

晶圆及其粗糙度的改善方法、装置、设备及介质

相关申请的交叉引用

本申请主张在 2024 年 08 月 14 日在中国提交的中国专利申请 No. 202411114022 .0 的优先权，其全部内容通过引用包含于此。

技术领域

本申请涉及半导体制造技术领域，尤其涉及一种晶圆及其粗糙度的改善方法、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、化学机械抛光（Chemical Mechanical Polishing, CMP）以及清洗等加工工序，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。表面粗糙度是晶圆表面形貌参数中的重要的一种性能参数。

根据上述晶圆制造过程中的各加工工序，通过线切割设备将单晶硅棒切割得到裸晶圆之后，该裸晶圆就已经具备一个初始的表面状态，而后续的研磨、刻蚀、磨削、CMP 以及清洗等各加工工序只是在该初始的表面状态的基础上逐步修复表面损伤的作用。基于此，如果期望得到表面粗糙度指标更优的单晶硅晶圆，那么就需要在线切割工序阶段就开始进行工艺优化，提高线切割工序得到的裸晶圆的表面粗糙度，从而提升最终单晶硅晶圆的表面粗糙度指标。

在线切割工序中，磨料颗粒尺寸的均一性属于一种表征切割能力工艺参数，具体来说，通过对磨料颗粒抽样后进行尺寸统计，并以该样本的统计值来估计磨料颗粒总体的切割能力。对于以上阐述的磨料颗粒尺寸的均一性的获取过程，其抽样的方式以及统计结果对磨料颗粒总体真实的切割能力的估计程度是无法验证的。

发明内容

本申请提供了一种晶圆及其粗糙度的改善方法、装置、设备及介质。以磨料颗粒的形状与正多面体的几何相似度作为切割能力的评估指标，并通过该指标对线切割工序的工艺进行优化，降低了晶圆表面粗糙度。

本申请的技术方案是这样实现的：

第一方面，本申请提供了一种晶圆粗糙度的改善方法，所述方法包括：

当完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值；

当所述指标值小于或等于设定的性能阈值，向执行线切割工序的设备中补充新的切割浆料。

第二方面，本申请提供了一种晶圆粗糙度的改善装置，所述装置包括：确定部分、比较部分以及工序改善部分；其中，

所述确定部分，被配置成当完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值；

所述比较部分，被配置成比较所述指标值与设定的性能阈值，并且当所述指标值小于或等于设定的性能阈值时，触发所述工序改善部分；

所述工序改善部分，被配置成向执行线切割工序的设备中补充新的切割浆料。

第三方面，本申请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粗糙度的改善方法。

第四方面，本申请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粗糙度的改善方法。

第五方面，本申请提供了一种晶圆，所述晶圆经由第一方面所述的晶圆

粗糙度的改善方法改善后的线切割工艺得到，并且在目标波长范围的粗糙度为以下至少之一：

当所述目标波长范围为 0 至 1.8 微米波长时，所述粗糙度为 0.01 至 1nm；

当所述目标波长范围为 1.8 至 22 微米波长时，所述粗糙度为 1 至 3nm；

当所述目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长时，所述粗糙度为 3 至 30nm。

本申请提供了一种晶圆及其粗糙度的改善方法、装置、设备及介质。当完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征当前使用的切割浆料的切割能力的指标值，并且在该指标值小于或等于设定的性能阈值的情况下向执行线切割工序的设备中补充新的切割浆料。不仅可以准确地评估磨料颗粒的切割性能，而且及时在切割性能劣化的情况下补充新的切割浆料，使得切割浆料的切割性能保持在良好的水平，降低了晶圆表面粗糙度。

附图说明

通过以下参照附图的描述，本申请的实施方式的特征和优点将变得更加容易理解。附图并非按比例绘制，可放大或缩小一些特征以显示特定部件的细节。在附图中：

图 1 为本申请提供的示例性的多线切割设备组成示意图。

图 2 为本申请提供了一种晶圆粗糙度的改善方法流程示意图。

图 3 为本申请提供的磨料颗粒的微观图像示意图。

图 4 为本申请提供了一种滤波器在晶圆表面滑动的示意图。

图 5 为本申请提供了一种划分得到的分析区域的示意图。

图 6 为本申请提供了一种晶圆粗糙度的改善装置组成示意图。

图 7 为本申请提供了一种计算设备的结构示意图。

具体实施方式

下面将结合本申请中的附图，对本申请中的技术方案进行清楚、完整地

描述。

参见图 1，其示出了适用于本申请技术方案示例性的多线切割设备 1，该设备 1 可以包括线切割单元 11 和承载单元 12。在本申请的一些实施例中，线切割单元 11 可以在竖向方向上位于承载单元 12 的下方。在本申请未示出的实施例中，线切割单元 11 也可以在竖向方向上位于承载单元 12 的上方，在此不做赘述。

线切割单元 11 可以包括多个线轴 111、切割线 112 和切割浆料供给单元 113，切割线 112 缠绕于线轴 111 上以形成由相互平行的切割线段构成的阵列。下面参照图 1 以线轴 111 的数量为 2 个作为示例进行说明。两个线轴 111 以轴线彼此平行的方式相对设置。两个切割浆料供给单元 113 分别位于所述两个线轴 111 的正上方，用于向两个线轴 111 和切割线 112 喷淋切割浆料，该切割浆料可以是一种磨料颗粒悬浮的液体介质。

线轴 111 和切割线 112 朝向和远离承载单元 12 的往复运动方向如图 1 中的实线箭头所示，往复运动速度示例性地可以为 10m/s 至 15m/s。承载单元 12 用于装载并固定待加工硅棒 S，可以包括基台 121 以及中间件 122。待加工硅棒 S 经由中间件 122 固定至基台 121，例如待加工硅棒可以通过其周向表面粘接至基台 121 的下表面，从而固定至基台 121。

对于图 1 中所示的线切割设备 1，可以通过使承载单元 12 沿竖向方向朝向切割线段阵列移动以使待加工硅棒靠近切割线段阵列。当切割线段阵列与待加工硅棒 S 相互接触之后，利用切割线段阵列中的每个切割线段阵列沿其延伸方向的运动以及承载单元 12 继续沿竖向方向朝向切割线段阵列的进给运动实现对待加工硅棒 S 的切割。需要说明的是，本申请通过升降装置（图中未示出）实现线承载单元 12 的移动，可以理解地，本领域技术人员还可以根据实际需要及实施场景通过其他方式实现承载单元 12 的移动，本申请对此不做赘述。

线轴 111 的周向表面上开设有多个线槽 111A，用于引导和固定切割线 112，确保其在切割过程中保持稳定的张力和位置。通常，线槽 111A 在线轴 111 的周向表面上均匀分布。

基于上述图 1 所示的多线切割设备 1，钨钢等材质的切割线 112 在往复

运动过程中，通过携带的切割浆料中的磨料颗粒与待加工硅棒 S 材料之间的微观作用机理可以被称之为“滚动-压痕”模型，即磨料颗粒被切割线和切割浆料流体施压后嵌入待加工硅棒 S 的材料表面，然后经过切割线和切割浆料流体的位移，以嵌入的磨料颗粒中的未嵌入部分为力臂，杠杆作用撬开待加工硅棒 S 的材料表面的局部区域，形成局部区域的待加工硅棒 S 的材料去除。

基于上述微观作用机理，可以获知：待加工硅棒 S 的材料去除依赖于磨料颗粒嵌入材料表面的能力。由于硅在常温下是脆性材料，磨料颗粒不宜嵌入待加工硅棒 S 表面太深，否则经过杠杆撬动后很容易造成大面积的损伤，这样尽管提高了材料的去除速率，但会造成非常差的表面状态。

需要说明的是，由于杠杆作用的容易程度依赖于力臂的长度，发明人发现理想的磨料颗粒形状应当具有适宜的楞长。此外，发明人还发现增加角的个数有利于增大磨料颗粒嵌入待加工硅棒 S 材料表面的概率，因此发明人产生如下认知：理想的磨料颗粒除了应当具有适宜的棱长，还应当具有尽可能多的立体角（即棱角）。

对于一个立体的几何体来说，如果需要同步满足尽可能多的棱角以及每个棱角都具有较大的棱长，那么只有正多面体能够同时符合上述要求。但是实际生产磨料颗粒过程中，磨料颗粒的形状由于其在工业加工过程中关于动力学和热力学控制条件的限制，很难做到符合正多面体的形状进行生产，实际应用的磨料颗粒形状都是呈无规则形貌。

基于此，本申请期望利用磨料颗粒形状偏离正多面体结构的程度来描述磨料颗粒的切割能力，以能够准确地评估磨料颗粒的切割性能，并通过该种磨料颗粒的切割能力对线切割工艺进行改善，从而改善晶圆的粗糙度。如图 2 所示，其示出了本申请提供的一种晶圆粗糙度的改善方法，所述方法包括步骤 S210 至 S220。

在步骤 S210 中，当完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值。

在本申请中，对于晶圆表面形貌的均一程度，体现于晶圆表面上各点之

间的高度差值，这种高度差值在晶圆表面会从整体上呈现出各点高度值的波动现象。基于该认识，本申请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，波信号的波长越小，其所表征高度值波动现象的区域尺寸越小；波信号的波长越大，其所表征高度值波动现象的区域尺寸越大。

在以上阐述的基础上，为了评估或量测出更加微小的区域的粗糙度，本申请可以采用期望测量粗糙度的区域尺寸对上述波动现象进行滤波，从而获得期望测量粗糙度的区域对应的波长范围内的波信号数据，并根据该波信号数据计算获得出晶圆在该区域尺寸标准下的粗糙度。

在获得完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度之后，可以通过设定的粗糙度阈值来表征粗糙度是否良好。以目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长为例，该粗糙度阈值可以设置为 30nm。即当裸晶圆在目标波长范围的粗糙度数值大于或等于 30nm 时，则表示多线切割设备 1 的切割能力劣化严重。多线切割设备 1 的切割能力的劣化现象可能是切割浆料的切割能力劣化而导致的，也可以是多线切割设备 1 中的其他组件或者线切割工序中的其他工艺参数所导致的。因此，在多线切割设备 1 的切割能力劣化严重的情况下，本申请对于切割浆料的切割能力进行评估，从而使得在确定切割浆料的切割能力出现劣化之后，执行步骤 S220 以提高切割浆料的切割能力来提升多线切割设备 1 的切割能力，进而对晶圆粗糙度进行改善。

需要说明的是，切割浆料的切割能力来自于切割浆料中的磨料颗粒，当磨料颗粒的切割能力降低时，切割浆料的切割能力也相应降低。基于前述发明人关于理想的磨料颗粒在形状上的要求的认知且正多面体结构符合该要求，在本申请中，磨料颗粒的切割能力可以磨料颗粒的形状偏离正多面体结构的程度进行描述，即磨料颗粒的形状偏离正多面体结构的程度越大，切割浆料的切割能力越低；磨料颗粒的形状偏离正多面体结构的程度越小，切割浆料的切割能力越高。在一些示例中，对于当前使用的切割浆料中磨料颗粒，可以基于其与正多面体的几何相似度确定为用于表征切割浆料的切割能力的指标值。

在步骤 S220 中，当所述指标值小于或等于设定的性能阈值，向执行线切割工序的设备中补充新的切割浆料。

在本申请中，采用设定的性能阈值来评估切割浆料的切割能力的劣化程度，比如，当前述步骤 S210 所得到的用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值小于或等于该性能阈值时，则表示切割浆料中的磨料颗粒的切割能力均出现了较为严重的劣化，如果继续使用，则会导致线切割得到的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度增加。因此，需要对切割能力劣化的磨料颗粒进行改善。在线切割过程中，切割浆料通常是循环使用的，当切割浆料中的磨料颗粒出现了较为严重的劣化的时候，则需要补充新的切割浆料。对于在具体实施过程中采用的补充手段，在一些示例中，可以将执行线切割工序的多线切割设备停机，随后将多线切割设备中用于存储切割浆料的容器内的切割浆料全部排出之后，更换新的切割浆料。在一些示例中，为了避免频繁停机对设备造成不利影响，降低生产效率，该补充手段也可以是向用于存储切割浆料的容器内补充新的切割浆料，使得新补充的切割浆料与该容器内已有的切割浆料充分混合，从而提升已经严重劣化的切割能力达到性能阈值所对应的切割能力的要求。

对于图 2 所示的技术方案，当完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征当前使用的切割浆料的切割能力的指标值，并且在该指标值小于或等于设定的性能阈值的情况下向执行线切割工序的设备中补充新的切割浆料。不仅可以准确地评估磨料颗粒的切割性能，而且及时在切割性能劣化的情况下补充新的切割浆料，使得切割浆料的切割性能保持在良好的水平，降低了晶圆表面粗糙度。

针对图 2 所示的技术方案，在一些实现方式中，当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度的获取过程可以包括：

通过扫描电子显微镜扫描所述当前使用的切割浆料，以采集得到在所述当前使用的切割浆料中的多个磨料颗粒的微观图像；

通过对采集的每个磨料颗粒的微观图像进行图像分析，获得所述采集的每个磨料颗粒的每个边长的长度、最大对角线长度以及立体角的数量；

根据采集的每个磨料颗粒的每个边长的长度以及立体角的数量确定每个磨料颗粒与正多面体的几何相似度。

具体来说,在线切割过程中,切割浆料通过机械搅拌的方式均匀混合后,均匀地分散在切割线上。本申请利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)在设定的倍率下(比例尺下)按照设定的步进对当前使用的切割浆料进行扫描,从而得到多张磨料颗粒的微观图像,如图3所示,图3中显著地显示了3个采集得到的磨料颗粒的微观图像。对于采集的每个磨料颗粒的微观图像,可以通过已训练成熟的用于进行图像实例分割的深度学习模型,如mask-RCNN等对微观图像进行分析,从而得到采集的每个磨料颗粒的三个形状参数,例如采集的每个磨料颗粒的所有边长的长度、最大对角线长度以及所包含的立体角(棱角)的数量。

在上述三个形状参数中,所有边长的长度以及立体角的数量能够用来表征磨料颗粒与正多面体的形状相似度,基于此,在本申请中,可以根据每个磨料颗粒的立体角的数量与所有边长的长度方差的差值计算出所述每个磨料颗粒与正多面体的几何相似度。具体来说,定义磨料颗粒与正多面体的几何相似度指标为LR,用来表征磨料颗粒与正多面体的几何形状的相似度的大小。对于任一磨料颗粒,其LR指标可以通过下式计算得到:

$$LR = c - \sigma_{(a_i)}^2$$

在上式中, c 表示磨料颗粒的立体角数量, a_i 表示磨料颗粒的边的数量, $\sigma_{(a_i)}^2$ 表示磨料颗粒的所有边的边长的方差,可以理解地, c 越大, $\sigma_{(a_i)}^2$ 越小,则LR值越大,表示磨料颗粒与正多面体的几何相似度越高。

基于上述实现方式,在一些示例中,在获得磨料颗粒与正多面体的几何相似度之后,步骤S210所述的基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值,包括:

获取采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度的中位值;

获取采集的所有磨料颗粒的最大对角线长度的方差;

根据采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度的中位值以及所述采集的所有磨料颗粒的最大对角线长度的方差获取所述用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值。

对于上述示例,具体来说,在获得采集的每个磨料颗粒的LR值之后,可

以将所有微观图像的磨料颗粒的 LR 值进行统计, 以获得采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度大小 LRS, 比如将采集的所有磨料颗粒的 LR 值进行归一化处理后, 取中位数作为 LRS, 该 LRS 同样也表示了当前适用的切割浆料的正多面体相似度, 可以作为一种对切割浆料的切割能力的表征参数。

此外, 在本申请中, 对每一个磨料颗粒, 将微观图像中像素的最远距离确定为该磨料颗粒的最大对角线长度 (DL, Dialog Length) 值。接着, 将所有微观图像中的所有磨料颗粒的 DL 值统计完毕后进行归一化处理, 并将归一化处理后的数值的方差作为另一种对切割浆料的切割能力的表征参数, 比如该表征参数定义为 DLS (dialog length statistic)。具体来说, DLS 可以通过下式计算得到:

$$DLS = \sigma_{(DL_k)}^2$$

在上式中, DL_k 表示采集的所有磨料颗粒的归一化后的 DL 值, $\sigma_{(DL_k)}^2$ 表示采集的所有磨料颗粒的归一化后的 DL 值的方差。

基于上述 LRS 以及 DLS, 可以通过下式计算得到所述用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值 SP:

$$SP = LRS/DLS。$$

通过上式可知, 当磨料颗粒的几何形状都很接近正多面体的几何形貌时候, LRS 的值会变大; 当磨料颗粒的尺寸很均一的时候, DLS 会变小。结合这两种对切割浆料的切割能力的表征参数, 在上述两种情况下, 能够反映或表征切割浆料的切割能力的指标值 SP 会较大。

针对图 2 所示的技术方案, 在一些实现方式中, 所述方法还包括:

对于所述裸晶圆的表面的每个采样点, 通过单点量测方案获取每个采样点处关于晶圆表面高度的原始量测数据;

基于所述裸晶圆的表面的全部采样点的原始量测数据, 针对每个采样点通过与目标波长范围对应的滤波器获取每个采样点在所述目标波长范围的波信号;

基于所有采样点在所述目标波长范围的波信号的振幅统计值确定所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度。

对于上述实现方式, 具体来说, 单点量测方案也就是一次测量过程仅能

够量测出一个采样点处量测数据的方案。在一些示例中，可以采用接触式量测方案，比如利用探针与裸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，裸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裸晶圆表面的高度数据，即关于晶圆表面高度的原始量测数据。在另一些示例中，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。

通过上述单点量测方案对裸晶圆表面的每个采样点完成量测之后，所有采样点的原始量测数据就能够体现出各采样点之间的高度差值，从整个晶圆表面可以看成是一个三维的波动现象。对于该波动现象，可以将叠加形成该波动现象的不同波长的波信号的振幅用来表示与波长对应尺寸的区域内的的高度差值。

在一些实例中，目标波长范围包括：0 至 1.8 微米波长、1.8 至 22 微米波长以及 22 微米波长至 20 毫米波长中的至少一个波长范围。以目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长为例，其包括波长上限和波长下限。

在一些示例中，为了获得每个采样点在所述目标波长范围的波信号，首先利用低通滤波函数的方式从波动现象中滤除波长高于波长上限的波信号，随后利用高通滤波函数的方式滤除低于波长下限的波信号，最终得到在目标波长范围内的波信号。具体来说，上述滤波器为圆形滤波器，并且该圆形滤波器由双高斯滤波函数组成，其中，第一高斯滤波函数 GLP1 可以是低通滤波范围覆盖至所述目标波长范围的上限的高斯低通滤波函数；第二高斯滤波函数 GLP2 可以是低通滤波范围覆盖至所述目标波长范围的下限的高斯低通滤波函数，并通过 $(1 - \text{GLP2})$ 获得高通滤波函数。基于上述第一高斯滤波函数和第二高斯滤波函数，所述圆形滤波器 GDHP 可以表示为 $\text{GDHP} = \text{GLP1} (1 - \text{GLP2})$ 。在本申请中，以上述示例的圆形滤波器为例，如图 4 所示，可以将由箭头所指示的圆形滤波器在裸晶圆表面上按照采样点进行滑动，利用处于圆形滤波器中心的采样点以及圆形滤波器的作用范围所覆盖的其他采样点的原始量测数据通过该圆形滤波器滤波得到每个采样点在所述目标波长范围的波信号。

需要说明的是，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，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中心，其对应的滤波器的作用范围应当减小，或称之为收缩。因此，所述滤波器的作用范围的半径由所述采样点与所述裸晶圆中心的距离确定。

在本申请中，设定一临界距离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。当所述采样点与所述裸晶圆中心的距离小于或等于临界距离时，所述滤波器的作用范围的半径为第一半径；当所述采样点与所述裸晶圆中心的距离大于临界距离时，所述滤波器的作用范围的半径为第二半径；其中，所述第一半径与第二半径均由所述目标波长范围的上限确定，并且第一半径大于第二半径。

基于上述示例，具体来说，收缩的方式可以是阶跃式，即当采样点与所述裸晶圆中心的距离大于临界距离时，第二半径固定设置为一小于第一半径的数值；也可以是渐变式，即第二半径随着采样点远离裸晶圆中心而逐渐减小。具体来说，当所述采样点与所述裸晶圆中心的距离大于临界距离时，所述第二半径为一小于第一半径的固定数值，或者，所述第二半径与所述采样点与所述裸晶圆中心的距离呈负相关关系。

对于上述实现方式，在通过滤波获得所有采样点在目标波长范围的波信号之后，在一些示例中，所述基于所有采样点在所述目标波长范围的波信号的振幅统计值确定所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度，包括：

将裸晶圆划分出多个分析区域；

根据每个分析区域内的采样点在所述目标波长范围的波信号的振幅值计算出每个分析区域在所述目标波长范围的波信号的振幅的极差；

根据所有分析区域在所述目标波长范围的波信号的振幅的极差计算出所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度指标。

对于上述示例，如图 5 所示，裸晶圆表面在按照 EE 去除边缘区域之后，剩余区域按照设定的尺寸，例如 10mm*10mm 的方形区域进行划分，从而能够得到能够呈现出完整方形的完整分析区域以及处于按照 EE 去除边缘区域之后剩余区域的边缘且无法呈现完整方形的非完整分析区域，这两个分析区

域组成了上述实现方式中的分析区域。

需要说明的是，晶圆表面所有采样点在所述目标波长范围的波信号，其包括了能够表征晶圆表面在目标波长范围对应尺寸区域内的表面形貌（即粗糙度）的所有信息，这些信息可以通过振幅的统计值进行表征，例如前述技术方案所提到的振幅的均值，极值，设定尺寸面积占比下的极值，极差，方差，标准差，中位数，众数等。

在本申请中，以极差为例，所述每个分析区域在所述目标波长范围的波信号的振幅统计值为所述每个分析区域内的采样点和插值点在所述目标波长范围的波信号的振幅值的极差；相应地，所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度指标为所有分析区域在所述目标波长范围的波信号的振幅值的极差的均值。

基于上述技术方案，本申请通过以下三个具体实施例进行阐述。

在实施例一中，以目标波长范围是 22 微米波长至 20 毫米波长为例，针对切割浆料循环使用的时长，按照上述技术方案获取经过线切割得到的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度以及用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值 SP 如下表 1 所示。

切割浆料循环使用时 长	SP	目标波长范围的粗糙 度
0h	7.7	5.7nm
5h	5.8	11.8nm
10h	3.1	18.4nm
15h	0.9	31.3nm
20h	0.4	37.8nm
25h	0.07	103.6nm
30h	0.07	121.8nm

表 1

通过表 1 可以看出，切割浆料在经过 10 小时的循环后，SP 值下降显著（由 3.1 下降至 0.9），与之相应的，目标波长范围的粗糙度也同样出现了显著的提高（由 18.4 上升至 31.3）可以看出，在线切割工艺过程中，新的切割

浆料在使用了 10 小时之后应该进行更新。

另外，在本实施例中，基于上述 10 小时的结论，分别在 10 小时之后（即第 15 小时）以及 20 小时之后（即第 25 小时），在已有切割浆料的基础上加入新的切割浆料。并且按照上述技术方案获取在目标波长范围的粗糙度以及 SP 值如表 2 所示。

切割浆料循环使用 时长	SP	目标波长范围的粗 糙度
0h	7.7	5.7nm
5h	5.8	11.8nm
10h	3.1	18.4nm
15h+1/2 新切割浆 料	2.9	21.3nm
20h	1.8	29.4nm
25h+1/2 新切割浆 料	2.2	26.7nm

表 2

通过表 2 可知，在切割浆料的切割能力劣化的情况下，可以通过加入新的切割浆料，以提升切割浆料整体的切割能力。

基于上述技术方案及具体实施例，通过由前述晶圆粗糙度的改善方法改善后的线切割工艺得到的晶圆，当所述目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长时，其在目标波长范围的粗糙度为 3 至 30nm。

在实施例二中，以目标波长范围是 1.8 微米波长至 22 微米波长为例，针对切割浆料循环使用的时长，按照上述技术方案获取经过线切割得到的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度以及用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值 SP 如下表 3 所示。

切割浆料循环使用时 长	SP	目标波长范围的粗糙 度
0h	7.7	1.8 nm
2h	7.1	2.2 nm

4h	5.7	2.9 nm
6h	4.8	5.3nm
8h	3.7	9.4nm
10h	3.1	11nm
12h	2.1	13.8nm

表 3

通过表 3 可以看出,切割浆料在经过 4 小时的循环后,SP 值下降至 4.8,并且与之相应的,目标波长范围的粗糙度出现了显著的提高(由 2.9 上升至 5.3)可以看出,在线切割工艺过程中,新的切割浆料在使用了 4 小时之后应该进行更新。

另外,在本实施例中,基于上述 4 小时的结论,分别在第 4 小时以及第 10 小时,在已有切割浆料的基础上加入新的切割浆料。并且按照上述技术方案获取在目标波长范围的粗糙度以及 SP 值如表 4 所示。

切割浆料循环使用时 长	SP	目标波长范围的粗糙 度
0h	7.7	1.8 nm
2h	7.1	2.2nm
4h+1/2 新切割浆料	6.8	2.5 nm
6h	6.2	2.9 nm
8h	5.4	3 nm
10h+1/2 新切割浆料	5.1	3 nm

表 4

通过表 4 可知,在切割浆料的切割能力劣化的情况下,可以通过加入新的切割浆料,以提升切割浆料整体的切割能力。

基于上述技术方案及具体实施例,通过由前述晶圆粗糙度的改善方法改善后的线切割工艺得到的晶圆,当所述目标波长范围为 1.8 微米波长至 22 微米波长时,其在目标波长范围的粗糙度为 1 至 3nm。

在实施例三中,以目标波长范围是 0 微米波长至 1.8 微米波长为例,针对切割浆料循环使用的时长,按照上述技术方案获取经过线切割得到的裸晶

圆在目标波长范围的粗糙度以及用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值 SP 如下表 5 所示。

切割浆料循环使用时 长	SP	目标波长范围的粗糙 度
0h	7.7	0.4 nm
1h	7.3	0.6 nm
2h	7.1	0.8 nm
3h	6.8	0.9 nm
4h	5.7	1.8 nm
5h	5	2.2 nm
6h	4.8	2.7 nm

表 5

通过表 3 可以看出，切割浆料在经过 4 小时的循环后，SP 值下降至 5.7，并且与之相应的，目标波长范围的粗糙度出现了显著的提高（提高至 1.8nm）可以看出，在线切割工艺过程中，新的切割浆料在使用的第 4 小时进行更新。

另外，在本实施例中，基于上述 4 小时的结论，在第 4 小时的时候，在已有切割浆料的基础上加入新的切割浆料。并且按照上述技术方案获取在目标波长范围的粗糙度以及 SP 值如表 6 所示。

切割浆料循环使用时 长	SP	目标波长范围的粗糙 度
0h	7.7	0.4 nm
1h	7.3	0.6 nm
2h	7.1	0.8 nm
3h	6.8	0.9 nm
4h+1/2 新切割浆料	6.6	1 nm

表 6

通过表 6 可知，在切割浆料的切割能力劣化的情况下，可以通过加入新的切割浆料，以提升切割浆料整体的切割能力。

基于上述技术方案及具体实施例，通过由前述晶圆粗糙度的改善方法改

善后的线切割工艺得到的晶圆，当所述目标波长范围为 1.8 微米波长至 22 微米波长时，其在目标波长范围的粗糙度为 0.01 至 1nm。

基于前述技术方案相同的发明构思，参见图 6，其示出了一种晶圆粗糙度的改善装置 60，所述装置 60 包括：确定部分 601、比较部分 602 以及工序改善部分 603；其中，

所述确定部分 601，被配置成当完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值；

所述比较部分 602，被配置成比较所述指标值与设定的性能阈值，并且当所述指标值小于或等于设定的性能阈值时，触发所述工序改善部分 603；

所述工序改善部分 603，被配置成向执行线切割工序的设备中补充新的切割浆料。

在一些示例中，所述确定部分 601，还被配置成：

通过扫描电子显微镜扫描所述当前使用的切割浆料，以采集得到在所述当前使用的切割浆料中的多个磨料颗粒的微观图像；

通过对采集的每个磨料颗粒的微观图像进行图像分析，获得所述采集的每个磨料颗粒的每个边长的长度以及立体角的数量；

根据采集的每个磨料颗粒的每个边长的长度以及立体角的数量确定所述采集的每个磨料颗粒与正多面体的几何相似度。

在一些示例中，所述确定部分 601，还被配置成：

根据所述采集的每个磨料颗粒的立体角的数量与所有边长的长度方差的差值计算出所述采集的每个磨料颗粒与正多面体的几何相似度。

在一些示例中，所述确定部分 601，还被配置成：通过对采集的每个磨料颗粒的微观图像进行图像分析，获得所述采集的每个磨料颗粒的最大对角线长度；

相应地，所述确定部分 601，被配置成：

获取采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度的中位值；

获取采集的所有磨料颗粒的最大对角线长度的方差；

根据所述采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度的中位值以及所述采集的所有磨料颗粒的最大对角线长度的方差获取所述用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值。

在一些示例中，所述确定部分 601，被配置成：

根据所述采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度的中位值与所述采集的所有磨料颗粒的最大对角线长度的方差的比值计算出所述用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值。

在一些示例中，所述确定部分 601，还被配置成：

对于所述裸晶圆的表面的每个采样点，通过单点量测方案获取每个采样点处关于晶圆表面高度的原始量测数据；

基于所述裸晶圆的表面的全部采样点的原始量测数据，针对每个采样点通过与目标波长范围对应的滤波器获取每个采样点在所述目标波长范围的波信号；

基于所有采样点在所述目标波长范围的波信号的振幅统计值确定所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度。

在一些示例中，所述滤波器为圆形滤波器，并且由双高斯滤波函数组成；

所述滤波器的作用范围的半径由所述采样点与所述裸晶圆中心的距离确定，并且当所述采样点与所述裸晶圆中心的距离小于或等于临界距离时，所述滤波器的作用范围的半径为第一半径；当所述采样点与所述裸晶圆中心的距离大于临界距离时，所述滤波器的作用范围的半径为第二半径；其中，所述第一半径与第二半径均由所述目标波长范围的上限确定，并且第一半径大于第二半径。

在一些示例中，所述确定部分 601，还被配置成：

将裸晶圆划分出多个分析区域；

根据每个分析区域内的采样点在所述目标波长范围的波信号的振幅值计算出每个分析区域在所述目标波长范围的波信号的振幅的极差；

根据所有分析区域在所述目标波长范围的波信号的振幅的极差计算出所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度指标。

在一些示例中，所述目标波长范围包括：0 至 1.8 微米波长、1.8 至 22 微

米波长以及 22 微米波长至 20 毫米波长中的至少一个波长范围。

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，可参见前述晶圆粗糙度的改善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 7，其示出了本申请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 70 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 70 具有通信功能，可以接入有线网络或无线网络。计算设备 70 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 70 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 70 承担本申请技术方案的计算及处理工作，本申请对此不作限定。

如图 7 所示，本申请中的计算设备可以包括一个或多个如下部件：处理器 710 和存储器 720。

可选的，处理器 710 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 720 内的指令、程序、代码集或指令集，以及调用存储在存储器 720 内的数据，执行计算设备的各种功能和处理数据。

在本申请中，所述处理器 710 通过执行所述存储器中存储的指令，以执行以下步骤：

当完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值；

当所述指标值小于或等于设定的性能阈值，生成用于向执行线切割工序的设备中补充新的切割浆料的指令并发送。

需要说明的是，对于上述执行步骤的具体实现方式及示例，可参见前述晶圆粗糙度的改善方法中相对应步骤的实现方式及其示例，在此不再赘述。

可选地，处理器 710 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 710 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 710 中, 单独通过一块芯片进行实现。

存储器 720 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 720 包括非瞬时性计算机可读介质 (non-transitory computer-readable storage medium)。存储器 720 可用于存储指令、程序、代码、代码集或指令集。存储器 720 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。

本申请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粗糙度的改善方法。

本申请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粗糙度的改善方法。

本申请还提供了一种晶圆，该晶圆经由前述技术方案所述的晶圆粗糙度的改善方法改善后的线切割工艺得到，并且在目标波长范围的粗糙度为以下至少之一：

当所述目标波长范围为 0 至 1.8 微米波长时，所述粗糙度为 0.01 至 1nm；

当所述目标波长范围为 1.8 至 22 微米波长时，所述粗糙度为 1 至 3nm；

当所述目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长时，所述粗糙度为 3 至 30nm。

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，本申请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。

以上所述，仅为本申请的具体实施方式，但本申请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申请揭露的技术范围内，可轻易想到变化或替换，都应涵盖在本申请的保护范围之内。因此，本申请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、一种晶圆粗糙度的改善方法，所述方法包括：

当完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值；

当所述指标值小于或等于设定的性能阈值，向执行线切割工序的设备中补充新的切割浆料。

2、根据权利要求1所述的方法，其中，所述方法还包括：

通过扫描电子显微镜扫描所述当前使用的切割浆料，以采集得到在所述当前使用的切割浆料中的多个磨料颗粒的微观图像；

通过对采集的每个磨料颗粒的微观图像进行图像分析，获得所述采集的每个磨料颗粒的每个边长的长度以及立体角的数量；

根据所述采集的每个磨料颗粒的每个边长的长度以及立体角的数量确定所述采集的每个磨料颗粒与正多面体的几何相似度。

3、根据权利要求2所述的方法，其中，所述根据所述采集的每个磨料颗粒的每个边长的长度以及立体角的数量确定所述采集的每个磨料颗粒与正多面体的几何相似度，包括：

根据所述采集的每个磨料颗粒的立体角的数量与所有边长的长度方差的差值计算出所述采集的每个磨料颗粒与正多面体的几何相似度。

4、根据权利要求2所述的方法，其中，所述方法还包括：

通过对采集的每个磨料颗粒的微观图像进行图像分析，获得所述采集的每个磨料颗粒的最大对角线长度；

相应地，所述基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值，包括：

获取采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度的中位值；

获取所述采集的所有磨料颗粒的最大对角线长度的方差；

根据所述采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度的中位值以及所

述采集的所有磨料颗粒的最大对角线长度的方差获取所述用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值。

5、根据权利要求4所述的方法，其中，所述根据所述采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度的中位值以及所述所有磨料颗粒的最大对角线长度的方差获取所述用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值，包括：

根据所述采集的所有磨料颗粒与正多面体的几何相似度的中位值与所述采集的所有磨料颗粒的最大对角线长度的方差的比值计算出所述用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值。

6、根据权利要求1所述的方法，其中，所述方法还包括：

对于所述裸晶圆的表面的每个采样点，通过单点量测方案获取每个采样点处关于晶圆表面高度的原始量测数据；

基于所述裸晶圆的表面的全部采样点的原始量测数据，针对每个采样点通过与目标波长范围对应的滤波器获取每个采样点在所述目标波长范围的波信号；

基于所有采样点在所述目标波长范围的波信号的振幅统计值确定所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度。

7、根据权利要求6所述的方法，其中，所述滤波器为圆形滤波器，并且由双高斯滤波函数组成；

所述滤波器的作用范围的半径由所述采样点与所述裸晶圆中心的距离确定，并且当所述采样点与所述裸晶圆中心的距离小于或等于临界距离时，所述滤波器的作用范围的半径为第一半径；当所述采样点与所述裸晶圆中心的距离大于临界距离时，所述滤波器的作用范围的半径为第二半径；其中，所述第一半径与第二半径均由所述目标波长范围的上限确定，并且第一半径大于第二半径。

8、根据权利要求6所述的方法，其中，所述基于所有采样点在所述目标波长范围的波信号的振幅统计值确定所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度，包括：

将裸晶圆划分出多个分析区域；

根据每个分析区域内的采样点在所述目标波长范围的波信号的振幅值计算出每个分析区域在所述目标波长范围的波信号的振幅的极差；

根据所有分析区域在所述目标波长范围的波信号的振幅的极差计算出所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度指标。

9、根据权利要求1至8任一项所述的方法，其中，所述目标波长范围包括：0至1.8微米波长、1.8至22微米波长以及22微米波长至20毫米波长中的至少一个波长范围。

10、一种晶圆粗糙度的改善装置，所述装置包括：确定部分、比较部分以及工序改善部分；其中，

所述确定部分，被配置成当完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，基于当前使用的切割浆料中用于线切割工序的磨料颗粒与正多面体的几何相似度确定用于表征所述当前使用的切割浆料的切割能力的指标值；

所述比较部分，被配置成比较所述指标值与设定的性能阈值，并且当所述指标值小于或等于设定的性能阈值时，触发所述工序改善部分；

所述工序改善部分，被配置成向执行线切割工序的设备中补充新的切割浆料。

11、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9任一项所述的晶圆粗糙度的改善方法。

12、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9任一项所述的晶圆粗糙度的改善方法。

13、一种晶圆，所述晶圆经由权利要求1至9所述的晶圆粗糙度的改善方法改善后的线切割工艺得到，并且在目标波长范围的粗糙度为以下至少之一：

当所述目标波长范围为0至1.8微米波长时，所述粗糙度为0.01至1nm；

当所述目标波长范围为1.8至22微米波长时，所述粗糙度为1至

3nm;

当所述目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长时，所述粗糙度为 3 至 30nm。