



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本

(11)證書號數：TW I861336 B

(45)公告日：中華民國 113 (2024) 年 11 月 11 日

(21)申請案號：110100550

(22)申請日：中華民國 110 (2021) 年 01 月 07 日

(51)Int. Cl. : G01N23/20 (2018.01)

H01L21/66 (2006.01)

(30)優先權：2020/01/07 美國

62/958,089

2020/12/30 美國

17/137,840

(71)申請人：美商科磊股份有限公司 (美國) KLA CORPORATION (US)

美國

(72)發明人：舒傑葛洛夫 安德烈 V SHCHEGROV, ANDREI V. (US)；古特曼 那達夫
GUTMAN, NADAV (IL)；庫茲尼斯夫 亞歷山大 KUZNETSOV, ALEXANDER
(US)；吉里紐 安東尼歐 艾里昂 GELLINEAU, ANTONIO ARION (TT)

(74)代理人：陳長文

(56)參考文獻：

TW 201606294A

TW 201626476A

TW 201917348A

TW 201940833A

TW 201940841A

US 2016/0320319A1

審查人員：林永昌

申請專利範圍項數：22 項 圖式數：11 共 67 頁

(54)名稱

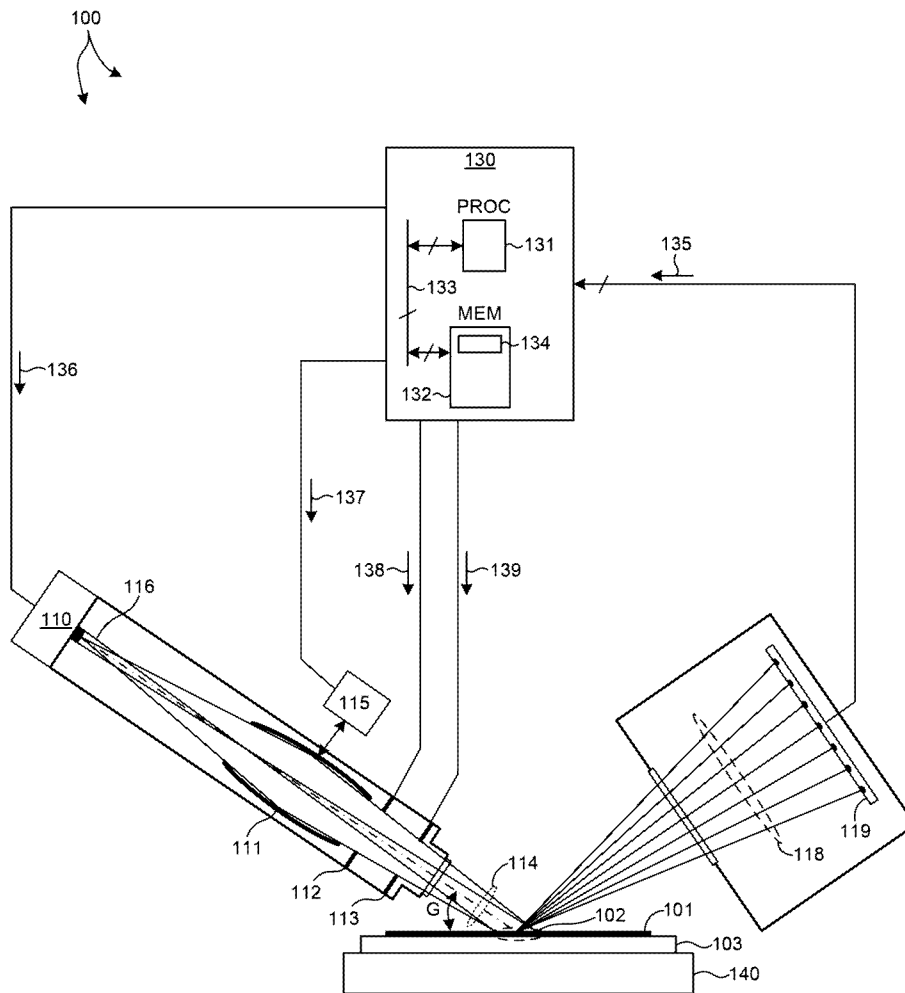
基於軟性 X 射線散射測量之覆蓋測量方法及系統

(57)摘要

本文中提出用於基於軟性 X 射線(SXR)散射測量之測量資料而執行覆蓋及邊緣放置誤差的方法及系統。聚焦在一小的照射場點大小內之短波長 SXR 輻射使得能夠測量設計規則目標或晶粒中作用裝置結構。在某些實施例中，用具有在自 10 至 5,000 電子伏特之一範圍中之能量之 SXR 輻射執行 SXR 散射測量之測量。因此，在 SXR 波長處之測量准許目標設計依密切表示實際裝置覆蓋之程序設計規則。在某些實施例中，自同一計量目標同時執行覆蓋及形狀參數之 SXR 散射測量之測量以使得能夠準確測量邊緣放置誤差。在另一態樣中，藉由將該等 SXR 測量校準至實際裝置目標之參考測量，基於設計規則目標之 SXR 測量而估計非週期性裝置結構之覆蓋。

Methods and systems for performing overlay and edge placement errors based on Soft X-Ray (SXR) scatterometry measurement data are presented herein. Short wavelength SXR radiation focused over a small illumination spot size enables measurement of design rule targets or in-die active device structures. In some embodiments, SXR scatterometry measurements are performed with SXR radiation having energy in a range from 10 to 5,000 electronvolts. As a result, measurements at SXR wavelengths permit target design at process design rules that closely represents actual device overlay. In some embodiments, SXR scatterometry measurements of overlay and shape parameters are performed simultaneously from the same metrology target to enable accurate measurement of Edge Placement Errors. In another aspect, overlay of aperiodic device structures is estimated based on SXR measurements of design rule targets by calibrating the SXR measurements to reference measurements of the actual device target.

指定代表圖：



【圖3】

符號簡單說明：

100:軟性 X 射線計量
工具/軟性 X 射線散射
測量工具/系統/計量工
具/計量系統/記憶體板
上計量系統

101:晶圓/樣品

102:測量區/有限場點
大小

103:晶圓卡盤

110:x 射線照射源/照射源

111: 聚焦光學器件

112:束髮散控制狹縫/
束狹縫

113: 狹縫/束狹縫/束塑
形狹縫

114:照射束/入射束

115:致動器系統/照射
光學器件

116:射線

118:x 射線輻射/經散
射 x 射線

119:x 射線偵測器/偵測器

130:計算系統/單電腦
系統/多電腦系統/電腦
系統

131:處理器

132:記憶體

133: 匯流排

134:程式指令

135:輸出信號/信號/對
應所測量資料/所測量
軟性 X 射線信號/軟性
X 射線測量資料

136:命令信號

137:命令信號

138:命令信號

139:命令信號

140:樣品定位系統

G:標稱入射角



I861336

【發明摘要】

【中文發明名稱】

基於軟性X射線散射測量之覆蓋測量方法及系統

【英文發明名稱】

METHODS AND SYSTEMS FOR OVERLAY MEASUREMENT
BASED ON SOFT X-RAY SCATTEROMETRY

【中文】

本文中提出用於基於軟性X射線(SXR)散射測量之測量資料而執行覆蓋及邊緣放置誤差的方法及系統。聚焦在一小的照射場點大小內之短波長SXR輻射使得能夠測量設計規則目標或晶粒中作用裝置結構。在某些實施例中，用具有在自10至5,000電子伏特之一範圍中之能量之SXR輻射執行SXR散射測量之測量。因此，在SXR波長處之測量准許目標設計依密切表示實際裝置覆蓋之程序設計規則。在某些實施例中，自同一計量目標同時執行覆蓋及形狀參數之SXR散射測量之測量以使得能夠準確測量邊緣放置誤差。在另一態樣中，藉由將該等SXR測量校準至實際裝置目標之參考測量，基於設計規則目標之SXR測量而估計非週期性裝置結構之覆蓋。

【英文】

Methods and systems for performing overlay and edge placement errors based on Soft X-Ray (SXR) scatterometry measurement data are presented herein. Short wavelength SXR radiation focused over a small illumination spot size enables measurement of design rule targets or in-die active device structures. In some embodiments, SXR scatterometry measurements are performed with SXR radiation having energy in a

range from 10 to 5,000 electronvolts. As a result, measurements at SXR wavelengths permit target design at process design rules that closely represents actual device overlay. In some embodiments, SXR scatterometry measurements of overlay and shape parameters are performed simultaneously from the same metrology target to enable accurate measurement of Edge Placement Errors. In another aspect, overlay of aperiodic device structures is estimated based on SXR measurements of design rule targets by calibrating the SXR measurements to reference measurements of the actual device target.

【指定代表圖】

圖3

【代表圖之符號簡單說明】

100: 軟性X射線計量工具/軟性X射線散射測量工具/系統/計量工具/
計量系統/記憶體板上計量系統

101: 晶圓/樣品

102: 測量區/有限場點大小

103: 晶圓卡盤

110: x射線照射源/照射源

111: 聚焦光學器件

112: 束髮散控制狹縫/束狹縫

113: 狹縫/束狹縫/束塑形狹縫

114: 照射束/入射束

115: 致動器系統/照射光學器件

116: 射線

118: x射線輻射/經散射x射線

119: x射線偵測器/偵測器

130: 計算系統/單電腦系統/多電腦系統/電腦系統

131: 處理器

132: 記憶體

133: 匯流排

134: 程式指令

135: 輸出信號/信號/對應所測量資料/所測量軟性X射線信號/軟性X

射線測量資料

136: 命令信號

137: 命令信號

138: 命令信號

139: 命令信號

140: 樣品定位系統

G: 標稱入射角

【發明說明書】

【中文發明名稱】

基於軟性X射線散射測量之覆蓋測量方法及系統

【英文發明名稱】

METHODS AND SYSTEMS FOR OVERLAY MEASUREMENT
BASED ON SOFT X-RAY SCATTEROMETRY

【技術領域】

【0001】所闡述實施例係關於計量系統及方法，且更特定而言係關於用於經改良測量準確度之方法及系統。

【先前技術】

【0002】通常藉由應用於一樣品之一處理步驟序列來製作諸如邏輯及記憶體裝置之半導體裝置。藉由此等處理步驟形成半導體裝置之各種特徵及多個結構層級。舉例而言，其他處理步驟當中之微影係涉及在一半導體晶圓上產生一圖案之一個半導體製作程序。半導體製作程序之額外實例包含但不限於化學機械拋光、蝕刻、沈積及離子植入。可在一單個半導體晶圓上製作多個半導體裝置，且然後將其等分離成個別半導體裝置。

【0003】在一半導體製造程序期間，在各個步驟處使用計量程序來偵測晶圓上之缺陷以促成較高良率。通常使用若干種基於計量之技術(包含散射測量及反射測量實施方案)及相關聯分析演算法來表徵關鍵尺寸、膜厚度、組合物及奈米尺度結構之其他參數。

【0004】隨著裝置(例如，邏輯及記憶體裝置)朝向較小奈米尺度尺寸進展，表徵變得更困難。併入有複雜三維幾何結構及具有迥異實體性質之材料的裝置加劇表徵困難度。舉例而言，現代記憶體結構通常係高縱橫

比三維結構，此使得光學輻射難以穿透至底部層。利用紅外光至可見光之光學計量工具可穿透半透明材料之諸多層，但提供良好穿透深度之較長波長不提供對小異常現象之充足敏感度。類似地，基於電子之計量工具在不損壞樣本的情況下遭受穿透深度不足。另外，表徵複雜結構(例如，FinFET)所需之愈來愈多數目之參數導致愈來愈多之參數相關性。因此，通常無法可靠地將表徵目標之參數與可用測量解耦。對於某些結構參數，諸如邊緣放置誤差(EPE)，當前不具有高輸送量(例如，光學)測量解決方案。

【0005】當前，採用數種技藝來測量覆蓋及關鍵尺寸(CD)，同時取得不同程度之成功。通常採用光學及電子束計量技術對專門化計量目標執行CD及覆蓋測量。

【0006】光學覆蓋測量主要基於光學成像或非成像繞射(散射測量)。然而，此等方法尚未可靠地克服與諸多高級目標(例如，複雜3D結構、小於10 nm之結構、採用不通透材料之結構)之測量及測量應用(例如，線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度測量)相關聯的基本挑戰。

【0007】使用現有方法，通常基於藉由一微影工具對形成於晶圓上之各個位置處之專門化目標結構進行測量而評估覆蓋誤差。在某些實例中，空間分離之光柵係用於基於成像之光學覆蓋測量。在某些其他實例中，框中框結構係用於基於成像之光學覆蓋測量。以此形式，一框形成於晶圓之一個層上且一第二較小框形成於另一層上。藉由比較兩個框之中心之間的對準來測量局域化覆蓋誤差。在其中目標結構係可獲得的之晶圓上之位置處進行此等測量。在某些實例中，覆蓋之光柵或交錯之光柵係用於基於散射測量之光學覆蓋測量或電子束覆蓋測量。

【0008】不幸地，此等專門化目標結構通常不符合用以產生電子裝置之特定半導體製造程序之設計規則。此導致對與根據適用設計規則製造之實際裝置結構相關聯的覆蓋誤差之估計誤差。

【0009】在一項實例中，基於影像之光學覆蓋計量嚴重受限於在光學波長處成像之解析度。因此，僅能測量具有遠大於設計規則之特徵之目標。基於影像之光學覆蓋計量通常需要待用一光學顯微鏡解析之圖案，該光學顯微鏡需要具有遠超出設計規則關鍵尺寸的關鍵尺寸之粗線。

【0010】在另一實例中，基於0階繞射的基於散射測量之光學覆蓋計量對小覆蓋誤差具有極低敏感度，此乃因敏感度隨週期性目標之間距而降低。此驅使間距遠大於裝置之設計規則之尺寸。而且，此測量方法之準確度在其中測量覆蓋之層中之任一者中存在任何不對稱的情況下皆急劇降級。另外，此方法在一單個測量中無法在正覆蓋誤差與負覆蓋誤差之間進行區分。

【0011】在另一實例中，基於高於零之繞射階的基於散射測量之光學覆蓋計量亦需要相對大的間距目標以在非零傳播繞射階處產生充足信號。一覆蓋不對稱光學信號通常自具有與照射光之光學波長相當之一圖案間距的週期性目標產生。在某些實例中，可使用在範圍500 nm至800 nm中之間距值。同時，用於邏輯或記憶體應用之實際裝置間距(設計規則尺寸)係小得多的，例如，在範圍100 nm至400 nm中或甚至低於100 nm。另外，此方法之準確度在其中測量覆蓋之層中之任一者中存在任何不對稱的情況下皆急劇降級。將照射之光學波長減小至深紫外光及真空紫外光範圍中並沒有幫助，此乃因此等光子被衰減且不足以穿透多個層結構來到達評估覆蓋及邊緣放置誤差所需之下伏圖案。

【0012】基於電子之計量技術(諸如掃描電子顯微鏡(SEM)及電子束計量)能夠解析奈米尺度特徵且測量非週期性結構(諸如隨機邏輯)。然而，基於電子之計量系統在用於測量實際裝置時係具破壞性的。另外，基於電子之計量系統係具低輸送量的。測量時間可係每測量位點大約幾秒。另外，基於電子之計量系統係提供極有限的三維測量能力之自上而下的成像系統。舉例而言，當採用SEM來測量重疊之光柵之間的覆蓋時，其歸因於點擴展函數隨穿透深度增加而喪失測量CD及EPE之能力。進一步細節闡述於授予 Gutman 等人且受讓與 KLA-Tencor 公司之美國專利第 10,473,460 號中，該美國專利之內容以其全文引用方式併入本文中。一般而言，SEM 達成中間解析度位準，但不能夠在不破壞樣本的情況下將結構穿透至充足深度。另外，樣品之所需充電對成像效能具有一不利效應。

【0013】原子力顯微鏡(AFM)及掃描穿隧顯微鏡(STM)能夠達成原子解析度，但其等僅可探測樣品之表面。另外，AFM 及 STM 顯微鏡需要長掃描時間。

【0014】透射電子顯微鏡(TEM)達成高解析度位準且能夠探測任意深度，但TEM需要對樣品進行破壞性剖切。

【0015】為了克服對用於覆蓋及EPE測量的基於光學及電子之計量之某些限制，可採用一絕對對位測量技術。採用具有等於任何兩個圖案之間的空間分離之一範圍之一準確平移階段來測量特徵之間的絕對距離。採用此結果來輔助對覆蓋、CD及EPE之評估。不幸地，絕對對位測量技術需要一準確階段，將複雜度添加至測量工具且限制輸送量。而且，該技術可無法在圖案覆蓋圖案目標或裝置結構上良好地執行。進一步細節闡述於 Shchegrov 等人且受讓與 KLA-Tencor 公司之 WIPO 公開案第 2019/173171

號中，該WIPO公開案之內容以其全文引用方式併入本文中。

【0016】總而言之，對於邏輯裝置及高級DRAM以及垂直或平坦NAND裝置，裝置製作節點處低於20奈米之半導體裝置良率係諸多參數之一複雜函數，該等參數包含膜厚度、經圖案化線之輪廓參數、覆蓋誤差及邊緣放置誤差(EPE)。其中，EPE具有最高要求處理窗且需要對CD及覆蓋進行計量及控制。當前，尚不存在用於EPE測量及諸多設計規則覆蓋測量應用之高輸送量光學計量解決方案。另外，充分計量之缺乏使得定義控制方案以改良裝置良率變得具挑戰性。

【0017】歸因於愈來愈小之解析度需要、多參數相關性、愈來愈複雜之幾何結構及不通透材料之愈來愈多之使用，未來計量應用針對計量提出挑戰。因此，期望用於經改良覆蓋及形狀測量之方法及系統。

【發明內容】

【0018】本文中提出用於基於軟性X射線(SXR)散射測量之測量資料而執行覆蓋及邊緣放置誤差的方法及系統。聚焦在一小的照射場點大小內之短波長SXR輻射使得能夠測量設計規則目標，亦即，具有與附近晶粒中作用裝置結構或晶粒中作用裝置結構自身相同或大約相同之間距之目標。除提供覆蓋計量能力之外，本文中所闡述之該等方法及系統還藉由對該等所測量結構之幾何參數進行強去相關來增強形狀參數測量之精度及準確度。

【0019】SXR照射輻射使得能夠穿透至一目標之不通透區及下層中。在某些實施例中，用具有在自10至5,000電子伏特之一範圍中之能量之SXR輻射執行SXR散射測量之測量。通常，繞射限制及其他光學效應控制形狀及覆蓋測量之最小的可能目標大小。歸因於SXR照射之相對短波

長，可對具有一相對小目標區之計量目標執行SXR散射測量之測量。

【0020】至下層之SXR穿透使得SXR散射測量之測量能夠對估計覆蓋、CD及EPE所需之信號具有相對高敏感度。而且，與具有較大間距之傳統覆蓋目標相比，設計規則目標之SXR散射測量之覆蓋測量更密切地表示實際裝置覆蓋。SXR散射測量使得能夠對設計規則目標進行覆蓋測量，此乃因照射波長短於該等所測量設計規則目標之週期。因此，在SXR波長處之測量准許目標設計依程序設計規則。

【0021】在某些實例中，SXR散射測量之覆蓋測量係基於對例如SRAM之實際裝置結構進行直接測量。

【0022】在某些實施例中，該等設計規則目標包含各自具有一下伏週期性之多個層。SXR散射測量使得能夠測量對下層圖案具有高敏感度之多層設計規則目標。在此等實施例中之某些實施例中，該設計規則目標之頂層係一光蝕劑層。以此方式，SXR散射測量達成開發後檢測(ADI)程序監視。

【0023】在一項態樣中，一SXR散射測量系統經組態以依據自被測結構散射之非零繞射階來估計一設計規則計量目標或晶粒中作用裝置結構之不同層之間的覆蓋誤差。歸因於SXR輻射之該相對短波長，非零繞射階且特定而言 ± 1 繞射階提供對覆蓋誤差之相對高敏感度。

【0024】在某些實施例中，依據自同一計量目標收集之SXR散射測量之測量同時執行SXR散射測量之覆蓋及形狀參數測量。此使得能夠測量邊緣放置誤差(EPE)，諸如端線縮短、線至觸點之距離等。因此，SXR散射測量在不具有歸因於目標偏置之誤差的情況下達成邊緣放置誤差(EPE)測量，該目標偏置在對不同目標執行覆蓋及CD測量時發生。另外，對來

自該同一計量目標之覆蓋及CD結構參數進行同時測量改良測量準確度及輸送量兩者。

【0025】在某些實施例中，採用來自各自在相反方向上具有一標稱偏移之一計量目標之兩個單元的SXR散射測量之測量信號來解析覆蓋誤差。

【0026】在某些實施例中，基於SXR散射測量之計量涉及判定藉由具有該所測量SXR散射測量資料之一預定測量模型之逆解來表徵該樣本之所關注參數，例如，覆蓋誤差、形狀參數等。以此方式，藉由對一參數化測量模型之值求解來估計目標參數，該等值最小化該等所測量之經散射x射線強度與經模型化結果之間的誤差。

【0027】在某些實施例中，基於一基於經訓練機器學習之測量模型，自一或多個非零繞射階內之所偵測強度來直接判定與一測量目標或一品粒中目標相關聯的該覆蓋誤差值。在此等實施例中，一基於經訓練機器學習之模型直接自SXR測量資料提取覆蓋誤差。

【0028】在某些實施例中，一基於SXR散射測量之覆蓋測量涉及用SXR輻射照射一樣本且偵測相對於該樣本之多個入射角、多個波長或兩者之所得繞射階之該等強度。而且，基於在該多個測量例項中之每一者處之該一或多個非零繞射階中之每一者內之該複數個強度中之調變而判定與該測量目標相關聯的該覆蓋誤差。

【0029】在另一態樣中，該實際裝置目標係非週期性的。藉由將覆蓋測量校準至一參考測量，SXR散射測量技術可應用於基於具有充足週期性之設計規則目標之測量而估計非週期性結構之覆蓋。此有效地克服需要所測量目標係週期性或大約週期性的之散射測量之測量之限制。

【0030】在某些實施例中，一多層覆蓋計量目標在不同層處設計有不同間距，使得自一個層產生之一繞射階相長地干涉另一層之一不同繞射階。相反地，在不受製於覆蓋之相長干涉之不同階數對處偵測之強度測量係由形狀參數主導。因此，在某些實施例中，一計量覆蓋目標被設計成具有特定光柵結構以增加對特定光柵階對處之覆蓋之敏感度，且亦提供對形狀參數值之估計有用之強度資料。

【0031】在某些實施例中，一多層覆蓋計量目標被設計成在不同層處具有不同間距定向，使得自一個層產生之一繞射階相長地干涉另一層之一不同繞射階。一般而言，具有不同週期性(例如，不同光柵間距)、不同間距定向或其任一組合之一組層產生一組散射向量，每一散射向量與一不同層相關聯。該覆蓋計量目標經設計使得一預定子組之該等散射向量被對準。以此方式，與該預定子組之散射向量對應之該等層當中之覆蓋的該敏感度得到增強。

【0032】前述內容係一發明內容且因此必然含有細節之簡化、概述及省略；因此，熟習此項技術者將瞭解，發明內容僅係說明性的且以任何方式為限制性的。在本文中所陳述之非限制性實施方式中，本文中所闡述之裝置及/或程序之其他態樣、發明性特徵及優點將變得顯而易見。

【圖式簡單說明】

【0033】圖1係圖解說明在一微電子晶片之一靜態隨機存取記憶體(SRAM)區10中製作之線結構11之一硬遮罩圖案之一圖式。

【0034】圖2係圖解說明一底部抗反射塗佈(BARC)層12及安置在圖1中所繪示之線結構之圖案之頂部上之一抗蝕劑層13之一圖式。

【0035】圖3係圖解說明根據本文中所提出之例示性方法的用於測量

一樣品之特性之一軟性X射線(SXR)計量工具100之一實施例之一圖式。

【0036】圖4係圖解說明包含作用場401至404、閘極405至408及觸點409至421之裝置結構400之一俯視圖之一圖式。

【0037】圖5A繪示具有自彼此偏移一距離之經堆疊光柵結構之一單元，該距離等於在一個方向上之一標稱偏移+OFFSET與一覆蓋誤差OVL之總和。

【0038】圖5B繪示具有自彼此偏移一距離之經堆疊光柵結構之一單元，該距離等於在與圖5A中所繪示之標稱偏移相反之一方向上之一標稱偏移-OFFSET與覆蓋誤差OVL之總和。

【0039】圖6係圖解說明一模型構建及分析引擎180之一圖式，模型構建及分析引擎180經組態以基於如本文中所闡述之一模型擬合分析而估計覆蓋。

【0040】圖7係圖解說明一晶圓101之一圖式，晶圓101包含由一x射線輻射束以一入射角及方位角照射之一計量目標120。

【0041】圖8繪示包含不同層中線151及152之兩個週期性陣列之一層式計量目標150。

【0042】圖9繪示圖解說明圖8中所圖解說明之計量目標之一角度範圍之-2及+2繞射階之強度與對應所測量值的一經簡化模型之一擬合之一模擬的一曲線圖170。

【0043】圖10係圖解說明一半導體晶粒之一圖式，該半導體晶粒包含在一作用裝置區中製作之作用裝置結構及在一刻劃線區中製作之設計規則計量目標。

【0044】圖11係圖解說明基於如本文中所闡述之經校準SXR測量而

估計覆蓋之一例示性方法200之一流程圖。

【實施方式】

相關申請案之交叉參考

【0045】本專利申請案依據35 U.S.C. §119主張來自於2020年1月7日提出申請的標題為「System and Method for Measuring Overlay and Edge Placement Error With Soft X-ray Scatterometry」之序列號62/958,089之美國臨時專利申請案之優先權，該美國臨時專利申請案之標的物以其全文引用方式併入本文中。

【0046】現將詳細參考先前技術實例及本發明之某些實施例，本發明之實例圖解說明於附圖中。

【0047】圖1繪示在一微電子晶片之一靜態隨機存取記憶體(SRAM)區10中製作之線結構11之一硬遮罩圖案。藉由將多種圖案化技術與切口遮罩組合來形成作用區域之複雜佈局。切口遮罩選擇性地移除用於將基板圖案化至作用區域中之硬遮罩層之部分。圖2繪示一底部抗反射塗佈(BARC)層12及安置在圖1中所繪示之線結構之圖案之頂部上之一抗蝕劑層13。該抗蝕劑層係用於選擇性地移除抗蝕劑層13之開口14下方之硬遮罩圖案之部分。如圖1中所繪示，線結構11之硬遮罩圖案甚至由BARC層12掩埋在抗蝕劑層13之開口14內。

【0048】為了給切口遮罩程序提供充分良率，需要對形狀參數(例如，CD、HT、SWA、輪廓參數等)、膜厚度及覆蓋進行可靠測量。一覆蓋計算揭露其係依據來自一個四元組圖案化程序之先前步驟之諸多結構參數。切口之邊緣與毗鄰線結構之間的間隙之分佈及因此程序之良率取決於所有程序參數之一複雜相互作用。

【0049】在另一實例中，邊緣放置距離(EPD)及相關聯邊緣放置誤差(EPE)係在進行裝置電觸點之後進行監視及控制之一重要參數。所期望EPD與實際EPD之間的差稱為EPE。EPD與EPE係依據覆蓋與CD誤差兩者。

【0050】提出用於基於軟性X射線(SXR)散射測量之測量資料而執行結構及材料之覆蓋及邊緣放置誤差的方法及系統。聚焦在一小照射場點大小內之短波長SXR輻射使得能夠測量設計規則目標，亦即，具有與附近晶粒中作用裝置結構或晶粒中作用裝置結構自身相同或大約相同之間距的目標。本文中所提出之方法及系統可應用於位於功能性晶粒之內或之外的二維及三維設計規則計量目標。除提供覆蓋計量能力之外，本文中所闡述之方法及系統還藉由對所測量結構之幾何參數進行強去相關來增強形狀參數測量之精度及準確度。

【0051】SXR照射輻射使得能夠穿透至一目標之不通透區及下層中。使用SXR散射測量之可測量幾何參數之實例包含孔大小、孔密度、線邊緣粗糙度、線寬度粗糙度、側壁角度、輪廓、關鍵尺寸、覆蓋、邊緣放置誤差及間距。可測量材料參數之實例包含電子密度、元素識別及組合物。在某些實例中，SXR散射測量使得能夠測量小於10 nm之特徵以及其中需要測量幾何參數及材料參數之高級半導體結構(諸如自旋轉移轉矩MRAM)。

【0052】在某些實施例中，用具有在自10至5,000電子伏特之一範圍中之能量之SXR輻射執行SXR散射測量之測量。通常，繞射限制及其他光學效應控制形狀及覆蓋測量之最小可能的目標大小。歸因於SXR照射之相對短波長，可對具有一相對小目標區之計量目標執行SXR散射測量之測

量。在某些實施例中，對在具有小於5微米之一最大廣度尺寸之一區內之計量目標執行SXR散射測量之測量。在某些實施例中，對在具有大於2微米之一最大廣度尺寸之一區內之計量目標執行SXR散射測量之測量。

【0053】在某些實施例中，設計規則目標包含各自具有一下伏週期性之多個層。SXR散射測量使得能夠測量對下層圖案具有高敏感度之多層設計規則目標。在此等實施例中之某些實施例中，設計規則目標之頂層係一光蝕劑層。以此方式，SXR散射測量達成開發後檢測(ADI)程序監視。

【0054】SXR穿透至下層使得SXR散射測量之測量能夠對估計覆蓋、CD及EPE所需之信號具有相對高敏感度。而且，與具有大得多之間距之傳統覆蓋目標相比，設計規則目標之SXR散射測量之覆蓋測量更密切地表示實際裝置覆蓋。在某些實例中，SXR散射測量之覆蓋測量係基於對實際裝置結構(例如，SRAM)進行直接測量。

【0055】在一項態樣中，一SXR散射測量系統經組態以依據自被測結構散射之非零繞射階來估計一設計規則計量目標或晶粒中作用裝置結構之不同層之間的覆蓋誤差。

【0056】圖3圖解說明用於在至少一項新穎態樣中測量一樣品之特性之一SXR散射測量工具100之一實施例。如圖3中所展示，系統100可用於在由一入射照射束場點照射之一樣品101之一測量區102內執行SXR散射測量之測量。

【0057】在所繪示實施例中，計量工具100包含一x射線照射源110、聚焦光學器件111、束髮散控制狹縫112及狹縫113。x射線照射源110經組態以產生適合於SXR散射測量之測量之SXR輻射。在某些實施例中，x射線照射源110係一多色、高亮度、大集光率(etendue)源。在某些實施例

中，x射線照射源110經組態以產生在10至5000電子伏特之間的一範圍中之x射線輻射。一般而言，請審慎考慮能夠以足以達成高輸送量直列式計量之通量位準產生高亮度SXR之任何適合高亮度x射線照射源以供應用於SXR測量之x射線照射。

【0058】在某些實施例中，一x射線源包含使得x射線源能夠遞送在不同可選擇波長處之x射線輻射之一可調諧單色儀。在某些實施例中，採用一或多個x射線源來確保x射線源供應在允許足以穿透至被測樣品中之波長處之光。

【0059】在某些實施例中，照射源110係一高諧波產生(HHG) x射線源。在某些其他實施例中，照射源110係一擺動器/波蕩器同步加速器輻射源(SRS)。一例示性擺動器/波蕩器SRS闡述於美國專利第8,941,336及8,749,179號中，該等美國專利之內容以其全文引用方式併入本文中。

【0060】在某些其他實施例中，照射源110係一雷射產生之電漿(LPP)光源。在此等實施例中之某些實施例中，LPP光源包含氫、氮、氫、氖及氬發射材料中之任一者。一般而言，針對諧振SXR區域中之亮度而最佳化對一適合LPP目標材料之選擇。舉例而言，由氬發射之電漿在矽K邊緣處提供高亮度。在另一實例中，由氫發射之電漿遍及(10至5000 eV)之整個SXR區域而提供高亮度。

【0061】亦可針對可靠及長壽命光源操作而最佳化LPP目標材料選擇。諸如氫、氮及氫之惰性氣體目標材料係惰性的，且可在僅需最少或無需去污染處理的情況下在一閉環操作中重複使用。一例示性SXR照射源闡述於Khodykin等人且受讓與KLA-Tencor公司之美國專利公開案第2019/0215940號中，該美國專利公開案之內容以其全文引用方式併入本

文中。

【0062】在某些實施例中，由照射源(例如，照射源110)發射之波長係可選擇的。在某些實施例中，照射源110係一LPP光源，其由計算系統130控制以最大化一或多個所選擇光譜區域中之通量。目標材料處之雷射峰值強度控制電漿溫度及因此所發射輻射之光譜區域。雷射峰值強度係藉由調整脈衝能量、脈衝寬度或兩者而發生變化。在一項實例中，一個100皮秒脈衝寬度適合於產生SXR輻射。如圖3中所繪示，計算系統130將命令信號136傳遞至照射源110，此致使照射源110調整自照射源110發射之波長之光譜範圍。在一項實例中，照射源110係一LPP光源，且LPP光源調整一脈衝持續時間、脈衝頻率及目標材料組合物中之任一者以實現自LPP光源發射之波長之一所期望光譜範圍。

【0063】藉由非限制性實例之方式，一粒子加速器源、一液體陽極源、一旋轉陽極源、一靜止固體陽極源、一微焦源、一微焦旋轉陽極源、一基於電漿之源及一逆康普頓源中之任一者可用作x射線照射源110。

【0064】例示性x射線源包含經組態以轟擊固體或液體目標以模擬x射線輻射之電子束源。用於產生高亮度液體金屬x射線照射之方法及系統闡述於在2011年4月19日頒予KLA-Tencor公司之美國專利第7,929,667號中，該美國專利之全文以引用方式併入本文中。

【0065】x射線照射源110在具有有限橫向尺寸(亦即，正交於束軸之非零尺寸)之一源區內產生x射線發射。在一項實施例中，照射源110之源區係由小於20微米之一橫向尺寸表徵。在某些實施例中，源區係由10微米或更小之一橫向尺寸表徵。小的源大小使得能夠以高亮度照射樣品上之一小目標區，因此改良測量精度、準確度及輸送量。

【0066】一般而言，x射線光學器件將x射線輻射塑形且將其引導至樣品101。在某些實例中，x射線光學器件使用多層x射線光學器件將x射線束準直或聚焦至樣品101之測量區102上以達成小於1毫弧度之發散。在某些實施例中，x射線光學器件包含一或多個x射線準直鏡、x射線孔隙、x射線射束截捕器、折射x射線光學器件、繞射光學器件(諸如波帶片)、Schwarzschild光學器件、Kirkpatrick-Baez光學器件、Montel光學器件、Wolter光學器件、鏡面x射線光學器件(諸如橢球面鏡)、多毛細管光學器件(諸如中空毛細管x射線波導)、多層光學器件或系統或者其任一組合。進一步細節闡述於美國專利公開案第2015/0110249號中，該美國專利公開案之內容以其全文引用方式併入本文中。

【0067】如圖3中所繪示，聚焦光學器件111將源輻射聚焦至位於樣品101上之一計量目標上。有限橫向源尺寸導致由來自源之邊緣之射線116以及由束狹縫112及113提供之任何束塑形定義之目標上之有限場點大小102。

【0068】在某些實施例中，聚焦光學器件111包含經橢圓塑形之聚焦光學元件。在圖3中所繪示之實施例中，聚焦光學器件111在橢圓之中心處之放大率係大約一。因此，投射至樣品101之表面上之照射場點大小與照射源之大小大約相同，針對歸因於標稱入射角G之束擴展進行調整。

【0069】在另一態樣中，聚焦光學器件111收集源發射並選擇一或多個離散波長或光譜帶，且以一所期望標稱入射角將所選擇光聚焦至樣品101上。

【0070】選擇標稱入射角以達成計量目標之一所期望穿透，以在維持在計量目標邊界內的情況下取得信號資訊內容的最大化。硬性x射線之

關鍵角係極小的，但軟性x射線之關鍵角係顯著較大的。作為此額外測量靈活性之一結果，SXR測量更深地探測至結構中而對標稱入射角之精確值則有較小敏感度。

【0071】在某些實施例中，聚焦光學器件111包含分級多層，其等選擇用於投射至樣品101上之所期望波長或波長範圍。在某些實施例中，聚焦光學器件111包含一分級多層結構(例如，層或塗佈)，其選擇一個波長且在圍繞標稱入射角之一入射角範圍內將所選擇波長投射至樣品101上。在某些實施例中，聚焦光學器件111包含一分級多層結構，其選擇一波長範圍且在一個入射角內將所選擇波長投射至樣品101上。在某些實施例中，聚焦光學器件111包含一分級多層結構，其選擇一波長範圍且在一入射角範圍內將所選擇波長投射至樣品101上。

【0072】分級多層式光學器件係較佳的，以最小化當單層光柵結構太深時發生之光損耗。一般而言，多層光學器件選擇經反射波長。所選擇波長之光譜帶寬度最佳化提供至樣品101之通量、所測量繞射階中之資訊內容，且防止信號經由偵測器處之角度色散及繞射峰值重疊之降級。另外，採用分級多層光學器件來控制發散。針對偵測器處之通量及最小空間重疊而最佳化每一波長處之角度發散。

【0073】在某些實施例中，分級多層光學器件選擇波長來增強來自特定材料介面或結構尺寸之繞射信號之對比度及資訊內容。舉例而言，可選定所選擇波長來跨越元件特定之諧振區域(例如，矽K邊緣、氮K邊緣、氧K邊緣等)。另外，在此等實施例中，亦可調諧照射源以最大化所選擇光譜區域中之通量(例如，HHG光譜調諧、LPP雷射調諧等)。

【0074】在某些實施例中，聚焦光學器件111包含各自具有一橢圓表

面形狀之複數個反射光學元件。每一反射光學元件包含一基板及經調諧以反射一不同波長或波長範圍之一多層塗佈。在某些實施例中，在每一入射角處配置各自反射一不同波長或波長範圍之複數個(例如，1至5個)反射光學元件。在一其他實施例中，在一不同標稱入射角處配置各自反射一不同波長或波長範圍之多組(例如，2至5組)反射光學元件。在某些實施例中，多組反射光學元件在測量期間將照射光同時投射至樣品101上。在某些其他實施例中，多組反射光學元件在測量期間將照射光依序投射至樣品101上。在此等實施例中，採用主動快門或光圈來控制投射至樣品101上之照射光。

【0075】在某些實施例中，藉由主動定位聚焦光學器件之一或多個鏡元件來調整投射至同一計量區上之波長範圍、AOI、方位角或其任一組合。如圖3中所繪示，計算系統130將命令信號137傳遞至致動器系統115，此致使致動器系統115調整聚焦光學器件111之光學元件中之一或多者之位置、對準或兩者以達成投射至樣品101上之所期望波長範圍、AOI、方位角或其任一組合。

【0076】一般而言，針對每一波長而選擇入射角以最佳化藉由被測計量目標對照射光之穿透及吸收。在諸多實例中，測量多個層結構且選擇入射角以最大化與所關注的所期望層相關聯的信號資訊。在覆蓋計量之實例中，選擇波長及入射角以最大化由來自先前層與當前層之散射之間的干涉引起之信號資訊。另外，亦選擇方位角以最佳化信號資訊內容。另外，選擇方位角以確保偵測器處之繞射峰值之角度分離。

【0077】在某些實施例中，一SXR散射測量系統(例如，計量工具100)包含一或多個束狹縫或孔隙以將入射在樣品101上之照射束114塑

形，且選擇性地阻擋將以其他方式照射一被測計量目標之照射光之一部分。一或多個束狹縫定義束大小及形狀，使得x射線照射場點在被測計量目標之區內擬合。另外，一或多個束狹縫定義照射束髮散以最小化偵測器上之繞射階之重疊。

【0078】在某些實施例中，一SXR散射測量系統(例如，計量工具100)包含一或多個束狹縫或孔隙以選擇同時照射一被測計量目標之一組照射波長。在此等實施例中，一或多個狹縫經組態以使包含多個照射波長之照射通過。一般而言，一被測計量目標之同時照射係較佳的以增加信號資訊及輸送量。然而，實務上，偵測器處之繞射階之重疊限制照射波長之範圍。在某些實施例中，一或多個狹縫經組態以使不同照射波長依序通過。在某些實例中，較大角度發散處之依序照射提供較高輸送量，此乃因當束髮散較大時，與同時照射相比，依序照射之信雜比可係較高的。當依序執行測量時，繞射階之重疊問題並非一議題。此增加測量靈活性且改良信雜比。

【0079】圖3繪示位於聚焦光學器件111與束塑形狹縫113之間的束路徑中之一束髮散控制狹縫112。束髮散控制狹縫112限制提供至被測樣品之照射之發散。束塑形狹縫113位於束髮散控制狹縫112與樣品101之間的束路徑中。束塑形狹縫113進一步將入射束114塑形且選擇入射束114之照射波長。束塑形狹縫113位於緊接在樣品101之前的束路徑中。在某些實施例中，束塑形狹縫113之狹縫位於緊接近於樣品101，以最小化歸因於藉由有限源大小定義之束髮散之入射束場點大小之放大。如圖3中所繪示，計算系統130將命令信號138傳遞至束髮散控制狹縫112，此致使束髮散控制狹縫112之主動元件調整束髮散控制狹縫112之光學元件中之一或

多者之位置、對準或兩者以達成所期望束髮散。類似地，如圖3中所繪示，計算系統130將命令信號139傳遞至束塑形狹縫113，此致使束塑形狹縫113之主動元件調整束塑形狹縫113之光學元件中之一或多者之位置、對準或兩者以達成投射至樣品101上之所期望束形狀。

【0080】在某些實施例中，束塑形狹縫113包含多個經獨立致動之束塑形狹縫。在一項實施例中，束塑形狹縫113包含四個經獨立致動之束塑形狹縫。此等四個束塑形狹縫有效地阻擋傳入束之一部分且產生具有一框形狀之照射剖面之一照射束114。

【0081】束塑形狹縫113之狹縫由最小化散射且有效地阻擋入射輻射之材料構造。例示性材料包含單晶材料，諸如鍺、砷化鎵、磷化銦等。通常，狹縫材料沿著一結晶方向經切開而非鋸開，以跨越結構邊界而最小化散射。另外，狹縫相對於傳入束而定向，使得傳入輻射與狹縫材料之內部結構之間的相互作用產生一最少量之散射。晶體附接至由高密度材料(例如，鎢)製成之每一狹縫固持器以便在狹縫之一個側上完全阻擋x射線束。

【0082】在某些實施例中，一SXR散射測量系統之聚焦光學器件以至少五之一縮小率(亦即，0.2或更小之放大因子)將照射源之一影像投射至被測樣品上。在某些實施例中，如本文中所闡述之一SXR散射測量系統採用具有由20微米或更小之一橫向尺寸表徵之一源區(亦即，源大小係20微米或更小)之一SXR照射源。在某些實施例中，以至少五之一縮小因子(亦即，將源之一影像投射至比源大小小五倍之晶圓上)來採用聚焦光學器件以將照射投射至具有四微米或更小之一入射照射場點大小之一樣品上。

【0083】在某些實施例中，照射源110係具有10微米或更小之一源大小之一LPP光源，且聚焦光學器件111具有大約10之一縮小因子。此使得

一SXR散射測量工具能夠將照射光聚焦至具有1至2微米之尺寸之一計量目標上。測量具有1至2微米之尺寸之目標的能力減小致力於專門化計量目標之晶圓面積。另外，測量具有1至2微米之尺寸之目標的能力使得能夠直接測量裝置結構而非專門化計量目標。測量裝置結構直接消除目標至裝置之偏置。此顯著改良測量品質。另外，對晶粒中目標之測量達成晶粒內參數變化之表徵。所關注例示性參數包含關鍵尺寸、覆蓋及邊緣放置誤差。

【0084】x射線偵測器119根據一SXR散射測量之測量收集自樣品101散射之x射線輻射118且產生指示對入射x射線輻射敏感之樣品101之性質之輸出信號135。在某些實施例中，經散射x射線118由x射線偵測器119收集，而樣品定位系統140將樣品101定位且定向以產生經角度解析之經散射x射線。

【0085】在某些實施例中，一SXR散射測量系統包含具有高動態範圍(例如，大於 10^5)之一或多個光子計數偵測器。在某些實施例中，一單個光子計數偵測器偵測所偵測光子之位置及數目。

【0086】在某些實施例中，x射線偵測器解析一或多個x射線光子能量且針對每一x射線能量分量產生指示樣品之性質之信號。在某些實施例中，x射線偵測器119包含以下各項中之任一者：一CCD陣列、一微通道板、一光電二極體陣列、一微條帶比例計數器、一以氣體填充之比例計數器、一閃爍器或一螢光材料。

【0087】以此方式，除像素位置及計數數目之外，還藉由能量來區分偵測器內之X射線光子相互作用。在某些實施例中，藉由比較X射線光子相互作用之能量與一預定上部臨限值及一預定下部臨限值來區分X射線光子相互作用。在一項實施例中，經由輸出信號135將此資訊傳遞至計算

系統130以進行進一步處理及儲存。

【0088】歸因於繞射中之角度色散，在偵測器平面處分離由具有多個照射波長之一週期性目標之同時照射引起之繞射圖案。在此等實施例中，採用積分偵測器。使用面積偵測器(例如，真空相容背側CCD或混合像素陣列偵測器)來測量繞射圖案。針對布拉格(Bragg)峰值積分而最佳化角度取樣。若採用像素位準模型擬合，則針對信號資訊內容而最佳化角度取樣。選擇取樣率以防止零階信號飽和。

【0089】在某些實施例中，可期望以大波長範圍、入射角範圍及方位角範圍執行測量以增加所測量參數值之精度及準確度。此方法藉由延伸可用於分析之資料集之數目及多樣性來減少參數當中之相關性。

【0090】收集經繞射輻射之強度依據相對於晶圓表面法線之照射波長及x射線入射角之測量。含納於多個繞射階中之資訊在考量中之每一模型參數之間通常係唯一的。因此，x射線散射以小誤差及經減少參數相關性產生所關注參數之值之估計結果。

【0091】在某些實施例中，計量工具100包含固定地支撐晶圓101且耦合至樣品定位系統140之一晶圓卡盤103。樣品定位系統140經組態以相對於照射束114以六個自由度主動定位樣品101。在一項實例中，計算系統130將命令信號(未展示)傳遞至指示樣品101之所期望位置之樣品定位系統140。作為回應，樣品定位系統140向樣品定位系統140之各種致動器產生命令信號以達成對樣品101之所期望定位。

【0092】在一其他態樣中，採用一SXR散射測量系統以基於經散射光之一或多個繞射階而判定一樣品之性質(例如，結構參數值)。如圖3中所繪示，計量工具100包含經採用以獲取由偵測器119產生之信號135且至

少部分地基於所獲取信號而判定樣品之性質之一計算系統130。

【0093】SXR散射測量使得能夠對設計規則目標進行覆蓋測量，此乃因照射波長短於所測量結構之週期。與其中對大於設計規則目標之覆蓋進行測量之現有技術相比，此提供一顯著益處。SXR波長之使用准許目標設計依程序設計規則(亦即，沒有「非零偏移」)。非零偏移之減小係經減小圖案放置誤差及為在裝置間距處進行圖案化而最佳化之一程序之結果。圖案放置誤差取決於由圖案間距驅動之製造程序。隨著圖案間距減小，圖案放置誤差亦減小。而且，隨著將製造程序最佳化至裝置間距，裝置特性圖案之局域不對稱變形(例如，類似裝置之圖案)減少。

【0094】用於SXR測量之一覆蓋計量目標可包含一個一維週期性陣列或二維週期性陣列。一維目標沿著入射平面展現大角度發散，從而增加通量及輸送量。對於二維目標，繞射角度色散對於兩個平面中軸係不等效的。因此，對於平行於入射平面之樣本方向，可施加一額外超週期。在此等實例中，藉由一單個子系統在同一目標上旋轉晶圓並執行依序正交測量可係有利的。

【0095】在一項態樣中，基於非零繞射階，採用SXR散射測量信號來解析覆蓋誤差。歸因於SXR輻射之相對短波長，非零繞射階及特定而言 ± 1 繞射階提供對覆蓋誤差之相對高敏感度。

【0096】一般而言，目標設計及相關聯測量演算法取決於是採用0階還是1階散射測量而不同。對於0階散射測量，一計量目標之每一所測量區(亦即，單元)依據波長、入射角及方位角而產生一單個0階信號。然而，對於1階散射測量，一計量目標之每一所測量區(亦即，單元)依據波長、入射角及方位角而產生兩個信號，亦即， $+1$ 繞射階信號及 -1 繞射階信號。

因此，在某些實例中，基於第1級散射測量，需要較少單元來提取充足信號資訊以解析一所關注參數，例如，覆蓋或一形狀參數。在此等實例中，可採用較小計量目標。為了高效，第1級散射測量需要相對高的光瞳均勻性。減小光瞳非均勻性效應之校準方法提供於Mieher等人且受讓與KLA-Tencor公司之美國專利公開案第2004/0169861號中，該美國專利公開案之內容以其全文引用方式併入本文中。

【0097】在一其他態樣中，採用零階、非零階或其任一組合下之SXR散射測量信號來解析表徵被測結構形狀參數之值，例如，CD、H、SWA、輪廓參數等。在某些實施例中，依據自同一計量目標收集之SXR散射測量之測量同時執行SXR散射測量覆蓋及形狀參數測量。此使得能夠測量邊緣放置誤差(EPE)，諸如端線縮短、線至觸點距離等。因此，SXR散射測量在不具有歸因於目標偏置之誤差的情況下達成邊緣放置誤差(EPE)測量，該目標偏置在對不同目標執行覆蓋及CD測量時發生。另外，對來自同一計量目標之覆蓋及CD結構參數進行同時測量改良測量準確度及輸送量兩者。

【0098】在一項實例中，基於如本文中所闡述之一覆蓋測量以及基於在多個不同入射角及多個不同方位角處測量之每一x射線繞射階內之強度測量之一形狀參數之一測量而估計層之間的一邊緣放置誤差。邊緣放置誤差(EPE)組合覆蓋與形狀參數(例如，CD)誤差。在一項實例中，EPE係一CD值(例如，圖8中所繪示之寬度W)與一覆蓋值(例如，圖8中所繪示之覆蓋D)之間的一差。因此，藉由採用本文中所闡述之計算高效的覆蓋測量且使用同一強度測量資料來估計CD參數值而流線化EPE之一測量。

【0099】圖4繪示裝置結構400之一俯視圖，裝置結構400包含作用

場401至404、閘極405至408及觸點409至420。圖4圖解說明閘極407與觸點418之間的邊緣放置距離 EPD_1 。圖4亦圖解說明閘極408與觸點418之間的邊緣放置距離 EPD_2 及閘極406與觸點414之間的邊緣放置距離 EPD_3 。必須小心控制邊緣放置距離以確保高裝置良率。若與此等邊緣放置距離中之任一者相關聯的邊緣放置誤差係過大的，則裝置將失效。如圖4中所圖解說明，覆蓋誤差及CD誤差兩者引起EPE。舉例而言，若與觸點相關聯的層同與閘極相關聯的層未對準，則導致EPE。類似地，若與觸點結構相關聯的CD自標稱尺寸偏離，則導致EPE。舉例而言，觸點413及416係過大的。結果係每一觸點與對應閘極結構之間的重疊及裝置失效。而且，每一所測量結構之三維形狀充當一角色。在某些實例中，不能忽略側壁角度。在此等實例中之某些實施例中，一結構係由一頂部CD尺寸及一底部CD尺寸而非一單個CD尺寸表徵。

【0100】關於EPE測量之額外細節闡述於Shchegrov等人之美國專利公開案第2016/0003609中，該美國專利公開案以其全文引用方式併入本文中。

【0101】在某些實施例中，採用來自在相反方向上各自具有一標稱偏移之一計量目標之兩個單元的SXR散射測量之測量信號來解析覆蓋誤差。

【0102】圖5A繪示具有堆疊在另一光柵結構162A上方之一光柵結構161A之單元160A。光柵結構161A及162A具有相同間距，但光柵結構161A自光柵結構162A偏移一距離，該距離等於在一個方向上之一標稱偏移+OFFSET與一覆蓋誤差OVL之總和。

【0103】圖5B繪示具有堆疊在另一光柵結構162B上方之一光柵結構

161B之單元160B。光柵結構161B及162B具有相同間距，但光柵結構161A自光柵結構162A偏移一距離，該距離等於在與計量目標160A相比相反之方向上之標稱偏移-OFFSET與覆蓋誤差OVL之一總和。標稱地，計量目標160A及160B係相同的，惟頂部光柵結構相對於底部光柵結構之偏移方向係相反的。

【0104】與測量目標相關聯的覆蓋誤差OVL之值係基於與單元160A相關聯的一個+1繞射階及一個-1繞射階內之所偵測強度之間的差以及與單元160B相關聯的+1繞射階及-1繞射階內之所偵測強度之間的一差。在一項實例中，計算系統130判定差信號 D_1 及 D_2 ，如由方程式(1)所說明，其中 I_A^{+1} 係來自單元160A之+1階之所測量強度， I_A^{-1} 係來自單元160A之-1階之所測量強度， I_B^{+1} 係來自單元160B之+1階之所測量強度，且 I_B^{-1} 係來自單元160B之-1階之所測量強度。

$$\begin{aligned} D_1 &= I_A^{+1} - I_A^{-1} \\ D_2 &= I_B^{+1} - I_B^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

【0105】假定差分信號值與實際偏移之間存在一線性關係，那麼覆蓋誤差係由差分信號直接判定，如由方程式(2)所說明，其中偏移係如上文中所闡述之標稱偏移距離之量值。

$$\text{OverlayError} = \text{OFFSET} \left(\frac{D_1 + D_2}{D_1 - D_2} \right) \quad (2)$$

【0106】在某些實例中，基於SXR散射測量之計量涉及判定藉由具有所測量SXR散射測量資料之一經預定測量模型之逆解來表徵樣本之所關注參數，例如，覆蓋誤差、形狀參數等。逆求解方法包含但不限於基於模型之回歸、斷層掃描、機器學習或其任一組合。以此方式，藉由對一參數

化測量模型之值求解來估計目標參數，該等值最小化所測量經散射x射線強度與經模型化結果之間的誤差。

【0107】在某些實施例中，計算系統130經組態以產生一樣品之一所測量結構之一結構模型(例如，幾何模型、材料模型或經組合幾何及材料模型)，產生包含來自結構模型之至少一個幾何參數之一SXR回應模型，且藉由執行SXR測量資料與SXR回應模型之一擬合分析來解析至少一個樣品參數值。使用分析引擎來比較所模擬SXR信號與所測量資料，藉此允許判定樣本之諸如電子密度之幾何以及材料性質。在圖3中所繪示之實施例中，計算系統130被組態為如本文中所闡述之經組態以實施模型構建與分析功能性之一模型構建及分析引擎。

【0108】圖6係圖解說明由計算系統130實施之一例示性模型構建及分析引擎180之一圖式。如圖6中所繪示，模型構建及分析引擎180包含一結構模型構建模組182，其產生一樣品之一所測量結構之一結構模型181。結構模型182被接收為至SXR回應函數構建模組183之輸入。SXR回應函數構建模組183至少部分地基於結構模型182而產生一SXR回應函數模型184。在某些實例中，SXR回應函數模型184係基於x射線形式因子，亦稱為結構因子。

$$F(\vec{q}) = \int \rho(\vec{r}) e^{-i\vec{q} \cdot \vec{r}} d\vec{r} \quad (3)$$

其中F係形式因子，q係散射向量，且 $\rho(r)$ 係球面座標中之樣品之電子密度。接著，x射線散射強度係由以下方程式給出。

$$I(\vec{q}) = F^* F. \quad (4)$$

SXR回應函數模型184被接收為至擬合分析模型185之輸入。擬合分

析模型185比較經模型化SXR回應與對應所測量資料135以判定樣品之幾何以及材料性質。

【0109】在某些實例中，藉由最小化一卡方值來達成經模型化資料與實驗資料之擬合。舉例而言，對於SXR測量，可將一卡方值定義為

$$\chi_{\text{SXR}}^2 = \frac{1}{N_{\text{SXR}}} \sum_j \frac{(S_j^{\text{SXR model}}(v_1, \dots, v_L) - S_j^{\text{SXR experiment}})^2}{\sigma_{\text{SXR},j}^2} \quad (5)$$

【0110】其中， $S_j^{\text{SXR experiment}}$ 係「通道」j中之所測量SXR信號135，其中指數j闡述一組系統參數，諸如繞射階、能量、角度坐標等。 $S_j^{\text{SXR model}}(v_1, \dots, v_L)$ 係針對一組結構(目標)參數 $v_1, \dots, v_L$ 評估之「通道」j之經模型化SXR信號 S_j ，其中此等參數闡述幾何(CD、側壁角度、覆蓋等)及材料(電子密度等)。 $\sigma_{\text{SXR},j}$ 係與第j通道相關聯的不確定因素。 N_{SXR} 係x射線計量中之通道之總數目。 L 係表徵計量目標之參數之數目。

【0111】方程式(5)假定與不同通道相關聯的不確定因素係不相關的。在其中與不同通道相關聯的不確定因素係相關的之實例中，可計算不確定因素之間的一協方差。在此等實例中，可將SXR測量之一卡方值表達為

$$\chi_{\text{SXR}}^2 = \frac{1}{N_{\text{SXR}}} \left(\bar{S}_j^{\text{SXR model}}(v_1, \dots, v_M) - \bar{S}_j^{\text{SXR experiment}} \right)^T V_{\text{SXR}}^{-1} \left(\bar{S}_j^{\text{SXR model}}(v_1, \dots, v_M) - \bar{S}_j^{\text{SXR experiment}} \right) \quad (6)$$

【0112】其中， V_{SXR} 係SXR通道不確定因素之協方差矩陣，且 T 表示轉置。

【0113】在某些實例中，擬合分析模型185藉由對SXR測量資料135與SXR回應模型184執行一擬合分析來解析至少一個樣品參數值。在某些

實例中，將 χ^2_{SXR} 最佳化。

【0114】如上文中所闡述，藉由最小化卡方值來達成SXR資料之擬合。然而，一般而言，可藉由其他函數來達成SXR資料之擬合。

【0115】SXR計量資料之擬合對於提供對所關注幾何及/或材料參數之敏感度之任何類型之SXR技術係有利的。樣品參數可係判定性的(例如，CD、SWA等)或統計的(例如，側壁粗糙度之rms高度、粗糙度相關長度等)，只要使用闡述與樣品之SXR束相互作用之恰當模型即可。

【0116】一般而言，計算系統130經組態以採用即時關鍵尺寸(RTCD)來即時存取模型參數，或其可存取經預計算模型之程式庫以便判定與樣品101相關聯的至少一個樣品參數值之一值。一般而言，可使用某種形式之CD引擎來評估一樣品之經指派CD參數同與所測量樣品相關聯的CD參數之間的差。用於計算樣品參數值之例示性方法及系統闡述於在2010年11月2日頒予KLA-Tencor公司之美國專利第7,826,071號中，該美國專利之全文以引用方式併入本文中。

【0117】在某些實例中，模型構建及分析引擎180藉由側饋分析、前饋分析及並行分析之任一組合來改良所測量參數之準確度。側饋分析係指採取關於同一樣品之不同區上之多個資料集且將自第一資料集判定之共同參數傳送至第二資料集上以供分析。前饋分析係指採取關於不同樣品之資料集且使用一逐步複製準確參數前饋方法將共同參數前向傳遞至後續分析。並行分析係指將一非線性擬合方法並行或同時應用於多個資料集，其中在擬合期間耦合至少一個共同參數。

【0118】多工具及結構分析係指基於回歸、一查找表(亦即，「程式庫」匹配)或多個資料集之另一擬合程序之一前饋、側饋或並行分析。用

於多工具及結構分析之例示性方法及系統闡述於在2009年1月13日頒予KLA-Tencor公司之美國專利第7,478,019號中，該美國專利之全文以引用方式併入本文中。

【0119】在另一其他態樣中，基於以入射x射線束相對於測量目標之一單個定向執行之SXR測量而判定一或多個所關注參數之值之一初始估計。將初始所估計值實施為針對具有以多個定向自SXR測量收集之測量資料之測量模型之一回歸之所關注參數之起始值。以此方式，用一相對小量之計算努力來判定對一所關注參數之一密切估計，且藉由將此密切估計實施為對一大得多之資料集進行一回歸之起始點，用較小總體計算努力來獲得所關注參數之一精細化估計。

【0120】在某些實施例中，基於一基於經訓練機器學習之測量模型，自一或多個非零繞射階內之所偵測強度直接判定與一測量目標或一晶粒中目標相關聯的覆蓋誤差值。在此等實施例中，一基於經訓練機器學習之模型直接自SXR測量資料提取覆蓋誤差。

【0121】在某些實施例中，由SXR計量系統測量之目標並非週期性的，然而基於經訓練機器學習之測量模型能夠自SXR測量提取覆蓋誤差。

【0122】在某些實施例中，基於自具有已知覆蓋誤差值之實驗設計(DOE)目標收集之SXR測量資料而訓練基於機器學習之測量模型。在某些實施例中，與目標相關聯之覆蓋誤差係由一受信任參考計量系統(諸如一基於電子束之計量系統、一掃描電子顯微鏡等)測量。在某些實施例中，DOE目標係設計規則計量目標。在某些實施例中，DOE目標係晶粒中作用裝置結構。

【0123】在某些實施例中，基於機器學習之測量模型係一神經網路模

型、一支援向量機模型等。額外細節闡述於授予Shchegrov等人且受讓與KLA-Tencor公司之美國專利第10,352,876中，該美國專利之內容以其全文引用方式併入本文中。

【0124】在某些其他實施例中，基於自實驗設計(DOE)目標(例如，週期性目標)收集之SXR測量資料及與緊接近於所測量DOE目標之晶粒中作用裝置結構相關聯的已知覆蓋誤差值而訓練基於機器學習之測量模型。在此等實施例中，與晶粒中作用裝置結構相關聯的覆蓋誤差係由一受信任參考計量系統(諸如一基於電子束之計量系統、一掃描電子顯微鏡等)測量。以此方式，基於經訓練機器學習之測量模型基於自一附近設計規則計量目標收集之SXR散射測量之測量資料而估計一晶粒中作用裝置結構之覆蓋誤差。

【0125】圖10圖解說明一半導體晶粒190，其包含作用裝置區191及外切作用裝置區之刻劃線區192。在刻劃線區192內製作若干個設計規則計量目標，諸如設計規則目標193。類似地，在作用裝置區191內製作若干個作用裝置結構，諸如作用裝置結構194。在某些實施例中，一基於經訓練機器學習之測量模型基於對設計規則目標193進行SXR散射測量之測量而估計與作用裝置結構194相關聯的覆蓋誤差。

【0126】關於基於機器學習之測量模型之額外細節闡述於Shchegrov等人之美國專利公開案第2016/0003609號中，該美國專利公開案以其全文引用方式併入本文中。

【0127】在某些其他實施例中，基於自實驗設計(DOE)目標收集之SXR測量資料及基於SXR測量資料判定之形狀參數值而訓練基於機器學習之測量模型。在某些實例中，採用SXR測量資料來估計如上文中所闡述之

形狀參數(例如，CD、H、SWA、輪廓參數等)值。採用此等形狀參數值連同SXR測量資料及與緊接近於所測量DOE目標之晶粒中作用裝置結構相關聯的已知覆蓋誤差值來訓練基於機器學習之測量模型。額外結構資訊改良經訓練模型之準確度。

【0128】在某些實施例中，一基於SXR散射測量之覆蓋測量涉及用SXR輻射照射一樣本且偵測相對於樣本之多個入射角、多個波長或兩者之所得繞射階之強度。而且，基於多個測量例項中之每一者處之一或多個非零繞射階中之每一者內之複數個強度之調變而判定與測量目標相關聯的覆蓋誤差。

【0129】在此等實施例中，以若干個不同入射角及方位角執行一計量目標之SXR散射測量之測量。圖7繪示晶圓101，其包含一計量目標120。一x射線照射源用一x射線輻射束114以一入射角AOI及一方位角Az照射計量目標120。相對於固定至樣品101之一座標系 $\{^BX, ^BY, ^BZ\}$ 而定義入射x射線輻射束之入射角及方位角。如圖7中所繪示，計量目標120包含一光柵結構，其在 BY 方向上延伸且在 BX 方向上係週期性的。將入射角定義為入射束相對於 BZ 軸投射至 BX - BZ 平面上之角度。在此意義上，可將入射角之改變視為晶圓101圍繞與晶圓101共面之 BY 軸之一旋轉。類似地，將方位角定義為入射束相對於 BX 軸投射至 BX - BY 平面上之角度。在此意義上，可將方位角之改變視為晶圓101圍繞法向於晶圓101之 BZ 軸之一旋轉。

【0130】如圖3中所圖解說明，計量工具100包含一樣品定位系統140，其經組態以在相對於SXR散射計之一大的平面外角度定向範圍內既將樣品101對準又將樣品101定向。換言之，樣品定位系統140經組態以在

一大角度範圍內圍繞一或多個旋轉軸旋轉樣品101，該一或多個旋轉軸與樣品101之表面共面且法向於樣品101之表面而對準。以此方式，樣品101之表面上之每個位置可用於在一旋轉範圍內圍繞固定至樣品101之座標系 $\{^BX, ^BY, ^BZ\}$ 之軸進行測量。

【0131】在圖3中所繪示之實施例中，圖解說明一單個入射x射線輻射束。單個束相對於晶圓之定向係由一單個標稱入射角及方位角定義。對於採用一單個照射束之實施例，依序執行與多個不同入射角及方位角相關聯的x射線繞射測量。然而，一般而言，可同時執行與多個不同入射角及方位角相關聯的x射線繞射測量。在某些實施例中，可採用一或多個x射線源及一或多組x射線光學器件，使得在入射角及方位角中離散或連續地自多個方向同時照射計量目標。

【0132】當以多個不同入射角及多個不同方位角進行測量時，計量目標之不同層中之兩個或更多個結構之垂直堆疊以一強烈且獨特方式影響經x射線繞射之信號。因此，可基於所測量強度而估計覆蓋及形狀參數值。

【0133】在此等實施例中，覆蓋之估計涉及共同階之強度調變之一參數化，使得一低頻率形狀調變係由一基函數集或比率闡述，且一高頻率覆蓋調變係由包含指示覆蓋之一參數之一仿射圓函數闡述。

【0134】在一項實例中，自一正準覆蓋問題之一分析導出參數化。圖8繪示一層式計量目標150，其包含各自具有週期性P之兩個週期性線陣列151及152。線陣列係藉由一距離S來垂直分離，且線陣列係藉由覆蓋距離D來偏移。線陣列中之每一者之高度及寬度分別由參數H及W賦予。

【0135】另外，頂部線之電子密度係由參數 δ_0 賦予，且底部線由 δ_1

賦予。計量目標150係由具有一波長 λ 之一x射線輻射束照射。當光射線之投射垂直於光柵之週期性時，入射x射線輻射束以一入射角 θ 及一方位角 φ 照射在計量目標上，其中 $\varphi=0$ 。對於此一光柵，我們將波長數目定義為 $k_0=2\pi/\lambda$ ，且將1D週期性方向上之光柵數目定義為 $k_x=2\pi/P$ ，其中 m 係階數。依據法向於晶圓之軸來測量入射角。

【0136】繞射強度之一分析提供每一階之強度之一近似值，如方程式(7)中所說明。

$$I = \left| \frac{k_0 W H}{P \cos \theta} \right|^2 \sin^2 \left[\frac{m k_x W}{2} \right] \sin^2 \left[\frac{m k_x H \tan \theta \cos \varphi}{2} \right] \left(\delta_0^2 + \delta_1^2 + 2 \delta_0 \delta_1 \cos(m k_x (D + S \tan \theta \cos \varphi)) \right) \quad (7)$$

【0137】方程式(7)說明，不僅藉由改變入射角 θ 而且藉由改變方位角 φ 而存在階強度之一調變。以另一方式陳述，藉由改變入射角，我們可期望繞射階自與^BX對準之光柵週期性尺寸之投射至與^BZ對準之方向之一調變。另外，藉由改變方位角，我們可期望繞射階自與^BX對準之光柵週期性尺寸之投射至與^BY對準之方向之一調變。另外，可協調入射角及方位角之改變以增強覆蓋信號。舉例而言，歸因於入射角因比例因子 $\cos(\varphi)$ 之改變，改變方位角可減慢形狀及覆蓋調變。最終，方程式(7)亦說明，歸因於形狀參數 W 及 H 之階強度之調變相對於方程式(7)之最後一項所闡述之覆蓋調變通常係具低空間頻率的。

【0138】歸因於由於形狀引起之相對低空間頻率調變，此調變可藉由一低階多項式(例如，一線性或二次函數)來模型化。接著，歸因於分離距離 S 及覆蓋 D 之調變可由方程式(7)中所說明之餘弦項表示。因此，每一階之強度之一經簡化模型分別採取如由方程式(8a)及(8b)所說明之一加法及乘法形式。

$$I = \sum_{j=0}^N a_j \theta^j + b \cos\{mk_x(D + S \tan \theta \cos \varphi)\} \quad (8a)$$

$$I = \left\{ \sum_{j=0}^N a_j \theta^j \right\} \{b \cos\{mk_x(D + S \tan \theta \cos \varphi)\}\} \quad (8b)$$

【0139】在不具有形狀之明確知識的情況下，由方程式(8a)之第一項及方程式(8b)之第一因子定義之形狀函數將形狀調變模型化為由參數 a_j 加權之基函數 θ^j 之一線性組合。如方程式(8a)及(8b)中所說明，採用一單項式基來闡述形狀改變。然而，一般而言，可採用任何多項式、有理數或任何種類之基集。

【0140】參數 b 定義調變深度。參數 D 及 S 定義覆蓋。藉由改變入射角、方位角或兩者，可使用任何適合曲線擬合常式將任何階之所得資料與參數 a_j 、 b 、 D 及 S 擬合。覆蓋係由參數 D 之擬合賦予。

【0141】上文中所闡述之用於覆蓋測量之經簡化模型圖解說明基於入射角及方位角之改變而模型化繞射階之強度變化之一現象學方法。一般而言，該模型可係基於其他波形及非多項式基函數。

【0142】藉由將所測量強度信號與現象學簡單函數擬合，可以一計算高效之方式估計與多個層相關聯的覆蓋偏移。因此，以一相對低計算成本執行且不具有外部參考計量測量，從而克服基於SEM、光學計量或其他所提議x射線計量技術之當前方法之限制。

【0143】圖9繪示對指示圖8中所繪示之計量目標150之擬合結果進行模擬之一曲線圖170。標繪線171繪示對一角範圍之-2繞射階之正規化強度之一模擬。標繪線172繪示對同一角範圍之+2繞射階之正規化強度之一模擬。標繪線173繪示藉由參考方程式(8)所闡述之類型之一模型之所模擬繞射強度之一擬合之結果。如圖9中所圖解說明，參考方程式(8)所闡述之經

簡化模型提供與所模擬強度值之一接近擬合。

【0144】如由方程式(8)所說明，覆蓋調變係繞射階之一偶函數。因此，可平均或聯合擬合來自正階及負階兩者資料。另外，可聯合擬合多個階。在某些實例中，角空間中之不同範圍可用於每一不同繞射階。額外細節闡述於Hench等人且受讓與KLA-Tencor公司之WIPO公開案第WO2016176502A1號中，該WIPO公開案之內容以其全文引用方式併入本文中。

【0145】在某些實施例中，實際裝置目標係非週期性的。藉由將覆蓋測量校準至一參考測量，基於對具有充足週期性之設計規則目標進行測量，SXR散射測量技術可用於估計非週期性結構之覆蓋。此有效地克服需要所測量目標係週期性或大約週期性的之散射測量之測量之限制。

【0146】在某些實施例中，作為開發後檢測(ADI)程序監視之部分，採用經校準SXR測量來估計與晶粒中作用裝置結構相關聯的覆蓋誤差。在某些實施例中，晶粒中作用裝置結構係非週期性邏輯裝置。

【0147】在某些實施例中，採用一單個覆蓋誤差校準值來校準基於SXR散射測量之覆蓋測量。採用一參考計量系統(例如，一SEM)來測量與一晶粒中作用裝置結構相關聯的覆蓋誤差。另外，採用一SXR散射測量系統(例如，SXR散射測量工具100)來測量一附近設計規則計量目標。由SXR散射測量系統測量之覆蓋誤差與由參考計量系統測量之覆蓋誤差之間的差係覆蓋誤差校準值。設計規則計量目標之後續覆蓋測量由覆蓋誤差校準值調整以估計與一附近晶粒中作用裝置結構相關聯的覆蓋誤差。更具體而言，將覆蓋誤差校準值添加至由SXR散射計測量之覆蓋誤差以估計與晶粒中作用裝置結構相關聯的覆蓋誤差。此方法之一限制係，其不補償由對

不同於SXR測量之一目標執行參考測量之事實誘發之目標誤差。

【0148】在一項實例中，此限制係藉由將一SEM校準後饋至晶粒中作用裝置結構之一SXR測量來克服。此方法在其中SXR測量不對所測量目標施加任何實體改變的情形中係可行的。

【0149】在另一實例中，採用兩個覆蓋誤差校準值來校準基於SXR散射測量之覆蓋測量。在此等實施例中，採用一參考計量系統(例如，一SEM)來測量與一晶粒中作用裝置結構相關聯的覆蓋誤差且測量與一附近設計規則計量目標相關聯的覆蓋誤差。另外，採用一SXR散射測量系統(例如，SXR散射測量工具100)來測量與附近設計規則計量目標相關聯的覆蓋誤差。與由參考計量系統測量之晶粒中作用裝置結構相關聯的覆蓋誤差同與附近設計規則計量目標相關聯的覆蓋誤差之間的差係第一覆蓋誤差校準值。與由參考計量系統測量之設計規則目標相關聯的覆蓋誤差同與由SXR散射測量系統測量之設計規則目標相關聯的覆蓋誤差之間的差係第二覆蓋誤差校準值。設計規則計量目標之後續覆蓋測量係藉由第一及第二覆蓋誤差校準值兩者來調整以估計與一附近晶粒中作用裝置結構相關聯的覆蓋誤差。更具體而言，將第一及第二覆蓋誤差校準值添加至由SXR散射計測量之覆蓋誤差以估計與晶粒中作用裝置結構相關聯的覆蓋誤差。

【0150】由一電子束工具執行之參考測量可在高(例如，10 kV或更高)電壓下執行以將一或多個下伏層成像。一般而言，可調整電子束工具之著陸能量以最大化成像效能。

【0151】如本文中所闡述之一SXR散射測量工具能夠執行與半導體製造相關之諸多不同類型之測量。舉例而言，可採用一SXR散射測量工具來測量一或多個目標之特性，諸如關鍵尺寸、覆蓋、側壁角度、膜厚度、

程序相關參數(例如，焦點及/或劑量)等。測量目標可包含週期性之所關注區域，諸如一記憶體晶粒中之光柵。測量目標可包含多個層，且一或多個層之厚度可由一SXR散射測量工具測量。測量目標可位於一刻劃線內或位於晶粒自身內。在某些實施例中，多個目標係由一或多個計量工具同時或依序測量，如US 7,478,019中所闡述，該US 7,478,019之內容以其全文引用方式併入本文中。舉例而言，來自此等測量之資料可經組合且用於一半導體製造程序中，以前饋、後饋及側饋對程序(例如，微影、蝕刻)之校正。

【0152】所關注參數之測量通常涉及若干個演算法。在某些實施例中，使用一電磁解算器來模型化入射束與樣本之相互作用，且使用諸如RCWA、FEM、矩量法、表面積分法、體積積分法、FDTD、波恩(Born)近似法(BA)、畸變波BA (DWBA)及其他演算法之演算法。對於一基於模型之測量，通常使用一幾何引擎或在某些情形中一程序模型化引擎或兩者之一組合來模型化所關注目標。舉例而言，在自KLA公司(Milpitas, California)購得之AcuShape軟體中實施一幾何引擎。

【0153】可藉由若干種資料擬合及最佳化技術及技藝來分析所收集資料，該等資料擬合及最佳化技術及技藝包含：程式庫；快速降階模型；回歸；機器學習演算法，諸如神經網路、支援向量機(SVM)；降維演算法，諸如PCA (主要分量分析)、ICA (獨立分量分析)、LLE (局部線性嵌入)；稀疏表示，諸如傅立葉變換或小波變換；卡爾曼濾波器；促進相同或不同工具類型間匹配之演算法以及其他。亦可藉由不包含模型化、最佳化及/或擬合之演算法來分析所收集資料，以提取關於結構之尺寸及材料資訊。

【0154】在某些實施例中，設計一多層覆蓋計量目標，使得兩個層之每一組合之間的該組分離參數係不同的，且最大化所有層組合之間的最小分離距離，此受製於對計量目標之整體高度之一約束。

【0155】在某些實施例中，以在不同層處具有不同間距來設計一多層覆蓋計量目標，使得自一個層產生之一繞射階相長地干涉另一層之一不同繞射階。在一項實施例中，位於一第一層中之一週期性光柵結構具有等於 $2A$ 之一間距，其中 A 係一任意正值常數。位於一不同層中之另一週期性結構具有等於 $3A$ 之一間距。在此實例中，第一層之第二繞射階相干地干涉第二層之第三繞射階。因此，在此等階對處偵測之強度測量係藉由兩個層之間的覆蓋來主導。相反地，不受製於覆蓋之相長干涉的在不同階數對處偵測之強度測量係藉由形狀參數來主導。因此，在某些實施例中，將一計量覆蓋目標設計成具有特定光柵結構，以增加在特定光柵階對處對覆蓋之敏感度，且亦提供對形狀參數值估計有用之強度資料。

【0156】類似地，將一多層覆蓋計量目標設計成在不同層處具有不同間距定向，使得自一個層產生之一繞射階相長地干涉另一層之一不同繞射階。一般而言，具有不同週期性(例如，不同光柵間距)、不同間距定向或其任一組合之一組層產生一組散射向量，每一散射向量與一不同層相關聯。覆蓋計量目標被設計成使得一預定子組之散射向量被對準。以此方式，對與預定子組之散射向量對應之層當中之覆蓋之敏感度得到增強。

【0157】一般而言，一覆蓋計量目標可包含1D週期性結構(亦即，其中在一個方向上係週期性的且在另一方向上係恆定的)、2D週期性結構(亦即，在兩個方向上係週期性的)或其任一組合。對於2D週期性目標，兩個週期性方向可或可不彼此垂直。而且，組成結構中之每一者之間距可係相

同或不同的。

【0158】應認識到，本發明通篇所闡述之各種步驟可由一單電腦系統130或(另一選擇係)一多電腦系統130執行。而且，系統100之不同子系統(諸如樣品定位系統140)可包含適合於執行本文中所闡述之步驟之至少一部分之一電腦系統。因此，前述說明不應解釋為對本發明之一限制而僅為一說明。此外，一或多個計算系統130可經組態以執行本文中所闡述之方法實施例中之任一者之任一(任何)其他步驟。

【0159】另外，電腦系統130可以此項技術中已知之任何方式通信地耦合至偵測器119及照射光學器件115。舉例而言，一或多個計算系統130可耦合至分別與偵測器119及照射光學器件115相關聯的計算系統130。在另一實例中，偵測器119及照射光學器件115中之任一者可由耦合至電腦系統130之一單電腦系統直接控制。

【0160】電腦系統130可經組態以藉由可包含有線及/或無線部分之一傳輸媒體自系統之子系統(例如，偵測器119、照射光學器件115及諸如此類)接收及/或獲取資料或資訊。以此方式，傳輸媒體可充當電腦系統130與系統100之其他子系統之間的一資料鏈路。

【0161】計量系統100之電腦系統130可經組態以藉由可包含有線及/或無線部分之一傳輸媒體自其他系統接收及/或獲取資料或資訊(例如，測量結果、模型化輸入、模型化結果等)。以此方式，傳輸媒體可充當電腦系統130與其他系統(例如，記憶體板上計量系統100、外部記憶體或外部系統)之間的一資料鏈路。舉例而言，計算系統130可經組態以經由一資料鏈路自一儲存媒體(亦即，記憶體132或190)接收測量資料(例如，信號135)。舉例而言，使用由偵測器119收集之散射測量資料可儲存於一永久

或半永久記憶體裝置(例如，記憶體132或190)中。就此而言，可自板上記憶體或自一外部記憶體系統導入測量結果。而且，電腦系統130可經由一傳輸媒體將資料發送至其他系統。舉例而言，由電腦系統130判定之覆蓋值186可儲存於一永久或半永久記憶體裝置(例如，記憶體190)中。就此而言，測量結果可導出至另一系統。

【0162】計算系統130可包含但不限於一個人電腦系統、大型電腦系統、工作站、影像電腦、並行處理器或此項技術中已知之任一其他裝置。一般而言，術語「計算系統」可寬泛地定義為涵蓋具有執行來自一記憶體媒體之指令之一或多個處理器之任一裝置。

【0163】實施諸如本文中所闡述之彼等方法之方法之程式指令134可經由一傳輸媒體(諸如一導線、電纜或無線傳輸鏈路)傳輸。舉例而言，如圖3中所圖解說明，儲存於記憶體132中之程式指令經由匯流排133傳輸至處理器131。程式指令134儲存於一電腦可讀媒體(例如，記憶體132)中。例示性電腦可讀媒體包含唯讀記憶體、一隨機存取記憶體、一磁碟或光碟，或者一磁帶。

【0164】在某些實施例中，將如本文中所闡述之一散射測量分析實施為一製作程序工具之部分。製作程序工具之實例包含但不限於微影曝光工具、膜沈積工具、植入工具及蝕刻工具。以此方式，使用一SXR散射測量分析之結果來控制一製作程序。在一項實例中，將自一或多個目標收集之SXR散射測量之測量資料發送至一製作程序工具。如本文中所闡述地分析SXR散射測量之測量資料且使用結果來調整製作程序工具之操作。

【0165】可使用如本文中所闡述之散射測量之測量來判定各種半導體結構之特性。例示性結構包含但不限於FinFET、低尺寸結構(諸如奈米

線或石墨烯)、小於10 nm之結構、微影結構、穿基板通孔(TSV)、記憶體結構(諸如DRAM、DRAM 4F2、快閃、MRAM)及高縱橫比記憶體結構。例示性結構特性包含但不限於幾何參數(諸如線邊緣粗糙度、線寬度粗糙度、孔大小、孔密度、側壁角度、輪廓、關鍵尺寸、間距)及材料參數(諸如電子密度、組合物、顆粒結構、形態、應力、應變及元素識別)。

【0166】圖11圖解說明適合於藉由本發明之計量系統100之實施方案之一方法200。在一項態樣中，應認識到，可經由由計算系統130之一或多個處理器執行之一預程式化演算法實施方法200之資料處理方塊。雖然在計量系統100之內容脈絡中提出以下說明，但在本文中應認識到，計量系統100之特定結構態樣不表示限制且應僅解釋為說明性的。

【0167】在方塊201中，用具有在介於10與5,000電子伏特之間的一範圍中之能量之一軟性X射線(SXR)輻射束照射安置在一基板上之一設計規則目標之一第一例項。該設計規則目標係一多層目標。

【0168】在方塊202中，偵測與回應於入射SXR輻射束而自設計規則目標之第一例項散射之一SXR輻射量之 $+1/-1$ 繞射階相關聯的第一複數個強度。

【0169】在方塊203中，基於 $+1/-1$ 繞射階內之第一複數個所偵測強度而估計與設計規則目標之第一例項相關聯的第一覆蓋誤差值。

【0170】在方塊204中，基於藉由一掃描電子顯微鏡對一第一晶粒中作用裝置結構之一測量而估計與第一晶粒中作用裝置結構相關聯的一覆蓋誤差值。根據同一製作程序規則來製作設計規則目標之第一例項及第一晶粒中作用裝置結構。

【0171】在方塊205中，基於與第一晶粒中作用裝置結構相關聯的覆

蓋誤差值以及與設計規則目標之第一例項相關聯的第一覆蓋誤差值而判定一覆蓋校準值。

【0172】如本文中所闡述，術語「關鍵尺寸」包含一結構之任何關鍵尺寸(例如，底部關鍵尺寸、中間關鍵尺寸、頂部關鍵尺寸、側壁角度、光柵高度等)、任何兩個或兩個以上結構之間的一關鍵尺寸(例如，兩個結構之間的距離)，以及兩個或兩個以上結構之間的一位移(例如，覆蓋光柵結構之間的覆蓋位移等)。結構可包含三維結構、經圖案化結構、覆蓋結構等。

【0173】如本文中所闡述，術語「關鍵尺寸應用」或「關鍵尺寸測量應用」包含任何關鍵尺寸測量。

【0174】如本文中所闡述，術語「計量系統」包含至少部分地用於在包含關鍵尺寸應用及覆蓋計量應用之任何態樣中表徵一樣品之任何系統。然而，此等技術術語並不限制如本文中所闡述之術語「計量系統」之範疇。另外，本文中所闡述之計量系統可經組態以用於測量經圖案化晶圓及/或未圖案化晶圓。計量系統可組態為一LED檢測工具，邊緣檢測工具、背側檢測工具、大型檢測工具或多模式檢測工具(涉及同時來自一或多個平臺之資料)，以及受益於被測成像或結構之任何其他計量或檢測工具。

【0175】在本文中闡述各種實施例用於可用於處理一樣品之一半導體處理系統(例如，一計量系統或一微影系統)。本文中所使用之術語「樣品」係指一晶圓、一倍縮光罩或可由此項技術中已知之方式進行處理(例如，印刷或檢測缺陷)之任何其他樣本。

【0176】如本文中所使用，一般而言，術語「晶圓」係指由一半導

體或非半導體材料形成之基板。實例包含但不限於單晶矽、砷化鎵及磷化銦。此等基板通常可發現於及/或處理於半導體製作設施中。在某些情形中，一晶圓可僅包含基板(亦即，裸晶圓)。另一選擇係，一晶圓可包含形成於一基板上之一或多個不同材料層。形成於一晶圓上之一或多個層可「經圖案化」或「未經圖案化」。舉例而言，一晶圓可包含具有可重複圖案特徵之複數個晶粒。

【0177】一「倍縮光罩」可係在一倍縮光罩製作程序之任何階段處之一倍縮光罩或者可或不可被釋放以供在一半導體製作設施中使用之一完成倍縮光罩。一倍縮光罩或一「遮罩」通常定義為其上實質上形成有且組態成一圖案之不通透區域之一實質上透明基板。舉例而言，基板可包含諸如非晶 SiO_2 之一玻璃材料。一倍縮光罩可在一微影程序之一曝光步驟期間沈積於一抗蝕劑覆蓋之晶圓上方，使得可將倍縮光罩上之圖案轉印至抗蝕劑。

【0178】形成於一晶圓上之一或多個層可經圖案化或未圖案化。舉例而言，一晶圓可包含各自具有可重複圖案特徵之複數個晶粒。此等材料層之形成及處理可最終產生完成裝置。可在一晶圓上形成諸多不同類型之裝置，且如本文中所使用之術語晶圓意欲涵蓋其上製作有此項技術中已知之任何類型之裝置的一晶圓。

【0179】在一或多項例示性實施例中，所闡述之功能可以硬體、軟體、韌體或其任一組合實施。若以軟體實施，則該等功能可作為一或多個指令或碼儲存於一電腦可讀媒體上或者經由一電腦可讀媒體傳輸。電腦可讀媒體包含電腦儲存媒體及通信媒體兩者，該通信媒體包含促進將一電腦程式自一個地方遞送至另一地方之任何媒體。一儲存媒體可係可由一個一

般用途或特殊用途電腦存取之任何可用媒體。藉由實例而非限制方式，此電腦可讀媒體可包括：RAM、ROM、EEPROM、CD-ROM或其他光碟儲存裝置、磁碟儲存裝置或其他磁性儲存裝置或者可用於以指令或資料結構之形式載運或儲存所期望程式碼構件且可由一個一般用途或特殊用途電腦或者一個一般用途或特殊用途處理器存取之任何其他媒體。而且，可將任何連接恰當地稱為一電腦可讀媒體。舉例而言，若使用一同軸電纜、光纖電纜、雙絞線、數位用戶線(DSL)或無線技術(諸如紅外線、無線電及微波)自一網站、伺服器或其他遠端源傳輸軟體，則該同軸電纜、光纖電纜、雙絞線、DSL或無線技術(諸如紅外線、無線電及微波)皆包含於媒體之定義中。如本文中所使用，磁碟及碟片包含光碟(CD)、雷射碟片、XRF碟片、數位多功能碟片(DVD)、軟磁碟及藍光碟片，其中磁碟通常以磁性方式複製資料而碟片藉助雷射以光學方式複製資料。上文之組合亦應包含於電腦可讀取媒體之範疇內。

【0180】儘管在上文中出於指導性目的而闡述某些特定實施例，但本專利文件之教示內容具有一般適用性且不限於上文所闡述之特定實施例。因此，可在不違背如申請專利範圍中所陳述之本發明之範疇的情況下實踐對所闡述之實施例之各種特徵之各種修改、改動及組合。

【符號說明】

【0181】

- 10: 靜態隨機存取記憶體區
- 11: 線結構
- 12: 底部抗反射塗佈層
- 13: 抗蝕劑層

14: 開口

100: 軟性X射線計量工具/軟性X射線散射測量工具/系統/計量工具/
計量系統/記憶體板上計量系統

101: 晶圓/樣品

102: 測量區/有限場點大小

103: 晶圓卡盤

110: x射線照射源/照射源

111: 聚焦光學器件

112: 束髮散控制狹縫/束狹縫

113: 狹縫/束狹縫/束塑形狹縫

114: 照射束/入射束

115: 致動器系統/照射光學器件

116: 射線

118: x射線輻射/經散射x射線

119: x射線偵測器/偵測器

120: 計量目標

130: 計算系統/單電腦系統/多電腦系統/電腦系統

131: 處理器

132: 記憶體

133: 匯流排

134: 程式指令

135: 輸出信號/信號/對應所測量資料/所測量軟性X射線信號/軟性X
射線測量資料

- 136: 命令信號
- 137: 命令信號
- 138: 命令信號
- 139: 命令信號
- 140: 樣品定位系統
- 150: 層式計量目標/計量目標
- 151:線
- 152:線
- 160A: 單元/計量目標
- 160B: 單元/計量目標
- 161A: 光柵結構
- 161B: 光柵結構
- 162A: 光柵結構
- 162B:光柵結構
- 170: 曲線圖
- 171 - 173: 曲線
- 180: 模型構建及分析引擎
- 181: 結構模型
- 182: 結構模型構建模組/結構模型
- 183: 軟性X射線回應函數構建模組
- 184: 軟性X射線回應函數模型
- 185: 擬合分析模型
- 186: 覆蓋值

190: 半導體晶粒/記憶體

191: 作用裝置區

192: 刻劃線區

193: 設計規則目標

194: 作用裝置結構

200: 例示性方法/方法

201 - 205: 方塊

400: 裝置結構

401 - 404: 作用場

405 - 408: 閘極

409 - 420: 觸點

AOI: 入射角

AZ: 方位角

^BX: 方向/軸

^BY: 方向/軸

^BZ: 軸

D: 覆蓋/覆蓋距離/參數

EPD₁: 邊緣放置距離

EPD₂: 邊緣放置距離

EPD₃: 邊緣放置距離

G: 標稱入射角

H: 參數/形狀參數

OVL: 覆蓋誤差

P: 週期性

S: 距離/分離距離/參數

W: 寬度/參數/形狀參數

+OFFSET: 標稱偏移

-OFFSET: 標稱偏移

【發明申請專利範圍】

【請求項1】

一種計量系統，其包括：

一軟性X射線(SXR)照射源，其經組態以用具有在介於10與5,000電子伏特之間的一範圍中之能量之一SXR輻射束照射安置在一基板上之一測量目標之一第一例項，其中該測量目標包含：一第一結構，其安置於在該基板上方之一第一高度處製作之一第一層中；及一第二結構，其安置於在該基板上方之一第二高度處製作之一第二層中；

一x射線偵測器，其經組態以偵測各自與回應於入射x射線輻射束而自該測量目標散射之一x射線輻射量之一或多個非零繞射階相關聯的複數個強度；及

一計算系統，其經組態以：

基於該一或多個非零繞射階中之每一者內之該複數個所偵測強度而估計與該測量目標或一對應晶粒中作用裝置結構相關聯的一覆蓋誤差值。

【請求項2】

如請求項1之計量系統，該x射線偵測器進一步經組態以偵測與回應於該入射x射線輻射束而自該測量目標散射之該x射線輻射量之一零繞射階相關聯的一強度，且該計算系統進一步經組態以：

基於該零繞射階內之該所偵測強度、該一或多個非零x射線繞射階中之每一者內之該複數個所偵測強度或其任一組合而估計表徵該測量目標之一形狀之一或多個參數之一值；及

基於該所估計覆蓋值及表徵該測量目標之該形狀之該一或多個參數

之該所估計值而估計該測量目標之一邊緣放置誤差之一值。

【請求項3】

如請求項1之計量系統，該SXR照射源進一步經組態以用該SXR輻射束照射安置在該基板上之該測量目標之一第二例項，其中該測量目標之該第一例項之該第一結構在與該第一層對準之一方向上自該測量目標之該第一例項之該第二結構偏移一偏移距離，其中該測量目標之該第二例項之該第一結構在同與該第一層對準之該方向相反之一方向上自該測量目標之該第二例項之該第二結構偏移該偏移距離，該x射線偵測器經組態以偵測各自與回應於該入射x射線輻射束而自該測量目標之該第二例項散射之一x射線輻射量之一或多個非零繞射階相關聯的複數個強度，且其中對與該測量目標相關聯的該覆蓋誤差值之該估計係基於與該測量目標之該第一例項相關聯的一+1繞射階及一-1繞射階內之該等所偵測強度之間的差以及與該測量目標之該第二例項相關聯的該+1繞射階及該-1繞射階內之該等所偵測強度之間的一差。

【請求項4】

如請求項1之計量系統，其中對與該測量目標相關聯的該覆蓋誤差值之該估計係基於藉助一基於實體之測量模型對該一或多個非零繞射階內之該等所偵測強度之一擬合分析。

【請求項5】

如請求項1之計量系統，其中該SXR輻射束在多個測量例項處各自以一不同標稱入射角、一不同標稱方位角或兩者入射在該測量目標上。

【請求項6】

如請求項5之計量系統，其中對與該測量目標相關聯的該覆蓋誤差值

之該估計係基於該多個測量例項中之每一者處之該一或多個非零繞射階中之每一者內之該複數個強度中之調變。

【請求項7】

如請求項1之計量系統，其中與該測量目標或該對應晶粒中目標相關聯的該覆蓋誤差值係藉由一基於經訓練機器學習之測量模型自該一或多個非零繞射階內之該等所偵測強度直接判定。

【請求項8】

如請求項7之計量系統，其中該測量目標並非週期性的。

【請求項9】

如請求項7之計量系統，該軟性X射線(SXR)照射源進一步經組態以用具有在介於10與5,000電子伏特之間的一範圍中之能量之該SXR輻射束照射複數個實驗設計(DOE)測量目標，該x射線偵測器進一步經組態以偵測各自與回應於該入射x射線輻射束而自該複數個DOE測量目標中之每一者散射之一x射線輻射量之一或多個非零繞射階相關聯的複數個強度，該計算系統進一步經組態以基於與該等DOE測量目標或對應晶粒中目標中之每一者相關聯的該所偵測複數個強度及已知覆蓋誤差值而訓練該基於機器學習之測量模型。

【請求項10】

如請求項9之計量系統，其中該等已知覆蓋誤差值係藉由一參考計量系統自對該等DOE測量目標或對應晶粒中目標之測量而判定。

【請求項11】

如請求項1之計量系統，其中對與該對應晶粒中作用裝置結構相關聯的該覆蓋誤差值之該判定涉及基於該一或多個非零繞射階中之每一者內之

該複數個所偵測強度的與該測量目標相關聯的該所估計覆蓋誤差值與一校正值之一加總。

【請求項12】

如請求項1之計量系統，其中該第一層係一抗蝕劑層。

【請求項13】

如請求項1之計量系統，其中該測量目標係安置在一刻劃線或一晶粒中作用裝置結構內之一設計規則目標。

【請求項14】

如請求項1之計量系統，其中該對應晶粒中作用裝置結構並非週期性的。

【請求項15】

一種計量方法，其包括：

用具有在介於10與5,000電子伏特之間的一範圍中之能量之一軟性X射線(SXR)輻射束照射安置在一基板上之一設計規則目標之一第一例項，其中該設計規則目標係一多層目標；

偵測與回應於入射SXR輻射束而自該設計規則目標之該第一例項散射之一SXR輻射量之 $+1/-1$ 繞射階相關聯的一第一複數個強度；

基於該 $+1/-1$ 繞射階內之該第一複數個所偵測強度而估計與該設計規則目標之該第一例項相關聯的一第一覆蓋誤差值；

基於藉由一掃描電子顯微鏡對一第一晶粒中作用裝置結構之一測量而估計與該第一晶粒中作用裝置結構相關聯的一覆蓋誤差值，其中該設計規則目標之該第一例項及該第一晶粒中作用裝置結構係根據同一製作程序規則來製作；及

基於與該第一晶粒中作用裝置結構相關聯的該覆蓋誤差值及與該設計規則目標之該第一例項相關聯的該第一覆蓋誤差值而判定一覆蓋校準值。

【請求項16】

如請求項15之方法，其進一步包括：

用具有在介於10與5,000電子伏特之間的一範圍中之能量之一SXR輻射束照射該設計規則目標之一第二例項；

偵測各自與回應於該入射SXR輻射束而自該設計規則目標之該第二例項散射之一SXR輻射量之該+1/-1繞射階相關聯的第二複數個強度；

基於該+1/-1繞射階內之該複數個所偵測強度而估計與該設計規則目標之該第二例項相關聯的一覆蓋誤差值；

基於與該設計規則目標之該第二例項相關聯的該覆蓋誤差值與該覆蓋校準值之一加總而估計與一第二晶粒中作用裝置結構相關聯的一覆蓋誤差值。

【請求項17】

如請求項16之方法，其進一步包括：

偵測與回應於該入射x射線輻射束而自該設計規則目標之該第二例項散射之該x射線輻射量之一零繞射階相關聯的一強度；

基於該零繞射階內之該所偵測強度、該+1/-1繞射階內之該複數個所偵測強度或其任一組合而估計表徵該設計規則目標之一形狀之一或多個參數之一值；及

基於與該設計規則目標之該第二例項相關聯的該覆蓋誤差值及表徵該設計規則目標之該第二例項之該形狀之該一或多個參數之該值而估計該

設計規則目標之該第二例項之一邊緣放置誤差之一值。

【請求項18】

如請求項15之方法，其中該覆蓋校準值係與該第一晶粒中作用裝置結構相關聯的該覆蓋誤差值同與該設計規則目標之該第一例項相關聯的該第一覆蓋誤差值之間的差。

【請求項19】

如請求項15之方法，其進一步包括：

基於藉由該掃描電子顯微鏡對該設計規則目標之該第一例項之一測量而估計與該設計規則目標之該第一例項相關聯的一第二覆蓋誤差值，其中對該覆蓋校準值之該判定係基於與該設計規則目標之該第一例項相關聯的該等第一與第二覆蓋誤差值之間的一差及與該第一晶粒中作用裝置結構相關聯的該覆蓋誤差值同與該設計規則目標之該第一例項相關聯的該第二覆蓋誤差值之間的一差。

【請求項20】

如請求項15之方法，其中該設計規則目標被安置在一劃線內或係一晶粒中作用裝置結構。

【請求項21】

如請求項15之方法，其中該晶粒中作用裝置結構並非週期性的。

【請求項22】

一種計量系統，其包括：

一軟性X射線(SXR)照射源，其經組態以用具有在介於10與5,000電子伏特之間的一範圍中之能量之一SXR輻射束照射安置在一基板上之一測量目標之一第一例項，其中該測量目標包含：一第一結構，其安置於在該

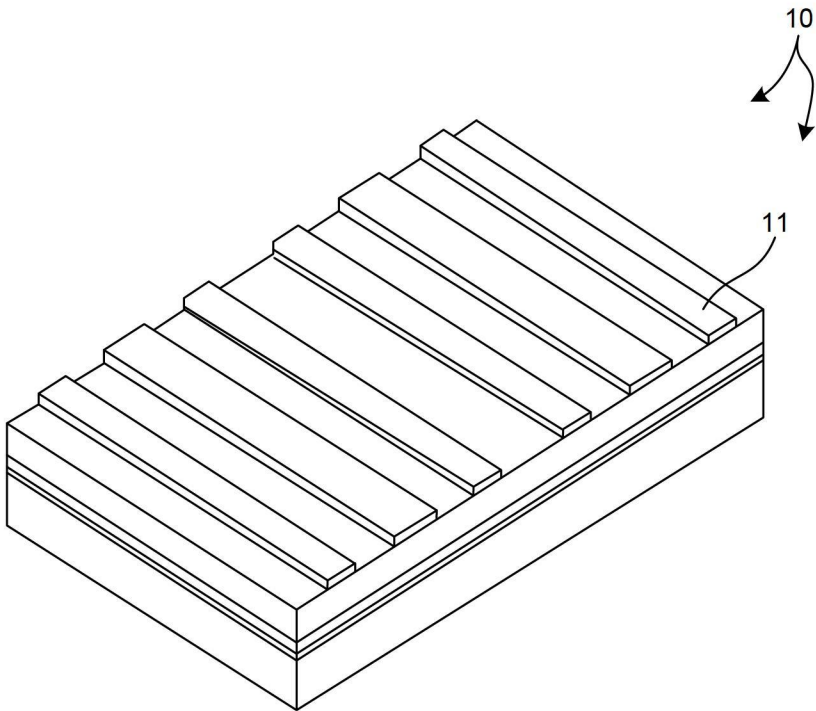
基板上方之一第一高度處製作之一第一層中；及一第二結構，其安置於在該基板上方之一第二高度處製作之一第二層中；

一x射線偵測器，其經組態以偵測各自與回應於入射x射線輻射束而自該測量目標散射之一x射線輻射量之一或多個非零繞射階相關聯的複數個強度；及

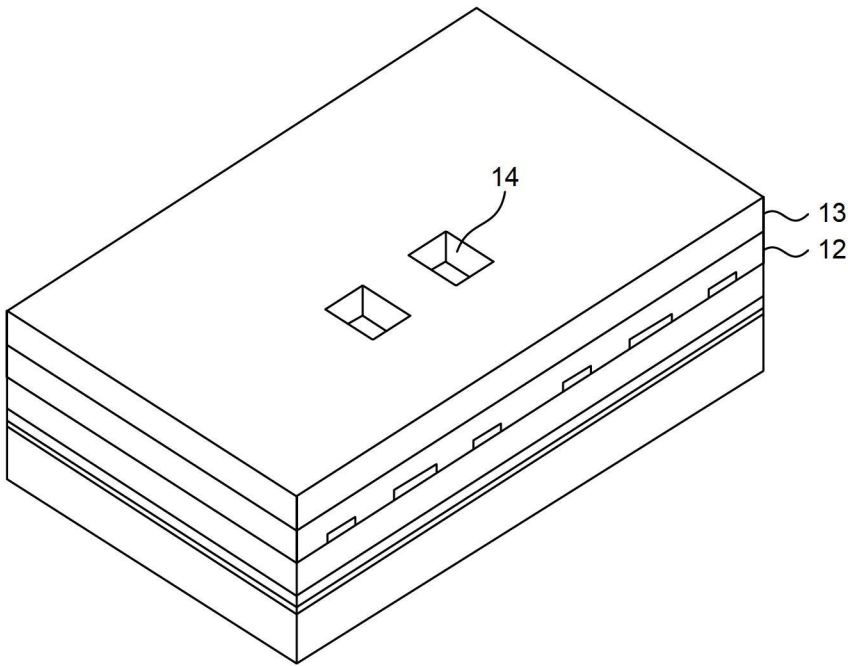
一非暫時性電腦可讀媒體，其儲存在由一或多個處理器執行時致使該一或多個處理器進行以下操作之指令：

基於該一或多個非零繞射階中之每一者內之該複數個所偵測強度而估計與該測量目標或一對應晶粒中作用裝置結構相關聯的一覆蓋誤差值。

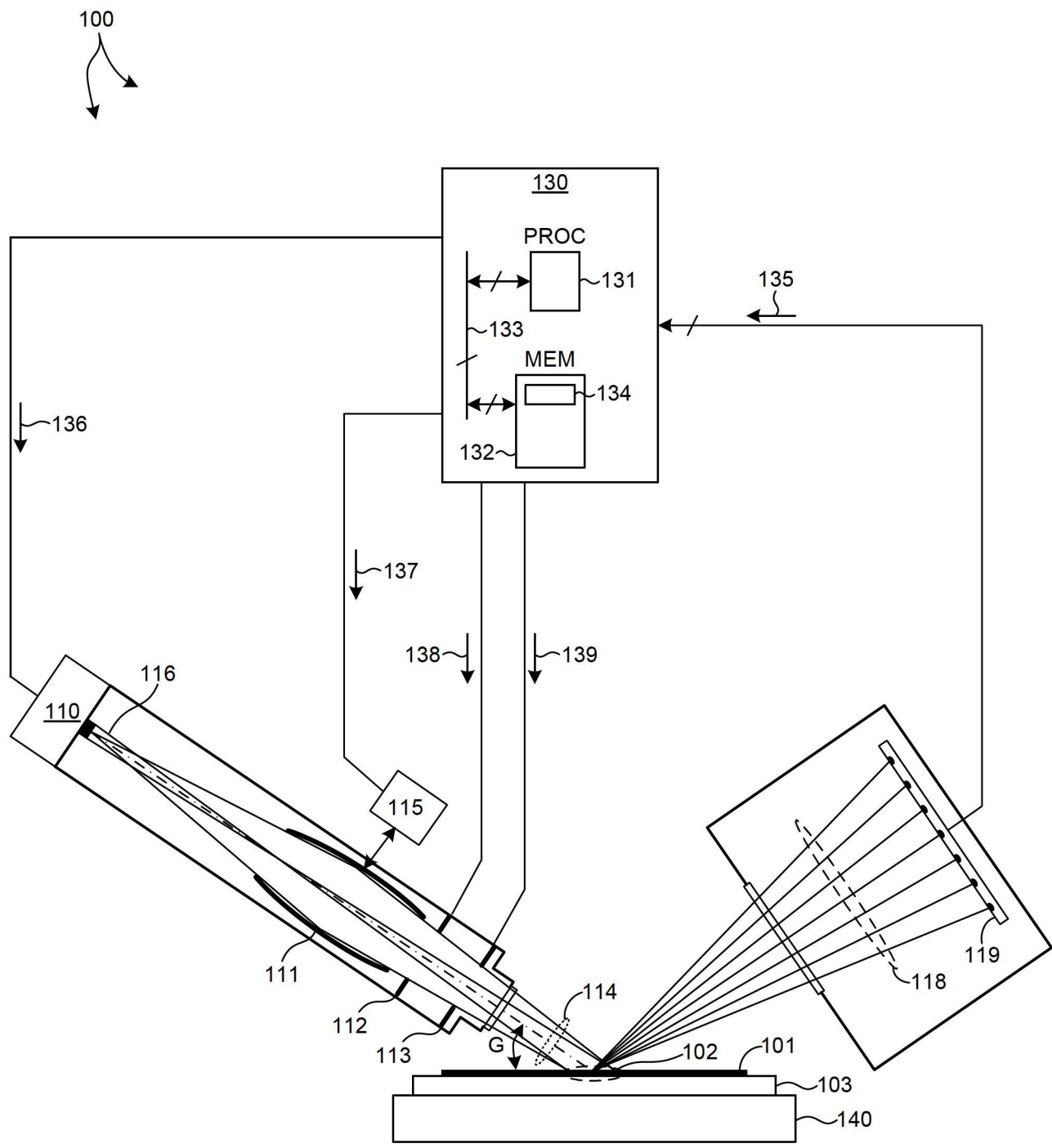
【發明圖式】



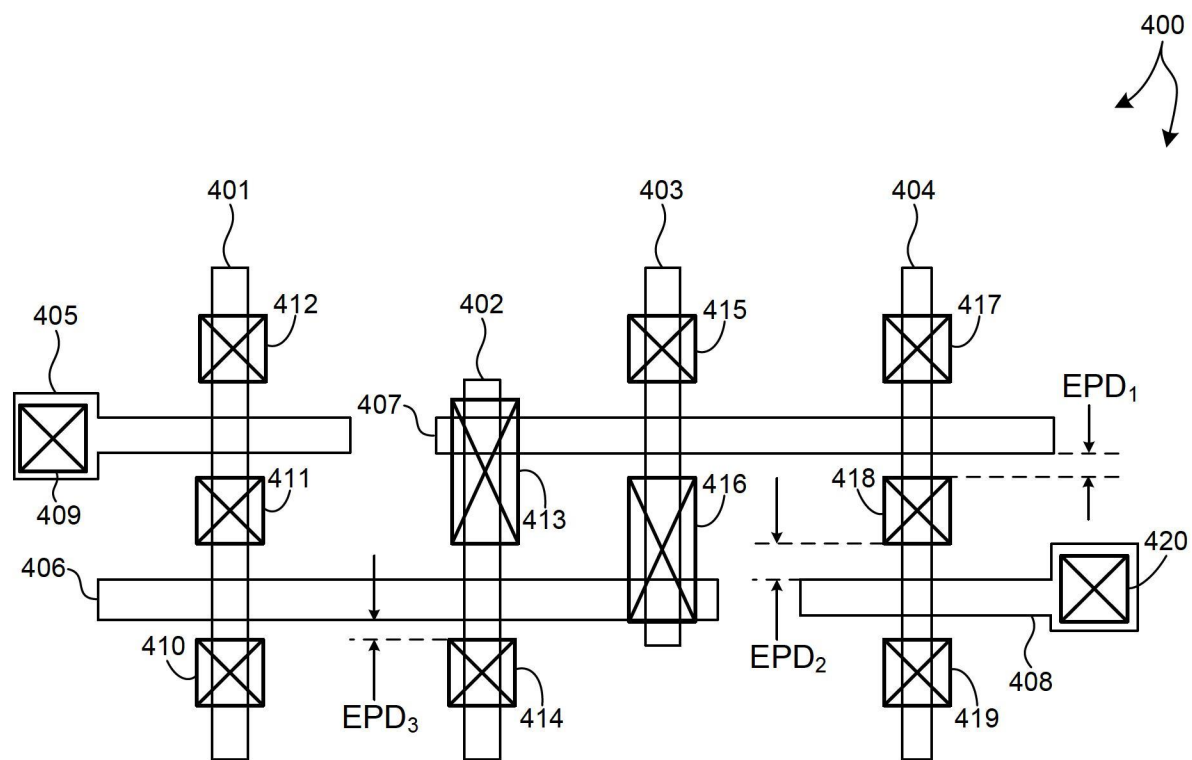
【圖1】



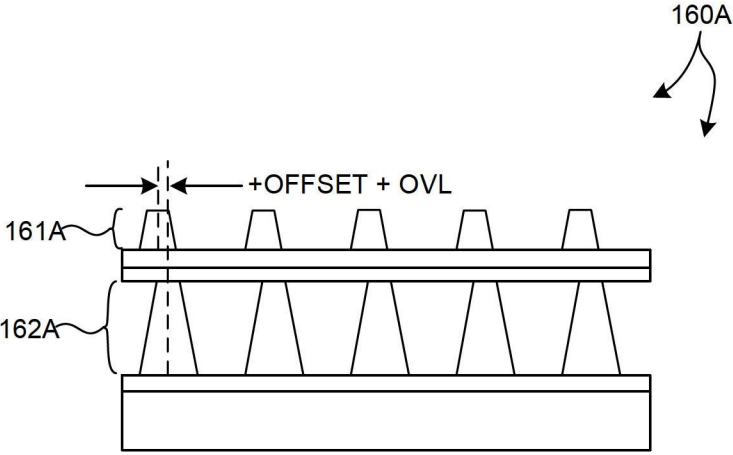
【圖2】



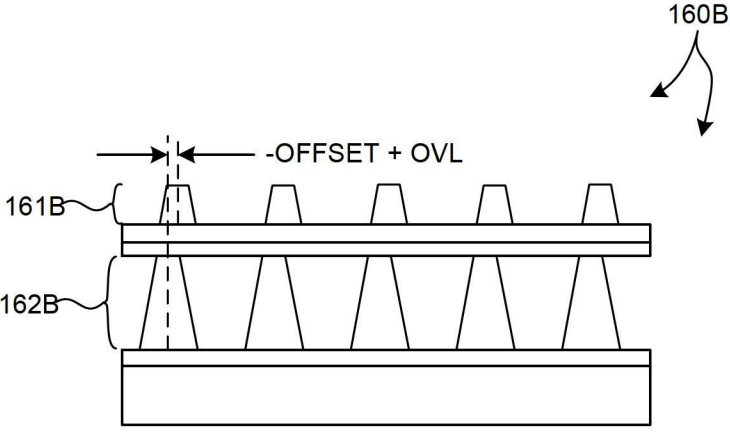
【圖3】



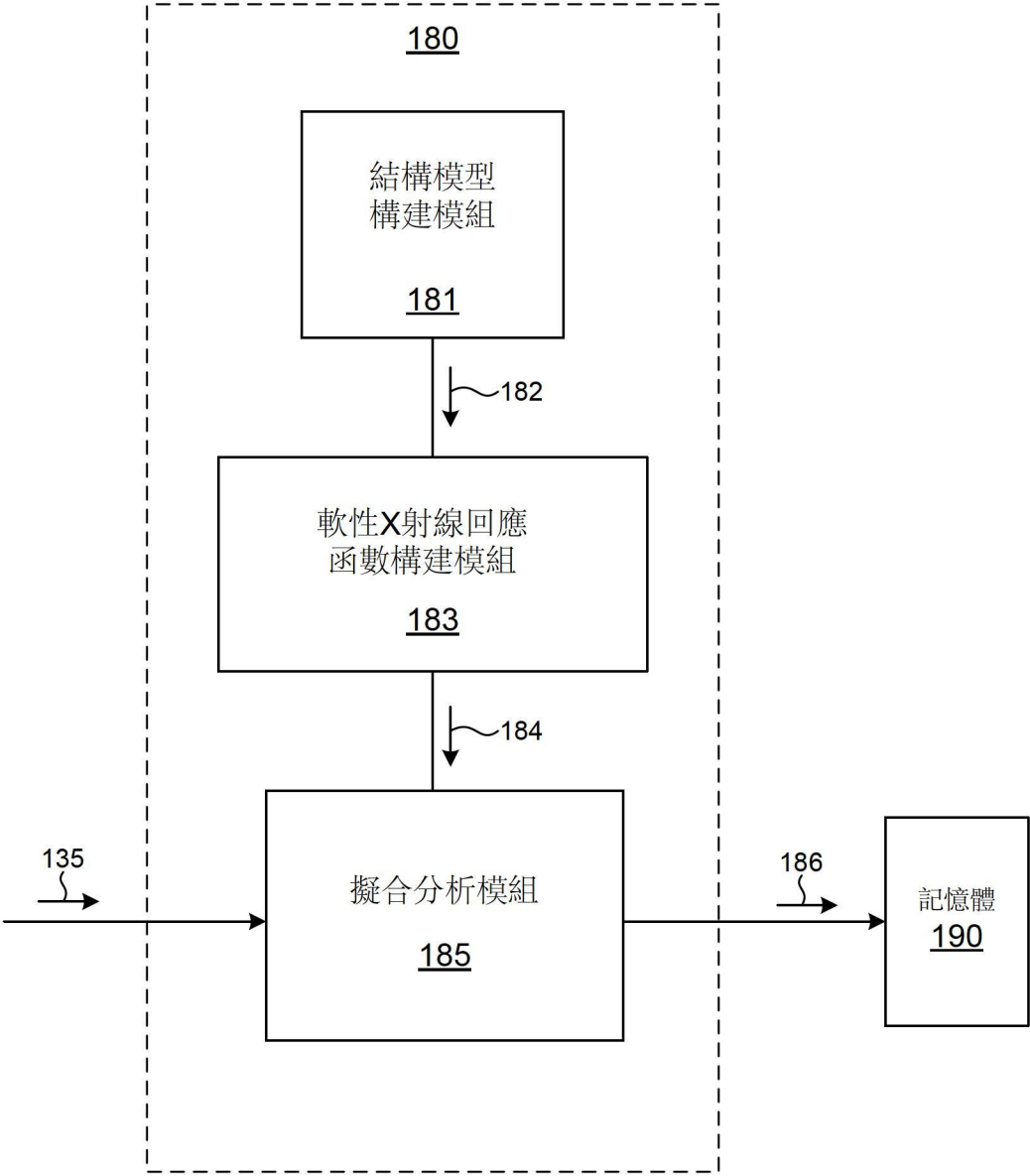
【圖4】



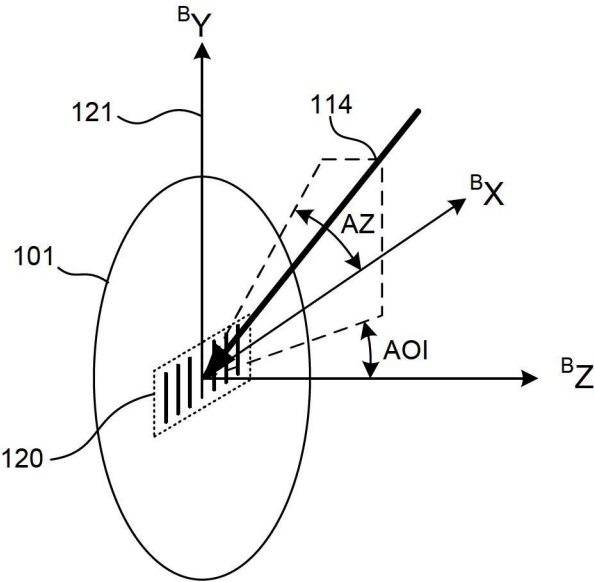
【圖5A】



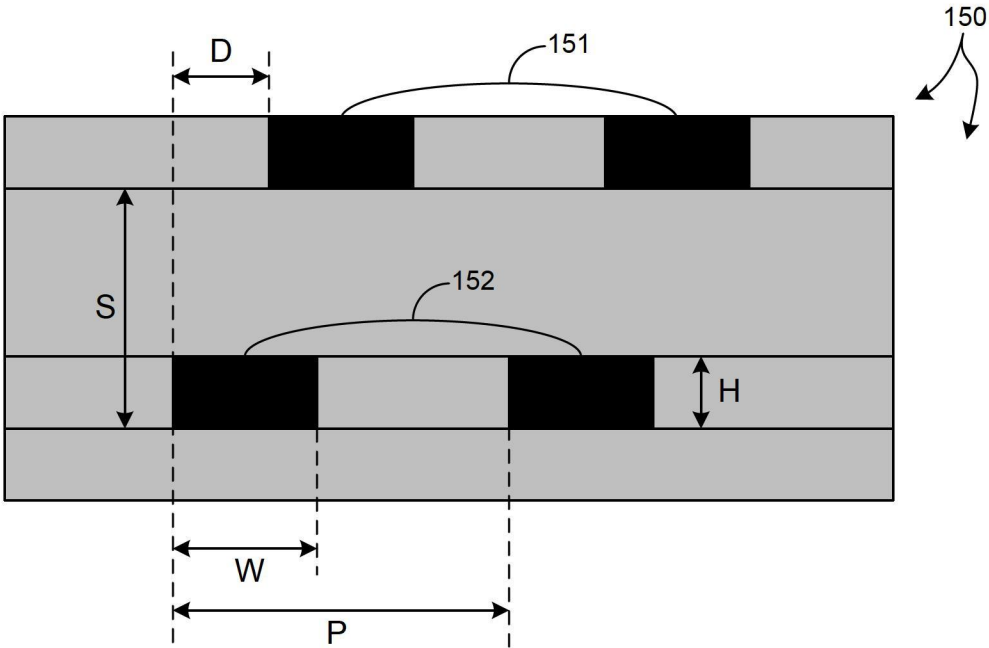
【圖5B】



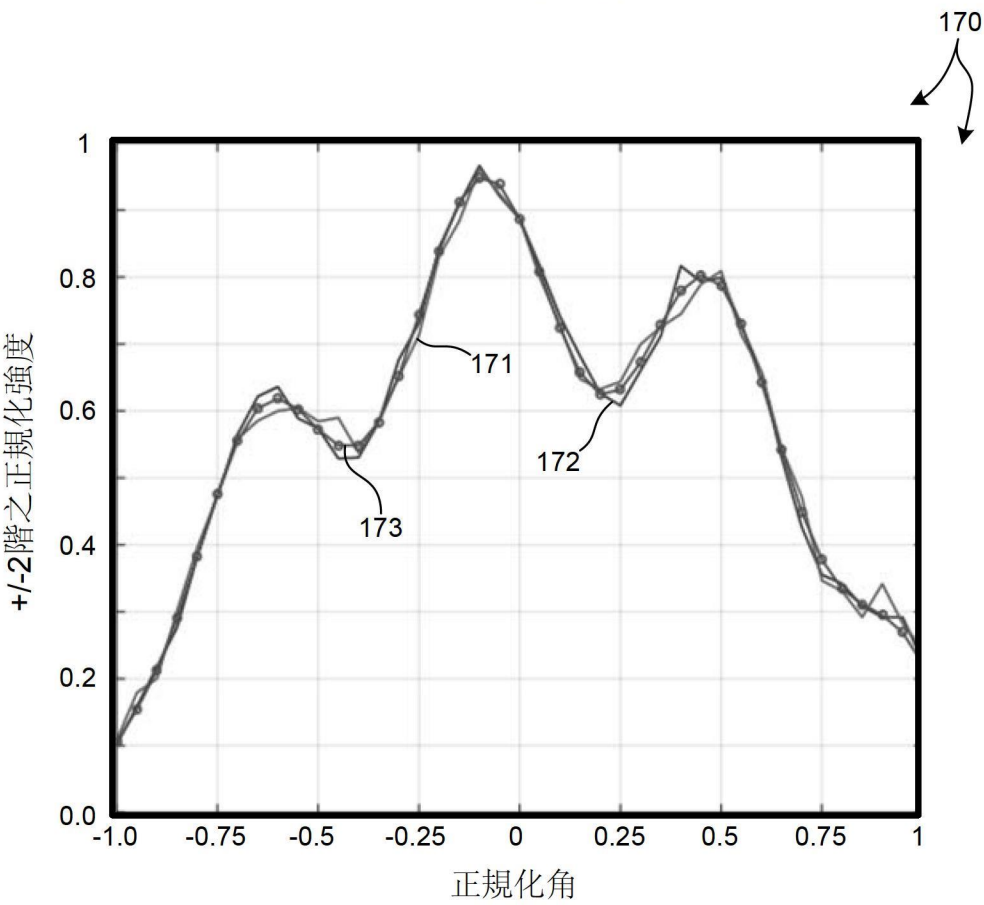
【圖6】



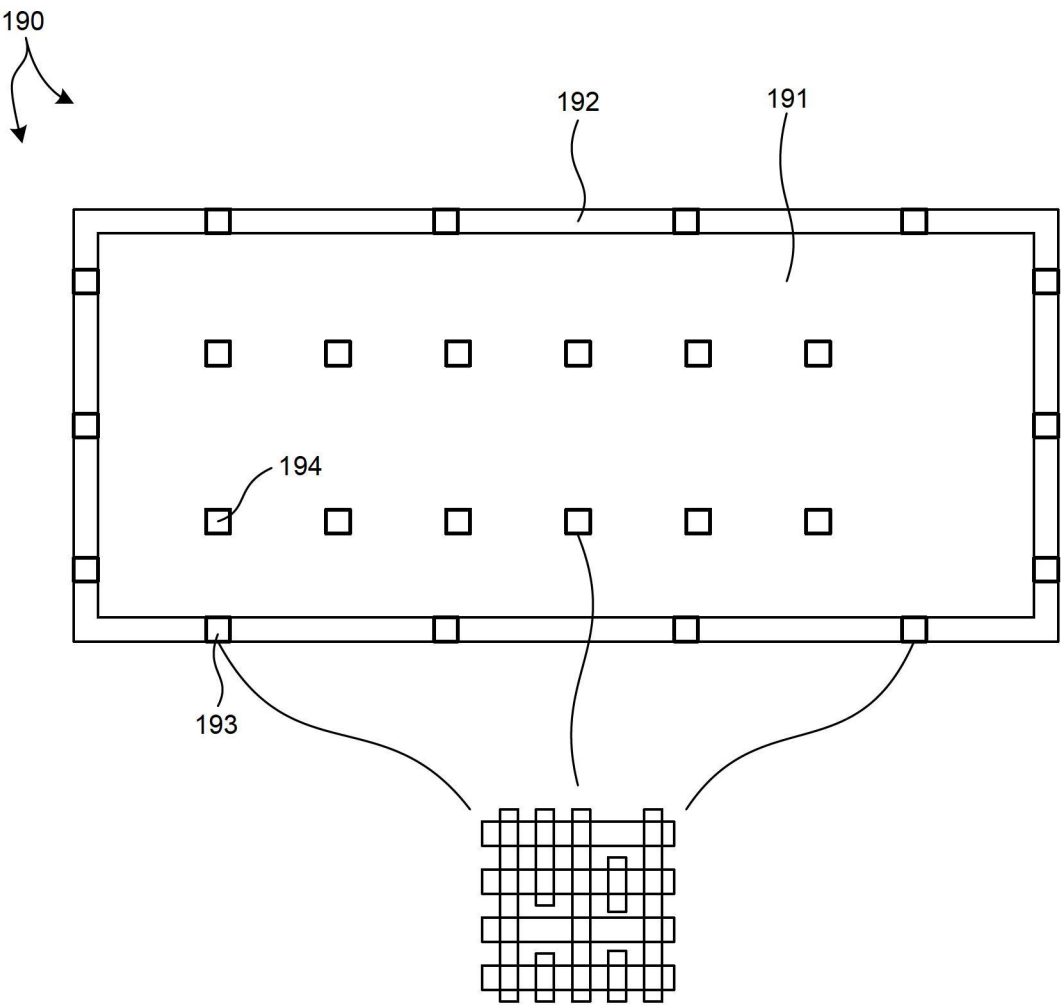
【圖7】



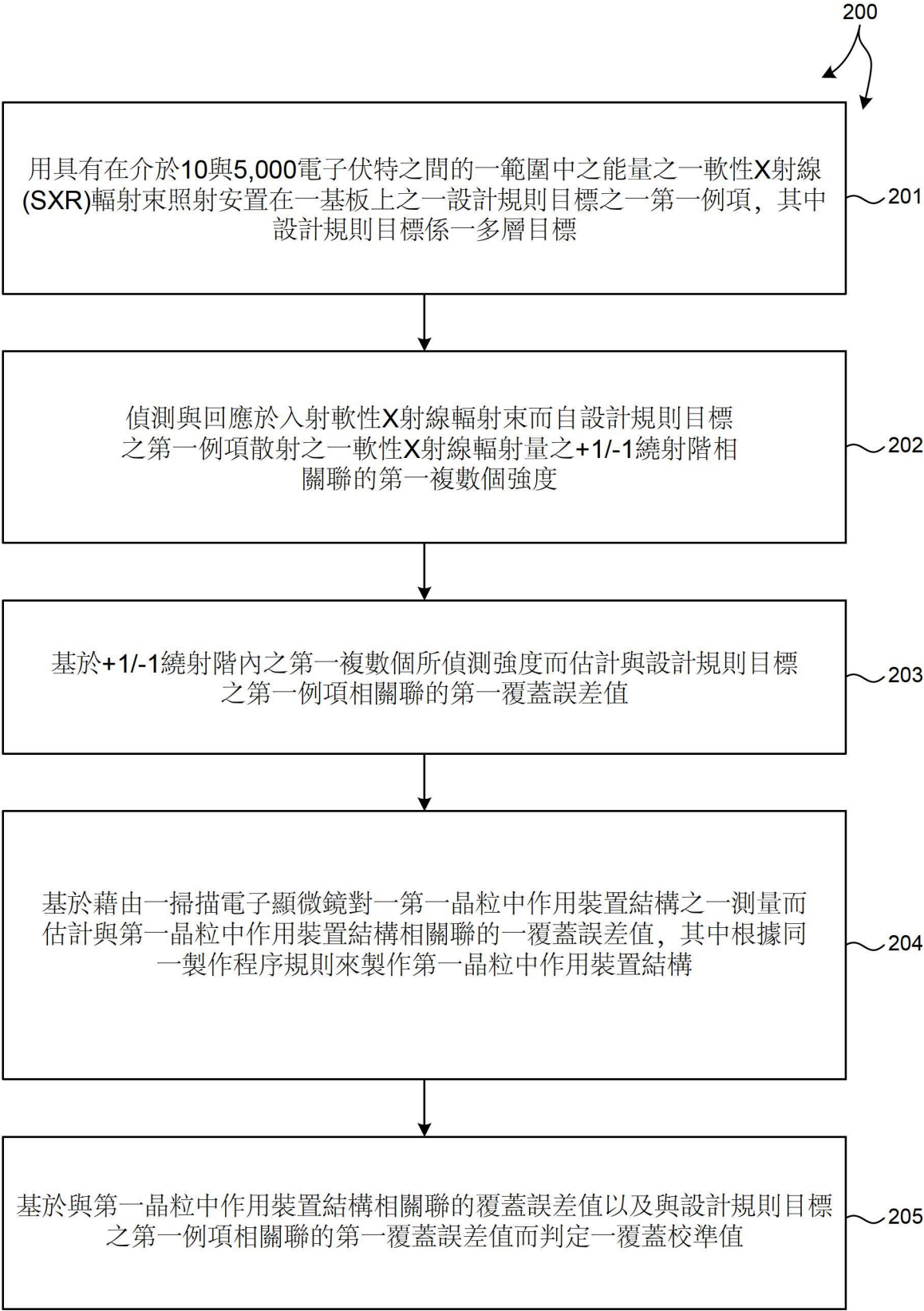
【圖8】



【圖9】



【圖10】



【圖11】