



(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 I808984 B

(45)公告日：中華民國 112 (2023) 年 07 月 21 日

(21)申請案號：107128261

(22)申請日：中華民國 107 (2018) 年 08 月 14 日

(51)Int. Cl. : **G01B11/06 (2006.01)****H01L21/66 (2006.01)**

(30)優先權：2017/08/22 美國

62/548,579

2017/11/01 美國

15/800,877

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

美國

(72)發明人：舟艾柏 浩山姆 CHOUAIB, HOUSSAM (LB)；譚 正泉 TAN, ZHENGQUAN (US)

(74)代理人：陳長文

(56)參考文獻：

TW 473892B

TW 200534362A

JP 2004-93436A

JP 2004-294210A

審查人員：邱柏豪

申請專利範圍項數：23 項 圖式數：18 共 60 頁

(54)名稱

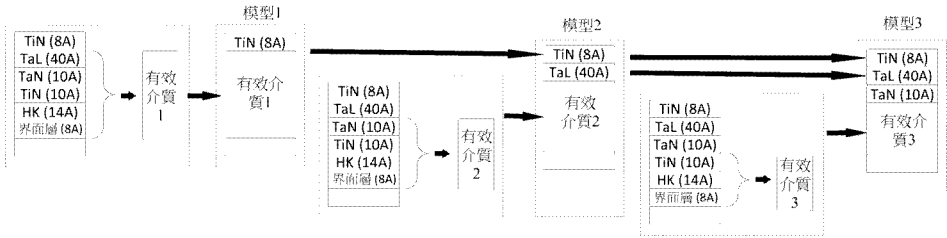
用於量測薄膜之方法、電腦程式產品及系統

(57)摘要

本文中所揭示之方法及系統可量測半導體中之薄膜堆疊，諸如光柵上膜及光柵上帶隙。例如，薄膜堆疊可為一 1D 膜堆疊，光柵上之一 2D 膜或光柵上之一 3D 膜。為該膜堆疊創建一或多個有效介質分散模型。每一有效介質分散模型可替代一或多個層。可使用基於該有效介質分散之散射量測模型來判定一或多個層之一厚度。在一實例中，開發三種基於有效介質分散之散射量測模型並將其用於判定一膜堆疊中三層之厚度。

Methods and systems disclosed herein can measure thin film stacks, such as film on grating and bandgap on grating in semiconductors. For example, the thin film stack may be a 1D film stack, a 2D film on grating, or a 3D film on grating. One or more effective medium dispersion models are created for the film stack. Each effective medium dispersion model can substitute for one or more layers. A thickness of one or more layers can be determined using the effective medium dispersion based scatterometry model. In an instance, three effective medium dispersion based scatterometry models are developed and used to determine thickness of three layers in a film stack.

指定代表圖：



【圖6】



公告本

I808984

【發明摘要】

【中文發明名稱】

用於量測薄膜之方法、電腦程式產品及系統

【英文發明名稱】

METHOD, COMPUTER PROGRAM PRODUCT, AND SYSTEM
FOR MEASURING THIN FILMS

【中文】

本文中所揭示之方法及系統可量測半導體中之薄膜堆疊，諸如光柵上膜及光柵上帶隙。例如，薄膜堆疊可為一1D膜堆疊，光柵上之一2D膜或光柵上之一3D膜。為該膜堆疊創建一或多個有效介質分散模型。每一有效介質分散模型可替代一或多個層。可使用基於該有效介質分散之散射量測模型來判定一或多個層之一厚度。在一實例中，開發三種基於有效介質分散之散射量測模型並將其用於判定一膜堆疊中三層之厚度。

【英文】

Methods and systems disclosed herein can measure thin film stacks, such as film on grating and bandgap on grating in semiconductors. For example, the thin film stack may be a 1D film stack, a 2D film on grating, or a 3D film on grating. One or more effective medium dispersion models are created for the film stack. Each effective medium dispersion model can substitute for one or more layers. A thickness of one or more layers can be determined using the effective medium dispersion based scatterometry model. In an instance, three effective medium dispersion based scatterometry models are developed and used

to determine thickness of three layers in a film stack.

【指定代表圖】

圖6

【代表圖之符號簡單說明】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】

用於量測薄膜之方法、電腦程式產品及系統

【英文發明名稱】

METHOD, COMPUTER PROGRAM PRODUCT, AND SYSTEM
FOR MEASURING THIN FILMS

【技術領域】

【0001】 本發明係關於量測薄膜。

【先前技術】

【0002】 半導體製造業的演進對良率管理且尤其對度量衡及檢查系統提出更高要求。當晶圓大小增加時，臨界尺寸縮小。經濟正在推動該行業縮短實現高良率、高價值生產及更佳設備效能的時間。因此，最小化從偵測良率問題到修復其總時間判定半導體製造商之投資報酬。

【0003】 為了控制裝置效能，特別為靜電特性，監測裝置之臨界尺寸(CD)及薄膜厚度。閘極電介質、高k及功函數材料及組合物影響裝置效能。此可影響例如臨限值電壓及驅動電流。在10 nm節點及以下節點，一些臨界膜厚度過程窗口可低於0.3 Å。對前層過程之後層效應為可能需要控制的另一問題。除了可能造成界面及晶體缺陷，金屬閘極沈積亦可經由退火或擴散改變材料性質及其組成。因此，在形成高k金屬閘極堆疊期間量測每一過程步驟變得至關重要。

【0004】 高k金屬閘極膜形成過程係複雜的。通常，取決於技術節點、應用及裝置類型(例如，NMOS或PMOS)，其可包括六至九個膜堆疊。

【0005】 在一實例中，在假性閘極移除及氧化物剝離及清潔之後，在沈積金屬之前在閘極上沈積一系列超薄材料。彼等材料通常極其薄且其光學分散性質相似。在此實例中，過程以在閘極(及鰭片)上沈積8 Å到10 Å SiO₂界面層(IL)開始。此可後續接著14 Å 二氧化鈺作為高k材料。此後續接著10 Å TiN功函數材料，然後為障壁金屬TaN (5Å至10Å)，然後為另一TiN層，然後為TiAlC層，且然後為10 Å TiN層。可經由原子層沈積(ALD)形成沈積。PMOS及NMOS需要不同高k金屬閘極(HKMG)過程流程，此可改變關鍵層之數目。HKMG過程位於CMOS裝置之線路(FEOL)環路之前端的端部處。

【0006】 傳統上，在平面膜堆疊墊上量測此等膜。X射線度量衡用於量測平面上之多層堆疊，但由於所需精度3西格馬(<0.04 Å)且由於薄膜之少量散射而導致其靈敏度不足，因此X射線不足。

【0007】 對於光學度量衡，複雜堆疊誘導高度相關之參數。可能需要將一些厚度固定在標稱值以減少相關性。但至少出於三個原因，此方法並非令人滿意的解決方案。首先，前層過程可能不足夠穩定以為彼參數指派一個固定值。其次，任何處理步驟可改變前層之性質。第三，對於商業製造而言，輸送量可能太慢，因為不能在一個步驟中量測多個層。

【0008】 以10 nm技術節點開始，半導體製造商一直在尋求量測光柵(2D及3D)上之一些關鍵膜。在1D膜墊上量測之膜厚度及/或性質與諸如WAT (像V_{th}之晶圓驗收測試)之類的真實裝置特性之相關性正在降低。具體地，對於一些FinFET層，1D代理膜目標與實際FinFET晶體管上之實際工藝變化具有有限相關性。由於沈積及蝕刻速率為地形相依之加載效果，1D膜資料將不會與2D或3D膜資料完全相關。先前方法用於執行此等量

測，但兩者皆不能提供準確量測及/或對於商業製造而言太慢。此等先前方法被稱作為「單入射角(AOI)全浮動」方法及「資料前饋」方法。

【0009】單AOI全浮動方法使用單AOI光譜橢圓量測光譜或單AOI旋轉偏振器旋轉補償器(RPRC)光譜，並同時浮動所有關鍵參數及自由度。此方法不能解決上文所描述大多數問題及要求。全浮動方法亦不能處理低對比度或薄材料。一個原因為在SiO₂與HfO₂及TiN與TaN之光學性質中之相似性。此導致併發參數之間的相關性，且因此導致光柵厚度上不準確之量測膜。例如，參見H. Chouaib及Q.Zhao之「使用深度紫外線光譜橢圓量測之接觸孔之奈米級光學臨界尺寸量測」，J. Vac. Sci. Technol.B 31,011803(2013)，其以全文引用的方式併入本文中。在實驗中，自單AOI全浮動方法獲得的模擬資料已實際實驗資料都不能通過精度、準確度、穩健性或晶圓一致性測試。雖然單AOI全浮動方法可能會滿足輸送量及所有權成本(COO)要求，但在大多數技術檢查中都失敗。

【0010】以下為單AOI全浮動方法結果之實例。此實例為預期參數靈敏度、相關性及精度之理論模擬。對於此實例，在14個HKMG層上執行模擬。此處僅呈現三個層。在頂蓋(TiN)中，膜堆疊為IL(SiO₂)/高k(HfO₂)/TiN。在此結構中，總共八個幾何參數同時浮動(圖2)。

【0011】模擬展示三個膜IL、HK及Cap之預期精度3西格馬分別為0.13 Å、0.13 Å及0.06 Å。半導體製造商之精度規格可能小至0.03 Å。此方法在精度方面達不到規格。此外，參數相關指數分別為0.958、0.95及0.846。對於相關性，當一表示100%參數相關時，在零到一的範圍內，0.958與0.846相關性被認為為高且表示所使用的組合模型及技術的潛在風險。除了模擬之外，單AOI全浮動方法實驗資料未通過此層的穩健性測試

及精度測試。

【0012】 在Ta₂N₅層中，膜堆疊為IL(SiO₂)/High-k(HfO₂)/TiN/Ta₂N₅。在此結構中(圖3)，共有9個參數同時浮動。模擬展示不良精度結果及高參數相關性，此不符合半導體製造商對此層之要求。實驗資料亦展示超出規格之結果。

【0013】 在N金屬閘極(NMG)沈積層中，在HKMG過程之後期，膜堆疊複雜性增加。該層包含若干前層堆疊，其影響光柵上的臨界參數量測。此層存在三個關鍵參數：Ta₂N₅ (10 Å)、TaL (40 Å)及TiN (8Å)。出於兩個原因，必須同時量測此三個層。首先，Ta₂N₅經歷一些處理(凹陷)且晶圓將在同一腔室內進行TaL及TiN沈積。此防止晶圓離開腔室進行度量衡步驟。TaL及TiN原位沈積。因此需要使用一個配方進行三層量測。模擬資料預計所有六個膜堆疊之間的不良精度資料及高度相關的參數。因此，單AOI全浮動方法無法提供此層的精確量測。

【0014】 資料前饋(DFP)係指在不同的前層上獲取資料集並將公共參數傳遞至後續層。例如，參見Mihardja等人的Proc. SPIE 8324，關於顯微光刻XXVI的度量衡、檢查及處理控制(2012年3月29日)，其以全文引用的方式併入本文中。換言之，其係指量測每個單一步驟(前層)並將資料前饋至下一步驟。此方法應打破不同膜堆疊之間的相關性。例如，在先前步驟中，可能量測IL厚度，且然後在待量測HK膜時將量測結果前饋至HK模組。類似地，可能將所量測之HK值前饋至閘極功函數模組。此方法假設前層IL及HK在性質方面沒有改變。然而，此假設對當前先進技術節點無效。DFP具有多個缺陷。首先，DFP輸送量對半導體製造商過慢。要使用前饋，需要量測每一單個步驟。要量測的膜堆疊的總數可為例如十四。

輸送量的預定義規格為在僅九個配方或更少配方內對所有十四個膜堆疊實現穩健量測。換言之，需要同時量測多個層，此對於DFF為不可能。

【0015】 其次，DFF不能用於NMG(圖4)層及PMG層。TaL及TiN原位沈積，諸如使用ALD。此外，底層TaN在與下面的TaL + TiN沈積步驟相同的室內進行一些處理。DFF不能與此特定處理流程一起使用。

【0016】 第三，DFF假設材料的光學分散在沈積之前及沈積之後不變。此假設可能不正確。在新過程之後存在影響前層性質的多個現象，諸如由於層後蝕刻/剝離期間的溫度改變引起的退火效應，由於後層沈積引起的應力及應變變化，或表面及界面效應以埃標度對每一層之光學性質的影響。

【0017】 第四，對所有後層實施前層模型中之任何不準確或錯誤。

【0018】 第五，早期前層階段中之任何庫邊界命中(LBH)將中斷後層中之所有量測。

【0019】 DFF及單AOI全浮動方法皆不能為光柵市場上之膜提供解決方案，次歸因於一或多個不準確資料超出參考方法的規格線性、不良精度及穩定性及匹配性、高度相關的臨界及浮動參數、慢量測(亦即，低輸送量)、高COO、無法處理原位ALD過程、LBH之高風險及穩健性測試失敗。

【0020】 因此，需要一種用於量測薄膜的改良方法及系統。

【發明內容】

【0021】 在第一實施例中，提供一種方法。使用控制器開發用於晶圓上的膜堆疊的第一有效介質分散模型。膜堆疊包括至少四層。第一有效介質分散模型替代除層中之第一層之外的所有層。第一層為與晶圓相對的

膜堆疊的頂層。使用控制器及第一有效介質分散模型判定第一層之厚度。使用控制器開發基於第一層之厚度用於膜堆疊之第二有效介質分散模型。第二有效介質分散模型替代除層中之第一層及第二層之外的所有層。第二層與第一層毗鄰。使用控制器及第二有效介質分散模型判定第二層之厚度。使用控制器開發基於第一層之厚度及第二層之厚度的膜堆疊之第三有效介質分散模型。第三有效介質分散模型替代除層中之第一層、第二層及第三層之外的所有層。第三層與第二層毗鄰。使用控制器及第三有效介質分散模型判定第三層之厚度。

【0022】層可包括氧化物層、高k層、TiN層、Ta₂N₅層、Ta₂O₅層及第二TiN層，但其他材料或材料組合亦為可能的。在一實例中，第一層為第二TiN層，第二層為Ta₂O₅層，且第三層為Ta₂N₅層。在另一實例中，氧化物層、高k層、TiN層、Ta₂N₅層及Ta₂O₅層的組合厚度為8 nm或更小。

【0023】第一有效介質分散模型可替代氧化物層、高k層、TiN層、Ta₂N₅層、Ta₂O₅層。第二有效介質分散模型可替代氧化物層、高k層、TiN層及Ta₂N₅層。第三有效介質分散模型可替代氧化物層、高k層及TiN層。

【0024】第一有效介質分散模型、第二有效介質分散模型及第三有效介質分散模型可各自具有不同光學性質。

【0025】方法可進一步包括藉由產生旋轉偏振器旋轉補償器光譜橢圓量測資料、全彌勒(Muller)矩陣分量資料、旋轉偏振器光譜橢圓量測資料、反射量測資料、雷射驅動光譜反射量測資料或x射線資料中之一或多者來量測膜堆疊。

【0026】開發第一有效介質分散模型可包括收集膜堆疊之光學回應；藉由在第一有效介質中組合除第一層之外的所有層使用模型構建模組

構建第一散射量測模型；為第一有效介質創建包括分散公式之分散模型；在擬合分析模組處以多個入射角接收光學回應；使用擬合分析模組，在每一光譜回歸中浮動分散模型的同時，對光學回應進行平行擬合；評估在入射角處的分散模型的一或多個結果以判定相似性；將分散模型轉換為表；使用第一散射測量模型執行擬合分析，其中將分散模型固定為表且第一層之厚度為浮動；量測第一層之厚度；並將第一層之厚度與參考值進行比較。可在評估之後應用經組態以最佳化分散模型的回饋迴路。回饋迴路可經組態以固定或浮動分散模型的參數。至少在平行擬合期間，可將分散模型的至少一個參數視為共同。

【0027】 開發第二有效介質分散模型可包括藉由在第二有效介質中組合除層中之第一層及第二層之外的所有層使用模型構建模組構建第一散射量測模型；將第一層之厚度轉遞到第二散射量測模型中；為第二有效介質創建包括分散公式之分散模型；在擬合分析模組處以多個入射角接收光學回應；使用擬合分析模組，在每一光譜回歸中浮動分散模型的同時，對光學回應執行平行擬合；評估在入射角處的分散模型的一或多個結果以判定相似性；將分散模型轉換為表；且使用第二散射測量模型執行擬合分析，其中分散模型為固定。可在評估之後應用經組態以最佳化分散模型的回饋迴路。回饋迴路可經組態以固定或浮動分散模型的參數。在平行擬合期間，可將分散模型之至少一個參數視為共同的，或在平行擬合期間將第一層之厚度視為共同的。

【0028】 開發第三有效介質分散模型可包括藉由在第三有效介質中組合除層中之第一層、第二層及第三層之外的所有層使用模型構建模組構建第三散射量測模型；將第一層之厚度及第二層之厚度轉遞到第三散射量

測模型中；為第三有效介質創建包括分散公式之分散模型；在擬合分析模組處以多個入射角接收光學回應；使用擬合分析模組，在每一光譜回歸中浮動分散模型的同時，對光學回應執行平行擬合；評估在入射角處的分散模型的一或多個結果以判定相似性；將分散模型轉換為表；且使用第三散射測量模型執行擬合分析，其中分散模型為固定。可在評估之後應用經組態以最佳化分散模型的回饋迴路。回饋迴路可經組態以固定或浮動分散模型的參數。可報告第一層之厚度、第二層之厚度及第三層之厚度。在平行擬合期間，可將分散模型之至少一個參數視為共同的，或在平行擬合期間將第一層之厚度視為共同的。

【0029】 膜堆疊可為1D膜堆疊、光柵上之2D膜或光柵上之3D膜。

【0030】 基於第一有效介質之散射量測模型，基於第二有效介質的散射量測模型及基於第三有效介質之散射量測模型可被視為虛擬目標。擬合分析可並行運行。

【0031】 至少四層可各自為SiO₂、HfO₂、HfSiON、具有氮濃度的HfON、TiN、TaN、TaAlC、TiAlC、W、Co、WC或TaO。在一實例中，四層中之至少一層為HfON、TiN或TaN中之一者，且該方法進一步判定氮濃度。

【0032】 第一有效介質分散模型、第二有效介質分散模型或第三有效介質分散模型中之一者可為將材料之光學性質模型化為光子能量或波長的函數的分散公式。

【0033】 可使用包含具有與其一起體現之電腦可讀程式的非暫時性電腦可讀儲存媒體的電腦程式產品。電腦可讀程式可經組態以執行第一實施例之任何不同變型或實例的方法。

【0034】 在第二實施例中，提供一種系統。該系統包含經組態以量測晶圓及控制器的量測系統。控制器包括處理器及與處理器電子通信的電子資料儲存單元。控制器與量測裝置進行電子通信。處理器經組態以執行一或多個軟體模組。一或多個軟體模組經組態以開發用於晶圓上之膜堆疊之第一有效介質分散模型，並使用第一有效介質分散模型判定第一層之厚度。膜堆疊包括至少四層。第一有效介質分散模型替代除層中之第一層之外的所有層。第一層為與晶圓相對的膜堆疊的頂層。

【0035】 軟體模組可經進一步組態以基於第一層之厚度開發用於膜堆疊之第二有效介質分散模型，並使用第二有效介質分散模型判定第二層之厚度。第二有效介質分散模型替代除層中之第一層及第二層之外的所有層。第二層與第一層毗鄰。

【0036】 軟體模組可經進一步組態以基於第一層之厚度及第二層之厚度開發用於膜堆疊之第三有效介質分散模型，並使用第三有效介質分散模型判定第三層之厚度。第三有效介質分散模型替代除層中之第一層、第二層及第三層之外的所有層。第三層與第二層毗鄰。

【0037】 量測系統可提供旋轉偏振器旋轉補償器光譜橢圓量測資料、全彌勒矩陣分量資料、旋轉偏振器光譜橢圓量測資料、反射量測資料、雷射驅動光譜反射量測資料或x射線資料中之一者。

【圖式簡單說明】

【0038】 為了更全面地理解本發明之本質及目的，應參考以下結合附圖的詳細描述，其中：

圖1為具有九個自由度的2D光柵結構上的膜，包括(a)等軸視圖(b)正視圖及(c)側視圖中之材料分散；

圖2說明(a)頂蓋層膜堆疊及(b)光柵上膜(FOG)頂蓋模型，其中單AOI全浮動方法模擬結果展示不良精度差(nm)結果及高參數相關性；

圖3說明(a)TaN層膜堆疊及(b)FOG TaN模型，其經受單AOI全浮動方法模擬；

圖4說明(a)NMG沈積膜堆疊及(b)FOG NMG模型，其經受單AOI全浮動模擬；

圖5為使用舊方法及半導體製造商規格之模擬精度的比較；

圖6為被稱為「相同結構資料前饋」(SSDF)概念之模型化方法的描述，其用於破壞相關性，改良資料準確性及配方穩健性，且成功地用於九個不同層中；

圖7為根據本發明之方法的流程圖；

圖8為與TEM量測結果相比的基於有效介質(EM)之方法SSDF散射量測(OCD)結果；

圖9為與全浮動方法相比的SSDF GRR及穩健性結果；

圖10為(a) TiN頂蓋膜堆疊、(b) EM層(IL + HK)的說明，及(c)頂蓋FOG模型；

圖 11 為 (a) IL (SiO_2) 及 HK (HfO_2) 折 射 率 N 、(b) IL(SiO_2) 及 HK(HfO_2)之消光係數 K 、(c)用掃描AOI光譜量測之實驗EM折射率 N ，及(d)用掃描AOI光譜量測之實驗EM消光係數 k ；

圖12為(a)與TEM量測相比的基於EM的方法散射量測(OCD)結果及(b)與DFF相比使用EM方法的穩健性測試結果，其中EM及DFF皆在0.5Å TiN之實例性半導體製造商規格內，其中預層HK厚度變化，而頂部TiN保持在POR值，且EM方法量測在小於0.5Å內之穩定TiN；

圖13為(a)TaN膜堆疊、(b)EM模型1-EM1層(IL+HK+TiN)之說明、(c)從模型1至模型2-EM2層(IL+HK)之SDF，以及(d) TaN FOG模型；

圖14為(a)IL (SiO_2)、HK (HfO_2)及TiN折射率 N 、(b)IL(SiO_2)、HK(HfO_2)及TiN之消光係數 K 、(c)用掃描AOI光譜量測之實驗EM1折射率 N ，及(d)用掃描AOI光譜量測之實驗EM1消光係數 k ；

圖15為與來自圖12的(a)TaN及(b)TiN層之TEM量測結果相比的基於EM方法SSDF散射量測(OCD)結果。

圖16為與全浮動方法相比的SDF GRR及穩健性結果；

圖17為說明根據本發明之方法之實施例的流程圖；及

圖18為根據本發明之系統的方塊圖。

【實施方式】

相關申請案之交叉參考

【0039】 本申請案主張2017年8月22日申請且讓渡給美國申請案第62/548,579號的臨時專利申請案之優先權，該申請案之揭示內容特此係以引用方式併入。

【0040】 儘管將根據某些實施例描述所主張標的物，但包括不提供本文中所闡述之所有益處及特徵之實施例的其他實施例亦在本發明之範疇內。在不脫離本發明之範疇的情況下，可進行各種結構、邏輯、處理步驟及電子改變。另外，本發明之範疇意欲僅由參考所附申請專利範圍界定。

【0041】 本文中所揭示之實施例克服與量測薄膜堆疊有關的許多缺點，諸如光柵上之膜及半導體中光柵上之帶隙。該方法之實施例可解決光學臨界尺寸及膜中之廣泛問題。揭示光柵上之高 k 金屬閘極及其中可減少浮動參數相關性之其他材料的膜量測。藉由準確地量測多個有效介質之光

學性質，藉由在同一層內使用多個散射量測模型，藉由在多個模型之間前饋資料，或藉由在模型化之前收集光信號時掃描入射角的設備，可增強參數靈敏度。

【0042】特別地，本文中所揭示之技術可量測光柵上之高k金屬閘極(HKMG)薄膜及光柵上之帶隙。隨著尺寸縮小，光柵標記上之膜正在增長。2D及3D結構比一維膜堆疊更複雜。光柵上之膜為模型增加更多自由度，且因此潛在不穩定性、相關性及參數互動。在3D代理結構上量測此等薄的，高度相關材料為有價值的，類似於真實裝置的幾何形狀。本文中所揭示之技術可快速、準確且精確地提供量測，此對半導體製造商為有吸引力的。

【0043】所揭示之技術、系統及演算法之實施例克服多個技術挑戰。首先，待量測之所有材料(SiO_2 、 HfO_2 、 TiN 、 TaN 、 TiAlN 、 TiAlC ，等)通常為低對比度材料且展現類似光學回應。 $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ 及 $\text{TiN}/\text{TaN}/\text{TiAl}$ 尤其往往展現類似光學回應。此可使膜厚度高度相關。

【0044】其次，所有膜都在光柵上量測，此意味著需要將至少五個額外自由度添加至模型(參見圖1)。

【0045】第三，膜較薄且半導體製造商規格可能很窄。精度3西格馬之典型要求為0.03 Å。一些次要參數相關性可能影響精度。與OCD精度相比，FOG精度規格可能極其小。因此，FOG精度非常具有挑戰性。

【0046】第四，雖然典型OCD精度要求為亞奈米級，但光柵精度水平上之膜為亞埃。FOG精度規格往往較嚴密。實驗設計(DOE)範圍可能為數埃。資料可能需要以良好線性度跟蹤DOE。

【0047】第五，度量衡結果可能需要特定穩健性，諸如前層DOE。

【0048】 第六，度量衡結果可能亦需要滿足半導體製造商之特定輸送量要求。可每層量測多個膜。

【0049】 第七，晶圓範圍可能需要合理且如所預期。晶圓變化內之界面層(IL)可小於0.7 Å。典型HfO₂晶圓範圍低於1.2 Å。對於HfO₂超過1.2 Å的晶圓範圍的度量衡解決方案是有問題的，且因缺乏準確性或參數相關性而可能被拒絕。

【0050】 第八，所有資料可能需要在晶圓及晶圓到晶圓之預期內保持一致

【0051】 第九，出於先前所論述之原因，不使用前層資料前饋。

【0052】 本文中所揭示之技術可使FOG關鍵參數之精度比先前技術好十倍。可打破所有關鍵參數及浮動參數之間的相關性，此將導致經改良穩健性。量測速度(每小時晶圓數)得以改良。可使用單次量測來量測多個順序膜。此等技術可處置原位ALD過程。不同膜堆疊之間的對比度得以改良。藉由構建穩健模型可降低庫邊界命中(LBH)風險。

【0053】 為解決上述技術難題，一層內有多個模型。每一模型使用有效介質方法將兩個或多於兩個膜堆疊組合成整體。資料可自一個模型前饋至另一模型以量測更多膜堆疊。前饋在同一層內執行。此層內資料前饋可被稱作為相同結構資料前饋(SSDF)。

【0054】 所揭示技術成功地應用於數個FOG層。為了闡明概念，將圖4之NMG沈積層視為成功使用狀況的實例。圖6的圖描繪SSDF之概念。對於NMG層，應在一個層內精確量測三個關鍵參數，而不使用任何前層前饋策略。為遞送三個臨界參數，可開發使用三種不同有效介質分散的三種模型。

【0055】 圖17中說明實施例之方法100。可對控制器執行方法100之一些或所有步驟。方法100可與晶圓上之膜堆疊一起使用。膜堆疊可為1D或2D膜堆疊或光柵上之2D或3D膜，可包括至少四層。光柵上之膜可為任何材料或合金或材料之複合物。例如，層可包括氧化物層、高k層、TiN層、Ta₂N₅層、Ta₂AlC層及第二TiN層。氧化物層、高k層、TiN層、Ta₂N₅層及Ta₂AlC層的組合厚度可為8 nm或更少，但技術可與較大厚度一起使用。在一實例中，第一層為第二TiN層，第二層為Ta₂AlC層，且第三層為Ta₂N₅層。在另一實例中，至少四層各自為SiO₂、HfO₂、HfSiON、具有氮濃度的HfON、TiN、Ta₂N₅、Ta₂AlC、TiAlC、W、Co、WC或TaO。

【0056】 在101處，為膜堆疊開發第一有效介質分散模型。第一有效介質分散模型可替代除層中之第一層之外的所有層。第一層為與晶圓相對的膜堆疊的頂層。

【0057】 在102處，使用第一有效介質分散模型判定第一層之厚度。

【0058】 在103處，基於第一層之厚度開發用於膜堆疊之第二有效介質分散模型。第二有效介質分散模型替代除層中之第一層及第二層之外的所有層。第二層與第一層毗鄰。

【0059】 在104處，使用第二有效介質分散模型判定第二層之厚度。

【0060】 基於第一層之厚度及第二層之厚度開發用於膜堆疊之第三有效介質分散模型。第三有效介質分散模型替代除層中之第一層、第二層及第三層之外的所有層。第三層與第二層毗鄰。

【0061】 在106處，使用第三有效介質分散模型判定第三層之厚

度。

【0062】 在方法100中，第一有效介質分散模型可替代氧化物層、高k層、TiN層、Ta₂N₅層、Ta₂O₅層。第二有效介質分散模型可替代氧化物層、高k層、TiN層及Ta₂N₅層。第三有效介質分散模型可替代氧化物層、高k層及TiN層。

【0063】 第一有效介質分散模型、第二有效介質分散模型及第三有效介質分散模型可各自具有不同光學性質。

【0064】 方法100可進一步包括藉由產生旋轉偏振器旋轉補償器光譜橢圓量測資料、全彌勒矩陣分量資料、旋轉偏振器光譜橢圓量測資料、反射量測資料、雷射驅動光譜反射量測資料或x射線資料中之一或多者來量測膜堆疊。

【0065】 第一有效介質分散模型、第二有效介質分散模型及第三有效介質分散模型可被視為虛擬目標。可使用三種有效介質模型在三目標量測模式中並行運行擬合分析。此特定技術被稱作為多目標量測(MTM)。例如，參見Tzai等人的Proc. SPIE 8324，關於顯微光刻XXVI,832420的度量衡、檢查及處理控制(2012年3月29日)，其以全文引用的方式併入本文中。此技術可包含藉由量測樣本生成旋轉偏振器旋轉補償器光譜橢圓量測資料、全彌勒矩陣分量資料、旋轉偏振器光譜橢圓量測資料、反射量測資料、雷射驅動光譜反射量測資料及/或x射線資料。模型構建及分析引擎(其包括具有預定義構建塊之幾何模型構建模組)可生成樣本結構的模型。擬合分析模組可經組態以接收光學回應。在操作期間，可將第一層之厚度或任何其他參數視為共同的，且可執行使用多目標模組之擬合分析以最佳化第一有效介質及/或第二有效介質及/或第三有效介質。

【0066】 第一有效介質分散模型、第二有效介質分散模型或第三有效介質分散模型中之一者為將材料之光學性質模型化為光子能量或波長的函數的分散公式。例如，第一有效介質分散模型、第二有效介質分散模型或第三有效介質分散模型中之一者可為Tauc-Lorentz模型、Cauchy模型、BEMA模型、Cody-Lorentz模型、Cody-Lorentz連續模型或NKOffset模型。此可為除諧波振盪器之外或替代諧波振盪器，其亦可被稱作為勞倫茲模型。

【0067】 四層中之至少一層可為HfON、TiN或TaN中之一者。方法100可進一步包含判定氮濃度，諸如來自有效介質分散。

【0068】 雖然在方法100中揭示三種有效介質分散模型，但在一實例中，僅開發第一有效介質分散模型。此可用於判定第一層之厚度。在另一實例中，僅開發第一有效介質分散模型及第二有效介質分散模型。此等可用於判定第一層及第二層之厚度。此外，可創建多於三個有效介質分散模型。在一實例中，可為幾乎所有層開發有效介質分散模型。此取決於裝置設計可為四個、五個或甚至十個不同有效介質分散模型。

【0069】 在一實例中，開發第一有效介質分散模型可包括收集膜堆疊之光學回應。在掃描入射角(AOI)同時停止光點以在光柵結構上之2D或3D膜上收集一系列光學回應。

【0070】 使用模型構建模組，藉由在第一有效介質(「EM1」)中組合除層中之第一層之外的所有層，構建第一散射量測模型(「模型1」)。第一散射量測模型可包含兩種媒體：第一有效介質及最後光柵上之膜(「Film1」)。散射量測模型，諸如圖2(b)及圖3(b)中所見之模型可包括至少一個有效介質分散模型或表。

【0071】 為第一有效介質創建包括分散公式之分散模型。分散公式可在第一個散射量測模型中。分散公式可為但不限於本文中所揭示之任何分散模型。分散公式可將兩種或多於兩種材料混合在一起，且可在擬合分析模組中變化。

【0072】 在擬合分析模組處以多個入射角接收光學回應。使用擬合分析模組，對光學回應執行平行擬合，同時在每一光譜回歸中浮動分散模型。在入射角處評估分散模型之一或多個結果以判定相似性。此可通過擬合分析模組或使用其他技術手動執行。例如，判定多個平行擬合之結果的一致性。若第一有效介質分散體不相似，則可應用經組態以在評估之後最佳化分散模型的回饋迴路。回饋迴路可經組態以固定或浮動分散模型之參數。在最佳化第一有效介質模型之後，可再次執行平行擬合且可以判定結果擬合之一致性。若第一有效介質分散體仍然不一致，則可再次運行回饋迴路。

【0073】 來自不同AOI量測之浮動分散參數可能需要匹配。此可指示不需要進一步之回饋迴路。分散參數可能不相同，但所得分散可在精度規格內，在系統的雜訊位準內，或在系統到系統匹配規格內。若所揭示方法之實施例為自動化的，則使用者可輸入及/或定義終止回饋迴路之規格或時間。

【0074】 可將分散模型轉換為表。可在第一有效介質分散相似之後執行此轉換。然後可認為組合膜(不包括第一層)之第一有效介質分散為準確的。

【0075】 可使用第一散射量測模型執行擬合分析，其中將分散模型固定為表且第一層之厚度為浮動的。量測第一層之厚度。可比較第一層之

厚度與參考以驗證第一散射量測模型。

【0076】 在平行擬合期間，可將分散模型之至少一個參數視為共同的。

【0077】 開發第二有效介質分散模型可包括使用模型構建模組構建第二散射模型(「模型2」)，藉由在第二有效介質(「EM2」)中組合除層中之第一層和第二層之外的所有層。第二散射量測模型可包括三種介質：第二有效介質及最後兩個光柵上之膜(膜1及「膜2」)。

【0078】 第一層之厚度可轉遞至第二散射量測法中。由於兩個模型皆為相同結構之不同表示，因此此可被稱作為SSDF。

【0079】 為第二有效介質創建包括分散公式之分散模型。分散公式可在第二個散射量測模型中。

【0080】 在擬合分析模組處以多個入射角接收光學回應。使用擬合分析模組，對光學回應執行平行擬合，同時在每一光譜回歸中浮動分散模型。在入射角處評估分散模型之一或多個結果以判定相似性。此可通過擬合分析模組或使用其他技術手動執行。例如，判定多個平行擬合之結果的一致性。若第二有效介質分散體不相似，則可應用經組態以在評估之後最佳化分散模型的回饋迴路。回饋迴路可經組態以固定或浮動分散模型之參數。在最佳化第二有效介質模型之後，可再次執行平行擬合且可以判定結果擬合之一致性。若第二有效介質分散體仍然不一致，則可再次運行回饋迴路。

【0081】 可將分散模型轉換為表。可在第二有效介質分散相似之後執行此轉換。然後可認為組合膜(不包括第一層或第二層)之第二有效介質分散為準確的。

【0082】 可使用第二散射量測模型執行擬合分析，其中將分散模型固定為表。量測第二層之厚度。

【0083】 在平行擬合期間，可將分散模型之至少一個參數或第一層之厚度視為共同的。

【0084】 開發第三有效介質分散模型可包括使用模型構建模組構建第三散射模型(「模型3」)，藉由在第三有效介質(「EM3」)中組合除層中之第一層、第二層及第三層之外的所有層。第三散射量測模型可包括四種介質：第三有效介質及最後三個光柵上之膜(膜1、膜2及「膜3」)。

【0085】 第一層及第二層之厚度可轉遞至第三散射量測法中。例如，第一層之厚度可自第一散射量測模型轉遞至第二散射量測模型，且第二層之厚度可轉遞至第三散射量測模型。由於三個模型皆為相同結構之不同表示，因此此可被稱作為SSDF。

【0086】 為第三有效介質創建包括分散公式之分散模型。分散公式可在第三個散射量測模型中。

【0087】 在擬合分析模組處以多個入射角接收光學回應。使用擬合分析模組，對光學回應執行平行擬合，同時在每一光譜回歸中浮動分散模型。在入射角處評估分散模型之一或多個結果以判定相似性。此可通過擬合分析模組或使用其他技術手動執行。例如，判定多個平行擬合之結果的一致性。若第三有效介質分散體不相似，則可應用經組態以在評估之後最佳化分散模型的回饋迴路。回饋迴路可經組態以固定或浮動分散模型之參數。在最佳化第三有效介質模型之後，可再次執行平行擬合且可以判定結果擬合之一致性。若第三有效介質分散體仍然不一致，則可再次運行回饋迴路。

【0088】 可將分散模型轉換為表。可在第三有效介質分散相似之後執行此轉換。然後可認為組合膜(不包括第一層、第二層或第三層)之第三有效介質分散為準確的。

【0089】 可使用第二散射量測模型執行擬合分析，其中將分散模型固定為表。量測第三層之厚度。可報告第一層、第二層及第三層之厚度。

【0090】 在平行擬合期間，可將分散模型之至少一個參數或第一層之厚度視為共同的。

【0091】 本文中揭示為擬合分析模組之一部分之擬合分析(例如，逆問題回歸)可使用基於神經網路之庫或使用其他技術來執行。

【0092】 可使用任何有效介質分散來量測光柵上膜之光柵上帶隙。

【0093】 有效介質理論可用於亞波長範圍內之任何光/物質互動。由於IL、HK、TiN、TaN及TaL之總厚度可為約8 nm且典型散射量測光譜波長範圍可為自150 nm至2000 nm，因此深亞波長範圍近似可為有效的。然後可在小深度極限中求解馬克士威方程。第一有效介質(以及第二及第三有效介質)之有效性質取決於光學性質 $[n, k]$ 以及形成有效介質之所有材料之厚度：IL、HK、TiN、TaN、TaL等。由圖6之模型生成之資料可取決於有效介質光學指數之準確性。除了圖6中所描述之創新方法，該方法之一部分用於判定下面所描述之有效介質光學指數且可取決於該設備。

【0094】 圖7之流程圖總結本發明之另一實施例。第一步為藉由掃描入射角(AOI)獲得一系列RPRC光譜(1)。AOI為相對於z軸之光束的方向，其垂直於晶圓平面表面。然後，可建構圖6中所描繪之初始第一有效介質分散模型(2)。初始模型係指尚未最佳化之模型。在此狀況下，初始第一有效介質分散模型包括被認為不準確且尚未最佳化之第一有效介質分

散。為了最佳化第一個有效的介質分散，創建了一個分散模型，並改變了它的參數(3)。此處，用於開發有效介質分佈之分散模型可為勞倫茲模型或亦稱為諧波振盪器(HO)模型。該模型考慮與入射光(例如，電磁波)下之材料中之原子繫結之電子的振盪作為諧波振盪器之系集。材料介電常數之表示可如下。

$$\epsilon(E) = n_b + \frac{\sum_{s=1}^m H_s(E)}{1 - \sum_{s=1}^m \nu_s H_s(E)}$$

【0095】 在上述方程式中， n_b 為均勻背景指數(預設值= 1)， E 為藉由 $E = 1,240/\lambda$ 表達為波長 λ (以nm為單位)之函數的電場能量(以eV計)， H_s 為 s^{th} 振盪器(如下文所描述)之貢獻，且 ν_s 為 s^{th} 振盪器之局部場校正因子。

【0096】 對於金屬， ν_s 等於零，對於大多數半導體，接近於零，且對於理想電介質，等於0.333。

【0097】 H_s 由以下方程式給出。

$$H_s = \frac{16\pi N_s R_y^2 r_0^3}{(E_{ns}^2 - E^2 + iE_{gs}E)} e^{-i\Phi_s}$$

【0098】 在上述方程中， R_y 為芮得柏常數($R_y = 13.6058$ eV)， r_0 為玻耳半徑($r_0 = 0.0529177$ nm)， N_s (或 N_{osc})為 s^{th} 振盪器的數密度(以 nm^{-3} 為單位)，此表示此振盪器之相對重要性， E_{ns} (或 E_n)為其諧振能量或臨界點(以eV為單位)(最低 E_n 為通常被稱為帶隙能量)， E_{gs} (或 E_g)為其阻尼常數能量(以eV為單位)，且 Φ_s (或 Φ 為其(相對)階段(以弧度為單位)。

【0099】 Lorentz HO模型用於描述材料光學性質，包括具有數個峰值的特性。此等材料可包括半導體材料，諸如Si、Ge、SiGe，甚至為金屬，諸如W、Cu、Co、Ti、TiN、TaN等。如可看出，Lorentz模型中之每個振盪器含有五個未知參數： N_{osc} 、 E_n 、 E_g 、 Φ_s 及 ν_s 。半導體材料及

金屬之典型分散模型需要四至八個波長範圍為190 nm至850 nm的振盪器。因此，在此基於HO之分散模型中可能之變數的數目在20(5×4)至40(5×8)之間。高數目自由度(例如，20至40)及缺乏參考可能為有效介質量測中最具挑戰性的部分。其導致材料參數相關性且可導致多種解決方案。可固定一些低靈敏度參數以減少相關性並改良有效介質分散準確度。此浮動或固定方法可被稱作為HO模型最佳化。若不能很好地執行，則可提取錯誤有效介質分散。正確有效介質分散的量測可能比單材料分散的量測更複雜。有效的介質分散可取決於兩種或多於兩種材料之分散及其厚度，因此當從光學回應中提取有效介質分散性質時可小心。掃描AOI有助於開發準確有效介質分散。可幫助提供準確且可靠有效介質分散之一個態樣為AOI獨立。掃描AOI可確保各向同性有效介質。各向同性有效介質分散可為有益的。使用此條件，可藉由比較來自每一AOI光譜之每一量測有效介質分散來檢查有效介質的準確性。回歸在AOI1(4)及AOI2(5)...及AOIn(5)上運行。n有效中等分散體可自N回歸中出現。然後比較n種有效介質分散體(6)。若有效介質分散不一致(7)，則意味著HO模型不夠最佳化，且可能需要進一步最佳化以減少參數相關性(8)。可創建回饋迴路。可執行多次迭代。一旦第一有效介質分散與不同AOI一致，則認為第一有效介質分散體為準確的。然後可準備好第一有效介質分散模型，且可量測頂部膜(在此特定實例中為TiN)厚度(9)。

【0100】 建立初始第二有效介質分散模型(10)。為最佳化第二有效介質分散，創建分散模型其參數變化(11)。然後將來自第一有效介質分散模型之TiN厚度前饋至第二有效介質分散模型(12)。使用來自第一有效介質分散模型之TiN厚度可幫助降低第二有效介質分散模型中之相關性以

最佳化第二有效介質並確保與第一有效介質分散模型之一致性。對第二種有效介質重複用於提取第一種有效介質之程序。對AOI1(13)及AOI2(14)...及AOIn(15)進行回歸。 n 個第二有效介質分散從 N 回歸中出現。然後比較 n 個第二有效介質分散體(16)。若第二有效介質分散不一致(17)，則HO模型不夠最佳化，且可能需要進一步最佳化以減少參數相關性(18)。可創建回饋迴路。可執行多次迭代。一旦第二有效介質分散體與不同的AOI一致，則認為第二有效介質分散體為準確的。然後準備好第二有效介質分散模型，並通過回歸量測第二膜(在此特定實例中之TaL)厚度。

【0101】 建立最初第三有效介質分散模型(19)。為最佳化第三有效介質分散，創建分散模型其其參數變化(20)。然後將來自第一有效介質分散模型之TiN厚度及來自第二有效介質分散模型之TaL前饋至第三有效介質分散模型(21)。使用來自第一及第二有效介質分散模型之TiN及TaL厚度可幫助降低第三有效介質分散模型中之相關性以最佳化第三有效介質並確保與第一及第二有效介質分散模型之一致性。用於提取第一有效介質及第二有效介質之相同程序經重複用於第三有效平台。對AOI1(22)及AOI2(23)...及AOIn(24)進行回歸。 N 個第三有效媒體分散從 N 個回歸出現。然後比較 n 個第三有效介質分散體(25)。若第三有效介質分散不一致(17)，則HO模型不夠最佳化，且可能需要進一步最佳化以減少參數相關性(18)。可創建回饋迴路。可執行多次迭代。一旦第三有效介質分散體與不同的AOI一致，則認為第三有效介質分散體為準確的。然後準備好第三有效介質分散模型，且經由回歸量測頂部TaN厚度。

【0102】 雖然揭示三種模型，但可僅判定第一有效介質分散模型。

在另一例子中，僅判定第一有效介質分散模型及第三有效介質分散模型。因此，可跳過判定有效介質分散模型中之一或多者的步驟。此外，可使用多於兩個或三個之有效介質分散模型。此外，雖然針對各種層揭示特定材料，但技術可應用於其他材料。

【0103】 圖5為系統300之實施例的方塊圖。系統300包括卡盤306，卡盤306經組態以保持晶圓307或其他工件。卡盤306可經組態以在一個、兩個或三個軸上移動或旋轉。卡盤306亦可經組態以旋轉，諸如圍繞Z軸。

【0104】 系統300亦包括量測系統301，其經組態以量測晶圓307上之表面、裝置、特徵或層的一部分。量測系統301可產生光束、電子束、寬帶電漿，或可使用其他技術來量測晶圓307之表面。在一個實例中，量測系統301包括雷射。在另一實例中，系統300為寬帶電漿檢測工具。量測系統301可提供晶圓307上之晶粒之影像，或可提供用於在晶圓307上形成晶粒之影像的資訊。

【0105】 特定而言，系統300或量測系統301可經組態以提供旋轉偏振器旋轉補償器光譜橢圓量測資料、全彌勒矩陣分量資料、旋轉偏振器光譜橢圓量測資料、反射量測資料、雷射驅動光譜反射量測資料或x射線資料中之一或多者。

【0106】 系統300與控制器302通信。例如，控制器302可與量測系統301或系統300之其他組件通信。控制器302可包括處理器303，與處理器303電子通信的電子資料儲存單元304，以及與處理器303電子通信的通信埠305。應瞭解，控制器302實際上可藉由硬體、軟體及韌體之任何組合來實施。此外，如本文中所描述之其功能可由一個單元執行，或在不同

組件之間劃分，每一組件可依次藉由硬體、軟體及韌體之任何組合來實施。用於控制器302實施各種方法及功能之程式碼或指令可儲存在控制器可讀儲存媒體中，諸如電子資料儲存單元304中、在控制器302內、在控制器302外部或其組合之記憶體。

【0107】 控制器302可包括一或多個處理器303及一或多個電子資料儲存單元304。每一處理器303可與電子資料儲存單元304中之一或多者進行電子通信。在實施例中，一或多個處理器303通信地耦合。就此而言，一或多個處理器303可接收在量測系統301處接收的讀數並將讀數儲存在控制器302之電子資料儲存單元304中。控制器302可為系統本身之一部分，或可與系統分離(例如，獨立控制單元或集中質量控制單元)。

【0108】 控制器302可以任何合適方式耦合至系統300之組件(例如，經由一或多個傳輸媒體，其可包括有線及/或無線傳輸媒體)，使得控制器302可接收由系統300生成之輸出，例如來自量測系統301之輸出。控制器302可經組態以使用輸出執行多個功能。例如，控制器302可經組態以量測晶圓307上之層。在另一實例中，控制器302可經組態以在不查看輸出的情況下將輸出發送至電子資料儲存單元304或另一儲存媒體。如本文中所描述，控制器302可經進一步組態。

【0109】 本文中所描述之控制器302、其他系統或其他子系統可採用各種形式，包括個人電腦系統、影像電腦、大型電腦系統、工作站、網路設備，網際網路設備或其他裝置。通常，術語「控制器」可廣義地定義為囊括具有自記憶體媒體執行指令之一或多個處理器的任何裝置。子系統或系統亦可包括此項技術中已知之任何合適處理器，諸如並行處理器。此外，子系統或系統可包括具有高速處理及軟體之平台，作為獨立或網路工

具。

【0110】 若系統包括多於一個子系統，則不同的子系統可彼此耦合，使得可在子系統之間發送影像，資料、資訊、指令等。例如，一個子系統可藉由任何合適傳輸媒體耦合至另外子系統，傳輸媒體可包含此項技術中已知之任何合適有線及/或無線傳輸媒體。此些子系統中之兩者或多於兩者亦可藉由共享電腦可讀儲存媒體(未展示)有效地耦合。

【0111】 系統300可為缺陷檢查系統、檢查系統、度量衡系統或一些其他類型系統之一部分。因此，本文中所揭示之實施例描述一些組態，該等組態可以多種方式修整，用於具有或多或少適合於不同應用之不同能力之系統。

【0112】 控制器302可與量測系統301或系統300之其他組件進行電子通信。可根據本文中所描述之實施例中之任何一者來組態控制器302。控制器302亦可經組態以使用量測系統301之輸出或使用來自其他源之影像、量測或資料來執行其他功能或額外步驟。

【0113】 另外實施例涉及一種儲存程式指令之非暫時性電腦可讀媒體，該等程式指令可在控制器上執行用於執行如本文中所揭示之電腦實施方法。特別而言，如圖18中所展示，控制器302可包括電子資料儲存單元304中之儲存器或具有非暫時性電腦可讀媒體之其他電子資料儲存媒體，該非暫時性電腦可讀媒體包括在控制器302上可執行之程式指令。電腦實施方法可包括本文中所描述之任何方法之任何步驟。例如，控制器302可經程式化以執行圖17或圖7之步驟中之一些或全部。電子資料儲存單元304或其他電子資料儲存媒體中之儲存器可為儲存媒體，諸如磁盤或光盤、磁帶或此些技術中已知之任何其他合適非暫時性電腦可讀媒體。

【0114】 在一實例中，處理器303可經組態以執行一或多個軟體模組，且其中一或多個軟體模組經組態以開發用於晶圓上之膜堆疊之第一有效介質分散模型，並使用第一有效介質分散模型判定第一層之厚度。膜堆疊可包括至少四層。第一有效介質分散模型替代除層中之第一層之外的所有層。第一層為與晶圓相對的膜堆疊的頂層。

【0115】 視情況，軟體模組可經進一步組態以基於第一層之厚度開發用於膜堆疊之第二有效介質分散模型，並使用第二有效介質分散模型判定第二層之厚度。第二有效介質分散模型替代除層中之第一層及第二層之外的所有層。第二層與第一層毗鄰。

【0116】 視情況，軟體模組可經進一步組態以基於第一層之厚度及第二層之厚度開發用於膜堆疊之第三有效介質分散模型，並使用第三有效介質分散模型判定第三層之厚度。第三有效介質分散模型替代除層中之第一層、第二層及第三層之外的所有層。第三層與第二層毗鄰。

【0117】 軟體模組可經組態以可選地開發第四、第五或甚至更有效介質分散模型以判定膜堆疊中之其他層之厚度。

【0118】 程式指令可以各種方式中之任何一者來實施，包括基於程序之技術，基於組件之技術及/或面向物件之技術等。例如，程式指令可根據需要使用ActiveX控制項、C ++物件、JavaBeans、Microsoft基礎類(MFC)、SSE(串流式SIMD擴展)或其他技術或方法來實施。

【0119】 在另一實施例中，控制器302可以此項技術中已知的任何方式通信地耦合至系統300之各種組件或子系統中之任何一者。此外，控制器302可經組態以藉由可包括有線及/或無線部分之傳輸媒體自其他系統接收及/或獲取資料或資訊(例如，來自諸如檢閱工具、包括設計資料之遠

端資料庫等之檢查系統之檢查結果)。以此方式，傳輸媒體可用作控制器302與系統300之其他子系統或系統300外部之系統之間的資料鏈路。

【0120】 在一些實施例中，本文中所揭示之系統300及方法之各種步驟、功能及/或操作由以下中之一或多者來執行：電子電路、邏輯閘、多工器、可程式化邏輯裝置、ASIC、類比或數位控制/開關、微控制器或計算系統。實施諸如本文中所描述之那些方法之程式指令可在載體媒體上傳輸或儲存在載體媒體上。載體媒體可包括儲存媒體，諸如唯讀記憶體、隨機存取記憶體、磁盤或光盤、非揮發性記憶體、固態記憶體，磁帶等。載體媒體可包括傳輸媒體，諸如電線、電纜或無線傳輸鏈路。例如，貫穿本發明描述之各種步驟可由單個控制器302 (或電腦系統)實施，或替代地，由多個控制器302 (或多個電腦系統)實施。此外，系統300之不同子系統可包括一或多個計算或邏輯系統。因此，以上描述不應被解釋為對本發明的限制，而僅僅為說明。

【0121】 本文中所揭示之實例旨在為說明而非限制性。

實例1

【0122】 在一實例中，第一有效介質分散模型替換堆疊中之五種材料：IL、HK、TiN、TaN及TaL。藉由浮動第一有效介質厚度並最終浮動第一有效介質布魯格曼有效介質近似(BEMA)分數，第一有效介質將五層之所有過程變化一起考慮。因此，第一散射量測模型浮動參數自最初十二個參數減少至僅七個。使用第一散射量測模型，精確量測光柵上之頂部TiN (8A)膜，且滿足所有成功準則准，包括穩健性測試。頂部TiN (8A)厚度經轉遞至另一模型。

【0123】 第二有效介質分散模型取代四種材料：IL、HK、TiN及

TaN。通過浮動第二有效介質厚度及最終浮動第二有效介質BEMA分數，第二有效介質將四個膜之所有過程變化一起考慮。因此，第二有效介質分散模型浮動參數實際上自十二個參數減少到僅七個參數加上自第一有效介質分散模前饋之頂部TiN。自第一有效介質分散模型前饋之頂部TiN與第二臨界參數量測TaL無任何互動或相關性。在開發第二有效介質分散體同時，自第一有效介質分散模型饋送頂部TiN厚度。若來自第一有效介質分散模型之資料用於開發第二有效介質分散模型，則第二有效介質分散模型可更準確。此可確保第一有效介質分散模型及第二有效介質分散模型之間的一致性。

【0124】 第三有效介質分散模型取代三種材料：IL、HK及TiN。藉由浮動第三有效介質厚度及最終浮動第三有效介質BEMA分數，第三有效介質分散模型將三個膜之所有過程變化一起考慮。因此，第三有效介質分散模型浮動參數實際上自12個參數減少到僅七個參數加上自第一有效介質分散模前饋之頂部TiN及自第二有效媒體分散模型前饋之TaL。來自第一有效介質分散模型及第二有效介質分散模型之頂部TiN及TaL與第三臨界參數量測TaL無任何互動或相關性。類似於第二有效介質分散模型，在開發第三有效介質分散模型時，TiN厚度及TaL厚度分別自第一有效介質分散模型及第二有效介質分散模型前饋。此可確保第一有效介質分散模型、第二有效介質分散模型及第三有效介質分散模型之間的一致性。

【0125】 關於量測有效介質(EM)分散，將多種材料組合成整體可改良對比度，可導致光學回應之獨特性，且可減少參數互動。例如，若圖6之所有六膜同時浮動，關鍵參數彼此相關之單個膜可能使模型不穩定且不夠穩健而不能通過用戶規格。

實例2

【0126】 為在另一實例中驗證內層前饋技術，使用掃描AOI RPRC設計及量測三個DOE晶圓。每晶圓之三個位置經選擇用於參考量測TEM。圖8總結使用圖6中描述之SSDF方法之TiN、TaL及TaN之FOG對TEM線性結果。除精度之外，亦測試SDF方法之精確GRR及穩健性。R2及斜率兩者皆通過客戶對線性度之要求。

【0127】 圖9展示SSDF方法之結果的重要性，並與「全浮動」之舊方法進行比較。GRR及穩健性測試更容易受到多個電影相關性影響。GRR及穩健性兩者皆通過客戶規格。

【0128】 下文呈現包括一些EM分散(使用經掃描AOI RPRC量測量測並用於庫中)之成功FOG層案例。

【0129】 圖2(a)展示頂蓋層膜堆疊，且2(b)展示FOG頂蓋結構。由於高度相關參數，模擬精度很差。此處亦使用有效媒體方法，而非同時浮動三個共形襯裡。將IL + HK襯裡混合為一個有效介質襯裡，如圖10中所說明。

【0130】 對經掃描AOI光譜進行回歸以最佳化EM分散模型。將圖7中所描述之相同方法應用於圖10之頂蓋層。在圖11上展示(IL+HK)之所得EM分散。展示IL及HK分散以供參考。

【0131】 圖3(a)展示頂蓋層膜堆疊，且3(b)展示FOG頂蓋結構。由於高度相關參數，模擬精度很差。圖13(a)展示TaN層膜堆疊。此處使用有效媒體方法，而非同時浮動四個共形襯裡。將IL + HK+頂蓋襯裡混合為一個有效介質襯裡，如圖13中所說明。

【0132】 隨著FinFET及奈米線中金屬閘極之奈米製造能力之不斷進

步，光柵量測上之膜似乎受到用於構建HKMG之自然光學性質以及與波長相比之其薄厚度的限制。上述實驗結果展示，當一或多種介質經組合且認為一種介質時，可獲得更準確結果。有效介質理論用於定義及研究材料或薄膜複合物在其各自組分及其幾何形狀方面之有效折射率及有效消光係數。如本文中所揭示，有效介質理論用於光柵上之薄膜。理論之有效性可能受到構成結構之每一膜之大小的限制。膜可能需要足夠小以使入射光波長看起來均勻。多層膜經模型化為一個有效膜，因為總厚度比波長小得多。有效介質可統計解釋複合物之行為。例如，在圖10之簡單狀況下，問題為要獲得由具有相對介電函數 ϵ_{SiO_2} 及 ϵ_{HfO_2} 及厚度 T_{IL} 及 T_{HK} 之IL (SiO_2SiO_2)及HK(HfO_2)製成之替代有效膜之有效參數。非磁性結構之有效介電常數可遵循以下方程式。

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}} \mathbf{E}$$

【0133】 $\mathbf{D}$ 為空間平均位移場，且 $\mathbf{E}$ 為電場。使用 $\mathbf{E}$ 為連續之邊界條件且藉由就體積對位移場 $\mathbf{D}$ 求平均，可判定以下公式。

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{T_{\text{IL}}}{T_{\text{HK}} + T_{\text{IL}}} \epsilon_{\text{IL}} + \frac{T_{\text{HK}}}{T_{\text{HK}} + T_{\text{IL}}} \epsilon_{\text{HK}}$$

【0134】 此方程式為描述有效介質光學性質之簡單模型。 T 變數為各種層之厚度且 ϵ_{HK} 為HK層之有效參數。實際上，加權函數可包含在此模型中。此簡單理論表明，任何有效介電常數為未知之厚度的函數。因此，準確判定有效介電常數(圖7)為因素。

【0135】 可如本文中所描述執行該方法之步驟中之每一者。該方法亦可包括可由本文中所描述之控制器及/或電腦子系統或系統執行之任何其他步驟。該等步驟可由一或多個電腦系統執行，其可根據本文中所描述之任何實施例來組態。另外，上文所描述方法可由本文中所描述之系統實

施例中之任一者執行。

【0136】 儘管已關於一或多個特定實施例描述本發明，但應理解可在不脫離本發明之範疇的情況下進行本發明之其他實施例。因此，本發明被認為僅受隨附請求項及其合理解釋限制。

【符號說明】

【0137】

- 101 步驟
- 102 步驟
- 103 步驟
- 104 步驟
- 105 步驟
- 106 步驟
- 300 系統
- 301 量測系統
- 302 控制器
- 303 處理器
- 304 電子資料儲存單元
- 305 通信埠
- 306 卡盤
- 307 晶圓

【發明申請專利範圍】

【第1項】

一種用於量測薄膜的方法，其包含：

使用一控制器，開發(developing)用於一晶圓上之一膜堆疊之一第一有效介質分散模型，其將小於該膜堆疊之一整體之光學性質模型化，其中該膜堆疊包括至少四層，其中該第一有效介質分散模型替代該膜堆疊中之至少一第二層、一第三層、及一第四層，且其中一第一層為與該晶圓相對之該膜堆疊之一頂層；及

使用該控制器，使用該第一有效介質分散模型判定該第一層之一厚度，其中開發該第一有效介質分散模型包括：

以多個入射角收集該膜堆疊之光學回應；

使用一模型構建(building)模組藉由將至少該第二層、該第三層、及該第四層組合在一第一有效介質中來構建一第一散射量測模型；

為該第一有效介質創建(creating)包括一第一分散公式之一第一分散模型；

在一擬合分析模組(fitting analysis module)處以該多個入射角接收該等光學回應；

使用該擬合分析模組，在每一光譜回歸中浮動該第一分散模型同時對該等光學回應執行平行擬合；

評估在該多個入射角下之該第一分散模型之一或多個結果以判定相似性；

將該第一分散模型轉換成一第一表；

使用該第一散射量測模型執行一擬合分析，其中將該第一分散模型

固定為該第一表且該第一層之該厚度為浮動的；

量測該第一層之該厚度；及

比較該第一層之該厚度與一參考。

【第2項】

如請求項1之方法，其進一步包含：

使用該控制器，基於該第一層之該厚度開發用於該膜堆疊之一第二有效介質分散模型，其將小於該膜堆疊之該整體之光學性質模型化，其中該第二有效介質分散模型替代至少該第三層及該第四層，且其中該第二層與該第一層毗鄰；

使用該控制器，使用該第二有效介質分散模型判定該第二層之一厚度。

【第3項】

如請求項2之方法，其進一步包含：

使用該控制器，基於該第一層之該厚度及該第二層之該厚度，開發用於該膜堆疊之一第三有效介質分散模型，其將小於該膜堆疊之該整體之光學性質模型化，其中該第三有效介質分散模型替代至少該第四層，且其中該第三層與該第二層毗鄰；及

使用該控制器，使用該第三有效介質分散模型判定該第三層之一厚度。

【第4項】

如請求項3之方法，其中該第一有效介質分散模型替代(substitutes)至少該第二層、該第三層、及該第四層之一氧化物層、一高k層、一TiN層、一Ta₂N₅層及一Ta₂Al₃層，其中該第二有效介質分散模型替代至少該第三

層及該第四層之一氧化物層、一高k層、一TiN層及一TaN層，且其中該第三有效介質分散模型替代至少該第四層之一氧化物層、一高k層及一TiN層。

【第5項】

如請求項4之方法，其中該第一有效介質分散模型、該第二有效介質分散模型及該第三有效介質分散模型各自具有不同光學性質。

【第6項】

如請求項1之方法，其進一步包含藉由產生旋轉偏振器旋轉補償器光譜橢圓量測資料、全彌勒矩陣分量資料、旋轉偏振器光譜橢圓量測資料、反射量測資料、雷射驅動光譜反射量測資料或x射線資料中之一或多者來量測該膜堆疊。

【第7項】

如請求項1之方法，其進一步包含：應用一回饋迴路，該回饋迴路經組態以在該評估之後最佳化該第一分散模型，其中該回饋迴路經組態以固定或浮動該第一分散模型之參數。

【第8項】

如請求項1之方法，其中在該平行擬合期間將該第一分散模型之至少一個參數視為共同的(common)。

【第9項】

如請求項2之方法，其中開發該第二有效介質分散模型包括：

使用該模型構建模組藉由將至少該第三層及該第四層組合在一第二有效介質中來構建一第二散射量測模型；

將該第一層之該厚度轉遞(forwarding)至該第二散射量測模型中；

為該第二有效介質創建包括一第二分散公式之一第二分散模型；

在該擬合分析模組處以該多個入射角接收該等光學回應；

使用該擬合分析模組，在每一光譜回歸中浮動該第二分散模型的同時對該等光學回應執行平行擬合；

評估在該等入射角下之該第二分散模型之一或多個結果以判定相似性；

將該第二分散模型轉換成一第二表；及

使用該第二散射量測模型執行一擬合分析，其中該第二分散模型為固定的。

【第10項】

如請求項9之方法，其進一步包含：應用一回饋迴路，該回饋迴路經組態以在該評估之後最佳化該第二分散模型，其中該回饋迴路經組態以固定或浮動該第二分散模型之參數。

【第11項】

如請求項9之方法，其中在該平行擬合期間，將該第二分散模型之至少一個參數視為共同的，或在該平行擬合期間將該第一層之該厚度視為共同的。

【第12項】

如請求項3之方法，其中開發該第三有效介質分散模型包括：

使用該模型構建模組藉由將至少該第四層組合在一第三有效介質中來構建一第三散射量測模型；

將該第一層之該厚度及該第二層之該厚度轉遞至該第三散射量測模型中；

為該第三有效介質創建包括一第三分散公式之一第三分散模型；

在該擬合分析模組處以該多個入射角接收該等光學回應；

使用該擬合分析模組，在每一光譜回歸中浮動該第三分散模型同時對該等光學回應執行平行擬合；

評估在該等入射角下之該第三分散模型之一或多個結果以判定相似性；

將該第三分散模型轉換成一第三表；及

使用該第三散射量測模型執行一擬合分析，其中該第三分散模型為固定的。

【第13項】

如請求項12之方法，其進一步包含：應用一回饋迴路，該回饋迴路經組態以在該評估之後最佳化該第三分散模型，其中該回饋迴路經組態以固定或浮動該第三分散模型之參數。

【第14項】

如請求項12之方法，其中在該平行擬合期間，將該第三分散模型之至少一個參數視為共同的，或在該平行擬合期間將該第一層之該厚度視為共同的。

【第15項】

如請求項1之方法，其中該膜堆疊為一1D膜堆疊、光柵上之一2D膜或光柵上之一3D膜中之一者。

【第16項】

如請求項1之方法，其中該至少四層各自為SiO₂、HfO₂、HfSiON、具有氮濃度的HfON、TiN、Ta₂N₅、TaAlC、TiAlC、W、Co、WC或TaO

中之一者。

【第17項】

如請求項16之方法，其中該至少四層中之至少一者為HfON、TiN或TaN中之一者，且進一步包含判定一氮濃度。

【第18項】

如請求項3之方法，其中該第一有效介質分散模型、該第二有效介質分散模型或該第三有效介質分散模型中之一者為將一材料之光學性質模型化為光子能量或波長之一函數的一分散公式。

【第19項】

一種用於量測薄膜的電腦程式產品，該電腦程式產品包括具有與其一起實現之電腦可讀程式之一非暫時性電腦可讀儲存媒體，該電腦可讀程式經組態以實施如請求項1之方法。

【第20項】

一種用於量測薄膜的系統，其包含：

一量測系統，其經組態以量測一晶圓；

一控制器，其包括一處理器及與該處理器電子通信之一電子資料儲存單元，其中該控制器與該量測系統電子通信，其中該處理器經組態以執行一或多個軟體模組，且其中該一或多個軟體模組經組態以：

使用該控制器，開發用於該晶圓上之一膜堆疊之一第一有效介質分散模型，其將小於該膜堆疊之一整體之光學性質模型化，其中該膜堆疊包括至少四層，其中該第一有效介質分散模型替代該膜堆疊中之至少一第二層、一第三層、及一第四層，且其中一第一層為與該晶圓相對之該膜堆疊之一頂層；及

使用該控制器使用該第一有效介質分散模型判定該第一層之一厚度，其中開發該第一有效介質分散模型包括：

以多個入射角收集該膜堆疊之光學回應；

使用一模型構建模組藉由將至少該第二層、該第三層、及該第四層組合在一第一有效介質中來構建一第一散射量測模型；

為該第一有效介質創建包括一第一分散公式之一第一分散模型；

在一擬合分析模組處以該多個入射角接收該等光學回應；

使用該擬合分析模組，在每一光譜回歸中浮動該第一分散模型同時對該等光學回應執行平行擬合；

評估在該多個入射角下之該第一分散模型之一或多個結果以判定相似性；

將該第一分散模型轉換成一第一表；

使用該第一散射量測模型執行一擬合分析，其中將該第一分散模型固定為該第一表且該第一層之該厚度為浮動的；

量測該第一層之該厚度；及

比較該第一層之該厚度與一參考。

【第21項】

如請求項20之系統，其中該等軟體模組經進一步組態以：

使用該控制器基於該第一層之該厚度開發用於該膜堆疊之一第二有效介質分散模型，其將小於該膜堆疊之該整體之光學性質模型化，其中該第二有效介質分散模型替代至少該第三層及該第四層，且其中該第二層與該第一層毗鄰；及

使用該控制器使用該第二有效介質分散模型判定該第二層之一厚

度。

【第22項】

如請求項21之系統，其中該等軟體模組經進一步組態以：

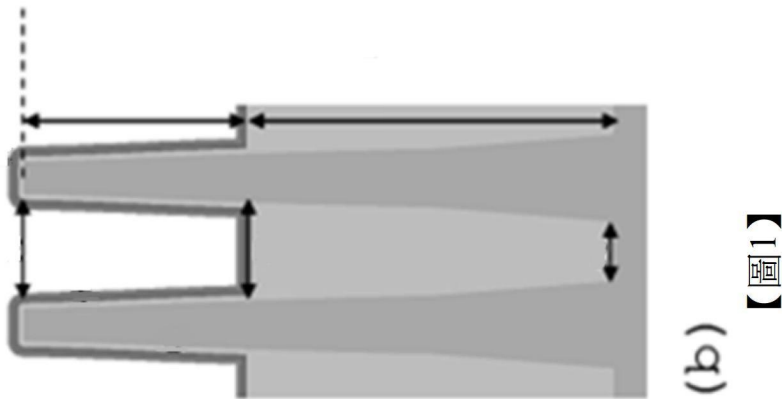
使用該控制器基於該第一層之該厚度及該第二層之該厚度，開發用於該膜堆疊之一第三有效介質分散模型，其將小於該膜堆疊之該整體之光學性質模型化，其中該第三有效介質分散模型替代至少該第四層，且其中該第三層與該第二層毗鄰；及

使用該控制器使用該第三有效介質分散模型判定該第三層之一厚度。

【第23項】

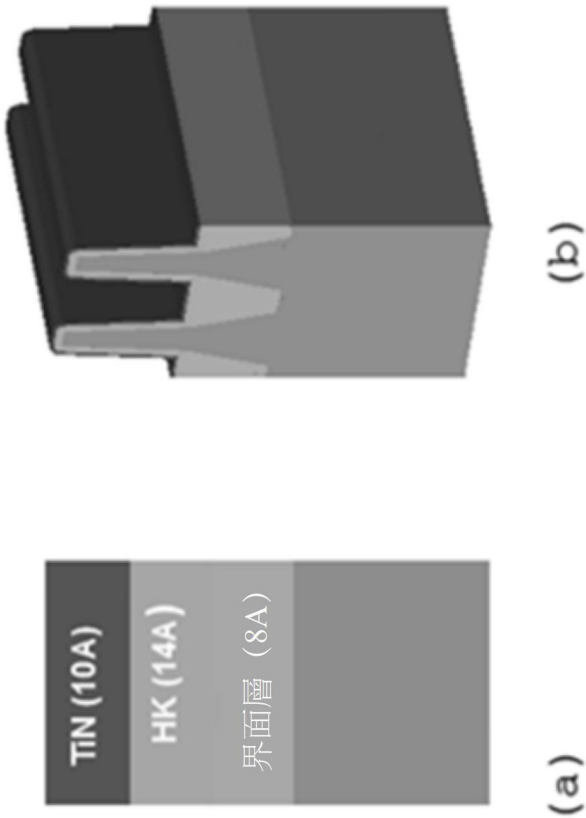
如請求項20之系統，其中該量測系統提供旋轉偏振器旋轉補償器光譜橢圓量測資料、全彌勒矩陣分量資料、旋轉偏振器光譜橢圓量測資料、反射量測資料、雷射驅動光譜反射量測資料或x射線資料中之一者。

【發明圖式】

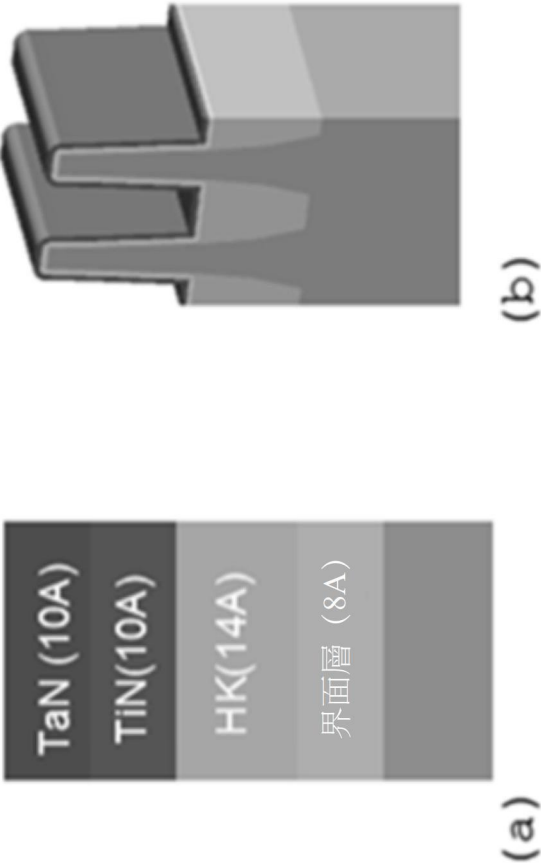


【圖1】

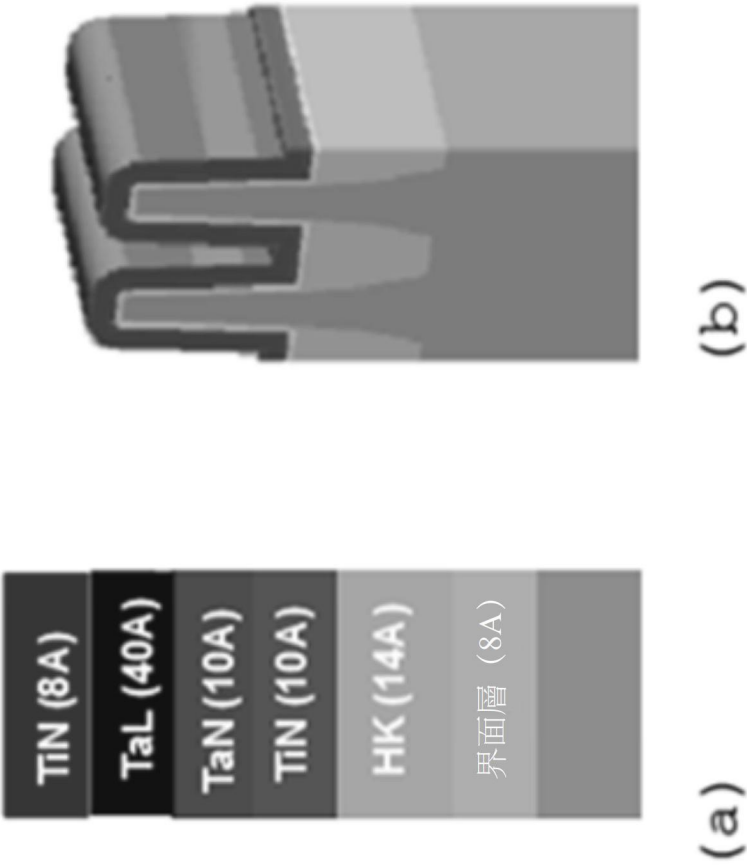




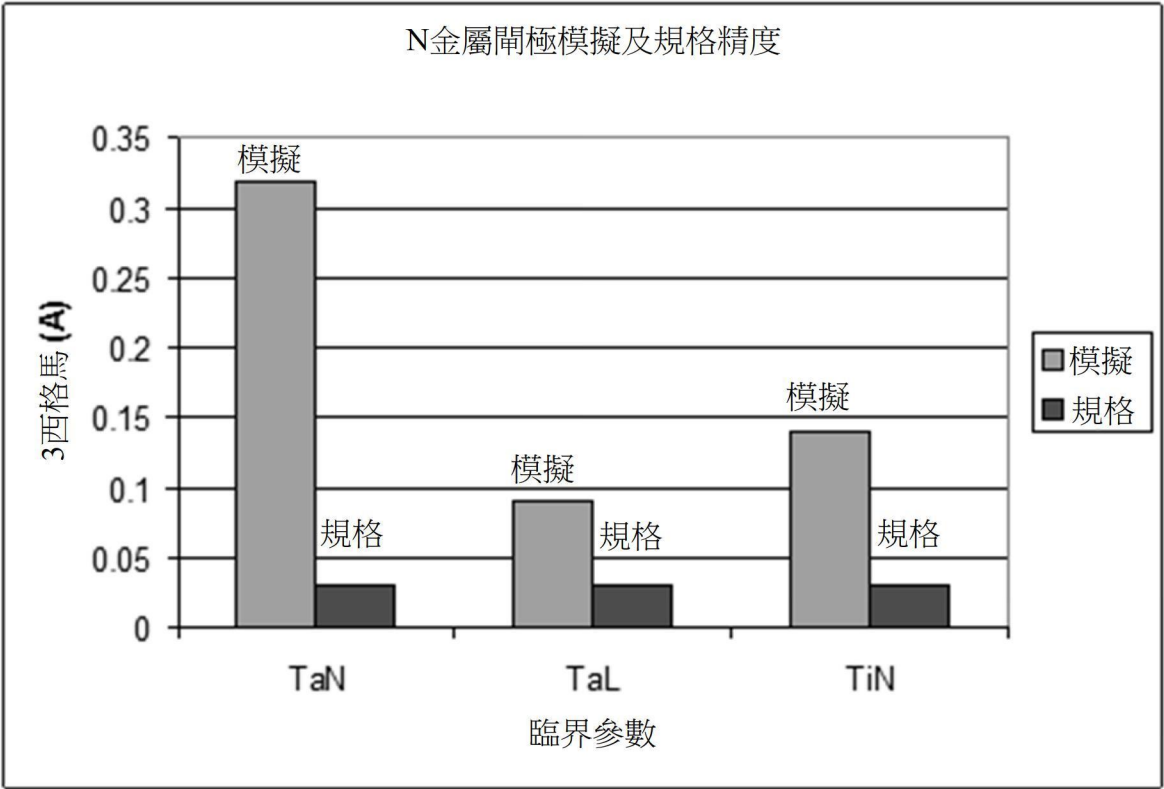
【圖2】



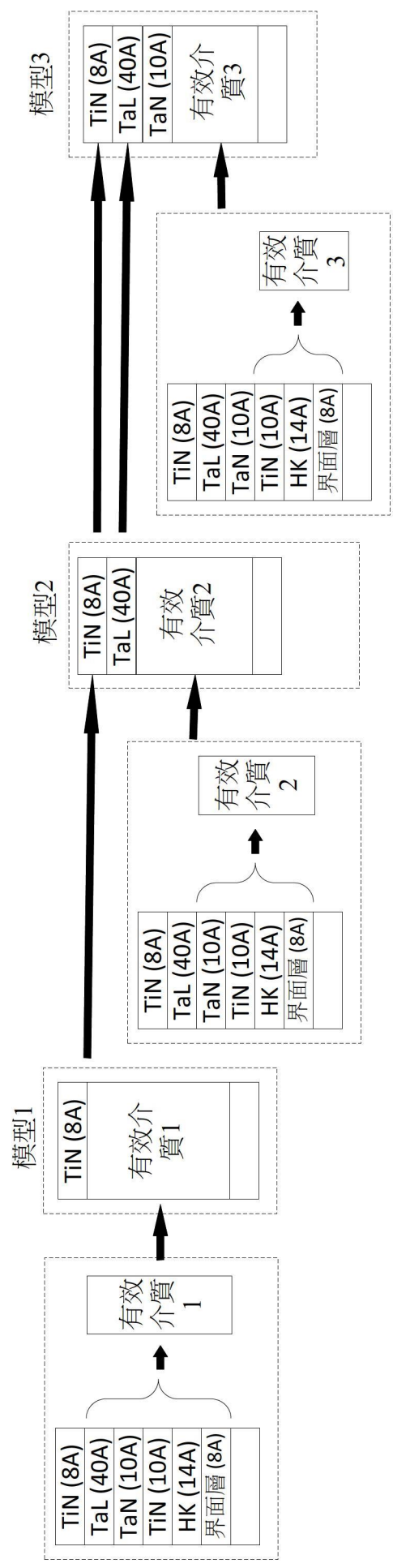
【圖3】



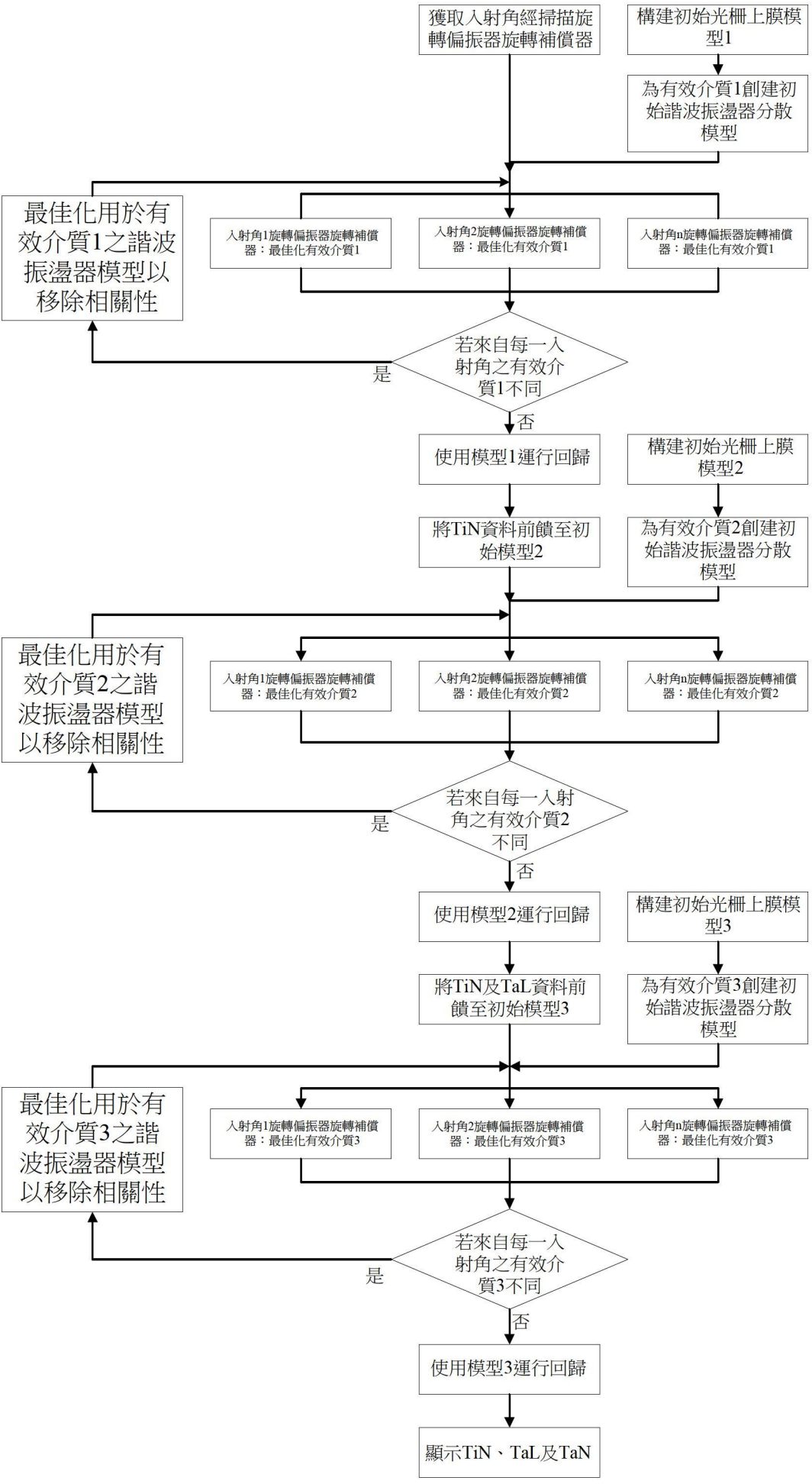
【圖4】



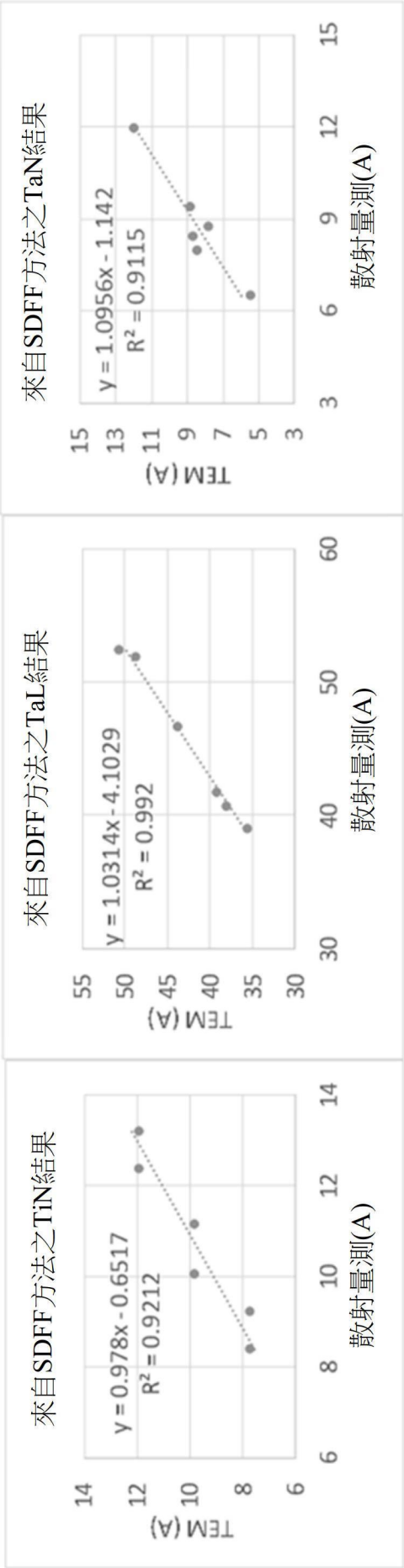
【圖5】



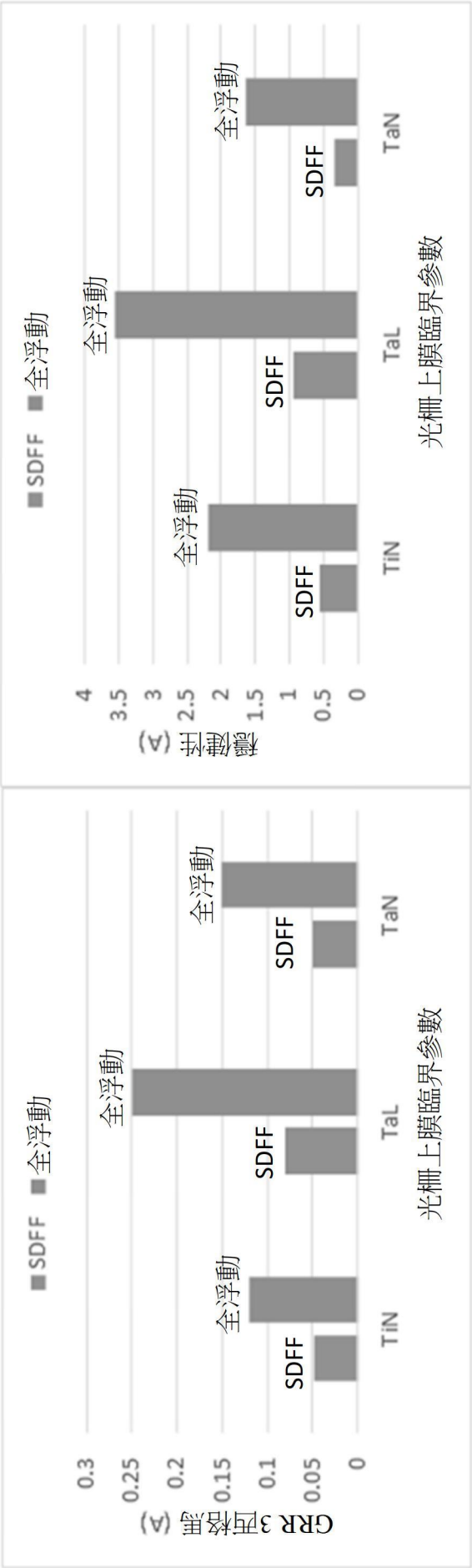
【圖6】



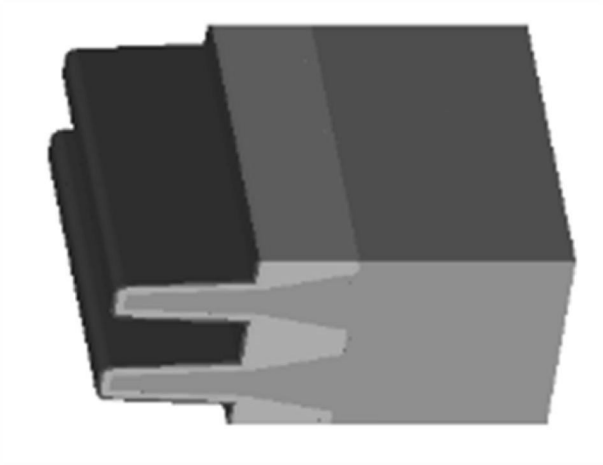
【圖7】



【圖8】



【圖9】

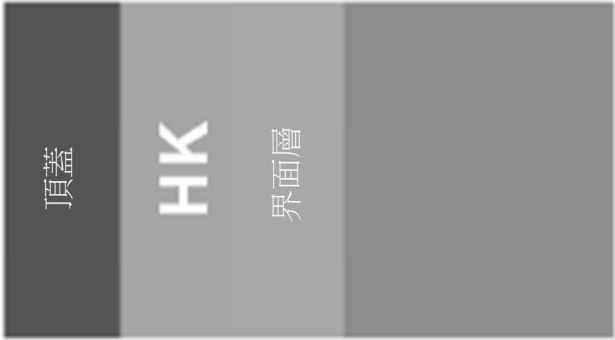
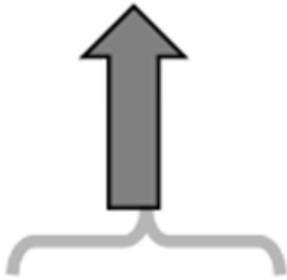


(c)

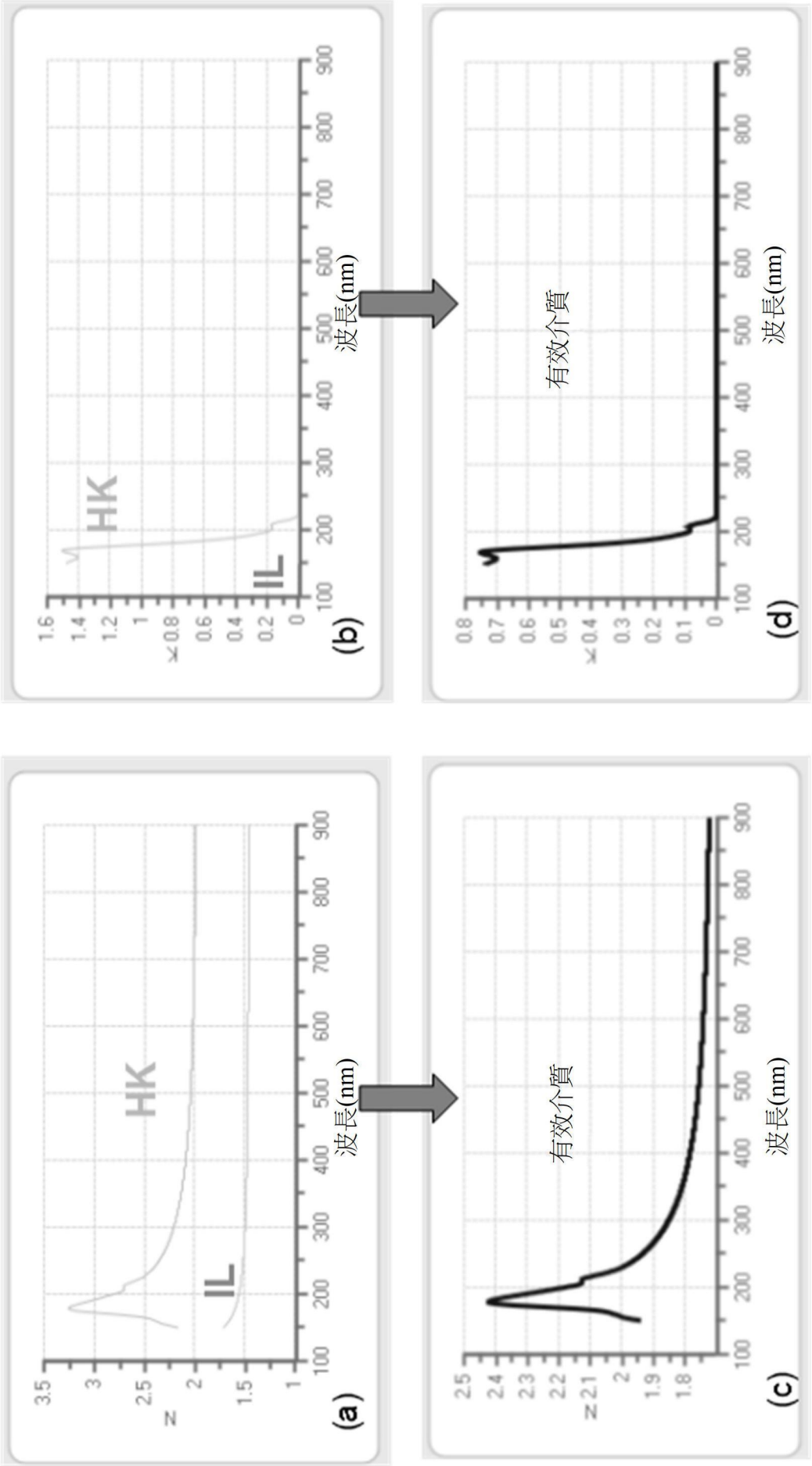


(b)

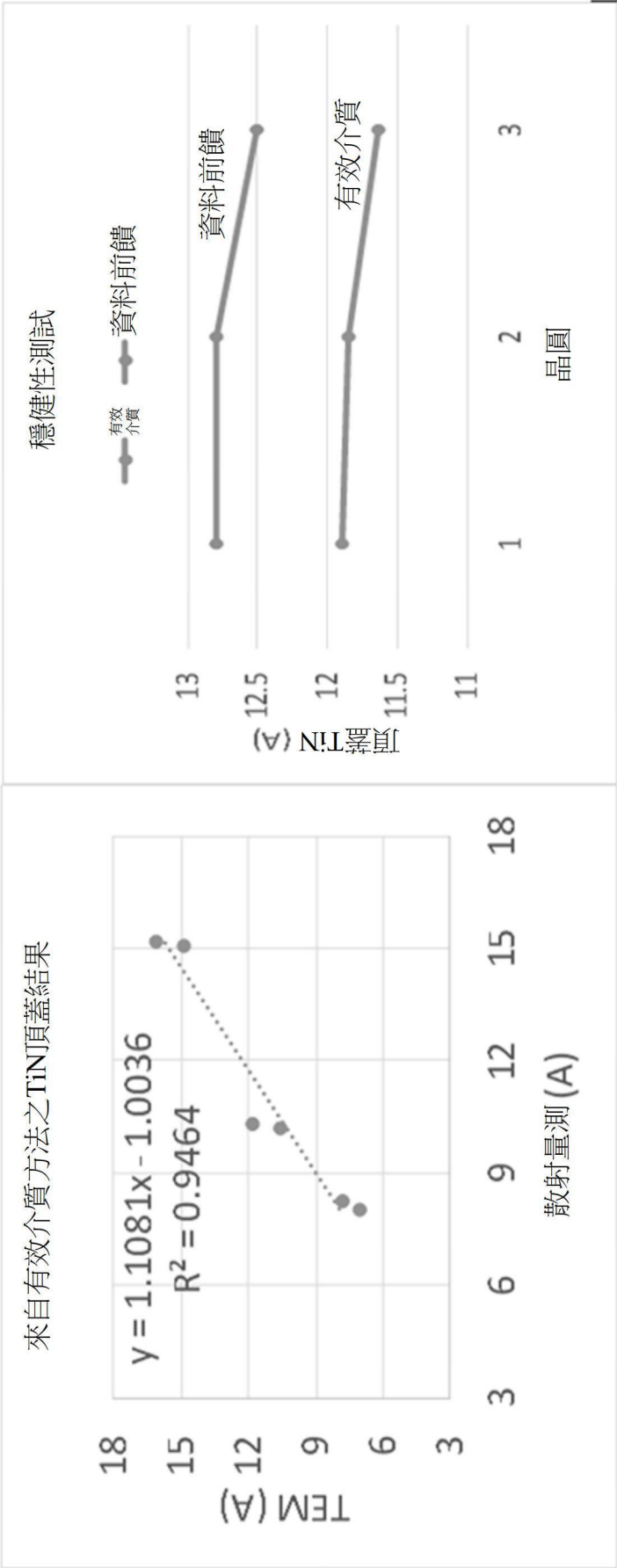
【圖10】



(a)



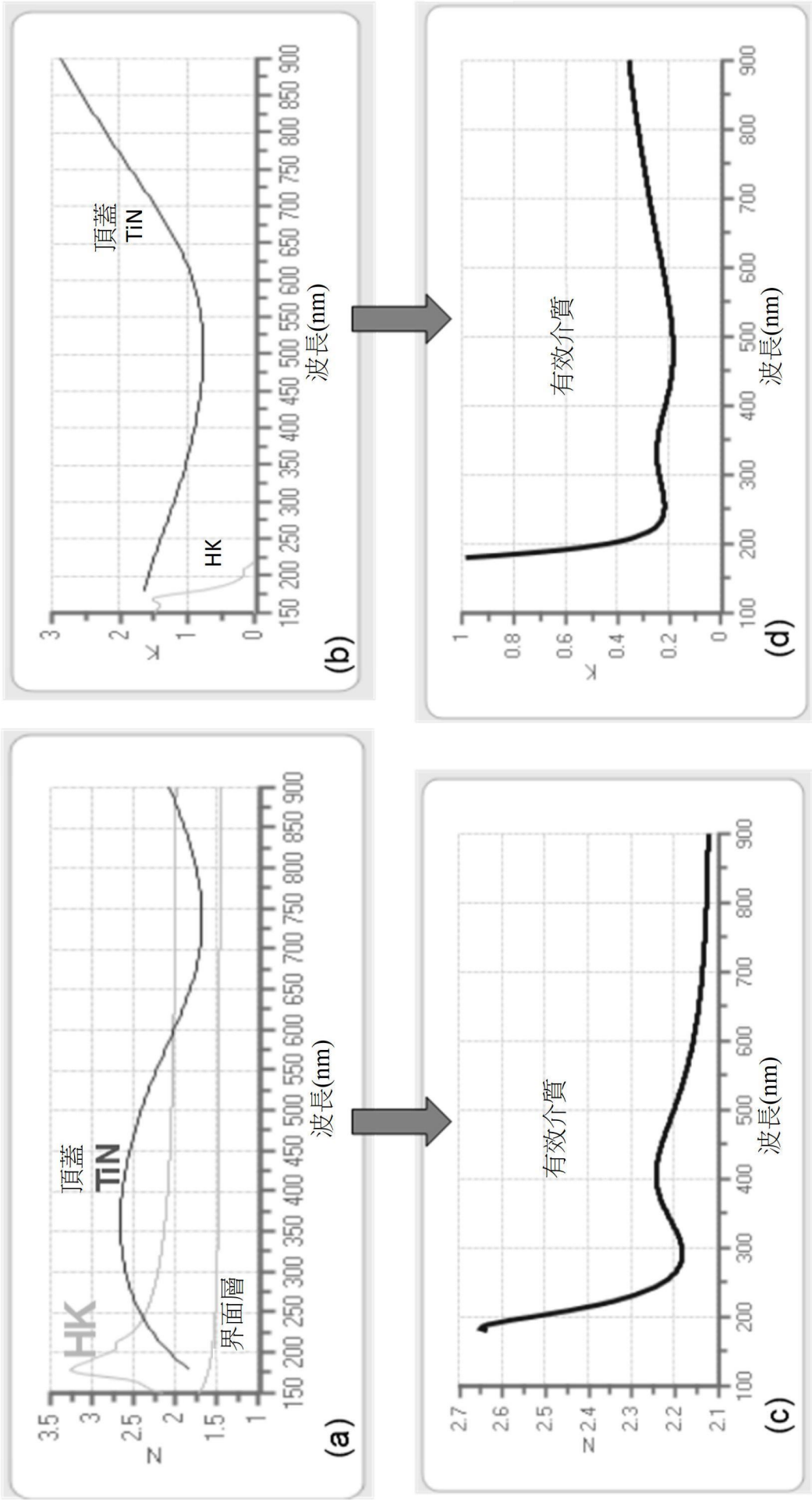
【圖11】



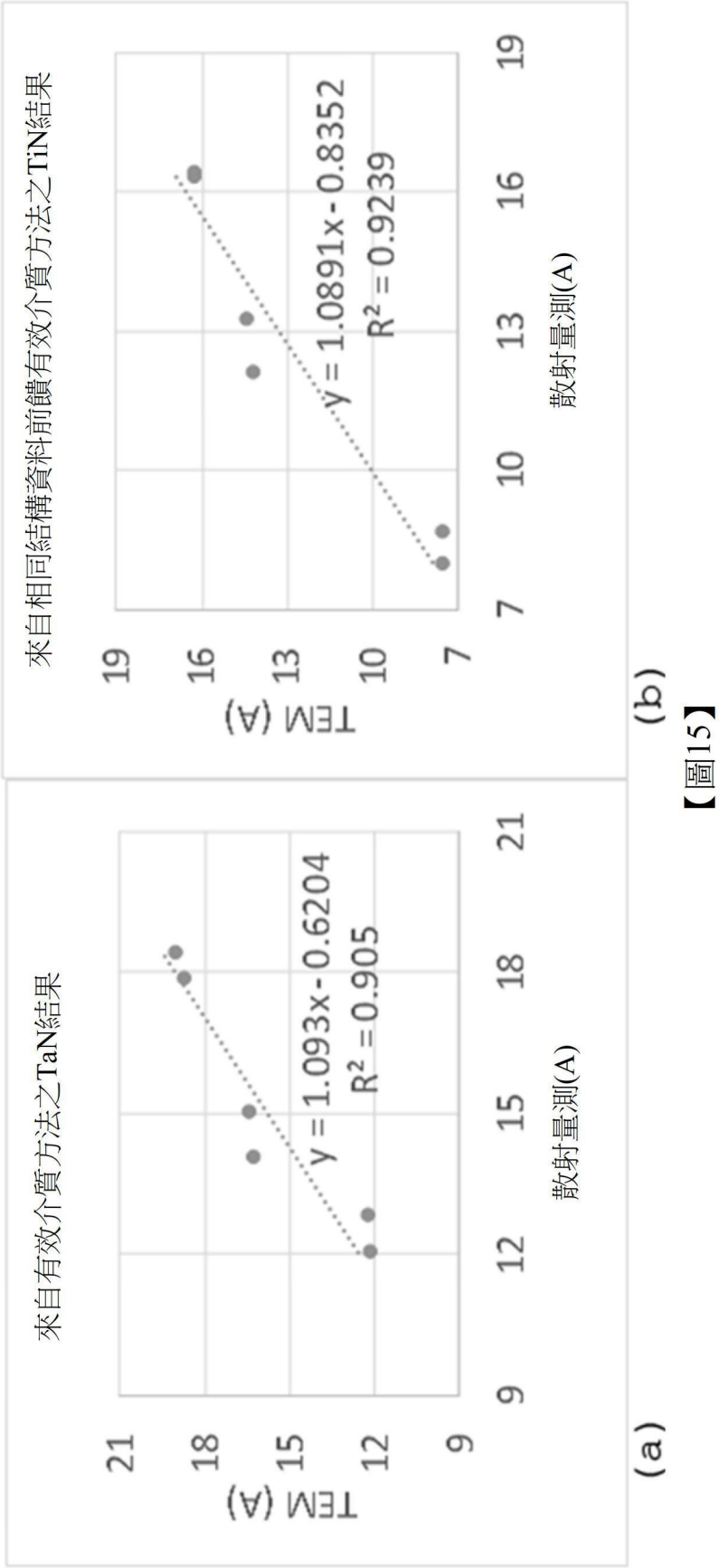
【圖12】

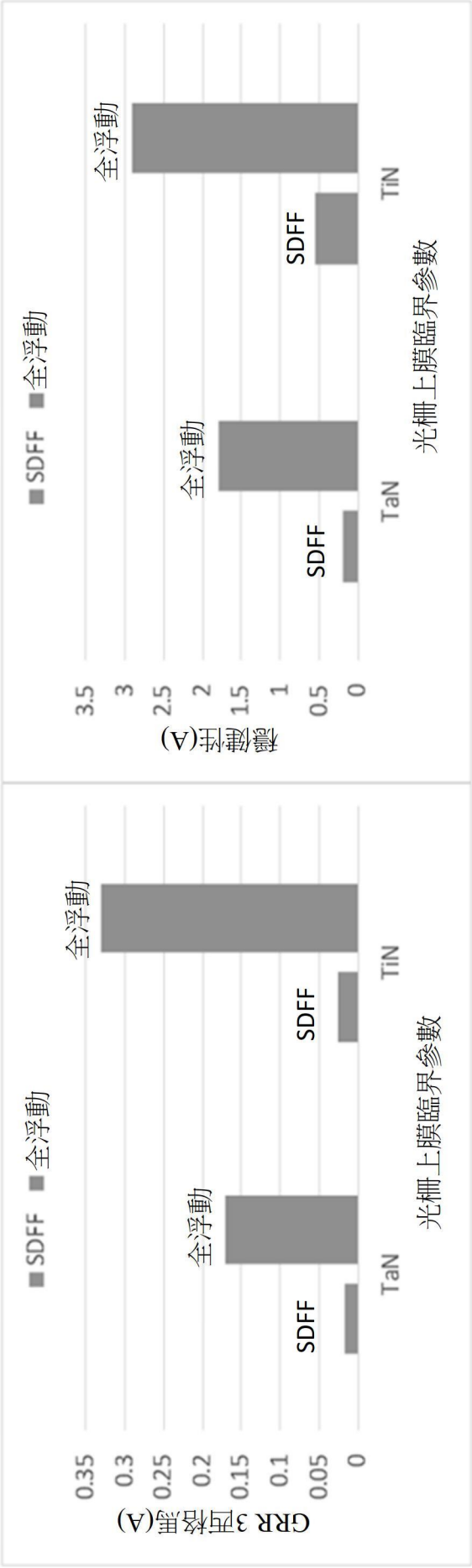


【圖13】

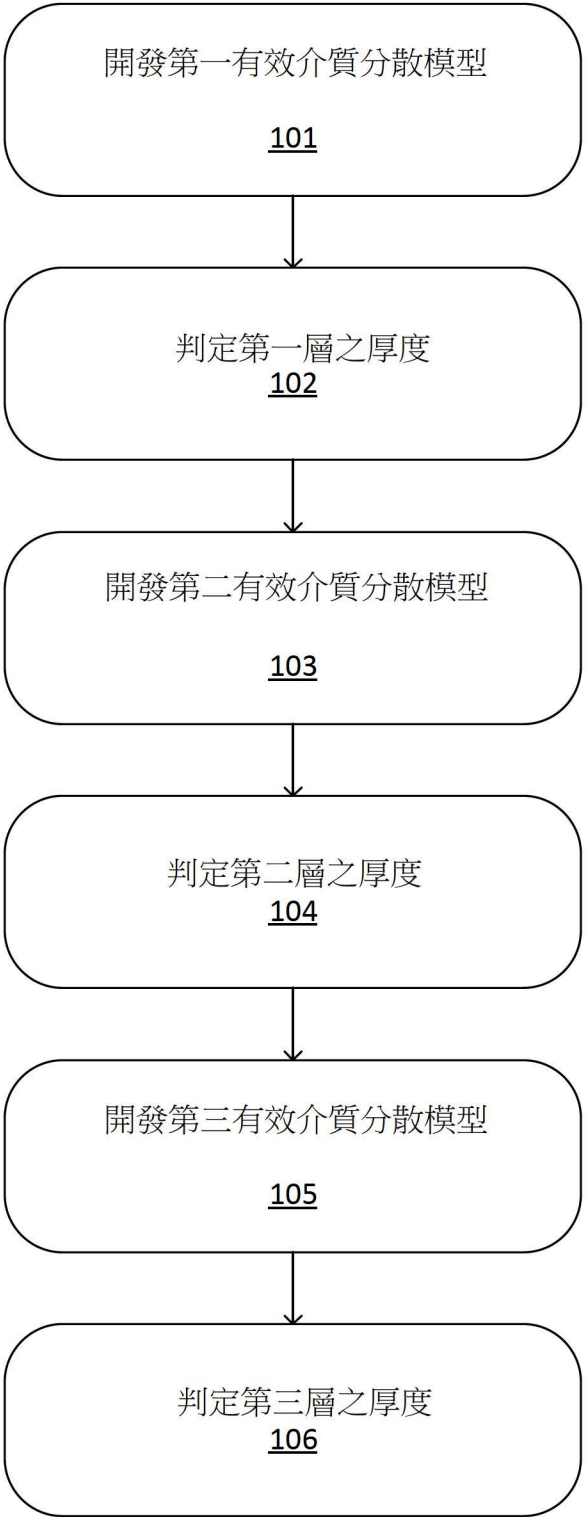


【圖14】

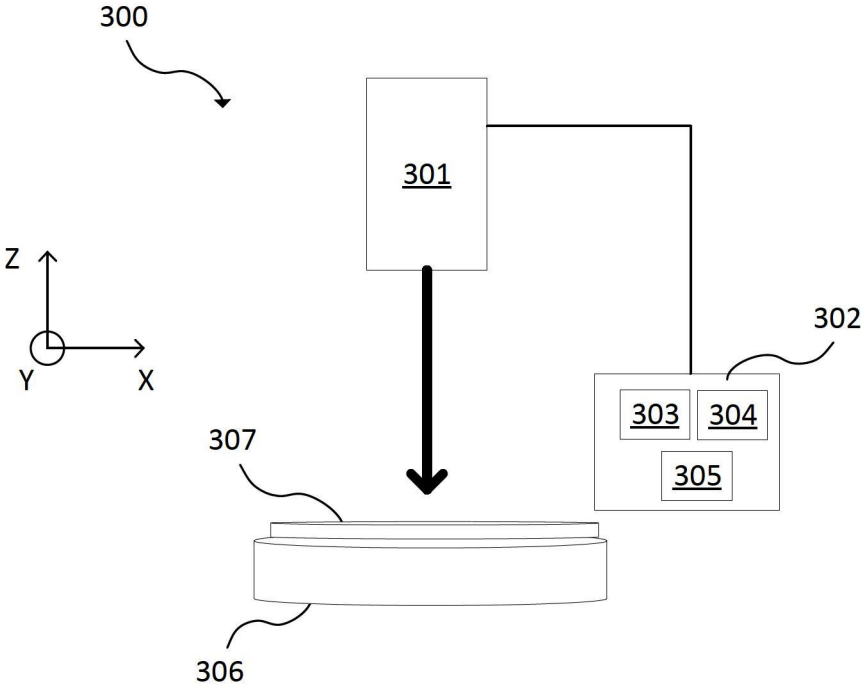




【圖16】



【圖17】



【圖18】