



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107405724 B

(45)授权公告日 2020.05.05

(21)申请号 201680012156.9

(22)申请日 2016.02.26

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107405724 A

(43)申请公布日 2017.11.28

(30)优先权数据
62/126,420 2015.02.27 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.08.25

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2016/019752 2016.02.26

(87)PCT国际申请的公布数据
W02016/138367 EN 2016.09.01

(73)专利权人 伊雷克托科学工业股份有限公司
地址 美国奥勒冈州97229波特兰西北科学
园大道13900号

(72)发明人 张海滨 杨川
马克·艾伦·昂瑞斯
马汀·奥瑞克

(74)专利代理机构 北京寰华知识产权代理有限公司 11408

代理人 林柳岑

(51)Int.Cl.
B23K 26/0622(2014.01)
B23K 26/08(2014.01)
B23K 26/00(2014.01)
B23K 26/062(2014.01)
B23K 26/06(2014.01)
B23K 26/352(2014.01)

审查员 顾新云

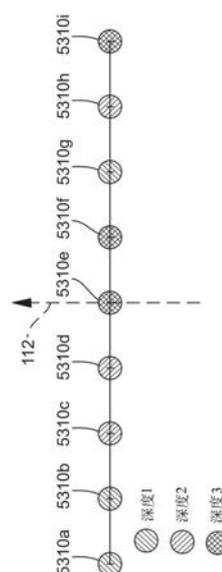
权利要求书1页 说明书64页 附图50页

(54)发明名称

用于横轴微机械加工的快速射束操纵

(57)摘要

一种雷射处理系统包括：第一定位系统(1044)，其用于赋予射束轴沿着射束轨迹(1062)相对于工件(1060)的第一相对移动；处理器，其用于判定射束轴(1061)沿着复数个颤化列的第二相对移动；第二定位系统(1042)，其用于赋予第二相对移动；以及雷射源(1046)，其用于发射雷射射束脉冲。在主要雷射通过期间，可将具有个别地选择的能量的雷射射束脉冲引导至个别地选择的横向光点位置(5310)一次或多次来准许三维图案化。亦可将雷射射束脉冲按时间非依序次序引导至工件上之在空间上相同、重叠或非重叠的相邻光点区域位置。



1. 一种用于颤化一雷射射束在一工件中形成一特征的方法,该方法包含:

自一雷射源产生沿着一雷射射束路径的多个雷射射束脉冲,该雷射射束路径相对于该工件的一表面形成一雷射射束轴;

使用一第一定位系统来赋予该雷射射束轴沿着射束轨迹相对于该工件的该表面的第一相对移动,其中该第一定位系统提供一第一射束偏转范围;

使用一第二定位系统来赋予该雷射射束轴的一第二相对移动,该第二相对移动叠加于该第一相对移动上,其中该第二定位系统提供小于该第一射束偏转范围的一第二射束偏转范围,其中该第二相对移动包含横向于该射束轨迹的一非零方向分量;以及

当赋予该第二相对移动时,将一雷射射束脉冲递送至工件上的多个选择性光点位置,其中该多个选择性光点位置是同时存在在该第二射束偏转范围内,其中递送到该工件的至少两个时间连续雷射射束被递送到在该多个选择性光点位置之中的所述选择性光点位置的集合,并且其中在所述选择性光点位置的所述集合中的至少一个选择性光点位置位在所述选择性光点位置的所述集合中的两个其他选择性光点位置之间。

2. 根据权利要求1的方法,其中递送至该工件的所述雷射射束脉冲在该第二射束偏转范围内来提供三维图案化,其中该三维图案化包括横向于该射束轨迹并且在深度方面在相应光点位置处相对于该工件的该表面处于两个以上深度的图案化。

3. 根据权利要求1的方法,进一步包含控制该雷射射束脉冲的能量,使得递送到所述选择性光点位置的所述集合的至少两个时间连续雷射射束具有不同的能量。

4. 根据权利要求1的方法,进一步包含控制所述至少两个时间连续雷射射束脉冲的光点大小以使其在所述选择性光点位置的所述集合中的不同选择性光点位置处是不同的。

5. 根据权利要求1的方法,进一步包含控制该雷射射束的焦点以使其在所述选择性光点位置的所述集合中的不同选择性光点位置处是不同的。

6. 根据权利要求1的方法,其中在该第二射束偏转范围内的所述选择性光点位置中的时间连续定址位置在空间上是不连续的。

7. 根据权利要求1的方法,其中在该第二射束偏转范围内的所述选择性光点位置中的时间连续定址位置在空间上是连续的。

8. 根据权利要求1的方法,其中该第二相对移动是非椭圆形并且非圆形的。

9. 根据权利要求1的方法,其中该第二定位系统包含一零惯性光学偏转装置。

10. 根据权利要求1的方法,其中多个雷射射束脉冲被引导至所述选择性光点位置中的一个选择性光点位置。

11. 根据权利要求1的方法,其中该多个雷射射束脉冲是以大于或等于100 kHz的一脉冲重复率产生。

12. 根据权利要求1的方法,其中该多个雷射射束脉冲具有短于或等于100 ps的一脉冲宽度。

13. 根据权利要求1的方法,其中该射束轨迹形成一介层孔的表面周边。

14. 根据权利要求1的方法,其中递送雷射射束到该工件上的多个选择性光点位置中的每一个发生时同时赋予该第二相对移动和该第一相对移动。

用于横轴微机械加工的快速射束操纵

[0001] 相关申请案的交互参照

[0002] 本申请为2015年2月27日申请的美国临时专利申请第62/126,420号的非临时申请案,该美国临时专利申请案的内容出于所有目的全部以引用方式并入本文中。

[0003] 版权声明

[0004] ©2016Electro Scientific Industries, Inc. 本专利文件的揭示内容的一部分含有受版权保护的材料。版权所有人反对任何人传真复制本专利文件或专利揭示内容,如其出现在专利商标局专利档案或记录中,但在其他方面保留所有版权权利。37CFR§1.71 (d)。

技术领域

[0005] 本专利是关于横轴雷射处理。

背景技术

[0006] 介电材料及导电材料的雷射处理通常用于在电子组件中烧蚀细微特征。举例而言,可对晶片封装基板进行雷射处理以便将来自半导体晶粒的信号依路由传递至球栅阵列或类似封装。经雷射处理的特征可包括信号迹线、接地迹线及微介层孔(用于在封装层之间连接信号迹线)。

[0007] 雷射直接烧蚀(LDA)将信号迹线及接地迹线并入于单一层上以便在减少晶片封装中的层数的同时紧密控制信号阻抗。此方法可要求较小特征尺寸及间隔(例如,约10微米(μm)至约25 μm),及每个封装的较长迹线长度(例如,约5米(m)至约10m)。为了经济地建构晶片封装,烧蚀此等特征的速度可非常高(例如,约1米/秒(m/s)至约10m/s)。可例如在约0.5秒(s)至约5s内处理某些封装以满足客户产出量目标。

[0008] 晶片封装的另一个有用特性可为,提供具有受控深度变化的相交迹线。举例而言,接地迹线可在整个图案中的若干个点处分支。在每个分支相交处,可用小于约 $\pm 10\%$ 的所要深度变化对迹线进行烧蚀。通常,若将要在一个点处烧蚀两个沟槽,则烧蚀射束的双曝光将产生约100%的深度变化。

[0009] 晶片封装的另一个有用特性可为,在封装的不同部分处提供可变迹线宽度以控制阻抗或为层间连接介层孔提供衬垫。应在对主要迹线的高速处理的干扰有所减少或为最小的情况下提供迹线宽度控制。

[0010] 亦可能有用的是,在对用来改变特征的特性的时间有所减少或为最小的情况下高速处理任意大小及形状的特征。举例而言,特征可包括具有各种直径及/或侧壁锥度的微介层孔、正方形或矩形衬垫、对准框标及/或文数字记号。传统上,为了处理诸如微介层孔的特征,光学系统被设计来提供可变直径的整形强度轮廓(例如,平顶射束),或纯粹地高斯射束。在改变雷射处理光点特性时,此等光学系统可具有显著的时间延迟(例如,约10毫秒(ms)至约10s)。

[0011] 其他问题与建造机器来满足上述处理参数相关。举例而言,迹线可归因于布线要

求而在整个封装中改变方向。在高速处理迹线时,轨迹角度的变化可要求在非常短时间尺度下的较高射束位置加速度。雷射处理可容易超出射束定位器的动态极限,例如在以用于较高产出量的较高速度(例如,约1m/s至约10m/s)来运行时。

[0012] 此等加速度及/或速度可能难以在传统雷射处理机器中达成,该等机器依赖射束定位技术,诸如与反射镜电流计射束偏转器(在本文中称为“电流计”或“电流计反射镜”)相结合的线性级段,以及静态(或缓慢改变的)射束调节光学器件,该等光学器件不能在用于此类型处理的时间尺度(例如,大约为约1微秒(μsec)至约100 μsec)下作出回应。

[0013] 实际烧蚀过程亦可为将要考虑的因素。具有较高峰值功率的雷射脉冲可用来烧蚀介电材料,同时使诸如熔化、裂化及基板损坏的热副效应最小化。举例而言,在约5兆赫(MHz)至约100MHz的重复率下具有在约20皮秒(ps)与约50ps之间的范围内的脉冲持续时间(脉冲宽度)的超快雷射可以较高峰值功率来处理材料,同时提供显著的脉冲重叠以避免脉冲间隔效应。光纤雷射现在通常在大于约500千赫(kHz)的重复率下提供奈秒区内的脉冲宽度。通常,对于给定处理条件(烧蚀深度及宽度),施加至所处理材料的“剂量”(功率/速度)应为恒定的。然而,在低速度下,所施加功率可变得如此低以致于峰值脉冲功率可能不足以在不诱发热效应(例如,熔化及炭化)的情况下烧蚀材料。

[0014] 射束定位器设计可使用电流计来使处理射束偏转。处理射束在工件处的强度轮廓可为高斯轮廓(用于高斯射束的简单聚焦),或对于藉由固定光学射束整形器调节的射束而言,为整形强度轮廓(例如,平顶轮廓)。

[0015] 雷射射束可大体上沿着切割路径、在切割方向上、沿着射束轴引导以便在工件中产生沟槽,该射束轴沿着射束轨迹相对于工件移动。通常,雷射脉冲在沿着射束轨迹的空间上邻近或重叠的位置处碰撞工件。空间上重叠的脉冲可藉由雷射系统依序产生,或可非依序地递送空间上重叠的脉冲,如美国专利公开案第2010-0252959号所描述。射束轴与工件之间的相对运动通常为连续的(以避免由于加速度、减速度及安定时间所导致的产出量延迟),并且射束轴通常定向成使得其垂直于工件。

[0016] 雷射脉冲大体上展现每个雷射脉冲的切割深度极限,其经常随着各种雷射输出参数而变化,该等参数包括但不限于雷射功率、脉冲重复频率、脉冲宽度、波长、碰撞工件的雷射光点的面积,及工件的材料特性。为了弥补切割深度极限,可将射束轴多次引导至沿着沟槽的位置以便增加切割的总深度。该等位置可藉由以下操作来多次定址:执行雷射射束轴沿着射束轨迹的多次通过,使射束轴停留在该等位置上,调整射束轴相对于工件的相对运动的速度,调整空间咬合大小(雷射脉冲的光点区域相对于最近的相邻光点区域的非重叠部分),调整空间上邻近或重叠的脉冲之间的时间延迟,调整雷射射束相对于工件表面的焦点深度,及调整先前提及其他雷射输出参数中的一或多个者。

[0017] 尽管对所有此等变数进行了控制,沟槽形成大体上取决于锥度。锥度是指沟槽的侧壁的形状及角度。侧壁锥度是重要的,因为在许多材料中,锥度大体上限制沟槽的深度,该深度随着在工件表面处介于侧壁顶部之间的沟槽宽度而变化。举例而言,在将多个雷射脉冲施加至工件上的单一位置时,在工件中形成的孔洞的直径将会随着孔洞的深度增加而增加。孔洞在工件表面处将具有最宽的直径,并且孔洞的侧壁可成锥形以使得孔洞在底部处可具有可忽略的直径。在许多情况下,在达到基本深度之后,每个脉冲的深度减少,此后,产出量减少并且雷射能量在工件中被浪费掉。另外,在许多情况下,在藉由此单一位置、连

续冲孔过程达到最大深度之前,临限值可达到工件中的材料的损坏临限值。

[0018] 用于产生深沟槽的一种现有解决方案涉及藉由经由多次通过沿着沟槽引导射束轴来限制连续被引导至工件上的给定位置的雷射功率的量。射束轴的每次通过使沟槽变深。射束轨迹的一些通过亦通常被引导成平行于沟槽的预期中线,向内部及/或向外部延伸,以便增加在工件表面处介于侧壁之间的沟槽宽度。工件表面处的沟槽宽度的增加用来减轻由于锥度所导致的一些深度难题。

[0019] 遗憾的是,射束轴沿着射束轨迹(或平行的射束轨迹)的额外通过需要大幅度增加用来使沟槽(或切口)达到所要深度的时间,在此等射束轨迹覆盖较长距离时尤其如此。

[0020] 图1A是现有的一组射束轨迹22、24、26、28及30的平面图,射束轴可沿着该等轨迹行进以便在工件10中制作深沟槽20。图1B可沿着图1A示出的射束轨迹22、24、26、28及30中的每一者引导射束轴以获得沟槽20的所要深度的通过次数的图形描述。图1C沿着图1A示出的射束轨迹22、24、26、28及30的沟槽的深度的图形描述。图1A至图1C论证沟槽20可能需要在工件10的顶部表面处加宽以获得所要深度,从而增加处理时间,进而不利地影响产出量。

发明内容

[0021] 提供此概述来以简化形式介绍在示范性实施例的详细说明中进一步描述的概念精选。此概述不意欲识别所主张标的物的关键或本质发明概念,亦不意欲限制所主张标的物的范畴。

[0022] 在一实施例中,用于颤化雷射射束的方法在工件中形成具有一或多个所要沟槽宽度的沟槽,而与沿着射束轨迹的变化处理速度无关。该方法包括:赋予雷射射束路径沿着射束轨迹相对于工件表面的第一相对移动;以及判定雷射射束路径沿着复数个颤化列的第二相对移动。第二相对移动以相对于射束轨迹的预定角度叠加于第一相对移动上。第二相对移动的判定包括补偿处理速度的变化以便保持复数个颤化列中的每一者的预定角度。该方法进一步包括赋予雷射射束路径的第二相对移动,以及在沿着复数个颤化列的复数个光点位置处将复数个雷射射束脉冲发射至工件以便在藉由预定角度界定的方向上加宽沟槽。在某些实施例中,预定角度垂直于射束轨迹。另外,在其他实施例中,发射复数个雷射射束脉冲包括以恒定速率来发射,并且该方法进一步包括选择性地调整处理速度以便处理整数个颤化列来完成沟槽。

[0023] 在另一实施例中,雷射处理系统包括:第一定位系统,其用于赋予雷射射束路径沿着射束轨迹相对于工件表面的第一相对移动;以及一或多个处理器,其用于判定雷射射束路径沿着复数个颤化列的第二相对移动。第二相对移动以相对于射束轨迹的预定角度叠加于第一相对移动上。第二相对移动的判定包括补偿沿着射束轨迹的处理速度的变化以便保持复数个颤化列中的每一者的预定角度。该系统亦包括:第二定位系统,其用于赋予雷射射束路径的第二相对移动;以及雷射源,其用于在沿着复数个颤化列的复数个光点位置处将复数个雷射射束脉冲发射至工件以便在藉由预定角度界定的方向上加宽沟槽。

[0024] 在另一实施例中,用于颤化雷射射束的方法在工件中产生沟槽。该方法包括:赋予雷射射束路径沿着射束轨迹相对于工件表面的第一相对移动,该射束轨迹界定沟槽的长度;以及赋予雷射射束路径沿着复数个颤化列的第二相对移动。第二相对移动叠加于第一相对移动上以加宽沟槽。沟槽的宽度是可变的。该方法进一步包括选择复数个颤化列中的

每一者中所包括的颤化点的数目。该选择减少用来处理每个颤化列的时间量,并且每个颤化列中的颤化点的数目是基于对应于相应颤化列的沟槽的宽度。该方法进一步包括在对应于复数个颤化列中的每一者中的颤化点的复数个光点位置处将复数个雷射射束脉冲发射至工件。

[0025] 在另一实施例中,用于对工件上的二维刮削区域进行雷射处理的方法使用雷射直接烧蚀系统。该方法包括在刮削区域内产生雷射光点位置的网格。网格内的雷射光点位置之间的间隔至少部分地基于雷射光点大小及邻近雷射光点的所要重叠。该方法进一步包括将网格划分成复数个条带,该等条带对应于雷射射束路径沿着射束轨迹的相应通过。每个条带包括沿着相对于射束轨迹的颤化方向的复数个颤化列。该方法亦包括:赋予雷射射束路径沿着射束轨迹相继通过复数个条带的第一相对移动;赋予雷射射束路径沿着每个颤化列的颤化方向的第二相对移动;以及沿着雷射射束路径将复数个雷射射束脉冲发射至工件,到达刮削区域内的雷射光点位置。在某些实施例中,该方法进一步包括将颤化列中的每一者的资料滤波以使雷射光点强度轮廓沿着网格的邻近条带的侧面倾斜,以对雷射射束的通过之间的重叠进行整形以便在刮削区域内控制深度变化。多个雷射射束脉冲中的每一者的雷射光点强度是基于滤波资料来选择。另外,或在另一实施例中,该方法包括:当雷射射束路径自网格的第一条带移动至网格的第二条带时,反转颤化方向。颤化方向可基于射束轨迹的方向。

[0026] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,用于颤化雷射射束以沿着射束轨迹在工件中形成特征的方法包含:自雷射源产生沿着雷射射束路径的多个雷射射束脉冲,该雷射射束路径相对于工件的表面形成雷射射束轴;使用第一定位系统来赋予雷射射束轴沿着射束轨迹相对于工件的表面的第一相对移动,其中第一定位系统提供第一射束偏转范围;使用第二定位系统来赋予雷射射束轴的第二相对移动,该第二相对移动叠加于第一相对移动上,其中第二定位系统提供小于第一射束偏转范围的第二射束偏转范围,其中第二相对移动包含横向于射束轨迹的方向分量;以及在沿着射束轨迹的雷射通过期间,在第二定位系统的偏转范围内的复数个选择性光点位置中的每一者处将雷射射束脉冲递送至工件,其中每个选择性光点位置在空间上更靠近相邻选择性光点位置并且在空间上更远离空间非相邻选择性光点位置,并且其中递送至工件的时间依序雷射射束脉冲递送至第二定位系统的偏转范围内的选择性非相邻光点位置。

[0027] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,用于颤化雷射射束以沿着射束轨迹在工件中形成特征的方法包含:自雷射源产生沿着雷射射束路径的多个雷射射束脉冲,该雷射射束路径相对于工件的表面形成雷射射束轴;使用第一定位系统来赋予雷射射束轴沿着射束轨迹相对于工件的表面的第一相对移动,其中第一定位系统提供第一射束偏转范围;使用第二定位系统来赋予雷射射束轴的第二相对移动,该第二相对移动叠加于第一相对移动上,其中第二定位系统提供小于第一射束偏转范围的第二射束偏转范围,其中第二相对移动包含横向于射束轨迹的方向分量;以及在沿着射束轨迹的雷射通过期间,在第二定位系统的偏转范围内的复数个选择性光点位置中的每一者处将雷射射束脉冲递送至工件,其中将多个雷射射束脉冲中的选定脉冲阻断以免碰撞工件,并且其中在雷射通过期间递送至工件的雷射射束脉冲提供在第二定位系统的偏转范围内的三维图案化,其中该三维图案化包括横向于射束轨迹并且在深度方面相对于工件的表面处于两个或两个以上

深度的图案化。

[0028] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,用于颤化雷射射束以沿着射束轨迹在工件中形成特征的方法包含:自雷射源产生沿着雷射射束路径的多个雷射射束脉冲,该雷射射束路径相对于工件的表面形成雷射射束轴;使用第一定位系统来赋予雷射射束轴沿着射束轨迹相对于工件的表面的第一连续相对移动,其中第一定位系统提供第一射束偏转范围;使用第二定位系统来赋予雷射射束轴的第二相对移动,该第二相对移动叠加于第一连续相对移动上,其中第二定位系统提供小于第一射束偏转范围的第二射束偏转范围,其中第二相对移动包含横向于射束轨迹的方向分量;以及在沿着射束轨迹的雷射通过期间,在第二定位系统的偏转范围内的复数个选择性光点位置中的每一者处将雷射射束脉冲递送至工件,其中在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,雷射源产生总数目个雷射射束脉冲,并且其中在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,将总数目个雷射射束脉冲的80%以上递送至工件。

[0029] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,用于颤化雷射射束以沿着射束轨迹在工件中形成特征的方法包含:自雷射源产生沿着雷射射束路径的多个雷射射束脉冲,该雷射射束路径相对于工件的表面形成雷射射束轴;使用第一定位系统来赋予雷射射束轴沿着射束轨迹相对于工件的表面的第一相对移动,其中第一定位系统提供第一射束偏转范围;使用第二定位系统来赋予雷射射束轴的第二相对移动,该第二相对移动叠加于第一相对移动上,其中第二定位系统提供小于第一射束偏转范围的第二射束偏转范围,其中第二相对移动包含横向于射束轨迹的方向分量;以及在沿着射束轨迹的雷射通过期间,在第二定位系统的偏转范围内的复数个选择性光点位置中的每一者处将雷射射束脉冲递送至工件。在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,用于颤化雷射射束以沿着射束轨迹在工件中形成特征的方法包含:自雷射源产生沿着雷射射束路径的多个雷射射束脉冲,该雷射射束路径相对于工件的表面形成雷射射束轴;使用第一定位系统来赋予雷射射束轴沿着射束轨迹相对于工件的表面的第一连续相对移动,其中第一定位系统提供第一射束偏转范围;使用第二定位系统来赋予雷射射束轴的第二相对移动,该第二相对移动叠加于第一连续相对移动上,其中第二定位系统提供小于第一射束偏转范围的第二射束偏转范围,其中第二相对移动包含横向于射束轨迹的方向分量;选择性地控制雷射射束脉冲的能量;以及在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在第二定位系统的偏转范围内的复数个选择性光点位置中的每一者处将雷射射束脉冲递送至工件,其中在藉由第二相对移动来定址的不同光点位置处,递送至工件的雷射射束脉冲中的两者或两者以上具有不同能量。

[0030] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,用于颤化雷射射束以沿着射束轨迹在工件中形成特征的方法包含:自雷射源产生沿着雷射射束路径的多个雷射射束脉冲,该雷射射束路径相对于工件的表面形成雷射射束轴;使用第一定位系统来赋予雷射射束轴沿着射束轨迹相对于工件的表面的第一连续相对移动,其中第一定位系统提供第一射束偏转范围;使用第二定位系统来赋予雷射射束轴的第二相对移动,该第二相对移动叠加于第一连续相对移动上,其中第二定位系统提供小于第一射束偏转范围的第二射束偏转范围,其中第二相对移动包含横向于射束轨迹的方向分量;以及在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在第二定位系统的偏转范围内的复数个选择性光点位置中的每一者处将雷射射

束脉冲递送至工件,其中在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,雷射源产生总数目个雷射射束脉冲,并且其中总数目个雷射射束脉冲提供总通量,该总通量超过处理窗口的工作通量,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹5微米的距离内用总数目个雷射射束脉冲碰撞工件。

[0031] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,用于颤化雷射射束以沿着射束轨迹在工件中形成特征的方法包含:自雷射源产生沿着雷射射束路径的多个雷射射束脉冲,该雷射射束路径相对于工件的表面形成雷射射束轴;使用第一定位系统来赋予雷射射束轴沿着射束轨迹相对于工件的表面的第一连续相对移动,其中第一定位系统提供第一射束偏转范围;使用第二定位系统来赋予雷射射束轴的第二相对移动,该第二相对移动叠加于第一连续相对移动上,其中第二定位系统提供小于第一射束偏转范围的第二射束偏转范围,其中第二相对移动包含横向于射束轨迹的方向分量;以及在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在第二定位系统的偏转范围内的复数个选择性光点位置中的每一者处将工作雷射射束脉冲递送至工件,其中在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,雷射源产生总数目个雷射射束脉冲,并且其中雷射射束脉冲的总数目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目10%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹5微米的距离内碰撞工件。

[0032] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,用于颤化雷射射束以沿着射束轨迹在工件中形成特征的方法包含:自雷射源产生沿着雷射射束路径的多个雷射射束脉冲,该雷射射束路径相对于工件的表面形成雷射射束轴;使用第一定位系统来赋予雷射射束轴沿着射束轨迹相对于工件的表面的第一连续相对移动,其中第一定位系统提供第一射束偏转范围;使用第二定位系统来赋予雷射射束轴的第二相对移动,该第二相对移动叠加于第一连续相对移动上,其中第二定位系统提供小于第一射束偏转范围的第二射束偏转范围,其中第二相对移动包含横向于射束轨迹的方向分量;以及在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在第二定位系统的偏转范围内的复数个选择性光点位置中的每一者处将工作雷射射束脉冲递送至工件,该工作雷射射束脉冲具有光点大小,其中在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,雷射源产生总数目个雷射射束脉冲,并且其中雷射射束脉冲的总数目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目10%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹一个光点大小的距离内碰撞工件。

[0033] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,每个选择性光点位置在空间上更靠近相邻选择性光点位置并且在空间上更远离空间非相邻选择性光点位置,其中递送至工件的时间依序雷射射束脉冲是递送至第二定位系统的偏转范围内的选择性非相邻光点位置。

[0034] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在次要雷射通过期间递送至工件的雷射射束脉冲提供在第二定位系统的偏转范围内的三维图案化,其中三维图案化包括横向于射束轨迹并且在深度方面在相应光点位置处相对于工件的表面处于两个或两个以上深度的图案化。

[0035] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二相对移动包含x及y非零方向分量。

[0036] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二射束偏转范围在横向方向

上延伸了0.01mm与4.0mm之间。

[0037] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二射束偏转范围在横向方向上延伸了0.01mm与2.5mm之间。

[0038] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,选择性地控制能量以使其在第二定位系统的偏转范围内的选择性光点位置中的时间依序定址位置处系不同的。

[0039] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,选择性地控制能量以使其在第二定位系统的偏转范围内的选择性光点位置的时间依序定址群组处系不同的。

[0040] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,选择性地控制雷射射束脉冲的光点大小以使其在第二定位系统的偏转范围内的选择性光点位置中的时间依序定址位置处系不同的。

[0041] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,选择性地控制雷射射束脉冲的光点大小以使其在第二定位系统的偏转范围内的选择性光点位置的时间依序定址群组处系不同的。

[0042] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,选择性地控制雷射射束的焦点以使其在第二定位系统的偏转范围内的选择性光点位置中的时间依序定址位置处系不同的。

[0043] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,选择性地控制雷射射束的焦点以使其在第二定位系统的偏转范围内的选择性光点位置的时间依序定址群组处系不同的。

[0044] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二定位系统的偏转范围内的选择性光点位置中的时间依序定址位置在空间上系不连续的。

[0045] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二定位系统的偏转范围内的选择性光点位置中的时间依序定址位置在空间上系连续的。

[0046] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二相对移动包含在时间上分开的相反方向分量。

[0047] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在时间上分开的相反方向分量横向于射束轨迹。

[0048] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在时间上分开的相反方向分量中的一者与射束轨迹相反。

[0049] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,方向分量系第二相对移动相对于射束轨迹的分向量。

[0050] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在第二相对移动的单次次要通过期间,递送至工件的雷射射束脉冲中的两者或两者以上在不同光点位置处具有不同能量。

[0051] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二相对移动系非椭圆形的。

[0052] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二相对移动系非椭圆形的。

[0053] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,沿着射束轨迹的主要雷射通过使射束轴扫描经过任何光点位置一次。

[0054] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,沿着射束轨迹的次要雷射通过使射束轴扫描经过任何光点位置一次。

- [0055] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,次要雷射通过使射束轴扫描经过任何光点位置一次。
- [0056] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,第二相对移动包含射束轴在第二射束偏转范围内的多次雷射通过。
- [0057] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲是递送至彼此距离大于或等于第二射束偏转范围的25%的选择性光点位置。
- [0058] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲是递送至彼此距离大于或等于第二射束偏转范围的50%的选择性光点位置。
- [0059] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲是递送至彼此距离大于或等于第二射束偏转范围的75%的选择性光点位置。
- [0060] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲是递送至彼此距离大于或等于第二射束偏转范围的90%的选择性光点位置。
- [0061] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲的选择性光点位置之间的距离随着第二射束偏转范围、第一定位系统沿着射束轨迹移动射束轴的第一速度及第二定位系统移动射束轴的第二速度而变化。
- [0062] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,选择性相邻光点位置重叠。
- [0063] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第一射束定位系统以大于或等于第一射束定位系统最大速度的25%的速度来沿着射束轨迹移动射束轴。
- [0064] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第一射束定位系统以大于或等于第一射束定位系统最大速度的50%的速度来沿着射束轨迹移动射束轴。
- [0065] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第一射束定位系统以大于或等于第一射束定位系统最大速度的75%的速度来沿着射束轨迹移动射束轴。
- [0066] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第一射束定位系统以大于或等于第一射束定位系统最大速度的90%的速度来沿着射束轨迹移动射束轴。
- [0067] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,特征为沟槽。
- [0068] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,特征为切口。
- [0069] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,特征为标记。
- [0070] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,特征为表面下标记。
- [0071] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,特征为电阻器上的修整。
- [0072] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,特征为盲介层孔(blind via)。
- [0073] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,特征为通孔介层孔(through-hole via)。
- [0074] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二定位系统包含零惯性定位装置。
- [0075] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二定位系统包含声光装置(AOD)。
- [0076] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二定位系统包含一个以上换能器。
- [0077] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,第二定位系统可操作以使射束

轴沿着一个以上偏转轴偏转。

[0078] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，第二定位系统包含两个或两个以上声光装置(AOD)。

[0079] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，第二定位系统使用安装在AOD的横向表面上的换能器。

[0080] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，第二定位系统包含电光装置(EOD)。

[0081] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，第二定位系统可操作来充当外腔射束阻断器。

[0082] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，外腔射束阻断器用来阻断多个雷射射束脉冲中的选择性脉冲。

[0083] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，在沿着射束轨迹的雷射通过期间，多个雷射射束脉冲被引导至一个选择性光点位置。

[0084] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，递送至工件的时间依序雷射射束脉冲沿着相对于射束轨迹的不同轴来递送至选择性非相邻光点位置。

[0085] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，递送至工件的时间依序雷射射束脉冲沿着相对于射束轨迹的单一轴来递送至选择性非相邻光点位置。

[0086] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，在雷射通过期间在第二定位系统的扫描场内递送至工件的时间依序雷射射束脉冲包括10个或更多个雷射射束脉冲。

[0087] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，在雷射通过期间在第二定位系统的扫描场内递送至工件的时间依序雷射射束脉冲包括100个或更多个雷射射束脉冲。

[0088] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，第二定位系统的扫描场或射束偏转范围具有大于10个并列雷射光点的长轴尺寸。

[0089] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，第二定位系统的扫描场或射束偏转范围具有大于100个并列雷射光点的长轴尺寸。

[0090] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，第二定位系统的扫描场或射束偏转范围具有小于500个并列雷射光点的长轴尺寸。

[0091] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，在雷射通过期间在第二定位系统的扫描场内递送至工件的时间依序雷射射束脉冲包括500个或更多个雷射射束脉冲。

[0092] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，射束轴横向于射束轨迹被颤化以加宽在每次雷射通过期间藉由雷射来加工的区域。

[0093] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，多个雷射射束脉冲以大于或等于100kHz的脉冲重复率产生。

[0094] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，沿着射束轨迹在射束轴与工件之间的相对运动大于或等于400mm/s。

[0095] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，多个雷射射束脉冲具有短于或等于100ps的脉冲宽度。

[0096] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中，多个雷射射束脉冲具有短于或等于10ps的脉冲宽度。

[0097] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,多个雷射射束脉冲具有短于或等于1ps的脉冲宽度。

[0098] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,选择性相邻光点位置之间的咬合大小小于或等于4微米。

[0099] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲具有光点区域,该光点区域具有小于或等于15微米的长轴。

[0100] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,时间依序雷射射束脉冲以选择性雷射光点的微动图案来递送至工件。

[0101] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,轨迹形成介层孔的表面周边。

[0102] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲是递送至第一光点位置的第一雷射射束脉冲,其中递送至工件的时间依序雷射射束脉冲是递送至第二光点位置的第二个雷射射束脉冲,其中在时间上稍后的依序雷射射束脉冲是递送至第三光点位置的第三个雷射射束脉冲,并且其中第三光点位置是相邻选择性光点位置。

[0103] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,射束轴可被引导至个别地选择的横向位置。

[0104] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在单次通过期间,雷射射束可定址横向位置多次。

[0105] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,被引导至工件上的空间上相同、空间上重叠或空间上相邻的光点区域位置的雷射脉冲是非依序的。

[0106] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,雷射源产生总目数个雷射射束脉冲,并且其中总目数个雷射射束脉冲提供总通量,该总通量超过处理窗口的工作通量,以用于沿着射束轨迹在雷射射束轴的2微米内用总目数个雷射射束脉冲碰撞工件。

[0107] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,总目数个雷射射束脉冲提供总通量,该总通量超过处理窗口的工作通量,以用于沿着射束轨迹在雷射射束轴的5微米内用总目数个雷射射束脉冲碰撞工件。

[0108] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,总目数个雷射射束脉冲提供总通量,该总通量超过处理窗口的工作通量,以用于沿着射束轨迹在雷射射束轴的10微米内用总目数个雷射射束脉冲碰撞工件。

[0109] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目数超过工作雷射射束脉冲的所期望数目20%以上,以用于沿着射束轨迹在雷射射束轴的5微米内碰撞工件。

[0110] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,雷射源产生总目数个雷射射束脉冲,并且其中雷射射束脉冲的总目数超过工作雷射射束脉冲的所期望数目10%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹5微米的距离内碰撞工件。

[0111] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,工作雷射射束脉冲在复数个选择性光点位置中的每一者处具有光点大小,并且其中在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,雷射源产生总目数个雷射射束脉冲,并且其

中雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目10%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹一个光点大小的距离内碰撞工件。

[0112] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目20%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹一个光点大小的距离内碰撞工件。

[0113] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目30%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹一个光点大小的距离内碰撞工件。

[0114] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目50%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹一个光点大小的距离内碰撞工件。

[0115] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目10%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹五个光点大小的距离内碰撞工件。

[0116] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目20%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹五个光点大小的距离内碰撞工件。

[0117] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目30%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹五个光点大小的距离内碰撞工件。

[0118] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目50%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹五个光点大小的距离内碰撞工件。

[0119] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目20%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹5微米的距离内碰撞工件。

[0120] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目30%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹5微米的距离内碰撞工件。

[0121] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目50%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹5微米的距离内碰撞工件。

[0122] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目20%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹10微米的距离内碰撞工件。

[0123] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目30%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹10微米的距离内碰撞工件。

[0124] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总目超过工

作雷射射束脉冲的所期望数目50%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹10微米的距离内碰撞工件。

[0125] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总数目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目20%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹25微米的距离内碰撞工件。

[0126] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总数目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目30%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹25微米的距离内碰撞工件。

[0127] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,雷射射束脉冲的总数目超过工作雷射射束脉冲的所期望数目50%以上,以用于沿着射束轨迹在距射束轨迹25微米的距离内碰撞工件。

[0128] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,雷射源产生总数目个雷射射束脉冲,其中在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,将总数目个雷射射束脉冲的60%以上递送至工件。

[0129] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,将总数目个雷射射束脉冲的80%以上递送至工件。

[0130] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,将总数目个雷射射束脉冲的90%以上递送至工件。

[0131] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,在沿着射束轨迹的主要雷射通过期间,在雷射射束轴处于第二射束偏转范围内时,将总数目个雷射射束脉冲的95%以上递送至工件。

[0132] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,特征可藉由任何上述实施例组合的方法来制成。

[0133] 在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,可建构利用任何上述实施例的组件的系统。

[0134] 将自以下参考随附图式对较佳实施例的详细说明显而易见额外态样及优点。

附图说明

[0135] 图1A为现有的一组射束轨迹的平面图,射束轴可沿着该等轨迹行进以便在工件中产生深沟槽。

[0136] 图1B为可沿着图1A示出的射束轨迹中的每一者引导射束轴以获得沟槽的所要深度的通过次数的图形描述。

[0137] 图1C为沿着图1A示出的射束轨迹的沟槽的深度的图形描述。

[0138] 图1D为例示处理光点的网格的示意图,该网格可藉由颤化移动射束或静止光栅图案来产生。

[0139] 图2图形地表示根据一实施例的EffectiveWidth的变化,该EffectiveWidth随着

相对网格宽度(藉由光点直径来标准化)及跨网格宽度的颤化点数目而变化。

[0140] 图3图形地例示根据一实施例的具有不同网格密度的两个相交特征的网格图案。

[0141] 图4图形地例示根据一实施例的在振幅标准化之后的相交特征的模型化通量(未组合)。

[0142] 图5图形地例示根据一实施例的相交特征的组合通量。

[0143] 图6图形地例示根据一实施例的具有突出部的圆形衬垫的光栅网格(右侧)及通量轮廓(左侧)。

[0144] 图7图形地例示根据一实施例的通量标准化对于不同宽度的沟槽的影响。

[0145] 图8例示根据一实施例的示例性过程校准测试矩阵。

[0146] 图9例示根据一实施例的示例性材料表。

[0147] 图10为例示根据一实施例的用于指挥AOD的简化处理及资料流架构的方块图。

[0148] 图10A为根据一实施例的用于颤化雷射射束的系统的方块图,该系统包括AOD子系统及电流计子系统。

[0149] 图10B为根据一实施例的用于射束整形的系统的方块图。

[0150] 图10C为根据一实施例的提供倾斜处理射束的系统的方块图。

[0151] 图11为表示根据一实施例的在FPGA中实行的AOD控制资料流的方块图。

[0152] 图12为例示根据一实施例的DSP与FPGA的示例性同步的时序图。

[0153] 图13为例示根据一实施例的使用内倾的处理状况的示意图。

[0154] 图14图形地例示根据一实施例的示例性内倾参数定标。

[0155] 图15图形地例示根据示例性颤化操作的示例性XY射束位置。

[0156] 图16图形地例示根据图15示出的示例性颤化操作的示例性X及Y射束位置对时间。

[0157] 图17例示图15及16示出的示例性颤化操作的示例性射束位置及过程参数的表。

[0158] 图18图形地例示示例性实施例中的扫描场失真图案,其中LDA系统包括F/18 100mm扫描场透镜。

[0159] 图19图形地例示根据示例性实施例的X及Y扫描场失真误差对X及Y场位置。

[0160] 图20图形地例示根据图19示出的示例性实施例的X及Y扫描场失真尺度因子及旋转误差对X及Y场位置。

[0161] 图21图形地例示根据图19及20示出的实例的光栅化特征的示例性局部位置几何校正失真。

[0162] 图22示意性地例示根据一实施例的三级剖析子系统。

[0163] 图23示意性地例示根据一实施例的AOD校准图案。

[0164] 图24图形地例示根据某些实施例的AOD校准角。

[0165] 图25为例示根据一实施例的用于功率控制的信号流的方块图。

[0166] 图26图形地例示根据一实施例的示例性功率控制曲线。

[0167] 图27图形地例示根据一实施例的示例性ch1 AOD功率线性化曲线集。

[0168] 图28例示根据一实施例的ch0 AOD的示例性曲线。

[0169] 图29为例示根据某些实施例的示例性AOD效率曲线的图表。

[0170] 图30为例示根据某些实施例的示例性AOD效率增益的图表。

[0171] 图31为例示根据一实施例的功率校准资料流的方块图。

- [0172] 图32图形地例示根据一实施例的对于速度变化的三级滤波器回应。
- [0173] 图33图形地例示根据一实施例的蒙地卡罗AOD瞬态模拟。
- [0174] 图34图形地例示根据一实施例的在 $T_{aod}=T_{cmd}=1\mu\text{sec}$ 的情况下的示例性速度极限。
- [0175] 图35图形地例示根据一实施例的AOD行程范围对特征宽度。
- [0176] 图36图形地例示根据一实施例的雷射功率对于处理速度的限制。
- [0177] 图37图形地例示根据某些实施例的示例性光点失真。
- [0178] 图38示意性地例示根据一实施例的垂直于标称射束轨迹来对准的颤化列。
- [0179] 图39示意性地例示根据一实施例的板块化光栅处理的实例。
- [0180] 图40示意性地例示根据某些实施例的由于宽线刮削所导致的像素化误差。
- [0181] 图41示意性地例示根据一实施例的划分成网格条带的刮削区域。
- [0182] 图42图形地例示根据一实施例的刮削颤化点的未滤波网格及刮削颤化点的对应滤波网格。
- [0183] 图43图形地例示根据一实施例的对应于图41示出的条带的前三个刮削射束的通量分布。
- [0184] 图44图形地例示根据一实施例的刮削实例。
- [0185] 图45图形地例示根据一实施例的在刮削期间的射束命令。
- [0186] 图46为例示根据一实施例的材料移除速率对刮削列长度及宽度的绘图。
- [0187] 图47示意性地例示根据一实施例的刮削列几何形状的侧视图。
- [0188] 图48为例示根据一实施例的用于向量处理的AOD命令产生的方块图。
- [0189] 图49为例示根据一实施例的用于光栅处理的AOD命令产生的方块图。
- [0190] 图50为例示根据一实施例的用于刮削处理的AOD命令产生的方块图。
- [0191] 图51为例示根据一实施例的电流计及AOD校准资料流5100的方块图。
- [0192] 图52图形地例示根据一实施例的颤化列通量控制。
- [0193] 图53为射束轴可沿着其行进的射束轨迹及藉由射束轴的颤化定位所碰撞于的示例性辅助光点区域位置的示例性网格的平面图。
- [0194] 图54描绘光点位置的示例性列及将雷射射束脉冲递送至该等位置的示例性次序。
- [0195] 图55描绘光点位置的示例性列及将雷射射束脉冲递送至该等位置的另一个示例性次序。
- [0196] 图56描绘光点位置的示例性列,其中一些位置在雷射通过期间被碰撞多次。
- [0197] 图57描绘以射束轴的微动图案来引导的雷射射束脉冲所碰撞的选定横轴特征区域的示例性列。

具体实施方式

[0198] 以下配合图式及本发明的较佳实施例,进一步阐述本发明为达成预定发明目的所采取的技术手段。

[0199] 与图1A至图1C相关的过程的一个缺点为,沿着射束轨迹的每次通过耗费时间,从而增加每个工件消耗的时间,由此减少产出量。

[0200] 与图1A至图1C相关的过程的另一个缺点为,较新的雷射的功率及脉冲重复率在沿

着射束轨迹的射束轴与工件之间的相对运动的最大可用速度下超过破坏临界值。此问题可藉由使雷射的最大潜力不能充分发挥来解决。举例而言,可使雷射脉冲衰减,或可阻断特定数目个雷射脉冲。此外,使用沿着射束轨迹的射束轴与工件之间的相对运动的最高速度亦可导致不合需要的加工特性,诸如由间隔较宽的连续光点造成的扇形边缘。

[0201] 本文描述用来克服此等缺点并且提供额外处理优点的示例性实施例。

[0202] 下文参考随附图式描述示例性实施例。诸多不同形式及实施例在不背离本揭示案的精神及教示的情况下是可能的,且因此本揭示案不应被视为限于本文所阐明的示例性实施例。实情为,提供此等示例性实施例以使得本揭示案是全面及完整的,并且将揭示内容的范畴传达给本领域的技术人员。在附图中,为了清楚起见,组件的大小及相对大小可加以夸大。本文所使用的术语仅出于描述特定示例性实施例的目的且不意欲是限制性的。如本文所用,除非上下文另外明确指示,否则单数形式“一”及“该”意欲亦包括复数形式。应进一步理解,本说明书使用术语“包含”来指定所述特征、整数、步骤、操作、元件及/或组件的存在,而并不排除一或多个其他特征、整数、步骤、操作、元件、组件及/或其群组的存在或添加。除非另外指出,否则值的范围在被陈述时包括该范围的上限及下限以及上限与下限之间的任何子范围。

[0203] 本文中所含的揭示内容描述使用声光偏转器(AOD)作为射束定位装置的LDA系统的实行细节。虽然本文揭示的示例性实施例是关于AOD,但是亦可使用电光偏转器(EOD)。在某些实施例中,举例而言,EOD是一些或所有AOD指向(偏转)功能的合适替代物。

[0204] 在某些实施例中,处理特征的几何形状(例如,宽度及深度)可在高阶由使用者指定,然后藉由机器控制软体来转换成处理命令。在某些实施例中,雷射功率及颤化操作的细节是自动化的以防止繁重的、易于出错的人工机器设置过程。举例而言,可为使用者提供用来产生具有标称尺寸的几何特征的简单过程。特征可包括具有目标宽度及深度的沟槽,或具有目标直径及深度的衬垫。使用者可直接输入此等几何参数,并且系统藉由产生为了产生该等特征所需要的适当过程参数(例如,射束速度、颤化宽度、雷射功率)来作出回应。因为某些LDA机器可在任意射束速度下操作(以便在给定射束定位器及受雷射功率限制的条件下使产出量最大化),所以可针对速度来自动调整过程参数。此自动化避免迫使使用者指定低阶细节(例如,雷射功率、颤化宽度、颤化点、速度),其伴随着操作者错误的风险,同时允许系统自动使产出量最大化。

[0205] 某些实施例提供最佳化的颤化点选择。此实施例藉由设定颤化表的大小以使用最小数目个颤化点覆盖所要颤化范围,来使产出量最大化。使颤化点数目最小化的一个原因是因为,每个颤化点使用特定更新时间 T_{dither} (例如,根据以下论述的示例性实施例,约 $1\mu s$ 的更新速率)。其中 N_{pt} 是每一列的颤化点的数目, $T_{dither} * N_{pt}$ = 每一列所使用的时间量。因此,使颤化点的数目最小化允许系统在最高可能速度下处理特征,同时保持颤化列之间的足够重叠,从而可用于产生均匀的通量分布,并且由此产生特征的均匀烧蚀。举例而言,在使用AOD颤化来形成特征时,颤化光点保持最小重叠来使通量变化最小化。用来加宽沟槽的颤化点的数目可影响此重叠。在某些实施例中,颤化点的选择得以最佳化以提供较高处理速度及适当光点重叠。

[0206] 某些实施例提供用于较宽弧形处理的通量标准化。在宽度与弧形半径的比率相对较大的情况下,此等实施例保持烧蚀弧形特征的品质(例如,均匀的沟槽深度)。与另外可实

行的情形相比,此举为电路布局设计师提供更大自由度,来在更紧凑区域中对弧形进行布线。举例而言,在进行颤化以处理形成圆弧段的较宽沟槽时,跨较宽沟槽的所施加通量随着距弧形中心的半径而变化。在某些实施例中,对此通量进行标准化以处理具有恒定深度的弧形。

[0207] 某些实施例提供AOD及电流计定位系统的协调校准。亦可使用其他定位系统,诸如使用快速转向镜(FSM)的系统。不同定位系统的协调校准保持整个扫描场上的颤化操作的准确度。AOD射束定位子系统可遭受由于实行扫描透镜、电流计反射镜及AOD子系统所导致的扫描场失真。举例而言,扫描透镜通常具有随着扫描场位置而变化的局部几何失真。藉由施加随着扫描场位置而变化的局部校正,将颤化的准确度保持在适用于提供相交处的可接受深度变化的等级。另外,或在其他实施例中,AOD射束定位子系统的校准与电流计子系统的校准相协调以便适当实行三级射束定位。如下文所论述,在颤化模式、光栅化模式及刮削模式期间使用此校准。此操作可与三级射束定位协同进行,该三级射束定位命令AOD子系统保持轨迹中心线(在向量或刮削模式中的颤化期间)或光栅中心点(在光栅模式期间)。

[0208] 某些实施例提供重叠的光栅图案。只要有可能,可藉由光栅化特征使产出量最佳化,因为AOD光栅化操作发生的速度比在级段或电流计射束定位的情况下有可能的速度高得多。然而,AOD场的受限场大小会限制可在一个步骤中加以AOD光栅化的特征大小。藉由在保持重叠区的相交处的适当深度控制的同时使光栅图案重叠,可针对超过AOD场大小的图案产生品质光栅图案,由此使产出量最大化。在某些实施例中,AOD子系统用来将AOD范围内的二维特征光栅化,而无需来自电流计子系统的任何运动。大于AOD场的图案亦可藉由使单独(及静止)电流计坐标处的复数个单独光栅图案重叠来光栅化。与使用移动电流计轨迹的一般二维刮削相比,此方法可为更有效(并且由此更理想)的处理方法。如本文所使用,二维(2D)是指处理2D区域(例如,在X及Y方向上),但是亦包括具有第三维度(3D)中的深度控制的雷射处理。深度控制包括,举例而言,在Z方向上移除的材料量或对处理特征进行整形。

[0209] 某些实施例提供最佳化的AOD效率对范围。在LDA系统中处理特征时实现的产出量与在给定所需过程参数的情况下可利用的雷射功率成比例。最佳化此雷射功率因此最佳化产出量。藉由最佳化随着所需AOD操作范围而变化的AOD效率(同时保持操作AOD场上的准确AOD功率线性化),达成此功率最佳化。在处理需要相对较小AOD场的特征时,产出量得以最大化,同时仍然提供在较大特征所需要时使AOD范围最大化的能力。举例而言,在藉由AOD来颤化或形成二维光栅图案时,光学效率随着偏转范围增加而减小。因此,可需要在操作范围上线性化来自AOD的光学输出功率以使得AOD操作是可预测并且一致的。在某些实施例中,提供线性化的功率控制,其中对于在某些操作中所使用的有所减少的AOD偏转范围而言,光学效率较高,同时允许其他操作可利用的较大范围(具有减少的光学效率)。

[0210] 某些实施例藉由三级滤波来提供速度最佳化。三级滤波方法以及有限的AOD射束位移范围对于给定特征宽度所允许的最大射束速度造成限制。藉由计算此极限(在给定随着AOD操作范围而变化的颤化宽度及AOD功率限制的情况下),可判定在给定限制条件下的最佳速度,由此最佳化产出量。设定保守的速度极限(其将在所有状况下起作用)的替代方案可能不合意地减少产出量。藉由AOD射束控制的三级滤波允许减少电流计射束定位器的频宽要求。三级滤波器的动态,及随着偏转范围而变化的AOD光学效率的变化可组合,来对处理沟槽时的允许处理速度设定极限。在某些实施例中,判定此最佳速度的自动化系统及

过程用来使处理速度最大化。某些实施例保持垂直于轨迹的颤化。此等实施例可保证自动保持所要线宽度,而与处理速度无关。此产生可预测的且可重复的处理品质,同时允许速度任意变化,此是在射束定位器及功率限制条件内最佳化产出量所需的。举例而言,当将射束颤化来在工件材料中形成可变宽度沟槽时,颤化射束保持垂直于沟槽的切线,不论处理速度如何。某些实施例使用整数颤化列。此等实施例提供可预测的处理结果,而与用来加宽线性处理特征的颤化点的数目无关,并且不论所选择的处理速度如何。举例而言,在产生特征之间的相交处时,可预测的处理结果是有用的。藉由完成整数个颤化列,线性处理特征的末端得到较好界定,从而允许在与诸如其他沟槽或衬垫的其他特征的相交处较好地控制深度变化。

[0211] 某些实施例改良在工件上处理较大二维区域的效率。此可藉由使用颤化来加宽处理光点以便刮削该区域来解决。此方法提供刮削区域周边的良好解析度,并且提供对于由邻近刮削通过的重叠所导致的深度变化的适当控制。某些此等实施例提供具有受控重叠及较高解析度边缘的有效刮削。较大刮削区域在藉由LDA机器处理的应用中是常见的。为了使产出量最大化,有用之的举为最佳化此等刮削特征的处理,同时保持刮削区域的边缘界定的足够解析度。此等实施例允许使用更宽颤化射束来处理刮削区域,而同时保持高品质边缘界定并且对刮削通过之间的重叠进行整形以使得在刮削区域内较好控制深度变化。

[0212] 现在参考附图,其中相同参考数字指代相同元件。为了清楚起见,参考数字的第一个数位指示第一次使用对应元件的附图编号。在以下描述中,提供许多特定细节以便全面理解本文揭示的实施例。然而,本领域的技术人员将认识到,可在没有此等特定细节中的一或多者的情况下实践实施例,或用其他方法、组件或材料实践实施例。此外,在一些情况下,未展示或详细描述熟知的结构、材料或操作以避免模糊本发明的态样。此外,可在一或多个实施例中以任何适合方式组合所描述特征、结构或特性。

[0213] 实施例可包括各种步骤,该等步骤可在藉由通用或专用电脑(或其他电子装置)执行的机器可执行指令中实施。或者,步骤可藉由包括用于执行步骤的特定逻辑的硬件组件或藉由硬件、软体及/或韧体的组合来执行。

[0214] 实施例亦可以电脑程式产品形式来提供,该产品包括上面储存有指令的非暂时性机器可读媒体,该等指令可用来程式化电脑(或其他电子装置)来执行本文描述的过程。机器可读媒体可包括但不限于硬碟机、软式磁片、光碟、CD-ROM、DVD-ROM、ROM、RAM、EPROM、EEPROM、磁性或光学卡、固态记忆体装置或适合于储存电子指令的其他类型的媒体/电脑可读媒体。

[0215] I. 简介

[0216] 本揭示案描述LDA系统中所使用的AOD控制方法。此控制扩展LDA架构的能力以便针对较大刮削区域改良产出量,并且支援沟槽处理的高速操作。

[0217] LDA系统的能力是使用声光偏转器(AOD)以非常高的速度($>1\text{MHz}$)偏转处理射束来提供雷射处理能力。在一些实施例中,AOD在横向方向上提供约5-500光点直径的扫描场或射束偏转范围。在一些实施例中,AOD扫描场或射束偏转范围在横向方向上约5-100光点直径。在一些实施例中,AOD扫描场或射束偏转范围在横向方向上约5-50光点直径。在一些实施例中,AOD扫描场或射束偏转范围在横向方向上约5-20光点直径。在一些实施例中,AOD扫描场或射束偏转范围在横向方向上具有约500光点直径的最大距离。LDA系统可例如在向量

模式、光栅模式、向量模式及刮削模式下操作。

[0218] 在向量模式下,系统在工件中将沟槽作为“线”来处理。AOD射束在正交于射束轨迹的轴上、沿着一维(1D)线颤化,来人为地加宽烧蚀沟槽。

[0219] 在光栅模式下,AOD偏转处理射束来处理在其处理场内的二维(2D)区域。此等光栅区域的空间及强度图案大体上是任意的。此能力可用于例如产生沟槽之间的相交处,或产生诸如介层孔衬垫的特征。

[0220] 在刮削模式下,可处理较大区域(超过AOD场大小)。此可藉由颤化加宽的线来执行。然而,使用特殊处理来避免仿形边缘的过度像素化,并且提供倾斜通量轮廓以获得良好重叠及相交品质。

[0221] 以下部分描述此等模式并且概述LDA系统的各种实施例的实行细节。

[0222] II. AOD处理理论

[0223] 在一实施例中,LDA系统藉由AOD子系统来操纵处理射束以产生各种尺寸的特征。此部分描述此处理所依据的理论,从而产生系统架构。

[0224] A. 用于深度控制的中心通量标准化

[0225] 材料移除体积在名义上与通量(对于给定雷射功率位准而言)成比例,并且因此可控制通量来控制特征深度。另外,藉由指定通量而非剂量,可消除特征尺寸与通量之间的相互作用。当指定剂量时,颤化区域或光栅化区域中的所得通量取决于颤化点的数目及相对于处理光点大小的特征尺寸,此是由于落在颤化网格区域外部的高斯光点能量分布。可计算并补偿此效应以消除此相互作用。系统自动地动态调整雷射功率以在沟槽或光栅区域的中心处保持指定通量,而与速度或颤化(或光栅)网格尺寸无关。因此,可改变系统的基本射束递送设置(例如,光点大小、最小颤化(或光栅)光点重叠)而不影响过程校准结果。

[0226] 1. 理论通量

[0227] 图1D为例示处理光点110的网格100的示意图,该网格可藉由颤化移动射束(例如,在向量模式下)或静止光栅图案(例如,在光栅模式下)来产生。处理光点110各自分别具有在同轴(OA)及横轴(CA)中的XY光点间距 D_{oa} 及 D_{ca} 。对于根据此实例的颤化射束而言,假定当射束在Y轴中移动(如藉由箭头112指示)时,颤化图案重复(例如,基本上永远)。计算区域由分别在OA及CA轴中的 N_{oa} 及 N_{ca} 个点覆盖。换言之, N_{ca} 为横轴方向中的点的数目。

[0228] i. 光栅通量

[0229] 假设雷射功率为P,且每个点的AOD停留时间为 T_{aod} ,平均通量(每单位面积A的能量E)由下式给出

[0230]
$$\text{通量} = E/A = P * T_{aod} / (D_{ca} * D_{oa})。$$

[0231] 此表达式适用于光栅处理,其藉由可预测的网格间隔来较好地描述。在此情况下,可定义“通量尺度”来将通量转换成功率:

[0232]
$$\text{通量尺度} = (D_{ca} * D_{oa}) / T_{aod},$$

[0233] 然后,用于指定通量的光栅功率(以瓦为单位)可藉由下式来计算

[0234]
$$\text{功率} = \text{通量尺度} * \text{通量}。$$

[0235] ii. 向量通量

[0236] 在颤化射束的情况下,由于可变速度及变化的颤化宽度,网格间隔并非恒定的。在此情况下,通量计算可在剂量方面来描述。给出

[0237] $Doa = V * Nca * Taod$ 及

[0238] 宽度 = $Dca * (Nca - 1)$,

[0239] 则

[0240] 通量 = $P * Taod / (Dca * V * Nca * Taod)$

[0241] = $(P/V) / (\text{宽度} * Nca / (Nca - 1))$

[0242] = 剂量 / EffectiveWidth,

[0243] 其中

[0244] 射束速度 (例如, 沿着图1D示出的Y轴) = V ,

[0245] 剂量 = P/V , 并且

[0246] $EffectiveWidth = \text{宽度} * Nca / (Nca - 1) = Dca * Nca$ 。

[0247] 此为有用的结果, 因为其意谓 (对于理想情况) 可使用剂量及宽度 (对于颤化线) 或间隔及停留时间 (对于光栅化区域) 的熟知过程参数来对给定区域中的通量进行标准化。具有时变光点分布的颤化特征及任意光点分布的光栅化特征可组合, 以便在将其相应通量等级标准化之后产生相交处。

[0248] 注意, 只要剂量得到控制, 就不需要在向量处理期间的颤化的细节 (颤化点的数目 Nd 、颤化间隔、速度)。此是有用的, 因为LDA系统的射束控制架构依赖于能够任意改变颤化间隔及速度。

[0249] iii. 边缘效应

[0250] 当颤化图案的尺寸相对于光点大小为较小时, 上述通量模型偏离理论。在此等较小尺寸下, 每个光点中的功率自网格100“泄漏出去”并且减少网格区域的中心处的通量。此效应随着网格尺寸及网格内的点的数目而变化。举例而言, 图2图形地表示根据一实施例的EffectiveWidth ($Weff$) 的变化, 该EffectiveWidth随着相对网格宽度 (藉由光点直径 $Dspot$ 来标准化) 及跨网格宽度的颤化点的数目而变化。可预测并补偿EffectiveWidth的此偏离。

[0251] 在图2中, 对于0与大约1之间的标准化网格宽度而言, 顶部曲线对应于6个光点, 下一个最高曲线对应于5个光点, 下一个最高曲线对应于4个光点, 下一个最高曲线对应于3个光点, 并且最下部曲线对应于2个光点。

[0252] 2. 通量标准化

[0253] 以上开发的方程计算雷射光点的任意网格的通量以使得分开处理的区域可藉由可预测的结果来组合。此“通量标准化”适用于形成具有不同宽度的沟槽, 及特征相交处。两个实例对此进行例示。

[0254] 通量标准化的第一实例在图3、4、5及6中例示。图3图形地例示根据一实施例的具有不同网格密度的两个相交特征的网格图案。在图3中, 两个特征相交, 每一特征具有不同的颤化网格间隔。藉由圆圈来表示用于该等特征中的一者的处理光点, 并且藉由加号 (+) 来表示用于另一个特征的处理光点。对于相交处, 此等图案的一者可为例如沟槽, 并且另一个图案可为相交光栅图案的一部分。注意, 光点振幅斜降以产生相交斜率来提供对定位误差的容限。图4图形地例示根据一实施例的在振幅标准化的后的相交特征的模型化通量 (未组合)。在图4中, 在根据网格的光点密度将每个网格的光点能量定标之后, 模拟每个图案上的通量。图5图形地例示根据一实施例的相交特征的组合通量。在图5中, 两个图案的通量被组合以获得相对平滑的相交。

[0255] 此方法对于此等有规则的矩形图案较好地起作用。在诸如沟槽及圆形衬垫(常见的LDA相交处)的更复杂的相交处的情况下,衬垫图案可包括“突出部”,其自衬垫网格延伸出去,到达矩形部分,然后可如上所述来处理该部分。举例而言,图6图形地例示根据一实施例的具有突出部612的圆形衬垫610的光栅网格(右侧)及通量轮廓(左侧)。在图6的实例中,突出部612具有约50 μm 的长度,其可用于相交过渡。

[0256] 第二实例在图7中示出,其图形地例示根据一实施例的通量标准化对于具有不同宽度的沟槽的影响。在图7中,图表被组织成三行,其中顶部图表例示颤化图案,中间图表例示对应的通量分布,并且底部图表例示对应的中心通量710、712、714(即,随着沟槽的宽度变化,相应沟槽的中心处的通量)。左侧行示出没有补偿,中间行示出宽度补偿,并且右侧行示出非线性补偿。在此实例中,当剂量仅藉由颤化网格宽度来定标时,随着颤化宽度变窄,图2示出的有效宽度的非线性仍然产生通量变化。相比之下,图7示出当宽度变化时,施加非线性通量校正达成恒定通量。如图7中示出,当沟槽宽度变化时,没有补偿的中心通量710及具有基于宽度的线性补偿的中心通量712变化。然而,在使用以上论述的非线性通量校正(例如,基于剂量及宽度参数,其中通量= $P \cdot T_{\text{aod}} / (D_{\text{ca}} \cdot V \cdot N_{\text{ca}} \cdot T_{\text{aod}})$)时,中心通量714保持恒定(即,曲线714保持于标准化值“1”)。

[0257] 在施加随着颤化(或光栅)网格宽度而变化的通量线性校正之后,然后可施加恒定剂量(功率/速度)以便保持此通量,而与速度无关。因此,经向量处理的沟槽可在宽度及速度方面变化,同时保持中心通量恒定。

[0258] 通量线性补偿可扩展至光栅化区域(例如,对于衬垫或其他较大特征)的两个尺寸。然而,此效应对于大于约1.5*光点直径的衬垫直径而言是可忽略的。在某些实施例中,由于衬垫通常将满足此直径准则,其可能不需要通量补偿。

[0259] 3. 通量模型化的注意事项

[0260] 以上分析是理想化的。应提到若干注意事项,其可影响系统在产生具有受控深度变化的相交处方面的效能。

[0261] 材料具有处理限值,因此通量不一定线性组合来预测烧蚀材料的量。此意味着恒定剂量处理可能不产生一致结果,因为在恒定剂量下,当功率随着速度增加时,处理临界效应将会减小。

[0262] 光点失真(包括来自AOD偏转的影响,尤其在较高偏转速率下)将使通量场失真。

[0263] 沟槽末端上的通量非线性可能无法解决。通常,沟槽终止于与另一个沟槽的相交处(衬垫上的短柱,或光栅化相交处上的分支)。只要两个相交沟槽在相交区域上具有通量的相同斜坡,则末端效应在名义上得以消除。

[0264] B. 颤化抽象化

[0265] 基于此结果,颤化及光栅的过程可加以抽象化以涵盖颤化的低阶细节(例如,颤化点的数目及其定标)。此允许容易地修改系统架构或组件(例如,新AOD设计、不同光学布局)而不影响使用者(或程式设计员)指定颤化及光栅处理的方式。软体架构、机器校准及应用设置得以简化。

[0266] 在形成相交处的过程中,应小心避免相交点处的通量(及由此深度)变化。在示例性实施例中,每个相交处是基于周围沟槽尺寸来定制,并且针对每个类型的相交处来产生定制光栅图案(例如使用Matlab或其他工具来预先离线计算)。此过程可针对生产机器来流

线化。

[0267] 对于LDA系统,两个目标可藉由将颤化物件及光栅化物件视为由颤化光点的网格组成来满足,该网格藉由光点密度及尺寸界限来描述。藉此,可计算工件上的颤化或光栅化区域内的通量,并且可基于此等计算出的通量来产生相交光栅图案。

[0268] 1. 颤化图

[0269] 由于相交处界定不需要颤化几何形状的细节,因此在向量处理期间的颤化的指定可抽象化成光点网格宽度及剂量。同轴(沿着速度向量)及横轴的光点布局不需要明确的定义。实际上,颤化图将网格宽度转换成低阶颤化参数;例如,颤化点的数目Nd及颤化宽度定标因子Kw。注意,暂时忽略“形状”(Ks)的概念。

[0270] 本文所述的过程校准程序经由网格宽度及通量的介面来检视颤化操作。根据某些实施例,Nd及Kw的细节涵盖于颤化图中以避免过程校准步骤中的复杂性。注意,若光点大小或AOD范围改变,则颤化图可变化。在某些实施例中,相同颤化图用于过程校准及运行时间处理期间以便确保一致、校准的处理结果。

[0271] 在系统校准期间预设支援此处理的AOD颤化表。颤化图涵盖颤化参数的使用者介面,诸如过程校准、过程图及定序器。颤化图使用以下步骤来设定颤化表:

[0272] 第一,在系统校准期间判定AOD偏转尺度因子。

[0273] 第二,基于1:1深度/宽度纵横比的最小沟槽尺寸,设定系统校准资料中的有效光点直径Def_f。此设定仅为对于设定AOD表(以便将间距设定为保守最大值)及通量线性化的准则。在某些实施例中,Def_f的值可能需要精确至~10-20%内。Def_f的较低值可用来确保重叠,但是其增加颤化点的数目并且可降低最大速度。

[0274] 第三,初始化32个依序颤化表(例如,在现场可程式闸阵列(FPGA)内,如下论述)。颤化表中的每一者包括1至32个点,每个点具有0.35*Def_f的间距。颤化表可覆盖高达10*Def_f的颤化范围。此提供Def_f定义的10%容限,同时确保重叠的脉冲产生均匀的通量分布。

[0275] C. 过程校准及映射

[0276] 在给出通量控制的典范的情况下,过程设置程序可在LDA系统中加以修改。在LDA系统的示例性实施例中,过程参数包括低阶颤化参数(Kw,Ks)及剂量(功率/速度),其标称单位为焦耳/米(J/m)(但是实际剂量单位可为任意的)。LDA系统藉由一致、校准的单位以及避免低阶实行细节来简化用于处理设置的使用者介面。

[0277] LDA系统中的材料处理可藉由两个参数来定义:通量(J/cm²)及颤化或光栅网格尺寸(对于向量及刮削处理为宽度,对于光栅化为XY光栅尺寸)。

[0278] 1. 过程校准

[0279] 通量标准化适用于颤化(或光栅)特征的中心区域。在特征边缘处的通量不易于标准化,因为其由高斯光点的尾部产生。因此,沟槽宽度随着颤化网格宽度非线性地变化,并且在某些实施例中仍然得到校准。此是过程校准特征的功能。对于给定材料,相同程序用来校准特征深度对通量。

[0280] 图8例示根据一实施例的示例性过程校准测试矩阵800。校准测试矩阵800指定一系列通量等级及颤化网格宽度。在机器上自动处理一组特征(一个特征针对参数矩阵中的每个条目),并且在外部计量工具上量测该组特征。将特征宽度及深度结果输入至过程校准软体,该软体然后建立“过程表”资料库,该资料库用来自动选择用来处理任何尺寸的特征

的过程参数(通量及网格宽度)。

[0281] 2. 过程图及材料表

[0282] 对于向量处理,沟槽尺寸(宽度及深度)经由过程图来判定颤化网格宽度及通量,该过程图针对应用来填入材料表。过程图基于自过程校准表供应的资料来执行此映射。图9例示根据一实施例的示例性材料表900。注意,材料表900中的灰色条目是由过程图输入并且使用者不能对其进行修改。对过程参数的精细调整可用于进行过程测试或对过程进行微调。

[0283] 当载入应用程式时,用应用程式中所包含的所有向量及刮削特征(沟槽宽度及深度)及光栅特征(衬垫直径及深度)的尺寸来填入材料表900。

[0284] 若需要,使用者可在材料表900中输入微调调整。在某些实施例中,对于生产处理而言不建议此举,但是可适用于过程测试及微调。若没有过程校准表可利用,则可手动输入材料表900条目。

[0285] 过程图的功能是基于在过程校准期间收集的相对稀疏资讯来对所需材料表900条目进行内插。

[0286] III. 系统架构

[0287] 以下部分描述实行AOD操作的系统架构及组件的某些实施例。

[0288] A. 资料流及处理

[0289] 图10为例示根据一实施例的用于命令AOD的简化处理及资料流架构(在本文中亦称为“AOD处理架构”1000)的方块图。AOD处理架构1000包括系统控制电脑(SCC) 1010,处理丛集1012,AOD前端板(AFEB) 1014,AOD驱动器1016、1018,及AOD 1020、1022。如以下详细地论述,SCC 1010预处理雷射处理应用以建构个别处理段及相关过程参数。SCC 1010经由介面1023(例如,在200kHz资料速率下)将段资料发送至处理丛集1012的介面1024。处理丛集1012包括数位信号处理器(DSP) 1026及现场可程式闸阵列(FPGA) 1028。本领域的技术人员自本文中的揭示内容将理解,亦可使用其他类型的处理逻辑(例如,附加于或代替DSP 1026及/或FPGA 1028)。

[0290] DSP 1026计算详细射束轨迹及颤化参数(例如,在1MHz资料速率下)。然后将此资料传输至FPGA 1028。如以下详细地论述,FPGA 1028计算高速AOD命令(例如,高达4MHz资料速率),该等命令经由SSP1串列链接传输至AFEB 1014。AFEB 1014将AOD命令转换成平行资料字,该等资料字被发送至AOD驱动器1016、1018。AOD驱动器1016、1018然后产生射频(RF)驱动信号,该等信号操作AOD 1020、1022以经由AOD单元来控制光束偏转(经由RF信号频率)及振幅(经由RF信号振幅)。以下关于图10A、10B及10C来论述AOD 1020、1022及其他光学元件的示例性操作。

[0291] 图10A为根据一实施例的用于颤化雷射射束的系统1040的方块图,该系统包括AOD子系统1042及电流计子系统1044。本领域的技术人员自本文中的揭示内容将认识到,可使用其他类型的定位子系统。举例而言,定位子系统可使用FSM。

[0292] 系统1040包括将处理射束1048提供至AOD子系统1042的雷射源1046。在一实施例中,雷射源1046包括脉冲雷射源以使得处理射束1048包含一系列雷射脉冲。在另一实施例中,雷射源1046包括连续波(CW)雷射源以使得处理射束1048包含CW雷射射束。在某些此类实施例中,AOD子系统1042藉由使处理射束1048以离散的(“脉冲”)间隔偏转而自CW雷射射

束产生雷射脉冲。

[0293] 示例性雷射可包括光纤雷射、CO₂雷射、铜蒸气雷射、雷射二极管或其他类型的雷射中的一或多个者。然而，应了解光源不一定为雷射。举例而言，光源可为发光二极管(LED)或大功率灯。此等光源可为宽带及光谱滤波带或窄带。

[0294] 在一些实施例中，雷射源1046使用固态二极管激升的雷射，其可被组配来在高达5MHz的脉冲重复率下发射约266nm(UV)至约1320nm(IR)的波长。然而，可藉由替代或添加适当雷射、雷射光学器件、零件搬运设备及控制软体来调适此等系统以在工件1060上可靠地且重复地产生所选择的光点区域。此等修改准许雷射处理系统将具有适当雷射参数的雷射脉冲以雷射光点或脉冲之间的所要比率及间距引导至经适当定位且固持的工件1060上的所要位置，以产生具有所要颜色、对比度及/或光密度的所要光点区域。

[0295] 在一些实施例中，雷射微机械加工系统采用在1064nm波长下操作的二极管激升的Nd:YVO₄固态雷射(诸如，由Lumera Laser GmbH(Coherent), Kaiserslautern, Germany制造的模型Rapid)。可视情况使用固态谐波频率产生器来二倍频此雷射以将波长减小至532nm，从而产生可见(绿色)雷射脉冲，或将此雷射三倍频至约355nm或四倍频至约266nm，从而产生紫外线(UV)雷射脉冲。此雷射经定额以产生6瓦的持续功率且具有1000KHz的最大脉冲重复率。此雷射源与控制器协作产生具有约10ps的持续时间的雷射脉冲。然而，可使用展现1飞秒(fs)至1000奈秒(ns)的脉冲宽度的其他雷射。

[0296] 如以上所论述，AOD子系统1042将处理射束1048的一阶射束1049以AOD偏转角1050加以偏转并且将处理射束1048的零阶射束1051发送至射束收集器1052。系统1040可进一步包括：固定反射镜1054，其用来将一阶射束1049偏转至电流计子系统1044；及扫描透镜1056，其用来将雷射射束光点1058聚焦于工件1060上或其中。扫描透镜1056的输出可在本文中称为聚焦雷射射束1061。

[0297] 在一实施例中，AOD子系统1042可包括用来在第一方向(例如，颤化方向)上提供来回偏转的单一AOD，而电流计子系统1044在沿着处理轨迹1062的第二方向上提供偏转。在图10A示出的实施例中，AOD颤化光点的每个列(沿着X轴示出)垂直于处理轨迹1062。然而，为了增加速度及多用性，图10A所例示的实施例中的AOD子系统1042提供相对于工件1060的表面沿着X轴及Y轴的2-D偏转。在此实例中，Y轴可被称为平行于处理轨迹1062并且X轴可被称为垂直于处理轨迹1062。因此，X轴可被称为颤化方向。处理轨迹1062可对应于例如系统1040在工件1060的表面中刻划或切割沟槽1064(例如，在电流计子系统1044控制下)的方向。

[0298] 为了提供所例示的2-D偏转，AOD子系统1042包括：第一AOD 1020，其用来将一阶射束1049在第一方向上偏转；及第二AOD 1022，其用来将一阶射束1049在第二方向上偏转，同时电流计子系统1044将射束轴沿着处理轨迹1062移动。换言之，藉由AOD子系统1042提供的射束光点位置的移动叠加于藉由电流计子系统1044提供的射束光点位置的移动上。如图10A中示出，电流计子系统1044亦可包括第一电流计反射镜1066及第二电流计反射镜1067，其用来将一阶射束1049将一阶射束1049相对于工件1060的表面在X轴及Y轴方向上偏转。

[0299] AOD偏转的定向可能不与电流计子系统1044的偏转轴对准。通常，坐标变换可应用于AOD偏转命令以便将所得AOD偏转与所要坐标框架对准。此坐标变换亦可随着速度而变化，从而旋转AOD偏转坐标框架以便保持AOD射束偏转垂直于藉由电流计子系统1044界定的

处理轨迹。

[0300] 在AOD子系统1042包括于系统1040中的情况下,允许若干操作模式。在一实施例中,操作模式包括颤化处理射束1048以便有效地加宽工件1060处的雷射射束光点1058的能力。换言之,颤化处理射束1048包括空间定位一系列聚焦雷射射束光点1068以产生几何特征,该等特征的尺寸大于藉由扫描透镜1056聚焦的个别雷射射束光点1058的尺寸。出于示例性目的,图10A示出当在处理轨迹1062的方向上处理沟槽1064时自工件1060的表面上方观察的颤化雷射射束光点1068。因此,举例而言,在给定重复率下的一系列颤化雷射射束光点1068具有在较低脉冲重复率下在处理轨迹1062的方向上相继施加的一系列较大直径雷射射束光点的效果。

[0301] 在某些实施例中,AOD 1020、1022可以大约为约 $0.1\mu\text{s}$ 至约 $10\mu\text{s}$ 的速率更新其相应声场(用新的声学波形来填充光学孔隙)。假设为约 $1\mu\text{s}$ 的示例性更新速率,处理射束的位置可快速更新以使得颤化雷射射束光点1068中的若干个在处理期间重叠。颤化雷射射束光点1068可在垂直于处理轨迹1062的维度(例如,沿着X轴或颤化方向)上重叠以便加宽所处理的特征(例如,沟槽1064)。如图10A中示出,颤化雷射射束光点1068亦可在处理轨迹1062的方向上重叠。为了保持颤化射束定向成垂直于处理轨迹1062,根据某些实施例,可随着处理轨迹1062的角度变化而不断地调整颤化轴。另外,可调整颤化轴来弥补随着处理轨迹速度而变化在颤化点的线上所赋予的角度。

[0302] 除了相对于工件1060的表面来颤化射束位置之外,或在其他实施例中,AOD子系统1042可用来改变颤化轴中的强度轮廓。操纵沿着颤化轴的处理射束1048的强度轮廓允许对所处理沟槽1064的横截面进行整形。举例而言,沟槽1064可经处理而具有矩形、U形或V形横截面。对诸如侧壁斜率的特征进行整形可适用于诸如相交处形成的情况中。整形解析度可基于基本光点大小,并且整形强度轮廓可为颤化图案(位置及强度)及光点强度轮廓(例如,高斯轮廓形状或另一种轮廓形状)的卷积。可对特征进行整形,该整形例如藉由使脉冲沿着颤化轴在某些位置处重叠(例如,可将两个或两个以上脉冲施加于同一位置处)来移除选定量的目标材料,及/或藉由随着沿着颤化轴的偏转位置而变化来调变雷射脉冲的功率振幅来进行。

[0303] 除了沿着颤化轴对特征进行整形之外,或在其他实施例中,AOD子系统1042可用于控制随着沿着处理轨迹1062的位置而变化的功率以允许对所处理线性特征的“端点”的类似整形。控制随着沿着处理轨迹1062的位置而变化的功率亦可适用于诸如相交处形成的应用中。AOD子系统1042的使用允许功率调变以非常高速度(例如,大约为几微秒)发生,以使得强度轮廓的精密控制(例如,其中特征尺寸在约 $5\mu\text{m}$ 与约 $50\mu\text{m}$ 之间的范围内)在较高处理速度(例如,在约 1m/s 与约 5m/s 之间的范围内)下是可能的。

[0304] 除了使高斯射束偏转之外,某些实施例亦可使藉由包括例如绕射光学元件(DOE)的传统射束整形技术来整形的射束偏转。举例而言,图10B为根据一实施例的射束整形系统1070的方块图。系统1070包括图10A示出的AOD子系统1042(具有第一AOD 1020及第二AOD 1022)、零阶射束收集器1052及反射镜1054。系统1070进一步包括用于射束整形的绕射光学元件(DOE) 1072及光学元件1074(例如,成像光学器件、电流计反射镜及扫描透镜)。出于示例性目的,在一系列AOD偏转角1050上展示图10B中的一阶射束1049。在图10B例示的实施例中,藉由AOD子系统1042偏转的一阶射束1049经由中继透镜1076被中继至DOE 1072(将射束

的枢轴点成像于DOE 1072上)以便保持一阶射束1049在DOE的孔隙上居中,不论AOD子系统1042所赋予的AOD偏转角1050如何。然后,DOE 1072可藉由赋予额外波前相位失真来对射束强度进行整形(如此等射束整形DOE的典型情况)。此方法在以下情况中可为有利的,其中较大的整形射束可偏转并邻接以形成具有例如正方形强度轮廓的更均匀的颤化通量轮廓。此方法在以下情况中亦可为有利的,其中较少数目个雷射脉冲足以形成所要特征(举例而言,在介电材料中钻出的微介层孔)。在此情况下,相对于施加整形强度轮廓,光栅化施加高斯脉冲可能效率较低,但是高速AOD偏转对于整形强度处理光点位置的高速控制可为合意的。对修改雷射光点区域的空间辐照轮廓的详细说明可在Corey Dunskey等人的美国专利第6,433,301号中发现,该美国专利让渡给本申请案的受让人且以引用方式并入本文中。

[0305] 在其他实施例中,类似的中继透镜组态可用来定制AOD偏转射束在扫描透镜处的偏转。出于至少两个原因,此可为合乎需要的。首先,可能需要将射束的枢轴点中继至电流计扫描反射镜(消除射束横向偏转)以便:(a)保持射束在电流计反射镜及扫描透镜的透明孔隙中居中以避免射束截割,及(b)避免射束自扫描透镜入射光瞳的中心位移,因为此位移可在工作面处产生倾斜射束。其次,可能需要在扫描透镜处赋予横向射束偏转以便有意地在工作面处产生射束斜率。在某些高斯雷射钻孔应用中,倾斜射束可有利于在所处理特征(举例而言,微介层孔钻穿)中产生更陡的侧壁。

[0306] 图10C为根据一实施例的提供倾斜处理射束1082的系统1080的方块图。系统1080包括图10A示出的AOD子系统1042(具有第一AOD 1020及第二AOD 1022)、零阶射束收集器1052及反射镜1054。系统1080进一步包括中继透镜1076及光学元件1074(例如,成像光学器件、电流计反射镜及扫描透镜)。出于示例性目的,在一系列AOD偏转角1050上展示图10C中的一阶射束1049。如图10C中示出,藉由正确地设计并间隔1084中继透镜1076与扫描透镜(例如,图10A示出的扫描透镜1056),藉由AOD子系统1042偏转的一阶射束1049亦可横向偏转以在工件1060的表面处产生倾斜射束1082。用于处理光点在工件1060处的给定偏转的射束倾斜量可藉由以下来控制:(a)使用AOD 1020、1022来大体上产生工件1060处的横向光点偏转,并且改变中继透镜1076光学器件及与扫描透镜(例如,扫描透镜1056)的间隔1084,或(b)协调电流计(例如,图10A示出的电流计1066、1067)及AOD 1020、1022以使得可赋予扫描透镜处的任意横向射束偏转(以及由此,工件1060处的任意射束斜率),而与工件1060处的所要横向光点偏转无关。

[0307] 整形技术的进一步细节稍后加以更详细论述并且亦可在Mark A.Unrath等人的美国专利公开案第2012/0273472号中发现,该案的内容以引用方式并入本文中。

[0308] 虽然射束颤化可非常有效且灵活地产生所要通量轮廓,但是颤化的替代(但是有时更具限制性的)方法包括藉由向AOD 1020、1022中的至少一者施加线性变频波形来改变雷射射束光点1058的焦点,亦即,可藉由当雷射脉冲传播穿过AOD时使施加至AOD的一或多个超声换能器的RF信号线性变频来驱动AOD 1020、1022。使所施加RF信号线性变频具有在离开AOD子系统1042的雷射脉冲的射束的焦距中产生变化的效果。在改变焦距后,递送至工件1060的雷射脉冲的有效光点大小以对应的方式变化。焦距改变的程度可藉由以下来表征:

[0309] $F = v^2 / (\lambda \cdot df/dt)$ 。

[0310] 其中F为藉由线性变频产生的有效焦距,v为声光(AO)单元内的声速, λ 为雷射脉冲

的波长并且 df/dt 为施加至超声换能器的RF频率的变化率。如将了解,焦距改变的方向(即,朝向或远离工件1060是由F的正负号给出(即,可为正或负,取决于频率是否经调变来随时间增加或减小)。

[0311] 此外,使用线性变频波形,声波的瞬时频率在穿过AOD晶体的光学处理射束1048内线性变化。声波的瞬时频率的线性变化具有向处理射束1048施加单轴(散光)聚焦项的效果,而非在离散步骤中使雷射射束光点1058位移。藉由向AOD 1020、1022施加线性变频波形,根据某些实施例,雷射射束光点1058可对称(或不称)地散焦,由此增加工件1060处的光点大小。此方法可适用于例如较低重复率雷射的情况下,其中脉冲重复频率可能不足够高来提供脉冲在工件1060处的良好重叠以便在加宽沟槽1064时避免强度变化。线性变频亦可用于在使用较低通量或脉冲能量的处理步骤期间使雷射射束光点散焦。举例而言,雷射处理(例如,在形成于半导体晶圆上或其中的积体电路之间刻划)可包括切穿上覆金属(例如,铜)层的第一处理步骤,后续接着使用有所减少的通量来处理下伏介电层的第二处理步骤。代替使用雷射射束的两次通过,一个实施例使用线性变频来使雷射射束光点散焦,以使得可在单次通过中处理两个层。线性变频可在各个脉冲之间选择性地控制或可施加至脉冲的群组。类似地,亦可控制脉冲的空间形状。

[0312] 大体上,对于与穿过被雷射脉冲射束照射的孔隙的声波的渡越时间相比较短的雷射脉冲而言,使所施加RF信号线性变频较好地起作用。可能难以有效地改变藉由诸如CW或准CW(QCW)雷射的雷射源1046产生的雷射脉冲射束的焦距,基本上因为此等雷射(实际上)在脉冲之间没有雷射关闭时间,在此雷射关闭时间期间可将线性变频频率重设成开始值。因此,可更容易将线性变频技术与离散脉冲雷射一起实行,以使得当雷射脉冲穿过AOD 1020、1022时,可正确地设置线性变频扫描(围绕用于光点定位的中心AOD频率)。然而,若亦提供脉冲闸控单元,则线性变频技术可与CW或QCW雷射一起使用。

[0313] AOD子系统1042可赋予射束轴移动的程度与所施加RF信号的频率成比例。当所施加RF频率线性变频时,声波频率将在穿过AO单元的雷射脉冲的宽度(即,横向于射束路径来量测)上变化,并且射束路径的偏转与渡越雷射脉冲的平均频率成比例。平均频率可正确地设置或校准以赋予射束轴的所要移动。然而,雷射脉冲及/或AOD控制信号时序的变化可导致此平均频率的偏移,并且由此产生光点位置误差(即,导致雷射脉冲被递送至工件1060处的不同于所要光点位置的位置)。举例而言,AOD子系统1042可具有 $150\mu\text{m}$ 的扫描范围(例如,在30MHz频宽内)。因此,每MHz的射束路径偏转量将为 $150\mu\text{m}/30\text{MHz}$,或 $5\mu\text{m}/\text{MHz}$ 。若所要线性变频速率为 $30\text{MHz}/\mu\text{s}$,则10ns的时序变化将产生 $1.5\mu\text{m}$ 的射束路径偏转误差(即, $(5\mu\text{m}/\text{MHz}) * (30\text{MHz}/\mu\text{s}) * (10\text{ns})$)。

[0314] 雷射脉冲及/或AOD控制信号时序的变化通常由于以下因素而产生:控制器(因为其可以各种方式实施)内的电路或操作、驱动器的变化、雷射脉冲由雷射源1046产生等。在一些雷射源(诸如二极管脉冲式光纤雷射)中,输入雷射触发信号与最终产生的对应雷射脉冲之间的抖动可相对较低($<10\text{ns}$)。在其他雷射源(例如Q开关二极管激升雷射)1046中,变化可较大(例如,归因于内部Q开关活动及雷射空腔动态的随机同步)。例如,典型UV Q开关雷射可在输入雷射触发信号与最终产生的对应雷射脉冲之间展现大约 $\pm 15\text{ns}$ 的时序不确定性。此外,典型FPGA可具有以20ns时钟周期运行的基本时钟。因此,包括此FPGA的控制器(例如,FPGA1028AOD控制器)将引入额外 $\pm 10\text{ns}$ 的时序不确定性。此等时序不确定性可导致

最终递送至工件102的雷射脉冲的定位误差(即,雷射脉冲最终被递送至的实际位置远离所要处理光点的变化或偏差)。取决于在处理期间将要形成的特定特征,此定位误差可能重要或可能不重要。

[0315] 当实现Z高度补偿时,上述定位误差可为重要的。在此等情况下,发至雷射源1046的触发信号的输出(例如,用于产生雷射脉冲),发至AOD子系统1042的触发信号的输出(例如,用于施加一或多个线性变频RF信号),与雷射脉冲藉由雷射源1046的产生之间的同步化可加以改良。举例而言,在雷射源1046依赖于内部时钟来触发雷射脉冲的输出的一实施例中,内部时钟可(例如,经由PLL、闸控逻辑等)与起始发至AOD子系统1042的触发信号的控制器的内部时钟同步化。此外,产生线性变频率序列本身所涉及的任何时钟(例如,藉由直接数位合成器(DDS)电路使用的时钟等)可类似地同步化。此同步化可将时序不确定性减少至仅为归因于随机雷射空腔作用的时序不确定性。

[0316] 在一些实施例中,AOD子系统1042可藉由在雷射脉冲渡越超声换能器时向该等超声换能器中的一或多个者施加光谱整形RF信号来驱动。在此等实施例中,选择所施加RF信号中的频谱的形状以改变离开AOD子系统1042的雷射脉冲的射束的M2因子(在此项技术中亦称为“射束品质因子”或“射束传播因子”)。在改变M2因子后,递送至工件1060的雷射脉冲的有效光点大小以对应的方式变化。M2因子可改变的程度对应于所施加RF信号中的频谱的宽度(例如,与相对较窄频谱相比,相对较宽频谱对于M2因子具有更强影响)。大体上,对于与穿过被雷射脉冲射束照射的孔隙的声波的渡越时间相比较长的雷射脉冲而言,对所施加RF信号的频谱内容进行整形较好地起作用。

[0317] 在将具有径向对称、高斯空间强度轮廓的雷射脉冲递送至工件1060的实施例中(并且假定藉由雷射源1046输出的雷射脉冲具有高斯空间强度轮廓),则所施加RF信号的频谱亦可具有高斯形状。因此,在一实施例中,可施加的第一种类型的RF信号可表征为时间域中的相对较窄信号尖峰(即,暗示所施加信号频谱中的所有频率之间的恒定或大体上恒定的相位)。此类型的信号有可能负面地影响AOD单元的总绕射效率。因此,在另一实施例中,可施加的第二种类型的RF信号可表征为相对平滑信号,看上去几乎类似于单一频率振荡(例如,其中一个振荡峰的振幅与每隔一个振荡峰的振幅大约相同的信号)。此RF信号可包括准周期信号。不同于有尖峰的RF信号,此等光谱整形RF信号可建构成不会显著影响A0单元的绕射效率。

[0318] 合适的光谱整形RF信号可使用任何合适技术来产生。在一实施例中,光谱整形RF信号可藉由以下过程来产生,该过程包括:选择所要中心频率 ω_0 来设定调变射束的质心位置,选择所要频谱宽度 $\sigma\omega$ 来设定工件1060处的有效雷射脉冲光点大小,选择所要频率解析度 $r\omega$ 来设定将要驱动的离散频率的间隔,以及将选定中心频率 ω_0 、频谱宽度 $\sigma\omega$ 及频率解析度 $r\omega$ 输入至诸如Gerchberg-Saxton演算法的演算法,以便经由判定每个频率所需要的相位来大致估计将要施加的RF信号的要频谱性质。在此实施例中,AOD系统可被设计成使得入射于A0单元上的雷射脉冲的射束照射A0单元的相对较大数目个光栅周期(例如,在100MHz的脉冲重复率下入射于石英A0单元上的6mm射束大小照射超过100个周期),从而针对大多数实际情况来达成高斯频谱的合适近似。然后,可(例如,在控制器处)应用近似来产生将要施加至AOD子系统1042的一或多个合适光谱整形RF信号。藉由改变频谱宽度 $\sigma\omega$ (近似演算法的输入),可改变所施加RF信号的频谱以改变所施加RF信号中的频谱的宽度。此

外,藉由改变中心频率 ω_0 (近似演算法的输入),可偏转射束路径。因此应了解,频谱宽度 ω 、中心频率 ω_0 及频率解析度 $r\omega$ 或其任何组合可共同或单独地改变。

[0319] 虽然以上论述限于产生具有高斯整形频谱的RF信号,但是应认识到本发明不限于此。举例而言,可修改以上论述的技术来产生其他光谱整形RF信号(例如,具有矩形或“顶帽”频谱形状的RF信号)以便施加至AOD系统的一或多个换能器。当施加时,离开AOD系统的雷射脉冲的M2因子可以某种方式改变,该方式导致产生具有对应非高斯空间强度轮廓(例如,矩形“顶帽”空间强度轮廓)的雷射脉冲。

[0320] 关于光点大小变化、光点形状变化、光点能量变化及高度控制补偿的更多细节可在Mar.Unrath等人的美国临时申请案第62/271,446号、第62/216,102号及第62/241,624号中发现,该等案的内容全部以引用方式并入。

[0321] B. 颤化架构

[0322] 1. 基本颤化(或光栅)表架构

[0323] 图11为表示根据一实施例的在FPGA1028中实行的AOD控制资料流的方块图。应注意,颤化及光栅经常可互换使用。类似地执行颤化及光栅;然而,颤化是指一维射束偏转,而光栅化是指二维偏转。FPGA 1028包括一或多个颤化表1110,整形表1112,线性化表1114、1115,及潜时调整1116。

[0324] 两组颤化点载入于颤化表1110中。颤化表1110作为可无限地定址的循环缓冲器来操作。许多颤化表1110储存于FPGA 1028中。每个颤化表1110藉由位址及长度来识别。FPGA 1028自动调整循环缓冲器定址以适应指定表长度。

[0325] 在光栅或颤化操作期间,藉由变换矩阵读取并调节颤化表条目以定标并旋转颤化(或光栅)图案,由此产生发至两个AOD通道的频率命令。

[0326] 将一对额外频率偏移添加至经变换的颤化命令,从而提供标称命令向量,关于该向量施加颤化命令。

[0327] 该组线性化表1114、1115基于AOD频率命令来产生AOD振幅命令。

[0328] 以下定义亦针对图11来提供。

[0329] F0:AOD频率命令,轴0。

[0330] F1:AOD频率命令,轴1。

[0331] Fnom:零度偏转的标称AOD频率命令。

[0332] Fd[1..Nd]:一组偏转频率,其包含如上所述的“颤化表”1110。

[0333] Nd:偏转频率点的数目(例如,颤化点的数目)。

[0334] Kw:颤化宽度定标因子。Kw=0代表没有颤化(标称处理射束)。

[0335] Kp:功率命令尺度因子。

[0336] Ks:强度整形因子。

[0337] Atten:衰减命令。

[0338] 2. FPGA介面

[0339] 每次Tcmd更新(例如,1 μ sec),自DSP 1026传输资料至FPGA 1028。

[0340] 3. DSP/FPGA同步化

[0341] 在处理期间,DSP 1026将资料连续地串流传输至FPGA 1028,并且FPGA 1028同步化其资料传输与AOD控制执行。此可使用以下序列来进行,假定为1 μ sec的示例性更新时间

(Tcmd)。图12例示此时序。

[0342] 图12为例示根据一实施例的DSP与FPGA的示例性同步的时序图。如图12中示出，DSP 1026将十组控制资料(足够用于两个5 μ sec DSP循环)写入1210至FPGA 1028。DSP 1026在FPGA 1028中设定1212“Synch”暂存器以通知其资料准备好用于处理。FPGA 1028在下一个5 μ sec DSP中断1216处开始资料处理1214，如藉由虚线1218指示。(FPGA1028及DSP 1026接收同一中断)。在每个DSP循环期间，DSP 1026将新资料载入1220至FPGA 1028。FPGA 1028基于先进先出(FIFO)来处理此资料。电流计命令资料是在每个DSP循环期间计算出，但是在下一个DSP循环处施加至电流计控制器。因此，电流计1066、1067及AOD 1020、1022共用同一时序参考。DSP 1026使AOD命令资料相对于电流计命令资料延迟，以便考虑到电流计与AOD控制之间的各种信号处理延迟。此延迟并入针对最初资料传输(在1210处示出)与开始FPGA1028的资料执行(在1214处示出)之间的两个循环延迟的调整。

[0343] 4. 内倾参数

[0344] 图11未展示的一个参数是“内倾”参数(Kb)，其可包括于LDA系统颤化定义中。此参数用来改变跨颤化射束的宽度所施加的功率以考虑到弧形的内部边缘与外部边缘之间的速度差异(如同内倾的跑道转弯)。此举藉由向随着颤化位置而变化的颤化振幅施加额外定标因子来进行，类似于在某些实施例中所使用的“形状”参数。

[0345] 图13为例示根据一实施例的使用内倾的处理状况的示意图。图13例示较宽弧形1310。较宽弧形1310包括相对较小平均半径R，其内部弧长Ri与外部弧长Ro的比率可显著不同于1，从而导致跨沟槽宽度W的通量变化。

[0346] 将平均半径R与特征宽度W的比率定义为内倾比率

[0347] $R_b = R/W$ 。

[0348] 则外部速度与内部速度的比率为

[0349] $V_o/V_i = (2*R_b+1) / (2*R_b-1)$ 。

[0350] 为了调整跨颤化宽度的雷射功率，“内倾参数”Kb定义随着颤化位置而变化的功率定标的变化。图14图形地例示根据一实施例的示例性内倾参数定标。内倾参数Kb在-1与+1之间变化，并且可定义为

[0351] $K_b = (K_{start} - K_{end}) / 2$ ，

[0352] 其中

[0353] K_{start} = 在颤化循环开始时的内倾振幅定标，并且

[0354] K_{end} = 在颤化循环结束时的内倾振幅定标。

[0355] 内倾参数藉由以下关系与内倾比率相关

[0356] $K_b = 1 / (2*R_b)$ 。

[0357] 对于 $K_b = 0$ ，定标因子在颤化范围内为1(没有影响)。在极端($|K_b| = 1$)处，颤化范围的一个末端按比例缩小至零并且另一个末端放大2x。当处理典型弧形时，Kb可设定为中间值(例如，小于约0.5)。

[0358] 颤化范围的中心(亦即，颤化射束的中心线)处的内倾定标不受影响。因此中心线功率(P_{nom})保持不变，而内部边缘功率衰减(以补偿较低射束速度)并且外部边缘功率(P_{outer})放大(以补偿较高射束速度)：

[0359] $P_{outer} = P_{nom} * (1 + K_b)$ 。

[0360] 在某些实施例中，LDA设计规则阐明比率R/W应限于大于约2.0以便保持合理的速度比率及功率定标。在处理期间，检查放大的功率以证实其不超过最大可用功率。设定弧形中的速度以确保放大的功率不超过最大可用功率。由于三级剖析能力，此速度降低可在弧形段的末端处即时发生。

[0361] 5. 示例性颤化操作

[0362] 在图15、16及17中，简单实例例示颤化的时序及命令更新。图15图形地例示根据示例性颤化操作的示例性XY射束位置。图16图形地例示根据图15示出的示例性颤化操作的示例性X及Y射束位置对时间。图17例示图15及16示出的示例性颤化操作的示例性射束位置及过程参数的表。在此实例中， $T_{aod} = T_{cmd} = 1\mu\text{sec}$ 。使用一个颤化表 ($N_d = 5, T_d = 5\mu\text{sec}$) 来切割初始沟槽。在切割开始时改变剂量 (K_d)。在弧形期间修改内倾参数 (K_b) 以使在曲线的内部及外部边缘上的通量标准化。

[0363] 在此实例中，沟槽包括沟槽宽度开始增加的过渡段1510。在此实例中，过渡段1510包括第十三及第十四颤化列。然而，在其他实施例中，可使用不同数目个颤化列（例如，过渡区中可使用四个、五个、六个或更多个颤化列）。最初（例如，在第十三列开始）将较大颤化表 ($N_d = 7$) 压缩 ($K_w < 1$) 以匹配先前段。然后， K_w 在两个颤化列内增加，一直到 $K_w = 1$ （全部宽度）。换言之，如图17中示出，在第十三颤化列中 $K_w = 0.76$ ，在第十四颤化列中 $K_w = 0.87$ ，并且在第十五颤化列中 $K_w = 1$ 。

[0364] 随着宽度参数变化，亦修改剂量 (K_d)。当压缩颤化间隔时（例如，新颤化表的开头在第十三颤化列开始），剂量减少以便考虑到较大脉冲重叠。换言之，在 $N_d = 7$ 的过渡段1510之外， $K_d = 1.4$ 。然而，在过渡段内（其中颤化表首先自 $N_d = 5$ 变化至 $N_d = 7$ ）， K_d 在第十三颤化列中减少至1.06。然后， K_d 在第十四颤化列中增加至1.22，然后在第十五颤化列中再次增加至1.4。

[0365] 形状在此实例中保持恒定，但是通常其可能以类似于 K_d 、 K_w 及 K_b 的方式变化。对于一实施例中的LDA系统，将形状忽略。

[0366] 注意，对于每个颤化列，过程参数 (K_w 、 K_d 、 K_b 及 K_s) 及颤化表选择 (N_d) 保持恒定。如较早指出，FPGA1028强制实施此参数更新时序；DSP 1026可提供所有过程参数的定期更新并且在适当时允许FPGA1028应用过程参数。

[0367] C. AOD坐标框架及校准

[0368] AOD射束偏转与电流计射束偏转协作来起作用以便产生最后工作面射束位置。AOD偏转的校准，及其在三级定位、颤化及光栅化期间与电流计射束偏转的相互作用适用于保持局部重复性（例如，以便支援相交处形成），并且控制颤化及光栅化特征尺寸。

[0369] 在一实施例中，在处理射束进入扫描透镜1056之前，AOD子系统1042及电流计反射镜1066、1067各自使处理射束角度偏转。将任何AOD射束角度偏转添加至电流计1066、1067的射束角度偏转，并且因此AOD偏转命令可被视为等效于电流计“原始”命令，其为“射束角度”坐标。AOD偏转命令可被视为添加至电流计1066、1067的“射束角度”命令的“射束角度”命令。在某些实施例中，仅在定标并旋转AOD射束偏转坐标框架以匹配电流计坐标框架（如藉由图38所描述）之后，此才可为真实的，因为光学器件串布局可在此等两个轴之间产生旋转，并且AOD偏转器1020、1022具有独特的尺度因子。

[0370] 存在由于虚拟AOD偏转枢轴点自电流计反射镜1066、1067位移而导致的二阶效应。

当AOD 1020、1022偏转射束时,横向射束位置在透镜入射光瞳内稍微偏移,从而产生较小额外失真。预期为亚微米的此误差在某些实施例中可忽略。

[0371] 在考虑三级剖析、颤化及光栅操作时,藉由AOD 1020、1022施加的此“渐增角度”概念是有用的,说明为了满足系统效能目标,需要进行所需的校准及运行时间校正。

[0372] 1. AOD变换

[0373] 在某些实施例中,经由AOD处理类型所特有的坐标变换来得出发至AOD子系统1042的命令信号。以下论述涉及若干坐标系统。“理想”坐标是经校准的工作面坐标。此等坐标可藉由XY级段的玻璃网格校准来界定。用语“所要”或“标称”可在本文中代替“理想”来使用。“原始电流计”坐标用来命令电流计伺服回路。“原始AOD”坐标用来命令AOD通道。

[0374] 在本文中提及以下变换:TMframe、TMfield、TMdither及TMaod。TMframe将原始电流计坐标变换成原始AOD坐标。藉由将TMframe应用于一组渐增原始电流计坐标(围绕标称电流计位置偏离)所形成的AOD命令产生AOD射束偏转,其与围绕此标称位置的渐增电流计偏转在光学上相同。因此,在将TMframe应用于原始电流计命令之后,AOD变成“虚拟电流计”。此变换对于给定光学器件布局是固定的,并且不随着玻璃网格校准而变化。经由AOD位置校准常式来计算此变换。

[0375] TMfield是局部扫描场失真变换。其将一组渐增理想(或所要)坐标(围绕扫描场中的某一标称位置偏离)变换成渐增原始电流计坐标。使用“正向”(理想至原始电流计)及“反向”(原始电流计至理想)。此变换随着扫描场位置而变化。其随着玻璃网格校准而变化,因为此校准界定理想坐标框架。TMfield可自电流计校准资料计算出。

[0376] TMdither为自SCC 1010传递至DSP 1026的一组变换项,其用于在向量处理期间计算TMaod。TMdither是由SCC 1010针对每个向量或刮削处理段来计算,并且随着扫描场位置及射束速度而变化。

[0377] TMaod系FPGA 1028内部旋转并定标储存于颤化/光栅表中的理想AOD资料的变换。在向量或刮削处理中,此保持理想颤化向量垂直于理想轨迹向量。在光栅处理中,此定标并对准相交处处理或一般光栅图案形成所需要的二维光栅资料。在向量或刮削处理期间,此变换是由DSP基于射束轨迹速度向量及TMdither变换来即时计算。TMaod变换由SCC 1010在光栅处理期间计算一次。

[0378] 2. 扫描透镜场失真

[0379] 关于坐标框架及校准方程的问题来源于由扫描透镜1056及电流计反射镜射束递送系统所产生的场失真。在理想扫描透镜中,使入射射束的角度偏转以产生工作面处的光点位移。对于较好设计的远心扫描透镜(“F- θ ”透镜),若射束围绕透镜入射光瞳的中心枢转,则光点位移与射束角度成比例,并且不需要校准。然而,将电流计反射镜1066、1067封装于入射光瞳处的实体限制条件阻止射束精确地围绕理想点枢转;一些射束平移在射束偏转期间发生。此产生扫描场失真图案,如图18中示出。

[0380] 图18图形地例示示例性实施例中的扫描场失真图案,其中LDA系统包括F/18 100mm扫描场透镜。在典型雷射处理系统中,对此失真图案进行映射以使得校正项可应用于射束定位器,由此产生工作面处的(标称)无失真图案。此校准变换的输出是射束定位器的“原始”坐标框架中的命令,其等效于在电流计1066、1067的情况下的反射镜角度命令。在LDA电流计控制器子系统内,施加标称尺度因子(例如,2*透镜焦距),从而产生以工作面 μm

为单位的原始命令。在使用FSM定位系统的实施例中,与电流计的失真相比,定位于扫描场透镜的入射光瞳处的FSM将具有相对极少失真要加以校正。

[0381] 注意,在系统上量测的实际场失真是光学器件串(电流计区块+扫描透镜)中的几何失真与电流计定位器误差(偏移、尺度因子、非线性)的组合。光学器件场失真项为电流计偏转及AOD偏转所共有的,并且可施加相同校正项。然而,电流计1066、1067本身中的任何校准误差(角度相依性线性误差及尺度因子(SF)漂移)亦包括于扫描场校准项中,并且在应用于AOD偏转时产生校准误差。然而,在尺度因子(SF)非线性误差及温度漂移 $<0.1\%$ 的情况下,此电流计误差较小,其可导致对于 $100\mu\text{m}$ 的三级AOD偏转,在电流计偏转与AOD偏转之间的不匹配为 $<0.1\mu\text{m}$ 。然而,电流计1066、1067上的标称尺度因子容限可较大(例如,20%),其影响校准程序,如下所述。

[0382] 扫描场失真图案产生随着扫描场位置而变化的局部失真。举例而言,图19图形地例示根据示例性实施例的X及Y扫描场失真误差(err)对X及Y场位置。图20图形地例示根据图19示出的示例性实施例的X及Y扫描场失真尺度因子(SF)及旋转误差对X及Y场位置。图21图形地例示根据图19及20示出的实例的光栅化特征的示例性局部位置几何校正(PGC)失真。随着XY场位置而变化的X及Y误差的斜率可作为局部尺度因子及旋转误差来处理,例如,PGC失真项。若此等误差足够大,则局部PGC失真可在光栅图案中产生不可接受的误差。举例而言,考虑定位于 $(-50\text{mm}, -50\text{mm})$ 场位置中的 $200\times 200\mu\text{m}$ 光栅图案。局部PGC失真(自图20获取)将产生图21示出的失真图案。归因于较大旋转误差,X误差在图案隅角处达到 $5\mu\text{m}$,其可足够大以在相交处形成中产生不可接受的深度变化。

[0383] 扫描场失真图案以至少三种方式影响LDA射束定位器:在所有模式期间,当三级剖析界定AOD及电流计命令来产生标称射束轨迹时;在向量或刮削模式期间,当定标并旋转AOD颤化命令时;以及在光栅模式期间,当潜在较大光栅区域可能失真时。

[0384] 3. 在三级剖析期间的AOD校准校正

[0385] 图22示意性地例示根据一实施例的三级剖析子系统2200。在三级剖析中,在电流计子系统1044与AOD子系统1042之间划分射束定位。三级剖析是指使用AOD子系统1042作为三级定位器(例如,除了XY级段及电流计子系统1044之外)。示例性雷射射束三级定位器描述于美国专利第6,706,999号中,该案让渡给本揭示案的受让人,并且全部以引用形式并入本文中。如本文所揭示的使用AOD子系统1042的三级剖析允许高速剖析射束路径(例如,使用约 $1\mu\text{s}$ 的更新来提供时序解析度),其中在离散时序边界上发出AOD命令。三级剖析子系统2200包括剖析滤波器2204、延迟元件2206及减法器2208。

[0386] 图22例示对应于需要在工件中切割出的沟槽的示例性射束轮廓2210(亦可在本文中称为示例性“射束命令”)。示例性射束轮廓2210包括可能难以使用电流计子系统1044来高速追踪的急转弯。在通过扫描场校准变换2203之后,将示例性射束轮廓2210提供至三级滤波器2205,三级滤波器2205包括剖析滤波器2204及延迟元件2206。剖析滤波器2204包含低通滤波器,其过滤掉电流计子系统1044可能难以追踪的高频内容。剖析滤波器2204的输出可用作电流计命令(电流计控制信号),如位置轮廓2212所示出。图22例示位置轮廓2212的放大部分2213,放大部分2213示出相对于藉由电流计子系统1044提供的实际位置2218的所命令位置2216。AOD子系统1042用来校正所命令位置2216与实际位置2218之间的差异。

[0387] 在一实施例中,剖析滤波器2204包含无限脉冲回应(IIR)滤波器。在另一实施例

中,剖析滤波器2204包含有限脉冲回应(FIR)滤波器。对于任何频率范围中的信号,FIR滤波器自然地具有恒定延迟。然而,本领域的技术人员自本文中的揭示内容将认识到亦可使用其他类型的滤波器。延迟元件2206延迟示例性射束轮廓2210,延迟的量与藉由剖析滤波器2204引入的延迟量大约相同。减法器2208自延迟元件2206的输出减去剖析滤波器2204的输出以获得自电流计命令移除的高频内容。然后,藉由减法器2208输出的高频内容可用作控制AOD子系统1042的AOD命令信号。图22例示示例性AOD位置命令轮廓2214。虽然未展示,但是可在位置命令轮廓2214上使用差异来计算对应的速度及加速度命令轮廓。

[0388] 示例性射束命令2210是在应用面板对准变换之后,工作面上的射束在“所要”坐标中的所要轨迹。如以上所论述,将示例性射束轮廓2210提供(作为所命令射束位置信号)至扫描场校准变换2203。将资料滤波以将轨迹划分成低频及高频分量,从而允许AOD子系统1042追踪高频、低振幅命令,并且将频宽有限的、较大振幅命令传递至电流计子系统1044。应用扫描场校准变换2203产生“原始电流计”坐标。由于此发生在藉由三级滤波器2205划分命令之前,因此三级滤波器2205的输出为电流计分量及AOD分量,其中每一者在相同原始电流计坐标中。

[0389] 若将AOD子系统1042校准以使射束在原始电流计坐标框架中偏转,则对于AOD三级位移不需要进一步扫描场校准变换。此为有用的,因为其意味着不需要局部AOD场失真校正。换言之,在应用扫描场校准变换2203时,已经考虑到扫描场失真效应。

[0390] 此方法的另一个解释为,三级剖析滤波器使电流计命令在原始电流计坐标中自所要命令发生位移。AOD子系统1042仅提供补偿位移来补足此电流计射束角度位移。

[0391] 然后,将“原始电流计”坐标中的AOD命令输出变换(定标及旋转)以产生“原始AOD”偏转命令。此变换被称为“TMtert”变换。

[0392] 至少出于两个原因,TMtert变换保持与用来修改颤化的TMaod变换(在图11中示出)分离。首先,TMtert内部的定标不能在颤化期间使用,因为其对于AOD及电流计SF进行校正,并且由此不适用于与电流计运动无关的颤化过程。其次,TMtert中的旋转项为固定的并且与速度向量角度无关,与随着轨迹角度而变化的TMaod颤化变换(在FPGA 1028内部应用)形成对照。因此,在将AOD轨迹资料传输至FPGA 1028之前,将TMtert变换应用于AOD轨迹资料,并且此资料不再受TMaod影响。

[0393] 将TMtert变换应用于“原始电流计”坐标亦提供将AOD误差校正项添加至三级AOD资料的机会。此为便利的,因为电流计控制器误差(其经滤波以产生AOD误差校正资料)是在原始电流计坐标中。

[0394] 在图51中概述所得校准资料流。

[0395] 以上论述仅适用于处理供应至三级滤波器演算法的射束中心轨迹位置。对于颤化及光栅化的校准作用稍有不同,如下所述。

[0396] 4. 光栅图案化期间的AOD校准校正

[0397] 如以上提及,局部扫描场PGC失真可足够大以致于需要对于随着场位置而变化的光栅图案进行局部校准校正。注意,此情况不同于上述三级剖析的情况,因为AOD偏转并非代替预补偿的电流计偏转来执行(其意味着预补偿AOD偏转命令);实情为,仅光栅图案的中心点针对场失真加以补偿。未补偿用来处理光栅图案的AOD偏转。

[0398] 自扫描场校准变换得出局部PGC校正,并且在光栅处理期间或之前可将其自SCC

1010传输至DSP 1026。局部PGC变换与颤化角度的其他AOD变换及AOD坐标框架旋转组合,如稍后在“向量处理概述”下描述。

[0399] 5. 颤化期间的AOD校准校正

[0400] 在颤化的情况下,AOD场的局部PGC失真可影响颤化向量的宽度及旋转。由于跨沟槽的宽度来颤化射束,横轴(“旋转”)失真误差分量在同轴方向上(沿着沟槽)产生偏转,并且对于宽度具有可忽略的影响(例如,余弦误差 $<0.2\%$)。横轴中的PGC定标误差直接影响沟槽宽度,程度为约2%至约3%。

[0401] 然而,非常宽的沟槽可使其端点因旋转失真而偏移,如在较大光栅图案中。由于此可影响较宽沟槽的相交处,因此PGC校正适合于颤化。每个处理段,将失真项自SCC 1010传输至DSP 1026,并且可藉由八个(8)位元来表示,在藉由1/1024定标之后提供12.5%的误差范围及0.1%的解析度。

[0402] 6. AOD校准程序

[0403] 图23示意性地例示根据一实施例的AOD校准图案。以下程序相对于电流计框架2312及AOD尺度因子来校准AOD框架旋转2310。在扫描场的中心附近执行用于TMtert变换的校准,其中扫描场失真可忽略。注意,对于颤化及光栅化,电流计框架2312的旋转可能不造成问题。只要AOD框架2310正交并且与电流计框架2312对准,则颤化及光栅正确地对准,因为此等操作是相对于电流计框架2312。

[0404] 程序包括将TMtert变换设定成预设值(单位矩阵*标称SF),并且将X级段移动至其行程中心。然后,给FPGA 1028载入四个十字丝光栅图案2314。出于论述目的,图23示出十字丝光栅图案中的一者2318的放大(且旋转)后的型式2316。每个图案包括中心十字丝2320(零AOD位移),及在AOD轴(+ch0、-ch0、+ch1、-ch1)中的一者中位移的十字丝2322。注意,此等位移在原始AOD坐标框架(ch0,1)中,而非工件或电流计框架(XY)中。程序包括用处理光点大小来定标四个十字丝校准图案2314的群组及/或每个个别图案2318,该光点大小可取决于系统设置而变化。处理光点大小是系统组态参数。

[0405] 程序亦包括在以扫描场中心为中心的网格图案中切割四个图案2314中的每一者。对于每个图案,将电流计移动至图案的相应位置,并且在光栅化之前安定(例如,历时1ms)。在示例性实施例中,所有图案可落在距扫描场中心的1mm正方形内。程序重复以下步骤:将四个图案2314中的每一者切割预定次数,移动Y线性级段以使图案位移。举例而言,如图23中示出,可将四个图案2314可切割十次(或另一预定次数,取决于特定实施例)。程序包括收集资料以将位移后的AOD十字丝2322相对于其对应的零位移十字丝2320来定位。然后,程序将(例如,十个)资料集平均化,并且计算AOD尺度因子(AOD MHz/微米)及相对于电流计坐标框架2312的旋转。注意,四个中心十字丝(零AOD位移)提供关于电流计旋转的资讯。应相对于电流计轴的角度来计算AOD轴的旋转。程序亦可包括证实电流计图案旋转小于约1%,来作为对光学设置的检查。

[0406] i. 尺度因子分离及TMtert形成

[0407] AOD校准程序产生两个尺度因子(SF):

[0408] $\text{MHzPerRaw}\mu\text{m}: [\text{AOD MHz}] / [\text{原始电流计}\mu\text{m}]$,

[0409] $\text{MHzPer}\mu\text{m}: [\text{AOD MHz}] / [\mu\text{m}]$ 。

[0410] 具有X及Y分量的第一SF (MHzPerRaw μm) 组成TMtert变换中的定标项。如以上所解

释,三级剖析产生原始电流计坐标中的AOD命令以便在三级定位期间与电流计子系统1044协调。因此,此SF表示AOD SF项与电流计SF项的组合。

[0411] 在资料下载至FPGA 1028之前,第二AOD SF (MHzPer μm) 将SCC颤化(或光栅)表资料(以XY工作面 μm 为单位来指定)转换成AOD单位 (MHz)。

[0412] AOD校准的结果产生MHzPer μm 。为了产生MHzPerRaw μm ,应用在电流计校准中所嵌入的电流计尺度因子资料。电流计SF项 (Raw μm Per μm =[原始电流计 μm]/[μm]) 可自电流计校准资料的XY尺度因子提取,该等因子是在场失真可以忽略的扫描场的中心处评估。然后,对于XY分量中的每一者:

[0413] $\text{MHzPerRaw}\mu\text{m}[X, Y] = \text{MHzPer}\mu\text{m} / \text{Raw}\mu\text{mPer}\mu\text{m}[X, Y]$ 。

[0414] 为了形成TMtert变换,将AOD框架相对于电流计框架的旋转与以上判定的尺度因子组合。归因于AOD 1020、1022及安装中的机械容限,AOD框架旋转可为非正交的;因而包括两个单独的旋转项。图24图形地例示根据某些实施例的AOD校准角。AOD框架的旋转变换(TMframe)可定义为

$$[0415] \quad \text{TMframe} = \begin{bmatrix} K0 * \cos(\text{ThetaAod0}) & -K1 * \sin(\text{ThetaAod1}) \\ K0 * \sin(\text{ThetaAod0}) & K1 * \cos(\text{ThetaAod1}) \end{bmatrix}^{-1},$$

$$[0416] \quad \text{TMframe} = \begin{bmatrix} \cos(\text{ThetaAod1})/K0 & \sin(\text{ThetaAod1})/K0 \\ -\sin(\text{ThetaAod0})/K1 & \cos(\text{ThetaAod0})/K1 \end{bmatrix} / \cos(\text{ThetaAod0} - \text{ThetaAod1}),$$

[0417] 其中

[0418] ThetaAod0=ch0与X电流计轴之间的角度,

[0419] ThetaAod1=ch1与Y电流计轴之间的角度,

[0420] K0=AOD ch0的量值定标对工作面($\mu\text{mAOD0}/\mu\text{m}$),并且

[0421] K1=AOD ch1的量值定标对工作面($\mu\text{mAOD1}/\mu\text{m}$)。

[0422] 如图24中例示。

[0423] 在图24中,角度及定标是在扫描场的中心处评估。TMframe意图将AOD坐标框架与电流计坐标框架对准。TMfield变换对于扫描场失真及标称电流计对准进行校正,包括电流计轴的任何正负号翻转。为了避免混淆,在某些实施例中,AOD轴中的任何正负号翻转由旋转角度(额外180°旋转)引起,而非由K0/1定标因子引起。K0及K1不包括MHzPer μm 定标因子。此定标是在载入颤化(或光栅)表时应用,或(对于剖析)包括于TMtert变换中。实情为,K0及K1表示在应用标称MHzPer μm 尺度因子之后,AOD0与AOD1之间可能的定标变化。在某些实施例中,K0及K1预期等于1.0。

[0424] 然后TMtert(在三级剖析期间应用的变换)藉由下式给出

$$[0425] \quad \text{TMtert} = \text{TMframe} * \begin{bmatrix} [\text{MHzPerRawUmX}] & 0 \\ 0 & [\text{MHzPerRawUmY}] \end{bmatrix}。$$

[0426] 在此,MHzPerRaw $\mu\text{m}[X, Y]$ 定标项应包括仅量值定标;正负号在TMframe的旋转项中考虑到。

[0427] TMtert在运行时间计算中使用,应用于来自三级滤波器的AOD命令输出:

$$[0428] \quad \begin{bmatrix} \text{AODch0} \\ \text{AODch1} \end{bmatrix} = \text{TMtert} * \begin{bmatrix} \text{AODx} \\ \text{AODy} \end{bmatrix}。$$

[0429] 注意, TM_{tert} 的定义意味着尺度因子校正, 后续接着旋转。因此, 在评估AOD校准资料时, 首先应用 TM_{frame} 变换来将AOD资料旋转成与电流计框架对准, 然后评估AOD偏转来计算 $MHzPerRaw\mu m[X, Y]$ 。

[0430] D. 功率控制

[0431] 在LDA系统中使用功率控制来在颤化期间且在速度变化期间保持一致的雷射功率。功率控制包括AOD功率衰减的线性化, 及将线性化AOD功率控制校准至工作面功率。

[0432] 1. AOD功率线性化

[0433] 图25为例示根据一实施例的功率控制的信号流的方块图。使用两个线性化表 2510、2512来产生 $ch1$ RF信号振幅命令 2514来将随着所施加RF信号频率而变化的光学输出功率及所要光学输出功率线性化。

[0434] 对于两个AOD单元 1020、1022 ($ch0$ 及 $ch1$) 中的每一者, 将颤化(例如, $Dither0$ 或 $Dither1$) 添加至频率偏差(射束轨迹) 命令 ($Fdev0$ 或 $Fdev1$) 及标称中心频率 ($Fctr0$ 或 $Fctr1$) 以产生总频率命令 ($RfFreq0$ 或 $RfFreq1$)。 $ch0$ 频率命令 $RfFreq0$ 编入 $ch0$ 线性化表 2510中, 产生 $Pscale0$ 功率定标命令。 $Pscale0$ 功率定标命令表示光学输出功率定标因子, 其用于保持随着频率而线性变化的 $ch0$ 光学输出功率。线性化表 2510 仅为 $ch0$ 频率的一维函数。

[0435] 将 $Pscale0$ 乘以系统功率命令尺度因子 Kp (藉由 DSP 1026 命令), 产生总功率尺度因子 $Pscale$ 。此命令与 $ch1$ 频率命令 $RfFreq1$ 一起编入二维查找表 2512 中以产生 $RfAmpCmd$ 2514 ($ch1$ RF信号振幅命令)。注意, $ch0$ 的 RF 信号振幅保持恒定。换言之, 在此示例性实施例中, 所有输出功率控制是经由 $ch1$ 的 RF 信号振幅调变来执行。

[0436] i. 线性化表

[0437] AOD 1020、1022 藉由改变施加至 AOD 单元的 RF 信号功率位准来控制光学功率。图 26 图形地例示根据一实施例的示例性功率控制曲线(标准化光学输出功率对标准化 RF 信号功率)。注意, 图 26 例示由 RF 振幅命令产生的光学功率输出。

[0438] 在某些实施例中, 映射图 26 示出的非线性曲线来产生查找表, 该查找表将所要标准化输出功率(自 0 至 1, 1 是最大输出功率) 转换成达成此输出所需要的 AOD RF 信号功率。此可被视为图 26 的 X 及 Y 轴的翻转: 在给定所要光学功率的情况下, 判定所需 RF 振幅命令。

[0439] 所得线性化曲线在图 27 中示出。图 27 图形地例示根据一实施例的示例性 $ch1$ AOD 功率线性化曲线集。注意, 图 26 示出的功率控制曲线表示单一 RF 信号频率下的 AOD 行为。实际上, 此曲线随着施加至 AOD 单元 1020、1022 的 RF 信号频率而变化。因此, 在 AOD 子系统 1042 的操作频率范围内, 针对若干 RF 信号频率重复非线性映射。图 27 示出线性化曲线集。

[0440] $ch1$ 线性化表产生了产生所请求光学输出功率定标所需要的 RF 振幅命令。RF 信号振幅输出影响光学输出功率, 但是不直接设定输出功率。

[0441] 与 $ch1$ 表相反, $ch0$ 表产生 $Pscale0$ 功率尺度因子(而非 RF 振幅命令)。 $Pscale0$ 对随着 $ch0$ RF 信号频率而变化的 $ch0$ 回应进行线性化。 $ch0$ RF 信号振幅保持恒定并且不用于线性化表中。图 28 例示根据一实施例的 $ch0$ AOD 的示例性曲线。图 28 示出 $ch0$ 光学效率的变化对 RF 信号频率(左侧绘图), 从而导致线性化的所需功率定标(右侧绘图)。

[0442] 如图 28 中示出, AOD 1020、1022 藉由减少随着频率而变化的振幅命令来在其频率范围内加以线性化, 以使得任何频率下的输出功率等于最低效率频率下的功率。因此, 线性

化减少了AOD子系统1042的有效光学效率,并且AOD 1020、1022的操作频率范围对于子系统的光学效率有影响。

[0443] ii. 高功率模式:效率增益

[0444] 在等于ch0及ch1中的最坏情况光学效率的乘积的降低光学效率下,上述功率线性化程序可在整个操作RF信号频率范围内提供完全功率线性化的AOD子系统1042。AOD子系统1042可在此模式下保守操作,其中功率得以适当地线性化并且没有RF振幅命令饱和。

[0445] 然而,显著的光学效率增益可藉由计算随着ch0及ch1RF信号频率范围(或,等同地,AOD XY偏转范围)而变化的实际AOD子系统1042光学效率来实现。此允许AOD子系统1042在较高功率位准下、在比全功率校准范围窄的范围内操作,而不会使RF振幅命令饱和,因为较高光学效率需要较低RF振幅命令。或,等同地,此方法允许AOD 1020、1022在比正常范围大得多的频率范围内进行功率校准以适应较大光栅场或非常宽的沟槽,而不影响更典型的较小偏转范围中的正常操作。

[0446] 在一实施例中,光学效率增益藉由以下操作来计算:判定在选定频率范围(对于ch0及ch1)内的最小效率,藉由将两个最坏情况值相乘来计算最坏情况效率,以及针对若干可能频率范围进行重复。此程序产生效率增益对频率范围的保守曲线,其适合于一般用途以及光栅化时。在考虑向量处理时,进一步改良是可能的,其中在颤化与AOD瞬态之间划分AOD偏转。在AOD坐标框架中,颤化沿着具有某一角旋转的线来产生AOD偏转。在ch0及ch1偏转器中使用的实际AOD范围取决于颤化角度(如sin及cos函数)。任一个轴都不同时经历完全偏转。因此,总效率可高于以上产生的保守估计。

[0447] 然而,在颤化期间亦可考虑到AOD瞬态偏移。此等AOD瞬态偏移可发生在任一个轴中,取决于射束轨迹。

[0448] 图29及图30为例示效率增益计算的结果的图表。图29为例示根据某些实施例的示例性AOD效率曲线的图表。图30为例示根据某些实施例的示例性AOD效率增益的图表。举例而言,图29示出两个AOD单元1020、1022(ch0及ch1)的效率,而图30示出针对光栅及向量模式的相对于完全线性化、不饱和效率的效率增益。

[0449] 2. AOD工作面功率校准

[0450] 在以上线性化程序完成之后,将线性化表载入至FPGA 1028AOD控制器中。然后,发送至FPGA 1028的标准化功率命令(K_p ,在0至1范围内)产生光学功率输出,其可为所命令功率振幅的线性函数,并且与施加至AOD 1020、1022的RF频率命令无关。在某些实施例中,线性化表量化及校准不确定性产生约1%与约2%之间的残余线性误差。

[0451] 然而,在某些实施例中,线性化功率输出的定标是任意的。在最后的功率校准步骤中,将标准化雷射功率命令设定为0与1之间的若干值,同时夹头功率计(CPM)量测所得工作面功率。线性拟合判定CPM偏移及尺度因子 K_{pwr} ,其将工作面功率(瓦)转换成在处理期间自DSP 1026发送至FPGA 1028的标准化功率命令 K_p 。

[0452] 图31为例示根据一实施例的功率校准资料流3100的方块图。图31示出的功率控制资料流3100亦支援藉由效率增益来实现的高功率模式。此包括FPGA 1028内的x2增益以放大分数 K_p 值,从而允许使用大于1的效率增益。额外FPGA 1028定标因子 K_{pNorm} 将 K_p 命令标准化,以使得 $K_p=0.5$ 表示最大不饱和线性化输出功率,并且大于0.5的值表示可归因于效率增益而在减少的AOD范围内达成的较高功率(而不会饱和)。

[0453] 根据一实施例的用于提供工作面功率校准的方法包括执行AOD功率线性化校准。根据此资料,系统判定PscaleCal(最小ch1效率)。方法进一步包括将线性化表载入FPGA 1028中并且将FPGA 1028尺度因子KpNorm设定为PscaleCal。然后,方法包括将DSP 1026功率尺度因子Kpwr设定为0.5并且发出等于1的功率命令。考虑到内部FPGA 1028定标,对于功率线性化校准范围内的任何Fdev0或Fdev1频率命令,此命令将ch1 Pscale值限制于不超过PscaleCal。此确保可在整个AOD频率范围内获得线性化输出功率而不会饱和。注意,当Pscale0(ch0线性化表的输出)小于1时,Pscale可小于PscaleCal,但是此仅在具有较高光学效率的ch0频率下发生。因此,实际光学输出功率将在名义上在所有Fdev0频率下保持恒定。相同原则亦适用于ch1线性化输出。方法亦包括记录LinPmax,LinPmax为藉由夹头功率计在完全线性化、不饱和功率命令(在先前步骤中设定)的情况下量测的工作面功率。然后,将DSP 1026功率尺度因子Kpwr设定为0.5/LinPmax。此举将DSP 1026功率命令(以瓦为单位)标准化以使得FPGA 1028功率控制产生校准的工作面功率。对于其中效率增益大于1的AOD范围,功率命令(以瓦为单位)现在可能超过LinPmax。在此等情况下,将Pscale0及/或ch1线性化表条目设定为小于1,以使得所得振幅命令保持不饱和。

[0454] 总之,以下资料可储存为校准资料,并且在初始化期间载入至DSP 1026及FPGA 1028:Ch0线性化表;Ch1线性化表;KpNorm;Kpwr;效率增益表;及LinPmax。

[0455] E. 处理速度极限

[0456] 对于沟槽,最大处理段速度是由若干因素判定,该等因素包括:颤化时序(颤化列之间的所需光点大小重叠);归因于三级滤波的AOD动态;可用于处理沟槽的雷射功率;及资料速率极限。

[0457] 1. 颤化速度极限

[0458] 归因于颤化的速度极限是由颤化列之间所使用的重叠导致。在某些实施例中,颤化列之间的最大位置增量是 $0.35 * D_{eff}$ (假定65%重叠来提供安全边限)。因此,用来保持此重叠的速度极限是 $0.35 * D_{eff} / T_d = 0.35 * D_{eff} / (N_d * T_{aod})$ 。

[0459] 在此时间内,针对每个颤化列保持剂量及宽度参数恒定,并且任何变化仅在下一个颤化列开始时发生。由于低阶FPGA 1028控制演算法强制实施此举,因此可对藉由DSP 1026计算出并且传递至FPGA 1028的参数进行线性内插;在适当时间藉由FPGA 1028来更新颤化列参数。

[0460] 通常,以上论述的颤化产生被设计成使得颤化更新并非限制因素,从而允许系统在雷射功率的极限下运行。

[0461] 2. 三级滤波器极限

[0462] 在给定有限的校准AOD场大小的情况下,三级滤波过程对于处理速度强加极限。

[0463] 在三级滤波期间,处理段之间的速度的阶跃变化产生AOD命令中的瞬态回应。举例而言,图32图形地例示根据一实施例的对于速度变化的三级滤波器回应。此回应的量值与速度的阶跃变化成比例,并且衰减时间随着三级滤波器频宽及阻尼比而变化。

[0464] 图32示出使AOD偏移最大化的最坏情况速度轮廓3210,该偏移发生在一个速度变化3210(等于 $2 * V_{max}$)后续接着具有相等量值但是相反正负号的第二速度变化3214时,该第二速度变化的时间在三级滤波器的过冲3216的峰值处(对于3kHz三级滤波器,在速度变化的后约0.12msec)。

[0465] 若AOD瞬态尺度因子定义为“Ktrans”，则对于处理段速度变化 ΔV ，

[0466] $\Delta Aod = Ktrans * \Delta V$ 。

[0467] 对于4阶3kHz三级滤波器，Ktrans的示例性值是 $26.6 \mu\text{m}/(\text{m}/\text{sec})$ 。因此，举例而言，对于具有可产生+2至-2m/sec速度变化的2m/sec处理速度的区段， ΔAod 的界限 = $2 * (2\text{m}/\text{s}) * (26.6 \mu\text{m}/(\text{m}/\text{s})) = 106.4 \mu\text{m}$ 。

[0468] 图33图形地例示根据一实施例的蒙地卡罗AOD瞬态模拟。具有随机时序及随机速度段量值(高达 $\pm V_{\text{max}}$)的随机速度序列3308的简单蒙地卡罗模型确认以上关于图32所论述的情况将AOD偏移3310定界(如图33中示出)。因此三级滤波器回应可靠地预测对于给定雷射处理速度的最坏情况AOD偏移。

[0469] 3. 雷射功率极限

[0470] 雷射功率对于处理速度强加基本极限。对于一阶近似，处理沟槽所需要的剂量(功率/速度 = $W/(\text{m}/\text{sec}) = \text{J}/\text{m}$) 取决于沟槽面积。在示例性实施例中，对于藉由未颤化高斯射束所切割的沟槽，横截面面积为大约 $0.65 * \text{宽度} * \text{Defeff}$ ，其中 Defeff = 有效光点大小。当藉由颤化增加宽度时，总面积为 $D * (0.65 * \text{Defeff} + \text{宽度} - \text{Defeff})$ 。

[0471] 剂量要求的示例性模型为

[0472] 剂量(J/m) = 面积(μm^2) / $143 + 0.3$ 。

[0473] 在校准的LDA系统上，过程图提供剂量的校准值，其中

[0474] 剂量 = 通量 * EffectiveWidth 。

[0475] 由于剂量等于功率/速度，因此所需剂量判定对于给定可利用雷射功率的最大速度。

[0476] 图34图形地例示根据一实施例的对于 $T_{\text{aod}} = T_{\text{cmd}} = 1 \mu\text{sec}$ 的示例性速度极限。图34包括剂量极限的示例性曲线及可变点数目(Npt)极限的示例性曲线。工作面雷射功率极限(对于示例性LDA系统，为大约8W)限制随着宽度而变化的处理速度，如图34中示出。根据某些实施例，所例示的示例性曲线可为乐观的，因为其不包括AOD效率(例如，在最大宽度下，为65-70%)或三级剖析所需的额外AOD偏转的效应。但是，对于雷射限制处理速度的所例示上限形成保守下限，其他速度极限(射束定位器及颤化)超过该下限以避免限制产出量。图34突显以下事实：若颤化表使用最大宽度所需的最大点数目(最大Npt极限)，则较小宽度下的最大速度将不合意地受到限制。

[0477] 实际上，最大工作面功率随着光学串效率而变化，该效率随着AOD范围而变化(归因于AOD效率曲线)。所要沟槽宽度判定 gridWidth (所需颤化偏转)，其判定最大功率位准(归因于AOD功率线性化)。三级AOD偏转亦包括于此计算中，因为其需要额外AOD偏转并且由此降低最大效率。因此，可利用雷射功率随着沟槽宽度而减少并且影响图34中的曲线。

[0478] 随着段速度 V_{seg} 而变化的所需AOD范围藉由下式给出

[0479] $\text{AODrange} = [\text{gridWidth} + 4 * V_{\text{seg}} * Ktrans] * 1.10$ 。

[0480] 此包括归因于以下各者的分量：沟槽的所需 gridWidth (若可变，则为最大 gridWidth)；归因于三级滤波器动态的AOD偏移(经由“Ktrans”尺度因子)(注意，对于段速度 V_{seg} ，最大速度变化为 $2 * V_{\text{seg}}$ ，并且pk-pk AOD偏转范围为 $2 * (2 * V_{\text{seg}}) * Ktrans$)；及10%安全边限，包括扫描场失真及速度相依性颤化角度效应。

[0481] 示例性结果在图35中示出，其图形地例示根据一实施例的AOD行程范围对特征宽

度。图35示出的实例使用2m/sec速度、8W雷射功率及280 μm AOD范围。此模型亦预测可在移动至光栅位置之后在没有安定的情况下处理的最大光栅直径。此可为例如 $<100\mu\text{m}$ ，对于大多数衬垫而言不够大，但是有时足够用于沟槽相交处。较大光栅区域的替代方案是在光栅点处安定由三级滤波器回应定义的一段时间(通常为0.4-0.5msec)。

[0482] 注意，图35不包括AOD范围对于AOD效率的影响。为了并入对处理速度计算的此影响，将计算出的AOD范围与效率曲线(图30)组合来计算随着Vseg而变化的可利用雷射功率。然后，可藉由将可利用雷射功率(基于速度相依性AOD范围)与所需雷射功率(基于剂量)进行比较来判定雷射功率对于处理速度的限制。举例而言，图36图形地例示根据一实施例的雷射功率对于处理速度的限制。在图36示出的实例中，示出50 μm 沟槽，其中处理速度为1.65m/sec。

[0483] i. 弧形处理效果

[0484] 在较宽弧形期间，外部功率放大了 $(1+W/R/2)$ ，其可在弧形中强加较低中心线速度以避免对于外部边缘的功率限制。但是以上模型示出，可适应速度的任何阶跃变化(小于标称速度的两倍)，只要选择标称处理速度来适应最坏情况AOD行程即可。因此较宽弧形可在没有关于AOD行程范围限制的问题的情况下处理。

[0485] 4. 资料速率极限

[0486] 资料流速率限制对于任何处理段的可接受处理时间设定下限(大约7 μsec)。在给出处理段的长度的情况下，此对于段速度设定上限。举例而言，21 μm 段将具有归因于资料速率的3m/sec速度极限。

[0487] 5. 处理速度极限概述

[0488] 在一实施例中，沟槽的处理速度的计算遵循此等步骤。本领域的技术人员自本文中的揭示内容将认识到，某些以下步骤可按不同次序来执行。

[0489] 在第一步骤中，使用过程图基于沟槽尺寸(宽度及深度)来判定通量、gridWidth及EffectiveWidth。

[0490] 在第二步骤中，计算沟槽的剂量=通量*EffectiveWidth。那么，随着处理速度Vseg而变化的所需雷射功率为 $P_{req} = \text{剂量} * V_{seg}$ 。

[0491] 在第三步骤中，计算随着Vseg而变化的所需AOD偏转范围。在给定最大校准AOD范围的情况下，使用此结果来判定归因于AOD行程范围的速度极限(Vaod)。

[0492] 在第四步骤中，使用效率增益曲线(参见“高功率模式”)，计算随着AOD范围而变化的最大可利用雷射功率。

[0493] 在第五步骤中，判定归因于雷射功率的速度极限(Vlaser)：所需雷射功率等于可利用雷射功率时的处理速度。

[0494] 在第六步骤中，判定归因于颤化重叠的速度极限(Vdither)。

[0495] 在第七步骤中，判定归因于最小段时间的速度极限(Vsegtime)。

[0496] 在第八步骤中，将处理速度设定为Vaod、Vlaser、Vdither及Vsegtime中的最小者。

[0497] IV. 处理模式

[0498] 在一实施例中，LDA系统在三种不同模式下处理材料。向量模式处理具有可任意控制的不同宽度及深度的线性迹线。光栅模式处理在一个AOD扫描场内产生任意2D形状的较小特征(例如，为处理光点大小的十倍大)。刮削模式处理任意形状的较大区域，对于周边位

置的精确度及刮削区域内的材料烧蚀深度的一致性具有良好控制。

[0499] A. 向量处理

[0500] 沟槽的向量处理依赖于AOD颤化来控制沟槽宽度。在LDA系统的某些实施例中,举例而言,可存在关于不一致的颤化方法的问题,其中颤化图案在沟槽的起点及终点开始于任意位置,并且具有随着轨迹速度而变化的颤化角度(相对于主要射束轨迹)。

[0501] 为了解决此问题,一个实施例对于每个处理段的整数列施加颤化以便产生均匀、可重复且明确界定的段末端。定制处理段命令来支援此等整数颤化列的时序。

[0502] 整数颤化列的数目支援用来产生相交处的迹线末端过渡区。示例性40-50 μm 过渡允许2-3 μm 的射束定位误差,同时保持5-10%深度容限。对于在LDA系统的一实施例中使用的标称25 μm 有效光点大小,此过渡长度使用4-5个颤化列的剂量过渡。

[0503] 剂量在每个颤化列期间保持恒定以保持迹线末端处的一致宽度。所有剂量控制可基于每个颤化列来应用以在剂量变化期间产生可预测的沟槽宽度变化。

[0504] 在某些实施例中,施加颤化以使得连续光点重叠,重叠的量为>60%的光点直径。亦可足够快地施加颤化以在连续列的间提供>60%重叠。对于较宽沟槽,此可成为问题,归因于所需要的颤化脉冲的较大数目,及对于AOD更新周期的限制条件。

[0505] AOD更新周期受声波跨AOD中的光束的渡越时间的限制。在一实施例中,LDA系统AOD 1020、1022可以>500nsec的更新时间来操作。在快速更新速率下,由于声波中的瞬态所导致的偏转光点的失真变得相当明显;即使在500nsec下,光点失真仍可为问题。光点直径扩大减少了工作面通量,从而导致深度变化。在一实施例中,以比750nsec快的速率来更新AOD 1020、1022,750nsec是声波跨AOD中的4.5mm光束的实际渡越时间。图37图形地例示根据某些实施例的示例性光点失真。自左至右,图37对两个偏转光点在440nsec、640nsec及1240nsec更新周期下的失真进行比较。

[0506] LDA系统的另一个实施例在高得多的射束轨迹速度下操作。较高速度、光点重叠要求及有限AOD更新速率的组合意谓颤化点的数目随着特征宽度而变化。在其他实施例中,使用一个颤化表并且藉由按比例缩放颤化点之间的距离来改变特征大小。

[0507] 1. 颤化参数计算

[0508] 在某些实施例中,以下各项界定颤化参数的计算及设置。

[0509] 输入参数:

[0510] $Deff$:有效光点大小(μm);未颤化沟槽在所求深度下的宽度。注意, $Deff$ 随着光点直径以及所求深度而变化(因为增加深度所需要的剂量增加亦使宽度增加)。

[0511] $BiteSizeRatio$:每个光点的最大偏转,其提供足够重叠以保持平滑的通量分布,表示为光点直径的分数。对于高斯光点, $BiteSizeRatio$ 为 ≤ 0.4 。

[0512] $Taodmin$:最小AOD更新周期(μsec);对于LDA系统的一个实施例,为约400-700nsec。

[0513] $Tclock$:AOD时钟周期(μsec);针对此周期来量化 $Taod$ 。标称为0.04 μsec 。

[0514] 输出参数:

[0515] $Taod$:实际AOD更新周期(μsec)。

[0516] Nd :所要沟槽宽度所需要的颤化点的数目;随着宽度及 $Deff$ 而变化。

[0517] Td :总颤化周期(μsec)= $Nd * Taod$ 。以此速率来更新针对每个颤化列保持恒定的过

程参数(宽度、深度、形状、内倾)。

[0518] Tcmd:对标称射束位置的更新之间的时间周期(μsec)。标称为 $1\mu\text{sec}$ 。

[0519] Ncmd:对过程变数及/或颤化参数(Nd,Taod)的改变之间的Tcmd命令周期的数目。

[0520] 由于可存在可变数目个颤化点,因此可调整AOD更新周期以在Tcmd边界上更新整个列。另外,针对20nsec间隔来量化AOD更新周期。

[0521] 相依性参数的计算以所要特征宽度来开始。藉由下式来粗略地大致估计颤化迹线的宽度

[0522] 宽度= $\text{Deff} + \text{Nd} * \text{Deff} * \text{BiteSizeRatio}$ 。

[0523] 用于所要宽度的颤化点的数目舍进至离散值,并且藉由下式给出

[0524] $\text{Nd} \geq 1 + \text{ceil}((\text{宽度} - \text{Deff}) / (\text{Deff} * \text{BiteSizeRatio}))$,

[0525] 其中“ceil”是舍进至下一个整数的顶函数。

[0526] 归因于舍进,Nd通常可大于所需值,并且BiteSizeRatio可减少以将宽度按比例缩放至所要值(经由Kw参数)。在给出Nd的值的条件下,命令参数藉由下式给出

[0527] $\text{Ncmd} = \text{ceil}(\text{NdTaodmin} / \text{Tcmd})$, 并且

[0528] $\text{Taod} = \text{ceil}(\text{Ncmd} / \text{Nd} * \text{Tcmd} / \text{Tclock}) * \text{Tclock}$ 。

[0529] 举例而言,对于 $\text{Deff} = 25\mu\text{m}$,宽度= $250\mu\text{m}$, $\text{BiteSizeRatio} = 0.4$, $\text{Taod} = 0.5\mu\text{sec}$,并且 $\text{Tcmd} = 1\mu\text{sec}$,

[0530] $\text{Nd} = \text{ceil}((250 - 25) / (25 * 0.4)) = 23$,

[0531] $\text{Ncmd} = \text{ceil}(23 * 0.5 / 1.0) = 13$, 并且

[0532] $\text{Taod} = \text{ceil}(13 / 23 * 1.0 / 0.02) * 0.02 = 0.580\mu\text{sec}$ 。

[0533] 在一实施例中,LDA系统的AOD 1020、1022的最大偏转范围等于 $10 * \text{Deff}$ 。若使用完全AOD范围,则 $\text{Nd} \leq 24$ 。

[0534] 以上方程给出颤化参数的通解。可能更希望保持Taod恒定并且强制实施产生Ncmd的离散值的Nd值。例如,对于 $\text{Tcmd} = 1\mu\text{sec}$,Nd可为2的幂并且 $\text{Taod} = 0.5\mu\text{sec}$,或Nd可为4的幂并且 $\text{Taod} = 0.75\mu\text{sec}$ 。如下一部分中所描述,根据一实施例,AOD频率限制、光学光点品质及以上方程的组合产生使用Taod及Tcmd的 $1\mu\text{sec}$ 周期的LDA系统。

[0535] 2. 标称频率

[0536] 作为相对于一对标称AOD频率($\text{Fnom}0/1$)的频率偏差来施加颤化,该等频率指定标称射束路径(亦即,沟槽的中心线)。 $\text{Fnom}0/1$ 以命令更新速率(每Tcmd秒)来更新,并且由此大体上每个颤化列更新多次。在一实施例中,在不等待颤化列结束的情况下,立即施加 $\text{Fnom}0/1$ 以保持主要射束轨迹中的准确度。此与在每个颤化列中保持恒定的过程参数(宽度、形状、剂量、内倾)的更新形成对比。

[0537] 然而,在某些实施例中, Fnom 更新仅在下一次可利用的AOD更新(每Taod秒)时发生。若 Fnom 更新与AOD更新循环不同步,则其具有等于Taod的有效时序不确定性。另外,若Taod不保持恒定(例如,随着Nd而变化来计算,如上所述),则此抖动的量值变化。

[0538] 由不同步操作引入的不确定性使处理准确度降级,因为随机抖动不能校准除去。例如,对于 $\text{Taod} = 750\text{nsec}$,以 $2\text{m}/\text{sec}$ 来处理的沟槽具有 $\pm 0.75\mu\text{m}$ 的额外定位不确定性。

[0539] 为了避免此误差,Tcmd可为Taod的倍数。假定每个DSP1伺服循环($5\mu\text{sec}$)发送更新至FPGA 1028,在 $\text{Tcmd} = 1\mu\text{sec}$ 的情况下,Taod的自然值为500或1000nsec。另一个选择为

Taod=Tcmd=750nsec,但是此可需要每个伺服循环可变数目个资料封包。

[0540] 如图37中示出,离开AOD的偏转射束的失真在约500nsec下是边际的。为了避免此失真,向量模式处理以Tcmd=Taod=1000nsec来运行。在其他实施例中,AOD设计可允许Taod的较小值(例如,250nsec)。因此,此架构适应Tcmd及Taod的变化。

[0541] 3. 颤化角度校正及量值定标

[0542] 在一实施例中,调整AOD颤化图案的定向以保持其法向(即,垂直)于标称射束轨迹来定向。举例而言,图38示意性地例示根据一实施例的垂直于标称射束轨迹3812对准的颤化列3810。以下使用图38中描述的命名法来描述考虑到由于射束速度所导致的偏斜的过程。每个雷射光点位置3814(示出十一个)沿着颤化列3810线性对准,不论雷射射束在相对于射束轨迹3812移动时的速度如何。

[0543] i. 正负号惯例

[0544] 如本文揭示的示例性实施例中所使用,颤化射束定义为在电流计X轴中颤化,然后旋转至正确定向以保持颤化射束垂直于射束轨迹3812。将AOD子系统1042校准以在扫描场的中心处匹配电流计XY坐标框架。以下方程开发出颤化旋转矩阵。除非另外指示,否则角度的惯例是正的逆时针(CCW),其中零度沿着+X电流计轴。

[0545] ii. AOD旋转及变换分量

[0546] 最终AOD命令可藉由以下方程来计算:

[0547] $AODcmd = TMframe * TMfield * Rdither * \text{颤化}$,

[0548] 或

[0549] $AODcmd = TMaod * \text{颤化}$,

[0550] 其中:

[0551] AODcmd=发至其相应RF驱动器的AOD RF频率命令(2元素向量);

[0552] TMframe=非正交变换矩阵,其将AOD XY命令转换成AOD坐标框架,如在AOD校准部分中所定义;

[0553] TMfield=局部扫描场失真校正,在电流计XY框架中(4元素矩阵);

[0554] Rdither=将颤化向量相对于射束轨迹3812定向的旋转矩阵(4元素矩阵);

[0555] 颤化=载入于FPGA 1028中的颤化(或光栅)表;并且

[0556] TMaod=由以上分量产生的完整AOD命令变换矩阵,此矩阵的元素被传输至FPGA 1028,代替Kw0、Kw1项。

[0557] 应用TMfield校正项(两轴定标及旋转)以考虑到局部扫描场失真。因为AOD1020、1022在没有任何扫描场校准校正的情况下操作,所以可使用此。此变换可自电流计校准资料导出。此矩阵的元素为

$$[0558] \quad TMfield = \begin{bmatrix} SFx & Ryx \\ Rxy & SFy \end{bmatrix},$$

[0559] 其中:

[0560] SFx=X轴定标(标称为1.0);

[0561] SFy=Y轴定标;

[0562] Ryx=Y轴至X轴的旋转(rad);并且

[0563] Rxy=X轴至Y轴的旋转。

[0564] iii.Rdither推导

[0565] 颤化射束具有同轴及横轴分量,其量值(在一个颤化循环内)为:

[0566] DitherCA=宽度,

[0567] DitherOA=Vel*Taod*(Nd-1)。

[0568] 注意,OA颤化分量使颤化射束相对于射束轨迹3812“向后”移动,以使得在每个颤化列上的所有点的同轴位置保持固定(例如,雷射光点位置3814沿着图38示出的颤化列3810保持固定)。因此,OA颤化分量是基于速度向量以便保持每个颤化列垂直于射束轨迹3812。OA及CA颤化分量组合起来,以在相对于+X电流计轴的角度 θ_{dither} 下形成“颤化向量”。如图38中示出,OA及CA颤化分量将速度补偿角度 θ_{vel} 定义为:

[0569] $\theta_{vel} = \text{atan}(DitherOA/DitherCA)$ 。

[0570] 颤化向量定向包括速度补偿角度 θ_{vel} 加上轨迹角度 θ_{traj} 及 90° 旋转(即,在图38中,在射束轨迹3812与OA颤化分量DitherCA之间例示的 90°):

[0571] $\theta_{dither} = \theta_{vel} + \theta_{traj} + \theta/2$ 。

[0572] 因此,颤化角度 θ_{dither} 是相对于电流计XY框架的总颤化向量角度。然后,颤化向量可藉由角度 θ_{aod} 来与AOD框架对准,该角度可归因于光学器件串布局而相对于电流计XY框架旋转。

[0573] 在处理期间,轨迹角度(θ_{traj})即时更新(随着射束轨迹速度分量 V_x 及 V_y 而变化),而AOD角度(θ_{od})在校准的后恒定。对于即时更新(1 μsec 更新),可使三角计算最小化。此可藉由应用三角恒等式来进行:例如, $\sin(\text{atan}(y/x)) = y/\sqrt{x^2+y^2}$ 。

[0574] DSP 1026可使用以下变数来计算颤化定向:

[0575] ditherRange=当前颤化表的总范围(μm);

[0576] Kw=应用于颤化表以产生所要颤化宽度的定标因子(此可针对渐缩段来内插);

[0577] Nd=当前颤化表中的颤化点的数目(对于每个段是恒定的);

[0578] Taod=颤化表更新速率(μsec);

[0579] V_x, V_y =射束轨迹3812在原始电流计XY坐标中的X及Y分量(m/sec);并且

[0580] $Vel = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ = 速度向量量值。

[0581] 然后,三角恒等式允许Rdither旋转矩阵的sin及cos项藉由下式来计算

[0582] //在定标之后的标称横轴颤化宽度

[0583] $ditherCA = ditherRange * Kw$ (μm);

[0584] //在一个颤化列期间用于保持颤化点对准的所需同轴增量

[0585] $ditherOA = Vel * Taod * (Nd - 1)$;

[0586] //由于速度补偿所导致的完整颤化向量的量值(OA,CA的向量总和)

[0587] $ditherMag = \sqrt{ditherOA^2 + ditherCA^2}$;

[0588] //避免除以零问题;预设为单位矩阵

[0589] 若 $\text{abs}(Vel * ditherMag) < 1e-6$

[0590] $\text{cosThetaDither} = 1$;

[0591] $\text{sinThetaDither} = 0$;

[0592] 否则

[0593] $\text{cosThetaDither} = -(Vy * ditherCA + Vx * ditherOA) / (Vel * ditherMag)$;

[0594] $\sin\theta_{dither} = (V_x * dither_{CA} - V_y * dither_{0A}) / (Vel * dither_{Mag})$;

[0595] 结束。

[0596] iv. 定标及TMAod计算

[0597] 可调整颤化向量的量值以便考虑到经速度校正的颤化向量中的额外斜边长度。因此，

[0598] $Kw_{Corr} = Kw * dither_{Mag} / dither_{CA} = dither_{Mag} / dither_{Range}$ 。

[0599] 然后，最终变换矩阵藉由以下矩阵积来给出

[0600] $TM_{aod} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = TM_{frame} * TM_{field} * R_{dither} * Kw_{Corr}$ 。

[0601] 前两个项(TMframe, TMfield)可在SCC 1010中预计算并且作为“TMdither”变换矩阵来传递：

[0602] $TM_{dither} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} = TM_{frame} * TM_{field}$ 。

[0603] 最后两个项(Rdither, KwCorr)可基于速度向量及内插Kw来即时计算。注意，Rdither及KwCorr均含有ditherMag项，并且乘积RditherKwCorr导致ditherMag被抵消，从而避免DSP 1026中的高成本sqrt()计算。若定义

[0604] $\cos\theta_{dither_{Corr}} = -(V_y * dither_{CA} + V_x * dither_{0A}) / (Vel * dither_{Range})$;

[0605] $\sin\theta_{dither_{Corr}} = (V_x * dither_{CA} - V_y * dither_{0A}) / (Vel * dither_{Range})$;

[0606] 或，替代地(避免计算dither0A及ditherCA)，

[0607] $\cos\theta_{dither_{Corr}} = -(V_y * Kw / Vel + V_x * (Nd - 1) * Taod / dither_{Range})$;

[0608] $\sin\theta_{dither_{Corr}} = (V_x * Kw / Vel - V_y * (Nd - 1) * Taod / dither_{Range})$;

[0609] 则

[0610] $R_{dither} * Kw_{Corr} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{dither_{Corr}} & \sin\theta_{dither_{Corr}} \\ \sin\theta_{dither_{Corr}} & \cos\theta_{dither_{Corr}} \end{bmatrix}$ 。

[0611] 然后，将TMAod的四个元素传输至FPGA 1028，其将RF信号频率更新计算为

[0612] $\begin{bmatrix} AOD0 \\ AOD1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} DitherX \\ DitherY \end{bmatrix}$ ，

[0613] 其中DitherX及DitherY是AOD颤化表中的条目。光栅计算遵循同一过程。如以上所提及，按照惯例，在向量或刮削模式下，DitherY条目为零；藉由颤化图所产生的颤化条目填充DitherX。

[0614] TMframe矩阵中的项为恒定的并且可预计算并储存于DSP 1026中。TMfield矩阵中的项自电流计校准资料中采集。将此变换应用于电流计XY框架中，因为TMframe旋转可能太大(对于较大旋转角度，旋转是不可交换的)。

[0615] v. 另外校准的TMAod计算

[0616] 某些实施例包括在颤化期间的TMAod计算，其考虑到校准校正对于轨迹命令的影响。在以上提供的推导中，假定理想(工作面)速度。然而，在某些实施例中，在将轨迹命令传输至DSP 1026之前，将扫描场失真校正应用于轨迹命令。此等校正修改轨迹速度，如藉由DSP 1026计算出。此在颤化向量速度角度计算中产生轻微误差，可导致几微米的误差。为了提供进一步校正，可将局部场失真校正嵌入TMdither矩阵中。

[0617] 首先,重新定义形成变换矩阵的项,该矩阵旋转并定标颤化向量:

$$[0618] \quad \begin{bmatrix} \cos\theta_{DitherCorr} \\ \sin\theta_{DitherCorr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{oa} & -K_{ca} \\ K_{ca} & -K_{oa} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{xIdeal} \\ V_{yIdeal} \end{bmatrix},$$

[0619] 其中横轴及同轴颤化角度系数定义为

[0620] $K_{ca} = K_w / V_{elIdeal}$, 并且

[0621] $K_{oa} = T_{aod} * (N_{dither} - 1) / ditherRange$ 。

[0622] K_{ca} 及 K_{oa} 可藉由SCC基于处理段参数,使用理想坐标中的轨迹速度来计算。

[0623] 此公式化提出各种实行选项。在一实施例中, K_w 的值在处理段内保持恒定,并且单一恒定 TM_{dither} 变换自SCC 1010传递至DSP 1026。在某些实施例中,保持 K_w 恒定可为容许限制,因为渐缩线可由一系列短段来产生,每个段具有恒定的 K_w 值。在另一实施例中,扩展 TM_{dither} 的项以产生两个变换:一个是恒定的,并且一个藉由 K_w 来定标。然后,DSP 1026可更新处理段内的 TM_{dither} :

[0624] $TM_{dither} = TM_{dither1} + K_w * TM_{dither2}$ 。

[0625] 然后,可在处理段内对 K_w 的值进行内插以产生渐缩的线宽度。此意味着DSP 1026进行的更多计算,并且更多资料自SCC 1010传输至DSP 1026。取舍是提供更短且更精确的宽度过渡的能力。

[0626] 最终颤化命令藉由FPGA 1028产生:

$$[0627] \quad \begin{bmatrix} AOD0 \\ AOD1 \end{bmatrix} = TM_{aod} * \begin{bmatrix} DitherX \\ DitherY \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} DitherX \\ DitherY \end{bmatrix}。$$

[0628] 但是按照惯例,仅 $DitherX$ 分量在FPGA颤化表中为非零的。因此,仅 TM_{aod} 的第一行在颤化期间是必需的:

$$[0629] \quad \begin{bmatrix} AOD0 \\ AOD1 \end{bmatrix} = TM_{aod} * \begin{bmatrix} DitherX \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & 0 \\ T_{21} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} DitherX \\ 0 \end{bmatrix}。$$

[0630] 基于先前部分中的方程,此行藉由下式给出

$$[0631] \quad \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{21} \end{bmatrix} = TM_{frame} * TM_{fieldIdealToRawGalvo} * \begin{bmatrix} -K_{oa} & -K_{ca} \\ K_{ca} & -K_{oa} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{xIdeal} \\ V_{yIdeal} \end{bmatrix}。$$

[0632] 然而,可在DSP 1026中利用的射束轨迹资料是在原始电流计坐标中,而非在理想坐标中。藉由扫描场失真来修改的射束轨迹速度向量的角度及量值使颤化向量失真。为了正确地在理想坐标中计算颤化向量,根据某些实施例,在计算颤化向量之前,可自速度向量移除局部扫描场失真(藉由 TM_{field} 描述)。

$$[0633] \quad \begin{bmatrix} V_{xIdeal} \\ V_{yIdeal} \end{bmatrix} = TM_{fieldRawGalvoToIdeal} * \begin{bmatrix} V_{xRaw} \\ V_{yRaw} \end{bmatrix}。$$

[0634] 此转换允许在理想坐标中计算颤化向量,然后变换成原始AOD坐标。此程序使用三个变换: TM_{field} (原始电流计至理想), TM_{field} (理想至原始电流计),及 TM_{frame} (原始电流计至原始AOD)。然后, TM_{aod} 的第一行藉由下式给出

$$[0635] \quad \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{21} \end{bmatrix} = TM_{frame} * TM_{fieldIdealToRawGalvo}$$

$$[0636] \quad * \begin{bmatrix} -K_{oa} & -K_{ca} \\ K_{ca} & -K_{oa} \end{bmatrix} * TM_{fieldRawGalvoToIdeal} * \begin{bmatrix} V_{xRaw} \\ V_{yRaw} \end{bmatrix}, \text{ 或}$$

$$[0637] \quad \begin{bmatrix} T11 \\ T21 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D11 & D12 \\ D21 & D22 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VxRaw \\ VyRaw \end{bmatrix} = TMdither * \begin{bmatrix} VxRaw \\ VyRaw \end{bmatrix}。$$

[0638] TMdither矩阵藉由SCC 1010针对每个段来计算,并且传递至DSP 1026以用于基于VxRaw及VyRaw的即时值进行处理。然后,此简化DSP处理,因为颤化变换项是在SCC 1010上预计算。

[0639] 自DSP传输至FPGA 1028的完整TMaod矩阵则为

$$[0640] \quad TMaod = \begin{bmatrix} T11 & 0 \\ T21 & 0 \end{bmatrix}。$$

[0641] 此形式的TMaod仅为用于颤化的特殊情况。对于光栅处理,通常使用完整TMaod矩阵。

[0642] vi. 颤化方向控制

[0643] 例如,在刮削期间,当一致地处理较大烧蚀区域时,可使用颤化方向(相对于速度轨迹)。经验证明,相对于碎片辅助气流的雷射处理方向可显著影响处理结果。通常,“迎风”处理是较佳的,以避免与碎片羽流的相互作用。

[0644] 在给定以上方程的情况下,可简单地藉由改变TMdither方程中的Kca的正负号来改变颤化方向,从而有效地反转横轴颤化运动。此可在SCC阶层上基于刮削通过的速度轨迹来执行。注意,刮削通过通常在一个角定向上布置于有规律地间隔开的列中,从而允许简单地控制相对于碎片辅助气流之颤化方向。

[0645] 4. 颤化列通量控制

[0646] 在某些实施例中,在颤化期间实行通量控制保持每个颤化列的恒定剂量。此允许剂量在处理段的末端斜降,同时保持剂量跨线宽度为一致的。此可适用于例如随着较宽颤化线的快速剂量斜坡。

[0647] 图52图形地例示根据一实施例的颤化列通量控制。顶部绘图5210示出跨越两个处理段(示出为藉由虚线5214分开的段N及段N+1)的一系列颤化列5212(示出六个)。第二绘图5216示出用于每个颤化列5212的同轴(OA)颤化命令5217。第三绘图5218示出用于每个颤化列5212的横轴(CA)颤化命令5220。注意,OA颤化分量具有负斜率,当主要射束轨迹以恒定速度移动时,保持颤化相对于工件为静止的。底部绘图5222示出理想通量命令5224及实际通量命令5226。注意,在第二处理段中(虚线5214的左侧),通量斜降(例如,形成相交处的一个分支)。连续通量斜坡被转换成一系列通量步阶,其中每个颤化列的通量保持恒定。每个颤化列的通量等级藉由颤化列中心处的通量斜坡值给出。

[0648] 亦注意,颤化列5212的同轴位置不与处理段的开始或末端对齐,具有等于Taod*Vel*(Ndither-1)/2的偏移。此保持处理段的概念一般化,以使得可在任何方向上处理任何段。藉由此较小偏移产生的任何处理人为产物可藉由降低特定段中的速度以减少颤化列间隔来缓解。

[0649] 此描述了保持每个颤化列的通量恒定的方法。若允许颤化宽度在处理段内变化,则可使用类似方法。

[0650] 5. TMaod极限

[0651] 在某些实施例中,TMaod条目的量值限于<2。此在以下推导中看出:

$$[0652] \quad |\cos\theta_{ditherCorr}| = (Vy/Vel*ditherCA + Vx/Vel*ditherOA) / ditherRange,$$

[0653] 或

[0654] $|\cos\text{ThDitherCorr}| = \sin\text{ThVel} * \text{ditherCA} / \text{ditherRange} +$

[0655] $\cos\text{ThVel} * \text{ditherOA} / \text{ditherRange}$ 。

[0656] 为了保持光点重叠,颤化表条目之间隔小于 $\sim 0.35 * \text{Deff}$ 。类似地,段速度受到限制以使得颤化列之间的间隔(ditherOA)小于 $\sim 0.35 * \text{Deff}$ 。此确保 $\text{ditherOA} / \text{ditherRange} < 1$,即使对于最坏颤化情况($N_d = 2$)亦如此。按照定义, $\text{ditherCA} / \text{ditherRange} = K_w < 1$ 。因此,当此等项中的每一者=1时,出现 $|\cos\text{ThDitherCorr}|$ 的最大值,并且

[0657] $|\cos\text{ThDitherCorr}| = \sin\text{ThVel} + \cos\text{ThVel}$,

[0658] 其在 $\text{ThVel} = 45$ 度时具有最大值1.414。类似极限适用于 $|\sin\text{ThDitherCorr}|$ 。

[0659] 归因于扫描透镜失真局部尺度因子, TMfield 的项可具有稍微大于1的量值(例如,或许高达1.2)。非正交性可产生 TMframe 中的高达 ~ 1.1 的项。因此所有 TMaod 项的量值 < 2 。

[0660] 为了确保此极限,颤化图适当地将颤化表点间隔开(当ditherRange增加时,增加 N_d),并且段速度受到限制以约束 $|\text{ditherOA}|$ 。

[0661] 注意, TMaod 中的定标可大于1,但是此不意味着光点重叠的变化,因为 TMaod 中的定标项补偿其他定标效应。例如,颤化向量的较长斜边(归因于速度补偿,参见图38)似乎会减少光点重叠,但是当光点实际上施加至工作面时,速度效应将其对齐并且几何形状返回至正常。类似论证适用于局部透镜失真定标(> 1)的 TMfield 项对于 < 1 的局部透镜定标来标准化)。因此,颤化图可指定标称光点间隔而不考虑 TMaod 定标效应。

[0662] 6. 向量处理概述

[0663] 在某些实施例中,在向量模式下的处理可概述如下。对于应用中的每个处理段,遵循以下步骤。图48(以下论述)例示用于将向量处理段资料转换成发至FPGA 1028的命令的此处理流程。本领域的技术人员自本文中的揭示内容将认识到,某些以下步骤可按不同次序来执行。

[0664] 步骤1:SCC 1010使用以下规则将应用分解成单独处理段:单独段为弧形所需要的;所有段小于 maxSegmentLength ($\sim 1\text{mm}$,用于校准);并且所有段在大于 $12.5\mu\text{sec}$ 内处理(对于此特定实例,处理支援每个段 $12.5\mu\text{sec}$ 的持续更新速率,从而在 2m/sec 下支援 $25\mu\text{m}$ 的最小段长度;当然,其他实施例可使用不同更新速率)。

[0665] 步骤2:SCC 1010使用过程图及沟槽几何形状(宽度,深度)来判定所需过程参数(GridWidth 及通量)。

[0666] 步骤3:SCC 1010使用颤化图来判定对应于所需 GridWidth 的颤化表参数(N_d, K_w)。注意, N_d 对于每个段保持恒定,但是 K_w 可在过渡段内进行内插。

[0667] 步骤4:SCC 1010使用颤化图来判定对应于 N_d 的颤化表参数 tableAddress 及 tableLength 。

[0668] 步骤5:SCC 1010使用颤化图来计算 EffectiveWidth 。由于可对 K_w 进行内插,因此亦可在过渡段内对 EffectiveWidth 进行内插。

[0669] 步骤6:SCC 1010计算剂量= $\text{通量} * \text{EffectiveWidth}$ 。可在过渡段内对此进行内插。

[0670] 步骤7:SCC 1010基于段弧形半径来计算 K_b (若需要)。

[0671] 步骤8:SCC 1010基于以下限制中的一或多者来指派段速度(在段内保持恒定):a. 受雷射功率限制的速度,其基于功率图及所需剂量;b. 归因于所需 GridWidth 、AOD场大小及

三级滤波器瞬态量值的AOD速度极限;c. 归因于颤化列之间的最大间距的AOD速度极限($= Taod * (Nd-1) * Vel$),其可能 $< 0.35 * Deff$;以及e. 各段可具有满足步骤1中提及的最小段时间要求所需要的较低速度。

[0672] 步骤9:SCC 1010将过程及位置轮廓资料传输至DSP 1026。(在此实例中不使用形状参数 Ks)。自SCC 1010传输至DSP 1026的资料包括段端点XY坐标、段弧形中心XY坐标及半径、轨迹样本的数目(~速度)、颤化tableAddress、颤化tableLength、剂量、 Kw 及 Kb 。

[0673] 步骤10:DSP 1026以Tcmd的更新周期来计算中心线位置资料(Xc, Yc),并且用三级滤波器来处理该资料。

[0674] 步骤11:DSP 1026每个颤化列计算新的颤化(Kw)及过程(Kp, Kb)参数一次(每 $Nd * Taod$ 秒),若需要,则进行内插(在过渡段中)。

[0675] 步骤12:DSP 1026基于轨迹角度及速度来计算 $TMaod$ 变换分量。

[0676] 步骤13:DSP 1026将低阶命令发送至FPGA 1028来控制AOD操作。由于DSP 1026及FPGA 1028以不同更新周期($Tdsp$ 对 $Taod$)来操作,因此每个DSP循环传输足够的资料以允许FPGA 1028在接下来的 $Tdsp$ 秒内进行处理(亦即,全部 $Tdsp/Tcmd$ 资料集)。

[0677] B. 光栅处理

[0678] 光栅处理类似于向量处理,只是使用2D光栅表来进行AOD控制,而非如在向量处理中使用1D表。

[0679] 在一实施例中,光栅处理与向量处理同时实行,从而避免浪费时间来再访光栅位置并且使向量写入与相交处处理之间的经过时间最小化以便使雷射束漂移效应最小化。另外,较大场扫描透镜失真特性的检查指示较大光栅图案(例如,200 μm 宽)可能已应用PGC定标及旋转校正,尤其在沟槽与其相交时。

[0680] 根据一实施例,LDA系统使用用于光栅及向量处理的相同硬体架构来将向量处理与光栅处理混合。由于针对每个处理段来指定唯一的颤化表,因此光栅操作作为另一个表被无缝地整合至处理流程中。

[0681] 标称射束位置的速度通常在光栅处理期间设定为零。另外,若处理较大光栅区域(消耗大部分AOD范围),则允许三级滤波器安定以便使所添加的AOD三级偏转最小化。通常,在某些实施例中,此大约为0.25msec。

[0682] 定标/旋转校正可作为一组PGC项来提供,如先前颤化旋转论述中所描述。对于光栅处理, $Rdither$ 矩阵包括光栅图案在电流计XY坐标框架中的旋转,并且藉由SCC 1010针对每个光栅图案来传输(而非藉由DSP 1026基于轨迹速度来计算)。此旋转可将相交处光栅图案相对于周围迹线来定向以利于正确的相交处形成。

[0683] 为了考虑到扫描场失真,SCC 1010亦基于光栅的XY扫描场位置及电流计校准资料来识别PGC校正。在某些实施例中,此在光栅区域内校正X/Y误差中的高达5-6%的误差。此可为在光栅处理期间的未校正误差。注意,在向量处理中,扫描场校准明确地应用于段端点;在短距离(~1mm)内的端点的间的非线性误差较小。

[0684] 1. 光栅处理概述

[0685] 在光栅模式下的处理可概述如下。对于应用中的每个处理段,可遵循以下步骤。图49(以下论述)概述用于将光栅处理段资料转换成发至FPGA 1028的命令的此处理流程。本领域的技术人员自本文中的揭示内容将认识到,某些以下步骤可按不同次序来执行。

[0686] 步骤1:在应用的“转换”期间,SCC 1010计算光栅图案并且建立具有许多个别图案的光栅表。在一些情况下,单一光栅“部位”可由若干较小光栅图案组成(例如,圆形衬垫+各种角度下的“突出部”)。此等图案可组合成一个较大图案,或单独处理此等图案。注意,一些光栅图案可在整个应用中,在不同旋转角度下使用若干次。

[0687] 步骤2:SCC 1010识别所有光栅图案的旋转角度,例如,在CAD(电脑辅助设计,用于特定应用)坐标中。

[0688] 步骤3:在应用开始之前,SCC 1010将光栅表资料下载至FPGA 1028。

[0689] 步骤4:SCC 1010产生每个光栅位置的TMdither变换。此PGC对应于发送至FPGA 1028的TMaod变换。TMdither变换包括CAD坐标中的光栅旋转、工件对准旋转、局部扫描场失真PGC,及视情况由使用者指定的额外定标调整。

[0690] 步骤5:SCC 1010形成光栅处理段,在光栅的持续时间内速度为零。若使用者指定光栅的重复(例如,以获得更好的过程控制),则可将多个段链接在一起。

[0691] 步骤6:SCC 1010可包括具有允许三级滤波器安定的安定持续时间的先导及尾部零速度段,从而防止较大光栅图案的过度AOD偏移。

[0692] 步骤7:SCC 1010基于指定的光栅深度及过程图来计算所要通量。

[0693] 步骤8:SCC 1010基于光栅光点间距及可选的Kw定标调整因子来计算标称功率。

[0694] 步骤9:SCC 1010将光栅参数发送至DSP 1026。注意,对于几何形状定标是并入于PGC项而非Kw项中并且不使用内倾的光栅段,DSP 1026可将“剂量”解释为“功率”。“光栅模式”标识可适用于将此标记为不同资料结构。自SCC 1010发送至DSP的光栅参数可包括段端点XY坐标(对于零速度是相同的)、段弧形中心XY坐标及半径(未使用)、轨迹样本的数目(~光栅时间)、光栅tableAddress、光栅tableLength、功率(代替剂量)及TMdither(场失真及光栅角度)。

[0695] 步骤10:DSP 1026将以上光栅参数发送至FPGA 1028以供处理。由于光栅被视为颤化,因此不需要设定特殊模式。

[0696] 2. 板块化光栅处理

[0697] 光栅处理的变化在某些情况中可为适用的。图39示意性地例示根据一实施例的板块化光栅处理的实例。在图39中,两个衬垫3910、3912靠拢在一起并且藉由短迹线3914连接。整个区对于单一光栅图案而言太大,并且对于典型衬垫-迹线-衬垫处理序列而言,衬垫3910、3912可间隔得过于靠拢在一起。可对该区进行刮削,但是归因于处理区域的形状,雷射工作循环将较低。

[0698] 根据一实施例的替代方法将此区作为两个光栅图案3916、3918来处理,该等图案经板块化并且重叠来提供两个光栅区域3916、3918之间的过渡区3920。可在SCC 1010上如下界定光栅图案3916、3918:将任意“团迹”(即,具有任意形状及/或尺寸的区域)分解成若干重叠的光栅区域3916、3918,其中重叠等于所要过渡长度3922(例如,约40-50 μm),并且围绕每个团迹的边界超过过渡长度3922;用具有单位振幅的光点网格来填充每个区域;沿着每个尺寸应用FIR滤波器以便使光栅振幅在过渡区3920中斜降(例如,如同刮削滤波器);在每个光栅区域内,将团迹区之外的资料归零,从而产生明确界定的团迹区,在板块之间具有倾斜过渡区;并且在合适位置下载并执行每个光栅图案。

[0699] 此对于可包含于少许光栅场中的较小团迹而言可较好地起作用,并且可快于如图

39中示出的低密度图案的刮削,因为仅所需点可被光栅化(跳过所有空白空间),并且因为仅少许电流计移动可在AOD场之间进行。

[0700] 重复图案可重复(藉由合适的旋转),与每次重新计算新的刮削资料形成对照。当然,识别“相同图案”可能很难。

[0701] C. 刮削处理

[0702] 刮削是在较大区域(而非细沟槽)上移除材料的过程。与使用标称光点的情况相比,以下概述的方法允许颤化加宽线更加有效得多地移除材料,同时避免可由使用此等较宽线导致的“像素化”效应。举例而言,图40示意性地例示根据某些实施例的归因于宽线刮削的像素化误差。在图40中,将要处理的示例性团迹(左侧)包括圆形边缘,用足够精细以提供适当解析度的射束来处理该等圆形边缘。使用较宽射束来处理特征(右侧)导致过度像素化及解析度的不可接受的损失。

[0703] 在某些实施例中,对刮削射束的侧面及末端斜率进行整形是有用的。此等“过渡斜率”允许邻近的刮削通过适当地重叠并且在工件上产生均匀通量(例如,以获得均匀的深度控制)并且提供对于射束位置误差的容限。另外,刮削射束的末端上的斜率在沟槽将与刮削区域相交的情况下是合乎需要的(再次,提供均匀性及对于位置误差的容限)。

[0704] 在一实施例中,藉由剂量及形状控制来执行较宽刮削射束的此整形。然而,若线宽度在处理期间保持恒定,则宽线像素化问题使得此方法很难。

[0705] 在另一实施例中,藉由处理“像素网格”,并且将滤波器应用于网格以产生所要侧面及末端斜率,来改变较宽颤化图案。

[0706] 图41示意性地例示根据一实施例的划分成网格条带4102、4104、4106的刮削区域4100。虽然仅示出三个条带4102、4104、4106,但是额外条带可用来完成整个刮削区域4100。将一般或任意“团迹”区域转换成像素4110的网格,并且像素4110之间的最小间隔基于基本光点大小(例如,要求>60%重叠)。刮削物件可具有一个细长轴,其可与刮削射束轨迹对准(例如,在图41的实例中,对于第一条带4102而言,为左至右,如藉由箭头4112指示)。

[0707] 取决于速度、颤化点更新速率及颤化点的数目,沿着此主要射束轨迹(“同轴”)的网格间隔可小于正交轴(“横轴”)上的所需间隔。设置光点网格以使得准确地画出刮削区域轮廓,尤其在任何其他特征将与刮削区域相交时。因此最终光点网格间隔取决于轮廓尺寸。另外,根据某些实施例,因为颤化列执行时间是固定并且量化的($=T_{aod} * N_d$),所以调整刮削轨迹速度以使得整数个刮削颤化列精确地填充刮削区域。

[0708] 然后将网格划分成单独通过(在图41中展示为4102(条带1)、4104(条带2)及4106(条带3),出于示例性目的将其展示为藉由虚线划分)。在每次通过期间,将射束颤化以产生所要宽度。通常,此可产生不可接受的像素化误差,如图40中示出。然而,若颤化图案可随着同轴位置而变化来定制,则可避免此像素化。

[0709] 为了避免像素化,将网格图案依序载入至FPGA 1028AOD控制器中,其中每个“颤化列”藉由二元图案来指定。然后对此图案进行滤波以产生侧面及末端斜率。滤波网格的结果在图42中示出。图42图形地例示根据一实施例的刮削颤化点的未滤波网格(在左侧)及刮削颤化点的对应滤波网格(在右侧)。图43图形地例示根据一实施例的对应于图41示出的条带4102、4104、4106的前三个刮削射束的通量分布。第一图表4310示出对应于第一条带4102的通量分布。第二图表4312示出对应于添加第二条带4104的通量分布。第三图表示出对应于

添加第三条带4106的通量分布。第四图表4316示出对应于条带4102、4104、4106的组合通量的通量分布。

[0710] 在某些实施例中,颤化方向(相对于刮削射束轨迹的横轴方向)基于刮削射束轨迹的方向自一个条带至下一个条带在多次通过之间切换。举例而言,再次参看图41,第一条带4102的刮削射束轨迹4112是自左至右,第二条带4104的刮削射束轨迹4114自右至左,并且第三条带4106的刮削射束轨迹4116再次自左至右。因为主要射束轨迹在每次刮削通过之间反转方向,所以图41例示沿着每个颤化列的颤化方向(如藉由箭头4118、4120、4122指示)亦改变方向。对于第一通过,当刮削射束轨迹4112自左至右移动时,第一条带4102中的每个颤化列在第一颤化方向4118上(例如,自底部至顶部)处理。对于第二通过,当刮削射束轨迹4114自右至左移动时,第二条带4104中的每个颤化列在第二颤化方向4120上(自顶部至底部)处理。对于第三通过,当刮削射束轨迹4116再次自左至右移动时,第三条带4106中的每个颤化列在第一颤化方向4122上(自底部至顶部)处理。根据某些实施例,基于刮削通过的方向来切换颤化方向会影响刮削处理的控制及品质(例如,其影响刮削深度)。在某些实施例中,允许使用者选择是否在刮削期间反转或保持颤化方向(例如,基于刮削通过的方向)。

[0711] 以下总结概述根据一实施例的刮削程序。

[0712] 刮削列宽度的选择用于最佳化效率。以下论述两个示例性情况。

[0713] 第一种情况假定在刮削列之间移动之后没有安定,如图44及图45例示。图44图形地例示根据一实施例的刮削实例。在图44中,出于示例性目的,复数个刮削列4410、4412、4414、4416彼此分离。然而,如以上关于图41及43所论述,本领域的技术人员自本文中的揭示内容将理解,刮削列4410、4412、4414、4416亦可彼此邻近(或彼此部分重叠)。图45图形地例示根据一实施例的在刮削期间的射束命令。在处理每个刮削列4410、4412、4414、4416时,三级AOD位置居中(在三级滤波器已经安定之后),并且AOD子系统1042围绕中心颤化,颤化的量为 \pm 一半列宽度。当射束定位器完成每个列并且移动至下一列时,其在AOD场中产生(归因于三级剖析)等于一半列宽度的额外偏转(AOD偏转在当前列与下一列之间划分)。因此,在跳跃至下一列之后的最大AOD偏转消耗全部一个列宽度。在此“未安定”方法中,虽然在跳跃至下一列之后不需要安定,但是选择每个列的长度以便足够长以允许三级滤波器在先前列跳跃之后安定。取决于选定刮削宽度,较短列长度可仍然使用额外“安定段”来提供此时间。注意,虽然刮削宽度设定为完全低于最大AOD范围,但是功率(且由此速度)可设定来适应AOD的整个偏转范围内的最坏情况AOD效率,由此降低此方法的效率。

[0714] 第二种情况允许使用完整AOD宽度,但是其中总是插入安定段以允许三级瞬态在刮削列处理开始的前衰减。此允许使用更宽刮削宽度。虽然此可藉由每个列移除更大区域来增加刮削效率,但是藉由增加刮削宽度来获得的效率被更宽偏转范围下的较低AOD效率抵消掉(假定系统允许功率随着AOD偏转宽度而增加)。

[0715] 由此等两种情况所产生的刮削效率的模型在图46中例示,图46为例示根据一实施例的材料移除速率(面积/秒)对刮削列长度(skiveLength)及宽度(线间距)的绘图。图46中的绘图假定 $10\mu\text{m}$ 刮削深度及 $25\mu\text{m}$ 光点大小。此指示,对于在此实例中使用的AOD,“未安定”情况几乎与“安定”情况一样有效。此可随着具有更大效率或更宽偏转范围的不同AOD设计而变化,或针对不同刮削深度或标称光点大小而变化。注意,归因于在列之间跳跃期间的额外AOD偏转,“未安定”情况在更有限宽度范围内操作。在此实例中,最佳刮削列宽度为大约

50 μm 。

[0716] 图47示意性地例示根据一实施例的刮削列几何形状的侧视图。图47例示在滤波之前的刮削列宽度4710及在滤波之后的颤化宽度4712。在具有过渡宽度4716的过渡区中,滤波产生倾斜侧壁4714(例如,用于与邻近的刮削列或其他特征相交)。倾斜度及过渡宽度4716基于滤波(例如,CrossAxisTaps*光点间距)。

[0717] 1. 刮削处理概述

[0718] 在刮削模式下的处理可概述如下。本领域的技术人员自本文中的揭示内容将认识到,某些以下步骤可按不同次序来执行。图50(以下论述)概述将光栅处理段资料转换成发至FPGA 1028的命令的此处理流程。

[0719] i. 预处理步骤

[0720] 步骤1:SCC 1010识别刮削区域,其可置放于应用档案中的单独层中。

[0721] 步骤2:SCC 1010将刮削区域转换成二元光点的网格,其中横轴间隔基于光点大小,并且同轴间隔基于速度及颤化参数。

[0722] 步骤3:SCC 1010将刮削网格转换成列的集合。

[0723] a. 列宽度可最佳化(宽度对效率取舍),如图46中示出。注意,刮削宽度归因于产生倾斜边缘的滤波而增加,因此宽度最佳化计算可对此予以考虑。边缘过渡可为约40 μm 宽(在给出2 μm 定位误差的情况下,存在5%深度误差);滤波边缘自未滤波标称边缘的延伸等于1/2过渡长度。

[0724] b. 刮削颤化列间隔(在同轴方向上)满足对于最大间距(光点重叠>60%)、功率限制条件内的处理速度及每个刮削段内的整数个颤化列的要求。另外,颤化列间隔可与所要同轴过渡长度及指定同轴箱车波形滤波器相容(参见下文)。由于箱车波形滤波对于整数个颤化列操作,因此颤化列间隔可在过渡区中提供整数个列。必要时,过渡长度可稍微扩大以允许此举,只要任何对应相交处具有匹配的过渡长度即可。

[0725] 步骤4:SCC 1010指定箱车波形平均值的长度(CrossAxisTaps及OnAxisTaps)以产生边缘及末端上的所要斜率。

[0726] a. CrossAxisTaps及OnAxisTaps为奇数(中心点+成对的周围点)。

[0727] b. 取决于横轴间隔(受颤化控制)及同轴间隔(受Nd*Taod*vel控制), CrossAxisTaps及OnAxisTaps可能不同。过渡区可与用于相交处的过渡区相同,例如,约40 μm (对于2 μm 定位误差,为5%深度误差)。

[0728] c. 由于OnAxisTaps为舍位整数,因此可能需要调整颤化列的时序(经由速度及/或Taod)以满足端点位置及过渡斜率宽度的要求。

[0729] 步骤5:对于每个刮削列,SCC 1010产生一组SkiveData字。

[0730] a. 每个SkiveData字表示每个颤化列的一组振幅点,并且未处理点设定为零。

[0731] b. SkiveData字的长度等于用于刮削的颤化表长度(高达32个点)。

[0732] c. 在SkiveData字的每个末端,“CrossAxisTaps”个点可设定为零以考虑到箱车波形滤波器的宽度,如图47中例示。

[0733] d. 横轴上的雷射处理(朝向颤化表的末端)偏移,偏移的量为“CrossAxisTaps”个颤化点。刮削颤化表考虑到此偏移。刮削颤化表亦包括以上提及的足够补零条目。

[0734] 步骤6:SCC 1010计算处理段位置。每个刮削列的实际雷射处理沿着同轴偏移(延

迟), 偏移的量为“OnAxisTaps”个颤化列。处理段几何形状考虑到此偏移。

[0735] 步骤7: SCC 1010使用过程图及沟槽几何形状(宽度, 深度)来判定所需过程参数(GridWidth及通量)。

[0736] 步骤8: SCC 1010使用颤化图来判定对应于所需GridWidth的颤化表参数(Nd, Kw)。

[0737] 步骤9: SCC 1010使用颤化图来判定对应于Nd的颤化表参数tableAddress及tableLength。

[0738] 步骤10: SCC 1010使用颤化图来计算EffectiveWidth。由于可对Kw进行内插, 因此亦可在过渡段中对EffectiveWidth进行内插。

[0739] 步骤11: SCC 1010计算剂量=通量*EffectiveWidth。可在过渡段中对此进行内插。

[0740] 步骤12: SCC 1010使用功率图、基于所需剂量来判定该段所准许的最大速度。段可具有满足最小段时间要求所需要的较低速度。速度在任何段内保持恒定。

[0741] 步骤13: SCC 1010藉由下式来将剂量定标

[0742] $Kskive = 1 / (\text{CrossAxisTaps} * \text{OnAxisTaps})$ 。

[0743] 步骤14: SCC 1010通知DSP 1026进入刮削模式。DSP 1026将FPGA 1028设定成刮削模式。

[0744] ii. 运行时间处理

[0745] 在刮削处理期间, 针对每个段遵循以下步骤。

[0746] 步骤1: SCC 1010对于每个刮削列产生处理段, 并且将以下资料传输至DSP 1026: 段端点XY坐标; 段弧形中心XY坐标及半径; 轨迹样本的数目(~速度); 刮削tableAddress; 刮削tableLength; 剂量; Kw; SkiveData; OnAxisTaps; CrossAxisTaps; 及刮削模式通知。

[0747] 步骤2: DSP 1026处理来自SCC 1010的串流传输资料, 如同在向量模式下, 从而将资料发送至FPGA 1028。

[0748] 步骤3: FPGA 1028产生颤化列向量, 并且非零资料点设定为指定剂量。

[0749] 步骤4: FPGA 1028对于颤化列执行横轴及同轴箱车波形平均滤波如下:

[0750] a. 在横轴资料(每个颤化列)到达时, 对其运行箱车波形滤波器。每个点的每个箱车波形滤波器为此点与 $\pm (\text{CrossAxisTaps} - 1) / 2$ 周围点的总和(其中在向量末端补零)。不需要定标(剂量藉由Kskive来预定标)。

[0751] b. 将此等滤波颤化列排入伫列。

[0752] c. 处理来自此伫列的颤化列。藉由对每个列与周围 $(\text{OnAxisTaps} - 1) / 2$ 列求和来应用同轴箱车波形滤波(根据需要, 对开始及结束列进行补零)。另外, 归因于Kskive预定标, 不需要定标。

[0753] 步骤5: 注意, 仍然应用角度及剂量参数(如同在正常颤化中), 但是没有形状或内倾(箱车波形滤波应用形状; 刮削被限于直线, 因此没有内倾)。

[0754] 步骤6: 调整同步化以考虑来自箱车波形滤波器的延迟。

[0755] 图48为例示根据一实施例的用于向量处理的AOD命令产生的方块图。如以上所论述, SCC 1010将应用分解成单独处理段, 每个段具有对应的段资料4810。使用材料表4812(例如, 参见图9), SCC 1010根据段资料4810及来自过程图4814的资料来处理沟槽几何形状(例如, 深度及宽度), 以判定诸如网格宽度及通量的过程参数。SCC 1010使用颤化图4816来

处理GridWidth以判定颤化表参数Nd及Kw。在某些实施例中,Nd对于每个段保持恒定,但是可在过渡段内对Kw进行内插。然后,SCC 1010使用颤化图4816来判定对应于Nd的颤化表参数tableAddress及tableLength。SCC 1010亦使用颤化图来计算EffectiveWidth(Weff)。因为可对Kw进行内插,所以亦可在过渡段内对EffectiveWidth进行内插。如图48中示出,SCC 1010计算剂量=通量*EffectiveWidth。亦可在过渡段内对剂量进行内插。颤化图4816亦将DitherRange提供至DSP 1026。

[0756] SCC 1010将剂量提供至功率图4818并且指派段速度MaxVel (在段内保持恒定)。段速度MaxVel可基于受雷射功率限制的速度及/或一或多个AOD速度极限。受雷射功率限制的速度基于功率图4818及计算出的剂量。AOD速度极限可基于所需GridWidth、AOD场大小及三级滤波器瞬态量值。另外,或在其他实施例中,AOD速度极限可基于颤化列之间的最大间距(=Taod*(Nd-1)*Vel),根据某些实施例,其 $<0.35*Deff$ 。在某些实施例中,段可具有满足最小段时间要求所需要的较低速度。

[0757] SCC轨迹产生模组4820接收来自段资料4810的XY射束坐标及所指派的段速度MaxVel。若内倾用于弧形段,则SCC轨迹产生模组4820基于段弧形半径来计算内倾参数Kb。SCC轨迹产生模组4820亦产生段轨迹资料(例如,段端点XY坐标、段弧形中心XY坐标及半径,及轨迹样本的数目)。

[0758] SCC 1010使用段资料4810来产生TMfield变换4822,其对于扫描场失真及标称电流计对准进行校正。SCC 1010亦产生TMframe变换4823以将AOD坐标框架与电流计坐标框架对准。如图48中示出,SCC 1010将TMfield变换4822与TMframe变换4823相乘以判定TMdither变换矩阵。

[0759] 在DSP 1026内,DSP轨迹产生模组4824使用自SCC 1010接收的段轨迹资料、DitherRange及Kw以Tcmd的更新周期来计算中心线位置资料(Xc,Yc)。虽然在图48中未展示,但是在某些实施例中,DSP 1026亦用三级滤波器(参见,例如,图22及图51示出的三级滤波器2205)来处理资料。DSP轨迹产生模组4824输出速度、AOD偏转坐标及颤化向量尺度/旋转。将AOD偏转坐标提供至TMtert变换4832,其输出频率偏差命令Fdev0及Fdev1。

[0760] DSP 1026每个颤化列计算新的颤化(Kw)及过程(Kp,Kb)参数一次(每Nd*Taod秒)。若段为过渡段,则DSP 1026使用内插法4826来计算新的颤化Kw参数。对于过渡段,DSP 1026亦使用内插法4828来判定剂量。如图48中示出,DSP 1026使用剂量及藉由DSP轨迹产生模组4824计算出的速度来判定提供至Kpwr模组4830的工作面功率。Kpwr模组4830将工作面功率转换成标准化功率命令Kp。

[0761] 如图48中示出,DSP 1026基于TMdither及颤化向量尺度/旋转来计算TMaod变换分量,如以上所论述。

[0762] DSP 1026将低阶命令发送至FPGA 1028来控制AOD操作。

[0763] 图49为例示根据一实施例的用于光栅处理的AOD命令产生的方块图。如以上所论述,SCC 1010将应用分解成单独处理段,每个段具有对应的段资料4810。在应用的“转换”期间,SCC 1010计算光栅图案并且建立具有许多个别图案的光栅表。段资料4810包括光栅图案的光栅旋转角度。每个光栅段具有零速度。

[0764] 使用材料表4812,SCC 1010根据段资料4810及来自过程图4814的资料来处理光栅几何形状(例如,深度及宽度),以判定诸如RasterID(例如,对应于GridWidth)及通量的过

程参数。SCC 1010使用颤化图4816来处理RasterID以判定颤化表参数Nd及Kw,以及通量定标。如图49中示出,使用者可选择性地调整Kw。然后,SCC 1010亦使用颤化图4816来判定对应于Nd的光栅表参数tableAddress及tableLength。如图49中示出,SCC 1010藉由将来自材料表4812的通量乘以藉由颤化图4816提供的通量定标来计算所要通量。

[0765] SCC轨迹产生模组4820接收来自段资料4810的XY射束坐标。SCC轨迹产生模组4820产生段轨迹资料,该资料提供至DSP轨迹产生模组4824。

[0766] 如图49中示出,SCC使用TMfield变换4822、TMframe变换4823、来自段资料4810的光栅旋转资料,及来自颤化图4816的Kw来计算TMdither变换矩阵。TMdither变换对应于发送至FPGA 1028的TMaod变换。

[0767] 如亦在图49中示出,对于光栅段,DSP 1026可将剂量解释为“功率”。Kpwr模组4830将功率转换成标准化功率命令Kp。

[0768] DSP轨迹产生模组4824输出AOD偏转坐标。将AOD偏转坐标提供至TMtert变换4832,其输出频率偏差命令Fdev0及Fdev1。

[0769] 图50为例示根据一实施例的用于刮削处理的AOD命令产生的方块图。如以上所论述,SCC 1010将应用分解成单独处理段,每个段具有对应的段资料4810。在此实施例中,SCC 1010识别刮削区域,其可置放于应用档案中的单独层中。SCC 1010将每个刮削区域转换成二元光点的网格,其中横轴间隔基于光点大小,并且同轴间隔基于速度及颤化参数。如以上所论述,SCC 1010将刮削网格转换成列的集合。

[0770] 使用材料表4812,SCC 1010根据段资料4810及来自过程图4814的资料来处理沟槽几何形状(例如,深度及宽度),以判定诸如GridWidth及通量的过程参数。SCC 1010使用颤化图4816来处理GridWidth以判定颤化表参数Nd及Kw。在某些实施例中,Nd对于每个段保持恒定,但是可在过渡段内对Kw进行内插。然后,SCC 1010使用颤化图4816来判定对应于Nd的颤化表参数tableAddress及tableLength。SCC 1010亦使用颤化图来计算EffectiveWidth (Weff)。因为可对Kw进行内插,所以亦可在过渡段内对EffectiveWidth进行内插。如图50中示出,SCC 1010计算剂量=通量*EffectiveWidth。亦可在过渡段内对剂量进行内插。颤化图4816亦将DitherRange提供至DSP 1026。

[0771] SCC 1010将剂量提供至功率图4818以判定段的最大速度MaxVel(在段内保持恒定)。在某些实施例中,段可具有满足最小段时间要求所需要的较低速度。

[0772] SCC轨迹产生模组4820接收来自段资料4810的XY射束坐标及最大速度MaxVel。SCC轨迹产生模组4820指定箱车波形平均值的长度(CrossAxisTaps及OnAxisTaps)以产生边缘及末端上的所要斜率。因此,在设置期间,SCC轨迹产生模组4820将刮削微动提供至FPGA 1028。对于每个刮削列,CC轨迹产生模组4820亦产生一组SkiveData字。SCC轨迹产生模组4820产生段轨迹资料,其可包括处理段位置。每个刮削列的实际雷射处理沿着同轴偏移(延迟),偏移的量为“OnAxisTaps”个颤化列。处理段几何形状考虑到此偏移。

[0773] 如以上所论述,SCC 1010藉由下式将剂量定标: $Kskive = 1 / (CrossAxisTaps * OnAxisTaps)$ 。

[0774] 如图50中示出,SCC 1010将TMfield变换4822与TMframe变换4823相乘以判定TMdither变换矩阵。

[0775] 在DSP 1026内,DSP轨迹产生模组4824使用自SCC 1010接收的段轨迹资料、

DitherRange及Kw来输出速度、AOD偏转坐标及颤化向量尺度/旋转。将AOD偏转坐标提供至TMtert变换4832,其输出频率偏差命令Fdev0及Fdev1。

[0776] 如图50中示出,DSP 1026使用剂量及藉由DSP轨迹产生模组4824计算出的速度来判定提供至Kpwr模组4830的工作面功率。Kpwr模组4830将工作面功率转换成标准化功率命令Kp。DSP 1026基于TMdither及颤化向量尺度/旋转来计算TMaod变换分量,如以上所论述。

[0777] DSP 1026将低阶命令发送至FPGA 1028来控制AOD操作。FPGA 1028产生颤化列向量,并且非零资料点设定为指定剂量。FPGA 1028亦对于颤化列执行横轴及同轴箱车波形平均滤波。

[0778] 图51为例示根据一实施例的电流计及AOD校准资料流5100的方块图。在电流计及AOD校准资料流5100中,SCC 1010将包含XY段坐标(例如,在工作面坐标中)的SCC轨迹指定5110(诸如图22示出的示例性射束轮廓2210)提供至扫描场变换2203。然后,扫描场变换2203将经校正的XY段坐标(例如,在原始电流计坐标中)提供至DSP轨迹产生单元4824,DSP轨迹产生单元4824计算(例如,在原始电流计坐标中)发送至三级滤波器2205的详细射束轨迹及颤化参数。如以上所论述,三级滤波器2205将原始XY电流计控制命令(例如,在原始电流计坐标中)提供至电流计控制器5114。三级滤波器2205亦将XY AOD命令(可向其添加在原始电流计坐标中的可选的XY电流计误差校正项)提供至TMtert变换4832。然后,将来自TMtert变换4832的输出(例如,作为ch0及ch1AOD命令)提供至FPGA 1028,其产生最终AOD RF命令。

[0779] SCC 1010亦将旋转变换TMframe 5118与局部扫描场失真校正TMfield 4822组合以产生TMdither变换矩阵。然后,将TMdither变换矩阵与颤化旋转/尺度变换5122(例如,Rdither及KwCorr)组合以产生提供至FPGA 1028的AOD命令变换矩阵TMaod变换。SCC 1010亦使用SCC颤化资料5124(例如,在工作面坐标中)来产生尺度因子MHzPer μ m,其可作为预载入资料包括于颤化(或光栅)表1110中。FPGA 1028将来自颤化表1110的资料与TMoad变换组合以产生颤化及光栅资料,FPGA 1028将其与来自TMtert变换4832的AOD命令组合以产生AOD RF命令。

[0780] 除了沿着射束轨迹、在每次通过期间加宽藉由雷射来加工的区域之外,本文揭示的横轴微机械加工技术亦可用来或适于将雷射射束脉冲引导至个别选择的横向光点位置(涉及或不涉及颤化列、网格条带或光栅移动)。另外,横向光点位置可在雷射通过期间藉由雷射射束定址多次以准许三维图案化,诸如差异深度图案化的差异能量图案化。此外,雷射射束脉冲可按时间非依序次序被引导至工件上的空间相同、空间重叠或空间相邻的光点区域位置,诸如以便增加雷射处理参数窗口及/或处置具有热或其他回应特性的工件材料,该等特性包括但不限于对于峰值功率、通量、重复率及咬合大小的敏感性。此等能力增强此等雷射微机械加工系统在各种工件材料中以较高产出量对工件进行标记并产生复杂特征以及形成较小介层孔或制造切口的能力。

[0781] 工件10的示例性材料包括陶瓷、玻璃、塑胶及金属,或其组合。示例性材料可为结晶或非结晶的。示例性材料可为天然的或合成的。示例性半导体晶圆材料可包括但不限于氧化铝、蓝宝石、玻璃、强化玻璃及Corning Gorilla Glass™。示例性金属材料包括铝、不锈钢及金属氮化物。

[0782] 图53为射束轴1061可沿着其行进的射束轨迹5300及藉由射束轴1061的横轴定位

所碰撞的示例性辅助光点区域位置5310的示例性网格100的平面图。在一些实施例中,一或多个电流计驱动反射镜(电流计)1066、1067可用来沿着射束轨迹5300引导射束轴1061,并且高速定位系统(诸如包括零惯性定位装置或快速转向镜)可用来将射束轴1061引导至个别选择的辅助光点位置。在一些实施例中,零惯性定位装置使用声光装置或电光装置。

[0783] 高速定位系统可利用Johnson的美国专利第7,133,186号所揭示的AOM调变技术中的一或多个者,该专利以引用方式并入本文中。此等调变技术包括但不限于:1)使用一或多个AOM(或EOM)来使射束轴1061相对于工件10的表面沿着横向轴偏转;2)在AOM上,诸如在AOM的横向表面上,使用一或多个换能器来使射束轴1061相对于工件10的表面沿着横向轴偏转;3)使用多个AOM或具有多个不同角度切割表面的AOM及对应的换能器来增加高速定位系统的累加偏转范围;及4)使用各种技术来阻断(伴以完全射束消光)所产生的雷射射束脉冲,使其不能沿着射束轴传播至工件10。

[0784] 用于相对于工件10来引导射束轴的射束及基板定位系统(包括高速及快速定位系统)亦可利用以下各项中揭示的定位系统的调适:Unrath的美国专利第8,288,679号及第8,680,430号,Unrath等人的美国专利第8,026,158号,及Unrath等人的美国专利公开案第2012-0273472号及Kelly Bruland等人的美国专利第7,633,034号及第7,425,471号,其全部以引用方式并入本文中。

[0785] 参照图53,网格100的区域可与高速定位装置的射束偏转范围一样大,或网格100的区域可更小。或者,网格100可随着以下因素而变化来界定:射束偏转范围、射束轴与工件之间的相对运动的速度、脉冲重复率、将要在指定时间周期内递送的脉冲的数目(包括特定位置及该等位置中的任一者将被碰撞的次数),及/或垂直于射束轨迹的所要宽度。

[0786] 在一些实施例中,雷射射束脉冲可以在1kHz至100MHz范围内的脉冲重复率(亦被称为脉冲重复频率(PRF))来递送。在一些实施例中,脉冲重复率大于或等于100kHz。在一些实施例中,脉冲重复率为10kHz至1MHz。

[0787] 在一些实施例中,雷射通量可在自约 $0.1 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$ 至 100.0J/cm^2 或更特定而言自 $1.0 \times 10^{-2} \text{J/cm}^2$ 至 10.0J/cm^2 的范围内。

[0788] 在一些实施例中,射束轴1061相对于工件10移动的速度在1mm/s至10m/s的范围内。在一些实施例中,射束轴1061相对于工件10移动的速度在100mm/s至1m/s的范围内。在一些实施例中,沿着射束轨迹112的射束轴与工件10的间的相对运动大于或等于400mm/s。

[0789] 在一些实施例中,快速射束定位系统1044,诸如电流计驱动反射镜1066及1067,将射束轴1061沿着射束轨迹112以大于或等于快速射束定位系统1044的最大速度的25%的速度来移动。在一些实施例中,快速射束定位系统1044将射束轴1061沿着射束轨迹112以大于或等于快速射束定位系统1044的最大速度的50%的速度来移动。在一些实施例中,快速射束定位系统1044将射束轴1061沿着射束轨迹112以大于或等于快速射束定位系统1044的最大速度的75%的速度来移动。在一些实施例中,快速射束定位系统1044将射束轴1061沿着射束轨迹112以大于或等于快速射束定位系统1044的最大速度的90%的速度来移动。在一些实施例中,快速射束定位系统1044将射束轴1061沿着射束轨迹112以大于或等于快速射束定位系统1044的最大速度的95%的速度来移动。

[0790] 在一些实施例中,雷射射束脉冲具有1飞秒(fs)至1000奈秒(ns)范围内的脉冲持续时间(脉冲宽度)。在一些实施例中,雷射射束脉冲具有约10fs至500ns范围内的脉冲宽

度。在一些实施例中,可采用在500fs至10ns的范围内的脉冲宽度。在一些实施例中,雷射射束脉冲具有约1ps至200ns范围内的脉冲宽度。在一些实施例中,雷射射束脉冲具有约1至1,000ps范围内的脉冲宽度。在一些实施例中,可采用在自1ps至100ps的范围内的脉冲宽度。在一些实施例中,可采用在自5ps至75ps的范围内的脉冲宽度。在一些实施例中,可采用在自10ps至50ps的范围内的脉冲宽度。在一些实施例中,脉冲宽度短于或等于100ps。在一些实施例中,脉冲宽度短于或等于10ps。在一些实施例中,脉冲宽度短于或等于1ps。在一些实施例中,可采用在自1fs至1000fs的范围内的脉冲宽度。

[0791] 在一些实施例中,工件10上的光点位置5310的邻近列之间的间距或间隔可在1 μm 至1000 μm 范围内。在一些实施例中,工件10上的光点位置5310的邻近列之间的间距或间隔可或更佳在10 μm 至100 μm 范围内。

[0792] 在一些实施例中,在雷射射束的焦点处量测的雷射射束脉冲的射束腰的主要空间轴可在0.5 μm 至1000 μm 或1 μm 至500 μm 范围内。在一些实施例中,在雷射射束的焦点处量测的雷射射束脉冲的射束腰的主要空间轴小于约50 μm 。在一些实施例中,焦点的射束腰在1 μm 与50 μm 之间。在一些实施例中,焦点的射束腰在1 μm 与25 μm 之间。在一些实施例中,焦点的射束腰在1 μm 与15 μm 之间。在一些实施例中,光点区域具有小于或等于15 μm 的长轴。

[0793] 在一些实施例中,可选择扫描速率及脉冲重复频率以使得相继定向的雷射射束脉冲以约0.1 μm 至约500 μm 范围内的咬合大小碰撞于工件10上。在一些实施例中,咬合大小在约0.5 μm 至约100 μm 范围内。在一些实施例中,咬合大小在约0.5 μm 至约50 μm 范围内。在一些实施例中,咬合大小在约1 μm 至约5 μm 范围内。在一些替代实施例、额外实施例或累加实施例中,咬合大小小于或等于4 μm 。

[0794] 在一些实施例中,雷射微机械加工系统1000采用在1064nm波长下操作的二极管激升的Nd:YVO₄固态雷射1046(诸如,由Lumera Laser GmbH,Kaiserslautern,Germany制造的模型Rapid)。可视情况使用固态谐波频率产生器来二倍频此雷射1046以将波长减小至532nm,从而产生可见(绿色)雷射射束脉冲,或将此雷射三倍频至约355nm或四倍频至约266nm,从而产生紫外线(UV)雷射射束脉冲。此雷射1046经定额以产生6瓦的持续功率且具有1,000kHz的最大脉冲重复率。此雷射1046与系统控制电脑1010协作产生具有1皮秒至1,000奈秒的持续时间的雷射射束脉冲。

[0795] 在一些实施例中,雷射微机械加工系统1000采用具有在约1030nm至1550nm的范围内的基波长的二极管激升的掺钕光纤雷射1046。可视情况使用固态谐波频率产生器来二倍频此等雷射1046以将波长减小至约515nm,从而产生可见(绿色)雷射射束脉冲,或减小至约775nm,从而产生可见(暗红色)雷射射束脉冲,举例而言,可将此等雷射三倍频至约343nm或约517nm,或四倍频至约257nm或约387.5nm,从而产生UV雷射射束脉冲。更一般而言,在一些实施例中,雷射波长包含在200nm与3000nm之间的波长。

[0796] 再次参考图1A至图1C及图53,本文揭示的横轴微机械加工技术可用来或适于克服与图1A至图1C相关的缺点。具体而言,较新的雷射系统具有可用于在对于工件10的临界破坏方面超过快速射束定位系统1044及工件定位系统(级段)的速度及惯性限制的功率及通量。因此,本领域的技术人员使用不太强大的雷射系统或必需阻断较高能力雷射的一定比例的雷射射束脉冲以避免到达工件10。第一种情况限制产出量,并且第二种情况阻止利用更昂贵雷射的全部能力。

[0797] 克服此等缺点的横轴微机械加工技术的一实例利用藉由高速定位系统1042进行的光栅方法,其叠加于来自快速射束定位系统1044及工件定位系统(级段)中的一者或两者的射束轨迹的向量速度的顶部以提供射束轴1061与工件10的间的连续相对运动以便在较新的高功率雷射系统的可用功率及通量的使用过程中允许更大效率,尽管存在快速射束定位系统1044及工件定位系统(级段)的速度及惯性限制条件亦如此。此技术允许在阻断较少或不阻断雷射射束脉冲的同时利用雷射的全功率及重复率,因为高速定位系统1042的同时光栅能力能够将大部分或所有雷射射束脉冲在与射束轨迹112呈横向的轴上充分地分布。

[0798] 类似地,射束轴可在两个维度中颤化以实现相同结果。或者,刮削方法可用来实现相同结果。

[0799] 鉴于前述,可克服关于图1A至图1C的缺点,较新的更强大的雷射系统的全功率及/或较高脉冲重复率可以较大效率来利用,并且可增加雷射处理产出量。

[0800] 再次参考图53,一些工件材料在对于雷射射束碰撞的回应中展现不良副作用。一些解决方案涉及严密控制具有先前技术定位系统的限制条件的雷射脉冲参数以避免工件的破坏临限值(诸如与热积聚相关)。然而,一些此等破坏临限值相关问题可藉由将时间依序或连续的雷射射束脉冲在空间上分离以便定址在空间上非邻近或非相邻的光点位置5310来解决。

[0801] 图54描绘光点位置5310的示例性网格条带或列及示例性顺序,在雷射通过期间按该顺序将雷射射束脉冲递送至非相邻光点位置5310以减少工件10中的热积聚,该热积聚可由于将时间依序雷射射束脉冲碰撞于空间相邻光点位置5310而造成。在一些实施例中,此处理顺序可藉由调适先前论述的颤化方法来实行。

[0802] 具体而言,可设定横轴角度来用在时间上依序碰撞工件10的雷射射束脉冲来依序处理沿着该列的光点位置5310的第一子集,包括光点位置5310a、5310c、5310e、5310g及5310i。(自该顺序中省去任何被阻断的雷射射束脉冲。)因此,光点位置5310a首先被定址,光点位置5310c第二个被定址,光点位置5310e第三个被定址,光点位置5310g第四个被定址,并且光点位置5310i第五个被定址。

[0803] 然后,在同一雷射通过期间,必要时,可再调整横轴角度,以使用在时间上依序碰撞工件10的雷射射束脉冲来依序处理沿着该列的光点位置5310的第二子集,包括光点位置5310b、5310d、5310f及5310h。横轴角度再调整可补偿在处理光点位置5310的第一子集期间射束轴1061沿着射束轨迹112所行进的任何距离。雷射射束脉冲的间的间隔及时间可充分地减少或减轻热积聚问题并且准许利用雷射处理参数的更宽窗口,诸如较高功率或脉冲重复率。

[0804] 图55描绘光点位置5310的示例性网格条带或列及另一个示例性顺序,在雷射通过期间按该顺序将雷射射束脉冲递送至非相邻光点位置5310以减少工件10中的热积聚。参照图55,九个光点位置5310的列集合的示例性处理次序可开始于光点位置5310a的处理。光点位置5310d可第二个被处理,并且光点位置5310g可第三个被处理。然后,在同一雷射通过期间,必要时,可再调整横轴角度,以便依序处理沿着该列的光点位置5310的第二子集以使得光点位置5310b可第四个被处理,光点位置5310e可第五个被处理,并且光点位置5310h可以第六个被处理。然后,在同一雷射通过期间,必要时,可再调整横轴角度,以便依序处理沿着该列的光点位置5310的第三子集以使得光点位置5310c可第七个被处理,光点位置5310f可

第八个被处理,并且光点位置5310i可第九个被处理。

[0805] 在此实施例中,时间依序雷射射束脉冲间隔开,最小为三个光点位置5310;然而,可利用两次横轴角度调整。热性质及该列光点位置5310在高速定位系统的扫描场中停留的时间量可与其他雷射处理参数平衡以判定依序雷射射束脉冲之间的合适空间距离及横轴角度的再调整次数。

[0806] 此外,消除不良热效应的雷射射束脉冲的空间布局的次序存在许多变化。光点位置5310的子集的数目或子集中的光点位置5310的数目可以某种方式判定,该方式在雷射通过期间、在雷射射束递送及材料定位系统的扫描场能力或其任何组件的扫描场能力内使处理速度最大化。

[0807] 举例而言,每列光点位置5310可在牛耕式转行书写状图案中定址。示例性牛耕式转行书写状次序可依序定址光点位置5310a、5310c、5310e、5310g及5310i,然后在回程方向变化时依序定址光点位置5310f、5310d及5310b,并且最后再次改变方向以定址光点位置5310h。或,光点位置5310h可在光点位置5310f之后且在光点位置5310d的前定址。

[0808] 在一些实施例中,可调整定址光点位置5310的顺序以便使时间依序雷射射束脉冲之间的距离最大化。在一些实施例中,依序雷射射束脉冲位移可利用雷射光点位置5310的多个列。

[0809] 在一些实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲被递送至彼此距离大于或等于高速定位系统1042的射束偏转范围的25%的选择性光点位置。在一些实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲被递送至彼此距离大于或等于高速定位系统1042的射束偏转范围的50%的选择性光点位置。在一些实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲被递送至彼此距离大于或等于高速定位系统1042的射束偏转范围的75%的选择性光点位置。在一些实施例中,递送至工件的时间依序雷射射束脉冲被递送至彼此距离大于或等于高速定位系统1042的射束偏转范围的90%的选择性光点位置。

[0810] 在一些额外实施例、替代实施例或累加实施例中,高速定位系统1042的射束偏转范围或扫描场在横向方向上,诸如在X及Y方向上,延伸了0.01mm与4.0mm之间。然而,应了解,此射束偏转范围或扫描场可在任何横向方向上延伸小于0.01mm或超过4mm(例如,取决于一或多个因素,诸如高速定位系统1042的组态、高速定位系统1042沿着射束轨迹的位置、入射于高速定位系统1042上的雷射脉冲的射束大小、光点大小等)。因此,高速定位系统1042的射束偏转范围或扫描场可在任何横向方向上延伸大于或等于0.04mm、0.1mm、0.5mm、1.0mm、1.4mm、1.5mm、1.8mm、2mm、2.5mm、3.0mm、3.5mm、4.0mm、4.2mm等的距离。同样地,高速定位系统1042的射束偏转范围或扫描场可在任何横向方向上延伸小于5mm、4.2mm、4.0mm、3.5mm、3.0mm、2.5mm、2.0mm、1.8mm、1.5mm、1.4mm、1.0mm、0.5mm、0.1mm、0.04mm、0.01mm等的距离。如本文所使用,术语“射束大小”或“光点大小”系指雷射脉冲的直径、空间长轴或宽度,并且可量测为自射束轴至光学强度下降至射束轴处的光学强度的 $1/e^2$ 之处的径向或横向距离。因此,在一些实施例中,高速定位系统1042的射束偏转范围或扫描场(例如,在X或Y方向上,或另外)的最大尺寸可大于或等于将要在工件1060中形成的特征(例如,开口、介层孔、沟槽等)的对应最大尺寸(如在X-Y平面中量测)。然而,在另一实施例中,高速定位系统1042的射束偏转范围或扫描场的最大尺寸可小于将要形成的特征的最大尺寸。

[0811] 在一些实施例中,可藉由多个连续脉冲(诸如在脉冲串中)碰撞所选择光点位置

5310中的一些以促进三维图案化,包括在深度图案化中,以便例如在快速定位系统1044的雷射通过中产生复杂特征及/或三维码(诸如3D QR码)。图56描绘光点位置5310的示例性网格条带或列,该等位置中的一些在雷射通过期间被碰撞多次。参照图56,可连续地或不断地调整横轴角度以准许雷射射束轴1061停留于光点位置5310上,同时多个雷射射束脉冲被引导至该光点位置。举例而言,光点位置5310a可藉由两个依序雷射射束脉冲来定址,该等脉冲将其处理至第一深度。然后,光点位置5310b亦可藉由两个依序雷射射束脉冲来定址,该等脉冲将其处理至第一深度。随后,光点位置5310c可藉由五个依序雷射射束脉冲来定址,该等脉冲将其处理至第二深度。然后,光点位置5310d亦可藉由五个依序雷射射束脉冲来定址,该等脉冲将其处理至第二深度。随后,光点位置5310e可藉由八个依序雷射射束脉冲来定址,该等脉冲将其处理至第三深度。然后,光点位置5310f亦可藉由八个依序雷射射束脉冲来定址,该等脉冲将其处理至第三深度。然后,光点位置5310g可藉由两个依序雷射射束脉冲来定址,该等脉冲将其处理至第一深度。随后,光点位置5310h可藉由五个依序雷射射束脉冲来定址,该等脉冲将其处理至第二深度。随后,光点位置5310i可藉由八个依序雷射射束脉冲来定址,该等脉冲将其处理至第三深度。

[0812] 本领域的技术人员将认识到,定址至不同光点位置的脉冲的数目可改变。另外,在一些实施例中,将要处理至相同深度的光点位置5310可在将要处理至不同深度的光点位置5310之前加以处理。此顺序对于使任何所期望光学Z高度校正的数目最小化可为合意的。

[0813] 在替代实施例中,多个雷射射束脉冲可能并非在快速定位器1044的雷射通过期间依序递送至同一光点位置5310,而是可在高速定位系统1042的多次通过期间递送。

[0814] 因此,一些实施例可个别地控制递送至选定光点位置5310的强度轮廓或剂量。

[0815] 图57描绘以射束轴1061的微动图案来引导的雷射射束脉冲所碰撞的选定横轴特征区域的示例性列。特征区域可具有比光点大小的长轴更大的尺寸。在一些实施例中,与调整单一雷射脉冲的大小及空间形状来模拟特征的彼等大小及空间形状相比,使用较小光点大小的多个雷射射束脉冲来产生特征为较佳的。在使用或不使用遮罩的情况下并且与射束整形或能量模塑光学器件无关,特征形状可难以用单一脉冲产生。另外,增加雷射光点的大小或增加或降低雷射射束脉冲的强度以适应光点大小可不利地影响雷射处理窗口。

[0816] 参照图57,在一些实施例中,快速定位系统1044及/或工件位置系统提供射束轴1061沿着射束轨迹112的相对移动。在一些实施例中,高速定位系统大体上沿着特征区域的列来提供横轴角度方向。在一些实施例中,用于移动射束轴1061的微动图案可叠加于射束轴的横轴角度运动上并与其整合,并且视情况叠加于沿着射束轨迹的相对运动上并与其整合。射束轴1061的微动图案可用来提供子轨迹,诸如图57示出的子轨迹5720a-5720g,雷射射束脉冲的光点位置5310沿着该等子轨迹定位。

[0817] 射束轴的微动图案可藉由一或多个现有高速定位器1020及1022来提供,或射束轴的微动图案可藉由一或多个额外高速定位器1020及1022来提供,该一或多个额外高速定位器1020及1022的运动叠加于原始高速定位器1020及1022的运动上。此等额外高速定位器1020及1022可沿着射束路径定位在原始高速定位器1020及1022的上游或下游。微动图案可用来沿着射束轴1061、沿着子轨迹5720a提供雷射射束脉冲的一或多次通过以便在快速定位系统1044的单次通过期间产生具有圆形周边的特征。微动图案可在快速定位系统1044的雷射通过期间、沿着横轴角度在高速定位系统的一或多次通过中实行。

[0818] 类似地,微动图案可用来沿着射束轴1061、沿着子轨迹5720b提供雷射射束脉冲的一或多次通过以便在快速定位系统1044的单次通过期间产生具有矩形周边的特征。

[0819] 类似地,微动图案可用来沿着射束轴1061、沿着子轨迹5720c提供雷射射束脉冲的一或多次通过以便在快速定位系统1044的单次通过期间产生具有三角形周边的特征。

[0820] 类似地,微动图案可用来沿着射束轴1061、沿着子轨迹5720d提供雷射射束脉冲的一或多次通过以便在快速定位系统1044的单次通过期间产生具有圆形区域的特征。

[0821] 类似地,微动图案可用来沿着射束轴1061、沿着子轨迹5720e提供雷射射束脉冲的一或多次通过以便在快速定位系统1044的单次通过期间产生具有矩形区域的特征。

[0822] 类似地,微动图案可用来沿着射束轴1061、沿着子轨迹5720f提供雷射射束脉冲的一或多次通过以便在快速定位系统1044的单次通过期间产生具有三角形区域的特征。

[0823] 微动图案可用来产生具有任何所期望形状的特征。

[0824] 本文所述的雷射及选择性脉冲能量控制技术可用于任何现有的雷射特征产生或修改技术,包括但不限于做标记、刻划、雕刻或切割。特征可包括但不限于信号迹线、接地迹线、修整、锯口、沟槽、切口、具有各种直径及/或侧壁锥度的盲孔或通孔微介层孔、正方形或矩形衬垫、对准框标、表面或表面下的标记及/或文数字记号。

[0825] 举例而言,本文揭示的此等雷射及选择性脉冲能量控制技术可提供增强的锥度控制。侧壁锥度可相对于垂直于工件1060的顶部表面的深度轴来界定。若侧壁垂直于工件1060的顶部表面,则侧壁平行于深度轴(并且与其共线),并且侧壁具有为零的锥度。

[0826] 然而,若侧壁具有朝向锯口的中心向内倾斜的自顶部表面至底部表面的斜率,则藉由切割产生的侧壁具有正锥度。锥度可藉由在侧壁与深度轴之间量测的锥角 θ 来界定。若侧壁具有从切口的中心向外倾斜的自顶部表面至底部表面的斜率,则藉由切割产生的侧壁具有负锥度。

[0827] 锥角 θ 可在几度至超过10度的范围内,或有意地更大,并且可受一些雷射处理参数影响,但是不一定受其控制。较大锥度并非许多切割应用的理想结果。此外,最小化的锥度或大约为零的锥度是许多切割应用的理想结果。

[0828] 在一些实施例中,所期望的锥度特性可包括在侧壁与深度轴之间量测的锥角 θ ,其小于或等于5度。在一些实施例中,锥角 θ 小于或等于1度。在一些实施例中,锥角 θ 小于或等于0.5度。在一些实施例中,锥角 θ 小于或等于0.1度。在一些实施例中,所期望的锥度特性可包括侧壁124的其他性质,诸如纹理或光滑度,或纹理或光滑度的均匀性。

[0829] 在一些实施例中,本文揭示的雷射及选择性脉冲能量控制技术可用来产生工件1060中的光化学效应或改变工件1060的基板的组成,诸如用于交联光阻剂来作为特定光点位置,将铟锡氧化物(ITO)图案化,或其他形式的光微影术。

[0830] 本文揭示的此等雷射及选择性脉冲能量控制技术亦在做标记应用中提供用于颜色产生的增强机会及选择性。

[0831] 本文揭示的此等雷射及选择性脉冲能量控制技术亦提供特定应用所需要的功能性标记(诸如纹理化或抛光)的增强机会及选择性。

[0832] 具体而言,本文揭示的此等雷射及选择性脉冲能量控制技术可用来在铝管润滑心轴中产生凹坑或阱以便为内燃机更好地保持油。

[0833] 前文是对本发明的实施例的说明且不应被理解为对本发明的限制。尽管已描述数

个特定示例性实施例,但本领域的技术人员将容易理解在不实质上偏离本发明的新颖性教示及优点的情况下,对所揭示的示范性实施例以及其他实施例的诸多修改是可能的。

[0834] 因此,所有此类修改意欲包括于如权利要求中所界定的本发明的范畴内。举例而言,技艺人士将理解任一句子或段落的标的可与一些或所有其他句子或段落的标的组合,除此类组合互斥的情况外。

[0835] 对本领域的技术人员将显而易见,可在不脱离本发明的基本原理的情况下,对上文所描述实施例的细节进行诸多变化。因而,本发明的范畴应由以下权利要求以及包括在其中的权利要求的等效物来决定。

[0836] 以上所述仅是本发明的优选实施例而已,并非对本发明做任何形式上的限制,虽然本发明已以优选实施例揭露如上,然而并非用以限定本发明,任何熟悉本专业的技术人员,在不脱离本发明技术方案的范围内,当可利用上述揭示的技术内容作出些许更动或修饰为等同变化的等效实施例,但凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰,均仍属于本发明技术方案的范围内。

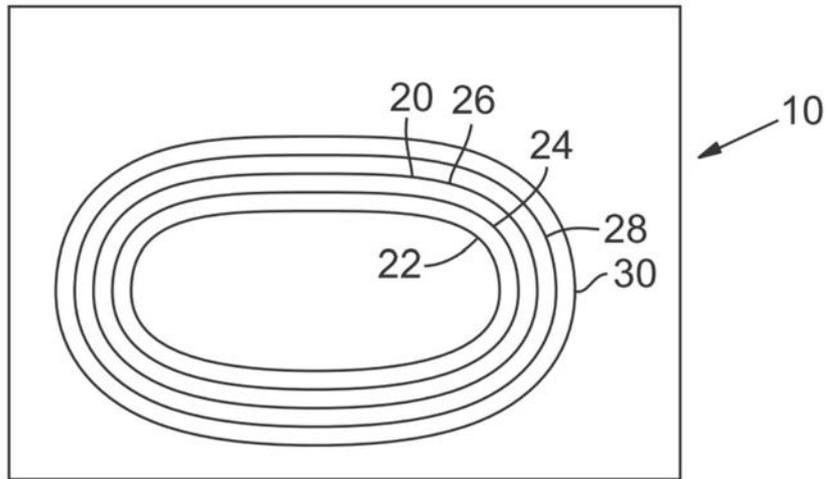


图1A

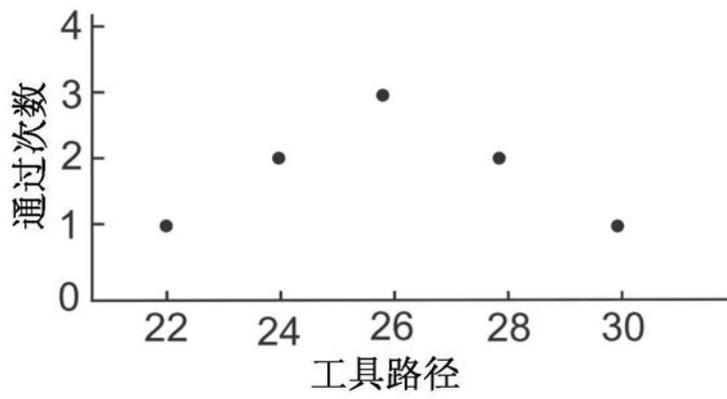


图1B

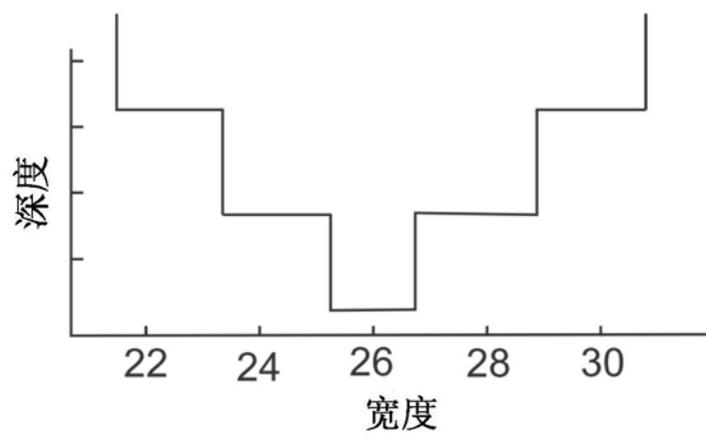


图1C

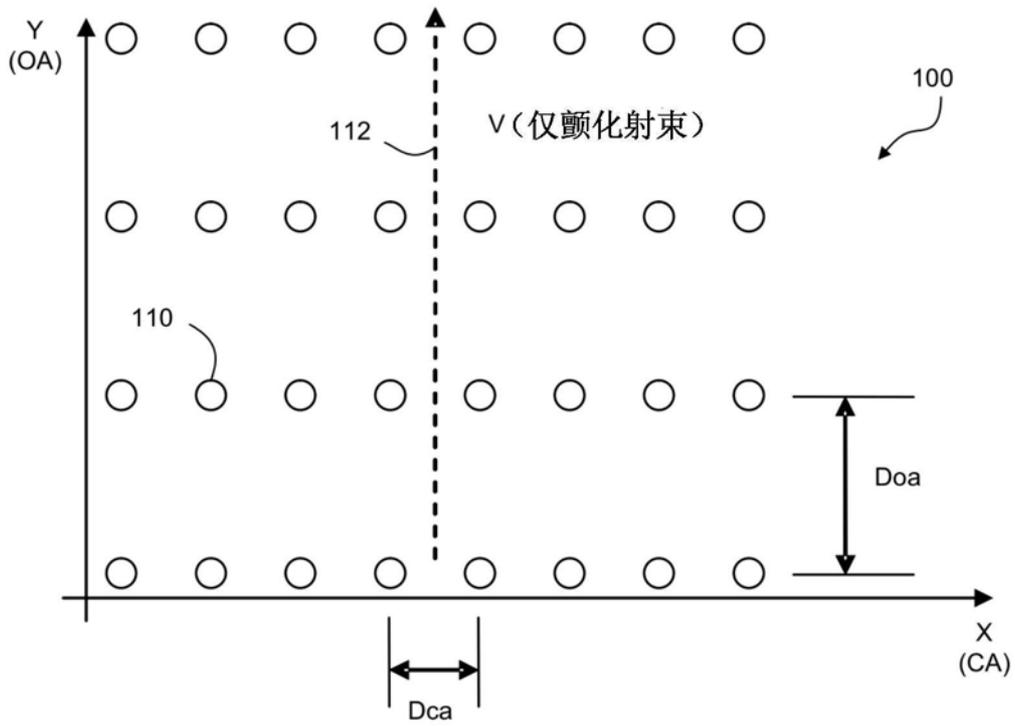


图1D

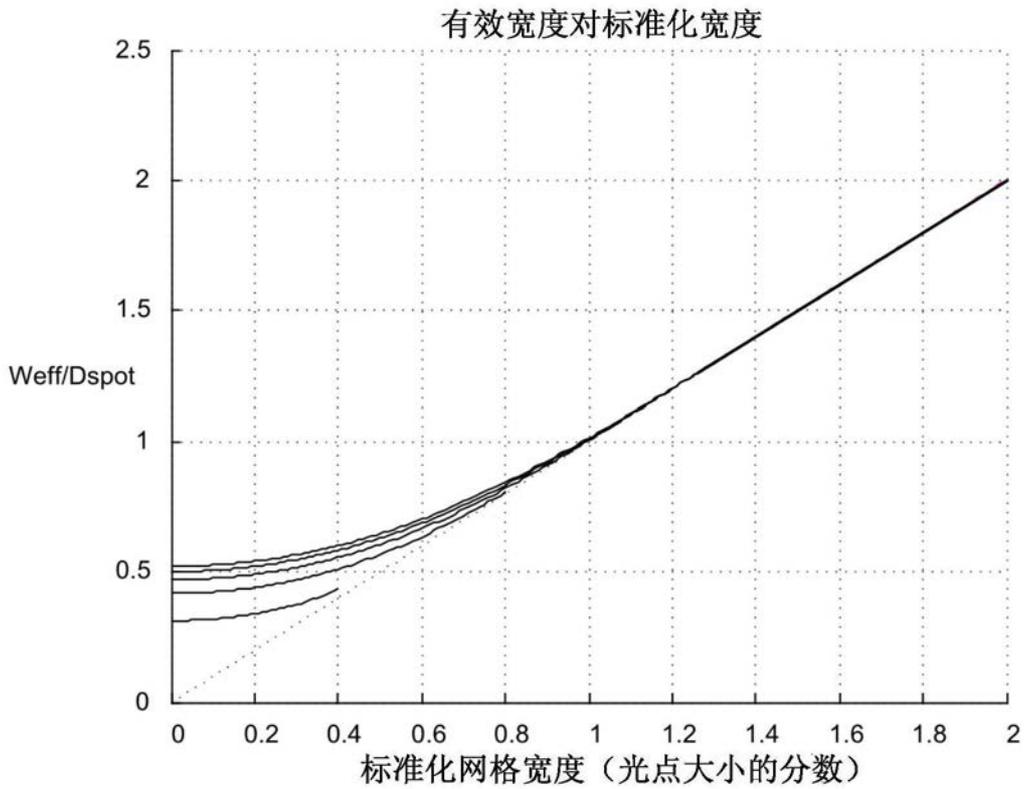


图2

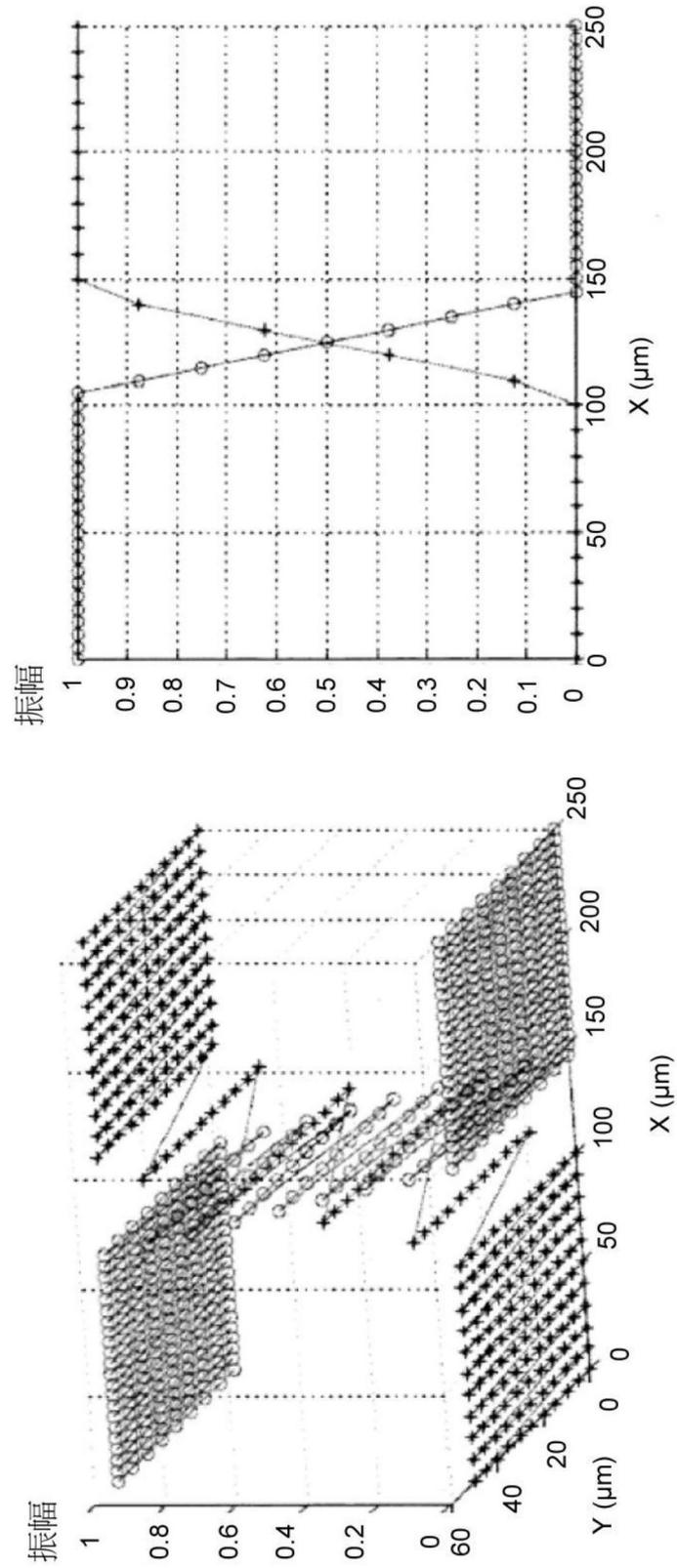


图3

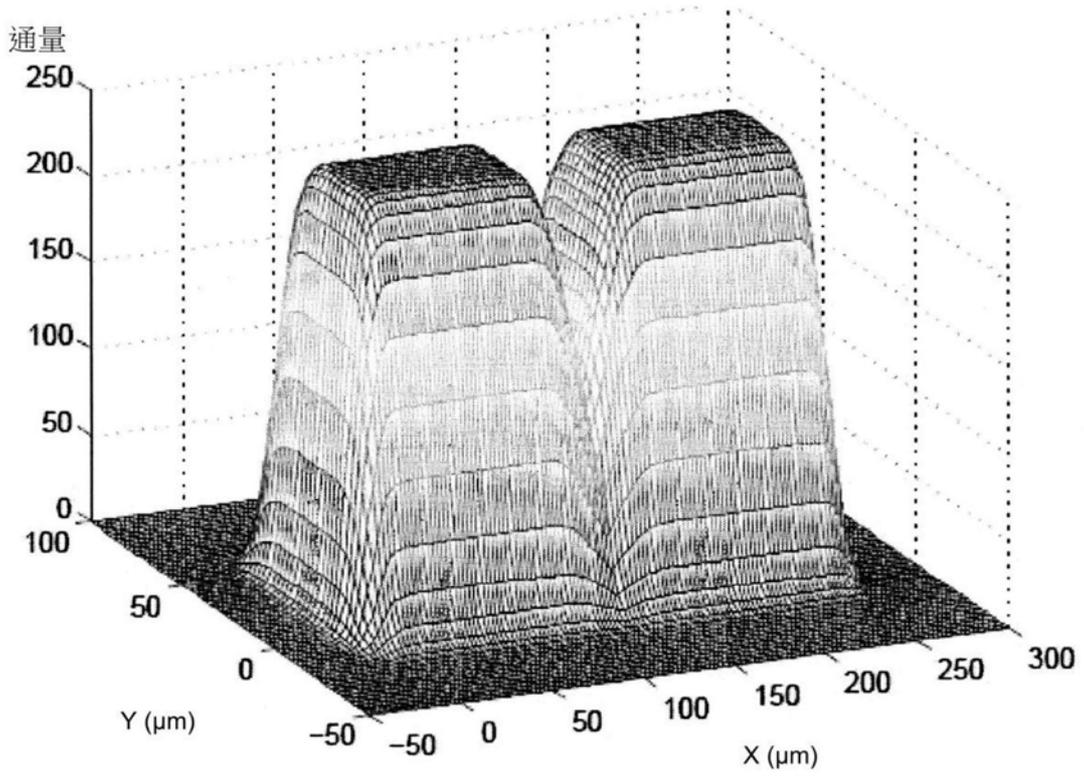


图4

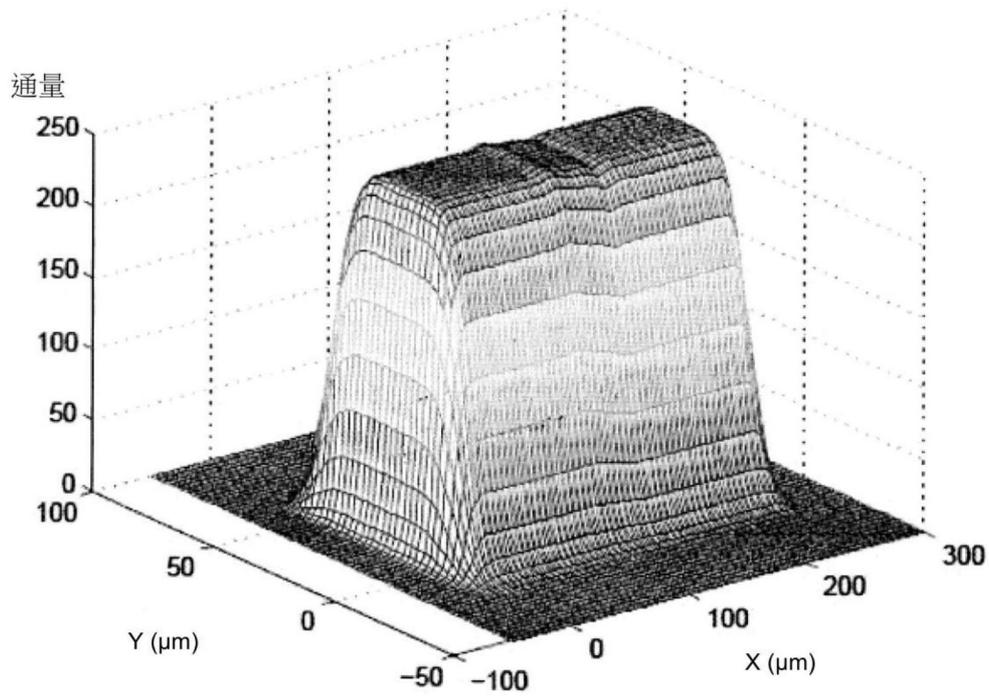


图5

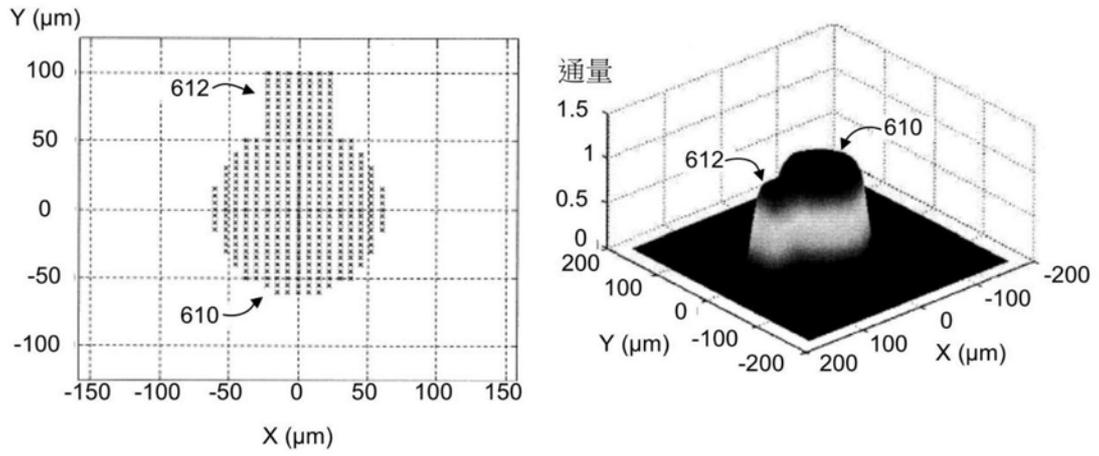


图6

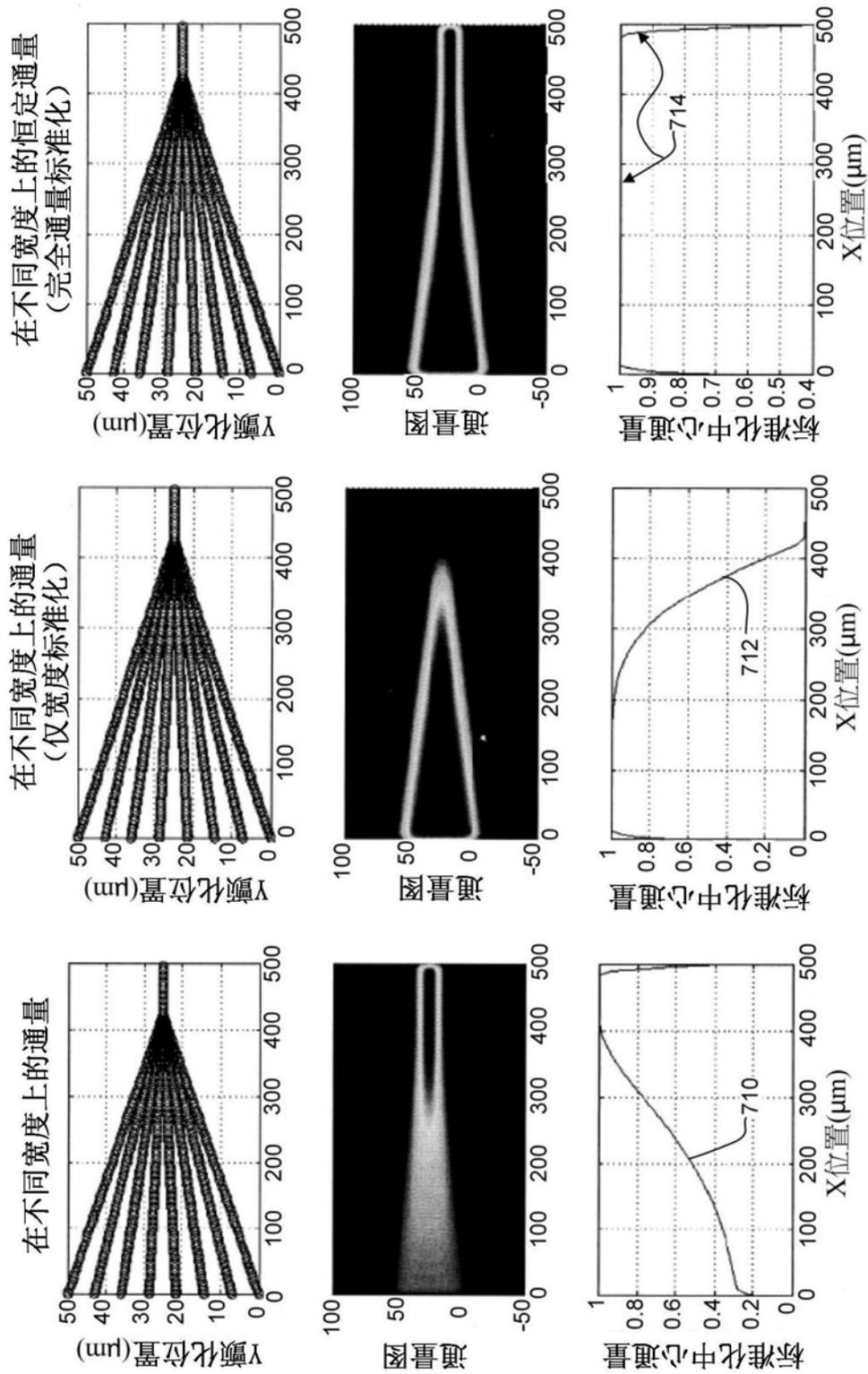


图7

800

		网格宽度(um)					
		1	2	4	6	8	等...
通量 (J/cm ²)	0.2	深度及宽度结果					
	0.4						
	0.6						
	等...						

图8

900

特征ID	向量(V)、 光栅(R)、 刮削(S)	宽度/直径 (um)	深度 (um)	通量 (J/m)	通量 调整	网格宽 度(um)	网格宽 度调整	# Reps	Taod (usec)
1	V	25	20	1.0	0.98	5.0	0.92	NA	1
2	V	50	20	1.0	0.95	23.0	1.01	NA	1
3	R	120	20	1.0	1.01	NA	1.02	2	0.5
4	V	100	15	0.8	1.00	70.0	0.99	NA	1
3	S	50	10	0.5	1.02	25	1.0	NA	1
等...									

图9

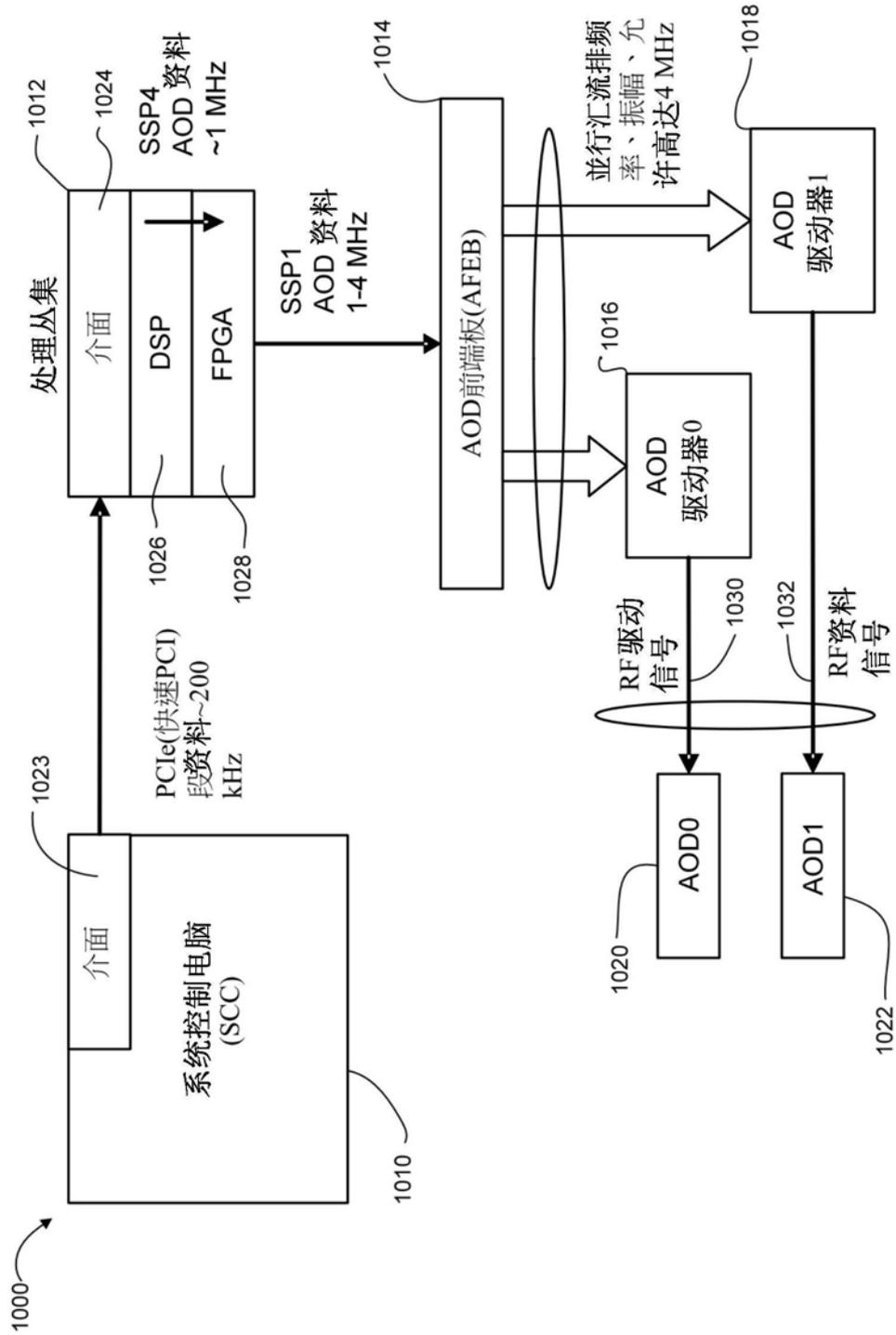


图10

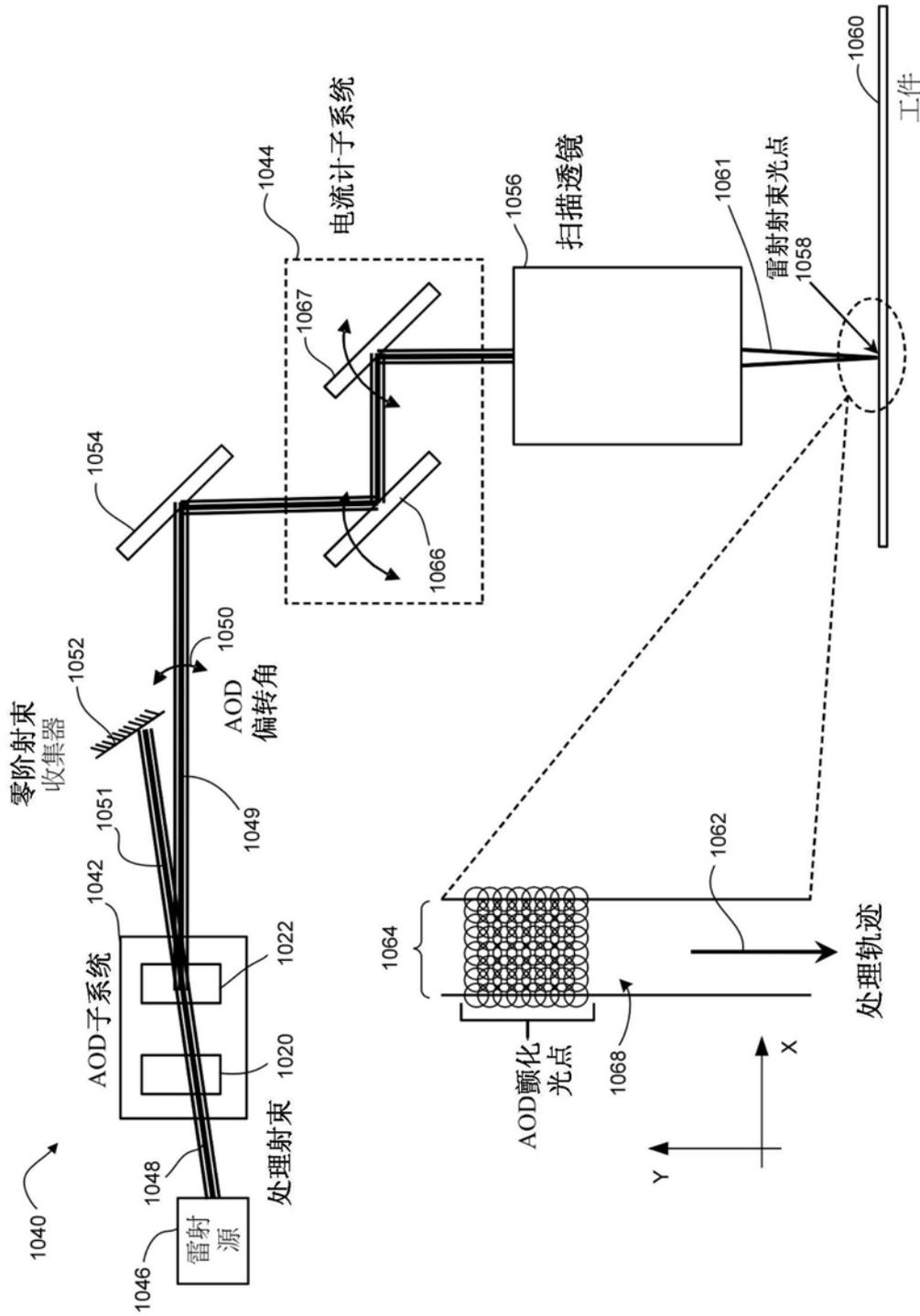


图10A

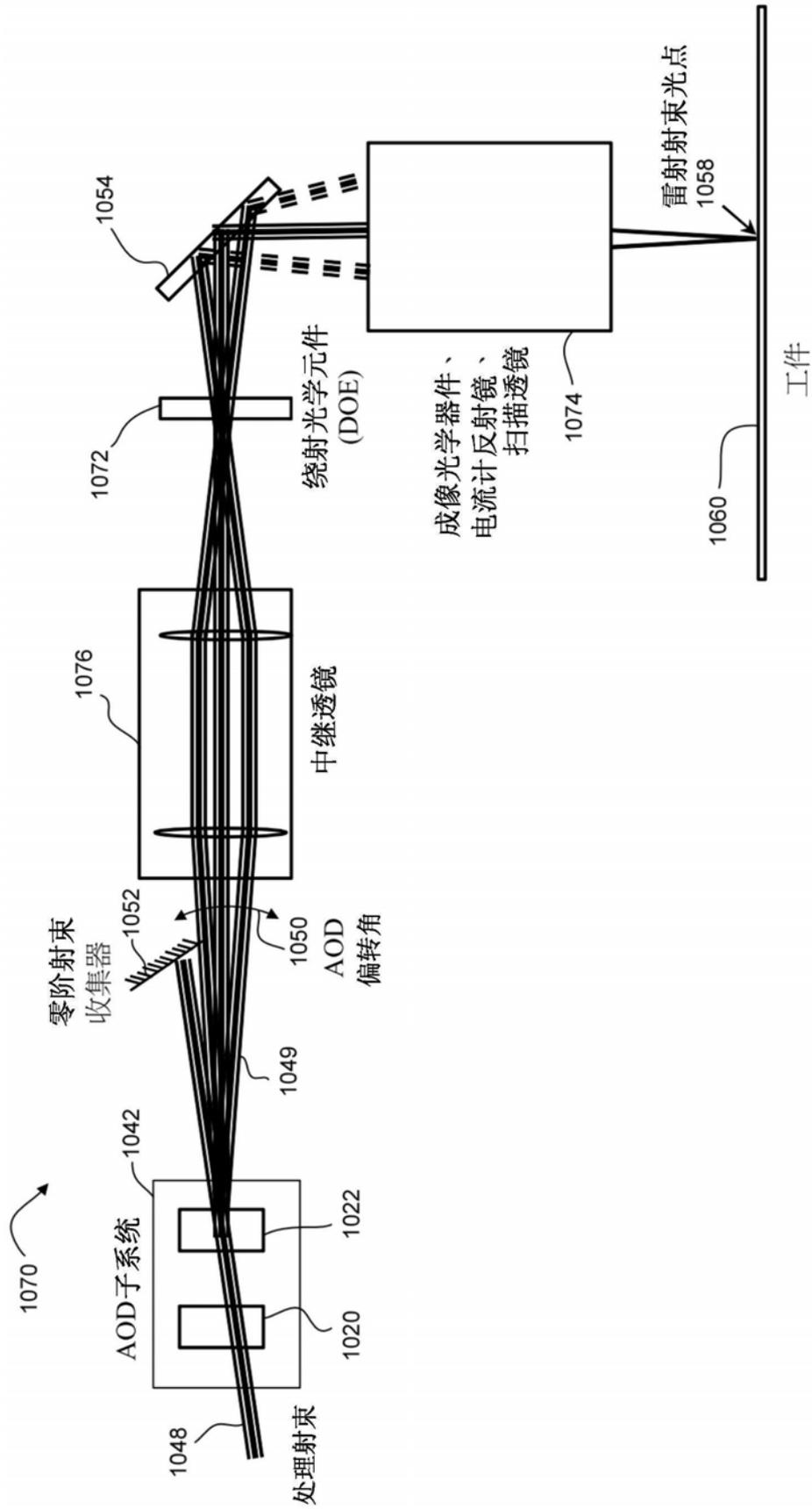


图10B

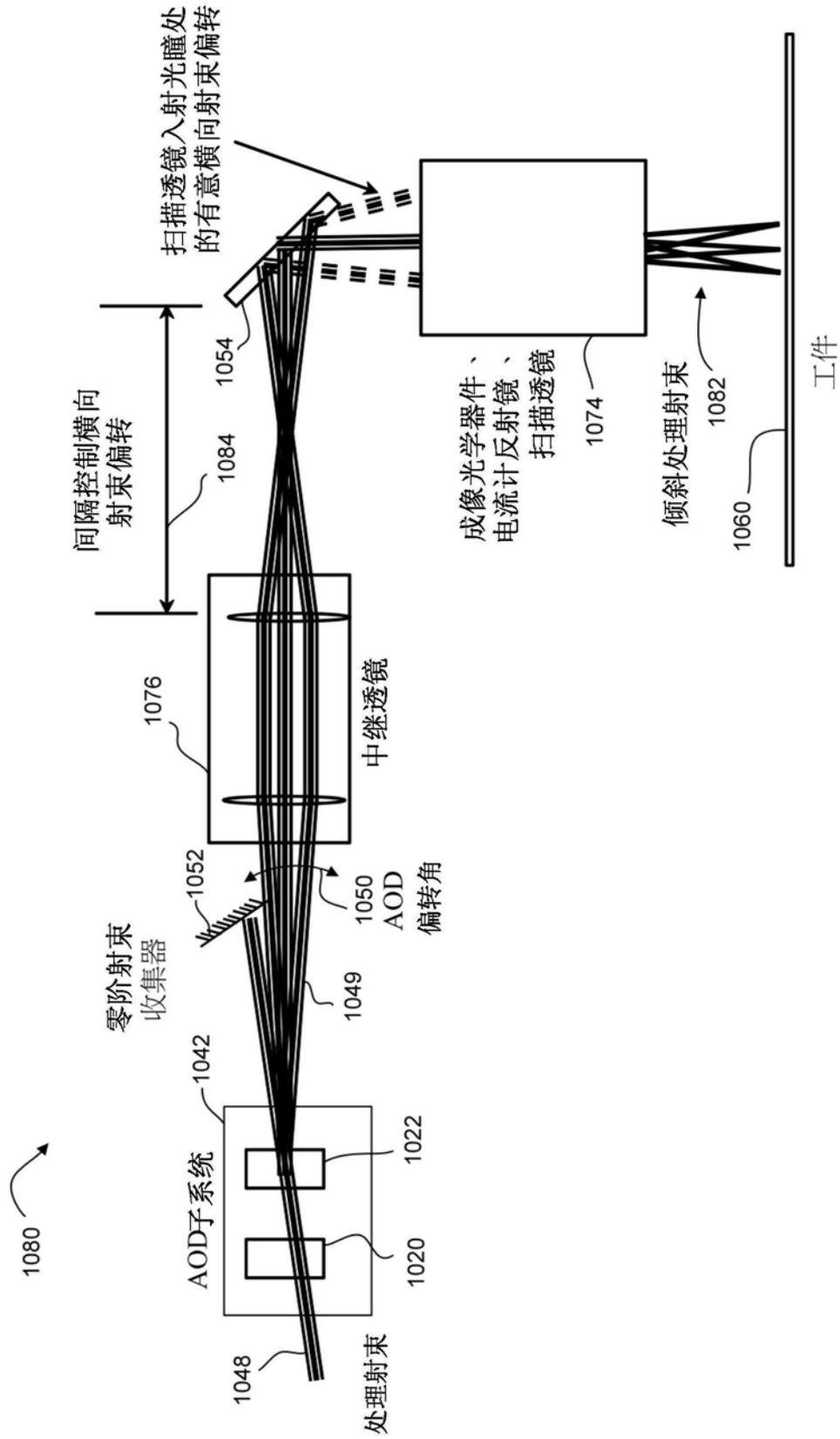


图10C

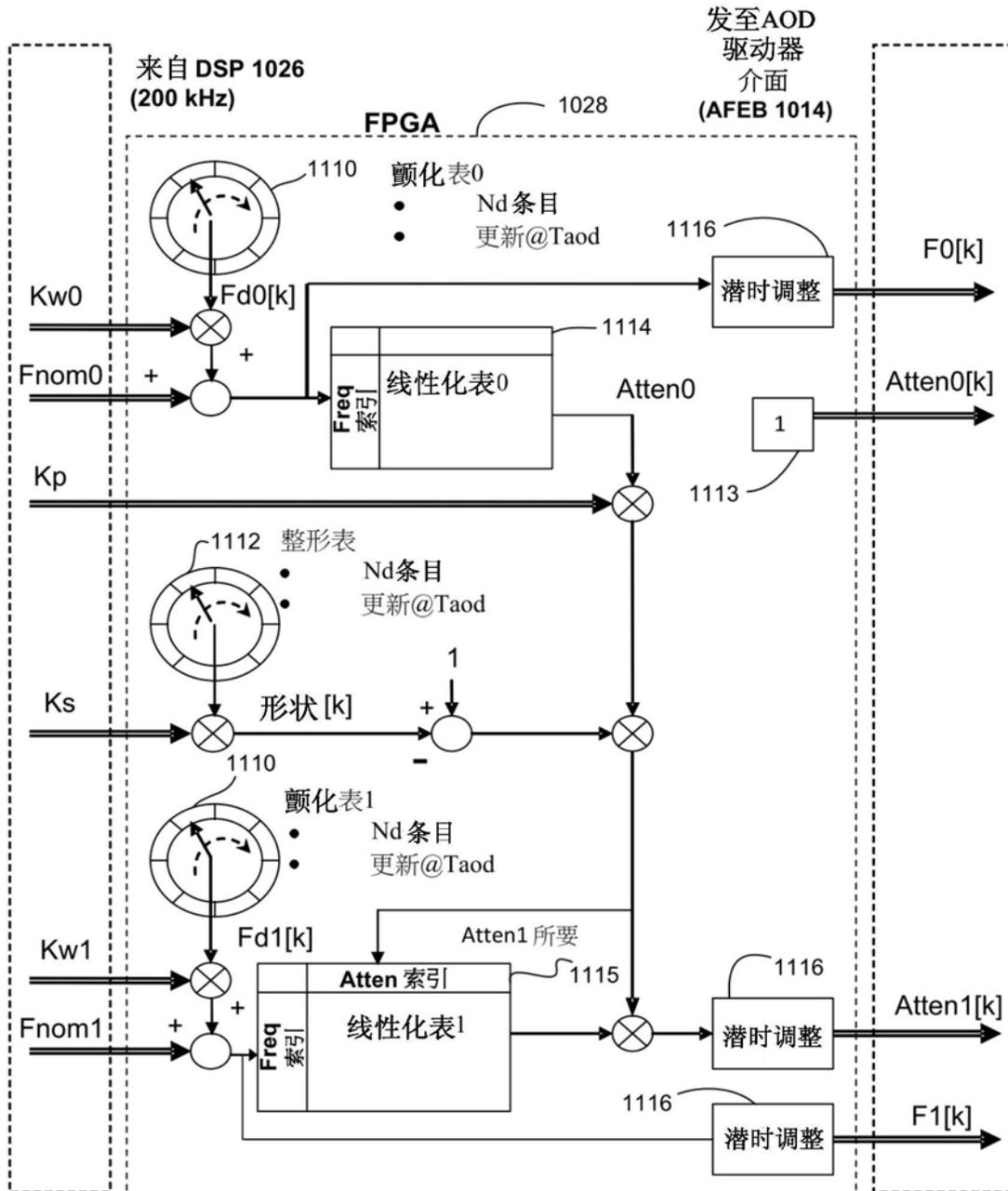


图11

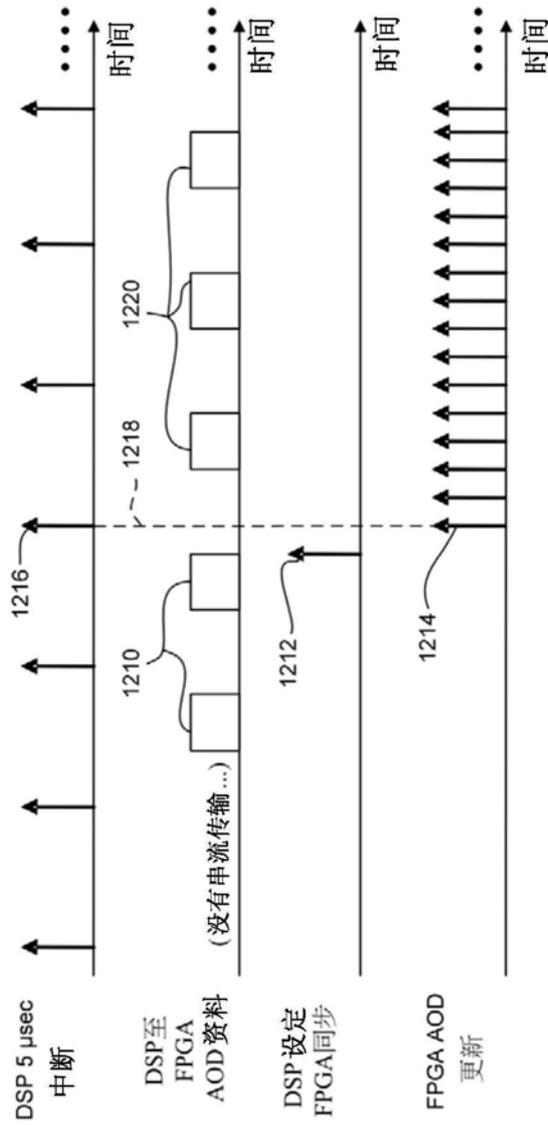


图12

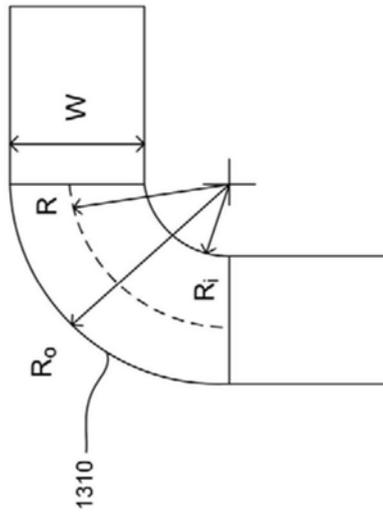


图13

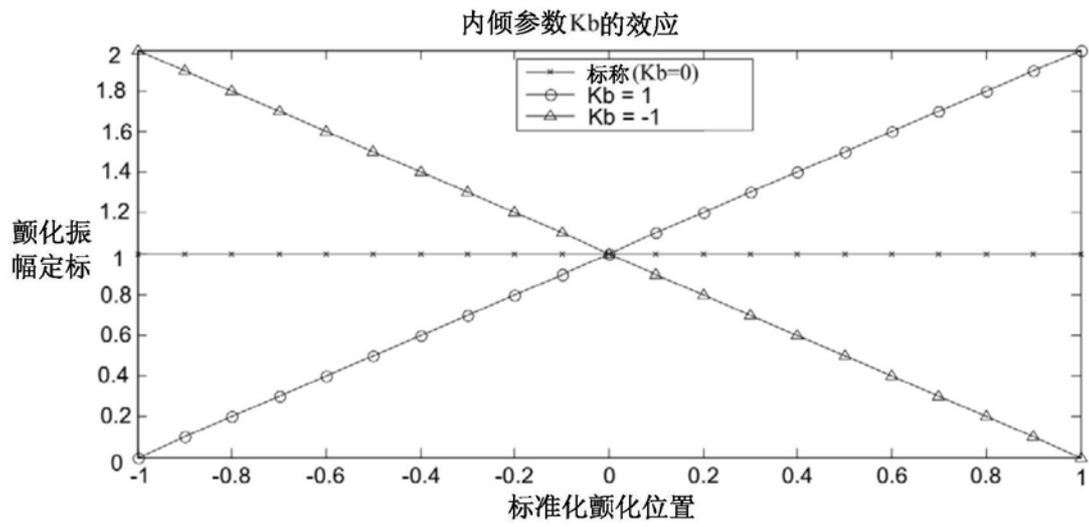


图14

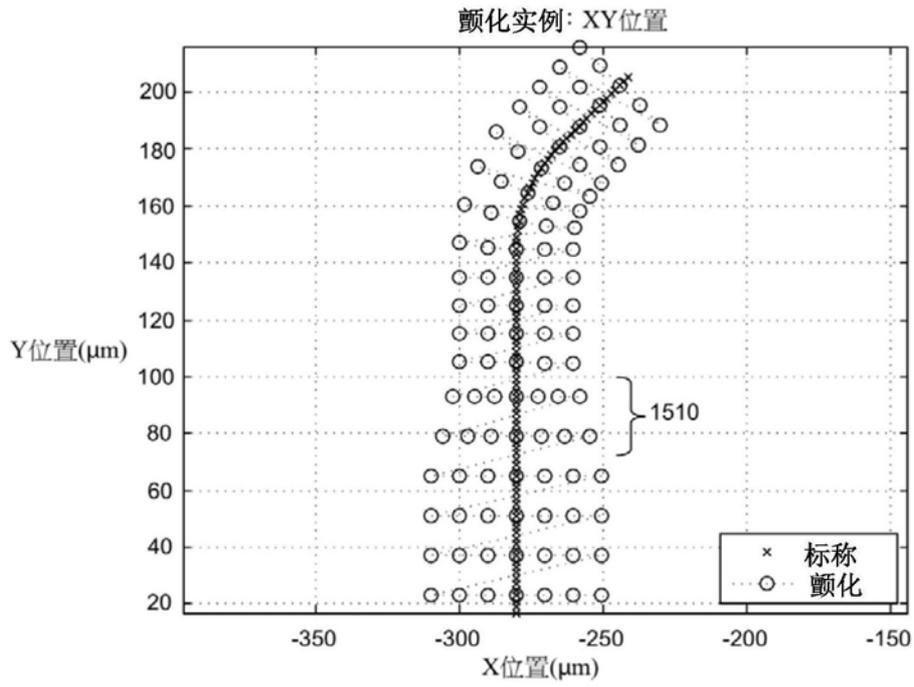


图15

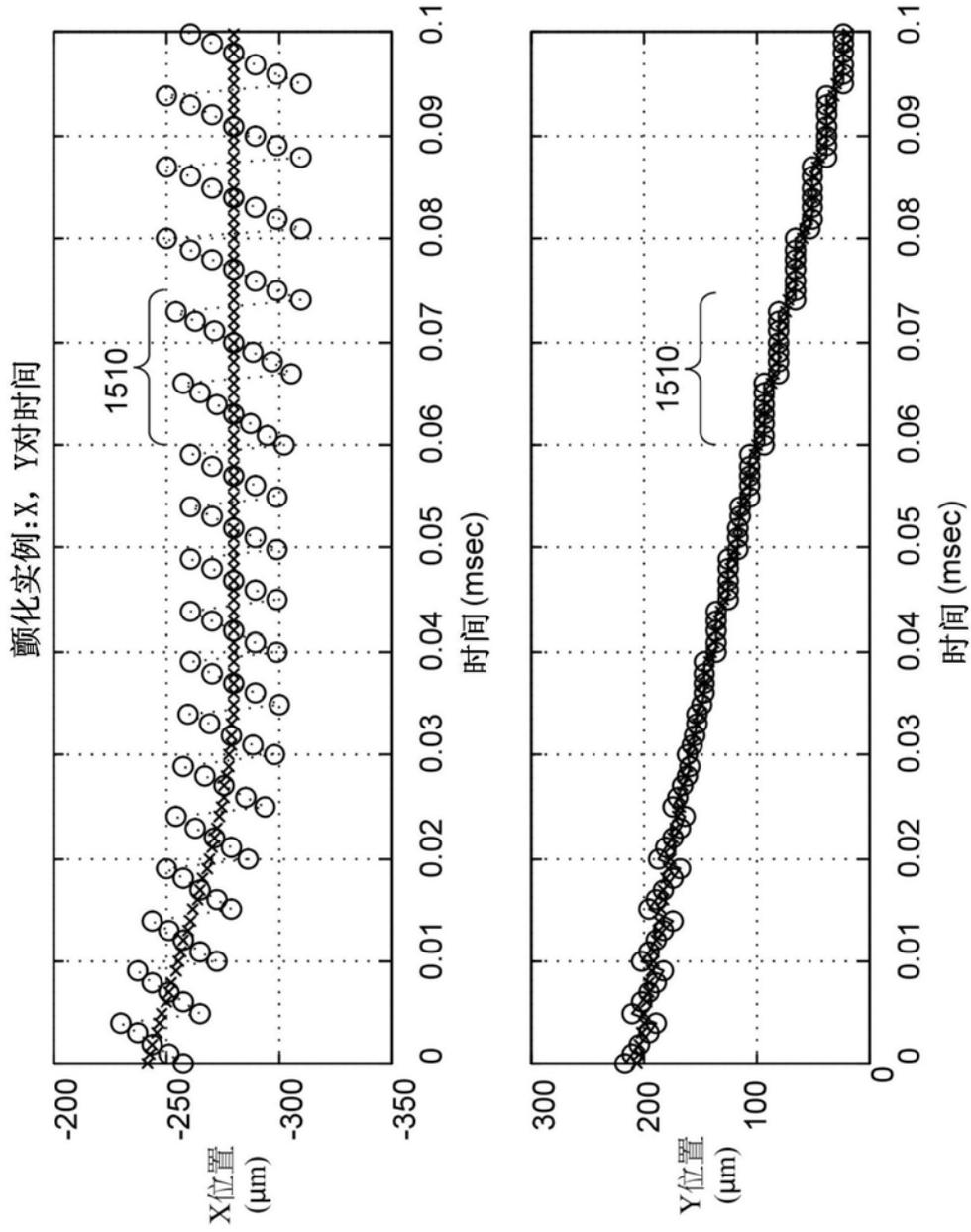


图16

每个Temd周期更新一次 每个颤化列更新一次 处理段

每个Temd周期更新一次											每个颤化列更新一次														
颤化时间		原始颤化		定标颤化		处理段							颤化时间		原始颤化		定标颤化		处理段						
Seg#	列	(usec)	Xc(um)	Yc(um)	(um)	(um)	Kw	Kd	Kb	Ks	Seg#	列	(usec)	Xc(um)	Yc(um)	(um)	(um)	Kw	Kd	Kb	Ks				
1	1	0	-241.6	205.0	-20	-20	1	0	0	0	3	11	50	-280.4	118.9	-20	-20	1	1	0	0				
1	1	1	-243.0	203.6	-10	-10	1	0	0	0	3	11	51	-280.4	116.9	-10	-10	1	1	0	0				
1	1	2	-244.4	202.2	0	0	1	0	0	0	3	11	52	-280.4	114.9	0	0	1	1	0	0				
1	1	3	-245.9	200.8	10	10	1	0	0	0	3	11	53	-280.4	112.9	10	10	1	1	0	0				
1	1	4	-247.3	199.3	20	20	1	0	0	0	3	11	54	-280.4	110.9	20	20	1	1	0	0				
1	2	5	-248.7	197.9	-20	-20	1	0.25	0	0	3	12	55	-280.4	108.9	-20	-20	1	1	0	0				
1	2	6	-250.1	196.5	-10	-10	1	0.25	0	0	3	12	56	-280.4	106.9	-10	-10	1	1	0	0				
1	2	7	-251.5	195.1	0	0	1	0.25	0	0	3	12	57	-280.4	104.9	0	0	1	1	0	0				
1	2	8	-252.9	193.7	10	10	1	0.25	0	0	3	12	58	-280.4	102.9	10	10	1	1	0	0				
1	2	9	-254.3	192.3	20	20	1	0.25	0	0	3	12	59	-280.4	100.9	20	20	1	1	0	0				
1	3	10	-255.7	190.9	-20	-20	1	0.5	0	0	4	13	60	-280.4	98.9	-30	-22.8	0.76	1.06	0	0				
1	3	11	-257.1	189.4	-10	-10	1	0.5	0	0	4	13	61	-280.4	96.9	-20	-15.2	0.76	1.06	0	0				
1	3	12	-258.5	188.0	0	0	1	0.5	0	0	4	13	62	-280.4	94.9	-10	-7.6	0.76	1.06	0	0				
1	3	13	-259.9	186.6	10	10	1	0.5	0	0	4	13	63	-280.4	92.9	0	0.0	0.76	1.06	0	0				
1	3	14	-261.3	185.2	20	20	1	0.5	0	0	4	13	64	-280.4	90.9	10	7.6	0.76	1.06	0	0				
1	4	15	-262.7	183.8	-20	-20	1	0.75	0	0	4	13	65	-280.4	88.9	20	15.2	0.76	1.06	0	0				
1	4	16	-264.1	182.4	-10	-10	1	0.75	0	0	4	13	66	-280.4	86.9	30	22.8	0.76	1.06	0	0				
1	4	17	-265.5	180.9	0	0	1	0.75	0	0	4	14	67	-280.4	84.9	-30	-26.1	0.87	1.22	0	0				
1	4	18	-266.9	179.5	10	10	1	0.75	0	0	4	14	68	-280.4	83.0	-20	-17.4	0.87	1.22	0	0				
1	4	19	-268.2	178.0	20	20	1	0.75	0	0	4	14	69	-280.4	81.0	-10	-8.7	0.87	1.22	0	0				
2	5	20	-269.5	176.4	-20	-20	1	1	0.5	0	4	14	70	-280.4	79.0	0	0.0	0.87	1.22	0	0				
2	5	21	-270.7	174.8	-10	-10	1	1	0.5	0	4	14	71	-280.4	77.0	10	8.7	0.87	1.22	0	0				
2	5	22	-271.8	173.2	0	0	1	1	0.5	0	4	14	72	-280.4	75.0	20	17.4	0.87	1.22	0	0				
2	5	23	-272.9	171.5	10	10	1	1	0.5	0	4	14	73	-280.4	73.0	30	26.1	0.87	1.22	0	0				
2	5	24	-273.9	169.8	20	20	1	1	0.5	0	5	15	74	-280.4	71.0	-30	-30.0	1	1.4	0	0				
2	6	25	-274.8	168.0	-20	-20	1	1	0.5	0	5	15	75	-280.4	69.0	-20	-20.0	1	1.4	0	0				
2	6	26	-275.7	166.2	-10	-10	1	1	0.5	0	5	15	76	-280.4	67.0	-10	-10.0	1	1.4	0	0				
2	6	27	-276.5	164.4	0	0	1	1	0.5	0	5	15	77	-280.4	65.0	0	0.0	1	1.4	0	0				
2	6	28	-277.2	162.5	10	10	1	1	0.5	0	5	15	78	-280.4	63.0	10	10.0	1	1.4	0	0				
2	6	29	-277.9	160.6	20	20	1	1	0.5	0	5	15	79	-280.4	61.0	20	20.0	1	1.4	0	0				
2	7	30	-278.4	158.7	-20	-20	1	1	0.5	0	5	15	80	-280.4	59.0	30	30.0	1	1.4	0	0				
2	7	31	-279.0	156.8	-10	-10	1	1	0.5	0	5	16	81	-280.4	57.0	-30	-30.0	1	1.4	0	0				
2	7	32	-279.4	154.8	0	0	1	1	0.5	0	5	16	82	-280.4	55.0	-20	-20.0	1	1.4	0	0				
2	7	33	-279.7	152.9	10	10	1	1	0.5	0	5	16	83	-280.4	53.0	-10	-10.0	1	1.4	0	0				
2	7	34	-280.0	150.9	20	20	1	1	0.5	0	5	16	84	-280.4	51.0	0	0.0	1	1.4	0	0				
3	8	35	-280.2	148.9	-20	-20	1	1	0	0	5	16	85	-280.4	49.0	10	10.0	1	1.4	0	0				
3	8	36	-280.3	146.9	-10	-10	1	1	0	0	5	16	86	-280.4	47.0	20	20.0	1	1.4	0	0				
3	8	37	-280.4	144.9	0	0	1	1	0	0	5	16	87	-280.4	45.0	30	30.0	1	1.4	0	0				
3	8	38	-280.4	142.9	10	10	1	1	0	0	5	17	88	-280.4	43.0	-30	-30	1	1.4	0	0				
3	8	39	-280.4	140.9	20	20	1	1	0	0	5	17	89	-280.4	41.0	-20	-20	1	1.4	0	0				
3	9	40	-280.4	138.9	-20	-20	1	1	0	0	5	17	90	-280.4	39.0	-10	-10	1	1.4	0	0				
3	9	41	-280.4	136.9	-10	-10	1	1	0	0	5	17	91	-280.4	37.0	0	0	1	1.4	0	0				
3	9	42	-280.4	134.9	0	0	1	1	0	0	5	17	92	-280.4	35.0	10	10	1	1.4	0	0				
3	9	43	-280.4	132.9	10	10	1	1	0	0	5	17	93	-280.4	33.0	20	20	1	1.4	0	0				
3	9	44	-280.4	130.9	20	20	1	1	0	0	5	17	94	-280.4	31.0	30	30	1	1.4	0	0				
3	10	45	-280.4	128.9	-20	-20	1	1	0	0	5	18	95	-280.4	29.0	-30	-30	1	1.4	0	0				
3	10	46	-280.4	126.9	-10	-10	1	1	0	0	5	18	96	-280.4	27.0	-20	-20	1	1.4	0	0				
3	10	47	-280.4	124.9	0	0	1	1	0	0	5	18	97	-280.4	25.0	-10	-10	1	1.4	0	0				
3	10	48	-280.4	122.9	10	10	1	1	0	0	5	18	98	-280.4	23.0	0	0	1	1.4	0	0				
3	10	49	-280.4	120.9	20	20	1	1	0	0	5	18	99	-280.4	21.0	10	10	1	1.4	0	0				
											5	18	100	-280.4	19.0	20	20	1	1.4	0	0				
											5	18	101	-280.4	17.0	30	30	1	1.4	0	0				

5个颤化点

过渡段 1510

7个颤化点

图17

失真 (误差定标10.0x)

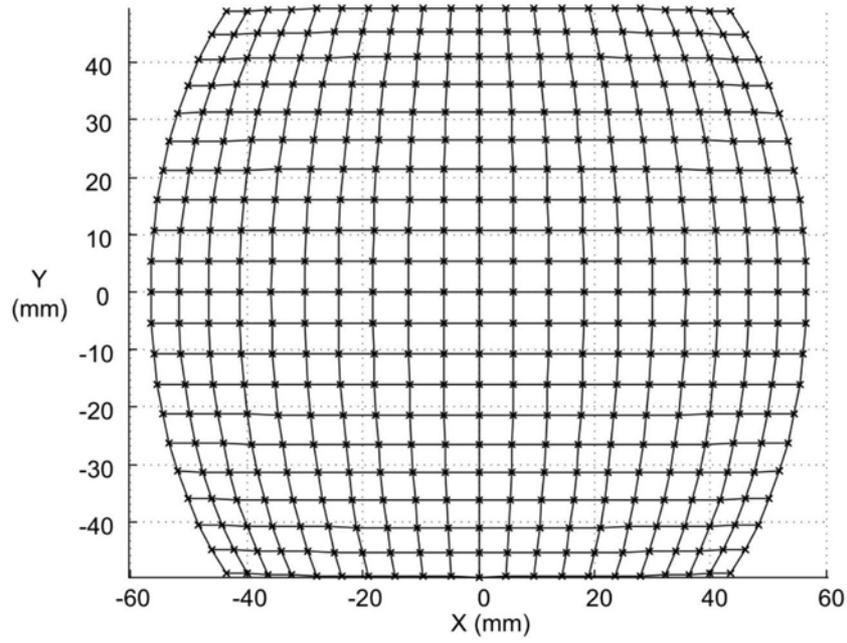


图18

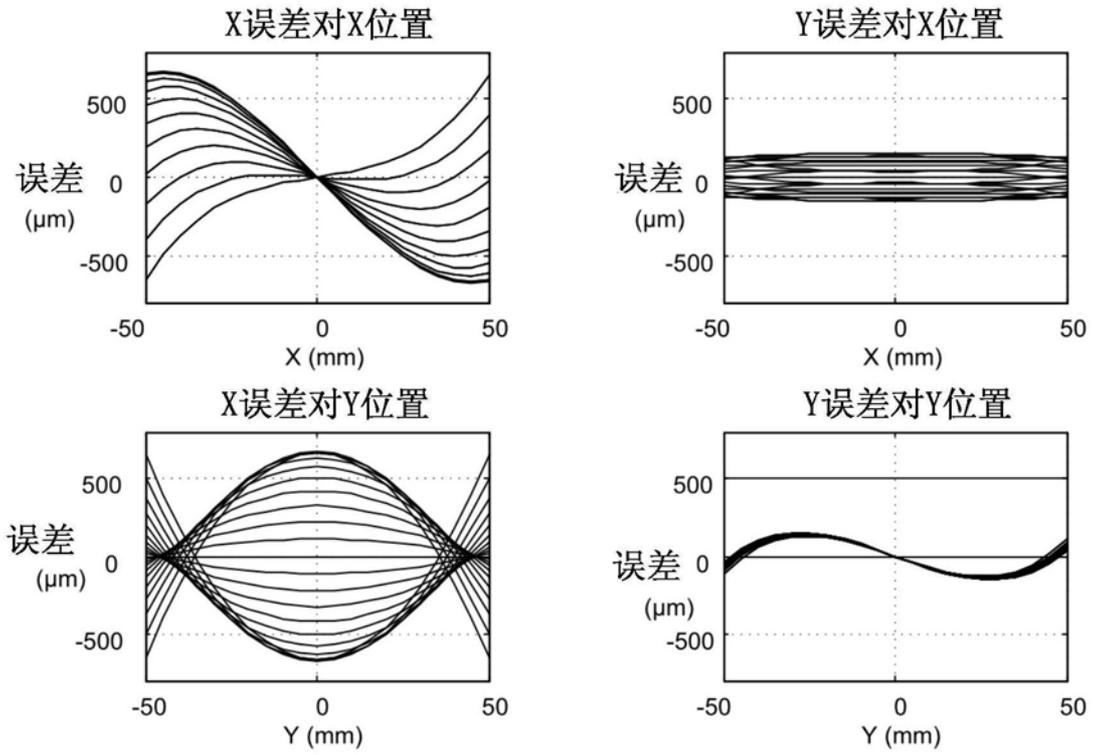


图19

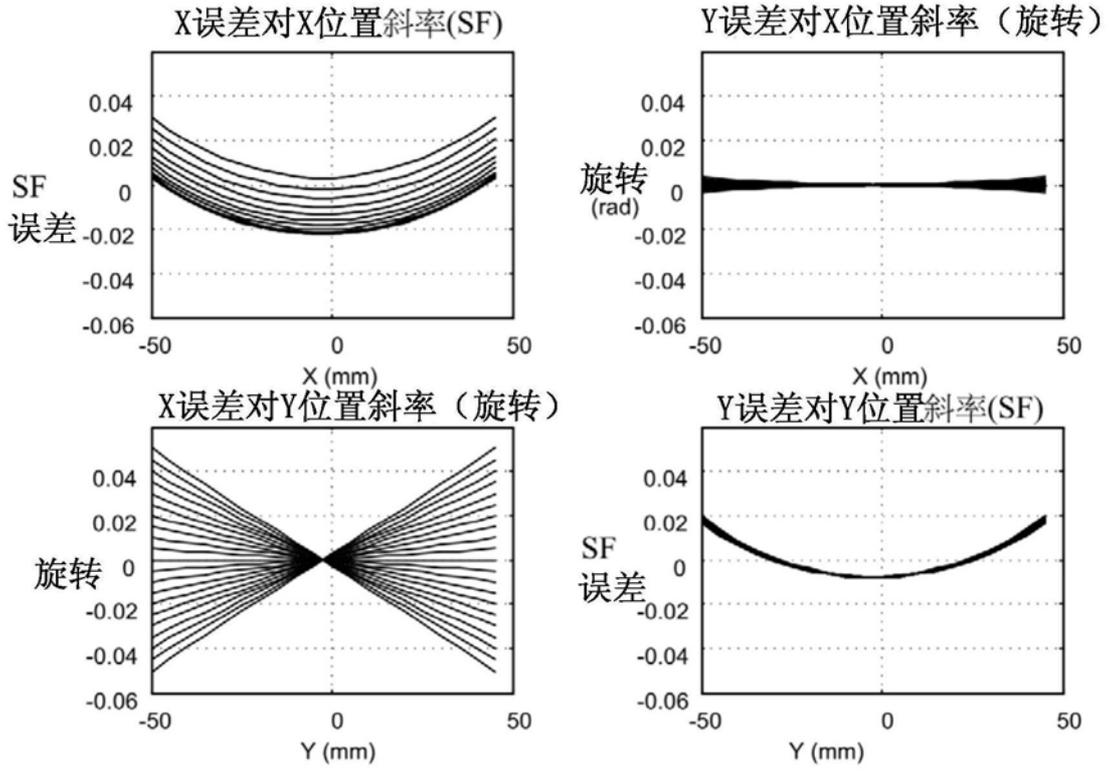


图20

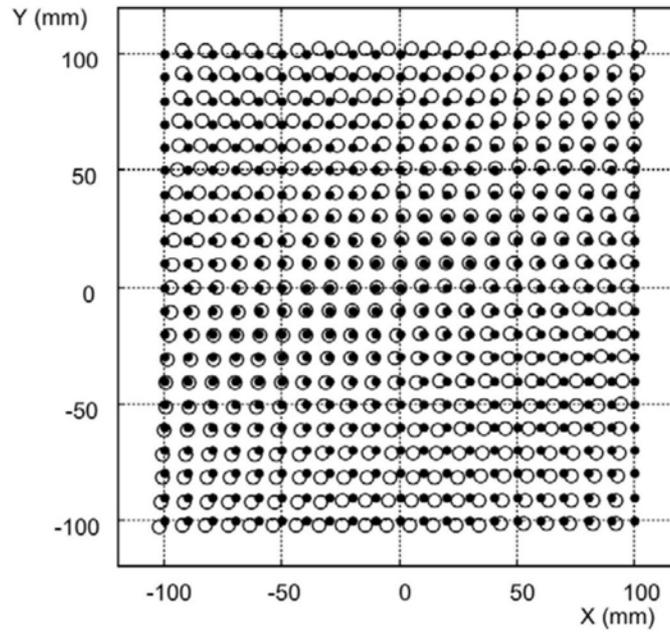


图21

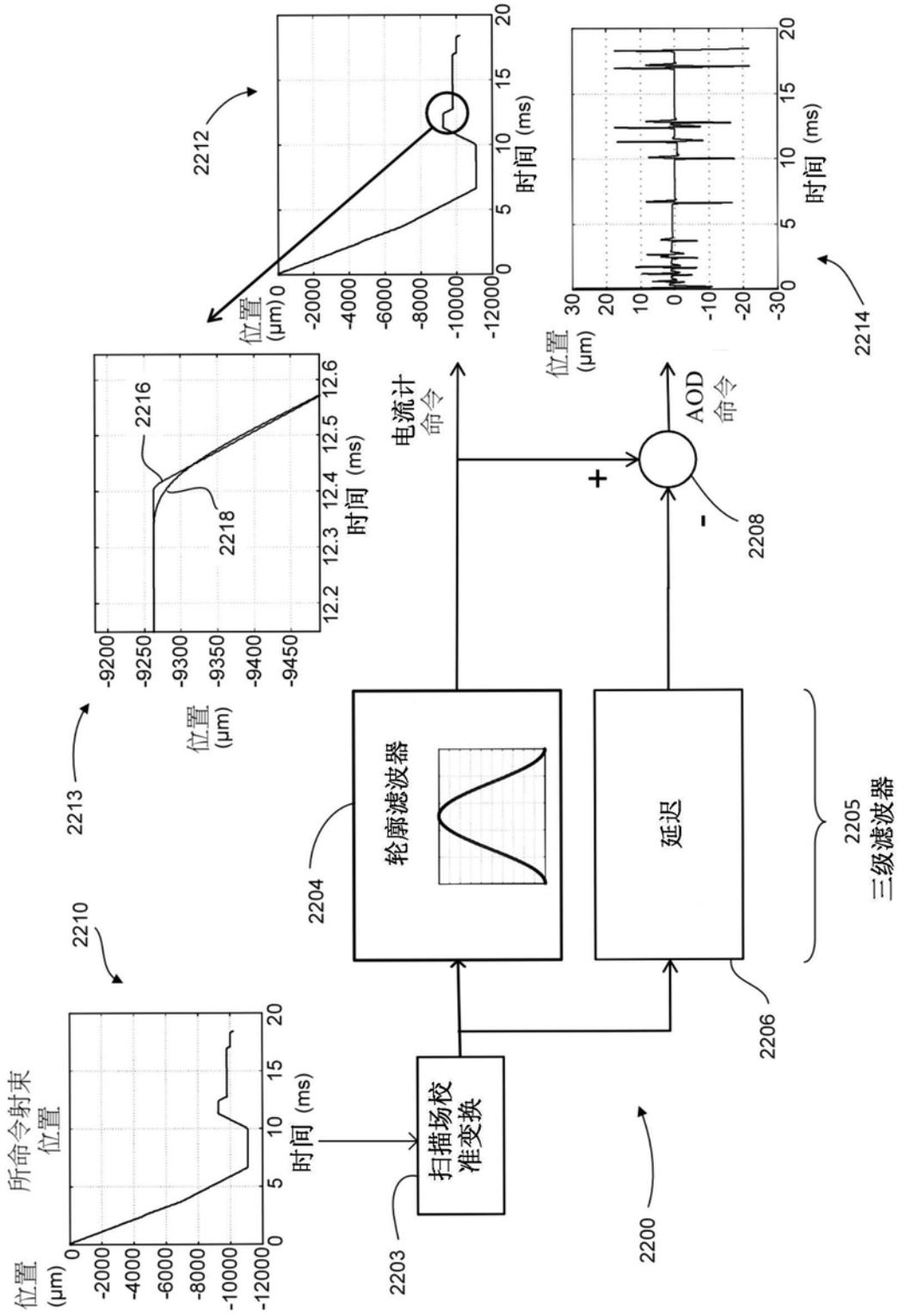


图22

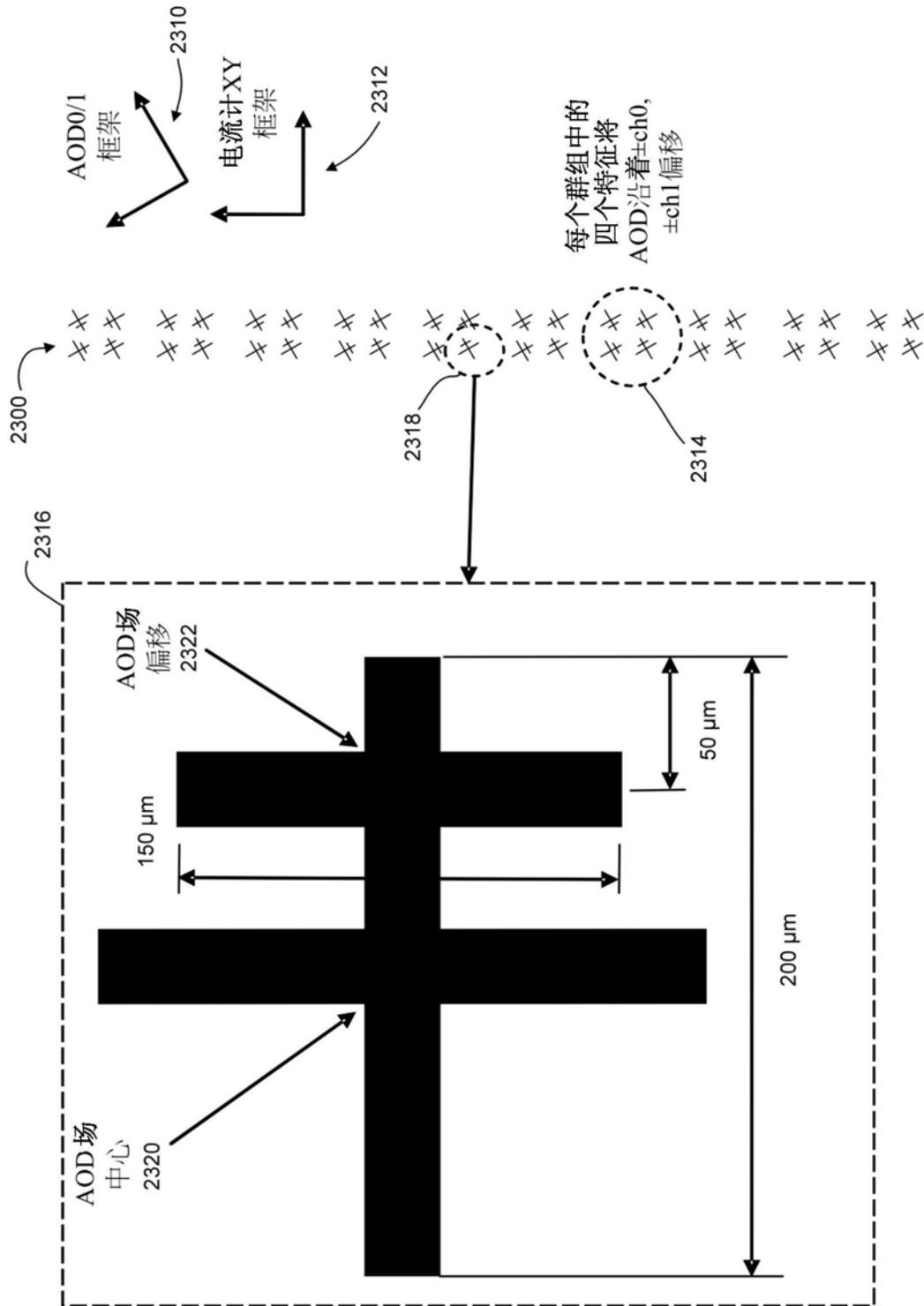


图23

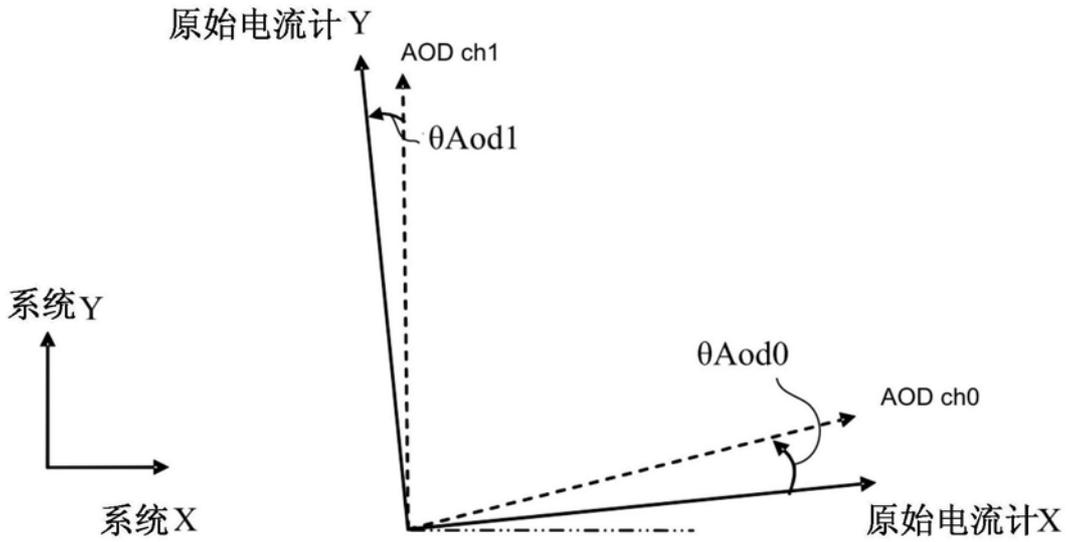


图24

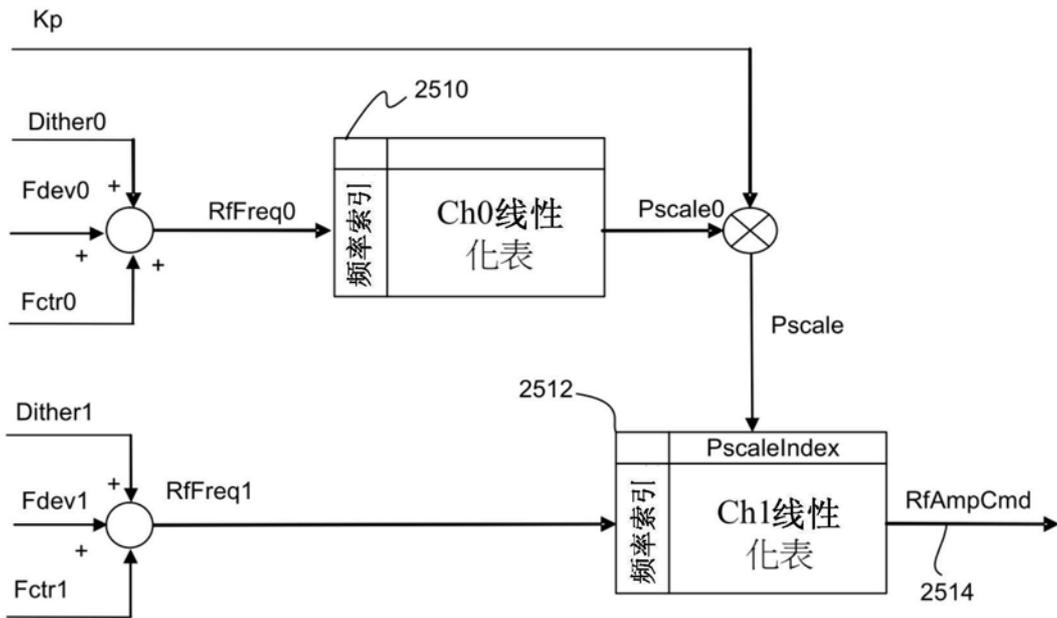


图25

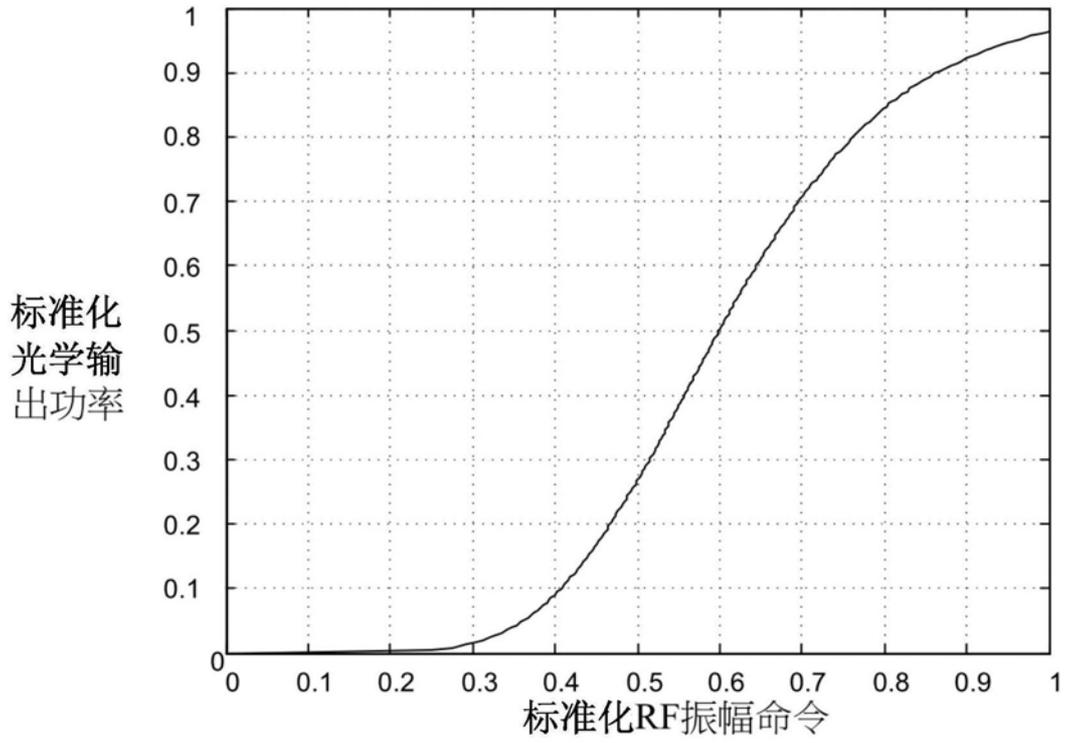


图26

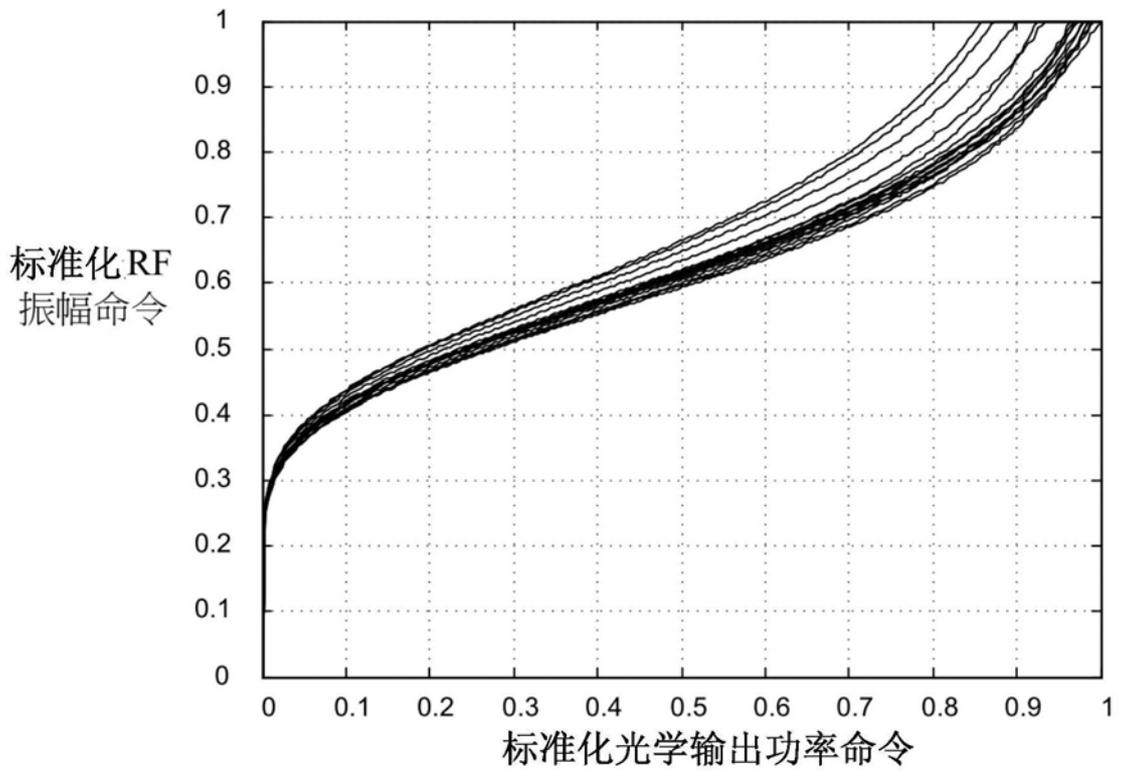


图27

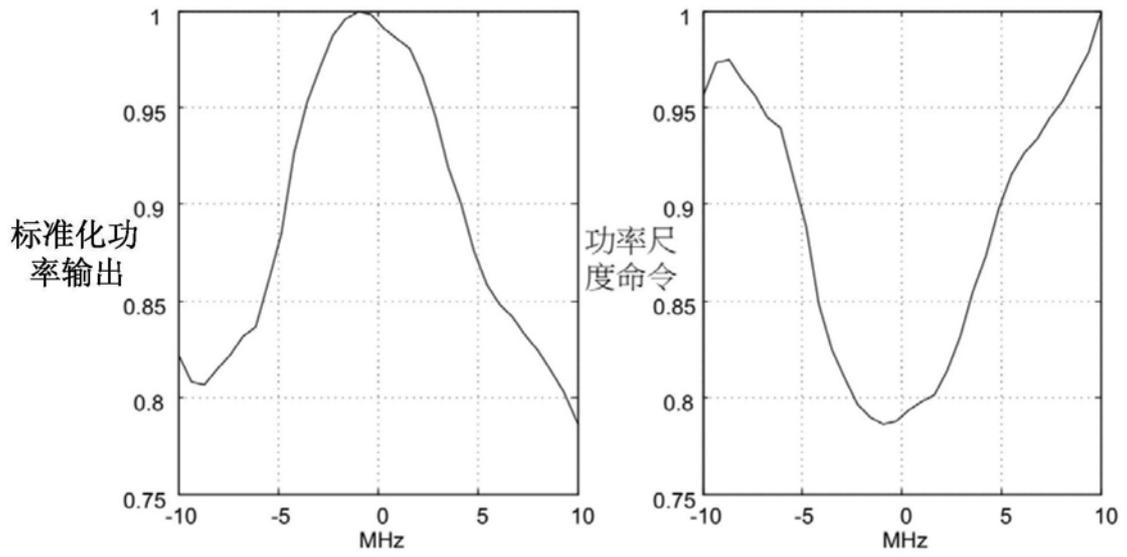


图28

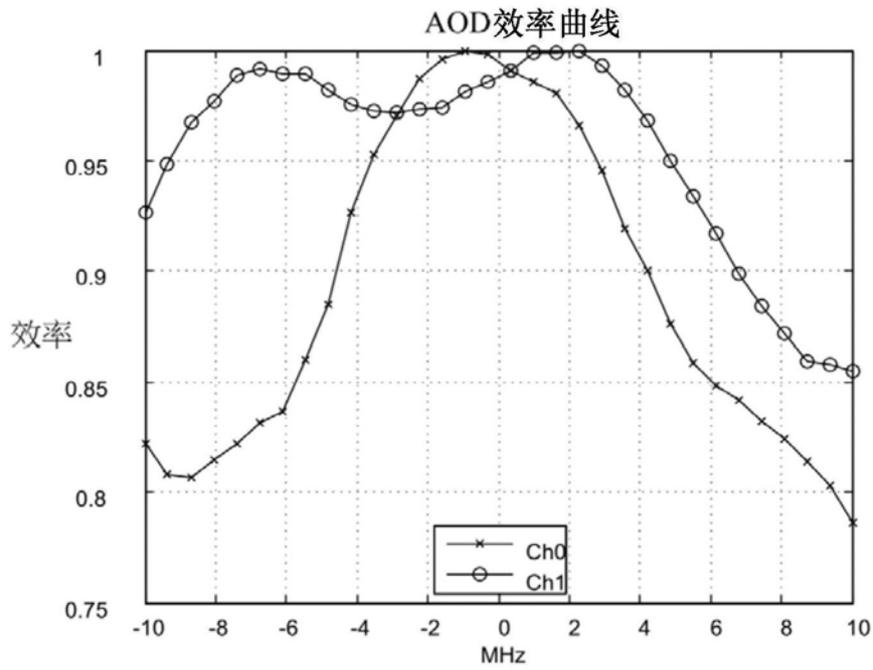


图29

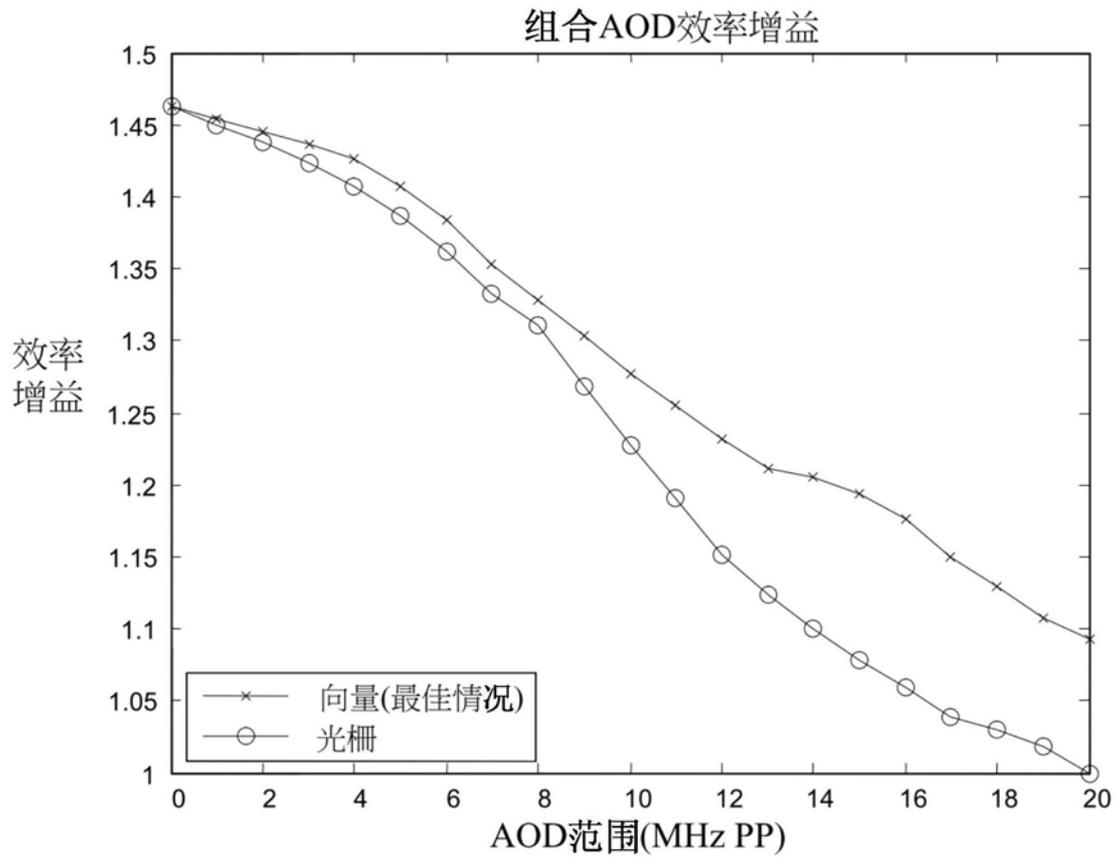


图30

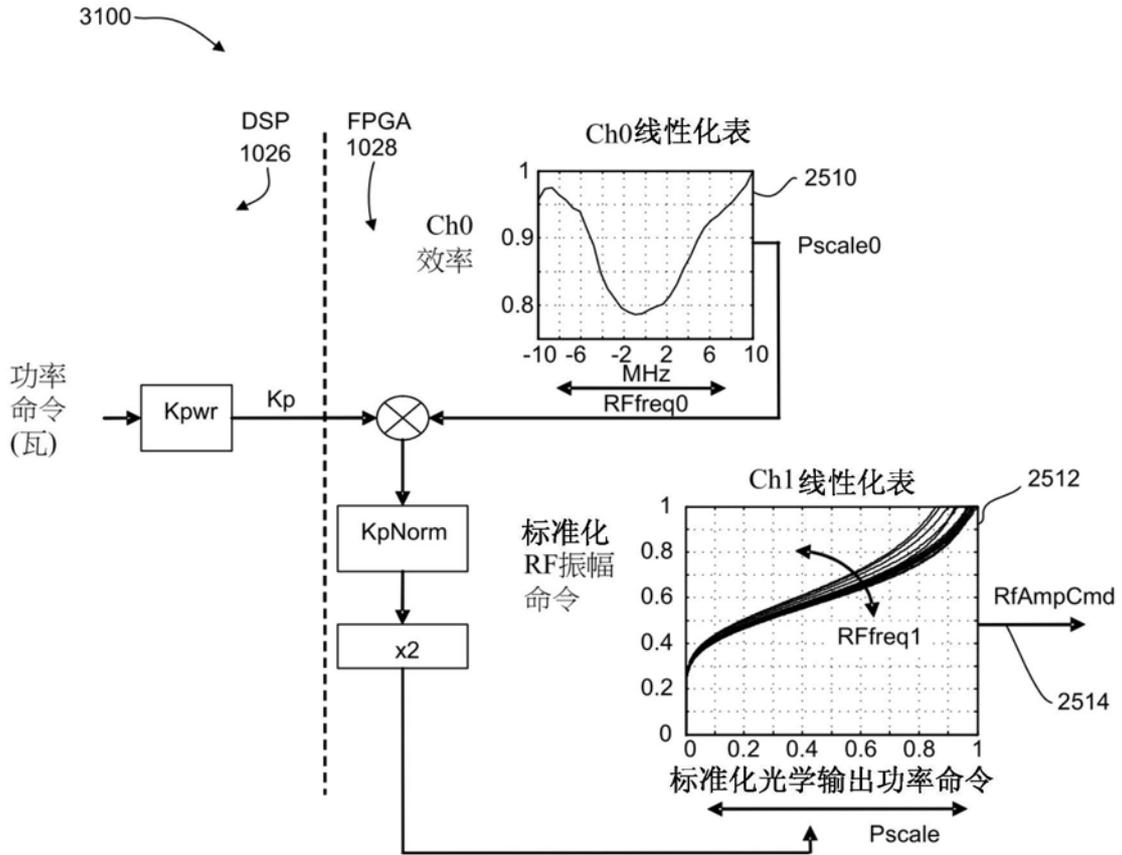


图31

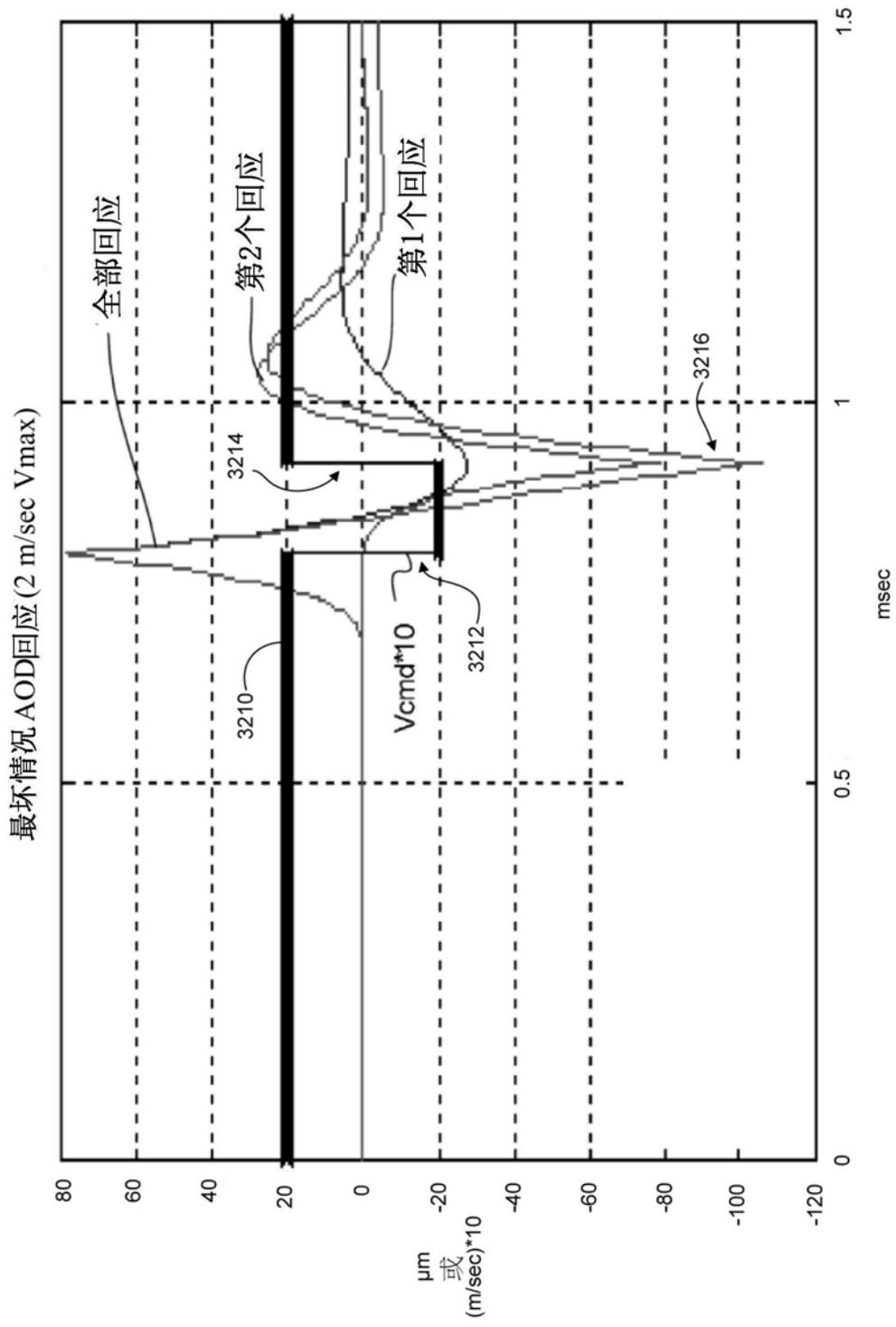


图32

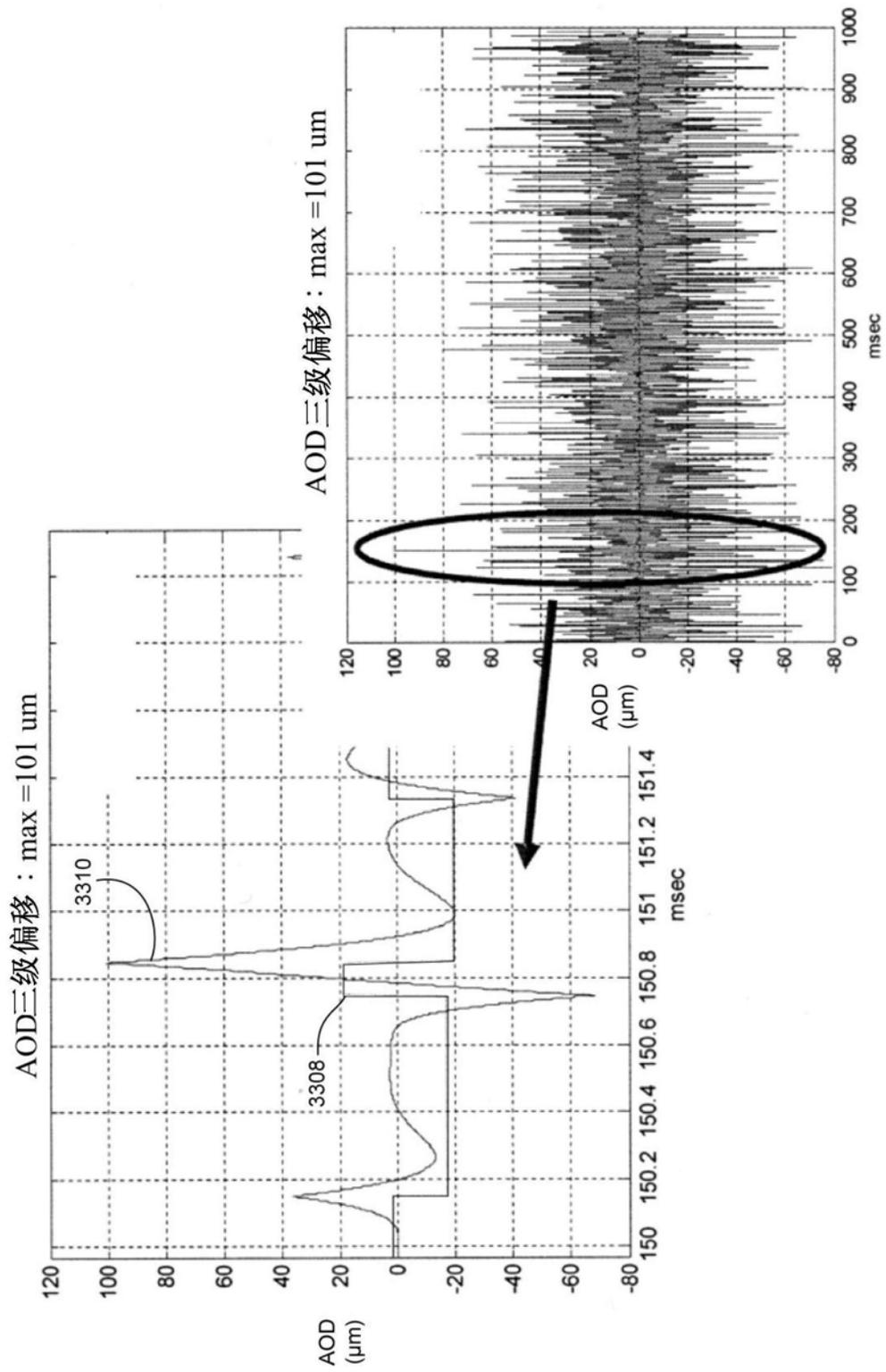


图33

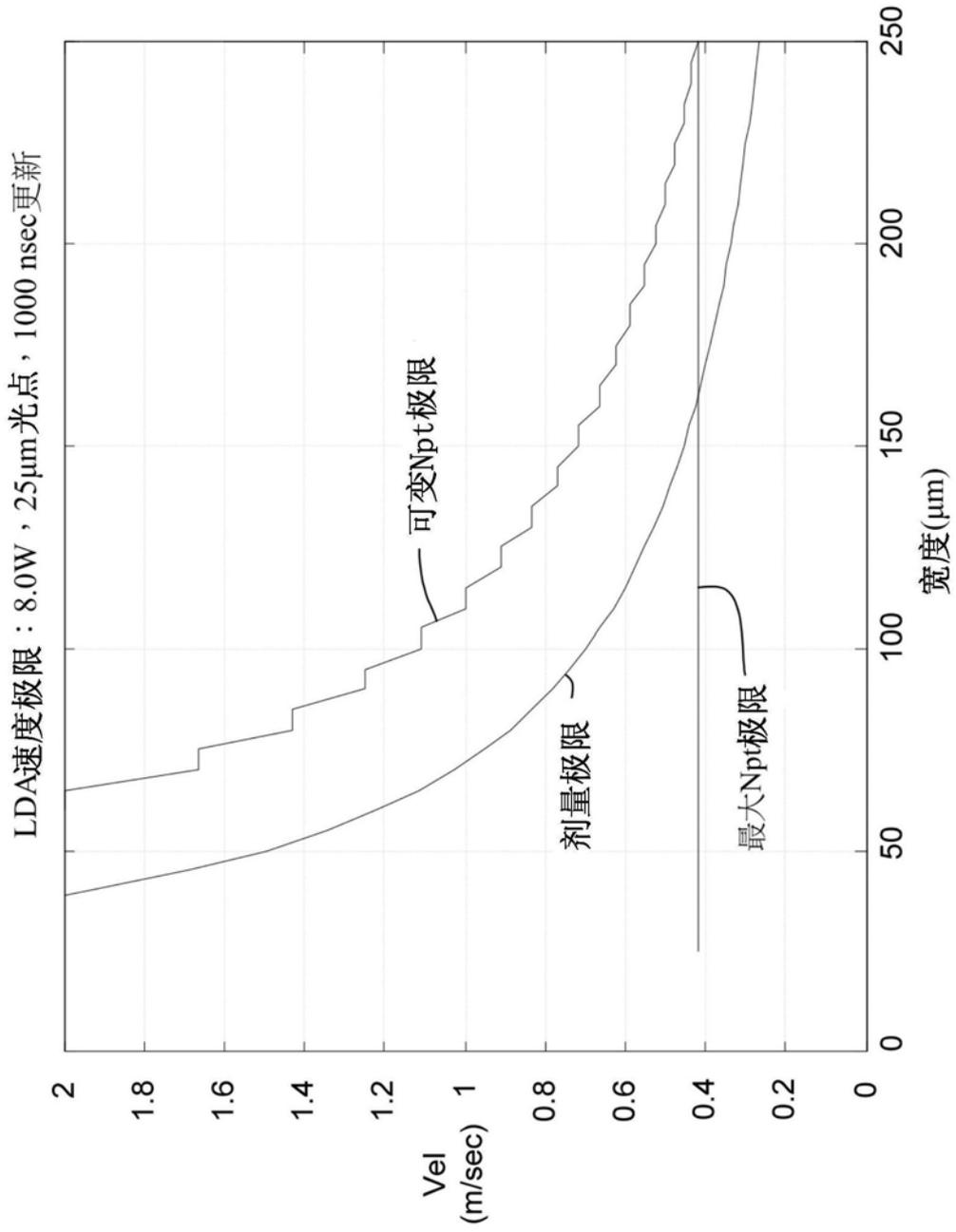


图34

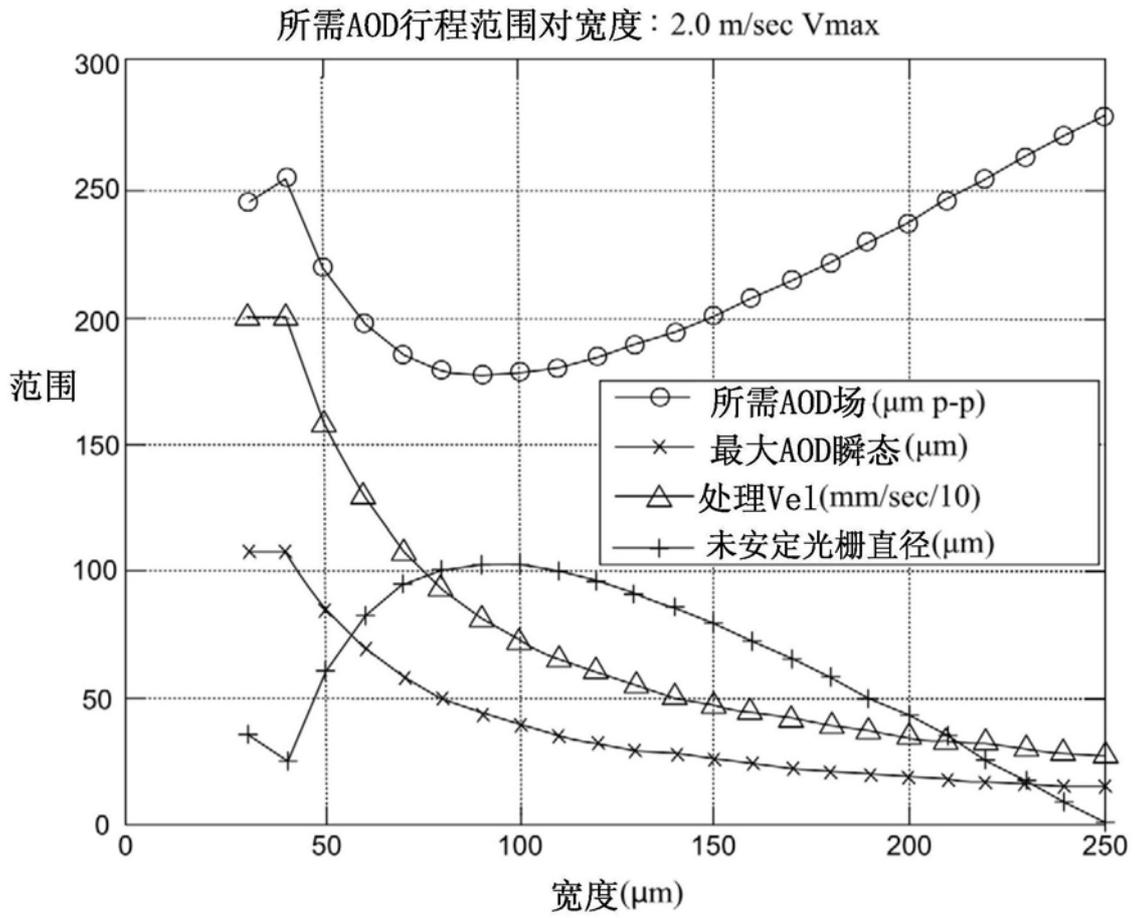


图35

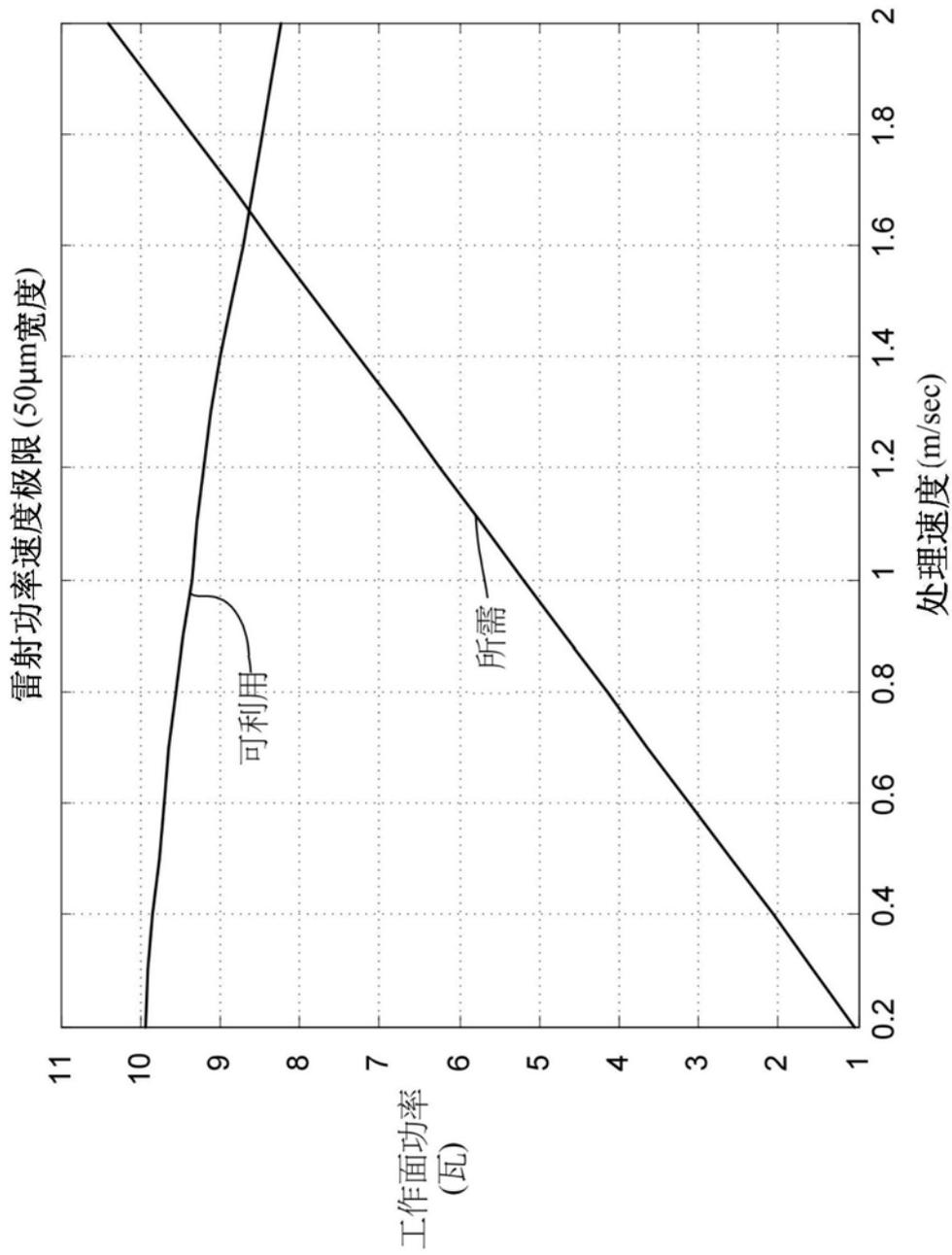


图36



图37

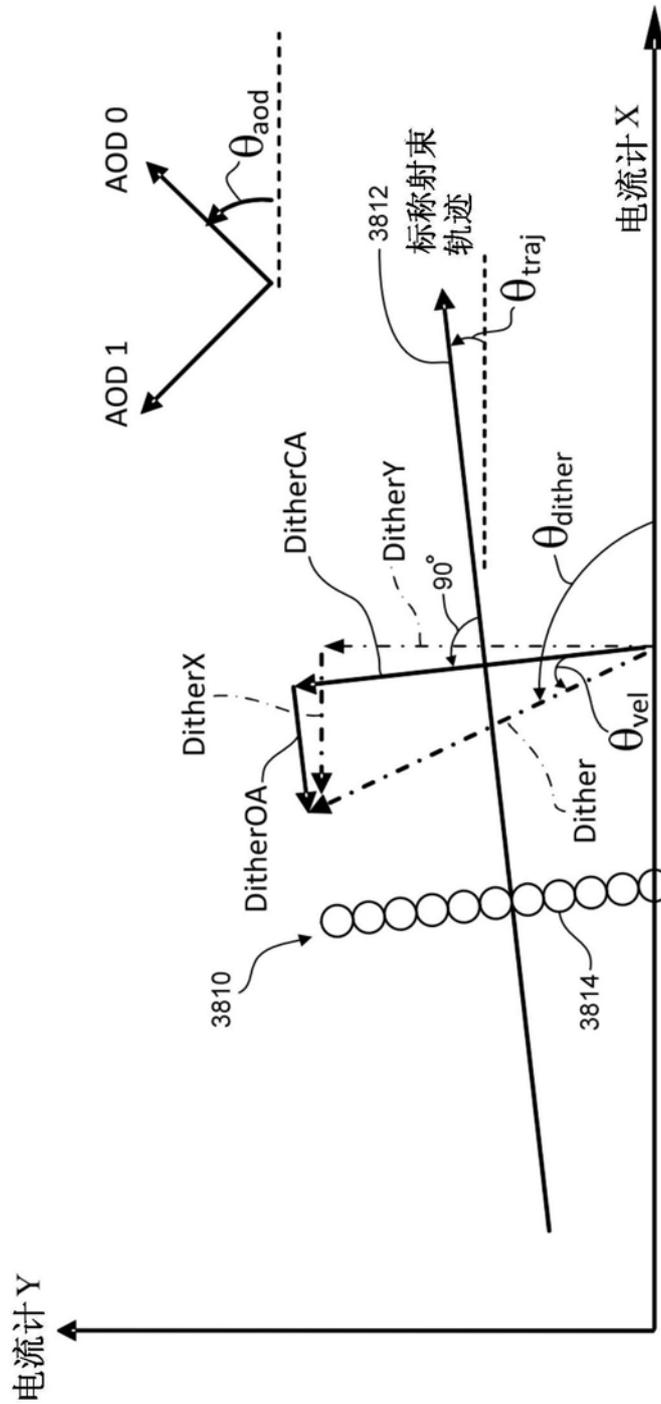


图38

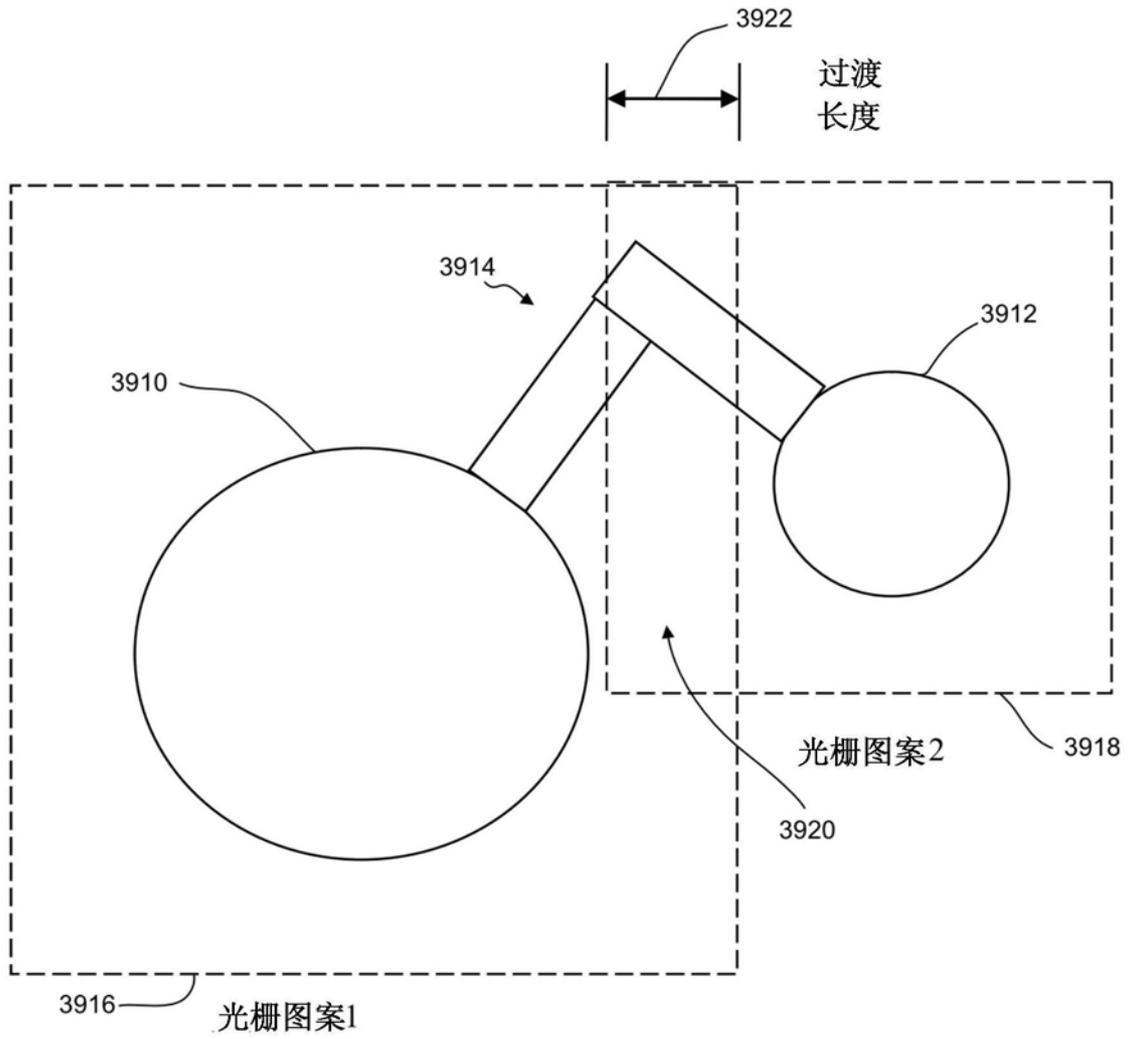


图39



图40

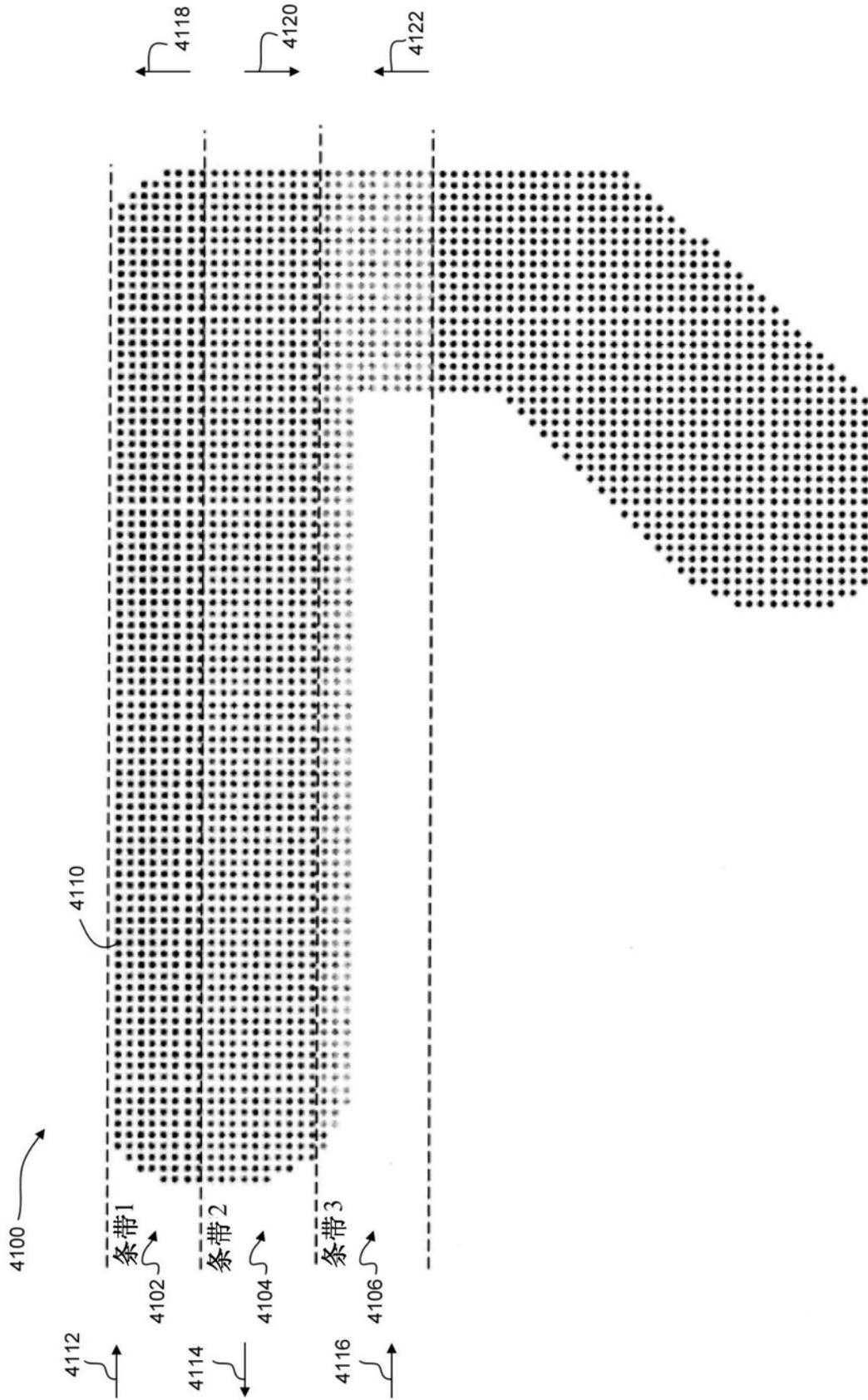


图41

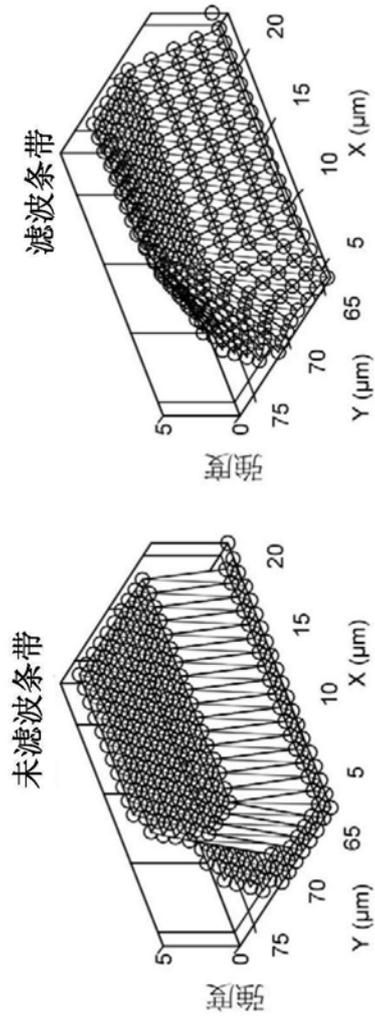


图42

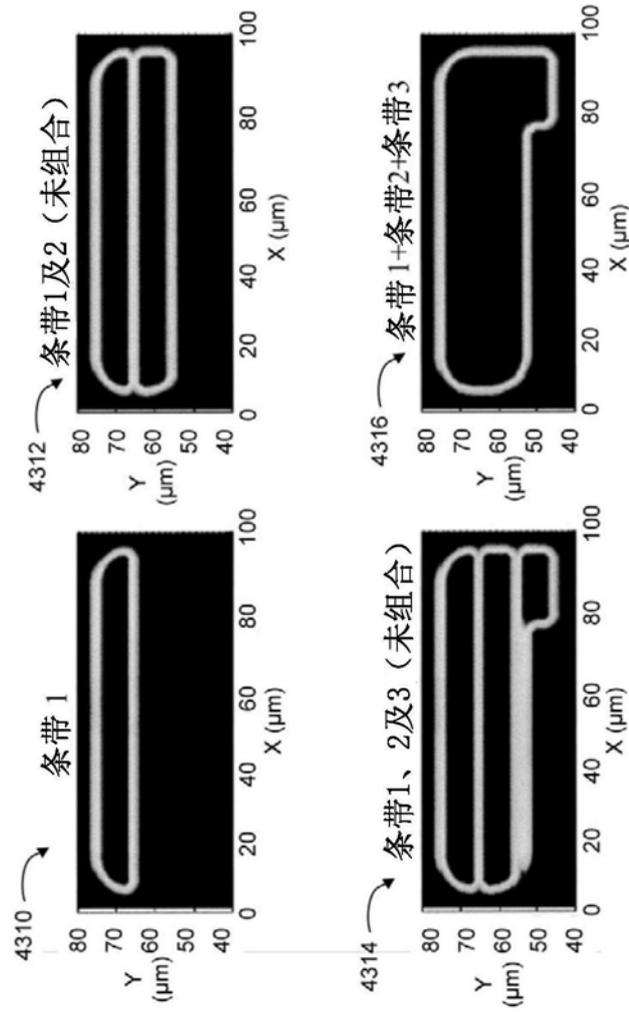


图43

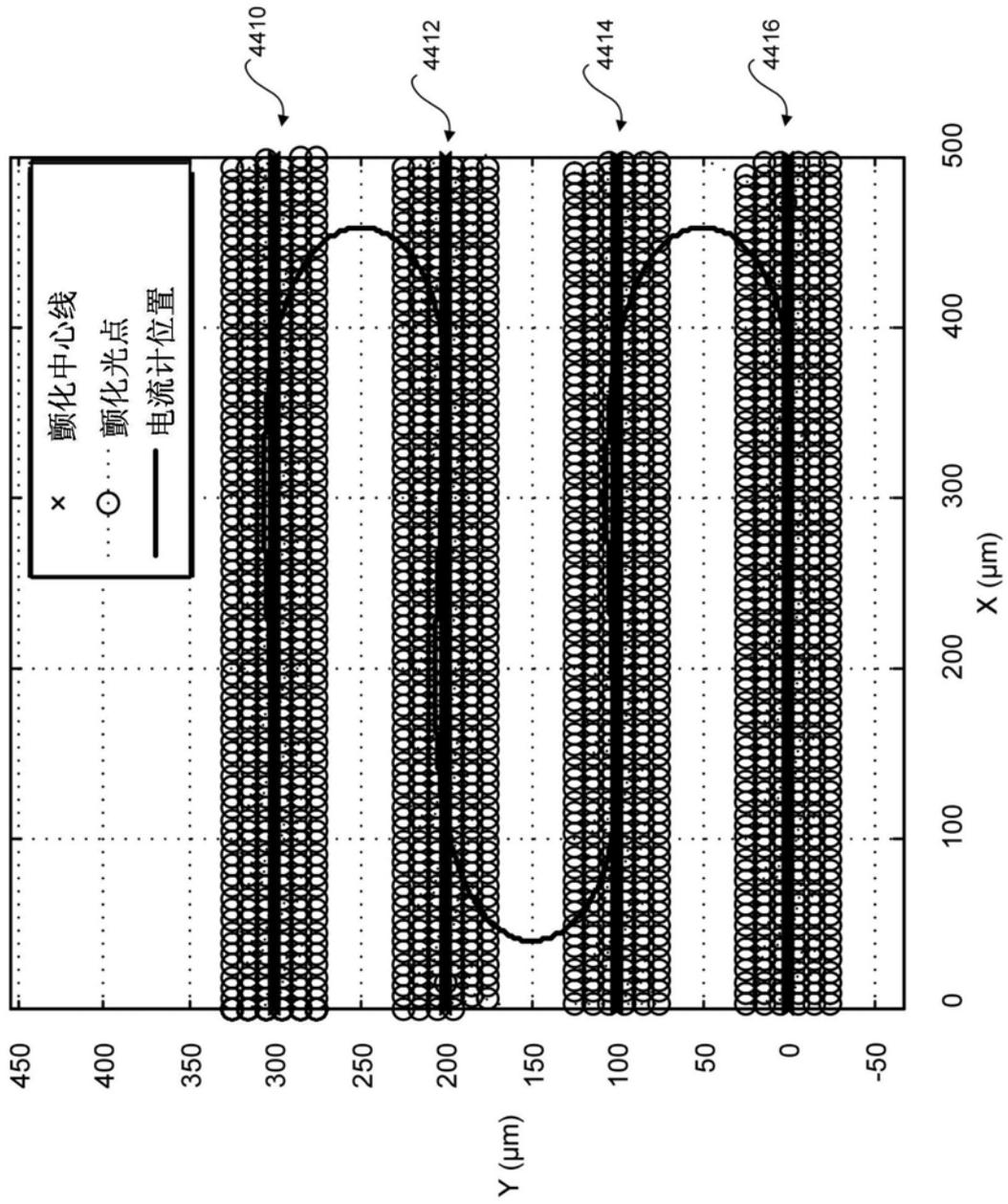


图44

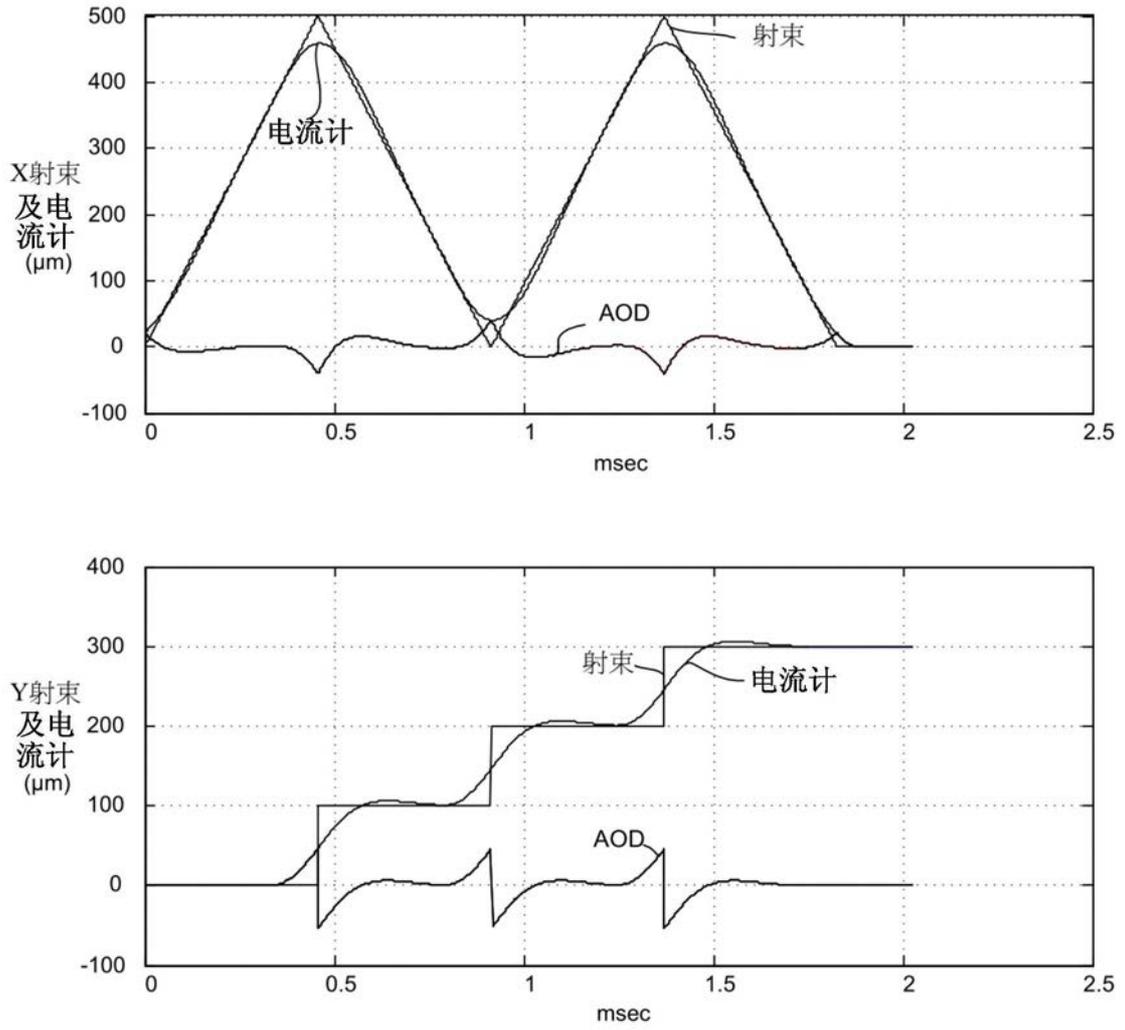


图45

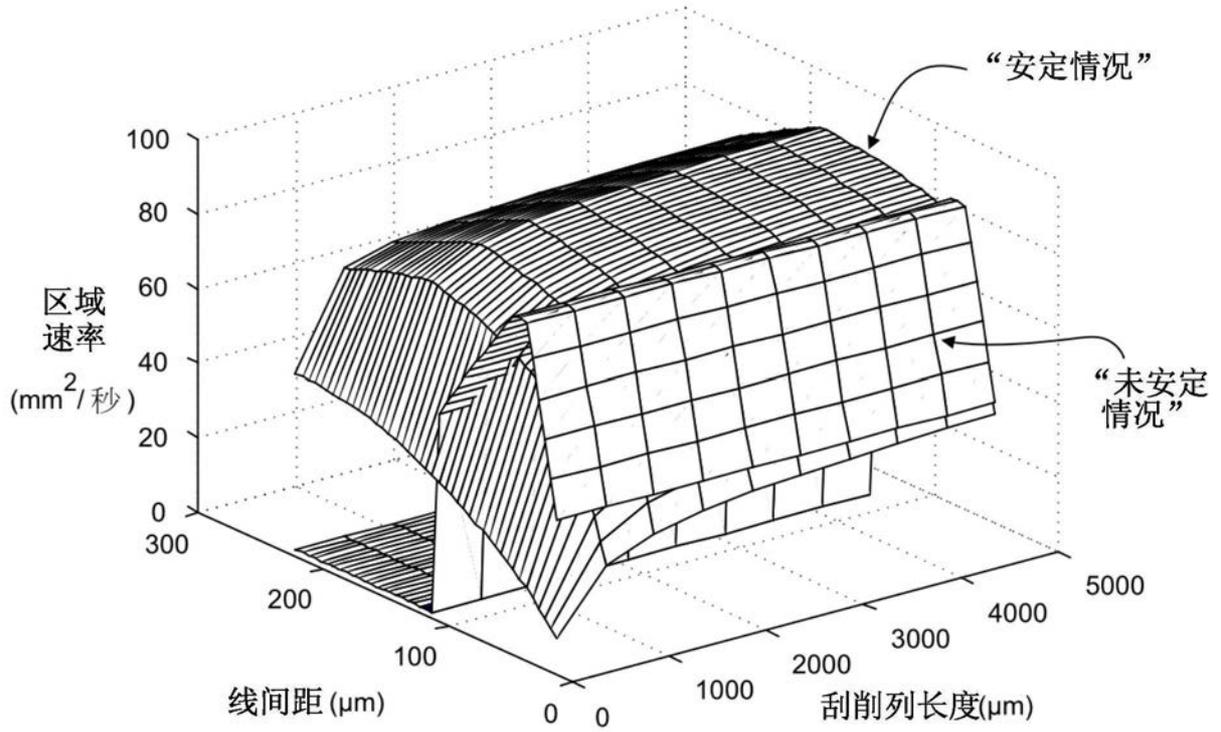


图46

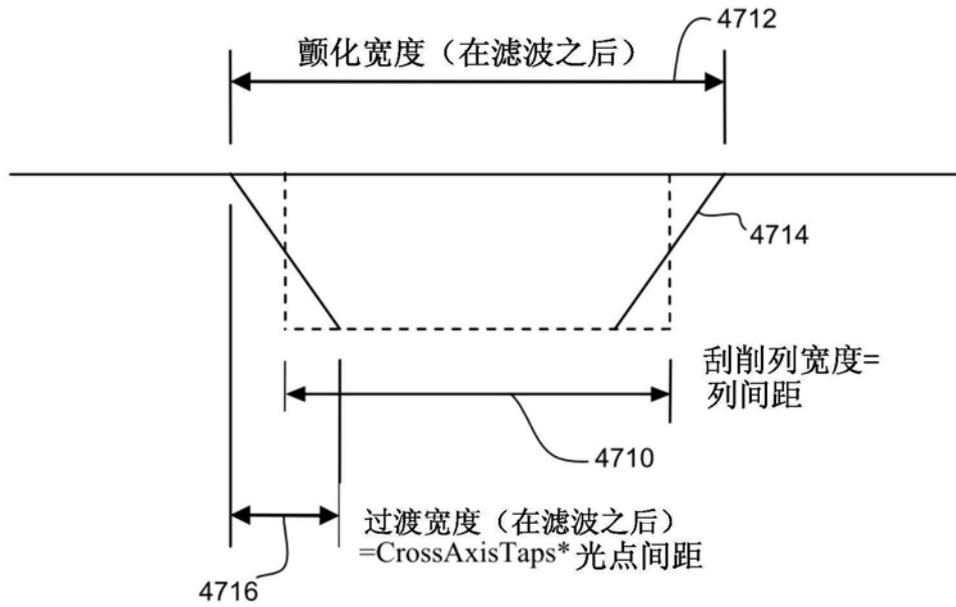


图47

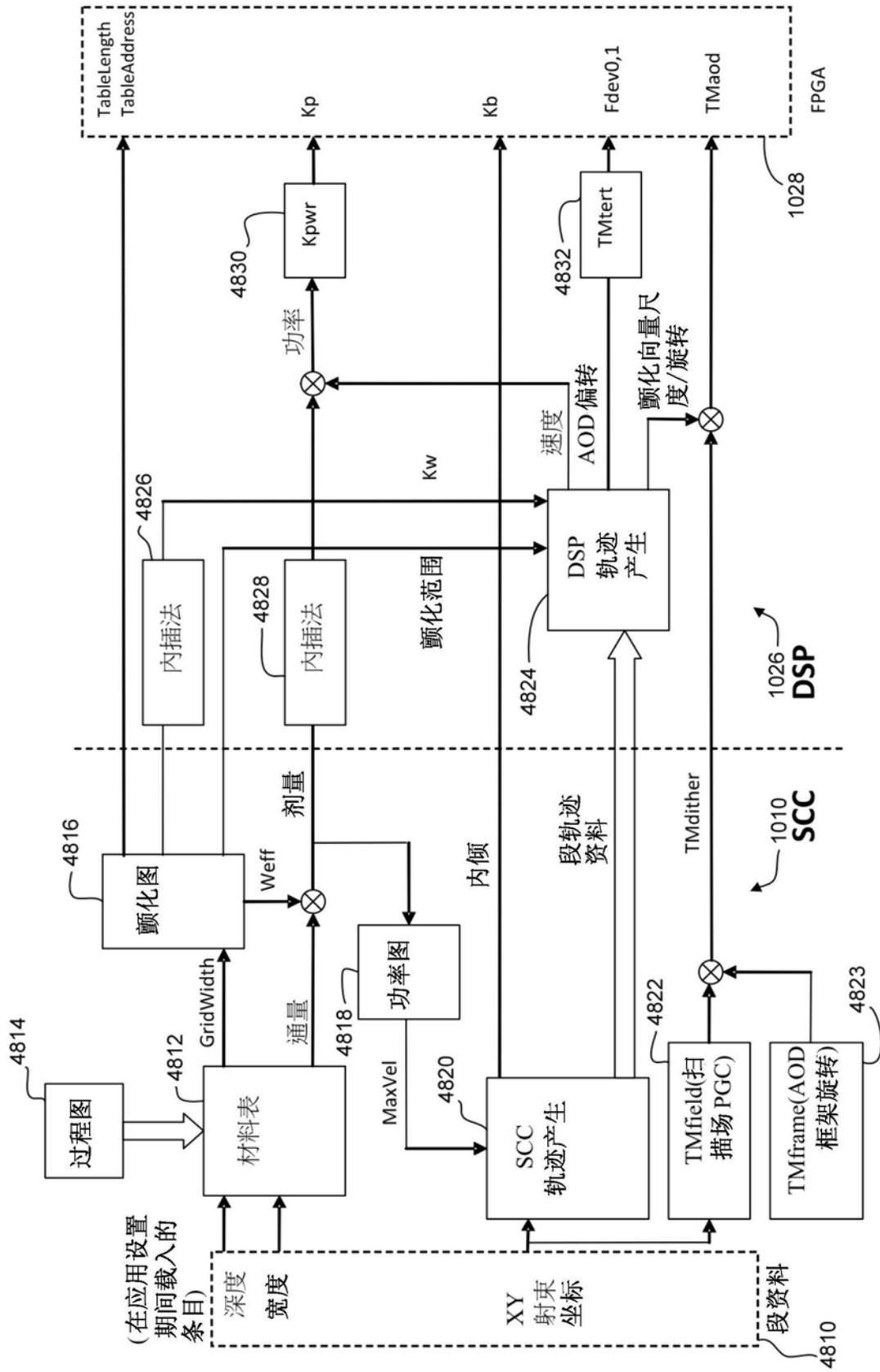


图48

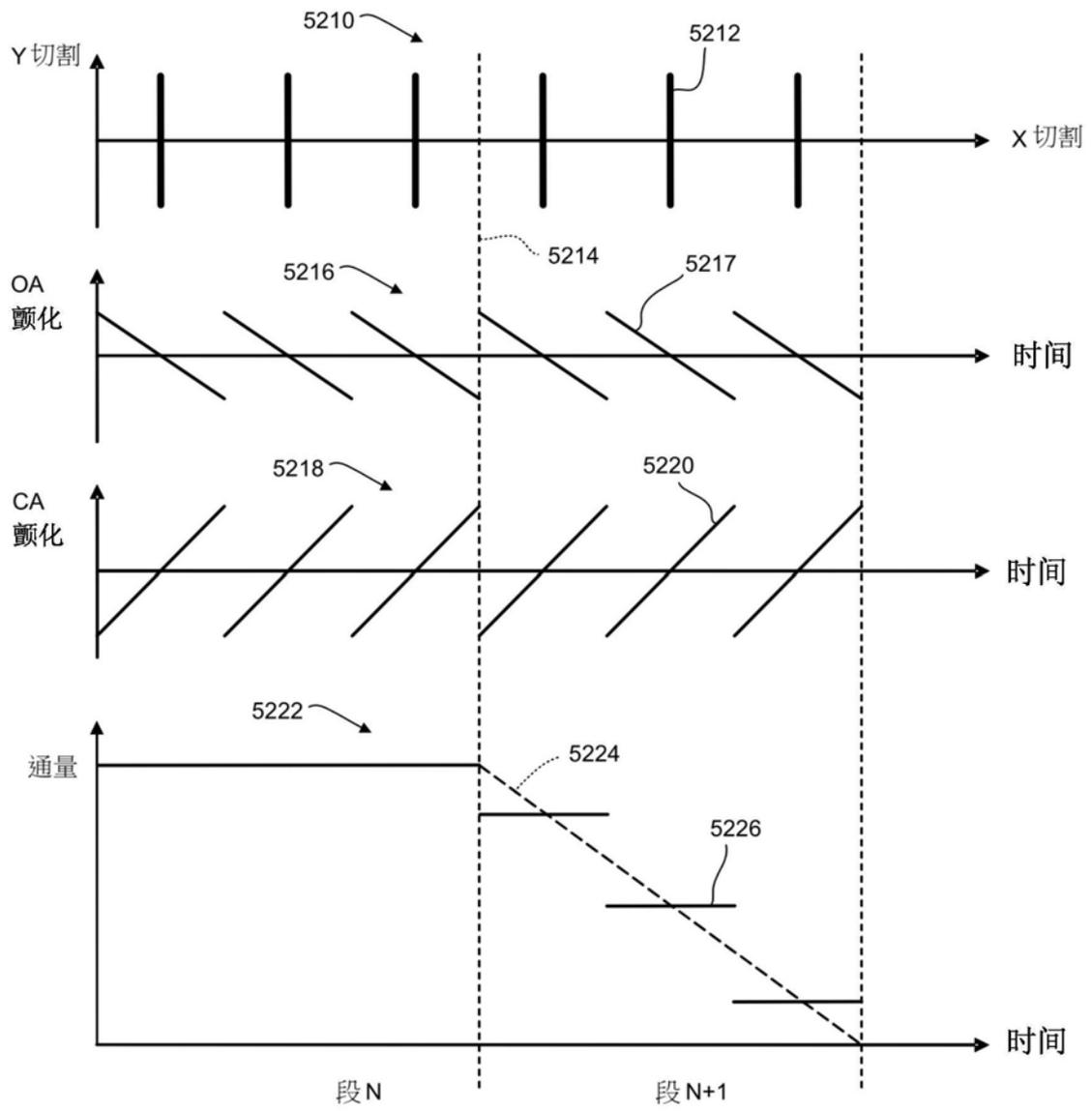


图52

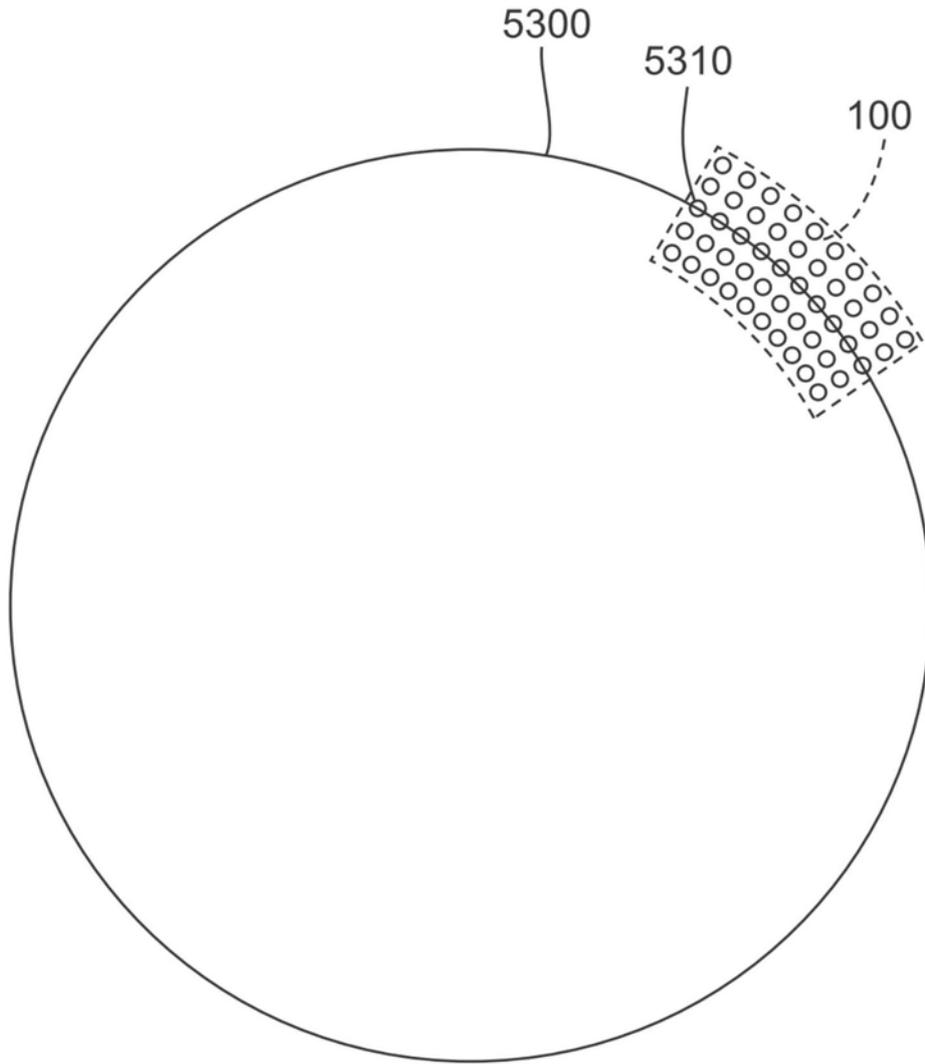


图53

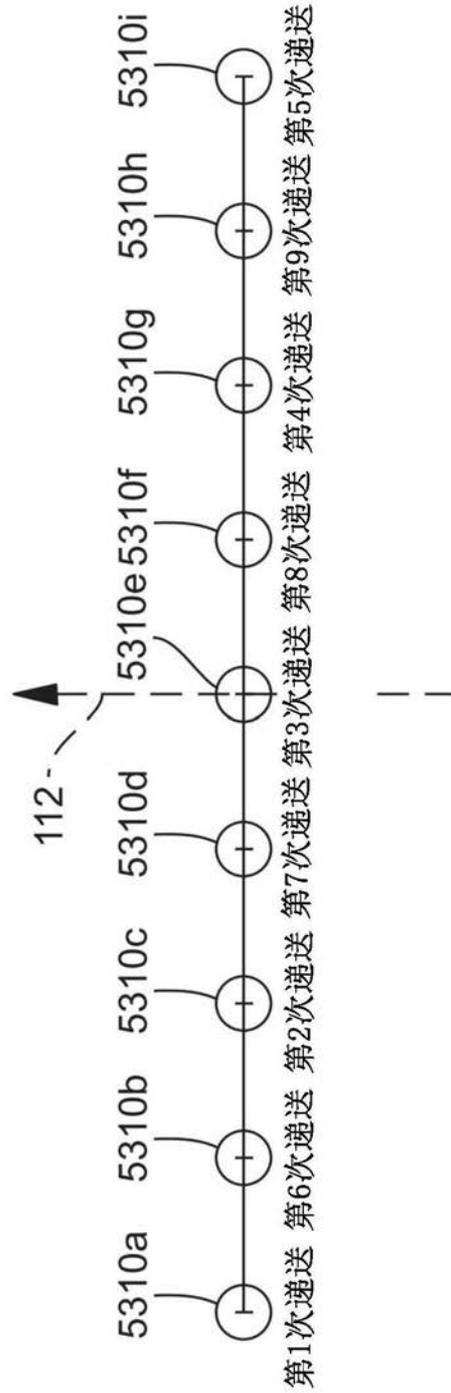


图54

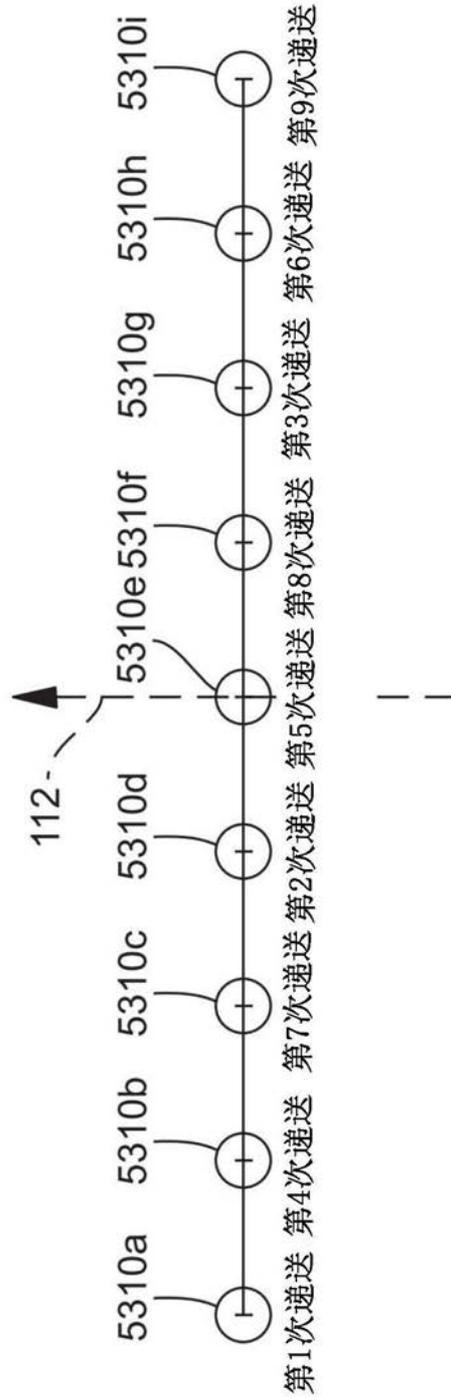


图55

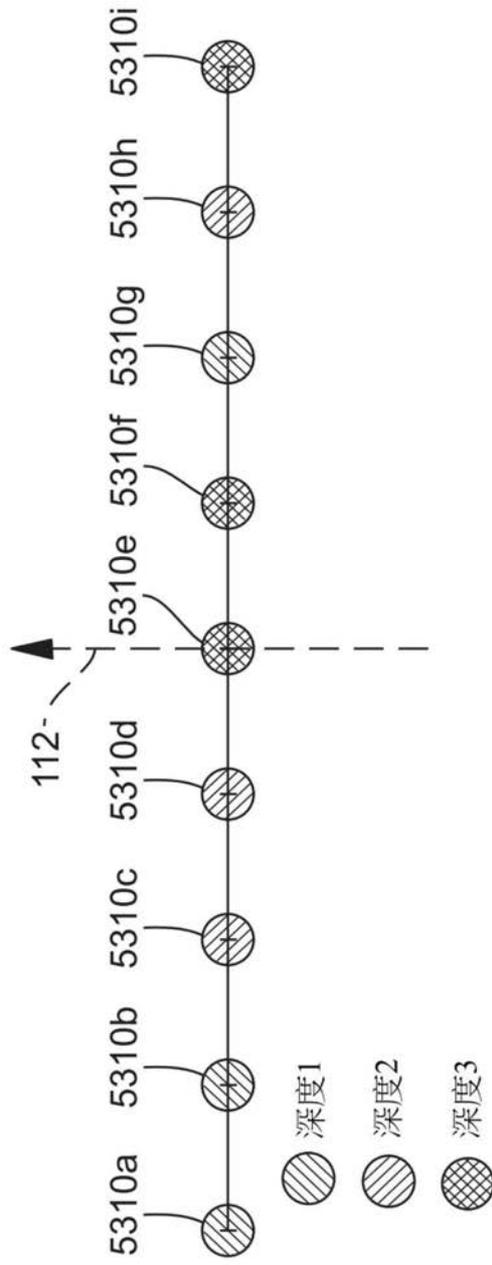


图56

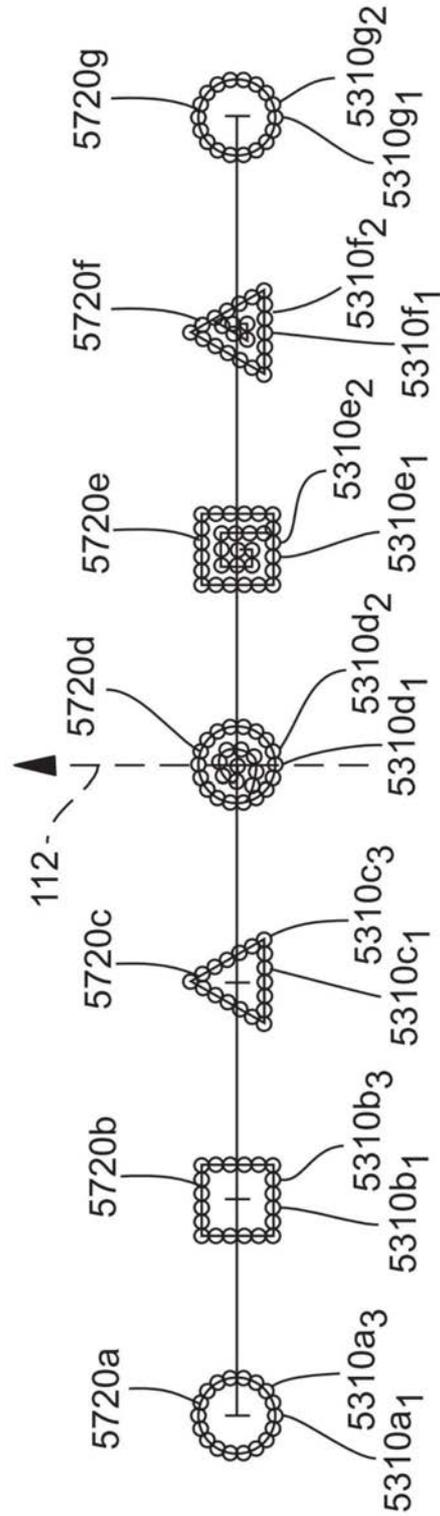


图57