

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 10 月 15 日在中国提交的中国专利申请 No. 202411435849.1 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。

但是目前尚未提供一种基于线切割工序得到的裸晶圆的表面粗糙度对线切割工序阶段的工艺进行优化的方案。

发明内容

本公开提供了一种晶圆及其粗糙度的改善方法、装置、设备及介质；以线切割得到的裸晶圆在目标波长范围内的粗糙度为评估指标，并通过该指标对线切割工序中的工艺参数进行调整，降低了晶圆表面的粗糙度。

第一方面，本公开提供了一种晶圆粗糙度的改善方法，所述方法包括：

检测完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度；

当所述粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，根据多个切割工艺参数与在目标波长范围的粗糙度之间的拟合函数所指示的切割工艺参数的优先级，选择出需要调整的切割工艺参数以降低后续线切割工序所得到的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度。

第二方面，本公开提供了一种晶圆粗糙度的改善装置，所述装置包括：检测部分、比较

部分以及工序改善部分；其中，

所述检测部分，被配置成检测完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度；

所述比较部分，被配置成比较所述粗糙度与设定的粗糙度阈值，并且当所述粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，触发所述工序改善部分；

所述工序改善部分，被配置成根据多个切割工艺参数与在目标波长范围的粗糙度之间的拟合函数所指示的切割工艺参数的优先级，选择出需要调整的切割工艺参数以降低后续线切割工序所得到的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度。

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粗糙度的改善方法。

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粗糙度的改善方法。

第五方面，本公开提供了一种晶圆，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。

本公开提供了一种晶圆及其粗糙度的改善方法、装置、设备及介质；以线切割得到的裸晶圆在目标波长范围内的粗糙度为评估指标，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，根据多个切割工艺参数与在目标波长范围的粗糙度之间的拟合函数所指示的切割工艺参数的优先级，选择出需要调整的切割工艺参数，通过对该被选出的切割工艺参数进行调整的方式降低后续线切割工序所得到的裸晶圆的在目标波长范围的粗糙度。

附图说明

图 1 为本公开提供的示例性的多线切割设备组成示意图。

图 2 为本公开提供的线切割过程中切割区域的示意图。

图 3 为本公开提供的一种晶圆粗糙度的改善方法流程示意图。

图 4 为本公开提供的检测目标波长范围的粗糙度的流程示意图。

图 5 为本公开提供的一种滤波器在晶圆表面滑动的示意图。

图 6 为本公开提供的一种划分得到的分析区域的示意图。

图 7 为本公开提供的一种晶圆粗糙度的改善装置组成示意图。

图 8 为本公开提供的另一种晶圆粗糙度的改善装置组成示意图。

图 9 为本公开提供的一种计算设备的结构示意图。

具体实施方式

下面将结合本公开中的附图，对本公开中的技术方案进行清楚、完整地描述。

参见图 1，其示出了适用于本公开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。在本公开的一些实施例中，线切割单元 11 可以在竖向方向上位于承载单元 12 的下方。在本公开未示出的实施例中，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 和切割液供给单元 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。两个切割液供给单元 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 喷淋切割液，该切割液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 5m/s 至 18m/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，本公开通过升降装置（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，本公开对此不做赘述。

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。

在基于上述多线切割设备 1 进行线切割的过程中，切割液无法喷洒至待加工硅棒 S 的中间部分，切割该部分的切割液只能通过切割线携带并运输而得到。由于切割线仅能够在有限的空间中运行，并且切割液与切割线材质之间没有较强的黏着作用，切割线上所附着的切割液极容易在切割线运输过程中被刮擦掉，使得在切割待加工硅棒 S 的中间部分时，切割液的含量小于待加工硅棒 S 的边缘部分，而切割液含量不足会导致沿切割方向的切割力变。具体来说，由于缺少切割液的对流传热散热途径，会在切割待加工硅棒 S 的中间部分时积聚更多热量而无法散去，那么就会在整个晶片范围内造成热应力差异，从而导致晶片的变形。

此外，随着待加工硅棒 S 的向下进给，导致在线切割过程中的切割区域的变化是一个增大-减小的过程。以图 2 所示的待加工硅棒的横截面为例，随着待加工硅棒 S 如箭头所示向下给进，切割的区域从弦（虚线）逐渐增长到直径再减少为弦（点划线）。基于图 2 所示，当切割的区域为一个直径的时候，裸晶圆内部积聚热量更多，存在更高的热应力变形风险。

根据以上内容，发明人发现：保持恒定的切割速率可能不是一个理想的线切割方案，可

以随着切割区域增加,适当调整与切割速率相关的工艺参数以使得待加工硅棒 S 内部能够实现更充分的散热,从而提高裸晶圆的粗糙度。

基于此,参见图 3,其示出了本公开提供的一种晶圆粗糙度的改善方法,所述方法包括步骤 S301 至步骤 S302。

在步骤 S301 中,检测完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度。

在本公开中,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,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,本公开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。在本公开中,以目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长为例。

在步骤 S302 中,当所述粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时,根据多个切割工艺参数与在目标波长范围的粗糙度之间的拟合函数所指示的切割工艺参数的优先级,选择出需要调整的切割工艺参数以降低后续线切割工序所得到的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度。

在本公开中,在检测出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,在一些示例中,该粗糙度阈值可以设置为 25nm。即当裸晶圆在目标波长范围的粗糙度数值大于或等于 25nm 时,则表示多线切割设备 1 的切割能力劣化严重。

具体来说,线切割工序得到的裸晶圆在宏观表现出明显的周期性线痕,这些线痕可以被认为是粗糙度在晶圆表面的整体呈现。基于该种认知可知:这些线痕与前述步骤中提到的粗糙度一样,可以表现为一种具有振幅的波动现象,并且这种波动现象同样由不同波长的波信号叠加而造成。

结合前述图 1 所示的多线切割设备的结构以及工作原理,发明人发现:该宏观表现(即线痕)与线切割工序所采用的以下切割工艺参数有关:切割线往复运动的移动速度、切割线往复运动的周期以及待加工硅棒 S 的进给速度。上述三种切割工艺参数对上述裸晶圆表面在目标波长范围的粗糙度产生的影响程度可由一个拟合函数进行表征。在本公开中,该拟合函数由关于上述三个切割工艺参数的幂函数进行表示,比如按照下式所示:

$$PV = K1 \times Vs^a \times Tr^b \times Vf^c$$

其中, Vs 表示切割线往复运动的移动速度, Tr 表示切割线往复运动的周期, Vf 表示进给速度, a 、 b 、 c 均为拟合函数中的经验系数,其分别表示其对应的切割工艺参数对粗糙度的影响程度, $K1$ 表示拟合系数。为了确定上述拟合函数的经验系数和拟合系数,在一些示例中,利用历史线切割工序中所采集的切割工艺参数以及对历史线切割工序得到的裸晶圆检测出的在目标波长范围的粗糙度代入到上述拟合函数中,从而确定拟合函数中的 a 、 b 、 c 以

及 $K1$ 。

在本公开中, $K1=6.2 \times 10^{-3}$, $a=0.529$, $b=1.445$, $c=0.873$, 基于该经验系数 a 、 b 、 c 的具体数值可以看出: 经验系数 b 对应的切割线往复运动的周期对粗糙度的影响最大, 其次是经验系数 c 对应的进给速度, 再其次为经验系数 a 对应的切割线往复运动的移动速度。对于上述影响程度的大小, 相应地分别为切割线往复运动的移动速度、切割线往复运动的周期以及进给速度设定优先级, 具体来说, 影响越大, 优先级越高。由此, 当粗糙度超过设定的粗糙度阈值, 按照上述优先级选择切割工艺参数进行调整, 从而降低后续线切割工序所得到的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度。

上述图 3 所示的技术方案, 以线切割得到的裸晶圆在目标波长范围内的粗糙度为评估指标, 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, 根据多个切割工艺参数与在目标波长范围的粗糙度之间的拟合函数所指示的切割工艺参数的优先级, 选择出需要调整的切割工艺参数, 通过对该被选出的切割工艺参数进行调整的方式降低后续线切割工序所得到的裸晶圆的在目标波长范围的粗糙度。

对于图 3 所示的技术方案, 在一些可能的实现方式中, 拟合函数可以利用历史线切割工序中所采集的切割工艺参数以及对历史线切割工序得到的裸晶圆检测出的在目标波长范围的粗糙度进行拟合得到, 具体的拟合过程可以包括:

根据以第一经验系数为指数的关于切割线往复运动的移动速度的幂函数、以第二经验系数为指数的关于切割线往复运动的周期的幂函数以及以第三经验系数为指数的关于进给速度的幂函数的乘积形成初始化一拟合函数;

在历史线切割工序中, 采集历史切割工艺参数, 并检测完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度;

将所述历史切割工艺参数以及完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度代入所述拟合函数, 以获得所述拟合函数中的第一经验系数、第二经验系数以及第三经验系数。

对于上述实现方式, 示例性的具体实施细节可以包括:

首先, 通过关于上述三个切割工艺参数的幂函数表示出一拟合函数如下所示:

$$PV = K1 \times Vs^a \times Tr^b \times Vf^c$$

其中, Vs 表示切割线往复运动的移动速度, Tr 表示切割线往复运动的周期, Vf 表示进给速度, a 、 b 、 c 均为拟合函数中的经验系数, 其分别表示其对应的切割工艺参数对粗糙度的影响程度, $K1$ 表示拟合系数。

接着, 将上述拟合函数进行对数变换, 从而得到经对数变换后的拟合函数如下式所示:
 $\log(PV) = \log(K1) + a \log(Vs) + b \log(Tr) + c \log(Vf)$ 。

然后, 利用在历史线切割工序中所采集到的历史切割工艺参数以及检测得到的完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度, 对上述经对数变换后的拟合函数通过最小二乘法的方式计算出经验系数以及拟合系数, 从而得到能够适用于图 3 所示的技术方案的拟合函数。

通过上述拟合函数的获取过程,最终可以得到 $K1=6.2\times10^{-3}$, $a=0.529$, $b=1.445$, $c=0.873$ 。根据以上经验系数,可以获知:切割线往复运动的周期对粗糙度的影响最大,其次是进给速度,再其次为切割线往复运动的移动速度。

在本公开中,部分历史切割工艺参数及对应的完成历史线切割工序的裸晶圆在 22 微米波长至 20 毫米波长的范围的粗糙度,如下表 1 所示。

V_f (mm/min)	V_s (m/s)	T_r (s)	在目标波长范围的粗糙度
3	15	80	38.1
3	15	65	28.2
3	15	40	14
2	15	40	9.8
1.5	15	40	7.6
1.5	12	40	6.8
1.5	8	40	5.5

表 1

在本公开中,目标波长范围为 1.8 至 22 微米波长时,基于上述拟合函数的获取过程,可以得到 $K1=4.4\times10^{-3}$, $a=0.659$, $b=1.217$, $c=0.887$ 。根据以上经验系数,同样可以获知:切割线往复运动的周期对粗糙度的影响最大,其次是进给速度,再其次为切割线往复运动的移动速度。在本公开中,部分历史切割工艺参数及对应的完成历史线切割工序的裸晶圆在 1.8 至 22 微米波长的范围的粗糙度,如下表 2 所示。

V_f (mm/min)	V_s (m/s)	T_r (s)	在目标波长范围的粗糙度
3	15	40	6.2
3	15	30	4.4
3	15	20	2.7
2	15	20	1.9
1.5	15	20	1.4
1.5	12	20	1.2
1.5	8	20	1.0

表 2

在本公开中,目标波长范围为 0 至 1.8 微米波长时,基于上述拟合函数的获取过程,可以得到 $K1=6.7\times10^{-3}$, $a=0.813$, $b=1.105$, $c=0.971$ 。根据以上经验系数,同样可以获知:切割线往复运动的周期对粗糙度的影响最大,其次是进给速度,再其次为切割线往复运动的移动速度。在本公开中,部分历史切割工艺参数及对应的完成历史线切割工序的裸晶圆在 0 至 1.8 微米波长的范围的粗糙度,如下表 3 所示。

V_f (mm/min)	V_s (m/s)	T_r (s)	在目标波长范围的粗糙度
----------------	-------------	-----------	-------------

1.5	8	20	1.5
1.5	8	15	1.1
1.5	8	10	0.7
1	8	10	0.5
0.7	8	10	0.3
0.7	6	10	0.3
0.7	4	10	0.2

表 3

在上述表 1、表 2 以及表 3 中，从粗糙度随着 V_f 、 V_s 以及 Tr 的变化而变化的情况同样可以验证上述关于切割线往复运动的周期、进给速度以及切割线往复运动的移动速度对粗糙度的影响程度的结论。

对于图 3 所示的技术方案，在一些可能的实现方式中，如图 4 所示，步骤 S301 所述检测完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度的过程可以包括步骤 S3011 至 S3013。

在步骤 S3011 中，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。

对于本实现方式，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。

在步骤 S3012 中，基于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目标波长范围的波信号。

在本实现方式中，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高度差值。以目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长为例，其波长上限为 20mm，波长下限为 22 μm 。以目标波长范围为 0 至 1.8 微米波长为例，其波长上限为 1.8 μm ，波长下限为 0。以目标波长范围为 1.8 至 22 微米波长为例，其波长上限为 22 μm ，波长下限为 1.8 μm 。

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，在步骤 S3012 的具体实施过程中，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，以上述滤波器是圆形滤波器为例，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 G_{LP1} 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 G_{LP2} 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 $(1 - G_{LP2})$ 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 G_{DHP} 可以表示为 $G_{DHP} = G_{LP1} (1 - G_{LP2})$ 。在本公开中,以上述示例的圆形滤波器为例,如图 5 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。

在本公开中,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。

在步骤 S3013 中,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,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;

将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均值确定为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 6 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 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 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边缘排除区域 (Edge Exclusion, 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。

在本公开中，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，其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。

基于前述技术方案相同的发明构思，参见图 7，其示出了一种晶圆粗糙度的改善装置 70，所述装置 70 包括：检测部分 701、比较部分 702 以及工序改善部分 703；其中，

所述检测部分 701，被配置成检测完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度；

所述比较部分 702，被配置成比较所述粗糙度与设定的粗糙度阈值，并且当所述粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，触发所述工序改善部分 703；

所述工序改善部分 703，被配置成根据多个切割工艺参数与在目标波长范围的粗糙度之间的拟合函数所指示的切割工艺参数的优先级，选择出需要调整的切割工艺参数以降低后续线切割工序所得到的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度。

在一些示例中，所述多个切割工艺参数包括：切割线往复运动的移动速度、切割线往复运动的周期以及进给速度；

相应地，所述拟合函数由分别关于切割线往复运动的移动速度、切割线往复运动的周期以及进给速度的幂函数的乘积表示。

在一些示例中，参见图 8，所述装置 70 还包括：拟合部分 704，被配置成：

根据以第一经验系数为指数的关于切割线往复运动的移动速度的幂函数、以第二经验系数为指数的关于切割线往复运动的周期的幂函数以及以第三经验系数为指数的关于进给速度的幂函数的乘积形成初始化一拟合函数；

在历史线切割工序中，采集历史切割工艺参数，并检测完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度；

将所述历史切割工艺参数以及完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度代入所述拟合函数，以获得所述拟合函数中的第一经验系数、第二经验系数以及第三经验系数。

在一些示例中，所述拟合部分 704，被配置成：

将所述拟合函数进行对数变换，以得到经对数变换后的拟合函数；

利用所述历史切割工艺参数以及所述完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度，对所述经对数变换后的拟合函数通过最小二乘法的方式计算出所述拟合函数中的第一经验系数、第二经验系数以及第三经验系数。

在一些示例中，所述检测部分 701，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，所述检测部分 701，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；

将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均值确定为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，当所述目标波长范围为 0 至 1.8 微米波长时，所述粗糙度阈值为 1nm；

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

当所述目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长时，所述粗糙度阈值为 25nm。

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 9，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 90 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 90 具有通信功能，可以接入有线网络或无线网络。计算设备 90 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 90 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 90 承担本公开技术方案的计算及处理工作，本公开对此不限定。

如图 9 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 910 和存储器 920。

可选的，处理器 910 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 920 内的指令、程序、代码集或指令集，以及调用存储在存储器 920 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 910 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 910 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 910 中，单独通过一块芯片进行实现。

存储器 920 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 920 包括非瞬态性计算机可读介质 (non-transitory computer-readable storage medium)。存储器 920 可用于存储指令、程序、代码、代码集或指令集。存储器 920 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、无线保真 (WiFi, Wireless Fidelity) 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粗糙度的改善方法。

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粗糙度的改善方法。

本公开还提供了一种晶圆，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，本公开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、一种晶圆粗糙度的改善方法，所述方法包括：

检测完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度；

当所述粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，根据多个切割工艺参数与在目标波长范围的粗糙度之间的拟合函数所指示的切割工艺参数的优先级，选择出需要调整的切割工艺参数。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述多个切割工艺参数包括：切割线往复运动的移动速度、切割线往复运动的周期以及进给速度；

所述拟合函数由分别关于切割线往复运动的移动速度、切割线往复运动的周期以及进给速度的幂函数的乘积表示。

3、根据权利要求 1 所述的方法，所述方法还包括：

根据以第一经验系数为指数的关于切割线往复运动的移动速度的幂函数、以第二经验系数为指数的关于切割线往复运动的周期的幂函数以及以第三经验系数为指数的关于进给速度的幂函数的乘积形成初始化一拟合函数；

在历史线切割工序中，采集历史切割工艺参数，并检测完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度；

将所述历史切割工艺参数以及完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度代入所述拟合函数，以获得所述拟合函数中的第一经验系数、第二经验系数以及第三经验系数。

4、根据权利要求 3 所述的方法，其中，所述将所述历史切割工艺参数以及完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度代入所述拟合函数，以获得所述拟合函数中的第一经验系数、第二经验系数以及第三经验系数，包括：

将所述拟合函数进行对数变换，以得到经对数变换后的拟合函数；

利用所述历史切割工艺参数以及所述完成历史线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度，对所述经对数变换后的拟合函数通过最小二乘法的方式计算出所述拟合函数中的第一经验系数、第二经验系数以及第三经验系数。

5、根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述检测完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度包括：

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。

6、根据权利要求 5 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。

7、根据权利要求 5 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；

将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均值确定为所述裸晶圆在所述目标波长范围的粗糙度指标。

8、根据权利要求 1 至 7 任一项所述的方法，其中，当所述目标波长范围为 0 至 1.8 微米波长时，所述粗糙度阈值为 1nm；

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

当所述目标波长范围为 22 微米波长至 20 毫米波长时，所述粗糙度阈值为 25nm。

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

所述检测部分，被配置成检测完成线切割工序的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度；

所述比较部分，被配置成比较所述粗糙度与设定的粗糙度阈值，并且当所述粗糙度大于或等于设定的粗糙度阈值时，触发所述工序改善部分；

所述工序改善部分，被配置成根据多个切割工艺参数与在目标波长范围的粗糙度之间的拟合函数所指示的切割工艺参数的优先级，选择出需要调整的切割工艺参数以降低后续线切割工序所得到的裸晶圆在目标波长范围的粗糙度。

10、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 8 任一项所述的晶圆粗糙度的改善方法。

11、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 8 任一项所述的晶圆粗糙度的改善方法。

12、一种晶圆，所述晶圆经由权利要求 1 至 8 任一项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。