



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106102983 B

(45)授权公告日 2018.06.22

(21)申请号 201580015565.X

(22)申请日 2015.01.27

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106102983 A

(43)申请公布日 2016.11.09

(30)优先权数据

61/932,030 2014.01.27 US

62/022,885 2014.07.10 US

14/530,410 2014.10.31 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2016.09.22

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2015/013026 2015.01.27

(87)PCT国际申请的公布数据

W02015/113026 EN 2015.07.30

(73)专利权人 康宁股份有限公司

地址 美国纽约州

(72)发明人 J·班凯蒂斯 K·W·乌利希

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司
31100

代理人 徐鑫 项丹

(51)Int.Cl.

B23K 26/046(2014.01)

B23K 26/08(2014.01)

B23K 26/402(2014.01)

B23K 26/382(2014.01)

G03B 33/08(2006.01)

审查员 刘翠

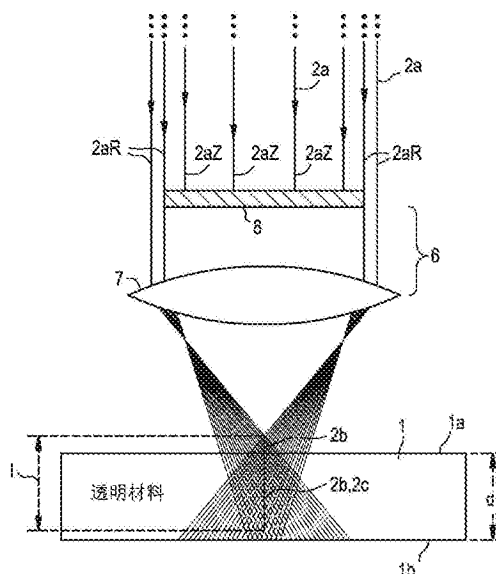
权利要求书2页 说明书23页 附图34页

(54)发明名称

通过机械加工激光切割玻璃来进行边缘斜切

(57)摘要

本申请涉及通过机械加工激光切割玻璃来进行边缘斜切。具体来说,一种对工件进行加工的方法,其包括以下步骤:(i)将脉冲激光束聚焦成激光束焦线;(ii)将激光束焦线以第一入射角导向到工件中,在工件内产生沿着激光束焦线的缺陷线;(iii)使得工件和激光束相对于彼此位移,从而用激光产生沿着工件内呈该第一角度的第一平面的多条缺陷线;(iv)沿着该平面分离工件,以产生具有至少一个切割表面的经激光切割的工件;以及(v)通过用抛光轮对经激光切割工件的切割表面进行抛光。



1. 一种对工件进行加工的方法,该方法包括以下步骤:

(i) 将脉冲激光束聚焦成激光束焦线,这是沿着束传播方向观察的;

(ii) 将所述激光束焦线以相对于所述工件成第一入射角导向到所述工件中,该第一角度与所述工件的边缘相交,所述激光束焦线在所述工件内产生感应吸收,所述感应吸收沿着所述激光束焦线在所述工件内产生缺陷线;

(iii) 使得所述工件和所述激光束相对于彼此位移,从而沿着所述工件内呈该第一角度的第一平面激光钻孔多条缺陷线,每条所述缺陷线具有不超过 $5\mu\text{m}$ 的直径;其中,形成所述焦线的激光束的波长使得工件材料对于所述波长是基本透明的;以及

(iv) 沿着所述平面分离所述工件,以产生具有至少一个切割表面的经激光切割的工件;以及

(v) 通过用抛光轮对经激光切割工件的切割表面进行抛光,来加工所述工件,其中所述抛光轮的本体弹性模量为 $0.1\text{--}5\text{GPa}$ 。

2. 如权利要求1所述的方法,所述方法还包括:

将所述激光束焦线以相对于材料的第二入射角导向到材料中,所述激光束焦线在材料内产生感应吸收,所述感应吸收沿着所述激光束焦线在材料内产生缺陷线;

使得所述材料和所述激光束相对于彼此位移,从而沿着所述材料内呈该第二角度的第二平面激光钻孔多条缺陷线,所述第二平面与所述第一平面相交,每条所述缺陷线具有不超过 $5\mu\text{m}$ 的直径;以及

其中,通过沿着所述第一平面和所述第二平面来分离材料从而进行所述分离,以产生所述经激光切割的材料。

3. 一种对玻璃材料进行激光加工的方法,该方法包括:

将脉冲激光束聚焦成激光束焦线,这是沿着束传播方向观察的;以及

沿着所述材料内的 N 个平面中的每一个激光钻孔多条缺陷线,对于 N 个平面中的每一个:

将所述激光束焦线以相对于所述材料成对应入射角导向到所述材料中,所述激光束焦线在所述材料内产生感应吸收,所述感应吸收沿着所述激光束焦线在所述材料内产生缺陷线;其中,形成所述焦线的激光束的波长使得工件材料对于所述波长是基本透明的;以及

使得所述材料与所述激光束相对于彼此位移,从而沿着所述 N 个平面中的对应平面激光钻孔所述多条缺陷线,每条所述缺陷线具有不超过 $5\mu\text{m}$ 的直径;以及

通过向所述工件施加离子交换过程,沿着所述 N 个平面中的至少一个分离所述工件,以产生具有激光切割表面的经激光切割的工件;以及

用抛光轮对所述经激光切割的工件的所述激光切割表面进行抛光,持续时间为 t ,其中, $1\text{秒}<t<1\text{分钟}$,其中,所述抛光轮的本体弹性模量为 $0.1\text{--}5\text{GPa}$ 。

4. 如权利要求1-3中任一项所述的方法,其特征在于,所述抛光轮具有 $40\text{--}250\text{mm}$ 的外直径,所述抛光轮以 $500\text{--}10000\text{rpm}$ 转动,以及所述抛光轮包括多种研磨剂颗粒,所述研磨剂颗粒具有 $0.1\text{--}100\mu\text{m}$ 的横截面宽度。

5. 如权利要求4所述的方法,其特征在于,所述抛光轮具有 $80\text{--}120\text{mm}$ 的外直径,所述抛光轮以 $500\text{--}8000\text{rpm}$ 转动,以及所述抛光轮包括多种研磨剂颗粒,所述研磨剂颗粒具有 $0.1\text{--}100\mu\text{m}$ 的横截面宽度。

6.如权利要求1-3中任一项所述的方法,其特征在于,所述激光是群脉冲激光,脉冲持续时间大于5皮秒且小于20皮秒,群重复频率为1kHz至2MHz,以及所述群脉冲包括2-25个脉冲每群。

7.如权利要求6所述的方法,其特征在于,所述激光具有10-100瓦特的功率。

8.一种玻璃制品,其通过如权利要求1、2或3所述的方法制备。

9.如权利要求8所述的玻璃制品,其特征在于,所述边缘的表面下损坏最大至小于或等于60 μ m的深度。

10.如权利要求8所述的玻璃制品,所述玻璃制品的边缘在离子交换后具有600-1000MPa的边缘强度。

通过机械加工激光切割玻璃来进行边缘斜切

[0001] 相关申请

[0002] 本申请根据35U.S.C.§119,要求2014年1月27日提交的美国临时申请系列第61/932030号的优先权,本文以该申请为基础并将其全文通过引用结合于此。本申请还要求2014年7月10日提交的美国临时申请第62/022,885号的优先权以及2014年10月31日提交的美国专利申请第14/530410号的优先权,其全部内容通过引用纳入本文。

背景技术

[0003] 本文一般地涉及玻璃斜切方法,更具体地,涉及采用激光结合机械精整的玻璃斜切方法。

[0004] 本文的任何引用并不承认构成现有技术。申请人明确保留质疑任何引用文件的准确性和针对性的权利。

[0005] 在玻璃面板被切割应用于建筑、车辆、消费者电子产品(这里仅举例而言)的所有情况下,会存在边缘,这会是非常有可能需要进行关注的。存在许多不同的方法来切割和分离玻璃。例如,玻璃可以进行机械切割(CNC机械加工、磨料水射流、划线和破裂等),采用电磁辐射进行切割(激光、放电、陀螺振子等)。较为常规和常用的方法(CNC机械加工的划线和破裂)产生的边缘存在不同类型和尺寸的缺陷。边缘并非完美垂直于表面也是常见的。为了消除缺陷并使得边缘是具有改善强度的更为平滑的表面,通常对它们首先进行研磨,然后通过抛光轮的行进进行抛光,从而需要多个步骤。该工艺涉及边缘材料的研磨去除,这会使其具有所需的精整以及对其形状进行成形(外圆角、斜面、铅笔状等)。为了实现研磨和之后的抛光步骤,必须将部件切割得比最终所需尺寸要大。

[0006] 虽然消除缺陷会增加边缘强度是众所周知和广泛理解的,但是对于形状对边缘强度的影响还没有达成一致。干扰主要在于,众所周知的是,形状有助于增加边缘冲击和处理的抗破坏性。事实在于,边缘形状实际上并不决定边缘强度(这是对挠曲力(或弯曲力)的抗性所限定的),但是缺陷尺寸和分布确实具有大的影响。但是,具有形状的边缘确实有助于通过产生较小的横截面和含有缺陷来改善抗冲击性。例如,具有同时垂直于两个表面的直面的边缘在这些直角拐角处积累应力,当其受到另一物体冲击时,会发生碎裂和破裂。由于积累的应力,缺陷尺寸会非常大,这会显著降低边缘强度。另一方面,由于其较为光滑的形状,圆角“外圆角”形状的边缘会具有较低的应力积累和较小的横截面,这有助于降低尺寸和缺陷渗透进入边缘的体积中。因此,在冲击之后,具有形状的边缘应该比平坦边缘具有更高的“弯曲”强度。

[0007] 出于上文所述,通常希望使得边缘具有形状,而不是平坦和垂直于表面。这些机械切割和边缘成形方法的一个重要方面是机械的维护度。对于切割和研磨这两者而言,用旧和磨损的切割头或研磨辊会产生损坏,这会显著影响边缘的强度,即使裸眼无法看出来差异。机械加工方法的其他问题在于,它们需要机械切割,之后进行机械研磨以及后续的多次机械抛光步骤,这是非常劳动密集型的,并且需要许多研磨和抛光步骤直至最终所需的精整,这产生大量碎片且需要清洁步骤以避免引入表面损坏。

[0008] 由于任意切割过程所引起的表面下损坏,表现为小的微裂纹和材料改性(例如锯齿状和横向龟裂),是一项考量,因为它们降低了脆性材料(特别是玻璃)的边缘强度。在这方面,机械和烧蚀性激光工艺是特别成问题的,因为该工艺会造成深度约为100-200um或更深的表面下损伤层。用常规加工产生的边缘通常需要大量的切割后研磨和抛光,以去除表面下损伤层。

发明内容

[0009] 本文所述的实施方式涉及采用激光结合机械抛光加工,来对任意形状的玻璃基材的边缘进行斜切和/或斜角化的方法。

[0010] 本文的一个实施方式涉及用于产生斜切或斜角的方法,所述方法包括:

[0011] 将脉冲激光束聚焦成激光束焦线,沿着束传播方向观察;

[0012] 将激光束焦线以相对于材料的第一入射角导向到材料中,激光束焦线在材料内产生感应吸收,感应吸收沿着激光束焦线在材料内产生缺陷线;

[0013] 使得材料和激光束相对于彼此位移,从而沿着材料内呈该第一角度的第一平面激光钻孔多条缺陷线;

[0014] 将激光束焦线以相对于材料的第二入射角导向到材料中,激光束焦线在材料内产生感应吸收,感应吸收沿着激光束焦线在材料内产生缺陷线;以及

[0015] 使得材料或激光束相对于彼此位移,从而沿着材料内呈该第二角度的第二平面激光钻孔多条缺陷线,所述第二平面与所述第一平面相交,

[0016] 使得材料沿着所述第一平面和第二平面分开,并产生经激光切割的材料;以及

[0017] 通过柔性轮(compliant wheel)对经激光切割的材料进行抛光。

[0018] 本文的一个实施方式涉及用于产生斜切或斜角工件的方法,所述方法包括:

[0019] 将脉冲激光束聚焦成激光束焦线,沿着束传播方向观察;

[0020] 将激光束焦线以相对于工件成入射角导向到工件中,入射角与工件的边缘相交,激光束焦线在工件内产生感应吸收,感应吸收沿着激光束焦线在工件内产生缺陷线;

[0021] 使得工件和激光束相对于彼此位移,从而沿着工件内呈该角度的平面激光钻孔多条缺陷线;以及

[0022] 沿着所述平面分离工件以产生经激光切割的工件;以及用柔性抛光轮对经激光切割的工件进行抛光,所述柔性抛光轮的本体弹性模量为0.1-5GPa。

[0023] 根据一些实施方式,用抛光轮对经激光切割的工件的切割表面进行抛光的时间为t,其中,1秒<t<1分钟,例如5-30秒。

[0024] 因此,本文的一个实施方式涉及用于产生斜切或斜角工件的方法,所述方法包括:

[0025] 将脉冲激光束聚焦成激光束焦线,沿着束传播方向观察;

[0026] 将激光束焦线以相对于工件成入射角导向到工件中,入射角与工件的边缘相交,激光束焦线在工件内产生感应吸收,感应吸收沿着激光束焦线在工件内产生缺陷线;

[0027] 使得工件和激光束相对于彼此位移,从而沿着工件内呈该角度的平面激光钻孔多条缺陷线;以及

[0028] 沿着所述平面分离工件,以产生具有切割表面的经激光切割的工件;以及

[0029] 用抛光轮对经激光切割的工件的切割表面进行抛光,持续时间为t,其中,1秒<t<1

分钟,其中,抛光轮的本体弹性模量为0.1-5GPa。

[0030] 根据一些实施方式,非常快速地对经激光切割表面工件进行抛光,即,切割表面的总边缘精整步骤,即,总抛光时间,抛光时间 t 是:1秒 $<t<1$ 分钟。

[0031] 根据一些实施方式, $t\leq 30$ 秒,以及在一些实施方式中,在 ≤ 10 秒内对通过激光切割的工件所有外边缘进行精整。

[0032] 根据一些实施方式,激光是群脉冲激光,脉冲持续时间大于约5皮秒且小于约20皮秒,群重复频率约为1kHz至2MHz,以及每个群是2-25个脉冲。根据一些实施方式,群脉冲激光的激光功率是10-100W。

[0033] 在以下的详细描述中给出了本发明的其他特征和优点,其中的部分特征和优点对本领域技术人员而言是容易理解的,或通过实施文字描述和其权利要求书以及附图中所述实施方式而被认识。

[0034] 应理解,上面的一般性描述和下面的详细描述都仅仅是示例性的,用来提供理解权利要求书的性质和特点的总体评述或框架。

[0035] 所附附图提供了对本发明的进一步理解,附图被结合在本说明书中并构成说明书的一部分。附图说明了本发明的一个或多个实施方式,并与说明书一起用来解释各种实施方式的原理和操作。

附图说明

[0036] 本发明或申请文件包括至少一幅彩色的附图。本专利或专利申请公开包括彩色附图的副本将根据要求,在支付所需的费用之后由专利局提供。

[0037] 通过本文示例性实施方式更为具体的描述使得前述内容是更为清楚的,在所示附图中,对于所有不同视图,相似附图标记表示相同部件。附图不一定是成比例的,进行了突出强调来显示本文的实施方式。

[0038] 图1A-1C显示具有改性玻璃的等间距缺陷线的断层线。

[0039] 图2A和2B显示激光束焦线的定位,即对激光波长透明的材料由于沿着焦线的感应吸收的加工。

[0040] 图3A所示是用于激光钻孔的光学组件。

[0041] 图3B-1至3B-4所示是通过将激光束焦线相对于基材的不同定位来对基材进行加工的各种可能性。

[0042] 图4所示是用于激光钻孔的第二光学组件。

[0043] 图5A和5B所示是用于激光钻孔的第三光学组件。

[0044] 图6是用于激光钻孔的第四光学组件的示意图。

[0045] 图7A是本申请所述用于形成更为牢靠边缘(产生斜切和牺牲边缘)的各种方法的流程图。

[0046] 图7B显示用缺陷线产生斜切边缘的过程。

[0047] 图7C显示采用沿着预定平面产生缺陷线的聚焦和呈角度的超短激光来对玻璃边缘进行激光斜切。上图显示采用3个缺陷线平面的例子,相比较而言,下图仅使用2个。

[0048] 图8A和8B显示对于皮秒激光,激光发射与时间的关系。每次发射表征为脉冲“群”,其可以含有一个或多个子脉冲。显示对应于脉冲持续时间、脉冲之间的分隔以及群之间的

分隔的时间。

[0049] 图9显示使用在切割部件之后得以保留的缺陷线,释放作为牺牲区域,捕获由于对部件边缘的冲击所引起的裂纹扩展。

[0050] 图10A显示切割部件,内缺陷线进行离子交换,这增加了足够的应力来去除打孔边缘并形成所需的边缘斜切。

[0051] 图10B显示具有内缺陷线的切割部件进行离子交换 (IOX) 来释放斜切角,类似于图10A所示,但是仅有两个缺陷线平面。

[0052] 图10C显示具有多种角度的斜切(超过3个缺陷线平面)。

[0053] 图11A提供了采用边缘探针,在一个实施方式的柔性边缘精整轮(抛光轮)的径向边缘上进行的INSTRON压缩测试结果总结图。

[0054] 图11B提供了采用相同边缘探针,在对比坚硬的可磨损精整轮的径向边缘上进行的INSTRON压缩测试结果总结图。

[0055] 图12A是边缘曲线的示意图,这是当用 15° 延伸的边缘斜切对部件进行激光切割时获得的。

[0056] 图12B是边缘曲线的示意图,这是当用 15° 缩短的边缘斜切对部件进行激光切割时获得的。

[0057] 图12C是边缘曲线的示意图,这是当用 45° 的边缘斜切对部件进行激光切割时获得的。

[0058] 图12D是边缘曲线的示意图,这是当用 60° 的边缘斜切对部件进行激光切割时获得的。

[0059] 图13A表示复合固定研磨剂轮,显示采用不同粘结材料、研磨剂和形状因子的轮设计可用于集中精整作用来适应输入的边缘曲线。

[0060] 图13B显示柔性抛光轮的概念,考虑在运行过程中将研磨剂浆料传递通过心轴和轮。

[0061] 图14示意性显示恒定作用力抛光设备的一个实施方式。

[0062] 图15A显示用于经激光切割的玻璃的机械加工的柔性轮100的一个实施方式。

[0063] 图15B-15E是图15A的轮的显微照片图。

[0064] 图16显示图15A-15E的柔性抛光轮的标称研磨剂尺寸估算。

[0065] 图17显示通过轮100的柔性轮抛光实现的示例性边缘强度(MPa)性能。

[0066] 图18A和18B分别是通过图15A的轮100进行机械抛光之前和之后的经激光切割基材边缘的顶点显微镜图(Apex Microscope Images)。

[0067] 图19A和19B分别是通过根据一个实施方式的轮进行机械抛光之前和之后的激光切割基材边缘的顶点显微镜图(Apex Microscope Images)。

[0068] 图20A和20B分别是通过根据另一个实施方式的轮100进行机械抛光之前和之后的激光切割基材角的顶点显微镜图(Apex Microscope Images)。

具体实施方式

[0069] 以下描述了示例性实施方式。

[0070] 本文所述的实施方式涉及采用激光对任意形状的玻璃基材和其他透明材料的边

缘进行斜切和/或斜角化的方法。第一个实施方式涉及采用超短脉冲激光将边缘切割成所需的斜切形状,之后可任选地跟有其他工艺步骤用于完全自动化分离。在第一个方法中,加工基础步骤是在相交平面上产生断层线,其描绘出所需边缘形状并建立路径,所述路径至少对于裂纹扩展具有抗性,因而对于形状从其基材基质的分离和分开具有抗性。该方法基本产生了具有形状的边缘,同时从主基材切割出部件。可以将激光分离方法调节和配置成实现具有形状的边缘从原始基材发生手动分离、部分分离或者自分离。产生这些断层线的基本原理详细见下文以及2013年1月15日提交的美国专利申请第61/752,489号所述。

[0071] 在第一个步骤中,待加工的物体用超短脉冲激光束辐射,所述超短脉冲激光束浓缩成高纵横比线聚焦,其渗透通过基材的厚度。在该高能密度体积内,材料经由非线性效应发生改性。重要的是要注意到,在没有该高光学强度的情况下,不会引发非线性吸收。低于该强度阈值,材料对于激光辐射是透明的,并且保持其初始状态,如图1A-1C所示。通过使得激光扫描过所需的线或路径,产生窄的缺陷线(数微米宽),并限定了在下个步骤中待分离的周界或形状。(下文所述的)所使用的特定激光方法的优势在于,在单次通过中,其产生通过材料的高度受控的完全线打孔,具有极小($<75\mu\text{m}$,优选 $<60\mu\text{m}$,通常 $<50\mu\text{m}$,以及在一些实施方式中 $\leq 40\mu\text{m}$)的表面下损伤和碎片产生。这不同于对材料进行烧蚀所通常使用的斑聚焦激光,其中,通常需要多次通过来完全打穿玻璃厚度,由烧蚀过程产生大量碎片,并且发生更为广泛的表面下损坏($>100\mu\text{m}$)和边缘碎片。

[0072] 转到图2A和2B,对材料进行激光钻孔的方法包括:将脉冲激光束2聚焦成激光束焦线2b,这是沿着束扩展方向观察。如图3A所示,(未示出的)激光3在光学组件6的入射侧(称作2a)发射激光束2,其入射到光学组件6上。光学组件6将入射的激光束在输出侧上转变成延长的激光束焦线2b,其是在限定膨胀范围上沿着束方向(焦线的长度1)。将待加工的平面基材1放在光学组件之后的束路径中,至少部分重叠激光束2的激光束焦线2b。附图标记1a表示平坦基材分别朝向光学组件6或者激光的表面,附图标记1b表示基材1的相反表面,通常是平行间隔开的。基材厚度(垂直于平面1a和1b测量,即,垂直于基材平面测量)标记为d。

[0073] 如图2A所示,基材1与束纵轴垂直对准,从而在由光学组件6产生的相同焦线2b的后面(基材垂直于附图平面),以及沿着束方向观察,其相对于焦线2b布置成以束方向观察,焦线2b在基材的表面1a之前开始,并且在基材的表面1b之前停止,即仍然在基材内。在激光束焦线2b与基材1的重叠区域中,即,被焦线2b覆盖的基材材料中,(沿着激光束焦线2b合适的激光强度,该强度通过将激光束2聚焦到长度1的区段上,即长度1的线聚焦,得以确保的情况下)延长的激光束焦线2b由此产生沿着纵向束方向观察到的延长区段2c,沿着在基材材料中产生感应吸收,这诱发了在基材材料中沿着区段2c形成缺陷线或裂纹。缺陷线的形成不仅是局部的,而是在感应吸收的延长区段2c的整个长度上。区段2c的长度(即,归根到底,激光束焦线2b与基材1重叠的长度)标记为附图标记L。感应吸收的区段(或者基材1的材料中发生形成缺陷线的区段)的平均直径或平均延长标记为附图标记D。该平均延长D基本上对应于激光束焦线2b的平均直径 δ ,也就是说,约为0.1-5 μm 的平均斑直径。

[0074] 如图2A所示,由于沿着焦线2b的感应吸收,加热了对于激光束2的波长 λ 是透明的基材材料。图2B显示被加热的材料会最终膨胀使得对应的感应拉伸导致形成微裂纹,拉伸在表面1a处最高。

[0075] 下面描述(可用于产生焦线2b)的具体光学组件6以及(可以将这些光学组件用于

其中的)具体光学设备。所有这些组件或设备是基于上文的描述,从而对于相同的组件或特征或者功能相同的那些使用相同标记。因此,下面仅描述不同的地方。

[0076] 由于最终形成分离的分离面是高质量的或者必须是高质量的(关于破裂强度、几何形貌精确度、粗糙度以及避免再次进行机械加工的需求而言),应该优选采用下文所述的光学组件产生沿着分离线5置于基材表面上的单条焦线(下文,也替代性地将光学组件称作激光光学件)。粗糙度具体来源于焦线的斑尺寸或斑直径。为了实现小的斑尺寸(例如在与基材1的材料相互作用的激光3的给定波长 λ 的情况下,0.5-2微米),通常必须对激光光学件6的数值孔径施加某些要求。下文所述的激光光学件6符合这些要求。

[0077] 为了实现所需的数值孔径,一方面,对于给定的焦距长度,光学件优选应该根据已知的阿贝公式($N.A. = n \sin(\theta)$), n :待加工的玻璃的折射率; θ :孔径半角;以及 $\theta = \arctan(D/2f)$; D :孔径, f :焦距长度)布置所需的开口。另一方面,激光束应该优选将光学件照亮至所需的孔径,这通常是通过采用在激光和聚焦光学件之间的加宽望远镜的束加宽的方式实现的。

[0078] 出于沿着焦线均匀相互作用的目的,斑尺寸不应该变化过于强烈。例如,这可以通过仅在小的圆形区域中照射聚焦光学件,从而使得束开口略微变化进而使得数值孔径的百分比仅略微变化,得以确保(参见下文实施方式)。

[0079] 根据图3A(垂直于在激光辐射2的激光束群中的中心束的水平的基材平面的区段;此处,也是激光束2垂直入射到基材平面,即,角 β 是 0° ,使得焦线2b或者感应吸收的延长区段2c平行于基材法线),激光3发射的激光辐射2a首先被导向到圆形孔径8上,其对于所使用的激光辐射是完全不透明的。孔径8取向垂直于束纵轴,并且处于所示的束群2a的中心束上。对孔径8的直径进行选择,使得靠近束群2a的中心的束群或者中心束(此处标记为2aZ)撞击孔径,并被其完全吸收。由于相比于束直径降低的孔径尺寸,导致仅绕着束群2a的外周界中的束(边缘射线,此处标记为2aR)没有被吸收,而是横向地通过孔径8并撞击光学组件6的聚焦光学元件的边缘区域,这在此处设计成球形切割双凸透镜7。

[0080] 透镜7处于中心束的中心,并且故意设计成常用球形切割透镜形式的非修正双凸聚焦透镜。换句话说,故意使用此类透镜的球形光行差。作为替代,也可以使用与理想修正系统发生偏差的非球形或者多透镜系统,其没有形成理想的焦点,而是形成限定长度的不同的拉伸的焦线(即,透镜或系统不具有单个焦点)。因而,透镜的区域沿着焦线2b聚焦,受制于来自透镜中心的距离。孔径8在束方向上的直径近似为束群直径的90%(束群直径定义为延长降低至 $1/e$)以及是光学组件6的透镜的直径的约75%。从而使用通过在中心将束群阻挡掉所产生的非光行差修正球形透镜7的焦线2b。图3A显示贯穿中心束的一个平面中的区段,以及当所示的束绕着焦线2b转动时,可以看到完整的三维束群。

[0081] 这种类型焦线的一个缺点在于,状态(斑尺寸、激光强度)沿着焦线变化(以及进而沿着所需的材料中的深度变化),因而可能仅在选定的焦线部分中产生所需类型的相互作用(不发生熔化、感应吸收、裂纹形成的热塑性变形)。这进而意味着可能仅有部分入射激光光线被以所需的方式吸收。以这种方式,一方面削弱了(对于所需的分离速度需要平均激光功率的)加工效率,并且另一方面激光光线可能传输到不合乎希望的更深区域(与基材附着的部件或层或者基材保持固定器)且与它们以不合乎希望的方式发生相互作用(加热、扩散、吸收、不合乎希望的改性)。

[0082] 图3B-1-4显示(不仅是对于图3A中的光学组件,而是基本上还对于任意其他可适用的光学组件6而言),可以通过使得光学组件6相对于基材1合适地定位和/或对准以及通过合适地选择光学组件6的参数,来对激光束焦线2b的进行不同定位。如图3B-1所示,可以对焦线2b的长度1进行如下方式的调节,使其超过基材厚度d(此处超过的系数为2)。如果(以束纵向方向观察)将基材1放在焦线2b的中心,则在整个基材厚度上产生感应吸收的延长区段2c。

[0083] 在图3B-2所示的情况中,产生长度1的焦线2b,其差不多对应于基材延长d。由于基材1相对于线2放置的方式使得线2b的起始点在基材之前,即基材外部,所以感应吸收的延长区段2c(其在这里是从基材表面延伸到限定的基材深度,但是没有到达相反表面1b)的长度L小于焦线2b的长度1。图3B-3显示如下情况,其中,(沿着束方向观察的)基材1放置成部分位于焦线2b的起始点之前,从而,此处也是用于线2b的长度1, $1 > L$ (L = 基材1中感应吸收区段2c的长度)。因而,焦线在基材内开始并延伸超过相反表面1b,越过基材。图3B-4最终显示如下情况,其中,产生的焦线长度1小于基材厚度d,从而在以入射方向观察使得基材相对于焦线中心放置的情况下,焦线在基材内靠近表面1a开始,并在基材内靠近表面1b终止 ($1 = 0.75d$)。

[0084] 特别有利的是实现焦线的如下方式放置,使得表面1a、1b中的至少一个被焦线覆盖,即感应吸收的区段2c至少是在一个表面上开始。以这种方式,可以实现实际上理想的钻孔或切割,避免表面的烧蚀、起毛和颗粒化。

[0085] 图4显示另一种可适用的光学组件6。基本构造符合图3A所述的那种情况,从而下面仅对差异进行描述。所示的光学组件基于使用具有非球形自由表面的光学件,从而产生焦线2b,其形状使得形成具有限定长度1的焦线。出于该目的,可以将非球面用作光学组件6的光学元件。例如,在图4中,使用了所谓的锥形棱镜,通常也称作锥棱镜。锥棱镜是特殊的锥形切割棱镜,其在沿着光轴的线上形成斑源(或者将激光束转变成环)。此类锥棱镜的设计是本领域技术人员周知的;例子中的锥角是 10° 。这里标记为附图标记9的锥棱镜的顶点导向入射方向并且处于束中心处。由于锥棱镜9的焦线2b已经开始于其内部,基材1(此处与主束轴垂直对准)可以放置在束路径中,直接位于锥棱镜9的后面。如图4所示,由于锥棱镜的光学特性,还可以沿着束方向偏移基材1,而不离开焦线2b的范围。因此,在基材1的材料中的感应吸收的延长区段2c延伸超过整个基材深度d。

[0086] 但是,所示的设置具有如下限制。由于锥棱镜9的焦线已经是在透镜内开始,显著部分的激光能没有被聚焦到焦线2b的部分2c中,其位于材料内,当透镜和材料之间是有限距离的情况下。此外,焦线2b的长度1与束直径经由可行的折射率和锥棱镜9的锥角相关联,这也是在较薄材料(数毫米)的情况下,总焦线为何可能太长的原因,其同样具有激光能没有被明确地(或者全部地)聚焦到材料中的影响。

[0087] 这是强化光学组件6同时包括锥棱镜和聚焦透镜的原因。图5A显示该光学组件6,其中,设计成形成延长激光束焦线2b的具有非球形自由表面的第一光学元件(以束方向观察)被放置在激光3的束路径中。在图5A所示的情况中,该第一光学元件是具有 5° 锥角的锥棱镜10,其放置成垂直于束方向并且位于激光束3的中心。锥棱镜的顶点取向朝向束方向。第二聚焦光学元件(此处为平-凸透镜11,其曲率取向朝向锥棱镜)放置在束方向中,距离锥棱镜10的距离为 z_1 。对距离 z_1 进行选择(在该情况下约为300mm),使得通过锥棱镜10形成的

激光辐射圆环状入射到透镜11的边缘区域上。透镜11将圆环辐射聚焦到距离为 z_2 的输出侧上,在该情况下,距离透镜11约为20mm,具有限定长度的焦线2b,在该情况下为1.5mm。此处,透镜11的有效焦距为25mm。经由锥棱镜10的激光束的圆形转变标记为附图标记SR。

[0088] 图5B具体显示根据图5A,在基材1的材料中形成焦线2b或者感应吸收2c。对两个元件10、11的光学特性以及它们的位置进行选择,使得束方向中焦线2b的延长1与基材1的厚度 d 完全一致。因此,要求基材1沿着束方向的精确定位,从而将焦线2b精确地放在基材1的两个表面1a和1b之间,如图5B所示。

[0089] 因此,如果焦线形成在距离激光光学件一定距离,以及如果较大部分的激光辐射调焦至焦线的所需端的话,则是有利的。如所述,这可以通过如下方式实现:仅在所需区域以圆环状照射主聚焦元件11(透镜),这在一方面,起到了实现所需的数值孔径进而实现所需的斑尺寸的作用,但是,在另一方面,在非常短距离上的斑中心处的所需的焦线2b之后,漫射环减小了强度,因为形成了基本圆环形斑。以这种方式,在所要求的基材深度的短距离内,停止了缺陷线的形成。锥棱镜10和聚焦透镜11的组合符合该要求。锥棱镜以两种不同方式起作用:由于锥棱镜10,将通常圆形激光斑以环形式输送到聚焦透镜11,以及锥棱镜10的非球面性具有形成超过透镜焦平面的焦线而不是形成在焦平面内的焦点的作用。可以通过锥棱镜上的束直径来调节焦线2b的长度 l 。另一方面,可以通过锥棱镜-透镜的距离 z_1 以及锥棱镜的锥角,来调节沿着焦线的数值孔径。以这种方式,可以将全部的激光能集中到焦线中。

[0090] 如果缺陷线的形成旨在持续到基材的露出侧(emergence side),则圆环形照射仍然具有如下优势:一方面,以最佳可能的方式使用激光功率,因为大部分的激光光线仍然集中在所需的焦线长度中,另一方面,可以实现沿着焦线的均匀斑尺寸,以及因而实现沿着焦线的均匀分开过程,这是由于圆环状照射区结合由于其他光学功能的方式设定的所需光行差所导致的。

[0091] 作为图5A所示的平-凸透镜的替代,也可以使用聚焦弯月形透镜或者另一较高修正的聚焦透镜(非球形、多透镜系统)。

[0092] 为了采用图5A所示的锥棱镜和透镜的组合产生非常短的焦线2b,优选选择非常小的激光束的束直径入射到锥棱镜上。这具有如下实践上的缺点:将束中心化至锥棱镜的顶点上必须非常精确,因此结果对于激光的方向变化非常敏感(束漂移稳定性)。此外,严格准直的激光束是非常发散的(divergent),即由于光偏转,束群在短距离内变得模糊。

[0093] 回到图6,通过插入另一个透镜,准直透镜12,可以避免这两种影响。该额外的正透镜12的作用是非常严格地调节聚焦透镜11的圆形照射。对准直透镜12的焦距 f' 进行选择,使得由于从锥棱镜到准直透镜12的距离 z_{1a} 导致的所需的圆形直径 d_r 等于 f' 。可以通过(准直透镜12到聚焦透镜11的)距离 z_{1b} 来调节所需的环宽度 b_r 。作为纯几何学问题,小的圆环照射宽度导致短的焦线。可以在距离 f' 实现最小值。

[0094] 因而,图6所示的光学组件6是基于图5A所示的那种情况,从而下面仅对差异进行描述。将准直透镜12(此处也设计成平-凸透镜,其曲率朝向束方向)额外地放置在束路径的中心,在(位于一侧的)锥棱镜10(其顶点朝向束方向)和(位于另一侧的)平-凸透镜11之间。准直透镜12与锥棱镜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} ,以及产生的焦线2b与聚焦透镜11的距离称作 z_2 (总是以束方向观察)。如图6所示,由锥棱镜10形成

的圆形辐射SR(其发散入射并在准直透镜12上具有圆形直径 d_r)被调节至沿着距离 z_{1b} 的所需的圆形宽度 b_r ,至少在聚焦透镜11处具有近似恒定的圆形直径 d_r 。在所示的情况下,旨在产生非常短的焦线2b,从而透镜12处近似4mm的圆形宽度 b_r 减少至透镜11处近似0.5mm,这是由于透镜12的聚焦性质(在该例子中,圆形直径 d_r 是22mm)。

[0095] 在所示的例子中,可以通过如下方式实现小于0.5mm的焦线1的长度:采用2mm的典型激光束直径,焦距 $f=25\text{mm}$ 的聚焦透镜11,以及焦距 $f'=150\text{mm}$ 的准直透镜。此外,在该实施方式中, $z_{1a}=z_{1b}=140\text{mm}$ 以及 $z_2=15\text{mm}$ 。

[0096] 一旦产生了缺陷线(本文也称作断层线或打孔),可以通过如下方式发生分离:在断层线上或者断层线附近手动或机械施加的应力;应力或压力应该产生拉伸,将断层线的两侧拉开并使得仍然粘结在一起的区域破裂。分离取决于数个工艺参数,例如,激光扫描速度、激光功率、透镜的参数、脉冲宽度、重复频率等。

[0097] 图7A给出了本申请所述的工艺总览。

[0098] 在采用短脉冲激光形成所需形状和边缘的方法中,建立的工艺依赖于在线性区域中材料对于激光的透过性,或者低的激光强度(这能够维持清洁且高(或者原始)表面质量),以及依赖于由于激光聚焦附近的高强度区域所产生的减少的表面下损伤。该工艺的一个重要参数在于通过超短脉冲激光所产生的缺陷的高纵横比。这能够产生长且深的断层线或缺陷线,其可以从待切割和斜切材料的顶表面延伸到底表面。原则上来说,可以通过单个脉冲形成每个缺陷,以及如果需要的话,可以使用额外的脉冲来增加受影响区域的延长(深度和宽度)。

[0099] 产生该缺陷线有数种方法。形成线聚焦的光学方法可以具有多种形式,采用圆环形激光束和球形透镜、锥棱镜透镜、衍射元件,或者其他方法来形成高强度的线性区域。激光的类型(皮秒、飞秒等)以及波长(IR、绿色、UV等)也可以发生变化,只要达到了足够的光学强度产生基材材料的破裂即可。

[0100] 在本实施方式中,使用超短脉冲激光,以一致、可控和可重复的方式产生这种高纵横比的垂直缺陷线。上文描述了能够产生该垂直缺陷线的光学设定的细节。该实施方式在光学透镜组件中使用锥棱镜透镜元件,采用超短(皮秒或飞秒持续时间)贝塞尔束,产生高纵横比、无锥角微通道的区域。换言之,锥棱镜将激光束浓缩成圆柱形状和高纵横比(长的长度和小的直径)的区域。由于浓缩激光束所产生的高强度,发生激光的电磁场与材料的非线性相互作用,并且激光能被传输到基材。但是,重要的是,认识到在激光能强度不够高的区域中(即,玻璃表面,围绕中心会聚线的玻璃体积),对于玻璃什么都没有发生,因为激光强度低于非线性阈值。

[0101] 如图1A-1C所示,对玻璃基材进行切割和分离的方法基本上是基于用超短脉冲激光在待加工的材料上产生断层线。工艺参数的具体选择会取决于材料性质(吸收、CTE、应力、组成等)以及选择用于加工的激光参数。

[0102] 在一些情况下,产生的裂纹线不足以使其自动分离,可能需要第二步骤。如果如此希望的话,在非化学强化玻璃的情况下,可以在产生缺陷线之后,通过施加机械作用力来实现分离。使用图1A-1C所示的分离具有平坦边缘的玻璃基材的相同原理,生产斜切边缘的工艺可以如图7A所示进行改性。为了分离玻璃并形成高质量的斜切边缘,例如,在一个实施方式,产生了三个分开的缺陷线平面,其相交并限定了边缘的边界。如图7C所示,可以使用例

如仅仅两个相交缺陷线平面来形成不同形状,但是可能需要在没有任何缺陷线的情况下对边缘的平坦部分进行破裂/分离。应该可以通过缺陷线特性与IOX浴处理的适当组合,在缺陷线平面分离角落。例如,可以相对于玻璃基材的平坦表面的法线成角度 θ_i 形成缺陷线,在一些实施方式中,角度 $0^\circ < \theta_i < 90^\circ$ 。例如,通过3个相交平面(每个含有多条缺陷线)产生图7B下面的斜切边缘。

[0103] 激光和光学系统:

[0104] 例如,出于切割玻璃或者其他透明脆性材料的目的,建立了使用(例如1064nm或532nm、266nm或261nm)皮秒激光结合形成线聚焦束的光学件的工艺,在基材中产生破损线(即缺陷线)。将0.7mm厚度的样品Corning® Gorilla®玻璃编号2320基材放置成使其处于线聚焦内。对于延长约1mm的线聚焦,以及以200kHz的重复频率产生约为>30W的输出功率的皮秒激光(约为150uJ/脉冲),线区域中的光学强度可以容易地足够高至在材料中产生非线性吸收。近似随着高强度的线性区域,产生损坏、烧蚀、蒸发或者其他方式改性的材料区域。

[0105] 注意到该皮秒激光的典型操作产生脉冲的“群”。(参见例如,图8A和8B)。每个“群”可含有非常短持续时间(例如,约10皮秒)的多个脉冲(本文也称作子脉冲)。每个子脉冲或者群内的单个脉冲的时间间隔是例如约为20毫微秒(50MHz),时间通常由激光腔设计控制。每个“群”之间的时间可以长得多,通常约为5us,对于约200kHz的激光重复频率而言。确切的时间间隔、脉冲持续时间和重复频率可取决于激光设计发生变化。但是已经显示高强度的短脉冲(<15皮秒)与该技术工作良好。

[0106] 例如,每个脉冲群可以含有2个脉冲(本文也称作子脉冲)或者更多(例如,3个脉冲、4个脉冲、5个脉冲、10个脉冲、15个脉冲、20个脉冲、22个脉冲、25个脉冲或者群内更多个脉冲),相互分开的时间范围约为1-50ns,例如,10-50ns(例如,约20ns或30ns),并且群重复频率(即,两个连续群中的第一个脉冲之间的间隔)可以约为1-200kHz。可以选择脉冲激光束的波长,使得材料在该波长是基本透明的。在本文内容中,当在激光波长处的吸收率小于约50%(例如,<40%)、更优选小于10%以及甚至更优选小于1%每mm的材料深度,材料在该激光波长是基本透明的。该波长可以是例如,1064nm、532nm、355nm或266纳米。材料处测得的平均激光功率可以大于40微焦每mm材料厚度,例如,40-1000微焦/mm,例如100-900μJ/mm,或者100-650微焦/mm,200-400μJ/mm是优选的。

[0107] 例如,如图8A和8B所示,根据本文所述选定的实施方式,皮秒激光产生脉冲500A的“群”500,有时也称作“群脉冲”。每个“群”500可含有高至100皮秒(例如,0.1皮秒、5皮秒、10皮秒、15皮秒、18ps、20ps、22ps、25ps、30ps、50ps、75ps或其间)的非常短持续时间 T_d 的多个脉冲500A。这些单个群500内的单独的脉冲500A也可被称作“子脉冲”,这不过是表示它们存在于单个脉冲群内这个事实。群内的每个激光脉冲500A的能量或强度可能不等于群内的其他脉冲的能量或强度,并且群500内的多个脉冲的强度分布通常符合由激光设计所管理的随时间的指数衰减。优选地,本文所述的示例性实施方式的群500中的每个脉冲500A与群内的后续脉冲的时间间隔的持续时间 T_p 为1-50毫微秒(例如,10-50ns,或者10-30毫微秒),时间通常由激光腔设计所管理。对于给定激光,群500内的每个脉冲的时间间隔 T_p (脉冲-脉冲间隔)较为均匀($\pm 10\%$)。例如,在一些实施方式中,每个脉冲与后续脉冲的时间间隔近似为20毫微秒(50MHz)。例如,对于产生约20毫微秒的脉冲间隔 T_p 的激光,群内的脉冲-脉冲间隔 T_p 维持在约为 $\pm 10\%$ 内,或者约为 ± 2 毫微秒。每个“群”之间的时间(即,群之间的时间间

隔 T_b)会长得多(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例性实施方式中,对于约为200kHz的激光重复频率或者频率,其约为5微秒。本文中,激光重复频率也称作群重复频率,定义为群中的第一个脉冲与后续群中的第一个脉冲之间的时间。在其他实施方式中,群重复频率约为1kHz至4MHz。更优选地,激光重复频率可以是例如约为10-650kHz。每个群中的第一个脉冲与后续群中的第一个脉冲之间的时间 T_b 可以是0.25微秒(4MHz重复频率)至1000微秒(1kHz重复频率),例如0.5微秒(2MHz重复频率)至40微秒(25kHz重复频率),或者2微秒(500kHz重复频率)至20微秒(50kHz重复频率)。确切的时间选择、脉冲持续时间和重复频率可以取决于激光设计发生变化,但是显示高强度的短脉冲($T_d < 20$ 微微秒以及优选 $T_d \leq 15$ 微微秒)工作特别好。

[0108] 对材料进行改性所需的能量可以描述为群能量(群内所含的能量,每个群500含有一系列的脉冲500A)或者描述为单个激光脉冲中所含的能量(许多个它们可构成群)。对于这些应用,每脉冲群的能量可以是25-750 μ J,更优选50-500 μ J,50-250 μ J。在一些实施方式中,每个群的能量是100-250 μ J。群内单个脉冲的能量会较小,单个激光脉冲的确切能量会取决于群500内的脉冲500A数量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和8B所示。例如,对于恒定的能量/群,如果群脉冲含有10个单个激光脉冲500A,则每个单个激光脉冲500A会含有较少的能量,相比于如果仅具有2个单个激光脉冲的相同脉冲群500而言。

[0109] 对于切割或改性透明材料(例如玻璃),使用能够产生此类群脉冲的激光是有利的。不同于使用通过激光的重复频率在时间上间隔开的单个脉冲,使用使得激光能量在(构成群500的)子脉冲的快速序列上铺展开的群脉冲序列实现了与材料的较大时间跨度的高强度相互作用,相比于单脉冲激光可能的情况而言。虽然单脉冲可以在时间上膨胀,但是如果这样的话,脉冲内的强度必然在脉冲宽度上粗略地下降。因此,如果10微微秒的单脉冲膨胀到10毫微秒脉冲的话,强度粗略地下降3个数量级。该下降会使得光学强度降低至非线性吸收不再显著的点,并且光材料相互作用不再强到足以实现切割。相反地,利用群脉冲激光,每个子脉冲500A(或者群500内的脉冲500A)期间的强度仍然可以是非常高的,例如时间间隔约为10毫微秒的3个10微微秒脉冲500A仍然实现每个脉冲中的强度近似高于3倍的单个10微微秒脉冲,同时激光能够与材料在现如今大3个数量级的时间规格上与材料相互作用。因而,这种群内的多脉冲500A的调节实现了激光-材料相互作用的时间规格的操纵,其方式可以有助于更大或更小的光与预先存在的等离子体羽毛状物的相互作用,更大或更小的光-材料相互作用(与通过初始或先前的激光脉冲预激发的原子和分子),以及材料内更大或更小的加热效应(可促进微裂纹的受控生长)。对材料进行改性所需的群能量大小会取决于基材材料组成和用于与基材相互作用的线聚焦的长度。相互作用区域越长,展开的能量越多,则会需要的群能量也越高。

[0110] 孔或损坏轨迹的形成:

[0111] 如果基材或透明材料具有足够的应力(例如,离子交换后玻璃),则部件会自发性地开裂并沿着通过激光加工描绘出的穿孔损坏路径分离。但是,如果基材并非固有很多应力的话(例如,康宁Eagle XG[®]组成的情况下),则皮秒激光会仅在片材中形成损坏轨迹(及,缺陷线或打孔)。缺陷线或损坏轨迹通常具有不超过5 μ m的内直径。也就是说,缺陷线(损坏轨迹)通常是内尺寸不超过5微米(例如,0.5-1.5微米或0.2-2微米,例如在一些实施

方式中,0.2-0.7微米或0.3-0.6微米)的孔的形式。优选地,孔的尺寸非常小(数个微米或更小)。

[0112] 孔或缺陷线可以刺穿材料的整个厚度,可以是穿过整个材料深度的连续开口或者可以不是这种情况。图1C显示刺穿700um厚的未强化的Gorilla®玻璃基材片的整个厚度的此类轨迹的例子。通过劈开边缘的侧面,观察穿孔或损坏轨迹。穿过材料的轨迹不一定是通孔,通常存在玻璃堵塞住孔的区域,但是它们通常是小尺寸的。

[0113] 这些孔之间的横向间距(节距)由基材在聚焦激光束下位移时的激光的脉冲频率所决定。仅需要单次皮秒激光脉冲群来形成完整孔,但是如果需要的话,可以使用多个脉冲。为了以不同节距形成孔,激光可以触发成以较长或较短的时间间隔射击。对于切割操作,激光触发通常与束下方的部件的阶段驱动运动同步,从而激光脉冲以固定时间间隔触发,例如每1um,或者每5um。确切的间距由材料性质所决定,其有助于裂纹从穿孔扩展到穿孔,产生基材中的应力水平。但是,不同于切割基材,也可以使用相同的方法仅对材料进行穿孔。在该情况下,孔是分开的,例如,具有5um的节距。

[0114] 激光功率和透镜焦距(其决定了丝长度进而决定了功率密度)对于确保玻璃的完全穿透和低微开裂是特别重要的参数。

[0115] 通常来说,可用的激光功率越高,以上述工艺可以对材料进行切割越快。本文所揭示的工艺可以以0.25m/s或更快的切割速度来对玻璃进行切割。切割速度(或者切割的速度)是激光束相对于透明材料(例如玻璃)的表面移动同时产生多个孔或者改性区域的速率。高的切割速度(例如,250mm/s,400mm/s,500mm/s,750mm/s,1m/s,1.2m/s,1.5m/s或者2m/s,或者甚至3.4-4m/s)通常是合乎希望的,从而使得制造的基建投资最小化并优化装备利用率。激光功率等于激光的群能量乘以群重复频率(速率)。通常来说,为了以高切割速度切割此类玻璃材料,损坏轨迹间隔通常是1-25微米,在一些实施方式中,间隔优选3微米或更大,例如,3-12微米,或者例如5-10微米。

[0116] 例如,为了实现300mm/s的线性切割速度,3微米孔节距对应于具有至少100kHz群重复频率的脉冲群激光。对于600mm/s切割速度,3微米节距对应于具有至少200kHz重复频率的群-脉冲激光。以200kHz产生至少40uJ/群以及以600mm/s的切割速度进行切割的脉冲群激光需要具有至少8瓦的激光功率。因此,更高的切割速度需要甚至更高的激光功率。

[0117] 例如,以3μm节距和40μJ/群的0.4m/s切割速度会要求至少5瓦特激光,以3μm节距和40μJ/群的0.5m/s切割速度会要求至少6瓦特激光。因此,优选脉冲群的激光功率大于或等于6瓦特,更优选至少8瓦特或更高,以及甚至更优选至少10瓦特或更高。例如,为了实现4μm节距(缺陷线间隔或损坏轨迹间隔)和100μJ/群的0.4m/s切割速度会要求至少10瓦特激光,以及为了实现4μm节距和100μJ/群的0.5m/s切割速度会要求至少12瓦特激光。例如,为了实现3μm节距和40μJ/群的1m/s切割速度会要求至少13瓦特激光。此外,例如,以4μm节距和400μJ/群的1m/s切割速度会要求至少100瓦特激光。损坏轨迹之间的最佳节距和确切群能量是依赖于材料的并且可以通过经验确定。但是,应注意的是,提升激光脉冲能量或者以更靠近的节距制造损坏轨迹并不总是使得基材材料更好地分离或者具有改进的边缘质量的情况。损坏轨迹之间过于致密的节距(例如,<0.1微米,在一些示例性实施方式中<1μm,或者在一些实施方式中<2μm)有时会抑制邻近后续损坏轨迹的形成,并且通常会抑制材料绕着穿孔轮廓的分离,以及还可能导致玻璃中不合乎希望的微开裂增加。过长的节距(>50μm,

以及在一些玻璃中 $>25\mu\text{m}$ 或者甚至 $>20\mu\text{m}$)可能导致“不受控的微开裂”,即作为从孔到孔的扩展的替代,微裂纹沿着不同路径扩展,并导致玻璃以不同(不合乎希望)的方向开裂。这可能最终导致分离的玻璃部件的强度降低,因为残留的微裂纹会起到使得玻璃弱化的瑕疵的作用。用于形成每个损坏轨迹的过高的群能量(例如, $>2500\mu\text{J}/\text{群}$,以及在一些实施方式中 $>500\mu\text{J}/\text{群}$)会导致相邻损坏轨迹的已经形成的微裂纹的“愈合”或再熔化,这会抑制玻璃的分离。因此,优选群能量 $<2500\mu\text{J}/\text{群}$,例如, $\leq 500\mu\text{J}/\text{群}$ 。此外,使用过高的群能量会导致形成极大的微裂纹,并产生降低分离后部件的边缘强度的瑕疵。过低的群能量($<40\mu\text{J}/\text{群}$)可能导致在玻璃中没有形成可见的损坏轨迹,因而导致非常高的分离强度或者完全无法沿着穿孔轮廓进行分离。

[0118] 该工艺所能达到的典型示例性切割速率(速度)是例如 $0.25\text{m}/\text{s}$ 和更高。在一些实施方式中,切割速率至少为 $300\text{mm}/\text{s}$ 。在本文所述的一些实施方式中,切割速率至少 $400\text{mm}/\text{s}$,例如, $500\text{--}2000\text{mm}/\text{s}$ 或更高。在一些实施方式中,皮秒(ps)激光采用脉冲群来产生缺陷线,其周期性为 $0.5\text{--}13\mu\text{m}$,例如 $0.5\text{--}3\mu\text{m}$ 。在一些实施方式中,脉冲激光的激光功率为 $10\text{--}100\text{W}$,以及材料和/或激光束相对于彼此以至少 $0.25\text{m}/\text{s}$ 的速率位移;例如,速率为 $0.25\text{--}0.35\text{m}/\text{s}$ 或 $0.4\text{--}5\text{m}/\text{s}$ 。优选地,脉冲激光束的每个脉冲群在工件处测得的平均激光能量大于 $40\mu\text{J}$ 每个群每 mm 工件厚度。优选地,脉冲激光束的每个脉冲群在工件处测得的平均激光功率小于 $2500\mu\text{W}$ 每个群每 mm 工件厚度,以及优选小于约 $2000\mu\text{W}$ 每个群每 mm 工件厚度,以及在一些实施方式中,小于 $1500\mu\text{W}$ 每个群每 mm 工件厚度,例如不超过 $500\mu\text{W}$ 每个群每 mm 工件厚度。

[0119] 发现相比于诸如康宁 Gorilla®玻璃的情况,为了打孔具有低含碱性玻璃或者不含碱性玻璃的碱土硼铝硅酸盐玻璃,需要高得多的体积脉冲能量密度($\mu\text{J}/\mu\text{m}^3$) ($5\text{--}10$ 倍)。这可以通过例如采用脉冲群激光(优选具有至少2个脉冲/群)并且在碱土硼铝硅酸盐玻璃中提供约为 $0.05\mu\text{J}/\mu\text{m}^3$ 或更高(例如,至少 $0.1\mu\text{J}/\mu\text{m}^3$,例如, $0.1\text{--}0.5\mu\text{J}/\mu\text{m}^3$)的体积能量密度来实现。

[0120] 因此,优选激光产生每个群具有至少2个脉冲的脉冲群。例如,在一些实施方式中,脉冲激光的激光功率为 $10\text{--}150\text{W}$ (例如, $10\text{--}100\text{W}$),并且产生每个群至少2个脉冲的脉冲群(例如, $2\text{--}25$ 个脉冲/群)。在一些实施方式中,脉冲激光的功率为 $25\text{--}60\text{W}$,并且产生每个群至少2个脉冲的脉冲群,以及由激光群产生的相邻缺陷线之间的周期性或者间距为 $2\text{--}10\mu\text{m}$ 。在一些实施方式中,脉冲激光的功率为 $10\text{--}100\text{W}$,产生每个群至少2个脉冲的脉冲群,以及工件和激光束相对于彼此位移的速率至少为 $0.25\text{m}/\text{s}$ 。在一些实施方式中,工件和/或激光束相对于彼此位移的速率至少为 $0.4\text{m}/\text{s}$ 。

[0121] 例如,为了切割 0.7mm 厚的非离子交换康宁公司编号2319或者编号2320 Gorilla玻璃,观察到 $3\text{--}7\mu\text{m}$ 的节距可以良好工作,脉冲群能量约为 $150\text{--}250\mu\text{J}/\text{群}$,以及群脉冲数量为 $2\text{--}15$,以及优选地,节距为 $3\text{--}5\mu\text{m}$ 和群脉冲数量(每个群的脉冲数量)为 $2\text{--}5$ 。

[0122] 以 $1\text{m}/\text{s}$ 的切割速度,切割厚的Eagle XG®玻璃,通常需要使用 $15\text{--}84\text{W}$ 的激光功率, $30\text{--}45\text{W}$ 通常是足够的。通常来说,对于各种玻璃和其他透明材料,申请人发现优选需要 $10\text{--}100\text{W}$ 的激光功率对于实现 $0.2\text{--}1\text{m}/\text{s}$ 的切割速度,对于许多玻璃而言, $25\text{--}60\text{W}$ 的激光功率是足够(且最佳)的。对于 $0.4\text{--}5\text{m}/\text{s}$ 的切割速度,激光功率应该优选为 $10\text{--}150\text{W}$,群能量为 $40\text{--}750\mu\text{J}/\text{群}$, $2\text{--}25$ 群每脉冲(取决于切割的材料),以及孔间隔(或节距)为 $3\text{--}15\mu\text{m}$ 或 $3\text{--}10\mu\text{m}$ 。对

于这些切割速度,使用皮秒脉冲群激光会是优选的,因为他们产生了高的功率和所需的每个群的脉冲数量。因此,根据一些示例性实施方式,脉冲激光产生10-100W的功率(例如25-60瓦特),以及产生至少2-25个脉冲/群的脉冲群,并且缺陷线之间的距离为2-15微米;以及激光束和/或工件相对于彼此以至少0.25m/s的相对速度(在一些实施方式中,至少0.4m/s,例如,0.5-5m/s或更快)的速率移动。

[0123] 斜切边缘的切割和分离:

[0124] 斜切方法1:

[0125] 发现采用未强化Gorilla®玻璃(具体是康宁编号2320),能够实现斜切边缘的分离的不同条件。第一种方法是使用皮秒激光仅产生缺陷线,并形成符合所需形状(在该情况下,斜切边缘)的断层线。在该步骤之后,可以通过使用断裂镊,手动弯曲部件,或者沿着断层线引发和扩展分离产生张力的任意方法,来实现机械分离。为了通过700um厚的未强化Gorilla®玻璃中的缺陷线产生斜切边缘并机械地分离部件,发现如下光学和激光参数得到最佳结果:皮秒激光(1064nm)

[0126] 到达锥棱镜透镜的输入束直径,约2mm

[0127] 锥角=10度

[0128] 初始校准透镜焦距=125mm

[0129] 最终物镜焦距=40mm

[0130] z处的聚焦设定=0.7mm(即,对于玻璃厚度处于中心的线聚焦设定)

[0131] 100%完全功率的激光功率(约40瓦特)

[0132] 激光的脉冲重复频率=200kHz

[0133] 节距=5um

[0134] 3个脉冲/群

[0135] 每条丝线单次通过

[0136] 牺牲边缘:

[0137] 在玻璃内存在剩下的缺陷线对于当边缘受到冲击时俘获裂纹扩展会是有利的。在该情况下,缺陷线平面可用作损坏捕获位置,实现产生在相对于缺陷线的外侧上的玻璃区域的“牺牲”边缘部分。事实上,产生牺牲边缘,所述牺牲边缘仅具有相对于分离边缘的内部的外部缺陷线或者相交形成更为复杂的真实边缘内侧的内部斜角的一组缺陷线,这可能是产生部件可靠性增加的方法,而无需部件的外侧边缘上的任意物理斜切特征并且无需机械研磨和抛光来产生该特征。这类牺牲边缘的一些选项如图9所示。由于上文所述的皮秒激光过程以单次通过产生每条缺陷线,并且速度高至1m/s,这非常容易且以成本节约的方式产生这些额外的“损坏停止”线。

[0138] 斜切方法2:

[0139] 示例性的缺陷线形成:

[0140] 为了通过700um厚的未强化Gorilla®玻璃中的缺陷线产生斜切边缘并机械地分离部件,根据一个实施方式,采用如下光学和激光参数得到最佳结果:皮秒激光(1064nm)

[0141] 到达锥棱镜透镜的输入束直径,约2mm

[0142] 锥角=10度

[0143] 初始校准透镜焦距=125mm

[0144] 最终物镜焦距=40mm

[0145] z处的聚焦设定=0.7mm(即,对于玻璃厚度处于中心的线聚焦设定)

[0146] 100%完全功率的激光功率(约40瓦特)

[0147] 激光的脉冲重复频率=200kHz

[0148] 节距=5um

[0149] 3个脉冲/群

[0150] 每条丝线单次通过

[0151] 激光,例如上文所述的皮秒激光,产生断层线并切割玻璃。不需要通过机械作用力来完成通过缺陷线形成的外侧玻璃边缘片的分离。激光加工自身可以产生足够的应力,以使得小的斜切区域或者角落片从部件崩裂。该激光切割过程采用线聚焦并且可以以200-1000mm/s的速度切割玻璃或其他透明材料,呈正交或者具有角度,以产生斜切形状的边缘。根据本文所述的一些实施方式,在切割过程期间,强激光束对薄玻璃进行切割和分离,引起小于60um的表面下损坏,具有小于400nm Ra的表面粗糙度。根据一些实施方式,表面下损坏小于30um,具有小于200nm Ra的表面粗糙度。在最终产品形状的数微米内完成激光玻璃切割,这样实现了最终精整工艺仅去除最小量的玻璃库存材料以符合消费者边缘精整、强度和边缘冲击要求。该工艺可以切割与玻璃表面垂直的玻璃堆叠,实现了堆叠精整。

[0152] 通过缺陷线形成的外侧玻璃边缘片的分离不需要通过施加CO₂激光或者施加机械作用力完成。在许多情况下,将从玻璃基材分离的玻璃部件输送到离子交换过程进行化学强化。离子交换自身可产生足够的应力来促进部件的切线区域或斜切角的剥离或分离。将新的离子引入到玻璃表面中会产生足够的应力来引起外侧角片的剥离或分离。此外,用于离子交换过程的高温盐浴可提供热应力,其足以诱发沿着断层线的剥离或分离,以提供斜切或者其他形状边缘。在任意情况下,最终结果是边缘更紧密地符合内部缺陷线,以形成所需的斜切形状(参见图10A-10C)。图10A显示切割部件,内缺陷线进行离子交换,这增加了足够的应力来去除打孔边缘并形成所需的边缘斜切。图10B显示具有内缺陷线的切割部件进行离子交换(10X)来释放斜切角,类似于图10A所示,但是仅有两个缺陷线平面。图10C显示具有多种角度的斜切(超过3个缺陷线平面)。

[0153] 可以对激光切割的边缘进行边缘精整,以去除暴露于激光切割和分离的区域中的边缘上留有的损伤。根据至少一些实施方式,通过激光切割制备的基材的边缘强度可以通过在边缘精整过程中使用显著柔性研磨边缘精整轮(本文也称作抛光轮)得到显著增加。使用柔性(本体弹性模量为0.1-5GPa)研磨抛光轮实现了部分延展性区域中的材料去除(此类去除集中在例如,通过工件的平行基材表面和基材边缘形成的角上)。以这种方式,不仅通过部分延展性区域材料去除减少表面下损伤(通过部分延展性区域边缘精整中的断裂力学所确定),还通过经由圆角化去除(round off)来中和应力集中点(即,平行基材表面和基材边缘之间形成的角),从而增加了边缘强度和抗冲击破坏性。在一些实施方式中,抛光轮是柔性固定研磨剂边缘精整轮(研磨剂装在其中,不发生移动)。在一些实施方式中,抛光轮是柔性研磨边缘精整轮,其中,研磨剂是外部传递没有固定,但是抛光轮通过载有研磨剂提供研磨边缘精整。在这些实施方式中,抛光轮体仍然是柔性的,本体弹性模量是0.1-5GPa。在一些实施方式中,抛光轮是柔性固定研磨剂边缘精整轮,并且外部传递额外的研磨剂,通过载有研磨剂提供研磨边缘精整。在该实施方式中,抛光轮体仍然是柔性的,本体弹性模量是

0.1-5GPa。

[0154] 因此,根据一个实施方式,方法采用了恒定作用力边缘精整工艺,其使用柔性固定研磨剂轮100(本文也称作抛光轮或精整轮100),其是依靠特点是软的(非金属或陶瓷的)可磨损粘结材料支撑一定量的特定类型、尺寸、浓度和脆度的研磨剂来具有柔性,提供所需的边缘精整。粘结材料可以是例如聚合物材料。柔性、固定磨料轮(100)与设备相连,所述设备能够使得轮以高速转动,同时使得轮与旨在进行精整的基材边缘发生接触。通过装纳轮100的设备施加横向作用力,使得玻璃基材(工件)的边缘被完全施加到柔性轮,从而能够对通过先前的切割技术形成的基材边缘曲线上的应力集中点被圆角化和中和掉。进行柔性轮100的修整和装饰是理所当然的。

[0155] 如本文更具体来说,柔性指的是固定的精整轮对于横向作用力(例如,通过外部来源,如气缸、普通弹簧或者其他此类装置的传递,并且在边缘精整过程中发生的传输通过限定接触面积,例如代表性基材边缘的那些)的相对机械抗性。在一个示例性实施方式中,采用市售可得的Instron(型号5500R)测试系统来量化柔性,其设定成经由测试探针将压缩作用力传递到固定的精整轮结构,其设计成旨在复制典型的矩形基材边缘。轮垂直安装,以及在其外侧直径处的表面放置探针,从而实现径向地向轮施加压缩作用力。柔性磨料轮100对于该测试中经由边缘探针径向传输的压缩作用力具有较低的初始抗性,从而能够明显渗透基材边缘进入固定的轮材料。根据本文所述的一些实施方式,抛光轮是柔性的,即其本体弹性模量为0.1-5GPa(例如,1-4GPa或者2-4GPa)。根据本文所述的一些实施方式,抛光轮是柔性的,使得对于1毫米的探针延长(实际上等同于渗透进入轮),由柔性轮提供的抗性不超过10kgf,例如,0.1-6kgf(干燥,没有施涂润滑剂)。例如,在图11A中可以看出,对于1毫米的探针延长(实际上等同于渗透进入轮),由柔性轮提供的抗性是3.73kgf。但是,从图11B可以看出,对于在非柔性(但是容易磨损)的常规玻璃质(V2类型)抛光轮中的相同探针延长,产生超过36kgf的抗性,近乎对应于图11A的柔性轮100的实施方式的10倍,并且该非柔性轮会需要以10倍的作用力量施加到切割边缘,如此大的作用力会导致对于基材的损坏、表面下裂纹扩展和过度的轮损耗。在该实施方式中采用的柔性轮100包括合成金刚石,但是也可以使用其他磨料类型,例如氧化铈、氧化锆、碳化硅等。通过光学显微镜,确定在该实施方式中使用的固定研磨轮100中的研磨剂粒度为5-10 μ m,并且存在的浓度为2.5-5体积%。但是,采用该方法的边缘精整不限于这些研磨剂尺寸和浓度范围。还可以使用宽范围的研磨剂脆性(相对韧性)、2.5-50体积%浓度的浓度范围、0.1-100 μ m的研磨剂粒度。此外,在该示例性实施方式中,认为研磨剂的研磨剂韧度处于韧度范围的上限(较不脆性);在评级表上会被认为是MBG 620-MBG 660范围。但是,可以在包括该边缘精整实施方式的固定柔性轮设定中使用具有MBG 600至MBG 680的脆度范围的研磨剂,柔性研磨轮100可以采用宽范围的研磨剂材料(即,天然金刚石、合成金刚石、锆、氧化铈、碳化硅以及许多其他材料)(或者由它们制得)。如上文所述,柔性、固定磨料轮(100)与设备相连,所述设备能够使得轮以高速转动,同时使得轮与旨在进行精整的基材边缘发生接触。轮转动速度被用于赋予(以及测量)边缘精整过程中研磨轮与基材(或工件)边缘的接触速率。虽然轮速度通常测量的单位是每分钟圈数,但是表述为单独的研磨剂颗粒与进行精整的基材发生接触的次数的研磨剂与基材边缘的相互作用也是重要的。该接触速率表述为线性速率,例如每分钟表面英尺(或米)。在该示例性实施方式中,采用101.6mm直径的柔性精整轮100,以500-6000rpm的轮速度转动(得到

159.6–1915.2 smpm (每分钟表面米) 的线性接触速率), 来完成工件的边缘抛光。申请人相信, 更高的轮速度 (以及因而更高的线性表面接触速率), 例如接近约 7000rpm 或者 2234 smpm 的轮速度, 对于材料去除的最大化以及减少表面下损伤是更有效的。此外, 可以通过向选择的精整轮提供机械支撑来增加最大轮运转速度。例如, 包括该实施方式的柔性可磨损轮当提供 101.6mm 直径尺寸时, 具有 7000rpm 的最大运转速度 (MOS)。但是, 例如, 如果该轮的内直径用钢或陶瓷压接凸缘强化的话, 则 MOS 可以明显增加 (>8000rpm)。如上文所述, 根据该实施方式, 通过装纳轮 100 的设备施加横向作用力, 使得玻璃基材的边缘被完全施加到柔性轮, 从而能够对通过先前的切割技术形成的基材边缘曲线上的应力集中点被圆角化和中和掉。在该实施方式中, 通过研磨系统测量横向作用力的量, 所述研磨系统装配高速 (10000rpm) 空气轴承心轴, 其安装的电容表 (capacitance gauge) 使得可以在运行期间测量和记录心轴空气间隙。假定心轴空气间隙的大小的变化与心轴偏斜直接成比例, 因为心轴轴承自身具有极高刚度, 因此它们偏斜的大小可以忽略不计。因此, 在运行过程中测得的心轴空气间隙的变化可以被视作是基材杠杆化进入精整轮所赋予的横向作用力的结果。对于该设备和方法, 可以在感兴趣的边缘精整条件范围上测量横向作用力。在一个示例性实施方式中, 测得的横向作用力的范围是 7.2–13.6N (工件尺寸为 44mm x 60mm)。但是, 对于更大的工件, 可以使用更大的横向作用力。例如, 35.56cm 对角线的代表性平板尺寸部件与其真空夹盘的接触面积是典型的 44mm x 60mm 尺寸样品部件的 30 倍。更具体来说, 会需要明显更大的横向作用力使得平板尺寸部件从其真空夹盘移走; 因此较大的部件或工件在精整过程的移走、损坏或破裂之前可以经受住大得多的横向精整作用力。在边缘精整中施加到基材边缘的横向作用力的量还必须被调节至边缘曲线的几何形貌。例如, 直角边缘轮廓或者具有相对于垂直是小角度的斜切的那种 (参见图 12A–12B) 在边缘精整过程中有效地圆角化掉 (那些在基材的平坦表面形成的) 过渡角所需的渗透进入柔性轮没有像相对于垂直是较大角度的那些基材轴承轮廓 (参见图 12C–12D) 那么大。重要的是, 有效地精整了所有的应力集中区域, 从而实现了化学强化后的边缘强度的最大化的目的。如果进行边缘斜切角投影, 并且计算它们的相交和过渡角形成的平面之间的距离, 则可以进行边缘精整过程中最佳轮渗透的良好初始估算。随着斜切角相对于垂直的增加, 预期在精整过程中投影进入轮的部件边缘浸入会增加。例如, 当斜切角相对于垂直是 15 度时 (参见图 12B), 如果以高速度实现过渡角的圆角化, 则部件边缘浸入轮约为 93.78 μ m。当斜切角相对于垂直是 45 度时 (参见图 12C), 进入轮的推荐部件边缘浸入增加到 350 μ m, 以及当斜切角相对于垂直是 60 度时 (参见图 12D), 通过该方法估算的边缘精整过程中的推荐部件浸入超过 600 μ m。优选地, 采用位于用于执行边缘精整的精整平台上的多端口冷却剂环递送系统来进行边缘精整期间向精整阶段施加冷却剂, 如上文所述。例如, 在该实施方式中, 混合了通过纽约州希克斯维勒美的通用光电股份有限公司 (Universal Photonics Incorporated) 销售的 BlueKool 冷却剂 (干净的饮用水中的 3% 浓度的 BlueKool 冷却剂), 并通过多端口冷却剂传递环组件以 1–10 加仑每分钟的速率施加到精整阶段。但是, 对于该目的, 可以使用不同浓度范围的不同切割流体。切割流体, 例如轻质机械油, 其他合成冷却剂 (例如, 纽约州伯克利高地奥凯特凯密特尔公司 (Oakite Chemetall of Berkley Hights, NJ) 制作的 Sabrelube) 以及甚至是干净的水也可以用作冷却剂。在该实施方式中, 如上所述方式的边缘精整也可以在完全没有任何冷却剂的情况下进行; 也就是说, 采用柔性、研磨剂轮 (如柔性轮 100) 进行干燥边缘抛光。柔性

轮100的修整可以是以通常接受的每次边缘精整的实践来进行。在该实施方式中,将柔性轮100安装到小心平衡的心轴上(平衡至5微米内),其位于合适的研磨平台上以及碳化物工具,以受控的横向作用力施加使得所述碳化物工具与轮外侧直径接触,从而优先磨损掉轮在圆形外面的那些部分,直至仔细检查下使得精整轮与研磨心轴的转轴是同轴的。在第二个实施方式中,(如上文所述)通过激光切割或分离之后的工件采用柔性、可磨损固定研磨剂复合轮100'进行边缘精整,即轮100'可具有复合轮结构,其具有多个研磨剂层、部分或部件。用于构造此类轮100'的研磨剂部件(或者例如研磨剂层)的数量会由终端用户所需的边缘精整分布的分辨率所决定。在此类复合轮的每层研磨剂层(或者一些层)中,可以通过研磨剂性质(类型、尺寸、浓度、脆性、粘结、混合物)、尺度性质(厚度、直径、形状)和物理性质(硬度、可磨损性、柔度)的每种性质的梯度(当可用时),来改变结构。部件的加工条件,以及它们相关的范围会适用于先前的实施方式。但是,在该实施方式中,增加了采用所述的柔性固定研磨剂轮进行部分延展性区域研磨的益处。也就是说,可以如下方式设计和制造复合固定研磨剂轮结构,使得将材料去除和精整行为分布到进行机械加工的基材的不同区域。例如,固定研磨剂精整轮可以构造成支撑多层,每层通过研磨剂类型、研磨剂尺寸、研磨剂脆度、研磨剂浓度、粘结刚度以及甚至设计用于向基材边缘的不同区域分配不同精整行为来适应边缘曲线和几何形貌来进行区分。例如,考虑采用激光以该方式产生直角边缘轮廓的基材;即,没有斜切或斜面只有垂直于基材的平行表面的边缘。考虑该基材在切割表面上具有均匀的损伤量,但是希望在直角切割边缘形成的角落和基材的平行表面处集中材料去除,从而形成圆角边缘轮廓。在最简单的情况下,这可以通过采用由三层取向和设定刚性固定到位的结构所构成的复合轮来完成,如图13A所示。图13A显示复合固定研磨剂轮,还显示采用不同粘结材料、研磨剂和成形因子的轮设计如何用于集中精整作用来适应输入的边缘轮廓。

[0156] 更具体来说,图13A所示的三层复合固定研磨剂抛光轮设计成在角落处集中精整作用,相信在该位置需要产生所需的边缘轮廓和最大化的边缘抗冲击性以及弯曲强度。结构是对称的;也就是说,标记为“激进区”的层在复合结构的每侧上是相同的,并且仅轮的芯材料不同。

[0157] 在第三个实施方式中,可以采用柔性、可磨损轮100”来对激光切割边缘进行边缘精整,所述柔性、可磨损轮100”具有或者不具有固定的研磨剂,但是具有一定的松散研磨剂,其以合适的速率传递到临界边缘精整界面。如之前的实施方式所述,固定轮是柔性的(即,柔性轮100),并且也可以装载一定量的相同的研磨剂类型、浓度和脆度的研磨剂。在该实施方式中,使用利用了轮100”的恒定作用力边缘精整工艺来进行边缘精整,所述轮100”是依靠特点是软的、可磨损轮体支撑一定量的固定研磨剂(即类似于柔性轮100)来具有柔性,但是装配有可以在运行过程中将松散研磨剂传递到基材和轮之间的界面处的装置(参见图13B)。松散研磨剂可以是小的研磨剂颗粒的液体悬浮物的形式,所述小的研磨剂颗粒的尺寸范围是10纳米至100微米,通过泵或者任意其他类似装置的方式传递到基材-固定轮界面。松散研磨剂可以是非常小的粒度,具有极高的研磨剂完整性和相对韧度(脆度),如同爆炸纳米金刚石粉末的情况,或者其可以大得多并且明显更为脆性,如同单晶金刚石粉末或者金属粘结金刚石粉末的情况。可以以合适的定向浓缩流的形式将松散研磨剂直接传输到基材-轮界面,或者可以经由轮芯通过装备有旋转接头和流体通道的研磨心轴(其能够以

这种形式接收和分配研磨剂材料)的方式将其传输到界面。松散研磨剂可以以浓缩的形式进行传递,或者其可以适当地稀释以实现所需的旨在用于精整的研磨剂与基材表面的接触。还可以以如下方式供给松散研磨剂,可以使其受迫进入柔性轮结构(即,对其进行滑封(dead head))并且在高转速(500-10000rpm)的帮助下使其流出轮结构,与目标基材表面发生接触。还可以将松散研磨剂传输到复合轮结构的单独区段,以进一步增强边缘精整作用的分布。例如,如果如图13B所示,根据本申请所列出的实施方式的基材激光切割的边缘处理的目的是在基材角落处集中精整作用,则可以将更为激进的松散研磨剂(即,较大的研磨剂尺寸、浓度和韧度)分配到位于轮横截面的外部区域的浆料路径,以及将更细、较不激进的松散研磨剂(即,较小的研磨剂尺寸、较低的浓度、更为脆性)传递到复合结构芯的中心(参见图13B)。以这种方式,固定研磨剂轮复合结构尺寸、材料和物理性质以及松散研磨剂性质的任意组合可用于执行分配式部分延展性模式边缘精整。

[0158] 在该实施方式中的边缘精整工艺参数及其相关运行范围与之前是相同的,示例性运行范围总结如下:

[0159] 在一些实施方式中,轮速度为500-10000rpm,例如,在一个实施方式中,6000rpm (1915smpm)。

[0160] 轮直径,50.8-203.2mm,例如在一个实施方式中,101.6mm。

[0161] 轮制备为采用高精度心轴和碳化物工具修整。

[0162] 研磨剂性质:

[0163] 研磨剂尺寸,0.1-100um,例如5-10um

[0164] 研磨剂脆度,MBG 600-MBG 680,例如在一些实施方式中,MBG 650-MBG 680 (例如, MBG 660)

[0165] 研磨剂浓度,2.5-50体积%,例如在一些实施方式中,2.5-5体积%

[0166] 研磨剂类型,类型没有限制,但是在一些实施方式中,是合成金刚石

[0167] 柔性轮100、100'、100"

[0168] 进料速率(工件的线性运动):2-10000mm/分钟,例如100-300mm/分钟(例如,在一些实施方式中,254mm/分钟)

[0169] 如果采用冷却剂的话,示例性冷却剂流量,1-10gpm(加仑/分钟),例如约为5gpm

[0170] 示例性冷却剂传递方法,例如:高压导向或者受控喷涌(flood)(例如,经由喷嘴)

[0171] 冷却剂组成:没有,或者水,或者轻质油,在一些实施方式中,水中的3%的BlueKool冷却剂

[0172] 切割深度(横向作用力):0.1-100N,例如10-20N,例如13.6N

[0173] 该技术提供以下的一种或多种优点:

[0174] 1.所述的精密激光切割技术与之后的具有柔性边缘精整轮100、100'或100"和恒定作用力抛光的机械加工的组合同时消除了对所有边缘研磨加工步骤和大多数后续边缘抛光步骤的需求,从而将边缘精整加工减少至单个步骤并且减少了相应的循环时间和相关费用。

[0175] 2.所述的恒定作用力抛光实现了优异的基材角落抛光,在该位置对直角基材进行了加工;恒定作用力抛光实现了精整轮与基材边缘的良好接触,即使是在例如角落的此类过渡点,从而改善了绕着部件周界的边缘精整一致性。

[0176] 3. 本文所述的激光切割之后的边缘精整不需要使用昂贵的、机械刚性、高度精密的研磨平台,但是现有的商用研磨平台可用于轮100以进行该边缘精整。

[0177] 4. 应用该实施方式,证实了抛光之后的化学强化之后(即,玻璃在用轮100进行抛光之后进行离子交换)超过800MPa的边缘强度;具体来说,去除了应力集中点,即使是在基材的平坦表面过渡到目标边缘轮廓的那些点。例如,在一个实施方式中,以本文所述的方式经由边缘精整去除4-8um的材料导致(在离子交换后)IOX后的B10强度增加15%(从659MPa增加到761MPa B10),以及IOX后的最大边缘强度增加32%(从720MPa增加到950MPa)。

[0178] 5. 采用这种方法明显改善了尺寸控制,因为以高精度将部件切割到近乎净形状;因为边缘精整仅需要对角落进行圆角化以去除应力集中点,所以去除是少的,几乎没有明显尺寸变化的风险。

[0179] 6. 由于通过本文所述的实施方式的方法的边缘精整很大程度上是以部分延展性模式精整进行的,并且没有脆性破裂模式研磨,在平坦平行(前和后)表面过渡到边缘斜面形状的基材边缘的点上不存在阻塞碎片。

[0180] 7. 由于通过该实施方式的方法的边缘精整很大程度上是部分延展性模式精整并且没有脆性破裂模式研磨,通过更为一致性和可靠的激光切割和斜切方法而不是边缘精整授予了边缘轮廓一致性;相比于边缘精整的常规方法,在研磨槽中,对于基材的差对准的考虑要低得多。

[0181] 更具体来说,在上文所述的激光进行切割之后,根据一些实施方式,将经切割的玻璃基材(工件)安装到位,并用轮100、100'、100''进行边缘抛光。该实施方式通过执行恒定作用力抛光,实现了以高速度进行边缘抛光。该边缘抛光步骤完全地精整了切割表面,并且在本实施方式中,进行边缘抛光步骤没有额外的机械研磨或抛光步骤(即,该过程不需要使用多个研磨和抛光轮,和/或机械研磨与之后的抛光步骤,采用不同研磨剂特性(从粗到细)的数种类型的抛光轮来产生最终抛光)。

[0182] 在本文所述的设备中,将(通过上文所述的激光系统)加工的玻璃基材安装到能够转动的夹盘和边缘精整轮上,其中,心轴固定成近乎无摩擦线性滑动。采用气缸来驱动转动精准轮进入旨在进行抛光的玻璃基材的边缘中,并且在轮上维持恒定横向作用力。气缸设计成具有大冲程能力;该大冲程能够补偿所有可能的轮磨损,从而在基材边缘上维持恒定的抛光作用力。引起通过皮秒激光加工的玻璃基材自身在通过真空固定的夹盘上转动,转动的速度设计成匹配目标线性边缘精整进料速率。以这种方式,将基材边缘进料到恒定作用力-进料抛光轮,并且维持了基材边缘与精整轮之间的良好接触,即使是在诸如角落之类的过渡点。图14示意性显示采用柔性抛光轮100、100'、100''的恒定作用力抛光设备的一个实施方式。图15A显示在图14的设备中使用的用于对经激光切割的玻璃的机械加工的柔性轮100的一个实施方式。

[0183] 在本发明的一个实施方式中,采用包括本发明的方法,对激光切割成接近净形状的Gorilla™玻璃基材进行边缘精整。基材是厚度为0.70mm的2320Gorilla™玻璃材料,采用上文所述的激光加工方法激光切割成矩形形状因子。当生产这些玻璃基材(样品)时,1064nm皮秒激光切割系统运行在200mm/s的切割速度。

[0184] 在该实施方式中,将玻璃基材安装到铝真空夹盘上,其具有软的塑料覆盖以防止在边缘处理过程中对基材表面造成损伤。通过夹盘抽真空,并且在精整过程中,使得基材与

夹盘牢固地固定并保持在该位置。以上文所述的方式,采用市售可得固定研磨剂研磨轮产品进行边缘精整。在该实施方式中,边缘精整轮选择图15A所示的金刚石抛光轮,对应于图15B-15E的显微镜图像,并且具有图16所示的研磨剂尺寸。示例性轮100的物理尺寸如下:

[0185] 外直径为4.0英寸(101.6mm)

[0186] 内直径为1.25英寸(31.75cm)

[0187] 厚度为0.25英寸(6.35mm)

[0188] 在该实施方式的情况下,用该轮进行抛光所采用的工艺条件如下:

[0189] o心轴速度=6000rpm,产生约为6283sfpm(1915smpm)运行

[0190] o线性部件进料速率=10英寸/分钟(254mm/分钟)

[0191] o切割深度=0.001英寸或25.4um每部件每次循环,或者13.6N的恒定作用力

[0192] o冷却剂流动式样=喷涌冷却剂

[0193] o冷却剂流量约为2-10gpm(例如,5gpm)

[0194] o冷却剂产品=BlueKool

[0195] o冷却剂浓度=3-5%,水中

[0196] o研磨平台=HURCO MX24机械系统

[0197] 通过对具有已知边缘轮廓的部件进行抛光,然后在抛光后检查它们来评估在边缘的顶点还有在基材表面与边缘轮廓之间的过渡点的抛光有效性,来确定研磨剂柔性轮(本文也称作抛光轮)100、100”、100”进行切割所需的深度。

[0198] 出于以下原因选择轮100:

[0199] 1.其提供了使得基材进入轮的适度压力,产生完全浸没的基材表面(前表面和背表面重叠),

[0200] 2.其减少了用于生产基材所使用的激光切割工艺所产生的锋利角落过渡点。在抛光过程中,用轮100在所有关键区域圆角化掉了这些锋利角落过渡点。

[0201] 3.它的研磨剂类型、尺寸和浓度足以明显地减少所有边缘区域中的基材表面下损坏,并且还产生视觉上诱人的基材边缘。

[0202] 图17显示通过轮100的柔性轮抛光实现的示例性边缘强度性能。图18A和18B分别是通过图15A的轮100进行机械抛光之前和之后的经激光切割基材边缘的顶点显微镜图(Apex Microscope Images)。图19A和19B分别是通过根据一个实施方式的轮进行机械抛光之前和之后的激光切割基材边缘的顶点显微镜图(Apex Microscope Images)。图20A和20B分别是通过根据另一个实施方式的轮100进行机械抛光之前和之后的激光切割基材角落的顶点显微镜图(Apex Microscope Images)。如这些附图所示,通过用轮100对激光切割边缘进行抛光,产生了视觉上诱人的透明光泽边缘表面。通过轮100去除的材料是少量的,即2-10um,并且在一些实施方式中,约为4-8um。激光切割边缘轮廓明显光滑,激光切割角落观察到明显圆角化。观察到相比于仅经过激光切割的部件,边缘强度改善得以增加(参见图17)。

[0203] 方法1的皮秒打孔部分与(用轮100进行抛光的)机械加工相结合,以产生斜切轮廓。该工艺可用于透明材料,例如薄玻璃(例如,<2m)或者曲面玻璃,并且得到的玻璃具有牢固边缘和非常高的质量。通过离子交换产生的应力曲线释放了打孔边缘。

[0204] 上文所述的方法提供了以下益处:位移增强激光加工能力和成本节约,从而更低成本制造。在本实施方式中,切割和斜切过程提供了如下内容:

[0205] 斜切或完全切割具有斜切边缘的部件：所揭示的方法能够以干净且受控的方式完全分离/切割Gorilla®玻璃和其他类型的透明玻璃。证实了采用两种方法的完全分离和/或边缘斜切。对于方法1，将部件切割成尺寸或者从玻璃基质分离，具有斜切边缘，原则上来说，不再需要其他后加工。对于第二种方法，部件已经切割成尺寸，打孔并且IOX工艺用于对边缘进行斜切。

[0206] 减少的表面下缺陷：对于方法1，由于激光和材料之间的超短脉冲相互作用，几乎没有热相互作用，因而使得会导致不合乎希望的应力和裂纹的热影响区最小化。此外，将激光束浓缩到玻璃中的光学件产生缺陷线，其通常在部件的表面上是2-5微米直径。在分离之后，表面下损坏可以低至<30μm。这对于部件的边缘强度具有重要影响，并且减少了对边缘进行进一步研磨和抛光的需求，因为这些表面下损坏会生长并发展成微裂纹，当部件经受拉伸应力时，使得边缘强度弱化。

[0207] 工艺清洁度：本文的方法1能够以干净且受控的方式斜切玻璃。使用常规烧蚀过程是非常成问题的，因为它们产生大量碎片。此类烧蚀产生的碎片是有问题的，因为其难以去除，甚至是在使用各种清洁和清洗方案的情况下。任何粘附的微粒会造成后续工艺（其中，对玻璃进行涂覆或金属化以产生薄膜晶体管等）的缺陷。所揭示方法的激光脉冲以及所诱发的与材料的相互作用的特性避免了该问题，因为它们进行的时间规格非常短，并且对于激光辐射透明的材料使得诱发的热效应最小化。由于在物体内部产生缺陷线，事实上消除了切割步骤期间的碎片和粘附颗粒的存在。如果存在由于产生缺陷线所导致的任意微粒，它们会被良好地容纳直至部件分离。

[0208] 省略工艺步骤

[0209] 从输入玻璃面板将玻璃板或基材制造成最终尺寸和形状的工艺涉及以下数个步骤，其包括：切割面板，切割成尺寸，精整和边缘成形，将部件薄化至它们的目标厚度，抛光，以及甚至在一些情况下进行化学强化。任意这些步骤的省略会改善加工时间和基建花费方面的制造成本。本发明的方法可以通过如下方式减少步骤数量，例如：

[0210] 1. 减少碎片和边缘缺陷的产生-潜在地消除清洗和干燥工作站

[0211] 2. 将样品直接切割成具有形状边缘、形状和厚度的最终尺寸，减少或消除对于机械精整线的需求。例如，通过对经切割的部件进行精整的方法是单个抛光步骤，没有额外的研磨或抛光，以及与其相关的大量无价值的额外成本。

[0212] 因此，根据一些实施方式，对工件进行加工的方法包括如下步骤：

[0213] (i) 将脉冲激光束聚焦成激光束焦线，这是沿着束传播方向观察；

[0214] (ii) 将激光束焦线以相对于工件成第一入射角导向到工件中，该第一角度与工件的边缘相交，激光束焦线在工件内产生感应吸收，感应吸收沿着激光束焦线在工件内产生缺陷线；

[0215] (ii) 使得工件和激光束相对于彼此位移，从而沿着工件内呈第一角度的第一平面激光钻孔多条缺陷线，每条所述缺陷线具有不超过5μm的直径；以及

[0216] (iv) 沿着所述平面分离工件，以产生具有至少一个切割表面的经激光切割的工件；以及

[0217] (v) 用本体弹性模量为0.1-5GPa的抛光轮对经激光切割工件的切割表面进行抛光（即，边缘精整）。

[0218] 根据一些实施方式,非常快速地对经激光切割表面工件进行抛光,即,切割表面的总边缘精整步骤,即,总抛光时间,抛光时间 t 是: $1\text{秒} < t < 1\text{分钟}$ 。根据一些实施方式, $t \leq 30$ 秒,以及在一些实施方式中,在 ≤ 10 秒内对通过激光切割的工件所有外边缘进行精整(即,激光切割的边缘抛光小于或等于10秒)。不需要通过研磨轮进行机械剥离研磨的步骤,即在分离或激光切割后,工件的经激光切割的表面在一个抛光步骤中进行抛光,没有进行机械研磨并且无需使用多个研磨/抛光步骤。优选地,抛光轮100、100'、100"的外直径为40-250mm,在一些实施方式中,抛光轮的外直径为50-200mm,以及在一些实施方式中,抛光轮的外直径为80-120mm。轮直径确定了基材边缘与抛光轮100、100'、100"之间的接触面积。大直径轮提供较大的接触面积(和较缓慢的每分钟圈数)并且对于较厚的玻璃片是更为优选的,较小直径的轮提供较小的接触面积(和更大的每分钟圈数)并且对于较小或较薄的玻璃工件是优选的。优选地,抛光轮100、100'、100"以500-10000rpm转动。较快的轮速度增加轮与工件的总接触。较大的转速是优选的,因为它们增加了研磨剂颗粒与工件边缘之间的接触次数。根据一些实施方式,抛光轮100、100'或100"以500-8000rpm,例如5000-7000rpm转动。根据本文所述的一些实施方式,抛光轮100、100'或100"包括多种研磨剂颗粒,通常具有0.1-100um的横截面宽度,并且研磨剂颗粒具有600-680MPG(例如,620-670MPG或650-670MPG)的相对韧度(断裂韧度)。得到的玻璃基材可以具有例如600-1000MPa的边缘强度。根据一些实施方式,抛光轮100、100'或100"具有80-120mm的外直径,抛光轮以500-8000rpm转动,抛光轮包括多种研磨剂颗粒,研磨剂颗粒具有0.1-100um的横截面宽度和650-670MPG的相对韧度以及MBG 650-MBG 680研磨剂脆度。注意到,至少根据一些实施方式,非强化的玻璃首先如上文所述进行激光切割以产生至少一个斜切边缘,根据本文所揭示的实施方式所述用轮100、100'或100"进行边缘抛光,以及然后进行离子交换或化学强化以提供边缘强度为600-1000MPa的玻璃工件,离子交换后(IOX后边缘强度)。因此,根据一些实施方式,玻璃含有高水平的碱性(例如, >5 重量%,或者 ≥ 7 重量%,例如7-12重量%),并且可以被离子交换。例如,此类玻璃的实施方式具有约为7-9ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 的CTE以及在组合物中具有高的碱性(如钠)量(实现其进行离子交换)以及较高的热扩散率。

[0219] 通过本文所述方法进行加工的一种示例性实施方式是康宁Gorilla®玻璃工件。

[0220] 根据其他实施方式,玻璃是碱土硼铝硅酸盐玻璃复合物(具有低碱性或者没有碱性)。

[0221] 本文引用的所有专利、公开申请和参考文献的全部教导都通过引用全文纳入本文。

[0222] 虽然本文描述了示例性实施方式,但本领域技术人员应理解可在不背离所附权利要求所包含的本发明精神和范围的情况下对形式和细节作出各种改变。

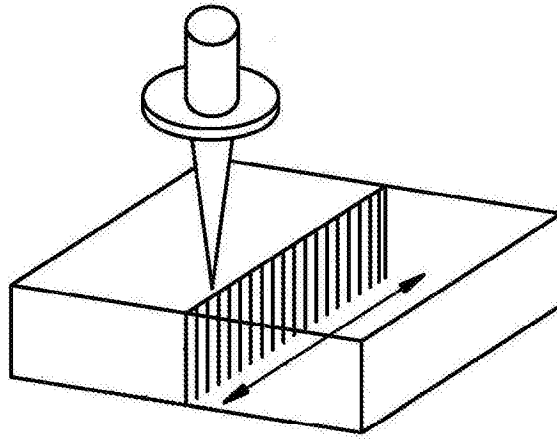


图1A

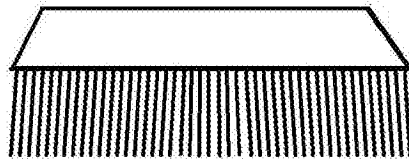


图1B



图1C

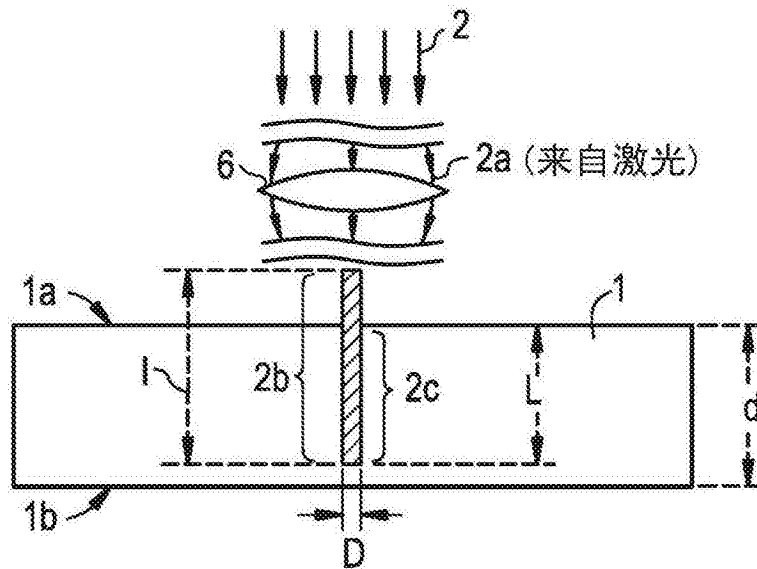


图2A

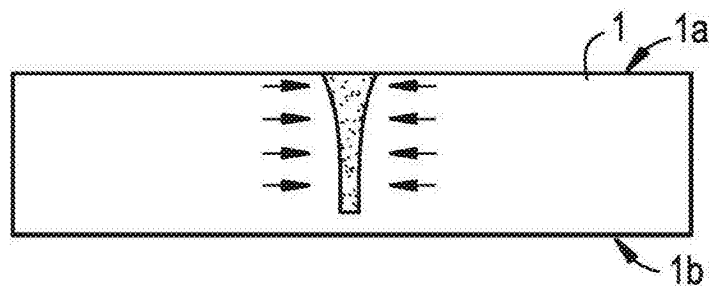


图2B

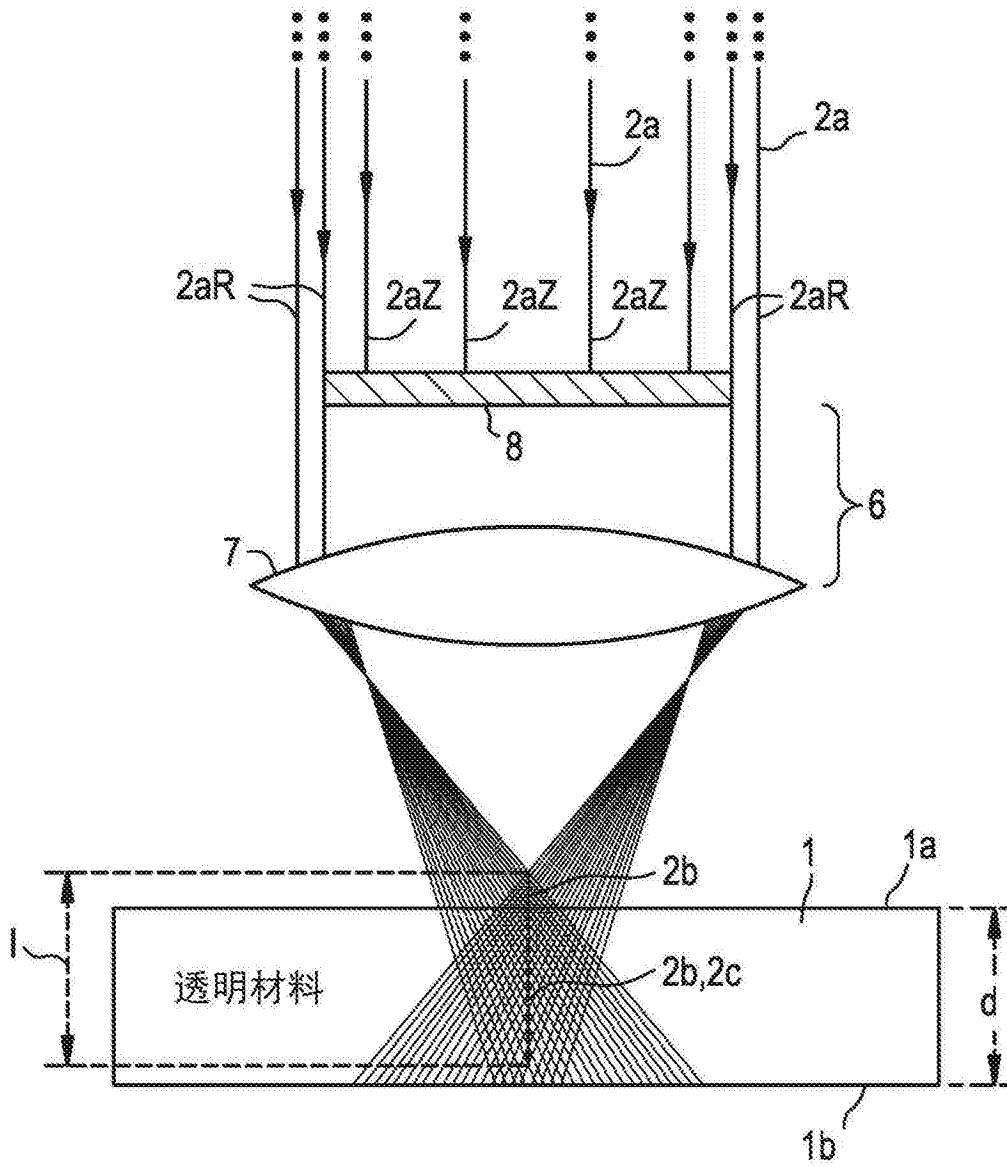


图3A

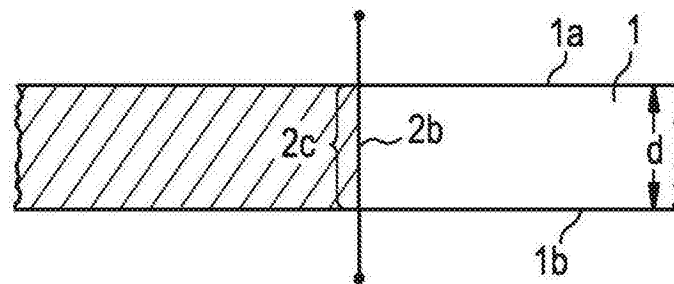


图3B-1

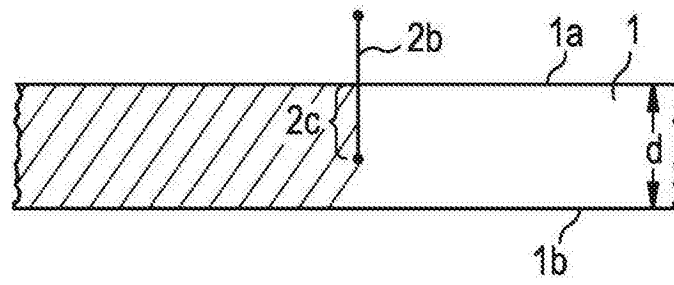


图3B-2

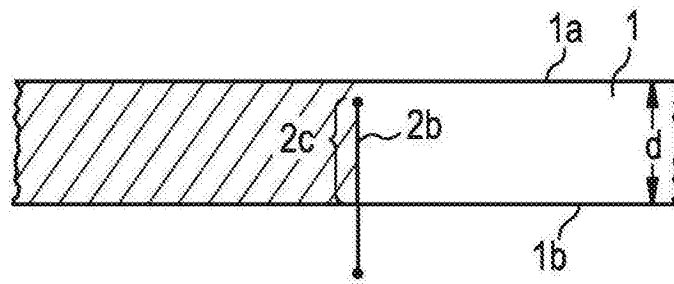


图3B-3

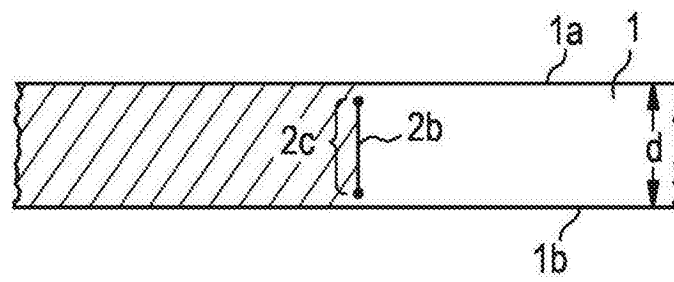


图3B-4

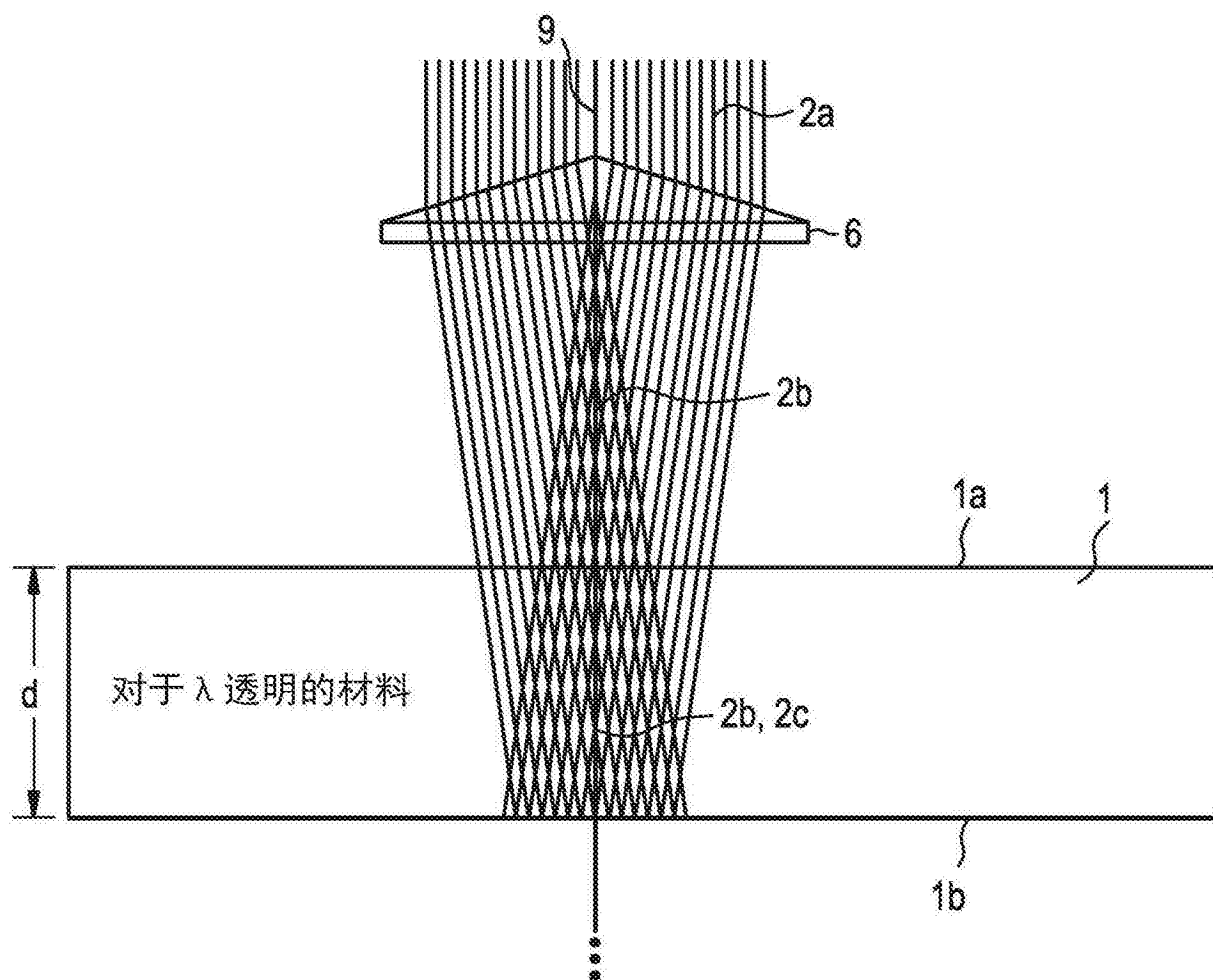


图4

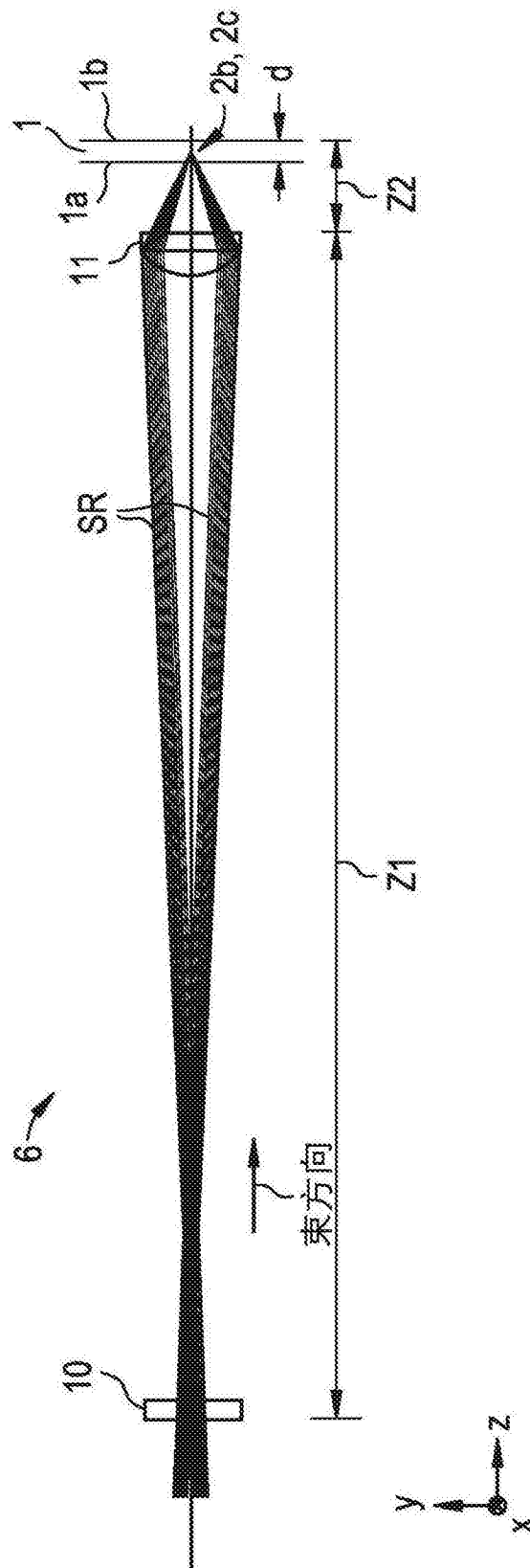


图5A

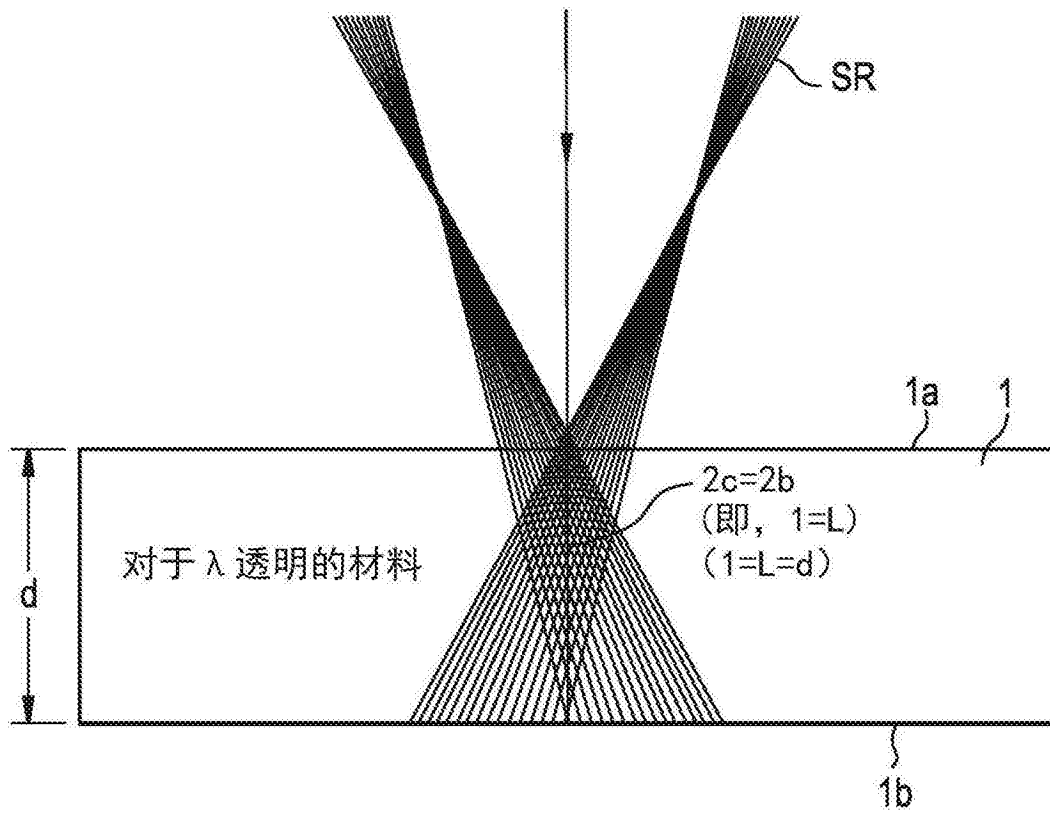


图5B

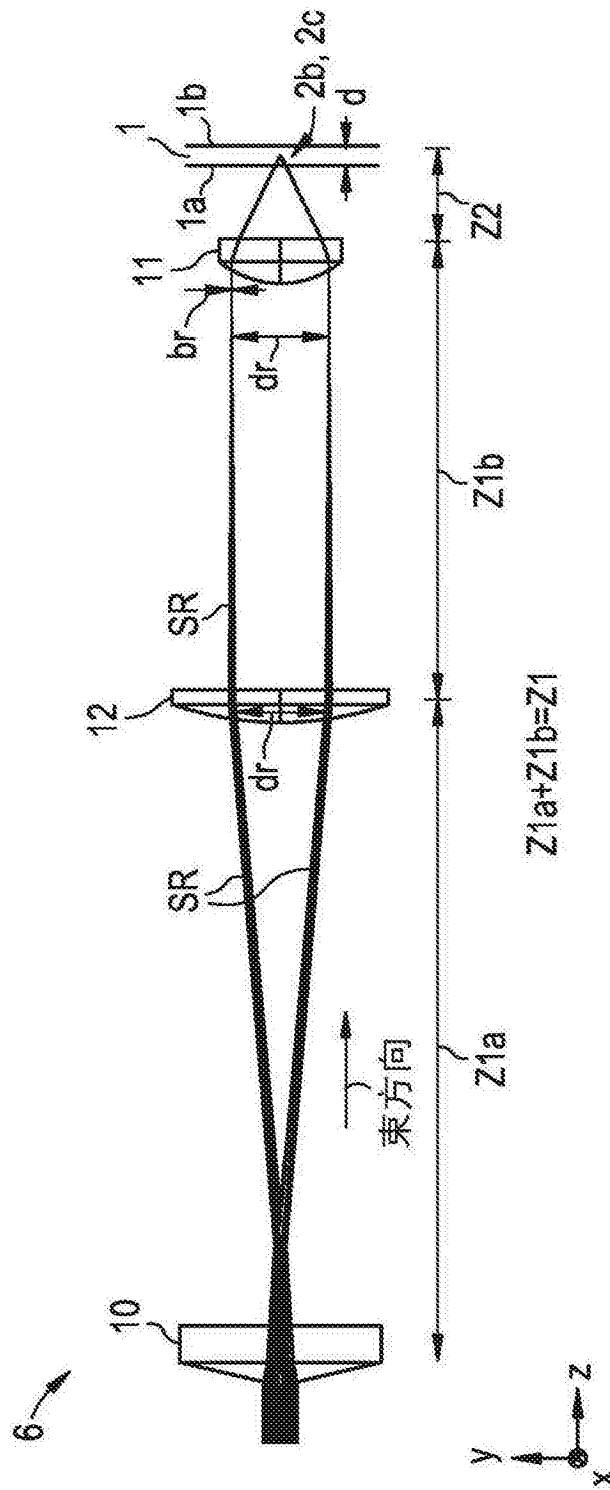


图6

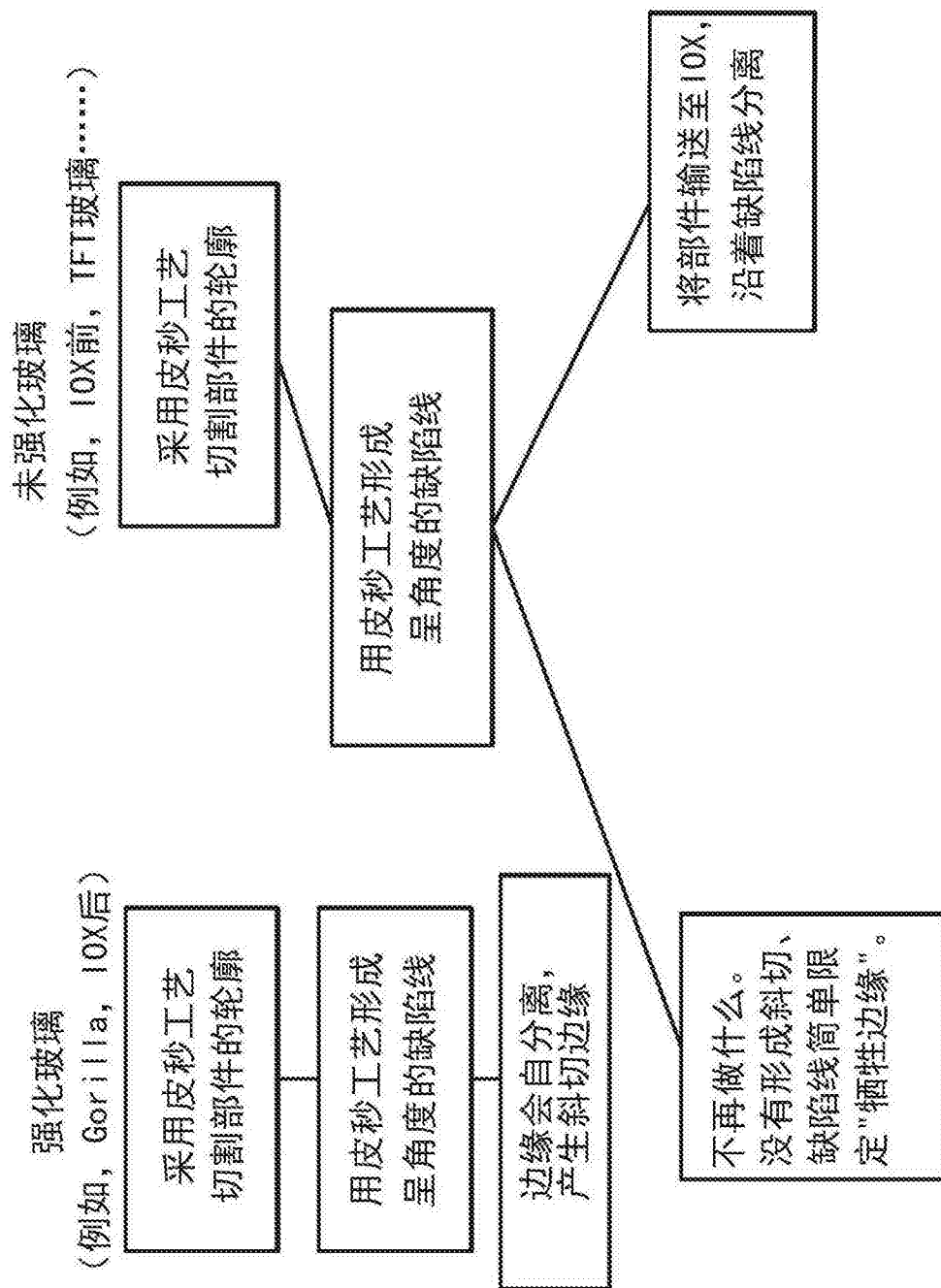


图7A

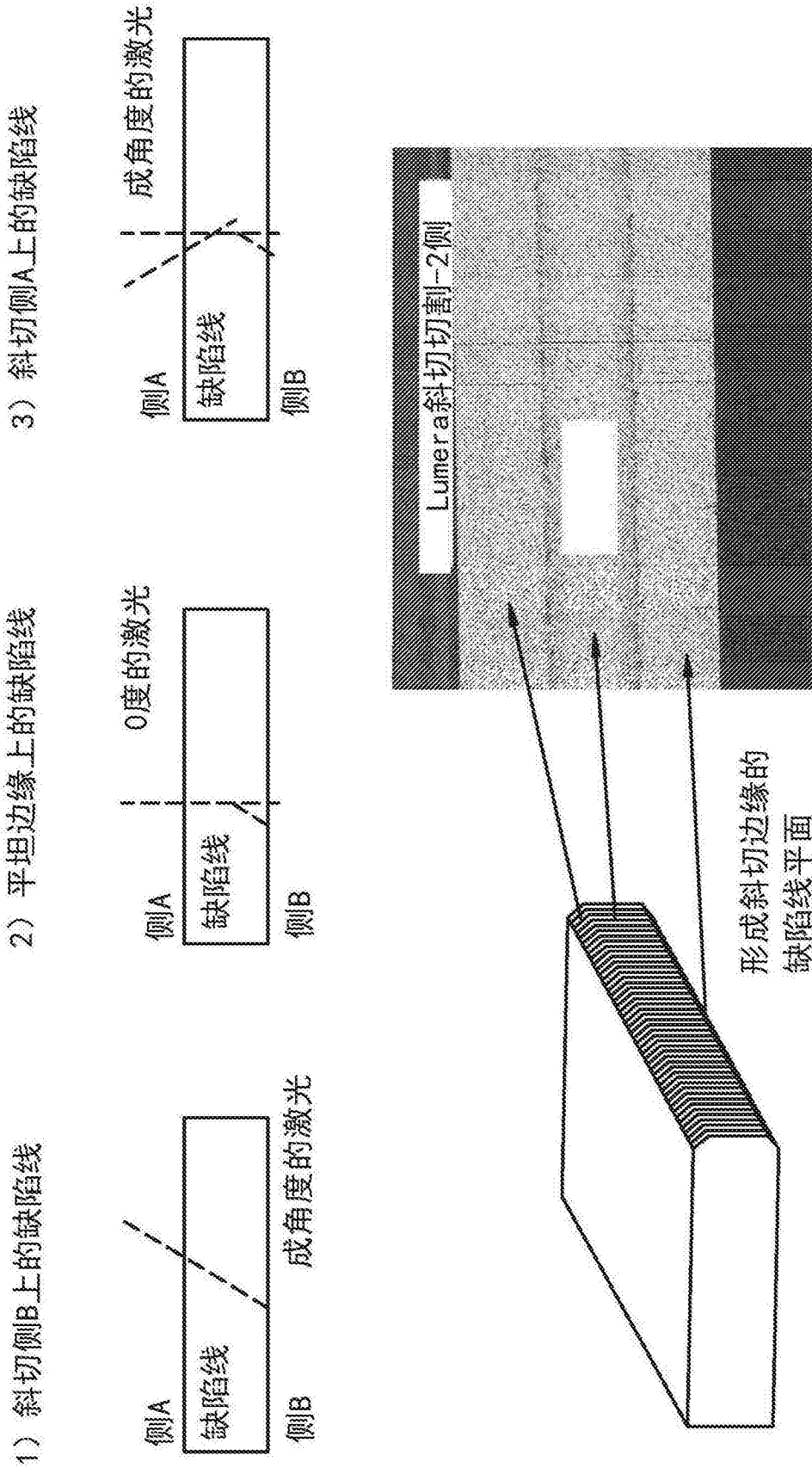


图7B

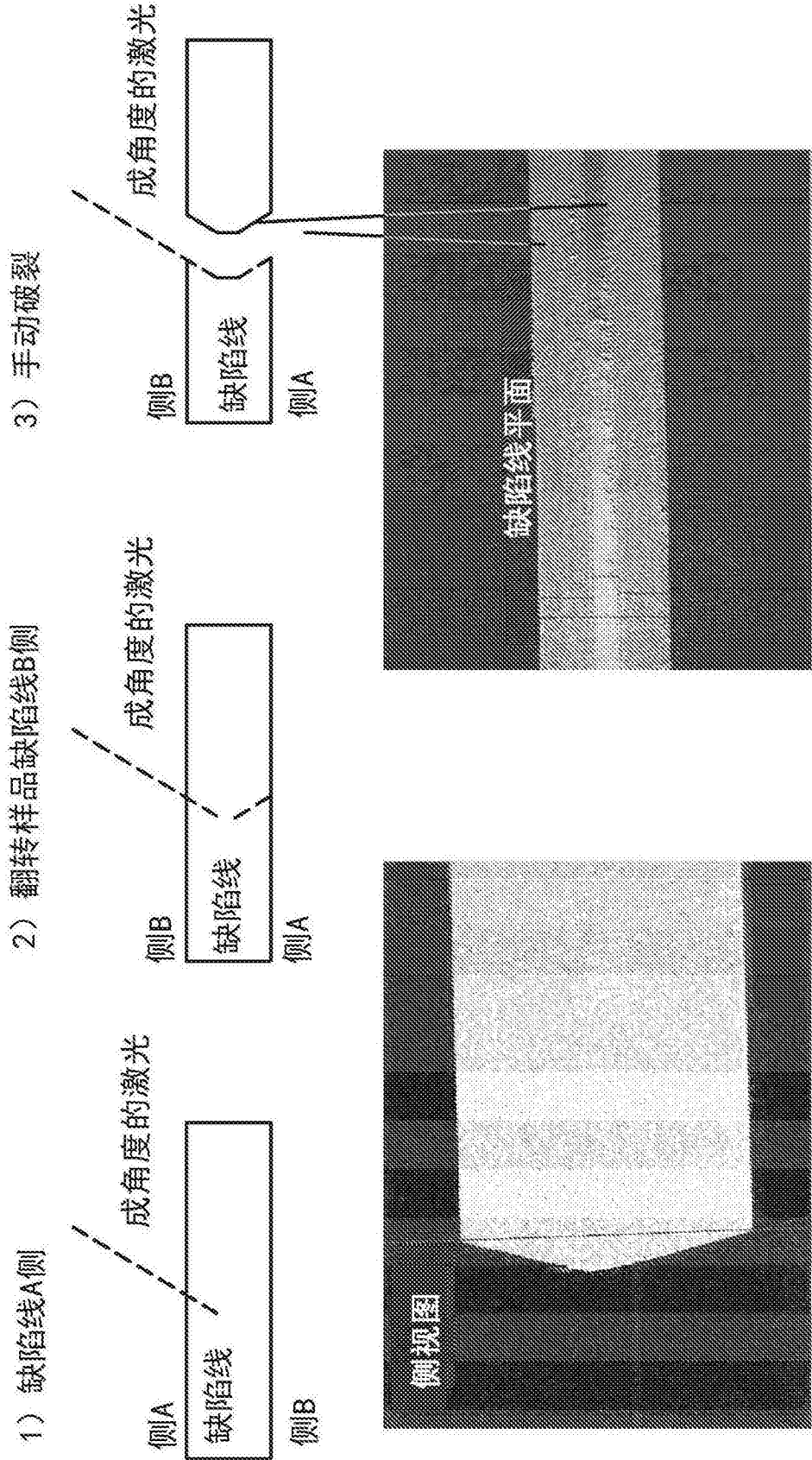


图7C

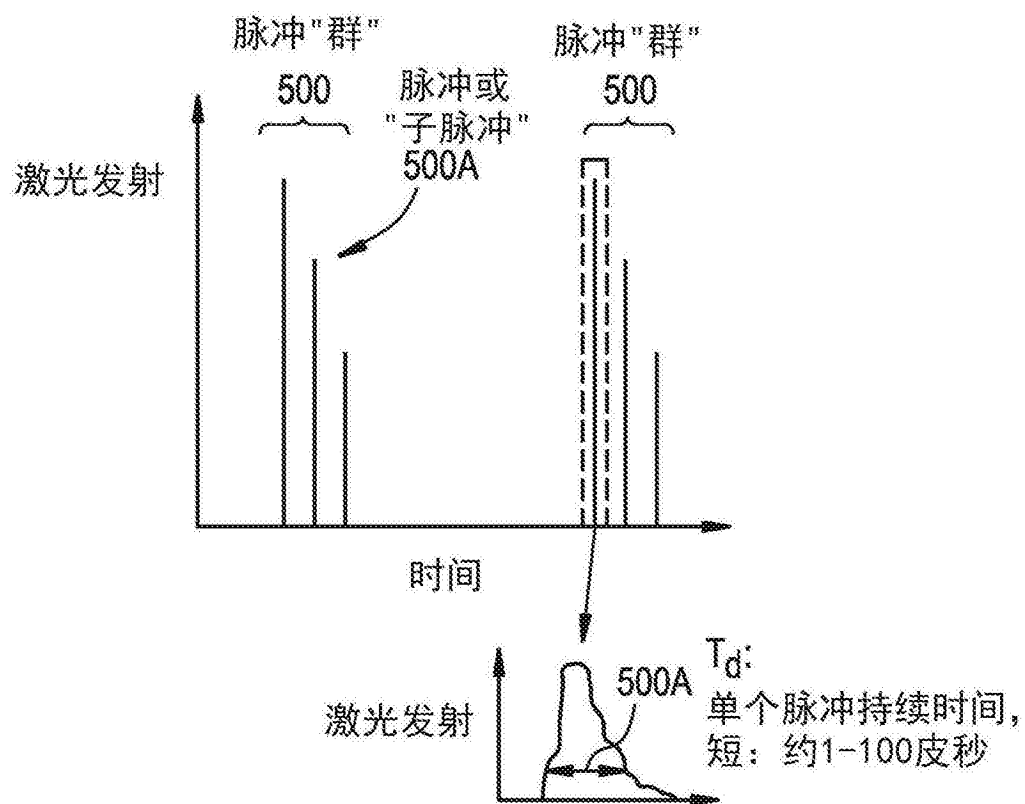


图8A

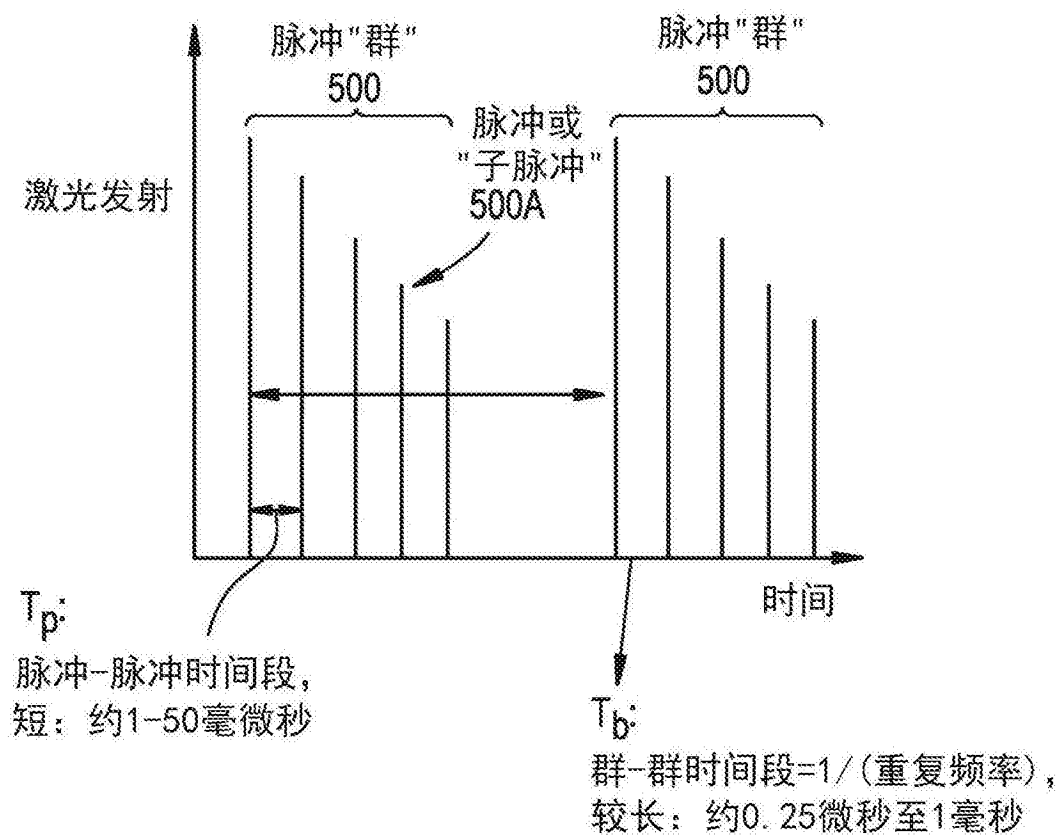


图8B

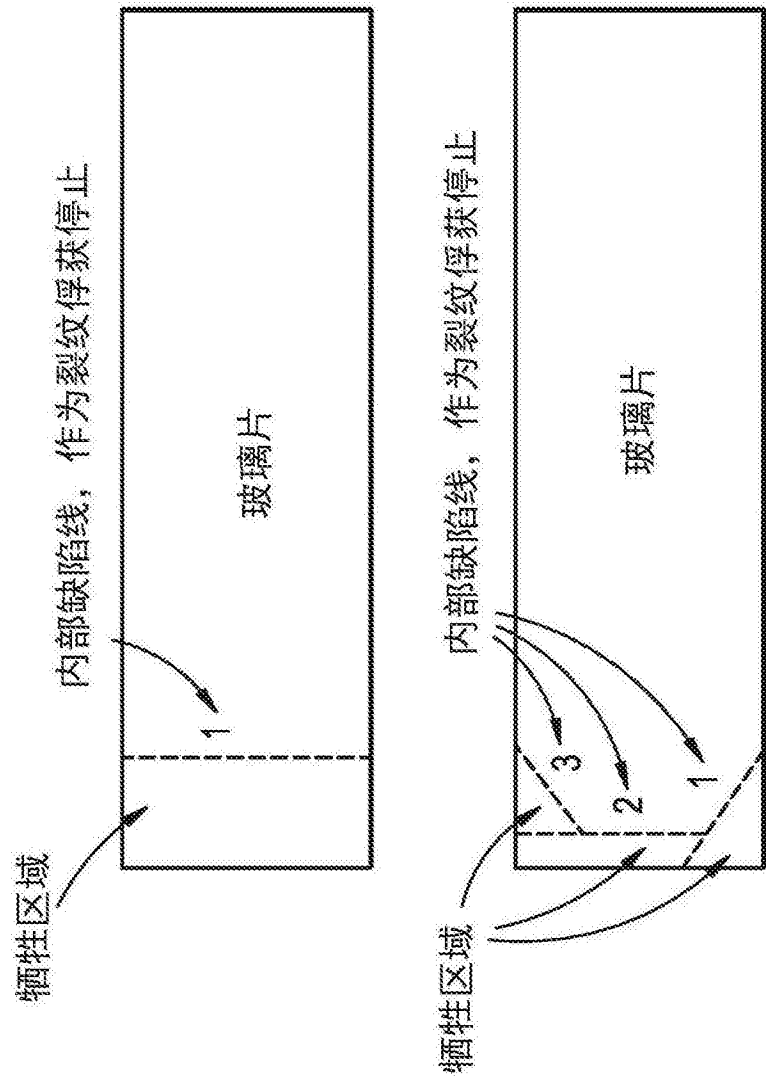


图9

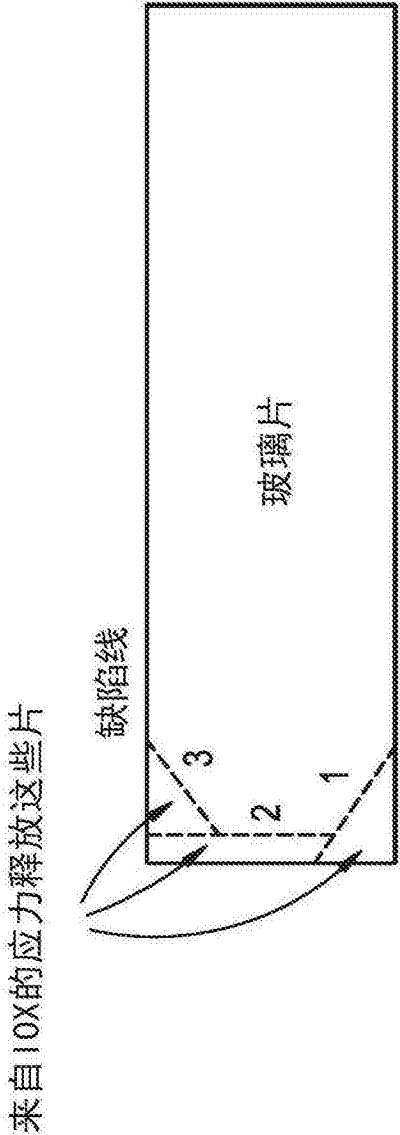


图10A

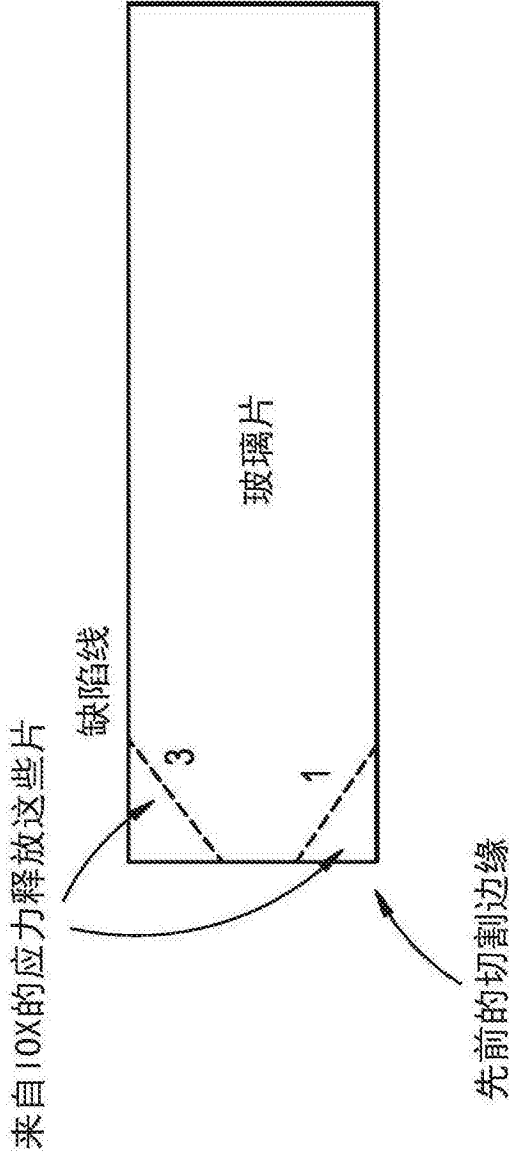


图10B

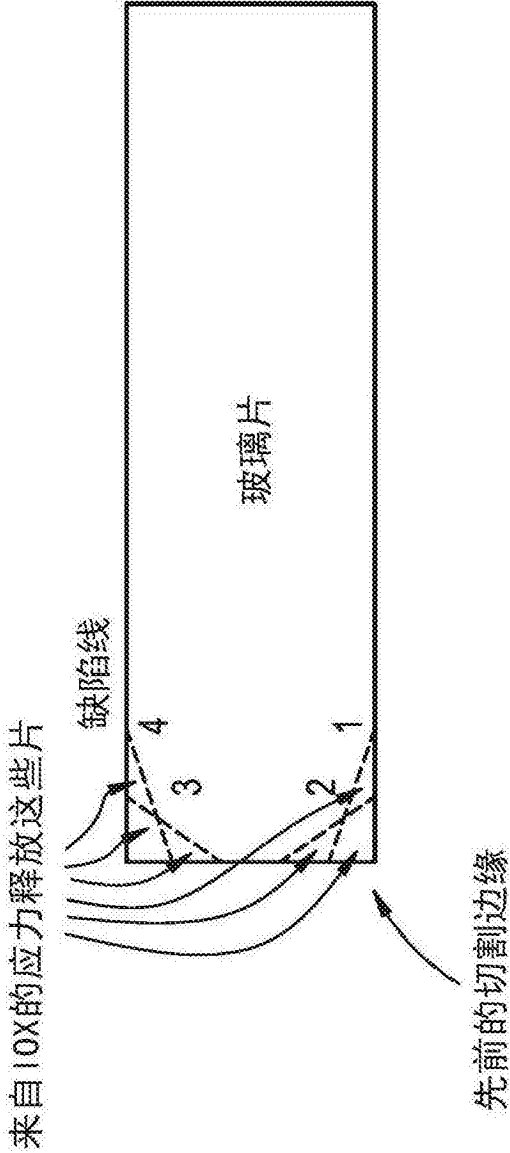


图10C

Trizact 685DC轮INSTRON压缩测试总结

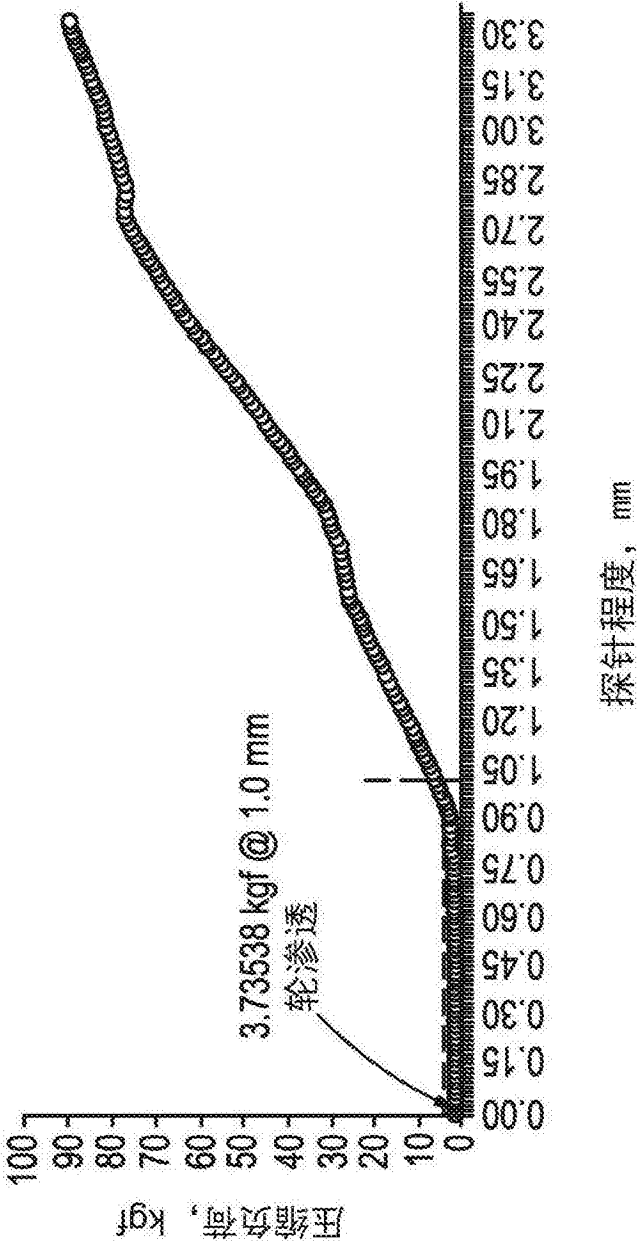


图11A

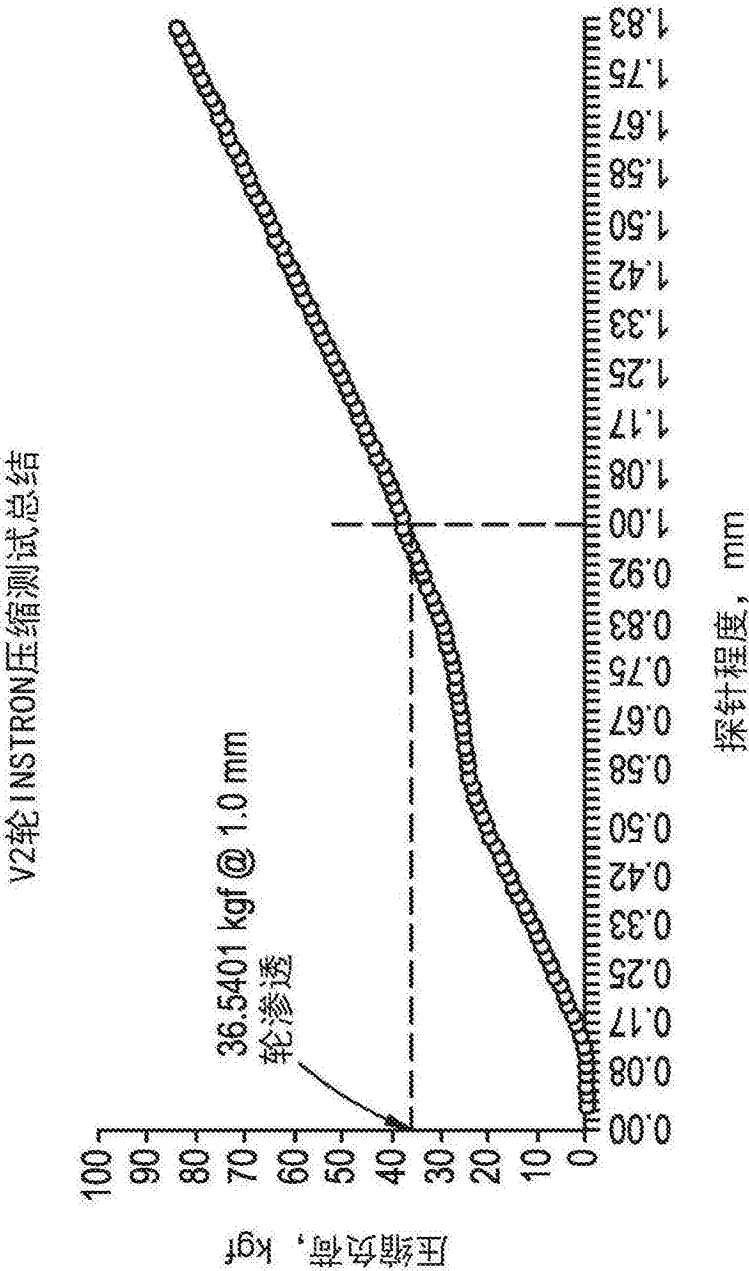


图11B

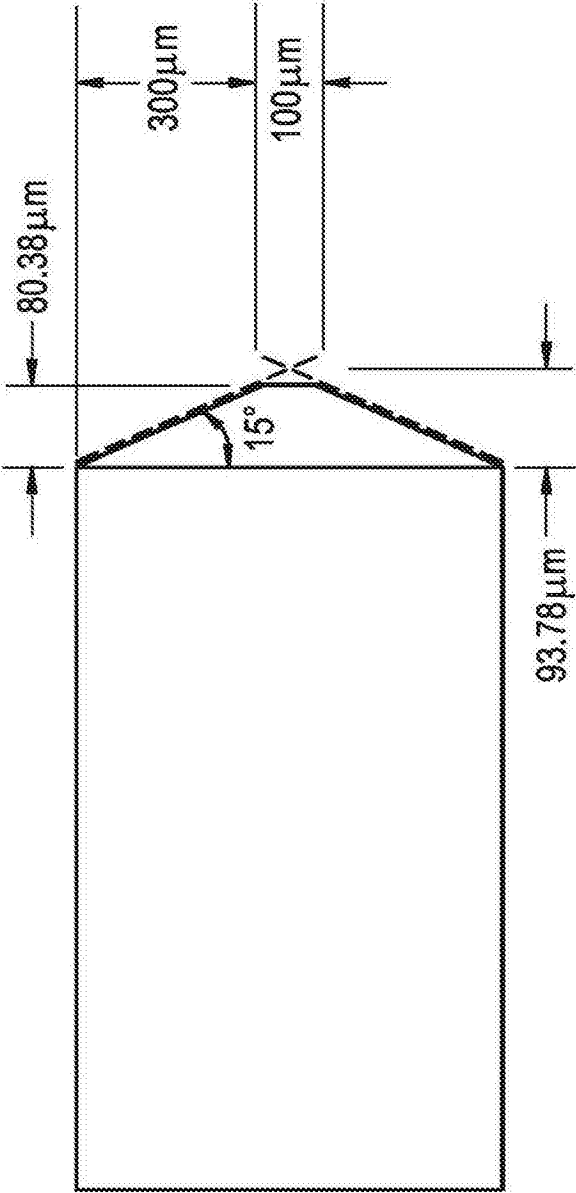


图12A

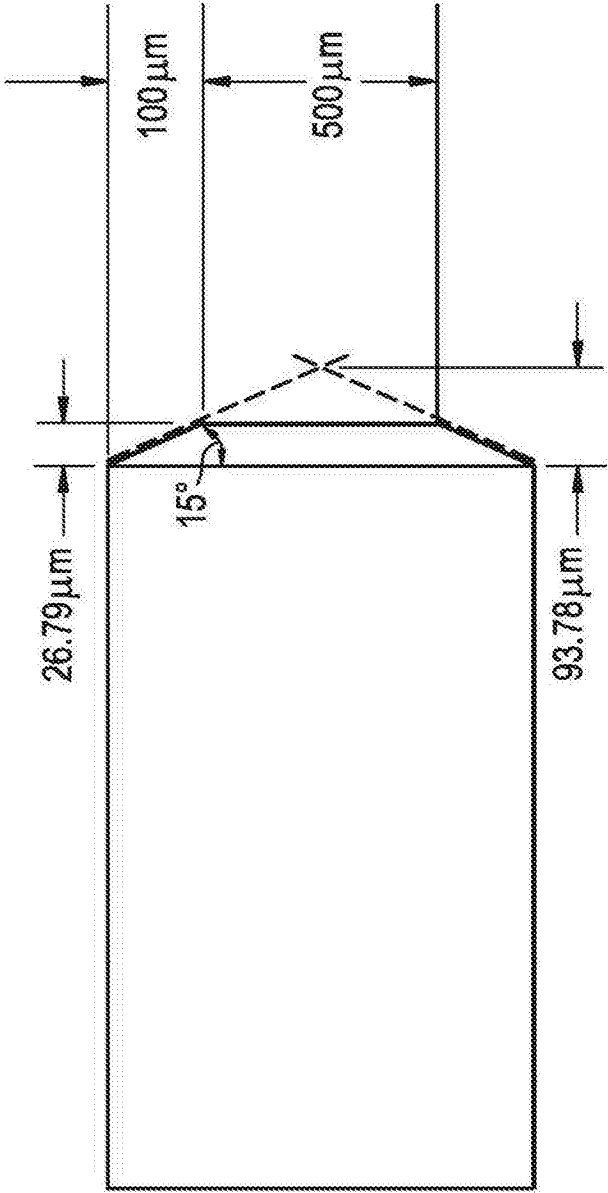


图12B

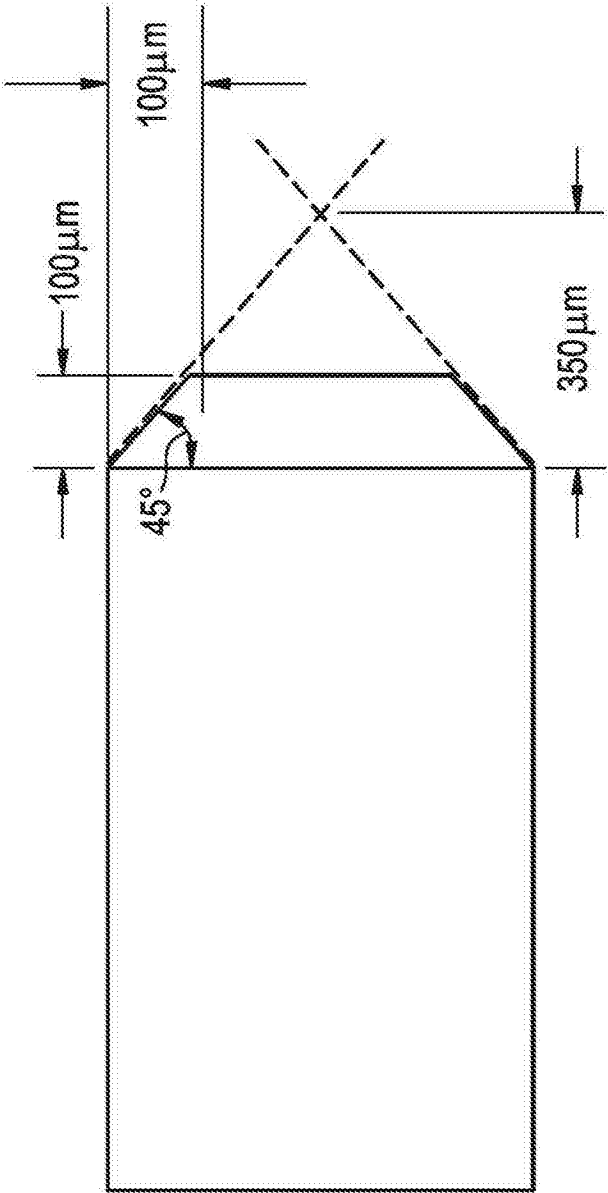


图12C

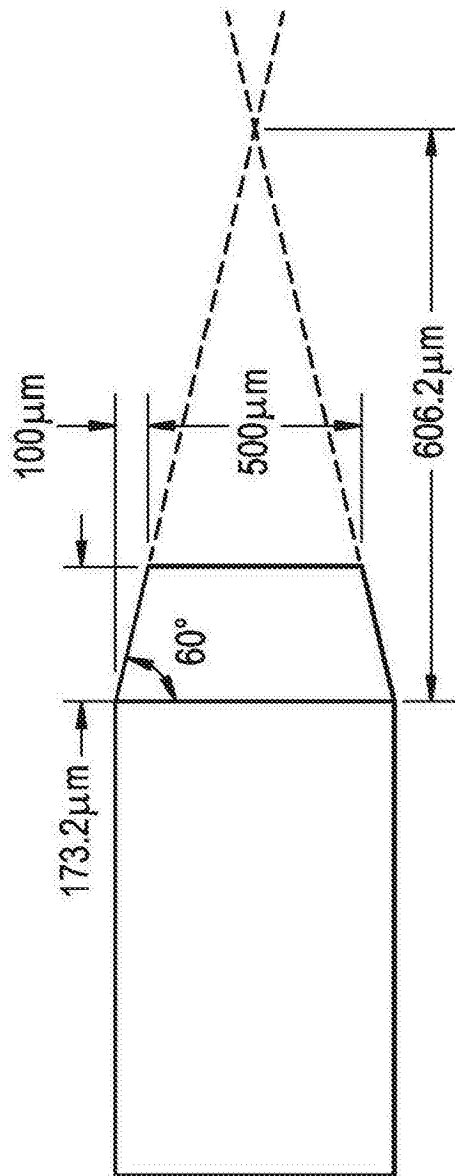


图12D

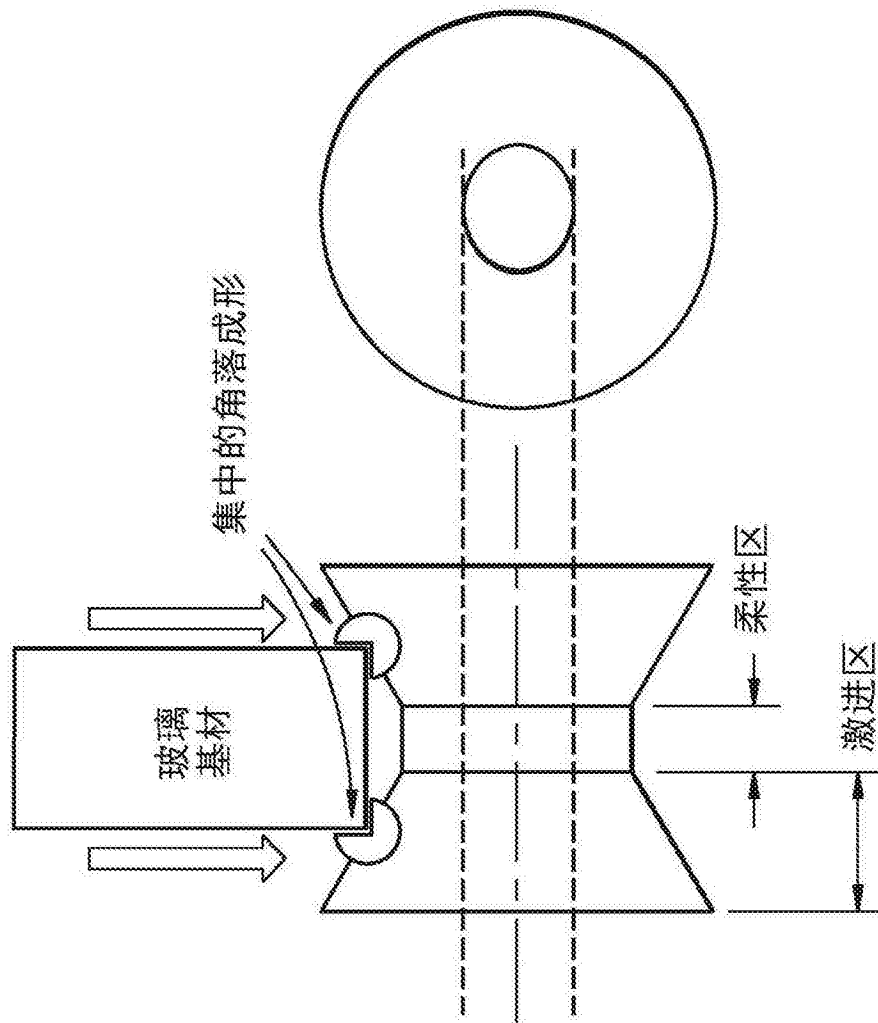


图13A

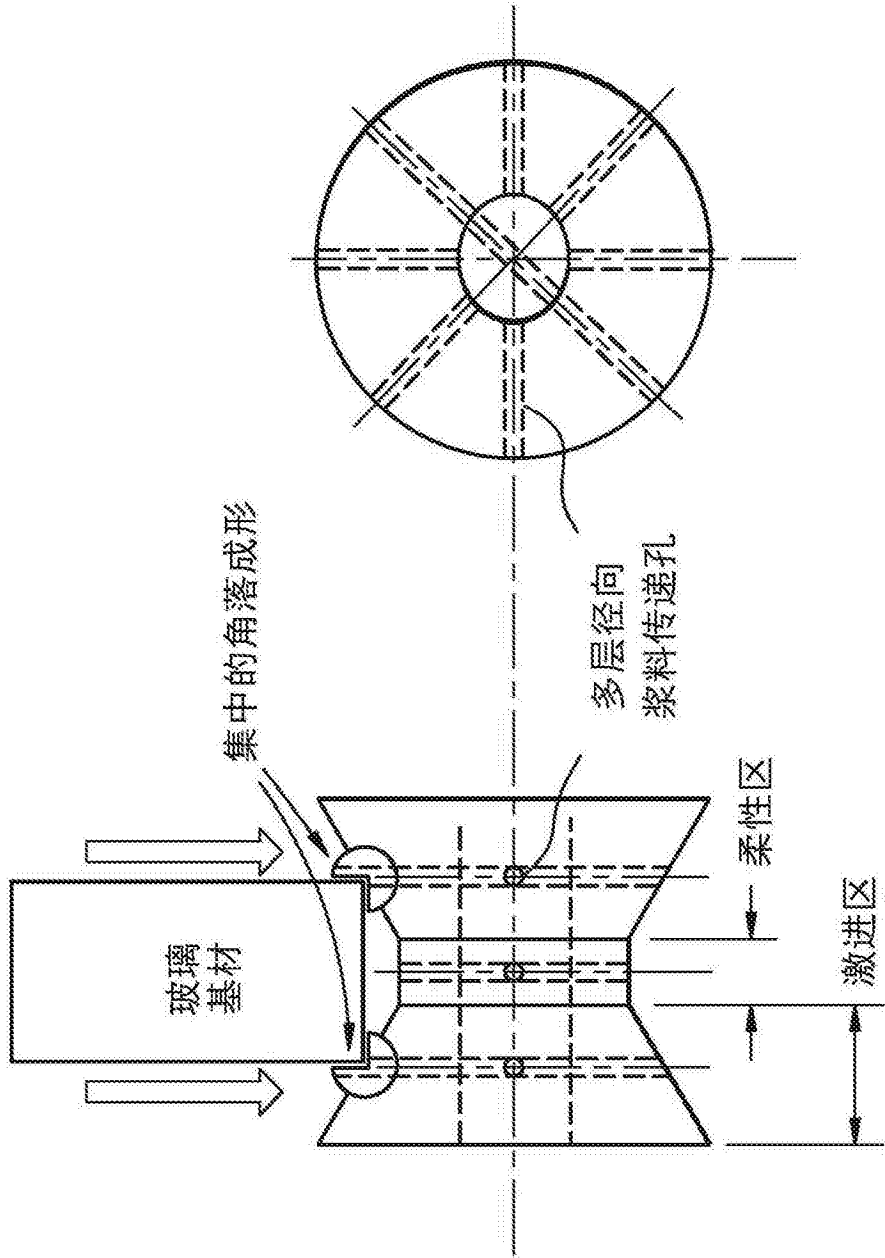


图13B

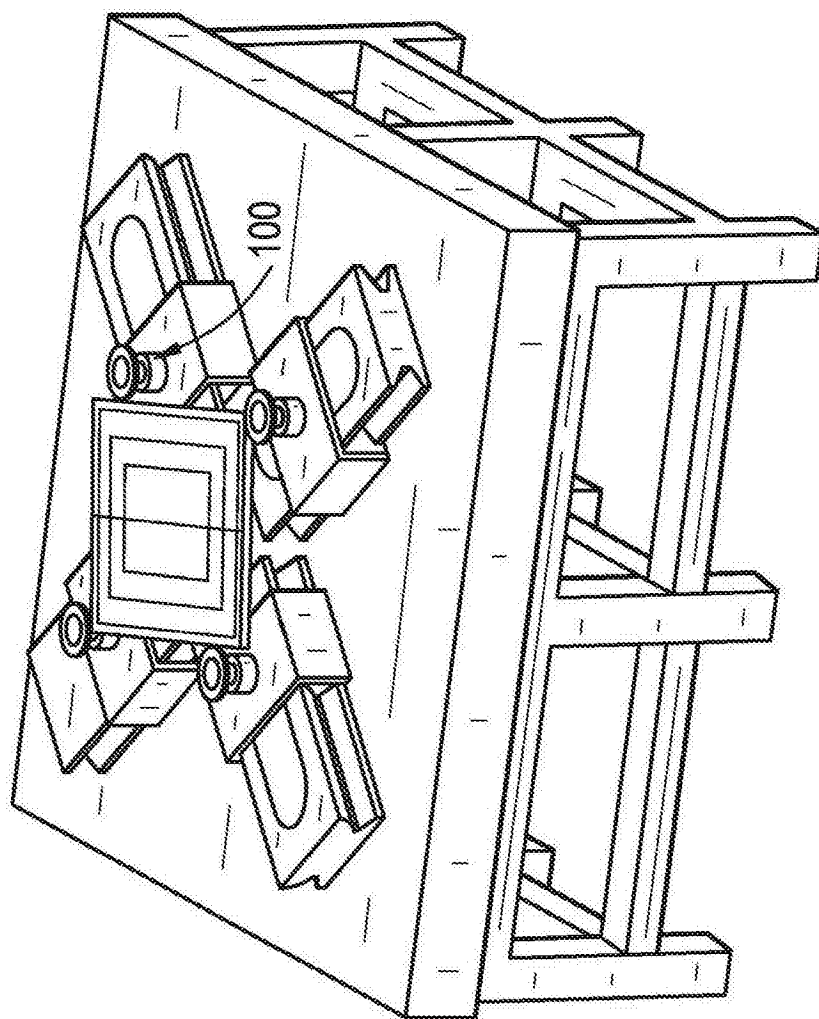


图14

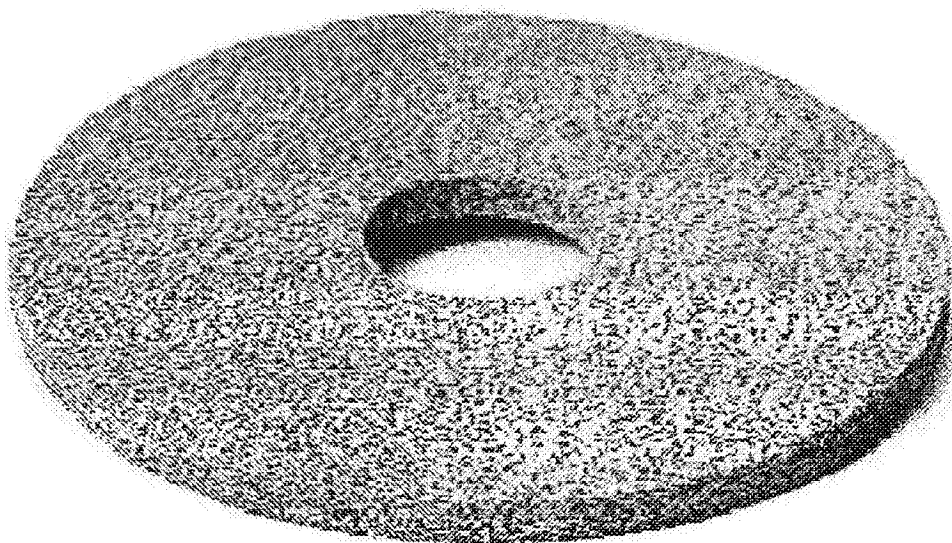


图15A

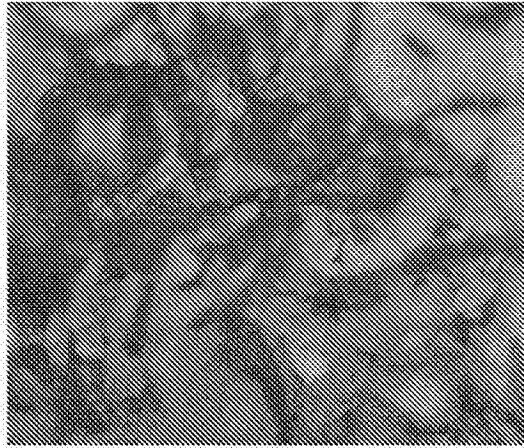


图15B

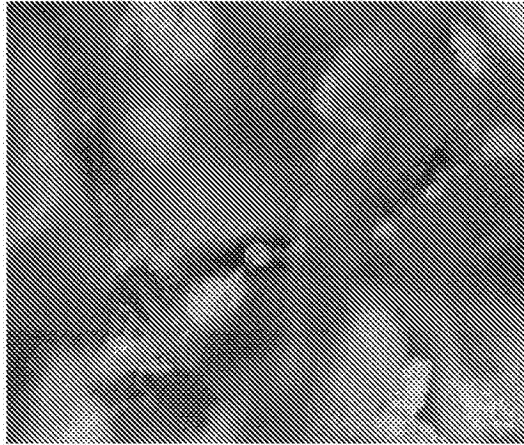


图15C



图15D

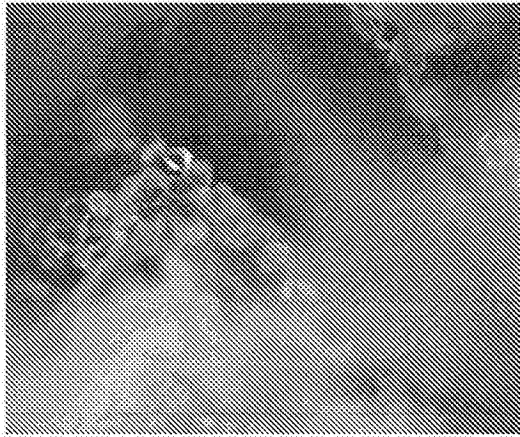


图15E

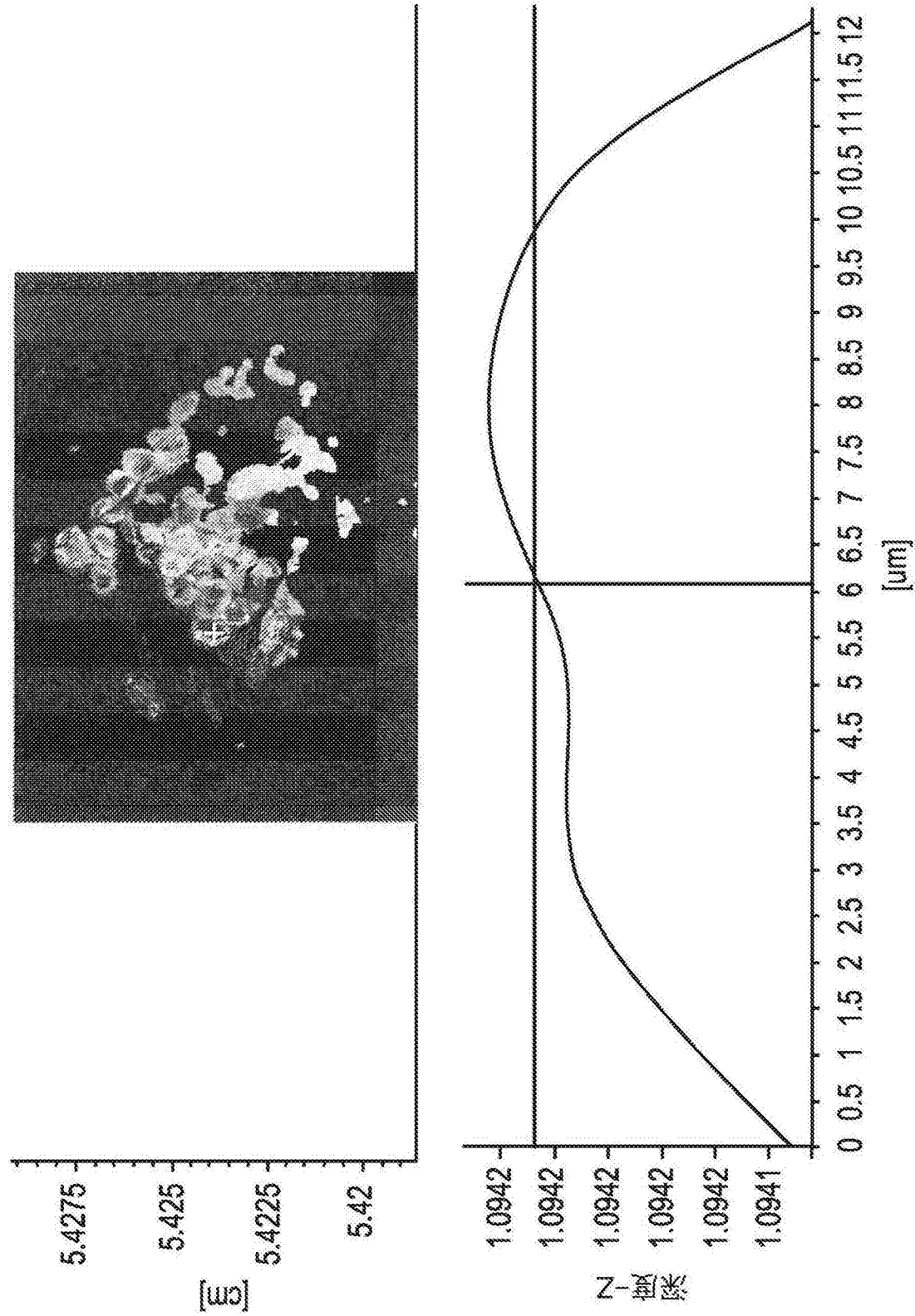


图16

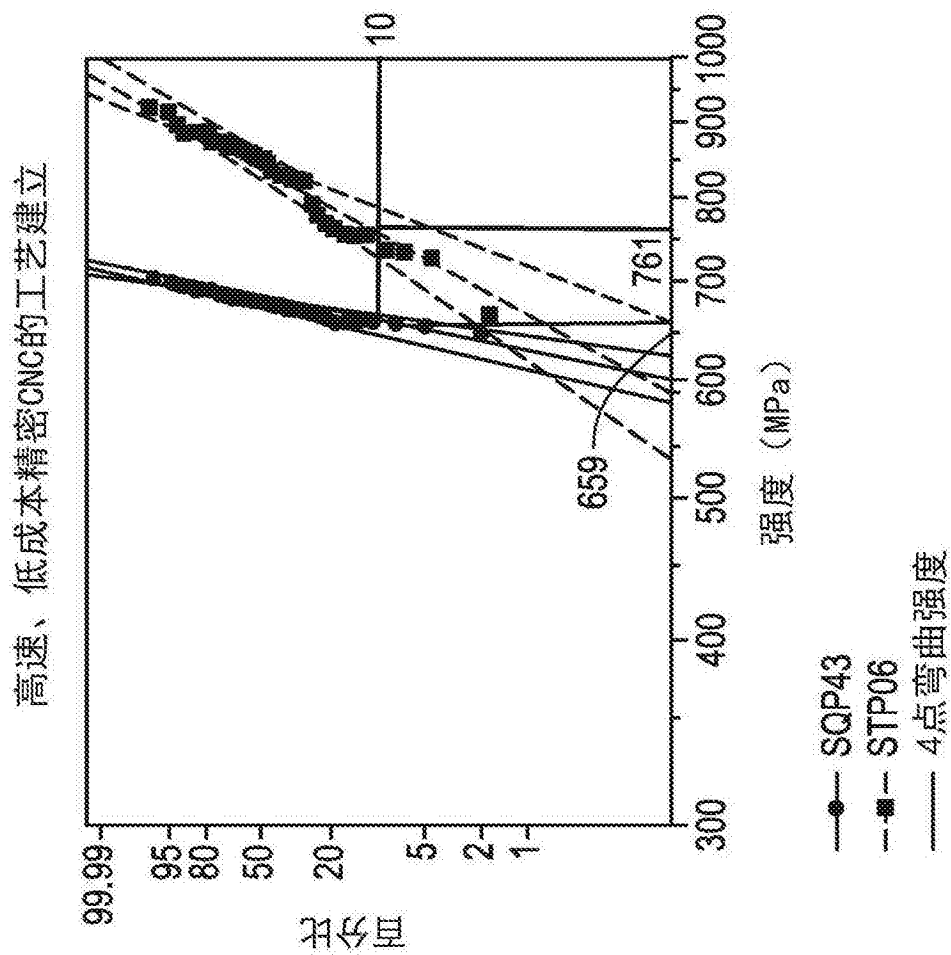


图17

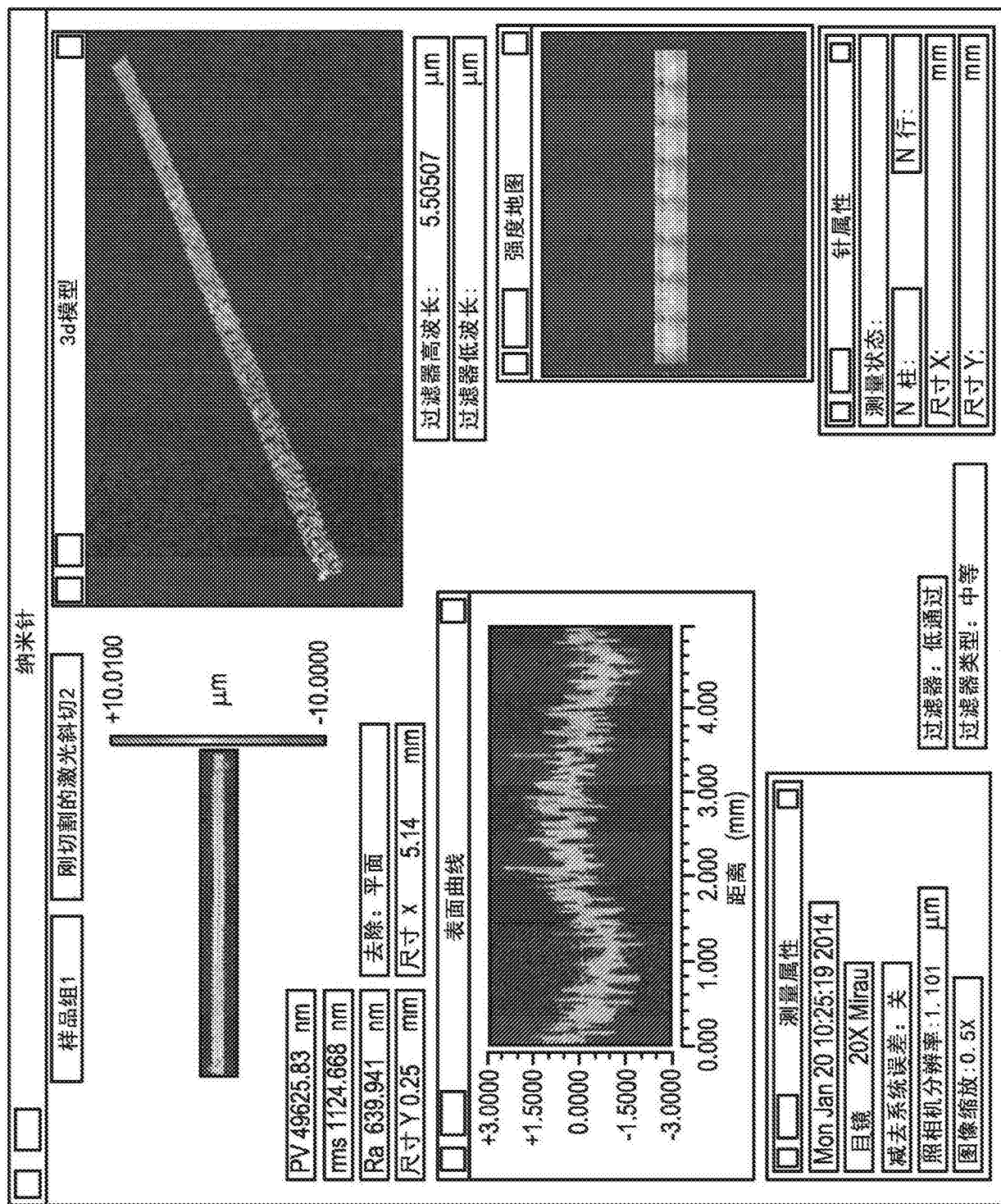


图18A

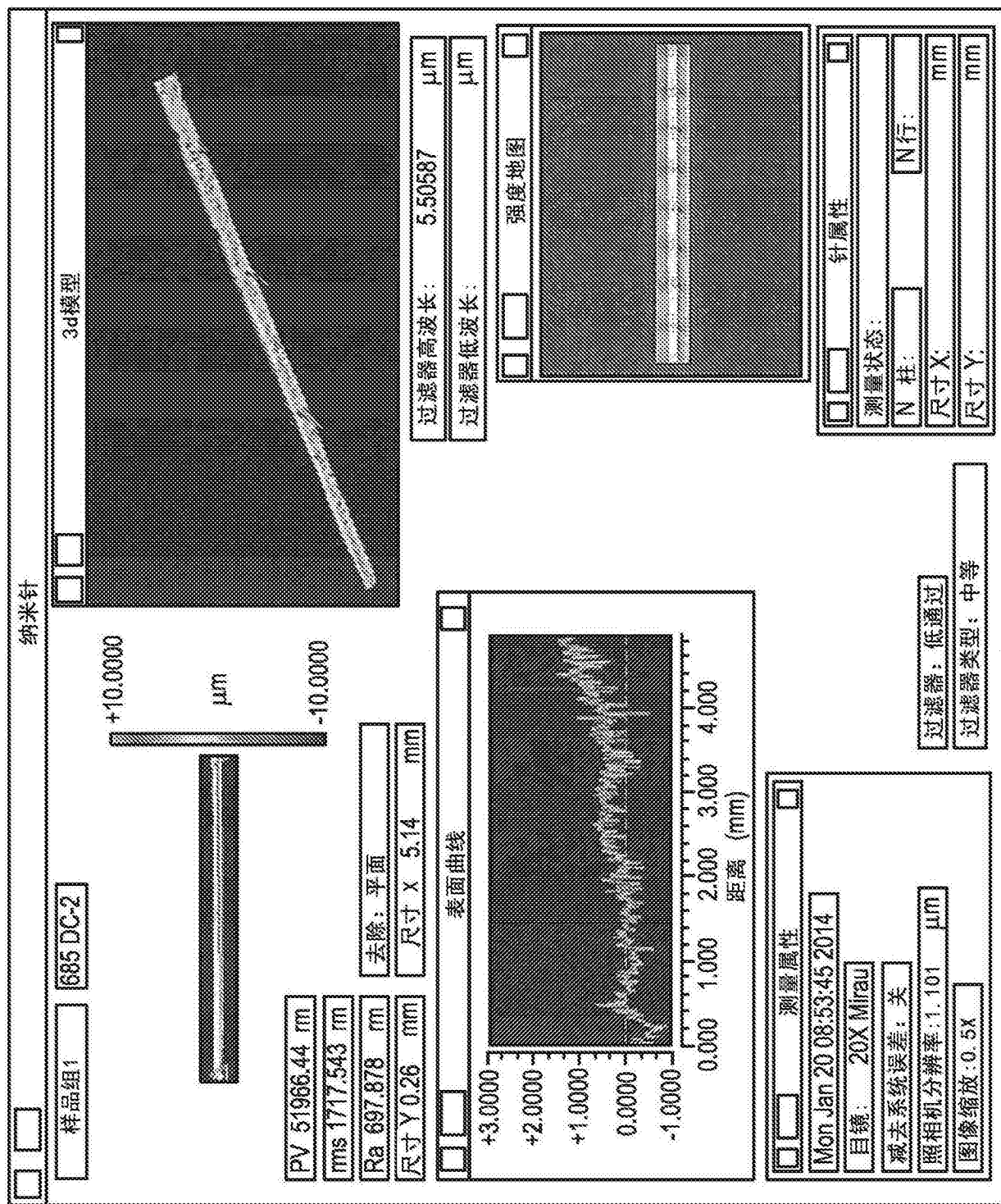


图18B

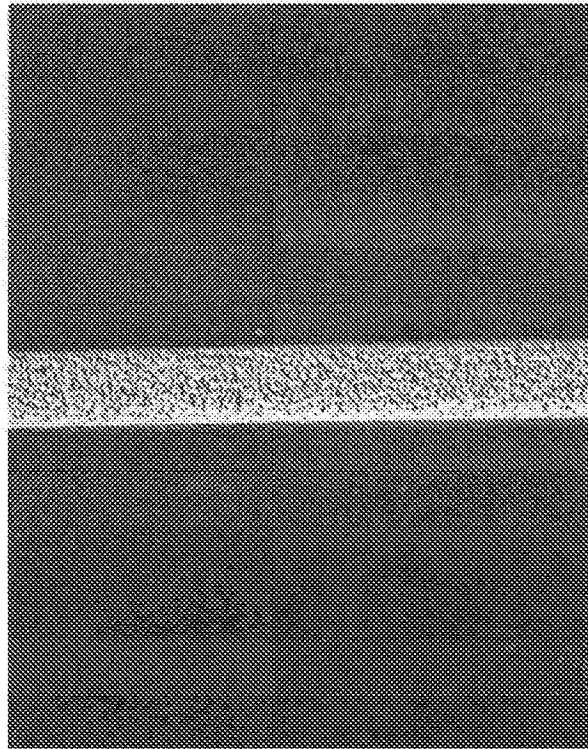


图 19B

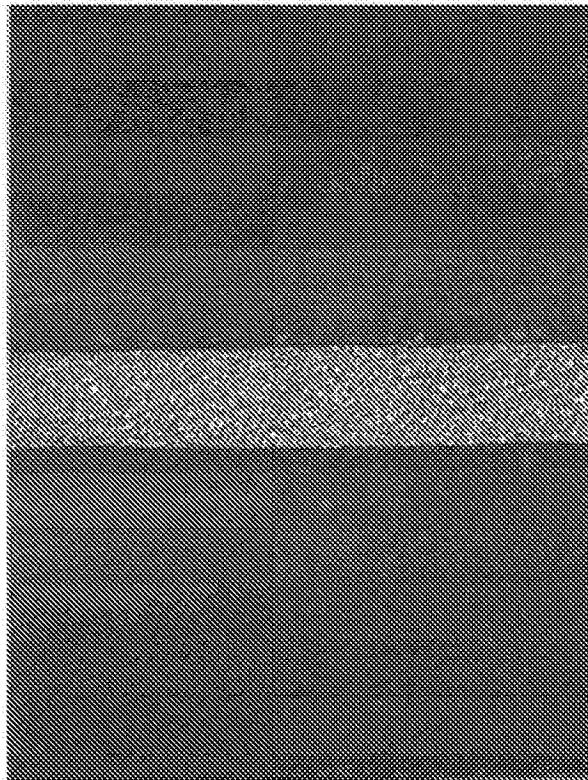


图 19A

图19

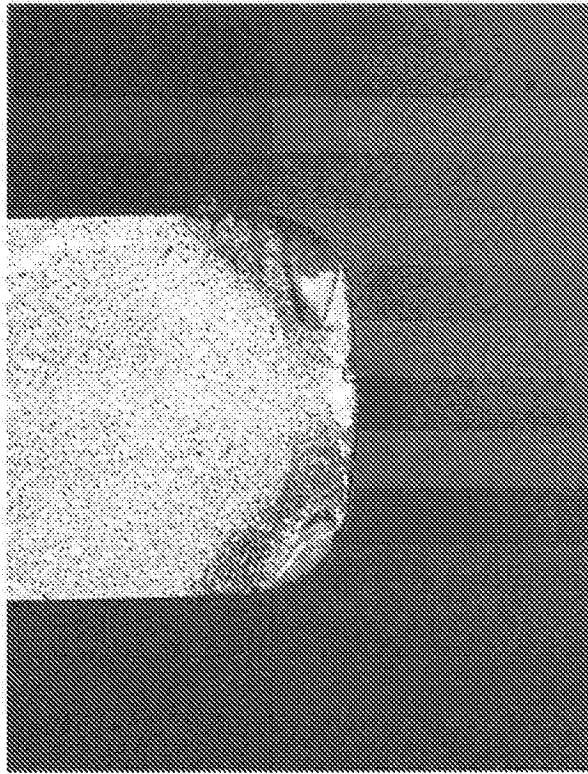


图 20B

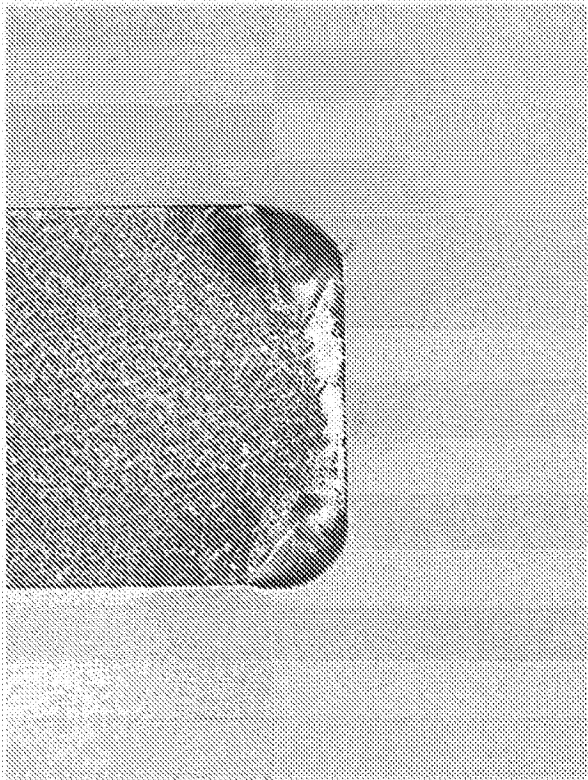


图 20A

图20