



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107406293 A

(43)申请公布日 2017.11.28

(21)申请号 201680015214.3

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司 31100

(22)申请日 2016.01.11

代理人 姬利永

(30)优先权数据

62/102,257 2015.01.12 US

(51)Int.Cl.

C03B 33/02(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2017.09.12

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2016/012814 2016.01.11

(87)PCT国际申请的公布数据

W02016/115017 EN 2016.07.21

(71)申请人 康宁股份有限公司

地址 美国纽约州

(72)发明人 M·恩格姆 G·A·皮奇

J·J·沃特金斯 K·A·威尔兰

C·M·威尔考克斯

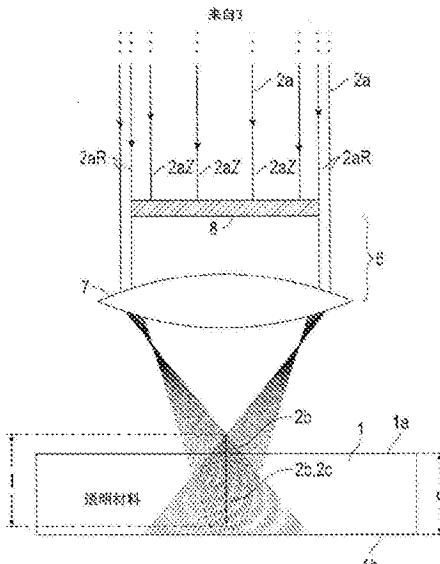
权利要求书3页 说明书18页 附图21页

(54)发明名称

使用多光子吸收方法来对经热回火的基板
进行激光切割

(57)摘要

公开了用于对经热回火的基板进行激光切割的系统和方法。在一个实施例中，一种分离经热回火的基板的方法包括：引导激光束焦线，从而使得所述激光束焦线的至少一部分在所述经热回火的基板的主体内。使所述聚焦脉冲激光束脉动以便形成包括一个或多个子脉冲的脉冲串序列。所述激光束焦线沿着所述激光束焦线在所述经热回火的基板的所述主体内产生损伤轨迹。在所述聚焦脉冲激光束与所述经回火的基板之间提供相对运动，从而使得所述脉冲激光束在所述经回火的基板内形成损伤轨迹序列。所述损伤轨迹序列中的单独损伤轨迹通过横向间隔分离开，并且一个或多个微裂纹连接所述损伤轨迹序列中的相邻损伤轨迹。使用所述多光子吸收方法来对经热回火的基板进行激光切割。



1. 一种分离经热回火的基板的方法,所述方法包括:

将激光束焦线引导到所述经热回火的基板中,使得所述激光束焦线的至少一部分处于所述经热回火的基板的主体内,其中,所述激光束焦线通过脉冲激光束形成,并且所述激光束焦线沿着光束传播方向布置;

使所述脉冲激光束脉动以便形成包括一个或多个子脉冲的脉冲串序列,其中,所述激光束焦线在所述经热回火的基板内生成诱导多光子吸收,所述诱导多光子吸收沿着所述激光束焦线在所述经热回火的基板的所述主体内产生损伤轨迹;以及

在第一次激光束通过时提供所述脉冲激光束与所述经热回火的基板之间的相对运动,使得所述脉冲激光束在所述经热回火的基板内形成第一损伤轨迹序列,其中,所述第一损伤轨迹序列中的单独损伤轨迹通过横向间隔分离开,并且一个或多个微裂纹连接所述第一损伤轨迹序列中的相邻损伤轨迹。

2. 如权利要求1所述的方法,其中,所述经热回火的基板是经热回火的玻璃基板,所述经热回火的玻璃基板在所述经热回火的玻璃基板的表面处具有大于24MPa的压缩应力。

3. 如权利要求2所述的方法,其中,所述激光束焦线被定位在所述经热回火的玻璃基板内,使得所述第一损伤轨迹序列被布置成穿过所述经热回火的玻璃基板的厚度的至少50%。

4. 如权利要求1、2或3所述的方法,其中,所述第一损伤轨迹序列中的所述损伤轨迹中的每个损伤轨迹具有在约0.5μm与约1.5μm之间的直径。

5. 根据以上权利要求中任一项所述的方法,其中,所述脉冲激光束具有递送到所述经热回火的基板的在约150μJ与约750μJ之间的激光脉冲串能量,并且每个单独脉冲串具有1到20个之间的子脉冲。

6. 根据以上权利要求中任一项所述的方法,其中,单独脉冲串之间的时间为使得单独脉冲串撞击所述经热回火的基板的地方之间的横向间隔大于或等于2μm并且小于或等于20μm。

7. 如权利要求1所述的方法,其中:

所述脉冲激光束的激光功率在约25W与约60W之间;

所述脉冲串序列中的每个脉冲串具有2到25个之间的子脉冲;并且

损伤轨迹之间的横向间隔在约2μm与约10μm之间。

8. 如权利要求1所述的方法,其中,每个脉冲串包括单个子脉冲。

9. 如权利要求1所述的方法,其中,每个脉冲串包括多个子脉冲。

10. 如权利要求9所述的方法,其中,单独脉冲串中的单独子脉冲之间的时间在约10纳秒与约50纳秒之间。

11. 如权利要求9或10所述的方法,其中,单独子脉冲的持续时间在约1皮秒与约100皮秒之间。

12. 如权利要求10所述的方法,其中,单独子脉冲的持续时间在约5皮秒与约20皮秒之间。

13. 根据以上权利要求中任一项所述的方法,其中,所述激光束焦线的长度在约1mm与约10mm之间。

14. 根据以上权利要求中任一项所述的方法,其中,所述激光束焦线的长度在约1mm与

约5mm之间。

15. 如权利要求1所述的方法,进一步包括:

在所述第一次激光束通过之后,对所述激光束焦线的位置进行调整,使得所述激光束焦线的中点处于所述经热回火的基板的所述主体内的某个深度处,所述深度不同于所述激光束焦线的所述中点在所述第一次激光束通过期间在所述经热回火的基板的所述主体内的深度;以及

在第二次激光束通过时提供所述脉冲激光束与所述经热回火的基板之间的相对运动,使得所述脉冲激光束在所述经热回火的基板的所述主体内形成第二损伤轨迹序列,其中,所述第一损伤轨迹序列和所述第二损伤轨迹序列中的单独损伤轨迹的长度大于1mm长。

16. 如权利要求15所述的方法,进一步包括:

在所述第二次激光束通过之后,对所述激光束焦线的所述位置进行调整,使得所述激光束焦线的所述中点被定位在所述经热回火的基板的所述主体内的某个深度处,所述深度不同于所述激光束焦线的所述中点在所述第一次激光束通过期间和在所述第二次激光束通过期间在所述经热回火的基板的所述主体内的深度;以及

在第三次激光束通过时提供所述脉冲激光束与所述经热回火的基板之间的相对运动,使得所述脉冲激光束在所述经热回火的基板的所述主体内形成第三损伤轨迹序列,其中,所述经热回火的基板的厚度的50%或更多暴露于所述第一、第二和第三损伤轨迹序列中的损伤轨迹。

17. 如以上权利要求中任一项所述的方法,其中,所述经热回火的基板为经热回火的玻璃基板,并且其中,在将所述激光束焦线引导到所述经热回火的玻璃基板的步骤之前,在所述经热回火的玻璃基板上涂敷至少一个电致变色层。

18. 如以上权利要求中任一项所述的方法,其中,所述经热回火的基板为钠钙玻璃。

19. 如以上权利要求中任一项所述的方法,其中,所述经热回火的基板沿着这些损伤轨迹被分成两片或多片。

20. 一种用于加工经热回火的基板的系统,所述系统包括:

激光源,所述激光源可操作用于发射脉冲激光束;

平移台,所述平移台可操作用于接纳所述经热回火的基板并且可操作成沿着至少一个轴平移;

光学组件,所述光学组件布置在所述脉冲激光束的光学路径内,所述光学组件将所述脉冲激光束转变为激光束焦线,其中,所述激光束焦线的至少一部分可操作成定位在所述经热回火的基板的主体内,使得所述激光束焦线在所述经热回火的基板内生成诱导多光子吸收以便沿着所述激光束焦线在所述经热回火的基板内产生材料改性;以及

一个或多个控制器,所述一个或多个控制器被编程用于:

使所述脉冲激光束脉动以便形成包括一个或多个子脉冲的脉冲串序列;以及

控制所述平移台以便在第一次激光束通过时沿着所述至少一个轴提供所述脉冲激光束与所述经热回火的基板之间的相对运动,使得所述脉冲激光束在所述经热回火的基板内形成损伤轨迹序列,其中,所述损伤轨迹序列中的单独损伤轨迹通过横向间隔分离开,并且一个或多个微裂纹在所述损伤轨迹序列中的相邻损伤轨迹之间延伸。

21. 如权利要求20所述的系统,其中:

所述脉冲激光束的激光功率在约25W与约60W之间；

所述脉冲串序列中的每个脉冲串具有2到25个之间的子脉冲；并且
损伤轨迹之间的所述横向间隔在约2μm与约10μm之间。

22. 一种经热回火的玻璃基板，包括：

第一表面和第二表面，其中，所述第一表面和所述第二表面具有大于或等于24MPa的压
缩应力，并且在所述第一与第二表面之间在所述经热回火的玻璃基板的本体内的应力分布
是抛物线型的；

边缘，所述边缘从所述第一表面延伸到所述第二表面；以及

多个损伤轨迹，所述多个损伤轨迹被定位在所述边缘处，其中：

所述多个损伤轨迹中的每个单独损伤轨迹具有小于或等于5μm的直径并且具有大于或
等于250μm的长度；

所述多个损伤轨迹中的相邻损伤轨迹通过在约2μm与约20μm之间的横向间隔分离开；
并且

所述多个损伤轨迹延伸所述边缘的长度的50%或更多。

23. 如权利要求22所述的经热回火的玻璃基板，其中：

所述多个损伤轨迹中的每个单独损伤轨迹的长度等于或大于1mm；并且

所述多个损伤轨迹延伸所述边缘的所述长度的75%或更多。

24. 如权利要求22或23所述的经热回火的玻璃基板，其中，所述经热回火的基板是具有
位于其上的至少一个电致变色层的经热回火的玻璃基板。

25. 如权利要求22、23或24所述的经热回火的玻璃基板，其中，所述经热回火的基板是
钠钙玻璃。

使用多光子吸收方法来对经热回火的基板进行激光切割

[0001] 本申请根据35U.S.C. §119要求于2015年1月12日提交的美国临时申请序列号62/102257的优先权权益,所述美国临时申请的内容被用作依据并且通过引用以其全部内容结合在此。

背景技术

[0002] 经热回火的基板(如经热回火的玻璃)具有提供附加强度和耐刮性的内应力分布。这种基板已经在许多方面得到了应用,如例如,建筑玻璃应用和电子设备的屏幕。

[0003] 近年来,精密微机械加工以及其为了满足顾客需求以减小尖端设备的大小、重量和材料成本的工艺开发的改进已经引起高科技产业的快步伐增长。超快工业激光器正在变成用于需要高精度微机械加工的应用的重要工具。

[0004] 然而,由于大量应力包含在经热回火的玻璃中,所以加工(如切割)极其困难。使用常规方法来切割经热回火的玻璃的尝试释放了这种内应力并且导致整个玻璃板的碎片化。出于这个原因,在热回火工艺之前对经热回火的玻璃进行切割成形。因此,仅可获得有限数量的标准尺寸的经热回火的玻璃板。这可能会抑制柔性,影响定制板的成本并且进一步限制经回火的玻璃的用途。

[0005] 因此,可能期望用于切割经热回火的基板的替代性系统和方法。

发明内容

[0006] 在一个实施例中,一种分离经热回火的基板的方法包括:将激光束焦线引导到所述经热回火的基板中,从而使得所述激光束焦线的至少一部分处于所述经热回火的基板的主体(bulk)内。所述激光束焦线由聚焦脉冲激光束形成,并且所述激光束焦线沿着光束传播方向布置。所述方法进一步包括:使所述聚焦脉冲激光束脉动(pulsing)以便形成包括一个或多个子脉冲的第一脉冲串序列。所述激光束焦线在所述经热回火的基板内生成诱导多光子吸收,所述诱导多光子吸收沿着所述激光束焦线在所述经热回火的基板的所述主体内产生损伤轨迹。所述方法进一步包括:在第一次激光束通过时在所述聚焦脉冲激光束与所述经热回火的基板之间提供相对运动,从而使得所述脉冲激光束在所述经热回火的基板内形成第一损伤轨迹序列。所述第一损伤轨迹序列中的单独损伤轨迹通过横向间隔分离开,并且一个或多个微裂纹连接所述第一损伤轨迹序列中的相邻损伤轨迹。

[0007] 在另一个实施例中,一种用于加工经热回火的基板的系统包括:激光源,所述激光源可操作用于发射脉冲激光束;平移台,所述平移台可操作成沿着至少一个轴平移并且可操作用于接纳所述经热回火的基板;以及光学组件,所述光学组件布置在所述脉冲激光束的光学路径内。所述光学组件将所述脉冲激光束转变为激光束焦线,其中,所述激光束焦线的至少一部分可操作成定位在所述经热回火的基板的主体内,从而使得所述激光束焦线在所述经热回火的基板内生成诱导多光子吸收以便沿着所述激光束焦线在所述经热回火的基板内产生材料改性。所述系统进一步包括一个或多个控制器,所述一个或多个控制器被编程用于使所述脉冲激光束脉动以便形成包括一个或多个子脉冲的脉冲串序列,并且用于

控制所述平移台以便在第一次激光束通过时沿着所述至少一个轴提供所述脉冲激光束与所述经热回火的基板之间的相对运动,从而使得所述脉冲激光束在所述经热回火的基板内形成损伤轨迹序列。所述损伤轨迹序列中的单独损伤轨迹通过横向间隔分离开,并且一个或多个微裂纹在所述损伤轨迹序列中的相邻损伤轨迹之间延伸。

[0008] 在又另一个实施例中,一种经热回火的玻璃基板包括第一表面和第二表面,其中,所述第一表面和所述第二表面具有大于或等于24MPa的压缩应力,并且在所述第一与第二表面之间在所述经热回火的玻璃基板的本体(body)内的应力分布是抛物线型的。所述经热回火的玻璃基板进一步包括:边缘,所述边缘从所述第一表面延伸到所述第二表面;以及多个损伤轨迹,所述多个损伤轨迹被定位在所述边缘处。所述多个损伤轨迹中的每个单独损伤轨迹具有小于或等于5μm的直径并且具有大于或等于250μm的长度。所述多个损伤轨迹中的相邻损伤轨迹通过在约2μm与约20μm之间的横向间隔分离开,并且所述多个损伤轨迹延伸所述边缘的长度的50%或更多。

附图说明

[0009] 如在附图中所展示的,前述内容将从以下对示例实施例的更具体描述中变得明显,在附图中,贯穿不同视图的相似的参考符号指代相同的部分。所述附图不一定是按比例的,而是将重点放在展示代表性实施例上。

[0010] 图1A和图1B是根据本文中所描述和所展示的一个或多个实施例的将激光束焦线定位在经热回火的基板中以便沿着所述焦线通过诱导吸收形成损伤轨迹的示意图;

[0011] 图2A是根据本文中所描述和所展示的一个或多个实施例的用于激光加工的光学组件的示意图;

[0012] 图2B-1至图2B-4是根据本文中所描述和所展示的一个或多个实施例的通过相对于基板在透明材料内的不同位置处形成激光束焦线来加工基板的各种可能性的示意图;

[0013] 图3是根据本文中所描述和所展示的一个或多个实施例的用于激光加工的第二光学组件的示意图;

[0014] 图4A和图4B是根据本文中所描述和所展示的一个或多个实施例的用于激光加工的第三光学组件的示意图;

[0015] 图5是用于激光加工的第四光学组件的示意图;

[0016] 图6A和图6B是根据本文中所描述和所展示的一个或多个实施例的具有两个压缩区域和一个内张力区域的经热回火的基板的示意图;

[0017] 图7A至图7C是根据本文中所描述和所展示的一个或多个实施例的作为皮秒激光器的时间的函数的示例激光发射的图形;

[0018] 图8示意性地描绘了根据本文中所描述和所展示的一个或多个实施例的用于在经热回火的基板内形成损伤轨迹序列的激光工艺;

[0019] 图9示意性地描绘了根据本文中所描述和所展示的一个或多个实施例的针对三次激光通过在经热回火的基板内的激光线状焦点位置;

[0020] 图10A是经热回火的玻璃基板的在激光入射表面处的激光切割边缘的侧面(横截面)的显微图像;

[0021] 图10B是在图10A中所描绘的经热回火的玻璃基板的在激光出射表面处的激光切

割边缘的侧面(横截面)的显微图像;

[0022] 图11A是经热回火的玻璃基板的激光切割边缘的顶侧的显微图像;

[0023] 图12A至图12C是三片3.2mm厚的经热回火的玻璃基板的激光切割边缘的侧面(横截面)的显微图像;并且

[0024] 图13A至图13C是三片5.5mm厚的经热回火的玻璃基板的激光切割边缘的侧面(横截面)的显微图像。

具体实施方式

[0025] 本文中所描述的实施例涉及用于光学地切割经热回火的基板(如经热回火的玻璃材料)的方法和系统。通常,激光束被转变成定位在经热回火的基板(如经热回火的玻璃)的主体内的激光束焦线以便创建通过材料内的损伤轨迹形成的一条或多条损伤线。经热回火的基板沿着这些损伤线被分成例如两片或更多片。

[0026] 通常,可以以极快速率以可以超过1m/s的平移速度制作损伤轨迹系列。对于高应力玻璃(对于经热回火的玻璃,情况就是这样),一旦创建了损伤位点,微裂纹(或单个微裂纹)就将形成并且极其快速地传播。由于相比多种激光方法可以创建合适的损伤位点以引导裂纹前沿的速度,微裂纹可以更快地形成和传播,所以这在切割高中心张力的玻璃方面带来了相当大的挑战。这导致失去对裂纹的控制。然而,本文中所公开的方法可以使用单个激光脉冲或脉冲串来形成完整损伤轨迹并且因此容易以超过微裂纹传播速度的速度来创建损伤轨迹位置,从而确保微裂纹被逐损伤轨迹地引导,而不是“领先”激光损伤扩展。因此,可以沿着这些损伤线将经热回火的基板(例如,经热回火的钠钙玻璃)分成多个部分,例如,分成两片或更多片经热回火的玻璃。

[0027] 可以通过使用受控热处理来创建经热回火的玻璃以便增大玻璃的强度。将玻璃在高温炉(约600°C)中加热并且然后例如通过使玻璃经受冷气流使其温度快速降低。这迫使玻璃的外层与内层相比快速收缩,这在玻璃的外层中锁定高水平的压缩应力,而玻璃的内层被迫处于张力下以保持材料内部力的平衡。经完全回火的玻璃通常被定义为具有大于10,000psi(69MPa)的表面压缩应力的玻璃,并且热增强玻璃通常被定义为具有大于3,500psi(24MPa)的表面压缩应力的玻璃。

[0028] 作为热回火深度的函数的应力分布通常是抛物线型的,并且随着深度缓慢变化,而对于化学强化玻璃(例如,离子交换化学强化玻璃),其中,应力分布随着深度更呈指数式地变化并且受限于玻璃表面附近的区域。因此,经热回火的玻璃的压缩应力层通常更深,针对热回火,通常>>100μm,但是针对化学强化,通常<100μm。此外,热回火一般局限于厚度>2mm(并且主要地,>3mm)的玻璃片,而化学强化经常局限于更薄的玻璃片。

[0029] 这种应力分布和深压缩应力层使经热回火的玻璃极其耐受由表面冲击造成的断裂。当玻璃断裂时,其通常破裂成不锋利的碎片。

[0030] 目前,对经热回火的玻璃的任何切割首先涉及对玻璃的特殊处理以便有效地对其进行淬火。一种方法通过局部加热期望形状周围的材料来创建未回火玻璃带以便与更大的经热回火的玻璃板分离。然后,沿着未回火带切割玻璃,从而使得板的实际回火部分被稍后完成的未回火(退火)玻璃包围。

[0031] 在期望玻璃强度的情况下,经热回火的玻璃的需求量很大。经热回火的玻璃用于

大部分现代建筑玻璃立面、客运车辆窗户、浴室门以及多种消费者应用中。此外，经热回火的钠钙玻璃可以与更高质量的显示玻璃(如碱性硼铝硅酸盐玻璃(例如,Corning®Eagle XG™玻璃))结合使用，以便制造电致变色受控窗户。当应用电致变色电子层时，将更高质量的(更平整的、更具组分均匀性、低碱含量的)显示玻璃用于窗户玻璃的一些部分可以堆叠导致更好的电气性能和更高的收益。因为将两种材料切割成复杂形状的能力实现了更高的材料(板)利用率，所以其具有显著的益处。由于回火涉及高温，所以在玻璃上涂敷电致变色层并对其进行图案化，但是必须在任何热回火之后进行涂敷。如果可以在经热回火的玻璃被图案化成具有电致变色层之后对其进行切割，则可以通过使用常用设备进行涂覆和回火并且然后简单地切割部件以便在下游成形来实现更大的工艺灵活性。

[0032] 如上所述，本公开的实施例涉及在不需要淬火的情况下对经热回火的玻璃进行激光切割的系统和方法。实施例利用超短脉冲激光器和专用光学递送系统来在经热回火的玻璃内创建精确穿孔(即，损伤轨迹)。这些穿孔或损伤轨迹允许任何裂纹传播得到精确控制，从而防止玻璃板在切割工艺期间破碎。因此，根据一些实施例，经热回火的基板为经热回火的玻璃基板，并且在将激光束焦线引导到经热回火的玻璃基板的步骤之前，将至少一个电致变色层涂敷在经热回火的玻璃基板上。也就是说，在一些实施例中，超短脉冲激光束切割具有位于其上的一个或多个电致变色层的经热回火的玻璃(例如，钠钙玻璃)。

[0033] 根据下面描述的方法，激光器可以用于创建穿过经热回火的(即，经强化的)材料的高度受控的整行穿孔，具有极少($<75\mu\text{m}$ ，常常 $<50\mu\text{m}$)的亚表面损伤和可以忽略不计的碎屑生成。因此，可以使用单个高能脉冲或脉冲串来在透明的经热回火的材料中创建微观(即，直径 $<0.5\mu\text{m}$ 且 $>100\text{nm}$)细长“孔”或空隙(在本文中还被称为穿孔、缺陷线或损伤轨迹)。这些单独的损伤轨迹(或“穿孔”)可以以数百千赫(例如，每秒数十万个穿孔)的速率来产生。因此，在光源与材料之间的相对运动下，可以将这些穿孔布置成彼此邻近(空间间隔根据需要从亚微米至数十微米变化)。为了促进切割而对此空间间隔进行选择。在一些实施例中，损伤轨迹是“通孔”，其是从透明材料的顶部延伸到底部的孔或开放通道。在一些实施例中，损伤轨迹可以不是连续的通道，并且可以被固体材料(例如，玻璃)的部分或区段阻断或部分地阻断。如此处所定义的，损伤轨迹的内径是材料中的开放通道或气孔或空隙的内径。例如，在此处所描述的实施例中，损伤轨迹的内径是 $<500\text{nm}$ (例如， $\leq 400\text{nm}$ ，或 $\leq 300\text{nm}$)。

[0034] 如以下更详细描述的，由每个激光脉冲(或子脉冲串)形成的损伤轨迹延伸穿过(多个)压缩层到达经热回火的基板的张力区域中。不像其他激光方法，这种方法不需要长停留多脉冲或冲击钻孔方法来钻取一直穿过材料的孔。

[0035] 因为经热回火的玻璃包含高水平内部应力，所以微裂纹将从这些受损位置出现。然而，只要损伤轨迹位点紧密间隔开并且以比微裂纹传播速度更快的速度形成，微裂纹将被优先地从一个损伤轨迹引导至另一个损伤轨迹。然后，如以下详细描述的，这些微裂纹的传播将沿着期望的穿孔轮廓将玻璃分离。

[0036] 选择激光的波长，从而使得待激光加工(钻孔、切割、烧蚀、损伤或通过激光以其他方式明显改性)的材料对于所述激光波长是透明的。在一个实施例中，如果待通过激光加工的材料吸收每mm材料厚度的所述激光波长的强度的小于10%，则其对于所述激光波长是透明的。在另一个实施例中，如果待通过激光加工的材料吸收每mm材料厚度的所述激光波长的强度的小于5%，则其对于所述激光波长是透明的。在仍另一个实施例中，如果待通过激

光加工的材料吸收每mm材料厚度的所述激光波长的强度的小于2%，则其对于所述激光波长是透明的。在又另一个实施例中，如果待通过激光加工的材料吸收每mm材料厚度的所述激光波长的强度的小于1%，则其对于所述激光波长是透明的。

[0037] 激光源的选择进一步基于在透明材料中诱导多光子吸收 (MPA) 的能力。MPA是对相同或不同频率的多个(例如，两个、三个、四个或更多个)光子的同时吸收，以便将材料从较低能态(通常是基态)激发到较高能态(激发态)。激发态可以是激发电子态或者电离态。材料的较高与较低能态之间的能量差等于所述两个或更多个光子的能量之和。MPA是非线性过程，其比线性吸收弱若干个数量级。在双光子吸收的情况下，其与线性吸收的不同之处在于吸收的强度取决于光强度的平方，从而使其成为非线性光学过程。在普通光强度下，MPA是可以忽略不计。如果光强度(能量密度)极其高，如在激光源(具体地脉冲激光源)的焦点区域中，则MPA变得明显并且在光源的能量密度足够高的区域内导致材料中的可测量效应。在焦点区域内，能量密度可以足够高以便导致电离、分子键的断裂以及材料的汽化。

[0038] 在原子能级上，对单独原子的电离具有离散能量需求。在玻璃中常用的几种元素(例如，Si、Na、K)具有相对低的电离能(约5eV)。在没有MPA现象的情况下，将需要约248nm的波长来在大约5eV下创建线性电离。在具有MPA的情况下，由约5eV的能量分开的状态之间的电离或激发可以使用长于248nm的波长来完成。例如，因为具有532nm的波长的光子具有约2.33eV的能量，所以两个具有532nm波长的光子可以例如在双光子吸收 (TPA) 中诱发由约4.66eV的能量分开的状态之间的跃迁。

[0039] 因此，在激光束的能量密度足够高以诱导具有例如一半所需激发能量的激光波长的非线性TPA的材料区域中，原子和键可以被选择性地激发或电离。MPA可以导致激发的原子或键与相邻的原子或键的局部重构和分离。所得到的键或构型的改性可以导致非热烧蚀以及从发生MPA的材料区域移除物质。这种物质的移除创建了机械地削弱所述材料并且使其更容易开裂或断裂的结构缺陷(即，穿孔、缺陷线或损伤轨迹)。通过控制损伤轨迹的布置，沿着其发生开裂的轮廓或路径可以被精确地限定以便引导相邻损伤轨迹之间的应力诱导微裂纹。由损伤轨迹系列限定的轮廓可被视为断裂线并对应于材料中的结构薄弱区域。

[0040] 可以使用在时间上更靠近在一起的单个高能量短持续时间子脉冲“串”来完成损伤轨迹。激光脉冲持续时间可以是 10^{-10} s或更小、或 10^{-11} s或更小、或 10^{-12} s或更小、或 10^{-13} s或更小。这些“脉冲串”可以以高重复速率(例如，kHz或MHz)重复。损伤轨迹可以通过控制激光器和/或基板的运动来控制基板或基板堆叠相对于激光器的速度而被间隔开并且精确定位。作为示例，在暴露于100kHz脉冲系列的以200毫米/秒移动的经热回火的基板中，单独脉冲将被间隔开2微米，以便创建分隔开2微米的损伤轨迹系列。在一些实施例中，经热回火的基板被定位在能够沿着至少一个轴平移的平移台(未示出)上。可以利用能够平移玻璃基板或光学递送头部的任何平移台或其他设备。

[0041] 转向图1A和图1B，对经热回火的基板进行激光钻孔的方法包括沿着光束传播方向观察，使脉冲激光束2聚焦成激光束焦线2b。激光束焦线2b为高能量密度区域。如图2中所示出的，激光器3(未示出)发射激光束2，所述激光束具有入射到光学组件6的部分2a。光学组件6在沿着光束方向(焦线的长度l)的限定外延范围内的输出侧将入射激光束转变为外延激光束焦线2b。

[0042] 本公开的实施例利用非衍射光束(“NDB”)来形成激光束焦线2b。典型地，激光加工

已经使用了高斯激光束。具有高斯强度分布的激光束的紧密焦点具有由以下等式给出的瑞利范围ZR:

$$Z_R = \frac{\pi n_0 w_0^2}{\lambda_0} \quad \text{等式 (1)}.$$

[0043] 瑞利范围表示光束的光斑大小 w_0 在波长 λ_0 的折射率 n_0 的材料中将增大 $\sqrt{2}$ 的距离。此限制是由衍射强加的。在等式(1)中注意的是,瑞利范围与光斑大小直接相关,从而导致具有紧密焦点(即,小光斑大小)的光束不能有长瑞利范围的结论。这种光束将仅在非常短的距离内维持此小光斑大小。这还意指,如果这种光束用于通过改变焦点区域的深度来钻孔穿过材料,则光斑在焦点的任一侧上的快速扩展将需要没有光学失真的大区域,所述光学失真可能限制光束的焦点性质。这种短瑞利范围还需要多个脉冲以便切穿厚样本。

[0044] 然而,本公开的实施例利用NDB而非以上讨论的光学高斯光束。在衍射效应不可避免地限制光束焦点之前,非衍射光束可以在相当长的距离内进行传播。虽然无限NDB不遭受衍射效应,但是在物理上可实现的NDB将具有有限的物理范围。光束的中心波瓣可以具有相当小的半径并且因此产生高强度光束。存在许多种类型的NDB,包括但不限于:贝塞尔(Bessel)光束、艾里(Airy)光束、韦伯(Weber)光束和马蒂厄(Mathieu)光束,它们的场分布通常由在横向方向上比高斯函数衰减更缓慢的特殊函数给出。

[0045] 应当理解的是,虽然在此在贝塞尔光束的背景下描述了所描述的NDB,但是实施例不限于此。贝塞尔光束的中心光斑大小由以下等式给出:

$$d = 2 \frac{2.405 \lambda_0}{NA \cdot 2\pi n_0} \quad \text{等式 (2),}$$

其中,NA是由与光轴形成角度 β 的平面波的圆锥体给出的数值孔径。贝塞尔光束与高斯光束之间的关键差异是贝塞尔光束的瑞利范围由以下等式给出:

$$Z_{max} = \frac{\pi D d}{4 \lambda} \quad \text{等式 (3),}$$

其中,D是由某个孔口或光学元件强加的有限光束范围。因此示出的是,孔口尺寸D可以用于将瑞利范围增大到由中心光斑的大小强加的限制之外。一种用于生成贝塞尔光束的实际方法是使高斯光束穿过具有径向线性相位梯度的轴锥镜或光学元件。

[0046] 通常,形成线状焦点(即,激光束焦线)的光学方法可以采取多种形式,诸如但不限于,使用圆环形激光束和球面透镜、轴锥镜透镜、衍射元件、或其他方法来形成高强度的线性区域。在美国专利申请号62/024122中描述了形成并且调整线状焦点的各种光学方法,所述专利申请通过引用以其全文结合在此。只要达到足够的光学强度以便产生基板材料的断裂,激光的类型(皮秒、飞秒等)和波长(IR、可见光、UV等)也可以被改变。

[0047] 激光功率和透镜焦距(其确定线焦距并且因此功率密度)是确保基板的完全穿透以用于切割的参数。因此,应当控制在基板中形成的线状焦点的尺寸。

[0048] 再次参考图1A和图1B,示意性地展示了其中将发生通过激光加工和多光子吸收进行内部改性的经热回火的基板1(例如,经热回火的玻璃)。经热回火的基板1可以布置在基板或载体上。在一些实施例中,多个经热回火的基板1以堆叠方式安排,以便同时加工。经热回火的基板1可以被定位在被配置用于沿着至少一个轴移动的平移台(未示出)上。例如,可

以由一个或多个控制器(未示出)控制平移台。经热回火的基板1被定位在光束路径中以便至少部分地与激光束2的激光束焦线2b重叠。例如,可以通过可以由一个或多个控制器(未示出)控制的激光源(未示出)来生成激光束2。分别地,参考号1a表示经热回火的基板1的面向(最靠近或邻近)光学组件6或激光器的表面,并且参考号1b表示经热回火的基板1的相反表面(与光学组件6或激光器远离或更远的表面)。经热回火的基板1的厚度(垂直于平面1a和1b,即垂直于基板平面测量的)用d标记。

[0049] 如图1A描绘的,经热回火的基板1被排列成与纵向光束轴线垂直并且因此处于由光学组件6产生的相同焦线2b的后面(基板垂直于所述图的平面)。沿着光束方向观察,经热回火的基板1相对于焦线2b定位,其方式为使得焦线2b(在光束的方向上观察)在经热回火的基板1的表面1a之前开始并且在经热回火的基板1的表面1b之前停止,即焦线2b在经热回火的基板1内终止并且不延伸超出表面1b。在激光束焦线2b与经热回火的基板1的重叠区域中(即,在经热回火的基板1的与焦线2b重叠的部分中),外延激光束焦线2b在经热回火的基板1中产生非线性吸收。(假设沿着激光束焦线2b的激光强度适当,所述强度由激光束2在长度1的区段(即,长度1的线状焦点)上的充分聚焦来保证,其限定了外延区段2c(沿着纵向光束方向对准),沿着所述外延区段在经热回火的基板1中产生了诱导非线性吸收。)诱导非线性吸收导致在经热回火的基板1中沿着区段2c形成损伤轨迹或裂纹。损伤轨迹或裂纹形成不仅是局部的,而是可以在外延诱导吸收区段2c的整个长度上延伸。区段2c的长度(其对应于激光束焦线2b与经热回火的基板1的重叠的长度)用参考号L标记。诱导吸收区段2c(或经热回火的基板1的材料中经历缺陷线或裂纹形成的区段)的平均直径或范围用参考号D标记。此平均范围D可以对应于激光束焦线2b的平均直径 δ ,即,在约0.1μm与约5μm之间的范围内的平均光斑直径。

[0050] 如图1A所示出的,由于沿着焦线2b的诱导吸收,经热回火的基板1(其对于激光束2的波长λ是透明的)被局部加热。诱导吸收起因于与焦线2b内的激光束的高强度(能量密度)相关联的非线性效应。图1B展示了被加热的经热回火的基板1最终将膨胀,从而使得相应诱导张力导致微裂纹形成,其中,张力在表面1a处最高。

[0051] 以下描述了可被应用于产生焦线2b的代表性光学组件6和其中可以应用这些光学组件的代表性光学装置。所有组件或装置均基于以上描述,从而使得相同的参考号用于相同的部件或特征或在功能上相等的部件或特征。因此,以下仅描述不同之处。

[0052] 为了确保沿着由损伤轨迹系列限定的轮廓的破裂后分离表面的高质量(关于断裂强度、几何精度、粗糙度和再加工要求的避免),应当使用下述光学组件(在下文中,光学组件可替代地还被称为激光光学器件)来生成用于形成限定开裂轮廓的损伤轨迹的单独焦线。分离表面的粗糙度主要由焦线的光斑大小或光斑直径决定。表面粗糙度可以由例如Ra表面粗糙度统计数值(经采样的表面的高度绝对值的粗糙度算术平均值)来表征。为了在给定波长λ的激光器3(与经热回火的基板1的材料相互作用)的情况下实现例如0.5μm至2μm的小光斑大小,通常必须对激光组件6的数值孔径强加某些要求。

[0053] 此处描述的激光切割工艺通常生成约0.1到1.0μm Ra的玻璃部件的暴露切割表面(边缘)的表面粗糙度,其中,Ra是经采样的表面的高度绝对值的统计粗糙度算术平均值,所述高度包括由于焦线的光斑直径导致的凸块高度。更一般地,对于此处所描述的激光工艺,切割边缘的Ra值为约0.25到0.75μm。

[0054] 为了实现所需的数值孔径,一方面,光学器件应当根据已知的阿贝公式 ($N.A. = n \sin(\theta)$, n :待加工的材料的折射率; θ :孔径角的一半;且 $\theta = \arctan(D/2f)$; D :孔径, f :焦距) 处理针对给定焦距所要求的开口。另一方面,激光束应当照射光学器件至所需孔径,这通常借助于使用激光器与聚焦光学器件之间的加宽望远镜进行的光束加宽来实现。

[0055] 出于沿着焦线均匀相互作用的目的,光斑大小不应当改变太大。这可以例如通过仅在小的圆形区域中照射聚焦光学器件来确保(见以下实施例),从而使得光束开口以及因此数值孔径的百分比仅稍微改变。

[0056] 图2A描绘了生成线状焦点的一种示例方法。如上所述,存在生成此处所描述的线状焦点的多种可替代方法,并且实施例不限于图2A中所描绘的示例。根据图2A(在激光辐射2的激光束簇(bundle)中的中心光束的水平处垂直于基板平面的截面;这里,同样,激光束2垂直地入射到经热回火的基板1上,即入射角为 0° ,从而使得聚焦线2b或外延诱导吸收区段2c平行于基板法线),由激光器3发射的激光辐射2a首先被引导至圆形孔口8上,其对所用的激光辐射是完全不透明的。孔口8被定向为垂直于纵向光束轴并且以所描绘的光束簇2a的中心光束为中心。选择孔口8的直径,其方式为使得使靠近光束簇2a的中心的光束簇或中心光束(在此用2aZ标记)撞击孔口并且被其完全阻挡。只有光束簇2a的外周边范围内的光束(边缘光线,在此用2aR标记)由于与光束直径相比的减小的孔口大小而不被阻挡,但是侧向地穿过孔口8并且撞击光学组件6的聚焦光学元件(在此实施例中,其被设计为球形切割的双凸透镜7)的边缘区域。

[0057] 透镜7以中心光束为中心并被设计为呈常见的球形切割透镜形式的未校正的双凸聚焦透镜。这种透镜的球面像差可以是有利的。作为替代方案,也可以使用偏离理想校正系统的非球面或多透镜系统,所述非球面或多透镜系统不形成理想焦点但是形成限定长度的不同狭长焦线(即,不具有单个焦点的透镜或系统)。透镜的区域因此沿着焦线2b聚焦,受制于距透镜中心的距离。横越光束方向的孔口8的直径是所述光束簇的直径的约90%(由针对将光束的强度降低至峰强度的 $1/e^2$ 所要求的距离限定的)并且是光学组件6的透镜的直径的约75%。因此,使用通过阻挡掉中心的光束簇产生的非像差校正的球面透镜7的聚焦线2b。图2A示出了穿过中心光束的一个平面中的截面,当所描绘的光束绕着焦线2b旋转时,可以看到完整的三维簇。

[0058] 这种类型的焦线的一个潜在的缺点是所述条件(光斑大小、激光强度)可能沿着焦线(以及因此沿着材料中的期望深度)改变并且因此可能仅在焦线的选定部分中有可能发生期望类型的相互作用(无熔融、诱导吸收、热塑性变形直至裂纹形成)。这反过来意指可能仅入射激光的一部分被待加工的材料以期望的方式吸收。以这种方式,可能损害工艺的效率(期望的分离速率所需要的平均激光功率),并且激光还可能被传输到非期望的区域(粘附到基板或基板保持夹具上的部分或层)并以非期望的方式(例如,加热、扩散、吸收、不需要的改性)与其相互作用。

[0059] 图2B-1至图2B-4示出了(不仅针对图2A中的光学组件,而且还针对任何其他适用的光学组件6)可以通过相对于经热回火的基板1适当地定位和/或对准光学组件6以及通过适当地选择光学组件6的参数来控制激光束焦线2b的位置。如图2B-1展示的,焦线2b的长度1可以被调整,其方式为使所述长度超过层厚度d(这里是2倍)。如果经热回火的基板1(在光束纵向上观察)置于焦线2b中央,则在整个基板厚度上生成外延诱导吸收区段2c。

[0060] 在图2B-2中所示的情况下,生成或多或少对应于基板厚度d的长度1的焦线2b。由于经热回火的基板1相对于线2b被定位,其方式为使线2b在待加工的材料外部的点处开始,外延诱导吸收区段2c的长度L(其此处从基板表面延伸到达限定的基板深度,但不延伸到达相反表面1b)比焦线2b的长度1更小。图2B-3示出了如下情况:经热回火的基板1(沿着光束方向观察)被定位在焦线2b的起点上方从而使得(如在图2B-2中)线2b的长度1大于在经热回火的基板1中的诱导吸收区段2c的长度L。因此,焦线在经热回火的基板1内开始并且延伸超过相反表面1b。图2B-4示出了如下情况:焦线长度1小于基板厚度d,从而使得在入射方向观察的基板相对于焦线中心定位的情况下,焦线在经热回火的基板1内在表面1a附近开始,并且在经热回火的基板1内在表面1b附近终止(例如,1=0.75·d)。例如,激光束焦线2b可以具有在约0.1mm与约100mm之间的范围内或约0.1mm与约10mm之间的范围内的长度1。例如,各个实施例可以被配置为具有约0.1mm、0.2mm、0.3mm、0.4mm、0.5mm、0.7mm、1mm、2mm、3mm或5mm的长度1。

[0061] 特别有利的是,对焦线2b进行定位,其方式为使表面1a、1b中的至少一个表面被焦线覆盖从而使得诱导非线性吸收区段2c至少在待加工的材料的一个表面上开始。以这种方式,有可能实现几乎理想的切割,同时避免在表面处的烧蚀、羽化和微粒生成。

[0062] 图3描绘了另一种适用的光学组件6。因为基本构造遵循图2A中所描述的基本构造,所以以下仅描述不同之处。所描绘的光学组件基于使用具有非球面自由表面的光学器件来生成焦线2b,所述焦线被成形,其方式为使得形成具有限定长度1的焦线。出于此目的,非球面透镜可以用作光学组件6的光学器件。在图3中,例如,使用也经常被称为轴锥镜的所谓圆锥形棱镜。轴锥镜是在沿着光轴的线上形成光斑源(或将激光束转变为环)的圆锥形切割透镜。这种轴锥镜的布局原则上是本领域技术人员已知的;在所述示例中,锥角为10°。在此,用参考号9标记的轴锥镜的顶点指向入射方向并以光束中心为中心。由于锥棱镜9产生的焦线2b开始于其内部,所以经热回火的基板1(此处与主光束轴垂直对准)可以被定位在光束路径中,直接在锥棱镜9的后面。如图3所示,还有可能由于锥棱镜的光学特性而沿着光束方向移动经热回火的基板1,同时仍在焦线2b的范围内。因此,经热回火的基板1的材料中的外延诱导吸收区段2c在整个深度d上延伸。

[0063] 然而,所描绘的布局受制于以下限制:由于由轴锥镜9形成的焦线2b的区域在轴锥镜9内开始,所以在轴锥镜9与待加工的材料之间存在间隔的情况下,激光能量的显著部分未被聚焦到焦线2b的诱导吸收区段2c(其位于所述材料内)内。此外,焦线2b的长度1通过轴锥镜9的折射率和锥角与光束直径相关。这是为什么,在相对薄的材料(数毫米)的情况下,总焦线比待加工的材料的厚度长得多,从而具有许多激光能量未聚焦到材料内的效应。

[0064] 出于此原因,可能期望使用包括轴锥镜和聚焦透镜两者的光学组件6。图4A描绘了这种光学组件6,在所述光学组件中,具有被设计用于形成外延激光束焦线2b的非球面自由表面的第一光学元件(沿着光束方向观察)被定位在激光器3的光束路径中。在图4A中所示出的情况下,此第一光学元件是具有5°锥角的轴锥镜10,所述轴锥镜垂直于光束方向定位并且以激光束为中心。轴锥镜的顶点被定向成朝向光束方向。第二聚焦光学元件在此为平凸透镜11(其弯曲被定向成朝向所述轴锥镜)在光束方向上与轴锥镜10相距距离z1定位。对距离z1(在这种情况下约300mm)进行选择,其方式为使得由轴锥镜10形成的激光辐射圆形地入射到透镜11的外部径向部分上。在限定长度(在这种情况下是1.5mm)的焦线2b上,透镜

11在距离 z_2 (在这种情况下,与透镜11相距约20mm)处的输出侧聚焦所述圆形辐射。在这个实施例中,透镜11的有效焦距为25mm。通过轴锥镜10进行的对激光束的圆形转变用参考号SR标记。

[0065] 图4B详细描绘了根据图4A的经热回火的基板1中的材料的焦线2b或诱导吸收2c的形成。选择元件10、11两者的光学特性及其定位,其方式为使得焦线2b在光束方向上的长度1与经热回火的基板1的厚度d完全相同。因此,应当提供经热回火的基板1沿着光束方向的精确定位以便将焦线2b精确定位在经热回火的基板1的两个表面1a与1b之间,如图4B中所示。

[0066] 因此,如果在距激光光学器件一定距离处形成焦线,并且如果激光辐射的更大部分聚焦到焦线的期望端,则是有利的。如所描述的,这可以通过仅将主聚焦元件11(透镜)圆形地(环形地)照射在特定外部径向区域上来实现,这一方面用于实现所需要的数值孔径以及因此所需要的光斑大小,并且,然而,在另一方面,由于形成了基本上圆形的光斑,所以在焦线2b之后,漫射的圆在光斑的中心的非常短的距离上强度减小。以这种方式,裂纹形成在所需的基板深度中的短距离内停止。轴锥镜10与聚焦透镜11的组合满足此要求。轴锥镜以两种不同方式起作用:由于轴锥镜10,将通常圆形的激光光斑以环的形状发送到聚焦透镜11,并且轴锥镜10的非球面性具有在透镜的焦平面(而非焦平面中的焦点)之外形成焦线的效应。焦线2b的长度1可以经由轴锥镜上的光束直径进行调整。另一方面,沿着焦线的数值孔径可以经由轴锥镜-透镜距离 z_1 并且经由轴锥镜的锥角进行调整。以这种方式,全部激光能量可以集中在焦线上。

[0067] 如果裂纹形成旨在持续至待加工的层或材料的背面,则所述圆形(环形)照射仍然具有以下优点:(1)在大部分激光仍然集中在焦线的所需长度中的意义上,激光功率被最佳地使用,以及(2)有可能实现沿着焦线的均匀光斑大小——以及因此沿着由焦线产生的损伤轨迹的均匀分离过程——由于圆形照射的区域结合借助于其他光学功能设置的期望像差。

[0068] 代替图4A中所描绘的平凸透镜,还有可能使用聚焦弯月形透镜或另一种更高校正聚焦透镜(非球面透镜、多透镜系统)。

[0069] 为了使用图4A中所描绘的轴锥镜与透镜组合来生成非常短的焦线2b,可能需要入射到轴锥镜上的激光束的非常小的光束直径。这具有实际的缺点:将光束定中心置于轴锥镜顶点上必须是非常精确的,并且结果对于激光的方向变化(光束漂移稳定性)是非常敏感的。此外,紧密准直的激光束是非常发散的,即,光束簇由于光偏转而在短距离内变得模糊。

[0070] 如图5所示,通过在光学组件6中包括另一透镜(准直透镜12),两种效应均可以避免。附加准直透镜12用于非常紧密地调整聚焦透镜11的圆形照射。选择准直透镜12的焦距 f' ,其方式为使得期望的圆直径 dr 产生自从轴锥镜至准直透镜12的距离 z_{1a} ,所述距离等于 f' 。所述环的期望宽度 br 可以经由距离 z_{1b} (准直透镜12至聚焦透镜11)进行调整。作为纯几何学问题,圆形照射的小宽度导致短焦线。可以在距离 f' 处实现最小值。

[0071] 因此,图5中所描绘的光学组件6基于图4A中所描绘的光学组件,所以以下仅描述了不同之处。在此还被设计成平凸透镜(其弯曲朝向光束方向)的准直透镜12另外地居中放置在一侧的轴锥镜10(其顶点朝向光束方向)与在另一侧上的平凸透镜11之间的光束路径中。准直透镜12距轴锥镜10的距离被称为 z_{1a} ,聚焦透镜11距准直透镜12的距离被称为 z_{1b} ,

并且焦线2b距聚焦透镜11的距离被称为z2(始终在光束方向上观察)。如图5中所示,由轴锥镜10形成的发散地入射在准直透镜12上并且在圆形直径dr以下的圆形辐射SR针对在聚焦透镜11处的至少约恒定的圆形直径dr沿着距离z1b被调整至所需圆形宽度br。在所示出的情况下,旨在生成非常短的焦线2b,从而使得在透镜12处的约4mm的圆形宽度br由于透镜12的聚焦性质减少至在透镜11处的约0.5mm(在示例中,圆形直径dr为22mm)。

[0072] 在所描绘的示例中,有可能使用2mm的典型激光束直径、具有焦距 $f=25\text{mm}$ 的聚焦透镜11、具有焦距 $f'=150\text{mm}$ 的准直透镜以及选择距离 $Z_{1a}=Z_{1b}=140\text{mm}$ 和 $Z_2=15\text{mm}$ 来实现小于0.5mm的焦线1的长度。

[0073] 现在将描述用于切割经热回火的基板的激光加工方法。参照图6A,示意性地展示了经热回火的基板1(如经热回火的玻璃基板)。经热回火的基板1包括第一表面1a和第二表面1b。从第一表面1a和第二表面1b延伸朝向经热回火的基板1的内部的是处于压缩应力下的压缩区域1c。处于张力下的内张力区域1d布置在压缩区域1c之间并且平衡压缩区域1c的压缩应力。压缩区域的深度(即,层的深度(“DOL”))取决于回火工艺。作为示例而非限制,对于经热回火的玻璃,DOL可以大于100 μm 。图6B示出了经热回火的玻璃基板的典型应力分布。虽然内部应力的精确水平和特定函数依赖将取决于玻璃基板的精确热回火条件和厚度,但是一般来说,应力的函数依赖将采取抛物线形状,其中,压缩应力的最高幅值处于玻璃表面附近,并且拉伸应力的最高幅值处于玻璃基板中心附近。在距玻璃表面中的每个玻璃表面的一定深度处,应力从压缩应力过渡到拉伸应力,并且这些过渡点限定了图6A中所示出的压缩和拉伸区域的边界。

[0074] 注意,其他激光工艺通常通过在玻璃表面附近或在玻璃内特定位置深度处引入局部损伤来切割基板。机械切割工艺通过在玻璃的最顶部表面处引入开孔或裂纹而进行切割。在这种情况下,制作完全穿透可能存在于经热回火的玻璃中的厚压缩应力层(大于约100 μm)的损伤区域可能具有挑战性。这意指可能难以使用机械的或者过去已知的激光方法来在经热回火的玻璃中以受控的方式发起裂纹。相比而言,此处所描述的激光方法能够快速形成可以在垂直于玻璃表面(多毫米)的尺寸上更进一步延伸的损伤轨迹,并且甚至可以使其一直延伸穿过玻璃厚度。相比使用其他激光方法可实现的控制,这允许对断裂平面定向的更好控制。

[0075] 为了切割经热回火的玻璃,脉冲激光束的波长对于材料应当是透明的。作为示例而非限制,所述波长可以是1064nm激光器。脉冲持续时间和强度应足够短以实现上述的多光子吸收效应。可以利用超短脉冲激光器(如皮秒或飞秒激光源)。在一些实施例中,可以利用约10皮秒脉冲激光器。作为示例而非限制,在约1mm与约3mm范围之间的线状焦点,以及以200kHz(250uJ/脉冲)的重复率产生大于约50W的输出功率的约10皮秒脉冲激光器的情况下,则线状区域中的光学强度可以容易地足够高以便在经热回火的玻璃基板中创建非线性吸收。

[0076] 注意,对在此所描述的这种皮秒激光器的操作产生具有子脉冲5a的“脉冲串”5。图7A描绘了两个连续脉冲串5,每个脉冲串包括三个子脉冲5a、5a'和5a''(统称“5a”)。产生脉冲串是一种类型的激光操作,其中,脉冲发射并非呈均匀且稳定的流,而是呈紧凑的子脉冲簇。每一个脉冲串包含多个非常短持续时间的单独子脉冲5a(如至少2个子脉冲、至少3个子脉冲、至少4个子脉冲、至少5个子脉冲、至少10个子脉冲、至少15个子脉冲、至少20个子脉冲

或更多)。也就是说,脉冲串5是一“袋”子脉冲5a,并且脉冲串5彼此之间通过比每个脉冲串内的相邻单独脉冲的间隔更长的持续时间分离。参照图7B,其绘制了图7A的子脉冲5a的相对于时间的激光发射,子脉冲可以具有高达100皮秒(例如0.1皮秒、5皮秒、10皮秒、15皮秒、18皮秒、20皮秒、22皮秒、25皮秒、30皮秒、50皮秒、75皮秒或介于其间)的脉冲持续时间 T_d 。在单个脉冲串5内的这些单独子脉冲(例如,子脉冲5a、5a' 和5a")在本文中被称为子脉冲以便表示其在单个脉冲串内发生的事。脉冲串5内的每个单独子脉冲5a、5a' 和5a"的能量或强度可以不等于脉冲串内的其他子脉冲的能量或强度,并且脉冲串内的多个子脉冲的强度分布通常遵循由激光器设计管理的时间上的指数衰减。

[0077] 参照图7C,优选地,在此所描述的示例性实施例的脉冲串5内的每个子脉冲(例如,子脉冲5a、5a' 和5a")与所述脉冲串中的后续子脉冲在时间上分离从1纳秒至50纳秒(例如,10至50纳秒,或10至30纳秒,其中,时间经常由激光器腔设计管理)的持续时间 T_p 。对于给定激光器,脉冲串5内的每个子脉冲之间的时间间隔 T_p (子脉冲至子脉冲间隔)相对均匀($\pm 10\%$)。例如,在一些实施例中,脉冲串内每个子脉冲与后续子脉冲在时间上分离约20纳秒(50MHz)。例如,对于产生约20纳秒的子脉冲间隔 T_p 的激光器,脉冲串内的子脉冲至子脉冲间隔 T_p 维持在约 $\pm 10\%$ 内或约 ± 2 纳秒。具有子脉冲5a的每个脉冲串5之间的时间(即,脉冲串之间的时间间隔 T_b)将长得(例如,0.25微秒 $\leq T_b \leq 1000$ 微秒,例如,1至10微秒或3至8微秒)。在此所描述的激光器的一些示例性实施例中,对于具有约200kHz的脉冲串重复率或重复频率的激光器,时间间隔 T_b 约5微秒。激光脉冲串重复率(在此也被称为脉冲串重复频率)被定义为脉冲串5中的第一子脉冲5a到后续脉冲串5中的第一子脉冲5a之间的时间。在一些实施例中,脉冲串重复频率可以处于约1kHz与约4MHz之间的范围内。更优选地,激光脉冲串重复率可以处于例如在约10kHz与650kHz之间的范围内。每个脉冲串内的第一子脉冲与后续脉冲串内的第一脉冲之间的时间 T_b 可以为0.25微秒(4MHz脉冲串重复率)至1000微秒(1kHz脉冲串重复率),例如0.5微秒(2MHz脉冲串重复率)至40微秒(25kHz脉冲串重复率),或2微秒(500kHz脉冲串重复率)至20微秒(50kHz脉冲串重复率)。精确定时、脉冲持续时间和脉冲串重复率可以根据激光器设计改变,但高强度的短子脉冲($T_d < 20$ 皮秒,并且优选地, $T_d \leq 15$ 皮秒)已经被示出为特别良好地工作。

[0078] 对能够生成此类脉冲串的激光器的使用有利于切割或改性透明材料(例如,玻璃)。与使用在时间上由单脉冲激光的重复率隔开的单脉冲相比,使用脉冲串序列(其使激光能量分布于脉冲串5内的快速子脉冲序列上)允许获得与材料的高强度相互作用的更大的时间尺度(与和单脉冲激光器的高强度相互作用可能获得的时间尺度相比)。虽然单脉冲可以在时间上扩展,但是当发生这种情况时,脉冲内的强度必须下降大致脉冲宽度分之一。因此,如果10皮秒的单脉冲扩展到10纳秒脉冲,则强度大约下降三个数量级。此种下降可以将光学强度降低到非线性吸收不再是显著的并且光材料相互作用不再足够强以允许切割的点。

[0079] 相比之下,在脉冲串激光器的情况下,在脉冲串5内的每个子脉冲5a期间的强度可以维持得非常高——例如在时间上分离约10纳秒的三个10皮秒子脉冲5a仍允许每个子脉冲内的强度比单个10皮秒脉冲的强度低约仅三倍,同时所述激光器能够在现在大三个数量级的时间尺度内与材料相互作用。因此,对在脉冲串内的多个子脉冲5a的这种调整允许对激光-材料相互作用的时间尺度进行操纵,其方式为可以促进更多或更少的与预先存在的

等离子体羽的光相互作用,更多或更少的与已由初始或先前的激光脉冲预激励的原子和分子之间的光-材料相互作用、以及可以促进微裂纹的受控生长的所述材料内的更多或更少的热效应。用于对材料进行改性所需的脉冲串能量的量将取决于基板材料成分以及用于与基板相互作用的线状焦点的长度。相互作用区越长,能量散布出的越多,并且将需要越高的脉冲串能量。精确定时、子脉冲持续时间和脉冲串重复率可以根据激光器设计改变,但高强度的短子脉冲(<15皮秒,或≤10皮秒)已经被示出为与此技术良好地工作。

[0080] 当具有子脉冲5a的单个脉冲串5撞击玻璃基板上基本相同位置时,在材料中形成缺陷线或孔。也就是说,单个脉冲串5内的多个子脉冲5a对应于玻璃中的单条缺陷线或孔位置。因为平移了玻璃基板(例如,通过不断移动的平台,或相对于玻璃移动了光束),所以脉冲串5内的单独子脉冲5a无法处于玻璃基板上完全相同的空间位置处。然而,它们彼此很好地在 $1\mu\text{m}$ 内,即,它们在基本上相同的位置处撞击玻璃基板。例如,子脉冲5a可以以彼此间隔 sp 撞击玻璃基板,其中, $0 < sp \leq 1000\text{nm}$ 。例如,当使用具有20个子脉冲的脉冲串5击中玻璃基板的位置时,脉冲串5内的单独子脉冲5a在彼此的 250nm 内撞击玻璃。因此,在一些实施例中, $1\text{nm} < sp < 250\text{nm}$ 。在一些实施例中, $1\text{nm} < sp < 100\text{nm}$ 。

[0081] 如上所述,由脉冲激光器产生的脉冲串用于沿着延伸穿过经热回火的基板的限定线快速沉积能量,从而创建通常延伸约 1mm 到 3mm 穿过经热回火的基板的主体的损伤轨迹。损伤轨迹的长度取决于所使用的光学器件的焦距。

[0082] 现在参照图8,示意性地展示了具有通过激光工艺形成的损伤轨迹13序列的经热回火的基板1。损伤轨迹13一般采用具有约 $0.1\mu\text{m}$ 至约 $1.5\mu\text{m}$ 的内部展开尺寸(即,宽度w)的孔形式。由于所述孔可能被阻断或封闭在区域内,所以所述孔可以是贯穿损伤轨迹长度的连续开口或可以不是这种情况。此外,每个损伤轨迹13周围的改性玻璃或开裂区域可以明显更大(从几微米到几十微米),其范围可以取决于线状焦点的精确尺寸、用于形成每个损伤轨迹13的脉冲串能量的量以及精确激光条件(如每脉冲串的子脉冲数)。因此,有可能使用单个高能量脉冲串来在透明材料中创建微观(即,在一些实施例中在直径上 $< 2\mu\text{m}$ 且 $> 100\text{nm}$,并且在一些实施例中 $< 0.5\mu\text{m}$ 且 $> 100\text{nm}$)细长“孔”(在本文中还被称为穿孔或缺陷线)。这些单独穿孔可以以几百千赫(例如,每秒数十万个穿孔)的速率来产生。因此,在光源与材料之间的相对运动的情况下,这些穿孔或损伤轨迹13可以置于基板内的任何期望位置处。在一些实施例中,损伤轨迹13是“通孔”,其是从透明材料的顶部延伸到底部的孔或开放通道。在一些实施例中,损伤轨迹13可以不是连续的通道,并且可以被固体材料(例如,玻璃)的部分或区段阻断或部分地阻断。如本文中所定义的,损伤轨迹13的内径是开放通道或气孔(或空隙)的内径。例如,在此处所描述的实施例中,损伤轨迹13的内径是 $< 500\text{nm}$ (例如, $\leq 400\text{nm}$,或 $\leq 300\text{nm}$)。在此处所公开的实施例中,围绕孔的材料的中断或改性区域(例如,压实的、熔融的、或以其他方式改变的)优选地具有 $< 50\mu\text{m}$ (例如, $< 10\mu\text{m}$)的直径。

[0083] 在所展示的示例中,通过脉冲激光束2创建的激光束焦线2b被定位在经热回火的基板1内从第一表面1a延伸。损伤轨迹13在经热回火的基板1的主体内具有长度L。每个损伤轨迹13的至少一部分处于经热回火的基板1的内张力区域1d内。如上所述,每个损伤轨迹13可以由子脉冲串创建或其完全可以由单个脉冲形成。附加脉冲不使损伤轨迹13更深地延伸穿过材料;然而,其可以改变损伤轨迹13的精确尺寸或围绕其的改性材料的范围。

[0084] 因为经热回火的基板1在聚焦激光束下方平移(或者可替代地,因为聚焦激光束相

对于经热回火的基板平移),所以每个损伤轨迹之间的横向间隔(即间距p)由激光器的脉冲速率决定。为了产生不同间距的损伤轨迹13,可以触发激光器来以更长或更短间隔发射光辐射。可以通过经热回火的基板1的硬度(即,其产生微裂纹的趋势)和经热回火的基板1中的帮助微裂纹传播的应力水平来管理每个损伤轨迹13之间的间距选择。通常,具有更高应力水平的经热回火的基板以损伤轨迹之间的更宽间隔被切割,并且具有更低应力水平的经热回火的基板以其间具有更近间隔的损伤轨迹被切割。作为非限制性示例,横向间隔可以处于 $2\mu\text{m}$ 与 $20\mu\text{m}$ 之间。

[0085] 经热回火的基板1的主体内的每个损伤轨迹13的形成使一个或多个微裂纹14至少部分地由于经热回火的基板1的内部应力而从损伤轨迹13延伸。应当理解的是,图8中示意性地示出了微裂纹14,并且其可以采取不同于图8中描绘的形状/或方向的形状和/或方向。进一步地,在一些情况下,仅一个裂纹或微裂纹可以从损伤轨迹13延伸。

[0086] 如图8中所示出的,微裂纹在相邻损伤轨迹13之间延伸。不受理论的束缚,认为损伤的小横向范围(即,在通常平行于第一或第二表面1a、1b的方向上从损伤轨迹13延伸的(多个)微裂纹14)连同损伤轨迹13的长深度尺寸L使这种激光方法能够切割经热回火的玻璃基板。通过保持小横向损伤,裂纹或微裂纹14不会在下一损伤轨迹形成之前生长太快或在变得太大。进一步地,通过使损伤轨迹相对较长(即,长于微裂纹14),所述工艺确保可以到达在经热回火的玻璃的情况下被埋在距第一和第二表面1a、1b很远的经热回火的玻璃基板1的内张力区域1d。如果损伤没有延伸到内张力区域1d,则裂纹将不会增大,或更重要的是,裂纹将不会以时控方式增大。

[0087] 图8示意性地描绘了已经通过本文中所公开的方法仅部分地激光加工的经热回火的基板1。已经创建了许多损伤轨迹13,其中,微裂纹14从所述损伤轨迹延伸。所展示的焦线2b将把另一个损伤轨迹13'形成到经热回火的基板1的主体中。由于形成了损伤轨迹13'(和/或仅在其形成之后),微裂纹14'开始从其传播。激光束2相对于经热回火的基板1的相对速度为使得激光束焦线2b相对于经热回火的基板1在由箭头30表示的方向上前进,从而使得微裂纹14'将被引导朝向损伤轨迹系列内的下一个尚未形成的损伤轨迹。以这种方式,沿着通过损伤轨迹13形成的损伤线15引导微裂纹并且沿着此损伤线15成功切割经热回火的基板1。

[0088] 不受理论束缚,此处所描述的方法由于在使微裂纹传播的足够强大的内部损伤事件发生之前的贯穿经热回火的基板的本体的厚度的大部分或全部快速且清楚地限定大损伤平面或轮廓的能力而可以能够切割所述经热回火的基板。然后,此现在限定的损伤平面或轮廓引导任何后续开裂,从而允许材料沿着预定义轮廓分离,而不是以将使玻璃板破碎成多个片的未受控方式行进。其他方法(其他激光和机械刻划方法)不能够在这种经热回火的基板中的高内部应力响应于切割工艺引入的损伤而被释放之前完全建立这种损伤平面或轮廓,意味着后续开裂不受控制。

[0089] 与在仅短得多的区域上创建损伤的常规激光方法相比,使用线状焦点建立内部损伤允许人们在单次通过时相对于经热回火的基板的厚度限定很长(例如,约1mm或更长)的区域。此外,对线状焦点的使用将激光能量分布成沿着某个线性区域,其中,所述线性区域中的任何特定位置都不具有比任何其他位置高得多(例如,>2-3X)的能量密度。

[0090] 相比而言,将高斯光束聚焦在基板内将在范围上创建小损伤区域,通常仅数十微

米或可能一百微米。因此,这并未在经热回火的基板内限定许多毫米厚的完整损伤“墙”,除非执行很多、很多次通过(几十次通过)。进一步地,根据高斯光束焦点的性质,高斯光束焦点在沿着光束传播的光轴(焦点)的小局部区域内比远离所述焦点的几个瑞利范围更强烈。因此,如果使高斯光束足够强烈以便限定几十微米或更多的损伤轨迹,则在焦点斑点本身处,很容易创建损伤,所述损伤足够强以至于其将在板内发起不受控制的开裂。这使得允许在不发起不受控开裂的情况下限定损伤平面的任何工艺窗口极其窄(或不存在)。

[0091] 在化学强化玻璃的情况下,类似的概念集适用。优选的是,在微裂纹传播之前使用如线状焦点等方法来在玻璃基板内(理想地穿过玻璃基板的完整深度)完整地限定损伤平面或轮廓。然而,由于这种化学强化玻璃在其中通常不具有与经热回火的玻璃相同的内力水平,所以化学回火玻璃可以是更宽大的。如果没有完整地形成损伤平面,则仍然可以足够好地控制后续开裂以便在期望轮廓周围产生部分,并且此外,在发起对张力层的损伤时,这种化学强化板不会像经热回火的板一样快递开裂并且具有快速裂纹传播。对于更低中心张力的玻璃(例如,CT<20MPa),工艺窗口是最宽的和最宽大的以至于没有完全形成的损伤平面或轮廓,而对于更高中心张力的板(例如,CT>20MPa,特别是CT>50MPa),工艺窗口更窄并且需要对预定义损伤平面和轮廓的更快速并且完整形成。最后,化学强化玻璃板的厚度通常比经热回火的玻璃板的厚度(通常>3mm)小得多(通常<2.5mm)。这意味着对于经热回火的板,限定贯穿玻璃板的厚度的大部分的损伤平面或轮廓更具挑战性,与使用其他激光方法相比,使用在范围上>1mm的线状焦点特别有利。

[0092] 应将激光功率和透镜焦距(其确定线焦距并且因此功率密度)选择成用于确保玻璃的完全穿透和低微开裂。例如,激光功率可以处于约25W与约60W之间。可以通过使用太短的焦距透镜(例如,30mm或40mm)(其在线状焦点中生成极其高的功率密度)、太高的脉冲串能量或损伤轨迹之间太密集的间距诱导的更高功率密度来切割玻璃的尝试可能导致经热回火的玻璃基板的碎片化。作为非限制性示例,对于经热回火的玻璃基板,已经发现,约1到3mm的线状焦距、150到750μJ/脉冲串的激光脉冲串能量、2到15μm的损伤轨迹横向间隔和每脉冲串2到15个子脉冲是可接受范围。更优选地,可以使用150到250μJ的串脉冲能量,并且可以使用3到6个子脉冲/脉冲串,连同5到10μm的损伤轨迹横向间隔。

[0093] 对于线状焦点完全穿过基板主体的更薄(例如,小于2.5mm)的经热回火的基板,可能仅需要脉冲激光束的单次通过。然而,对于更厚的经热回火的基板,可以利用多通过方式,其中,每个后续通过处的焦点上升以便允许N次通过之后对经热回火的基板的完全切割。虽然有可能以比之前形成的损伤轨迹的设置更低的焦点设置(即,距聚焦光学器件更远)来形成损伤轨迹,但是通常优选的是,首先进行最低焦点通过并且然后在后续通过时使焦点上升。这可以帮助防止之前形成的损伤轨迹干扰激光束的传播。

[0094] 图9示意性地描绘了具有如通过激光通过线A、B和C描绘的三次通过的经热回火的基板。对于激光通过线A,激光束焦线2b的中点M_A在第一压缩区域1c内。对于激光通过线B,激光束焦线2b的中点M_B在内张力区域1d内。对于激光通过线C,激光束焦线2b的中点M_C在第二压缩区域1c'内。

[0095] 图10A和图10B是使用此处描述的激光工艺的经热回火的钠钙玻璃板20的激光切割边缘27的显微图象。使用两次激光通过来切割3.2mm厚的经热回火的玻璃板。图10A描绘了经热回火的玻璃板20的第一表面21a(即,激光入射表面)。尽管在显微图像中很难看到,

但沿着经热回火的玻璃板的第一表面21a可以看到单独损伤轨迹23的入口。损伤轨迹23穿过压缩区域21c延伸到经热回火的玻璃板20的主体中并且进入内张力区域21d中。在约592 μ m深度处,在激光切割边缘27中看见结构改变25,其可能与此片经热回火的玻璃层的近似深度(内张力区域21d的深度)相关。

[0096] 图10B描绘了第二表面21b(即,激光出射表面)。尽管在显微图像中很难看见,但激光诱导的损伤轨迹23沿着经热回火的玻璃的激光切割边缘27而存在。与图10A相类似,在约546 μ m深度处在切割边缘中存在结构改变25',其可能与此片经热回火的玻璃的层深相关。

[0097] 图11示出了经热回火的玻璃片30的切割边缘37的顶部视图(与从切割边缘侧看到的视图相反的从玻璃片的顶侧看到的视图)。在约6微米的周期内,可以看见沿着边缘的周期性扇形边。这些特征起因于限定已经沿着其分离经热回火的玻璃30的边缘37的激光穿孔或进入孔。扇形边的幅度(垂直于切割表面的深度)约1微米(例如,<3微米或<2微米,更通常地<1微米)。

[0098] 图12A、图12B和图12C示出了三片约3.2mm厚的经热回火的玻璃板40A、40B、40C的暴露激光切割边缘47A、47B、47C的侧视图(横截面),其中,在没有诱导灾难性粉碎(碎片化)情况下切割玻璃板。在这三种情况之间,改变了精确聚焦条件,从而导致在每片的侧中明显的不同穿孔(损伤轨迹)结构。在图12A中,在玻璃片的上部80%中看见损伤轨迹,而底部20%仅展示弱激光标记。在图12B中,损伤轨迹存在于玻璃片的上部90%中,然而,存在距玻璃片的顶部约1/3的表明断裂面未被激光损伤轨迹精确地引导的深度约为500微米的区域。然而,由于玻璃片的大部分深度使断裂平面受控,所以玻璃片以受控方式分离。在图12C中,激光损伤轨迹仅在玻璃边缘的中心约60%(更多地通过拉伸应力控制的区域)中明显,而未存在于边缘的上下约20%(其是更多地通过压缩应力控制的区域)中。然而,在上述所有情况下(图12A、图12B、图12C),玻璃深度的一部分被激光穿孔(在所有三种情况下,>50%),足以使得断裂面受到良好控制,并且玻璃片沿着由激光限定的轮廓分离,这与导致对玻璃板的不受控裂纹传播和灾难性碎片化相反。

[0099] 图13A、图13B和图13C示出了三片约5.5mm厚的经热回火的玻璃板50A、50B、50C的暴露激光切割边缘57A、57B、57C的侧视图(横截面),其中,在没有诱导灾难性粉碎(碎片化)情况下切割玻璃板。图13A示出了玻璃板的深度的下部80%(约4.5mm)被由三次激光通过形成的激光损伤轨迹覆盖。图13B使玻璃板深度的上部80%被三次激光通过的损伤轨迹覆盖,并且图13C使玻璃板的中部被损伤轨迹覆盖,其中,上部5%未被强烈穿孔并且下部15%未被强烈穿孔。横跨图像水平延伸的薄玻璃区域示出了激光损伤轨迹到达其范围终点的近似区域,表明每次通过有损穿孔约1.5mm的深度。注意,在所有情况下,对玻璃板深度的>75%完全穿孔,从而限定了穿过玻璃板的大部分深度的玻璃断裂面。这允许所有5.5mm的经热回火的板在没有灾难性碎片化的情况下被成功地切割和分离。

示例

[0100] 使用本文中所描述的激光加工方法来切割具有不同厚度的在玻璃表面处具有大于69MPa(10000psi)的压缩应力的经完全热回火的钠钙玻璃。发现下列条件对在不产生碎片化的情况下对切割材料是有效的:

- 具有大于约30W的输出功率的1064nm皮秒激光器
- 产生约2mm长的线状焦点的光学系统参数:

- 到达轴锥透镜的约 $3\text{mm } 1/e^2$ 的输入光束直径;
- 轴锥角=10度;
- 初始准直透镜焦距=125mm;以及
- 最终物镜焦距=50mm;
- 每脉冲串5个子脉冲,(递送到玻璃的激光脉冲串能量为约 $160\mu\text{J}$) ;以及
- 相邻损伤轨迹之间约 $7\mu\text{m}$ 的间距并且激光器与基板之间约1米/秒的相对运动速度 ($7\mu\text{m}$ 间距和1米/秒的速度意指以142kHz的速率产生新损伤轨迹或每7微妙产生一个)。

[0101] 应当理解的是,上述参数仅出于说明性目的,并且实施例不限于此。其他参数也是可能的,特别是对于除了完全经热回火的钠钙玻璃之外的经热回火的基板。

示例1

[0102] 对于此示例,使用在玻璃板内的在不同焦高处创建了两条损伤轨迹损伤线的两次激光通过来切割3.2mm厚的经完全回火的钠钙玻璃板。激光器和光学参数为上面所提供的参数。

[0103] 第一次通过的焦点设置为使得线状焦点以约玻璃板的中心为中心。使用在物理上更低(1.1mm)的地方的光学器件来设置第二次通过的焦点,考虑到玻璃的折射率,所述光学器件将产生中心非常靠近玻璃底部的线状焦点。玻璃没有分离,直到完成第二(下部)激光通过。产生最好结果的焦点设置如下:

- 第一次激光通过:焦点设置在 $z=2.3\text{mm}$ 处;并且
- 第二次激光通过:焦点设置在 $z=1.18\text{mm}$ 处。

[0104] 经完全热回火的玻璃板具有存在于其主体内的足够应力(中心张力),从而使得在使用上述激光条件曝光后,玻璃基板沿着由损伤线创建的路径快速分离。如上所述,保持足够的切割速度是很重要的,从而使得从损伤轨迹出现的微裂纹不会“超出”损伤轨迹。如果速度设置得太低,则微裂纹可以变得不受控制并且不会遵循损伤轨迹,这导致玻璃最后破碎。

示例2

[0105] 在下一示例中,使用三次激光通过来切割5.5mm厚的经热回火的钙钠玻璃板。除了以下条件之外,激光条件与如在示例1中提供的条件相同:

- 第一次激光通过:焦点设置在 $z=2.8\text{mm}$ 处;
- 第二次激光通过:焦点设置在 $z=3.7\text{mm}$ 处;
- 第三次通过:焦点设置在 $z=5.0\text{mm}$ 处;并且
- 激光脉冲能量:约 $190\mu\text{J}$ 。

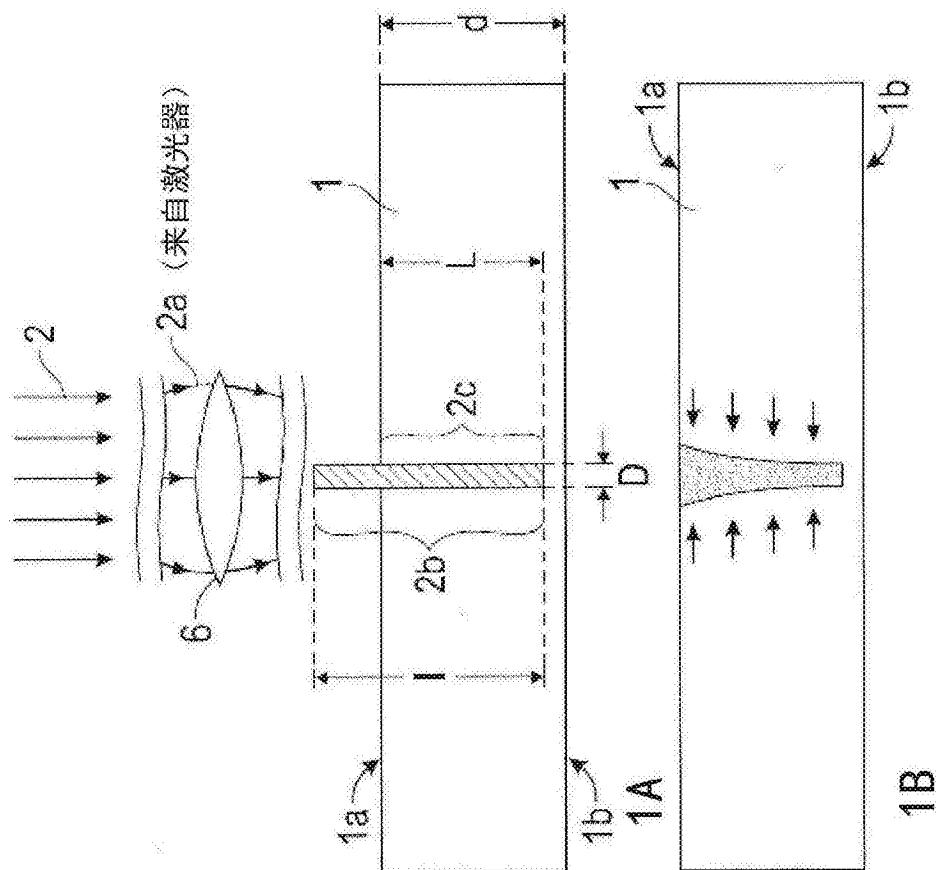
[0106] 激光工艺使损伤线处于玻璃板内的逐渐更高的位置处。第一次通过使损伤线处于玻璃板的下三分之一处,第二次通过使用光学器件使其处于物理上比第一损伤线高约0.9mm处(或考虑到折射率,在玻璃板内高约1.4mm处),并且最后一次通过使用光学器件使其处于高于约1.3mm处(玻璃板内高于约1.95mm)。在完成第三次通过之后,玻璃板被切割。

[0107] 此处所描述的激光加工方法不仅可以用于沿着直线切割经热回火的基板,而且可以用于沿着曲线切割由经热回火的基板制成的任意形状制品。

[0108] 现在应当理解的是,此处所描述的实施例提供了在不需要在期望切割线周围进行局部淬火情况下对经热回火的基板的激光切割。实施例使用超短脉冲激光器和专用光学递

送系统来在经热回火的玻璃内创建精确损伤轨迹。这些损伤轨迹引导由经热回火的基板内的内部应力造成的微裂纹的传播,这允许裂纹传播被精确控制,从而防止经热回火的基板在切割过程期间破碎。此处所描述的方法允许玻璃在回火工艺之后被切割成期望的形状。此外,此处所描述的实施例以高速(例如,在一些实施例中约1米/秒)切割经热回火的基板并且可以形成复杂形状(如矩形、倒角形、半径拐角或圆形)。进一步地,此处所描述的工艺可以用于多种基板厚度和回火水平。

[0109] 虽然本文中描述了示例性实施例,但本领域的技术人员将理解是的,在不偏离所附权利要求书所包含的范围的情况下,可以在对作出形式和细节上的各种改变。



图

图

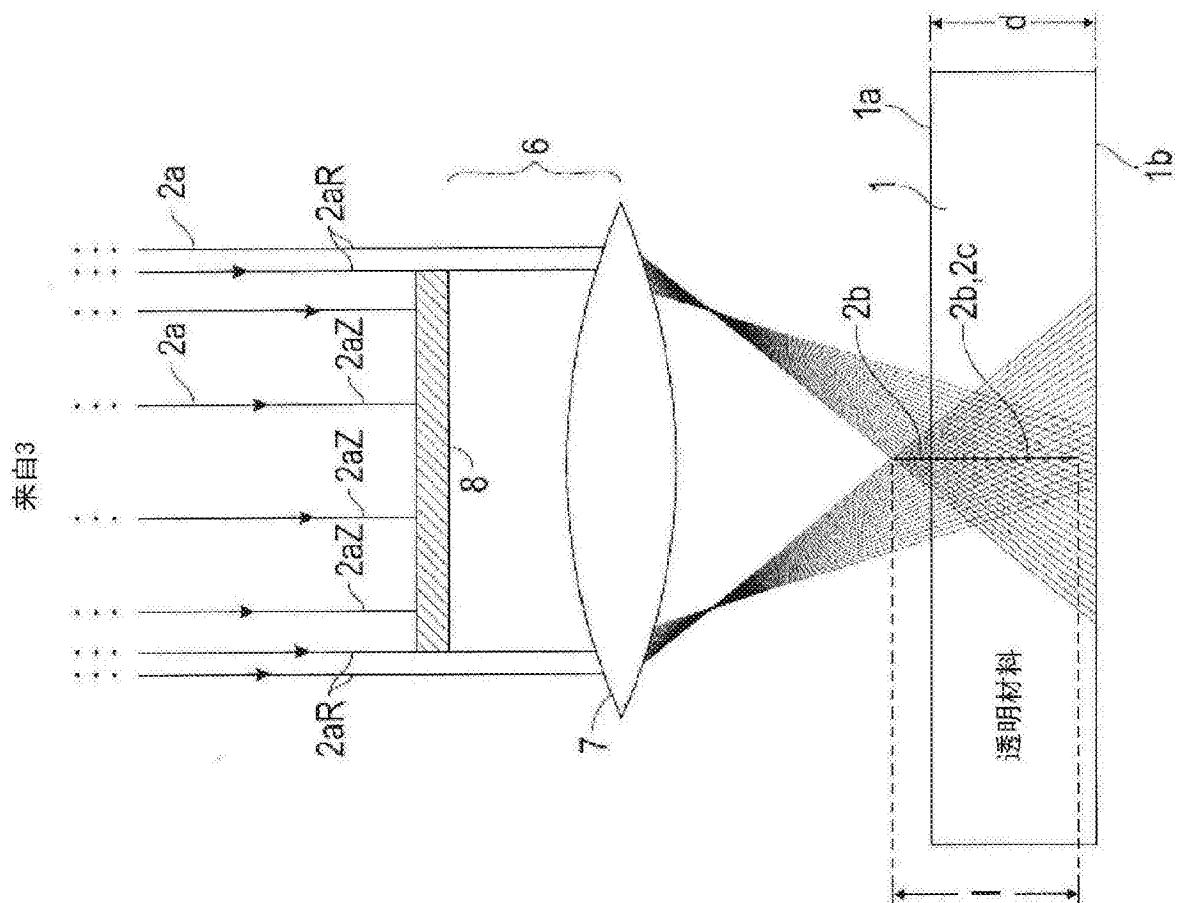


图2A

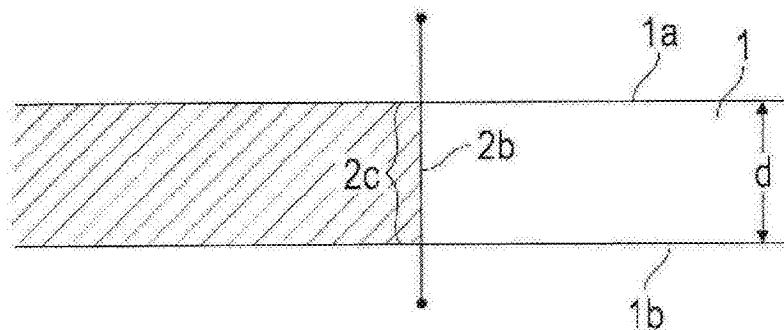


图2B-1

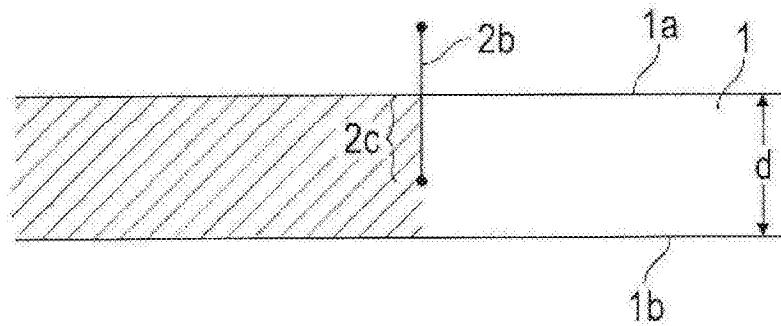


图2B-2

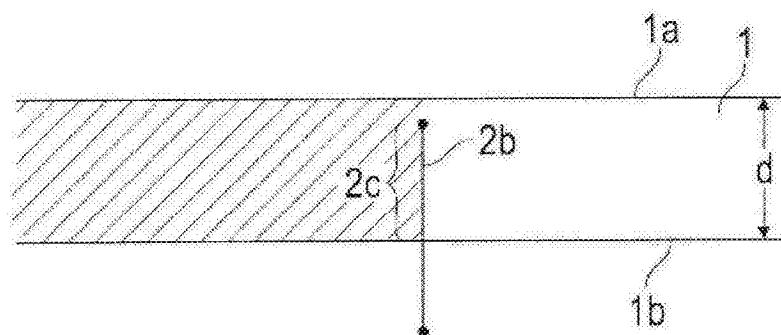


图2B-3

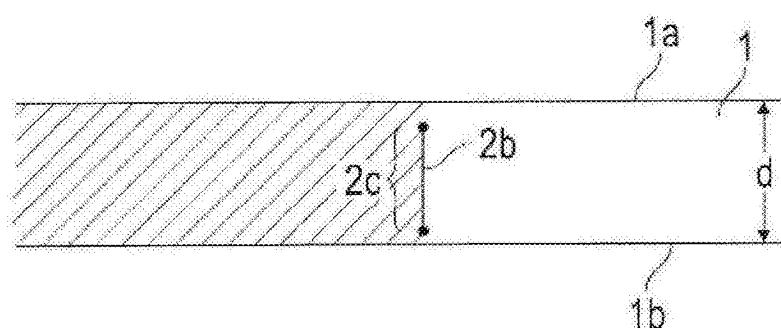


图2B-4

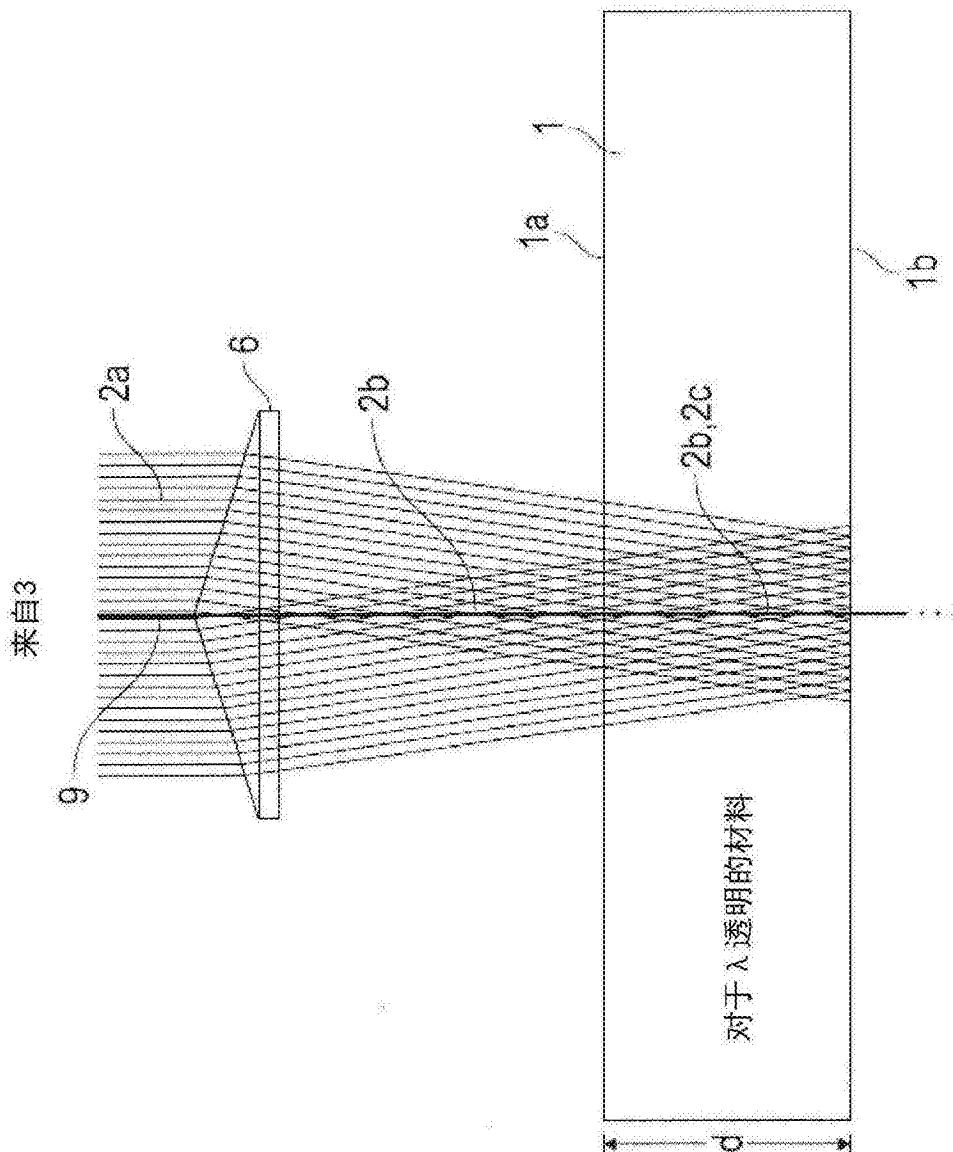


图3

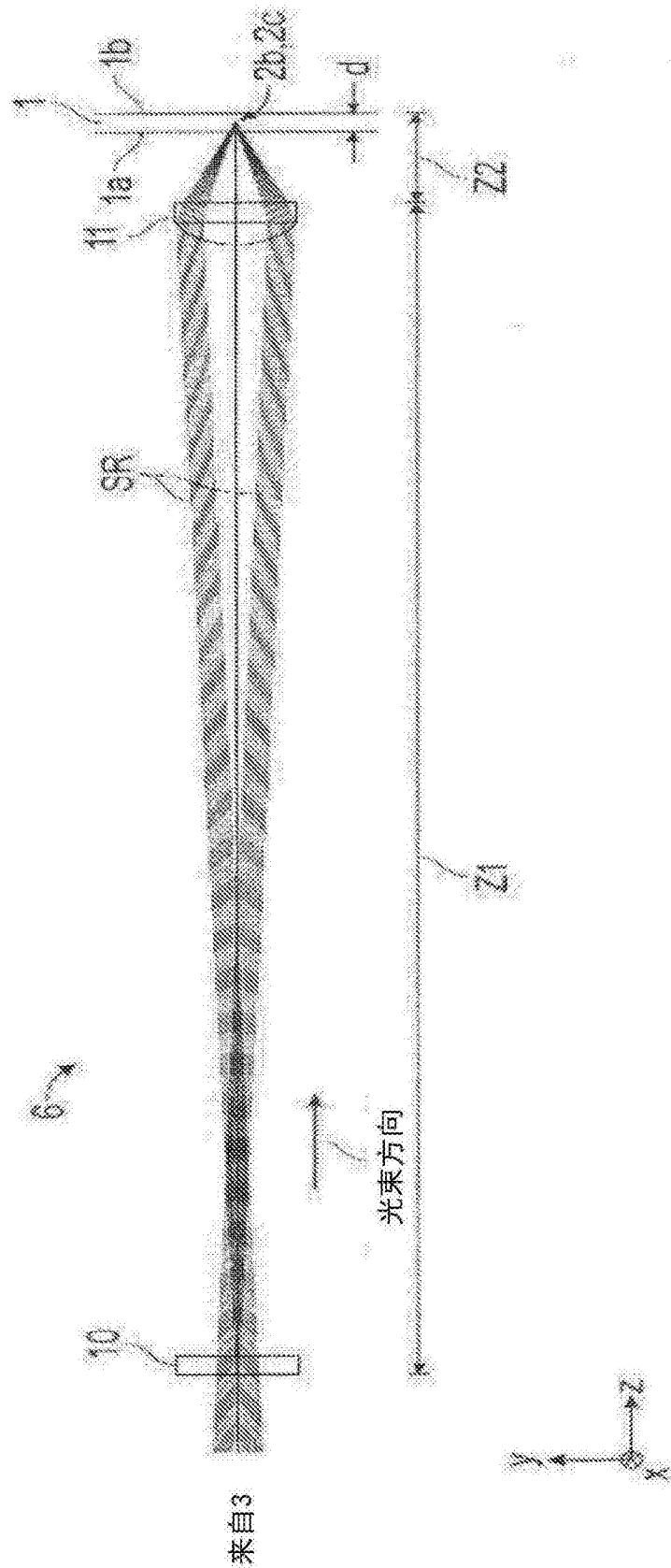


图4A

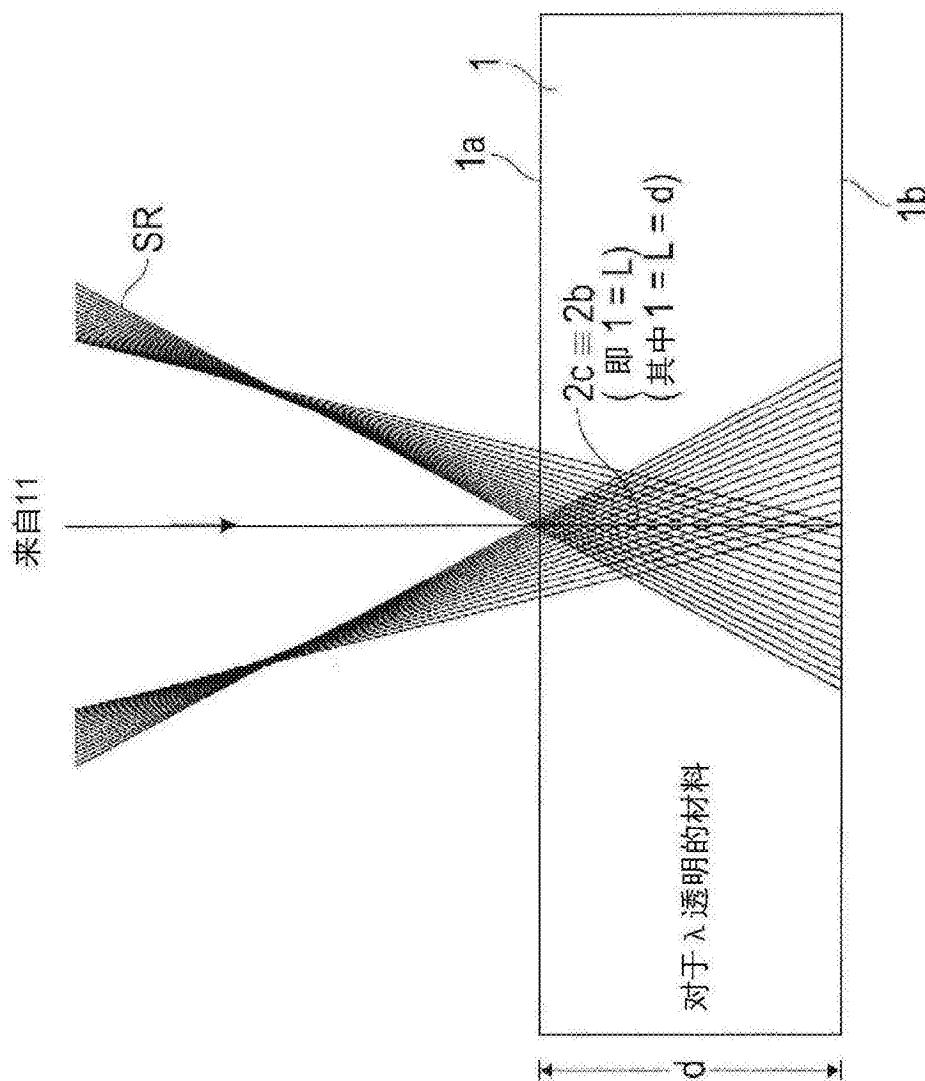


图4B

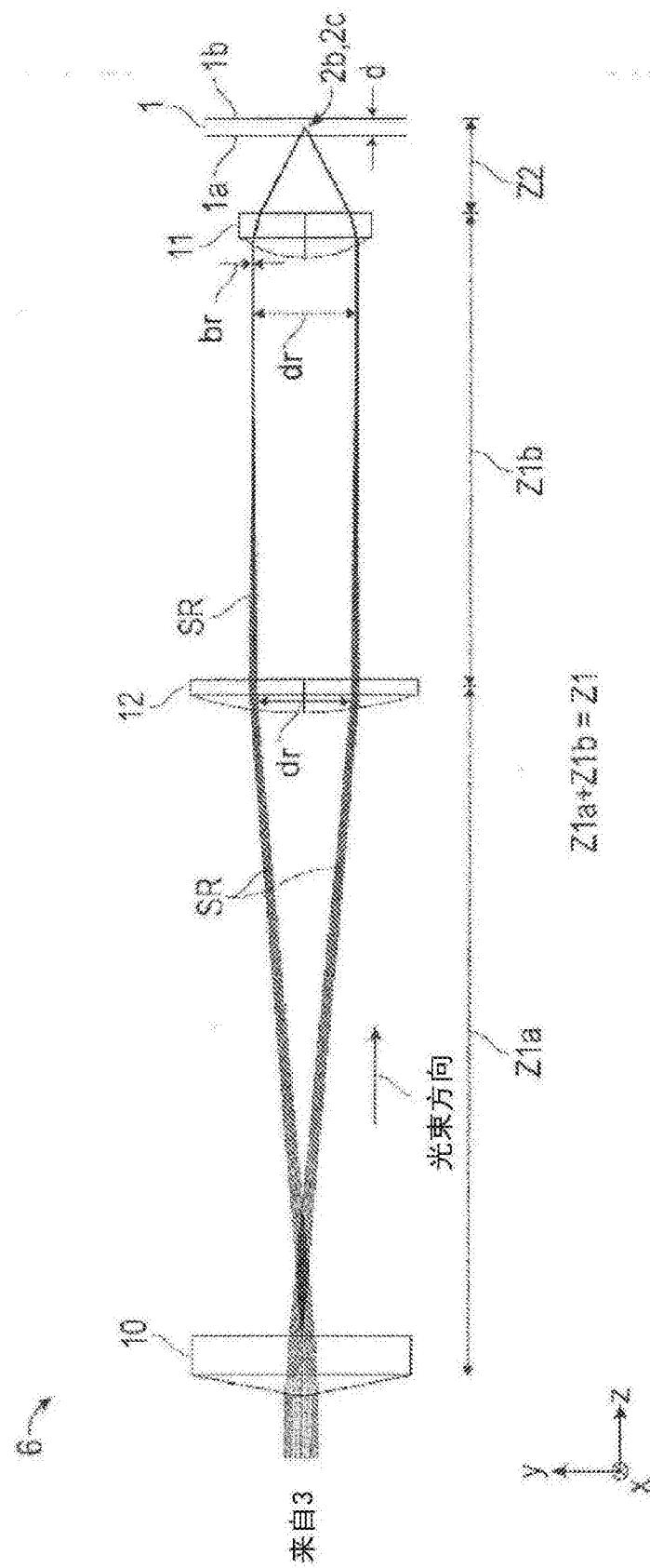


图5

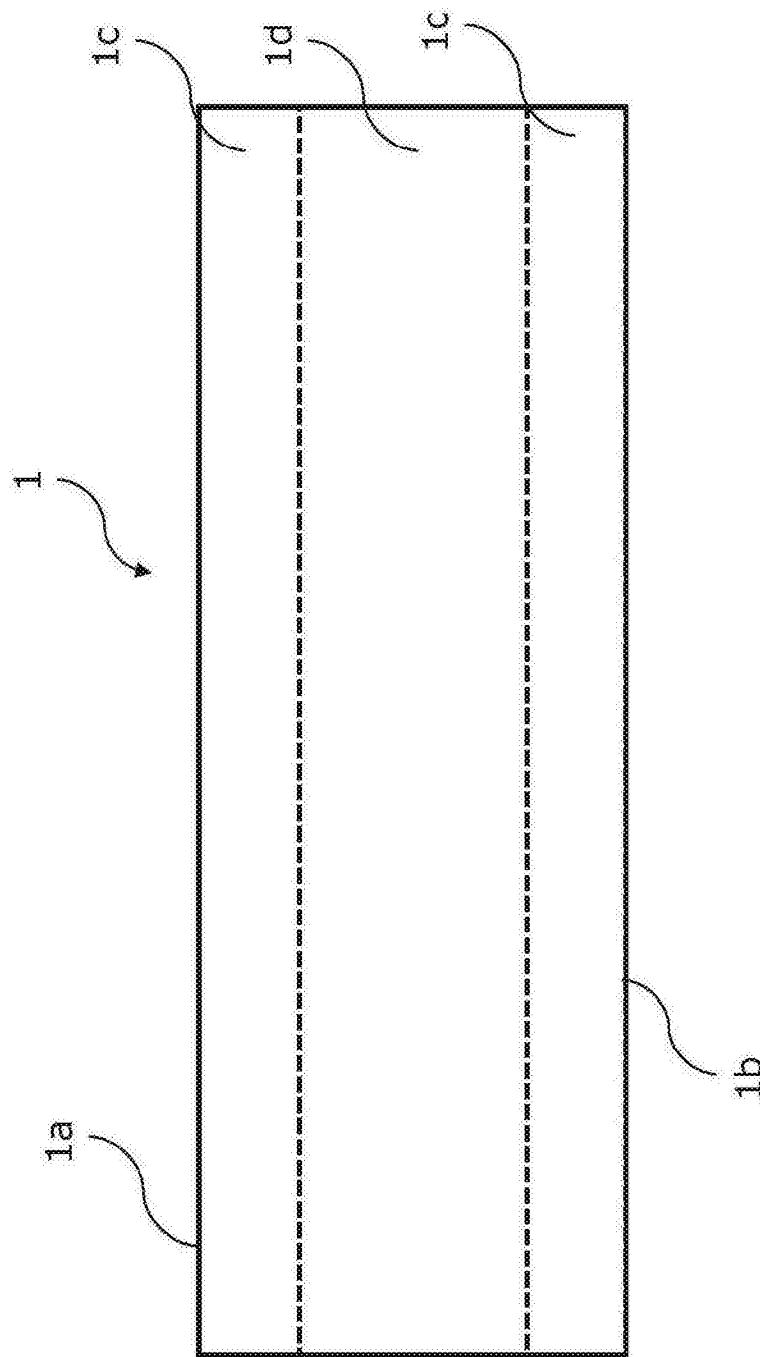


图6A

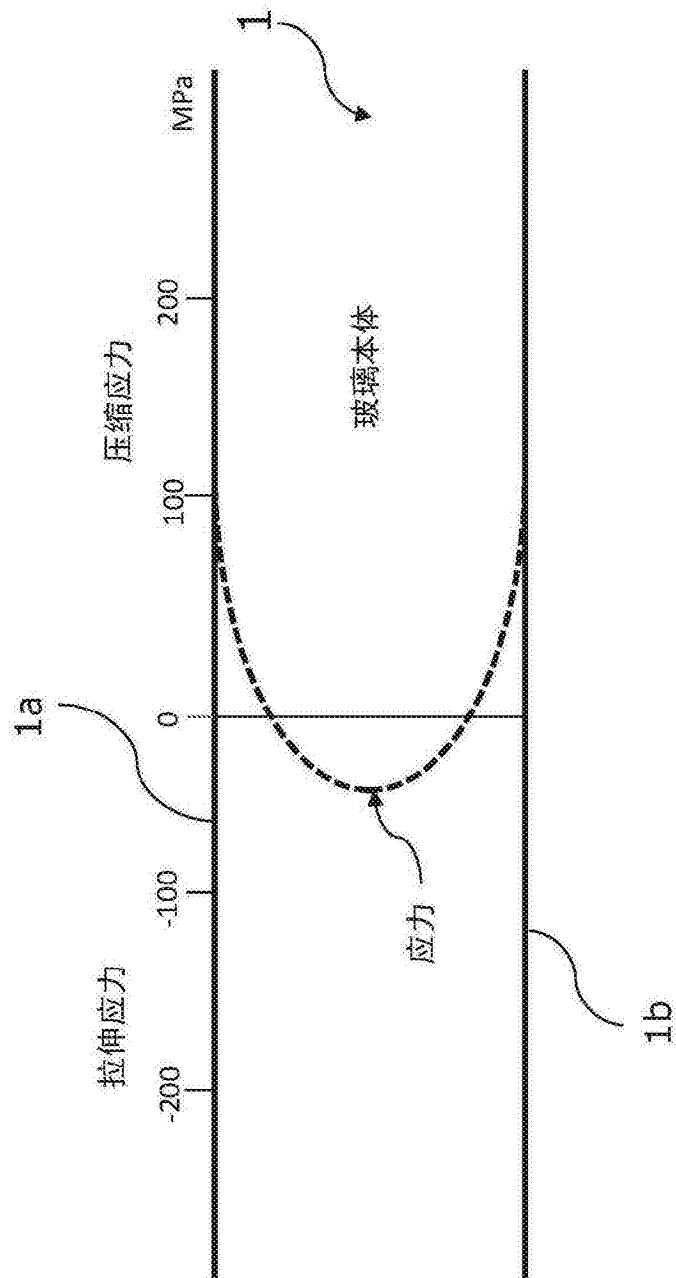


图6B

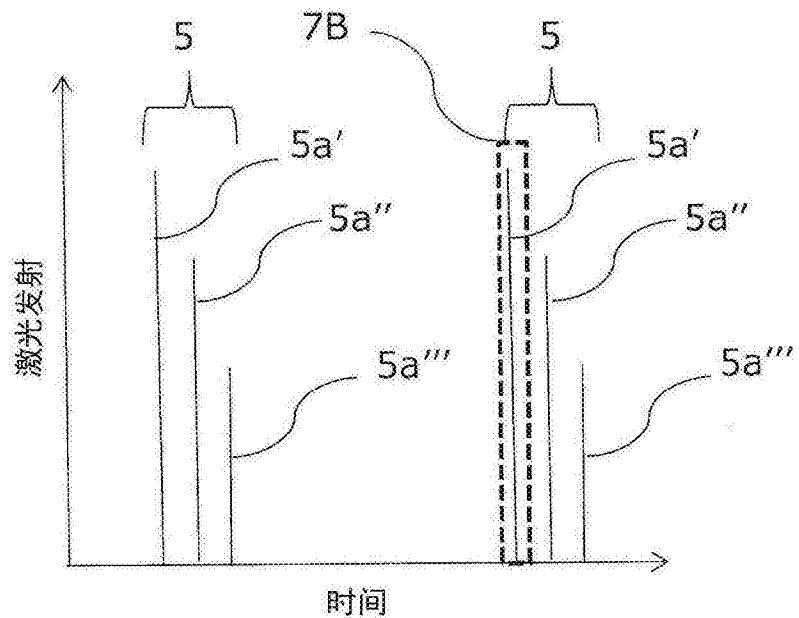


图7A

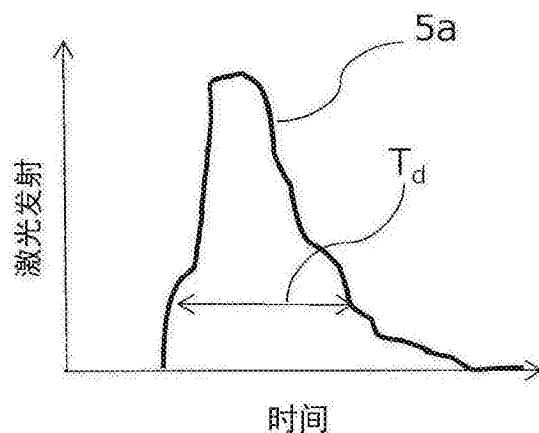


图7B

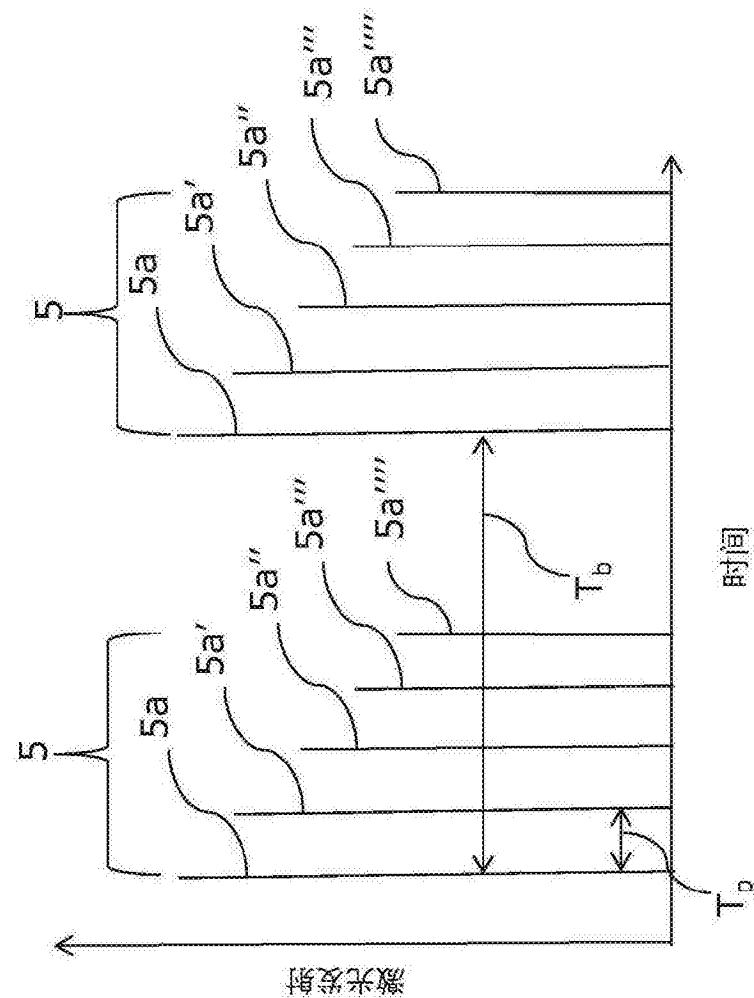


图7C

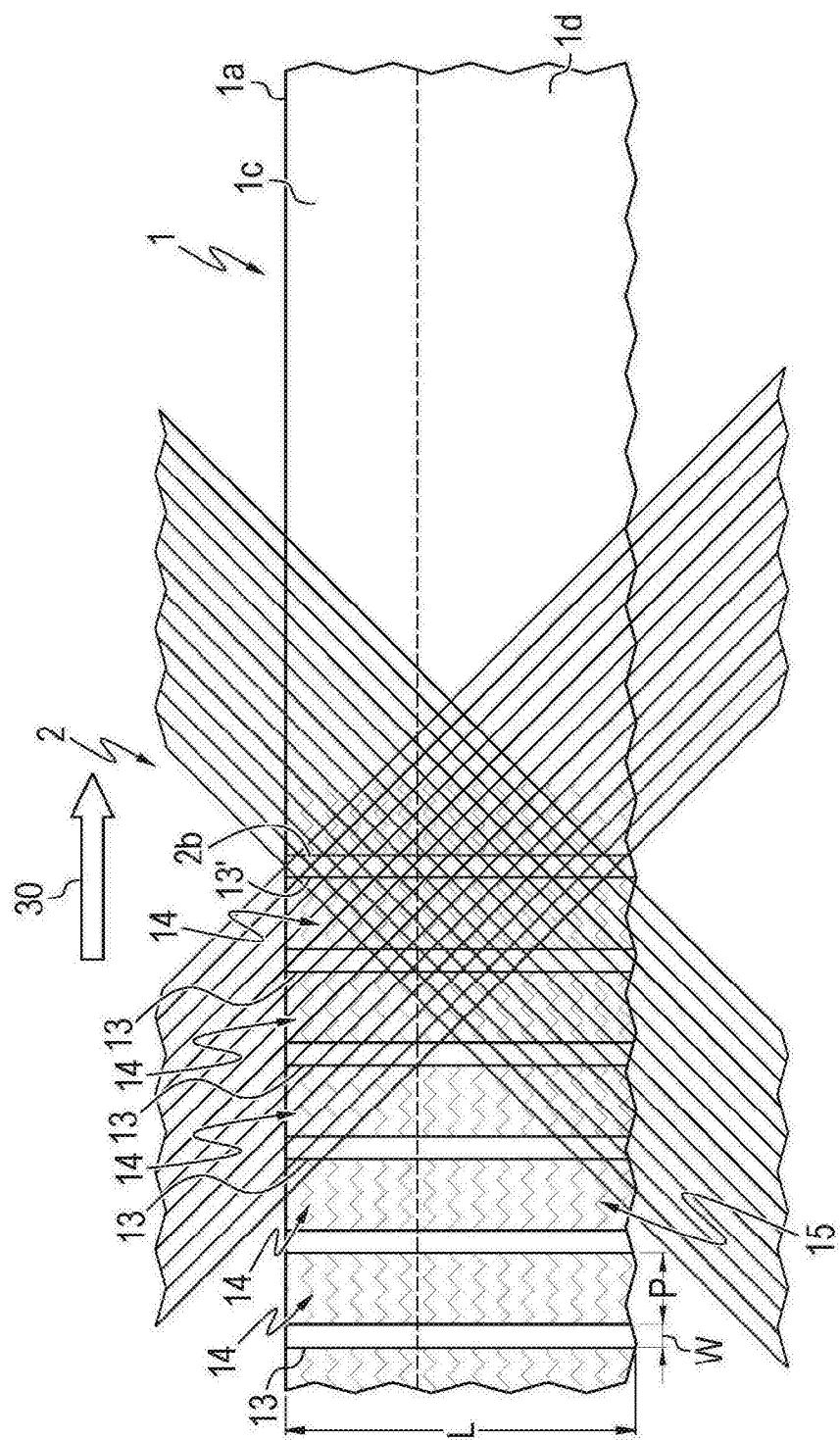


图8

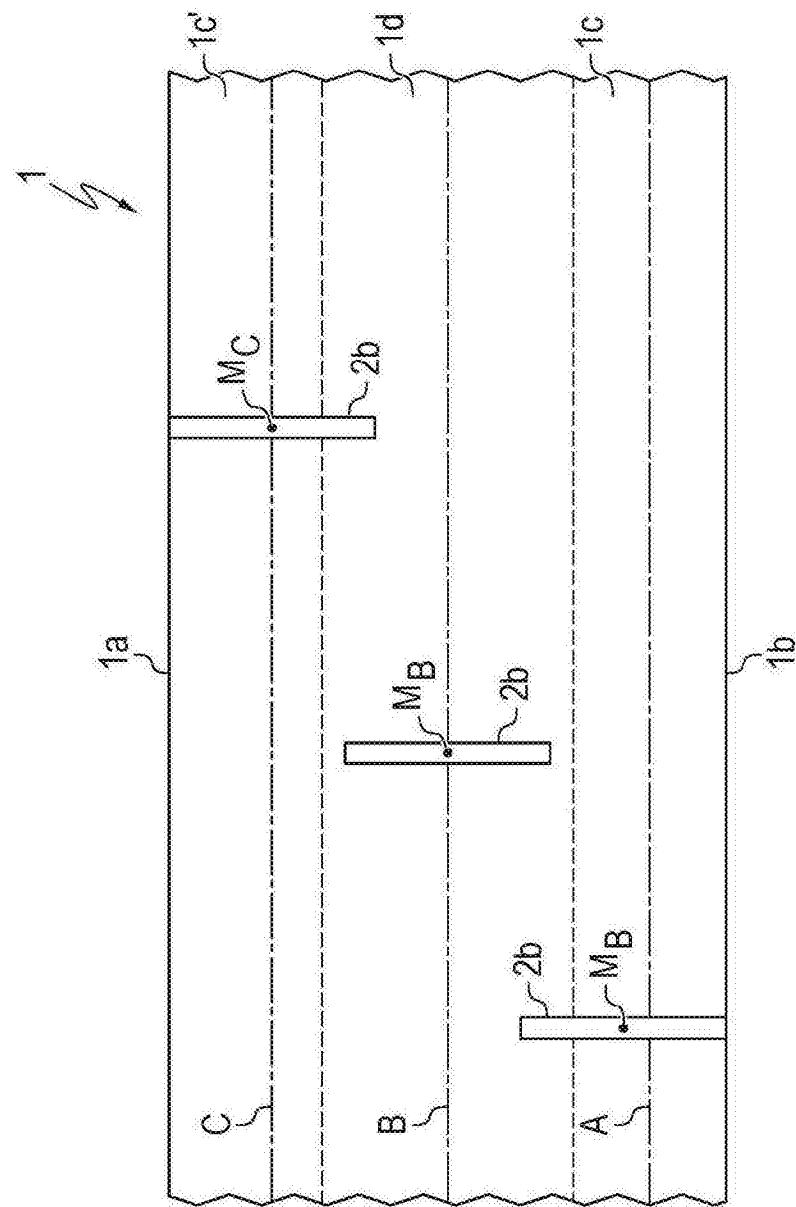


图9

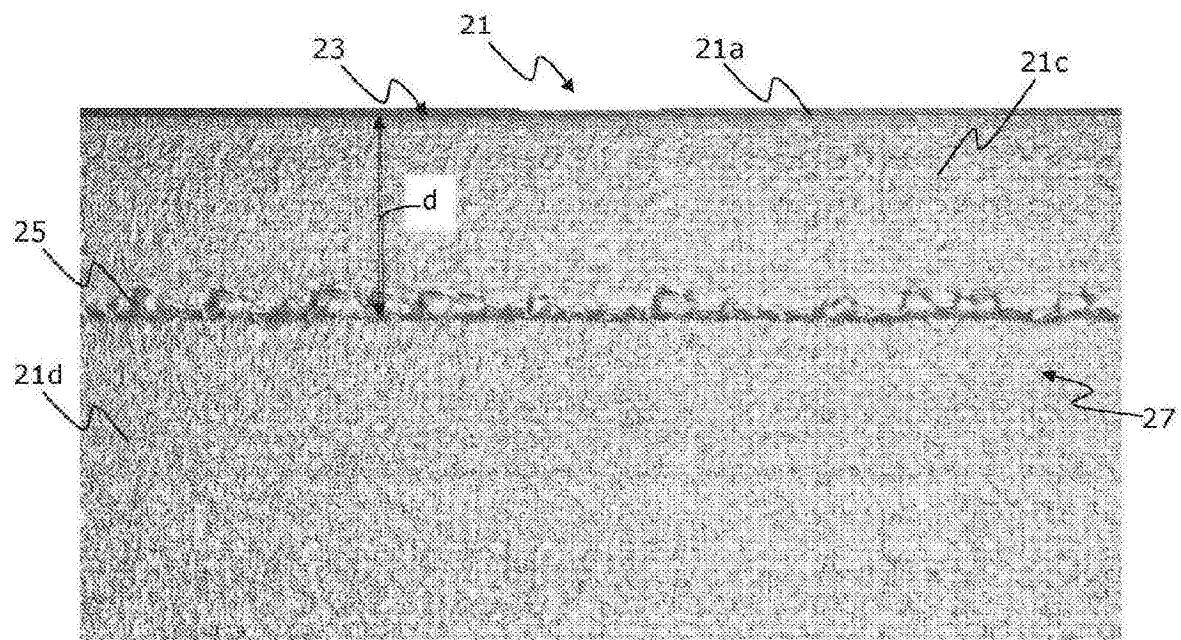


图10A

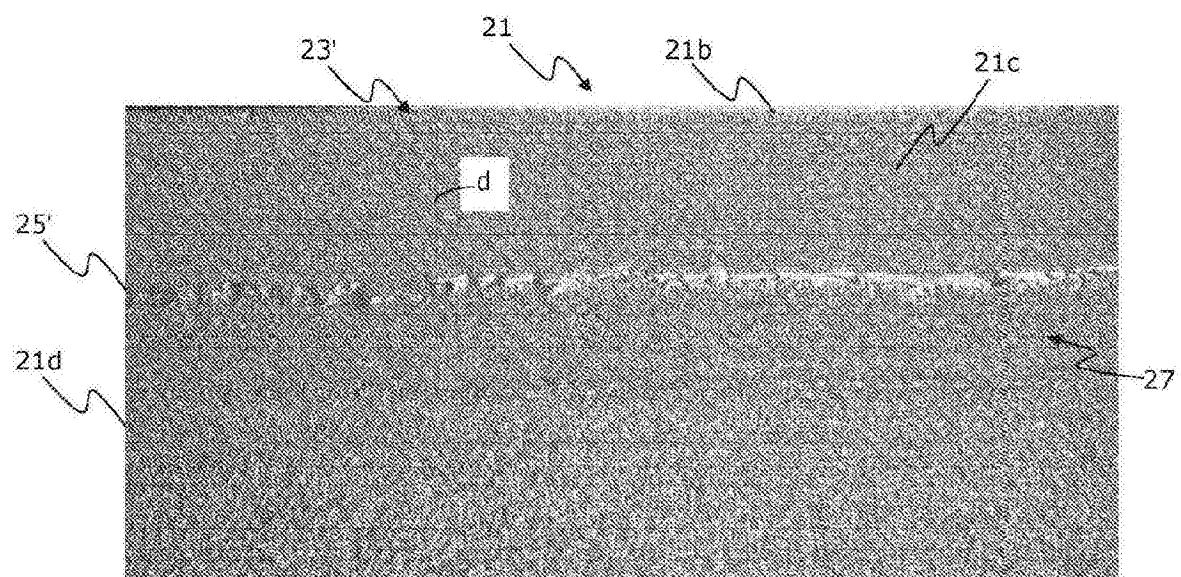


图10B

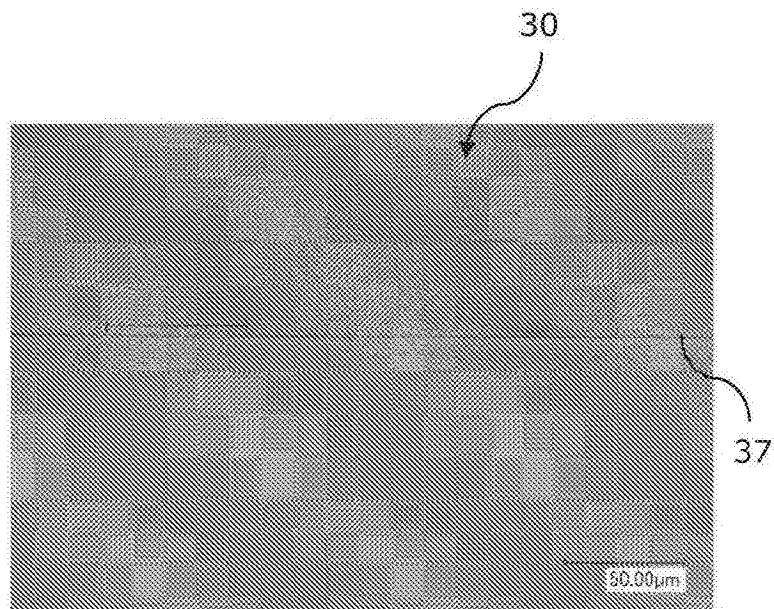


图11A

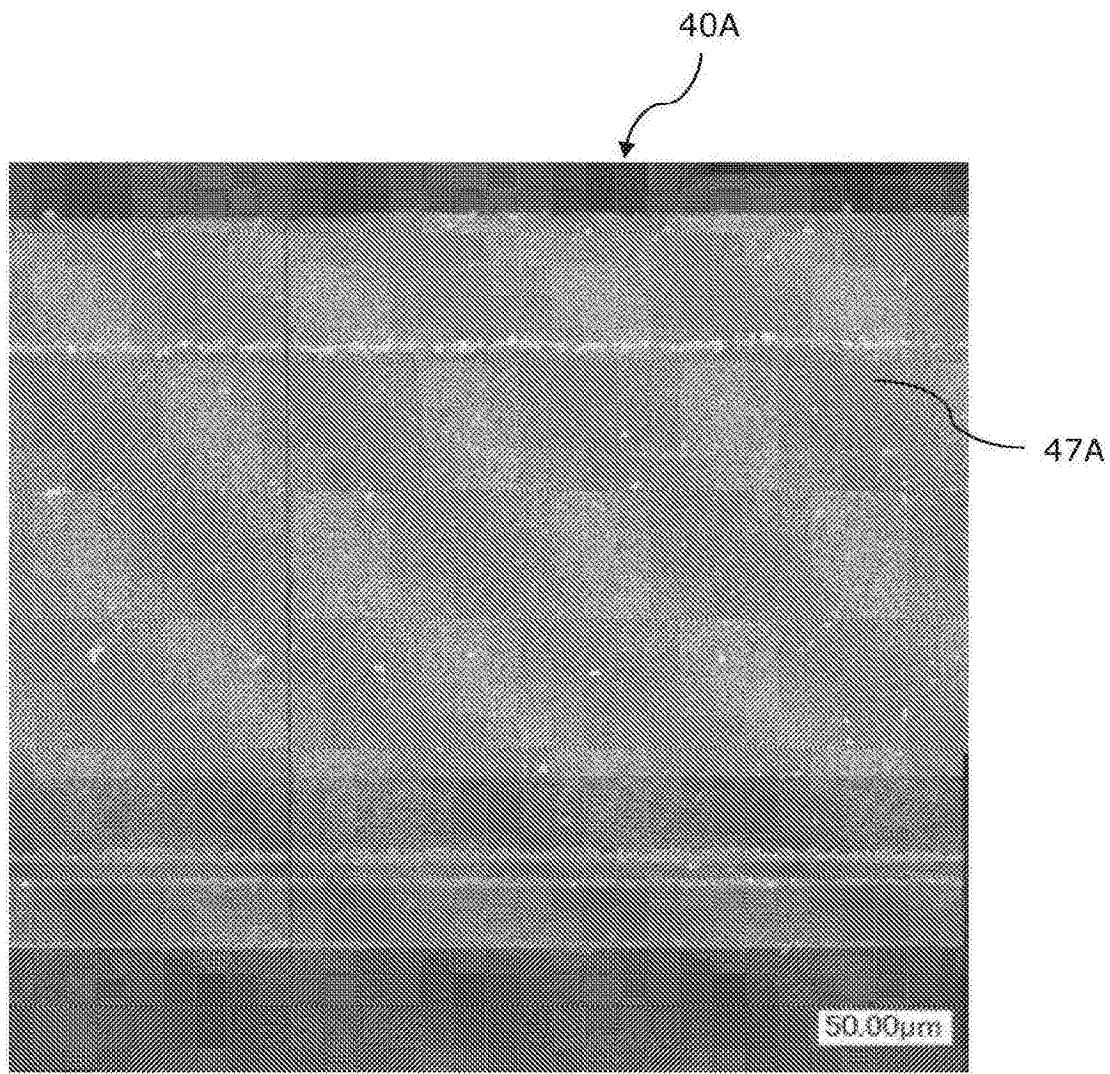


图12A

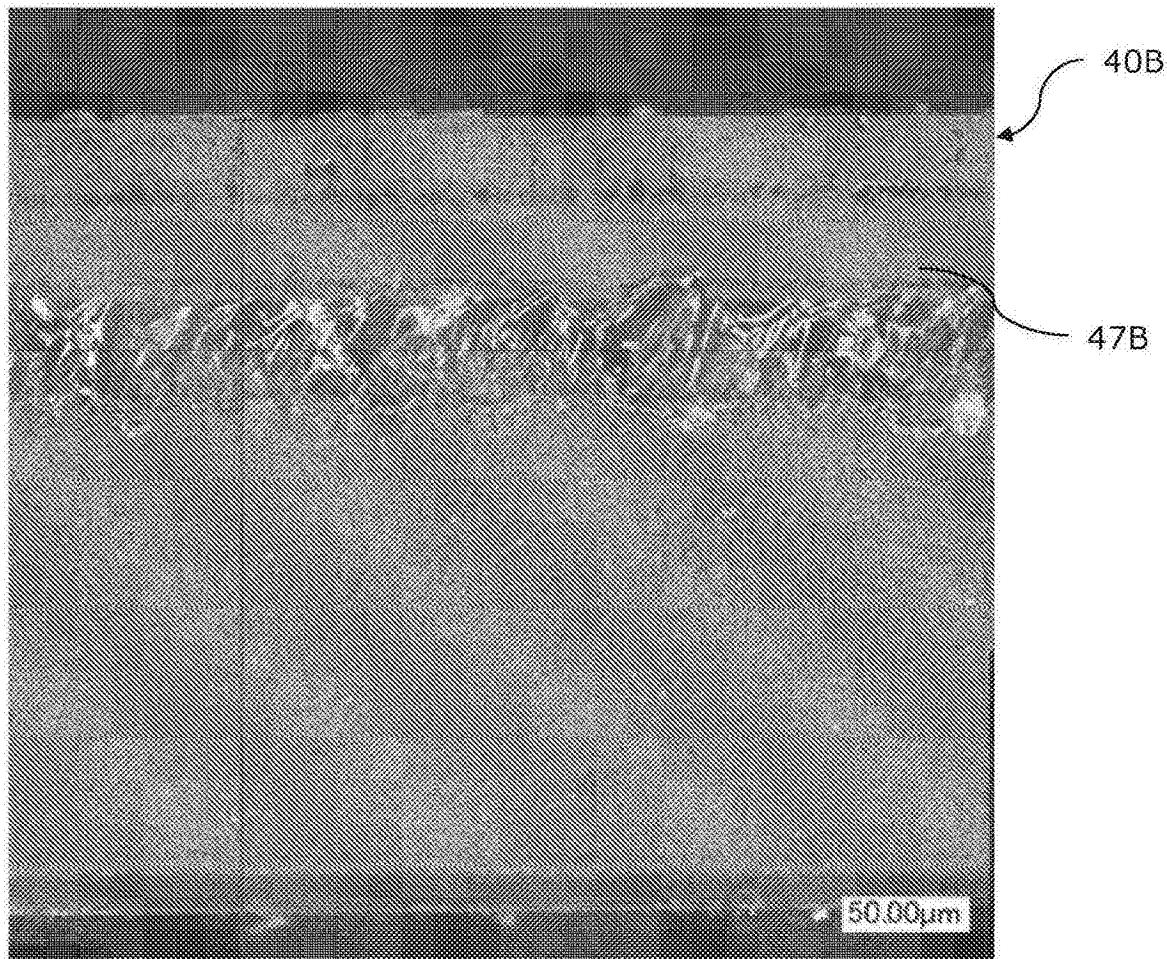


图12B

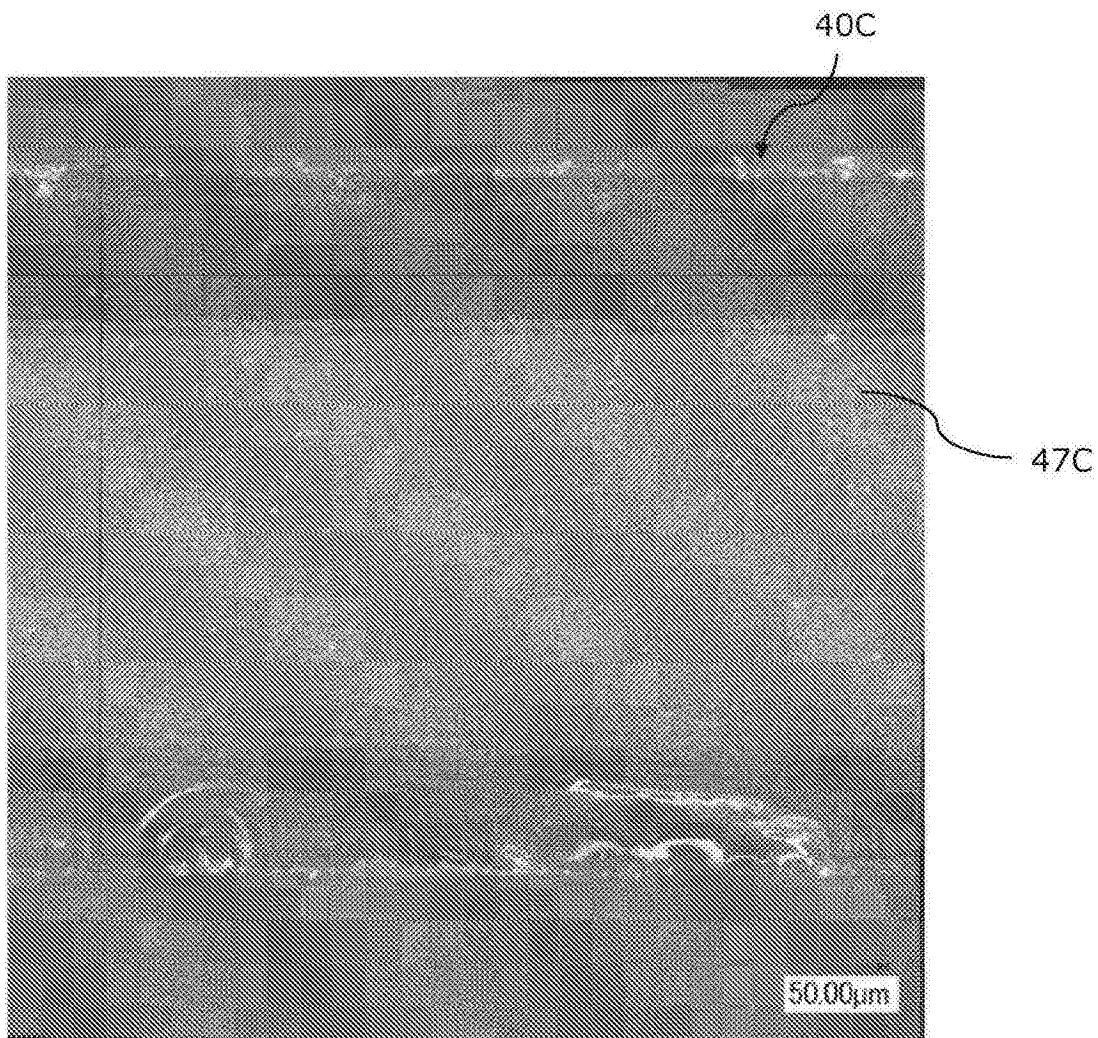


图12C

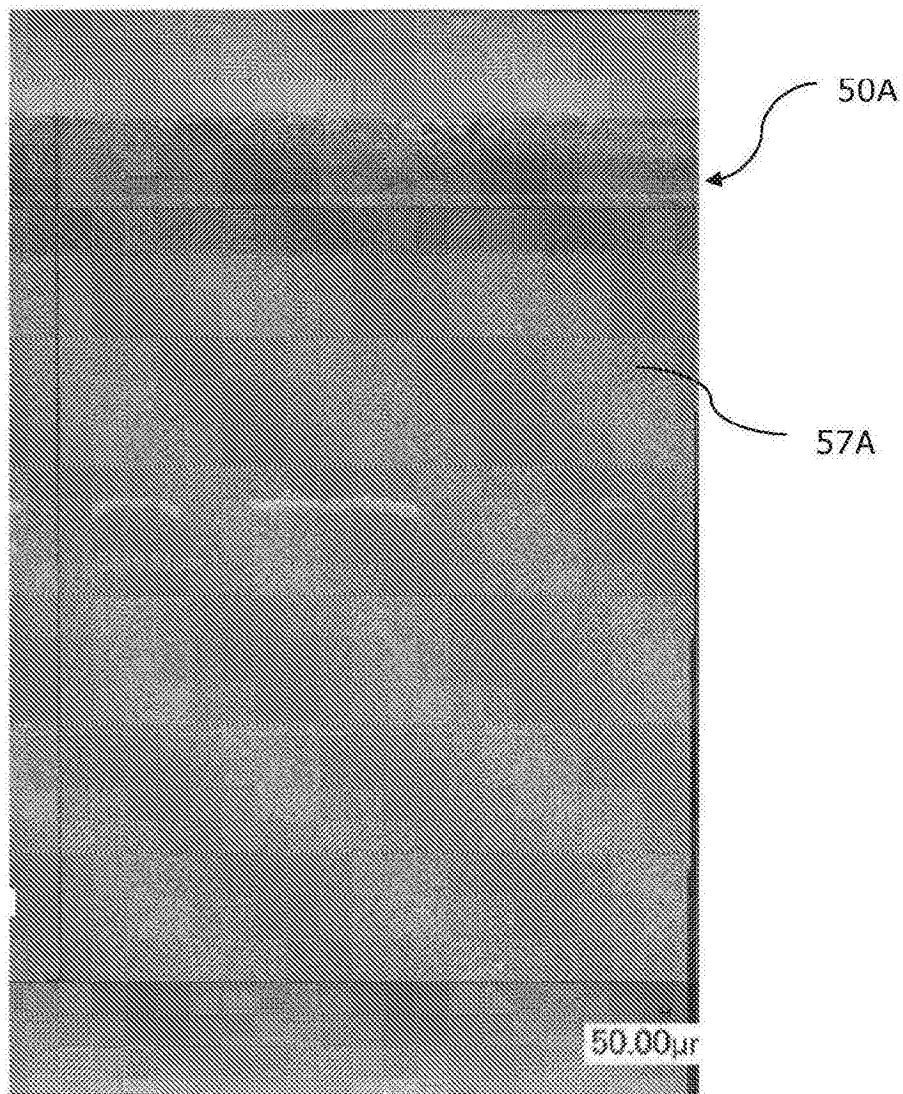


图13A

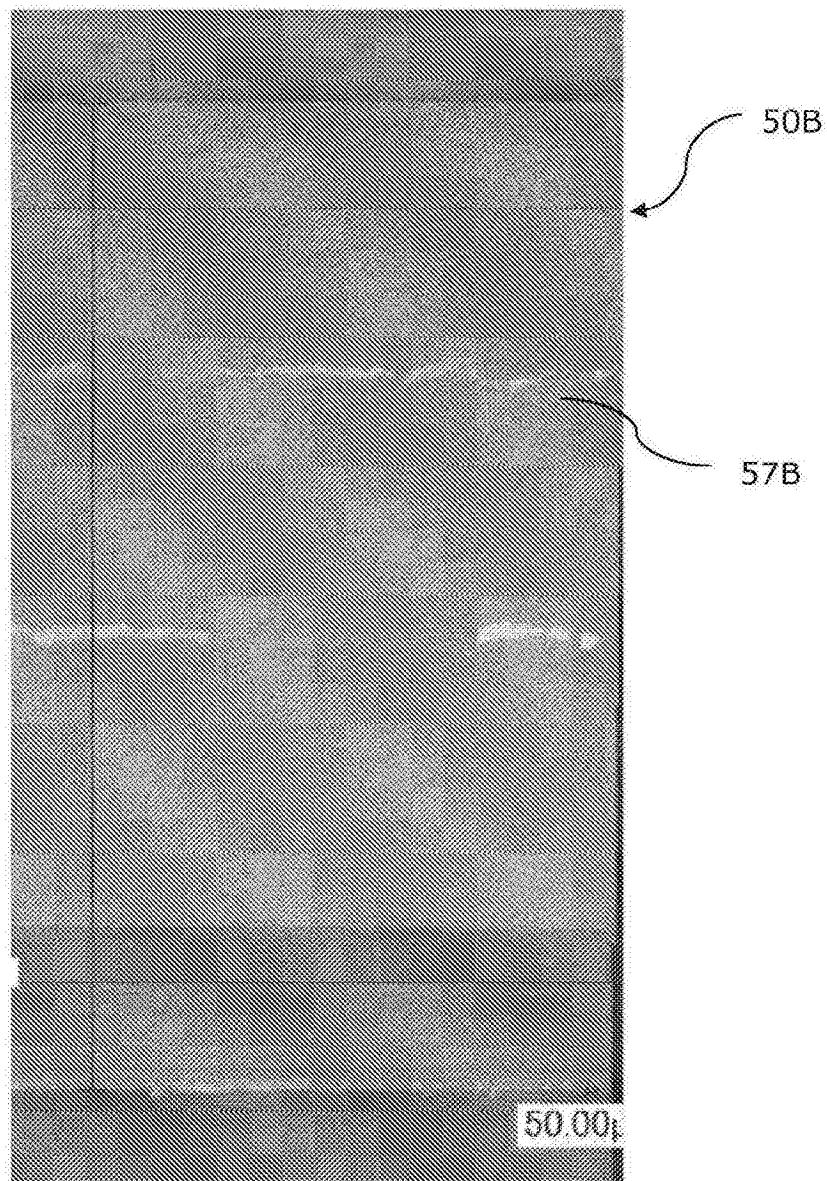


图13B

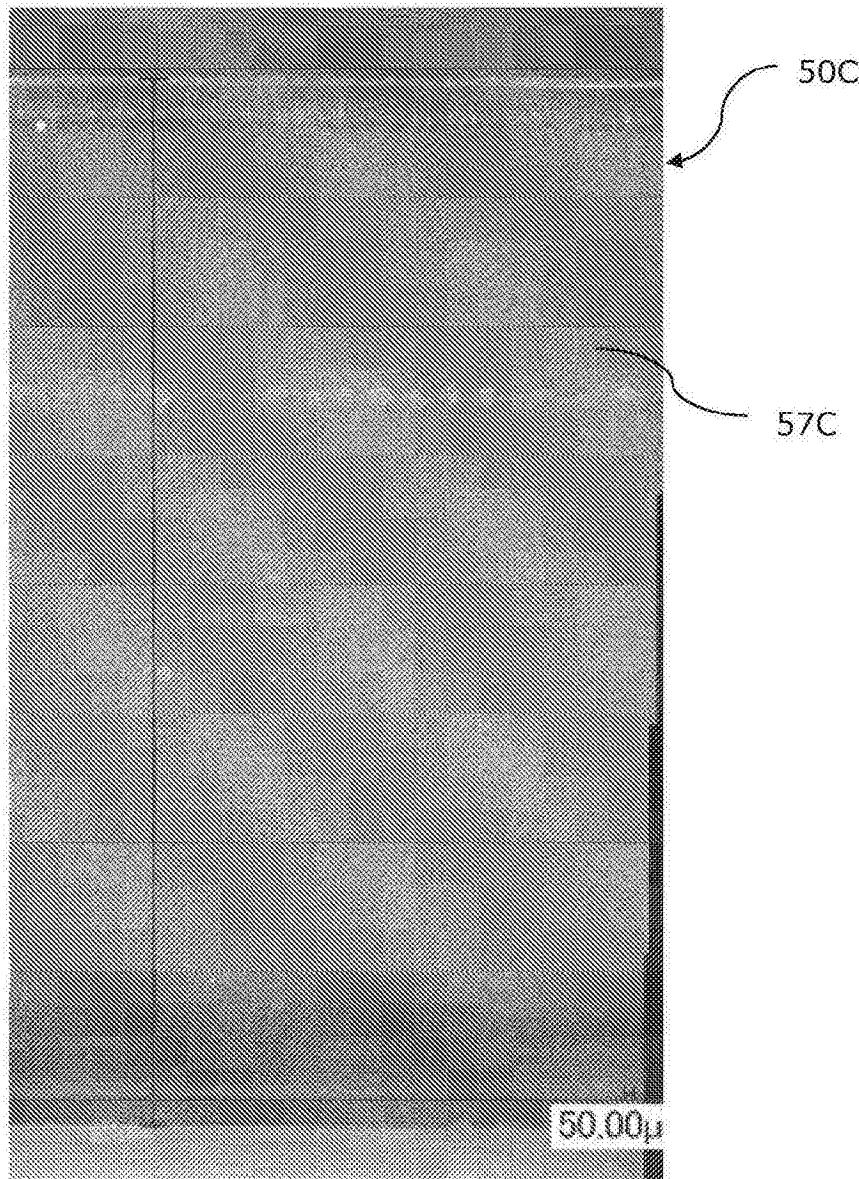


图13C