



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公開本

(11)公開編號：TW 202011110 A

(43)公開日：中華民國 109 (2020) 年 03 月 16 日

(21)申請案號：108131310

(22)申請日：中華民國 108 (2019) 年 08 月 30 日

(51)Int. Cl. : **G03F1/70 (2012.01)**

(30)優先權：2018/08/31 美國 62/725,271

2019/05/28 美國 16/423,190

(71)申請人：台灣積體電路製造股份有限公司 (中華民國) TAIWAN SEMICONDUCTOR
MANUFACTURING CO., LTD. (TW)

新竹市力行六路八號

(72)發明人：何 力鍵 HO, KENNETH LIK KIN (US)

(74)代理人：卓俊傑

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：1 項 圖式數：7 共 32 頁

(54)名稱

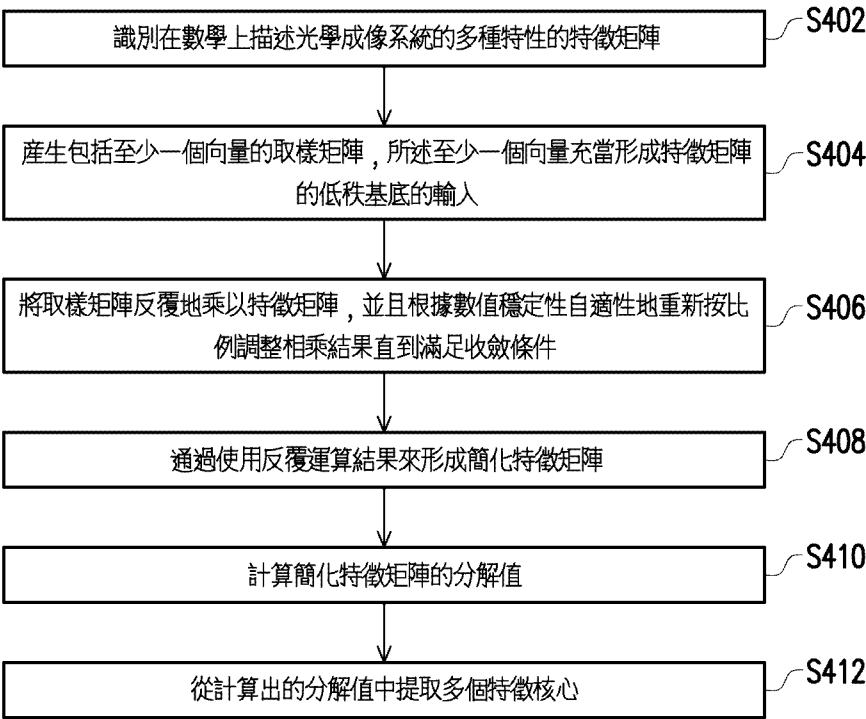
用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法

(57)摘要

一種用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法。在方法中，識別在數學上描述光學成像系統的多種特性的特徵矩陣。產生包括至少一個向量的取樣矩陣，至少一個向量充當形成特徵矩陣的低秩基底的輸入。將取樣矩陣反覆地乘以特徵矩陣，並且根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果直到滿足收斂條件。使用反覆運算結果來形成簡化特徵矩陣。計算簡化特徵矩陣的分解值，並且從計算出的分解值中提取多個特徵核心。

A method for computing feature kernels for optical model simulation is provided. In the method, a feature matrix mathematically describing a plurality of properties of an optical imaging system is identified. A sampling matrix comprising at least one vector serving as input to form a low-rank basis for the feature matrix is generated. The sampling matrix is iteratively multiplied by the feature matrix and a multiplication result is adaptively rescaled according to numerical stability until a convergence condition is met. The iteration results are used to form a reduced feature matrix. Decomposition values of the reduced feature matrix are computed and a plurality of feature kernels are extracted from the computed decomposition values.

指定代表圖：



符號簡單說明：
S402、S404、S406、
S408、S410、S412: 步驟

【圖4】



202011110

【發明摘要】**【中文發明名稱】**

用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法

【英文發明名稱】

METHOD FOR COMPUTING FEATURE KERNELS FOR OPTICAL
MODEL SIMULATION

【中文】一種用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法。在方法中，識別在數學上描述光學成像系統的多種特性的特徵矩陣。產生包括至少一個向量的取樣矩陣，至少一個向量充當形成特徵矩陣的低秩基底的輸入。將取樣矩陣反覆地乘以特徵矩陣，並且根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果直到滿足收斂條件。使用反覆運算結果來形成簡化特徵矩陣。計算簡化特徵矩陣的分解值，並且從計算出的分解值中提取多個特徵核心。

【英文】 A method for computing feature kernels for optical model simulation is provided. In the method, a feature matrix mathematically describing a plurality of properties of an optical imaging system is identified. A sampling matrix comprising at least one vector serving as input to form a low-rank basis for the feature matrix is generated. The sampling matrix is iteratively multiplied by the feature matrix and a multiplication result is adaptively rescaled according to numerical stability until a

convergence condition is met. The iteration results are used to form a reduced feature matrix. Decomposition values of the reduced feature matrix are computed and a plurality of feature kernels are extracted from the computed decomposition values.

【指定代表圖】圖4。

【代表圖之符號簡單說明】

S402、S404、S406、S408、S410、S412：步驟

【特徵化學式】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】

用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法

【英文發明名稱】

METHOD FOR COMPUTING FEATURE KERNELS FOR OPTICAL
MODEL SIMULATION

【技術領域】

【0001】 本發明的實施例是有關於一種計算特徵核心的方法，且特別是有關於一種用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法。

【先前技術】

【0002】 在現代半導體裝置的製造製程中，操縱各種材料和機器以產生最終產品。由於半導體裝置的複雜度增加和超小電晶體的顯影，因此製程變化對產品的性能具有更大影響。光刻是產生影響的重要因素中的一種，並且將光刻模擬應用於評估待在大批量生產之前製造的產品的性能。

【0003】 在光刻模擬中採用根據霍普金斯理論在數學上描述光學成像系統的特性的傳輸交叉係數（transmission cross-coefficient，TCC）矩陣，並且計算來自 TCC 矩陣的 TCC 核心對模擬是必要的。然而，用於計算 TCC 核心的標準方法在計算上極為昂貴，這可以使模擬減慢並增加遮罩製造製程的整體時間。

【發明內容】

【0004】 本發明實施例提供一種用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法，適用於具有儲存介質及處理器的電子設備，所述方法包括：通過所述處理器識別在數學上描述光學成像系統的多種特性的特徵矩陣，所述多種特性從所述光學成像系統中檢索並且儲存在所述儲存介質中；通過所述處理器產生包括至少一個向量的取樣矩陣，所述至少一個向量充當形成所述特徵矩陣的低秩基底的輸入；通過所述處理器將所述取樣矩陣反覆地乘以所述特徵矩陣，並且根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果直到滿足收斂條件；通過所述處理器使用反覆運算結果以形成簡化特徵矩陣；以及通過所述處理器計算所述簡化特徵矩陣的分解值，並且從所述計算出的分解值中提取多個特徵核心。

【圖式簡單說明】

【0005】 根據結合附圖閱讀的以下詳細描述最佳地理解本公開的各個方面。應注意，根據行業中的標準慣例，各種特徵並未按比例繪製。事實上，可出於論述清楚起見而任意地增大或縮減各種特徵的尺寸。

圖 1 是示出根據本公開的實施例的模型模擬製程的示意圖。

圖 2 是示出根據本公開的實施例的基於模型的遮罩製造製程的示意圖。

圖 3 示出根據本公開的實施例的用於計算光學模型模擬的特徵核心的電子設備的框圖。

圖 4 是示出根據本公開的實施例的用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法的流程圖。

圖 5A 是示出根據本公開的實施例的用於通過使用 EVD 演算法來計算光學模型模擬的特徵核心的方法的流程圖。

圖 5B 是示出根據本公開的實施例的通過使用 EVD 演算法來計算光學模型模擬的特徵核心的實例的示意圖。

圖 6A 是示出根據本公開的實施例的用於通過子空間反覆運算發現低秩基底的方法的流程圖。

圖 6B 是示出根據本公開的實施例的用於通過塊克雷洛夫方法（block Krylov method）發現低秩基底的方法的流程圖。

圖 7A 是示出根據本公開的實施例的用於通過使用 SVD 演算法來計算光學模型模擬的特徵核心的方法的流程圖。

圖 7B 是示出根據本公開的實施例的通過使用 SVD 演算法來計算光學模型模擬的特徵核心的實例的示意圖。

【實施方式】

【0006】 以下公開內容提供用於實施所提供的主題的不同特徵的許多不同實施例或實例。下文描述元件和佈置的具體實例來簡化本公開。當然，這些僅僅是實例而並不旨在作為限制。舉例來說，在以下描述中，在第二特徵上方或在第二特徵上形成第一特徵可

包含第一特徵與第二特徵直接接觸地形成的實施例，且也可包含在第一特徵與第二特徵之間可形成有額外特徵，使得第一特徵與第二特徵可不直接接觸的實施例。此外，本公開可在各種實施例中重複附圖標號和/或字母。此重複是為了簡單和清楚起見，且本身並不指示所論述的各種實施例和/或配置之間的關係。

【0007】 另外，為易於描述，本文中可能使用例如「在...下面 (beneath)」、「在...下方 (below)」、「下部 (lower)」、「在...上方 (above)」、「上部 (upper)」等空間相對術語來描述如圖中所示出的一個元件或特徵與另一（些）元件或特徵的關係。除圖中所描繪的定向之外，這些空間相對術語旨在涵蓋裝置在使用或操作中的不同定向。設備可以另外方式定向(旋轉 90 度或處於其它定向)，且本文中所使用的空間相對描述詞因此可相應地作出解釋。

【0008】 本發明實施例旨在顯著地加快傳輸交叉係數 (TCC) 核心的計算，這些傳輸交叉係數核心對現代光刻中的投影光學成像系統的高效建模極為重要。

【0009】 根據本發明的一些實施例，取樣矩陣由隨機矩陣、偽隨機矩陣或結構矩陣形成。將在數學上描述光學系統的特性的傳輸交叉係數 (TCC) 矩陣與取樣矩陣反覆地相乘，並且在滿足收斂條件之前自適性地重新按比例調整結果(或使結果正交化)。因此，根據反覆運算的最終結果或反覆運算的中間結果的累加來形成大致保留相關核心的低秩基底。使用低秩基底來計算較小大小的簡化 TCC 矩陣。

【0010】 利用簡化 TCC 矩陣，將塊演算法應用於計算特徵值分解（eigenvalue decomposition，EVD）或奇異值分解（singular value decomposition，SVD），從這些值分解中提取簡化 TCC 核心並將其擴展到全空間（full space）。重建的 TCC 核心應用於模型校準和遮罩校正/優化，以便獲得優化遮罩。

【0011】 通過所述方法，由於主要計算僅包含矩陣相乘，所述矩陣相乘通常包含 $O(N^2)$ 運算或甚至在特殊情況下僅包含 $O(N \log N)$ ，因此可以顯著降低計算複雜度並且可加快基於模型的遮罩製造的光刻模擬。

【0012】 圖 1 是示出根據本公開的實施例的模型模擬製程的示意圖。參看圖 1，將實施例的模型模擬實施為計算模擬影像，例如使用這些模擬影像來與從晶圓捕獲到的實際影像進行比較以驗證模擬模型是否適合。

【0013】 在步驟 S110 中，給出多個光學模型 11 和遮罩 12 作為模型模擬的輸出。每個光學模型是例如包括與投影光學成像系統中的光學器件相關聯的許多參數的數學模型，例如散焦、影像平面，光的波長或數值孔徑。遮罩是例如光刻中所使用的光刻光遮罩且在積體電路製造中用圖案層顯影。

【0014】 在步驟 S120 中，將每個光學模型應用於基於霍普金斯理論實施的模型模擬。霍普金斯理論使用傳輸交叉係數（TCC）來描述遮罩傳輸對光學影像的影響，通過對 TCC 乘以遮罩函數的乘積進行傅立葉轉換來形成所述光學影像。

【0015】 詳細地說，可以如下形式呈現標量光學器件(scalar optics) 的 TCC :

$$T(f, f') = \int P(f + f_s) S(f_s) P^*(f' + f_s) df_s ,$$

其中引數是 2D 空間頻率座標，即， $f = (f_x, f_y)$ 。P(f)是等於點擴散函數的傅立葉變換的光瞳函數。S(f)是源強度分佈。離散化 $T(f, f')$ 是 TCC 矩陣，在所述矩陣中，一個維度用於 f ，而另一個維度用於 f' 。

【0016】 也可以 $T = PP^* \in \mathbb{C}^{N \times N}$ ， $P \in \mathbb{C}^{M \times N}$ （由於 ≥ 0 ，將 $\sqrt{S(f)}$ 併入 P, P^* 中的每一個中）的形式編寫 TCC 矩陣 T ，其中 P 是僅取決於光學系統的特性（例如光瞳函數、源強度、相關因數、偏振）的「堆疊的移位光瞳矩陣」，且 P^* 是光瞳矩陣 P 的共軛轉置。在現代光刻模擬中， $M \cong 10^4$ 且 $N \cong 3000$ 。可以如下方式使用 TCC 矩陣 T 來計算空中影像 AI：

$$AI = \iint m(f) T(f, f') m^*(f') e^{2\pi i(f - f')} df df' ,$$

其中 $m(f)$ 是等於遮罩衍射運算元的遮罩傳輸函數。應注意，根據投影光學器件，由光遮罩上的圖案衍射的光進入光刻膠，並且在光刻膠上形成的光遮罩的影像被稱為空中影像。

【0017】 上文所描述的定義用於標量光學理論。類似公式適用於向量光學理論。也就是說，對於向量光學理論，P(f)變為矩陣（即，描述光偏振的多個分量），而 S(f)變為矩陣，以便捕獲每個源點的偏振。

【0018】 由此得出，TCC 矩陣 T 允許特徵分解 $T = V\Lambda V^*$ ，其中 V 與

列 \mathbf{v}_j 形成么正，且 $\mathbf{\Lambda}$ 與實際項 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq 0$ 形成對角。TCC 核心是經調整的特徵向量 $\boldsymbol{\varphi}_j = \sqrt{\lambda_j} \mathbf{v}_j$ 。通常，僅保留主要核心中的少量 $k \ll N$ ，所述主要核心隨後包括 T 直到秩 k 的最佳近似值。

【0019】 基於上文，在步驟 S121 中，產生多個 TCC 核心，並且在步驟 S122 中，應用所產生的 TCC 核心作為光學模型的一部分。

【0020】 在步驟 S121 中，本發明實施例的重點在於產生 TCC 核心。通過將 TCC 矩陣與低秩基底反覆地相乘，從而獲得簡化 TCC 矩陣並使用所述矩陣來計算分解值。最後，可以通過從計算出的分解值中提取簡化 TCC 核心並且將所述簡化 TCC 核心擴展到全空間來產生 TCC 核心。

【0021】 除了應用光學模型之外，在步驟 S130 中，還將抗蝕劑/晶圓模型應用於模型模擬，使得在步驟 S140 中產生模擬影像 13。使用模擬影像來與從晶圓捕獲到的實際影像進行比較，以便驗證模擬模型是否適合。

【0022】 因此，由於產生 TCC 核心的時間縮短，因此模型模擬製程可以運行得更快。

【0023】 圖 2 是示出根據本公開的實施例的基於模型的遮罩製造製程的示意圖。參看圖 2，遮罩製造製程基於如圖 1 中所說明的模型模擬。

【0024】 在圖 2 的上半部分中，示出用於晶圓光刻機和掃描器的投影光學器件的鑒定製程的模型校準方法，其中應用多個測試圖案 21 以製造光遮罩。通過光將測試圖案 21 從光遮罩轉移到形成

於襯底或晶圓上的光刻膠，在光刻膠中進行一系列化學處理以將圖案雕刻到光刻膠下方的材料中。然後從圖案化的襯底或晶圓中獲得多個測試測量 22。

【0025】 在步驟 S210 中，給出前述測試圖案 21 和測試測量 22 作為模型校準的輸入。在步驟 S220 中的模型校準製程中，應用如圖 1 中所示的模型模擬製程來模擬具有輸入測試圖案的光學模型（步驟 S221），並且針對測試測量 22 檢查從模型模擬獲得的模擬測量（即，模擬影像）以查看模型是否適合（步驟 S222）。

【0026】 如果測試測量 22 和模擬測量彼此相距較遠，那麼就意味著模型不穩健，並且製程返回到步驟 S221 以校正並改變模型並再次執行模擬。重複執行模型校準，直到測試測量 22 和模擬測量彼此接近為止，並且因此，在步驟 S230 中輸出校準模型 23。

【0027】 應注意，每當在步驟 S221 中改變光學模型時，光學器件的參數都會改變，並相應地再次執行模型模擬，這意味著需要計算新 TCC 核心，且因此計算是減慢模型校準製程的關鍵因素。

【0028】 在圖 2 的下半部分中，示出遮罩校正/優化製程，並且在步驟 S240 中，給出在先前模型校準製程中經過校準的模型 23、遮罩 24 和目標 25 作為步驟 S250 中的遮罩校正/優化製程中的多個模擬的輸入。在遮罩校正/優化製程中，模擬中的一個或組合包含但不限於：在步驟 S251 中執行光學鄰近校正（optical proximity correction，OPC）、逆光刻技術（inverse lithography technology，ILT）、基於模型的輔助特徵（model-based assist feature，MBAF）

和源-遮罩優化(source-mask optimization, SMO),並且在步驟 S252 中執行光刻製程檢查(lithography process check, LPC)以檢查在校正/優化之後製造的遮罩是否適合。

【0029】 在一些實施例中，在步驟 S252 中，如果通過使用給定遮罩 24 獲得的結果影像經檢查為與目標 25 (例如期望圖案)不匹配或類似，那麼再次執行步驟 S251 中的模擬以校正遮罩。另一方面，在步驟 S252 中，如果通過使用給定遮罩 24 獲得的結果影像經檢查為與目標 25 匹配或類似，那麼在步驟 S260 中輸出優化遮罩 26。

【0030】 應注意，儘管步驟 S251 中的一些模擬(例如 OPC/ILT)可以應用先前在步驟 S220 中產生的 TCC 核心，但是一些模擬可能需要新 TCC 核心。舉例來說，在一些實施例中，針對源-遮罩優化(SMO)的模擬，由於在模擬中優化光學器件，因此改變光學器件的參數並且期望計算新 TCC 核心。類似於步驟 S221 中的模擬，步驟 S251 中的新 TCC 核心的計算可減慢遮罩校正/優化製程並且導致遮罩製造製程的總時間增加。

【0031】 鑒於上述情況，本公開開發一種用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法，以加快 TCC 核心的計算，從而縮短模型模擬製程和遮罩製造製程的時間。

【0032】 詳細地說，圖 3 示出根據本公開的實施例的用於計算光學模型模擬的特徵核心的電子設備的框圖。參看圖 3，本發明實施例的電子設備 30 是例如個人電腦、伺服器、工作站或任何其它計算裝置，並且可包含資料檢索裝置 32、儲存介質 34 以及處理器

36，所述處理器耦合到資料檢索裝置 32 和儲存介質 34。

【0033】 在一些實施例中，電子設備 30 在外部連接到光學成像系統（未繪示）並且配置以檢索光學成像系統的多種特性並且掃描由對襯底或晶圓執行熱掃描的光學成像系統獲得的影像，以便執行光學模型模擬。

【0034】 在一些實施例中，資料檢索裝置 32 配置以連接光學成像系統並且檢索光學成像系統的特性。資料檢索裝置 32 是例如任何有線或無線介面，例如 USB、火線、雷電、通用非同步接收器/發射器（universal asynchronous receiver/transmitter，UART）、串列週邊介面匯流排（serial peripheral interface bus，SPI）、WiFi 或藍牙，但是本公開並不限於此。

【0035】 儲存介質 34 配置以儲存由資料檢索裝置 32 檢索到的特性。儲存介質 34 是例如隨機存取記憶體（random access memory，RAM）、唯讀記憶體（read-only memory，ROM）、快閃記憶體、硬碟、獨立磁碟容錯陣列（redundant array of independent disks，RAID）、其它類似儲存裝置或其組合，但本公開並不限於此。

【0036】 處理器 36 是例如中央處理單元（central processing unit，CPU）、其它可程式設計通用或專用微處理器、數位訊號處理器（digital signal processor，DSP）、可程式設計控制器、專用積體電路（application specific integrated circuit，ASIC）、可程式設計邏輯裝置（programmable logic device，PLD）、其它類似裝置或其組合，但本公開並不限於此。

【0037】 電子設備 30 配置以執行用於實施根據本公開的一些實施例的用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法的指令。具體來說，圖 4 是示出根據本公開的實施例的用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法的流程圖。本發明實施例的方法適用於圖 3 的電子設備 30，並且下文參看圖 3 的電子設備 30 中的各種元件描述所述方法的詳細步驟。

【0038】 參看圖 4，在步驟 S402 中，處理器 36 識別在數學上描述光學成像系統的多種特性的特徵矩陣。特徵矩陣是例如在數學上描述光學系統的特性的 TCC 矩陣，例如光瞳函數、源強度、相干因數或偏振，但本公開並不限於此。

【0039】 在步驟 S404 中，處理器 36 產生包括至少一個向量的取樣矩陣，所述至少一個向量充當形成特徵矩陣的低秩基底的輸入。取樣矩陣包括例如隨機矩陣、偽隨機矩陣或結構矩陣。在一些實施例中，當產生取樣矩陣時，處理器 36 可執行過取樣（例如將秩 k 放大到 $k + O(1)$ ）以便改善隨機取樣誤差。在一些實施例中，同時對向量組（即，矩陣）起作用以利用電腦硬體快取記憶體效率，但在一些實施例中，還可以匯出每次單個向量變型（single-vector-at-a-time variant），這可以使計算結果更準確。

【0040】 在步驟 S406 中，處理器 36 將取樣矩陣反覆地乘以特徵矩陣，並且根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果直到滿足收斂條件。重複應用相乘以改善頻譜近似誤差。

【0041】 在一些實施例中，在不直接計算全特徵矩陣的情況下，

通過利用特性的子集來執行與特徵矩陣的相乘。舉例來說，通過執行與 TCC 矩陣 T 的相乘為 $T\mathbf{x} = P(P^*\mathbf{x})$ ，計算可繞過 T 的構建(包含 $O(N^3)$ 個運算元)並且至多包含 $O(N^2)$ 個運算元，這給出演算法的總 $O(N^2)$ 成本。還可以利用其它結構(例如低秩、稀疏或張量)，並且本公開並不限於此。

【0042】 在一些實施例中，當將多個源點鋪設在共形均勻網格上時，通過使用快速傅立葉變換(fast Fourier transform, FFT)計算根據特性的光瞳矩陣與所述光瞳矩陣的共軛轉置的卷積來執行與特徵矩陣的相乘。光瞳矩陣的卷積結構允許使用 FFT 在 $O(N \log N)$ 時間內相乘，並給出演算法的總 $O(N \log N)$ 。

【0043】 在一些實施例中，當將任意分佈的多個源點重新取樣到均勻網格中時，通過使用 FFT 計算根據特性的光瞳矩陣與所述光瞳矩陣的共軛轉置的卷積來執行與特徵矩陣的相乘。可將源點重新取樣到具有可控空中影像誤差的均勻網格上，並且如上文所描述的一樣給出演算法的總 $O(N \log N)$ 。

【0044】 在一些實施例中，當任意分佈的多個源點不在均勻網格上時，通過使用非均勻 FFT 計算根據特性的光瞳矩陣與所述光瞳矩陣的共軛轉置的卷積來執行與特徵矩陣的相乘。即使對於任意分佈的源點，也可通過使用非均勻 FFT 來實現演算法的總 $O(N \log N)$ 。

【0045】 在一些實施例中，除了明確考慮到具有提供快於 $O(N^3)$ 相乘的結構 $T = PP^*$ 的 TCC 矩陣之外，也可以應用具有更一般結構

（例如對於對角不定（即，可為負的）矩陣 D 的 $T = PDP^*$ ）的 TCC 矩陣。

【0046】 在步驟 S408 中，處理器 36 使用反覆運算結果來形成簡化特徵矩陣。

【0047】 在一些實施例中，通過子空間反覆運算獲得簡化特徵矩陣，使用所述矩陣來計算近似於主要特徵空間的低秩基底。收斂可與執行固定數量的反覆運算相關或與監測子空間相似性的一些度量相關。也就是說，在一些實施例中，當反覆運算次數達到預定次數時確定滿足收斂條件，而在一些實施例中，當監測自我調整誤差度量時確定滿足收斂條件，但本公開並不限於此。因此，通過使用反覆運算的最終結果來形成簡化特徵矩陣。

【0048】 在一些實施例中，通過塊克雷洛夫方法獲得簡化特徵矩陣，在所述簡化特徵矩陣中，中間結果以與傳統蘭索斯（Lanczos）方法類似的方式更好地用於構建可能比子空間反覆運算更大的基底。也就是說，通過初始化空基底並將每次反覆運算的中間結果累加到所述空基底來形成簡化特徵矩陣。與子空間反覆運算相比，近似誤差嚴格來說並不太差，但代價是簡化特徵矩陣可能更大，且計算分解值的成本可能更高。

【0049】 在步驟 S410 中，處理器 36 計算簡化特徵矩陣的分解值，並且在步驟 S412 中，處理器 36 從計算出的分解值中提取多個特徵核心。在一些實施例中，通過使用塊演算法（例如特徵值分解（EVD）演算法或奇異值分解（SVD）演算法）來計算簡化特徵

矩陣的分解值，這些分解值分別在下文詳細說明。

【0050】 圖 5A 是示出根據本公開的實施例的用於通過使用 EVD 演算法計算光學模型模擬的特徵核心的方法的流程圖。圖 5B 是示出根據本公開的實施例的通過使用 EVD 演算法計算光學模型模擬的特徵核心的實例的示意圖。本發明實施例的方法適用於圖 3 的電子設備 30，並且下文參看圖 3 的電子設備 30 中的各種元件描述所述方法的詳細步驟。

【0051】 參看圖 5A 和圖 5B 兩者，在步驟 S502 中，處理器 36 獲得光學系統的光瞳矩陣，以便計算在數學上描述光學系統的特性的 TCC 矩陣 T 。

【0052】 在步驟 S504 中，借用來自亂數值線性代數的技術，處理器 36 發現大致保留相關核心的大小為 $O(k)$ 的低秩基底 Q 。

【0053】 在步驟 S506 中，處理器 36 將低秩基底 Q 乘以 TCC 矩陣 T 以形成簡化的 TCC 矩陣 \tilde{T} ，在所述矩陣中，將低秩基底 Q 的共軛轉置矩陣 Q^* 乘以 TCC 矩陣 T 和低秩基底 Q ，以便將 TCC 矩陣 T 壓縮成簡化 TCC 矩陣 \tilde{T} 。

【0054】 在步驟 S508 中，處理器 36 根據簡化 TCC 矩陣 \tilde{T} 計算簡化 EVD。

【0055】 在步驟 S510 中，處理器 36 從計算出的簡化 EVD 中提取核心。在一些實施例中，處理器 36 從計算出的簡化 EVD 中提取簡化 TCC 核心（即， $\tilde{V}\sqrt{\tilde{\Lambda}}$ ），然後通過將低秩基底 Q 與簡化 TCC 核心相乘來將所提取的簡化 TCC 核心擴展到全空間，以便恢復

TCC 核心 (即, $q\tilde{v}\sqrt{\tilde{\lambda}}$)。

【0056】 根據本發明實施例, 發現低秩基底, 並且使用所述低秩基底將 TCC 矩陣壓縮成小簡化矩陣(例如大小為 k 階乘 k 階的 TCC 矩陣, 其中 k 是相關核心的數量)。在較小壓縮空間中執行計算, 並且將結果擴展回原始空間。因此, 可顯著降低計算複雜度, 並且可加快 TCC 核心的產生。

【0057】 在一些實施例中, 可通過如上文所引入的子空間反覆運算或塊克雷洛夫方法來執行用於發現低秩基底的方法。

【0058】 詳細地說, 圖 6A 是示出根據本公開的實施例的用於通過子空間反覆運算發現低秩基底的方法的流程圖。圖 6B 是示出根據本公開的實施例的用於通過塊克雷洛夫方法發現低秩基底的方法的流程圖。本發明實施例的方法適用於圖 3 的電子設備 30。

【0059】 參看圖 6A, 在步驟 S602 中, 處理器 36 產生過取樣隨機矩陣。在一些實施例中, 處理器 36 可通過對隨機矩陣、偽隨機矩陣或結構矩陣進行過取樣來產生過取樣隨機矩陣。

【0060】 在步驟 S604 中, 處理器 36 將所產生的隨機矩陣乘以 TCC 矩陣, 並且在步驟 S606 中, 根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果。重新按比例調整被稱為例如格萊姆-施密特正交化 (Gram-Schmidt orthogonalization), 其主要用於數值穩定性, 但本公開並不限於此。

【0061】 在步驟 S608 中, 處理器 36 確定反覆運算是否完成。在一些實施例中, 可基於設定反覆運算次數或一些自我調整誤差度

量來使終止（即，收斂）固定。

【0062】 如果不滿足收斂條件，那麼處理器 36 返回到步驟 S604 以將所產生的隨機矩陣反覆地乘以 TCC 矩陣，並且再次重新按比例調整相乘結果直到滿足收斂條件。一旦滿足收斂條件，則處理器 36 繼續進行到步驟 S610 以使重新按比例調整的相乘結果正交化並最終輸出正交化的結果作為低秩基底。

【0063】 參看圖 6B，在步驟 S612 中，處理器 36 初始化空基底，且隨後在步驟 S614 中產生過取樣隨機矩陣。在一些實施例中，處理器 36 可通過對隨機矩陣、偽隨機矩陣或結構矩陣進行過取樣來產生過取樣隨機矩陣。

【0064】 在步驟 S616 中，處理器 36 將所產生的隨機矩陣乘以 TCC 矩陣，並且在步驟 S618 中，根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果，並將重新按比例調整的相乘結果與在步驟 S612 中進行初始化的空基底相加。重新按比例調整被稱為例如格萊姆-施密特正交化，其主要用於數值穩定性，但本公開並不限於此。

【0065】 在步驟 S620 中，處理器 36 確定反覆運算是否完成。在一些實施例中，可基於設定反覆運算次數或一些自我調整誤差度量來使終止（即，收斂）固定。

【0066】 如果不滿足收斂條件，那麼處理器 36 返回到步驟 S616 以將所產生的隨機矩陣反覆地乘以 TCC 矩陣，重新按比例調整相乘結果並且將重新按比例調整的相乘與累加基底相加直到滿足收斂條件。一旦滿足收斂條件，則處理器 36 繼續進行到步驟 S622

以使累加基底正交化並最終輸出正交化的基底作為低秩基底。

【0067】 與子空間反覆運算相比，對於塊克雷洛夫方法，累加中間結果以構建可能比子空間反覆運算更大的基底。因此，近似誤差嚴格來說並不太差，但用於計算 EVD 的成本可能更昂貴，這是由於所產生的基底更大。

【0068】 在圖 5A 到圖 6B 中所說明的前述方法中，使用 EVD 演算法計算特徵核心。然而，在一些實施例中，可使用 SVD 演算法來計算特徵核心。下文給出實施例以進行進一步說明。

【0069】 圖 7A 是示出根據本公開的實施例的用於通過使用 SVD 演算法計算光學模型模擬的特徵核心的方法的流程圖。圖 7B 是示出根據本公開的實施例的通過使用 SVD 演算法計算光學模型模擬的特徵核心的實施例的示意圖。本發明實施例的方法適用於圖 3 的電子設備 30，並且下文參看圖 3 的電子設備 30 中的各種元件描述所述方法的詳細步驟。

【0070】 參看圖 7A 和圖 7B 兩者，在步驟 S702 中，處理器 36 獲得光學系統的光瞳矩陣 P 。

【0071】 在步驟 S704 中，借用來自亂數值線性代數的技術，處理器 36 發現大致保留相關核心的大小為 $O(k)$ 的低秩基底 Q 。

【0072】 在步驟 S706 中，處理器 36 將低秩基底 Q 的共軛轉置矩陣 Q^* 乘以光瞳矩陣 P 以形成簡化光瞳矩陣 \tilde{P} ，以便將光瞳矩陣 P 壓縮成簡化光瞳矩陣 \tilde{P} 。

【0073】 在步驟 S708 中，處理器 36 根據簡化光瞳矩陣 \tilde{P} 計算簡化

SVD。對於具有特徵分解 $\tilde{T} = \tilde{V}\Lambda\tilde{V}$ 的簡化 TCC 矩陣，對於某個么正矩陣 \tilde{W} ，對應的簡化光瞳矩陣 SVD 是 $\tilde{P} = \tilde{V}\sqrt{\tilde{\Lambda}}\tilde{W}$ 。

【0074】 在步驟 S710 中，處理器 36 從計算出的簡化 SVD 中提取核心。在一些實施例中，處理器 36 從計算出的簡化 SVD 中提取簡化 TCC 核心（即， $\tilde{V}\sqrt{\tilde{\Lambda}}$ ），然後通過將低秩基底 Q 與簡化 TCC 核心相乘來將所提取的簡化 TCC 核心擴展到全空間，以便恢復 TCC 核心（即， $Q\tilde{V}\sqrt{\tilde{\Lambda}}$ ）。

【0075】 在一些實施例中，可通過如上文所引入的子空間反覆運算或塊克雷洛夫方法來執行用於發現低秩基底的方法。

【0076】 具體地說，在一些實施例中，可通過子空間反覆運算獲得簡化特徵矩陣，使用所述矩陣來計算近似於主要特徵空間的低秩基底。收斂可以與執行固定數量的反覆運算相關或與監測子空間相似性的一些度量相關。因此，可通過將所產生的隨機矩陣反覆地乘以 TCC 矩陣（即，通過光瞳矩陣和其共軛轉置），重新按比例調整相乘結果並使重新按比例調整的相乘結果正交化來發現低秩基底。

【0077】 在一些實施例中，可通過塊克雷洛夫方法獲得簡化特徵矩陣，在所述簡化特徵矩陣中，中間結果更好地用於構建可能比子空間反覆運算更大的基底。因此，可通過初始化空基底、將每次反覆運算的中間結果累加到所述空基底並使累加基底正交化來發現低秩基底。

【0078】 在本發明實施例的光瞳矩陣 P 的快速低秩 SVD 演算法中，

由於光瞳矩陣 P 的頻譜衰減僅是 TCC 矩陣 T 的頻譜衰減的二分之一，取決於頻譜衰減的誤差可較大。

【0079】 在上述實施例中，分別引入基於快速 EVD 的演算法和基於快速 SVD 的演算法以提取 TCC 核心，但在一些實施例中，相同構想還可用以產生優於傳統分解的各種快速低秩因式分解，從而產生具有例如簡化記憶體複雜度的「非典型」TCC 核心。

【0080】 在一些實施例中，提供一種包括處理器可執行指令的非暫態電腦可讀記錄介質，所述處理器可執行指令在經執行時執行如以上實施例中所說明的用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法。在一些實施例中，非暫態電腦可讀記錄介質是其上編碼有電腦可讀數據的 CD-R、DVD-R、快閃驅動器或硬碟驅動器的碟片等。電腦可讀資料（例如包括多個零和一的二進位資料）又包括配置以根據本文中所闡述得原理中的一或多種操作的電腦指令集。在一些實施例中，例如，處理器可執行電腦指令配置以執行用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法，例如圖 4 中說明的例示性方法中的至少一些。本領域普通技術人員可設計經配置以根據本文中所提出的技術操作的許多此類電腦可讀記錄介質。

【0081】 根據一些實施例，提供一種適用於具有儲存介質和處理器的電子設備的用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法。在所述方法中，通過處理器識別在數學上描述光學成像系統的多種特性的特徵矩陣，所述多種特性從光學成像系統中檢索並且儲存在儲存介質中。通過處理器產生包括至少一個向量的取樣矩陣，所

述至少一個向量充當形成特徵矩陣的低秩基底的輸入。由處理器將取樣矩陣反覆地乘以特徵矩陣，並且根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果直到滿足收斂條件。由處理器使用反覆運算結果來形成簡化特徵矩陣。通過處理器計算簡化特徵矩陣的分解值，並且從計算出的分解值中提取多個特徵核心。

【0082】 在相關實施例中，所述簡化特徵矩陣由所述反覆運算的最終結果形成。

【0083】 在相關實施例中，通過初始化空基底並且將每次反覆運算的中間結果累加到所述空基底來形成所述簡化特徵矩陣。

【0084】 在相關實施例中，所述取樣矩陣包括隨機矩陣、偽隨機矩陣或結構矩陣，且產生所述取樣矩陣的步驟還包括：執行過取樣以改進隨機取樣誤差。

【0085】 在相關實施例中，所述收斂條件在反覆運算次數達到預定次數或自我調整誤差度量受監測時得以滿足。

【0086】 在相關實施例中，在不直接計算全特徵矩陣的情況下，通過利用所述特性的子集來執行與所述特徵矩陣的相乘。

【0087】 在相關實施例中，當將多個源點鋪設在共形均勻網格上時，通過使用快速傅立葉變換（FFT）計算根據所述特性的光瞳矩陣與所述光瞳矩陣的共軛轉置的卷積來執行與所述特徵矩陣的相乘。

【0088】 在相關實施例中，當將任意分佈的多個源點重新取樣到均勻網格上時，通過使用快速傅立葉變換計算根據所述特性的光

瞳矩陣與所述光瞳矩陣的共軛轉置的卷積來執行與所述特徵矩陣的相乘。

【0089】 在相關實施例中，當任意分佈的多個源點不在均勻網格上時，通過使用不均勻快速傅立葉變換計算根據所述特性的光瞳矩陣與所述光瞳矩陣的共軛轉置的卷積來執行與所述特徵矩陣的相乘。

【0090】 在相關實施例中，所述計算所述簡化特徵矩陣的分解值的步驟包括：通過使用塊演算法來計算所述簡化特徵矩陣的所述分解值，所述塊演算法包括特徵值分解（EVD）演算法或奇異值分解（SVD）演算法。

【0091】 根據一些實施例，用於計算光學模型模擬的特徵核心的設備包含資料檢索裝置、儲存介質以及處理器。資料檢索裝置配置以檢索光學成像系統的多種特性。儲存介質配置以儲存由資料檢索裝置檢索到的特性。處理器耦合到資料檢索裝置和儲存介質，並且配置以執行用以進行以下步驟的指令：識別在數學上描述光學成像系統的多種特性的特徵矩陣；產生包括至少一個向量的取樣矩陣，所述至少一個向量充當形成特徵矩陣的低秩基底的輸入；將取樣矩陣反覆地乘以特徵矩陣，並且根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果直到滿足收斂條件；使用反覆運算結果以形成簡化特徵矩陣；以及計算簡化特徵矩陣的分解值，並且從計算出的分解值中提取多個特徵核心。

【0092】 在相關實施例中，所述簡化特徵矩陣由所述反覆運算的

最終結果形成。

【0093】 在相關實施例中，通過初始化空基底並且將每次反覆運算的中間結果累加到所述空基底來形成所述簡化特徵矩陣。

【0094】 在相關實施例中，所述取樣矩陣包括隨機矩陣、偽隨機矩陣或結構矩陣，且所述處理器還執行過取樣以改進隨機取樣誤差。

【0095】 在相關實施例中，所述收斂條件在反覆運算次數達到預定次數或自我調整誤差度量受監測時得以滿足。

【0096】 在相關實施例中，在不直接計算全特徵矩陣的情況下，通過所述處理器利用所述特性的子集來執行與所述特徵矩陣的相乘。

【0097】 在相關實施例中，當將多個源點鋪設在共形均勻網格上時，通過所述處理器使用快速傅立葉變換計算根據所述特性的光瞳矩陣與所述光瞳矩陣的共軛轉置的卷積來執行與所述特徵矩陣的相乘。

【0098】 在相關實施例中，當將任意分佈的多個源點重新取樣到共形均勻網格上時，通過所述處理器使用快速傅立葉變換計算根據所述特性的光瞳矩陣與所述光瞳矩陣的共軛轉置的卷積來執行與所述特徵矩陣的相乘。

【0099】 在相關實施例中，當任意分佈的多個源點不在均勻網格上時，通過所述處理器使用不均勻快速傅立葉變換計算根據所述特性的光瞳矩陣與所述光瞳矩陣的共軛轉置的卷積來執行與所述

特徵矩陣的相乘。

【0100】根據一些實施例，一種非暫態電腦可讀記錄介質包含處理器可執行指令，所述處理器可執行指令在經執行時執行用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法。在方法中，識別在數學上描述光學成像系統的多種特性的特徵矩陣。產生包括至少一個向量的取樣矩陣，所述至少一個向量充當形成特徵矩陣的低秩基底的輸入。將取樣矩陣反覆地乘以特徵矩陣，並且根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果直到滿足收斂條件。使用反覆運算結果來形成簡化特徵矩陣。計算簡化特徵矩陣的分解值，並且從計算出的分解值中提取多個特徵核心。

【0101】前文概述若干實施例的特徵以使本領域的技術人員可更好地理解本公開的各方面。本領域的技術人員應瞭解，其可以易於使用本公開作為設計或修改用於進行本文中所介紹的實施例的相同目的和/或獲得相同優勢的其它方法和結構的基礎。本領域的技術人員還應認識到，此類等效構造並不脫離本公開的精神和範圍，且本領域的技術人員可在不脫離本公開的精神和範圍的情況下在本文中進行各種改變、替代以及更改。

【符號說明】

【0102】

11：光學模型

12、24：遮罩

13：模擬影像

21：測試圖案

22：測試測量

23：校準模型

25：目標

26：優化遮罩

30：電子設備

32：資料檢索裝置

34：儲存介質

36：處理器

S110、S120、S121、S122、S130、S140、S210、S220、S221、
S222、S230、S240、S250、S251、S252、S260、S402、S404、S406、
S408、S410、S412、S502、S504、S506、S508、S510、S602、S604、
S606、S608、S610、S612、S614、S616、S618、S620、S622、S702、
S704、S706、S708、S710：步驟

【發明申請專利範圍】

【第1項】 一種用於計算光學模型模擬的特徵核心的方法，適用於具有儲存介質及處理器的電子設備，所述方法包括：

通過所述處理器識別在數學上描述光學成像系統的多種特性的特徵矩陣，所述多種特性從所述光學成像系統中檢索並且儲存在所述儲存介質中；

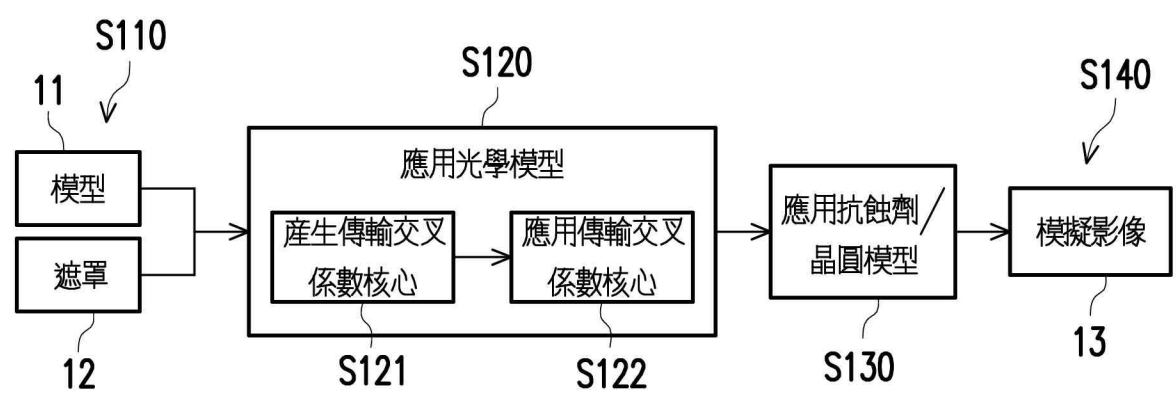
通過所述處理器產生包括至少一個向量的取樣矩陣，所述至少一個向量充當形成所述特徵矩陣的低秩基底的輸入；

通過所述處理器將所述取樣矩陣反覆地乘以所述特徵矩陣，並且根據數值穩定性自適性地重新按比例調整相乘結果直到滿足收斂條件；

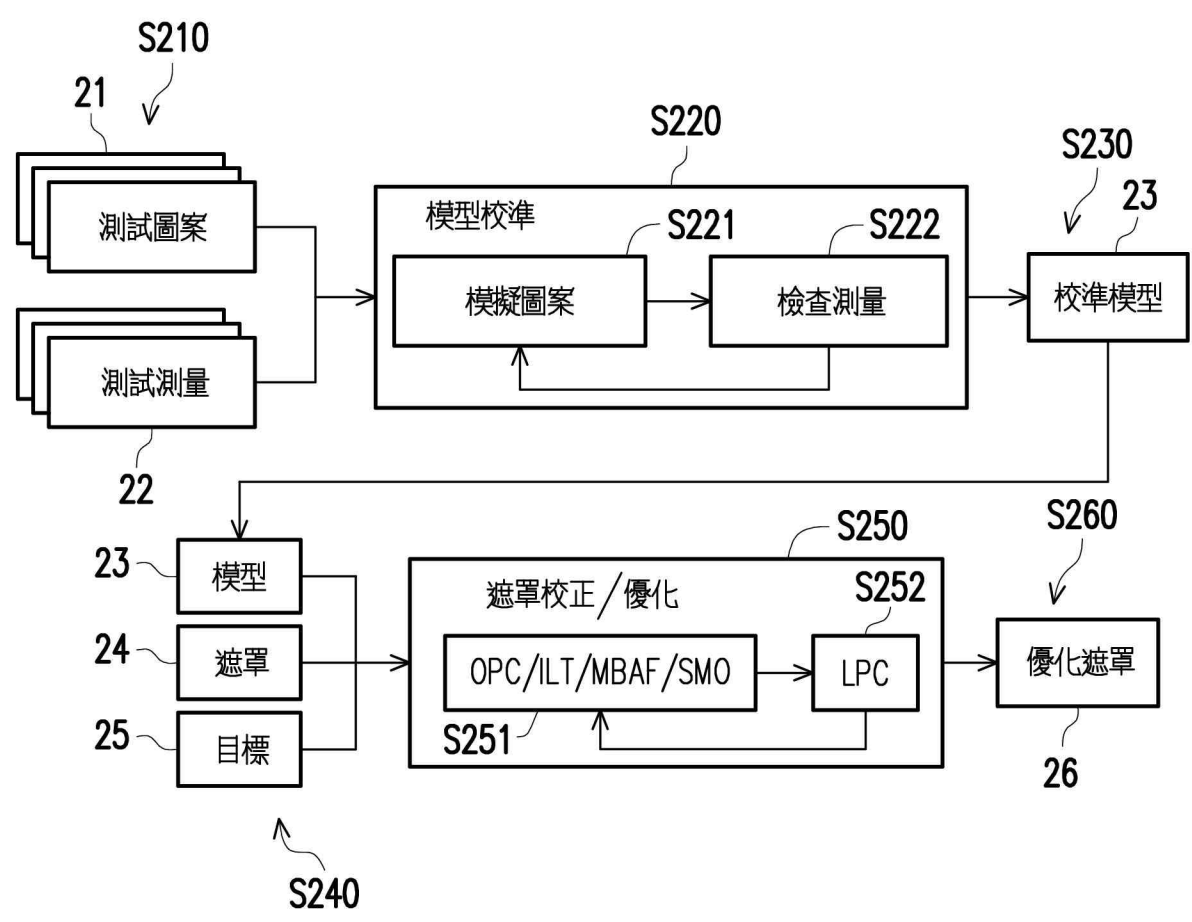
通過所述處理器使用反覆運算結果以形成簡化特徵矩陣；以及

通過所述處理器計算所述簡化特徵矩陣的分解值，並且從所述計算出的分解值中提取多個特徵核心。

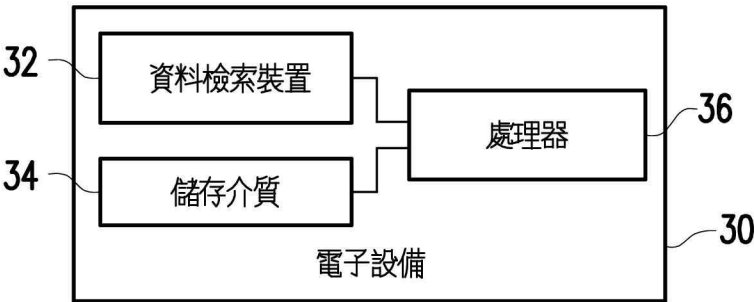
【發明圖式】



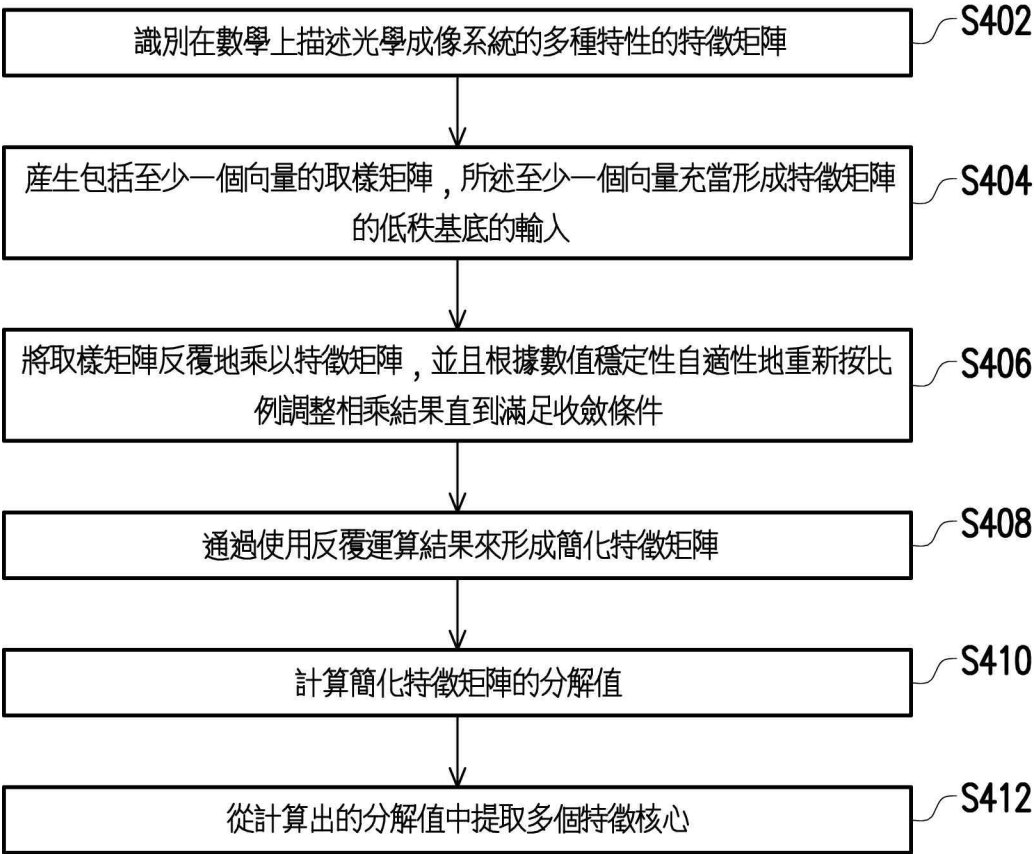
【圖1】



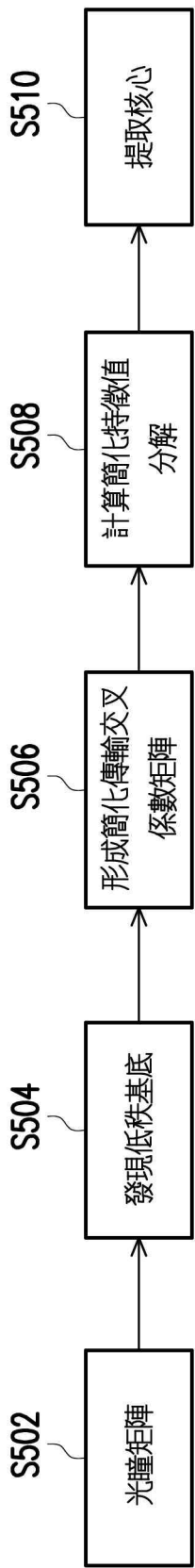
【圖2】



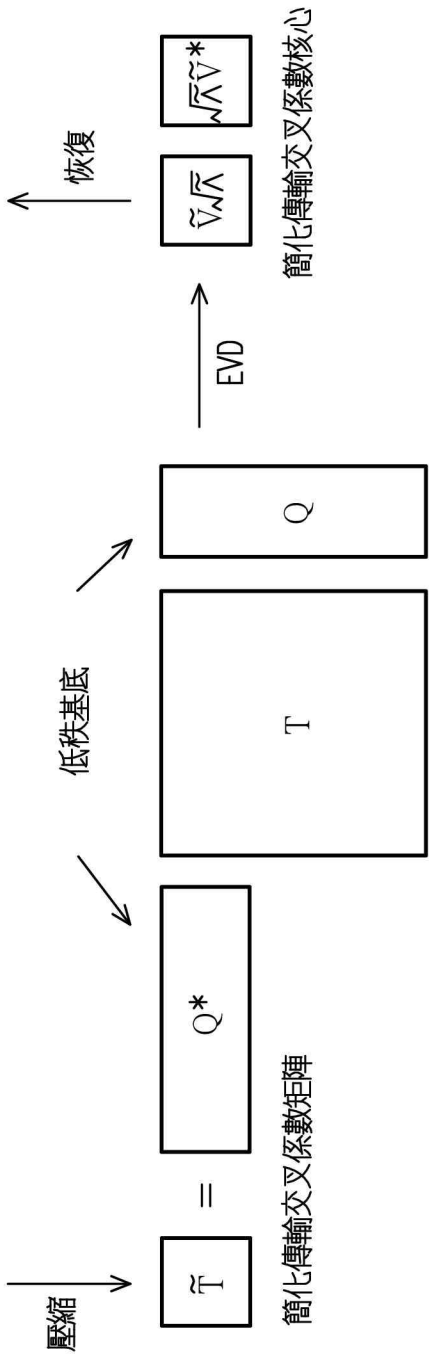
【圖3】



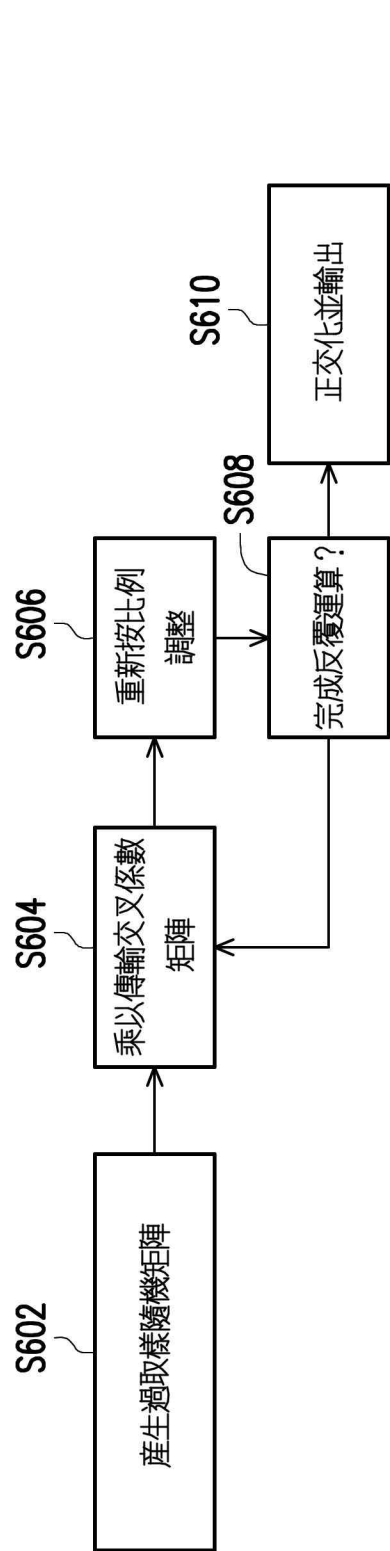
【圖4】



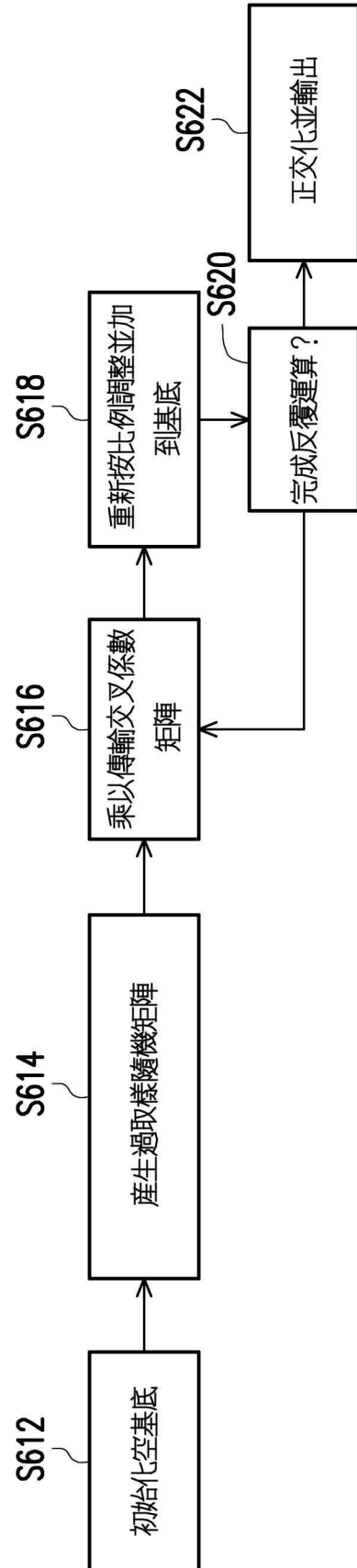
【圖5A】



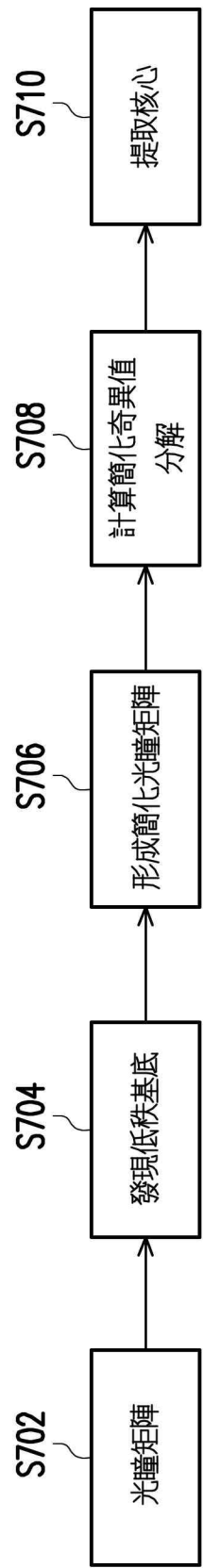
【圖5B】



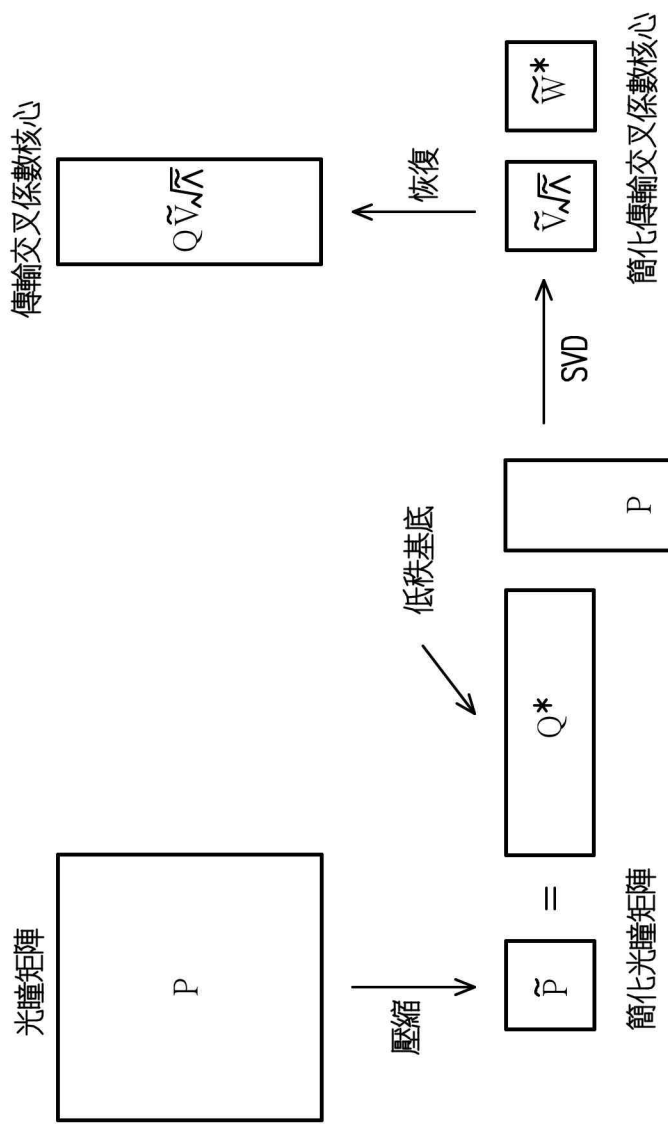
【圖 6A】



【圖 6B】



【圖7A】



【圖7B】