

晶圆及其表面纳米形貌的预测方法、装置、设备及介质

相关申请的交叉引用

本公开主张在 2024 年 07 月 05 日在中国提交的中国专利申请 No.202410895811.6 的优先权，其全部内容通过引用包含于此。

技术领域

本公开涉及半导体制造技术领域，尤其涉及一种晶圆及其表面纳米形貌的预测方法、装置、设备及介质。

背景技术

在晶圆制造过程中，通过直拉法制备出单晶硅棒后，对单晶硅棒依次进行线切割、研磨、刻蚀、磨削以及化学机械抛光（Chemical Mechanical Polishing, CMP）等加工工序，最终获得单晶硅晶圆。对于单晶硅晶圆来说，其表面形貌是衡量其品质的关键参数。晶圆的表面纳米形貌（nanotopography, NT）是晶圆表面形貌参数中的重要的一种品质参数。

在相关方案中，对于晶圆的 NT 检测，通常设置在最后一道表面加工工序，即 CMP 工序之后，但是对于纳米形貌这种短波相关的品质参数，很大程度上是由化学机械抛光之前的加工工艺所决定的，也就是说，在相关方案的实施过程中，当 CMP 之前的加工工序出现问题时，那么也只能在 CMP 工序之后被发现。如此，造成了 CMP 之前的加工出现问题的晶圆仍然进行了完整的晶圆制造过程，这是对生产资源来说是一种浪费。

发明内容

有鉴于此，本公开期望提供一种晶圆及其表面纳米形貌的预测方法、装置、设备及介质，能够根据晶圆在完成当前加工工序后的量测纳米形貌值预测该晶圆在完成后续工序后的预测纳米形貌值。使得能够利用该预测得到的纳米形貌数据对前端加工工序的产品性能进行监控，避免前端加工工序得到的不良晶圆

流入后序的加工工序，避免生产资源的浪费。

本公开的技术方案是这样实现的：

第一方面，本公开提供一种晶圆表面纳米形貌的预测方法，包括：

在晶圆的加工过程中，利用阶跃式设计滤波器对获取的所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波以及数据处理，获得所述晶圆的量测纳米形貌值 nt ；

基于预测函数 $f(nt) = NT$ ，根据所述晶圆的量测纳米形貌值 nt 预测后序加工工序后所述晶圆的预测纳米形貌值 NT 。

第二方面，本公开提供一种晶圆表面纳米形貌的预测装置，所述装置包括：滤波部分以及预测部分；其中，

所述滤波部分，经配置为在晶圆的加工过程中，利用阶跃式设计滤波器对获取的所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波以及数据处理，获得所述晶圆的量测纳米形貌值 nt ；

所述预测部分，经配置为基于预测函数 $f(nt) = NT$ ，根据所述晶圆的量测纳米形貌值 nt 预测后序加工工序后所述晶圆的预测纳米形貌值 NT 。

第三方面，本公开提供了一种计算设备，所述计算设备包括：处理器和存储器；所述处理器用于执行所述存储器中存储的指令，以实现如第一方面所述的晶圆表面纳米形貌的预测方法。

第四方面，本公开提供了一种计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质存储有至少一条指令，所述至少一条指令用于被处理器执行以实现如第一方面所述的晶圆表面纳米形貌的预测方法。

第五方面，本公开提供了一种晶圆，所述晶圆的预测纳米形貌值在 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的规格小于 5 nm ，和/或在 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的规格小于 10 nm 时，最终得到的晶圆的纳米形貌值为在 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的规格小于 5 nm ，在 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的规格小于 10 nm 。

本公开提供了一种晶圆及其表面纳米形貌的预测方法、装置、设备及介质，利用预测函数以及晶圆在完成当前加工工序后的量测纳米形貌值预测该晶圆在完成后续工序后的预测纳米形貌值。通过该预测纳米形貌值不仅能够对每个加

工工序进行监控，以保证加工工序所采用的加工设备的稳定性和一致性，还能够对每个加工工序的产物进行监控，以确保合格产物进入下一加工工序，提高晶圆表面的微观形貌品质，避免后序加工工序加工出未来合格可能性不高的产品，从而降低了加工成本，而且还能够用来判断已完成工序的工艺是否存在问题，以辅助工艺调整。

附图说明

图 1 为本公开提供的一种晶圆表面纳米形貌的预测方法流程图；

图 2 为本公开提供的基于 100 片晶圆的采样数据获得的预测 NT 值与实际测量的 NT 值的线性相关性示意图；

图 3 为本公开提供的一种晶圆表面纳米形貌的预测装置组成示意图；

图 4 为本公开提供的另一种晶圆表面纳米形貌的预测装置组成示意图；

图 5 为本公开提供一种计算设备的结构示意图。

具体实施方式

下面将结合本公开实施例中的附图，对本公开实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述。

在相关方案中，将经过 CMP 工序的晶圆表面按照设定尺寸划分分析区域后，根据每个分析区域内各采样点处经滤波后的量测数据中的峰谷值进行升序排列，并按照设定的百分位数（例如 99.5%）选取该升序排列中相应位置的值作为晶圆的纳米形貌（NT）值。

从晶圆表面来看，各区域内各采样点处经滤波后的量测数据会从整体上呈现出各采样点的量测数据的波动现象。本公开以波的角度将这种波动现象视为由不同波长的波信号叠加而造成的，不同的波长可以对应于发生波形现象的区域尺寸，即波信号的波长越小，其所表征发生量测数据波动现象的区域尺寸越小；波信号的波长越大，其所表征发生量测数据波动现象的区域尺寸越大。在量测数据呈现的波动现象中，波长较长的信号数据可以包括弯曲度（Bow），翘

曲度 (Warp) 等参数, 这些参数在线切割工序后大致定型, 后序的加工工序对其影响较小, 而对于波长较短的信号数据, 例如纳米形貌值, CMP 工序之前的所有前端加工工序都会对其产生影响。而相关方案所得到的晶圆的 NT 值, 是经过 CMP 工序之后的晶圆的 NT 值, 该数据仅能够表示整个晶圆加工过程的性能, 无法对加工过程中的每个加工工序的性能进行评估。而且, 随着先进制程对晶圆的表面微观形貌的要求愈发严苛, 需要对每个加工工序进行监控, 以保证加工工序所采用的加工设备的稳定性和一致性, 对每个加工工序的产物进行监控, 以确保合格产物进入下一加工工序, 从而提高晶圆表面的微观形貌品质。

基于此, 本公开提供了一种晶圆表面纳米形貌的预测方法, 所述方法包括步骤 S101 至步骤 S102。

在步骤 S101 中, 在晶圆的加工过程中, 利用阶跃式设计滤波器对获取的所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波以及数据处理, 获得所述晶圆的量测纳米形貌值 nt 。

在本公开中, 该晶圆的量测纳米形貌值在完成晶圆加工过程中的任一工序后得到。在一些示例中, 在完成任一加工工序 (比如线切割) 之后, 可以通过单点量测方案对完成线切割的晶圆表面的采样点的表面高度进行量测, 以获得晶圆的表面形貌量测数据。

在上述示例中, 单次量测方案也就是一次量测过程仅能够量测出一个采样点处量测数据的方案。例如, 可以采用接触式量测方案, 比如利用探针与待测晶圆表面接触并在晶圆表面上进行水平移动。随着该水平移动, 待测晶圆表面高度差异会引起探针产生纵向位移, 该纵向位移通过位移传感器感知并将感知到的纵向位移值转变为待测晶圆表面的高度数据, 即关于历史晶圆表面高度的历史量测数据。例如, 也可以采用以电容法量测、激光聚焦量测等的非接触式量测方案。

当然, 在一些示例中, 也可以仅通过一次量测过程获取晶圆在完成当前加工工序后的表面形貌量测数据, 比如利用光学手段 (如菲索干涉、微分干涉等) 进行测量的方案。本公开对此不做赘述。

具体来说,进行量测时所使用的采样间距,可以由进行量测的设备精度和具体配方决定,例如对于光学量测设备,采样间距可低至 0.2mm,对于一些精度不高的电容式量测设备,采样间距可以提高至 4mm。

在本公开中,所有采样点的表面形貌量测数据从整个晶圆表面可以看成是一个三维的波动现象。该波动现象可以由不同波长的波信号叠加而成,对于 NT 值来说,其对应的波长范围是 22 微米波长至 20 毫米波长。在一些示例中,对表面形貌量测数据通过滤波器过滤出波长范围从 22 微米波长至 20 毫米波长的滤波值。

在一些示例中,本公开并非采用固定尺寸的滤波器对所述晶圆表面上所有采样点的表面形貌量测数据进行滤波。滤波器的尺寸随着采样点的位置进行变化,比如,所述滤波器为阶跃式设计滤波器,该阶跃式设计滤波器的尺寸可以根据目标波长范围、采样间距以及晶圆的表面形貌量测数据的采样点位置设计得到。

在本公开中,以目标波长范围是 22 微米波长至 20 毫米波长为例,在获得波长范围从 22 微米波长至 20 毫米波长的滤波值之后,可以对晶圆表面划分出多个待分析区域,获取每个待分析区域内的关于滤波值的峰谷(Peak to valley, PV)值,并将所有待分析区域的 PV 值按照升序排列后,根据设定的百分位数的选取 PV 值以作为所述晶圆在完成线切割后的量测纳米形貌值。

在步骤 S102 中,基于预测函数 $f(nt) = NT$,根据所述晶圆的量测纳米形貌值 nt 预测后序加工工序后所述晶圆的预测纳米形貌值 NT 。

在本公开中,后序加工工序是指在晶圆加工过程中,处于步骤 S101 所述获得晶圆的表面形貌量测数据的工序之后的加工工序。比如,设定步骤 S101 获取到线切割工序之后的晶圆的表面形貌量测数据,步骤 S102 所述的后序加工工序可以是在晶圆加工过程中处于线切割工序之后的工序,例如研磨工序、刻蚀工序、磨削工序、CMP 工序等。

以线切割工序为例,设定线切割工序之后的加工过程形成一个关于晶圆 NT 值的正态分布,基于该设定,可以认为晶圆在完成线切割工序后的纳米形貌值

与该晶圆在完成后续加工工序后的纳米形貌值之间存在一个固定的函数关系，本公开以 $NT = f(nt)$ 表示，其中， NT 表示晶圆在完成后续加工工序后的预测纳米形貌值， nt 表示晶圆经步骤 S101 所得到的量测纳米形貌值， $f()$ 表示预测函数的表达式。

在本公开中，在获得晶圆的预测纳米形貌值之后，就能够对当前已完成的加工工序进行评估。

在一些示例中，可以根据所述晶圆的预测纳米形貌值的统计量确定执行当前已完成的加工工序的设备的工作状态，以确保设备的稳定性和一致性，避免机差。例如，监控每台设备每天加工的所有产品的 NT 预测值，如果 NT 预测值有离散，出现了离群值过多，均值过大等问题，表明该设备不稳定，需要停机维护。

在一些示例中，可以根据所述晶圆的预测纳米形貌值与设定的评估指标的比较结果确定所述晶圆是否继续进行后续加工工序，从而能够筛选合格产物下放，避免后续加工工序加工出未来合格可能性不高的产品，从而降低了加工成本。

在一些示例中，根据所述晶圆的预测纳米形貌值调整所述当前已完成的加工工序的工艺参数。比如，根据各加工工序的产物的预测纳米形貌值来判断已完成工序的工艺是否存在问题，以辅助工艺调整，更加有的放矢。并且在工艺调整中，同样可以参考此预测纳米形貌值来反馈和调节加工工序的工艺参数。

通过图 1 所示的技术方案，利用预测函数以及晶圆在完成当前加工工序后的量测纳米形貌值预测该晶圆在完成后续工序后的预测纳米形貌值。通过该预测纳米形貌值不仅能够对每个加工工序进行监控，以保证加工工序所采用的加工设备的稳定性和一致性，还能够对每个加工工序的产物进行监控，以确保合格产物进入下一加工工序，提高晶圆表面的微观形貌品质，避免后续加工工序加工出未来合格可能性不高的产品，从而降低了加工成本，而且还能够用来判断已完成工序的工艺是否存在问题，以辅助工艺调整。

对于图 1 所示的技术方案，在一些可能的实现方式中，步骤 S101 所述的阶

跃式设计滤波器的尺寸可以根据目标波长范围、采样间距以及晶圆的表面形貌量测数据的采样点位置设计得到，具体的设计过程可以包括：

基于所述目标波长范围，利用双高斯低通滤波函数确定滤波器；

根据所述目标波长范围的波长上限确定所述滤波器的临界尺寸；

根据采样点位置进行边缘收缩处理；

当所述采样点位置与所述晶圆表面圆心之间的距离小于或等于所述临界尺寸时，确定所述阶跃式设计滤波器的半径为第一半径；或者

当所述采样点位置与所述晶圆表面圆心之间的距离大于所述临界尺寸时，确定所述阶跃式设计滤波器的半径为第二半径；其中，所述第一半径大于所述第二半径。

对于上述示例，目标波长范围可以是与 NT 值对应的 22 微米波长至 20 毫米波长。在本公开中，所述滤波器可以为圆形滤波器，并且由双高斯低通滤波函数组成，具体来说，所述基于所述目标波长范围，利用双高斯低通滤波函数确定所述滤波器，包括：

确定低通滤波范围覆盖至所述目标波长范围的上限的第一高斯低通滤波函数；

确定低通滤波范围覆盖至所述目标波长范围的下限的第二高斯低通滤波函数；

根据所述第一高斯低通滤波函数 G_{LP1} 与所述第二高斯低通滤波函数 G_{LP2} 按照下式获得用于描述所述滤波器的函数 G_{DHP} ：

$$G_{DHP} = G_{LP1} (1 - G_{LP2})。$$

举例来说，定义截止波长与标准差之间的关系为 $\lambda_c = 6\sigma$ ，高斯低通滤波函数均为 $\exp\left(-\left(\frac{\lambda}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right)$ ，其中， λ 表示函数的参数为波长。需要说明的是，对于第一高斯低通滤波函数和第二高斯低通滤波函数来说，两者的标准差 σ 是不同的，从而能够保留不同波长范围的信号。

在通过上述具体方案获得圆形滤波器之后，需要对该滤波器的作用范围按照进行滤波计算的采样点位置进行设定。具体来说，由于晶圆表面越靠近边缘，其形貌变化越剧烈，为了能够准确地捕获剧烈的形貌变化，有效地捕捉到不同尺度的表面形貌特征，当采样点靠近晶圆表面边缘时，其对应的圆形滤波器的作用范围应当小于靠近晶圆表面中心的采样点对应的圆形滤波器的作用范围，即随着采样点逐渐远离晶圆表面圆心，其对应的滤波器的作用范围应当减小，或称之为边缘收缩。在本公开中，边缘收缩的方式是阶跃式的，即设定一临界尺寸用于判断采样点靠近晶圆表面中心或者靠近晶圆表面边缘。相较于靠近晶圆表面中心，当采样点靠近晶圆表面边缘时，滤波器的作用范围应当进行收缩（ k 为进行收缩时边缘处理系数），并且当采样点与所述晶圆表面圆心的距离大于临界尺寸时，第二半径固定设置为一小于第一半径的数值。以 12 英寸晶圆为例，其半径 $R=150\text{mm}$ ，在进行量测时，边缘去除量（exclude edge, EE）通常为 3mm，目标波长范围上限 w 为 20mm，可以按照下式计算出临界尺寸 a ：

$$a=R-EE-0.5*w$$

在本公开中，根据临界尺寸设定滤波器的阶跃式半径如下表 1 所示。

采样点所处位置	阶跃式半径
0	$0.5*w$
...	$0.5*w$
a	$0.5*w$
$a+m$	$k*w(k=0.2)$
$a+2m$	$k*w(k=0.2)$
...	$k*w(k=0.2)$
R	$k*w(k=0.2)$

表 1

在一些示例中，当采样点与所述晶圆表面圆心的距离大于临界尺寸时，第二半径除了小于第一半径之外，还被设置为随着采样点与晶圆表面圆心的距离增加而缩小，例如线性缩小，而不必设置为固定值。

基于上述实现方式，在根据上述方案获得圆形滤波器及其作用范围的半径之后，就可以利用该滤波器对所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波，获得所述晶圆的量测纳米形貌值，具体来说，获得所述晶圆量测纳米形貌值可以包括：

利用所述阶跃式设计滤波器对所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波后，获得每个采样点位置的滤波值；

将所有采样点按照设定的尺寸划分出至少一个待分析区域；

将每个待分析区域内的最大滤波值和最小滤波值获取每个待分析区域的峰谷（PV）值；

将所有待分析区域的 PV 值按照升序排列后，根据设定的百分位数的选取 PV 值以作为所述晶圆的量测纳米形貌值。

在上述示例中，当采样点处于晶圆边缘附近，且滤波器的作用范围超出晶圆表面的边缘范围时，在进行滤波过程中，可以将超出晶圆表面的边缘范围的滤波器的作用范围部分采用插值填充的方式补充数据，也可以不填充。插值填充的方法可以是线性外推，对称插值，三次样条插值等，本公开对此不做赘述。

在上述示例中，对于待分析区域的划分可以根据特定的表面形貌测量和分析需求来确定。在本公开中，待分析区域是按照均匀网格划分得到，即在晶圆表面上，将数据划分成若干均匀的小网格，每个网格作为一个待分析区域且每个网格的尺寸均为 10*10 微米或 20*20 微米的正方形。

在上述示例中，每个待分析区域的 PV 值进行升序排列之后，可以根据特定的百分位数，比如 99%，99.5%等选定倒数第 N 个次序的 PV 值作为所述晶圆的量测纳米形貌值。

对于图 1 所示的技术方案，在一些可能的实现方式中，所述方法还包括预测函数的获取过程，具体来说，该过程可以包括：

根据历史晶圆在完成当前加工工序后的量测纳米形貌值与所述历史晶圆在完成所述后序加工工序后的量测纳米形貌值进行数学建模拟合，通过线性拟合或多项式拟合的方式获得所述预测函数。

对于上述实现方式，详细说明，无论是在完成当前加工工序后的量测纳米

形貌值，还是完成后序加工工序后的量测纳米形貌值，均可以通过对所述历史晶圆的表面形貌量测数据利用所述阶跃式设计滤波器进行滤波以及数据处理，获得所述历史晶圆的量测纳米形貌值。在具体实施过程中，与前述方案中，关于晶圆的量测纳米形貌值的具体获取过程相同，本公开对此不做赘述。

对于本实现方式，在一些示例中，通过线性拟合或多项式拟合的方式获得所述预测函数的具体实施细节可以包括：

首先，将历史晶圆在完成当前加工工序后的量测纳米形貌值和该历史晶圆在完成当前加工工序后的纳米形貌值整理为数据集，比如以矩阵的形式存储，矩阵中的每一行对应一个样本。

接着，根据实际情况选择合适的预测函数 $f(nt) = NT$ ，比如线性函数、多项式函数、指数函数、对数函数等。以选择用多项式拟合为例，对于多项式拟合，通常使用最小二乘法来拟合数据，即通过最小化实际观测值 NT 值与拟合值($f(nt)$ 值)之间的残差平方和来确定预测函数 $f(nt)$ 的参数，最终得到能够在实际生产中应用的预测函数。

基于前述技术方案，本公开以一具体实施例进行阐述，在该实施例中，以经过线切割之后的100张半径为150mm裸晶圆为例，对每张裸晶圆按照边缘去除量(EE)为4mm去除边缘之后，采用电容法采样量测其表面的高度数据，得到每张裸晶圆的表面形貌量测数据。比如，按照以晶圆表面圆心为极点的极坐标系均匀采样，即每 45° 量测一条直径方向，并且每个直径方向上的采样间隔为4mm，在该极坐标系下，就能够得到 8×37 个采样点的表面形貌量测数据，从整个晶圆表面整体上看，每个采样点可以看成是一个像素点。

接着，通过前述技术方案的滤波器对每个采样点的表面形貌量测数据进行滤波后，将所有采样点经滤波后的滤波值按照 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的尺寸划分待分析区域，针对每个待分析区域内，根据每个像素点(采样点)的滤波值确定该待分析区域的PV值。将这些所有待分析区域的PV值按照升序排列后，根据特定的百分位数，比如99%，99.5%等选定倒数第N个次序的PV值作为该张裸晶圆在完成线切割后的量测纳米形貌值。

然后，将所有 100 张裸晶圆在完成线切割后的量测纳米形貌值分别通过拟合函数计算出 100 张裸晶圆的预测纳米形貌值，在本实施例中，拟合函数通过历史晶圆的数据通过线性拟合获得，如图 2 中的虚线直线所示。在本实施例中，预测函数为 $NT=1.9785*nt+5.9023$ 。其中， nt 表示在完成线切割后的量测纳米形貌值， NT 表示预测纳米形貌值。

最后，以后序加工工序为 CMP 为例，根据这 100 张裸晶圆在经过 CMP 之后的实际纳米形貌值与预测纳米形貌值分析是否具有相关性，继续参见图 2，以线切割后的预测纳米形貌值和 CMP 之后的实际纳米形貌值为坐标，本公开选取的 100 片晶圆的预测纳米形貌值和实际纳米形貌值如图 2 中的点所示。为了验证预测纳米形貌值（预测 NT 值）和实际纳米形貌值（实际 NT 值）是否具有相关性，根据预测 NT 值与实际测量的 NT 值计算拟合曲线与实际数据之间的残差或者计算拟合曲线的 R^2 值等指标。对于本实施例所选取的 100 片晶圆，预测 NT 值和实际 NT 值相关性如表 2 所示。

数据量	~100pcs
(预测 NT-实际 NT) R^2	0.485

表 2

从表 2 可以看出，预测 NT 值和实际 NT 值之间具备相关性。

基于前述技术方案所提供的晶圆表面纳米形貌的预测方法，所述晶圆的预测纳米形貌值在 2mm*2mm 的规格小于 5 nm，和/或在 10mm*10mm 的规格小于 10 nm 时，所述晶圆的纳米形貌值为在 2mm*2mm 的规格小于 5 nm，10mm*10mm 的规格小于 10 nm。

需要说明的是，获取预测纳米形貌值的加工工序处于获取所述晶圆的纳米形貌值之前。例如，预测纳米形貌值可以在线切割工序后获取得到，晶圆内的纳米形貌值可以在 CMP 工序之后获取得到。或者，预测纳米形貌值可以在 CMP 工序之后获取得到，晶圆内的纳米形貌值可以在晶圆流入至后端半导体制造工艺时获取得到，本公开对此不做赘述。

基于前述技术方案相同的发明构思，参见图 3，其示出了本公开提供的一种晶圆表面纳米形貌的预测装置 30，所述装置 30 包括：滤波部分 301 以及预测部分 302；其中，

所述滤波部分 301，经配置为在晶圆的加工过程中，利用阶跃式设计滤波器对获取的所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波以及数据处理，获得所述晶圆的量测纳米形貌值 nt ；

所述预测部分 302，经配置为基于预测函数 $f(nt) = NT$ ，根据所述晶圆的量测纳米形貌值 nt 预测后序加工工序后所述晶圆的预测纳米形貌值 NT 。

在一些示例中，所述阶跃式设计滤波器尺寸根据目标波长范围、采样间距以及所述晶圆的表面形貌量测数据的采样点位置设计，相应地，所述滤波部分 301，经配置为：

基于所述目标波长范围，利用双高斯低通滤波函数确定滤波器；

根据所述目标波长范围的波长上限确定所述滤波器临界尺寸；

根据采样点位置进行边缘收缩处理；

当所述采样点位置与所述晶圆表面圆心之间的距离小于或等于所述临界尺寸时，确定所述阶跃式设计滤波器的半径为第一半径；或者

当所述采样点位置与所述晶圆表面圆心之间的距离大于所述临界尺寸时，确定所述阶跃式设计滤波器的半径为第二半径；其中，所述第一半径大于所述第二半径。

在一些示例中，所述滤波部分 301，经配置为：

确定低通滤波范围覆盖至所述目标波长范围的上限的所述第一高斯低通滤波函数；

确定低通滤波范围覆盖至根据所述目标波长范围的下限的所述第二高斯低通滤波函数；

根据所述第一高斯低通滤波函数 G_{LP1} 与所述第二高斯低通滤波函数 G_{LP2} 按照下式获得用于描述所述滤波器的函数 G_{DHP} ：

$$G_{DHP} = G_{LP1} (1 - G_{LP2})。$$

在一些示例中，所述滤波部分 301，经配置为：

利用所述阶跃式设计滤波器对所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波后，获得每个采样点位置的滤波值；

将所有采样点按照设定的尺寸划分出至少一个待分析区域；

将每个待分析区域内的最大滤波值和最小滤波值获取每个待分析区域的峰谷 PV 值；

将所有待分析区域的 PV 值按照升序排列后，根据设定的百分位数的选取 PV 值以作为所述晶圆的量测纳米形貌值。

参见图 4，所述装置 30 还包括：所述拟合部分 303，经配置为：根据历史晶圆在完成当前加工工序后的量测纳米形貌值与所述历史晶圆在完成所述后序加工工序后的量测纳米形貌值进行数学建模拟合，通过线性拟合或多项式拟合的方式获得所述预测函数。

在一些示例中，所述滤波部分 301，还被配置成通过对所述历史晶圆的表面形貌量测数据利用所述阶跃式设计滤波器进行滤波以及数据处理，获得所述历史晶圆的量测纳米形貌值。

在一些示例中，参见图 4，所述装置 30 还包括：反馈部分 304，经配置为：

根据所述晶圆的预测纳米形貌值的统计量确定执行当前已完成的前端加工工序的设备的工作状态；或者，

根据所述晶圆的预测纳米形貌值与设定的评估指标的比较结果确定所述晶圆是否继续进行后序加工工序；或者，

根据所述晶圆的预测纳米形貌值调整所述当前已完成的加工工序的工艺参数。

需要说明的是，对于上述装置中，各“部分”所配置功能的具体实现，可参见前述晶圆表面纳米形貌的预测方法中相对应步骤的实现方式及其示例，在此不再赘述。

请参考图 5，其示出了本公开一个示例性实施例提供的计算设备的结构方框图。在一些示例中，计算设备 50 可以为智能手机、智能手表、台式电脑、手

提电脑、虚拟现实终端、增强现实终端、无线终端和膝上型便携计算机等设备中的至少一种。计算设备 50 具有通信功能，可以接入有线网络或无线网络。计算设备 50 可以泛指多个终端中的一个，本领域技术人员可以知晓，上述终端的数量可以更多或更少。在一些示例中，计算设备 50 可以基于所接入的有线网络或无线网络接收数据。可以理解地，计算设备 50 承担本公开技术方案的计算及处理工作，本公开对此不作限定。

如图 5 所示，本公开中的计算设备可以包括一个或多个如下部件：处理器 510 和存储器 520。

可选地，处理器 510 利用各种接口和线路连接整个计算设备内的各个部分，通过运行或执行存储在存储器 520 内的指令、程序、代码集或指令集，以及调用存储在存储器 520 内的数据，执行计算设备的各种功能和处理数据。可选地，处理器 510 可以采用数字信号处理（Digital Signal Processing, DSP）、现场可编程门阵列（Field-Programmable Gate Array, FPGA）、可编程逻辑阵列（Programmable Logic Array, PLA）中的至少一种硬件形式来实现。处理器 510 可集成中央处理器（Central Processing Unit, CPU）、图像处理器（Graphics Processing Unit, GPU）、神经网络处理器（Neural-network Processing Unit, NPU）和基带芯片等中的一种或几种的组合。其中，CPU 主要处理操作系统、用户界面和应用程序等；GPU 用于负责触摸显示屏所需要显示的内容的渲染和绘制；NPU 用于实现人工智能（Artificial Intelligence, AI）功能；基带芯片用于处理无线通信。可以理解的是，上述基带芯片也可以不集成到处理器 510 中，单独通过一块芯片进行实现。

存储器 520 可以包括随机存储器（Random Access Memory, RAM），也可以包括只读存储器（Read-Only Memory, ROM）。可选地，该存储器 520 包括非瞬时性计算机可读介质（non-transitory computer-readable storage medium）。存储器 520 可用于存储指令、程序、代码、代码集或指令集。存储器 520 可包括存储程序区和存储数据区，其中，存储程序区可存储用于实现操作系统的指令、用于至少一个功能的指令（比如触控功能、声音播放功能、图像播放功能等）、

用于实现以上各个方法实施例的指令等；存储数据区可存储根据计算设备的使用所创建的数据等。

除此之外，本领域技术人员可以理解，上述附图所示出的计算设备的结构并不构成对计算设备的限定，计算设备可以包括比图示更多或更少的部件，或者组合某些部件，或者不同的部件布置。比如，计算设备中还包括显示屏、摄像组件、麦克风、扬声器、射频电路、输入单元、传感器（比如加速度传感器、角速度传感器、光线传感器等等）、音频电路、WiFi 模块、电源、蓝牙模块等部件，在此不再赘述。

本公开还提供了一种计算机可读存储介质，该计算机可读存储介质存储有至少一条指令，所述至少一条指令用于被处理器执行以实现如上各个实施例所述的晶圆表面纳米形貌的预测方法。

本公开还提供了一种计算机程序产品，该计算机程序产品包括计算机指令，该计算机指令存储在计算机可读存储介质中；计算设备的处理器从计算机可读存储介质读取该计算机指令，处理器执行该计算机指令，使得该计算设备执行以实现上述各个实施例所述的晶圆表面纳米形貌的预测方法。

本公开还提供了一种晶圆，该晶圆经由上述各个实施例所述的晶圆表面纳米形貌的预测方法得到的预测纳米形貌值在 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的规格小于 5 nm ，和/或在 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的规格小于 10 nm 时，最终得到的晶圆的纳米形貌值为在 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的尺寸内小于 5 nm ，在 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的尺寸内小于 10 nm 。

本领域技术人员应该可以意识到，在上述一个或多个示例中，本公开实施例所描述的功能可以用硬件、软件、固件或它们的任意组合来实现。当使用软件实现时，可以将这些功能存储在计算机可读介质中或者作为计算机可读介质上的一个或多个指令或代码进行传输。计算机可读介质包括计算机存储介质和通信介质，其中通信介质包括便于从一个地方向另一个地方传送计算机程序的任何介质。存储介质可以是通用或专用计算机能够存取的任何可用介质。

需要说明的是：本公开所记载的技术方案之间，在不冲突的情况下，可以任意组合。

以上所述，仅为本公开的具体实施方式，但本公开的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的技术人员在本公开揭露的技术范围内，可轻易想到变化或替换，都应涵盖在本公开的保护范围之内。因此，本公开的保护范围应以所述权利要求的保护范围为准。

权利要求书

1、一种晶圆表面纳米形貌的预测方法，所述方法包括：

在晶圆的加工过程中，利用阶跃式设计滤波器对获取的所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波以及数据处理，获得所述晶圆的量测纳米形貌值 nt ；

基于预测函数 $f(nt) = NT$ ，根据所述晶圆的量测纳米形貌值 nt 预测后序加工工序后所述晶圆的预测纳米形貌值 NT 。

2、根据权利要求1所述的方法，其中，所述阶跃式设计滤波器尺寸根据目标波长范围、采样间距以及所述晶圆的表面形貌量测数据的采样点位置设计，相应地，所述方法包括：

基于所述目标波长范围，利用双高斯低通滤波函数确定滤波器；

根据所述目标波长范围的波长上限确定所述滤波器临界尺寸；

根据采样点位置进行边缘收缩处理；

当所述采样点位置与所述晶圆表面圆心之间的距离小于或等于所述临界尺寸时，确定所述阶跃式设计滤波器的半径为第一半径；或者

当所述采样点位置与所述晶圆表面圆心之间的距离大于所述临界尺寸时，确定所述阶跃式设计滤波器的半径为第二半径；其中，所述第一半径大于所述第二半径。

3、根据权利要求2所述的方法，其中，所述基于所述目标波长范围，利用双高斯低通滤波函数确定滤波器，包括：

确定低通滤波范围覆盖至所述目标波长范围的上限的第一高斯低通滤波函数；

确定低通滤波范围覆盖至所述目标波长范围的下限的第二高斯低通滤波函数；

根据所述第一高斯低通滤波函数 G_{LP1} 与所述第二高斯低通滤波函数 G_{LP2} 按照下式获得用于描述所述滤波器的函数 G_{DHP} ：

$$G_{DHP} = G_{LP1} (1 - G_{LP2})。$$

4、根据权利要求2所述的方法，其中，所述利用阶跃式设计滤波器对获取的所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波以及数据处理，获得所述晶圆的量测纳米形貌值，包括：

利用所述阶跃式设计滤波器对所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波后，获得每个采样点位置的滤波值；

将所有采样点按照设定的尺寸划分出至少一个待分析区域；

将每个待分析区域内的最大滤波值和最小滤波值获取每个待分析区域的峰谷PV值；

将所有待分析区域的PV值按照升序排列后，根据设定的百分位数的选取PV值以作为所述晶圆的量测纳米形貌值。

5、根据权利要求1所述的方法，其中，所述方法包括：

根据历史晶圆在完成当前加工工序后的量测纳米形貌值与所述历史晶圆在完成所述后序加工工序后的量测纳米形貌值进行数学建模拟合，通过线性拟合或多项式拟合的方式获得所述预测函数。

6、根据权利要求5所述的方法，其中，所述方法包括：

通过对所述历史晶圆的表面形貌量测数据利用所述阶跃式设计滤波器进行滤波以及数据处理，获得所述历史晶圆的量测纳米形貌值。

7、一种晶圆表面纳米形貌的预测装置，所述装置包括：滤波部分以及预测部分；其中，

所述滤波部分，经配置为在晶圆的加工过程中，利用阶跃式设计滤波器对获取的所述晶圆的表面形貌量测数据进行滤波以及数据处理，获得所述晶圆的量测纳米形貌值 nt ；

所述预测部分，经配置为基于预测函数 $f(nt) = NT$ ，根据所述晶圆的量测纳米形貌值 nt 预测后序加工工序后所述晶圆的预测纳米形貌值 NT 。

8、一种计算设备，所述计算设备包括：处理器和存储器；所述处理器用于执行所述存储器中存储的指令，以实现如权利要求1至6任一所述的晶圆表面纳米形貌的预测方法。

9、一种计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质存储有至少一条指令，所述至少一条指令用于被处理器执行以实现如权利要求 1 至 6 任一所述的晶圆表面纳米形貌的预测方法。

10、一种晶圆，所述晶圆的预测纳米形貌值 NT 在 2mm*2mm 规格小于 5 nm, 和/或 10mm*10mm 规格小于 10 nm 时, 所述晶圆的纳米形貌值为 2mm*2mm 规格小于 5 nm, 10mm*10mm 规格小于 10 nm。