



## (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110929366 A

(43)申请公布日 2020.03.27

(21)申请号 201910773551.4

G06F 17/14(2006.01)

(22)申请日 2019.08.21

G03F 1/68(2012.01)

G03F 1/36(2012.01)

(30)优先权数据

62/725,271 2018.08.31 US

16/423,190 2019.05.28 US

(71)申请人 台湾积体电路制造股份有限公司

地址 中国台湾新竹科学工业园区新竹市力行六路八号

(72)发明人 何力键

(74)专利代理机构 南京正联知识产权代理有限公司 32243

代理人 顾伯兴

(51)Int.Cl.

G06F 30/20(2020.01)

G06F 17/16(2006.01)

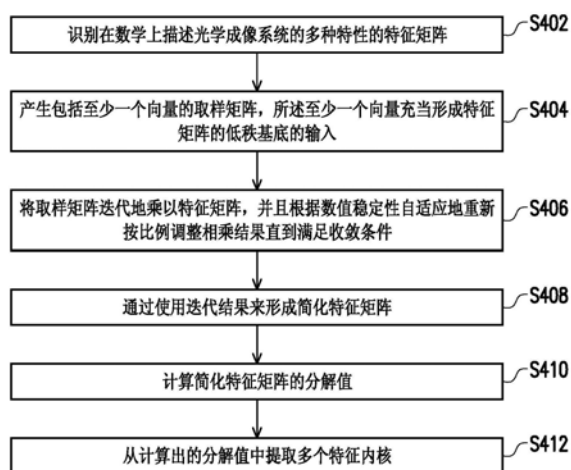
权利要求书1页 说明书11页 附图8页

(54)发明名称

用于计算光学模型模拟的特征内核的方法

(57)摘要

本发明提供一种用于计算光学模型模拟的特征内核的方法。在方法中,识别在数学上描述光学成像系统的多种特性的特征矩阵。产生包括至少一个向量的取样矩阵,至少一个向量充当形成特征矩阵的低秩基底的输入。将取样矩阵迭代地乘以特征矩阵,并且根据数值稳定性自适应地重新按比例调整相乘结果直到满足收敛条件。使用迭代结果来形成简化特征矩阵。计算简化特征矩阵的分解值,并且从计算出的分解值中提取多个特征内核。



1. 一种用于计算光学模型模拟的特征内核的方法,适用于具有存储介质及处理器的电子设备,所述方法包括:

通过所述处理器识别在数学上描述光学成像系统的多种特性的特征矩阵,所述多种特性从所述光学成像系统中检索并且存储在所述存储介质中;

通过所述处理器产生包括至少一个向量的取样矩阵,所述至少一个向量充当形成所述特征矩阵的低秩基底的输入;

通过所述处理器将所述取样矩阵迭代地乘以所述特征矩阵,并且根据数值稳定性自适应地重新按比例调整相乘结果直到满足收敛条件;

通过所述处理器使用迭代结果以形成简化特征矩阵;以及

通过所述处理器计算所述简化特征矩阵的分解值,并且从所述计算出的分解值中提取多个特征内核。

## 用于计算光学模型模拟的特征内核的方法

### 技术领域

[0001] 本发明的实施例是有关于一种计算特征内核的方法,且特别是有关于一种用于计算光学模型模拟的特征内核的方法。

### 背景技术

[0002] 在现代半导体装置的制造工艺中,操纵各种材料和机器以产生最终产品。由于半导体装置的复杂度增加和超小晶体管的显影,因此工艺变化对产品的性能具有更大影响。光刻是产生影响的重要因素中的一种,并且将光刻模拟应用于评估待在大批量生产之前制造的产品的性能。

[0003] 在光刻模拟中采用根据霍普金斯理论在数学上描述光学成像系统的特性的传输交叉系数(transmission cross-coefficient,TCC)矩阵,并且计算来自TCC矩阵的TCC内核对模拟是必要的。然而,用于计算TCC内核的标准方法在计算上极为昂贵,这可以使模拟减慢并增加掩模制造工艺的整体时间。

### 发明内容

[0004] 本发明实施例提供一种用于计算光学模型模拟的特征内核的方法,适用于具有存储介质及处理器的电子设备,所述方法包括:通过所述处理器识别在数学上描述光学成像系统的多种特性的特征矩阵,所述多种特性从所述光学成像系统中检索并且存储在所述存储介质中;通过所述处理器产生包括至少一个向量的取样矩阵,所述至少一个向量充当形成所述特征矩阵的低秩基底的输入;通过所述处理器将所述取样矩阵迭代地乘以所述特征矩阵,并且根据数值稳定性自适应地重新按比例调整相乘结果直到满足收敛条件;通过所述处理器使用迭代结果以形成简化特征矩阵;以及通过所述处理器计算所述简化特征矩阵的分解值,并且从所述计算出的分解值中提取多个特征内核。

### 附图说明

[0005] 根据结合附图阅读的以下详细描述最佳地理解本公开的各个方面。应注意,根据行业中的标准惯例,各种特征并未按比例绘制。事实上,可出于论述清楚起见而任意地增大或缩减各种特征的尺寸。

[0006] 图1是示出根据本公开的实施例的模型模拟工艺的示意图;

[0007] 图2是示出根据本公开的实施例的基于模型的掩模制造工艺的示意图;

[0008] 图3示出根据本公开的实施例的用于计算光学模型模拟的特征内核的电子设备的框图;

[0009] 图4是示出根据本公开的实施例的用于计算光学模型模拟的特征内核的方法的流程图;

[0010] 图5A是示出根据本公开的实施例的用于通过使用EVD算法来计算光学模型模拟的特征内核的方法的流程图;

[0011] 图5B是示出根据本公开的实施例的通过使用EVD算法来计算光学模型模拟的特征内核的实例的示意图；

[0012] 图6A是示出根据本公开的实施例的用于通过子空间迭代发现低秩基底的方法的流程图；

[0013] 图6B是示出根据本公开的实施例的用于通过块克雷洛夫方法(block Krylov method)发现低秩基底的方法的流程图；

[0014] 图7A是示出根据本公开的实施例的用于通过使用SVD算法来计算光学模型模拟的特征内核的方法的流程图；

[0015] 图7B是示出根据本公开的实施例的通过使用SVD算法来计算光学模型模拟的特征内核的实例的示意图；

[0016] 附图标号说明：

[0017] 11:光学模型；

[0018] 12、24:掩模；

[0019] 13:模拟图像；

[0020] 21:测试图案；

[0021] 22:测试测量；

[0022] 23:校准模型；

[0023] 25:目标；

[0024] 26:优化掩模；

[0025] 30:电子设备；

[0026] 32:数据检索装置；

[0027] 34:存储介质；

[0028] 36:处理器；

[0029] 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:步骤。

## 具体实施方式

[0030] 以下公开内容提供用于实施所提供的主题的不同特征的许多不同实施例或实例。下文描述组件和布置的具体实例来简化本公开。当然,这些仅仅是实例而并不旨在作为限制。举例来说,在以下描述中,在第二特征上方或在第二特征上形成第一特征可包含第一特征与第二特征直接接触地形成的实施例,且也可包含在第一特征与第二特征之间可形成有额外特征,使得第一特征与第二特征可不直接接触的实施例。此外,本公开可在各种实例中重复附图标号和/或字母。此重复是为了简单和清楚起见,且本身并不指示所论述的各种实施例和/或配置之间的关系。

[0031] 另外,为易于描述,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)”等空间相对术语来描述如图中所示出的一个元件或特征与另一(些)元件或特征的关系。除图中所描绘的定向之外,

这些空间相对术语旨在涵盖装置在使用或操作中的不同定向。设备可以另外方式定向(旋转90度或处于其它定向),且本文中所使用的空间相对描述词因此可相应地作出解释。

[0032] 本发明实施例旨在显著地加快传输交叉系数(TCC)内核的计算,这些传输交叉系数内核对现代光刻中的投影光学成像系统的高效建模极为重要。

[0033] 根据本发明的一些实施例,取样矩阵由随机矩阵、伪随机矩阵或结构矩阵形成。将在数学上描述光学系统的特性的传输交叉系数(TCC)矩阵与取样矩阵迭代地相乘,并且在满足收敛条件之前自适应地重新按比例调整结果(或使结果正交化)。因此,根据迭代的最终结果或迭代的中间结果的累加来形成大致保留相关内核的低秩基底。使用低秩基底来计算较小大小的简化TCC矩阵。

[0034] 利用简化TCC矩阵,将块算法应用于计算特征值分解(eigenvalue decomposition,EVD)或奇异值分解(singular value decomposition,SVD),从这些值分解中提取简化TCC内核并将其扩展到全空间(full space)。重建的TCC内核应用于模型校准和掩模校正/优化,以便获得优化掩模。

[0035] 通过所述方法,由于主要计算仅包含矩阵相乘,所述矩阵相乘通常包含 $O(N^2)$ 运算或甚至在特殊情况下仅包含 $O(N \log N)$ ,因此可以显著降低计算复杂度并且可加快基于模型的掩模制造的光刻模拟。

[0036] 图1是示出根据本公开的实施例的模型模拟工艺的示意图。参看图1,将实施例的模型模拟实施为计算模拟图像,例如使用这些模拟图像来与从晶片捕获到的实际图像进行比较以验证模拟模型是否适合。

[0037] 在步骤S110中,给出多个光学模型11和掩模12作为模型模拟的输出。每个光学模型是例如包括与投影光学成像系统中的光学器件相关联的许多参数的数学模型,例如散焦、图像平面,光的波长或数值孔径。掩模是例如光刻中所使用的光刻光掩模且在集成电路制造中用图案层显影。

[0038] 在步骤S120中,将每个光学模型应用于基于霍普金斯理论实施的模型模拟。霍普金斯理论使用传输交叉系数(TCC)来描述掩模传输对光学图像的影响,通过对TCC乘以掩模函数的乘积进行傅立叶变换来形成所述光学图像。

[0039] 详细地说,可以如下形式呈现标量光学器件(scalar optics)的TCC:

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

[0041] 其中自变量是2D空间频率坐标,即,  $f = (f_x, f_y)$ 。  $P(f)$  是等于点扩散函数的傅里叶变换的光瞳函数。 $S(f)$  是源强度分布。离散化  $T(f, f')$  是TCC矩阵,在所述矩阵中,一个维度用于  $f$ ,而另一个维度用于  $f'$ 。

[0042] 也可以  $T = PP^* \in \mathbb{C}^{N \times N}$ ,  $P \in \mathbb{C}^{M \times N}$  (由于  $\geq 0$ , 将  $\sqrt{S(f)}$  并入  $P$ ,  $P^*$  中的每一个中)的形式编写TCC矩阵  $T$ , 其中  $P$  是仅取决于光学系统的特性(例如光瞳函数、源强度、相关因子、偏振)的“堆叠的移位光瞳矩阵”,且  $P^*$  是光瞳矩阵  $P$  的共轭转置。在现代光刻模拟中,  $M \cong 10^4$  且  $N \cong 3000$ 。可以如下方式使用TCC矩阵  $T$  来计算空中图像  $AI$ :

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

[0044] 其中  $m(f)$  是等于掩模衍射算子的掩模传输函数。应注意,根据投影光学器件,由光掩模上的图案衍射的光进入光刻胶,并且在光刻胶上形成的光掩模的图像被称为空中图

像。

[0045] 上文所描述的定义用于标量光学理论。类似公式适用于向量光学理论。也就是说，对于向量光学理论， $P(f)$  变为矩阵（即，描述光偏振的多个分量），而  $S(f)$  变为矩阵，以便捕获每个源点的偏振。

[0046] 由此得出，TCC矩阵  $T$  允许特征分解  $T = V \Lambda V^*$ ，其中  $V$  与列  $v_j$  形成幺正，且  $\Lambda$  与实际项  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq 0$  形成对角。TCC内核是经调整的特征向量  $\varphi_j = \sqrt{\lambda_j} v_j$ 。通常，仅保留主要内核中的少量  $k \ll N$ ，所述主要内核随后包括  $T$  直到秩  $k$  的最佳近似值。

[0047] 基于上文，在步骤S121中，产生多个TCC内核，并且在步骤S122中，应用所产生的TCC内核作为光学模型的一部分。

[0048] 在步骤S121中，本发明实施例的重点在于产生TCC内核。通过将TCC矩阵与低秩基底迭代地相乘，从而获得简化TCC矩阵并使用所述矩阵来计算分解值。最后，可以通过从计算出的分解值中提取简化TCC内核并且将所述简化TCC内核扩展到全空间来产生TCC内核。

[0049] 除了应用光学模型之外，在步骤S130中，还将抗蚀剂/晶片模型应用于模型模拟，使得在步骤S140中产生模拟图像13。使用模拟图像来与从晶片捕获到的实际图像进行比较，以便验证模拟模型是否适合。

[0050] 因此，由于产生TCC内核的时间缩短，因此模型模拟工艺可以运行得更快。

[0051] 图2是示出根据本公开的实施例的基于模型的掩模制造工艺的示意图。参看图2，掩模制造工艺基于如图1中所说明的模型模拟。

[0052] 在图2的上半部分中，示出用于晶片光刻机和扫描器的投影光学器件的鉴定工艺的模型校准方法，其中应用多个测试图案21以制造光掩模。通过光将测试图案21从光掩模转移到形成于衬底或晶片上的光刻胶，在光刻胶中进行一系列化学处理以将图案雕刻到光刻胶下方的材料中。然后从图案化的衬底或晶片中获得多个测试测量22。

[0053] 在步骤S210中，给出前述测试图案21和测试测量22作为模型校准的输入。在步骤S220中的模型校准工艺中，应用如图1中所示的模型模拟工艺来模拟具有输入测试图案的光学模型（步骤S221），并且针对测试测量22检查从模型模拟获得的模拟测量（即，模拟图像）以查看模型是否适合（步骤S222）。

[0054] 如果测试测量22和模拟测量彼此相距较远，那么就意味着模型不稳健，并且工艺返回到步骤S221以校正并改变模型并再次执行模拟。重复执行模型校准，直到测试测量22和模拟测量彼此接近为止，并且因此，在步骤S230中输出校准模型23。

[0055] 应注意，每当在步骤S221中改变光学模型时，光学器件的参数都会改变，并相应地再次执行模型模拟，这意味着需要计算新TCC内核，且因此计算是减慢模型校准工艺的关键因素。

[0056] 在图2的下半部分中，示出掩模校正/优化工艺，并且在步骤S240中，给出在先前模型校准工艺中经过校准的模型23、掩模24和目标25作为步骤S250中的掩模校正/优化工艺中的多个模拟的输入。在掩模校正/优化工艺中，模拟中的一个或组合包含但不限于：在步骤S251中执行光学邻近校正（optical proximity correction, OPC）、逆光刻技术（inverse lithography technology, ILT）、基于模型的辅助特征（model-based assist feature, MBAF）和源-掩模优化（source-mask optimization, SMO），并且在步骤S252中执行光刻工艺

检查(lithography process check,LPC)以检查在校正/优化之后制造的掩模是否适合。

[0057] 在一些实施例中,在步骤S252中,如果通过使用给定掩模24获得的结果图像经检查为与目标25(例如期望图案)不匹配或类似,那么再次执行步骤S251中的模拟以校正掩模。另一方面,在步骤S252中,如果通过使用给定掩模24获得的结果图像经检查为与目标25匹配或类似,那么在步骤S260中输出优化掩模26。

[0058] 应注意,尽管步骤S251中的一些模拟(例如OPC/ILT)可以应用先前在步骤S220中产生的TCC内核,但是一些模拟可能需要新TCC内核。举例来说,在一些实施例中,针对源-掩模优化(SMO)的模拟,由于在模拟中优化光学器件,因此改变光学器件的参数并且期望计算新TCC内核。类似于步骤S221中的模拟,步骤S251中的新TCC内核的计算可减慢掩模校正/优化工艺并且导致掩模制造工艺的总时间增加。

[0059] 鉴于上述情况,本公开开发一种用于计算光学模型模拟的特征内核的方法,以加快TCC内核的计算,从而缩短模型模拟工艺和掩模制造工艺的时间。

[0060] 详细地说,图3示出根据本公开的实施例的用于计算光学模型模拟的特征内核的电子设备的框图。参看图3,本发明实施例的电子设备30是例如个人计算机、服务器、工作站或任何其它计算装置,并且可包含数据检索装置32、存储介质34以及处理器36,所述处理器耦合到数据检索装置32和存储介质34。

[0061] 在一些实施例中,电子设备30在外部连接到光学成像系统(未绘示)并且配置以检索光学成像系统的多种特性并且扫描由对衬底或晶片执行热扫描的光学成像系统获得的图像,以便执行光学模型模拟。

[0062] 在一些实施例中,数据检索装置32配置以连接光学成像系统并且检索光学成像系统的特性。数据检索装置32是例如任何有线或无线接口,例如USB、火线、雷电、通用异步接收器/发射器(universal asynchronous receiver/transmitter,UART)、串行外围接口总线(serial peripheral interface bus,SPI)、WiFi或蓝牙,但是本公开并不限于此。

[0063] 存储介质34配置以存储由数据检索装置32检索到的特性。存储介质34是例如随机存取存储器(random access memory,RAM)、只读存储器(read-only memory,ROM)、闪存、硬盘、独立磁盘冗余阵列(redundant array of independent disks,RAID)、其它类似存储装置或其组合,但本公开并不限于此。

[0064] 处理器36是例如中央处理单元(central processing unit,CPU)、其它可编程通用或专用微处理器、数字信号处理器(digital signal processor,DSP)、可编程控制器、专用集成电路(application specific integrated circuit,ASIC)、可编程逻辑装置(programmable logic device,PLD)、其它类似装置或其组合,但本公开并不限于此。

[0065] 电子设备30配置以执行用于实施根据本公开的一些实施例的用于计算光学模型模拟的特征内核的方法的指令。具体来说,图4是示出根据本公开的实施例的用于计算光学模型模拟的特征内核的方法的流程图。本发明实施例的方法适用于图3的电子设备30,并且下文参看图3的电子设备30中的各种组件描述所述方法的详细步骤。

[0066] 参看图4,在步骤S402中,处理器36识别在数学上描述光学成像系统的多种特性的特征矩阵。特征矩阵是例如在数学上描述光学系统的特性的TCC矩阵,例如光瞳函数、源强度、相干因子或偏振,但本公开并不限于此。

[0067] 在步骤S404中,处理器36产生包括至少一个向量的取样矩阵,所述至少一个向量

充当形成特征矩阵的低秩基底的输入。取样矩阵包括例如随机矩阵、伪随机矩阵或结构矩阵。在一些实施例中,当产生取样矩阵时,处理器36可执行过取样(例如将秩 $k$ 放大到 $k+O(1)$ )以便改善随机取样误差。在一些实施例中,同时对向量组(即,矩阵)起作用以利用计算机硬件高速缓存效率,但在一些实施例中,还可以导出每次单个向量变型(single-vector-at-a-time variant),这可以使计算结果更准确。

[0068] 在步骤S406中,处理器36将取样矩阵迭代地乘以特征矩阵,并且根据数值稳定性自适应地重新按比例调整相乘结果直到满足收敛条件。重复应用相乘以改善频谱近似误差。

[0069] 在一些实施例中,在不直接计算全特征矩阵的情况下,通过利用特性的子集来执行与特征矩阵的相乘。举例来说,通过执行与TCC矩阵 $T$ 的相乘为 $Tx = P(P^*x)$ ,计算可绕过 $T$ 的构建(包含 $O(N^3)$ 个算子)并且至多包含 $O(N^2)$ 个算子,这给出算法的总 $O(N^2)$ 成本。还可以利用其它结构(例如低秩、稀疏或张量),并且本公开并不限于此。

[0070] 在一些实施例中,当将多个源点铺设在共形均匀网格上时,通过使用快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT)计算根据特性的光瞳矩阵与所述光瞳矩阵的共轭转置的卷积来执行与特征矩阵的相乘。光瞳矩阵的卷积结构允许使用FFT在 $O(N \log N)$ 时间内相乘,并给出算法的总 $O(N \log N)$ 。

[0071] 在一些实施例中,当将任意分布的多个源点重新取样到均匀网格中时,通过使用FFT计算根据特性的光瞳矩阵与所述光瞳矩阵的共轭转置的卷积来执行与特征矩阵的相乘。可将源点重新取样到具有可控空中图像误差的均匀网格上,并且如上文所描述的一样给出算法的总 $O(N \log N)$ 。

[0072] 在一些实施例中,当任意分布的多个源点不在均匀网格上时,通过使用非均匀FFT计算根据特性的光瞳矩阵与所述光瞳矩阵的共轭转置的卷积来执行与特征矩阵的相乘。即使对于任意分布的源点,也可通过使用非均匀FFT来实现算法的总 $O(N \log N)$ 。

[0073] 在一些实施例中,除了明确考虑到具有提供快于 $O(N^3)$ 相乘的结构 $T = PP^*$ 的TCC矩阵之外,也可以应用具有更一般结构(例如对于对角不定(即,可为负的)矩阵 $D$ 的 $T = PDP^*$ )的TCC矩阵。

[0074] 在步骤S408中,处理器36使用迭代结果来形成简化特征矩阵。

[0075] 在一些实施例中,通过子空间迭代获得简化特征矩阵,使用所述矩阵来计算近似于主要特征空间的低秩基底。收敛可与执行固定数量的迭代相关或与监测子空间相似性的一些度量相关。也就是说,在一些实施例中,当迭代次数达到预定次数时确定满足收敛条件,而在一些实施例中,当监测自适应误差度量时确定满足收敛条件,但本公开并不限于此。因此,通过使用迭代的最终结果来形成简化特征矩阵。

[0076] 在一些实施例中,通过块克雷洛夫方法获得简化特征矩阵,在所述简化特征矩阵中,中间结果以与传统兰索斯(Lanczos)方法类似的方式更好地用于构建可能比子空间迭代更大的基底。也就是说,通过初始化空基底并将每次迭代的中间结果累加到所述空基底来形成简化特征矩阵。与子空间迭代相比,近似误差严格来说并不太差,但代价是简化特征矩阵可能更大,且计算分解值的成本可能更高。

[0077] 在步骤S410中,处理器36计算简化特征矩阵的分解值,并且在步骤S412中,处理器36从计算出的分解值中提取多个特征内核。在一些实施例中,通过使用块算法(例如特征值



分解 (EVD) 算法或奇异值分解 (SVD) 算法) 来计算简化特征矩阵的分解值, 这些分解值分别在下文详细说明。

[0078] 图5A是示出根据本公开的实施例的用于通过使用EVD算法计算光学模型模拟的特征内核的方法的流程图。图5B是示出根据本公开的实施例的通过使用EVD算法计算光学模型模拟的特征内核的实例的示意图。本发明实施例的方法适用于图3的电子设备30, 并且下文参看图3的电子设备30中的各种组件描述所述方法的详细步骤。

[0079] 参看图5A和图5B两者, 在步骤S502中, 处理器36获得光学系统的光瞳矩阵, 以便计算在数学上描述光学系统的特性的TCC矩阵T。

[0080] 在步骤S504中, 借用来自随机数值线性代数的技术, 处理器36发现大致保留相关内核的大小为O(k)的低秩基底Q。

[0081] 在步骤S506中, 处理器36将低秩基底Q乘以TCC矩阵T以形成简化的TCC矩阵 $\tilde{T}$ , 在所述矩阵中, 将低秩基底Q的共轭转置矩阵 $Q^*$ 乘以TCC矩阵T和低秩基底Q, 以便将TCC矩阵T压缩成简化TCC矩阵 $\tilde{T}$ 。

[0082] 在步骤S508中, 处理器36根据简化TCC矩阵 $\tilde{T}$ 计算简化EVD。

[0083] 在步骤S510中, 处理器36从计算出的简化EVD中提取内核。在一些实施例中, 处理器36从计算出的简化EVD中提取简化TCC内核 (即,  $\tilde{v} \sqrt{\tilde{\lambda}}$ ), 然后通过将低秩基底Q与简化TCC内核相乘来将所提取的简化TCC内核扩展到全空间, 以便恢复TCC内核 (即,  $Q\tilde{v} \sqrt{\tilde{\lambda}}$ )。

[0084] 根据本发明实施例, 发现低秩基底, 并且使用所述低秩基底将TCC矩阵压缩成小简化矩阵 (例如大小为k阶乘k阶的TCC矩阵, 其中k是相关内核的数量)。在较小压缩空间中执行计算, 并且将结果扩展回原始空间。因此, 可显著降低计算复杂度, 并且可加快TCC内核的产生。

[0085] 在一些实施例中, 可通过如上文所引入的子空间迭代或块克雷洛夫方法来执行用于发现低秩基底的方法。

[0086] 详细地说, 图6A是示出根据本公开的实施例的用于通过子空间迭代发现低秩基底的方法的流程图。图6B是示出根据本公开的实施例的用于通过块克雷洛夫方法发现低秩基底的方法的流程图。本发明实施例的方法适用于图3的电子设备30。

[0087] 参看图6A, 在步骤S602中, 处理器36产生过取样随机矩阵。在一些实施例中, 处理器36可通过对随机矩阵、伪随机矩阵或结构矩阵进行过取样来产生过取样随机矩阵。

[0088] 在步骤S604中, 处理器36将所产生的随机矩阵乘以TCC矩阵, 并且在步骤S606中, 根据数值稳定性自适应地重新按比例调整相乘结果。重新按比例调整被称为例如格莱姆-施密特正交化 (Gram-Schmidt orthogonalization), 其主要用于数值稳定性, 但本公开并不限于此。

[0089] 在步骤S608中, 处理器36确定迭代是否完成。在一些实施例中, 可基于设定迭代次数或一些自适应误差度量来使终止 (即, 收敛) 固定。

[0090] 如果不满足收敛条件, 那么处理器36返回到步骤S604以将所产生的随机矩阵迭代地乘以TCC矩阵, 并且再次重新按比例调整相乘结果直到满足收敛条件。一旦满足收敛条件, 则处理器36继续进行到步骤S610以使重新按比例调整的相乘结果正交化并最终输出正

交化的结果作为低秩基底。

[0091] 参看图6B,在步骤S612中,处理器36初始化空基底,且随后在步骤S614中产生过取样随机矩阵。在一些实施例中,处理器36可通过对随机矩阵、伪随机矩阵或结构矩阵进行过取样来产生过取样随机矩阵。

[0092] 在步骤S616中,处理器36将所产生的随机矩阵乘以TCC矩阵,并且在步骤S618中,根据数值稳定性自适应地重新按比例调整相乘结果,并将重新按比例调整的相乘结果与在步骤S612中进行初始化的空基底相加。重新按比例调整被称为例如格莱姆-施密特正交化,其主要用于数值稳定性,但本公开并不限于此。

[0093] 在步骤S620中,处理器36确定迭代是否完成。在一些实施例中,可基于设定迭代次数或一些自适应误差度量来使终止(即,收敛)固定。

[0094] 如果不满足收敛条件,那么处理器36返回到步骤S616以将所产生的随机矩阵迭代地乘以TCC矩阵,重新按比例调整相乘结果并且将重新按比例调整的相乘与累加基底相加直到满足收敛条件。一旦满足收敛条件,则处理器36继续进行到步骤S622以使累加基底正交化并最终输出正交化的基底作为低秩基底。

[0095] 与子空间迭代相比,对于块克雷洛夫方法,累加中间结果以构建可能比子空间迭代更大的基底。因此,近似误差严格来说并不太差,但用于计算EVD的成本可能更昂贵,这是由于所产生的基底更大。

[0096] 在图5A到图6B中所说明的前述方法中,使用EVD算法计算特征内核。然而,在一些实施例中,可使用SVD算法来计算特征内核。下文给出实施例以进行进一步说明。

[0097] 图7A是示出根据本公开的实施例的用于通过使用SVD算法计算光学模型模拟的特征内核的方法的流程图。图7B是示出根据本公开的实施例的通过使用SVD算法计算光学模型模拟的特征内核的实例的示意图。本发明实施例的方法适用于图3的电子设备30,并且下文参看图3的电子设备30中的各种组件描述所述方法的详细步骤。

[0098] 参看图7A和图7B两者,在步骤S702中,处理器36获得光学系统的光瞳矩阵P。

[0099] 在步骤S704中,借用来自随机数值线性代数的技术,处理器36发现大致保留相关内核的大小为O(k)的低秩基底Q。

[0100] 在步骤S706中,处理器36将低秩基底Q的共轭转置矩阵 $Q^*$ 乘以光瞳矩阵P以形成简化光瞳矩阵 $\tilde{P}$ ,以便将光瞳矩阵P压缩成简化光瞳矩阵 $\tilde{P}$ 。

[0101] 在步骤S708中,处理器36根据简化光瞳矩阵 $\tilde{P}$ 计算简化SVD。对于具有特征分解 $\tilde{T} = \tilde{V} \Lambda \tilde{V}$ 的简化TCC矩阵,对于某个幺正矩阵 $\tilde{W}$ ,对应的简化光瞳矩阵SVD是 $\tilde{P} = \tilde{V} \sqrt{\Lambda} \tilde{W}$ 。

[0102] 在步骤S710中,处理器36从计算出的简化SVD中提取内核。在一些实施例中,处理器36从计算出的简化SVD中提取简化TCC内核(即, $\tilde{V} \sqrt{\Lambda}$ ),然后通过将低秩基底Q与简化TCC内核相乘来将所提取的简化TCC内核扩展到全空间,以便恢复TCC内核(即, $Q \tilde{V} \sqrt{\Lambda}$ )。

[0103] 在一些实施例中,可通过如上文所引入的子空间迭代或块克雷洛夫方法来执行用于发现低秩基底的方法。

[0104] 具体地说,在一些实施例中,可通过子空间迭代获得简化特征矩阵,使用所述矩阵来计算近似于主要特征空间的低秩基底。收敛可以与执行固定数量的迭代相关或与监测子空间相似性的一些度量相关。因此,可通过将所产生的随机矩阵迭代地乘以TCC矩阵(即,通过光瞳矩阵和其共轭转置),重新按比例调整相乘结果并使重新按比例调整的相乘结果正交化来发现低秩基底。

[0105] 在一些实施例中,可通过块克雷洛夫方法获得简化特征矩阵,在所述简化特征矩阵中,中间结果更好地用于构建可能比子空间迭代更大的基底。因此,可通过初始化空基底、将每次迭代的中间结果累加到所述空基底并使累加基底正交化来发现低秩基底。

[0106] 在本发明实施例的光瞳矩阵P的快速低秩SVD算法中,由于光瞳矩阵P的频谱衰减仅是TCC矩阵T的频谱衰减的二分之一,取决于频谱衰减的误差可较大。

[0107] 在上述实施例中,分别引入基于快速EVD的算法和基于快速SVD的算法以提取TCC内核,但在一些实施例中,相同构想还可用于产生优于传统分解的各种快速低秩因式分解,从而产生具有例如简化存储器复杂度的“非典型”TCC内核。

[0108] 在一些实施例中,提供一种包括处理器可执行指令的非暂时性计算机可读记录介质,所述处理器可执行指令在经执行时执行如以上实施例中所说明的用于计算光学模型模拟的特征内核的方法。在一些实施例中,非暂时性计算机可读记录介质是其上编码有计算机可读数据的CD-R、DVD-R、快闪驱动器或硬盘驱动器的盘片等。计算机可读数据(例如包括多个零和一的二进制数据)又包括配置以根据本文中所阐述得原理中的一或多种操作的计算机指令集。在一些实施例中,例如,处理器可执行计算机指令配置以执行用于计算光学模型模拟的特征内核的方法,例如图4中说明的例示性方法中的至少一些。本领域普通技术人员可设计经配置以根据本文中所提出的技术操作的许多此类计算机可读记录介质。

[0109] 根据一些实施例,提供一种适用于具有存储介质和处理器的电子设备的用于计算光学模型模拟的特征内核的方法。在所述方法中,通过处理器识别在数学上描述光学成像系统的多种特性的特征矩阵,所述多种特性从光学成像系统中检索并且存储在存储介质中。通过处理器产生包括至少一个向量的取样矩阵,所述至少一个向量充当形成特征矩阵的低秩基底的输入。由处理器将取样矩阵迭代地乘以特征矩阵,并且根据数值稳定性自适应地重新按比例调整相乘结果直到满足收敛条件。由处理器使用迭代结果来形成简化特征矩阵。通过处理器计算简化特征矩阵的分解值,并且从计算出的分解值中提取多个特征内核。

[0110] 在相关实施例中,所述简化特征矩阵由所述迭代的最终结果形成。

[0111] 在相关实施例中,通过初始化空基底并且将每次迭代的中间结果累加到所述空基底来形成所述简化特征矩阵。

[0112] 在相关实施例中,所述取样矩阵包括随机矩阵、伪随机矩阵或结构矩阵,且产生所述取样矩阵的步骤还包括:执行过取样以改进随机取样误差。

[0113] 在相关实施例中,所述收敛条件在迭代次数达到预定次数或自适应误差度量受监测时得以满足。

[0114] 在相关实施例中,在不直接计算全特征矩阵的情况下,通过利用所述特性的子集来执行与所述特征矩阵的相乘。

[0115] 在相关实施例中,当将多个源点铺设在共形均匀网格上时,通过使用快速傅里叶

变换 (FFT) 计算根据所述特性的光瞳矩阵与所述光瞳矩阵的共轭转置的卷积来执行与所述特征矩阵的相乘。

[0116] 在相关实施例中,当将任意分布的多个源点重新取样到均匀网格上时,通过使用快速傅里叶变换计算根据所述特性的光瞳矩阵与所述光瞳矩阵的共轭转置的卷积来执行与所述特征矩阵的相乘。

[0117] 在相关实施例中,当任意分布的多个源点不在均匀网格上时,通过使用不均匀快速傅里叶变换计算根据所述特性的光瞳矩阵与所述光瞳矩阵的共轭转置的卷积来执行与所述特征矩阵的相乘。

[0118] 在相关实施例中,所述计算所述简化特征矩阵的分解值的步骤包括:通过使用块算法来计算所述简化特征矩阵的所述分解值,所述块算法包括特征值分解 (EVD) 算法或奇异值分解 (SVD) 算法。

[0119] 根据一些实施例,用于计算光学模型模拟的特征内核的设备包含数据检索装置、存储介质以及处理器。数据检索装置配置以检索光学成像系统的多种特性。存储介质配置以存储由数据检索装置检索到的特性。处理器耦合到数据检索装置和存储介质,并且配置以执行用以进行以下步骤的指令:识别在数学上描述光学成像系统的多种特性的特征矩阵;产生包括至少一个向量的取样矩阵,所述至少一个向量充当形成特征矩阵的低秩基底的输入;将取样矩阵迭代地乘以特征矩阵,并且根据数值稳定性自适应地重新按比例调整相乘结果直到满足收敛条件;使用迭代结果以形成简化特征矩阵;以及计算简化特征矩阵的分解值,并且从计算出的分解值中提取多个特征内核。

[0120] 在相关实施例中,所述简化特征矩阵由所述迭代的最终结果形成。

[0121] 在相关实施例中,通过初始化空基底并且将每次迭代的中间结果累加到所述空基底来形成所述简化特征矩阵。

[0122] 在相关实施例中,所述取样矩阵包括随机矩阵、伪随机矩阵或结构矩阵,且所述处理器还执行过取样以改进随机取样误差。

[0123] 在相关实施例中,所述收敛条件在迭代次数达到预定次数或自适应误差度量受监测时得以满足。

[0124] 在相关实施例中,在不直接计算全特征矩阵的情况下,通过所述处理器利用所述特性的子集来执行与所述特征矩阵的相乘。

[0125] 在相关实施例中,当将多个源点铺设在共形均匀网格上时,通过所述处理器使用快速傅里叶变换计算根据所述特性的光瞳矩阵与所述光瞳矩阵的共轭转置的卷积来执行与所述特征矩阵的相乘。

[0126] 在相关实施例中,当将任意分布的多个源点重新取样到共形均匀网格上时,通过所述处理器使用快速傅里叶变换计算根据所述特性的光瞳矩阵与所述光瞳矩阵的共轭转置的卷积来执行与所述特征矩阵的相乘。

[0127] 在相关实施例中,当任意分布的多个源点不在均匀网格上时,通过所述处理器使用不均匀快速傅里叶变换计算根据所述特性的光瞳矩阵与所述光瞳矩阵的共轭转置的卷积来执行与所述特征矩阵的相乘。

[0128] 根据一些实施例,一种非暂时性计算机可读记录介质包含处理器可执行指令,所述处理器可执行指令在经执行时执行用于计算光学模型模拟的特征内核的方法。在方法

中,识别在数学上描述光学成像系统的多种特性的特征矩阵。产生包括至少一个向量的取样矩阵,所述至少一个向量充当形成特征矩阵的低秩基底的输入。将取样矩阵迭代地乘以特征矩阵,并且根据数值稳定性自适应地重新按比例调整相乘结果直到满足收敛条件。使用迭代结果来形成简化特征矩阵。计算简化特征矩阵的分解值,并且从计算出的分解值中提取多个特征内核。

[0129] 前文概述若干实施例的特征以使本领域的技术人员可更好地理解本公开的各方面。本领域的技术人员应了解,其可以易于使用本公开作为设计或修改用于进行本文中所介绍的实施例的相同目的和/或获得相同优势的其它方法和结构的基础。本领域的技术人员还应认识到,此类等效构造并不脱离本公开的精神和范围,且本领域的技术人员可在不脱离本公开的精神和范围的情况下在本文中进行各种改变、替代以及更改。

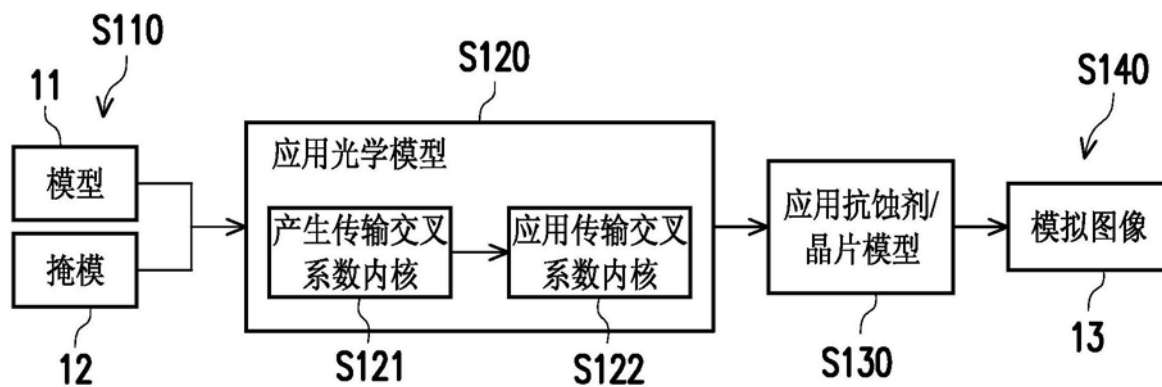


图1

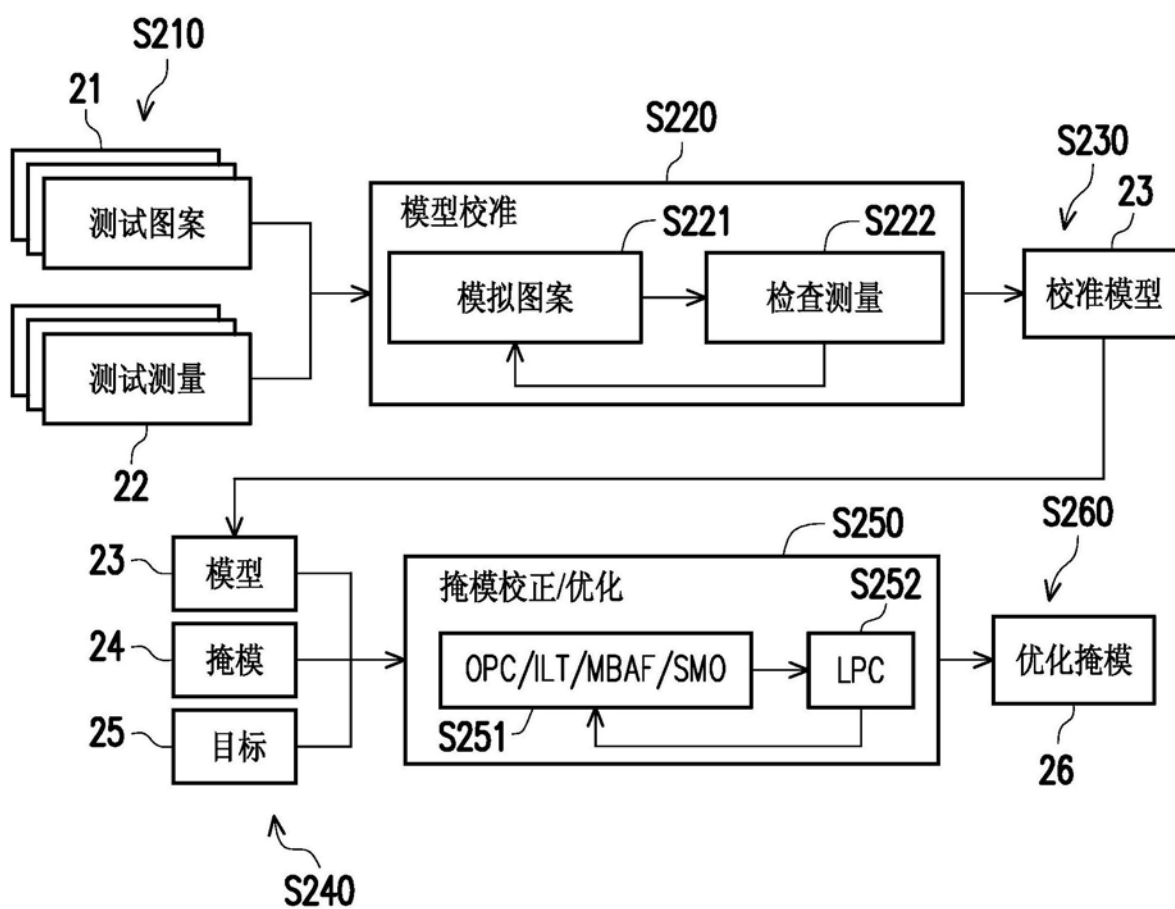


图2

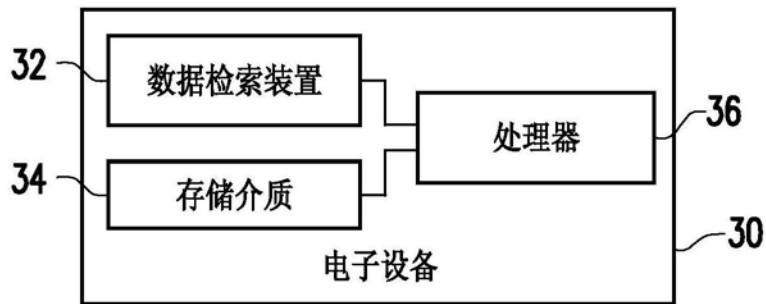


图3



图4



图5A



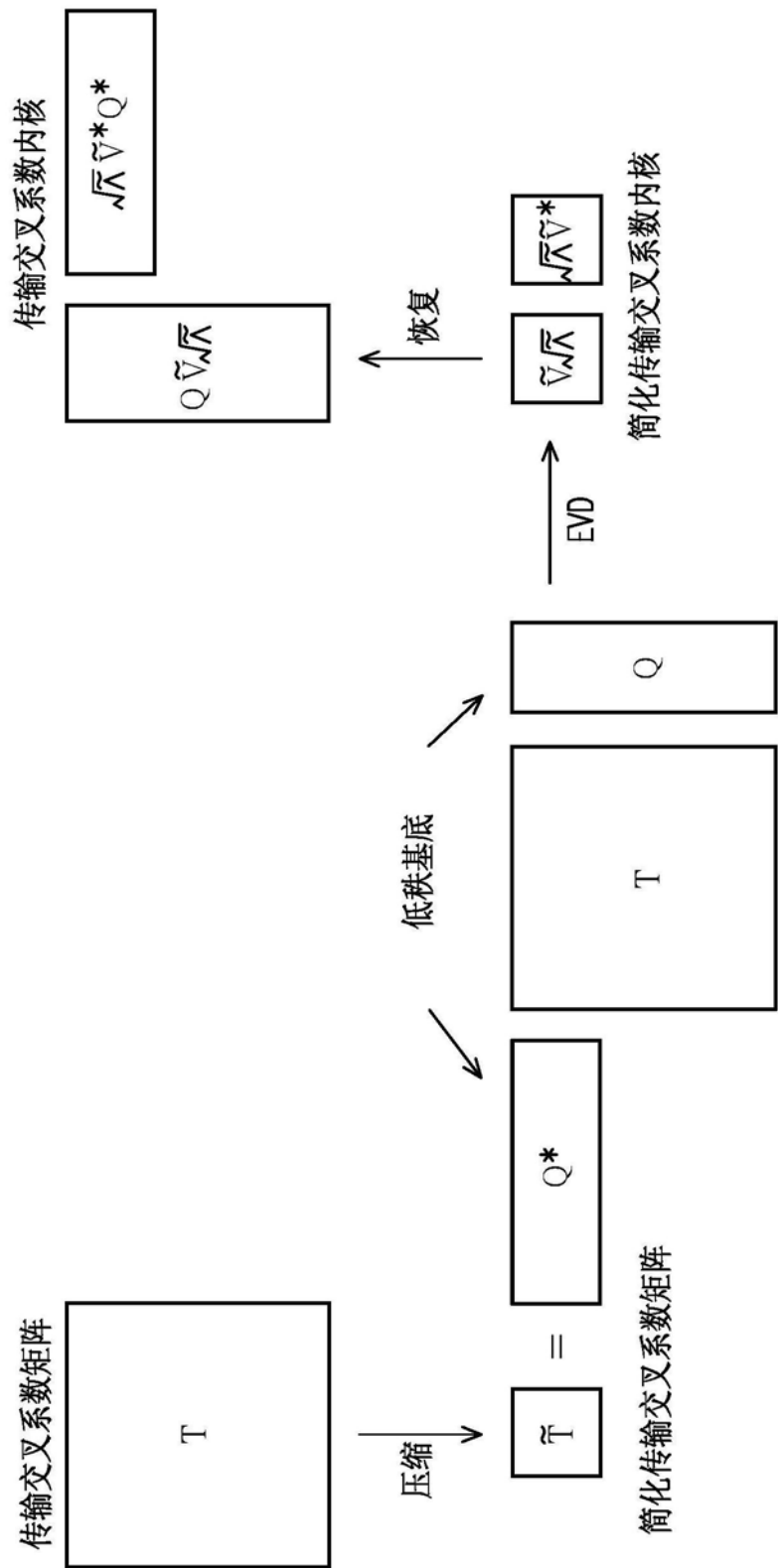


图5B

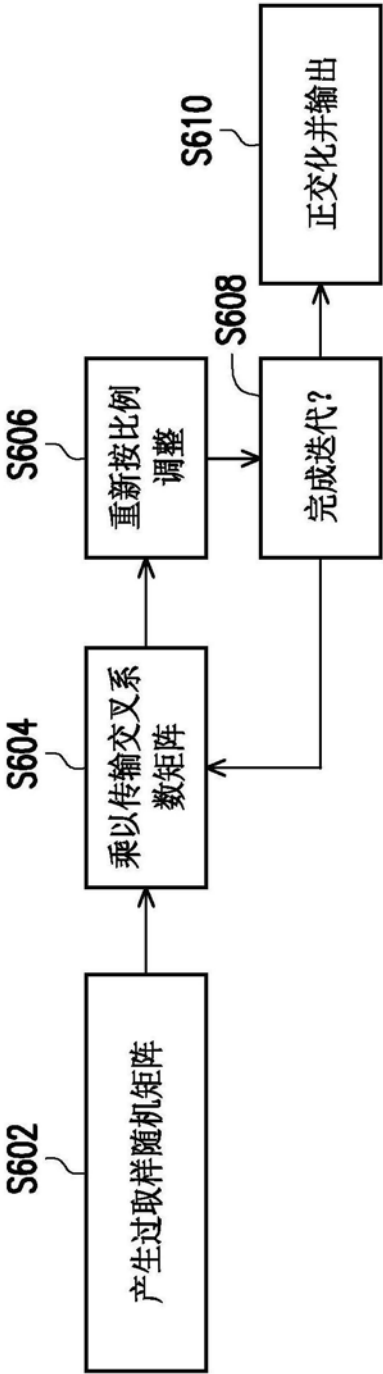


图6A

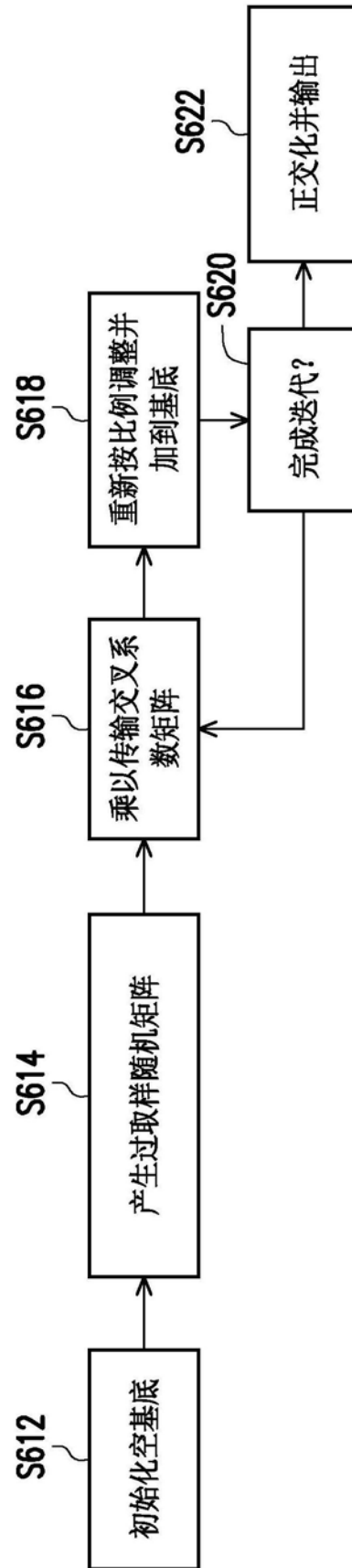


图6B



图7A

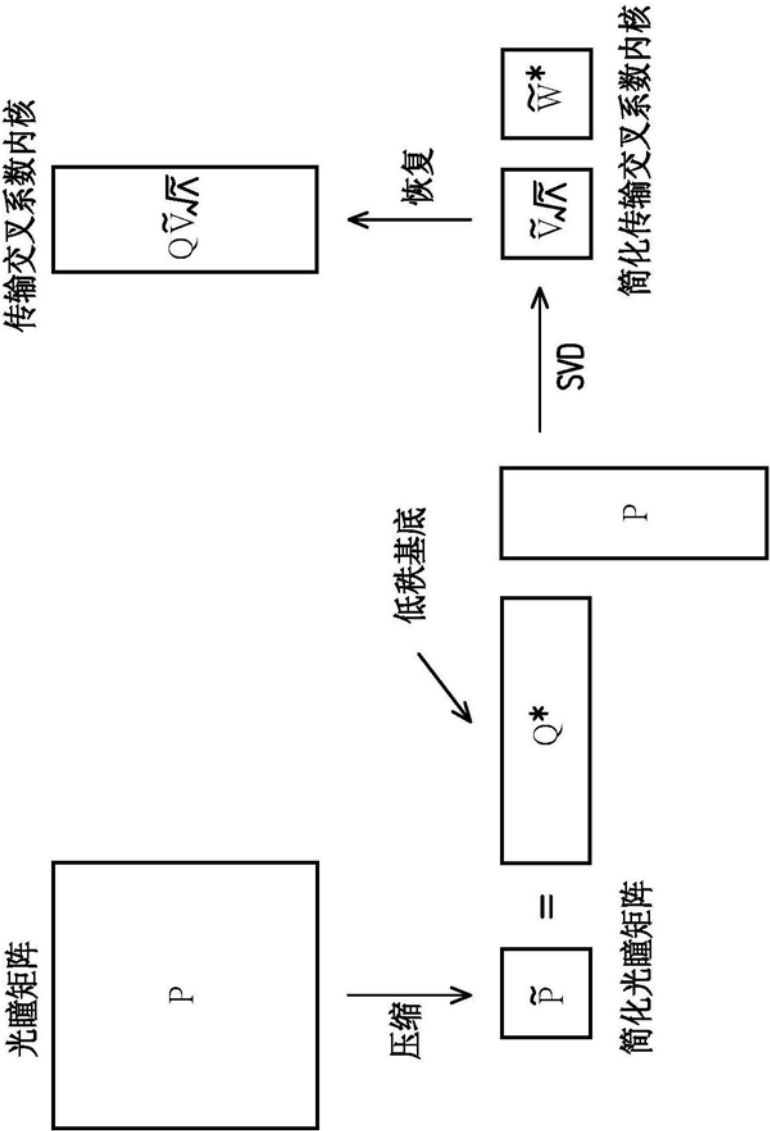


图7B