(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105377500 B
(45)授权公告日 2019.01.04

(21)申请号 201480030334.1
(22)申请日 2014.03.21
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105377500 A
(43)申请公布日 2016.03.02
(30)优先权数据
102013005136.3 2013.03.26 DE
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.11.26
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2014/000778 2014.03.21
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2014/154341 DE 2014.10.02
(73)专利权人 弗劳恩霍弗实用研究促进协会
地址 德国慕尼黑
专利权人 德国亚琛工业大学
(72)发明人 W.舒尔茨 U.埃佩尔特
(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001
代理人 卢江 刘春元
(51)Int.Cl.
B23K 26/06(2014.01)
B23K 26/40(2014.01)
B23K 26/36(2014.01)
B23K 26/382(2014.01)
B23K 26/38(2014.01)
(56)对比文件
CN 102218606 A,2011.10.19,
审查员 李尚华

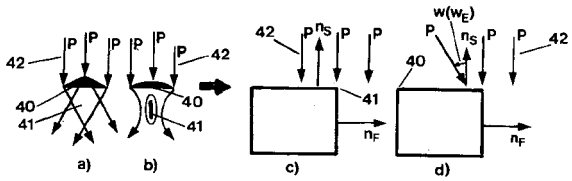
权利要求书1页 说明书9页 附图4页

(54)发明名称

用于借助于激光辐射剥除脆硬材料的方法

(57)摘要

本发明涉及一种用于借助激光辐射剥除脆硬材料的方法,其中通过剥除在材料中形成具有剥除凹陷的侧壁的侧壁角(w)的剥除凹陷(1),并且具有入射边缘(4),所述入射边缘被定义成材料表面的空间上伸展的区域,在所述区域处,材料表面的未被改变并因此未被剥除的部分过渡到剥除凹陷中,并且在所述入射边缘处,激光辐射的功率的空间分量被折射和聚焦到未被剥除的材料的体积中。调整激光辐射的分布,使得入射边缘具有小的空间伸展,使得激光辐射的由入射边缘的聚焦作用所检测的功率分量不足以在材料体积中产生电子密度的阈值 $\rho_{损伤}$ 并且因此避免材料的损伤。



CN 105377500 B

1.用于借助激光辐射剥除脆硬材料的方法，其中通过剥除在材料中形成具有剥除凹陷的侧壁的侧壁角w的剥除凹陷，其中所述侧壁角w被定义成剥除凹陷的侧壁上的表面法线与材料的未被剥除的表面的表面法线之间的角度，并且具有入射边缘，所述入射边缘被定义成材料表面的空间上伸展的区域，在所述区域处，材料表面的未被改变并因此未被剥除的部分过渡到剥除凹陷中，并且在所述入射边缘处，激光辐射的功率的空间分量被折射和聚焦到未被剥除的材料的体积中，其特征在于，调整激光辐射的分布，使得入射边缘具有小的空间伸展，使得激光辐射的由入射边缘的聚焦作用所检测的功率分量不足以在材料体积中产生电子密度的阈值$\rho_{损伤}$并且因此避免材料的损伤。

2.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，激光辐射的入射到剥除凹陷的区域中的材料的未被剥除的表面上的分量的坡印廷矢量P在入射边缘的方向上被调整为倾斜的，并且激光辐射的入射角w_E不小于零，其中入射角w_E被定义成激光辐射的坡印廷矢量P与激光辐射所入射的表面的法向矢量之间的角度的补角。

3.根据权利要求1或2所述的方法，其特征在于，将激光辐射的在入射边缘区域中落入剥除凹陷中的分量的坡印廷矢量P调整为垂直于剥除凹陷的侧壁上的法向矢量n_F并且激光辐射的入射角w_E为w_E=90角度，其中入射角w_E被定义成激光辐射的坡印廷矢量P与剥除凹陷的侧壁上的法向矢量n_F之间的角度。

4.根据权利要求1或2所述的方法，其特征在于，激光辐射在到剥除凹陷中的入口处的空间分布被调整为从垂直于激光光轴的方向上看为矩形的。

5.根据权利要求1或2所述的方法，其特征在于，激光辐射在到剥除凹陷中的入口处的空间分布被调整为高斯形的，并且高斯形分布在与光轴相距的一定距离处、即材料中的强度达到损伤材料的阈值$\rho_{损伤}$之处被矩形地分割，并且对于与光轴相距的更大距离，强度为零。

6.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，作为用于剥除的激光辐射使用由至少两个波长构成的波长混合，并且所述至少两个波长被选择成，使得干涉-衍射图案由于衍射和折射与具有所述波长中仅仅一个的激光辐射相比既沿着所述剥除凹陷的面出现又出现在材料体积中，使得强度分布的空间结构中的对比度K减小，其中对比度K根据迈克尔逊被定义为$K = (I_{max}-I_{min})/(I_{max}+I_{min})$，其中Imax和Imin说明强度分布的空间结构的最大和最小强度。

7.根据权利要求6所述的方法，其特征在于，选择由至少两个波长构成的波长混合，使得一个或多个波长的干涉最大值的空间位置落入另外的一个或多个波长的干涉最小值内。

8.根据权利要求6所述的方法，其特征在于，附加于所述至少两个波长选择以下波长，使得所述波长是所述至少两个波长的整数多倍或约数。

9.根据权利要求6所述的方法，其特征在于，每个波长都由专门的激光器来提供。

10.根据权利要求6所述的方法，其特征在于，不同波长由以下激光源来提供，所述激光源的波长在时间上被调制。

用于借助于激光辐射剥除脆硬材料的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于借助于激光辐射剥除、诸如切割、刻刮、钻孔脆硬材料的方法，其中通过剥除在材料中形成具有剥除凹陷的侧壁的侧壁角w的剥除凹陷，其中该侧壁角w被定义成剥除凹陷的侧壁上的表面法线与材料的未被剥除的表面的表面法线之间的角度，并且具有入射边缘，所述入射边缘被定义成材料表面的空间上伸展的区域，在所述区域处，材料表面的未被改变并因此未被剥除的部分过渡到剥除凹陷中，并且在所述入射边缘处，激光辐射的空间分量被折射和聚焦到未被剥除的材料的体积中。

背景技术

[0002] 这样的方法尤其是应用于显示器技术，其中必须处理薄玻璃衬底、一种脆硬物料。恰好工业显示器技术占领着越来越大的市场空间，并且倾向于越来越轻的设备，并且因此还倾向于更薄的玻璃板以用于例如智能电话和平板计算机。

[0003] 薄玻璃衬底在可以实现较厚玻璃的耐久性和机械稳定性时恰好提供针对显示器的优点。所述薄玻璃板几乎被用在全部平板显示器(FDP)中。

[0004] 常规的用于加工这样的薄玻璃板的方法是用所定义的刀片进行铣削，或者其基于向物料或材料中有针对性引入的裂缝形成的机械作用(刻刮和折断)。在使用激光辐射情况下的多种公知方法变型同样所基于的是，利用刻刮和然后折断的原理的机械作用，其方式是，用激光辐射的作用代替刻刮，并且物料或材料在激光辐射的作用以后被折断。常规机械加工(切割、钻孔)对于薄玻璃板而言与大的物料厚度相比显著更困难。也就是说，在机械刻刮的情况下引入微裂缝或者甚至拆出小部分、所谓的碎屑(Chip)，使得打磨或蚀刻作为后续加工工艺变得需要。

[0005] 还已经表明的是，在材料中形成的剥除凹陷的面或侧壁对引入的激光辐射具有衍射和折射作用。由此通过激光辐射的辐射分量生成干涉-衍射图案。一旦这些辐射分量又射到剥除凹陷的面上，就在那里加强地使表面粗糙化；该粗糙的光折射作用导致激光辐射的聚焦，并且可以在接界的材料中引起裂缝。对剥除凹陷的形成和所产生的裂缝具有非常大影响的还有所形成的剥除凹陷区域中的入射边缘(Eintrittskante)。也就是说，看上去射到入射边缘上的激光辐射所引起的裂缝形式的损伤以所述入射边缘为出发点。

[0006] US 2006/0091126 A1描述了用于在使用紫外激光的情况下加工由硅、砷化镓、磷化铟或单晶的蓝宝石构成的衬底的方法以及激光系统，以便在所述衬底中产生微结构图案。在此重叠两个激光束，以便制造具有小的深度的精细结构化的剥除凹陷。根据该方法仅仅产生剥除凹陷的小的深度(结构化)，使得剥除凹陷的光学作用是可忽略小的。此外，应该剥除材料表面，使得在窄的空间上形成具有尽可能多的直角的尖锐的边缘的精细结构化。

[0007] US 2011/0240616 A1描述一种在使用激光的情况下将脆的电子衬底切割成小的立方体的方法。如图4和5所示，以两个子步骤执行切割。在第一步骤中，在钻孔的边缘区域中以小的功率并且以小的剥除速率和接近小的热影响区域来执行平坦的钻孔(初始切割)。这虽然导致碎片的减少，但是不导致损伤的减少，该损伤由在第二子步骤期间激光辐射到

材料中的聚焦所引起，在该第二子步骤中以具有在第一平坦的钻孔(初始切割)的钻孔底部位置处的不期望的聚焦的伸展的边缘来产生第二深钻孔。

[0008] 文献US 2010/0176103 A1涉及用于从工件上剥除材料至预先确定的剥除深度的方法和装置。使用由一个或多个子束组成的激光束，所述子束的每一个具有定义的束轴，其中激光束的轴或者子束的单独的轴以预先确定的传播速度沿着剥除线被引导并且所述激光束具有定义具有值$I_0f(x)$和方向s的波印廷矢量S的预先确定的空间能量流密度，所述空间能量流密度建立具有由剥除面的引导部在剥除方向上形成的顶点的剥除面并且所述面建立剥除边缘。剥除面的由剥除面的法向量n和波印廷矢量的方向s形成的各个入射角α被以这样的方式设定，使得所述入射角在剥除面的顶点周围的预定义的区域中不超过最大值α_{max}。如果最大值被超过，这通过从剥除边缘的上部中的小的凿孔幅度到剥除边缘的下部中的大的凿孔幅度的变化来检测。

[0009] 文献US 2011/240616 A1涉及用于激光器加工脆的工件的方法，提供具有激光器参数的激光器，利用所述激光器采用第一激光器参数在所述工件中产生第一切口，以及利用所述激光器采用第二激光器参数在所述工件中产生第二切口，所述第二切口基本上与所述第一切口相邻而基本上避免由所述第一激光切口产生的碎片云。还公开了用于激光器加工脆的工件的设备，所述设备包括具有激光脉冲以及激光脉冲参数的激光器、被操作用于引导所述激光脉冲到所述工件的激光器光学器件、被操作用于相对被操作用于控制所述激光脉冲参数、运动台和所述激光器光学器件的控制器来移动所述工件的运动台。所述激光器被操作用于在第一地点利用第一激光器参数由所述控制器与所述激光器、激光器光学器件以及运动台协作地加工所述工件并且然后所述激光器被操作用于在与所述第一地点相邻的第二地点利用第二激光器参数来加工所述工件而避免由在所述第一地点的加工产生的碎片云。

发明内容

[0010] 本发明所基于的任务是，提供一种方法，利用该方法避免或至少竭尽全力地抑制特别是以入射边缘为出发点的或在原因上归因于射到入射边缘上的激光辐射的前述损伤。

[0011] 该任务通过根据本发明的方法来解决。

[0012] 对于根据本发明的方法重要的是，调整激光辐射的分布，使得入射边缘具有小的空间伸展，使得激光辐射的由入射边缘的聚焦作用所检测的功率分量不足以在材料体积中产生电子密度的阈值$\rho_{损伤}$并且因此避免材料的损伤。

[0013] 因此激光辐射的由入射边缘的聚焦作用所检测的功率被调整成，使得材料中的通过入射边缘的聚焦所达到的强度不达到损伤材料的阈值$\rho_{损伤}$。按照根据本发明的方法，不是简单地缩小功率并且产生损伤少的第一钻孔，而是在一个步骤中以大功率进行切割并且仅仅缩小功率的导致损伤的分量。

[0014] 根据本发明的措施充分利用以下认识：在到体积中的入射边缘处的聚焦作用是可以避免的重要作用。

[0015] 通过该措施显著地减少或可以避免从入射边缘出发的损伤，因为因此减小激光辐射的强度并且由此避免脆硬材料的空间局部化的进而过高的负荷。

[0016] 如前面提到的那样，在机械加工薄玻璃板时出现裂缝。但是这样的裂缝在利用激

光辐射加工玻璃板时也能观察到。本发明人已经发现，这些裂缝表现为至少三种不同的表现形式：

[0017] 第一类裂缝：损伤、裂缝形成/碎屑出现在物料的背侧。第一类裂缝在前侧——激光辐射入射之处——还未发生损伤并且也还未进行剥除时就已经出现。

[0018] 第二类裂缝：裂缝或损伤——亦称尖状物——以入射边缘为出发点，该入射边缘是从工件的表面的未改变的部分到所形成的剥除凹陷的侧向剥除侧壁中的过渡部。

[0019] 第二类的裂缝或损伤在——与第三类裂缝相比——大的深度上延伸到材料的体积中。这些以入射边缘为出发点的材料改变/损伤也可以在体积中变得可见或产生(其于是也被称为“细丝”；物理原因是克尔效应和自聚焦)或者甚至到达工件的背侧或背向激光辐射的表面。

[0020] 第三类裂缝：精细的没那么深地侵入的裂缝的形成附加于第二类裂缝或第二类损伤——沿着被剥除的表面(切割边缘)——出现；其不限于接近入射边缘的区域，并且出现在激光辐射在剥除凹陷中入射到被剥除的表面(剥除侧壁)、即剥除侧壁上之处。第三类裂缝从被剥除的表面伸展到材料中。第三类裂缝与第一类裂缝相比以较少的深度侵入到材料中。剥除凹陷的粗糙表面与入射边缘相比具有拥有更小曲率半径的粗糙度。剥除凹陷的粗糙表面的聚焦作用与入射边缘的聚焦作用相比显著更强。

[0021] 所述第三类裂缝因此通过本发明的方法被避免或者至少与常规方法相比被明显减少。

[0022] 优选地在根据本发明的方法中，激光辐射的入射到剥除凹陷区域中的材料的未被剥除的表面上的分量的坡印廷矢量P在入射边缘的方向上被调整为倾斜的，并且选择激光辐射的入射角w_E，使得其不小于零(w_E>=0角度)，其中入射角w_E被定义成激光辐射的坡印廷矢量P与激光辐射所入射的表面的法向矢量之间的角度的补角。

[0023] 此外可能有利的是，将激光辐射的在剥除凹陷区域中落入剥除凹陷中的分量的坡印廷矢量P调整为垂直于剥除凹陷的侧壁上的法向矢量n_F并且将激光辐射的入射角w_E选择为w_E=90角度，其中入射角w_E被定义成激光辐射的坡印廷矢量P与剥除凹陷的侧壁上的法向矢量n_F之间的角度。

[0024] 当激光辐射在到剥除凹陷中的入口处的空间分布被调整为矩形时(矩形)，于是得出该方法的一个有利的实施方式。也就是说由此实现，入射边缘的区域具有小的伸展，并且因此激光辐射的从入射边缘的区域所检测的并聚焦到材料中的分量变小。

[0025] 激光辐射在到剥除凹陷中的入口处的空间分布也可以被调整为从垂直于激光辐射的入射方向来看为高斯形的，并且高斯形分布在与光轴相距的一定距离处、即材料中的强度达到损害材料的阈值$\rho_{损伤}$之处被矩形地分割；对于与光轴相距的更大距离，激光辐射的强度被调整为零，亦称高斯矩形。激光光轴由坡印廷矢量在激光束的横截面上求平均的平均值来定义。激光辐射的方向在激光束的横截面之上改变，并且由坡印廷矢量的局部方向来定义。典型地，坡印廷矢量在激光束的焦点之上向激光光轴倾斜，并且在焦点之下远离激光光轴地指向。激光束中的强度的高斯矩形状分布被定义成高斯形分布，该高斯形分布自与激光光轴相距所定义的距离起——例如通过光圈——而不再具有强度。在数学上，高斯矩形是高斯形分布与具有最大值1的矩形分布的乘积。矩形分布是指绕激光光轴旋转的2D矩形分布。

[0026] 在所说明的用于借助激光辐射剥除脆硬材料的方法中，通过剥除来在材料中形成剥除凹陷，所述剥除凹陷的亦称侧壁的面对所引入的激光辐射产生衍射和折射作用，并且由此所述激光辐射的辐射分量在剥除凹陷内生成干涉-衍射图案。一旦所述辐射分量又射到所述剥除凹陷的面上并且侵入到材料体积中，干涉-衍射图案就在那里造成沿着所述面在空间上可变的剥除，并且作为结果使表面粗糙化并且在材料体积中引起裂缝。

[0027] 在该方法的另一种设计方案中，仅仅作为用于剥除的激光辐射使用由至少两个波长构成的波长混合，其中所述至少两个波长被选择成，使得干涉-衍射图案由于衍射和折射与具有所述波长中仅仅一个的激光辐射相比既沿着所述剥除凹陷的面出现又出现在材料体积中，使得强度分布的空间结构中的对比度K减小，其中对比度K根据迈克尔逊被定义为K = (Imax-Imin)/(Imax+Imin)，其中Imax和Imin说明强度分布的空间结构的最大和最小强度。在此，根据迈克尔逊的对比度K是针对衍射最大值和衍射最小值的周期图案的度量。

[0028] 通过这些措施，减小了剥除凹陷的侧壁的表面区域中的强度对比度，并且由此避免了材料的在空间上局部化的并且因此过高的负荷，更确切地说是因为，为了加工脆硬材料使用了具有两个重叠的不同波长的激光辐射。

[0029] 也就是说，具有不同波长的激光辐射的重叠对每个波长产生在剥除凹陷中空间上移位的衍射图案。通过选择所使用的辐射分量的合适波长、所述(至少两个)要重叠的波长的功率和焦半径，具有第一波长的激光辐射的衍射最大值可以落入具有第二波长的激光辐射的衍射最小值所在之处。该重叠的结果是，重叠的衍射结构的对比度变得明显更小，其结果是，实现了高剥除速率以及如果有的话、剥除以后小的应力和/或裂缝。

[0030] 为了实现最小的对比度，必须调整要重叠的辐射分量的波长以及属于所述波长的功率和辐射分量的所属的焦半径。

[0031] 在方法的一种优选的实施方式中，选择由至少两个波长构成的波长混合，使得一(些)波长的干涉最大值的空间位置落入另一(些)波长的干涉最小值内，由此实现，剥除侧壁不被粗糙化，并且因此也不形成粗糙的剥除边缘的聚焦作用，并且因此未达到出现损伤/裂缝的剥除的阈值$\rho_{损伤}$。

[0032] 此外，可以附加于所述至少两个辐射分量使用激光辐射的如下辐射分量，即所述辐射分量具有以下波长，所述波长是可称为基本波长的至少两个波长的整数多倍或约数。

[0033] 每个波长都可以由专门的激光器来提供。这所具有的优点是，激光辐射的不同波长的焦半径和功率分量可以被调整。如果激光源允许波长的调制，则可以由激光源或激光设备提供不同波长。

[0034] 如果激光源发射多个波长，比如在二极管激光器的情况下就是这种情况，则可以由波长经调制的激光源或激光设备来提供不同波长。

附图说明

[0035] 本发明的另外的细节和特征从下面根据附图对实施例的描述中得出。在附图中：

[0036] 图1示意性地示出了具有对第二类和第三类的不同裂缝形成/损伤的表征的剥除凹陷；

[0037] 图2示出了模拟的剥除凹陷，其示出所形成的第二类和第三类裂缝的伸展；

[0038] 图3示出了用于阐述具有粗糙剥除侧壁的剥除凹陷的产生的示意性简图；

[0039] 图4示出了通过入射激光辐射在剥除侧壁处的衍射而产生的衍射图案；

[0040] 图5示出了产生第二类的裂缝的原理(绘图a、b)、以及根据本发明的用于避免或至少抑制这些裂缝的方法的原理(绘图c、d)；

[0041] 图6示出了利用激光辐射的礼帽形强度分布生成的模拟剥除凹陷；

[0042] 图7示出了根据图6、但是具有激光辐射的由礼帽分布和高斯分布组成的空间强度分布的视图；

[0043] 图8示出了根据图6、在使用具有射束半径<4μm的激光辐射的情况下具有激光辐射强度的狭窄的空间高斯分布的视图；

[0044] 图9示出了根据图6、具有激光辐射在到剥除凹陷中的入口处的空间礼帽分布的视图；

[0045] 图10示出了用于阐述第三类裂缝的产生的图序列a至e；以及

[0046] 图11以放大模拟图示出了根据图5的图a的剥除凹陷中的强度的空间分布的对比度。

具体实施方式

[0047] 在图1的图示中示意性地示出了V形剥除凹陷1，该剥除凹陷1形成在具有厚度x的薄玻璃材料2中。该剥除凹陷1具有剥除侧壁3，该剥除侧壁3从材料的表面5处的入射边缘4出发。

[0048] 针对在此使用的不同概念可以应用下列定义：阈值$\rho_{剥落}$是电子密度的阈值，在该阈值的情况下开始剥落/剥除；阈值$\rho_{损伤}$是电子密度的阈值，在该阈值的情况下损伤/裂缝开始；脉冲参数是用来表征入射激光辐射的空间、时间和光谱特性的一组参数。脉冲参数至少包括下列各项的值：

[0049] -脉冲时长；

[0050] -脉冲中的强度的最大值；

[0051] -时间上的脉冲形状；在此是单脉冲或脉冲序列(多重脉冲、脉冲突发)中的激光辐射的强度的时间分布；

[0052] -强度的空间分布；以及

[0053] -强度的光谱分布(波长混合)。

[0054] 入射边缘是工件表面的在空间上伸展的区域：在该区域处，工件表面的未改变部分过渡到表面的已经进行物料剥除并已经产生剥除凹陷的区域。

[0055] 剥除凹陷的边缘是通过剥除材料生成的表面。

[0056] 工件的背侧或下侧是工件的背向激光辐射的表面。

[0057] 在损伤/裂缝的前述三个不同的表现形式中，第一类裂缝是背侧损伤，第二类裂缝是入射边缘损伤，第三类裂缝是从剥除凹陷的表面、即从剥除凹陷的侧壁出发的损伤。

[0058] 为物料中的电子密度定义了两个阈值$\rho_{损伤}$、$\rho_{剥落}$，所述阈值分别导致物料的损伤$\rho_{损伤}$或剥除$\rho_{剥落}$。对于每种物料，可以给电子密度ρ的这些不同阈值$\rho_{损伤}$、$\rho_{剥落}$，分配两组激光辐射的参数值，其中$\rho_{损伤}<\rho_{剥落}$。

[0059] 入射边缘的光折射特性、例如聚焦特性对于本发明是特别重要的。也就是说，入射边缘可能具有能够导致两种不期望的效果的几何形状和伸展，但是这两种不期望的效果可

以通过根据本发明的方法来避免或显著减少。首先，可能由于该几何形状而发生入射激光辐射到物料中的不期望的聚焦；以及其次，入射激光辐射的从入射边缘所检测的并然后聚焦到材料中的功率可能由于该伸展而不期望地具有某个值，使得入射边缘的焦点处的强度生成如下电子密度ρ：该电子密度ρ超过了电子密度的损伤物料/材料的阈值$\rho_{损伤}$，并且未达到电子密度的用于剥除的阈值$\rho_{剥落}$。

[0060] 在损伤物料/材料的情况下，出现前面已经阐述的三个不同种类的裂缝。

[0061] 第一类裂缝是这样的在前侧——激光辐射入射之处——还未发生损伤并且也未进行剥除时就已经出现的裂缝。

[0062] 第二类裂缝和第三类裂缝根据图1和2被阐释。

[0063] 在图1和2中，第二类裂缝用附图标记22来表示，并且第三类裂缝用附图标记33来表示。

[0064] 如果从被剥除的表面出发的裂缝22到达工件的下侧或背向激光辐射的表面，则常常不再能够将其与第一类裂缝、即在工件表面还未被剥除时工件下侧的损伤相区分。第三类裂缝或损伤是在粗糙的剥除凹陷处、即在被剥除的表面处并且被剥除的表面与平坦性具有偏差之处开始。

[0065] 剥除凹陷与平坦性的该偏差是通过如下方式产生的：入射激光辐射在剥除凹陷的入口处并且在其走向上被衍射到工件的深度中(剥除正面、切割边缘)并且具有衍射结构，如其在图3和图4中所示。

[0066] 该衍射结构是强度的空间调制，并且生成与平坦剥除正面的偏差。剥除凹陷中针对辐射强度所产生的衍射结构导致剥除正面处的强度的过高，并且因此导致剥除正面的与光滑或平坦剥除正面的偏差。

[0067] 根据本发明，为了避免从要加工的物料的入射边缘出发的损伤/裂缝形成形式的第二类裂缝的出现，将激光辐射的由入射边缘的聚焦作用所检测的功率调整为，使得材料中的通过入射边缘的聚焦所达到的强度不达到损伤材料的阈值$\rho_{损伤}$。

[0068] 在图5中示出了图序列，其中绘图a)和b)示出了产生第二类裂缝的原理，而具有绘图c)和d)的图序列用于阐释根据本发明的用于避免或显著减少这样的第二类裂缝的产生的措施。

[0069] 在绘图5a)和5b)中通过区域40标示出剥除凹陷的相应入射边缘。因此，这些入射边缘包括在空间上伸展的区域40，激光辐射被聚焦在该区域中。在绘图5c和5d)中，空间上伸展的区域40由于其位置而被分配为从未被剥除的表面到剥除凹陷的侧壁中的过渡区。

[0070] 图5c示出，激光辐射的在入射边缘区域中落入剥除凹陷中的分量的坡印廷矢量P被调整为垂直于剥除凹陷的侧壁上的法向矢量n_F并且激光辐射的入射角w_E选择为w_E=90角度。

[0071] 在工件的材料中形成用附图标记41表示的损伤的区域或细丝的开始。

[0072] 用箭头42来说明坡印廷矢量P(具有方向和绝对值)，其时间平均绝对值也被称为强度。

[0073] 在图5的绘图c)和d)中，除了坡印廷矢量P(附图标记42)以外还示出了未被剥除的表面上的法向矢量n_s和被剥除的表面(切割边缘、剥除凹陷的边缘)上的法向矢量n_F。最后，在图5的绘图d)中说明了坡印廷矢量P在未被剥除的表面上的入射角w_E。如根据图5可见，入

射角w_E被定义成激光辐射的坡印廷矢量P与激光束所入射的表面的法向矢量n_S之间的角度的补角或者激光辐射的坡印廷矢量P与剥除凹陷的侧壁上的法向矢量n_F之间的角度。激光束要么入射到具有表面法线n_F的剥除凹陷的侧壁上(图5c)，要么入射到具有表面法线n_S的未被剥除的表面上(图5d)。当坡印廷矢量平行于材料的未被剥除的表面上的表面法线n_S延伸时，入射角w_E等于侧壁角(例如参见图5c)。

[0074] 根据本发明，现在调整激光辐射，以便避免辐射的两个空间分量被入射边缘折射和聚焦到未被剥除的材料中并且在材料中重叠，使得超过损伤的阈值$\rho_{损伤}$并且因此未达到剥除的阈值$\rho_{剥落}$。因此不产生第二类裂缝/损伤。

[0075] 入射边缘的周围的伸展是通过如下方式定义的：入射到入射边缘的起聚焦作用的部分中的激光辐射包含足够的功率，使得在该功率的焦点处至少可以达到材料或物料的损伤阈值。因此，为了避免材料中通过在剥除凹陷的入射边缘处被折射和聚焦到材料中的激光辐射产生的损伤，考虑和正确调整两个参量、即首先是入射边缘的几何形状、以及其次是入射激光辐射的方向、以及因此坡印廷矢量与处于表面的未被剥除部分上的法向矢量n_S的角度w。

[0076] 如前面提及的那样，入射边缘的几何形状导致激光辐射的折射，并且在不利情况下导致入射激光辐射的聚焦，如这在图5的绘图a)和b)中予以示意性示出。入射边缘的几何形状理想地具有尖锐的边缘，所述边缘不具有空间伸展；因此，入射边缘的几何形状理想地是这样的没有曲率的几何形状(其理想地是具有曲率半径r的边缘，该曲率半径具有值r=0)。为了实现具有曲率半径近似r=0的边缘(利用后面段落中的标准)，根据本发明的措施在于调整入射强度的高斯矩形分布。

[0077] 按照根据本发明的方法，入射边缘的几何形状被调整为，使得激光辐射的被入射边缘聚焦或由入射边缘的聚焦作用所检测的功率小的以至于可通过聚焦实现的强度未达到损伤工件的材料的阈值$\rho_{损伤}$。

[0078] 要观察的第二参量是入射激光辐射的方向、即激光辐射的坡应廷矢量P在工件的材料的未被剥除的表面上的方向。入射激光辐射的方向理想地在剥除凹陷以外、即在工件表面的未被剥除的部分上应当平行于未被剥除的表面上的法向矢量n_S，并且在剥除凹陷之内应当垂直于剥除凹陷的边缘上的法向矢量n_F。

[0079] 按照根据本发明的方法，入射激光辐射在工件材料的未被剥除的表面上的方向、因此激光辐射的坡印廷矢量P的方向现在在剥除凹陷的方向上与法向矢量n_S倾斜角度w，也就是说，该方向在未被剥除的表面上与法向矢量n_S形成入射角w>=0(参见图5的绘图d))，并且在剥除凹陷内理想地垂直于剥除凹陷的边缘上的法向矢量n_F。

[0080] 在图6至9中，现在示出了可用于影响入射边缘的几何形状的不同措施的结果。

[0081] 图6示出了利用入射激光辐射实现的剥除凹陷的模拟形成，该入射激光辐射具有入射激光辐射的礼帽形空间强度分布(即横向于入射方向)。通过该措施，入射边缘的区域被高度缩小或不再存在，并且仍存在的损伤从入射边缘出发与通常使用的激光辐射的高斯形空间分布的情况下相比具有显著更小的到材料中的侵入深度。

[0082] 图7现在示出了根据图6的模拟图示，但是其中激光辐射具有入射激光辐射的如下空间强度分布：该空间强度分布由与激光光轴相距大距离的礼帽分布和接近激光光轴的高斯分布组成。明显可见，在此，激光辐射的分量由于上部区域中的礼帽分布而仍然还得出近

似平行的剥除侧壁，但是具有圆形的剥除底部，该圆形的剥除底部是激光辐射的基于高斯分布的分量的结果。除此之外，该模拟的结果与入射激光辐射的空间强度分布仅仅为礼帽形的情况相比具有到材料中的稍大的侵入深度。

[0083] 在如图8中所示的模拟中，使用了具有窄射束半径(< 4μm)和高斯分布的激光辐射。在入射边缘的区域中，从入射边缘区域中聚焦的激光辐射的裂缝形成作用、即第二类裂缝或入射边缘损伤不再存在。

[0084] 仅仅第三类裂缝、即从剥除凹陷的表面出发、即从剥除凹陷的侧壁出发的损伤仍然出现。尽管第三类裂缝仍然存在，但是明显更小地产生影响，并且剥除或钻孔速度采取更大的值。小侧壁角的实现实验上被证实。

[0085] 图9示出了一模拟，其中激光辐射是脉冲的，并且激光辐射的波长逐个脉冲地交替地从500nm变换到1000nm。入射边缘区域的有利地形成的大曲率的几何形状导致从入射边缘区域到体积中的聚焦强度缩小，并且因此不超过损伤阈值，并且避免裂缝形成的该原因。

[0086] 在该方法的一个设计方案中，作为用于剥除的激光辐射使用由至少两个波长构成的波长混合。在此，所述至少两个波长被选择成，使得干涉图案由于衍射和折射与具有所述波长中仅仅一个的激光辐射相比既出现在材料体积中又出现在剥除凹陷的体积中，使得强度分布的空间结构中的对比度K减小，使得由此避免材料的在空间上局部化的并因此过高的负荷。在此，对比度K根据迈克尔逊被定义成K = (Imax-Imin)/(Imax+Imin)，其中I说明强度。

[0087] 因此，强度最大值与强度最小值之间的对比度被减小，该对比度否则是激光辐射在剥除凹陷的表面或侧壁处并且由于激光辐射的干涉能力造成的衍射的原因。

[0088] 通过根据本发明重叠具有至少两个不同波长的激光辐射，关于每个波长产生在剥除凹陷中在空间上移位的衍射图案。因此，所述至少两个波长、还结合相应激光辐射的功率和焦半径的调整可以被选择成，使得具有第一波长的激光辐射的衍射最大值落入具有第二波长的激光辐射的衍射最小值所在之处。作为该重叠的结果，重叠的衍射结构的对比度变得显著更小。

[0089] 图10以图a至e的图序列再次阐释了第三类裂缝的产生，如该第三类裂缝可以在图序列的最后一幅图e中在激光辐射的八个脉冲以后看到。

[0090] 图a示出了剥除凹陷中的有原因的强度分布，图b示出了脆硬材料中的有原因的强度分布。图c示出了自由电子密度，图d示出了剥除凹陷的表面，并且图e示出了在激光辐射的8个脉冲以后所得到的改变/损伤/裂缝的分布。

[0091] 根据图10的图可见，剥除凹陷中的强度分布的空间结构(图a)发展为脆硬材料中的激光辐射的强度的不期望地强烈突出的空间结构(图b)。结果，剥除凹陷的表面的几何形状(图b)、自由电子的所产生的密度(图c)和改变/损伤(图e)在空间上也被结构化并且形成不期望的第三类裂缝。

[0092] 沟槽的空间伸展在两个方向上都为40μm，以便说明大小比例。

[0093] 作为在此使用的对比度，表示激光辐射的强度与空间上弱改变的分布的偏差，如该分布在不受干扰地传播的激光辐射的情况下将存在于剥除凹陷中那样(图10的图a)。

[0094] 在放大的图11中再次示出了剥除凹陷中的空间强度分布的要缩小的该对比度。根据本发明缩小了剥除凹陷中的强度分布的空间结构中的该对比度，其方式是，使具有至少

两个不同波长的激光辐射重叠。

[0095] 根据本发明，不是缩小激光辐射的功率，以便避免损伤，而是根据本发明通过调整功率的空间分布来调整入射边缘的几何形状，使得入射边缘的聚焦作用减小。因此根据本发明在大功率下并且由此在期望的大的剥除速率下减小功率的由入射边缘所检测并聚焦的进而导致不期望的损伤的分量。

[0096] 按照根据本发明的方法，可以在一个步骤中以大功率进行切割并且尽管如此仍可以产生入射边缘的小的伸展。作为入射边缘的小的伸展的结果，现在功率的更小的分量被聚焦到材料中并且因此避免损伤。

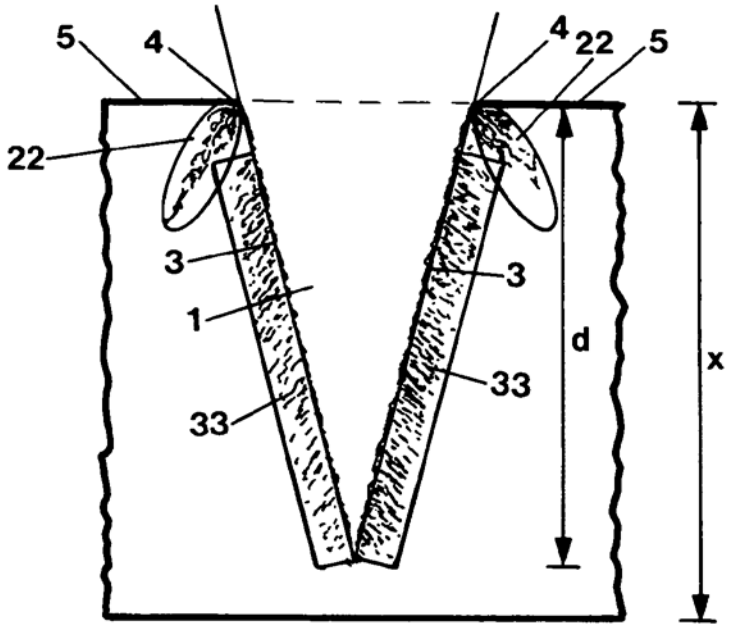


图 1

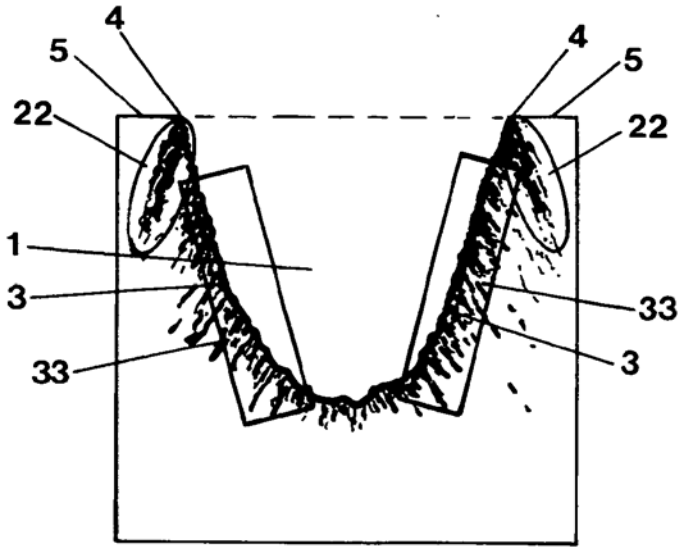


图 2

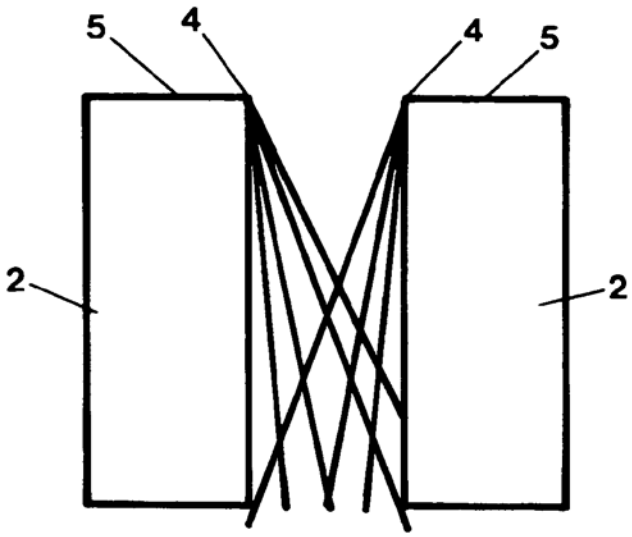


图 3

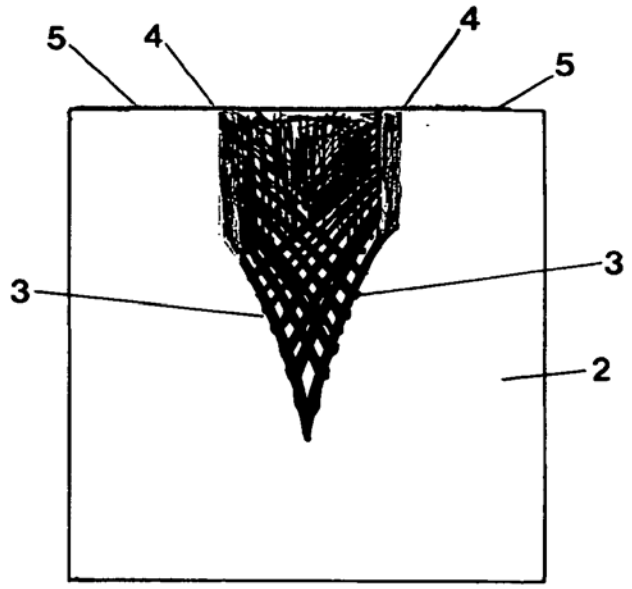


图 4

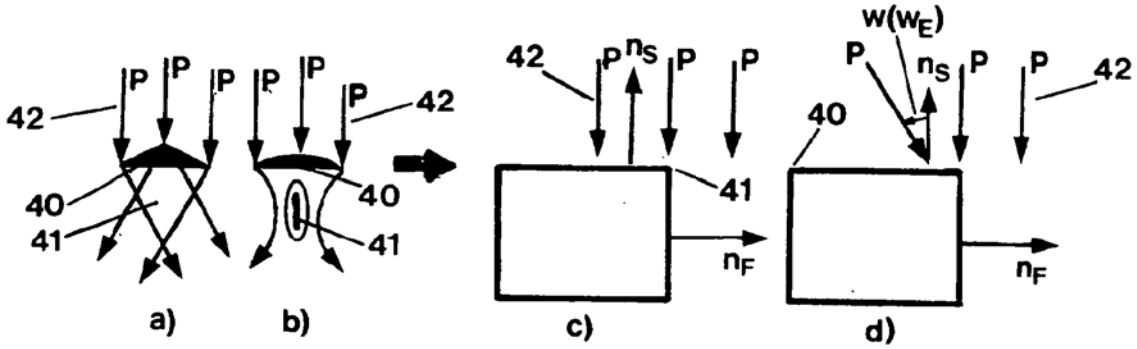


图 5

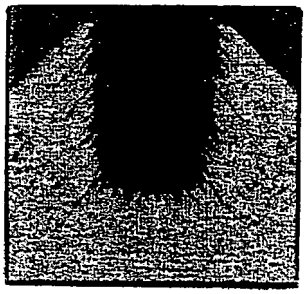


图 6

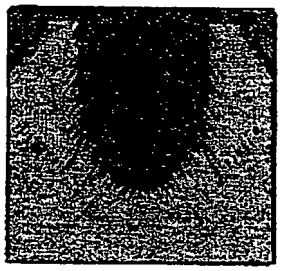


图 7

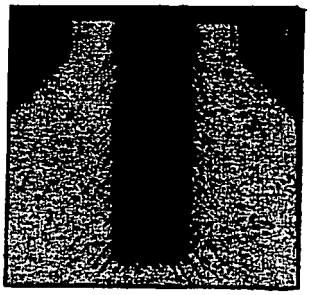


图 8

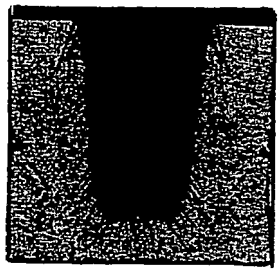


图 9

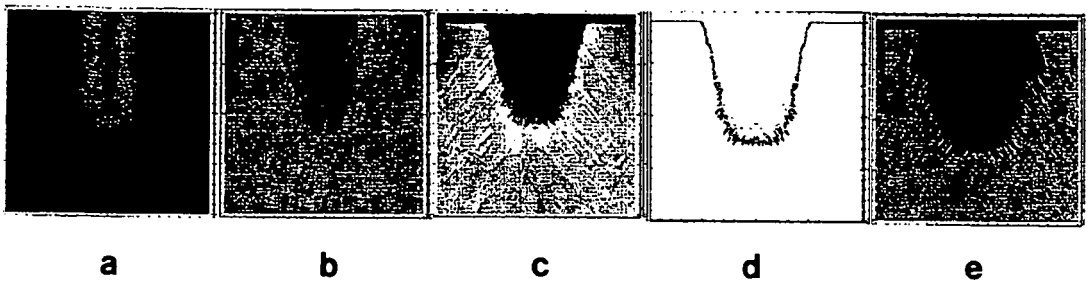


图 10

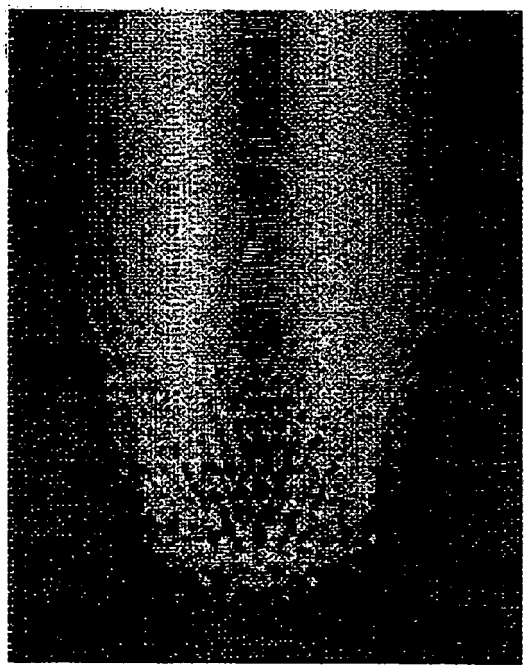


图 11