



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119156531 A

(43) 申请公布日 2024. 12. 17

(21) 申请号 202380038062.9

(22) 申请日 2023.03.23

(30) 优先权数据

63/337,714 2022.05.03 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2024.11.01

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2023/016071 2023.03.23

(87) PCT国际申请的公布数据

W02023/215046 EN 2023.11.09

(71) 申请人 威科仪器公司

地址 美国

(72) 发明人 马修·厄尔·华莱士·里德

沈小华

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

专利代理师 杨林森

(51) Int.Cl.

G01N 25/02 (2006.01)

G01N 21/47 (2006.01)

G01J 5/00 (2022.01)

H01L 21/67 (2006.01)

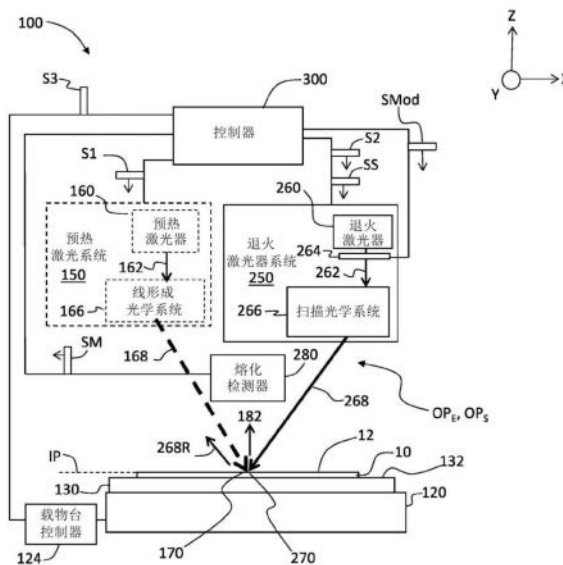
权利要求书3页 说明书18页 附图17页

(54) 发明名称

散射熔化检测系统及其使用方法

(57) 摘要

高带宽时间和空间辨析散射相变显微术系统,其被配置成检测由具有超短停留时间和光斑尺寸的激光退火系统处理的晶片中的熔化开始。



1. 一种确定在激光退火处理期间半导体材料的固态到液态材料相变的发生的方法,所述方法包括:

利用来自退火激光器的退火激光束在所述半导体材料的表面上形成退火图像;
形成包括所述退火图像的区域 of 所述半导体表面的散射图像;以及
根据所述散射图像中收集的光的强度来识别所述半导体材料的固态到液态材料相变。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述识别包括检测所述散射图像中达到或超过阈值的强度,所述阈值对应于所述半导体材料的固态到液态相变的开始。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中,所述识别包括在所述散射图像的在所述退火图像内并且小于所述退火图像的区域中检测所述散射图像中的强度。

4. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述识别包括识别与低于熔化的参考图像相比所述散射图像中收集的光的强度的不连续性。

5. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述识别包括识别所述光的强度与处理参数之间的非线性比例关系。

6. 根据权利要求5所述的方法,其中,所述处理参数是所述退火激光器的功率水平或所述退火激光器的局部功率密度。

7. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述激光退火处理包括跨所述半导体表面执行所述退火图像的顺序扫掠,其中,每个扫掠形成退火照明线,其中,形成散射图像包括形成至少一个退火照明线的图像。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中,所述识别的步骤包括分析沿着所述退火照明线的光的强度,以确定所述半导体材料沿着所述退火照明线的材料相变的程度。

9. 根据权利要求7所述的方法,其中,所述识别的步骤包括分析沿着所述退火照明线的光的强度,以确定已经发生固态到液态相变的开始的所述退火照明线的比例。

10. 根据权利要求7所述的方法,其中,所述识别的步骤包括分析所述退火图像的多个顺序扫掠中的沿着所述退火照明线的第一位置处的光的强度,以确定所述退火激光器的熔化阈值功率水平或统计功率波动中的至少一个。

11. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述激光退火处理包括以扫掠频率 f_{sweep} 跨所述半导体表面执行顺序扫掠,所述方法还包括利用具有脉冲频率为 f_{probe} 的辐射脉冲的探测光源来照射所述半导体表面,其中, $f_{\text{probe}} < f_{\text{sweep}}$ 。

12. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述识别包括应用下述中的一个或多个:拟合算法、边缘检测算法、特征基分解、前馈分类器或者对所捕获的图像帧中超过阈值的任何强度的检测。

13. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述识别包括识别根据一个或多个退火处理控制参数的图像强度的统计变化、时间序列变化或几何非线性变化。

14. 根据权利要求13所述的方法,其中,所述一个或多个退火处理控制参数包括激光功率或光功率密度。

15. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述识别包括:
创建将所述散射图像参考到对应的低于熔化的参考图像的熔化检测图像。

16. 根据权利要求15所述的方法,还包括将所述熔化检测图像的值与阈值进行比较,以确定在所述熔化检测图像的一个或多个区域中是否发生了熔化。

17. 根据权利要求15所述的方法,还包括应用所述熔化检测图像的一维分布分析,以识别在载物台扫描方向上具有比所述处理激光束的宽度小的宽度的窄峰。

18. 根据权利要求15所述的方法,其中,通过执行以下步骤来获得低于熔化的参考图像,所述步骤包括:

在低于熔化的情况下对晶片进行退火;

利用散射熔化检测器来捕获图像帧;

记录退火激光器功率水平;

根据所捕获的图像帧来创建低于熔化的参考图像;

对所述低于熔化的参考图像进行处理以生成多个低于熔化的一维载物台扫描方向强度分布;

识别所述低于熔化的参考图像的感兴趣区域(ROIref);以及

创建平均一维载物台扫描方向强度分布。

19. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述识别包括:

计算所述图像帧的感兴趣区域ROIref内的像素值的统计变化,其中,ROIref是所述图像的在所述晶片上形成退火激光图像的区域;以及

比较所计算出的统计变化以识别所述熔化的开始。

20. 一种散射熔化检测系统,包括:

被配置成支撑半导体晶片的载物台;

被配置成对所述半导体晶片进行退火的退火激光器;以及

散射熔化检测器,其包括:

图像捕获装置,其包括焦平面阵列(FPA);以及

散射光学布置,其被配置成阻挡或避免由所述退火激光器形成的光束的镜面反射,并且在所述FPA上形成所述半导体晶片的表面的散射图像。

21. 根据权利要求20所述的系统,还包括处理器和包括程序指令的机器可读存储介质,所述程序指令用于由所述处理器执行以执行根据权利要求1至19中任一项所述的操作。

22. 一种激光退火系统,包括:

退火激光器;

存储装置,其包括至少一个退火激光器熔化阈值校准设定点,所述校准设定点指定所述退火激光器的操作参数以在一组预定的退火处理条件下将半导体材料的局部区域的温度升高至熔化阈值,其中,所述校准设定点是从在所述半导体材料的激光退火处理期间获取的所述半导体材料的散射图像得到的;以及

控制器,其被配置成根据所述退火激光器熔化阈值校准设定点来控制所述退火激光器。

23. 根据权利要求22所述的系统,其中,所述校准设定点是通过包括权利要求1至19中任一项的步骤的处理确定的。

24. 一种非暂态机器可读存储介质,包括:

至少一个退火激光器熔化阈值校准设定点,所述校准设定点指定退火激光器的操作参数以在一组预定的退火处理条件下将半导体材料的局部区域的温度升高至熔化阈值,其中,所述校准设定点是从在所述半导体材料的激光退火处理期间获取的所述半导体材料的

散射图像得到的。

25. 根据权利要求24所述的非暂态机器可读存储介质, 其中, 所述校准设定点是通过包括权利要求1至19中任一项的步骤的处理确定的。

散射熔化检测系统及其使用方法

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于2022年5月3日提交并且题为“Scatter Melt Detection Systems and Methods of Using the Same”的美国临时专利申请序列第63/337,714号的优先权的权益,该美国临时专利申请的全部内容通过引用并入本文。

技术领域

[0003] 本公开内容总体上涉及温度测量,并且特别涉及相变显微术。

背景技术

[0004] 在先进的集成电路(IC)芯片制造中使用脉冲激光熔化退火系统以用于芯片的快速热处理。由这样的激光系统提供的热处理可以用于各种效果,例如,掺杂剂活化、限定结以及以其他方式改变芯片的材料和电特性。然而,在利用脉冲激光系统进行退火期间,由于激光将晶片温度升高至熔化温度的持续时间以及激光作用于其上的晶片的表面积减少,因此准确测量和控制晶片温度是重要的并且可能具有挑战性。晶片温度的精确测量和控制对于退火系统校准也是重要的。

发明内容

[0005] 在一个实现方式中,本公开内容涉及一种确定在激光退火处理期间半导体材料的固态到液态材料相变的發生的方法。该方法包括:利用来自退火激光器的退火激光束在半导体材料的表面上形成退火图像;形成包括退火图像的区域半导体表面的散射图像;以及根据散射图像中收集的光的强度来识别半导体材料的固态到液态材料相变。

[0006] 在另一实现方式中,本公开内容涉及一种分析散射图像数据的方法,该方法包括:接收在半导体的激光退火处理期间捕获的半导体表面的区域的散射图像;以及从图像中识别半导体材料的固态到液态材料相变;其中,所述识别包括识别根据一个或多个退火处理控制参数的图像强度的统计变化、时间序列变化或几何非线性变化。

[0007] 在又一实现方式中,本公开内容涉及一种对半导体材料的激光退火处理执行熔化校准的方法。该方法包括:利用来自退火激光器的退火激光束对半导体材料的区域进行退火,其中,退火包括在发生半导体材料的固态到液态相变的熔化阈值功率水平以下和之上递增地改变退火激光器的功率水平;在退火期间捕获半导体材料的区域的散射图像;以及根据所捕获的散射图像来确定退火激光器的至少一个熔化阈值设定点功率水平。

[0008] 在又一个实现方式中,本公开内容涉及一种散射熔化检测系统,其包括:被配置成支撑半导体晶片的载物台;被配置成对半导体晶片进行退火的退火激光器;以及散射熔化检测器,其包括:图像捕获装置,其包括焦平面阵列(FPA);以及散射光学布置,其被配置成阻挡或避免由退火激光器形成的光束的镜面反射,并且在FPA上形成半导体晶片的表面的散射图像。

[0009] 在又一实现方式中,本公开内容涉及一种激光退火系统,其包括:退火激光器;存

储装置,其包括至少一个退火激光器熔化阈值校准设定点,该校准设定点指定退火激光器的操作参数以在一组预定的退火处理条件下将半导体材料的局部区域的温度升高至熔化阈值,其中,校准设定点是从在半导体材料的激光退火处理期间获取的半导体材料的散射图像得到的;以及控制器,其被配置成根据退火激光器熔化阈值校准设定点来控制退火激光器。

[0010] 在又一实现方式中,本公开内容涉及一种非暂态机器可读存储介质,其包括至少一个退火激光器熔化阈值校准设定点,该校准设定点指定退火激光器的操作参数以在一组预定的退火处理条件下将半导体材料的局部区域的温度升高至熔化阈值,其中,校准是从在半导体材料的激光退火处理期间获取的半导体材料的散射图像得到的。

[0011] 在又一实现方式中,本公开内容涉及一种形成用于与熔化检测算法一起使用的低于熔化的参考图像和参数的方法。该方法包括:在低于熔化的情况下对晶片进行退火;利用散射熔化检测器来捕获图像帧;记录退火激光器功率水平;根据所捕获的图像帧来创建低于熔化的参考图像;对低于熔化的参考图像进行处理以生成多个低于熔化的一维载物台扫描方向强度分布;识别低于熔化的参考图像的感兴趣区域(ROIref);以及创建平均一维载物台扫描方向强度分布。

[0012] 在又一实现方式中,本公开内容涉及一种检测晶片材料在退火处理期间是否熔化的方法。该方法包括:在低于熔化阈值、等于熔化阈值或高于熔化阈值的情况下对晶片进行退火,在退火期间利用散射熔化检测器捕获图像帧,以及记录激光功率水平;根据所捕获的图像帧创建平均图像;以及创建将平均图像参考到针对相同晶片类型的对应的低于熔化的参考图像的熔化检测图像。

[0013] 在又一实现方式中,本公开内容涉及一种检测晶片材料在退火处理期间是否熔化的方法。该方法包括:在低于熔化阈值、等于熔化阈值或高于熔化阈值的情况下对晶片进行退火,并且在退火期间利用散射熔化检测器来捕获图像帧;计算图像帧的感兴趣区域ROIref内的像素值的统计变化,其中,ROIref是图像中在晶片上形成退火激光图像的区域;并且比较所计算出的统计变化以识别熔化的开始。

附图说明

[0014] 出于说明本公开内容的目的,附图示出了本公开内容的一个或更多个实施方式的各方面。然而,应当理解,本公开内容不限于附图中所示出的精确布置和手段,在附图中:

[0015] 图1是根据本公开内容的具有散射熔化检测器的示例激光退火系统的示意图;

[0016] 图2是半导体晶片的俯视图,其示出了扫描具有预热线图像和退火图像的晶片表面的示例方法;

[0017] 图3A是形成在晶片表面上的预热线图像和退火图像的俯视特写视图,其示出了两个图像的相对尺寸和扫描方向以及限定熔化退火处理的停留时间的扫描交叠区域;

[0018] 图3B是不包括预热激光器的备选示例的俯视特写视图,其示出了形成在晶片表面上的退火图像以及图像的扫掠方向和载物台扫描方向;

[0019] 图3C是退火图像的扫掠和沿着退火图像的扫掠增加的液相半导体材料(被称为熔池)的体积的自上而下的特写视图;

[0020] 图4A是示例散射熔化检测系统的示意图,其中,激光处理光束被用作光源探头;

[0021] 图4B是示例散射熔化检测系统的示意图,该散射熔化检测系统包括与激光处理光束分离的光源探头;

[0022] 图5A是本公开内容的散射成像系统的光学布置的示意图;

[0023] 图5B是本公开内容的散射成像系统的光学布置的另一示例的示意图;

[0024] 图6A概念性地和图形化地示出了在晶片表面低于熔化的情况下,在退火图像的扫描期间由散射熔化检测器的图像捕获装置在图像帧中捕获的数据;

[0025] 图6B概念性地和图形化地示出了在晶片表面在高于熔化并且沿着退火图像的扫描形成液相材料池的情况下,在退火图像的扫描期间由散射熔化检测器的图像捕获装置在图像帧中捕获的数据;

[0026] 图6C示出了来自退火激光器进行的退火图像的扫描的图像帧的数据,该退火激光器未被正确校准而引起扫描的部分低于熔化和高于熔化;

[0027] 图7A至图7C示出了来自熔化阈值校准的测试数据,其中,激光功率逐渐增加,并且在测试数据中检测到熔化程度的增加;

[0028] 图8示出了在低于和高于熔化阈值功率水平的增加功率水平下的一系列退火处理的FPA累积强度数据;

[0029] 图9A和图9B示出了利用在熔化阈值功率水平下操作的退火激光器沿着半导体表面进行扫描的多个顺序退火图像的散射图像数据;

[0030] 图10是示例计算装置的功能框图;

[0031] 图11概念性地示出了在退火处理期间由散射熔化检测器的ICD捕获的示例图像帧的一部分;

[0032] 图12示出了生成低于熔化的参考图像和相关联的参数以供一个或多个熔化检测算法使用的示例方法;

[0033] 图13示出了熔化检测算法的一个示例方法,其中,根据图像帧中振幅的非线性来检测熔化;以及

[0034] 图14示出了熔化检测算法的一个示例方法,其中,根据熔化图像中的统计变化来检测熔化。

具体实施方式

[0035] 本公开内容的各方面包括高带宽时间和空间辨析相变显微术系统,所述系统被配置成通过扫描具有超短停留时间和小光斑尺寸的CW或QCW(脉冲时间<<停留时间)激光退火系统来检测正被处理的半导体晶片中的熔化的开始,并且用于校准用于退火处理的这样的系统。在一些示例中,本公开内容的熔化检测系统被配置成准确且可靠地检测具有在10ns至500ns或25ns至250ns范围内的超短停留时间和在10 μ m至150 μ m x 10 μ m至150 μ m范围内的光斑尺寸的激光的熔化的开始。

[0036] 熔化退火包括利用入射激光束来局部升高晶片表面或次表面的温度直至其熔化。在晶片表面由覆盖具有较低熔化温度的材料层(例如,锗或锗硅)的薄层硅构成的示例中,晶片表面可以在次表面材料熔化时保持固态。本文中描述的熔化检测系统可以被配置成检测其中熔化发生在晶片表面上的表面熔化处理中的熔化,以及/或者可以被配置成检测其中晶片表面保持固态并且晶片表面下方的一定体积的材料熔化的次表面熔化处理中的熔

化。

[0037] 图1是可以结合本公开内容的熔化检测系统的示例准连续波 (QCW) 激光退火系统 (“系统”) 100的示意图。如将理解的, 系统100是通过示例的方式描述和示出的, 并且本公开内容的熔化检测系统可以在各种其他激光退火系统中的任何激光退火系统上使用。系统100的示例实施方式的某些方面在2018年9月25日发布的题为“Laser Annealing Systems And Methods With Ultra-Short Dwell Times”的美国专利第10,083,843号中进行了描述, 该美国专利的内容通过引用整体并入本文。并入美国专利第10,083,843号中的参考文献也通过引用整体并入本文, 包括: 美国专利第8,309,474号; 第8,546,805号; 第8,865,603号; 以及美国专利申请序列第14/497,006号, 现在作为美国专利第9,343,307发布。

[0038] 系统100包括晶片载物台120, 其可操作地支撑具有上表面132的卡盘130。晶片载物台120可操作地连接至载物台控制器124, 并且被配置成经由载物台控制器的操作在X-Y平面中移动并且可选地在Z方向上移动。卡盘上表面132被配置成可操作地支撑具有表面12的晶片10。在一些示例中, 晶片10可以被处理并且包括由半导体结构限定的图案, 该半导体结构通常与制造集成电路芯片的各个阶段相关联, 在许多情况下是光学上较深、高度图案化的多层结构。在其他示例中, 晶片10可以是未被处理的、没有制造结构, 并且表面12可以是极其光滑的镜状表面。如下面更多地描述的, 未处理的晶片10可以与本文中公开的计量系统一起用于校准和跟踪激光退火工具的性能。本文中公开的计量系统还可以与校准良好的退火系统一起使用来执行晶片特定的退火激光器功率校准以确定例如独特材料和表面的熔化阈值设定功率水平。在示例中, 卡盘130包括将晶片10加热至高于环境温度的均匀温度的加热器。晶片载物台120可操作地连接至载物台控制器124。

[0039] 系统100包括被配置成生成扫描激光束268的退火激光器系统250, 扫描激光束268在晶片表面12上形成退火图像270 (图2)。退火激光器系统250包括发射初始激光束262的退火激光器260、可操作地连接至调制器驱动器的调制器264、以及接收初始激光束并生成扫描激光束268的扫描光学系统266。在示例中, 退火激光器260可以是发射具有例如532nm波长的扫描激光束268的QCW光纤激光器。前述通过示例的方式提供, 并且现在已知或以后开发的其他退火激光器系统可以与本文中公开的计量系统一起使用。在示例中, 调制器264是声光调制器 (AOM), 其与扫描光学系统266协同使用来选择性地且交替地阻挡和通过初始激光束262以控制引起退火图像在晶片表面上的扫描运动的退火图像270的扫描。

[0040] 在一些示例中, 系统100还可以可选地包括预热激光系统150, 预热激光系统150与退火激光器系统250结合操作并且被配置成生成预热激光束168。预热激光束168用于通过将晶片表面 (或晶片次表面) 温度 T_s 升高至小于熔化温度 T_m 的预退火温度 T_{PA} 来预热晶片表面12。

[0041] 预热激光系统150可以包括预热激光器160和线形成光学系统166。预热激光器160可以包括二极管激光器、光纤激光器或 CO_2 激光器, 例如连续波 (CW) p偏振10.6微米 CO_2 激光器。在示例中, 线形成光学系统166被配置成使得预热激光束168以近法向入射角或较大的倾斜入射角入射到晶片表面12上。在示例实施方式中, 预热激光束168的入射角基本上等于晶片表面12的布鲁斯特角, 使得来自非均匀光学吸收的不利图案密度影响被减少或最小化。

[0042] 线形成光学系统166被配置成接收来自预热激光器160的初始激光束162, 并且由

此在晶片表面12上形成预热线图像170(图2和图3)。线形成光学系统166和扫描光学系统266可以各自包括透镜、反射镜、孔径、滤光器、有源光学元件(例如,可变衰减器等)及其组合。在示例中,线形成光学系统166和扫描光学系统266中的一个或两个可以被配置成执行光束调节,例如,使其相应的激光束162和262均匀化和/或提供具有选定截面形状的激光束。在美国专利第7,514,305号、第7,494,942号、第7,399,945号和第6,366,308号中公开了适用于执行这样的光束调节的非限制性示例光学系统,这些美国专利的内容通过引用整体并入本文。在示例中,来自退火激光器260的初始激光束262具有高质量(例如,基本上是高斯光束),并且在没有实质性(在某些情况下,没有任何)光束调节的情况下使用。

[0043] 系统100还包括散射熔化检测器280,如下面更多地描述的,散射熔化检测器280配置有散射光学布置,该散射光学布置用于检测来自晶片表面12的感兴趣区域的散射光,以用于在时间上和空间上辨析散射光来检测熔化的开始。本公开内容的散射光学布置包括基于空间辨析的传感器或传感器阵列的系统,该空间辨析的传感器或传感器阵列不检测来自平坦晶片表面的镜面反射,没有探测光束的远场镜面反射衍射极限。散射光学布置的一个示例形式是暗场成像。探头控制(例如,偏振和波长)和光学测量后选择(例如,偏振滤光器、双折射晶体等)也可以用于捕获相同或相似的散射信息。

[0044] 示例激光退火系统100还包括控制器300。在示例中,控制器300是计算机或者包括计算机,所述计算机例如个人计算机或工作站。控制器300优选地包括许多市售微处理器、用于将处理器连接至存储器装置例如硬盘驱动器的合适总线架构以及合适的输入和输出装置(例如,分别为键盘和显示器)中的任何。控制器300可以经由包含在非暂态计算机可读介质(例如,存储器、处理器或两者)中的指令(软件)进行编程,所述指令(软件)使控制器执行系统100的各种功能以实现晶片10的退火。

[0045] 控制器300可操作地连接至预热激光系统150和扫描激光系统250,并且控制这些系统的操作。控制器300电连接至调制器264,并且利用控制信号SMod来控制调制器的操作。在示例中,控制器300包括数字信号处理器(DSP)(未示出)以控制预热激光系统150和扫描激光系统250中的扫描功能。在一些示例中,控制器300还可以可操作地连接至散射熔化检测器280和扫描光学系统266,并且被配置成在激光退火处理期间接收和处理由散射熔化检测器生成的熔化信号SM,以用于控制退火激光器系统250或预热激光系统150,就像调节扫描激光束268的功率水平以实现期望的处理条件一样。在其他示例中,控制器300可以根据存储在计算机可读存储装置1016(图10)中的先前获得的退火激光器熔化校准设定点1024来控制退火激光器系统250的功率水平。控制器300或单独的计算装置还可以被配置成控制散射熔化检测器280的部件,例如控制熔化检测器的图像捕获装置(ICD)。

[0046] 在系统100的操作的示例中,系统控制器300向预热激光器160发送第一控制信号S1,预热激光器160响应于此生成初始激光束162。该初始激光束162由光学系统166接收,光学系统166由此形成预热激光束168,预热激光束168在晶片表面12处形成预热线图像170。系统控制器300还向退火激光器260发送第二控制信号S2,退火激光器260响应于此生成初始激光束262。该初始激光束262由扫描光学系统266接收,扫描光学系统266由控制信号SS控制以形成扫描激光束268,扫描激光束268进而在晶片表面12处形成退火图像270。系统控制器300还向载物台控制器124发送第三控制信号S3,以使载物台120的受控移动相对于预热线图像170和退火图像270移动(扫描)晶片10。在卡盘130提供晶片预热的示例中,系统控

制器300还可以向卡盘控制器发送另一控制信号(未示出)以启动或控制晶片预热。典型的卡盘预热范围为室温(25℃)至400℃。

[0047] 图2是晶片10的俯视图,其示出了利用退火图像270扫描晶片表面以及在使用预热激光系统150的示例中利用预热线图像170扫描晶片表面的示例方法。预热线图像170相对于晶片表面12的移动可以通过载物台120在第一方向例如y方向上的平移来实现,第一方向如箭头AR1所示,本文中还可称为预热扫描方向或载物台扫描方向。与预热线图像170相关联的晶片表面12的部分表示晶片表面的局部预热部分,其中,晶片表面温度 T_s 升高至预退火温度 T_{pa} 。通过扫描激光束268形成的退火图像270相对于晶片表面12在与第一方向正交的第二方向例如x方向上移动,第二方向如箭头AR2所示,本文中还可称为退火扫描方向或扫描方向。

[0048] 扫描光学系统266被配置成在预热线图像170上跨预热线图像的长度在x方向上扫描或扫描退火图像270。在一个示例中,退火图像270的扫描速度与预热线图像170的移动相比足够快,使得预热线图像在退火图像的扫描期间基本上是静止的。

[0049] 一旦退火图像270到达预热线图像170的末端,通过激活调制器264(图1)使得其阻挡初始激光束262的传输来关闭扫描激光束268和对应的退火图像270。在扫描激光束268“关闭”时,预热线图像170在y方向上移动,使得可以扫描晶片表面12的下一部分。在示例中,预热线图像170的移动可以是连续的,例如通过在y方向上连续地移动载物台120。一旦预热线图像170就位,在扫描光学系统266可以将扫描激光束268和对应的退火图像270引导至新定位的预热线图像170的第一端处的开始位置时,通过将调制器264置于传输模式来重新导通扫描激光束268。然后,在新定位的预热线图像170上执行退火图像270的扫描。图2示出了通过重复上面描述的扫描方法来扫描基本上整个晶片表面12(例如,至少图案化部分)的示例方法。在退火系统不包括预热激光器例如预热激光系统150的其他示例中,省略了预热线图像170,并且可以在晶片10被载物台120在y方向移动的同时,在x方向上类似地快速扫描退火图像270。

[0050] 图3A是形成在晶片表面12上的预热线图像170和退火图像270之一的俯视特写视图。预热线图像170具有近端172、远端174和相对侧173。预热线图像170具有从近端172延伸至远端174并且具有长度 $L1$ 的长方向(尺寸)。预热线图像170还具有在相对侧173之间测量的具有宽度 $W1$ 的窄方向(尺寸)。在示例中,长度 $L1$ 在5mm至20mm的范围内,其中示例性长度 $L1$ 在7mm至12mm的范围内。同样在示例中,宽度 $W1$ 在50 μm 至200 μm 的范围内,其中示例性宽度 $W1$ 为150 μm 。在示例实施方式中,预热激光束168(图1)在扫描方向(例如,y方向)上具有高斯强度分布,并且在长(交叉扫描)方向(例如,x方向)上具有相对平坦的顶部分布。光束宽度 $W1$ 可以限定为高斯分布的 $1/e^2$ 强度值处或高斯分布的全宽半高(FWHM)处。

[0051] 退火图像270与预热线图像170的一部分交叠,并且交叠区域在本文中被称作扫描交叠区域(SOR)。退火图像270具有长度为 $L2$ 的长尺寸和宽度为 $W2$ 的窄尺寸。在所示的示例中,退火图像270在x方向和y方向上具有基本高斯的强度分布。退火图像270的长尺寸 $L2$ 朝向预热线图像170的短尺寸 $W1$ 的方向。在示例中,长度 $L2$ 在100 μm 至500 μm 的范围内,而宽度在10 μm 至50 μm 的范围内,并且在一些示例中,宽度在15 μm 至20 μm 的范围内或在16 μm 至18 μm 的范围内。退火图像270的扫描方向AR2垂直于(正交于)其长方向。扫描方向AR2也被称为退火扫描或扫描方向,并且与预热扫描方向AR1基本正交。退火图像270的宽度 $W2$ 限定扫描交

叠区域SOR在退火扫描方向AR2上的宽度。退火图像270在扫描方向AR2上的快速扫描引起SOR形成退火照明线272,退火照明线272具有与预热线图像170基本相同的尺寸,该预热线图像170通过载物台120在y方向上的移动而沿着晶片表面12在y方向(预热扫描方向AR1)上顺序地移动。

[0052] 在示例中,如图3A中所示,长度L2基本上大于宽度W1(例如,大2倍至4倍之间),使得退火图像270的端部延伸超过预热线图像170的侧边173。这使得相对容易对准预热线图像170和退火图像270以限定扫描交叠区域SOR。该配置利用退火图像270的中心高强度部分来增加由预热线图像170提供的晶片表面的局部预热,以使晶片表面温度 T_s 高达熔化温度 T_M 。

[0053] 在一个示例中,扫描交叠区域SOR的停留时间 t_d 在 $10\text{ns} \leq t_d \leq 500\text{ns}$ 的范围内,而在另一示例中在 $25\text{ns} \leq t_d \leq 250\text{ns}$ 的范围内。对于宽度 $W2 = 15\mu\text{m}$ 并且25ns的停留时间,退火图像20的扫描速度以及因此扫描交叠区域SOR的扫描速度为 $v_s = (W2)/t_d = 600\text{m/s}$ 。对于250ns的停留时间 t_d ,扫描速度为 $v_s = 60\text{m/s}$ 。对于500ns的停留时间 t_d ,扫描速度为 $v_s = 30\text{m/s}$ 。对于10ns的停留时间 t_d ,扫描速度为 1500m/s 。在一个示例中,扫描光学系统266被配置成提供这些速度或其间的任何速度。

[0054] 图3B是省略了预热激光系统150的系统100的另一示例实现方式的俯视特写视图。退火激光器系统250被设计和配置成将晶片表面温度 T_s 升高至期望的退火温度。退火图像270在扫描方向AR2上的快速扫描产生退火照明线272,退火照明线272通过载物台120在y方向上的移动而沿着晶片表面12在y方向(箭头AR1)上顺序地移动。在示例中,退火照明线272的长度L1在3mm至12mm的范围内,退火图像270的宽度W2在 $10\mu\text{m}$ 至 $50\mu\text{m}$ 的范围内,并且退火图像270的长度L2在 $100\mu\text{m}$ 至 $500\mu\text{m}$ 的范围内。

[0055] 图3C是晶片表面12的一部分的俯视图,其示出了退火图像270沿着退火照明线272在扫描方向AR2上行进的三个时间实例(标记为a、b和c)。图3C概念性地示出了已经由扫描激光束268形成的熔池310,其中晶片表面12的局部区域已经熔化并部分或完全地从固相转变为液相,从而产生固相与液相之间的界面312。在所示出的示例中,熔池310的尺寸沿着扫描方向AR2增加,这可能是由于激光束268通过退火图像270跨退火照明线272进行的扫掠的光功率密度增加。熔池310内的晶片材料的相变是引起晶片材料的密度和原子间或分子间相互作用的形式两者的不连续性的一阶相变。由于材料的两个不同相(固相和液相)中的不同电磁相互作用,相变导致材料的折射率的显著变化。在示例中,熔池310内的液相的折射率基本上高于熔池310外的固相晶片材料的折射率,例如,对于典型的IC半导体材料,折射率高约100%至300%的数量级。

[0056] 熔池310与熔池周围的固相材料之间的界面312充当入射光的主要散射体,其中,宽场结构因子的大小随着熔池310的半径 r_1 增长。本文中公开的散射成像系统被设计和配置成检测在熔化开始时和在熔池310最初开始形成时出现的散射光。散射光的强度随着熔池310尺寸的增加而快速且非线性地增加,并且本公开内容的散射成像系统可以被配置成检测由熔化的晶片材料范围的增加引起的散射光强度的增加。

[0057] 在低于熔化的固相中,反射光信号的强度与材料温度之间的关系可以近似为大致线性的 γT ,其中, γ 是缩放因子,并且T是材料温度。对于小于入射光的波长(例如,激光束268的波长)的熔池310,熔池310和界面312的散射强度大约为 $\alpha V^{4/3}$,其中, α 是缩放因子,并

且 V 是熔池的体积或熔池半径的4次方,其中,大小 $\alpha \gg \gamma$ 。对于显著大于入射光的波长的熔池310,半径 r_1 的熔池上的不连续性是进入宽场的主要散射体,其中大小近似为 $\alpha V^{2/3}$ 。因此,增加的光功率与熔池尺寸之间的总体比例关系是高度非线性的,并且最终可能使散射成像系统饱和。在图3C中所示的示例中,熔池310的初始形成将由于从熔池周围的区域发射的散射光的突然增加而引起由散射熔化检测器280检测到的光的急剧不连续性。随着熔池310的尺寸增大(例如,熔池310b和310c相比熔池310a的尺寸),由散射熔化检测器280检测到的光的强度将按熔池的增大半径的4次方的数量级非线性地增加,这可能使由熔化检测器生成的熔化信号SM迅速饱和。本文中公开的散射熔化检测器280和散射成像通道被设计和配置成对熔化的开始高度敏感,其中,由熔化检测器捕获的光的强度的不连续性增加基本上在熔化开始时瞬时发生,从而引起光信号的强度增加若干数量级。

[0058] 在退火处理期间中,散射熔化检测器280可以用于捕获来自退火图像270周围区域的光,包括被退火图像区域中的光学结构衍射、反射或折射的光。在示例中,散射熔化检测器280生成表示检测到的光的熔化信号SM,并且将熔化信号发送至控制器300。在示例中,控制器300接收熔化信号SM并且可以使用该信号来创建反馈回路,该反馈回路控制退火激光器系统250的一个或更多个特性并且在一些示例中控制预热激光系统150的一个或更多个特性,例如功率水平,使得可以控制晶片表面温度 T_s 。在一些示例中,散射熔化检测器280可以用于校准和跟踪退火激光器系统250的光学性能。并且在一些示例中,散射熔化检测器280可以用于开发晶片特定激光功率校准,晶片特定激光功率校准为一组预定退火处理条件提供熔化阈值激光功率设定点。

[0059] 图4A示出了散射熔化检测器280的一个示例实现方式的侧视图。在所示出的示例中,熔化检测器280沿着散射检测器路径402接收来自晶片表面12的光,该散射检测器路径402相对于表面法线 N 具有不同于扫描激光束268的角 α_2 的角 α_1 。在所示出的示例中,扫描激光束268同时用作散射测温测量的探头并且用作退火激光束。在其他示例中,可以使用除了扫描激光束268之外的光源作为探头。利用扫描激光束268作为用于散射测量的光源提供了更简单布置的益处,因为其不需要另外的光源并且因为其仅照亮较小退火图像270周围的视场,该较小退火图像270可以快速地(例如,高达约1km/s)跨晶片表面12行进。

[0060] 扫描激光束268相对于表面法线 N 具有不同于角 α_1 的入射角 α_2 ,并且在晶片表面12上形成退火图像270。散射检测器路径402的角 α_1 被设计成使得来自晶片10的表面12的扫描激光束268的镜面反射268R不进入散射检测器路径402,从而实现通过熔化检测器280进行的散射观察。

[0061] 熔化检测器280包括光学器件404和图像捕获装置(ICD) 406。ICD 406包括或电连接至至少一个像素化二维CCD或CMOS焦平面阵列(FPA)和图像捕获装置领域已知的包括用于存储捕获图像的处理器和存储单元的相关联电子装置。光学器件404被配置成将晶片表面12成像到FPA上。在示例中,ICD 406被配置成在与激光束268的停留时间相比相对较长的曝光时间帧上例如大约50us的图像帧捕获率来捕获散射图像,使得在单个图像帧中捕获退火图像270跨退火照明线272的至少一个完整扫描。

[0062] 光学器件404可以包括一个或更多个透镜、反射镜、滤光器、光栅、孔径或其他部件。沿着散射检测器路径402收集的光(例如散射光)被光学器件404收集并在某些情况下被反射和/或过滤,并且被成像在图像捕获装置406的FPA上。光学器件404的视场(FOV)可以包

括晶片表面12的整体或其一部分。例如,光学器件404的FOV在扫描方向AR2(见图3B)上的宽度可以大约等于退火照明线272的长度L1,或者在方向AR2上的宽度可以比退火照明线的长度L1大至5%至50%。光学器件404的FOV在载物台扫描方向AR1(见图3B)上的宽度可以与FOV在退火图像扫描方向AR2上的宽度相同,或者可以大于或小于FOV在扫描方向AR2上的宽度。在示例中,光学器件404的FOV在载物台扫描方向AR1上的宽度是退火图像270在载物台扫描方向上的直径或外部范围的至少两倍,使得晶片表面12的低于熔化和在退火图像外部的部分与退火图像内的部分被捕获在同一图像中。光学器件404的在扫描方向AR2上的FOV可以比照明线272的长度L1大至少10%,并且在一些示例中,可以大至少20%。ICD 406的空间分辨率可以是10um/像素至50um/像素,并且在一些示例中大约是30um/像素。

[0063] 如所示出的,光源(此处为退火激光器系统250)产生扫描激光束268,该扫描激光束268在晶片表面12上形成退火图像270。扫描激光束268的光的第一部分被晶片表面12镜面反射并且没有到达熔化检测器280。在晶片表面12沿退火照明线272的温度低于熔化温度并且晶片材料处于固相时,散射熔化检测器280可以检测到一定量的背景光,例如来自光致发光的光和由于例如晶片表面12中的缺陷(例如厚度的小变化或诸如划痕或灰尘的大规模缺陷)而引起的散射光,或者在经处理的晶片的情况下,由晶片中的光学不连续性(例如晶片表面或次表面中的制造图案)衍射、反射和/或折射的光。因此,在未处理和高度抛光的晶片10的情况下,熔化检测器280可以沿着散射检测器路径402检测到很少的光或没有光,并且熔化检测器280的视场基本上是暗的。在经处理的晶片的情况下,可以捕获到与亚熔化固相条件相关联的一定程度的散射光。

[0064] 在扫描激光束268的功率密度升高至熔化阈值能量密度 E_m 时,在晶片表面12或次表面处的晶片材料中发生相变,从而产生大致位于退火图像270中的一部分的熔化液相材料。熔化液相材料的反射率基本上不同于固相材料的反射率。新形成的一定体积的液体的液相与固相之间的界面(例如,界面312(图3C))在晶片表面中产生了新的光学不连续性,其将光强烈散射到晶片的熔化区域上方的 2π 角度半球中。在熔化区域(例如,熔池310)中观察到的反射是漫射的,并且在一些示例中接近朗伯反射率。与固相相比,所得到的熔化区域的成像热反射信号的强度将具有显著增加,例如增加50%的数量级。相比之下,由于从固态到液态的材料相变引起的散射成像热反射信号沿着散射检测器路径402的强度的变化是极端的,例如强度高100,000%的数量级,这为检测熔化的开始提供了极高的灵敏度。

[0065] 在示例中,ICD 406在大于退火图像270的停留时间的时间长度上并且在对应的频率 $f \leq \frac{1}{t_d}$ 下捕获散射图像。散射熔化检测器280沿着退火激光器扫描方向AR2解析时间,其中,退火图像270以速度 v 移动,其中 $x = v \cdot t$ 。以这种方式,捕获的散射图像可以用于将沿着 x 方向(扫描方向AR2)的散射信号数据分解为带宽为 $f = \frac{1}{t_d}$ 的功率波动谱测量值。在散射图像帧包括退火图像270的整个扫描或多个扫描的情况下,散射熔化检测器280可以用于测量单个图像帧中的整个退火图像扫描条带上的处理均匀性。在示例中,散射熔化检测器280被配置成通过捕获在单个帧中可以针对所有点 $x = v \cdot (t \pm t_d)$ 被空间解析的散射图像来测量频率 $f \leq \frac{1}{t_d}$ 下的熔化行为和均匀性,这对于退火激光器系统250的优化是高度实用和有用的。

[0066] 图4B示出了散射熔化检测器280的另一示例实现方式,其中,与退火激光器系统250分离的探测光源410被用作作用于散射测量的探头。所示出的示例具有与图4A中所示出的示例类似的配置,包括检测器,该检测器包括光学器件412和ICD 406,该光学器件412可以包括与光学器件404相同或相似的部件。探测光源410可以是发射探测光420的脉冲光源,该探测光420入射到晶片表面12上与退火图像270交叠的区域中。与图4A中所示出的示例一样,图4B中的散射熔化检测器280具有散射检测器路径416,使得光学器件412不捕获探测光420的镜面反射420R或扫描激光束268的镜面反射268R。在所示出的示例中,熔化检测器280沿着散射检测器路径416接收来自晶片表面12的光,该散射检测器路径416相对于表面法线N具有与扫描激光束268的角 α_2 或探测光420的角 α_3 不同的角 α_1 。探测光源410可以是二极管或连接至激光源的光纤,并且可以发射较窄波长的光,例如绿光、蓝光、NIR或电信频带中的光,例如在1260nm与1675nm之间。光学器件412可以被配置成滤除除了探测光420之外的光的波长。探测光源410可以被配置成以比ICD 406的帧速率更大的频率或更短的持续时间发射探测光420的脉冲,使得可以对退火照明线272的离散部分进行成像。

[0067] 图5A和图5B概念性地示出了用于散射成像的两个替代光学布置500、501。布置500包括物镜502和图像形成透镜504,用于在ICD例如ICD 406的FPA上形成晶片表面12的包括熔池310的区域的散射图像。布置500对应于图4A和图4B中所示出的示例,其中诸如扫描激光束268(图4A的示例中)或单独的探测光源(例如,图4B的示例中的探测光420)的光入射到物体例如熔池310上。在傅里叶光学方面,由于透镜502和504的空间位置和数值孔径,零阶光530(非散射光)不会到达物镜502,使得形成在FPA上的图像来自自由熔池310和/或晶片表面或次表面上的其他光学散射体或不连续性散射的高阶衍射强度532。

[0068] 图5B示出了替代光学布置501,其中至少一个不透明光阑520用于阻挡零阶光530(非散射光)到达ICD例如ICD 406的FPA,使得由物镜510和图像形成透镜512在FPA上形成的图像来自自由熔池310和/或晶片表面或次表面上的其他光学散射体或不连续性散射的高阶衍射强度532。图4A的散射熔化检测器280或图4B的散射熔化检测器可以被修改为具有利用至少一个不透明光阑520来形成散射图像的光学布置501。

[0069] 图6A概念性地和图形化地示出了当晶片表面12低于熔化时在退火图像270的扫描期间由散射熔化检测器280的ICD 406在图像帧中捕获的数据。图6B概念性地示出了当退火激光器系统250的光功率增加并且晶片表面12的温度超过熔化阈值并且晶片材料开始熔化时在图像中捕获的数据的变化。

[0070] 当低于熔化时,由熔化检测器280捕获的图像是由晶片的粗糙度散射并且在一些情况下是由嵌入晶片表面12中的共振散射体散射的探头强度 $I(\vec{x})$ 。在薄膜近似中,由于高度差 $\delta(\vec{x})$ 引起的粗糙度将其自身强加为随机全息相位光栅 $\phi(\vec{x})$, $\phi(\vec{x})$ 将其自身作为 $e^{i\phi(\delta(\vec{x}))} = e^{i\alpha\delta(\vec{x})}$ 强加在电场上。对于均匀晶片制造处理,波动功率谱即 $\delta(\vec{x})$ 的傅立叶变换的平方 $|\mathcal{F}(\delta(\vec{x}))|^2 = |\delta(\vec{k})|^2$ 通常在超过 $\vec{k} = \frac{4\pi}{\lambda}$ 后非零,并且因此将均匀地将 $I(\vec{x})$ 散射到晶片平面上方的半球中。图6A概念性地示出了在低于熔化可能发生的这种弱光且相对平坦的响应。

[0071] 对于经处理和高度图案化的晶片10,一些材料制造处理将稀少的光学散射体包括

在薄膜中,这可能产生可能提供假熔化信号的随机图像。然而,在跨编译的图像帧对来自熔化检测器280的图像数据进行平均时,可以将低于熔化的假熔化信号与真熔化信号区分开,因为随着退火激光器250的光功率密度的增加,高强度信号在跨退火照明线272的整个扫描上均匀地出现在编译的图像帧中。本公开内容的各方面包括对低于熔化的晶片10的一组高解析率图像进行编译以对照明探测光束例如扫描激光束268或来自探测光源410的探测光420的形状进行采样。然后,可以将低于熔化的图像数据与高于熔化的图像数据区分开来,高于熔化的图像数据将包括半径 $r_{\text{melt}} < r_{\text{beam}}$ 的熔池310的高强度伪影和相关联的界面312。在熔池中的晶片材料的液相部分中探测光束的缩短的吸收长度减少了由经处理的晶片中的次表面光学不连续性引起的散射,从而简化了在超过熔化阈值时的散射光学响应,这进一步有助于检测熔化的开始。

[0072] 图6C示出了来自使用捕获的光的振幅来识别熔化的系统100的示例实现方式的测试数据的图像帧。图6C示出了未适当优化的系统的示例,其中,退火图像扫描的开始(图像的顶部)和结束(底部)都高于熔化,并且中间的暗淡区域正好低于熔化。退火激光器系统250的光功率密度没有被适当地校准,从而引起光功率的不希望的波动,这导致扫描的开始和结束高于熔化并且扫描的中间低于熔化。

[0073] 图7A至图7C示出了来自针对具有独特材料堆叠且在特定卡盘温度下的特定经处理的晶片类型的熔化阈值校准的测试数据。图7A至图7C示出了来自扫描激光束268的三个不同条带的一个或更多个扫描,其中,条带是一系列连续的扫描。在图7A中,退火激光器系统250的功率被设置为132W,在图7B中的下一条带中,功率水平被增加至135W,并且在图7C中的第三条带中功率被增加至138W。箭头指向图像中信号饱和的位置,指示由于晶片材料的熔化引起散射光急剧增加而引起图像中这些区域的高光强度。图7A至图7C中的图像还示出了由经处理的晶片的固有粗糙度和不均匀性引起的低强度伪影(在每个图中,低强度伪影中的一些低强度伪影以虚线圈出)。然而,与晶片的熔化区域对应的高强度位置具有更大的空间密度和比散射图像中的低于熔化的背景光大许多数量级的大小,并且从背景散射中强烈地突出。图7A至图7C示出了其中可以通过提高激光功率和研究熔化计量来针对具有独特材料堆叠的特定经处理的晶片类型校准熔化阈值的示例。

[0074] 图8示出了来自与图7A至图7C所示相同的校准处理的另外的数据。Y轴是ICD 406的FPA捕获的光的累积强度。更具体地,Y轴是图像中所有像素的所有灰度值的总和,其中,如本领域已知的,FPA的每个像素在0(黑色)与1(白色)之间的灰度级上记录入射光的强度水平。X轴是退火图像扫描数。图8示出了在132W下退火图像的第一多个扫描,并且灰度值的和是第一值,该第一值较低并且表示低于熔化的条件和由ICD 406的FPA捕获的背景光散射。图8示出了在功率增加至135W(其被确定为熔化阈值)时灰度值的增加,并且然后在激光功率增加至138W(其被确定为超过熔化阈值)时由ICD 406捕获的光的强度急剧增加,并且晶片材料的液态体积在退火图像扫描的较大比例上一致地形成。

[0075] 图9A和图9B示出了退火激光器系统250的功率被设置在被确定为半导体晶片的熔化阈值处的情况下的良好优化系统的测试数据。图9A和图9B示出了呈两种不同格式的相同数据。每种数据是来自高速光斑扫描方向上的许多图像帧的分布分析的集合。在图9A中,Y轴是强度,并且X轴是沿着退火图像扫描的位置,其中多个连续扫描的光强度分布交叠。在图9B中,在三维彩色图上示出了相同的扫描强度分布,其中Y轴是退火图像扫描方向上的位

置,X轴是图像帧和载物台扫描方向上的位置,并且颜色指示光信号的强度。图9B是利用散射熔化检测器280捕获的多个图像帧的马赛克。

[0076] 利用退火图像的速度和ICD的空间解析率的知识,可以将图像帧中的位置转换为时间上的实例和沿着退火图像扫描的特定位置。通过示例的方式,如果退火图像扫描的速度是500m/s并且ICD的空间分辨率是30um/像素,则每个像素在时间上表示60ns,并且具有50ns曝光的退火图像扫描的图像可以被分解成60ns时间增量。更一般地,散射熔化检测器280(例如如图4A所示出的示例)可以用于通过在单个帧中空间解析所有点 $x=v \cdot (t \pm t_d)$ 来测量频率 $f \leq \frac{1}{t_d}$ 下的熔化行为和均匀性,这对于退火激光器250的优化是实用和有用的。在使用与处理激光束分离的脉冲探头的示例中,如在图4B中,可以获得更高频率的数据。

[0077] 在一些示例中,扫描激光束268的光功率密度跨退火图像270的扫描可能存在较小的可变性。因此,校准退火激光器系统250的方法可以包括跨多个扫描在扫描中的特定点处分析来自散射熔化检测器280的熔化信号,以消除来自校准处理中沿着扫描的光功率变化的任何影响。通过示例的方式,图9B中的位置902示出了可以分析来自位置902处的多个扫描的熔化信号的特定扫描位置。例如,可以增量地调整例如以总功率的百分比的分数调整退火激光器系统250的功率水平,以识别检测到熔化的退火图像的扫描的百分比。例如,对于给定的卡盘温度 T_{ch} 和停留时间 t_{dwell} ,存在熔化阈值能量密度 $E_m(T_{ch}, t_d)$,并且传递的实际能量密度是 $E_m \pm \delta_E$ 。由于功率偶尔达到熔化阈值,因此在设定点功率 $E_m - \delta_E$ 下很少检测到熔化。熔化总是在高于该处理的范围的 $E_m + \delta_E$ 处被检测到。通过在一系列条带上将扫描激光束268的功率从低于 $E_m - \delta_E$ 改变至高于 $E_m + \delta_E$ 并且分析在特定扫描位置(例如,位置902)处检测到熔化的时间百分比,可以从在低于该能量的情况下从未检测到熔化的能量和在高于该能量的情况下熔化存在于所有或基本上所有扫描中的能量中独立地识别 E_m 和 δ_E 两者。在示例中,在退火处理期间,扫描激光束268的功率水平在整个退火图像扫描中递增地变化。因此,可以在多个扫描位置处重复前述校准处理,以跨退火图像的整个扫描确定熔化阈值功率水平设定点。

[0078] 控制器

[0079] 图10是示出可以与本公开内容的退火系统一起使用的一个或更多个计算装置1000的一个示例实现方式的物理部件的框图,包括用于提供控制器300、载物台控制器124和熔化检测器280的功能。所示出的是耦接至芯片组1004的至少一个处理器1002。存储器1006、网络适配器1008和通信模块1010也耦接至芯片组1004。外围装置1012和显示器1014耦接至计算装置1000。在另一实施方式中,存储器1006直接耦接至处理器1002。存储装置1016也耦接至芯片组1004。

[0080] 存储装置1016可以是任何非暂态计算机可读存储介质,例如硬盘驱动器、致密盘只读存储器(CD-ROM)、DVD或固态存储装置。存储装置1016可以包括可以存储在与激光退火系统领域已知的退火系统通信的计算机存储装置中的任何软件或数据。图10还示出了可以存储在存储装置1016上的应用1020的非限制性示例列表以及熔化阈值1022和退火激光器熔化校准设定点1024。

[0081] 在所示出的示例中,应用1020包括ICD控制应用1030和图像处理应用1032,其包括用于控制散射熔化检测器的ICD(例如散射熔化检测器280的ICD 406)的指令。ICD控制应用

1030可以包括用于控制诸如帧速率和快门速度的功能以及用于处理由ICD的FPA生成的信号的指令。图像处理应用1032可以被配置成执行一个或更多个图像处理算法以分析从具有包括退火图像的FOV的散射检测器路径收集的光。

[0082] 如本文中描述的,在退火图像例如退火图像270导致晶片表面12上或晶片表面12下方的材料开始熔化时,材料的光学特性发生实质性变化,这引起散射熔化检测器收集的光的强度显著增加。图像处理应用1032可以被配置成使用各种图像处理算法中的任何图像处理算法来识别由ICD收集的光的强度的增加。例如以下中的一个或更多个:拟合算法、边缘检测算法、特征基分解、前馈分类器,或者检测所捕获的图像帧中超过熔化阈值的任何强度,或者与晶片材料的液相与固相之间的界面引起的光散射效应相对应的强度值。在示例中,图像处理应用1032可以被配置成识别由ICD在小于由处理光束(例如,激光束268)形成的退火图像270的区域中收集的光的强度的增加。在示例中,图像处理应用1032可以将光强度与熔化阈值1022进行比较,熔化阈值1022可以包括与由散射熔化检测器280针对不同尺寸的熔池而捕获的光强度对应的阈值,或者将光强度与低于熔化的强度和激光功率水平相关联的阈值。参照图3C作为示例,图像处理应用1032可以被配置成通过检测沿着散射检测器路径402或416捕获的超过高于周围探测光束的相对散射强度的光的强度来检测熔化的开始以及熔池310和对应界面312的形成。在示例中,可以将阈值归一化为亚熔化散射光束光强度分布。图像处理应用1032还可以被配置成分析包括超过熔化阈值的光强度的图像帧的空间密度或空间范围,以便区分真熔化信号和由非熔化散射体引起的离散假信号。图像处理应用1032还可以被配置成将图像帧中的高强度信号的空间位置与移动退火图像270的已知位置和/或退火照明线272的位置进行比较,以验证高强度信号是否与退火图像或退火照明线交叠或紧邻。

[0083] 图11概念性地示出了在退火处理期间由ICD 406捕获的示例图像帧1100的一部分。图11示出了像素1102的网格和照明线272的一部分。图像帧1100包括与图11中标记为y的载物台扫描方向对准的多个列1104(标记为1104a和1104b的两列)和与图11中标记为x的退火图像扫描方向对准的多个行1106(标记为1106a的一行)。交叉影线阴影被包括在像素的一列中,以示出沿着给定列1104的像素的变化灰度级的示例。

[0084] 图12至图14示出了图像处理应用例如图像处理应用1032(图10)可以被配置成执行的熔化检测算法的示例。图12示出了生成低于熔化的参考图像和相关联的参数的示例方法1200。在块1203处,方法1200可以包括在低于熔化的情况下对晶片退火、用散射熔化检测器捕获图像帧以及记录退火激光器功率水平。在示例中,可以利用板载检测器(OBD)来测量激光功率,该板载检测器(OBD)生成与退火激光束例如退火激光束268的光功率密度对应的电压 V_{ref} 。在其他示例中,可以使用用于监测激光功率的任何其他传感器工艺或技术。块1203还可以包括接收晶片类型信息,例如与特定晶片设计对应的唯一标识号。在块1203中,捕获诸如图像帧1100(图11)的图像帧。因此,块1203包括在低于将使晶片材料熔化的功率水平的退火激光器功率水平下执行退火处理,以便利用散射熔化检测器例如散射熔化检测器280来收集低于熔化的图像数据,该低于熔化的图像数据可以用作检测熔化的熔化处理期间的数据的参考。

[0085] 在块1205中,方法1200可以包括从捕获的图像帧创建低于熔化的参考图像 I_{ref} ,这可以包括对多个图像帧的像素值进行平均,排除图像中包括晶片边缘的任何图像。在块

1207处,对低于熔化的参考图像进行处理以生成多个低于熔化的一维载物台扫描方向强度分布。块1207可以包括在载物台扫描方向上在像素的一列或更多列1104上运行一维峰值检测算法或拟合算法,并且针对每个一维强度分布生成参数,例如,振幅 $A_{\text{ref}}(x)$ 、宽度 $w_{\text{ref}}(x)$ 以及重心或最大值位置 $y_{0,\text{ref}}(x)$,其中,在示例中,宽度 $w_{\text{ref}}(x)$ 是距 $y_{0,\text{ref}}(x)$ 的 $\pm y$ 距离,并且全宽度是 $2 \cdot w_{\text{ref}}(x)$ 。此处, y 是指载物台扫描方向,并且 x 是指或扫描方向(见图11)。因此,块1207返回沿 y 方向的每一列1104或一组列的强度分布。块1207还可以包括将多个分布保存为扫描分布。

[0086] 在块1209中,可以识别低于熔化的参考图像的感兴趣区域(ROI),此处被称为 ROI_{ref} ,其对应于图像中的照明线272的空间位置。可以通过识别位于扫描分布内的具有高于最小值的强度的像素来确定 ROI_{ref} 。在示例中, ROI_{ref} 是根据在块1207中确定的扫描分布参数来确定的,例如,参考图像中具有大于黑电平加上与退火图像外部背景对应的多个灰度级(例如,FPA的255个灰度级上的标度上的两个灰度级)的振幅并且具有位于 $y = y_{0,\text{ref}}(x) \pm 2 \cdot w_{\text{ref}}(x)$ 内的 y 位置的像素。在块1211处,方法1200可以包括例如通过将每一行1106中的 ROI_{ref} 内的像素的灰度值相加并除以列1104(见图11)的数目来创建平均一维载物台扫描方向强度分布。

[0087] 图13示出了熔化检测算法的一个示例方法1300,其中,根据图像帧中的振幅的非线性来检测熔化。在块1303处,方法1300可以包括在低于熔化阈值、等于熔化阈值或高于熔化阈值的情况下对晶片进行退火,利用散射熔化检测器捕获图像帧,以及记录此处被称为 V_{melt} 的对应的OBD电压,其指示在捕获图像时退火激光束的功率水平。块1303还可以包括接收晶片信息例如唯一ID,使得可以参考在方法1200中获得的适当的低于熔化的参考数据。在块1305处,方法1300可以包括通过对在相同激光功率水平下执行的扫描的所有图像帧(排除包括晶片边缘的任何帧)进行平均来从捕获的图像帧创建平均图像,以及保存平均图像。在块1307处,生成将块1305中创建的平均图像参考到相同晶片类型的对应的低于熔化的参考图像的熔化检测图像 I_{data} 。在示例中,来自块1305的平均图像的像素值和对应的激光功率值可以如下被参考到在图12的块1205处生成的低于熔化的参考图像中的像素值和对应的激光功率: $\frac{I_{\text{data}}}{I_{\text{ref}}} \times \frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{melt}}}$, 其中, I_{data} 是在块1207处生成的平均图像的像素值, I_{ref} 是

低于熔化的参考图像的像素值,并且 V_{ref} 和 V_{melt} 是对应的OBD信号值。在块1309中,可以将熔化图像值与阈值(例如1.1)进行比较,以确定图像中是否发生了任何熔化。例如,可以对熔化图像中 ROI_{ref} 内的像素值进行平均并与阈值进行比较。

[0088] 此外或代替执行块1309,在块1311处,该方法可以包括应用在块1307处生成的熔化检测图像的一维分布分析,以识别载物台扫描方向上具有比激光束的宽度更小的宽度的窄峰。在块1313处,确定所识别的峰的宽度 $w(x)$,并且将其与低于熔化的参考图像的宽度 $w(x)$ 进行比较。如果所识别的峰具有更小的宽度,例如小于低于熔化的参考图像 $w_{\text{ref}}(x)$ 的宽度的50%,则确定已经发生了熔化。前述基于激光束的能量分布并且假设在载物台扫描方向 y 上的高斯分布,这引起熔化仅发生在较大退火图像270的狭窄区域中。因此,检测到的在载物台扫描方向(与扫描方向正交)上的宽度小于退火图像在载物台扫描方向上的宽度的强度峰值指示退火图像内的局部熔化区域或熔池。通过示例的方式,参照图11,沿着列1104的像素1102a至1102e包括指示在块1307处创建的熔化检测图像的不同振幅的交叉影线。例

如,如果像素1102c或1102b至1102d具有比周围像素的振幅更大并且例如高于阈值的振幅,并且像素1102b至1102c在载物台扫描方向y上的宽度与退火照明线272或对应的ROI_{ref}的宽度相比足够窄,则方法1300可以确定已经发生了熔化。步骤1311和1313对于具有高散射的经处理的晶片可能最有用,并且可以利用具有高解析率光学器件的散射熔化检测器来实现。

[0089] 图14示出了用于根据熔化统计数据来检测熔化的另一示例算法——方法1400。在块1403中,方法1400可以包括在低于熔化阈值、处于熔化阈值或高于熔化阈值的情况下对晶片进行退火、利用散射熔化检测器来捕获图像帧以及记录OBD电压信号 V_{melt} 。在块1405处,计算图像帧的(在步骤1209处确定的)ROI_{ref}内的像素值的标准偏差。在示例中,块1405可以包括计算分数标准偏差,该分数标准偏差是ROI_{ref}内的像素值与ROI_{ref}内的像素值的平均值之比的标准偏差。大的标准偏差指示ROI_{ref}内的强度值的宽可变性,指示激光功率被设置在熔化阈值处,其中,在高于熔化或低于熔化的像素中存在较大可变性,例如在图9B中所示出的示例中。在块1407处,将计算出的标准偏差与阈值进行比较以确定熔化的存在。方法1400对于具有最小散射的晶片例如裸硅晶片可能最有用。

[0090] 方法1200、1300和1400可以根据特定晶片类型和应用选择性地用作激光退火处理的熔化检测子例程,包括针对处理条件的特定组合来校准激光系统和确定激光功率校准表或曲线,所述处理条件包括晶片类型、卡盘温度和停留时间。参数和参考数据例如 V_{ref} 、ROI_{ref}和 V_{melt} 、低于熔化的一维载物台扫描方向强度分布等可以存储在存储器中例如存储装置1016中,并且可以由图像处理应用1032访问以执行本文所公开的图像处理算法中的任何图像处理算法。

[0091] 具有退火激光器控制应用1034的计算装置1000可以被配置成控制预热激光器系统150和/或退火激光器系统250的一个或更多个参数,以实现处于熔化阈值或高于熔化阈值的期望处理条件。退火激光器控制应用1034还可以被配置成根据退火激光器熔化校准设定点1024来控制退火激光器系统250的功率水平。退火激光器熔化校准设定点1024可以指定激光功率水平设定点,用于针对一组特定处理条件(例如,针对特定卡盘加热器温度、退火图像的停留时间和晶片10的类型)实现亚熔化、熔化阈值或超过熔化阈值的退火条件。如本文中描述的,散射熔化检测器280可以用于执行退火激光器系统250的熔化校准以确定退火激光器熔化校准设定点1024。

[0092] 在示例中,ICD 406可以具有小于退火图像的扫描频率 f_{sweep} 的最大曝光频率。散射熔化检测器280的FOV可以包括至少一个退火照明线272(即,退火图像的至少一个扫描),并且在一些情况下可以包括多个退火照明线(退火图像的多次连续扫描)。因此,通过ICD 406的一次曝光捕获的单个图像可以包括退火图像270的至少一个扫描,并且在一些示例中包括退火图像270的多个扫描。图像处理应用1032可以利用关于材料相变的已知强度分布的预定信息,并且从来自一个或更多个图像帧的多个扫描的捕获强度中提取一个或更多个统计相关函数以表征熔化处理的一致性,或者充当器件晶片上的多采样器,或者充当空间锁定频率以利用快速傅里叶变换来简化熔化检测。

[0093] 在本公开内容的散射熔化检测器包括与处理激光器分离的探头例如探头光源410(图4B)的示例中,应用1020还可以包括探头控制应用1036,探头控制应用1036用于控制由探头光源410发射的脉冲辐射的强度、相位和/或频率以及/或者由探头发射的具有变化的

长度或周期的辐射的脉冲定时和/或传感器曝光定时,例如ICD 406的曝光定时。探头控制应用1036可以包括用于通过公共时钟将探头和ICD与扫描频率 f_{sweep} 同步以及根据扫描频率、扫描相位和要测量的晶片材料相变处理的方面来确定探头410的脉冲频率 f_{Probe} 和脉冲相位 ϕ_{Probe} 和ICD曝光 f_{exposure} 的指令。在一个示例中, f_{Probe} 和 $f_{\text{exposure}} \ll f_{\text{sweep}}$,使得每个ICD曝光的 n_{probes} 为1。在一个示例中,频率比 $R = f_{\text{sweep}}/f_{\text{Probe}}$ 可以是任何整数,使得可以提取关于相变处理的稳定性的统计数据。在一个示例中,可以不存在 f_{Probe} ,而是可以收集已知时间的脉冲的随机分布以用于提取宽带统计数据。在一些示例中, f_{Probe} 可以是具有 f_{sweep} 的合理拍频以确定和优化扫描均匀性。在一个示例中,选择探测脉冲频率 f_{Probe} ,使得 f_{Probe} 与退火图像270在x方向上的扫描同步,使得一组退火图像扫描中的同步时刻的子集将用单个脉冲探测,其中,多个脉冲由ICD 406收集到单个图像帧中,使得可以从熔化区域的对比度中提取相变的高带宽一致性。在一些示例中,探头410被配置成发射持续时间为3ns至20ns的光脉冲,并且在一些示例中为持续时间为5ns至15ns的光脉冲,并且在一些示例中为持续时间为5ns至10ns的光脉冲,并且在一些示例中为持续时间为5ns至7ns的光脉冲。

[0094] 存储器1006可以保存处理器1002使用的指令和数据。网络适配器1008将计算装置1000耦接至局域网或广域网,并且通信模块1010提供用于有线通信或无线通信的另外的信道。如本领域已知的,计算装置1000可以具有与图10中所示出的部件不同的部件和/或其他部件。另外,计算装置1000可以缺少某些所示出的部件。在一些示例中,存储装置1016可以是本地的和/或远离计算装置1000,例如单独的存储装置、冷存储装置、存储区域网络(SAN)或基于云的存储架构。

[0095] 如本领域已知的,计算装置1000适于执行用于提供本文中描述的功能的计算机程序模块。如本文中所使用的,术语模块是指用于提供指定功能的计算机程序逻辑。因此,可以在硬件、固件和/或软件中实现模块。在一个实施方式中,程序模块存储在存储装置1016上,加载到存储器1006中,并且由处理器1002执行。

[0096] 本公开内容的一些部分描述了算法处理或操作方面的示例。这些算法描述和表示通常由数据处理领域的技术人员使用,以有效地向本领域的其他技术人员传达其工作的实质。虽然在功能上、计算上或逻辑上进行了描述,但是这些操作应被理解为由包括由处理器或等效电路、微码等执行的指令的计算机程序来实现。此外,在不丧失一般性的情况下,将这些功能操作的布置称为模块有时也被证明是方便的。

[0097] 虽然图10示出了单个计算装置1000和存储装置1016,但是应当理解,由计算装置1000以及存储装置1016提供的功能和存储可以在任何数目的计算装置和存储装置中实现。通过示例的方式,第一计算装置1000可以用于实现控制器300,并且一个或更多个其他计算装置1000可以用于执行本文公开的其他功能,例如载物台控制器124、卡盘加热器、熔化检测器280等。

[0098] 计算装置1000可以被配置成使用有线通信系统和/或无线通信系统两者通过一个或更多个网络与系统100的其他计算装置通信,所述一个或更多个网络可以包括局域网和/或广域网的任何组合。在一个实施方式中,网络使用标准通信技术和/或协议。例如,网络包括使用诸如以太网、802.11、全球微波接入互操作性(WiMAX)、3G、4G、码分多址(CDMA)、数字用户线(DSL)等技术的通信链路。用于经由网络进行通信的网络协议的示例包括多协议标签交换(MPLS)、传输控制协议/互联网协议(TCP/IP)、超文本传输协议(HTTP)、简单邮件传

输协议 (SMTP) 和文件传输协议 (FTP)。通过网络交换的数据可以使用任何合适的格式例如超文本标记语言 (HTML) 或可扩展标记语言 (XML) 来表示。本领域技术人员将认识到, 基于网络的性质, 使用其他合适技术的加密将适用于各种应用。

[0099] 本公开内容的示例包括分析散射图像数据的方法。该方法包括: 接收在半导体的激光退火处理期间捕获的半导体表面的区域的散射图像; 以及从图像中识别半导体材料的固态到液态材料的相变; 其中, 所述识别包括识别根据一个或多个退火处理控制参数的图像强度的统计、时间序列或几何非线性变化。在一些示例中, 一个或多个退火处理控制参数包括激光功率或光功率密度。

[0100] 本公开内容的示例还包括对半导体材料的激光退火处理执行熔化校准的方法。该方法包括: 利用来自退火激光器的退火激光束对半导体材料的区域进行退火, 其中, 所述退火包括在半导体材料发生固态到液态相变的熔化阈值功率水平以下和之上递增地改变退火激光器的功率水平; 在退火期间捕获半导体材料区域的散射图像; 以及根据所捕获的散射图像来确定退火激光器的至少一个熔化阈值设定功率水平。

[0101] 本公开内容的示例包括用于在激光退火处理期间控制退火激光器操作参数的方法。该方法包括: 根据通过执行前述段落中描述的方法而创建的激光退火温度校准, 在半导体材料的退火处理期间控制退火激光器的操作参数。

[0102] 本公开内容的示例还包括机器可读指令, 所述机器可读指令被配置成使激光退火系统的控制器的处理器根据退火处理参数和根据本文中公开的方法确定的至少一个退火激光器熔化阈值校准设定点来控制退火激光器。

[0103] 本公开内容的示例包括形成用于与熔化检测算法一起使用的低于熔化的参考图像和参数的方法。该方法包括: 在低于熔化的情况下对晶片进行退火; 利用散射熔化检测器来捕获图像帧; 记录退火激光器功率水平; 根据所捕获的图像帧创建低于熔化的参考图像; 处理低于熔化的参考图像以生成多个低于熔化的一维载物台扫描方向强度分布; 识别低于熔化的参考图像的感兴趣区域 (ROIref); 以及创建平均一维载物台扫描方向强度分布。

[0104] 本公开内容的示例包括检测晶片材料在退火处理期间是否熔化的方法。该方法包括在低于熔化阈值、处于熔化阈值或高于熔化阈值的情况下对晶片进行退火, 在退火期间利用散射熔化检测器捕获图像帧, 并且记录激光功率水平; 根据所捕获的图像帧创建平均图像; 以及创建将平均图像参考到相同晶片类型的对应的低于熔化的参考图像的熔化检测图像。

[0105] 根据段落 [0082] 的方法, 还包括将熔化检测图像的值与阈值进行比较, 以确定在图像的一个或多个区域中是否发生了熔化。

[0106] 根据段落 [0082] 的方法, 还包括应用熔化检测图像的一维分布分析, 以识别在载物台扫描方向上具有比处理激光束的宽度小的宽度的窄峰。

[0107] 根据段落 [0082] 的方法, 其中, 通过使用本文中公开的系统中的任何系统执行方法中的任何方法来获得低于熔化的参考图像。

[0108] 本公开内容的示例还包括检测晶片材料在退火处理期间是否熔化的方法。该方法包括: 在低于熔化阈值、处于熔化阈值或高于熔化阈值的情况下对晶片进行退火, 并且在退火期间利用散射熔化检测器来捕获图像帧; 计算图像帧的感兴趣区域 ROIref 内的像素值的统计变化, 其中, ROIref 是图像的在晶片上形成退火激光图像的区域; 以及比较所计算出的

统计变化以识别熔化的开始。

[0109] 前述内容是对本公开内容的说明性实施方式的详细描述。注意,在本说明书和所附权利要求书中,除非特别说明或另有指示,否则例如在短语“X、Y和Z中的至少一个”和“X、Y和Z中一个或更多个”中使用的连接性语言应当被视为意指连接性列表中的每一项可以以除列表中的每个其他项之外的任何数目存在,或者以与连接性列表中的任何或所有其他项目组合的任何数目存在,连接性列表中的每个列表也可以以任何数目存在。应用该一般规则,在连接性列表包括X、Y和Z的前述示例中的连接性短语应当各自包括:X中的一个或更多个;Y中的一个或更多个;Z中的一个或更多个;X中的一个或更多个和Y中的一个或更多个;Y中的一个或更多个和Z中的一个或更多个;X中的一个或更多个和Z中的一个或更多个;以及X中的一个或更多个、Y中的一个或更多个和Z中的一个或更多个。

[0110] 在不脱离本公开内容的精神和范围的情况下,可以进行各种修改和添加。上面描述的各种实施方式中的每个实施方式的特征可以适当地与其他所描述的実施方式的特征组合,以便在相关联的新的实施方式中提供多种特征组合。此外,虽然前面描述了多个单独的实施方式,但是本文所描述的仅是本公开内容的原理的应用的说明。此外,尽管本文中的特定方法可以被示出和/或描述为以特定顺序执行,但是在实现本公开内容的各方面的普通技术范围内,该顺序是高度可变的。因此,本描述意在仅以示例的方式进行,并且不以其他方式限制本公开内容的范围。

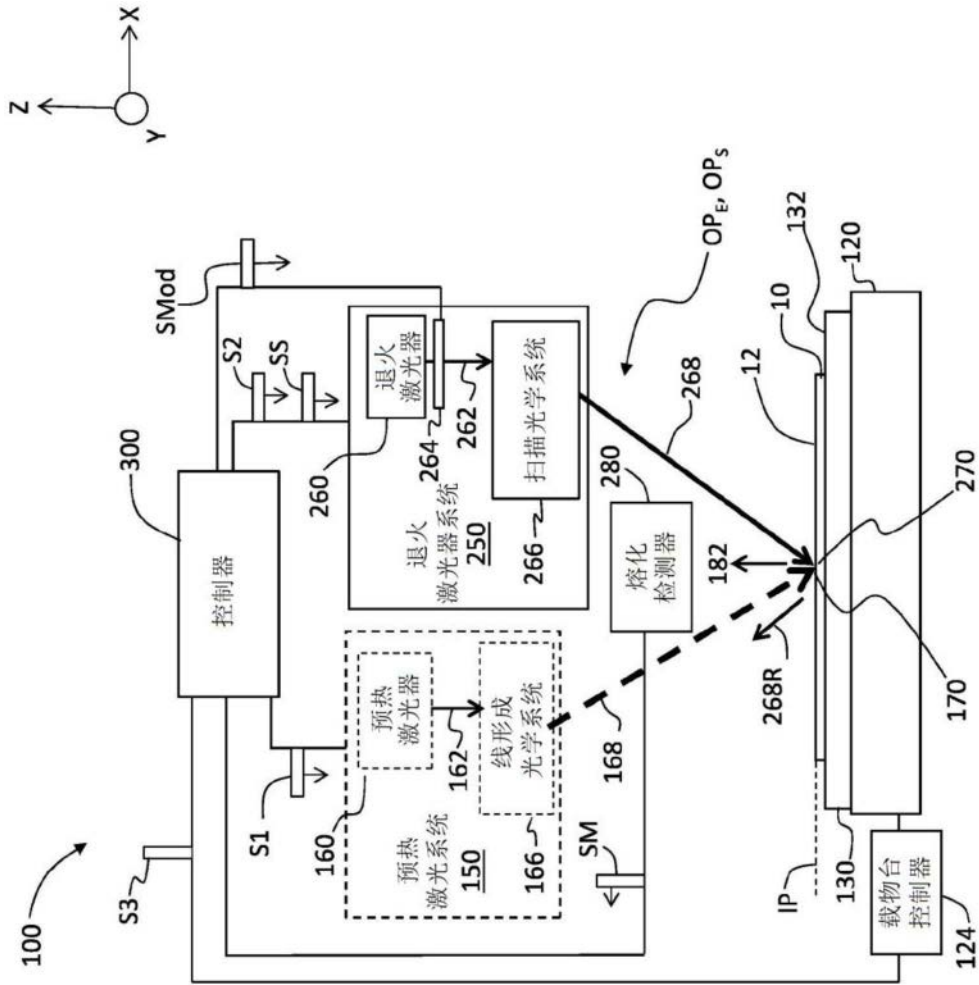


图1

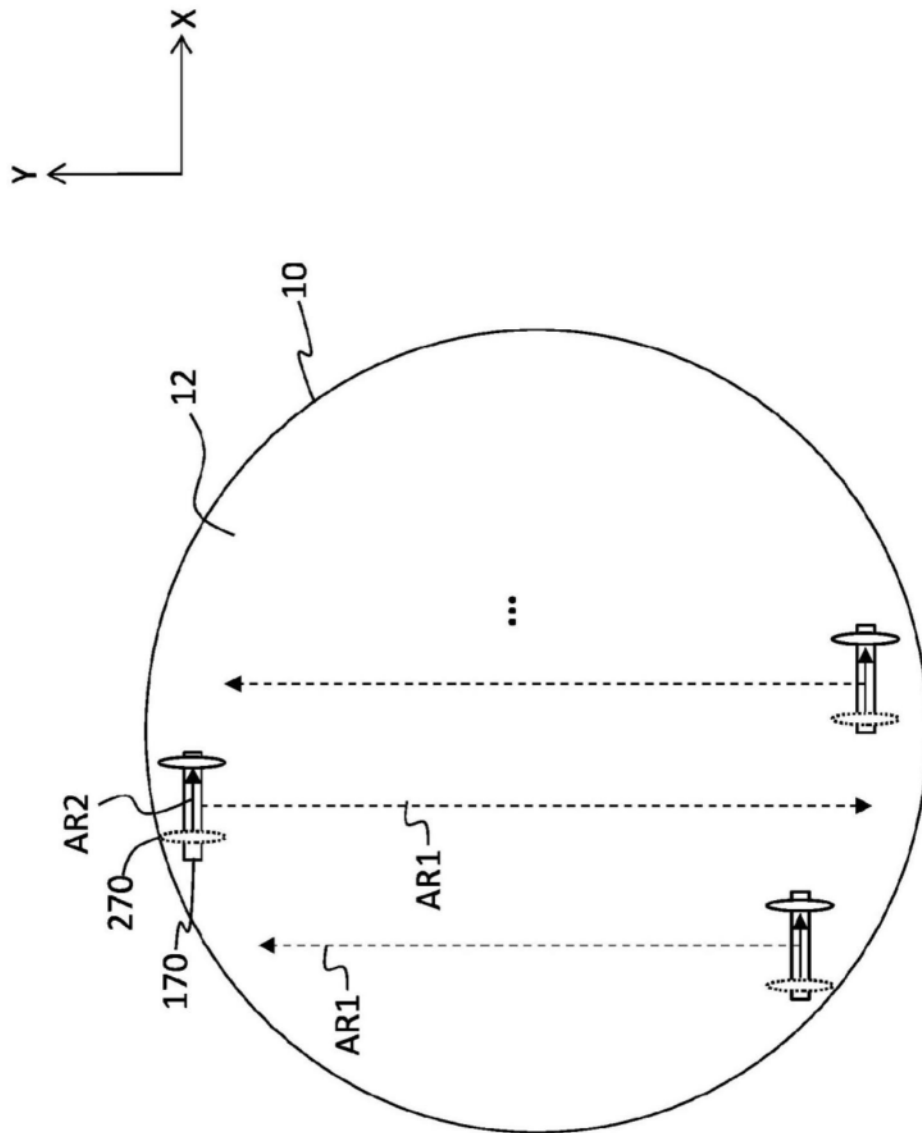


图2

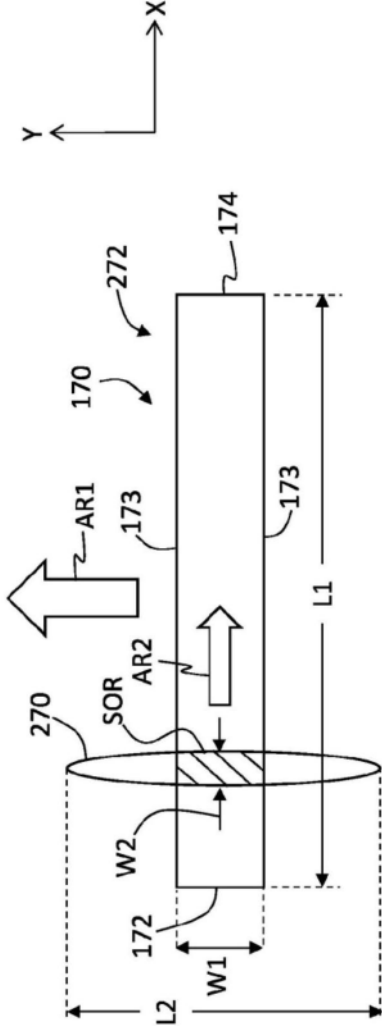


图3A

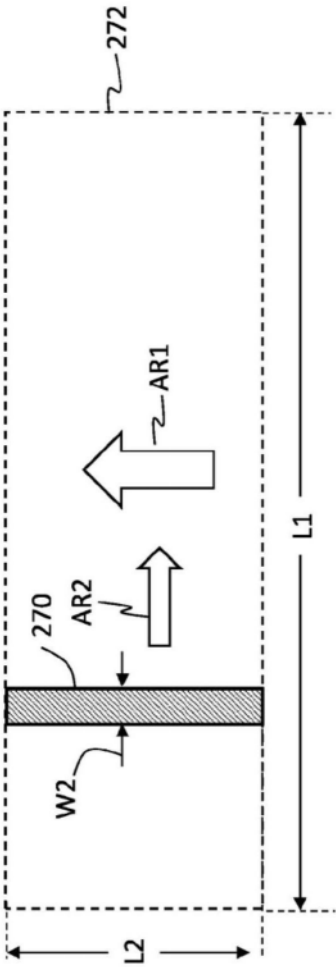


图3B

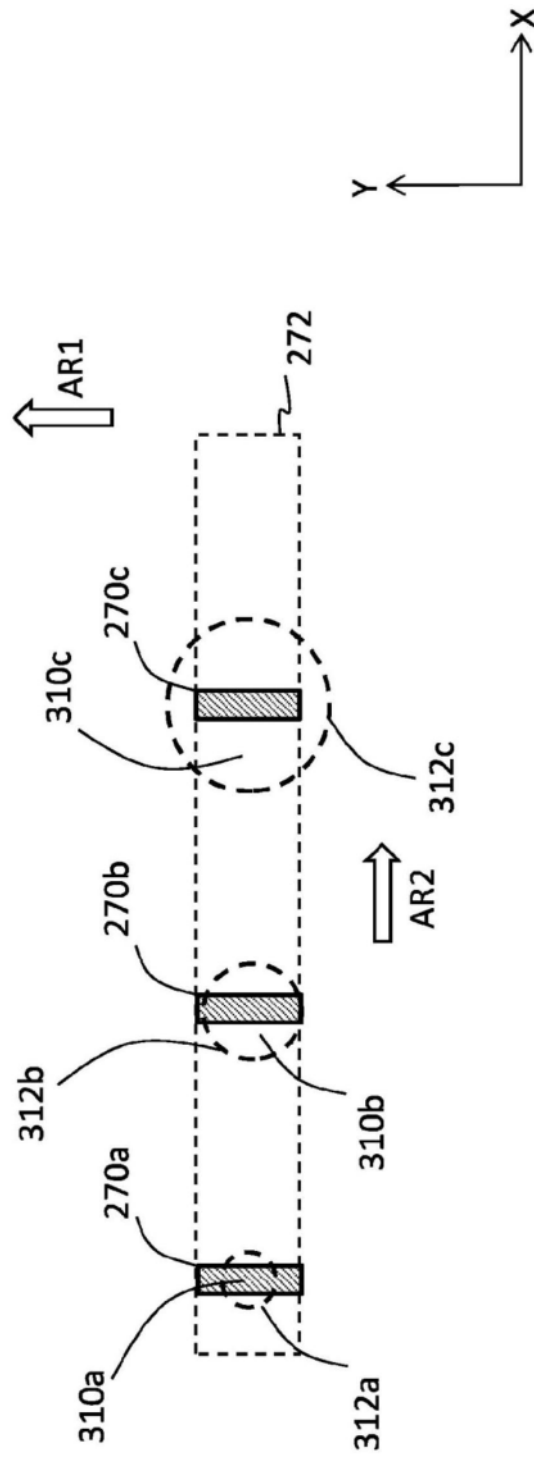


图3C

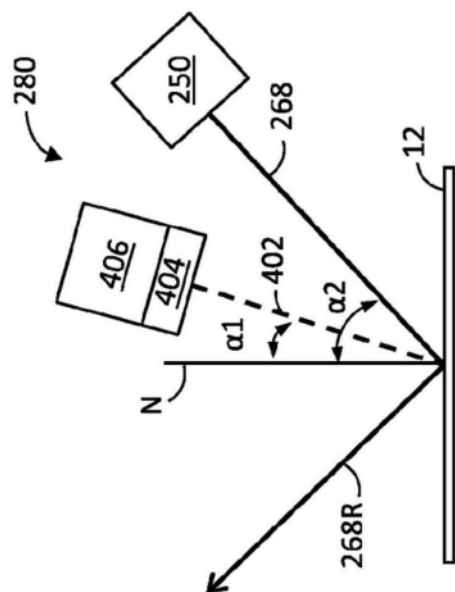


图4A

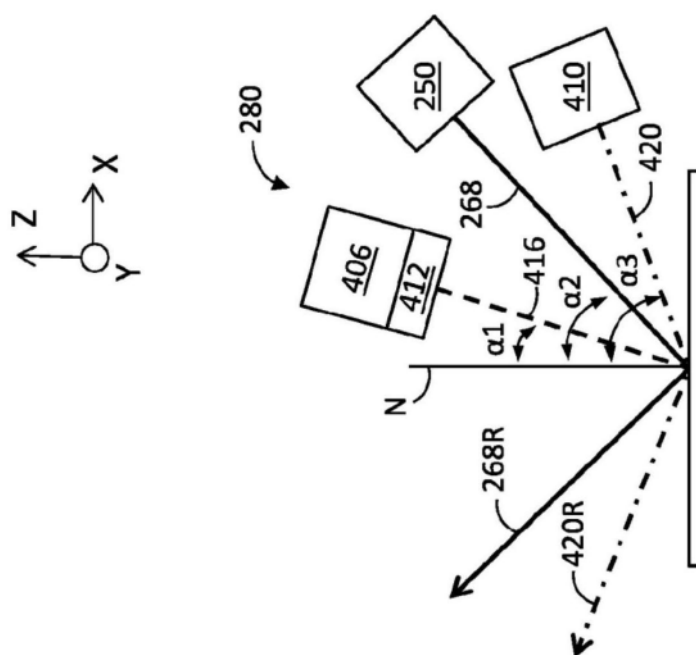


图4B

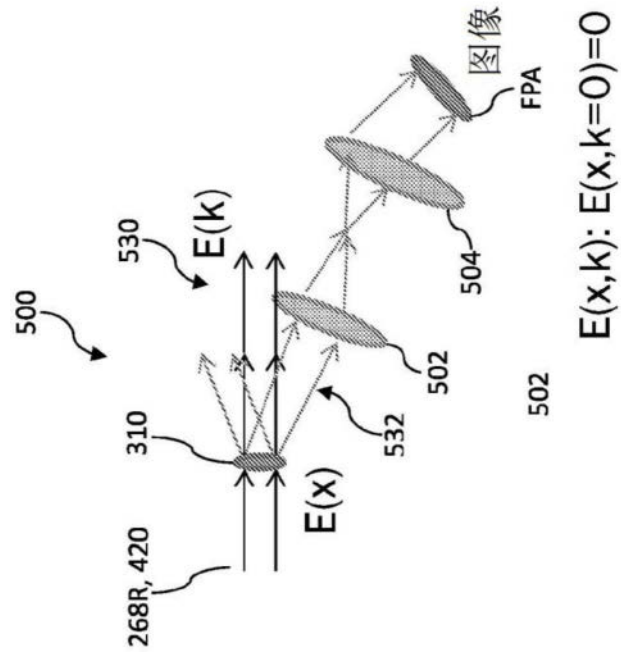


图5A

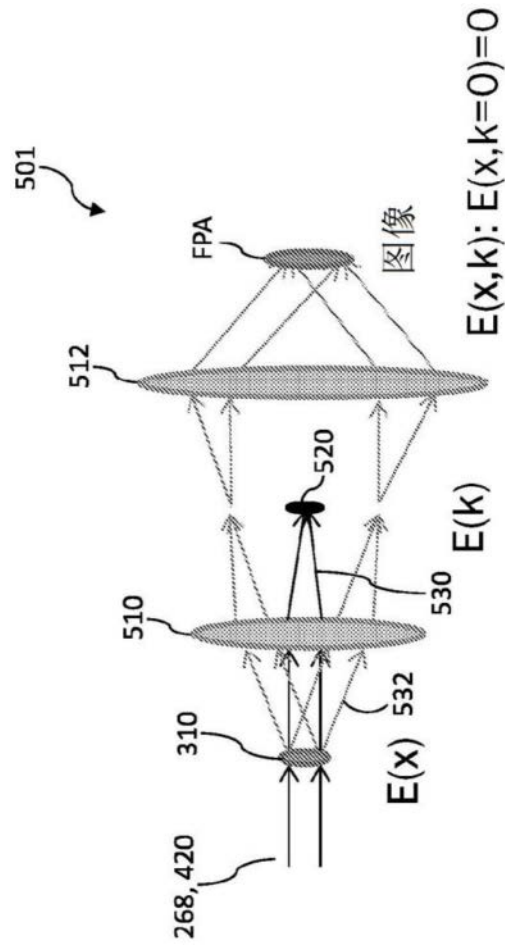


图5B

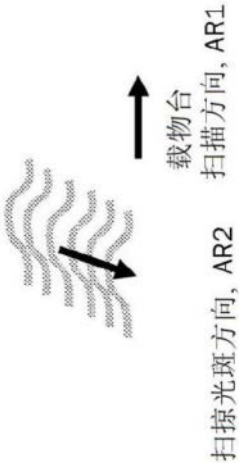


图6A

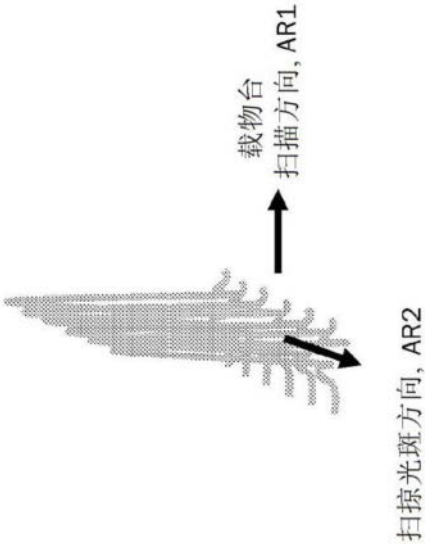


图6B

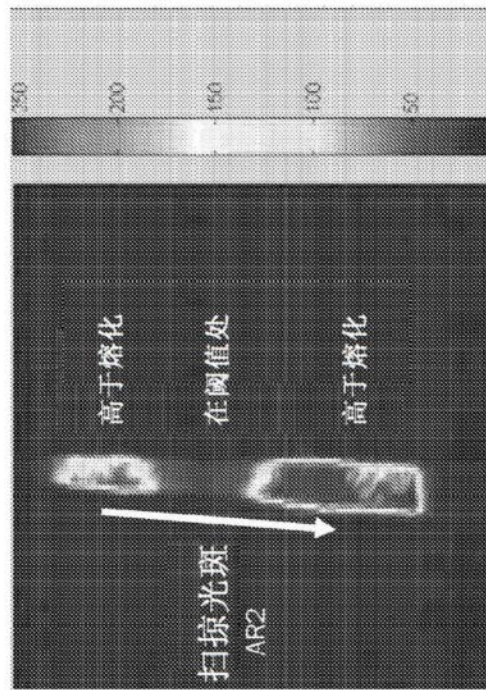


图6C

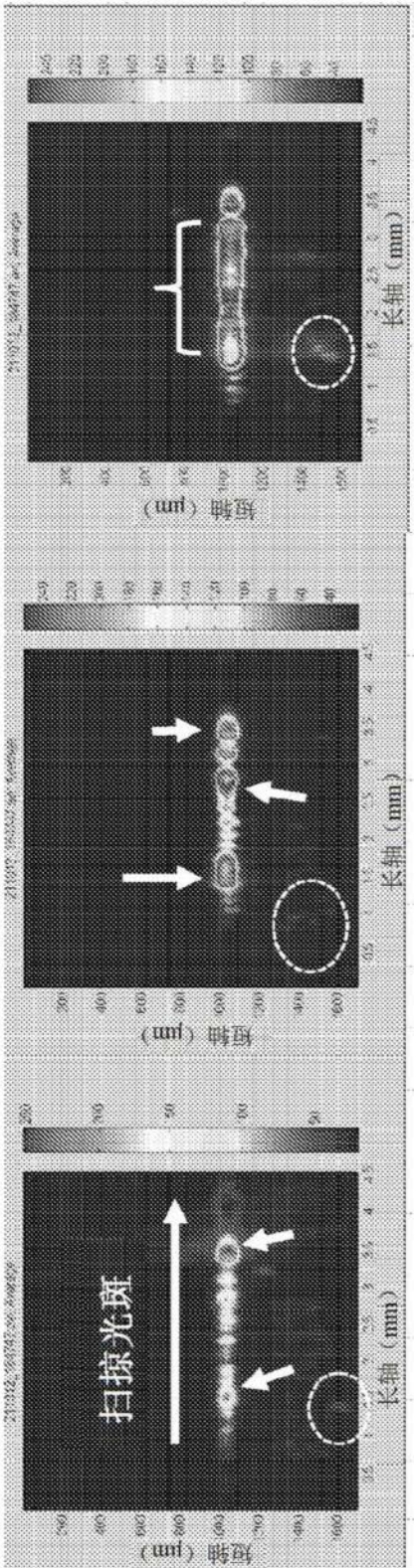


图7C

图7B

图7A

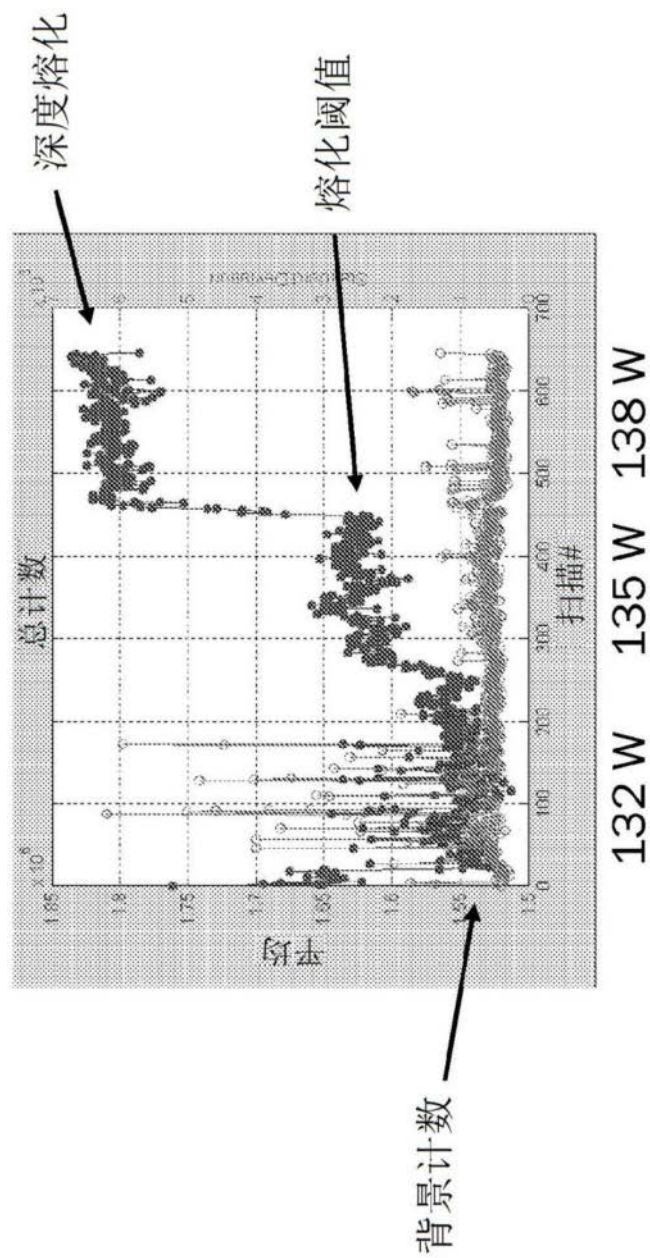


图8

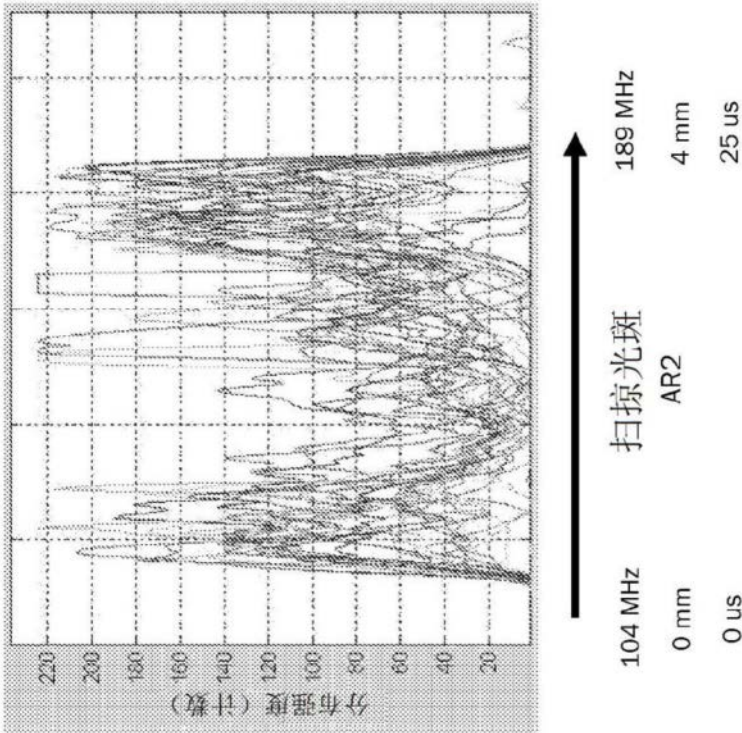


图9A

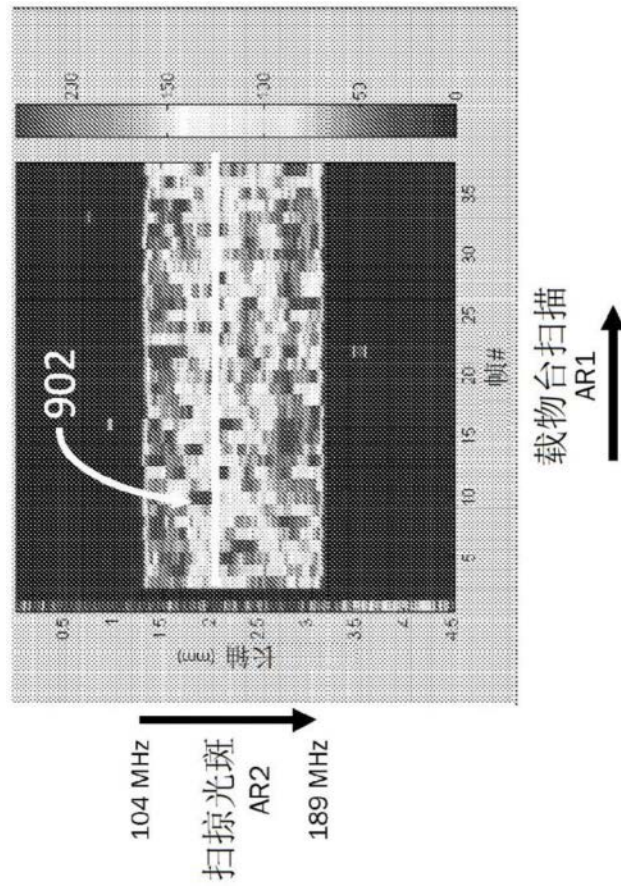


图9B

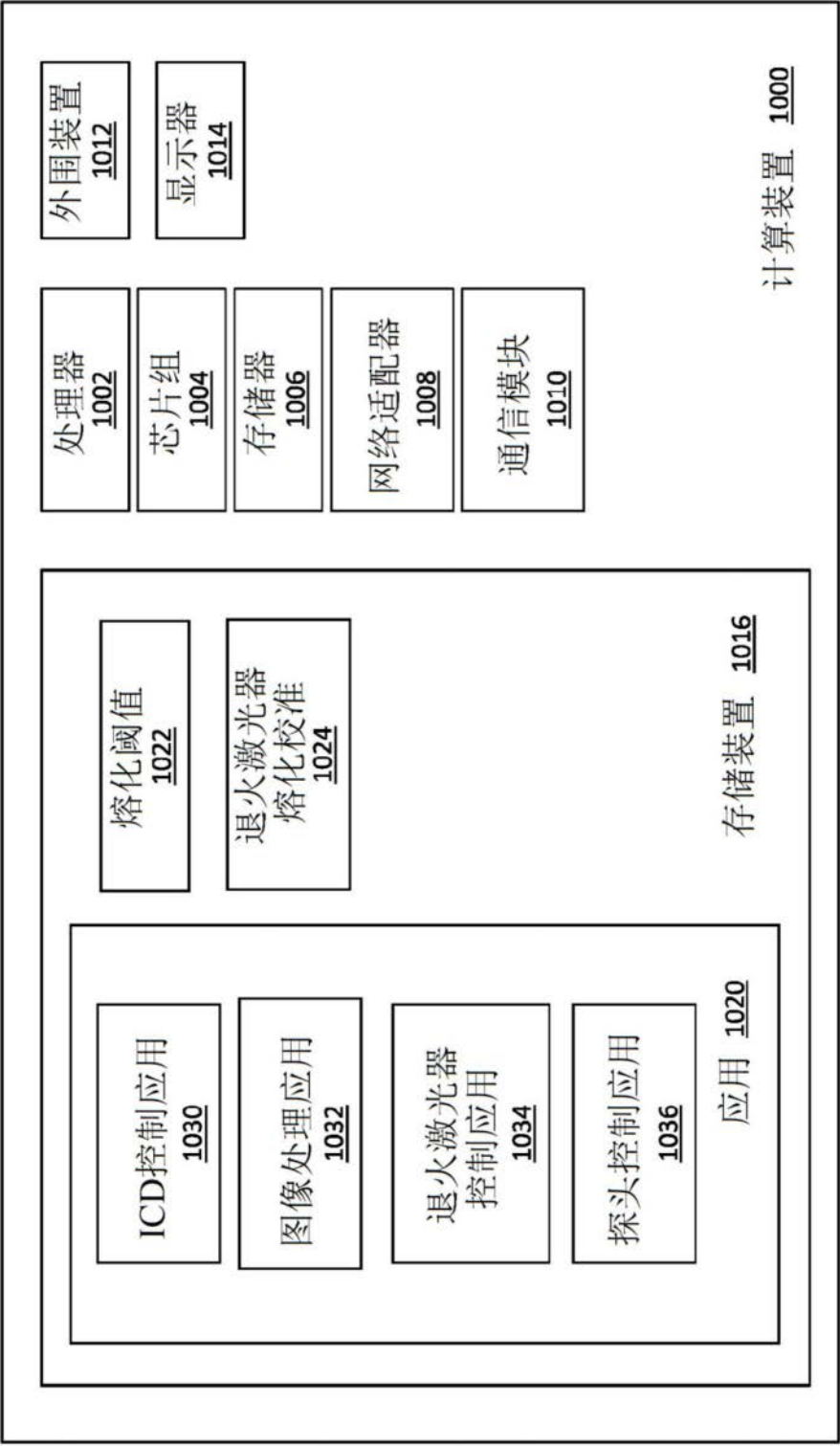


图10

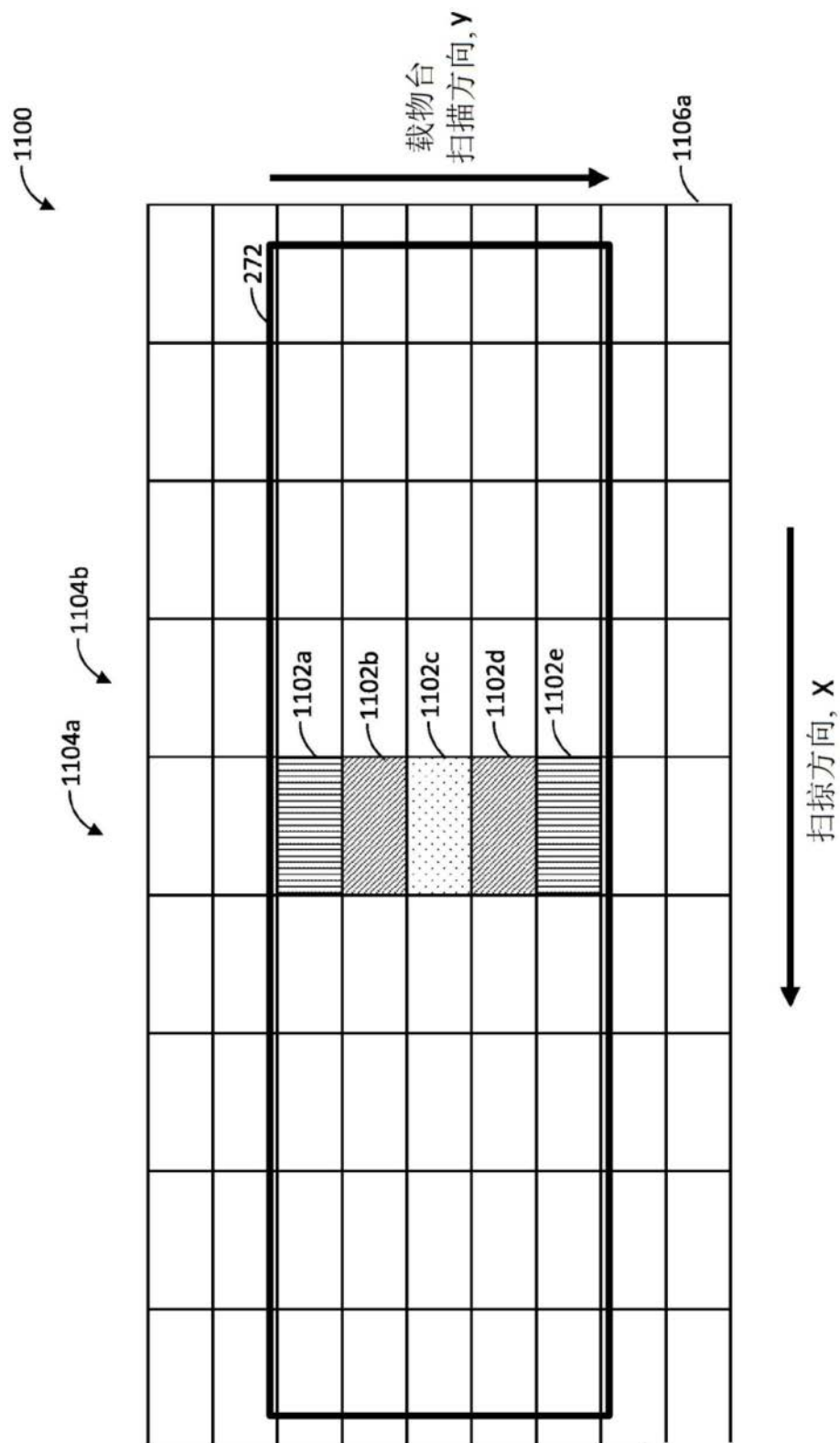


图11

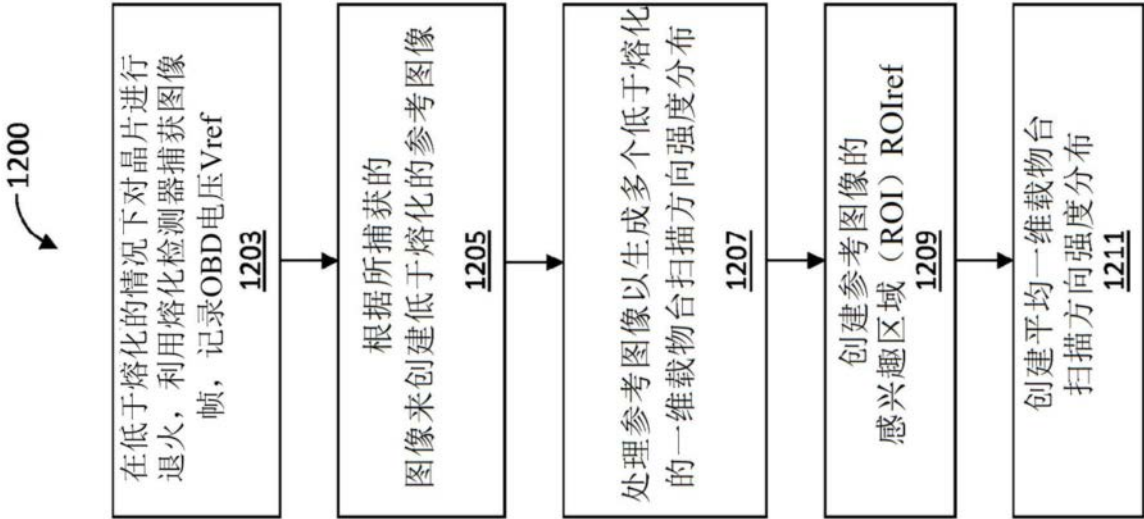


图12

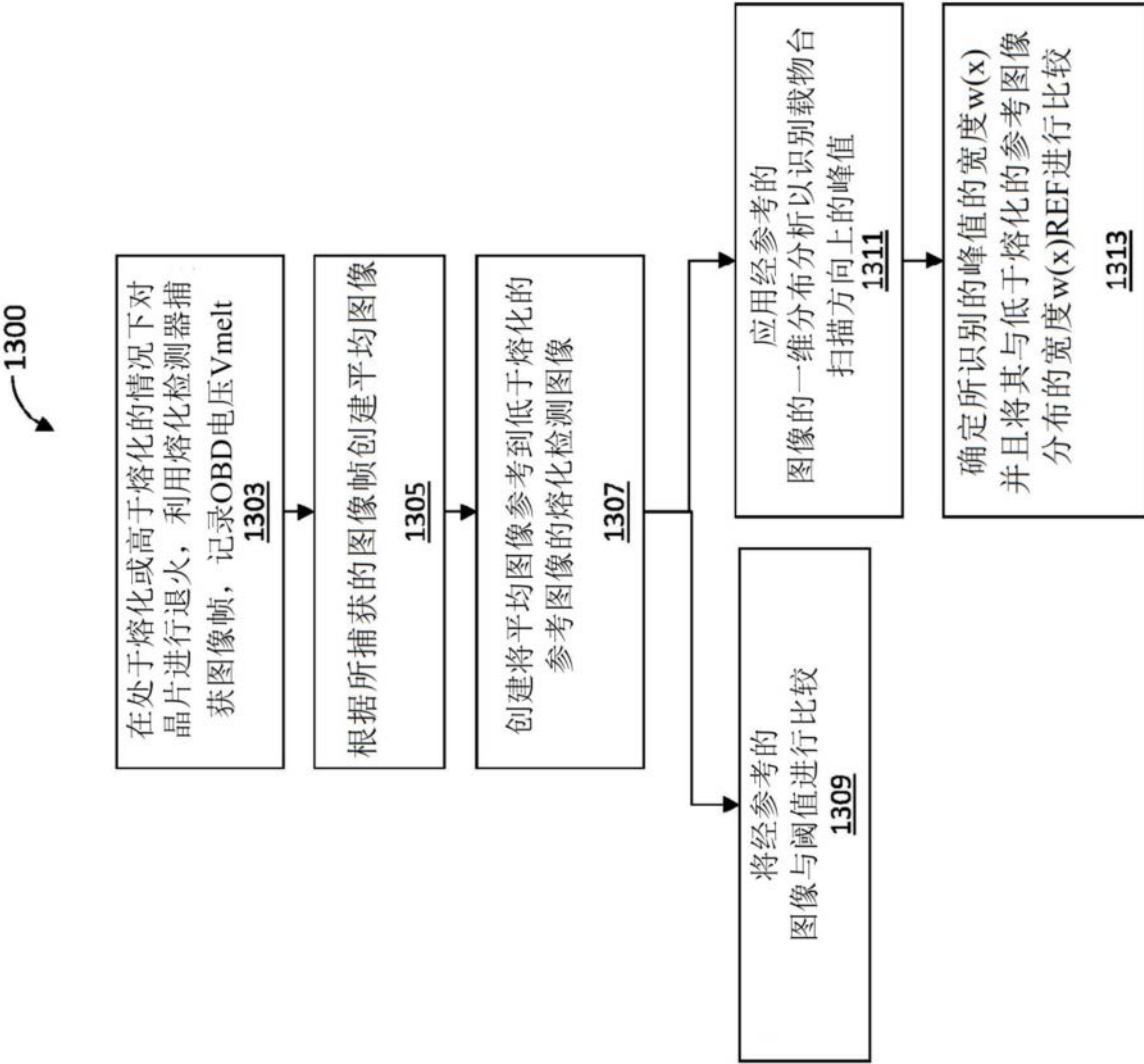


图13

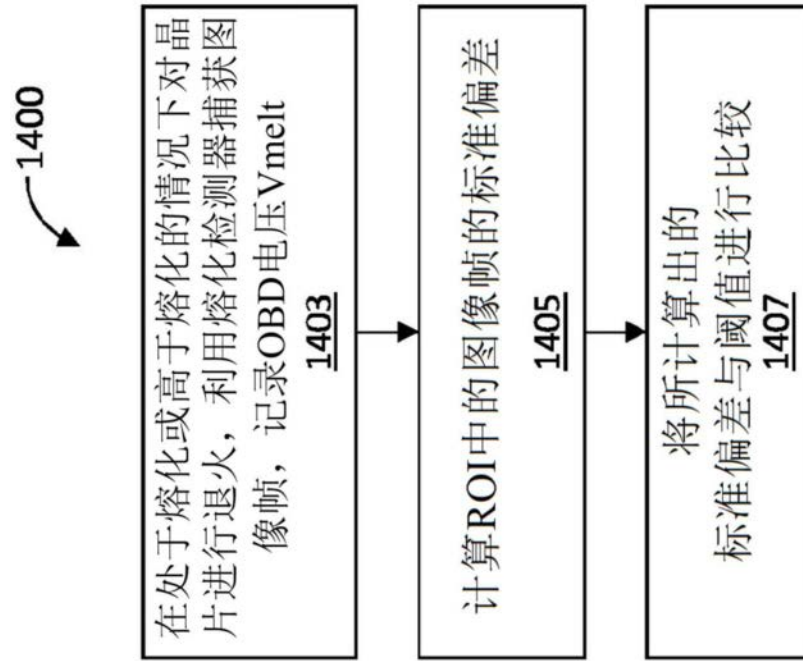


图14