exp(i \angle \{S\})$ 。单独位相函数 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 的衍射效率具有不同的振幅,在本实施例中,位相函数 f_1 和 f_2 各包含35%的权重 W_1 和 W_2 ,位相函数 f_3 和 f_4 各包含15%的权重 W_3 和 W_4 。

[0099] 根据图5的位相光栅 f_G 的位相函数 f_1 产生非球面输出波56。位相光栅 f_G 的位相函数 f_2 产生球面输出波58。光栅周期在根据图2的衍射结构图案54上非常空间地对应于位相函数 f_1 和 f_2 。

[0100] 位相光栅 f_G 的位相函数 f_3 和 f_4 是用于产生分别为 $+1^{\text{st}}$ 和 -1^{st} 衍射级的平面波(P)的线性光栅。因此,位相函数 f_3 构造为用于产生相对于输入波42偏转在 $+/ -y$ 方向上的平面输出波的y线性光栅。图2中绘制的平面输出波 60_y^{+1} 和 60_y^{-1} 为通过y线性光栅以 $+1^{\text{st}}$ 和 -1^{st} 衍射级产生的波。由于图2中选择的截面,在图2中不能看到通过由位相函数 f_4 形成的x线性光栅产生的平面输出波 60_x^{+1} 和 60_x^{-1} ,但是其反而绘制在图3中。

[0101] 图3显示通过根据图2的衍射结构图案54的中心产生的方向空间中的输出波。方向空间中的x和y坐标为传播方向上矢量的关于1标准化的x和y坐标。该方向矢量的成分称为方向余弦。以下适用: $-1 \leq x \leq 1$, $-1 \leq y \leq 1$ 以及 $x^2 + y^2 \leq 1$ 。

[0102] 在输出波 60_y^{+1} 和 60_y^{-1} 相对于非球面输出波56在 $+y$ 或 $-y$ 方向上偏移时,输出波 60_x^{+1} 和 60_x^{-1} 相对于非球面输出波56在 $-y$ 和 $+x$ 或 $-x$ 方向上偏移。输出波 60_x^{+1} 和 60_x^{-1} 同样为平面波并且以 $+1^{\text{st}}$ 和 -1^{st} 衍射级由构造为x线性光栅的位相函数 f_4 产生。在所示实施例中,球面输出波58的传播方向与非球面输出波56相比在 $+x$ 和 $+y$ 方向上倾斜。

[0103] 在测量光学元件14(在测量期间光学元件14布置在非球面输出波56的光束路径中,如图1所描绘)之前,测量系统10最初以校准模式工作。以该方式,校准球62最初代替光学元件14相对于衍射光学元件50布置在输出波侧,并且在球面输出波58的光束路径中是精确的,如图6所示。

[0104] 球面输出波58入射在校准球62上,其形状被按绝对值精确地确定。该绝对确定例如可通过本领域技术人员已知的剪切技术或通过同样已知的三位置测试来实现。

[0105] 在校准球62处反射后,球面输出波58通过衍射光学元件50并且通过干涉仪相机45的透镜系统46而引导至干涉仪相机45的相机芯片48的检测区域47。干涉图案通过与参考波40的叠加而产生在检测区域47上,由该干涉图案,球面输出波58与其理想球面波形式的预期波前的偏差通过评估装置49来确定。因此,输出波58的实际波前通过校准球62来按绝对值确定。球面输出波58与其预期波前的偏差存储作为校准偏差K1。

[0106] 因此,再次从衍射光学元件50的输出波侧移走校准球,反而将平面反射镜64接着布置在平面输出波 60_y^{+1} 和 60_y^{-1} 及 60_x^{+1} 和 60_x^{-1} 的相应光束路径中,如图7在(a)中针对输出波 60_y^{+1} 以及在(b)中针对输出波 60_y^{-1} 所描绘。平面反射镜64在各情况中布置为使得合适的输

出波 60_y^{+1} 、 60_y^{-1} 、 60_x^{+1} 或 60_x^{-1} 在通过在输入波42的光束路径中的衍射光学元件50后反射至其本身并且返回到测量系统10的干涉仪16，并且在相机芯片48的检测区域47上与参考波40干涉。

[0107] 相机芯片48针对两个输出波 60_y^{+1} 和 60_y^{-1} 中每一个记录相应干涉图案。如上所述，两个输出波 60_y^{+1} 和 60_y^{-1} 由位相函数 f_3 形成的y线性光栅处的 $+1^{\text{st}}$ 和 -1^{st} 衍射级产生。针对两个输出波 60_y^{+1} 和 60_y^{-1} 记录的干涉图案在校准装置49中彼此组合，因此，在衍射光学元件50的衍射结构图案54的整个区域上确定位相函数 f_3 的变形的x坐标。根据一个实施例，两个干涉图案之间的差在该情况中形成。

[0108] 对于两个输出波 60_x^{+1} 和 60_x^{-1} 发生相同评估。因此，在衍射光学元件50上确定在衍射结构图案54的整个区域上的位相函数 f_4 的变形的y坐标。因此，从这样获得的变形坐标推导出整个衍射结构图案54的x和y坐标的变形。该变形矢量存储作为其它校准偏差K2并且用于校正球面输出波58以及非球面输出波56。

[0109] 此外，输出波 60_y^{+1} 和 60_y^{-1} 及输出波 60_x^{+1} 和 60_x^{-1} 及球面输出波58的干涉图案可例如通过求和彼此组合，使得这因此可用于确定衍射光学元件50的具有衍射结构图案54的基板表面的形状或轮廓偏差。因此确定的形状或轮廓偏差还储存作为其它校准偏差K3。

[0110] 最后，通过测量系统10测量光学元件14的光学表面12。为此，如图1所示，光学元件14形式的测试物布置在非球面输出波56的光束路径中，使得非球面输出波56自对准地入射至光学表面12上并在其上被反射。其上反射的波作为返回测量波66返回通过衍射光学元件50到达干涉仪16。返回测量波66在检测区域47上与参考波40干涉并因此产生干涉图。干涉图通过评估装置49来评估，并且这用于确定光学表面12的实际形状与其预期形状的偏差。在评估期间考虑先前确定的所有校准偏差。

[0111] 通过校准偏差K1和K2，所述方法使得可消除基板50的基板误差以及由衍射结构图案54的变形导致的误差。另外，通过校准偏差K3，所述方法使得可减小衍射结构图案54的形状或轮廓偏差的误差。

[0112] 图8至12描绘了图1的测量系统10中使用的衍射光学元件50的另一实施例。如图8所描绘，该衍射光学元件50的衍射结构图案54构造为使得，通过在衍射结构图案54处的衍射，除了也通过图2的衍射结构图案产生的非球面输出波56外，输入波42进一步转换为三个球面输出波70、72和74。

[0113] 图9在方向空间中描绘输出波56、70、72和74。可从该示图得知，球面输出波70、72和74布置在非球面输出波56周围。在此，球面输出波70、72和74的方向矢量形成三角形。非球面输出波56的方向矢量有利地位于三角形中。

[0114] 图10描绘根据图8的结构图案54的复杂位相编码位相光栅 f_6 的成分。与图5中相同，图10显示的位相光栅 f_6 的一部分是相应结构图案54的高度放大截面。所描绘全部是具有边缘长度50 μm 的方形截面。如图12所描绘，根据一个实施例的衍射光学元件50布置在具有边缘长度500mm的方形基板52上。在该实施例中，衍射结构图案54是圆形的并大部分地覆盖基板52。

[0115] 如图10所示，根据图8的结构图案54的复杂编码的位相光栅 f_6 包含单独位相函数 f_1 至 f_4 。在输入波42辐射至衍射光学元件50上时，分离的输出波通过适当的衍射针对各单独位相函数 f_1 至 f_4 产生。

[0116] 波前适配于要测量的光学元件14的光学表面12的预期形状的非球面输出波56在位相函数 f_1 处产生。非球面输出波56充当测量波。球面输出波70在位相函数 f_2 处产生,球面输出波72在位相函数 f_3 处产生,球面输出波74在位相函数 f_4 处产生。在40%的权重的情况下,位相函数 f_1 的权重与其余位相函数 f_2 至 f_4 的两倍一样强,其余位相函数的权重在各情况下为20%。三个球面输出波70、72和74还可称为校准波。

[0117] 在适当的曲线图中,首先针对非球面输出波56(FF),其次针对球面输出波70、72和74(SP1、SP2和SP3),图11首先示出根据图8的衍射光学元件50在单一通路期间的衍射效率E,其次示出在穿过衍射光学元件50的两个通路期间,由干涉测量系统的相机芯片48记录的干涉图案的对比度C。在曲线图中,根据产生非球面输出波56(FF)的位相函数 f_1 的权重绘制相应衍射效率或对比度。所述曲线图涉及斐索元件36反射0.4%,非球面区域的光学表面12反射4%,适配于球面输出波70、72和74的校准球的光学表面各反射80%。由所述曲线图可明白,在根据图10的 f_1 的权重为40%的情况下,这导致在单一通路中稍微小于25%的衍射效率,而对比度稍微大于90%。那么,球面输出波70、72和74的对比度接近85%。

[0118] 与通过根据图2的衍射光学元件50测量光学元件14的光学表面12相似,使用根据图8的衍射光学元件50时的测量系统最初以校准模式工作。为此,适配于球面输出波70、72和74的校准球接着以对应方式布置在输出波70、72和74的相应光束路径中,并在各情况下通过干涉测量法来测量。干涉测量结果存储在评估装置49中作为球面输出波70、72和74的每一个的校准测量数据。

[0119] 在通过非球面输出波56随后测量光学元件14形式的测试物的光学表面12中,因此获得的测量数据通过考虑存储的校准测量数据的评估装置49来评估。因为考虑了在测量球面输出波70、72和74期间获得的校准测量数据,衍射光学元件50的制造误差可在光学表面12的测量结果中得到校正,因此,光学表面12的形状可以高精度来确定。在此可校正的制造误差包括衍射光学元件50的具有衍射结构图案54的基板表面的形状或轮廓偏差,以及衍射结构图案54的变形效应。

[0120] 因此,可省略衍射结构图案54的变形误差的明确测量。使用三个球面波校准光学表面12的形状测量的选项使得可实现更好的误差预算。尤其是,这是由于以下事实,衍射结构图案54的形状或轮廓偏差在球面输出波70、72和74以及非球面输出波56中产生非常相似的偏差。因此,这些形状或轮廓偏差可在大部分上得到校准。

[0121] 由根据图8的实施例中的衍射结构图案54形成的衍射光栅构造为使得在具有1mm边缘长度的衍射光栅的方形测量区域内平均的光栅线的条纹密度在具有50 μm 的边缘长度的任意方形部分区域上具有变化,该变化延伸在小于20线对/mm的范围上。

[0122] 举例而言,如下文参考图12所解释的,可确定光栅线的条纹密度的变化。布置在衍射光学元件50的基板52上且根据一个实施例具有直径约500mm的圆形形式的衍射结构图案54细分为单独的方形测量区域MF,其各具有1mm的边长。测量区域MF进而细分为单独的方形部分区域TF,其相应边长为50 μm 。

[0123] 在方形部分区域TF内,在沿各光栅线GL的测量点i处确定相应周期距离 d_i ,所述测量点在各情况下分开1 μm 。周期距离 d_i 由测量点i处的光栅线GL的宽度与至在一侧与其毗邻的下一个光栅线的空间的和产生。测量的周期距离 d_i 通过形成倒数转换为条纹密度值 D_i 。因此获得的条纹密度 D_i 的值在相关部分区域TF内的所有光栅线GL的所有测量点i上平均。

[0124] 方形测量区域MF内的所有部分区域TF(例如,400个部分区域)均发生上述情况。因此,针对测量区域MF内的每个部分区域TF确定平均条纹密度 D_M 。根据上述说明,单独部分区域TF的平均条纹密度 D_M 具有小于20线对/mm的范围。因此,针对测量区域MF内的各个部分区域TF确定的平均条纹密度 D_M 变化小于20线对/mm。举例而言,如果平均的条纹密度 D_M 在所有部分区域TF上为200线对/mm,则根据上文提及的说明,条纹密度可至多在190至210线对/mm的范围内变化。

[0125] 图13和14描绘根据图8的实施例中衍射结构图案54的其它特性。在此,图13显示由衍射结构图案54形成的衍射光栅的具有50 μm 边长的方形截面,图14显示图13的截面A,其中包含光栅线GL之一。

[0126] 图13中描绘的衍射光栅具有在衍射光栅上平均的平均周期距离 p ,其由各情况中的相邻光栅线GL之间的中心距确定。还可通过平均(参考图12在上文所述的)确定的周期距离 d_i 来确定平均周期距离。

[0127] 光栅线GL具有波形形式,准确地说,使得光栅线的平均波周期 λ 位于衍射光栅的平均周期距离 d 的3倍至20倍的区域中。另外,光栅线GL在横向于它们的纵向范围的范围 Δ 上的变化,范围 Δ 位于衍射光栅的平均周期距离 d 的0.1倍至3倍的区域中。

[0128] 如图14所描绘,范围 Δ 可通过相应光栅线GL的由直边界线76接近的边缘边界界定,或者通过在相对于相应接近的边界线76确定的波峰处与波谷处的光栅线GL的偏差界定。这些偏差的总和,即,波峰处的偏差81和波谷处的偏差82导致变化的范围 Δ 。然而,范围 Δ 还可通过直辅助线78确定,其从一侧朝光栅线挤直到所述辅助线毗连光栅线GL。那么,光栅线GL的边缘边界与辅助线78之间的最大距离同样对应于范围 Δ 。

[0129] 图15和16在方向空间中显示对输出波的描绘,所述输出波通过衍射条纹图案54的其它实施例产生。在两个实施例中,除了充当测量波的中心布置的非球面输出波56外,通过在条纹图案54处的衍射由输入波42产生充当校准波的四个其它分离的球面输出波70、72、74和80。在此,球面输出波70、72、74和80产生,使得它们不对称围绕非球面波,即,相应相对“空间”保持自由,其由方向空间中的示图平面中非球面输出波56上相应点的镜像限定。换言之,成对的球面输出波70、72、74和80的相应平均传播方向在各情况中不相对于由非球面输出波56的平均传播方向限定的轴关于彼此对称布置。

[0130] 在根据图15的实施例中,在方向空间中的示图平面中,球面输出波80和70相对于关于非球面输出波56的平均传播方向横向布置的对称轴关于球面输出波72和74对称布置。在根据图16的实施例中,缺少该对称性,但是球面输出波70和74以及72和76在各情况中布置在直线上,该直线在方向空间中的示图平面中延伸通过非球面输出波56。

[0131] 使用四个非球面输出波使得可发现一构造,其中,与仅使用三个球面输出波相比,对光栅缺陷的敏感性由于附加自由度而在校准光学元件14的光学表面12的形状测量期间最小化。

[0132] 根据上述实施例之一中的衍射光学元件50的一个实施例变型,衍射结构图案54实施为多级位相光栅,如图17使用图10的位相光栅 f_G 的示例所描绘。如本领域技术人员所清楚的,多级位相光栅应被理解为表示具有在最高和最低级之间的至少一个中间级的位相光栅。因此,这种位相光栅具有至少三个级,图17显示的实施例提供四级。使用多级位相光栅使得可至少部分地补偿或者甚至过补偿由承担的复杂编码造成的衍射效率损失。

[0133] 图18和19描绘了根据本发明制造的光学元件14的实施例,其形式为透镜元件或反射镜,尤其是用于EUV投射曝光设备的反射镜。光学元件14具有形成为自由形式表面的光学表面12。在制造期间,光学元件14的光学表面12最初依据制造精度制造为接近自由形式表面形式的预定预期形状。接近的表面12于是通过使用根据本发明的一个实施例中的衍射光学元件50的干涉测量系统10来测量,因此所述表面与预期形状的偏差以高精度确定。基于测量结果在合适点进一步处理表面12,使得所述表面具有下文所指定的规格。

[0134] 在图18中,可看到光学表面12的直径d,所述光学表面接近圆形,图18显示光学元件14的顶视图。在所描绘的实施例中,直径d约为600mm。图19显示沿光学元件14的轴80的光学元件的示意性横截面。轴80是具有最适于光学表面12的预期形状84的旋转对称球82的旋转轴,并且布置在图中的z方向上。如上文已提及的,预期形状84具有自由形式表面的形式,并且因此不是旋转对称的。非常放大且以用于示意目的的示意性方式描绘光学表面12与图19所示的预期形状84的偏差。

[0135] 预期形状84与最适合的旋转对称球82的最大偏差 Δ 在本实施例中约为 $6\mu\text{m}$,并因此大于 $5\mu\text{m}$ 。光学表面12的实际形状与预期形状84的偏差由2维偏差 $D(x, y)$ 描述,其中x和y表示表面12上的坐标。源于具有 $d/100$ (即,约5mm)与 $d/5$ (即,约100mm)之间的振动波长的振荡的偏差 $D(x, y)$ 至多为0.05nm。

[0136] 如果偏差 $D(x, y)$ 通过傅里叶变换由实空间转换进频率空间,则获得函数 $d(v)$,其中,v表示频率。函数 $d(v)$ 在对应于上述振动波长范围的边界值的频率之间的区域中的振幅因此至多为0.05nm。

[0137] 参考符号列表

- [0138] 10 干涉测量系统
- [0139] 12 光学表面
- [0140] 14 光学元件
- [0141] 16 干涉仪
- [0142] 18 光源
- [0143] 20 照明辐射
- [0144] 21 激光器
- [0145] 22 激光束
- [0146] 24 聚集透镜
- [0147] 26 光阑
- [0148] 28 发散光束
- [0149] 30 透镜元件组
- [0150] 32 光轴
- [0151] 34 分束器
- [0152] 36 斐索元件
- [0153] 38 斐索区域
- [0154] 40 参考波
- [0155] 42 输入波
- [0156] 44 平面波前

- [0157] 45 干涉仪相机
- [0158] 46 透镜系统
- [0159] 47 检测区域
- [0160] 48 相机芯片
- [0161] 50 衍射光学元件
- [0162] 52 基板
- [0163] 54 衍射结构图案
- [0164] 56 非球面输出波
- [0165] 58 球面输出
- [0166] 60_x^{+1} 平面输出波
- [0167] 60_x^{-1} 平面输出波
- [0168] 60_y^{+1} 平面输出波
- [0169] 60_y^{-1} 平面输出波
- [0170] 62 校准球
- [0171] 64 平面反射镜
- [0172] 66 返回测量波
- [0173] 70 球面输出波
- [0174] 72 球面输出波
- [0175] 74 球面输出波
- [0176] 76 接近的直边界线
- [0177] 78 直辅助线
- [0178] 80 旋转轴
- [0179] 82 最适合的旋转对称非球面
- [0180] 84 预期形状

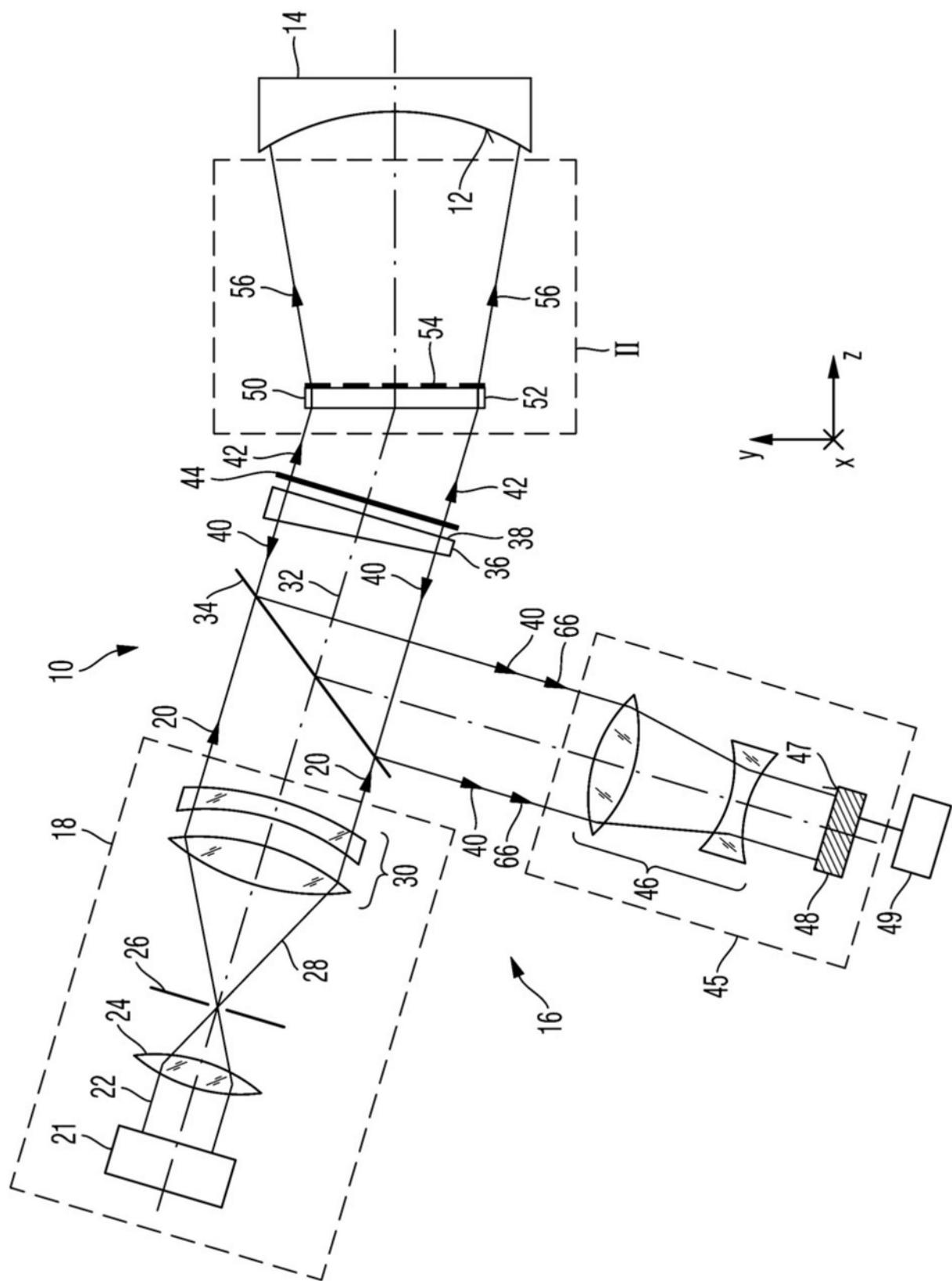


图1

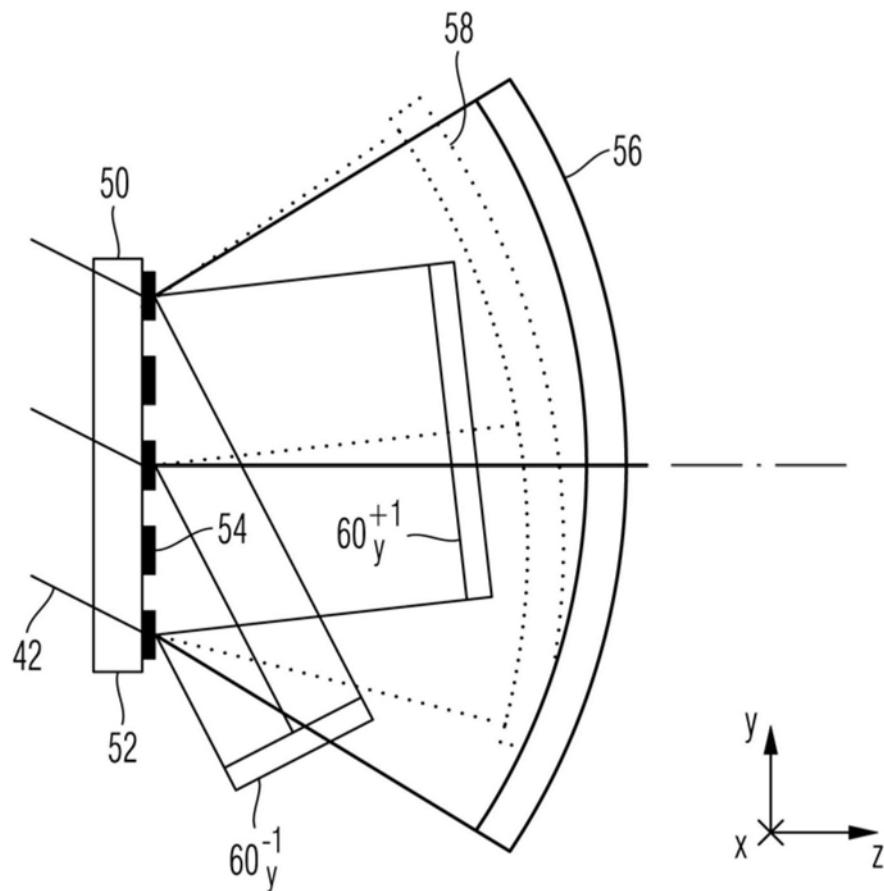


图2

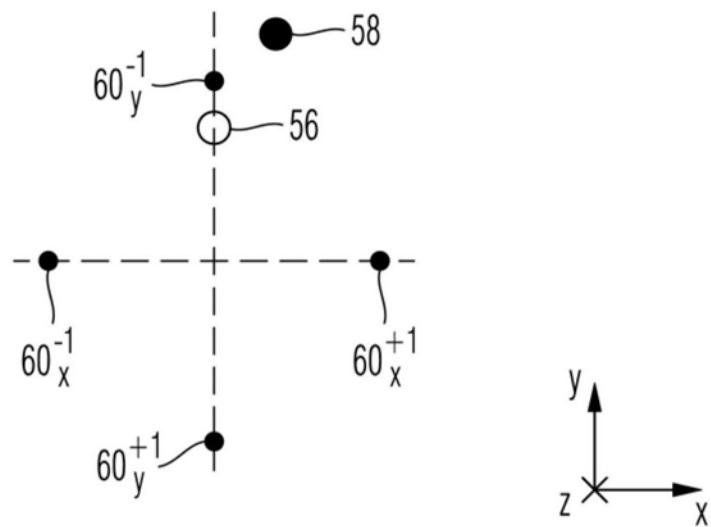


图3

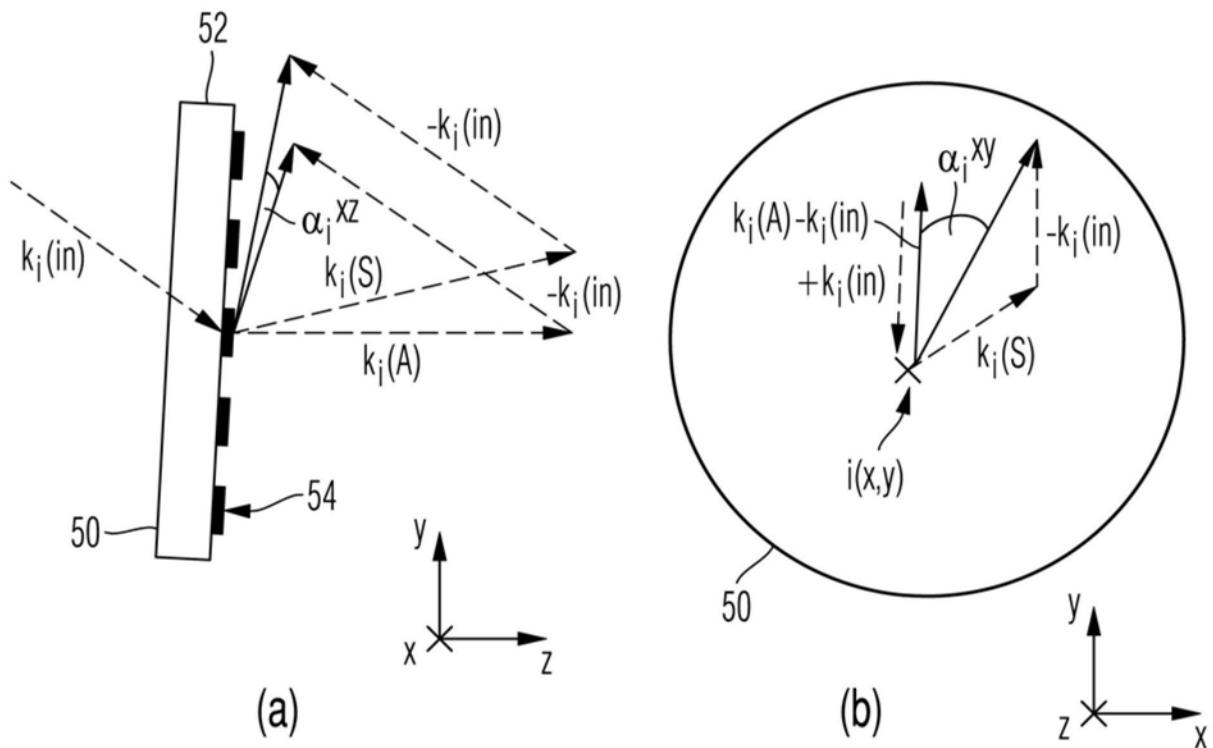


图4

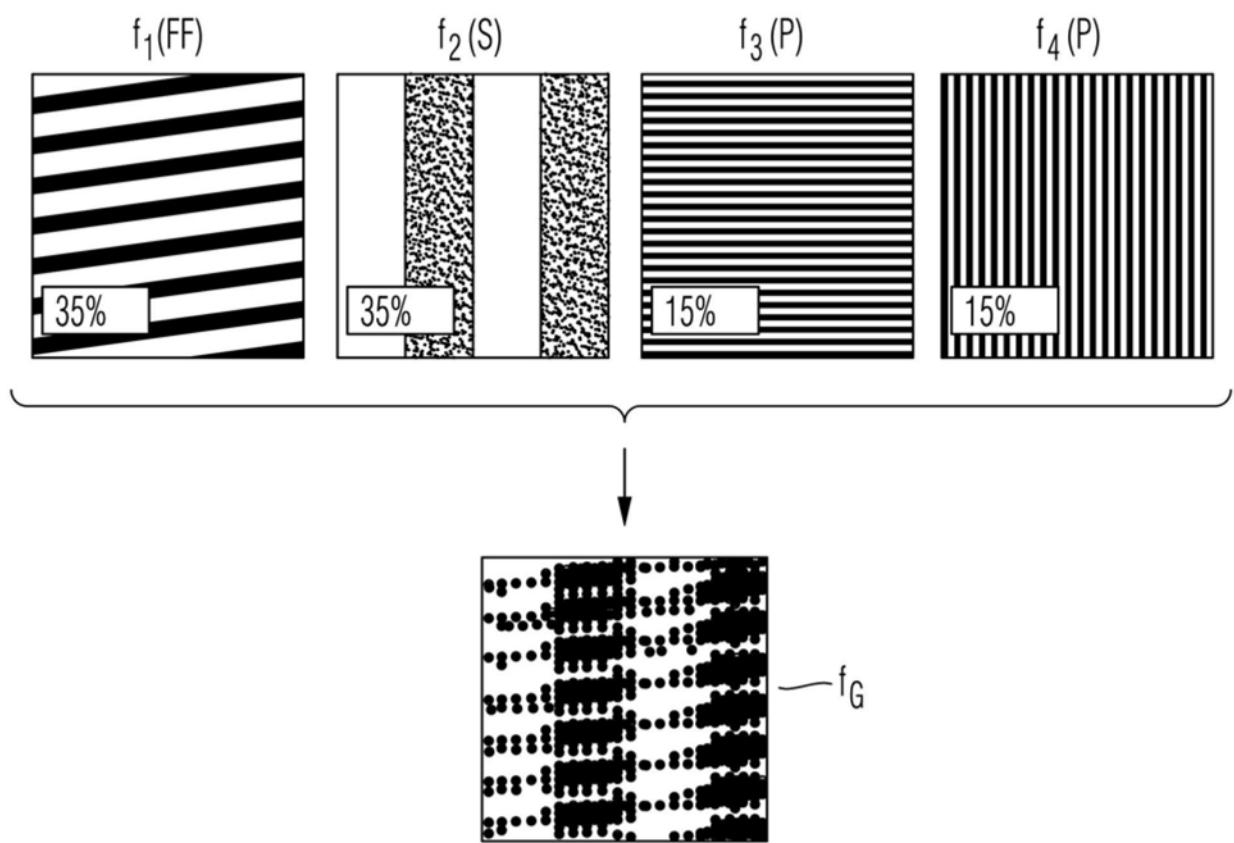


图5

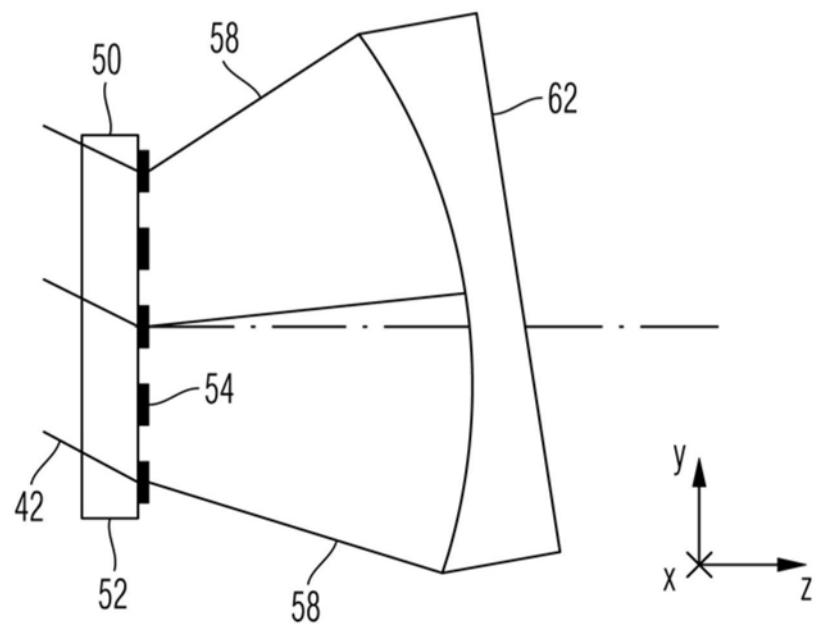


图6

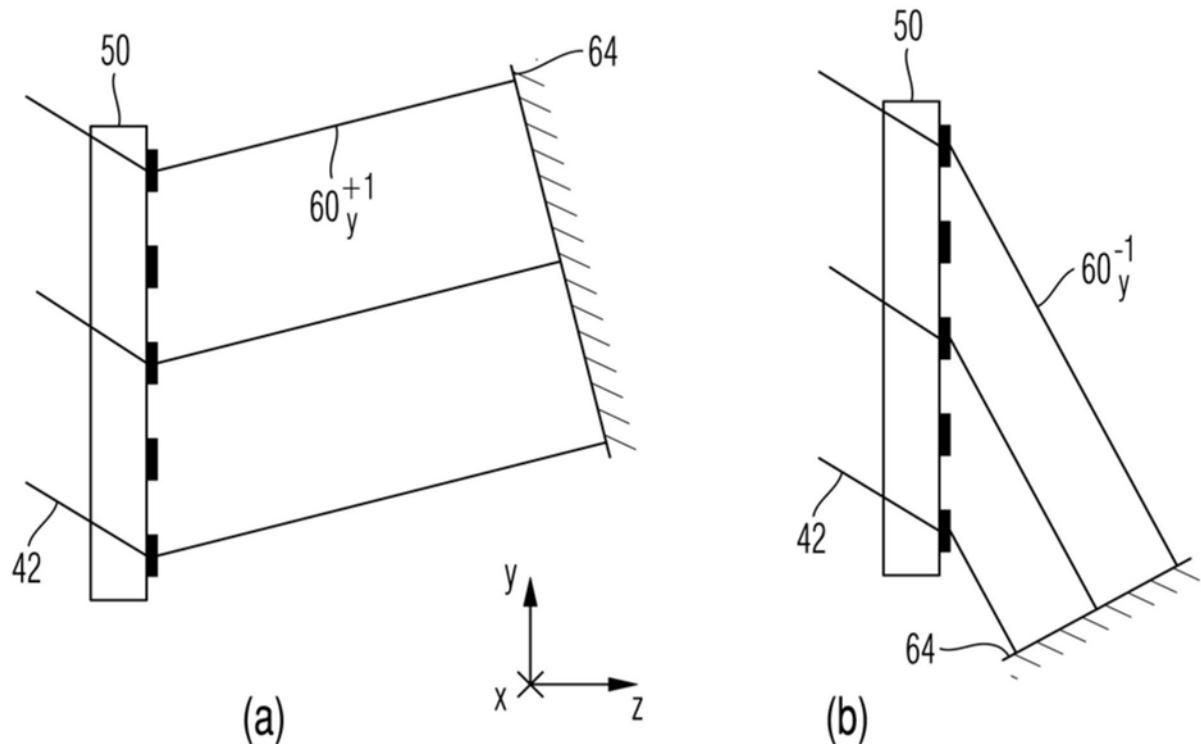


图7

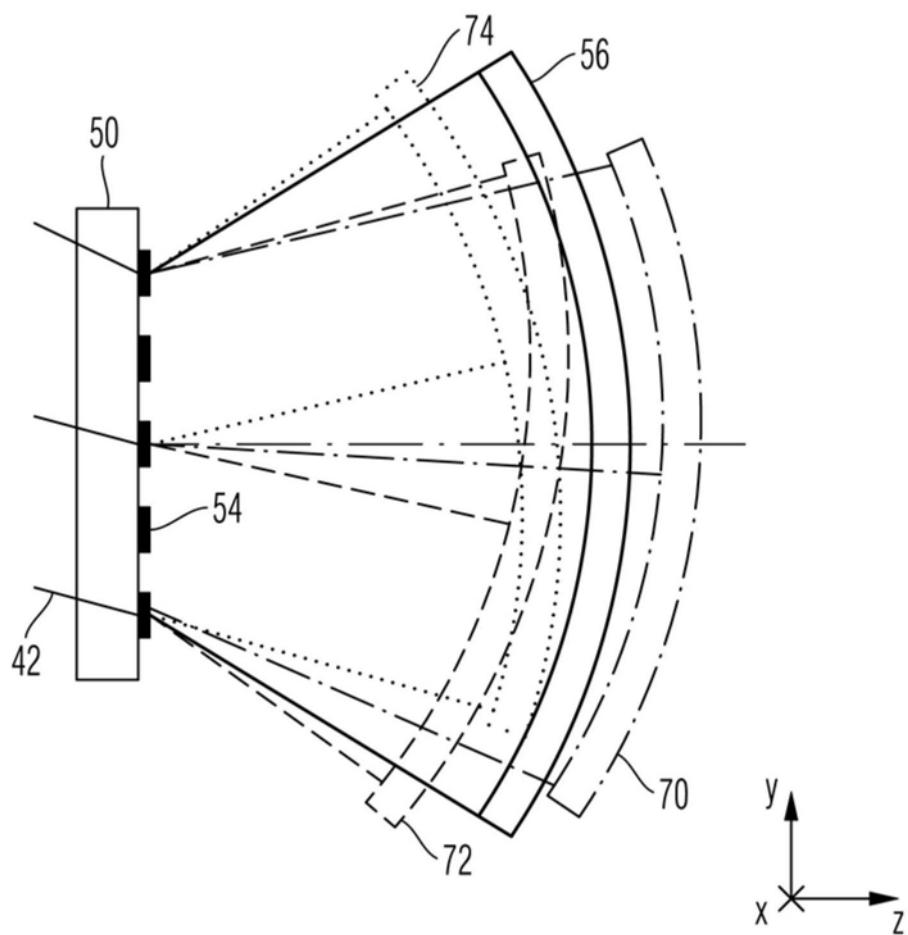


图8

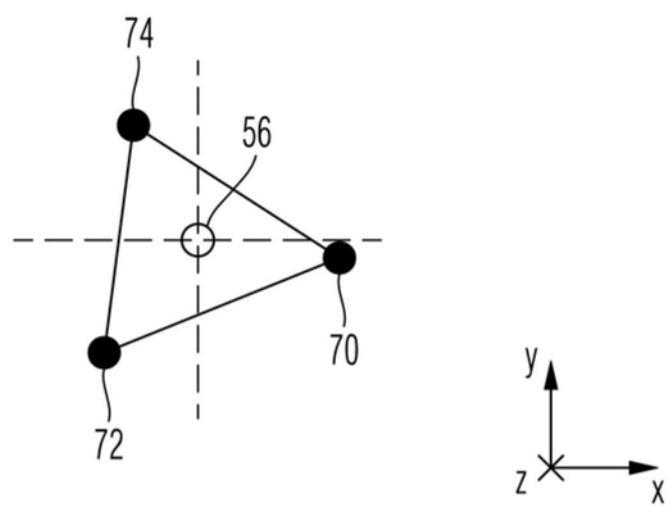


图9

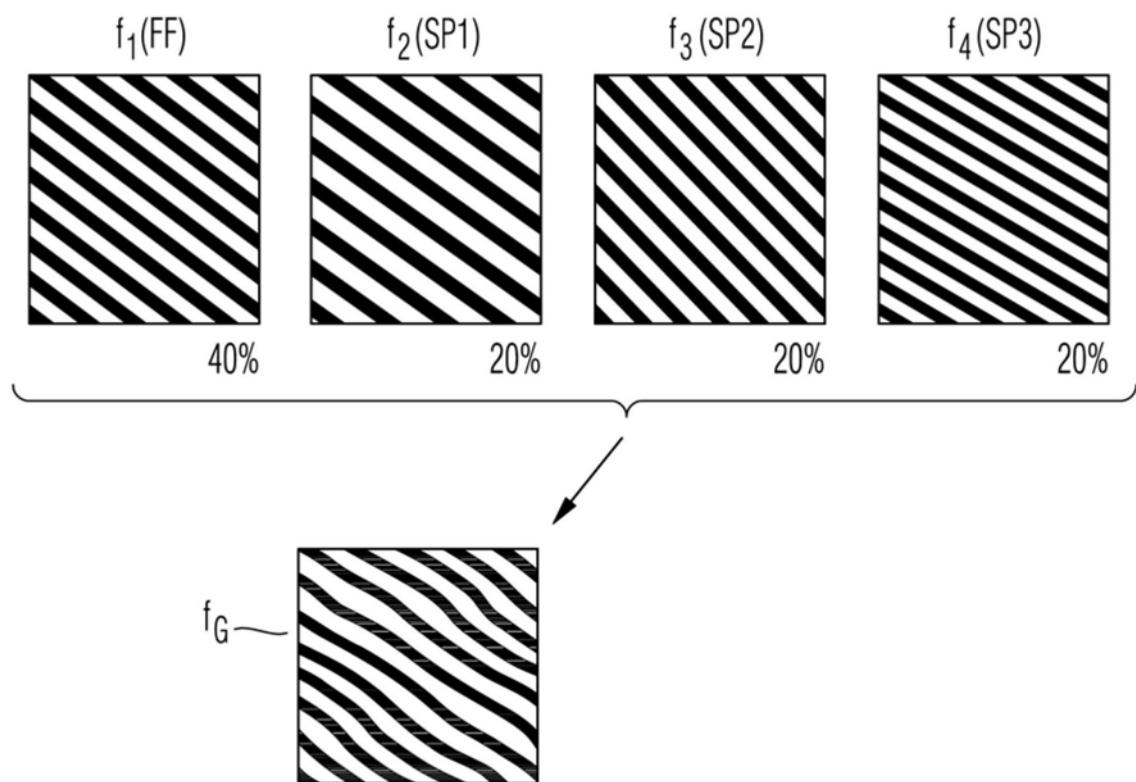


图10

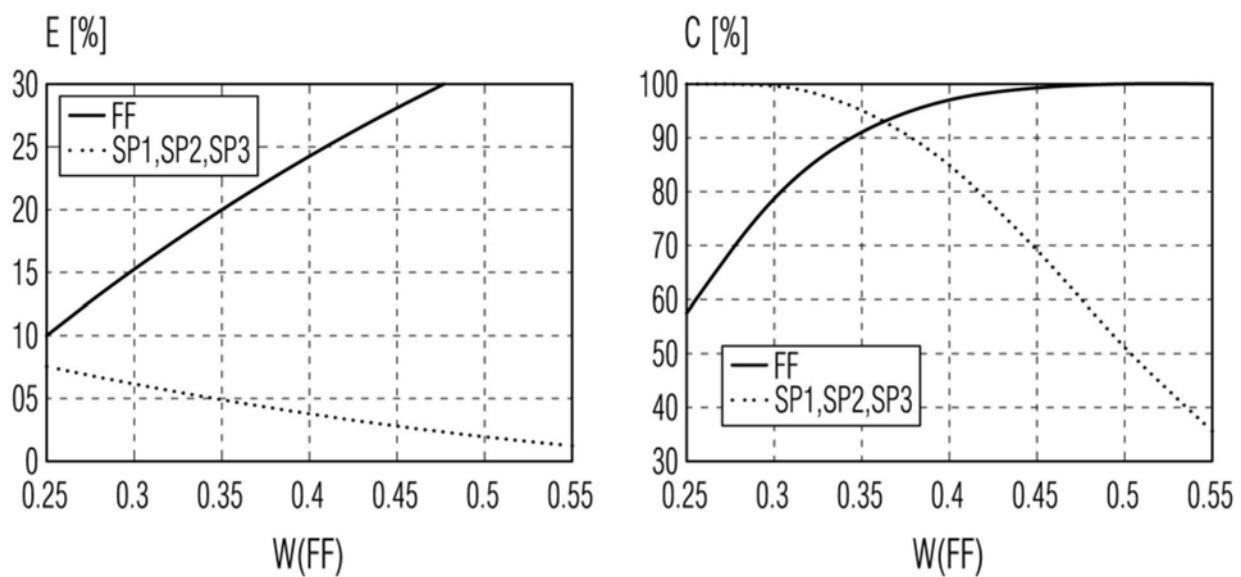


图11

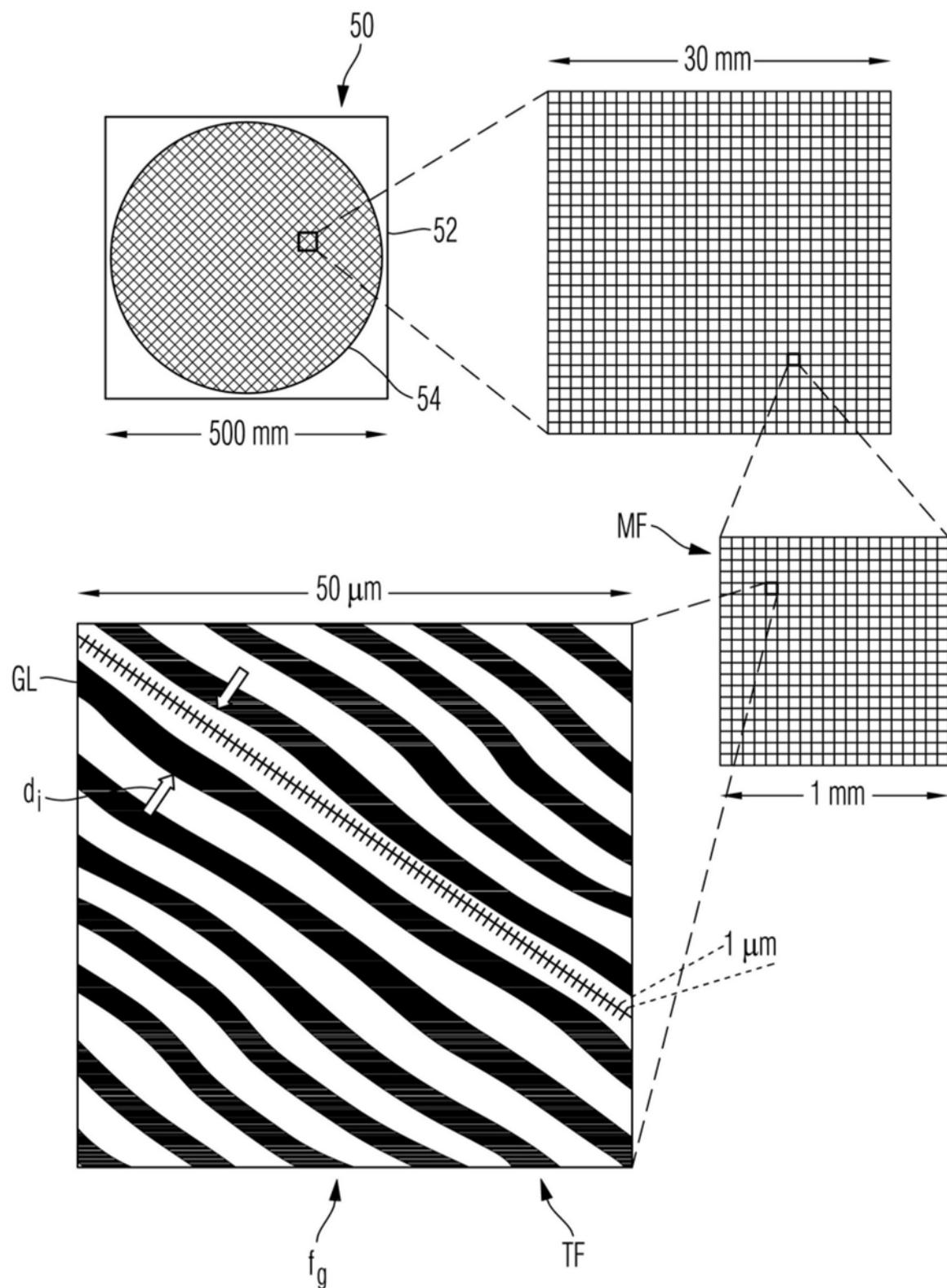


图12

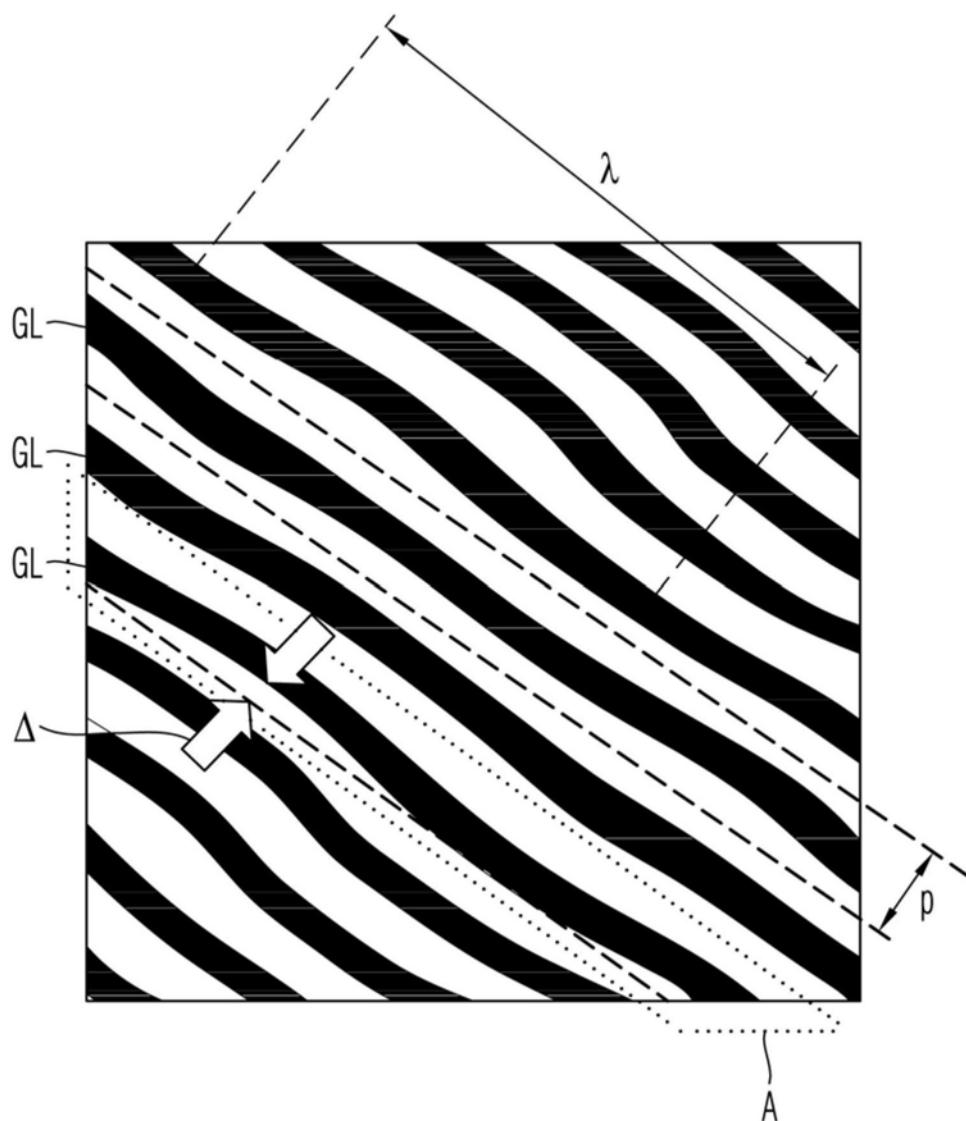


图13

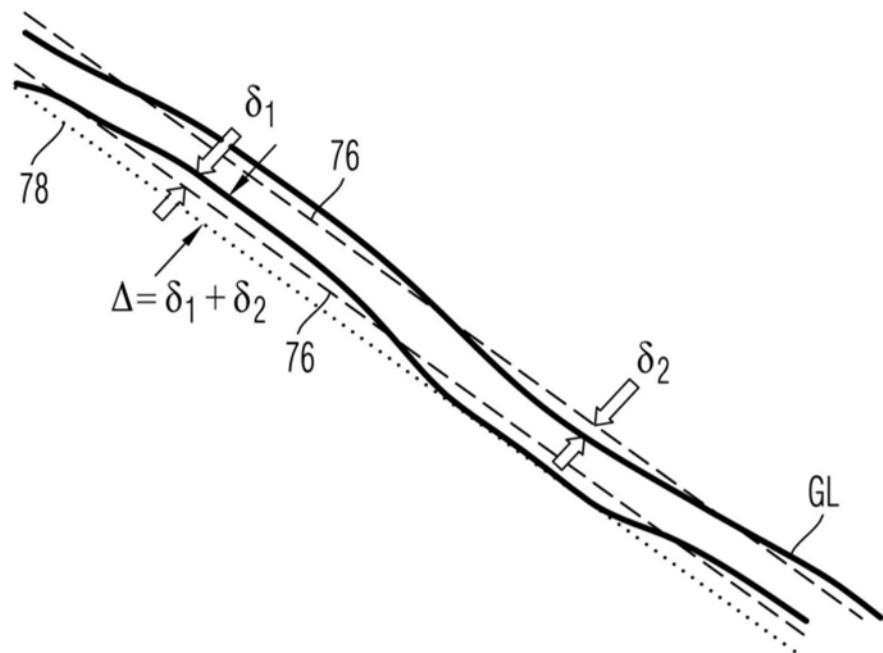


图14

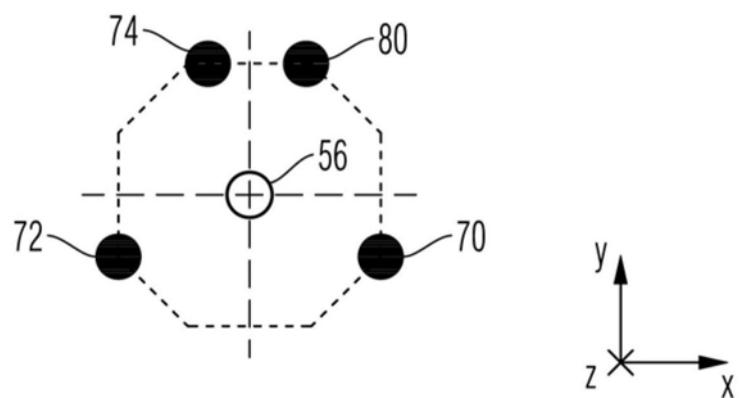


图15

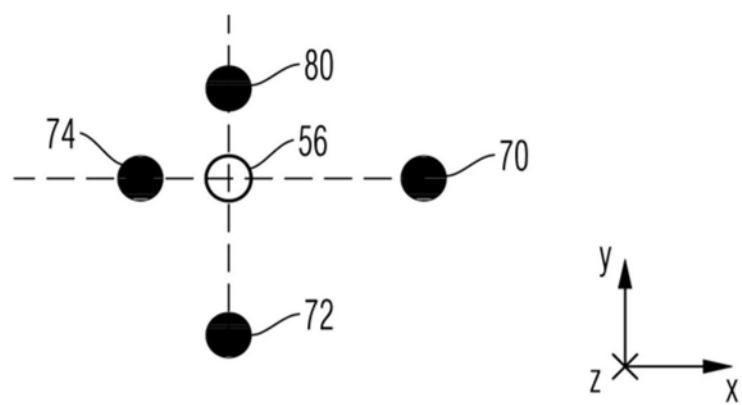


图16

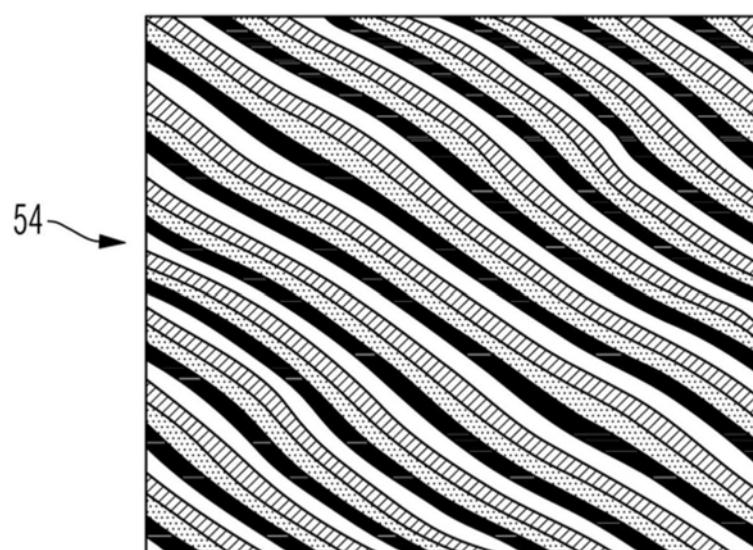


图17

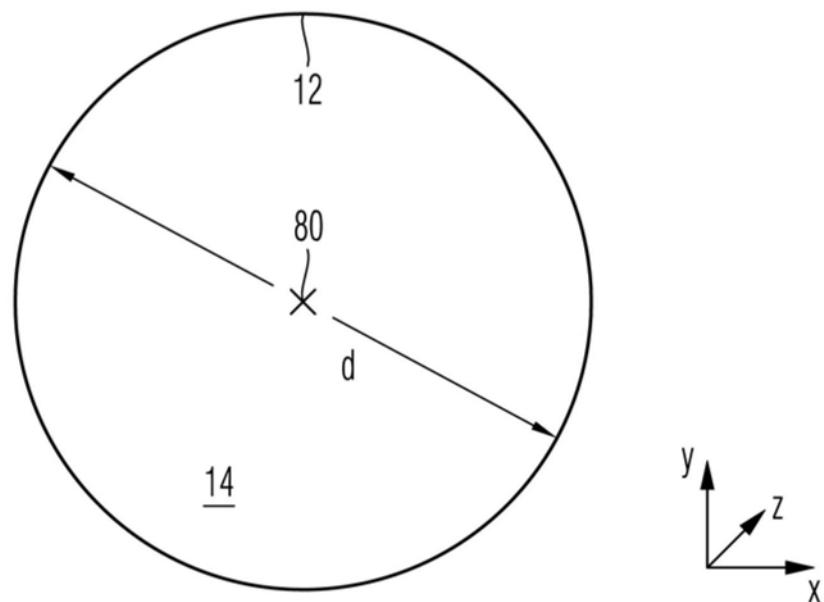


图18

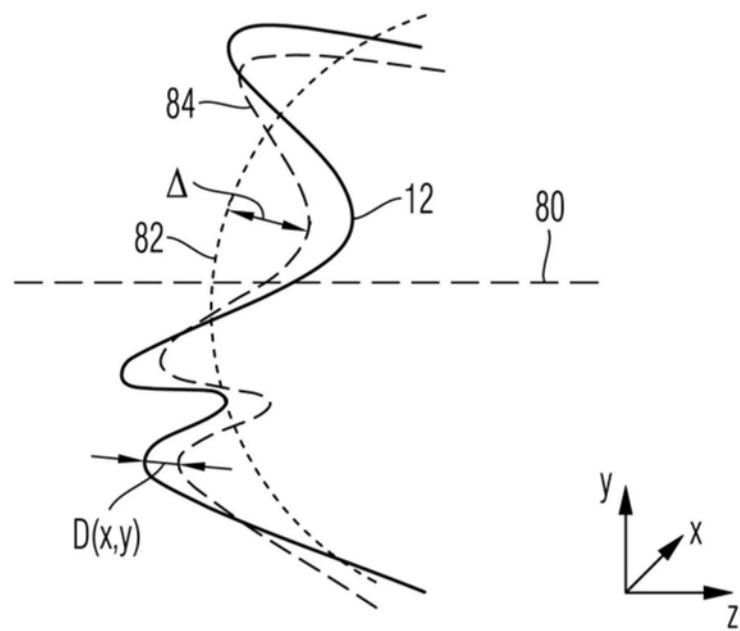


图19