



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公開本

(11)公開編號：TW 202323765 A

(43)公開日：中華民國 112 (2023) 年 06 月 16 日

(21)申請案號：111137542

(22)申請日：中華民國 111 (2022) 年 10 月 03 日

(51)Int. Cl.：

G01B11/24 (2006.01)

G01B9/02 (2022.01)

G01M11/00 (2006.01)

G01M11/02 (2006.01)

G03F7/20 (2006.01)

(30)優先權：2021/10/04

德國

10 2021 211 172.6

(71)申請人：德商卡爾蔡司 S M T 有限公司 (德國) CARL ZEISS SMT GMBH (DE)

德國

(72)發明人：克魯斯 雷吉娜 KRUSE, REGINA (DE)

(74)代理人：李宗德

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：5 項 圖式數：4 共 25 頁

(54)名稱

用於特徵化光學元件之表面形狀的方法與裝置

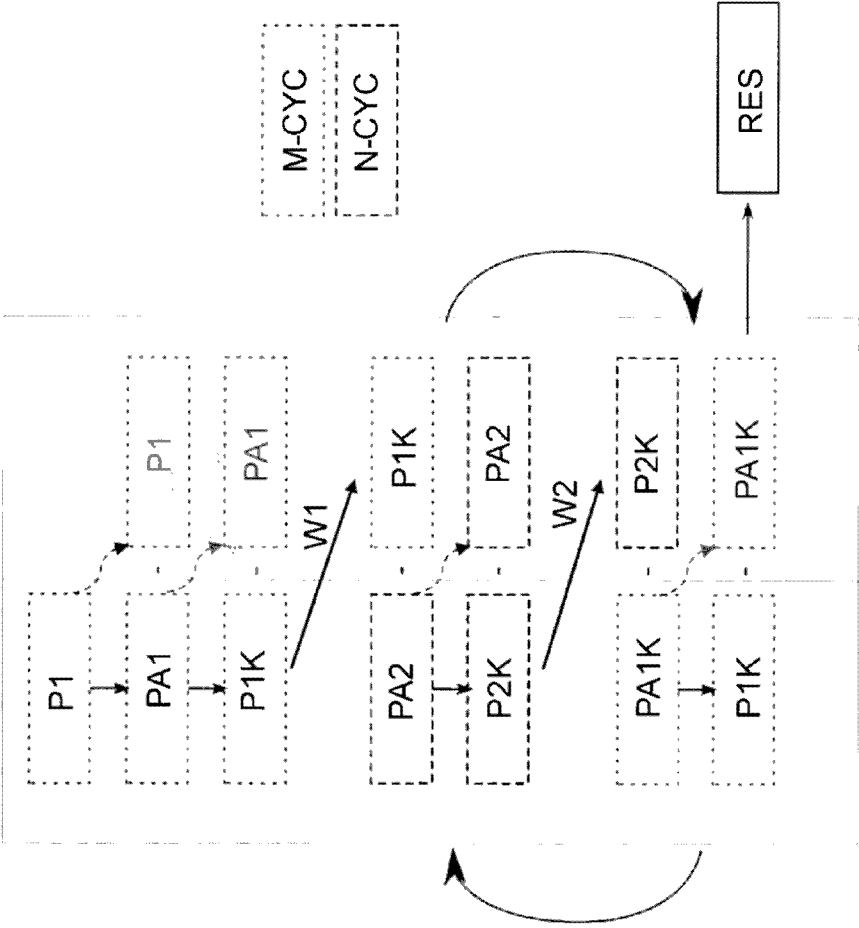
(57)摘要

本發明揭露一種用於特徵化光學元件的光學表面的表面形狀之方法，所述作為測試物件的光學元件係完全配置在一干涉測試裝置的測量區域內。在多個單獨測量之間，該測試物件圍繞一測試物件旋轉軸旋轉。記錄至少兩分別具有 M 個及 N 個等距旋轉位置的測量系列，其中 M 及 N 為互質自然數。聯合評估該等不同測量系列的第一及第二測量值，其中重複執行以下多個步驟：(A) 以該第一測量為基礎計算一第一圖形，其中該第一圖形是該等第一測量系列的一共同伴隨旋轉圖形；(B) 從該等第一測量值中減去該第一圖形，以決定一第一測試設置誤差，其含有該等第一測量系列的共同非伴隨旋轉誤差；(C) 使用該第一測試設置誤差來計算一校正第一圖形，其是來自該第一圖形減去該第一測試設置誤差的結果；(D) 從該等第二測量值中減去該校正第一圖形，以決定一第二測試設置誤差；(E) 使用該第二測試設置誤差來計算一校正第二圖形，其藉由考慮到該第二測試設置誤差從該第二測量值產生；(F) 藉由從該等第一測量值中減去該校正第二圖形，使用該校正第二圖形來校正該第一測試設置誤差，以決定一校正第一測試設置誤差，其含有該等第一測量系列及該等第二測量系列的共同非伴隨旋轉誤差；(G) 使用該校正第一測試設置誤差來計算一第一圖形以再次校正；及 (H) 將該結果與一收斂準則進行比較，並根據該比較的結果選擇性重複步驟 (A) 至 (H)。

In a method for characterizing the surface shape of an optical surface of an optical element, the latter as test object is arranged completely within the measurement region of an interferometric test device. Between individual measurements the test object is rotated about a test object rotation axis. At least two measurement series with M and respectively N equidistant rotational positions are recorded, where M and N are relatively prime natural numbers. First and second measured values of the different measurement series are jointly evaluated, wherein the following steps are carried out iteratively: (A) calculating a first figure on the basis of the first measurements, wherein the first figure is a common concomitantly rotating figure of the first measurement series; (B) subtracting the first figure from the first measured values in order to determine a first test set-up error containing common non-concomitantly rotating errors of the first measurement series; (C) using the first test set-up error for calculating a corrected first figure, which results

from the first figure by subtraction of the first test set-up error; (D) subtracting the corrected first figure from the second measured values in order to determine a second test set-up error; (E) using the second test set-up error for calculating a corrected second figure, which results from the second measured values by taking into account the second test set-up error; (F) using the corrected second figure for correcting the first test set-up error by subtracting the corrected second figure from the first measured values in order to determine a corrected first test set-up error containing common non-concomitantly rotating errors of the first measurement series and of the second measurement series; (G) using the corrected first test set-up error for calculating a first figure corrected once again; and (H) comparing the result with a convergence criterion and optionally repeating steps (A) to (H) depending on a result of the comparison.

指定代表圖：



符號簡單說明：
M-CYC:M 循環
N-CYC:N 循環
P1:第一圖形
P1K、P2K:校正圖形
PA1、PA2:測試設置
誤差
PA1K:校正測試設置
誤差
RES:最終結果
W1、W2:斜箭頭

【圖4】

【發明摘要】

【中文發明名稱】

用於特徵化光學元件之表面形狀的方法與裝置

【英文發明名稱】

METHOD AND DEVICE FOR CHARACTERIZING THE SURFACE SHAPE OF AN OPTICAL ELEMENT

【中文】

本發明揭露一種用於特徵化光學元件的光學表面的表面形狀之方法，所述作為測試物件的光學元件係完全配置在一干涉測試裝置的測量區域內。在多個單獨測量之間，該測試物件圍繞一測試物件旋轉軸旋轉。記錄至少兩分別具有 M 個及 N 個等距旋轉位置的測量系列，其中 M 及 N 為互質自然數。聯合評估該等不同測量系列的第一及第二測量值，其中重複執行以下多個步驟：（A）以該第一測量為基礎計算一第一圖形，其中該第一圖形是該等第一測量系列的一共同伴隨旋轉圖形；（B）從該等第一測量值中減去該第一圖形，以決定一第一測試設置誤差，其含有該等第一測量系列的共同非伴隨旋轉誤差；（C）使用該第一測試設置誤差來計算一校正第一圖形，其是來自該第一圖形減去該第一測試設置誤差的結果；（D）從該等第二測量值中減去該校正第一圖形，以決定一第二測試設置誤差；（E）使用該第二測試設置誤差來計算一校正第二圖形，其藉由考慮到該第二測試設置誤差從該第二測量值產生；（F）藉由從該等第一測量值中減去該校正第二圖形，使用該校正第二圖形來校正該第一測試設置誤差，以決定一校正第一測試設置誤差，其含有該等第一測量系列及該等第二測量系列的共同非伴隨旋轉誤差；（G）使用該校正第一測試設置誤差來計算一第一圖形以再次校正；及（H）將該結果與一收斂準則進行比較，並根據該比較的結果選擇性重複步驟（A）至（H）。

【英文】

In a method for characterizing the surface shape of an optical surface of an optical element, the latter as test object is arranged completely within the measurement region of an interferometric test device. Between individual measurements the test object is rotated about a test object rotation axis. At least two measurement series with M and respectively N equidistant rotational positions are recorded, where M and N are relatively prime natural numbers. First and second measured values of the different measurement series are jointly evaluated, wherein the following steps are carried out iteratively: (A) calculating a first figure on the basis of the first measurements, wherein the first figure is a common concomitantly rotating figure of the first measurement series; (B) subtracting the first figure from the first measured values in order to determine a first test set-up error containing common non-concomitantly rotating errors of the first measurement series; (C) using the first test set-up error for calculating a corrected first figure, which results from the first figure by subtraction of the first test set-up error; (D) subtracting the corrected first figure from the second measured values in order to determine a second test set-up error; (E) using the second test set-up error for calculating a corrected second figure, which results from the second measured values by taking into account the second test set-up error; (F) using the corrected second figure for correcting the first test set-up error by subtracting the corrected second figure from the first measured values in order to determine a corrected first test set-up error containing common non-concomitantly rotating errors of the first measurement series and of the second measurement series; (G) using the corrected first test set-up error for calculating a first figure corrected once again; and (H) comparing the result with a convergence criterion and optionally repeating steps (A) to (H) depending on a result of the comparison.

【指定代表圖】圖4

【代表圖之符號簡單說明】

M-CYC：M循環

N-CYC：N循環

P1：第一圖形

P1K、P2K：校正圖形

PA1、PA2：測試設置誤差

PA1K：校正測試設置誤差

RES：最終結果

W1、W2：斜箭頭

【發明說明書】

【中文發明名稱】

用於特徵化光學元件之表面形狀的方法與裝置

【英文發明名稱】

METHOD AND DEVICE FOR CHARACTERIZING THE SURFACE SHAPE OF AN OPTICAL ELEMENT

【技術領域】

【0001】 本發明有關一種用於特徵化光學元件的表面形狀之方法與裝置，尤其是一微影投射曝光裝置的一反射鏡或一透鏡元件。

【先前技術】

【0002】 微影方法及投射曝光系統，現今主要用於生產半導體組件及其他精細結構組件，諸如，例如用於微影的光罩。在此情況下，針對光罩（亦稱為倍縮光罩）所生產的結構圖案使用一照明系統成形的照明光照射，並藉助於一投射透鏡，以一縮小比例投射到一基材的功能層上，所述功能層塗覆一感光層。感光層顯影後，藉一刻蝕方法將對應結構圖案的結構轉移到功能層中。

【0003】 為了能夠生產更精細的結構，近幾十年來，除了使用折射及折反射光學系統，這些系統使用深紫外範圍（Deep Ultraviolet, DUV）的光進行操作，並且無論浸潤及不浸潤皆具有接近1或更高的成像側數值孔徑NA，還開發了光學系統，以更適中的數值孔徑操作，並藉使用來自極紫外範圍（Extreme Ultraviolet range, EUV）的短波長二次電磁輻射，取得高解析度，尤其操作波長在5 nm至30 nm之間的範圍內，例如工作波長在13.5 nm左右。由於來自極紫外範圍（EUV輻射）的輻射係由在較高波長下呈透明的光學材料所吸收，因此反射鏡系統使用於EUV微影。

【0004】 成像側數值孔徑的增加，往往伴隨著投射曝光裝置中所使用的反射鏡所需的反射鏡面積擴大。除了製造之外，測試反射鏡的表面形狀在技術上也變得越來越嚴格。

【0005】 在本申請案中所考量的方法中，測試光學表面的表面形狀借助干涉測量來執行。在一干涉表面測量的情況下，通常將待檢查表面反射的測量波與一參考波疊加，並在此過程中擷取產生的干涉圖案。因此，為了測試，表面的實際形狀可藉由測量與一所需的目標形狀進行干涉地比較所獲得。基於干涉圖對偏差進行量化，以確定是否符合或超過製造公差。

【0006】 由於歷史原因，一測試物件的一光學表面與其目標形狀的形狀偏差亦稱為圖形誤差(**figure error**)或「圖形」；因此，圖形測量或圖形測試也經常用作此類方法的術語。一圖形測量的目的是盡可能準確特徵化圖形，亦即一測試物件誤差。

【0007】 在此測量方法的情況下出現的一問題是干涉儀的設置在實踐中並不理想，而是與理想設置有偏差，例如因為位於其中的光學組件與完美的表面形狀有偏差及/或未完全對齊。這可能例如具有參考波具有誤差的效果，因為其波前並未足以準確地對應於要預定義的目標波前。這種誤差會影響測量結果，如測試設置誤差，並可能導致被測光學表面的表面形狀錯誤特徵化。

【0008】 當努力獲得具有足夠少誤差的測試結果時，一中心目標會因此可靠地將測試物件誤差與測試設置誤差相對彼此區分開。

【0009】 在一些情況下，在一圖形測量期間應用一旋轉平均法，以分開測試物件與測試設置誤差。待檢查的光學元件（以下亦稱為「測試物件」）在各個測量之間以等距步長圍繞一旋轉軸旋轉，並且針對複數個不同的旋轉位置擷取干涉圖並進行評估。旋轉平均法能夠將「伴隨旋轉」標誌分配給測試物件，而「非伴隨旋轉」誤差則歸因於測試設置。結果是對絕對誤差的評估非常好。然而，不能擷取到旋轉對稱部分及旋轉位置數對稱的部分，亦即所謂的波紋(**waviness**)。例如，在使用十二個旋轉位置進行一旋轉平均圖形測量的測量方法

的情況下，無法區分一12摺(12-fold)對稱性的測試物件誤差與一12摺對稱性的測試設置誤差。

【0010】經驗表明，高階誤差往往小於低階誤差。因此，其對最終產品的誤差效益較小。因此，將波紋誤差驅動到可能的最高階數（例如第100階波紋）被認為是值得的。然而，這需要首先測量一百或多個的旋轉位置，這需要非常多的測量時間及機器時間，因此導致最終產品的成本更高。

【0011】專利案DE 100 58 650 A1描述一種用於干涉測量測試物件上的非旋轉對稱波前像差的方法，該測試物件可藉由圍繞一測試物件旋轉軸的旋轉逐漸被帶到複數個旋轉位置。在多個旋轉位置中的每一者確定至少一測量結果。在至少兩測量系列（M、N）中進行測量，其中該等測量系列（M、N）之每一者的測量結果（M1...Mm、N1... Nn），在測試物件於任何情況下相對另一者等距的旋轉位置上所確定。該等測量系列（M、N）之每一者包含一特定數量n、m個測量，其中m及n是自然且互質的數值。最後，對所有測量結果進行數學評估。此測量方法可以從「N+M」個旋轉位置非常有效產生一「N*M」對稱波紋誤差(symmetrical waviness error)。該方法基於該事實，亦即可藉由形成一N圖形與一M圖形之間的差異，來區分具有第M階及第N階波紋的測試物件誤差與測試設置誤差。為此目的，N旋轉位置測量或M旋轉位置測量，以所形成的NM圖形來校正。針對一相當數量的測量點，該方法提供比上述旋轉位置測試更高的絕對精度。換言之，該方法可提供與旋轉位置測試相當的精確度，且測量點的數量明顯較小。

【0012】專利案DE 10 2017 217 371 A1描述另一種用於特徵化光學元件的表面形狀的方法。在該方法中，同樣地，在測試物件（亦即光學元件）上執行大量干涉測量，該等測量之每一者涉及記錄從光學元件的一相應部分發出的測試波與一參考波之間的干涉圖。在這些測量之間，藉由圍繞一測試物件旋轉軸的旋轉，逐步改變光學元件相對於測試波的位置。光學元件的圖形是基於這些測量計算出來的。所述計算係使用複數個重複步驟的方式重複執行，使得在複

數個重複步驟中，光學元件的圖形在每一情況下皆藉由執行一前向計算來確定，這些重複步驟中的每一者在每一情況下皆基於一參考波，該參考波是基於先前的重複步驟進行調適。該方法亦適用於測試大反射鏡或類似物，因為即使在一測量中沒有擷取到測試物件的整個表面區域，該方法也能起作用，而非只能記錄未覆蓋測試物件整個區域的子孔徑。

【0013】 隨著用於微影的光學系統的發展，越來越多的光學元件具有一複雜的圖形，使用傳統技術不可能或不再可能以合乎成本的方式對其進行測試。其包括例如具有切口或穿孔的反射鏡，其具有一非旋轉對稱形狀及/或相對於光學元件的對稱中心不對稱定位。

【發明內容】

【0014】 本發明要解決的問題在於提供一種用於特徵化光學元件的光學表面的該表面形狀之通用類型方法（具有測試物件旋轉），該方法可在相對短的總測量時間內，亦即使待測表面在整個區域上相對於測試期間作為測試物件旋轉軸的一軸並非旋轉對稱，也能進行可靠的測試。

【0015】 為了解決這個問題，本發明提供一種具有如請求項1所述之特徵件的方法、及一種具有如請求項5所述之特徵件的裝置。在獨立項中具體指出較佳的發展。所有請求項的措辭透過引用併入說明書的內容供參考。

【0016】 該方法用於特徵化光學元件的光學表面的該表面形狀。如此可進行圖形測試。該光學元件可為例如是一反射鏡或一透鏡元件，其在安裝好準備使用的狀態下是一微影投射曝光裝置的光學系統的一部分，例如一投射透鏡。該光學元件作為一測試物件結合在一干涉測試裝置中，使得待測的表面完全配置在測試裝置的一測量區域內。術語「測試物件」在此表示光學元件，旨在測試其光學表面的形狀或形狀偏差，亦即表示「被測裝置」。

【0017】 在測試物件上執行複數個干涉測量，以測試表面形狀是否足以準確地對應到一規格。在一干涉測量中，從表面發出一測試波與一參考波疊加

或干涉，從而產生含有表面形狀資訊的一干涉圖(interferogram)。從一干涉圖的強度分布可以確定測量值，例如以波前或相位資訊的形式，然後基於此進行進一步的評估。

【0018】該方法提供測試物件旋轉。也就是說，在多個單獨測量之間，藉由測試物件圍繞一測試物件旋轉軸的有限旋轉，測試物件相對於測試裝置的旋轉位置改變。因此，測試物件在複數個不同的旋轉位置被測量。在一評估操作中，聯合評估從干涉圖導出的測量值，以確定用於特徵化該光學表面的該表面形狀的形狀資訊。

【0019】類似於從專利案DE 100 58 650 A1中已知的方法，該方法執行至少兩具有不同數量旋轉位置的測量系列。第一測量系列包含藉由第一測量確定、數量為M個的第一測量值。測量值與M個不同的等距旋轉位置相關聯，在這些旋轉位置之間分別存在 $360^\circ/M$ 的一旋轉角差。以一類似方式擷取第二測量值，其形成含有N個旋轉位置的測量值的一第二測量系列。在擷取到第二測量值的旋轉位置之間，在每個情況下存在 $360^\circ/N$ 的一旋轉角差。數值M及N為互質自然數(relatively prime natural numbers)。

【0020】若表面的目標形狀相對於一對稱軸旋轉對稱，則傳統方法產生良好的結果，對稱軸被用作一測試物件旋轉軸，並且待測表面具有以相對於測試物件旋轉軸為中心、實質上為圓形的外輪廓，並且在整個區域上，體現為沒有間隙、切口或穿孔，這些相對於測試物件旋轉軸不是旋轉對稱的。此待測表面，在此處稱為在整個區域上旋轉對稱。當存在這些條件時，使用的術語包括「軸上孔徑(on-axis apertures)」測試。

【0021】此外，本發明亦允許對「離軸孔徑」進行可靠的測試，也就是說，其待測試表面在整個區域不是旋轉對稱的。為此目的，建議的步驟解釋如下。

【0022】本發明的方法與前述先前技術之間的本質差異存在於測量結果的評估。評估操作涉及使用重複性評估方法，亦即多重性重複相同或相似的評估步驟，以逐步處理所尋求的最終結果的一程序。

【0023】 在第一步驟（A）中，以第一測量為基礎計算一第一圖形 (figure)。第一圖形是第一測量系列的一共同伴隨旋轉圖形 (common concomitantly rotating figure)。第一圖形含有形狀資訊，該資訊實質上相同地存在於所有M個旋轉位置的第一測量值中。因為考量到，實際上歸因於測試物件上的形狀偏差的誤差，在所有旋轉位置中會以相同的方式表現出來，但是是在相對於測試物件旋轉軸的不同旋轉位置處。因此，在干涉圖中，此誤差的標誌伴隨測試物件一起旋轉。然而，在此方法步驟中，無法擷取到旋轉對稱誤差部分及以旋轉位置數對稱的誤差部分。因此，方法步驟（A）的結果仍然包含具有第M階波紋的測試物件誤差以及歸因於測試設置的效益，亦即測試設置誤差。

【0024】 在接續的步驟（B）中，從第一測量值（亦即來自第一測量的原始數據）中減去上述第一圖形，以決定一第一測試設置誤差。後者含有第一測量系列的共同非伴隨旋轉誤差 (common non-concomitantly rotating error)。這些主要包含歸因於測量設置的一不理想對準的誤差，例如測試物件旋轉期間的擺動誤差。此外，其包括源自實際使用的參考波偏離理想提供的參考波而產生的誤差。

【0025】 在接續的方法步驟（C）中，因此確定的第一測試設置誤差用於計算一校正第一圖形。後者從第一測量值，亦即第一測量的原始數據，減去第一測試設置誤差而得到。

【0026】 在本申請案中，上述方法步驟的序列亦稱為第一循環或M循環。M循環本身無法識別具有第M階波紋的測試物件誤差及具有第M階波紋的測試設置誤差，因為其根本的原始數據（第一測量值）存在於M個旋轉位置。

【0027】 所請求保護的方法使其可將具有第M階波紋的誤差與具有第N階波紋的誤差分開。為此，然後，簡言之，將具有第M階波紋的校正測試物件誤差（亦即重建的第一圖形），饋送到N旋轉位置循環的重建中或在其進行處理。原始數據（第二測量系列的第二測量值）僅帶有具有第N階波紋的測試物件誤差及具有第N階波紋的測試設置誤差。此循環中的一第M階波紋僅藉由校正M個旋轉

位置循環來表達，並藉由N個旋轉位置的重建來抑制。換言之，具有第M階波紋的測試物件誤差因此可與具有第M階波紋的測試設置誤差分開。

【0028】 在一接續的步驟中，第一測量系列的結果及第二測量系列的結果因此使用一特定方式「彼此結合(married to one another)」。根據本發明的一構想，在一方法步驟(D)中，藉由第二測量值中減去在步驟(C)中所確定的校正第一圖形來完成，以決定一第二測試設置誤差。因此，在此步驟中，來自M循環的資訊被引入到N循環中。

【0029】 在步驟(E)中，使用因此所確定的第二測試設置誤差來計算一校正第二圖形，其藉由考慮到該第二測試設置誤差而從第二測量值(亦即第二測量系列的原始數據)產生。

【0030】 其後，在步驟(F)中，校正第二圖形用於校正第一測試設置誤差。此係藉由從第一測量值中減去校正第二圖形來完成，以決定第一測試設置誤差，現在含有第一測量系列和第二測量系列的共同非伴隨旋轉誤差。

【0031】 其後，在步驟(G)中，使用校正第一測試設置誤差來計算第一圖形以再次校正。

【0032】 在重建N個旋轉位置循環之後，然後該重建結果作為校正再次饋送到M個旋轉位置循環的重建中。此對具有第N階波紋的測試物件誤差進行校正或增加抑制。

【0033】 可重複執行該等方法步驟的順序，直到對於測試物件的表面形狀存在足夠準確的結果，也就是說，例如直到滿足特定的收斂準則(convergence criterion)。因此，一步驟(H)包含與一收斂準則進行比較，並根據該比較的結果重複上述步驟(A)至(H)。

【0034】 藉多重的重複(亦即反覆(iterative))，應用這些方法步驟，具有第M階波紋的測試物件誤差、具有第N階波紋的測試物件誤差，以及具有第M階波紋的測試設置誤差、具有第N階波紋的測試設置誤差彼此能更佳分開，使得最

終結果中僅保留公倍數，亦即 $N \times M$ 。此類似於引言中提到的專利案DE 100 58 650 A1中的方法。

【0035】然而，對照下，第 N 階波紋及第 M 階波紋的校正會發生在測試物件掃描的整個區域上，因為 M 循環及 N 循環的結果是在一重複方法中彼此交替計算。此計算在下文中亦稱為「拼接(stitching)」。結果，這意味著可在測量的任何階段，針對位於測量區域中的表面的每一部分確定關於測試設置誤差的資訊。若在一特定測量的情況下，亦即在一特定旋轉位置的情況下，沒有擷取到測量區域的一部分區域的資訊（其將導致此測量中的「不良像素」），則只要可在任何旋轉位置測量該區域，就可重建測試設置誤差。

【0036】因此，藉由「拼接」可讓無效影像區域及/或平均邊緣不會複製。因此，此方法甚至適用於專注區域相對於測試物件旋轉軸在整個區域上不是旋轉對稱的測試物件。例如，這情況可能是包含一離軸切口(off-axis cutout)的反射鏡，以在一多重折疊光束路徑中，為在光學系統的其他反射鏡之間通過的光束提供一無暈影通道(vignetting-free)。另一實例是其外輪廓不是圓形、且相對於標稱旋轉對稱表面形狀的對稱軸居中的光學元件的表面，例如橢圓反射鏡。

【0037】僅確切執行兩測量系列並且聯合評估其結果可能就足夠了。一些具體實施例提供執行三或多個測量系列，例如三、四或五個測量系列，並相互計算其結果。這使得可用更長的測量時間獲得更準確的結果。

【圖式簡單說明】

【0038】從以下參考附圖進行解釋之本發明的請求項及示例性具體實施例的描述，將明白本發明的進一步優點及樣態。

【0039】圖1示意性示出一用於特徵化測試物件的光學表面的表面形狀之干涉測試裝置的設置；

【0040】圖2示出根據先前技術(Prior Art, PA)之一方法中的評估演算法；

【0041】圖3示意性說明一先前技術方法中的第M階波度的中介（Mediation）效應及測試離軸孔徑時的問題；

【0042】圖4示意性示出本發明的一具體實施例中的一評估操作的方法步驟序列。

【實施方式】

【0043】根據本發明之一方法及根據本發明之一測量裝置的一示例性具體實施例在下面基於一反射鏡的光學表面的表面形狀的特徵來解釋，該反射鏡適用於一微影投射曝光裝置中的一投射透鏡或一照明系統。

【0044】該方法可藉由各種干涉測試裝置來執行。圖1以高度示意性的基本繪示示出一測試裝置100的設置，用於特徵化一光學元件形式的測試物件200的光學表面210的表面形狀。使用一邁克生干涉儀（Michelson interferometer）方式的一光學設置作為例子，來說明該測試裝置。其也可根據其他干涉儀原理進行操作；例如，測試裝置可配置成斐索干涉儀（Fizeau interferometer）。該測試係基於干涉測量的測量結果，因此測試裝置100也可稱為測量裝置100。

【0045】干涉測試裝置100，除其他外，其具有一光源110、一參考元件120、一光束分離器130，以及一具有偵測器的裝置150，用於擷取出現的干涉圖案。所述裝置可具有例如一照相機。裝置150耦合到含有一評估單元170的一控制單元160，除其他外，該評估單元包含一基於電腦的數據處理單元，在該數據處理單元中執行評估操作，用於評估從干涉圖導出的測量值。控制單元160用以協調及控制自動測試裝置的操作。

【0046】測試物件結合在一可旋轉安裝的測試物件支架中，使得待測的表面210完全配置在測試裝置的一測量區域140內。測試物件支架可藉控制單元旋轉，使得測試物件可圍繞一測試物件旋轉軸220使用一可預定義的角度增量來旋轉，並也可停止在特定的旋轉位置。

【0047】測試物件200的待測表面210的目標形狀，相對於表面的一對稱軸旋轉對稱（球面或非球面）。測試物件可被接受，使得所述對稱軸盡可能精確切對應於測試物件旋轉軸。

【0048】在測試物件上執行干涉測量，其中在每一干涉測量中確定一干涉圖，該干涉圖在從表面210發出一測試波與從參考元件發出一參考波之間。在這些測量之間，藉由測試物件圍繞測試物件旋轉軸200的有限旋轉，改變測試物件相對於測試裝置的旋轉位置。在一評估操作中，聯合評估干涉圖或從其導出的測量值，以確定用於特徵化光學表面的表面形狀的形狀資訊。

【0049】為了形成一第一測量系列，執行M次測量。在此情況下，針對一旋轉角差為 $360^\circ/M$ 個旋轉位置（M1、M2等），擷取M個測量值。為了形成一第二測量系列，針對具有 $360^\circ/M$ 的一旋轉角差的N個旋轉位置，擷取N個測量值（N1、N2等）。在此情況下，M及N為互質自然數。第一測量系列的M個測量值在此亦稱為「第一測量值」，而第二測量系列的N個測量值相應地亦稱為「第二測量值」。圖1基於M=3及N=5為例，示意說明旋轉位置的情況。在每一測量系列中，旋轉位置在測試物件200的一完整旋轉過程中，以等距或等角位置配置。

【0050】鑑於這些一般樣態，程序對應於專利案DE 100 58 650 A1中描述的方法，但修改所述方法以避免某些特定的缺點。

【0051】為了更容易理解，首先將更詳細解釋從專利案DE 100 58 650 A1中已知的方法，該方法在以下亦稱為「N+M方法」。圖2示意性說明此傳統方法的根本演算法。該方法涉及首先記錄等距 $360^\circ/N$ 旋轉位置及 $360^\circ/M$ 旋轉位置的測量數據或測量值。在圖1中，這些測量值記錄的系列或循環，分別由N-CYC（於N循環）及M-CYC（於M循環）指定。然後相應的原始數據，分別在相應的步驟REC(P_N)及REC(P_M)中被重建，以形成相應循環的一圖形。在圖2中，P_N代表從N循環導出的N圖形，亦即從N個旋轉位置的重建。這同樣適用於P_M，亦即來自M循環的圖形（N圖形）。用來計算圖形P_N的N個旋轉位置的重建REC(P_N)，可表示如下：

$$\text{Figure}_N = \text{Figure} + \text{Errors}^{\text{rot}} + \text{FigureSet-up}_N。$$

【0052】 這同樣適用於M循環。在此情況下，參數「 $\text{Errors}^{\text{rot}}$ 」包括旋轉對稱測試物件及測試設置誤差，亦即無法藉由10次旋轉平均所決定的誤差。參數「 FigureSet-up_N 」表示與測試物件及測試設置的第N階波紋無法分割的誤差。在每一情況下，重建的圖形 P_N 及 P_M 含有具有第M階波紋的測試物件及測試設置誤差。

【0053】 由於旋轉位置的數量有限，無法分離彼此。這種「N+M方法」的一個好處，在於藉具有第N階波紋及第M階波紋的重建圖形 P_N 及 P_M ，將具有第N階波紋及第M階波紋的相應測試物件及測試設置誤差彼此分開。由此可以實現的是，在最終結果中仍然只存在最小公倍數 $N*M$ 的波紋。

【0054】 為了實現此目的，在一接續的方法步驟DIFF中，首先形成兩個重建圖形之間的差異，其在圖2中以符號「-」表示。然後此差異帶有測試物件及測試設置誤差的第N階波紋及第M階波紋。參數 Corr_{NM} 是藉由差值形成（difference formation）計算的，對於該參數，其成立如下式：

$$\text{Corr}_{NM} = \text{FigureSet-up}_M - \text{FigureSet-up}_N$$

【0055】 在隨後的步驟AVE中，將所形成的該差值旋轉N個等距的 $360^\circ/N$ 個步長並且對各個旋轉的差值進行平均。描述如下：

$$\text{Corr}_{NM_N} = \text{FigureSet-up}_N + \text{FigureSet-up}_{N*M}$$

【0056】 結果，第M階波紋被因子N的平均所抑制。這產生測試設置誤差的第N階波紋的一良好近似，殘餘誤差為第 $N*M$ 階波紋。

【0057】 在步驟CORR中，然後可藉由從重建的N個旋轉位置測量中減去來校正此第N階波紋。 Figure_M 的校正可描述如下：

$$\text{Figure}_{N*M} = \text{Figure}_M - \text{Corr}_{NM_N} = \text{Figure} + \text{Errors}^{\text{rot}} + \text{FigureSet-up}_{N*M}$$

【0058】 只有測試物件及具有第 $N*M$ 階波紋的測試設置誤差保留在最終結果中，在此方法中這些誤差不能彼此分開。

【0059】根據發明人的見解，此方法的實際缺點是對於某些測試物件應用這種N+M旋轉平均法會導致圖形測量結果中的大區域，其中在測量結果中存在間隙（Gap）。因此，此「傳統」N+M旋轉平均方法僅適用於在整個區域上旋轉對稱的孔徑。這些孔徑在此也稱為「軸上孔徑（On-axis aperture）」。若相對於測試物件旋轉軸，待測表面是旋轉對稱並具體實施在整個區域上（亦即，例如沒有離軸間隙（off-axis gap）或切口），則存在一軸上孔徑。

【0060】然而，有許多測試物件幾何圖形，其中待測表面在整個區域上相對於測試物件旋轉軸不是旋轉對稱。其的一實例是具有離軸及/或非圓形切口及/或具有一非圓形外邊界的反射鏡表面。這些情況在此稱為具有一「離軸孔徑」的情況。

【0061】發明人已經認識到，在離軸孔徑存在於測試物件及測試設置誤差中所使用的中介的情況下，N+M旋轉位置方法的有限適用性的主要問題，測試設置誤差具有用於確定項 $CORR_{NM,N}$ 的第N階波紋。由於在離軸系統中不測量完整的測試設置孔徑，測量影像（取決於測試物件的形狀）以不同的比例由無效像素組成，亦即沒有分配測量區域的區域元素的影像元素。

【0062】將參考圖3解釋在一離軸N+M方法的情況下產生的平均問題。後者示意性示出一測試物件200的待測表面的一平面圖，所述表面具有一圓形外邊界，其中心使用作為測試物件旋轉軸220。相對於中心偏心地，在示例的情況下在反射鏡中提供一切口230，其也可體現為一穿孔。小方塊符號表示來自一N循環的一示例性第四階波紋，而十字表示來自一M循環的一示例性第三階波紋。

【0063】圖3清楚示出第M階波紋的中介效應（在此情況下， $M=3$ ）。子圖形ST1、ST2、ST3及ST4，示出一測試物件200的四個旋轉位置—在每一情況下方位角偏移 90° —該測試物件200為一反射鏡形式，具有位於中心外的一切口230（測試物件旋轉軸220）。此外，子圖形 $Corr_{NM,N}$ 暴露無效影像區域被複製時的問題。在其他平均方法的情況下（例如，無效區域中的多個值被人為設定為

「0」)，邊緣仍然會出現在區域邊界處並破壞結果。因此，傳統的N+M方法僅適用於全區域軸上孔徑。

【0064】此時，應簡要參考專利案DE 10 2017 217 371 A1中描述的方法。所述方法適用於校正整個區域的測試設置誤差。此處採用的程序在本申請案中亦稱為「反複性拼接」，因為不同的測量結果以一重複方法相互計算。其中，該方法也始於記錄必要的測量數據。在那情況下，通常只記錄具有一對應數量的N個旋轉位置的單一測量循環。此循環的單獨測量次數通常明顯大於剛才描述的N+M方法。該方法不能將具有第N階波紋的測試物件誤差與具有第N階波紋的測試設置誤差彼此分開。

【0065】根據請求保護發明的方法在此提供一改良。參考圖4中的示意圖來解釋一例性具體實施例。圖4示意性示出一評估操作的方法步驟的順序，用於評估以不同旋轉位置擷取的測量值。由短虛線包圍的文字欄（由右側的M-CYC指定）與一M循環相關，亦即具有M個測量值的測量系列。後者在此一般也稱為具有M個第一測量的第一測量系列。附圖標記N-CYC對應地表示一N循環，其與具有N個測量值（第二測量值）的第二測量系列相關聯。關聯的文字欄位以長虛線環繞。圖中下方部分橫向連接方塊的彎曲箭頭表示評估方法的反複特徵。

【0066】為了將先前技術中已知的N+M方法應用於離軸系統，在評估期間執行特定步驟以將測試物件誤差與具有第N階波紋及第M階波紋的測試設置誤差彼此分開。這意味著，有關待測表面上的所有相關測量點的測試設置誤差影響可藉由一反複程序重建。

【0067】測試方法始於記錄測量值，其方法如針對參考圖1中傳統的N+M方法為例的方式所述。因此，在例如M個旋轉位置的一第一測量系列中，擷取在那裡對應記錄下的干涉圖，並從中導出第一測量值。記錄等距旋轉位置的一N個旋轉位置循環及一M個旋轉位置循環就足夠了。

【0068】與已知的N+M方法的不同之處在於，在評估中也可基於此方法相對於其表面形來測試離軸系統。

【0069】圖4中的示例性方法始於一重複，在此作為示例在M循環中執行。在此情況下，首先以第一測量為基礎（對於M個旋轉位置）計算一第一圖形P1。作為說明性考慮，第一圖形是第一測量系列的一共同伴隨旋轉圖形。在此情況下，假設在每一旋轉位置的對應旋轉位置的對應點發生的那些誤差，與（旋轉）測試物件相關聯，而非與（靜止）測試設置相關聯。此第一圖形P1，可說是與實際要確定的圖形的一第一近似，亦即測試物件的表面形狀。

【0070】下一步驟涉及計算第一測試設置誤差PA1，其含有第一測量系列的共同非伴隨旋轉誤差。為此，從第一測量值中減去上面決定的第一圖形P1。換言之，從不伴隨測試物件旋轉的誤差中減去伴隨測試物件旋轉的誤差，並將這些誤差分別分配給測試物件及測試設置。

【0071】以此方式決定的第一測試設置誤差PA1然後用於在下一方法步驟中計算一校正第一圖形P1K。所述校正第一圖形，從第一圖形P1藉由減去第一測試設置誤差PA1產生。此結果，亦即校正第一圖形P1K，仍然含有具有第M階波紋的測試物件誤差及具有第M階波紋的測試設置誤差，因為其根本的原始數據，亦即第一測量值，存在於M個旋轉位置。

【0072】然後，為了將具有第M階波紋的誤差與具有第N階波紋的誤差分開，重建的測試物件誤差（亦即，包含第M階波紋的校正第一圖形P1K）被引入到相應重建N個旋轉位置循環N-CYC。向另一個循環的這種變化由斜箭頭W1表示。在圖4的圖像中，校正第一圖形P1K因此從第二測量值中減去，亦即從N循環的原始數據中減去。結果是，基於N循環的測量值確定一第二測試設置誤差PA2。在隨後的方法步驟中，所述第二測試設置誤差用於計算一校正第二圖形P2K。後者藉由考慮第二測試設置誤差從第二測量系列的原始數據（第二測量值）產生。

【0073】在N個旋轉位置循環的重建之後，該重建結果（亦即校正第二圖形P2K）再次作為校正引入N個旋轉位置循環的重建中，其由斜箭頭W2表示。此方法步驟導致抑制或校正具有第N階波紋的測試物件誤差。

【0074】 然後，藉由從N循環的原始數據（亦即，從第一測量值）中減去校正第二圖形P2K，使用校正第二圖形P2K來校正第一測試設置誤差PA1。然後，由此產生的校正第一測試設置誤差PA1K仍然僅包含第一測量系列和第二測量系列（亦即，M循環和N循環兩者）的共同波紋誤差。

【0075】 藉由這種方法的重複應用，具有第M階波紋和第N階波紋的測試物件和測試設置誤差越來越好彼此分開，使得理想情況下與傳統的N+M方法一樣，只有公倍數（亦即N*M）保留在最終結果中。演算法逐漸接近最終結果。若是將分別得到的結果與一收斂準進行比較而顯示滿足收斂準則的話，可結束計算。否則，至少會再通過一次重複迴圈。

【0076】 只有公倍數（亦即N*M）仍然保留在最終結果RES中，在這方面對應於傳統的N+M方法。然而，由於基於在本方法的情況下的事實，重建現在涉及對具有不同波紋的兩循環（重複拼接）的結果執行重複相互計算，第N和第M階波紋的校正可以發生在測試物件掃描的整個區域上，因此不會導致無效圖像區域或平均邊緣的重複（如圖3所示）。

【符號說明】

- 100：測試裝置
- 110：光源
- 120：參考元件
- 130：光束分離器
- 140：測量區域
- 150：裝置
- 160：控制單元
- 170：評估單元
- 200：測試物件
- 210：光學表面

220：測試物件旋轉軸

M1~M4：旋轉位置

M-CYC：M循環

N1~N5：測量值

N-CYC：N循環

P1：第一圖形

P1K、P2K：校正圖形

PA1、PA2：測試設置誤差

PA1K：校正測試設置誤差

RES：最終結果

W1、W2：斜箭頭

【發明申請專利範圍】

【請求項1】 一種用於特徵化一光學元件的一光學表面的表面形狀的方法，其中該光學元件作為一測試物件在一干涉測試裝置中，使得該表面完全配置在該測試裝置的一測量區域內，

在該測試物件上執行複數個干涉測量，

並在該等測量之間，藉由該測試物件圍繞一測試物件旋轉軸的有限旋轉，而改變該測試物件相對於該測試裝置的一旋轉位置，

其中為了藉由多個第一測量形成一第一測量系列，針對具有 $360^\circ/M$ 的一旋轉角差的 M 個旋轉位置，擷取 M 個第一測量值，並且為了形成一第二測量系列，針對具有 $360^\circ/N$ 的一旋轉角差的 N 個旋轉位置，擷取 N 個第二測量值，其中 M 及 N 為互質自然數；及

在一評估操作中，聯合評估多個測量值以確定用於特徵化該光學表面的該表面形狀的形狀資訊，其中在該評估操作中重複執行以下多個步驟：

(A) 以該等第一測量為基礎計算一第一圖形，其中該第一圖形是該等第一測量系列的一共同伴隨旋轉圖形；

(B) 從該等第一測量值中減去該第一圖形，以決定一第一測試設置誤差，其含有該等第一測量系列的多個共同非伴隨旋轉誤差；

(C) 使用該第一測試設置誤差來計算一校正第一圖形，其是來自於該第一圖形減去該第一測試設置誤差的結果；

(D) 從該等第二測量值中減去該校正第一圖形，以決定一第二測試設置誤差；

(E) 使用該第二測試設置誤差來計算一校正第二圖形，其藉由考慮到該第二測試設置誤差從該等第二測量值產生；

(F) 藉由從該等第一測量值中減去該校正第二圖形，使用該校正第二圖形來校正該第一測試設置誤差，以決定一校正第一測試設置誤差，其含有該等第一測量系列及該等第二測量系列的多個共同非伴隨旋轉誤差；

(G) 使用該校正第一測試設置誤差來計算再次校正的一第一圖形；

(H) 將該結果與一收斂準則進行比較，並根據該比較的結果選擇性重複步驟 (A) 至 (H)。

【請求項2】 如請求項1所述之方法，其特徵在於，測試形式為一反射鏡 (200) 的測試物件，所述反射鏡具有一反射表面 (210)，其表面區域不具有相對於一對稱軸的旋轉對稱性。

【請求項3】 如請求項2所述之方法，其特徵在於，該反射鏡具有一偏心穿孔 (230)。

【請求項4】 如請求項1至3中任一項所述之方法，其特徵在於，執行三或多個測量系列並且相互計算其結果。

【請求項5】 一種用於特徵化一光學元件的一光學表面的表面形狀的裝置 (100)，其特徵在於，該裝置 (100) 配置成執行如前述請求項中任一項所述之方法。

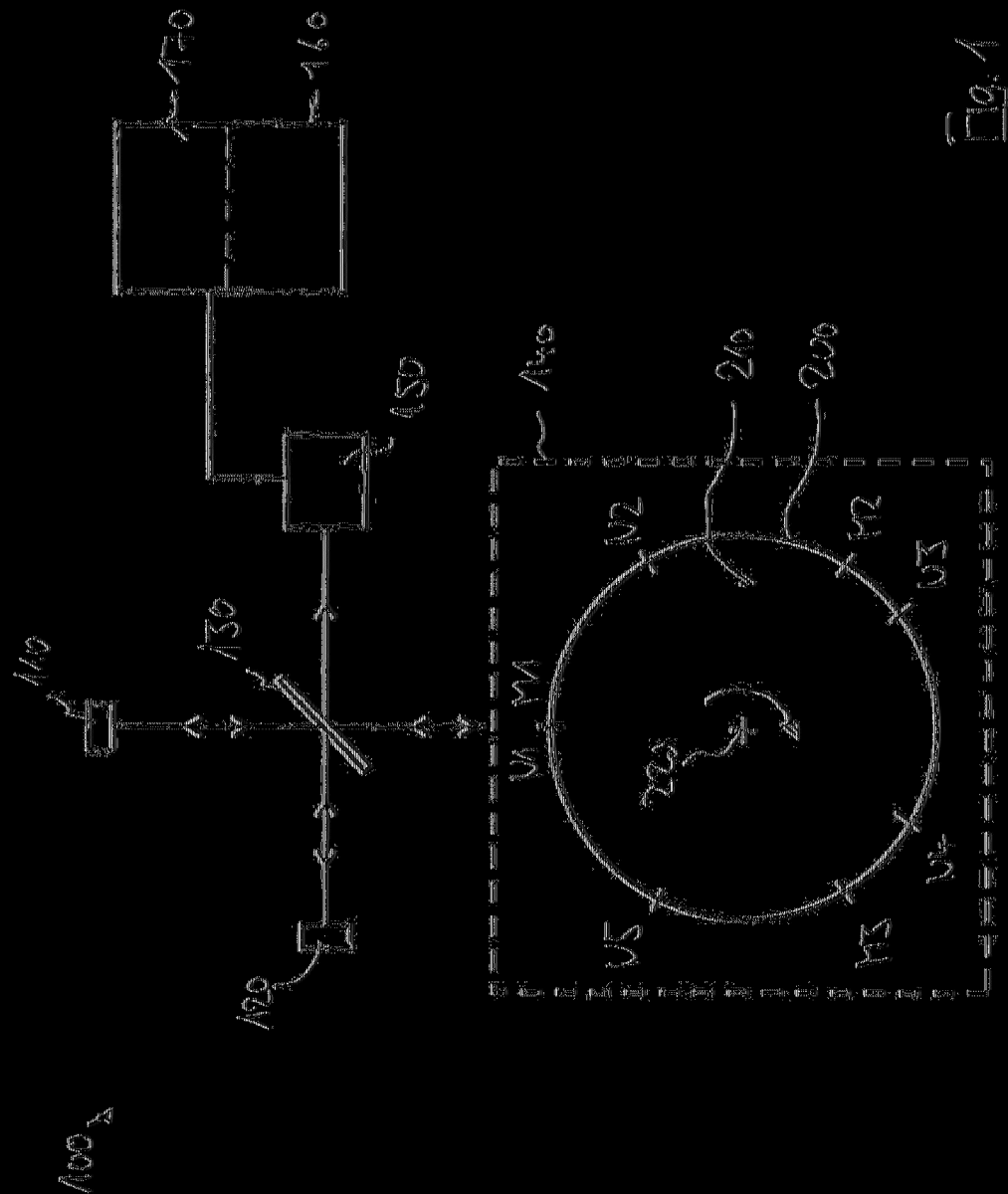


Fig. 1

(圖1)

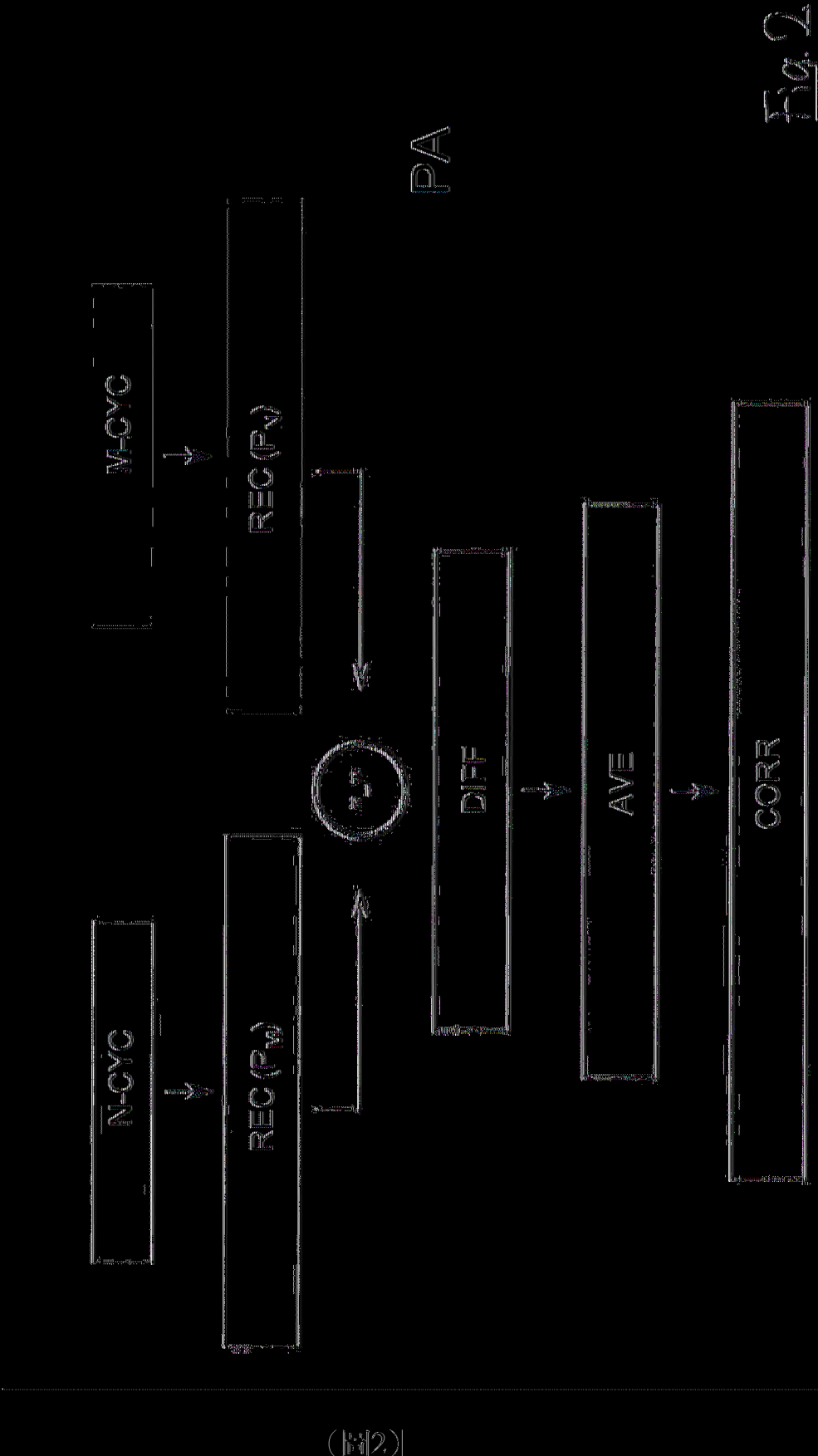


Fig. 2

(圖2)

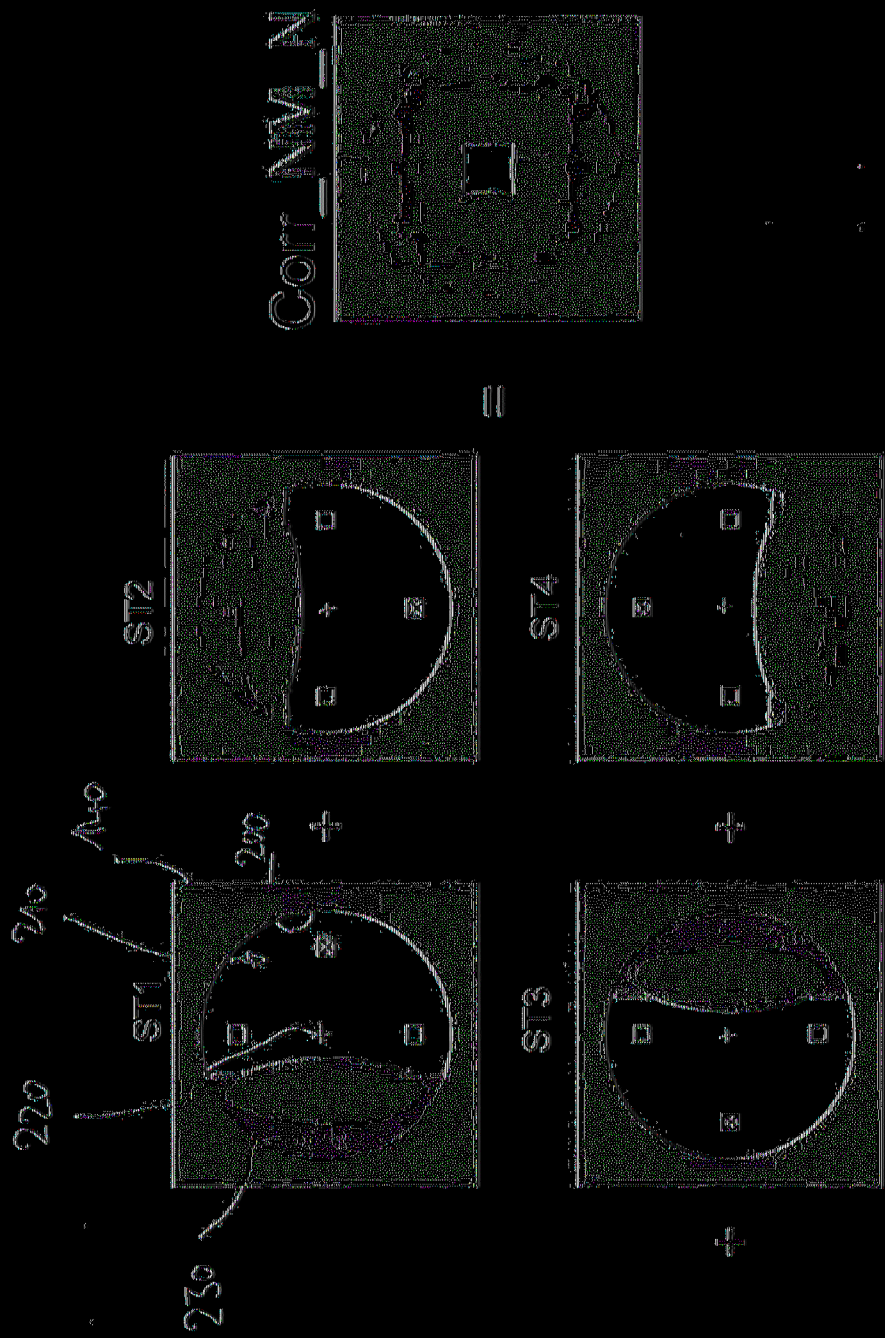
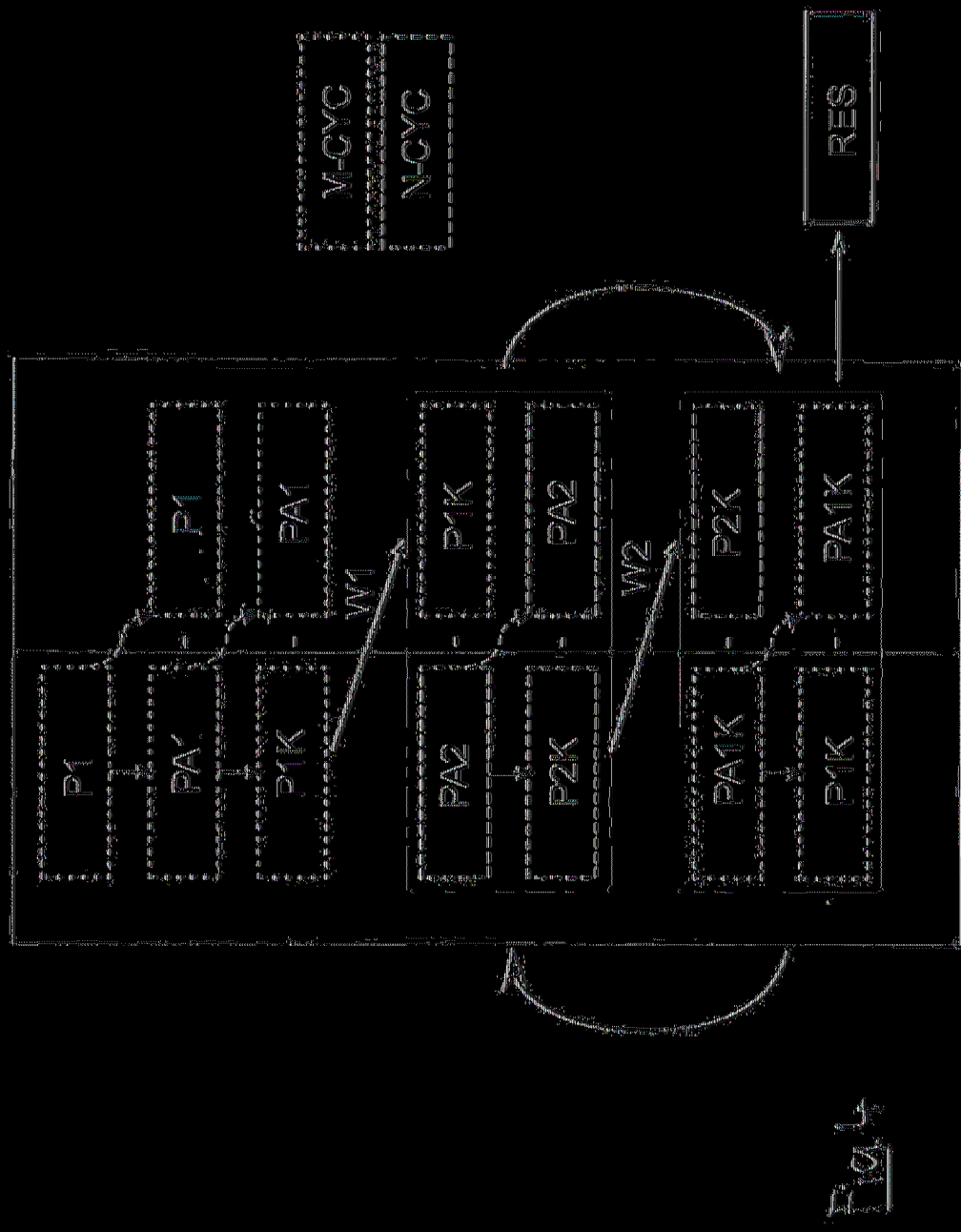


Fig. 3

(Fig. 3)



(圖4)

Fig. 4