



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115930820 A

(43) 申请公布日 2023.04.07

(21) 申请号 202211222503.4

(22) 申请日 2022.10.08

(30) 优先权数据

102021211172.6 2021.10.04 DE

(71) 申请人 卡尔蔡司SMT有限责任公司

地址 德国上科亨

(72) 发明人 R.库尔斯

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

专利代理人 王蕊瑞

(51) Int.CI.

G01B 11/24 (2006.01)

G01B 11/25 (2006.01)

G01C 25/00 (2006.01)

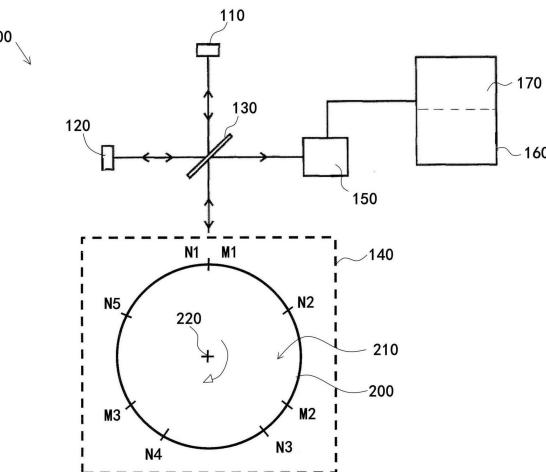
权利要求书1页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

用于表征光学元件的表面形状的方法和装置

(57) 摘要

在用于表征光学元件的光学表面的表面形状的方法中，联合评估不同测量系列的第一测量值和第二测量值，其中迭代实行以下步骤：(A) 计算第一图形；(B) 从第一测量值中减去第一图形，以便确定第一测试设置误差；(C) 使用第一测试设置误差来计算经校正的第一图形；(D) 从第二测量值中减去经校正的第一图形，以便确定第二测试设置误差；(E) 使用第二测试设置误差来计算经校正的第二图形；(F) 使用经校正的第二图形来校正第一测试设置误差，以便确定经校正的第一测试设置误差；(G) 使用经校正的第一测试设置误差来计算再次校正的第一图形；(H) 将结果与收敛准则进行比较，可选地重复步骤(A)至(H)。



1. 用于表征光学元件的光学表面的表面形状的方法, 其中所述光学元件作为测试物体被并入干涉测试装置中, 使得所述光学表面完全布置在所述干涉测试装置的测量区域内,
对所述测试物体实行多次干涉测量, 以及
在测量之间, 所述测试物体相对于所述测试装置的旋转位置通过所述测试物体围绕测试物体旋转轴线的有限旋转来改变,
其中, 为了凭借第一测量形成第一测量系列, 针对旋转角度差为 $360^\circ/M$ 的M个旋转位置捕获M个第一测量值, 并且为了形成第二测量系列, 针对旋转角度差为 $360^\circ/N$ 的N个旋转位置捕获N个第二测量值, 其中M和N是互质自然数, 并且
在评估操作中, 共同评估测量值, 以便确定用于表征所述光学表面的表面形状的形状信息, 其中在所述评估操作中迭代地实行以下步骤:
 - (A) 基于所述第一测量计算第一图形, 其中所述第一图形是所述第一测量系列的常见伴随旋转图形;
 - (B) 从所述第一测量值中减去所述第一图形, 以便确定含有所述第一测量系列的常见非伴随旋转误差的第一测试设置误差;
 - (C) 使用所述第一测试设置误差来计算经校正的第一图形, 该经校正的第一图形由所述第一图形减去所述第一测试设置误差得到;
 - (D) 从所述第二测量值中减去经校正的第一图形, 以便确定所述第二测试设置误差;
 - (E) 使用所述第二测试设置误差来计算经校正的第二图形, 所述经校正的第二图形是通过考虑所述第二测试设置误差从所述第二测量值得出的;
 - (F) 使用所述经校正的第二图形以通过从所述第一测量值中减去所述经校正的第二图形来校正所述第一测试设置误差, 以便确定含有所述第一测量系列的常见非伴随旋转误差和所述第二测量系列的常见非伴随旋转误差的经校正的第一测试设置误差;
 - (G) 使用所述经校正的第一测试设置误差来计算再次校正的第一图形;
 - (H) 将结果与收敛准则进行比较, 并且取决于所述比较可选地重复步骤(A)至(H)。
2. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 对呈反射镜(200)形式的测试物体进行测试, 所述反射镜具有反射表面(210), 其表面区域相对于对称轴线不具有旋转对称性。
3. 根据权利要求2所述的方法, 其特征在于, 所述反射镜具有偏心贯穿孔(230)。
4. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法, 其特征在于, 实行三个或更多测量系列并且它们的结果相互计算出。
5. 用于表征光学元件的光学表面的表面形状的装置(100), 其特征在于, 所述装置(100)被配置为实行根据前述权利要求中任一项所述的方法。

用于表征光学元件的表面形状的方法和装置

技术领域

[0001] 本发明涉及用于表征光学元件(特别是微光刻投射曝光设备的反射镜或透镜元件)的表面形状的方法和装置。

背景技术

[0002] 现在主要使用光刻方法和投射曝光系统来制造半导体部件和其他精细结构的部件,诸如用于微光刻的掩模。在这种情况下,要为掩模(也称为掩模母版)制造的结构图案利用由照明系统整形的照明光照明,并借助于投射镜头以缩小的尺度投射到基板的功能层上,所述功能层涂覆有感光层。在感光层已经显影之后,凭借蚀刻方法将对应于结构图案的结构转印到功能层中。

[0003] 为了能够制造更精细的结构,近几十年来,除了折射和反射折射光学系统(这些光学系统利用来自深紫外范围(DUV)的光操作并且在有浸没和没有浸没的情况下具有接近1或更高的高像侧数值孔径NA)以外,,还开发了通过短波长利用更适中的数值孔径来操作并实质获得高分辨率的光学系统,该短波长为所使用的来自极紫外范围(EUV)的电磁辐射,特别是操作波长在5nm和30nm之间,例如操作波长在13.5nm左右。由于来自极紫外范围的辐射(EUV辐射)由在较高波长下透明的光学材料吸收,因此反射镜系统用于EUV光刻。

[0004] 像侧数值孔径的增加趋于伴随着投射曝光设备中使用的反射镜的所需反射镜面积的扩大。这继而导致除了制造以外,对反射镜的表面形状进行测试的技术要求也越来越高。

[0005] 在本申请中考虑的方法的情况下,光学表面的表面形状的测试是借助于干涉测量实行的。在干涉表面测量的情况下,通常由待检查的表面反射的测量波与参考波叠加,并且捕获在该过程中生成的干涉图案。因此,出于测试的目的,将可由测量接近的表面的实际形状与期望的目标形状以干涉方式进行比较。基于干涉图对偏差进行量化,以便确定是否符合或超过制造公差。

[0006] 由于历史原因,测试物体的光学表面与其目标形状的形状偏差也被称为图形误差或“图形”;因此,图形测量或图形测试也经常用作此类方法的术语。图形测量的目的是尽可能准确地表征图形,即测试物体误差。

[0007] 在这种测量方法的情况下出现的一个问题是干涉仪的设置在实践中并不理想,而是与理想设置存在偏差,例如因为位于其中的光学部件与完美表面形状存在偏差和/或未完全对准。这可能例如具有参考波具有误差的效果,因为它的波前没有足够准确地对应于要预定义的目标波前。此类误差会作为测试设置误差影响测量结果,并且可能导致测量的光学表面的表面形状被不正确地表征。

[0008] 因此,当寻求具有足够少误差的测试结果时,中心目标是可靠地将测试物体误差和测试设置误差彼此分开。

[0009] 在一些情况下,为了将测试物体误差和测试设置误差分开,在图形测量期间应用旋转平均化方法。待检查的光学元件(以下也称为“测试物体”)在各测量之间以等距步长围

绕旋转轴线旋转，并且针对多个不同旋转位置捕获并评估干涉图。旋转平均化方法能够将“伴随旋转”特征分配给测试物体，而“非伴随旋转”误差归因于测试设置。这导致对绝对误差的非常好的估计。然而，不能捕捉旋转对称部分和具有旋转位置数量的对称的部分，即所谓的波纹。作为示例，在使用十二个旋转位置进行旋转平均图形测量的测量方法的情况下，无法区分测试物体误差的12倍对称性和测试设置误差的12倍对称性。

[0010] 经验示出了高阶误差趋向于小于低阶误差。因此，它们对最终产品误差的贡献更小。因此，将波纹误差驱动到可能的最高阶数（例如，第100阶波纹）被认为是值得的。然而，这首先需要在第一实例中测量一百个或更多个旋转位置，这需要非常多的测量时间和机器时间，从而导致最终产品的成本更高。

[0011] DE 100 58 650 A1描述了用于干涉测量测试物体上的非旋转对称波前像差的方法，该测试物体可以通过绕测试物体旋转轴线的旋转逐渐到达多个旋转位置。在每个旋转位置中确定至少一个测量结果。在至少两个测量系列(M, N)中实行测量，其中测量系列(M, N)中的每一个的测量结果($M_1 \cdots M_m, N_1 \cdots N_n$)在测试物体的在各个情况下彼此等距的旋转位置中确定。测量系列(M, N)中的每一个都包括特定数量—— n, m 个测量值，其中 m 和 n 是自然的且为互质数。最后，对所有测量结果进行数学评估。这种测量方法可以非常有效地从“ $N+M$ ”个旋转位置产生“ $N*M$ ”对称波纹误差。该方法基于事实的是，通过形成N-图形和M-图形之差，可以区分在第M阶和第N阶波纹的情况下测试物体误差和测试设置误差。为此，N-旋转位置测量或M-旋转位置测量通过形成的NM-图形进行校正。对于相当数量的测量点，该方法提供了比上述旋转位置测试更高的绝对准确度。换句话说，该方法可以提供与旋转位置测试相当的准确度，但测量点的数量显著更少。

[0012] DE 10 2017 217 371 A1描述了另一个用于表征光学元件的表面形状的方法。在该方法中，也在测试物体（即光学元件上）实行大量干涉测量，其中的每个测量涉及对从光学元件的相应部分发出的测试波与参考波之间的干涉图进行记录。在这些测量之间，光学元件相对于测试波的位置通过绕测试物体旋转轴线的旋转逐步改变。基于这些测量计算光学元件的图形。迭代地实行计算，使得在多个迭代步骤中，光学元件的图形在各个情况下通过实行前向计算来确定，这些迭代步骤中的每一个在各个情况下都基于基于先前的迭代步骤调整的参考波。该方法还适用于测试大反射镜或类似物，因为即使在测量中未捕获测试物体的整个表面区域而是只能记录不覆盖测试物体的整个区域的子孔径，该方法也能起作用。

[0013] 随着用于光刻的光学系统的进一步发展，越来越多的光学元件具有复杂的形状，使用常规技术对其进行测试是不可能的或不再可能以经济可行的方式进行。它们包括例如具有切口或贯穿孔的反射镜，该切口或贯穿孔具有非旋转对称的形状和/或相对于光学元件的对称的中心不对称地定位。

发明内容

[0014] 问题和方案

[0015] 本发明解决的问题是提供用于表征光学元件的光学表面的表面形状的通用类型（具有测试物体旋转）的方法，该方法可以在相对较短的总测量时间内实行可靠的测试，即使待测试的表面在测试期间在整个区域上不是相对于用作测试物体旋转轴线的轴线进行

旋转对称的。

[0016] 为了解决该问题,本发明提供了具有权利要求1的特征的方法以及具有权利要求5的特征的装置。在从属权利要求中指定有利的发展例。所有权利要求的措辞通过引文并入说明书的内容中。

[0017] 该方法用于表征光学元件的光学表面的表面形状。因此可以进行图形测试。光学元件可以是例如反射镜或透镜元件,其在安装准备好使用状态下是微光刻投射曝光设备(例如投射镜头)的光学系统的一部分。光学元件作为测试物体并入干涉测试装置中,使得待测试的表面完全地布置在测试装置的测量区域内。术语“测试物体”在此表示旨在对其光学表面的形状或形状偏差进行测试的光学元件,即表示“处于测试的装置”。

[0018] 对测试物体实行多次干涉测量,以便测试表面的形状是否足够准确地对应于规格。在干涉测量中,从表面发出的测试波和参考波叠加或产生干涉,从而产生含有关于表面形状的信息的干涉图。从干涉图的强度分布,可以例如以波前或相位信息的形式确定测量值,然后基于该测量值进一步评估。

[0019] 该方法提供测试物体旋转。也就是说,在各测量之间,测试物体相对于测试装置的旋转位置通过测试物体绕测试物体旋转轴线的有限旋转来改变。因此,在多个不同的旋转位置测量测试物体。在评估操作中,从干涉图导出的测量值被共同评估,以便确定用于表征光学表面的表面形状的形状信息。

[0020] 类似于从DE 100 58 650 A1已知的方法,该方法提供实行具有不同数量的旋转位置的至少两个测量系列。第一测量系列包括通过第一测量确定的多个——M个第一测量值。测量值与M个不同的等距旋转位置相关联,在这些位置之间在各个情况下存在 $360^\circ/M$ 的旋转角度差。以类似方式捕获第二测量值,其形成含有N个旋转位置的测量值的第二测量系列。在获取第二测量值的旋转位置之间,在各个情况下存在 $360^\circ/N$ 的旋转角度差。数M和N是互质自然数。

[0021] 如果表面的目标形状相对于对称轴线旋转对称,则该常规方法会产生良好的结果,该对称轴线用作测试物体的旋转轴线,并且待测试的表面具有相对于测试物体旋转轴线居中的几乎圆形的外轮廓并且被实施在整个区域上,只要它没有相对于测试物体旋转轴线旋转对称的间隙、切口或贯穿孔。这种待测试的表面在此被称为在整个区域上旋转对称。当存在这些条件时,所使用的术语包括“同轴孔径”的测试。

[0022] 此外,本发明还允许对“离轴孔径”进行可靠的测试,也就是说,对其待测试表面在整个区域上不是旋转对称的测试物体进行测试。为此提议的步骤如下所述。

[0023] 根据本发明的方法与上述现有技术之间的本质区别在于对测量结果的评估。评估操作涉及使用迭代评估方法,即多次重复相同或相似的评估步骤以便逐步接近所寻求的最终结果的过程。

[0024] 在第一步骤(A)中,基于第一测量计算第一图形。第一图形是第一测量系列的常见伴随旋转图形。第一图形含有形状信息,该形状信息实质上相同地存在于针对所有M个旋转位置的第一测量值中。这是基于以下的考虑:实际上归因于测试物体的形状偏差的误差在所有旋转位置上以相同的方式体现,但是在各个情况下在相对于测试物体旋转轴线的不同旋转位置处体现。因此,该误差在干涉图中的特征伴随着测试物体旋转。然而,在该方法步骤中,不能捕获旋转对称的误差部分和具有旋转位置数量的对称的误差部分。因此,方法步

骤(A)的结果仍然含有在第M阶波纹的情况下测试物体误差以及归因于测试设置的贡献，即测试设置误差。

[0025] 在随后的步骤(B)中，从第一测量值(即从第一测量的原始数据)中减去上述第一图形以便确定第一测试设置误差。后者含有第一测量系列的常见非伴随旋转误差。这些主要包括归因于测量设置的非理想对准的误差，例如在测试物体旋转期间的摆动误差。此外，它们包括根据实际使用的参考波偏离理想提供的参考波的事实而产生的误差。

[0026] 在随后的方法步骤(C)中，因此确定的第一测试设置误差用于计算经校正的第一图形。后者由第一次测量值(即第一次测量的原始数据)减去第一次测试设置误差得出。

[0027] 在本申请中，上述方法步骤的序列也称为第一周期或M周期。M周期本身不能识别在第M阶波纹的情况下测试物体误差和在第M阶波纹的情况下测试设置误差，因为基础原始数据(第一测量值)存在于M个旋转位置。

[0028] 主张的方法可以将在第M阶波纹的情况下误差与在第N阶波纹的情况下误差分开。为此，然后，在略微简单的表达模式中，在第M阶波纹的情况下经校正的测试物体误差(即重构的第一图形)被馈送到N个旋转位置周期的重构或在那里被处理。在那里，原始数据(第二测量系列的第二测量值)仅携带在第N阶波纹的情况下测试物体误差和在第N阶波纹的情况下测试设置误差。该周期中的第M阶波纹仅通过M个旋转位置周期的校正来登记，并通过N个旋转位置的重构来抑制。换句话说，在第M阶波纹的情况下测试物体误差由此可以与在第M阶波纹的情况下测试设置误差分开。

[0029] 在随后的步骤中，第一测量系列的结果和第二测量系列的结果因此以特定方式“相互结合”。根据本发明的一个公式，这在方法步骤(D)中通过从第二测量值中减去在步骤(C)中确定的经校正的第一图形来完成，以便确定第二测试设置误差。因此，在这个步骤中，将来自M周期的信息引入到N周期中。

[0030] 在步骤(E)中，因此确定的第二测试设置误差然后用来计算经校正的第二图形，其通过考虑第二测试设置误差由第二测量值(即第二测量系列的原始数据)得到。

[0031] 之后，在步骤(F)中，经校正的第二图形用于校正第一测试设置误差。这是通过从第一测量值中减去经校正的第二图形来完成的，以便确定第一测试设置误差，现在含有第一测量系列的常见非伴随旋转误差和第二测量系列的常见非伴随旋转误差。

[0032] 之后，在步骤(G)中，该经校正的第一测试设置误差用于计算再次校正的第一图形。

[0033] 在重构N个旋转位置周期之后，该重构结果然后作为校正再次馈送到M个旋转位置周期的重构中。这导致对在N阶波纹的情况下测试物体误差的校正或增加抑制。

[0034] 可以迭代地运行该方法步骤序列，直到针对测试物体的表面形状出现足够准确的结果，也就是说，例如直到满足特定的收敛准则。因此，步骤(H)包括与收敛准则的比较以及取决于比较的结果重复上述步骤(A)至(H)。

[0035] 凭借多次重复(即迭代)地应用这些方法步骤，在第M阶波纹的情况下测试物体误差、在第N阶波纹的情况下测试物体误差以及在第M阶波纹的情况下测试设置误差与在第N阶波纹的情况下测试设置误差越来越好地彼此分离，使得最终结果中仅保留公倍数，即N*M。这在这方面类似于背景技术中提到的来自DE 100 58 650 A1的方法。

[0036] 然而，与此相反，由于M周期和N周期的结果是以迭代的方式彼此交替计算的，因此

将在测试物体扫过的整个区域上发生第M阶波纹和第N阶波纹的校正。该计算在下文还被称为“拼接”。因此，这意味着可以为了测量的任何阶段是位于测量区域中的表面的每个部分而确定有关测试设置误差的信息。如果在特定测量的情况下（即在特定旋转位置的情况下），不会为测量区域的部分区域捕获信息（这将在该测量中导致“坏像素”），则只要可以在任何旋转位置测量该区域，就可以重构测试设置误差。

[0037] 因此通过“拼接”可以实现的在于不会出现无效图像区域的重复和/或平均边缘。因此，该方法甚至适用于感兴趣区域在整个区域上相对于测试物体旋转轴线不是旋转对称的测试物体。例如，这可以是对于含有离轴切口的反射镜的情况，以便在多次折叠的束路径中为光学系统的其他反射镜之间通行的束提供无光晕的通道。其他示例是其外轮廓不是圆形的且相对于名义上旋转对称的表面形状的对称轴线居中的光学元件的表面，例如椭圆反射镜。

[0038] 仅执行恰好两个测量系列并共同评估它们的结果可能就足够了。一些实施例提供实行三个或更多个测量系列，例如三个、四个或五个测量系列，并计算它们相互的结果。这使得可能以较长的测量时间为代价获得更准确的结果。

附图说明

[0039] 本发明的其他优点和方面从权利要求中且从本发明的示例性实施例的描述中是显而易见，下面参考附图解释本发明的其他优点和方面：

[0040] 图1示意性地示出了用于表征测试物体的光学表面的表面形状的干涉测试装置的设置；

[0041] 图2示出了根据现有技术 (PA) 的方法中的评估算法；

[0042] 图3图示了现有技术方法中第M阶波纹的中介效应和测试离轴孔径时的问题；

[0043] 图4示意性地示出了本发明的一个实施例中的评估操作的一系列方法步骤。

具体实施方式

[0044] 根据本发明的方法和根据本发明的测量装置的一个示例性实施例在下文中基于表征用于微光刻投射曝光设备的投射镜头或照明系统的反射镜的光学表面的表面形状来解释。

[0045] 该方法可以通过各种干涉测试装置来实行。图1以高度示意的基本图示示出了用于表征呈光学元件形式的测试物体200的光学表面210的表面形状的测试装置100的设置。测试装置以迈克尔逊干涉仪形式的光学设置为例进行说明。它还可以根据其他干涉仪原理进行操作；例如，测试装置可以配置为Fizeau干涉仪。测试基于干涉测量的测量结果，因此测试装置100也可以被称为测量装置100。

[0046] 干涉测试装置100，尤其是光源110、参考元件120、分束器130和配备有检测器的设备150，用于捕获出现的干涉图案。所述设备可以具有例如相机。设备150耦接到含有评估单元170的控制单元160，该评估单元170尤其包括基于计算机的数据处理单元，其中实行用于评估从干涉图导出的测量值的评估操作。控制单元160用于协调和控制自动测试装置的操作。

[0047] 测试物体被并入在可旋转安装的测试物体保持件中，使得待测试的表面210完全

地布置在测试装置的测量区域140内。测试物体保持件可通过控制单元旋转,使得测试物体可以绕测试物体旋转轴线220旋转可预定义的角度增量并且可以停止在特定的旋转位置中。

[0048] 测试物体200的待测试表面210的目标形状相对于表面的对称轴线旋转对称(球面或非球面)。接收测试物体,使得所述对称轴线尽可能准确地对应于测试物体旋转轴线。

[0049] 在测试物体上实行干涉测量,其中在每个干涉测量中确定从表面210发出的测试波与从参考元件发出的参考波之间的干涉图。在测量之间,测试物体相对于测试装置的旋转位置通过测试物体绕测试物体旋转轴线220的有限旋转来改变。在评估操作中,干涉图或由此导出的测量值被共同评估,以便确定用于表征光学表面的表面形状的形状信息。

[0050] 为了形成第一测量系列,实行多次——M次测量。在这种情况下,针对旋转角度差为 $360^\circ/M$ 的M个旋转位置(M1,M2等)捕获M个测量值。为了形成第二测量系列,针对旋转角度差为 $360^\circ/N$ 的N个旋转位置(N1,N2等)捕获N个测量值。在这种情况下,M和N是互质自然数。第一测量系列的M个测量值在此也被称为“第一测量值”,并且第二测量系列的N个测量值也对应地被称为“第二测量值”。图1基于M=3和N=5的示例图示了旋转位置的情况。在每个测量系列中,旋转位置在测试物体200的整个旋转期间以等距距离或角度位置布置。

[0051] 就这些一般方面而言,该过程对应于DE 100 58 650 A1中描述的方法,但是修改了所述方法以便避免某些特定的缺点。

[0052] 为了提供更好的理解,首先将更详细地解释从DE 100 58 650 A1中已知的方法,该方法在下文中也称为“N+M方法”。图2示意性地图示了该常规方法下的算法。该方法涉及首先记录等距 $360^\circ/N$ 旋转位置和 $360^\circ/M$ 旋转位置的测量数据或测量值。在图1中,这些测量值记录的系列或周期分别由N-CYC(针对N周期)和M-CYC(针对M周期)指定。相应的原始数据然后在相应的步骤REC(P_N)和REC(P_M)在各个情况下被重构以形成相应周期的图形。在图2中, P_N 代表从N周期导出的N图形,即来自N个旋转位置的重构。这同样类似地适用于 P_M ,即来自M周期的图形(M-图形)。为了计算图形 P_N 对N个旋转位置的重构REC(P_N)可以表示如下:

[0053] 图形 $_N$ =图形+误差 rot +图形设置 $_N$ 。

[0054] 这同样类似地适用于M周期。在这种情况下,参数“误差 rot ”包括旋转对称的测试物体误差和测试设置误差,即不能通过旋转平均化确定的误差。参数“图形设置 $_N$ ”表示测试设置和测试物体的具有第N阶波纹的不可分的误差。在各个情况下,重构的图形PN和PM都含有具有第M阶波纹的测试物体误差和测试设置误差。

[0055] 由于旋转位置的数量有限,它们无法相互分离。这种“N+M方法”的一个好处在于,凭借在第N阶波纹和在第M阶波纹的情况下经重构的图形PN和PM,将在第N阶波纹和在第M阶波纹的情况下相应的测试物体误差和测试设置误差彼此分开。由此可以实现的是,只有最小公倍数N*M的波纹仍然存在于最终结果中。

[0056] 为了达到这个目的,在随后的方法步骤DIFF中,首先形成两个经重构的图形之差,在图2中用符号“-”表示。然后,该差值则携带测试物体的第N阶波纹和第M阶波纹以及测试设置误差的第N阶波纹和第M阶波纹。参数CorrNM由差值公式计算,对于该参数以下适用:

[0057] Corr_{NM_N}=图形设置_M-图形设置_N

[0058] 在随后的步骤AVE中,形成的这个差值在N个等距 $360^\circ/N$ 的步骤中旋转,并且对相应的旋转差值求平均。这描述为:

[0059] $\text{Corr}_{NM_N} = \text{图形设置}_N + \text{图形设置}_{N*M}$

[0060] 因此,第M阶波纹通过以因子N求平均来抑制。这产生了针对带有第N*M阶波纹的残余误差的测试设置误差的良好近似。

[0061] 在步骤CORR中,然后可以通过从经重构的N个旋转位置测量中减去来对该第N阶波纹进行校正。经校正的图形_M可以描述如下:

[0062] 图形_{N*M}=图形_M-Corr_{NM_N}=图形+误差^{rot}+图形设置_{N*M}

[0063] 只有在第N*M阶波纹的情况下,测试物体误差和测试设置误差才会保留在最终结果中,这些误差在该方法中无法彼此分开。

[0064] 根据发明人的见解,这种方法的一个实际缺点是,对于某些测试物体,这种N+M旋转平均化方法的应用会导致图形测量结果中出现大的区域,其中存在测量结果中的间隙。因此,这种“传统的”N+M旋转平均化方法仅针对在整个区域内旋转对称的孔径来限定。这些孔径在此也称为“同轴孔径”。如果待测试表面相对于测试物体旋转轴线是旋转对称的并且被实施在整个区域上(即没有离轴间隙或切口),则存在同轴孔径。

[0065] 然而,存在许多测试物体的几何形状,其中待测试的表面在整个区域上相对于测试物体的旋转轴线不是旋转对称的。其一个示例是具有离轴和/或非圆形切口和/或具有非圆形外边界的反射镜表面。这些情况在这里被称为具有“离轴孔径”的情况。

[0066] 发明人已经认识到,N+M旋转位置方法在离轴孔径的情况下有限适用性的主要问题在于,在第N阶波纹情况下的测试物体误差和测试设置误差的所用的中介用于确定术语CORR_{NM_N}。凭借在离轴系统中不测量完整的测试设置孔径的事实,测量图像(取决于测试物体的形状)以不同的比例由无效像素构成,即没有分配测量区域的区域元素的图像元素。

[0067] 将参考图3解释在离轴N+M方法的情况下产生的平均化问题。图3示意性地示出了测试物体200的待测量的表面的平面图,所述表面具有圆形外边界,其中心用作测试物体旋转轴线220。在示例的情况下,相对于中心偏心地在反射镜中提供切口230,该切口230也可以实施为贯穿孔。小方块符号代表来自N周期的示例性第4阶波纹,叉号代表来自M周期的示例性第3阶波纹。

[0068] 图3清楚地示出了第M阶波纹的中介效应(在这种情况下,M=3)。子图形ST1、ST2、ST3和ST4示出了呈具有位于中心(测试物体旋转轴线220)外侧的切口230的反射镜形式的测试物体200的四个旋转位置——在各个情况下方位角偏移90°。此外,子图形Corr_{NM_N}揭示了无效图像区域重复时的问题。在其他平均化方法的情况下(例如,将无效区域中的值人为设置为“0”的方法),边缘仍然出现在区域边界并破坏结果。因此,传统的N+M方法仅同样对全区域同轴孔径起作用。

[0069] 此时,简要参考DE 10 2017 217 371 A1中描述的方法。所述方法适用于对整个区域的测试设置误差进行校正。此处采用的过程在本申请中也称为“迭代拼接”,因为不同的测量结果是在迭代方法中相互计算的。在那里,同样地,该方法从记录必要的测量数据开始。在这种情况下,通常只记录具有对应数量的N个旋转位置的单个测量周期。该周期的单独测量次数通常显著大于刚刚描述的N+M方法。该方法不能使在第N阶波纹的情况下,测试物体误差和在第N阶波纹的情况下,测试设置误差彼此分离。

[0070] 根据主张的本发明的方法在此提供了改进。参考图4中的示意图解释了一个示例性实施例。图4示意性地示出了用于评估在不同旋转位置捕获的测量值的评估操作的方法

步骤序列。由短划线(右侧由M-CYC表示)界定的文本框与M周期相关,即具有M个测量值的测量系列。后者在此也以广义的方式称为具有M个第一测量的第一测量系列。附图标记N-CYC对应地指定了与具有N个测量值(第二测量值)的第二测量系列相关联的N周期。相关的文本框由长划线界定。图中下部横向连接块的弯曲箭头指示评估方法的迭代特征。

[0071] 为了使现有技术中已知的N+M方法可以应用于离轴系统,在评估期间实行特定步骤以便将在第N阶波纹和第M阶波纹的情况下测试物体误差和测试设置误差彼此分开。这意味着,在此,测试设置误差对待测试的表面上所有相关测量点的影响可以通过迭代过程重构。

[0072] 测试方法首先以参照图1的传统N+M方法举例所描述的方式记录测量值。因此,在例如对于M个旋转位置的第一测量系列中,在那里对应地记录的干涉图被捕获并且从其中导出第一测量值。以等距的旋转位置来记录N个旋转位置周期和M个旋转位置周期就足够了。

[0073] 与已知的N+M方法的区别在评估中出现,该区别也可以基于该方法测试离轴系统的表面形状。

[0074] 图4中的示例性方法以迭代开始,在此以M周期为例实行。在这种情况下,首先基于第一测量(针对M个旋转位置)计算第一图形P1。如说明性认为的那样,第一图形是第一测量系列的常见伴随旋转图形。在这种情况下,假设对于每个旋转位置在对应旋转位置的对应位置处出现的那些误差与(旋转的)测试物体相关联,而不是与(静止的)测试设置相关联。该第一图形P1可以说是实际要确定的图形,即测试物体的表面形状的第一近似。

[0075] 下一步骤涉及计算含有第一测量系列的常见非伴随旋转误差的第一测试设置误差PA1。为此,从第一测量值中减去上面确定的第一图形P1。换言之,从不伴随测试物体旋转的误差中减去伴随测试物体旋转的误差,并将这些分别分配给测试物体和测试设置。

[0076] 以这种方式确定的第一测试设置误差PA1然后用于在下一方法步骤中计算经校正的第一图形P1K。所述经校正的第一图形通过减去第一测试设置误差PA1从第一图形P1产生。该结果(即经校正的第一图形P1K)仍然含有第M阶波纹的情况下测试物体误差和第M阶波纹的情况下测试设置误差,因为存在处于M个旋转位置的(即第一测量值的)基础原始数据。

[0077] 然后为了将在第M阶波纹的情况下误差与在第N阶波纹的情况下误差分开,将经重构的测试物体误差(即含有第M阶波纹的经校正的第一图形P1K)引入到对N旋转位置周期N-CYC的对应重构中。向另一个周期的这种变化由斜箭头W1表示。在图4的图像中,从第二测量值(即从N周期的原始数据)中减去经校正的第一图形P1K。因此,基于N周期的测量值确定第二测试设置误差PA2。在随后的方法步骤中,所述第二测试设置误差用于计算经校正的第二图形P2K。后者通过考虑第二次测试设置误差从第二次测量系列的原始数据(第二次测量值)中得出。

[0078] 在N旋转位置周期的重构之后,该重构结果(即经校正的第二图形P2K)再次作为校正被引入到N旋转位置周期的重构中,这由斜箭头W2表示。该方法步骤导致抑制或校正在N阶波纹的情况下测试物体误差。

[0079] 然后,通过从N周期的原始数据(即从第一测量值)中减去经校正的第二图形P2K,经校正的第二图形P2K用于校正第一测试设置误差PA1。由此得到的经校正的第一测试设置

误差PA1K则仍然仅含有第一测量系列和第二测量系列(即M周期和N周期两者)的常见波纹误差。

[0080] 凭借该方法的迭代应用,在第M阶波纹和第N阶波纹的情况下测试物体误差和测试设置误差越来越好地彼此分开,使得理想情况下只有公倍数,即N*M与传统的N+M方法一样,保留在最终结果中。该算法逐渐接近最终结果。如果相应获得的结果与收敛准则的比较示出了满足收敛准则,则可以结束计算。否则,将至少再经过一次迭代循环。

[0081] 只有公倍数,即N*M,仍然保留在最终结果RES中,在这方面对应于传统的N+M方法。然而,由于在本方法的情况下重构现在涉及对在不同波纹情况下的两个周期的结果进行相互迭代计算(迭代拼接)的事实,第N阶和第M阶波纹的校正可以发生在测试物体扫过的整个区域上,因此不会出现无效图像区域的重复或平均边缘(如图3所示)。

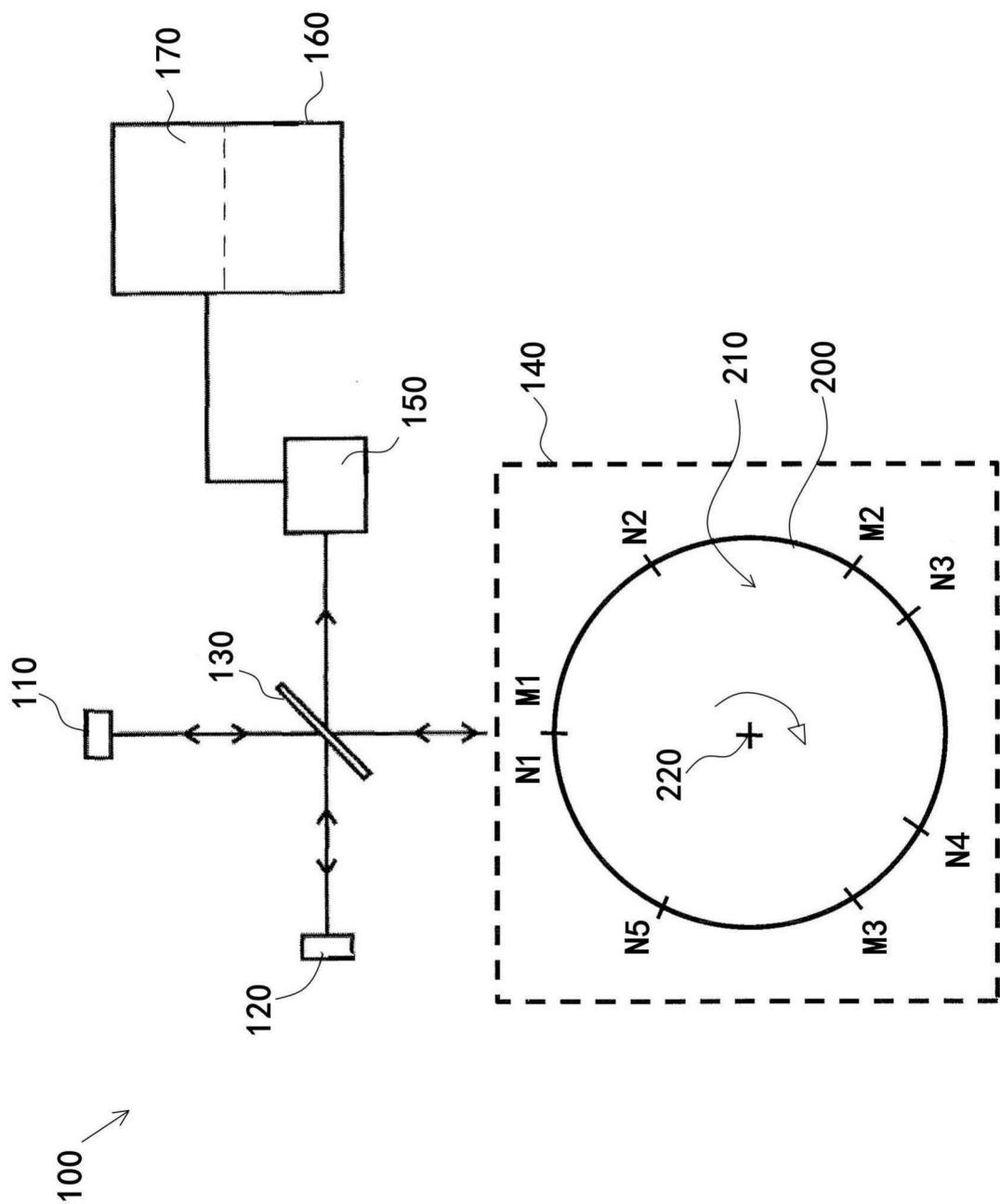


图1

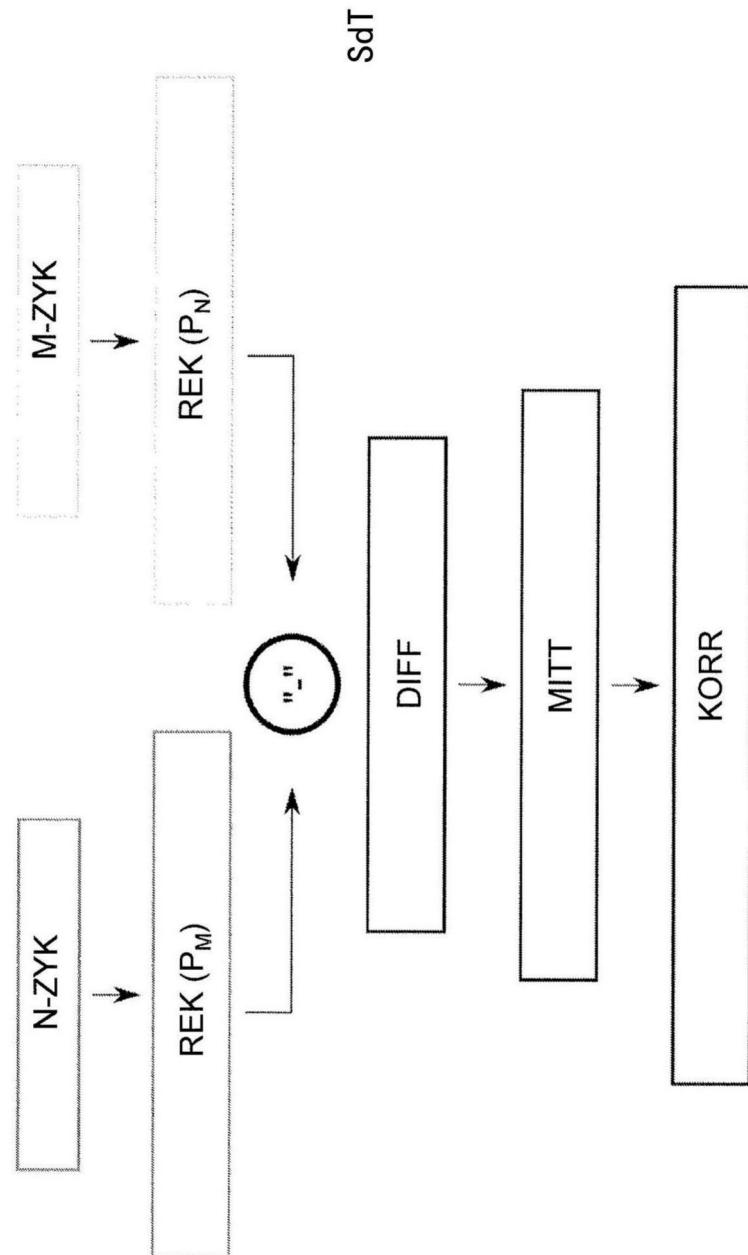


图2

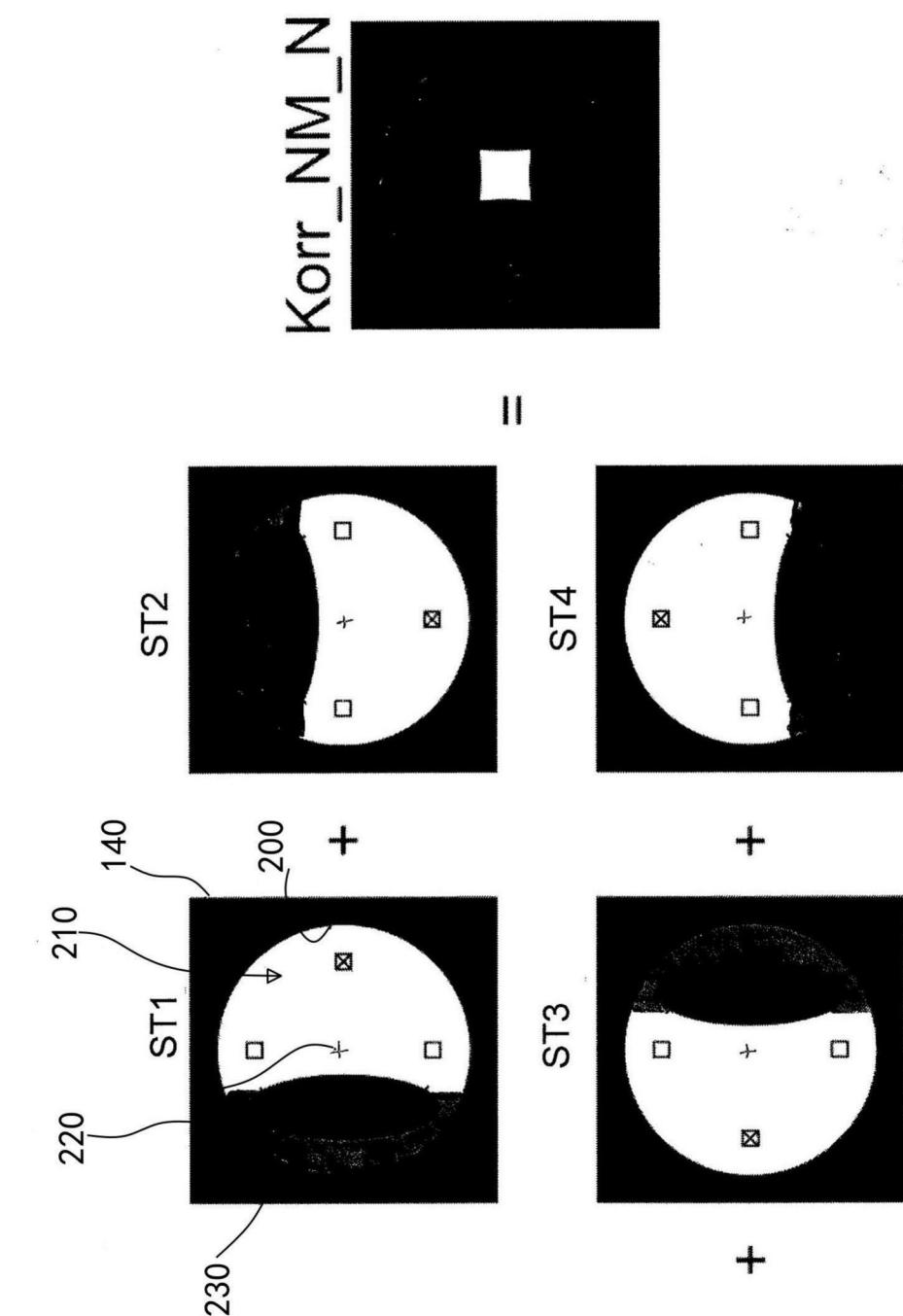


图3

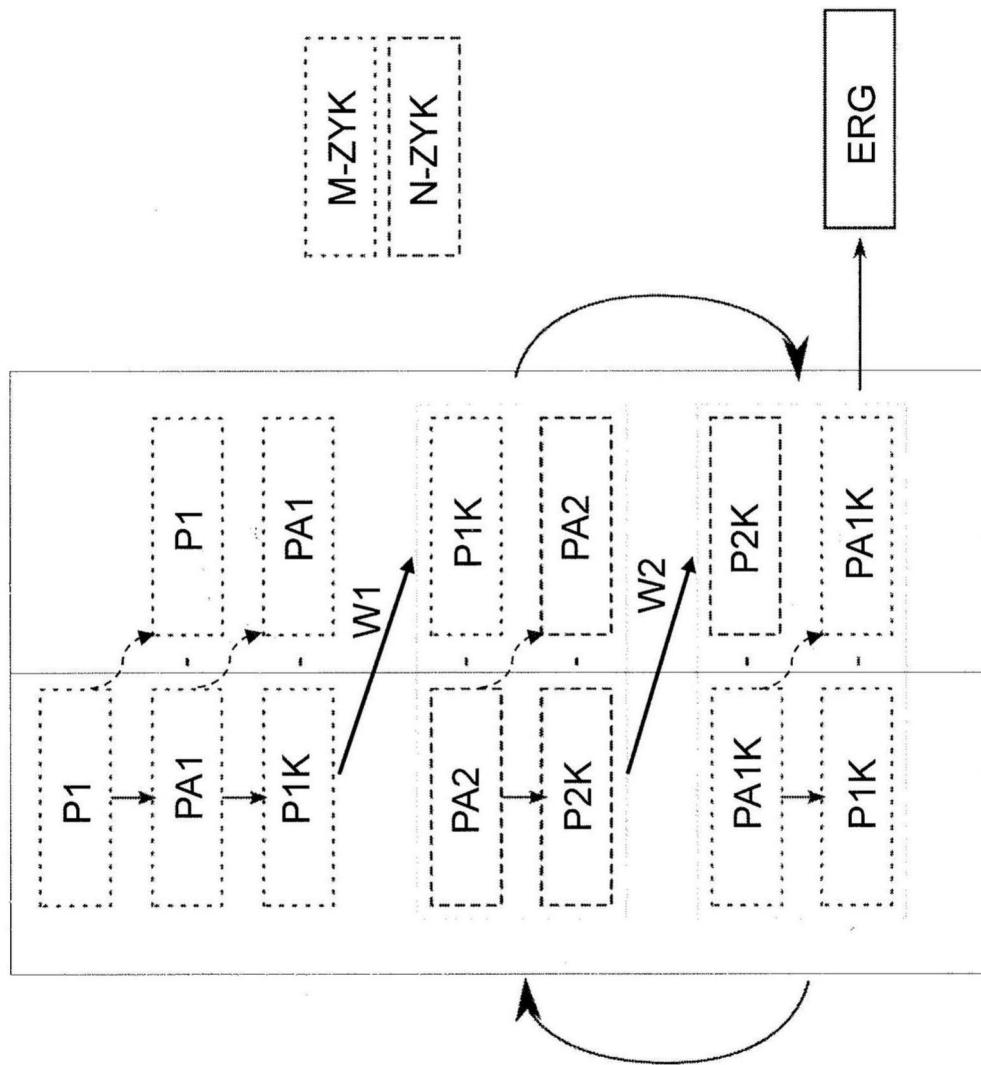


图4