



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106029589 B

(45)授权公告日 2019.05.03

(21)申请号 201480075647.9

P·坦登 N·维卡塔拉曼

(22)申请日 2014.12.16

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限
公司 31100

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106029589 A

代理人 陈哲锋 郭辉

(43)申请公布日 2016.10.12

(51)Int.Cl.

(30)优先权数据

C03B 33/02(2006.01)

61/917,226 2013.12.17 US

B23K 26/00(2014.01)

62/023,322 2014.07.11 US

B23K 26/06(2014.01)

14/530,244 2014.10.31 US

B23K 26/40(2014.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2016.08.16

C03B 33/07(2006.01)

C03B 33/09(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2014/070434 2014.12.16

C03B 25/087(2006.01)

C03B 29/10(2006.01)

(87)PCT国际申请的公布数据
W02015/095091 EN 2015.06.25

C03B 17/02(2006.01)

C03B 17/06(2006.01)

(73)专利权人 康宁股份有限公司
地址 美国纽约州

(56)对比文件

JP 特开2006-248885 A,2006.09.21,

CN 102060437 A,2011.05.18,

CN 102356050 A,2012.02.15,

CN 103079747 A,2013.05.01,

审查员 尹会燕

(72)发明人 S·马加诺维克 G·A·皮切
S·楚达 R·S·瓦格纳
D·C·布克班德 S·L·洛古诺夫
A·R·尼伯 K·P·莱迪

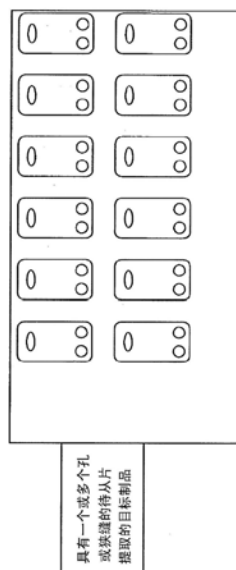
权利要求书1页 说明书22页 附图23页

(54)发明名称

激光切割复合材料玻璃制品和切割方法

(57)摘要

本发明涉及用于切割和分离透明材料特别是定制的复合材料熔合控制玻璃片的薄基材的任意形状的方法,且本发明还涉及用所述方法制备的玻璃制品。开发的激光方法可定制用于手动从面板分离零件,或者通过对所需的轮廓施加加热应力来进行完全激光分离。自发分离方法涉及利用超短脉冲激光,且可随后使用CO₂激光(与高压空气流结合),用于完全自动化分离。



1. 一种激光加工熔合形成的玻璃复合材料工件的方法,所述方法包括:

将脉冲激光束聚焦成沿着束传播方向取向并引导进入熔合形成的玻璃复合材料工件的激光束聚焦线,所述激光束聚焦线在所述工件之内产生诱导吸收,且所述诱导吸收在工件之内沿着激光束聚焦线产生缺陷线;和

沿着轮廓使得工件和激光束相对于彼此平移,由此在所述工件之内形成多个缺陷线,其中缺陷线以0.5微米-20微米的距离隔开。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述熔合形成的玻璃复合材料工件包括具有不同热膨胀系数的包覆层和芯层,且总计包括3个或更多个层。

3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,还包括沿着轮廓分离所述工件。

4. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述脉冲激光束具有波长,且在所述波长下所述玻璃复合材料工件是基本上透明的。

5. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述激光束聚焦线具有0.1微米-5微米的平均光斑直径。

6. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述熔合形成的玻璃复合材料工件是玻璃片的形式,以及其中聚焦所述脉冲激光束和沿着轮廓使得所述工件和激光束相对于彼此平移的操作在玻璃片处于在线拉制时进行。

7. 如权利要求6所述的方法,其特征在于,所述玻璃片包括具有至少两种不同的各自退火温度的至少两个层,以及其中在所述玻璃片处于所述至少两种不同的各自退火温度之间的温度下的情况下,进行聚焦和平移。

8. 一种通过如权利要求1-7中任一项所述的方法制备的玻璃制品。

9. 一种玻璃制品,其包括:玻璃复合材料,所述玻璃复合材料具有第一表面、第二表面和至少一个边缘,所述至少一个边缘具有在所述第一表面和第二表面之间延伸至少250微米且穿过玻璃制品的厚度的多个缺陷线,所述缺陷线各自具有小于或等于5微米的直径。

10. 如权利要求9所述的玻璃制品,其特征在于,所述至少一个边缘具有小于0.5微米的Ra表面粗糙度。

激光切割复合材料玻璃制品和切割方法

[0001] 相关申请

[0002] 本申请要求下述的优先权：2013年12月17日提交的美国临时专利申请号61/917,226,2014年07月11日提交的美国临时专利申请号62/023,322,和2014年10月31日提交的美国专利申请号14/530244,以上各文的全部内容通过引用纳入本文。

[0003] 背景

[0004] 材料的激光加工领域包括各种应用和不同种类的材料,该应用涉及切割、钻孔、研磨、焊接、熔融等。在这些应用中,人们特别感兴趣的一种应用是切割或分离不同类型的基材,例如多层复合材料熔合拉制的玻璃基材。

[0005] 从工艺开发和成本角度看,有许多机会来改善复合材料玻璃基材的切割和分离。提供比当今市场中所实施的更快、更干净、更便宜、更可重复和更可靠的玻璃分离方法是非常有意义的。在几种替代技术中,已使用不同方法成功地验证了激光分离。所述技术包括：1)实际地除去在所需的零件(或多个零件)的边界之间的材料和其基材基质；2)在材料的本体之内形成缺陷,以沿着所需轮廓的周界弱化材料或为材料接种裂纹引发点,然后进行辅助的破碎步骤；和3)通过热应力分离使得初始裂纹扩展。与竞争性技术(机械划割和破裂,高压水喷射和超声研磨等)相比,这些激光切割过程证明了潜在的经济和技术优势,例如精确性、良好的边缘精磨和低残留应力。

[0006] 然而,仍然需要改善的用于切割和分离多层复合材料熔合拉制的玻璃基材的方法。

[0007] 概述

[0008] 本发明涉及制备具有精磨(finished)边缘的切割复合材料玻璃制品,以及使用一种或多种激光切割所述制品的方法。

[0009] 在一种实施方式中,一种激光加工熔合形成的玻璃复合材料工件的方法包括将脉冲激光束聚集成沿着束传播方向取向且引导进入所述熔合形成的玻璃复合材料工件的激光束聚焦线,所述激光束聚焦线在工件之内产生诱导吸收,且所述诱导吸收在所述工件之内沿着激光束聚焦线产生缺陷线。所述方法还包括沿着轮廓使得工件和激光束相对于彼此平移,由此在所述工件之内形成多个缺陷线,其中缺陷线以0.5微米-20微米的距离隔开。激光束聚焦线可具有0.01mm-约100mm的长度。更优选地,聚焦线长度可为约0.1mm-约10mm。甚至更优选地,激光束聚焦线具有约0.1mm-约1mm的长度。在材料处测量的脉冲激光束的平均激光能量可大于40微焦耳/毫米材料厚度。在另一种实施方式中,用如上所述的方法制备玻璃制品。

[0010] 在另一种实施方式中,玻璃制品包含玻璃复合材料,所述玻璃复合材料具有第一表面、第二表面和至少一个边缘,所述至少一个边缘具有在所述第一表面和第二表面之间延伸至少250微米的多个缺陷线。缺陷线中的每一个具有小于或等于约5微米的直径。玻璃复合材料可为熔合形成的玻璃复合材料。相邻缺陷线的间隔可为0.1微米-20微米。所述玻璃制品可包括3个层,最外面的层包含第一组合物,并具有热膨胀系数CTE1和厚度TH1;内层在最外面的层之间,并包含不同于第一组合物的第二组合物,且具有热膨胀系数CTE2,和厚

度TH2;以及其中CTE1可大于CTE2。最外面的玻璃层可处于压缩应力下,且内层可处于拉伸应力下,且TH2与TH1的比例可为4-20。玻璃制品可具有大于5兆帕斯卡(MPa)的内层中央张力,且缺陷线可在边缘的全部厚度上延伸。边缘可具有小于约0.5微米的Ra表面粗糙度,且边缘可具有最高达小于或等于约75微米深度的表面下损坏。

[0011] 熔合形成的复合材料玻璃片和如下所述的激光切割方法的组合形成复合材料玻璃制品,其具有优异的边缘强度、4点弯曲强度和含可忽略的碎片的表面精磨以及对零件边缘的极小的损坏(由此保留强度)。

[0012] 本发明延伸至:

[0013] 一种激光加工熔合形成的玻璃复合材料工件的方法,所述方法包括:

[0014] 将脉冲激光束聚焦成沿着束传播方向取向并引导进入熔合形成的玻璃复合材料工件的激光束聚焦线,所述激光束聚焦线在所述工件之内产生诱导吸收,且所述诱导吸收在工件之内沿着激光束聚焦线产生缺陷线;和

[0015] 沿着轮廓使得工件和激光束相对于彼此平移,由此在所述工件之内形成多个缺陷线,其中缺陷线以0.5微米-20微米的距离隔开。

[0016] 本发明延伸至:

[0017] 一种玻璃制品,其包括:玻璃复合材料,所述玻璃复合材料具有第一表面、第二表面和至少一个边缘,所述至少一个边缘具有在所述第一表面和第二表面之间延伸至少250微米的多个缺陷线,所述缺陷线各自具有小于或等于约5微米的直径。

[0018] 附图简要说明

[0019] 根据下文对如在附图中所示的示例实施方式的更具体的描述,上述内容将变得显而易见,在附图中在全部不同的视图中相同的附图标记表示相同的部分。附图不必按比例绘制,相反重点是显示示例性实施方式。

[0020] 图1显示复合材料玻璃片。

[0021] 图2A和2B显示设置激光束聚焦线,以及沿着激光束聚焦线在诱导的非线性光学吸收i区域中形成缺陷线。

[0022] 图3A显示根据一种实施方式的用于激光加工的光学组装件。

[0023] 图3B1到3B4显示通过相对于基材或工件不同地设置激光束聚焦线来加工基材的各种可能性。

[0024] 图4显示用于激光加工的光学组装件的第二实施方式。

[0025] 图5A和5B显示用于激光加工的光学组装件的第三实施方式。

[0026] 图6示意性地显示用于激光加工的光学组装件的第四实施方式。

[0027] 图7A-7C显示用于材料的激光加工的不同激光强度状况(regime)。图7A显示未聚焦的激光束,图7B显示使用球形透镜浓缩的激光束,且图7C显示用轴棱锥或衍射菲涅耳(Fresnel)透镜浓缩的激光束。

[0028] 图8A显示用于皮秒激光器的激光发射随时间的变化。每一发射的特征包括脉冲“群”,其可包含一个或多个子脉冲。显示了对应于脉冲持续时间、脉冲之间的间隔以及脉冲群之间的间隔的时间。

[0029] 图8B是直线切割的0.7mm厚康宁(Corning) 2320NIOX(非离子交换的)厚基材带材的边缘图象。

- [0030] 图9是根据本发明的熔合形成的玻璃复合材料切割的边缘图象。
- [0031] 图10显示复合材料玻璃片,其具有计划用来提取的制品。
- [0032] 图11显示分离的复合材料玻璃制品,其具有孔和狭缝。
- [0033] 图12的图表显示根据本发明的熔合形成的玻璃复合材料的边缘强度的图象,其显示在酸蚀刻之前和之后的边缘强度结果。
- [0034] 图13A-13C显示具有改性玻璃等距间隔柱的缺陷线。
- [0035] 图14显示用于连续熔合玻璃制造法的现有玻璃切割方法,其使用机械或CO₂激光切割。
- [0036] 图15A显示在玻璃拉制时(on the glass draw)的基于激光的玻璃切割方法,其中使用水平激光切割从拉制分离玻璃板。
- [0037] 图15B显示在玻璃拉制时的基于激光的玻璃切割方法,其中使用激光来切穿玻璃片的高质量区域,并从拉制移出玻璃的高质量部分。
- [0038] 图16显示通过在拉制高处切割球边(bead),并在拉制下部水平地切割片,来基于激光的在拉制时切割玻璃。
- [0039] 图17显示通过水平地切割以从拉制除去玻璃,然后使用独立地垂直切割来除去玻璃球边,来基于激光在拉制时切割玻璃。
- [0040] 图18显示离开拉制的情况下对玻璃进行基于激光的切割,以从片除去裁剪的或废弃的玻璃。
- [0041] 图19显示在拉制时的基于激光的切割工艺,其使用多阶段炉子将玻璃片保持在接近玻璃退火点的温度下。
- [0042] 图20显示多阶段炉子,其构造成赋予在拉制时进行切割的玻璃片以规定的温度冷却分布。
- [0043] 具体描述
- [0044] 下面将描述示例实施方式。
- [0045] 本文所述的实施方式涉及用于切割和分离透明材料、特别是定制的复合材料熔合拉制玻璃片的薄基材的任意形状的方法。材料应优选地对选定的激光波长是基本上透明的(即,吸收小于约10%,优选地小于约1%/毫米的材料深度)。激光方法可定制用于手动从面板分离零件,或者通过对所需的轮廓施加热应力来进行完全激光分离。自发分离方法涉及利用超短脉冲激光,且可随后使用CO₂激光(与高压空气流结合),用于完全自动化分离。
- [0046] 切割的目标是提供从复合材料玻璃的薄基材精确地切割和分离具有和不具有内部孔或狭缝的任意形状制品。所述方法以可控方式分离零件,且具有可忽略的碎片、极少的缺陷和对分离的零件边缘的较低的表面下损坏。极少的缺陷和在分离的零件边缘处的较低表面下损坏保留零件强度,且防止零件在受到外部冲击时失效。激光方法非常适用于对选定的激光波长是透明的材料。使用片厚度为0.7-1.2毫米的复合材料片来演示切割方法,但设想了任意厚度的复合材料片都可使用本发明的方法进行切割。
- [0047] 包含由切割过程导致的小微裂纹和材料改性且大致垂直于切割表面的表面下损坏是玻璃或其它脆性材料的边缘强度的关注点。
- [0048] 如本文所使用,表面下损坏指根据本发明的从基材或材料分离的零件或者进行激光加工的材料的最大尺寸(例如,长度、宽度、直径)。因为激光缺陷从周界表面延伸,还可将

表面损坏看作从周界表面的最大深度,其中出现来自本发明激光加工的损坏。在本文中,可将分离的零件的周界表面称作分离的零件的边缘或边缘表面。结构缺陷可为裂纹或空穴,并表示机械弱点的点,其促进从基材或材料分离的零件的断裂或失效。通过使得表面下损坏的尺寸最小化,本发明的方法改善了分离的零件的结构完整性和机械强度。

[0049] 可通过使用共焦显微镜在切割表面上观察来测量表面下损坏的深度,显微镜的光学分辨率是几纳米。当在探测材料中裂纹时,忽略表面反射,裂纹出现为明亮的线。将显微镜聚焦进入材料直到不再存在“闪烁”,以规则的间隔收集图象。通过寻找裂纹并透过玻璃深度来追踪它们以获得表面下损坏的最大深度(通常以微米为单位进行测量),来手动处理图象。通常存在数以千计的微观裂纹,因此通常只测量最大的微裂纹。通常在切割边缘的约5个位置上重复这个过程。虽然微裂纹大致垂直于切割表面,但用这种方法可能不能检测直接垂直于切割表面的任何裂纹。

[0050] 使用本文所述的方法,使得表面下损坏最小化,并将其限制到边缘附近中较小的区域。相对于边缘表面,可将表面下损坏限制到下述深度:小于或等于100微米,小于或等于75微米,小于或等于60微米,小于或等于50微米,且切割可只产生较少的碎屑。在本文中,使用根据本发明的激光切割透明材料也可称作钻孔或激光钻孔或激光加工。

[0051] 激光方法的基础步骤是形成开裂线,其描绘所需零件形状,且形成用于裂纹扩展的具有最低阻力的路径,并因此对从其周围基材基质分离和拆分所述成形的零件具有最低阻力。开裂线由用激光形成的一系列的紧密间隔的缺陷线(本文中称作穿孔、孔或损坏痕迹)组成。可调节和构造激光分离方法来实现从原始的基材手动或机械分离、部分分离或完全分离具有所需形状的玻璃零件。

[0052] 在第一步中,用超短脉冲激光束辐射待加工的材料(例如物品或工件),该脉冲激光束浓缩成高长径比线状聚焦(在本文中称作激光束聚焦线),其穿过基材。在这个高密度激光辐射体积之内,通过非线性效应来改性材料。应特别指出的是,需要在高于临界阈值的光学强度下来诱导非线性吸收。在低于这个临界强度阈值的情况下,材料对激光辐射是透明的,且仍然处于其原始状态。通过在所需的线或路径上扫描激光,我们形成由一系列缺陷线组成的开裂线(几微米宽)。开裂线限定待在后续的加工步骤中分离的零件的周界或形状。

[0053] 基于在包括熔合形成的玻璃复合材料工件的透明材料中诱导非线性吸收的能力,来预测激光源的选定。非线性吸收包括多光子吸收(MPA)。MPA是同时吸收多个(两个或更多个)相同或不同频率的光子,从而将材料从较低能态(通常是基态)激发到较高能态(激发态)。激发态可为激发的电子态或离子化态。材料的较高和较低能态之间的能量差异等于所述两个或更多个光子的能量之和。MPA是非线性过程,其通常比线性吸收更弱几个数量级。其与线性吸收的不同之处在于MPA的强度取决于光强度的平方或更高的幂,因此使得其是非线性光学过程。在常规光强度下,MPA可忽略。如果光强度(能量密度)极高(在临界阈值以上),例如在含本文所述的激光束聚焦线的激光源(特别是脉冲激光源)的聚焦区域中,MPA变得可观并在材料中在其中光源的能量密度足够高的区域中,导致可测量的效应。在聚焦区域之内,能量密度还可高到足以导致离子化。

[0054] 在原子水平,单独的原子的离子化具有离散的能量要求。玻璃中常用的几种元素(例如Si,Na,K)具有较低的离子化能($\sim 5\text{eV}$)。在没有MPA现象的情况下,需要在约248纳米

波长来在 $\sim 5\text{eV}$ 下形成线性离子化。有MPA时,能量相隔 $\sim 5\text{eV}$ 的态之间的离子化或激发可使用长于248纳米的波长来实现。例如,波长为532纳米的光子的能量是 $\sim 2.33\text{eV}$,因此例如在双光子吸收(TPA)中,两个波长为532的光子可诱导能量相隔能量约为 4.66eV 的态之间的转变。因此,例如可在材料的区域中选择性地激发或离子化原子和键,其中激光束的能量密度高到足以例如诱导具有一半所需激发能量的激光波长的非线性TPA。

[0055] MPA可导致激发的原子或键与相邻原子或键的局部重构和分离。键接或构造中的所得改性可导致非热烧蚀,并从发生MPA的材料区域除去物质。物质的这种除去形成结构缺陷(例如缺陷线、损坏线或“穿孔”),其机械地弱化材料,并使得它在施加机械应力或热应力时更容易形成裂纹或断裂。通过控制穿孔的设置,可精确地限定裂纹形成所沿着的轮廓或路径,并可实现精确地微加工材料。由一系列穿孔限定的轮廓可看作开裂线,并对应于材料中结构弱化的区域。在一种实施方式中,微加工包括用激光从加工的材料分离零件,其中所述零件具有由穿孔的封闭轮廓决定的精确限定的形状或周界,其通过由激光诱导的MPA效应来形成。如本文所使用,术语封闭的轮廓指由激光线形成的穿孔路径,其中所述路径在某些位置与其自身相交。内部轮廓是一种形成的路径,其中所得形状完全被材料的外部部分环绕。

[0056] 优选的激光是超短脉冲激光(脉冲持续时间在几十皮秒的量级或更短),其可以脉冲模式或脉冲群模式操作。在脉冲模式中,从激光器发射一系列标称相同的单一脉冲,并引导至工件。在脉冲模式中,通过脉冲之间的时间间隔来决定激光的重复率。在脉冲群模式中,从激光器发射脉冲的脉冲群,其中每一脉冲群包括两个或更多个脉冲(具有相同或不同的幅度)。在脉冲群模式中,脉冲群之内的脉冲通过第一时间间隔(其限定脉冲群的脉冲重复率)隔开,且脉冲群通过第二时间间隔(其限定脉冲群重复率)隔开,其中第二时间间隔通常比第一时间间隔长得多。如本文所使用(无论是在脉冲模式或脉冲群模式的情况下),时间间隔指脉冲或脉冲群的相应部分(例如,前沿到前沿,峰到峰,或后沿到后沿)之间的时间差异。通过激光器的设计来控制脉冲和脉冲群重复率,且通常在极限之内可通过调节激光器的操作条件来进行调节。典型的脉冲和脉冲群重复率是kHz到mHz范围。

[0057] 激光脉冲持续时间(在脉冲模式中或用于在脉冲群模式中的脉冲群之内的脉冲)可为小于或等于 10^{-10} 秒,或小于或等于 10^{-11} 秒,或小于或等于 10^{-12} 秒,或小于或等于 10^{-13} 秒。在本文所述的示例性实施方式中,激光脉冲持续时间大于 10^{-15} 。

[0058] 可通过控制激光和/或基材或堆叠件的移动以控制基材或堆叠件相对于激光的速度,来隔开和精确设置穿孔。例如,在暴露于100kHz的系列脉冲(或脉冲群)且以200毫米/秒的速度移动的薄的透明基材中,单个脉冲将相隔2微米以形成相隔2微米的一系列的穿孔。这个缺陷线(穿孔)间隔近到足以沿着有该系列穿孔限定的轮廓实现机械分离或热分离。沿着开裂线方向的相邻缺陷线之间的距离可为例如0.25微米-50微米,或0.50微米-约20微米,或0.50微米-约15微米,或0.50微米-10微米,或0.50微米-3.0微米或3.0微米-10微米。

[0059] 一旦形成具有垂直缺陷的开裂线,可通过下述方式来进行分离:1)在开裂线上或周围的手动或机械应力;应力或压力应形成张力,其将开裂线的两侧牵拉开,并打碎仍然连接在一起的区域;2)使用热源来绕着开裂线形成应力区域,从而使垂直缺陷线处于张力中,并诱导部分的或全部的自发分离。在两种情况下,分离都取决于加工参数中的几个,例如激光扫描速度、激光功率、透镜参数、脉冲宽度、重复率等。

[0060] 可用多层熔合拉制系统来制备熔合形成的玻璃复合材料片。如图1所示,复合材料由在芯层的每一表面上的至少一个外部包覆层组成。在本文中,包覆层也称作外层或最外层,芯层也称作内层。在一种实施方式中,玻璃复合材料具有芯层,所述芯层是中等到高热膨胀系数(CTE)玻璃,而外层是低CTE玻璃。基于芯层和包覆层之间的组成差异,片具有天然存在的具有预先施加应力的中央芯。这种复合材料片常常难以在不损坏的情况下切割和分离成可用的零件。此外,在分离的零件之内形成内部开口(例如,狭缝或孔)可能较困难。

[0061] 本发明涉及从复合材料玻璃片,例如如图1所示的具有定制的芯区域和包覆区域的那些,分离零件(本文中也可称作制品)。芯玻璃和包覆玻璃的代表性组成如下所述:包覆层是玻璃组合物,其包含约60摩尔%-约66摩尔%SiO₂;约7摩尔%-约10摩尔%Al₂O₃;约14摩尔%-约18摩尔%B₂O₃;和约9摩尔%-约16摩尔%碱土金属氧化物,其中碱土金属氧化物至少包含CaO且CaO以约3摩尔%-约12摩尔%的浓度存在于玻璃组合物中;以及其中所述玻璃组合物基本上不含碱金属和含有碱金属的化合物。具体的包覆层玻璃组合物参见表1。

[0062] 表1:包覆玻璃组合物

组分	摩尔%
SiO ₂	64.59
Al ₂ O ₃	7.38
[0063] B ₂ O ₃	16.45
MgO	2.21
CaO	8.14
SrO	1.11

[0064] 代表性芯玻璃组合物包含:约60摩尔%-约75摩尔%SiO₂,约2摩尔%-约11摩尔%Al₂O₃,0摩尔%-约11摩尔%B₂O₃,0摩尔%-约1摩尔%Na₂O,约1摩尔%-约18摩尔%K₂O,0摩尔%-约7摩尔%MgO,0摩尔%-约9摩尔%CaO,约1摩尔%-约8摩尔%SrO,0摩尔%-约4摩尔%BaO,和约3摩尔%-约16摩尔%R' O,其中R' O包含组合物中MgO、CaO、SrO和BaO的摩尔%之和。具体的芯玻璃组合物参见表2。

[0065] 表2:芯玻璃组合物

组分	摩尔%
[0066] SiO ₂	63.46
Al ₂ O ₃	9.56
B ₂ O ₃	7.09
[0067] K ₂ O	5.79
MgO	2.49
CaO	7.41
SrO	3.95

[0068] 使用如下所述的方法,实现对如图1所示的熔合形成的玻璃复合材料片的激光钻

孔和分离。

[0069] 激光切割方法依赖于对在线性状况中或较低激光强度下的激光波长的材料透明度,其实现保持高表面质量,且依赖于减少的表面下损坏,该表面下损坏由围绕激光聚焦的高强度区域形成。例如,通过使用本文所述的方法,工件边缘可具有最高达小于或等于约75微米深度的表面下损坏。实现这个过程的关键因素之一是用超短脉冲激光形成的缺陷的高长径比。它使得形成从待切割材料的顶部表面延伸到底部表面的缺陷线。原则上,缺陷线可通过单一脉冲或脉冲的单一脉冲群来形成,如有需要,可使用额外的脉冲或脉冲群来形成缺陷线或增加受影响区域的程度(例如,深度和宽度)。

[0070] 切割和分离透明材料的方法主要基于使用超短脉冲激光在待加工的材料中形成开裂线,其中开裂线由一系列缺陷线组成,其设置成限定待从材料分离的零件的所需的周界。取决于材料性质(吸收性,CTE,应力,组成等)和选定用于加工材料的激光参数,只形成开裂线可足以诱发自发分离。在这种情况下,无需辅助的分离过程,例如张力/弯曲力,加热或CO₂激光。

[0071] 在一些情况下,沿着由一系列穿孔或缺陷线限定的轮廓形成的开裂线不足以自发地分离零件,可能需要辅助步骤。如需要这样,例如可使用第二激光来形成热应力以分离零件。在熔合形成的玻璃复合材料的情况中,我们发现在形成开裂线以后可通过下述方式来实现分离:施加机械力或使用CO₂激光来形成热应力以实施零件的分离。另一种选择是只用CO₂激光来启动分离,然后手动地完成分离。使用在10.6微米下发射的散焦cw激光和使用通过控制其占空度调节的功率,来实现任选的CO₂激光分离。通过改变光斑尺寸,聚焦变化(即,散焦范围)用于改变诱导的热应力。散焦激光束包括产生下述光斑尺寸的激光束:该光斑尺寸大于在激光波长尺寸量级上的最小、衍射限制的光斑尺寸。例如,对于CO₂激光可使用约7毫米、2毫米和20毫米的散焦光斑尺寸,考虑到10.6微米的发射波长,例如它的衍射限制的光斑尺寸小得多。

[0072] 存在几种方法来形成缺陷线。形成线状聚焦的光学方法可具有多种形式,使用圆环状激光束和球形透镜,轴棱锥透镜,衍射元件,或其它方法来形成高强度的线性区域。只要在基材材料或熔合形成玻璃复合材料工件的聚焦的区域中达到足以通过非线性光学效应来形成基材或工件材料的分解的光学强度,激光的类型(皮秒,飞秒等)和波长(IR,绿色,UV等)也可改变。

[0073] 在本发明中,使用超短脉冲激光以一致的、可控的和可重复的方式来形成高长径比的垂直缺陷线。实现形成这种垂直缺陷线的光学装置的细节如下所述,且还参见2013年1月15日提交的美国专利申请号61/752,489,以上各文的全部内容通过引用纳入本文。这个概念的本质是在光学透镜组装件中使用轴棱锥透镜元件,从而使用超短(皮秒或飞秒持续时间)Bessel束来形成高长径比的、不逐渐减小的微观通道区域。换句话说,轴棱锥在基材材料中将激光束浓缩成圆筒形状和高长径比(较长的长度和较小的直径)的高强度区域。因为使用浓缩的激光束形成高强度,出现激光的电磁场和基材材料的非线性相互作用,并将激光能量转移到基材,从而形成缺陷,所述缺陷变成开裂线的组成。但是,应特别指出的是,在激光能量强度不高的材料区域中(例如环绕中央汇聚线的基材玻璃体积),材料对激光是透明的,且不存在将能量从激光转移到材料的机理。结果,当激光强度低于非线性阈值时,玻璃或工件没有发生任何事情。

[0074] 转向图2A和2B,激光加工材料的方法包含将脉冲激光束2聚焦成沿着束传播方向取向的激光束聚焦线2b。激光束聚焦线2b可通过多种方法来形成,例如Bessel束、Airy束、Weber束和Mathieu束(即,非衍射性束),它们的场轮廓通常通过专用函数给出,与Gaussian函数相比,它们在横向方向(即,传播方向)衰减更慢。如图3A所示,激光器3(未显示)发射激光束2,其具有入射到光学组装件6的部分2a。在输出侧上,沿着束方向在限定的膨胀范围上(聚焦线的长度1),光学组装件6将入射激光束转变成激光束聚焦线2b。平坦基材1设置在束路径中,从而至少部分地与激光束2的激光束聚焦线2b重叠。因此,将激光束聚焦线引导进入基材。分别地,附图标记1a表示朝向光学组装件6或激光的平坦基材的表面,附图标记1b表示基材1的逆向(远端)表面。基材或工件厚度(在该实施方式中,垂直于平面1a和1b,即垂直于基材平面测量)用d标记。例如,基材或工件还可称作材料,且可为对激光束2的波长是基本上透明的玻璃制品。

[0075] 如图2A所示,基材1(或熔合形成的玻璃复合材料工件)基本上垂直于纵向束轴对齐,因此在由光学组装件6产生的相同的聚焦线2b后面(基材垂直于附图平面)。聚焦线沿着束方向取向或对齐,相对于聚焦线2b设置基材使得聚焦线2b从基材的表面1a之前开始并在基材的表面1b之前结束,即聚焦线2b在基材之内终止且不延伸超出表面1b。在激光束聚焦线2b与基材1的重叠区域中,即在被聚焦线2b覆盖的基材材料中,激光束聚焦线2b产生(假设沿着激光束聚焦线2b形成合适的激光强度,该强度通过激光束2在长度1部分上的聚焦即长度1的线状聚焦来确保)部分2c(沿着纵向束方向对齐),且沿着部分2c在基材材料中产生诱导非线性吸收。诱导非线性吸收沿着部分2c在基材材料中形成缺陷线。

[0076] 缺陷线是在基本上透明材料中的微观的(例如直径 $>100\text{nm}$ 且 <0.5 微米)细长“孔”(本文中也可称作穿孔或损坏痕迹),其通过使用一个或多个高能脉冲或一个或多个高能脉冲的脉冲群来形成。穿孔表示被激光改变的基材材料的区域。激光诱导的改性打乱基材材料的结构,并构造机械弱点的位点。结构打乱包括材料的密实化、熔融、移动,重排和键合裂开。穿孔延伸进入基材材料内部,并具有与激光的横截面形状(通常是圆形)一致的横截面形状。穿孔的平均直径可为 0.1 微米- 50 微米,或 1 微米- 20 微米,或 2 微米- 10 微米,或 0.1 微米- 5 微米。在一些实施方式中,穿孔是“通孔”,其是从基材材料的顶部延伸到底部的孔或开口通道。在一些实施方式中,穿孔可不是连续地开放的通道,且包括用激光从基材材料移出的固体材料部分。移出的材料堵塞或部分堵塞由穿孔限定的空间。在移出材料的部分之间可分散一个或多个开放通道(未堵塞的区域)。开放通道的直径可为 $<1000\text{nm}$,或 $<500\text{nm}$,或 $<400\text{nm}$,或 $<300\text{nm}$ 或为 10nm - 750nm ,或 100nm - 500nm 。在本文所述的实施方式中,环绕孔的材料的打乱的或改变的区域(例如实密化的、熔融的或以其它方式改变的)优选地具有 <50 微米(例如, <10 微米)的直径。

[0077] 例如,单个穿孔可以几百千赫(几十万孔眼/秒)的速率来形成。借助激光源与材料之间的相对移动,可将这些穿孔邻近彼此设置(空间间距根据需从亚微米变化到几微米或甚至几十微米)。可选定这种空间间距(节距),以促进材料或工件的分离。在一些实施方式中,缺陷线是“通孔”,其是基本上从透明材料的顶部延伸到底部的孔或开口通道。缺陷线的形成不是局部的,而是在诱导吸收的部分2c的全部长度上延伸。部分2c的长度(其对应于激光束聚焦线2b与基材1重叠的长度)用附图标记L标记。诱导吸收2c的部分(或基材1材料中经历形成缺陷线的部分)的平均直径或范围或附图标记D标记。这种平均范围D基本上

对应于激光束聚焦线2b的平均直径 δ ,即约0.1微米-约5微米的平均光斑直径。Bessel束的光斑直径D可书写成 $D = (2.4048\lambda) / (2\pi B)$,其中 λ 是激光束波长,B是轴棱锥角的函数。

[0078] 如图2A所示,因为沿着聚焦线2b的诱导吸收,加热基材材料(对激光束2的波长 λ 是透明的),其源自与聚焦线2b之内的激光束的高强度相关的非线性效应(例如,双光子吸收,多光子吸收)。图2B显示加热的基材材料最终发生膨胀,从而相应的诱导张力导致形成微观裂纹,且在表面1a处张力最大。

[0079] 下面描述了可用来产生聚焦线2b的代表性光学组装件6,以及其中可应用这些光学组装件的代表性光学装置。所有组装件或装置基于上述,从而相同的附图标记用于相同的组件或特征或功能上等同的那些。因此,下面只描述不同之处。

[0080] 为了确保沿着分离零件进行分离的分离零件表面的高质量(涉及破碎强度、几何精确性、粗糙度和避免再次加工的要求),在基材表面上沿着分离线设置的单个聚焦线应使用如下所述的光学组装件来产生(下文中,光学组装件也可称作激光光学器件)。分离表面(或切割边缘)的粗糙度主要由聚焦线的光斑尺寸或光斑直径决定。例如,表面的粗糙度可通过由ASME B46.1标准限定的Ra表面粗糙度参数来表征。如ASME B46.1所述,Ra是在评估的长度之内记录的表面轮廓高度偏离平均线的绝对值的算术平均值。换句话说,Ra是表面的单个特征(峰和谷)相对于平均值的一组绝对高度偏差的平均值。

[0081] 在激光3(与基材1材料相互作用)的给定波长 λ 的情况下,为了获得例如0.5微米-2微米的较小的光斑尺寸,通常必须对激光光学器件6的数值孔径施加某些要求。这些要求通过如下所述的激光光学器件6来满足。

[0082] 另一方面,为了获得所需的数值孔径,光学器件必需设置成需要用于给定焦距的开口,根据已知的Abbe公式($N.A. = n \sin(\theta)$),n:待加工的玻璃或复合材料工件的折射率, θ :孔径角的一半;且 $\theta = \arctan(D_L/2f)$; D_L :光圈直径,f:焦距)。另一方面,激光束必须照射最高达所需的孔径的光学器件,这通常通过在激光和聚焦光学器件之间使用宽化望远镜的束扩展来实现。

[0083] 为了沿着聚焦线的均匀的相互作用,光斑尺寸变化不应太大。例如,这可通过下述来确保(参见下文的实施方式):只在较小的圆形区域照射聚焦光学器件,从而束开口和因此数值孔径的百分比只稍微发生变化。

[0084] 根据图3A(垂直于基材平面且在激光辐射2的激光束簇中的中央束处的截面;这里,激光束2也垂直地入射到基材平面,即入射角 θ 是 0° ,从而聚焦线2b或诱导吸收2c的部分平行于基材法向),由激光器3发射的激光辐射2a首先引导至圆形光圈(aperture)8上,其对所用的激光辐射是完全不透明的。使光圈8取向成垂直于纵向束轴并在所示束簇2a的中央束上居中。选定光圈8的直径,使得靠近束簇2a的中心的束簇或中央束(这里用2aZ标记)撞击光圈,并被其完全吸收。因为与束直径相比光圈尺寸下降,所以只有在束簇2a外周范围的束(边际射线,这里用2aR标记)没有被吸收,而是从侧边通过光圈8并撞击光学组装件6的聚焦光学元件的边际区域,在该实施方式中,所述光学组装件6的聚焦光学元件设计成球形切割的、双凸透镜7。

[0085] 如图3A所示,激光束聚焦线2b不是激光束的单一焦点,而是用于激光束中不同射线的一系列焦点。所述系列焦点形成具有限定长度(在图3A中显示为激光束聚焦线2b的长度1)的细长聚焦线。

[0086] 透镜7在中央束上居中,且设计成常用球形切割透镜形式的非校准的双凸聚焦透镜。这种透镜的球形偏差可为优选的。作为替代,还可使用偏离理想的校准系统的非球形或多透镜系统,其不形成理想的焦点而是形成具有限定长度的不同的细长聚焦线(即,没有单一焦点的透镜或系统)。透镜的区域因此沿着聚焦线2b聚焦,受制于与透镜中心的距离。越过束方向的光圈8的直径约为束簇直径的90%(由束强度降低到最大强度的 $1/e^2$ 所需的距离来限定)且约为光学组装件6的透镜7直径的75%。因此,使用通过在中央阻断束簇而产生的非色差校准球形透镜7的聚焦线2b。图3A显示通过中央束的平面中的截面,且当所示的束绕着聚焦线2b旋转时,可看见完整的三维簇。

[0087] 用图3A所示的透镜7和系统形成的这类聚焦线的一个潜在不足在于条件(光斑尺寸、激光强度)可沿聚焦线变化(并沿着材料中所需的深度变化),因此所需类型的相互作用(无熔融、诱导吸收、直至裂纹形成的热塑性变形)可能只在聚焦线的选定部分中发生。这进而意味着可能只有一部分的入射激光由基材材料以所需的方式吸收。这样,可能会降低该工艺的效率(用于所需分离速度的所需的平均激光功率),且激光还可能会传输进入不需要的区域(粘合到基材的零件或层或者固定基材的固定件),并以不利的方式(例如,加热、扩散、吸收、不想要的改性)与它们相互作用。

[0088] 图3B-1-4表明(不仅用于图3A中的光学组装件,而且还用于任何其它可应用的光学组装件6)可通过下述来控制激光束聚焦线2b的位置:合适地相对于基材1设置和/或对齐光学组装件6以及合适地选定光学组装件6的参数。如图3B-1所示,可调节聚焦线2b的长度 l ,使得它超出基材厚度 d (这里是2倍)。如果将基材1设置成(沿纵向束方向观察)居中于聚焦线2b,那么在全部基材厚度上产生诱导吸收2c的部分。例如,激光束聚焦线2b的长度 l 可为约0.01mm-约100mm或约0.1mm-约10mm,或约0.1mm-约1mm。例如,各种实施方式可构造成包括约0.1mm,0.2mm,0.3mm,0.4mm,0.5mm,0.7mm,1mm,2mm,3mm或5mm的长度 l 。

[0089] 在图3B-2所示的情况中,产生长度 l 的聚焦线2b,其或多或少对应于基材厚度 d 。因为以线2b在基材以外的点处开始的方式来相对于线2b设置基材1,诱导吸收2c的部分(其从基片表面延伸到限定的基材深度但没有到达逆向表面1b)的长度 L 小于聚焦线2b的长度 l 。图3B-3显示其中基材1(沿着垂直于束方向的方向观察)设置在聚焦线2b的起始点上方的情况,从而类似于图3B-2,线2b的长度 l 大于基材1中诱导吸收2c的部分的长度 L 。因此,聚焦线在基材之内开始,并延伸超出逆向(远端)表面1b。图3B-4显示其中聚焦线长度 l 小于基材厚度 d 的情况,从而-在相对于聚焦线居中地设置基材且沿入射方向观察的情况下-聚焦线在表面1a附近从基材之内开始并在表面1b附近在基材之内结束(例如 $l=0.75 \cdot d$)。

[0090] 以下述方式来设置聚焦线2b是特别优选的:表面1a,1b中的至少一个被聚焦线覆盖,从而诱导吸收2c的部分从基材的至少一个表面上开始。这样,能获得实质上理想的切割,同时避免在表面处烧蚀、羽化和颗粒化。

[0091] 图4显示另一可用的光学组装件6。基础构造与图3A所示相同,所以下面只描述不同之处。所示的光学组装件基于使用非球形自由表面的光学器件,从而产生聚焦线2b,其成形为形成具有限定长度 l 的聚焦线。为此,可将非球面用作光学组装件6的光学元件。例如,在图4中使用了所谓的锥形棱柱,其也称作轴棱锥。轴棱锥是特殊的、锥形切割的透镜,其在沿着光学轴的线上形成光斑源(或者将激光束转换成环)。这种轴棱锥的布置是本技术领域所公知的;在实施例中的锥角是 10° 。这里用附图标记9标记的轴棱锥的顶点朝向入射方向,

并在束中央上居中。因为由轴棱锥9产生的聚焦线2b在其内部之内开始,可将基材1(这里与主束轴垂直对齐)设置在束路径中且直接在轴棱锥9后面。如图4所示,因为轴棱锥的光学特征,还可沿着束方向移动基材1,同时仍然在聚焦线2b的范围之内。因此,在基材1的材料中的诱导吸收2c的部分在全部基材深度d上延伸。

[0092] 但是,所示的布局受到下述限制:因为由轴棱锥9形成的聚焦线2b的区域在轴棱锥9之内开始,当在轴棱锥9和基材或玻璃复合材料工件材料之间存在间隔时,显著部分的激光能量没有聚焦进入位于材料之内的聚焦线2b的诱导吸收2c的部分。此外,通过轴棱锥9的折射率和锥角,使聚焦线2b的长度 l 与束直径相关。这是在较薄材料(在这种情况下几个毫米)的情况下,总聚焦线比基材或玻璃复合材料工件厚度长得多的原因,其具有使大多数的激光能量不聚焦进入材料的影响。

[0093] 为此,可能需要使用同时包含轴棱锥和聚焦透镜的光学组装件6。图5A显示这种光学组装件6,其中将含设计成形成激光束聚焦线2b的非球形自由表面的第一光学元件设置在激光3的束路径中。在图5A所示的情况中,这个第一光学元件是锥角为 5° 的轴棱锥10,其垂直于束方向设置并在激光束3上居中。轴棱锥的顶点朝着束方向取向。第二聚焦光学元件(这里是平面-凸透镜11(其弯曲部分朝向轴棱锥取向))沿束方向设置,并与轴棱锥10相距距离 Z_1 。在这种情况下,距离 Z_1 是约300mm,其以下述方式来选定:使由轴棱锥10形成的激光辐射在透镜11的外部径向部分上以圆形的方式入射。在限定长度(在这种情况下是1.5mm)的聚焦线2b上,透镜11在距离 Z_2 (在这种情况下,与透镜11相距约20mm)处在输出侧上聚焦该圆形辐射。在该实施方式中,透镜11的有效焦距是25毫米。通过轴棱锥10对激光束进行的圆形变换用附图标记SR标记。

[0094] 图5B详细显示根据图5A在基材1材料中形成聚焦线2b或诱导吸收2c。以下述方式选定两元件10,11的光学特征以及它们的设置:在束方向上的聚焦线2b的长度 l 与基材1的厚度 d 精确地相同。结果,需要沿着束方向精确地设置基材1,从而聚焦线2b的位置精确地在基材1的两个表面1a和1b之间,如图5B所示。

[0095] 因此,如果在离开激光光学器件一定距离形成聚焦线,以及如果将更大部分的激光辐射聚焦到所需的聚焦线端部,将是优选的。如本文所述,这可通过下述来实现:仅仅在特定的外部径向区域上以圆形(环形)的方式照射主要聚焦元件11(透镜),这一方面用于获得所要求的数值孔径和因此获得所要求的光斑尺寸,然而另一方面,在所需的聚焦线2b之后,在光斑中心中非常短的距离上,扩散的圆的强度下降,因为形成基本上圆形的光斑。通过这样的方式,在所要求的基材深度的较短距离之内停止缺陷线形成。轴棱锥10和聚焦透镜11的组合满足这个要求。轴棱锥以两种不同方式起作用:因为轴棱锥10,以环的形式将通常为圆形的激光光斑发射到聚焦透镜11,且轴棱锥10的非球形具有下述效果:超过透镜的焦平面形成聚焦线,而不是在焦平面内的焦点上形成聚焦线。可通过轴棱锥上的束直径来调节聚焦线2b的长度 l 。另一方面,可通过距离 Z_1 (轴棱锥-透镜间距)和通过轴棱锥的锥角,来调节沿着聚焦线的数值孔径。这样,可在聚焦线中浓缩全部激光能量。

[0096] 如果希望缺陷线的形成继续到基材背面,圆形(环形)照射仍然具有下述优势:(1)最佳地使用激光功率,因为大多数的激光仍然在聚焦线的所要求的长度中浓缩和(2)能获得沿着聚焦线的均匀的光斑尺寸-和因此获得沿着聚焦线的零件与基材的均匀分离-这是由环形照明的区域以及通过其它光学作用设定的所需色差带来的。

[0097] 与图5A所示的平面-凸透镜不同,还可使用聚焦半月形透镜或另外的较高程度校准的聚焦透镜(非球形的、多透镜系统)。

[0098] 为了使用图5A所示的轴棱锥和透镜的组合来产生非常短的聚焦线2b,必需选定非常小的在轴棱锥上入射的激光束的束直径。这具有实际的不足:将束居中到轴棱锥的顶点上必须非常精确,结果对激光的方向变化(束漂移稳定性)非常敏感。此外,严格准直的激光束非常分散的,即因为光挠曲,束簇在短距离上变得模糊。

[0099] 如图6所示,通过在光学组装件6中包括另一透镜(准直透镜12),可避免这两种效应。额外的正像(positive)透镜12用于非常紧密地调节聚焦透镜11的圆形照射。以下述方式选定准直透镜12的焦距 f' :所需的圆形直径 d_r 来自整体件与准直透镜12的距离 Z_{1a} ,其等于 f' 。可通过距离 Z_{1b} (准直透镜12到聚焦透镜11)来调节环的所需宽度 b_r 。作为纯几何学的问题,较小的圆形照射的宽度导致较短的聚焦线。在距离 f' 处可获得极小值。

[0100] 因此,在图6中描述的光学组装件6基于图5A所示的光学组装件,因此下文只描述不同之处。准直透镜12在本文中也设计成平面-凸透镜(其弯曲部分朝向束方向),将其额外地居中设置在一侧上的轴棱锥10(其顶点朝向束方向)和在另一侧上的平面-凸透镜11之间的束路径上。将准直透镜12与轴棱锥10的距离称作 Z_{1a} ,聚焦透镜11与准直透镜12的距离称作 Z_{1b} ,和将聚焦线2b与聚焦透镜11的距离称作 Z_2 (总是沿束方向观察)。如图6所示,由轴棱锥10形成的圆形辐射SR在准直透镜12上发散地入射并具有圆直径 d_r ,可沿着距离 Z_{1b} 将其调节到所要求的圆形宽度 b_r ,使得至少在聚焦透镜11处形成近似恒定的圆直径 d_r 。在所示的情况下,预期产生非常短的聚焦线2b,从而因为透镜12的聚焦性质(在该实施例中,圆直径 d_r 是22mm),将透镜12处约4mm的圆宽度 b_r 降低到透镜11处的约0.5mm。

[0101] 在所示实施例中,使用2mm的典型激光束直径、焦距 $f=25\text{mm}$ 的聚焦透镜11、焦距 $f'=150\text{mm}$ 的准直透镜,和选定距离 $Z_{1a}=Z_{1b}=140\text{mm}$ 和 $Z_2=15\text{mm}$,能获得小于0.5mm的聚焦线长度1。

[0102] 图7A-7C显示在不同激光强度状况下的激光-物质相互作用。在第一种情况下,如图7A所示,未聚焦的激光束710穿过透明基材720且没有对所述透明基材720带来任何改性。在这种特别的情况下,不存在非线性效应,因为激光能量密度(或激光能量/用激光束照射的单位面积)低于诱导非线性效应所需的阈值。能量密度越高,电磁场的强度越高。因此,如图7B所示,当用球形透镜730将激光束聚焦到更小的光斑尺寸(如图7B所示)时,照射的区域减小,且能量密度增加,这引发非线性效应,所述非线性效应改性材料以允许只在满足条件的体积中形成开裂线。这样,如果聚焦的激光的束腰部设置在基材表面,那么将发生表面的改性。相反,如果聚焦的激光的束腰部设置在基材表面以下,当能量密度低于非线性光学效应阈值时,在表面处不发生任何事情。但是在设置于基材720本体中的焦点740处,激光强度高到足以引发多光子非线性效应,由此诱导对材料的破坏。最终,如图7C所示,在轴棱锥的情况下(如图7C所示),轴棱锥750或替代的菲涅耳轴棱锥的衍射图案形成干涉,所述干涉产生Bessel状的强度分布(高强度圆筒760),且只有在这个体积中强度高到足以形成非线性吸收和对材料720的改性。其中Bessel状的强度分布高到足以形成非线性吸收和对材料的改性的圆筒760的直径,也是激光束聚焦线的光斑直径,如本文所述。Bessel束的光斑直径 D 可表达成 $D=(2.4048\lambda)/(2\pi B)$,其中 λ 是激光束波长, B 是轴棱锥角的函数。

[0103] 激光和光学系统:

[0104] 为了切割熔合形成的玻璃复合材料工件,开发了一种方法,所述方法使用1064纳米皮秒激光器以及形成线状聚焦束的光学器件来在玻璃复合材料中形成多行缺陷线。设置最高达0.7毫米厚的玻璃复合材料,从而它在由光学器件产生的聚焦线的区域之内。使用长度为约1毫米的聚焦线和在玻璃复合材料工件处测量的200kHz (脉冲模式中约120微焦耳/脉冲,或脉冲群模式中约120微焦耳/脉冲群) 重复率下大于或等于约24W的输出功率的皮秒激光器,聚焦线区域中的光学强度可容易地高到足以在玻璃复合材料工件中形成非线性吸收。在复合材料处测量的脉冲激光束的平均激光能量可大于40微焦耳/毫米材料厚度。这种“平均激光能量”还可称作平均、每脉冲、线性能量密度或每激光脉冲平均能量/毫米材料厚度。在玻璃工件之内形成损坏的、烧蚀的、蒸发的或以其它方式改变的材料区域,其近似遵循高强度的线性区域。

[0105] 超短(脉冲持续时间在几十皮秒的量级或更短)激光可以脉冲模式或脉冲群模式操作。在脉冲模式中,从激光器发射一系列标称地相同的单一脉冲,并引导至基材。在脉冲模式中,通过脉冲之间的时间间隔来决定激光的重复率。在脉冲群模式中,从激光发射脉冲的脉冲群,其中每一脉冲群包括两个或更多个脉冲(具有相同或不同的幅度)。在脉冲群模式中,脉冲群之内的脉冲通过第一时间间隔(其限定脉冲群的脉冲重复率)隔开,且脉冲群通过第二时间间隔(其限定脉冲群重复率)隔开,其中第二时间间隔通常比第一时间间隔长得多。如本文所使用(无论是在脉冲模式或脉冲群模式的情况下),时间间隔指脉冲或脉冲群的相应部分(例如,前沿到前沿,峰到峰,或后沿到后沿)之间的时间差异。通过激光的设计来控制脉冲和脉冲群重复率,且通常在极限之内可通过调节激光的操作条件来进行调节。典型的脉冲和脉冲群重复率是kHz到mHz。激光脉冲持续时间(在脉冲模式中或用于在脉冲群模式中的脉冲群之内的脉冲)可为小于或等于 10^{-10} 秒,或小于或等于 10^{-11} 秒,或小于或等于 10^{-12} 秒,或小于或等于 10^{-13} 秒。在本文所述的示例性实施方式中,激光脉冲持续时间大于 10^{-15} 。

[0106] 具体来说,如图8A所示,根据本文所述的选定实施方式,皮秒激光器形成脉冲500A的“脉冲群”500,有时也称作“群脉冲”。脉冲群是一种激光操作,其中脉冲发射不是均匀和稳定的流,而是脉冲的紧密簇。每一“脉冲群”500可包含多个脉冲500A(例如2脉冲,3脉冲,4脉冲,5脉冲,10,15,20,或更多),其具有最高达100皮秒的非常短的持续时间 T_a (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,或在它们之间)。脉冲持续时间通常是约1皮秒-约1000皮秒,或约1皮秒-约100皮秒,或约2皮秒-约50皮秒,或约5皮秒-约20皮秒。单一脉冲群500之内的这些单独脉冲500A也可称作“子脉冲”,其只是表示它们在出现在脉冲的单一脉冲群之内的事实。脉冲群之内每一激光脉冲500A的能量或强度可与该脉冲群之内的其它脉冲的能量或强度不相同,且脉冲群500之内多个脉冲的强度分布可遵循随时间的指数衰减,其由激光设计控制。优选地,在本文所述的示例性实施方式中的脉冲群500之内的每一脉冲500A在时间上与所述脉冲群中的后续脉冲相隔1纳秒-50纳秒的持续时间 T_p (例如10-50纳秒,或10-40纳秒,或10-30纳秒),且时间常常由激光腔设计来控制。对于给定激光,脉冲群500之内每一脉冲之间的时间间隔 T_p (脉冲到脉冲间隔)是较均匀的($\pm 10\%$)。例如,在一些实施方式中,每一脉冲在时间上与后续的脉冲相隔约20纳秒(50mHz脉冲重复频率)。例如,对于产生约20纳秒脉冲到脉冲间隔 T_p 的激光,将脉冲群之内的脉冲到脉冲间隔 T_p 保持在约 $\pm 10\%$ 之内,或是约 ± 2 纳秒。每一“脉冲

群”之间的时间(即,脉冲群之间的时间间隔 T_b)将大得多,(例如, $0.25 \leq T_b \leq 1000$ 微秒,例如1-10微秒,或3-8微秒)。例如,在本文所述的激光的一些示范性实施方式中,对于约200kHz的激光重复率或重复频率, T_b 可为约5微秒。在本文中,激光重复率也称作脉冲群重复率或脉冲群重复率,且定义为脉冲群中第一脉冲到后续的脉冲群中第一脉冲之间的时间。在其它实施方式中,脉冲群重复率是约1kHz-约4MHz,或约1kHz-约2MHz,或约1kHz-约650kHz,或约10kHz-约650kHz。在每一脉冲群中的第一脉冲到后续脉冲群中第一脉冲之间的时间 T_b 可为0.25微秒(4MHz脉冲群重复率)-1000微秒(1kHz脉冲群重复率),例如0.5微秒(2MHz脉冲群重复率)-40微秒(25kHz脉冲群重复率),或2微秒(500kHz脉冲群重复率)-20微秒(50kHz脉冲群重复率)。确切的时机、脉冲持续时间和重复率可根据激光设计和用户可控的操作参数而改变。已证明具有高强度的短脉冲($T_a < 20$ 皮秒,优选地 $T_a \leq 15$ 皮秒)非常有用。

[0107] 改变材料所要求的能量可通过脉冲群能量-在脉冲群之内包含的能量(每一脉冲群500包含一系列脉冲500A)来描述,或通过在单一激光脉冲之内包含的能量(其中的许多可包含脉冲群)来描述。对于这些应用,能量/脉冲群(/毫米待切割的材料)可为10-2500微焦耳,或20-1500微焦耳,或25-750微焦耳,或40-2500微焦耳,或100-1500微焦耳,或200-1250微焦耳,或250-1500微焦耳,或250-750微焦耳。脉冲群之内的单个脉冲的能量更小,且确切的单个激光脉冲能量取决于脉冲群500之内的脉冲500A的数目,以及激光脉冲随时间的衰减速率(例如,指数衰减速率),如图8A所示。例如,对于恒定能量/脉冲群,如果脉冲群包含10个单个激光脉冲500A,那么每个单个激光脉冲500A的能量将低于相同的脉冲群脉冲500只具有2个单个激光脉冲时的能量。

[0108] 对于切割和改性透明材料例如玻璃而言,使用能产生这种脉冲群的激光是优选的。与使用在时间上通过单一脉冲激光重复率隔开的单一脉冲相反,与使用单一脉冲激光所能形成的相比,使用在脉冲群500之内的脉冲的快速序列上铺展激光能量的脉冲群脉冲序列使得实现在更长的时间尺度上与材料的高强度相互作用。虽然单一脉冲可在时间上扩展,但能量守恒表明,这样做时脉冲之内的强度必须下降,且下降倍数大约与脉冲宽度增加倍数相同。因此,如果将10皮秒单一脉冲扩展到10纳秒脉冲,强度将下降大约3个数量级。这种下降可能会将光学强度下降到其中非线性吸收不再显著的程度,且光材料相互作用不再强烈到足以实现切割。相反,使用脉冲群脉冲激光时,在脉冲群500之内的每一脉冲或子脉冲500A中的强度可仍然非常高-例如脉冲持续时间 T_a 为10皮秒的3个脉冲500A在时间上通过约10纳秒的间隔 T_b 隔开时仍然使得每一脉冲之内的强度比约为单一10皮秒脉冲高约3倍,同时使得激光与材料在大三个数量级的时间尺度上相互作用。因此,在脉冲群之内的多个脉冲500A的这种调节实现以下述方式操控激光-材料相互作用的时间尺度:所述方式可促进更多或更少的与预先存在的等离子体羽流(plume)的光相互作用,更多或更少的光-材料相互作用且材料的原子和分子已通过初始的或之前的激光脉冲进行预激发,以及材料之内可促进缺陷线(穿孔)的受控生长的更多或更少的加热效应。改性材料所需的脉冲群能量的量取决于基材材料组成和用来与基材相互作用的线状聚焦的长度。相互作用区域越长,能量铺开的程度越大,则需要更高的脉冲群能量。

[0109] 当脉冲的单一脉冲群撞击玻璃上基本上相同位置时,在材料中形成缺陷线或孔。即,单一脉冲群之内的多个激光脉冲可在玻璃中形成单一缺陷线或孔位置。当然,如果使玻璃进行平移(例如通过恒定的移动台)或束相对于玻璃移动,脉冲群之内的单独脉冲不能精

确地在玻璃上相同的空间位置处。但是,它们彼此肯定在1微米之内-即它们在基本上相同的位置撞击玻璃。例如,它们可在彼此相距间隔 s_p 处撞击玻璃,其中 $0 < s_p \leq 500$ 纳米。例如,当玻璃位置用20个脉冲的脉冲群撞击时,脉冲群之内的单独脉冲在彼此的250纳米之内撞击玻璃。因此,在一些实施方式中 $1\text{nm} < s_p < 250\text{nm}$ 。在一些实施方式中, $1\text{nm} < s_p < 100\text{nm}$ 。

[0110] 孔或损坏痕迹形成:

[0111] 如果基材具有足够的应力(例如,离子交换玻璃),那么零件将沿着由激光过程描绘出的穿孔损坏的路径(开裂线)自发地进行分离。但是,如果基材没有大量固有的应力,那么皮秒激光器只在复合材料工件中形成缺陷线(损坏痕迹)。这些缺陷线通常为孔的形式,且内部尺寸(直径)是 ~ 0.5 - 1.5 微米。

[0112] 缺陷线可穿过材料的全部厚度或不穿过材料的全部厚度,且可为连续或不连续的在材料的全部深度上的开口。图8B显示缺陷线的示例,其在700微米厚2320NIOX基材工件的全部厚度上穿孔。如图9所示,在熔合形成的玻璃组合物上观察到相似的效果。通过裂开的边缘的侧面观察到缺陷线。通过材料的缺陷线不必然是通孔。可存在堵塞孔的玻璃的区域,但玻璃尺寸通常较小,例如在微米量级。应指出在分离零件之后,沿着缺陷线进行断裂,从而提供零件,所述零件具有含衍生自缺陷线的特征的周界表面(边缘)。在分离之前,缺陷线通常是圆筒状。在分离零件之后,缺陷线断裂,且缺陷线的残余物在分离的零件的周界表面的轮廓中是明显的。在理想的模型中,在分离时缺陷线对半裂开,从而分离的零件的周界表面包括对应于一半圆筒的齿突起(serration)。实践中,分离可偏离理想模型,且周界表面的齿突起可为原始缺陷线的形状的任意断裂。与具体形式无关,将周界表面的特征称作缺陷线,以表明它们存在的来源。

[0113] 还可对包含堆叠的玻璃片的工件进行穿孔。在这种情况下,缺陷线长度需要长于堆叠件高度。

[0114] 孔(缺陷线,穿孔)之间的横向间隔(节距)由当在聚焦的激光束下方平移基材时激光的脉冲率决定。通常,只需要单一皮秒激光脉冲或脉冲群来形成一个完整的孔,但如有需要,可使用多个脉冲或脉冲群。为了在不同节距形成孔,可激发激光束在更长或更短的间隔灼烧。对于切割操作,激光激发通常与束下方的工件的平台驱动移动同步,从而激光脉冲以固定间隔激发,例如每1微米或每5微米。例如在一些实施方式中,沿着开裂线方向的相邻穿孔缺陷线之间的距离或周期性可为大于0.1微米且小于或等于约20微米。更优选地,间隔是0.5-3.0微米。甚至更优选地,间隔可为0.5-1.0微米。在给定基材中的应力水平下,相邻缺陷线之间的确切间隔由促进从穿孔到穿孔的裂纹扩展的材料性质决定。但是,与切割基材不同,还可使用相同的方法来只对材料进行穿孔。在本文所述的方法中,孔或缺陷线可相隔较大的间隔(例如,大于或等于7微米的节距)。

[0115] 激光功率和透镜焦距(其决定聚焦线长度和因此决定功率密度)是确保完全穿透玻璃和下表面以及表面下损坏的特别重要的参数。

[0116] 一般来说,可用的激光功率越高,可在使用上述方法更快地切割材料。本文所述的方法可以0.25米/秒或更快的切割速度来切割玻璃。切割速度是激光束相对于基材材料(例如玻璃)的表面移动的速率,同时形成多个缺陷线孔。较高切割速度例如400毫米/秒,500毫米/秒,750毫米/秒,1米/秒,1.2米/秒,1.5米/秒,或2米/秒,或甚至3.4米/秒-4米/秒常常是所需的,从而使得用于制造的资金投资最小化,且优化设备利用率。激光功率等于激光的

脉冲群能量乘以脉冲群重复频率(重复率)。一般来说,为了以较高切割速度切割玻璃材料,缺陷线通常相隔1-25微米,在一些实施方式中,间隔优选地大于或等于3微米,例如3-12微米,或例如5-10微米。

[0117] 例如,为了获得300毫米/秒的线性切割速度,3微米孔节距对应于具有至少100kHz脉冲群重复率的脉冲群激光。对于600毫米/秒切割速度,3微米节距对应于具有至少200kHz脉冲群重复率的脉冲群-脉冲激光。在200kHz下产生至少40微焦耳/脉冲群并以600毫米/秒切割速度切割的脉冲群激光需要具有至少8瓦的激光功率。更高的切割速度相应地需要更高的激光功率。

[0118] 例如,在3微米节距和40微焦耳/脉冲群下的0.4米/秒的切割速度需要至少5W激光,在3微米节距和40微焦耳/脉冲群下的0.5米/秒的切割速度将需要至少6W激光。因此,优选地脉冲群ps激光的激光功率是6W或更高,更优选地至少8W或更高,和甚至更优选地至少10W或更高。例如,为了获得在4微米节距(缺陷线间隔,或损坏痕迹间隔)和100微焦耳/脉冲群下的0.4米/秒的切割速度需要至少10W激光,为了获得在4微米节距和100微焦耳/脉冲群下的0.5米/秒的切割速度将需要至少12W激光。例如,为了获得在3微米节距和40微焦耳/脉冲群下的1米/秒的切割速度将需要至少13W激光。还例如,在4微米节距和400微焦耳/脉冲群下的1米/秒的切割速度将需要至少100W激光。

[0119] 缺陷线(损坏痕迹)之间的最佳节距和确切的脉冲群能量是取决于材料的,且可根据经验决定。但是,应指出升高激光脉冲能量或以更密的节距制备损坏痕迹不总是使基材料更好地分离或具有改善的边缘质量的条件。缺陷线(损坏痕迹)之间的过小的节距(例如 <0.1 微米,或在一些示例性实施方式中 <1 微米,或在其它实施方式中 <2 微米)有时会抑制附近的后续缺陷线(损坏痕迹)的形成,且常常会抑制绕着穿孔轮廓的材料分离。如果节距过小,还导致玻璃之内的不想要的微裂纹化增加。过长的节距(例如, >50 微米,以及在某些玻璃中 >25 微米或甚至 >20 微米)可导致不受控的“微裂纹化”-即,微观裂纹不是沿着预期的轮廓从缺陷线到缺陷线的扩展,而是沿着不同路径扩展,且导致玻璃沿着远离预期轮廓的不同的(不希望的)方向形成裂纹。这会最终降低分离的零件的强度,因为残留的微裂纹构成弱化玻璃的瑕疵。用于形成缺陷线的脉冲群能量过高(例如, >2500 微焦耳/脉冲群,和在某些实施方式中 >500 微焦耳/脉冲群)会导致之前形成的缺陷线的“愈合”或再次熔融,这会抑制玻璃的分离。因此,优选地脉冲群能量是 <2500 微焦耳/脉冲群,例如, ≤ 500 微焦耳/脉冲群。此外,使用过高的脉冲群能量可导致形成极大的微裂纹,并形成可降低分离之后的零件的边缘强度的结构缺陷。过低的脉冲群能量(例如 <40 微焦耳/脉冲群)可导致在玻璃之内没有可观的缺陷线形成,并因此可必需使用特别高的分离力或导致完全不能沿着穿孔的轮廓分离。

[0120] 使用这种方法能获得的典型的示例性切割速率(速度)是例如0.25米/秒和更高。在某些实施方式中,切割速率是至少300毫米/秒。在某些实施方式中,切割速率是至少400毫米/秒,例如,500毫米/秒-2000毫米/秒,或更高。在某些实施方式中,皮秒(ps)激光利用脉冲群来产生缺陷线,其周期性是0.5微米-13微米,例如0.5微米-3微米。在某些实施方式中,脉冲激光的激光功率是10W-100W,材料和/或激光束以至少0.25米/秒的速率相对于彼此平移;例如以0.25米/秒-0.35米/秒,或0.4米/秒-5米/秒的速率。优选地,脉冲激光束的每一脉冲群在工件处测量的平均激光能量大于40微焦耳/脉冲群/毫米工件厚度。优选地,

脉冲激光束的每一脉冲群在工件处测量的平均激光能量大于小于2500微焦耳/脉冲群/毫米工件厚度,优选地小于约2000微焦耳/脉冲群/毫米工件厚度,且在一些实施方式中,小于1500微焦耳/脉冲群/毫米工件厚度;例如,不大于500微焦耳/脉冲群/毫米工件厚度。

[0121] 我们发现需要高得多的(更高5-10倍)的体积脉冲能量密度(微焦耳/立方微米),来对不含碱金属或含较少碱金属含量的碱土硼铝硅酸盐玻璃进行穿孔。例如,这可通过下述来实现:利用脉冲群激光(优选地具有至少2个脉冲/脉冲群),和在碱土硼铝硅酸盐玻璃(具有很少碱金属或不含碱金属)之内提供大于或等于约0.05微焦耳/立方微米,例如至少0.1微焦耳/立方微米,例如0.1-0.5微焦耳/立方微米的体积能量密度。

[0122] 因此,优选地激光产生具有至少2个脉冲/脉冲群的脉冲群。例如,在一些实施方式中,脉冲激光的功率是10W-150W(例如,10W-100W),并产生具有至少2脉冲/脉冲群(例如,2-25脉冲/脉冲群)的脉冲群。在一些实施方式中,脉冲激光的功率是25W-60W,并产生具有至少2-25脉冲/脉冲群的脉冲群,且用激光脉冲群产生的相邻缺陷线之间的周期或距离是2-10微米。在一些实施方式中,脉冲激光的功率是10W-100W,其产生具有至少2脉冲/脉冲群的脉冲群,且工件和激光束以至少0.25米/秒的速率相对于彼此平移。在一些实施方式中,工件和/或激光束以至少0.4米/秒的速率相对于彼此平移。

[0123] 例如,为了切割0.7毫米厚的非离子交换康宁代号2319或代号2320 Gorilla[®]玻璃,观察到3-7微米的节距可良好地凑效,且脉冲群能量是约150-250微焦耳/脉冲群,和脉冲群脉冲数目是2-15,和优选地节距是3-5微米和脉冲群脉冲数目(脉冲数目/脉冲群)是2-5。

[0124] 在1米/秒切割速度下,切割Eagle XG[®]玻璃通常需要利用15-84W的激光功率,且30-45W常常已足够。一般来说,对于各种玻璃和其它透明材料而言,申请人发现为了获得0.2-1米/秒的切割速度,10W-100W的激光功率是优选地的,且25-60W的激光功率对于许多玻璃就足够(或是最佳的)。对于0.4米/秒-5米/秒的切割速度,激光功率应优选地是10W-150W,脉冲群能量是40-750微焦耳/脉冲群,2-25脉冲群/脉冲(取决于被切割的材料),缺陷线间隔(节距)是3-15微米,或3-10微米。对于这些切割速度,使用皮秒脉冲群激光将是优选的,因为它们产生高功率和所需的脉冲数目/脉冲群。因此,根据一些示例性实施方式,脉冲激光产生10W-100W功率,例如25W-60W,并产生至少2-25脉冲/脉冲群的脉冲群,且缺陷线之间的距离是2-15微米;以及激光束和/或工件相对于彼此以至少0.25米/秒,在一些实施方式中至少0.4米/秒,例如0.5米/秒-5米/秒,或更快的速率平移。

[0125] 切割和分离板的形状:

[0126] 如图10所示,从更大的复合材料玻璃片形成具有或不具有孔或狭缝的制品是非常需要的。图11显示示例性分离的复合材料制品,其具有用于功能按钮或用于待设置的扬声器或麦克风的孔和狭缝。

[0127] 仅通过皮秒激光或通过皮秒激光和后续CO₂激光的组合来描绘开裂线,从而释放周界和/或内部孔或狭缝。需特别指出的是,应小心地规划引入由散焦CO₂激光描绘的释放线和路径,以避免问题,例如:

[0128] 避免同时发生的启动/停止设置。一般来说,移动台的缓慢加速/减速可足以形成准时的应力源,其将在之后使零件形成裂纹或甚至粉碎零件。

[0129] 在描绘的轮廓上停止或“驻留”散焦CO₂激光或任意光斑-最常见地这可熔融表面和/或形成微裂纹。应规划CO₂激光的路径,从而在待释放的轮廓以外启动和结束。

[0130] 示例性皮秒激光条件是:1064纳米波长,4脉冲/脉冲群,功率水平100%,200kHz重复率。示例性CO₂激光条件是:10.6微米波长,20米/分钟下的2次激光通过(pass),焦距28.5毫米,100%功率,20kHz重复率下的17微秒脉冲。

[0131] 与刚用激光切割的片相比,通过酸蚀刻进一步加工提取的制品可得到非常高的边缘强度制品。在一些情况下,刚切割的片的强度可足以用于特定应用,但对于许多应用而言其通常需要具有更高的边缘强度。

[0132] 然后,对零件(制品)进行标准的酸蚀刻处理(例如,1.5M HF和0.9M H₂SO₄的溶液)以减少或完全除去由激光切割方法诱导的表面缺陷。然后,如图12所示,在韦布尔(Weibull)图中对边缘强度数据作图,并与“刚切割(as-cut)”的实施例进行对比。如从图12可知,经过处理的制品现在可具有显著更高的强度值,高达650兆帕斯卡(MPa)。

[0133] 图13A-13C显示具有改性玻璃等距间隔柱的缺陷线的示例。

[0134] 拉制时切割玻璃

[0135] 机械划割和破裂是用于连续熔合玻璃制造法的传统玻璃切割方法。虽然较快(实现1米/秒的直线切割),但就切割轮廓玻璃形状而言,它是高度受限的,因为对于这种应用其变得极具挑战性,这是由缓慢的速度、玻璃边缘缺口化、高的切割边缘粗糙度等造成的。这些应用需要多个研磨和抛光步骤来降低表面下损坏(SSD),以及洗涤步骤,这不仅因更高的资金要求和因较低产率造成的更高成本而增加工艺成本,而且简单地不能满足技术要求。

[0136] 最近,已开发将二氧化碳(CO₂)激光划割和破裂方法用于切割显示器玻璃组合物。这种技术依赖于机械(或激光)裂纹引发,然后进行CO₂激光裂纹扩展。最常见地,将在10.6微米波长下的CO₂激光辐射用作精确热源,然后进行冷却剂喷射来形成热冲击,并沿着用CO₂激光横贯的直线扩展裂纹。这种方法的困难在于不能成功地控制和扩展这种裂纹,特别是沿着轮廓控制和扩展这种裂纹。虽然对于有些应用,通过机械或激光划割和破裂技术的直线切割可良好地凑效,但仍然持续地需要高度精确的、清洁的和柔性的玻璃切割解决方案。

[0137] 机械和CO₂划割的困难的示例之一是液晶显示器(LCD)玻璃熔合法。在LCD熔合法中,形成薄的平坦玻璃的连续带,其从高的拉制塔涌出。这种薄的玻璃形成为0.050mm-2mm厚以及24"-150"宽。通过机械划割砂轮来划割玻璃带,这与划割或切割玻璃窗户相似。然后,这个划割的玻璃在拉制塔底部机械弯曲和破裂带,以形成24"-150"宽乘以24"-150"高的片。这种片在片的右侧和左侧上具有非常粗糙的部分。机械划割只能在玻璃片的高质量区域中进行,且不能在玻璃片的较厚的球边部分中进行。然后,机器人将夹持玻璃片,弯曲玻璃片,并将划割的片从玻璃带破裂下来。这个破裂作用导致高幅度振动,其在带上并进入拉制塔,其导致在最终的片中形成平坦度变化。这还可导致蜿蜒形态(rubicons),因为振动可在拉制上形成微裂纹。机械划割和破裂玻璃产生像羽毛的非常轻的玻璃屑,但这些玻璃屑尺寸是10-200微米且厚度是3-20微米。这些玻璃屑在拉制塔中上浮并连接到片的表面,这些颗粒中的一些(称作蛤壳玻璃屑)永久地连接到带玻璃表面,这导致形成玻璃的不合格部分。

[0138] 然后将这个玻璃片从带区域移动到第二切割区域,其中将玻璃片设置在称作垂直球边划割机器的另一机器上,且随后机械划割玻璃的球边化部分或低质量区域,然后从母片机械破裂掉球边化部分。同样地,细小的蛤壳玻璃屑从片上飞落到缺陷的区域上,这导致

形成玻璃的不合格的部分。

[0139] 在一些情况下,随后将所有的片包装进入包装箱,并运输到精磨位置。同样地,蛤壳玻璃屑从玻璃的边缘迁移到表面,并导致形成玻璃的不合格部分。卸载这种玻璃的包装箱,并设置在精磨加工线中,其中机械地或CO₂划割片,并机械地破裂成稍微更小的玻璃片,但这种划割过程比精确划割机更精确得多。同样地,更多的蛤壳玻璃屑飞到玻璃表面上,并导致形成这些玻璃的不合格部分。

[0140] 接下来,将片移动到边缘研磨机,其将薄的玻璃板粗研磨和精细研磨成最终长度和宽度。然后,将片移动到另一研磨机,其研磨4个角。接下来,将片移动到在线清洗机,其清洁表面上大多数的松散颗粒,但蛤壳颗粒除外。

[0141] 本文所述的激光玻璃切割技术极精确地、极快地和在不形成玻璃屑的情况下切割薄玻璃,包括薄玻璃。IRIS技术可用极小的孔(例如,小于1微米)和较短的节距间隔(例如,1微米)对玻璃进行穿孔。此外,可以极高的速度(例如,1-2米/秒),对玻璃进行穿孔。在测试的情况中,在玻璃边缘上没有观察到碎片。激光过程可从较大的玻璃片穿孔和分离出较小玻璃制品,例如手机尺寸(70mm x 150mm)形状。薄玻璃的这种穿孔和分离过程得到边缘,所述边缘具有小于400nm的表面粗糙度Ra和深度限制于小于或等于60微米的表面下微裂纹。这种边缘质量接近研磨的玻璃片的质量。考虑到这种能力,可在制备薄玻璃片的熔合拉制过程中对热玻璃进行激光切割。

[0142] 图14显示用于连续的熔合玻璃制造法的现有玻璃切割方法。在现有方法中,玻璃片1464从拉制塔1462向下流动。玻璃片1464的更深的阴影表明更高的温度。当例如在熔合拉制机上形成玻璃片时,通过夹持机械装置例如辊来牵拉热而软的玻璃片,其在玻璃片的两个外部边缘上形成印记。将具有印记的边缘称为“球边”,且这些边缘延伸过玻璃片的全部长度。因为与玻璃片的中央部分相比,这些球边化区域常常是扭曲的和不平坦的,在将玻璃用于制备最终装置之前,除去球边(或球边化区域)。如通过拉制移动1465所述,使用轱辘向下牵拉玻璃片,其沿着玻璃片1466的边缘形成玻璃球边1464。沿着划割线1468施加机械或CO₂激光源,这促进将划割的片1470从玻璃片1464破裂下来。

[0143] 本文所述的方法提供用于显示器玻璃组合物的玻璃切割解决方案,用于在线和离线玻璃切割需求。可在玻璃片从拉制出来时,特别是在其中玻璃开始从其形成温度冷却的称作拉制底部(BOD)的区域处,在线地施加这些方法,用于玻璃片的切割和球边除去。本文所述的方法提供玻璃切割解决方案,其可提供透过玻璃片的整体厚度的全-主体(全厚度)穿孔。一系列全厚度穿孔可形成开裂线,在沿开裂线进行片分离时,开裂线可在玻璃片中形成非常精确的和可控的切割。

[0144] 图15A-15B显示根据本文所述的方法在拉制时进行激光玻璃切割的两种方法,其使用例如结合图2-6本文所述的那些的激光光学系统。根据激光切割工艺1500A,将由一系列缺陷线组成的激光切割线1468' 施加到由拉制塔1462形成的玻璃片1464。在工艺1500A中,将激光(未显示)构造成切穿玻璃片1464的整体厚度。激光切割线1468' 延伸越过在拉制时新形成的玻璃片1464,这包括在不振动玻璃带或形成任何玻璃碎屑或颗粒的情况下切割球边1466。

[0145] 图15B显示在拉制时的激光玻璃切割的替代方法1500B,其中使用激光来切穿玻璃片的高质量区域,并移除玻璃的较大的矩形片1470'。在拉制区域的底部1472处,从玻璃片

除去废弃玻璃1472。应认识到在其它实施方式中,移除的玻璃片1470' 无需是矩形的。玻璃片1470' 可为正方形或圆形,或具有任意其它所需形状。

[0146] 图16显示在拉制时激光玻璃切割的又一替代方法。在图16中,邻近玻璃球边1466在拉制路径中的相对上方的更高处,施加垂直激光切割线1468'。然后,在拉制路径的相对较低处,施加水平激光切割线1468' 来从拉制切割和除去玻璃片1470'。

[0147] 图17显示在拉制时激光玻璃切割的其它替代方法。在图17中,在拉制时越过玻璃片1464的全部宽度来施加激光切割线1468',从而从拉制移下激光切割的片1470'。在这之后,将垂直的激光切割线1468施加到切割片1470',从而在拉制底部处从切割片除去球边。

[0148] 图18显示使用本文所述的激光方法来在离开拉制处从片1470' 除去裁剪或废弃玻璃1472。在精磨区域中,同时施加水平的和垂直的激光切割线1468',以从激光切割的玻璃片1470' 除去裁剪或废弃玻璃1472的水平 and 垂直的块。

[0149] 对于有些应用,玻璃应力也会受到特别关注,特别是对于使用具有高应力的玻璃片或层压的玻璃片的应用而言。使用传统方法在这种情况下切割片具有显著的困难。例如,在熔合拉制法中,在拉制LCD玻璃片的过程中,引发显著量的应力。因为片和球边之间的不同厚度以及不同的相关冷却速率,在玻璃冷却过程中,在片和球边界面处的应力甚至更大。对于熔合拉制层压片(大于300MPa)的情况,应力水平可显著更大,其中相邻的片层之间的粘度和CTE差异导致非常高的外层压缩应力。这种高压压缩应力层性质可显著改善层压玻璃片的玻璃强度。然而,在具有高应力水平的片中,可能难以用传统方法来切割玻璃片。

[0150] 如本领域普通技术人员所理解,使用熔合拉制法制备的LCD玻璃片具有高应力,其中在将玻璃从高于玻璃软化点的温度冷却到比玻璃应变点低得多的过程中引发该应力。因为厚度和热质量的差异,在玻璃球边界面处的应力还显著更高。对于层压玻璃片的情况,应力更高得多(大于300MPa),其中玻璃层CTE和粘度的不匹配可导致强化玻璃应用所需的高压缩应力。这些高水平的应力使得非常难以在比玻璃应变点($<300^{\circ}\text{C}$)低得多的温度下切割玻璃片。

[0151] 批露方法和不同实施方式来使用激光技术切割片和从片分离球边,其使得需要穿过玻璃片厚度的单一激发(single shot)穿透。本文所述的方法实现在拉制处基于激光切割片,并分离球边,从而改善熔合拉制法的制造效率。此外,在一些实施方式中,可在高温(接近玻璃的退火点)下切割单一层片和层压的片,这使得诱导的应力更小得多。在高温下切割片和随后通过预定的温度分布后处理片的能力还可供应具有较低玻璃密实化、较低残留应力的片,消除独立的精磨步骤成本的可能性,加工有更高应变点玻璃的能力,和因为在退火温度下停留更久而带来的增加的生产通量。

[0152] 图19显示使用多阶段炉子1971的一种示例方法,该多阶段炉子1971设计成将玻璃片部分1470' (待切割的)保持在接近其退火点的温度下。在拉制的下部部分,将玻璃片1470' (待切割的)引入炉子1971a,其保持在近似等于玻璃的退火温度下。在接近退火点的升高的温度下的较低的应力水平有助于切割片。首先通过经历水平激光束平移1976的激光束1974在拉制处水平地切割片1464,从而在玻璃中形成多个缺陷线。

[0153] 然后,将玻璃片1470' 平移到炉子1971b,其也保持在玻璃的退火温度下。使用激光束1974分离玻璃球边1466,该激光束1974构造成经历垂直平移1674来对邻近球边1466的玻璃片1470' 进行激光划割。水平和垂直切割步骤可包括沿着激光损坏的轮廓施加拉伸或弯

曲应力,从而从拉制分离玻璃,且如有需要,从切割玻璃片1470'分离玻璃球边。例如,可使用机器人来施加应力。

[0154] 在除去玻璃球边之后,将切割玻璃片1470'平移到第三炉子1971c,其中热源1980经历垂直平移1982,以将热量输送到玻璃板1470'的切割边缘。施加热量来使得切割的垂直边缘平滑化和圆化,且虽然没有在图19中示出,但还可将热量施加到板1470'的水平切割边缘,用于平滑化和圆化。热源可包括气体火焰、CO₂激光等。

[0155] 玻璃片1464可为层压片,其中片包括多个层,每一层具有不同的材料性质例如CTE等。这种层压的片可通过使用双等压槽(isopipe)拉制塔来形成,其中每一等压槽用于提供用于层压件的不同层的玻璃。层压件的玻璃层之间的CTE差异导致在将玻璃片从高于软化点的温度冷却到比应变点低很多时引入显著量的应力。例如,当内部和表面层之间的CTE差异大于 $60 \times 10^{-7}/\text{C}$,且内部层厚度与总层压件厚度的比例是0.8-1时,可在层压件片表面的表面上引发大于400MPa的压缩应力(参见,例如谭东(Tandon)等,美国专利申请号20110318555,该文的全部内容通过引用纳入本文)。

[0156] 在其中玻璃片1464是层压件的情况下,炉子1971a和1971b可构造成将层压件保持在层压件的两个层的退火温度之间的温度下。对于其中需要高表面压缩应力的应用中(例如,用于高强度应用的层压玻璃中),提供在退火温度下的时间将降低应力大小,这促进使用激光束1974来进行切割。在这些情况中,还可通过在切割后冷却过程中对玻璃进行猝冷,在成品的玻璃片中获得高应力。

[0157] 图20显示一种过程,其中通过使片物理地横贯通过具有渐进的冷却器阶段2071a、2071b和2071c的多阶段炉子2071,将片1470'冷却到远低于玻璃退火点的温度。所述系列炉子施加预定的温度分布以使得残留应力最小化,形成后密实化,改善玻璃片性能特征并调整玻璃性质。应理解,在其它实施方式中,通过使用具有时间变化的温度分布的单一阶段炉子,获得相似的受控的冷却分布。

[0158] 在其它实施方式中,在高于玻璃退火点的温度下,使用在拉制时的玻璃制备激光穿孔,在缺陷线之间存在一些间隔。在这个拉制位置,这对玻璃强度没有显著影响。但是,这可导致当在拉制时位置下游形成CTE应力(例如,用于层压玻璃)时,玻璃片自发分离或仅使用非常微弱的外部扰动来分离。自发的分离,或者使用微弱的外部扰动来分离,可用于除去玻璃球边和用于玻璃采集。

[0159] 由于能够在高温下切割片且随后通过预定的温度分布后处理片,可使得片具有更低的玻璃密实化和更低的残留应力。这种能力还可消除独立的精磨步骤的成本,允许加工具有更高应变点的玻璃,且因为在退火温度下玻璃停留得较久而带来的增加生产通量。

[0160] 通过两个缺陷线之间的节距来控制沿着全厚度切割的玻璃分离。用于切割许多显示器玻璃组合物的典型示例性节距是约1-5微米(例如,2-5微米)。但是,还显示最高达8微米(5-8微米)的节距也提供良好的质量切割。控制节距的能力也是重要的,因为其决定切割速度,其还受到激光脉冲频率或脉冲群重复率、脉冲群模式之内的脉冲数目和平均能量/脉冲和/或平均能量/脉冲群的影响。

[0161] 当绕着缺陷线的微裂纹朝向相邻的缺陷线取向时,促进玻璃切割,因为微裂纹与开裂线对齐并引导分离的方向。在这种情况下,缺陷线之间较大的节距(例如3-50微米,例如3-20微米),可足以形成完全的玻璃分离,因此简化加工(因为需要更少的缺陷线来实施

分离)。或者,在一些玻璃类型中,当没有形成微裂纹或微裂纹没有朝着相邻的缺陷线进行取向时,对于干净的分层而言,可需要孔(或缺陷线)之间较小的节距(0.1-3微米,例如1-3微米)。

[0162] 本文引用的所有专利、专利申请公开和参考文献的相关教导都通过引用全文纳入本文。

[0163] 虽然本文描述了示例性实施方式,但本领域普通技术人员应理解在不偏离所附权利要求所包含的范围的情况下,可改变其中的各种形式和细节。

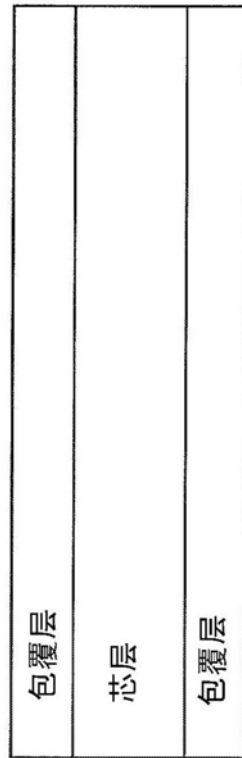


图1

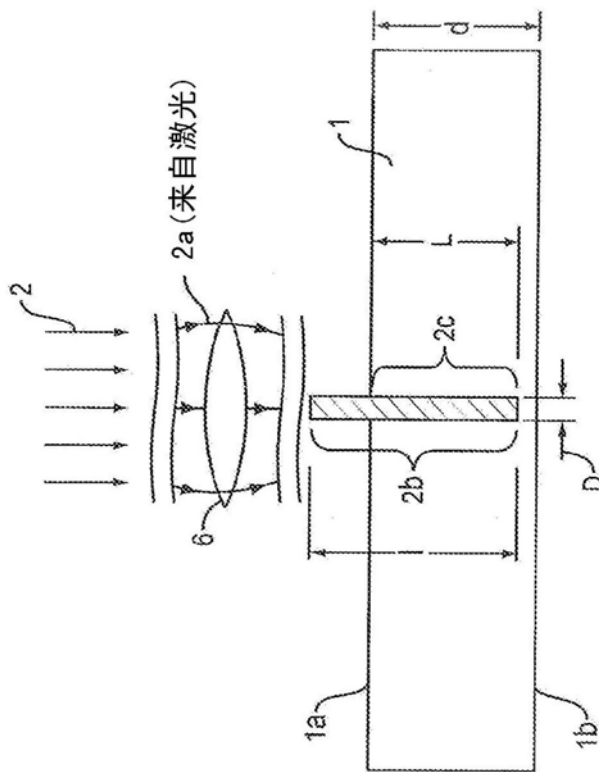


图2A

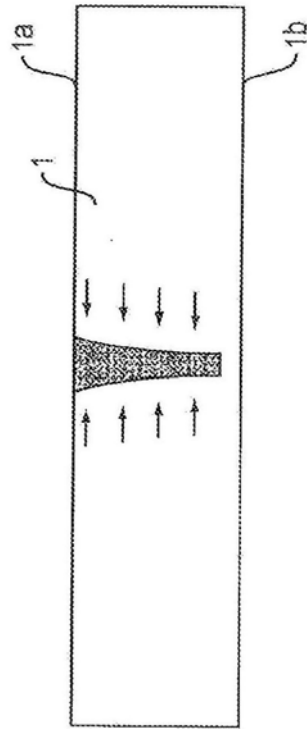


图2B

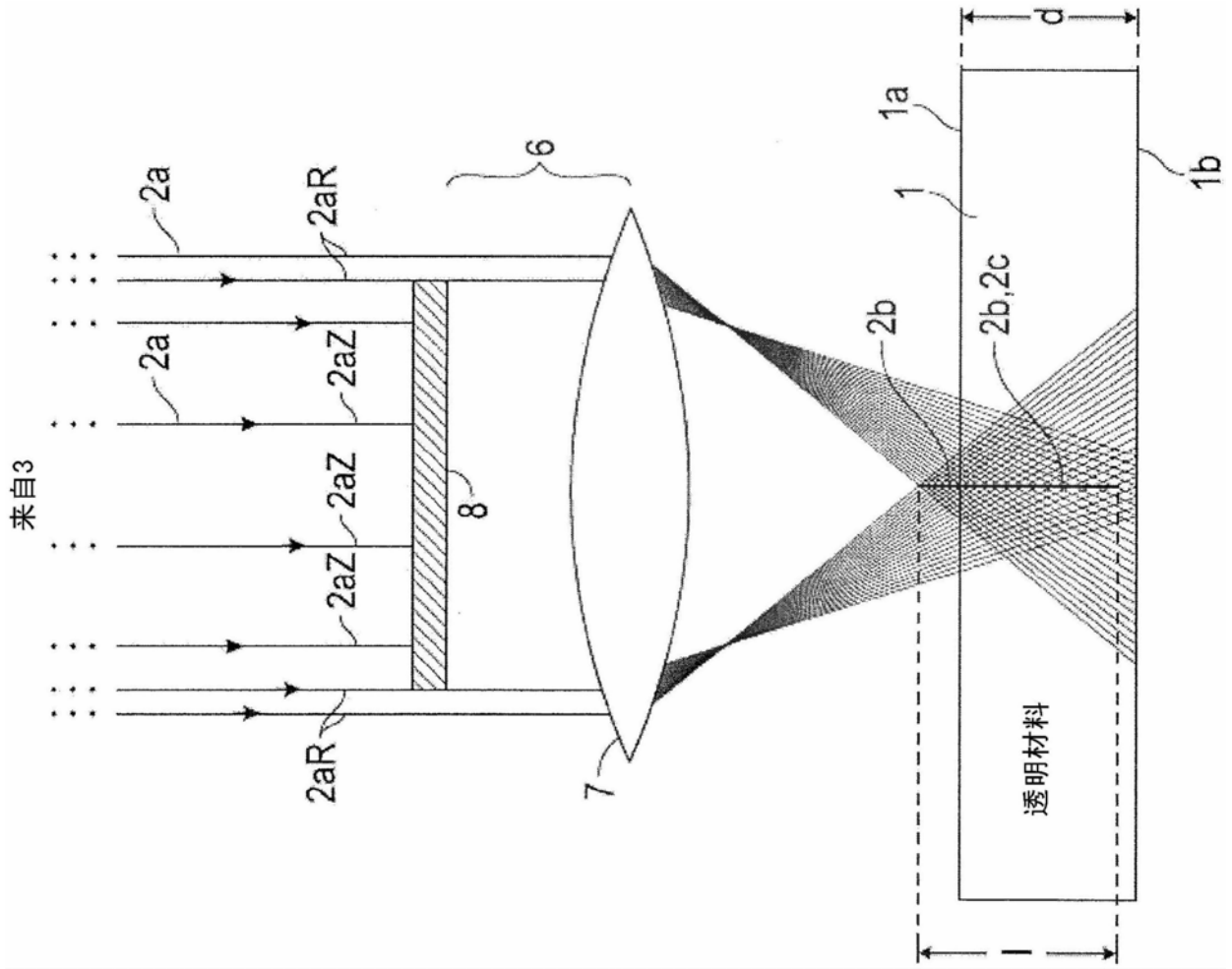


图3A

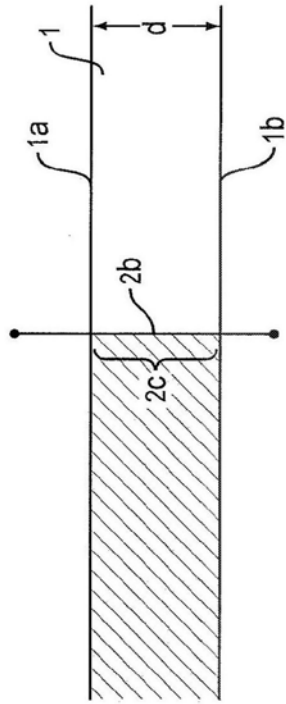


图3B-1

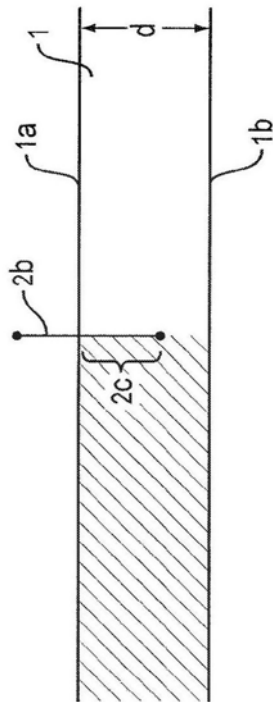


图3B-2

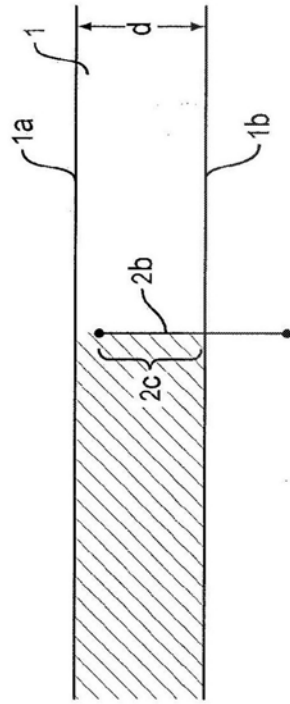


图3B-3

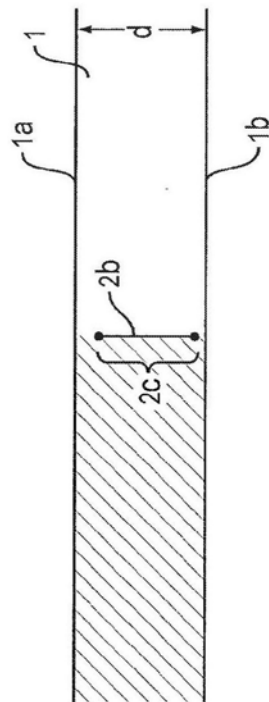


图3B-4

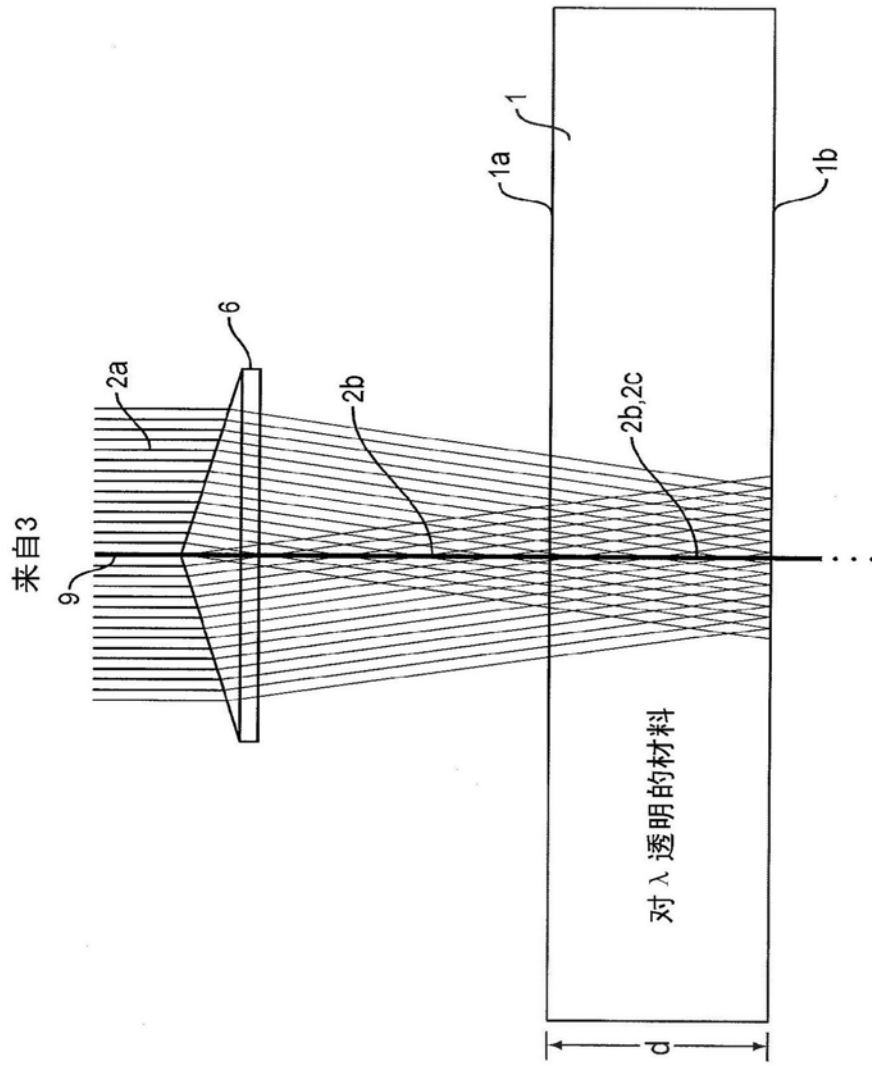


图4

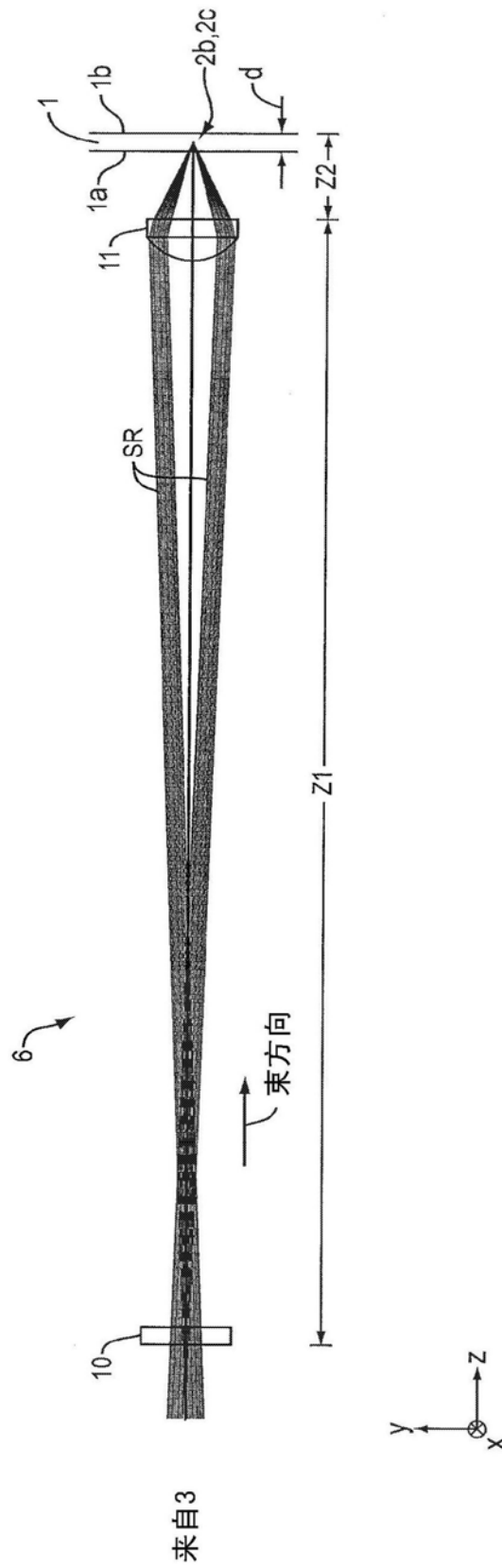


图5A

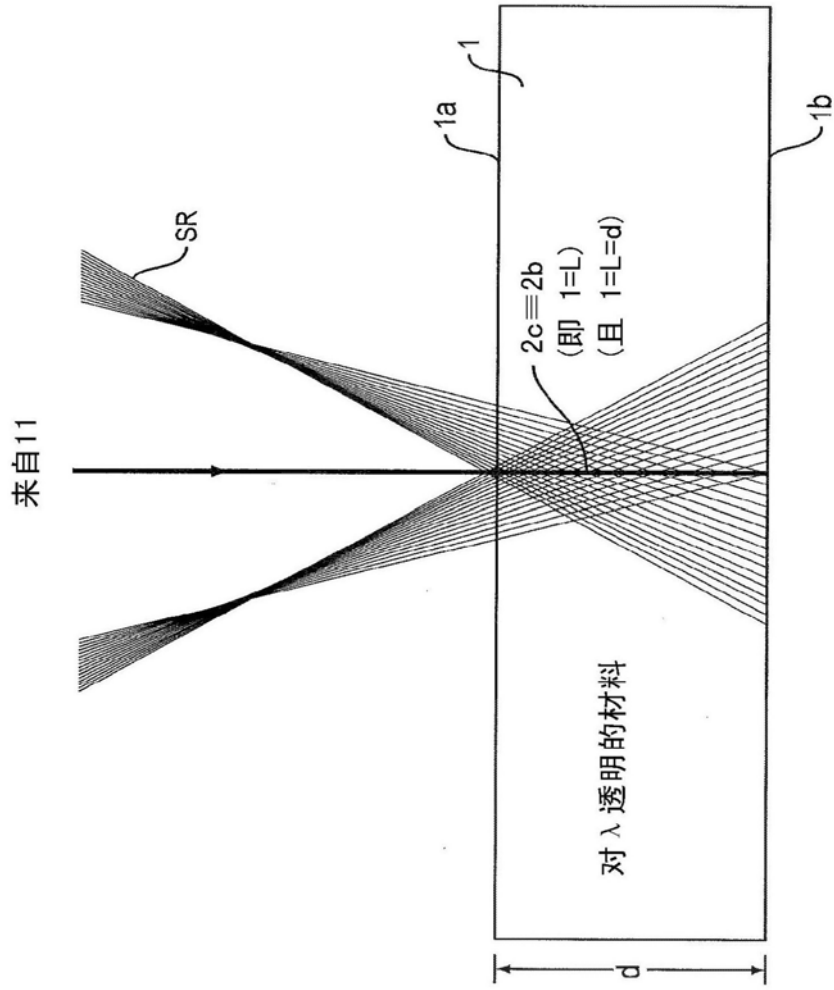


图5B

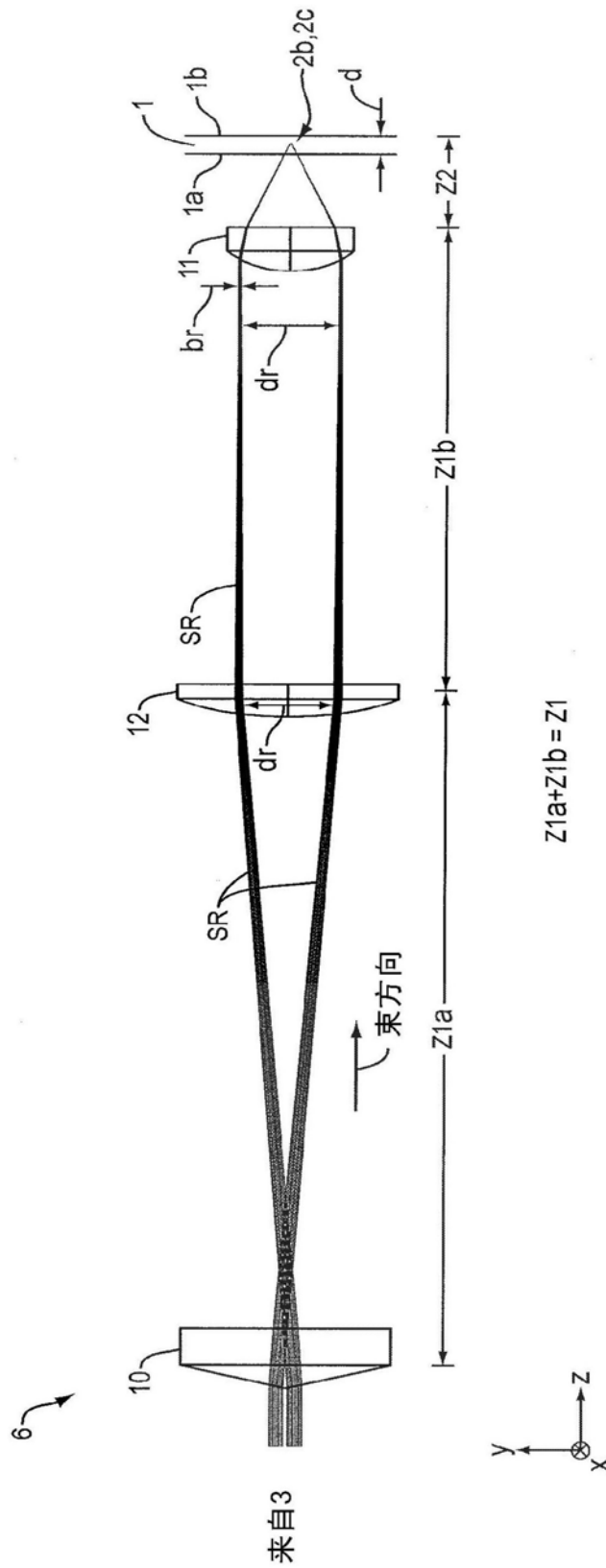


图6

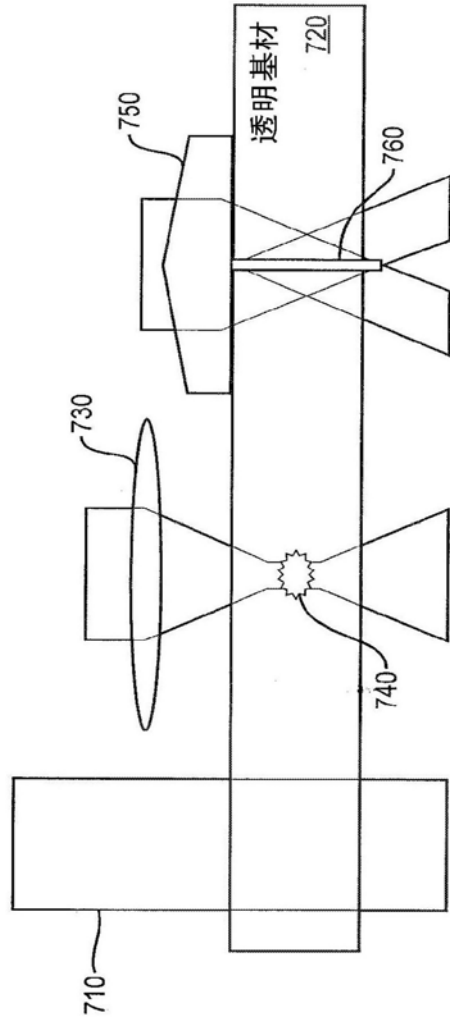


图 7A 图 7B 图 7C

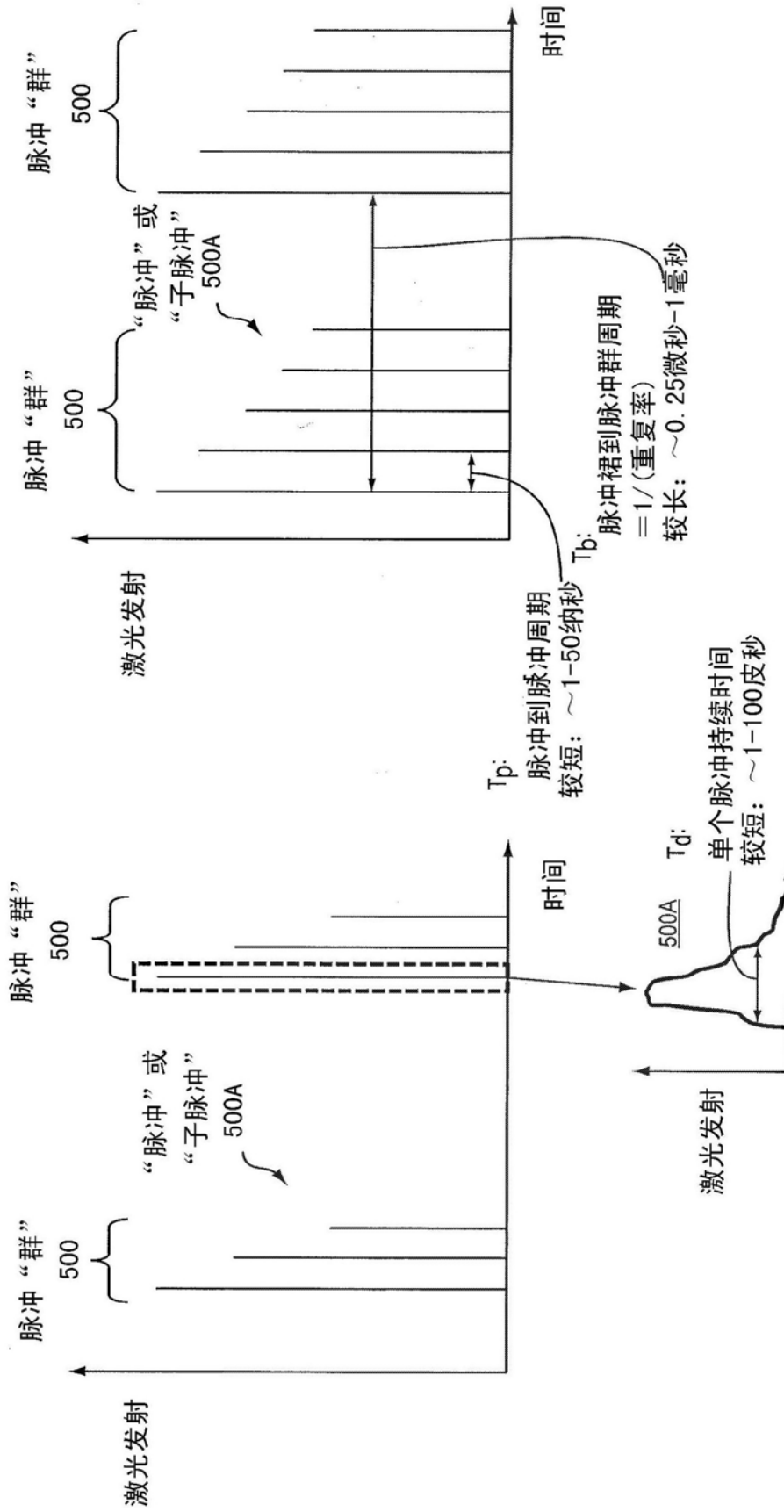


图8A

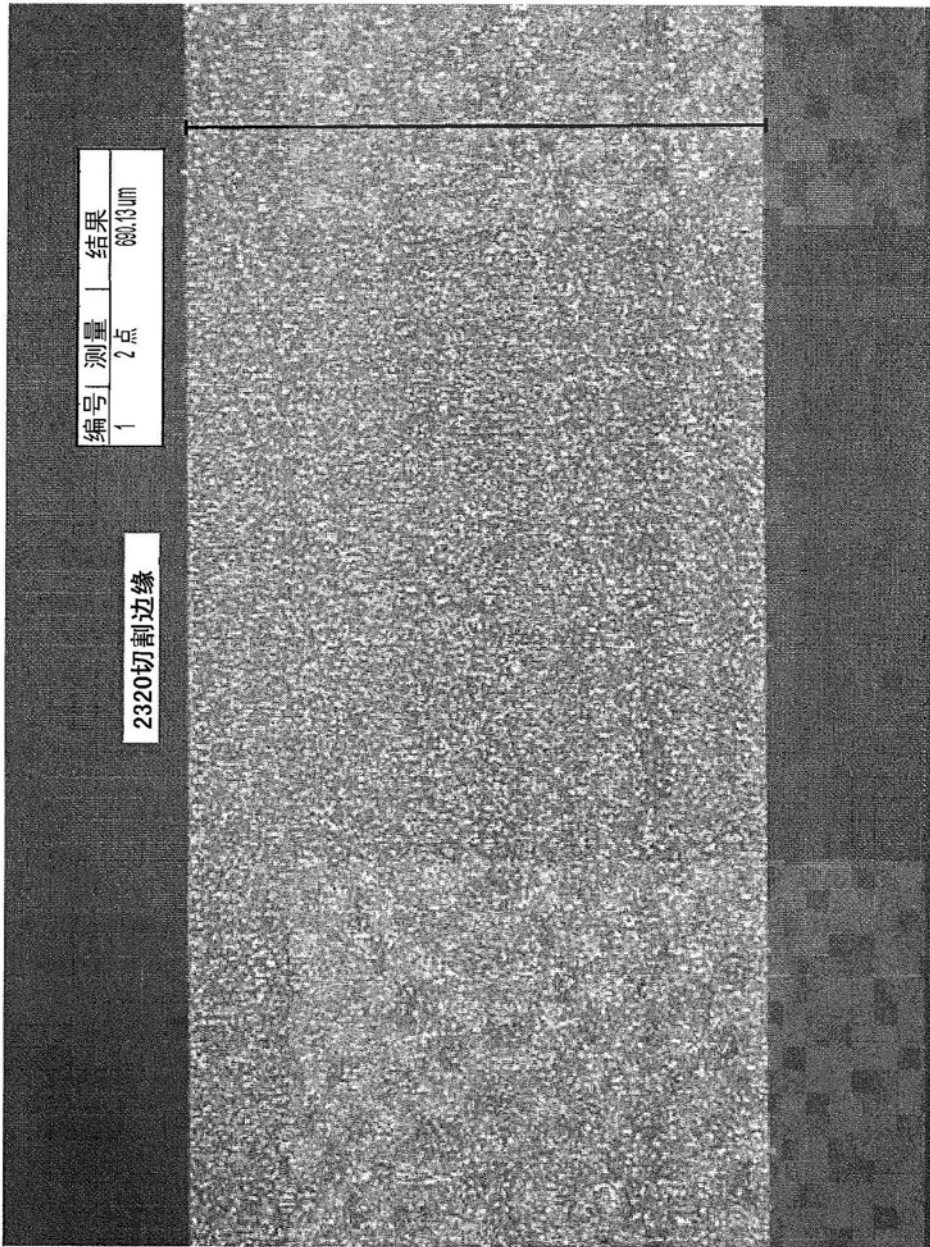


图8B

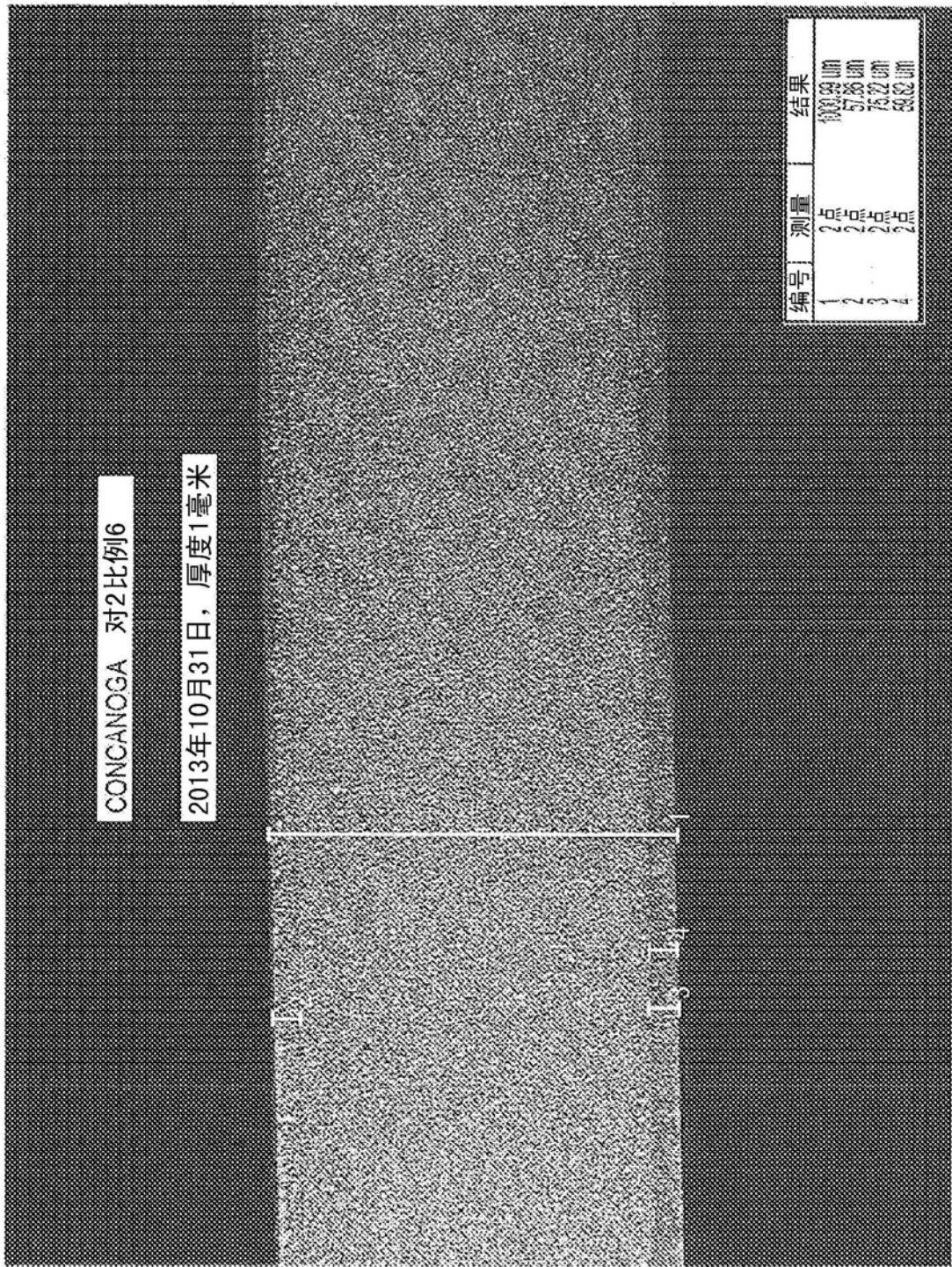


图9

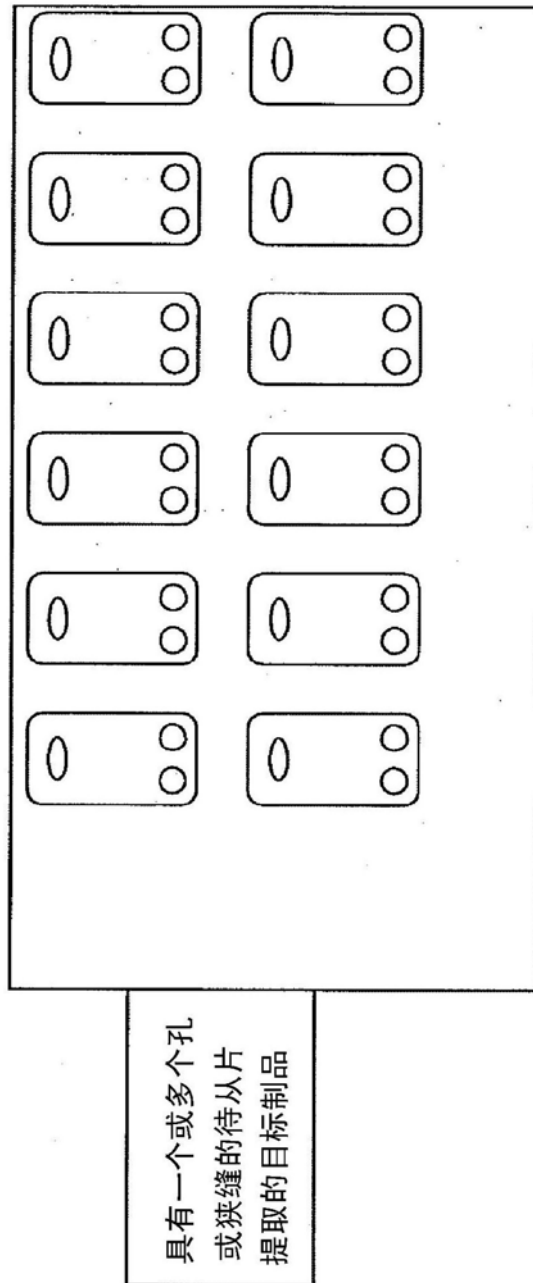


图10

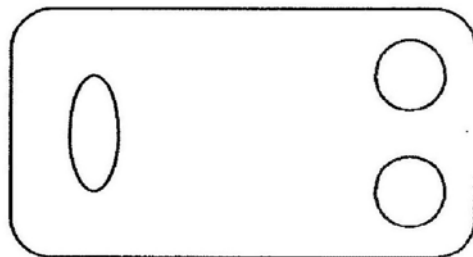


图11

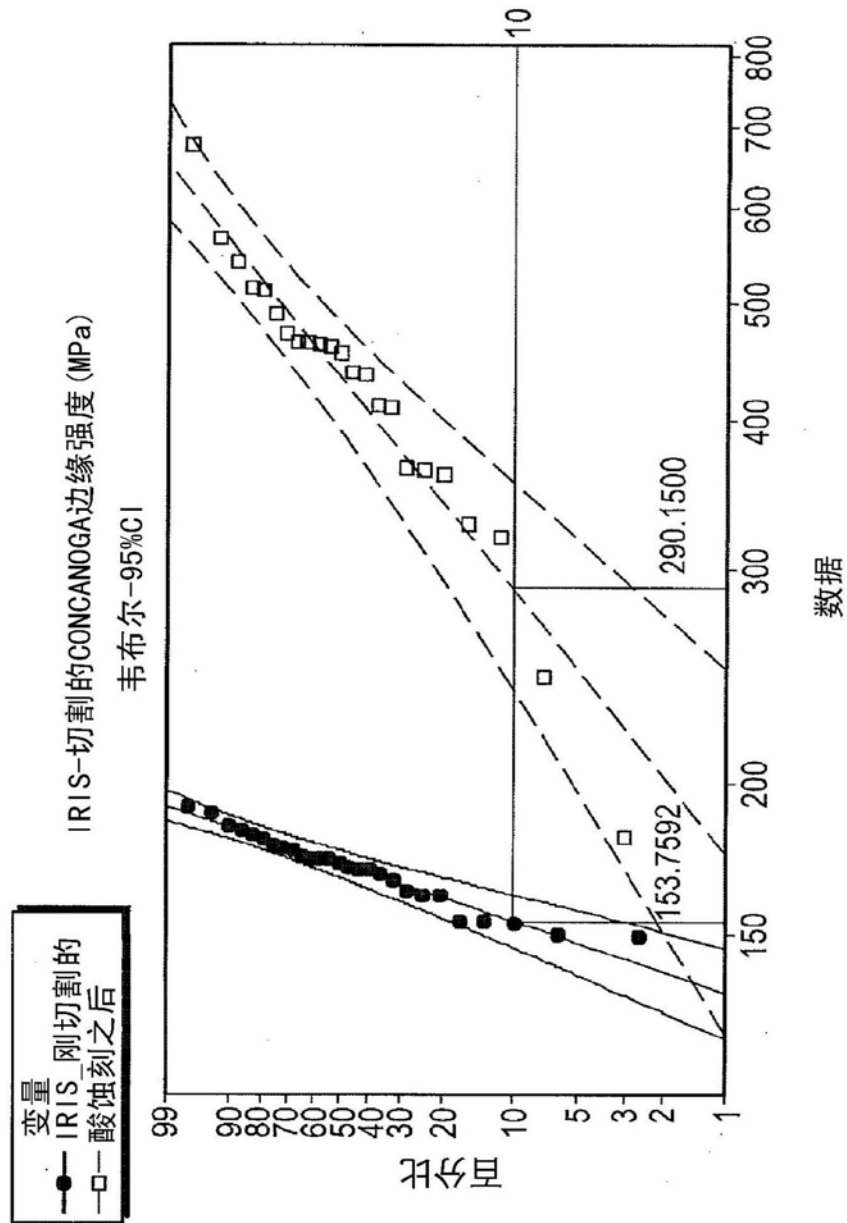


图12

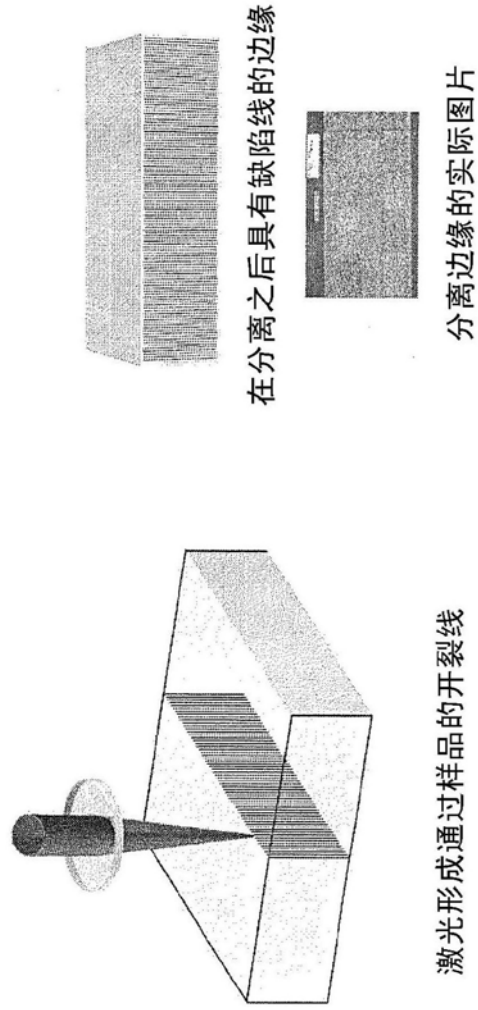


图13A-13C

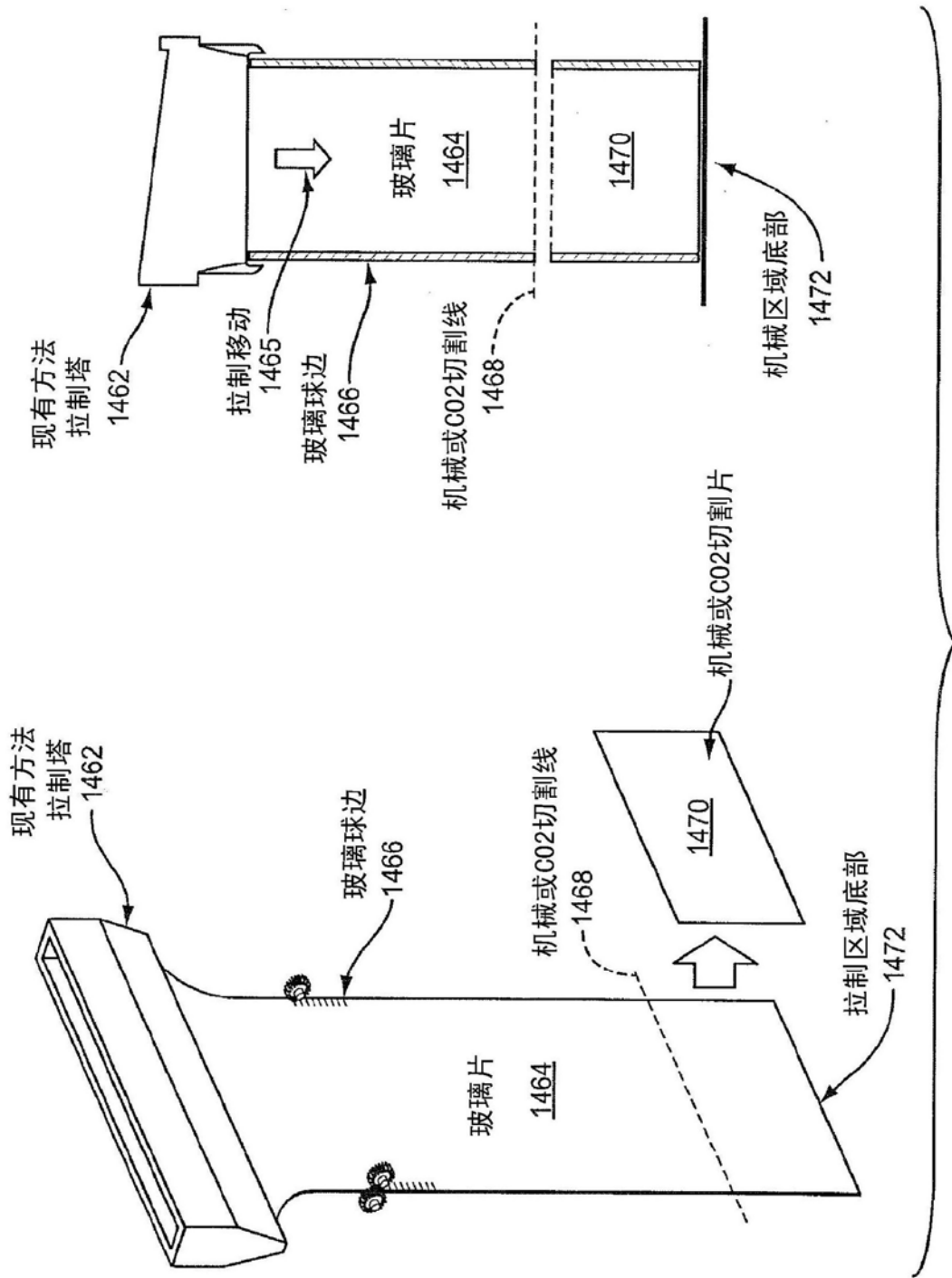


图14

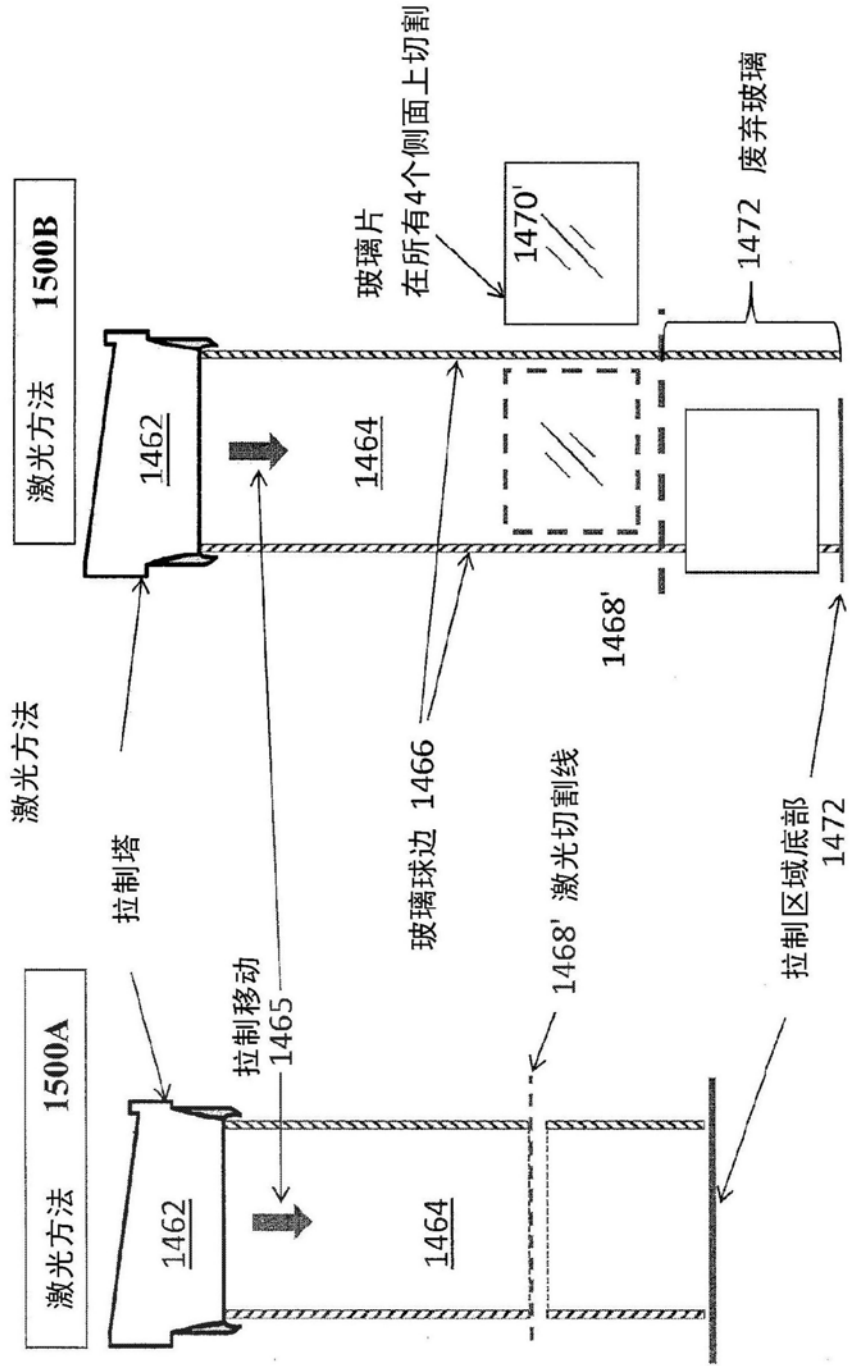


图 15A

图 15B

图15

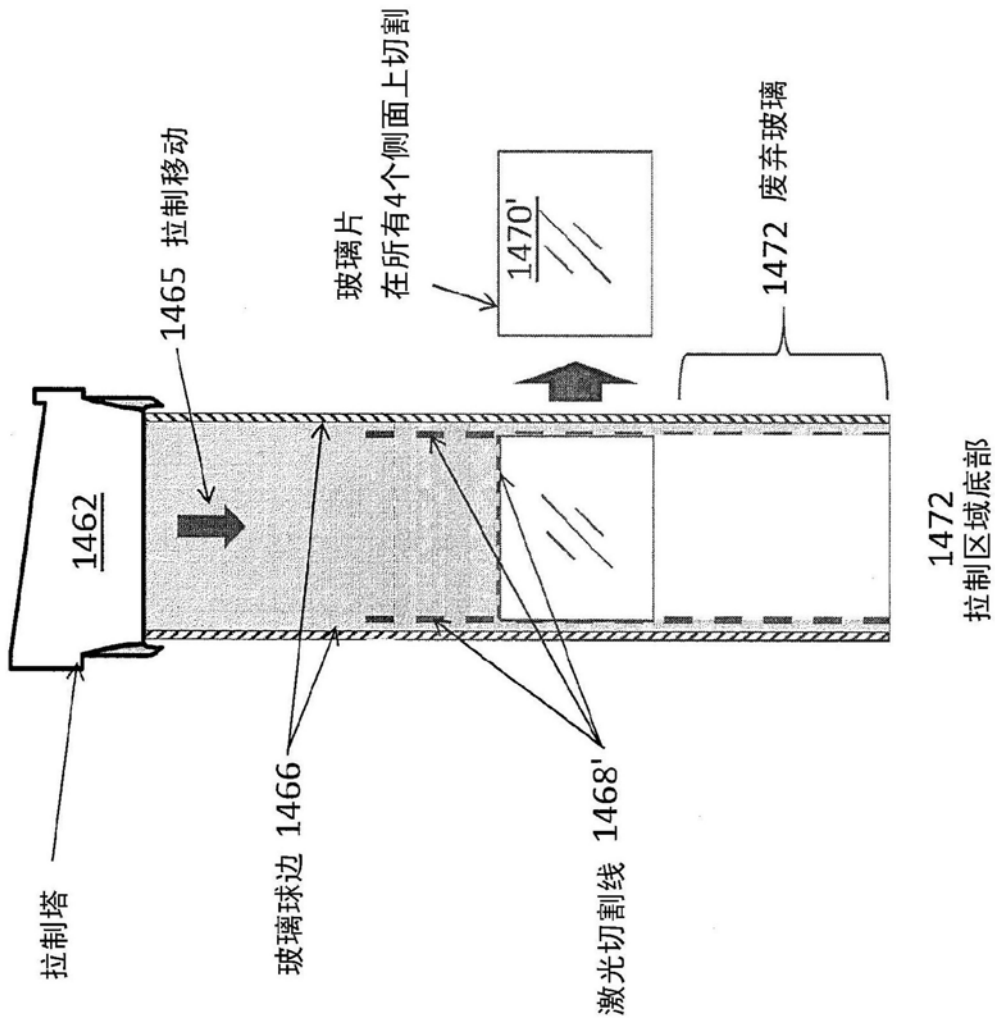


图16

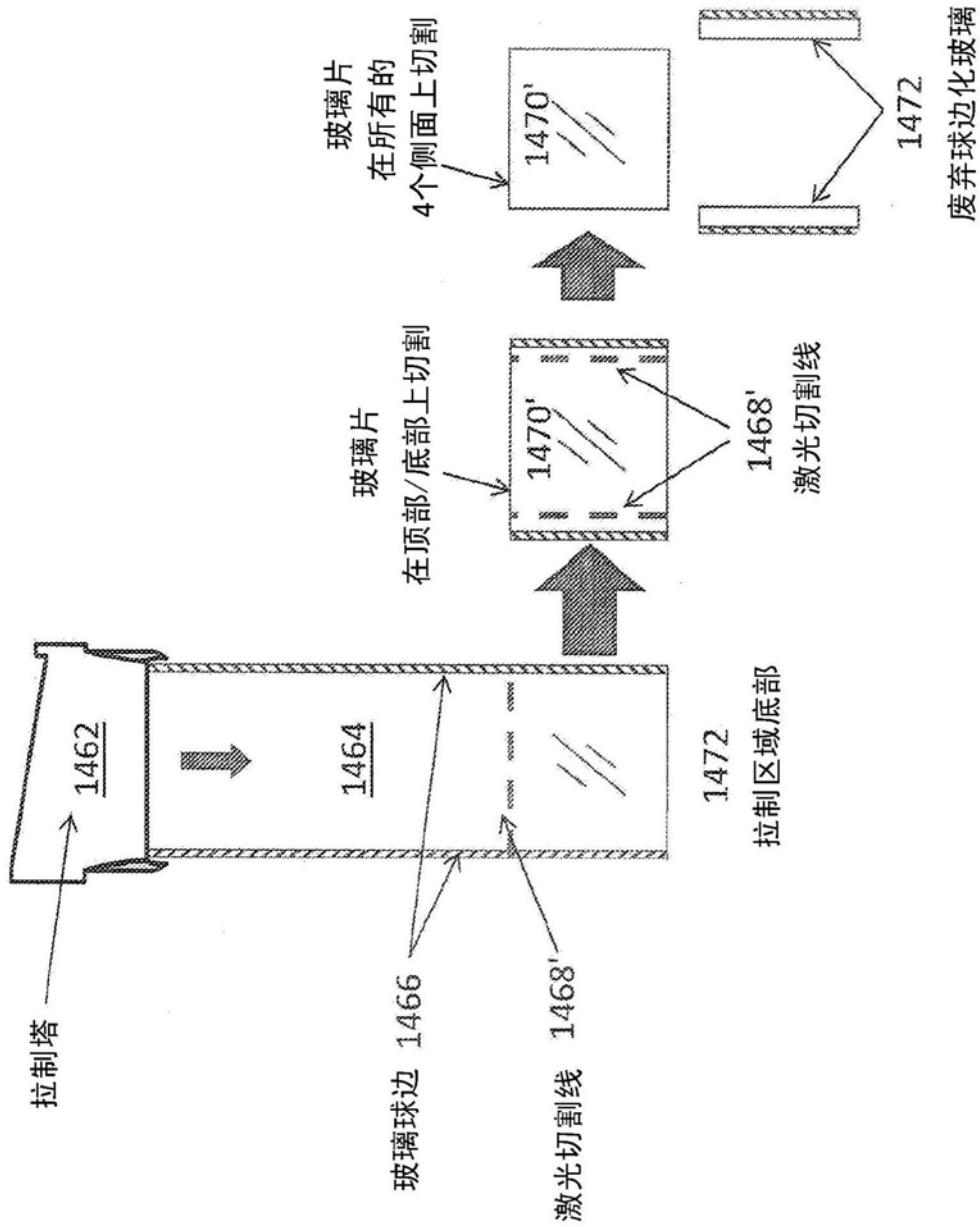


图17

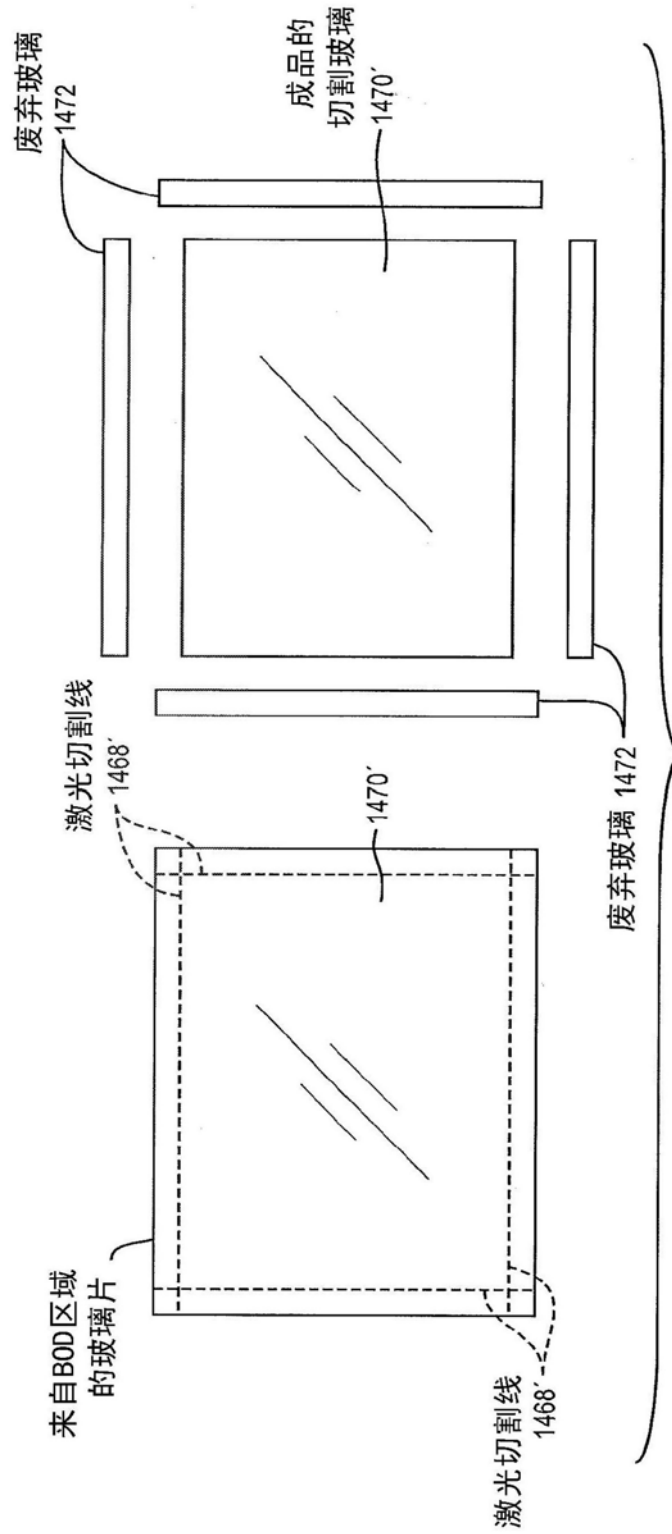


图18

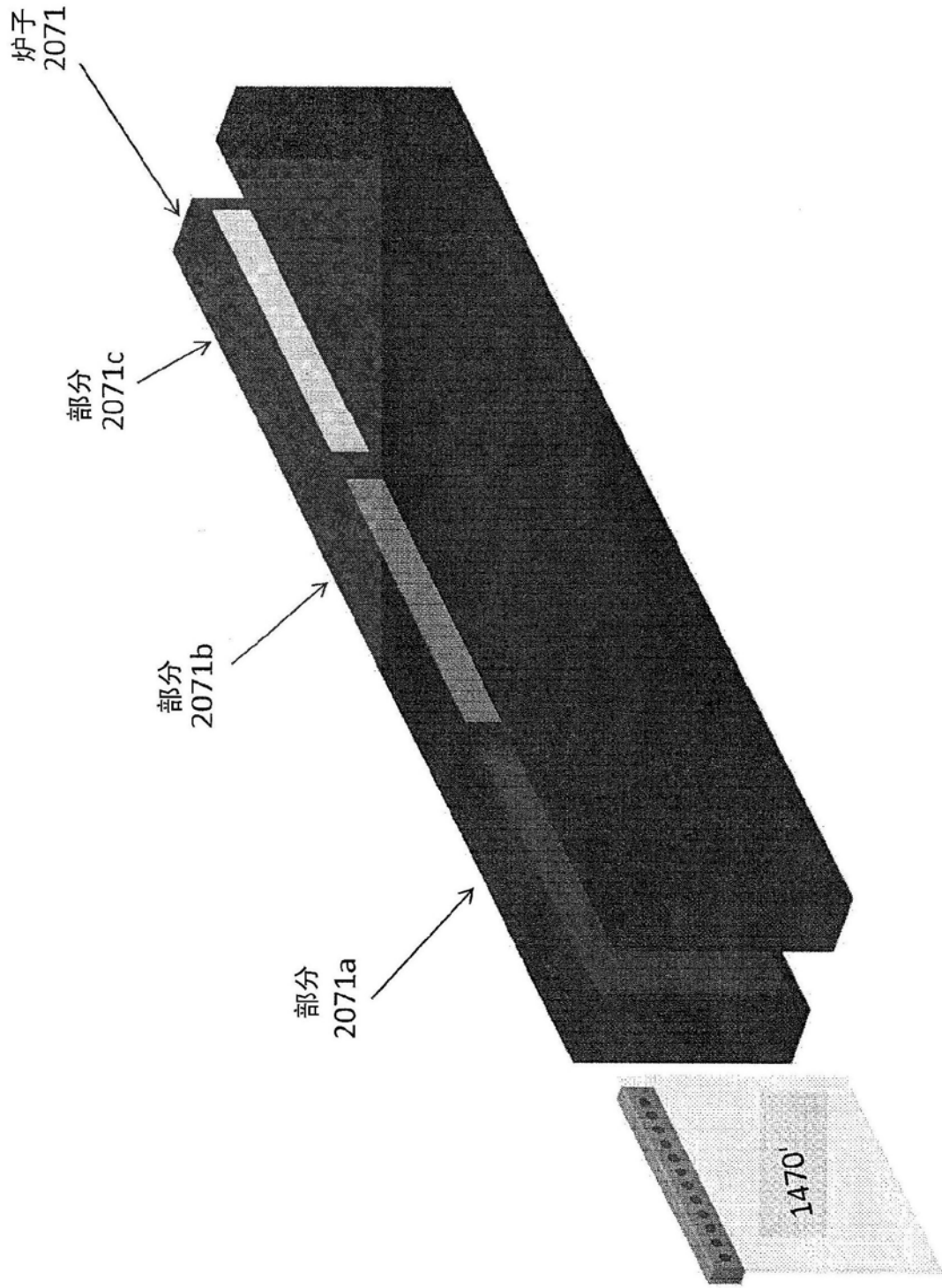


图20