



(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 I783988 B

(45)公告日：中華民國 111 (2022) 年 11 月 21 日

(21)申請案號：107112756

(22)申請日：中華民國 107 (2018) 年 04 月 13 日

(51)Int. Cl. : **G01T1/16 (2006.01)**

(30)優先權：2017/04/14 美國 62/485,497

2018/04/11 美國 15/950,823

(71)申請人：美商克萊譚克公司 (美國) KLA-TENCOR CORPORATION (US)

美國

(72)發明人：舒傑葛洛夫 安德烈 V SHCHEGROV, ANDREI V. (US)；吉里紐 安東尼歐
艾里昂 GELLINEAU, ANTONIO ARION (TT)；札盧博史基 瑟吉 ZALUBOVSKY,
SERGEY (US)

(74)代理人：陳長文

(56)參考文獻：

TW 201543003A

US 2016/0320319A1

WO 2017/044283A1

審查人員：陳勇志

申請專利範圍項數：37 項 圖式數：12 共 58 頁

(54)名稱

傳輸小角度 X 射線散射度量系統

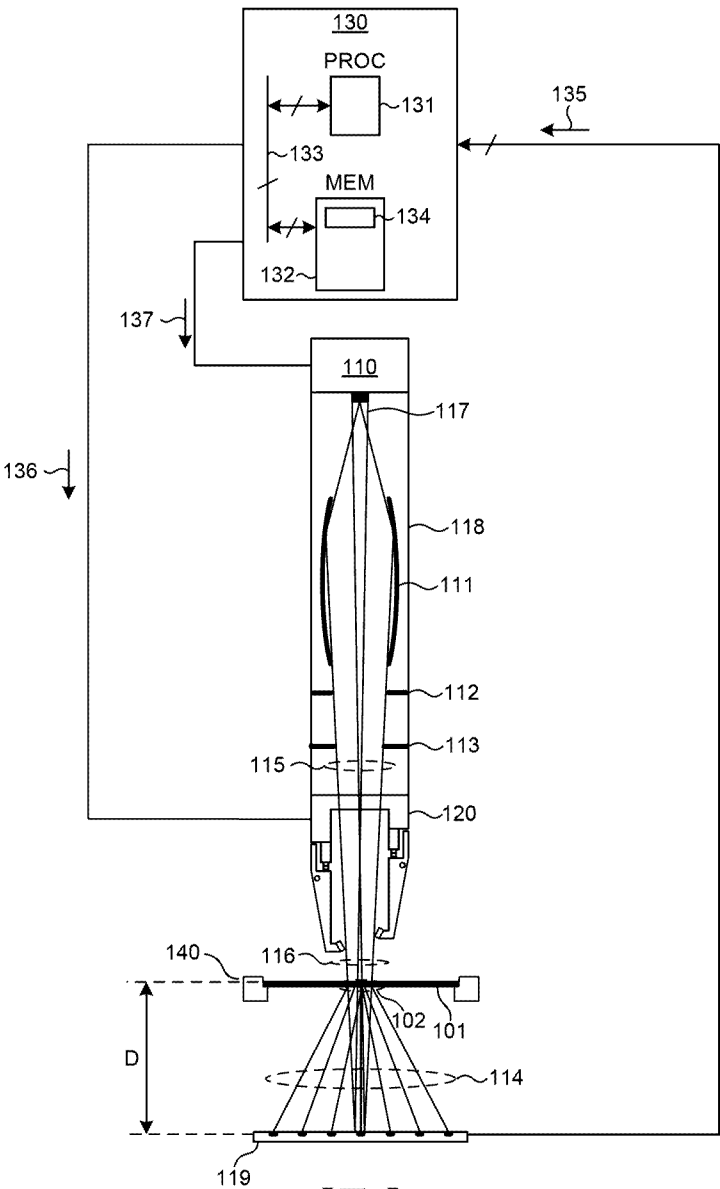
(57)摘要

本文中描述用於藉由具有相對小工具佔用面積之傳輸小角度 x 射線散射測量(TSAXS)系統特性化半導體裝置之尺寸及材料性質之方法及系統。本文中描述之該等方法及系統實現適合用於具有減小之光學路徑長度之半導體結構之度量之 Q 空間解析度。一般言之，該 x 射線光束針對相對小目標經聚焦更接近晶圓表面且針對相對大目標經聚焦更接近偵測器。在一些實施例中，採用具有小點擴散函數(PSF)之一高解析度偵測器以緩解對可達成 Q 解析度之偵測器 PSF 限制。在一些實施例中，該偵測器藉由判定由光子轉換事件刺激之一電子雲之質心而以子像素準確度定位一入射光子。在一些實施例中，除了入射位置之外，該偵測器亦解析一或多個 x 射線光子能量。

Methods and systems for characterizing dimensions and material properties of semiconductor devices by transmission small angle x-ray scatterometry (TSAXS) systems having relatively small tool footprint are described herein. The methods and systems described herein enable Q space resolution adequate for metrology of semiconductor structures with reduced optical path length. In general, the x-ray beam is focused closer to the wafer surface for relatively small targets and closer to the detector for relatively large targets. In some embodiments, a high resolution detector with small point spread function (PSF) is employed to mitigate detector PSF limits on achievable Q resolution. In some embodiments, the detector locates an incident photon with sub-pixel accuracy by determining the centroid of a cloud of electrons stimulated by the photon conversion event. In some embodiments, the detector resolves one or more x-ray photon energies in addition to location of incidence.

指定代表圖：

100



【圖5】

- 符號簡單說明：
- 100 . . . 度量系統/
傳輸小角度 x 射線散
射測量(T-SAXS)度量
工具
 - 101 . . . 樣品
 - 102 . . . 檢測區域/
有限光點大小
 - 110 . . . x 射線照明
源
 - 111 . . . 聚焦光學器
件
 - 112 . . . 光束發散控
制狹縫
 - 113 . . . 中間狹縫
 - 114 . . . x 射線輻射
 - 115 . . . 傳入光束
 - 116 . . . 照明光束/
傳出光束
 - 117 . . . 射線
 - 118 . . . 飛行管
 - 119 . . . x 射線偵測
器
 - 120 . . . 光束塑形狹
縫機構
 - 130 . . . 運算系統
 - 131 . . . 處理器
 - 132 . . . 記憶體
 - 133 . . . 匯流排
 - 134 . . . 程式指令
 - 135 . . . 輸出信號/
量測資料
 - 136 . . . 命令信號
 - 137 . . . 命令信號
 - 140 . . . 樣品定位系
統
 - D . . . 晶圓-偵測器
距離



I783988

【發明摘要】

【中文發明名稱】

傳輸小角度X射線散射度量系統

【英文發明名稱】

TRANSMISSION SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING
METROLOGY SYSTEM

【中文】

本文中描述用於藉由具有相對小工具佔用面積之傳輸小角度x射線散射測量(TSAXS)系統特性化半導體裝置之尺寸及材料性質之方法及系統。本文中描述之該等方法及系統實現適合用於具有減小之光學路徑長度之半導體結構之度量之Q空間解析度。一般言之，該x射線光束針對相對小目標經聚焦更接近晶圓表面且針對相對大目標經聚焦更接近偵測器。在一些實施例中，採用具有小點擴散函數(PSF)之一高解析度偵測器以緩解對可達成Q解析度之偵測器PSF限制。在一些實施例中，該偵測器藉由判定由光子轉換事件刺激之一電子雲之質心而以子像素準確度定位一入射光子。在一些實施例中，除了入射位置之外，該偵測器亦解析一或多個x射線光子能量。

【英文】

Methods and systems for characterizing dimensions and material properties of semiconductor devices by transmission small angle x-ray scatterometry (TSAXS) systems having relatively small tool footprint are described herein. The methods and systems described herein enable Q space resolution adequate for metrology of semiconductor structures

with reduced optical path length. In general, the x-ray beam is focused closer to the wafer surface for relatively small targets and closer to the detector for relatively large targets. In some embodiments, a high resolution detector with small point spread function (PSF) is employed to mitigate detector PSF limits on achievable Q resolution. In some embodiments, the detector locates an incident photon with sub-pixel accuracy by determining the centroid of a cloud of electrons stimulated by the photon conversion event. In some embodiments, the detector resolves one or more x-ray photon energies in addition to location of incidence.

【指定代表圖】

圖5

【代表圖之符號簡單說明】

- 100 度量系統/傳輸小角度x射線散射測量(T-SAXS)度量工具
- 101 樣品
- 102 檢測區域/有限光點大小
- 110 x射線照明源
- 111 聚焦光學器件
- 112 光束發散控制狹縫
- 113 中間狹縫
- 114 x射線輻射
- 115 傳入光束
- 116 照明光束/傳出光束

117	射線
118	飛行管
119	x射線偵測器
120	光束塑形狹縫機構
130	運算系統
131	處理器
132	記憶體
133	匯流排
134	程式指令
135	輸出信號/量測資料
136	命令信號
137	命令信號
140	樣品定位系統
D	晶圓-偵測器距離

【發明說明書】

【中文發明名稱】

傳輸小角度X射線散射度量系統

【英文發明名稱】

TRANSMISSION SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING
METROLOGY SYSTEM

【技術領域】

所述實施例係關於度量系統及方法，且更特定言之係關於用於改良的量測準確度之方法及系統。

【先前技術】

諸如邏輯及記憶體裝置之半導體裝置通常係由應用於一樣品之一系列處理步驟製造。半導體裝置之各種特徵及多個結構層級係由此等處理步驟形成。例如，其中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程。半導體製程之額外實例包含(但不限於)化學機械拋光、蝕刻、沈積及離子植入。多個半導體裝置可在一單一半導體晶圓上製造且接著分離成個別半導體裝置。

在一半導體製程期間之各個步驟使用度量程序以偵測晶圓上之缺陷以促進較高良率。通常使用包含散射測量及反射測量實施方案以及相關聯之分析演算法之若干基於度量之技術以特性化臨界尺寸、膜厚度、組合物及奈米級結構之其他參數。

傳統上，對由薄膜及/或重複週期性結構組成之目標執行散射測量臨界尺寸(SCR)量測。在裝置製造期間，此等膜及週期性結構通常表示實際裝置幾何形狀及材料結構或一中間設計。隨著裝置(例如，邏輯及記憶體

裝置)邁向更小奈米級尺寸，特性化變得更困難。併入複雜三維幾何形狀及具有多種物理性質之材料之裝置造成特性化困難。舉例而言，現代記憶體結構通常係高高寬比三維結構，此使得光學輻射難以穿透至底層。利用紅外光至可見光之光學度量工具可穿透許多半透明材料層，但提供良好的穿透深度之較長波長不提供對小異常之足夠靈敏度。另外，特性化複雜結構(例如，FinFET)所需之增大數目個參數導致漸大之參數相關性。因此，特性化目標之參數通常無法可靠地脫離可用量測。

在一個實例中，已採用較長波長(例如，近紅外)以試圖克服利用多晶矽作為堆疊中之一個替代材料之3D FLASH裝置之穿透問題。然而，3D FLASH之鏡狀結構隨著照明更深地傳播至膜堆疊中而固有地引起減小之光強度。此引起深度下之靈敏度損耗及相關性問題。在此案例中，SCD僅能夠依高靈敏度及低相關性成功提取一精簡組之度量尺寸。

在另一實例中，在現代半導體結構中愈來愈多地採用不透明高介電係數材料。光學輻射通常無法穿透由此等材料構成之層。因此，使用薄膜散射測量工具(諸如橢偏儀或反射計)之量測變得愈來愈具挑戰性。

回應於此等挑戰，已開發更複雜的光學度量工具。舉例而言，已開發具有多個照明角度、較短照明波長、較廣照明波長範圍及自反射信號之更完整資訊擷取(例如，除了較習知的反射率或橢偏量測信號之外，亦量測多個穆勒(Mueller)矩陣元素)之工具。然而，此等方法未可靠地克服與許多先進目標(例如，複雜3D結構、小於10 nm之結構、採用不透明材料之結構)之量測及量測應用(例如，線邊緣粗糙度及線寬度粗糙度量測)相關聯之根本挑戰。

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。掃描電子顯微鏡(SEM)達成中間解析度位準，但無法穿透結構至足夠深度。因此，未良好特性化高高寬比孔。另外，樣品所需之充電對成像效能具有一不利影響。x射線反射計亦遭受當量測高高寬比結構時限制其等之有效性之穿透問題。

為了克服穿透深度問題，結合破壞性樣本製備技術(諸如聚焦離子束(FIB)加工、離子銑削、毯覆式或選擇性蝕刻等)採用傳統成像技術(諸如TEM、SEM等)。舉例而言，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需要樣品之破壞性分段。材料移除及量測之若干反覆通常提供遍及一三維結構量測臨界度量參數所需之資訊。然而，此等技術需要樣本破壞及長程序時間。完成此等類型之量測之複雜性及時間歸因於蝕刻及度量步驟之漂移而引入大的不準確度。另外，此等技術需要引入對位誤差之若干反覆。

採用一硬x射線能階(>15 keV)之光子之傳輸小角度x射線散射測量(T-SAXS)系統已展示出有希望解決具挑戰性的量測應用。在以下各案中描述將SAXS技術應用至臨界尺寸(CD-SAXS)及疊對(OVL-SAXS)之量測之之各種態樣：1)Zhuang及Fielden之標題為「High-brightness X-ray metrology」之美國專利第7,929,667號；2)Bakeman、Shchegrov、Zhao及Tan之標題為「Model Building And Analysis Engine For Combined X-Ray And Optical Metrology」之美國專利公開案第2014/0019097號；3)Veldman、Bakeman、Shchegrov及Mieher之標題為「Methods and Apparatus For Measuring Semiconductor Device Overlay Using X-Ray Metrology」之美國專利公開案第2015/0117610號；4)Hench、Shchegrov

及 Bakeman 之標題為「Measurement System Optimization For X-Ray Based Metrology」之美國專利公開案第2016/0202193號；5)Dziura、Gellineau 及 Shchegrov 之標題為「X-ray Metrology For High Aspect Ratio Structures」之美國專利公開案第2017/0167862號；及6)Gellineau、Dziura、Hench、Veldman及Zalubovsky之標題為「Full Beam Metrology for X-Ray Scatterometry Systems」之美國專利申請案第15/419,130號，此等文獻之各者之內容以全文引用的方式併入本文中。前述專利文獻被讓渡給(美國)加利福尼亞州，米爾皮塔斯市(Milpitas)之 KLA-Tencor Corporation。另外，Mazor 等人之標題為「X-ray scatterometry apparatus」之美國專利第9,606,073號描述將SAXS技術應用至半導體結構之各種態樣，該專利之內容以全文引用的方式併入本文中。

SAXS亦已應用至材料之特性化及其他非半導體相關應用。例示性系統已由若干公司商業化，包含Xenocs SAS (www.xenocs.com)、Bruker Corporation (www.bruker.com) 及 Rigaku Corporation (www.rigaku.com/en)。Bruker 及 Rigaku 兩者提供分別命名為「Nanostar」及「Nanopix」之小角度x射線散射測量系統及廣角x射線散射測量系統。此等系統包含可調整樣本至偵測器距離。

在科學文獻中亦描述對半導體結構之CD-SAXS度量之研究。大多數研究群組已採用歸因於其等巨大的大小、成本等而不適合用於一半導體製造設施中之高亮度x射線同步加速器源。在Lemillet、Germer、Kline等人之標題為「Intercomparison between optical and x-ray scatterometry measurements of FinFET structures」之文章，Proc. SPIE，第8681卷，

第86810Q頁(2013年)中描述此一系統之一個實例，此等文獻之各者之內容以全文引用的方式併入本文中。最近，美國國家標準與技術研究院(NIST)之一群組已起始採用類似於美國專利第7,929,667號中所描述者之緊密且明亮x射線源的研究。在標題為「X-ray scattering critical dimensional metrology using a compact x-ray source for next generation semiconductor devices」之一文章，J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 16(1), 014001 (2017年1月至3月)中描述此研究，此等文獻之各者之內容以全文引用的方式併入本文中。

SAXS系統採用若干不同類型之偵測器，包含混合像素光子計數偵測器、電荷積分像素陣列偵測器、氣態突崩偵測器等。可用偵測器之像素大小係在自約50微米至近似200微米之範圍中。具有25微米像素之原型當前在開發中。

全部先前SAXS架構之一實質缺點係量測典型半導體結構所需之儀器之實質大小。需要精細角解析度來解析偵測器處之繞射影像。當前，藉由增加儀器之長度而達成此解析度。

在一個實例中，由Bruker製造之「Nanostar」系統可經組態具有1070 mm之一樣本至偵測器距離、具有一68微米像素大小之一偵測器及 $5e-3$ 埃-1之q空間解析度。

在半導體製造設施中，度量及檢測工具必須符合相對小佔用面積大小以最大化昂貴淨室空間之使用且容納更多工具用於更高處理量。因此，當前SAXS系統之工具長度必須自當前位準減小至可用於一實際半導體製造環境中。

此外，硬x射線偵測器之解析度亦限制當前系統重建半導體裝置之詳

細輪廓之能力。舉例而言，當前垂直NAND (VNAND)結構經製造具有大約數微米之基礎間距長度。使用硬x射線之此等結構之量測產生在不依靠不切實際工具長度(例如，~40 m工具長度)之情況下僅基於角解析度無法解析之非常精細的繞射圖案。因而，此量測應用對於當前工具不可行。

概括言之，當前CD/OVL SAXS系統歸因於過大佔用面積、有限解析度及對角度級分離之依賴而不適合實施於一生產半導體製造設施中。為了進一步改良裝置效能，半導體產業繼續關注於垂直整合而非橫向按比例調整。因此，複雜、完全三維結構之準確量測對於確保可行性及持續按比例調整改良至關重要。未來度量應用歸因於愈來愈小之解析度要求、多參數相關性、愈來愈複雜之幾何結構(包含高高寬比結構)及不透明材料之愈來愈多的使用而存在度量挑戰。因此，期望用於改良之x射線散射測量量測(包含改良之解析度及更小佔用面積)之方法及系統。

【發明內容】

本文中描述用於藉由具有相對小工具佔用面積之傳輸小角度x射線散射測量(TSAXS)系統特性化半導體裝置之尺寸及材料性質之方法及系統。本文中描述之該等方法及系統實現適合用於具有減小之光學路徑長度之半導體結構之度量之Q空間解析度。

在一個態樣中，一TSAXS量測系統在一相對短光學路徑長度內(例如，自照明源至偵測器小於3米)採用硬x射線照明來量測在自相對小尺寸(例如，近似50奈米)至相對大尺寸(例如，高達10微米)之範圍中之目標。

在一進一步態樣中，一TSAXS量測系統使用被聚焦在晶圓表面之前小於200毫米、在晶圓表面處、在偵測器表面處或在晶圓表面與偵測器表面之間之任何位置處之一x射線光束照明一樣本以緩解對可達成Q解析度

之光學焦點限制。一般言之，針對涉及必須使用最小可能照明光點大小照明之相對小目標之度量應用，x射線光束經聚焦更接近晶圓表面。針對涉及其中期望高影像解析度及光子通量之相對大目標之度量應用，x射線光束經聚焦更接近偵測器。

在另一進一步態樣中，一TSAXS量測系統包含具有一小PSF之一高解析度偵測器以緩解對可達成Q解析度之PSF限制。無關於光學焦點相對於晶圓及偵測器定位於何處，當晶圓-偵測器距離D減小至一相對小值(例如，小於1米)時，一高解析度偵測器係有利的。

在另一態樣中，由一光子轉換事件刺激之一電子雲之質心之位置由偵測器計算。質心之位置以子像素準確度提供入射光子之位置。此有效地減小像素大小且實現超出幾何限制之Q解析度。如本文中描述之子像素空間內插對於具有小於1米之一晶圓-偵測器距離之半導體結構之TSAXS量測係較佳的。

在一些實施例中，具有一相對短光學路徑長度之一TSAXS系統經組態具有入射於垂直定位(即，法向於晶圓表面近似垂直於重力向量)之一晶圓上之一水平光學路徑。然而，在一些其他實施例中，具有一相對短光學路徑長度之一TSAXS系統經組態具有入射於水平定位(即，法向於晶圓表面近似平行於重力向量)之一晶圓上之一垂直光學路徑。藉由垂直定向光束線，可達成一較小工具佔用面積且簡化晶圓處置。

在另一進一步態樣中，x射線偵測器解析一或多個x射線光子能量且針對各x射線能量分量產生指示樣品之性質之信號。以此方式，除了像素位置及計數之數目之外，亦藉由能量鑑別偵測器內之x射線光子互動。在一些實施例中，藉由比較x射線光子互動之能量與一預定上臨限值及一預

定下臨限值而鑑別x射線光子互動。

在另一態樣中，一TSAXS系統經組態以在一個方向上基於空間分離級但在正交方向上基於重疊級而量測一目標。在一些此等實施例中，在其中空間分離繞射級之方向上判定一或多個所關注參數之(若干)值。隨後採用此等參數值以基於重疊級判定一或多個所關注參數之(若干)值。

在另一態樣中，一光束塑形狹縫機構之狹縫經定位緊密接近量測中樣品以最小化歸因於光束發散之藉由有限源大小定義之入射光束光點大小之擴大。在一個實例中，針對一10微米x射線源大小及光束塑形狹縫與樣品101之間之25毫米之一距離，歸因於由有限源大小產生之陰影之光束光點大小之擴展係近似1微米。在其他實例中，藉由經定位距樣品小於100毫米之光束塑形狹縫控制光束發散。

在另一進一步態樣中，採用一T-SAXS系統以基於散射光之一或多個繞射級判定一樣品之性質(例如，結構參數值)。

前述係發明內容且因此必然含有細節之簡化、概括及省略；因此，熟習此項技術者將瞭解，發明內容僅係闡釋性且不得以任何方式限制。本文中所述之裝置及/或程序之其他態樣、發明特徵及優點將在本文中所闡述之非限制性詳細描述中變得顯而易見。

【圖式簡單說明】

圖1係繪示如本文中描述般經組態以執行x射線散射測量量測之一度量系統100之一圖式。

圖2描繪在不阻擋一傳入光束之位置中之一光束塑形狹縫機構之狹縫。

圖3描繪在阻擋一傳入光束之一部分之位置中之一光束塑形狹縫機構

之狹縫。

圖4描繪依由角度 ϕ 及 θ 描述之一特定定向入射於一晶圓上之一x射線照明光束。

圖5係繪示經組態使得x射線光學焦點定位於偵測器表面處或附近之度量系統100之一圖式。

圖6描繪藉由諸如度量系統100之一度量系統量測之散射級之一影像171。

圖7描繪藉由諸如度量系統100之一度量系統量測之散射級之一影像172。

圖8描繪與圖4中描繪之影像172之橫截面C相關聯之強度輪廓之一曲線圖173。

圖9係繪示在與量測中樣品分離之真空環境中含有之度量系統100之元件之一圖式。

圖10係繪示經組態以根據本文中描述之方法基於x射線散射測量資料解析樣品參數值之一模型建立及分析引擎150之一圖式。

圖11A至圖11C分別描繪以本文中描述之方式經受量測之一典型3D快閃記憶體裝置190之一等角視圖、一俯視圖及一橫截面視圖。

圖12描繪繪示如本文中描述般基於小佔用面積x射線散射測量量測而量測結構之一例示性方法300之一流程圖。

【實施方式】

相關申請案之交叉參考

本專利申請案根據35 U.S.C. §119規定主張2017年4月14日申請之美國臨時專利申請案第62/485,497號之優先權，該案之標的物以全文引用的

方式併入本文中。

現在將詳細參考本發明之背景實例及一些實施例，在隨附圖式中繪示其等之實例。

本文中描述用於藉由具有相對小工具佔用面積之傳輸小角度x射線散射測量(TSAXS)系統特性化半導體裝置之尺寸及材料性質之方法及系統。採用此等系統及技術以量測與不同半導體製程相關聯之結構及材料特性。在一些實例中，採用TSAXS以量測高高寬比半導體結構之臨界尺寸、厚度、疊對及材料性質，包含(但不限於)自旋轉移扭矩隨機存取記憶體(STT-RAM)、三維NAND記憶體(3D-NAND)或垂直NAND記憶體(V-NAND)、動態隨機存取記憶體(DRAM)、三維快閃記憶體(3D-FLASH)、電阻性隨機存取記憶體(Re-RAM)及相變隨機存取記憶體(PC-RAM)。

高亮度TSAXS之使用實現至目標之不透明區域中的高通量x射線輻射穿透。可使用x射線散射測量量測之幾何參數之實例包含孔徑、孔密度、線邊緣粗糙度、線寬度粗糙度、側壁角、輪廓、臨界尺寸、疊對、邊緣放置誤差及間距。一可量測材料參數之一實例包含電子密度。在一些實例中，x射線散射測量實現小於50 nm之特徵以及其中需要幾何參數及材料參數的量測之先進半導體結構(諸如STT-RAM、V-NAND、DRAM、PC-RAM及Re-RAM)之量測。

圖1繪示在至少一個新穎態樣中用於量測一樣品之特性之一T-SAXS度量工具100之一實施例。如圖1中展示，系統100可用於在藉由一照明光束光點照明之一樣品101之一檢測區域102上方執行T-SAXS量測。

在所描繪之實施例中，度量工具100包含經組態以產生適用於T-SAXS量測之x射線輻射之一x射線照明源110。在一些實施例中，x射線照

明源110經組態以產生在0.01奈米與1奈米之間之波長。一般言之，可設想能夠在足以實現高處理量、線內度量之通量位準下產生高亮度x射線之任何適合高亮度x射線照明源供應用於T-SAXS量測之x射線照明。在一些實施例中，一x射線源包含使x射線源能夠依不同可選擇波長遞送x射線輻射之一可調諧單色器。

在一些實施例中，採用發射具有大於15 keV之光子能量之輻射之一或多個x射線源以確保x射線源依容許穿過整個裝置以及晶圓基板的充分透射之波長供應光。藉由非限制性實例，一粒子加速器源、一液體陽極源、一旋轉陽極源、一固定固體陽極源、一微聚焦源、一微聚焦旋轉陽極源、一基於電漿之源及一逆康普頓(Compton)源之任何者可用作x射線照明源110。在一個實例中，可設想可購自(美國)加利福尼亞州，帕洛阿爾托市(Palo Alto)之Lyncean Technologies, Inc.之一逆康普頓源。逆康普頓源具有能夠在光子能量之一範圍內產生x射線，藉此使x射線源能夠依不同可選擇波長遞送x射線輻射之一額外優點。

例示性x射線源包含經組態以轟擊固體或液體目標以刺激x射線輻射之電子束源。在2011年4月19日頒予KLA-Tencor Corp.之美國專利第7,929,667號中描述用於產生高亮度、液體金屬x射線照明之方法及系統，該專利之全文以引用的方式併入本文中。

x射線照明源110在具有有限橫向尺寸(即，與光束軸正交之非零尺寸)之一源區域上方產生x射線發射。聚焦光學器件111將源輻射聚焦至定位於樣品101上之一度量目標上。有限橫向源尺寸導致在目標上藉由來自源之邊緣之射線117界定之有限光點大小102。在一些實施例中，聚焦光學器件111包含橢圓形聚焦光學元件。

一光束發散控制狹縫112定位於聚焦光學器件111與光束塑形狹縫機構120之間之光束路徑中。光束發散控制狹縫112限制提供至量測中樣品之照明之發散。一額外中間狹縫113定位於光束發散控制狹縫112與光束塑形狹縫機構120之間之光束路徑中。中間狹縫113提供額外光束塑形。然而，一般言之，中間狹縫113係選用的。

光束塑形狹縫機構120定位於緊接在樣品101之前之光束路徑中。在一個態樣中，光束塑形狹縫機構120之狹縫經定位緊密接近樣品101以最小化歸因於光束發散之藉由有限源大小界定之入射光束光點大小之擴大。在一個實例中，針對一10微米x射線源大小及光束塑形狹縫與樣品101之間之25毫米之一距離，歸因於陰影之由有限源大小產生之光束光點大小之擴展係近似1微米。在其他實例中，光束發散由經定位距樣品101小於100毫米之光束塑形狹縫控制。

在一些實施例中，光束塑形狹縫機構120包含多個獨立致動之光束塑形狹縫。在一項實施例中，光束塑形狹縫機構120包含四個獨立致動之光束塑形狹縫。此四個光束塑形狹縫有效地阻擋傳入光束115之一部分且產生具有一盒狀照明橫截面之一照明光束116。

圖2及圖3以兩個不同組態描繪在圖1中描繪之光束塑形狹縫機構120之一端視圖。如圖2及圖3中繪示，光束軸垂直於圖式頁。如圖2中描繪，傳入光束115具有一大橫截面。在一些實施例中，傳入光束115具有近似1毫米之一直徑。此外，傳入光束115在光束塑形狹縫126至129內之位置可歸因於光束指向誤差而具有近似3毫米之一不確定性。為了適應傳入光束之大小及光束位置之不確定性，各狹縫具有近似6毫米之一長度L。如圖2中描繪，各狹縫可在垂直於光束軸之一方向上移動。在圖2之圖解中，狹

縫126至129定位於距光束軸之一最大距離處(即，狹縫完全敞開且其等不限制光穿過光束塑形狹縫機構120)。

圖3描繪在阻擋傳入光束115之一部分使得經遞送至量測中樣品之傳出光束116具有減小之大小及良好界定之形狀的位置中之光束塑形狹縫機構120之狹縫126至129。如圖3中描繪，狹縫126至129之各者已朝向光束軸向內移動以達成所要輸出光束形狀。

狹縫126至129由最小化散射且有效地阻擋入射輻射之材料建構。例示性材料包含單晶體材料，諸如鍺、砷化鎵、磷化銦等。通常，沿著一結晶方向分裂而非鋸切狹縫材料以最小化跨結構邊界之散射。另外，狹縫相對於傳入光束定向使得傳入輻射與狹縫材料之內部結構之間之相互作用產生最小量之散射。晶體附接至由高密度材料(例如，鎢)製成之各狹縫固持器以用於完全阻擋狹縫之一個側上之x射線光束。在一些實施例中，各狹縫具有具備近似0.5毫米之一寬度及近似1至2毫米之一高度之一矩形橫截面。如圖2中描繪，一狹縫之長度L係近似6毫米。

一般言之，x射線光學器件塑形x射線輻射且將x射線輻射引導至樣品101。在一些實例中，x射線光學器件包含一x射線單色器以使入射於樣品101上之x射線光束單色化。在一些實例中，x射線光學器件使用多層x射線光學器件將x射線光束準直或聚焦至樣品101之量測區域102上至小於1毫弧度發散。在此等實例中，多層x射線光學器件亦用作一光束單色器。在一些實施例中，x射線光學器件包含一或多個x射線準直鏡、x射線孔徑、x射線光束光闌、折射x射線光學器件、繞射光學器件(諸如波帶片)、蒙特爾(Montel)光學器件、鏡面x射線光學器件(諸如掠入射橢球面鏡)、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

其等之任何組合。在美國專利公開案第2015/0110249號中描述進一步細節，該案之內容以全文引用的方式併入本文中。

x射線偵測器119收集自樣品101散射之x射線輻射114且根據一T-SAXS量測模態產生指示對入射x射線輻射敏感之樣品101之性質之一輸出信號135。在一些實施例中，由x射線偵測器119收集經散射x射線114，同時樣品定位系統140定位且定向樣品101以產生角度解析之經散射x射線。

在一些實施例中，一T-SAXS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。在一些實施例中，一單光子計數偵測器偵測經偵測光子之位置及數目。

在一進一步態樣中，採用一T-SAXS系統以基於散射光之一或多個繞射級判定一樣品之性質(例如，結構參數值)。如圖1中描繪，度量工具100包含經採用以擷取由偵測器119產生之信號135且至少部分基於經擷取信號判定樣品之性質之一運算系統130。

在一些實例中，基於T-SAXS之度量涉及藉由使用經量測資料反解一預定量測模型而判定樣本之尺寸。量測模型包含數個(大約十個)可調整參數且表示樣品之幾何形狀及光學性質以及量測系統之光學性質。反解法包含(但不限於)基於模型之迴歸、層析成像、機器學習或其等任何組合。以此方式，藉由對最小化經量測之散射x射線強度與經模型化結果之間的誤差之一參數化量測模型的值求解而估計目標輪廓參數。

可期望依入射角及方位角之大範圍執行量測以增加經量測參數值之精確度及準確度。此方法藉由擴展可用於分析之資料集之數目及多樣性以包含各種大角度、平面外定向來減少參數之間的相關性。舉例而言，在一法向定向中，T-SAXS能夠解析一特徵之臨界尺寸，但對於一特徵之側壁

角及高度在很大程度上不靈敏。然而，藉由收集在平面外角定向之一廣範圍內之量測資料，可解析一特徵之側壁角及高度。在其他實例中，依入射角及方位角之大範圍執行之量測提供充分解析度及穿透深度以透過其等整個深度特性化高高寬比結構。

收集依據相對於晶圓表面法線之x射線入射角而變化之繞射輻射之強度之量測。在多個繞射級中含有之資訊在考量中之各模型參數之間通常係獨有的。因此，x射線散射產生具有小誤差及減少之參數相關性之對於所關注參數之值之估計結果。

照明x射線光束116相對於一半導體晶圓101之表面法線之各定向由晶圓101相對於x射線照明光束115之任何兩個角旋轉描述，或反之亦然。在一個實例中，可關於固定至晶圓之一座標系統描述定向。圖4描繪依由一入射角 θ 及一方位角 ϕ 描述之一特定定向入射於晶圓101上之x射線照明光束116。座標系XYZ固定至度量系統(例如，照明射束116)且座標系X'Y'Z'固定至晶圓101。Y軸在平面中與晶圓101之表面對準。X及Z不與晶圓101之表面對準。Z'與法向於晶圓101之表面之一軸對準，且X'及Y'在與晶圓101之表面對準之一平面中。如圖4中描繪，x射線照明光束116與Z軸對準且因此位於XZ平面內。入射角 θ 描述x射線照明光束116相對於XZ平面中之晶圓之表面法線之定向。此外，方位角 ϕ 描述XZ平面相對於X'Z'平面之定向。 θ 及 ϕ 一起獨有地定義x射線照明光束116相對於晶圓101之表面之定向。在此實例中，x射線照明光束相對於晶圓101之表面之定向由繞法向於晶圓101之表面之一軸(即，Z'軸)之一旋轉及繞與晶圓101之表面對準之一軸(即，Y軸)之一旋轉描述。在一些其他實例中，x射線照明光束相對於晶圓101之表面之定向由繞與晶圓101之表面對準之一第一軸

及與晶圓101之表面對準且垂直於第一軸之另一軸之一旋轉描述。

在一個態樣中，一TSAXS量測系統採用在一相對短光學路徑長度內(例如，自照明源至偵測器小於3米)之硬x射線照明(例如，15 KeV或更高)來量測在相對小尺寸(例如，近似50奈米)至相對大尺寸(例如，高達10微米)之範圍中之目標。一般言之，本文中描述之方法及系統實現適合用於具有減小之光學路徑長度之半導體結構之度量之Q空間解析度。

對一TSAXS系統之最小可達成解析度之一幾何限制通常藉由一最小Q值 Q_{min} 特性化。 Q_{min} 由方程式(1)表達，其中 p 係偵測器處之像素大小， D 係經量測樣本與偵測器之間之距離，且 λ 係x射線輻射之波長。

$$Q_{min} = \frac{4\pi p}{\lambda D} \quad (1)$$

如由方程式(1)繪示，隨著經量測樣本與偵測器之間之距離 D 減小，針對一給定像素大小之最小可達成Q值增大。針對 D 之一減小值，為了維持Q解析度(即， Q_{min} 之小值)，需要像素大小之一成比例減小。當前最先進技術半導體度量目標之度量需要具有小於 0.01nm^{-1} 之一Q值之一TSAXS系統，其當前無法藉由受像素大小限制之商業上可行TSAXS系統達成。

雖然方程式(1)描述對Q解析度之一幾何限制，但存在必須經抑制以達成幾何限制之對Q解析度之其他限制。在一個實例中，在偵測器處之光學焦點之空間範圍限制可達成Q解析度。在另一實例中，在偵測器處光學系統之點擴散函數(PSF)限制可達成Q解析度。

在一進一步態樣中，本文中描述之TSAXS量測涉及使用被聚焦在晶圓表面之前小於200毫米、在晶圓表面處、在偵測器表面處或在晶圓表面與偵測器表面之間之任何位置處之一x射線光束照明一樣本以緩解對可達成Q解析度之光學焦點限制。一般言之，針對涉及必須使用最小可能照明

光點大小照明之相對小目標之度量應用，x射線光束經聚焦更接近晶圓表面。再者，針對涉及其中期望高影像解析度及光子通量之相對大目標之度量應用，x射線光束經聚焦更接近偵測器。

在一些實施例中，針對相對小目標(例如，近似50至100奈米)之量測，TSAXS量測系統之焦點定位於晶圓表面處或附近，如圖1中繪示。藉由將照明焦點定位於晶圓處，量測光點大小在經量測結構處最小。此最小化歸因於照明光外溢至包圍所關注目標之結構上之信號污染。此組態對於小大小之目標較佳，其中歸因於有限量測光點大小之信號污染係有限的。然而，將照明焦點定位於晶圓而非偵測器處引起入射於偵測器上之光束大小之一增加。此增加歸因於光束發散之入射光束之繞射部分之重疊的可能性。此隨著晶圓與偵測器之間之距離減小至一相對小尺寸(例如，小於1米)而加劇，此係因為角度級之空間分離隨著晶圓與偵測器之間之距離減小而減小。然而，針對小大小之目標(例如，小於100奈米)，繞射級之間之角分離相對大且本文中描述之偵測器解析度增強技術克服歸因於偵測器焦點限制之限制。

在其他實施例中，針對相對大目標(例如，近似1至10微米)之量測，TSAXS量測系統之焦點定位於偵測器表面處或附近，如圖5中繪示。藉由將照明焦點定位於偵測器處，量測光點大小在偵測器處而非在經量測目標處最小。此組態對於相對大大小之目標較佳，其中歸因於晶圓處之有限量測光點大小之信號污染不受限制，此係因為歸因於照明光外溢至包圍所關注目標之結構上之信號污染之風險減小。然而，針對大大小之目標，繞射級之間之角分離相對小。因此，偵測器處之角度級之空間分離相對小。此隨著晶圓與偵測器之間之距離減小至一相對小尺寸(例如，小於1米)而加

劇。藉由將照明焦點定位於偵測器處，最小化歸因於焦點限制之入射光束之繞射部分之重疊之可能性。此外，針對相對大目標大小，本文中描述之偵測器解析度增強技術克服歸因於偵測器處之級之相對小空間分離之限制。

一般言之，可將光學焦點之位置調整至經量測樣本與偵測器之間之任何位置，同時伴隨先前描述之優點/缺點之一折衷。一般言之，隨著目標大小減小，較佳移動光學焦點更接近晶圓或至晶圓前面，且隨著目標大小增大，較佳移動光學焦點更接近偵測器。

在一進一步態樣中，本文中描述之TSAXS量測涉及具有一小PSF之一高解析度偵測器以緩解對可達成Q解析度之偵測器PSF限制。無關於光學焦點相對於晶圓及偵測器定位於何處，當晶圓-偵測器距離D減小至一相對小值(例如，小於1米)時，一高解析度偵測器係有利的。

由系統之PSF設定之Q解析度限制取決於度量之要求及PSF之源。舉例而言，在弱散射之情況下，在一給定Q中，為了解析該Q，PSF可需要下降至10%。在其他實例中，在一給定Q中，為了解析該Q，PSF可需要下降至1%。為了實現高Q解析度及最短可能晶圓-偵測器距離D，TSAXS系統經設計以最小化Q相依PSF。在一些實例中，偵測器之像素大小小於100微米且偵測器PSF小於像素大小使得來自一特定像素之入射繞射光之鄰近像素之污染小於0.1%。

選擇偵測器材料以最小化透射。再者，偵測器之構造最小化偵測器內之PSF加寬。因此，系統PSF獨立於偵測器位置。舉例而言，使用傳統矽基偵測器對硬x射線(例如，15 KeV或更多)之偵測遭受一顯著Q獨立PSF。因此，需要一大晶圓-偵測器距離D (例如，2米或更多)以執行半導

體結構之度量。在減少之透射及反向散射之情況下，將PSF限制抑制至低於由方程式(1)描述之幾何限制，使用小於1米之一晶圓-偵測器距離D（例如，小至600毫米之D）達成半導體結構之度量。

在一些實施例中，一TSAXS系統包含具有高量子效率及動態範圍（例如，大於 10^5 ）之一或多個光子計數偵測器及在無損害且具有最小寄生反向散射之情況下吸收入射輻射之厚度吸收性晶體基板（例如，大於500微米之厚度）。在一些實施例中，一單光子計數偵測器偵測經偵測光子之位置及數目。

在一些實施例中，收集零級光束以及較高繞射級。零級光束比其他級強若干數量級。若零級光束在偵測器之X射線敏感區段中未被完全吸收，則其將散射且產生寄生信號。此等寄生信號之強度限制量測之動態範圍。舉例而言，若寄生信號係最大通量信號（即，零級信號）之 10^{-4} ，則將污染與許多更高級相關聯之信號。因此，偵測器（例如，偵測器119）展現x射線至電子電洞對之高轉換效率及高x射線吸收以增加x射線度量之有效動態範圍係至關重要的。

適用於小佔用面積x射線散射測量之例示性偵測器材料包含碲化鎘（CdTe）、鍺（Ge）及砷化鎵（GaAs）晶體及其他材料。在一些實施例中，選擇偵測器材料以提供在對應於源能量之一窄能帶中之高轉換效率。

在一些實施例中，選擇偵測器材料之厚度以達成傳入x射線之所要吸收。在一些實施例中，使偵測器相對於傳入x射線光束（各種繞射級）傾斜以增加穿過偵測器材料之x射線光束之路徑長度且因此，增加總吸收量。

在一些實施例中，採用雙臨限值偵測器以改良SNR。

在一進一步態樣中，採用一TSAXS系統以基於多個經量測繞射級判

定一樣品之性質(例如，結構參數值)。如圖1中描繪，度量工具100包含經採用以擷取由偵測器119產生之信號135且至少部分基於經擷取信號判定樣品之性質之一運算系統130。

在一TSAXS量測中，一高高寬比、一經製造結構將一準直x射線光束繞射至諸繞射級。各繞射級在一特定可預測方向上行進。繞射級之角度間距與樣品之晶格常數除以波長成反比。繞射級由放置於距晶圓某個距離處之一偵測器陣列偵測。偵測器之各像素輸出指示命中像素之光子之數目之一信號。

繞射級之強度具有 $I(m,n,\theta,\phi,\lambda)$ 形式，其中 $\{m,n\}$ 係繞射級之整數指數， $\{\theta,\phi\}$ 係入射光束之仰角及方位角(即，入射主射線相對於固定至晶圓之一座標系統之極座標)，且 λ 係入射x射線之波長。

若干雜訊源在照明光離開照明且傳播朝向樣品時擾動該照明光。例示性干擾包含電子束電流波動、溫度引發之光學器件漂移等。將受擾動入射通量表示為 $F_0(1+n_1)$ 。

目標以取決於入射光束之方位角及仰角之一方式散射入射輻射。可將散射成級 (m,n) 之光之效率定義為 $S_{mn}(\theta,\phi)$ 。在經繞射光自樣品傳播至偵測器時，光束穿過類似地影響所有級且具有某一變動 $(1+n_2)$ 及寄生雜訊 (n_3) 之其他散射介質。以此方式，以時間 t 量測之各級的總強度 I_{mn} 可由方程式(2)表達。

$$I_{mn} = S_{mn}(\theta,\phi)(1+n_2)(1+n_1)F_0t+n_3 \quad (2)$$

圖6描繪藉由諸如度量系統100之一度量系統量測之經散射級之一影像171。如圖6中繪示，在影像中心中之亮光點與零級光束相關聯。

可以諸多方式提取各級之強度。在一些實施例中，繞射級可在偵測

器處空間分離。在此等實施例中，由偵測器陣列個別地偵測繞射級，且組合(即，添加)與相同繞射級相關聯之像素的輸出。以此方式，藉由累積與各特定繞射級相關聯之像素的光子計數而區別經偵測繞射級。此案例更有可能在量測相對小節距特徵時或在使用具有一相對小發散之一光束量測時發生。

在一些其他實施例中，繞射級在空間上重疊。此在對具有一相對小晶圓-偵測器距離 D (例如， D 小於2米)之相對大目標(例如，具有1微米或更多之一間距之目標)執行TSAXS度量時或在使用具有一相對大發散之一光束量測時係典型的。在此等實施例中，在 Q 空間中分離繞射級以估計所關注結構參數之值。在一些此等實施例中，基於可用光束形狀資訊估計繞射級之形狀且採用一準確光束模型來考量歸因於重疊之 Q 解析度損耗。此對於滿足裝置上度量之要求尤其重要。一些現有度量系統無法執行重疊級之分離，此係因為系統採用防止存取估計繞射級之形狀所需之光束形狀資訊之光束光闌。在Mazor等人之標題為「X-ray scatterometry apparatus」之美國專利第9,606,073號中描述此一系統，該專利之內容以全文引用的方式併入本文中。

當繞射級在空間上重疊於偵測器處時，無法僅組合像素輸出以判定與一特定繞射級相關聯之強度。在此等實施例中，採用一量測模型以對繞射級解卷積以鑑別各經偵測繞射級之經量測強度。

在一些實施例中，基於經量測零級光束形狀而對經重疊級解卷積。在一些實施例中，即時執行此解卷積。基於零級光束之輪廓而模型化較高經繞射級(即，大於零之級)之光束輪廓。圖7描繪由一度量系統(諸如度量系統100)量測之經散射級的一影像172。圖8描繪與圖7中所描繪之影像

172的橫截面C相關聯之強度輪廓的一圖表173。相對高強度零級光束提供用來模型化較高繞射級之一極準確光束輪廓。

在一些實施例中，藉由簡單強度除法或以其他方式相對於經量測零級而估計各較高繞射級之強度。以此方式，顯著降低與相對弱、較高級信號相關聯之量測不確定性。

藉由基於同時經量測零級光束而估計較高繞射級之強度，在資料收集期間使散射信號與資料系統擾動分離。即時減輕歸因於光學組件(例如，狹縫、光學器件、光點形狀)之未對準之擾動及沿光束路徑(例如， n_1 及 n_2)之擾動。藉由使用所有經散射強度(包含零級)，使經散射強度對經量測樣品之厚度或材料密度的相依性與晶圓之前及之後的通量擾動隔離。

一高能量光子至偵測器之一晶體中之一電子雲之實體轉換亦對高 q 解析度、短光學路徑長度TSAXS系統設定一偵測限制。當像素大小足夠小以執行半導體結構之短光學路徑長度TAXS度量時，電子雲引起跨若干像素偵測一單光子事件。

在另一態樣中，由一光子轉換事件刺激之一電子雲之質心之位置由偵測器(例如，偵測器119)計算。質心之位置以子像素準確度提供入射光子之位置。此有效地減小像素大小且實現超出由方程式(1)描述之幾何限制之 Q 解析度。如本文中描述之子像素空間內插對於具有小於1米之一晶圓-偵測器距離之半導體結構之TSAXS量測係較佳的。

在一些實施例中，具有一相對短光學路徑長度之一TSAXS系統經組態具有入射於垂直定位(即，法向於晶圓表面近似垂直於重力向量)之一晶圓上之一水平光學路徑。然而，在一些其他實施例中，具有一相對短光學路徑長度之一TSAXS系統經組態具有入射於水平定位(即，法向於晶圓表

面近似平行於重力向量)之一晶圓上之一垂直光學路徑。藉由垂直定向光束線，可達成一較小工具佔用面積且簡化晶圓處置。

在一進一步態樣中，x射線偵測器解析一或多個x射線光子能量且針對各x射線能量分量產生指示樣品之性質之信號。在一些實施例中，x射線偵測器119包含一CCD陣列、一微通道板、一光電二極體陣列、一微帶比例計數器、一充氣比例計數器、一閃爍器或一螢光材料之任何者。

以此方式，除了像素位置及計數之數目之外，亦藉由能量鑑別偵測器內之x射線光子互動。在一些實施例中，藉由比較x射線光子互動之能量與一預定上臨限值及一預定下臨限值而鑑別x射線光子互動。在一項實施例中，經由輸出信號135將此資訊傳達至運算系統130以用於進一步處理及儲存。

在一些實施例中，經量測目標在一個維度上係週期性的(例如，一FinFET結構)。因而，僅需要在一個方向上最小化在偵測器處TSAXS系統之PSF。然而，在一些其他實施例中，經量測目標在兩個維度上係週期性的(例如，VNAND接觸件)。在此等實施例中，在兩個方向上最小化在偵測器處TSAXS系統之PSF係有利的。

在另一態樣中，TSAXS系統經組態以在一個方向上基於空間分離級但在正交方向上基於重疊級而量測一目標。在一些此等實施例中，在其中空間分離繞射級之方向上判定一或多個所關注參數之(若干)值。隨後採用此等參數值以基於重疊級判定一或多個所關注參數之(若干)值。

在一些實施例中，x射線照明源110、聚焦光學器件111、狹縫112及113或其等之任何組合維持於與樣品101相同之大氣環境(例如，氣體沖洗環境)中。然而，在一些實施例中，任何此等元件之間及內之光學路徑長

度係長的且在空氣中散射之x射線給偵測器上之影像帶來雜訊。因此，在一些實施例中，x射線照明源110、聚焦光學器件111以及狹縫112及113之任何者維持於藉由真空窗彼此分離及與樣品(例如，樣品101)分離之一局部真空環境中。

類似地，在一些實施例中，x射線偵測器119維持於與樣品101相同之大氣環境(例如，氣體沖洗環境)中。然而，在一些實施例中，樣品101與x射線偵測器119之間之距離係長的且在空氣中散射之x射線給經偵測信號帶來雜訊。因此，在一些實施例中，x射線偵測器(例如，偵測器119)之一或多者維持於藉由一真空窗而與樣品(例如，樣品101)分離之一局部真空環境中。

圖9係繪示含有x射線照明源110之一真空腔室160、含有聚焦光學器件111之真空腔室162以及含有狹縫112及113之真空腔室163之一圖式。各真空腔室之開口由真空窗覆蓋。舉例而言，真空腔室160之開口由真空窗161覆蓋。類似地，真空腔室163之開口由真空窗164覆蓋。真空窗可由對x射線輻射實質上透明之任何適合材料(例如，Kapton、Beryllium等)構成。在各真空腔室內維持一適合真空環境以最小化照明光束之散射。一適合真空環境可包含任何適合位準之真空、包含具有一小原子序數之一氣體(例如，氦)之任何適合沖洗環境。以此方式，儘可能多的光束路徑定位在真空中以最大化通量且最小化散射。

在一些實施例中，將包含樣品101之整個光學系統維持於真空中。然而，一般言之，與將樣品101維持於真空中相關聯之成本歸因於與樣品定位系統140之構造相關聯之複雜性而係高的。

在另一進一步態樣中，光束塑形狹縫機構120與真空腔室163機械地

整合以最小化經受大氣環境之光束路徑長度。一般言之，可期望在與樣品101相互作用之前將儘可能多的光束囊封於真空中。在一些實施例中，真空光束線在光束塑形狹縫機構120之輸入處延伸至一中空圓柱狀腔中。真空窗164定位於光束塑形狹縫機構120內真空腔室163之輸出處使得傳入光束115保持在光束塑形狹縫機構120之一部分內之真空中，接著在與狹縫126至129之任何者及樣品101之相互作用之前穿過真空窗164。

在圖1中描繪之實施例中，聚焦光學器件111、狹縫112及113以及光束塑形狹縫機構120維持在一飛行管118內之一受控制環境(例如，真空)中。

在另一進一步態樣中，運算系統130經組態以產生一樣品之一經量測結構之一結構模型(例如，幾何模型、材料模型或組合的幾何及材料模型)，產生包含來自結構模型之至少一個幾何參數之一TSAXS回應模型且藉由使用TSAXS回應模型執行TSAXS量測資料之一擬合分析而解析至少一個樣品參數值。使用分析引擎以比較經模擬TSAXS信號與經量測資料，藉此容許判定幾何以及材料性質(諸如樣本之電子密度)。在圖1中描繪之實施例中，運算系統130經組態為一模型建立及分析引擎，該模型建立及分析引擎經組態以實施如本文中描述之模型建立及分析功能性。

圖10係繪示由運算系統130實施之一例示性模型建立及分析引擎150之一圖。如圖10中描繪，模型建立及分析引擎150包含產生一樣品之一經量測結構之一結構模型152之一結構模型建立模組151。在一些實施例中，結構模型152亦包含樣品之材料性質。接收結構模型152作為至TSAXS回應函數建立模組153之輸入。TSAXS回應函數建立模組153至少部分基於結構模型152產生一TSAXS回應函數模型155。在一些實例中，

TSAXS回應函數模型155係基於x射線形狀因數，

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

其中F係形狀因數，q係散射向量，且p(r)係球面座標中樣品之電子密度。

接著藉由以下給定x射線散射強度

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

接收TSAXS回應函數模型155作為至擬合分析模組157之輸入。擬合分析模組157比較模型化TSAXS回應與對應經量測資料以判定樣品之幾何以及材料性質。

在一些實例中，藉由最小化一卡方值而達成模型化資料至實驗資料之擬合。舉例而言，針對TSAXS量測，一卡方值可定義為

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

其中 $s_j^{\text{SAXS experiment}}$ 係在「通道」j中之經量測TSAXS信號135，其中指數j描述一組系統參數，諸如繞射級、能量、角座標等。 $s_j^{\text{SAXS model}}(v_1, \dots, v_L)$ 係針對一組結構(目標)參數 $v_1, \dots, v_L$ 評估之針對「通道」j之模型化TSAXS信號 S_j ，其中此等參數描述幾何(CD、側壁角、疊對等)及材料(電子密度等)。 $\sigma_{\text{SAXS},j}$ 係與第j個通道相關聯之不確定性。 N_{SAXS} 係在x射線度量中之通道之總數目。 L 係特性化度量目標之參數之數目。

方程式(5)假定與不同通道相關聯之不確定性不相關。在其中與不同通道相關聯之不確定性相關之實例中，可計算不確定性之間之一協方差。

在此等實例中，針對x射線散射測量量測之一卡方值可表達為

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

其中 V_{SAXS} 係 SAXS 通道不確定性之協方差矩陣且 T 表示轉置。

在一些實例中，擬合分析模組 157 藉由使用 TSAXS 回應模型 155 對 TSAXS 量測資料 135 執行一擬合分析而解析至少一個樣品參數值。在一些實例中，最佳化 χ^2_{SAXS} 。

如前文描述，藉由最小化卡方值而達成 TSAXS 資料之擬合。然而，一般言之，可藉由其他函數達成 TSAXS 資料之擬合。

TSAXS 資料之擬合對於提供對所關注幾何及/或材料參數之靈敏度之任何類型之 TSAXS 技術係有利的。樣品參數可係確定性(例如，CD、SWA 等)或統計性(例如，側壁粗糙度之均方根高度、粗糙度相關性長度等)，只要使用描述與樣品之 TSAXS 光束互動之適當模型。

一般言之，運算系統 130 經組態以採用即時臨界尺寸(RTCD)即時存取模型參數，或其可存取預運算模型庫以判定與樣品 101 相關聯之至少一個樣品參數值之一值。一般言之，可使用某個形式之 CD 引擎以評估一樣品之經指派 CD 參數同與經量測樣品相關聯之 CD 參數之間之差異。在 2010 年 11 月 2 日頒予 KLA-Tencor Corp. 之美國專利第 7,826,071 號中描述用於運算樣品參數值之例示性方法及系統，該專利之全文以引用的方式併入本文中。

在一些實例中，模型建立及分析引擎 150 藉由側饋分析、前饋分析及平行分析之任何組合而改良經量測參數之準確度。側饋分析係指在相同樣品之不同區域上獲取多個資料集且將自第一資料集判定之共同參數傳遞至第二資料集上以用於分析。前饋分析係指在不同樣品上獲取資料集且使用一逐步複製精確參數前饋方法將共同參數正向傳遞至後續分析。平行分析係指將一非線性擬合方法平行或同時應用至多個資料集，其中在擬合期間

耦合至少一個共同參數。

多工具及結構分析係指基於迴歸、一查找表(即，「庫」匹配)或多個資料集之另一擬合程序之一前饋、側饋或平行分析。在2009年1月13日頒予KLA-Tencor Corp.之美國專利第7,478,019號中描述用於多工具及結構分析之例示性方法及系統，該專利之全文以引用的方式併入本文中。

在一個進一步態樣中，度量工具100包含經組態以實施如本文中描述之光束控制功能性之一運算系統(例如，運算系統130)。在圖1中描繪之實施例中，運算系統130經組態為可操作以控制諸如入射照明光束117之強度、發散、光點大小、偏光、光譜及定位之任何照明性質之一光束控制器。

如圖1中繪示，運算系統130通信地耦合至偵測器119。運算系統130經組態以自偵測器119接收量測資料135。在一個實例中，量測資料135包含樣品之經量測回應之一指示(即，繞射級之強度)。基於經量測回應在偵測器119之表面上之分佈，藉由運算系統130判定照明光束116入射於樣品101上之位置及區域。在一個實例中，藉由運算系統130應用圖案辨識技術以基於量測資料135判定照明光束116入射於樣品101上之位置及區域。在一些實例中，運算系統130將命令信號137傳達至照明源110以選擇所要照明波長且將命令信號136傳達至光束塑形機構120以重導引且重新塑形照明光束116，使得入射照明光束116到達相對於樣品101之所要位置及角定向。在一些其他實例中，運算系統130將一命令信號傳達至晶圓定位系統140以定位且定向樣品101，使得入射照明光束116到達相對於樣品101之所要位置及角定向。

在另一態樣中，使用x射線散射測量量測資料以基於經偵測繞射級之

經量測強度產生一經量測結構之一影像。在一些實施例中，一般化一TSAXS回應函數模型以描述自一通用電子密度網之散射。使此模型與經量測信號匹配，同時約束此網中之模型化電子密度以實施連續及稀疏邊緣提供樣本之一三維影像。

雖然基於模型之幾何參數反演對於基於TSAXS量測之臨界尺寸(CD)度量較佳，但自相同TSAXS資料產生之樣品之一圖可用於當經量測樣品偏離幾何模型之假定時識別且校正模型誤差。

在一些實例中，比較影像與由相同散射測量量測資料之一基於模型之幾何參數反演估計之結構特性。使用差異以更新經量測結構之幾何模型且改良量測效能。收斂於一準確參數量測模型之能力在量測積體電路以控制、監測且故障查找其等之製程時尤其重要。

在一些實例中，影像係電子密度、吸收性、複折射率或此等材料特性之一組合之一二維(2-D)圖。在一些實例中，影像係電子密度、吸收性、複折射率或此等材料特性之一組合之一三維(3-D)圖。使用相對少的物理約束產生該圖。在一些實例中，直接自所得圖估計一或多個所關注參數，諸如臨界尺寸(CD)、側壁角(SWA)、疊對、邊緣放置誤差、節距游動(pitch walk)等。在一些其他實例中，圖可用於當樣本幾何形狀或材料偏離至由用於基於模型之CD量測之一參數結構模型所設想之預期值之範圍之外時對晶圓程序除錯。在一個實例中，使用圖與由參數結構模型根據其之經量測參數預測之結構之一演現之間之差異，以更新參數結構模型且改良其之量測效能。在美國專利公開案第2015/0300965號中描述進一步細節，該案之內容以全文引用的方式併入本文中。在美國專利公開案第2015/0117610號中描述額外細節，該案之內容以全文引用的方式併入本

文中。

在一進一步態樣中，採用模型建立及分析引擎150以產生針對組合的x射線及光學量測分析之模型。在一些實例中，光學模擬係基於(例如)嚴格耦合波分析(RCWA)，其中求解馬克士威(Maxwell)方程式以計算光學信號，諸如針對不同偏光之反射率、橢偏測量參數、相位變化等。

基於使用一組合的幾何參數化回應模型之依複數個不同入射角之x射線繞射級之經偵測強度及經偵測光學強度之一組合擬合分析來判定一或多個所關注參數之值。藉由可整合或可未整合一x射線度量系統(諸如圖1中描繪之系統100)機械的一光學度量工具量測光學強度。在美國專利公開案第2014/0019097號及美國專利公開案第2013/0304424號中描述進一步細節，該等案之各者之內容以全文引用的方式併入本文中。

在一些實施例中，如本文中描述之由x射線散射測量量測特性化之度量目標定位於經量測晶圓之一刻劃道內。在此等實施例中，度量目標經定大小以配合於刻劃道之寬度內。在一些實例中，刻劃道寬度小於80微米。在一些實例中，刻劃道小於50微米。一般言之，半導體製造中採用之刻劃道之寬度趨於較小。

在一些實施例中，如本文中描述之由x射線散射測量量測特性化之度量目標定位於經量測晶圓之一作用晶粒區域內且係一功能積體電路之一部分(例如，記憶體、影像感測器、邏輯裝置等)。

一般言之，一度量目標藉由定義為度量目標之一最大高度尺寸(即，法向於晶圓表面之尺寸)除以一最大橫向範圍尺寸(即，與晶圓表面對準之尺寸)之一高寬比特性化。在一些實施例中，經量測度量目標具有至少20之一高寬比。在一些實施例中，度量目標具有至少40之一高寬比。

圖11A至圖11C分別描繪以本文中描述之方式經受量測之一典型3D快閃記憶體裝置190之一等角視圖、一俯視圖及一橫截面視圖。記憶體裝置190之總高度(或等效地，深度)在自1微米至若干微米之範圍內。記憶體裝置190係一垂直製造裝置。一垂直製造裝置(諸如記憶體裝置190)將一習知平坦記憶體裝置基本上轉動90度，使位元線及單元串垂直定向(垂直於晶圓表面)。為了提供足夠記憶體容量，大量不同材料之交替層沈積於晶圓上。此需要圖案化程序針對具有100奈米或更少之一最大橫向範圍之結構良好執行至若干微米之深度。因此，25對1或50對1之高寬比並非罕見。

應認知，可由一單一電腦系統130或替代地一多電腦系統130實行貫穿本發明描述之各種步驟。再者，系統100之不同子系統(諸如樣品定位系統140)可包含適合於實行本文中描述之步驟之至少一部分之一電腦系統。因此，不應將前述描述解譯為對本發明之一限制，而僅為一闡釋。此外，一或多個運算系統130可經組態以執行本文中描述之任何方法實施例之任何(若干)其他步驟。

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及照明光學元件。舉例而言，一或多個運算系統130可耦合至與偵測器119相關聯之運算系統。在另一實例中，可藉由耦合至電腦系統130之一單一電腦系統直接控制偵測器119。

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及類似者)接收及/或擷取資料或資訊。以此方式，傳輸媒體可充當電腦系統130與系統100之其他子系統之間之一資料鏈路。

度量系統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/或擷取資料或資訊(例如，量測結果、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，記憶體板上度量系統100、外部記憶體或外部系統)之間之一資料鏈路。舉例而言，運算系統130可經組態以經由一資料鏈路而自一儲存媒體(即，記憶體132或180)接收量測資料(例如，信號135)。舉例而言，由偵測器119量測之強度可儲存於一永久或半永久記憶體裝置(例如，記憶體132或180)中。在此方面，可自板上記憶體或自一外部記憶體系統匯入量測結果。再者，電腦系統130可經由一傳輸媒體而將資料發送至其他系統。舉例而言，由電腦系統130判定之樣品參數值170可儲存於一永久或半永久記憶體裝置(例如，記憶體180)中。在此方面，可將量測結果匯出至另一系統。

運算系統130可包含(但不限於)一個人電腦系統、主機電腦系統、工作站、影像電腦、平行處理器或此項技術中已知之任何其他裝置。一般言之，術語「運算系統」可廣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何裝置。

可經由諸如一導線、電纜或無線傳輸鏈路之一傳輸媒體傳輸實施諸如本文中描述之方法之方法之程式指令134。舉例而言，如圖1中繪示，經由匯流排133而將儲存於記憶體132中之程式指令傳輸至處理器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、一磁碟或光碟或一磁帶。

在一些實施例中，實施如本文中描述之一散射測量分析作為一製程工具之部分。製程工具之實例包含(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TSAXS分析之結果以控制

一製程。在一個實例中，將自一或多個目標收集之TSAXS量測資料發送至一製程工具。如本文中描述般分析TSAXS量測資料且結果用於調整製程工具之操作。

可使用如本文中描述之散射測量量測以判定各種半導體結構之特性。例示性結構包含(但不限於) FinFET、低維結構(諸如奈米線或石墨烯)、亞10 nm結構、微影結構、基板穿孔(TSV)、記憶體結構(諸如DRAM、DRAM 4F2、FLASH、MRAM)及高高寬比記憶體結構。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、孔徑、孔密度、側壁角、輪廓、臨界尺寸、節距)及材料參數(諸如電子密度、組合物、晶粒結構、形態、應力、應變及元素識別)。

圖14繪示適合於由本發明之度量系統100實施之一方法300。在一個態樣中，應認知，可經由由運算系統130之一或多個處理器執行之一預程式化演算法實行方法300之資料處理方塊。雖然在度量系統100之背景內容中提出以下描述，但本文中應認知，度量系統100之特定結構態樣不表示限制且應僅解譯為闡釋性。

在方塊301中，使用15千電子伏特或更高之一能階之x射線輻射之一光束照明形成於一晶圓表面上之一量測目標。

在方塊302中，回應於入射光束而偵測與自量測目標散射之一定量之輻射之複數個繞射級相關聯之一強度。照明源與偵測器之間之一光學路徑長度小於3米。另外，複數個繞射級之兩者或更多者在空間上重疊於偵測器表面上。

在方塊303中，基於一零繞射級之一光束形狀判定重疊繞射級之各者之一強度。

在方塊304中，基於複數個繞射級之強度判定與量測目標相關聯之一所關注參數之一值。

如本文中描述，術語「臨界尺寸」包含一結構之任何臨界尺寸(例如，底部臨界尺寸、中間臨界尺寸、頂部臨界尺寸、側壁角、光柵高度等)、任何兩個或兩個以上結構之間之一臨界尺寸(例如，兩個結構之間之距離)及兩個或兩個以上結構之間之一位移(例如，疊對光柵結構之間之疊對位移等)。結構可包含三維結構、圖案化結構、疊對結構等。

如本文中描述，術語「臨界尺寸應用」或「臨界尺寸量測應用」包含任何臨界尺寸量測。

如本文中描述，術語「度量系統」包含至少部分採用以在任何態樣中特性化一樣品之任何系統，包含臨界尺寸應用及疊對度量應用。然而，此等技術術語不限制如本文中描述之術語「度量系統」之範疇。另外，本文中描述之度量系統可經組態以量測圖案化晶圓及/或未經圖案化晶圓。度量系統可組態為一LED檢測工具、邊緣檢測工具、背側檢測工具、巨集檢測工具或多模式檢測工具(涉及同時來自一或多個平台之資料)及受益於本文中描述之量測技術之任何其他度量或檢測工具。

本文中針對可用於處理一樣品之一半導體處理系統(例如，一檢測系統或一微影系統)描述各項實施例。術語「樣品」在本文中用以指一晶圓、一倍縮光罩或可藉由此項技術中已知之構件處理(例如，印刷或檢測缺陷)之任何其他樣本。

如本文中描述，術語「晶圓」大體上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。此等基板通常可在半導體製造廠中找到及/或處理。在一些情況中，一晶圓可僅包

含基板(即，裸晶圓)。替代地，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。

一「倍縮光罩」可為處於一倍縮光罩製程之任何階段之一倍縮光罩，或為可能或可能未經釋放以於一半導體製造廠中使用之一完成倍縮光罩。一倍縮光罩或一「遮罩」大體上定義為具有形成於其上且以一圖案組態之實質上不透明區域之一實質上透射基板。基板可包含(例如)一玻璃材料，諸如非晶 SiO_2 。可在一微影程序之一曝光步驟期間將一倍縮光罩安置於一覆蓋有光阻劑之晶圓上方，使得可將倍縮光罩上之圖案轉印至光阻劑。

形成於一晶圓上之一或多個層可經圖案化或未經圖案化。例如，一晶圓可包含各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最終可導致完成裝置。許多不同類型的裝置可形成於一晶圓上，且如本文中使用的術語晶圓意欲涵蓋其上製造此項技術中已知之任何類型的裝置之一晶圓。

在一或多項例示性實施例中，所描述之功能可實施於硬體、軟體、韌體或其等之任何組合中。若在軟體中實施，則功能可作為一或多個指令或程式碼儲存於一電腦可讀媒體上或經由該電腦可讀媒體傳輸。電腦可讀媒體包含電腦儲存媒體及通信媒體兩者，包含促進一電腦程式自一位置至另一位置之傳送之任何媒體。一儲存媒體可為可藉由一通用電腦或專用電腦存取之任何可用媒體。舉例而言(且非限制)，此電腦可讀媒體可包括RAM、ROM、EEPROM、CD-ROM或其他光碟儲存器、磁碟儲存器或其他磁性儲存裝置或可用於載送或儲存呈指令或資料結構之形式之所要程式

碼構件且可藉由一通用電腦或專用電腦或一通用或專用處理器存取之任何其他媒體。再者，任何連接可被適當地稱為一電腦可讀媒體。例如，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)包含於媒體之定義中。如本文中使用的，磁碟及光碟包含光碟(CD)、雷射光碟、XRF碟、數位多功能光碟(DVD)、軟碟及藍光光碟，其中磁碟通常磁性地重現資料而光碟用雷射光學地重現資料。上述組合亦應包含於電腦可讀媒體之範疇內。

儘管上文為指導目的而描述某些特定實施例，但本專利文獻之教示具有一般適用性且不限於上文中描述之特定實施例。因此，在不脫離如申請專利範圍中闡述之本發明之範疇之情況下，可實踐所描述之實施例之各種特徵之各種修改、調適及組合。

【符號說明】

100	度量系統/傳輸小角度x射線散射測量(T-SAXS)度量工具
101	樣品
102	檢測區域/有限光點大小
110	x射線照明源
111	聚焦光學器件
112	光束發散控制狹縫
113	中間狹縫
114	x射線輻射
115	傳入光束

116	照明光束/傳出光束
117	射線
118	飛行管
119	x射線偵測器
120	光束塑形狹縫機構
126	光束塑形狹縫
127	光束塑形狹縫
128	光束塑形狹縫
129	光束塑形狹縫
130	運算系統
131	處理器
132	記憶體
133	匯流排
134	程式指令
135	輸出信號/量測資料
136	命令信號
137	命令信號
140	樣品定位系統
150	模型建立及分析引擎
151	結構模型建立模組
152	結構模型
153	傳輸小角度x射線散射測量(TSAXS)回應函數建立模組
155	傳輸小角度x射線散射測量(TSAXS)回應函數模型

157 擬合分析模組

160 真空腔室

161 真空窗

162 真空腔室

163 真空腔室

164 真空窗

170 樣品參數值

171 影像

172 影像

173 圖表

180 記憶體

190 典型三維(3D)快閃記憶體裝置

300 方法

301 方塊

302 方塊

303 方塊

304 方塊

C 橫截面

D 晶圓-偵測器距離

L 長度

【發明申請專利範圍】

【第1項】

一種度量系統，其包括：

一x射線照明源，其經組態以產生一定量之x射線輻射；

一x射線照明光學器件子系統，其經組態以使用該一定量之x射線輻射之一入射聚焦光束照明形成於一晶圓表面上之一量測目標；

一樣品定位系統，其將該量測目標定位於相對於該入射聚焦光束之複數個定向處；

一x射線偵測器，其經組態以回應於各定向處之該入射聚焦光束而偵測與自該量測目標散射之一定量之輻射之複數個繞射級之各者相關聯之一強度，其中該照明源與該偵測器之間之一光學路徑長度小於3米；及

一運算系統，其經組態以

基於該複數個不同定向處之該複數個繞射級之該等經偵測強度判定與該量測目標相關聯之一所關注參數之一值。

【第2項】

如請求項1之度量系統，其中該x射線照明光學器件子系統將該聚焦光束聚焦在該晶圓表面之前小於200毫米、在該量測目標處、在該偵測器處或在該量測目標與該偵測器之間之光學路徑中之任何位置。

【第3項】

如請求項1之度量系統，其中該x射線照明光學器件子系統包含定位於該量測目標之100毫米內之一或多個光束塑形狹縫。

【第4項】

如請求項1之度量系統，其中自該量測目標至該x射線偵測器之一光

學路徑之一部分被維持於一真空中。

【第5項】

如請求項1之度量系統，其中該x射線偵測器被維持於一真空中。

【第6項】

如請求項1之度量系統，其中該x射線偵測器包含各具有小於100微米之一大小之複數個像素及小於該複數個像素之一第一像素之一點擴散函數使得入射於鄰近該第一像素之一第二像素上之一繞射光束之一部分小於入射於該第一像素上之該繞射光束之一部分之0.1%。

【第7項】

如請求項1之度量系統，其中該x射線偵測器之一光敏體積包含碲化鎘、鍺、碲化鎵或其等之任何組合。

【第8項】

如請求項7之度量系統，其中該光敏體積至少500微米厚。

【第9項】

如請求項1之度量系統，其中該x射線偵測器在該x射線偵測器之各像素處之複數個能階之間內插。

【第10項】

如請求項1之度量系統，其中該x射線偵測器以子像素解析度判定與該偵測器之一光子互動之一質心之一位置。

【第11項】

如請求項1之度量系統，其中該聚焦光束在實質上平行於一重力向量之一方向上傳播。

【第12項】

如請求項1之度量系統，其中該等繞射級之兩者或更多者在空間上重疊於該偵測器上，且其中該運算系統進一步經組態以：

基於一零繞射級之一光束形狀判定該等重疊繞射級之各者之一強度。

【第13項】

如請求項1之度量系統，其中該量測目標包含一或多個高的高寬比結構。

【第14項】

如請求項13之度量系統，其中該一或多個高的高寬比結構係一自旋轉扭矩隨機存取記憶體(STT-RAM)、一三維NAND記憶體(3D-NAND)、一動態隨機存取記憶體(DRAM)、一三維快閃記憶體(3D-FLASH)、電阻性隨機存取記憶體(Re-RAMPC)及一相變隨機存取記憶體(PC-RAM)之任何者。

【第15項】

一種度量方法，其包括：

使用15千電子伏特或更高之一能階藉由一照明源產生之x射線輻射之一光束照明形成於一晶圓表面上之一量測目標；

回應於該入射光束而偵測與自該量測目標散射之一定量之輻射之複數個繞射級相關聯之一強度，其中該複數個繞射級之兩者或更多者在空間上重疊於偵測該等強度之一偵測器之一表面上，且其中該照明源與該偵測器之間之一光學路徑長度小於3米；

基於一零繞射級之一光束形狀判定該等重疊繞射級之各者之一強度；及

基於該複數個繞射級之該等強度判定與該量測目標相關聯之一所關注參數之一值。

【第16項】

如請求項15之度量方法，其中x射線輻射之該光束被聚焦在該晶圓表面之前小於200毫米、在該量測目標處、在該偵測器處或在該量測目標與該偵測器之間之一光學路徑中之任何位置。

【第17項】

如請求項15之度量方法，其中該偵測器包含各具有小於100微米之一大小之複數個像素及小於該複數個像素之一第一像素之一點擴散函數使得入射於鄰近該第一像素之一第二像素上之一繞射光束之一部分小於入射於該第一像素上之該繞射光束之一部分之0.1%。

【第18項】

如請求項15之度量方法，其進一步包括：

在該x射線偵測器之各像素處之複數個能階之間內插。

【第19項】

一種度量系統，其包括：

一x射線照明源，其經組態以產生一定量之x射線輻射；

一x射線照明光學器件子系統，其經組態以使用該一定量之x射線輻射之一入射聚焦光束照明形成於一晶圓表面上之一量測目標；

一x射線偵測器，其經組態以回應於該入射聚焦光束而偵測與自該量測目標散射之一定量之輻射之複數個繞射級之各者相關聯之一強度，其中該照明源與該偵測器之間之一光學路徑長度小於3米，且其中該複數個繞射級之兩者或更多者在空間上重疊於該x射線偵測器之一表面上；及

一非暫時性電腦可讀媒體，其包括：

用於引起一運算系統基於一零繞射級之一光束形狀判定該等重疊繞射級之各者之一強度之程式碼；及

用於引起該運算系統基於該複數個繞射級之該等經判定強度判定與該量測目標相關聯之一所關注參數之一值之程式碼。

【第20項】

如請求項19之度量系統，其中該x射線照明光學器件子系統將該聚焦光束聚焦於該量測目標處、該偵測器處或該量測目標與該偵測器之間之光學路徑中之任何位置。

【第21項】

一種度量系統，其包括：

一x射線照明源，其經組態以產生一定量之x射線輻射；

一或多個x射線光學元件，其經組態以引導該一定量之x射線輻射朝向一量測目標作為一聚焦光束，其中該聚焦光束入射於該量測目標上；

一樣品定位系統，其將該量測目標定位於相對於入射於該量測目標上之該聚焦光束之複數個定向處；

一x射線偵測器，其具有複數個像素，該複數個像素各者在最大範圍之一方向中具有小於100微米之一大小，該x射線偵測器經組態以回應於在該複數個定向之各者處入射於該量測目標上之該聚焦光束而偵測自該量測目標散射之一定量之輻射之複數個繞射級之各者；及

一運算系統，其經組態以基於該複數個定向之各者處經偵測之該複數個繞射級之各者判定與該量測目標相關聯之一所關注參數之一值，

其中該x射線照明源與該x射線偵測器之間之一光學路徑長度小於3

米。

【第22項】

如請求項21之度量系統，其中該偵測器係一光子計數偵測器。

【第23項】

如請求項21之度量系統，其中該偵測器係一積分偵測器。

【第24項】

如請求項21之度量系統，其中該一或多個x射線光學元件將該聚焦光束聚焦在度量系統之一光學路徑中之一位置，該位置係該晶圓表面之前小於200毫米、在該量測目標處、在該偵測器處或在該量測目標與該偵測器之間之光學路徑中之任何位置。

【第25項】

如請求項21之度量系統，其中該x射線偵測器之該複數個像素之各者具有小於該複數個像素之一第一像素之一點擴散函數使得入射於鄰近該第一像素之一第二像素上之一繞射光束之一部分小於入射於該第一像素上之該繞射光束之一部分之0.1%。

【第26項】

如請求項21之度量系統，其中該x射線偵測器之一光敏體積包含碲化鎘、銻、碲化鎘或其等之任何組合。

【第27項】

如請求項26之度量系統，其中該光敏體積至少500微米厚。

【第28項】

如請求項21之度量系統，其中該x射線偵測器在該x射線偵測器之各像素處之複數個能階之間內插。

【第29項】

如請求項21之度量系統，其中該x射線偵測器以子像素解析度判定與該偵測器之一光子互動之一質心之一位置。

【第30項】

如請求項21之度量系統，其中該等繞射級之兩者或更多者在空間上重疊於該偵測器上，且其中該運算系統進一步經組態以：

基於一零繞射級之一光束形狀判定該等重疊繞射級之各者之一強度。

【第31項】

一種度量方法，其包括：

藉由一照明源產生之x射線輻射之一光束照明形成於一半導體晶圓上之一量測目標；

回應於在一x射線偵測器處x射線輻射之入射光束而偵測自該量測目標散射之一定量之輻射之複數個繞射級，該x射線偵測器具有複數個像素，該複數個像素各者在最大範圍之一方向中具有小於100微米之一大小；及

基於經偵測之該複數個繞射級之各者判定與該量測目標相關聯之一所關注參數之一值，

其中該照明源與該x射線偵測器之間之一光學路徑長度小於3米。

【第32項】

如請求項31之度量方法，其中該x射線偵測器係光子計數偵測器或一積分偵測器。

【第33項】

如請求項31之度量方法，該x射線偵測器具有複數個像素，該複數個像素各者在最大範圍之一方向中具有小於50微米之一大小。

【第34項】

如請求項31之度量方法，其進一步包括：

在該x射線偵測器之各像素處之複數個能階之間內插。

【第35項】

一種度量系統，其包括：

一x射線照明源，其經組態以產生一定量之x射線輻射；

一或多個x射線光學元件，其經組態以引導該一定量之x射線輻射朝向一量測目標作為一聚焦光束，其中該聚焦光束入射於該量測目標上；

一樣品定位系統，其將該量測目標定位於相對於入射於該量測目標上之該聚焦光束之複數個定向處；

一x射線偵測器，其具有複數個像素，該複數個像素各者在最大範圍之一方向中具有小於50微米之一大小，該x射線偵測器經組態以回應於在該複數個定向之各者處入射於該量測目標上之該聚焦光束而偵測自該量測目標散射之一定量之輻射之複數個繞射級之各者；及

一非暫時性電腦可讀媒體，其包括：

用於引起一運算系統基於在該複數個定向處經偵測之該複數個繞射級之各者判定與該量測目標相關聯之一所關注參數之一值之程式碼，

其中該x射線照明源與該x射線偵測器之間之一光學路徑長度小於3米。

【第36項】

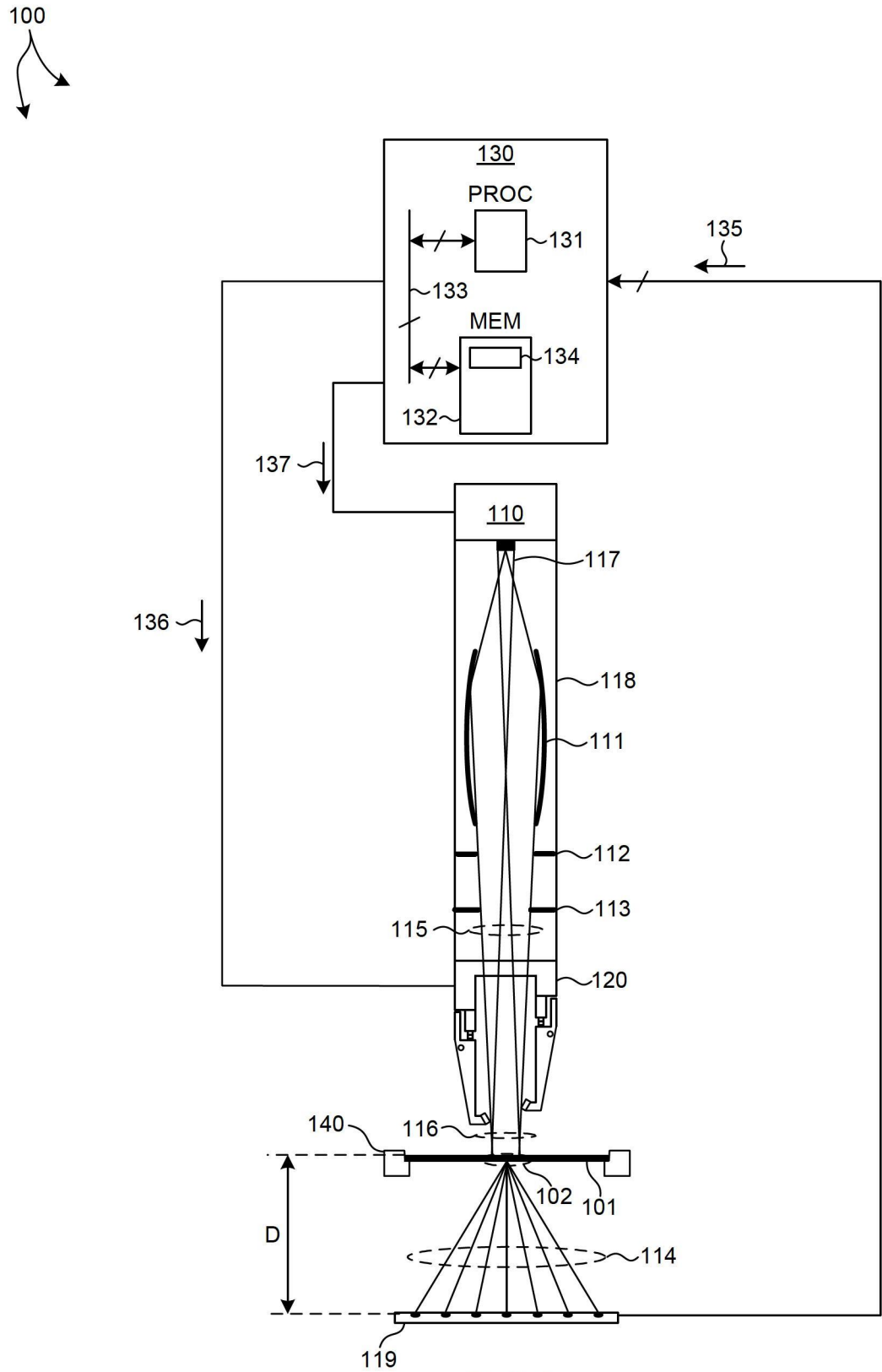
如請求項35之度量系統，其中該x射線偵測器係光子計數偵測器或一

積分偵測器。

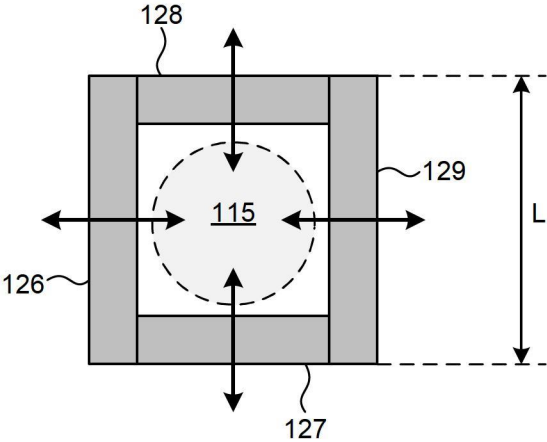
【第37項】

如請求項35之度量系統，其中該x射線偵測器以子像素解析度判定與該偵測器之一光子互動之一質心之一位置。

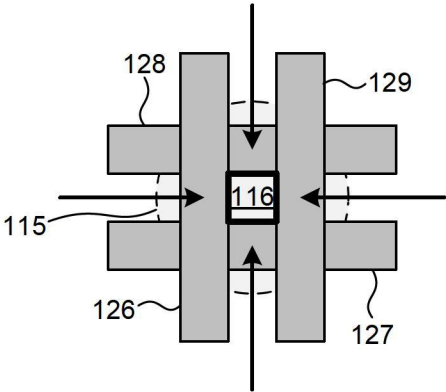
【發明圖式】



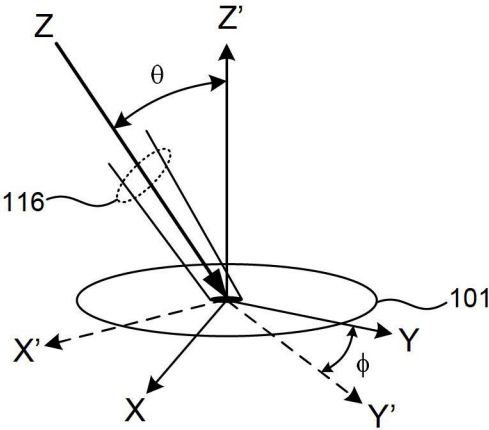
【圖1】



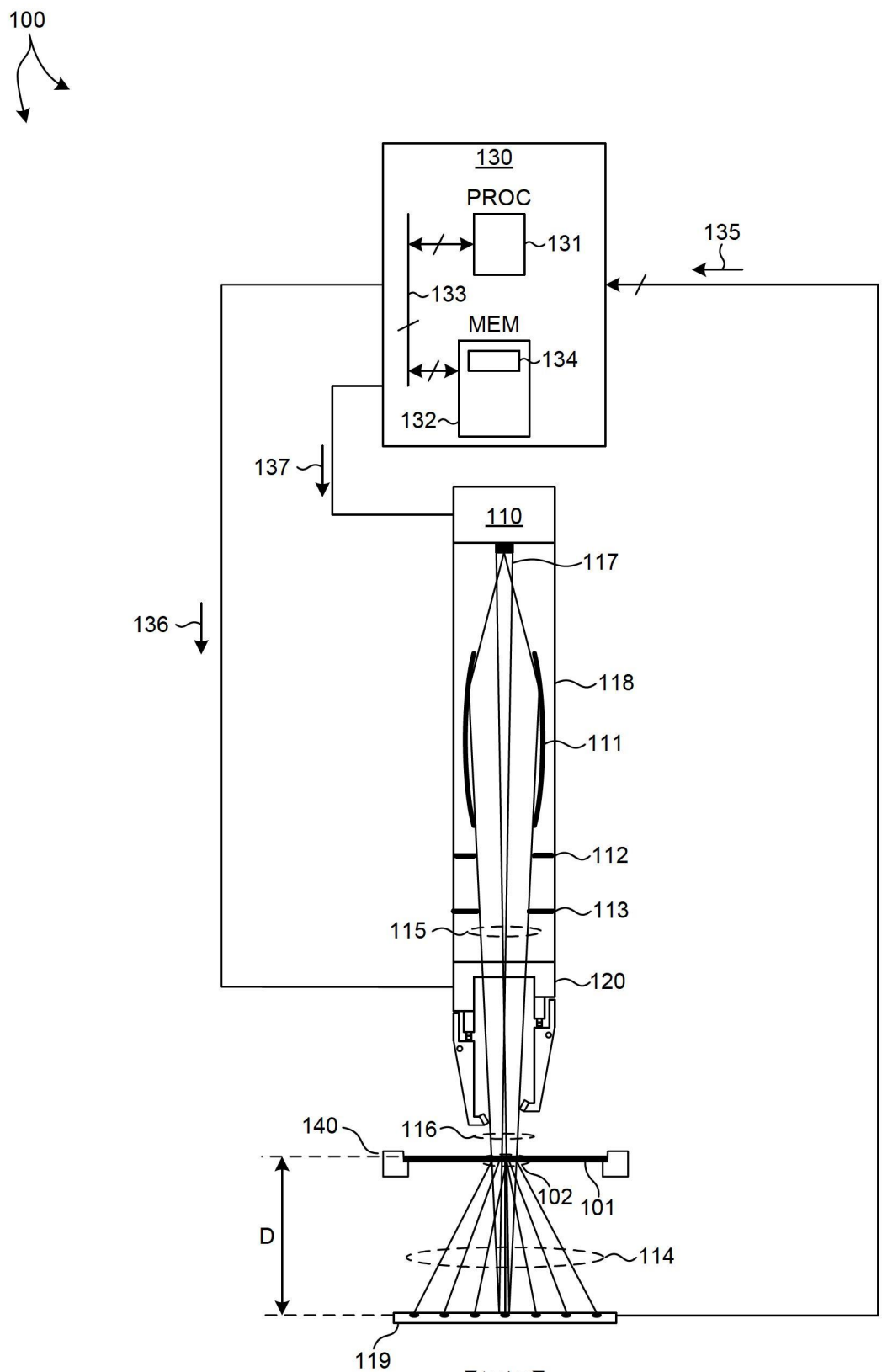
【圖2】



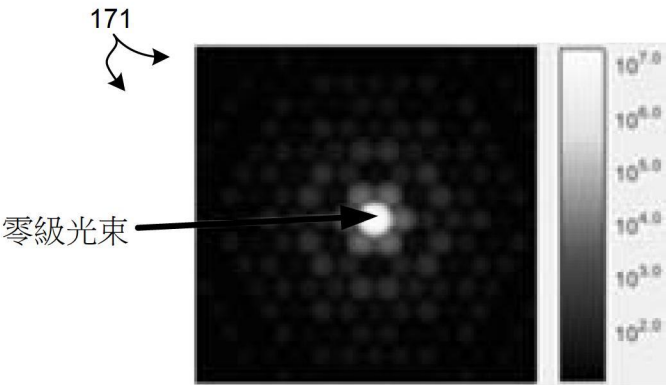
【圖3】



【圖4】



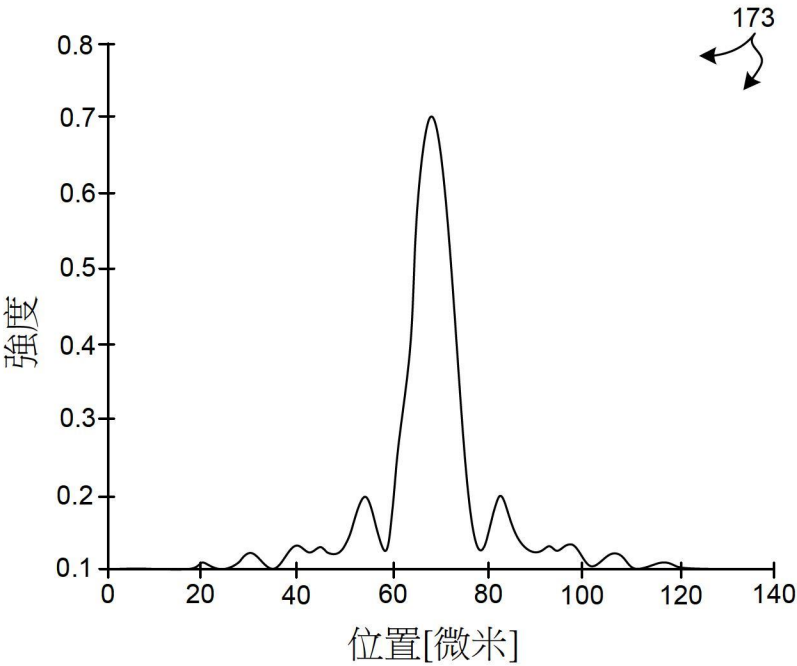
【圖5】



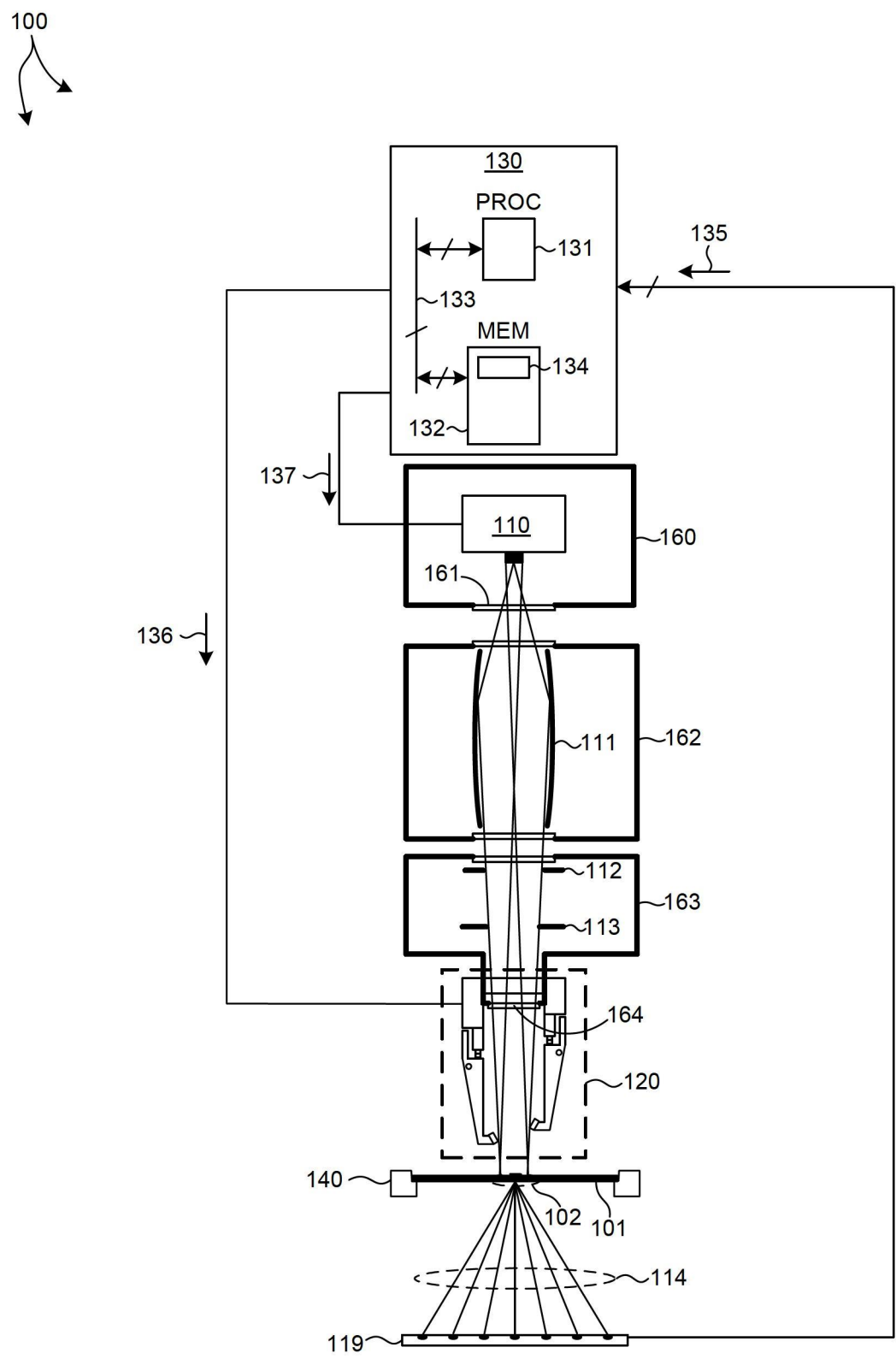
【圖6】



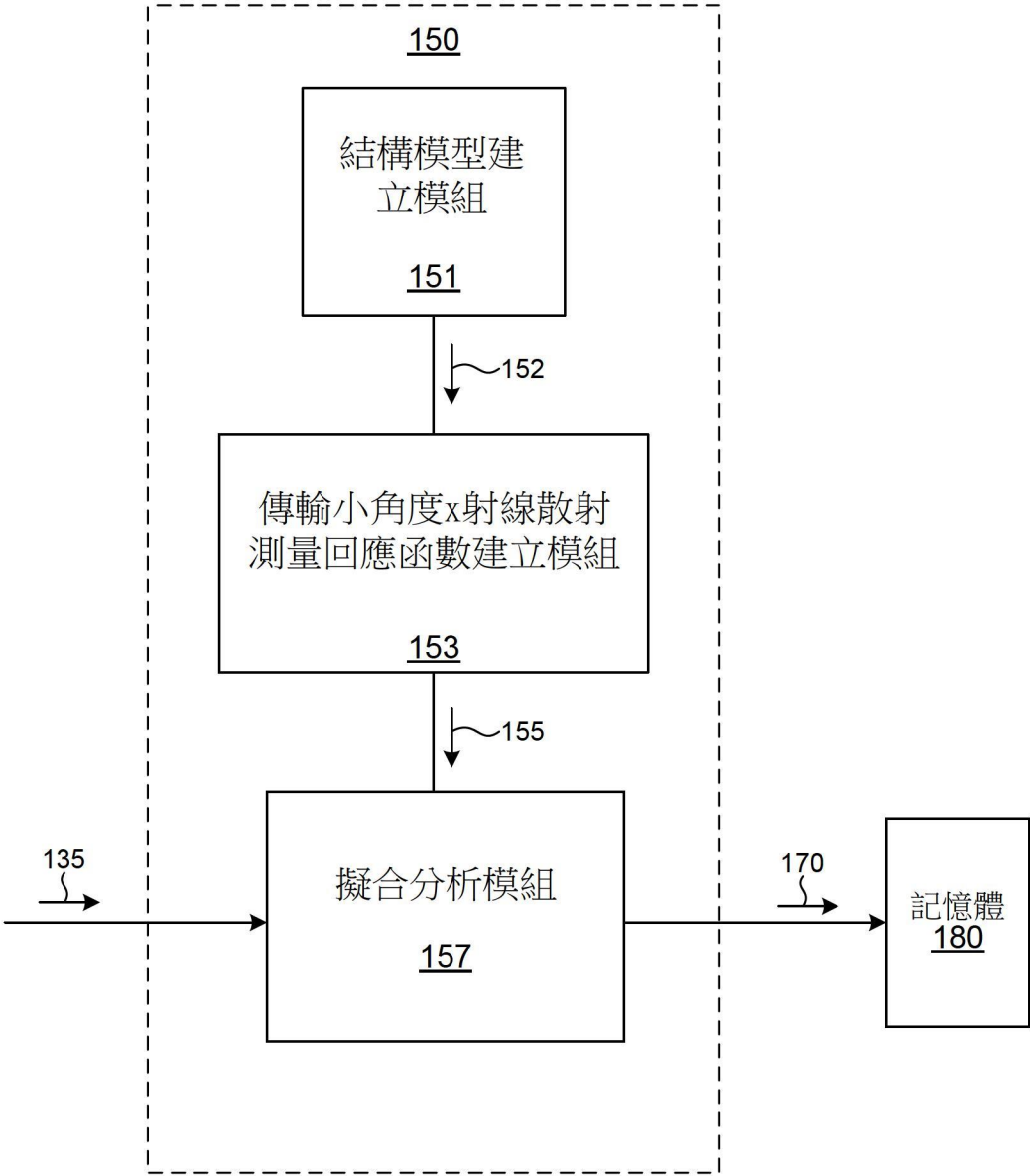
【圖7】



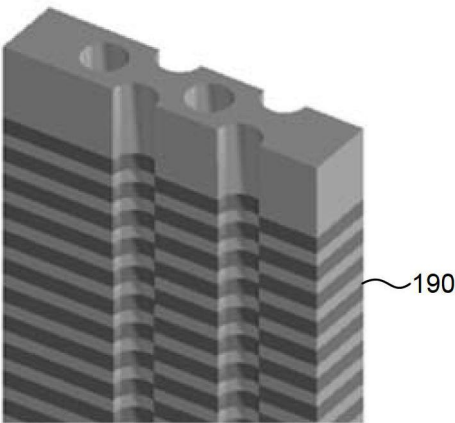
【圖8】



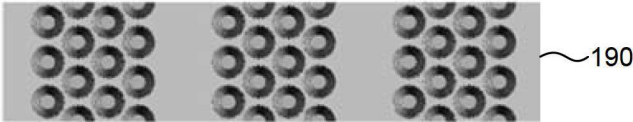
【圖9】



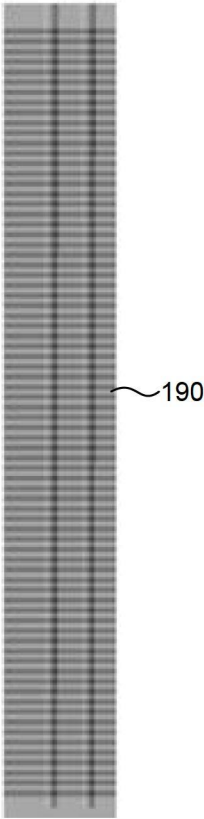
【圖10】



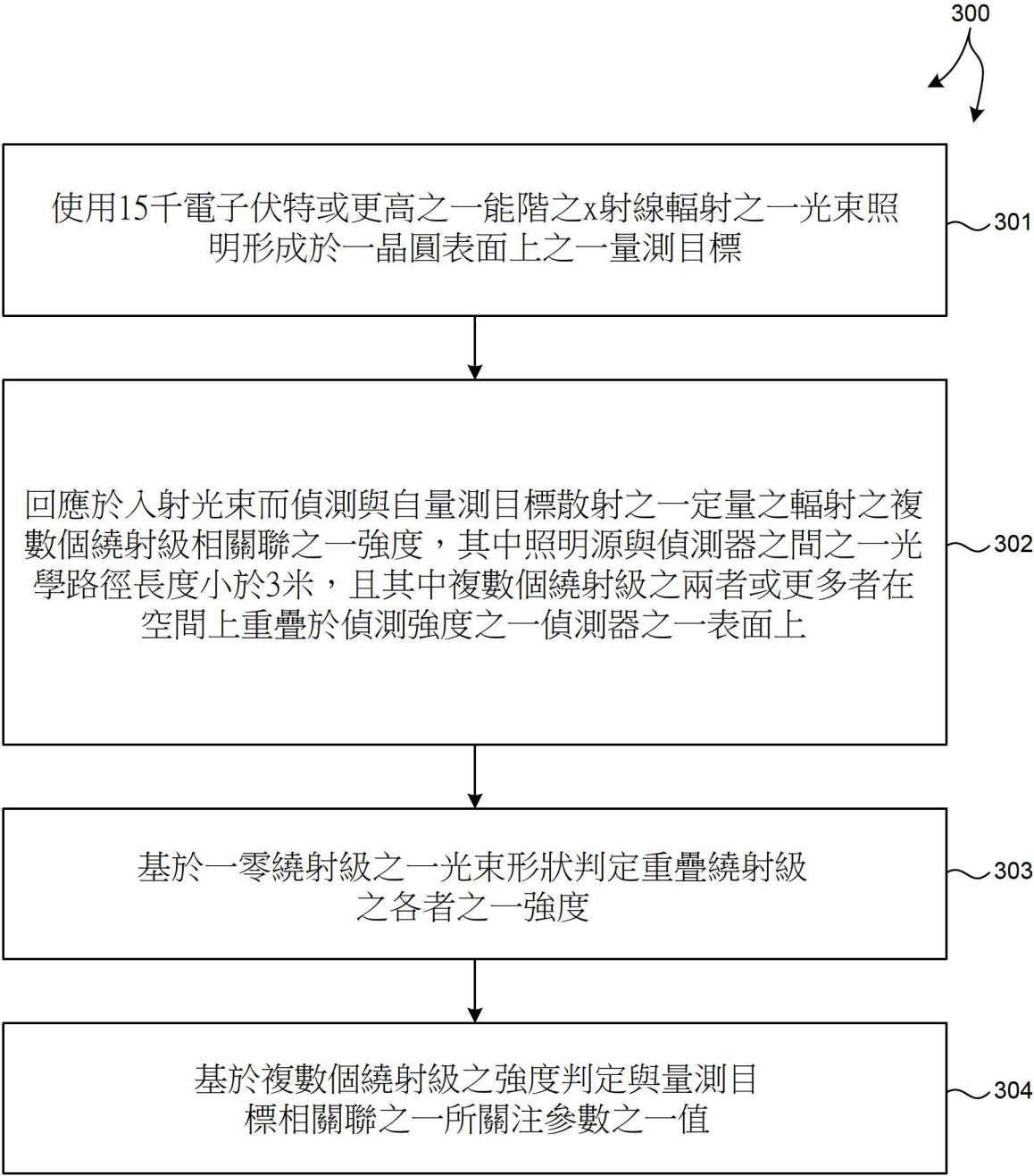
【圖11A】



【圖11B】



【圖11C】



【圖12】