



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103299401 B

(45)授权公告日 2016. 11. 16

(21)申请号 201180064900.7
 (22)申请日 2011.12.15
 (65)同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 103299401 A
 (43)申请公布日 2013.09.11
 (30)优先权数据
 2011-005195 2011.01.13 JP
 (85)PCT国际申请进入国家阶段日
 2013.07.12
 (86)PCT国际申请的申请数据
 PCT/JP2011/079079 2011.12.15
 (87)PCT国际申请的公布数据
 W02012/096096 JA 2012.07.19
 (73)专利权人 浜松光子学株式会社
 地址 日本,静冈县
 (72)发明人 奥间惇治 坂本刚志
 (74)专利代理机构 北京尚诚知识产权代理有限公司 11322
 代理人 杨琦

(51)Int.Cl.
 H01L 21/304(2006.01)
 H01L 29/16(2006.01)
 B23K 26/00(2014.01)
 B28D 5/00(2006.01)
 B23K 26/08(2014.01)
 C30B 29/36(2006.01)
 C30B 33/06(2006.01)
 B23K 26/0622(2014.01)

(56)对比文件
 CN 101842184 A,2010.09.22,
 CN 101689565 A,2010.03.31,
 CN 1993201 A,2007.07.04,
 JP 2006074025 A,2006.03.16,
 US 2006108338 A1,2006.05.25,

审查员 曹丽冉

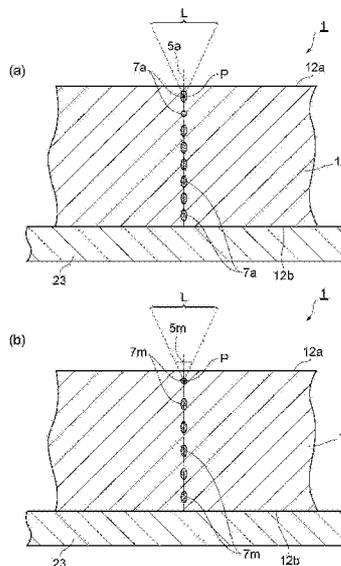
权利要求书1页 说明书11页 附图26页

(54)发明名称

激光加工方法

(57)摘要

准备具备具有与c面成偏离角的角度度的表面(12a)的六方晶系SiC基板(12)的板状的加工对象物(1)。接着,将脉冲振荡后的激光(L)的聚光点(P)对准于SiC基板(12)的内部,以脉冲间距为10 μ m~18 μ m的方式沿着切断预定线(5a,5m)将激光(L)照射于加工对象物(1)。由此,沿着切断预定线(5a,5m),将作为切断起点的改质区域(7a,7m)形成于SiC基板(12)的内部。



CN 103299401 B

1. 一种激光加工方法,其特征在于,
是用来将具备六方晶系SiC基板的板状的加工对象物沿着切断预定线进行切断的激光加工方法,该六方晶系SiC基板具有与c面成偏离角的角度主面,
通过使脉冲振荡后的激光的聚光点对准于所述SiC基板的内部,以脉冲间距为 $10\mu\text{m}\sim 18\mu\text{m}$ 的方式沿着所述切断预定线将所述激光照射于所述加工对象物,从而沿着所述切断预定线,将作为切断起点的改质区域形成于所述SiC基板的内部。
2. 如权利要求1所述的激光加工方法,其特征在于,
所述激光以所述脉冲间距为 $12\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 的方式沿着所述切断预定线照射于所述加工对象物。
3. 如权利要求1所述的激光加工方法,其特征在于,
所述激光以 $20\text{ns}\sim 100\text{ns}$ 的脉冲宽度进行脉冲振荡。
4. 如权利要求2所述的激光加工方法,其特征在于,
所述激光以 $20\text{ns}\sim 100\text{ns}$ 的脉冲宽度进行脉冲振荡。
5. 如权利要求3所述的激光加工方法,其特征在于,
所述激光是以 $50\text{ns}\sim 60\text{ns}$ 的脉冲宽度进行脉冲振荡。
6. 如权利要求4所述的激光加工方法,其特征在于,
所述激光是以 $50\text{ns}\sim 60\text{ns}$ 的脉冲宽度进行脉冲振荡。
7. 如权利要求1~6中的任一项所述的激光加工方法,其特征在于,
在形成所述改质区域后,以所述改质区域为起点沿着所述切断预定线将所述加工对象物切断。
8. 如权利要求1~6中的任一项所述的激光加工方法,其特征在于,
所述改质区域包含熔融处理区域。
9. 如权利要求7所述的激光加工方法,其特征在于,
所述改质区域包含熔融处理区域。

激光加工方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种用来将具备SiC基板的板状的加工对象物沿着切断预定线进行切断的激光加工方法。

背景技术

[0002] SiC(碳化硅),是作为能够制造耐热性、耐高电压性、省电性优异的功率器件的半导体材料而引人注目。然而,由于SiC是具有仅次于钻石的硬度的难加工材料,因此,若要将具备SiC基板的板状的加工对象物通过刀片切割进行切断,则需要进行低速度的加工或频繁地更换刀片。因此,通过对加工对象物照射激光,沿着切断预定线在SiC基板的内部形成改质区域,以该改质区域为起点而沿着切断预定线将加工对象物进行切断的激光加工方法已被提出(例如参照专利文献1)。

[0003] 现有技术文献

[0004] 专利文献

[0005] 专利文献1:日本特表2007-514315号公报

发明内容

[0006] 发明所要解决的技术问题

[0007] 然而,在通过上述那样的激光加工方法,将具备具有与c面成偏离角的角度之主面的六方晶系SiC基板的板状的加工对象物进行切断的情况下,本发明人等发现存在着如下的技术问题。即,为了在形成改质区域时让龟裂从改质区域到达SiC基板的激光入射面,若以让龟裂从改质区域向SiC基板的厚度方向伸展的方式将激光照射于加工对象物,则龟裂也变得容易从改质区域向c面方向伸展。

[0008] 因此,本发明的目的在于,提供一种激光加工方法,其能够将具备具有与c面成偏离角的角度之主面的六方晶系SiC基板的板状的加工对象物沿着切断预定线精度高地切断。

[0009] 解决技术问题的手段

[0010] 本发明的一个观点的激光加工方法,是用来将具备具有与c面成偏离角的角度之主面的六方晶系SiC基板的板状的加工对象物沿着切断预定线进行切断的激光加工方法,通过使脉冲振荡后的激光的聚光点对准于SiC基板的内部,以脉冲间距为 $10\mu\text{m}\sim 18\mu\text{m}$ 的方式沿着切断预定线将激光照射于加工对象物,从而沿着切断预定线将作为切断起点的改质区域形成于SiC基板的内部。

[0011] 在该激光加工方法中,以脉冲间距(“激光的聚光点相对于加工对象物的移动速度”除以“脉冲激光的重复频率”的值)为 $10\mu\text{m}\sim 18\mu\text{m}$ 的方式沿着切断预定线对加工对象物照射激光。若在这样的条件下对加工对象物照射激光,能够让龟裂容易从改质区域向SiC基板的厚度方向伸展,同时让龟裂难以从改质区域向c面方向伸展。因此,根据该激光加工方法,可以将具备具有与c面成偏离角的角度之主面的六方晶系SiC基板的板状的加工对象物

沿着切断预定线高精度地切断。再有,偏离角包含 0° 的情况。在这种情况下,主面与c面平行。

[0012] 本发明的一个观点的激光加工方法中,激光可以以脉冲间距为 $12\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 的方式沿着切断预定线照射于加工对象物。据此,能够让龟裂更容易从改质区域向SiC基板的厚度方向伸展,同时让龟裂更难以从改质区域向c面方向伸展。

[0013] 本发明的一个观点的激光加工方法中,激光可以以 $20\text{ns}\sim 100\text{ns}$ 的脉冲宽度进行脉冲振荡,也可以以 $50\text{ns}\sim 60\text{ns}$ 的脉冲宽度进行脉冲振荡。根据这些,能更切实地让龟裂容易从改质区域向SiC基板的厚度方向伸展,同时更切实地让龟裂难以从改质区域向c面方向伸展。

[0014] 本发明的一个观点的激光加工方法中,可以在形成改质区域后,以改质区域为起点沿着切断预定线将加工对象物切断。据此,能够得到沿着切断预定线被高精度地切断后的加工对象物。

[0015] 本发明的一个观点的激光加工方法中,改质区域有包含熔融处理区域的情况。

[0016] 发明的效果

[0017] 根据本发明,能够将具备具有与c面成偏离角的角度之主面的六方晶系SiC基板的板状的加工对象物沿着切断预定线高精度地切断。

附图说明

[0018] 图1是形成改质区域所使用的激光加工装置的结构图。

[0019] 图2是激光加工前的加工对象物的俯视图。

[0020] 图3是沿着图2的加工对象物的III-III线的截面图。

[0021] 图4是激光加工后的加工对象物的俯视图。

[0022] 图5是沿着图4的加工对象物的V-V线的截面图。

[0023] 图6是沿着图4的加工对象物的VI-VI线的截面图。

[0024] 图7是作为本发明的一个实施方式的激光加工方法的对象的加工对象物的俯视图。

[0025] 图8是表示图7的加工对象物的结晶构造的图。

[0026] 图9是图7的加工对象物的一部分截面图。

[0027] 图10是实施本发明的一个实施方式的激光加工方法的加工对象物的一部分截面图。

[0028] 图11是实施本发明的一个实施方式的激光加工方法的加工对象物的一部分截面图。

[0029] 图12是实施本发明的一个实施方式的激光加工方法的加工对象物的一部分截面图。

[0030] 图13是实施本发明的一个实施方式的激光加工方法的加工对象物的一部分截面图。

[0031] 图14是表示由本发明的一个实施方式的激光加工方法切断后的SiC基板的切断面的照片的图。

[0032] 图15是表示由本发明的一个实施方式的激光加工方法切断后的SiC基板的切断面

的照片的图。

[0033] 图16是表示由本发明的一个实施方式的激光加工方法切断后的SiC基板的平面照片的图。

[0034] 图17是用来说明SiC基板的内部所产生的c面裂纹的立体图。

[0035] 图18是表示产生c面裂纹的SiC基板的切断面的照片的图。

[0036] 图19是表示脉冲宽度与ID阈值、HC阈值及加工裕度的关系的表。

[0037] 图20是表示脉冲间距与ID阈值、HC阈值及加工裕度的关系的表。

[0038] 图21是表示脉冲宽度及脉冲间距的加工裕度的实验结果的表。

[0039] 图22是表示脉冲宽度及脉冲间距的加工裕度的实验结果的表。

[0040] 图23是表示脉冲宽度及脉冲间距的加工裕度的实验结果的表。

[0041] 图24是表示脉冲间距与HC阈值的关系的图表。

[0042] 图25是表示脉冲间距与ID阈值的关系的图表。

[0043] 图26是表示脉冲间距与加工裕度的关系的图表。

[0044] 图27是表示脉冲宽度及脉冲间距的加工裕度的实验结果的表。

[0045] 图28是表示脉冲宽度及脉冲间距的加工裕度的实验结果的表。

[0046] 图29是表示脉冲宽度及脉冲间距的加工裕度的实验结果的表。

[0047] 图30是表示脉冲间距与HC阈值的关系的图表。

[0048] 图31是表示在激光入射面附近的HC品质的加工裕度的实验结果的表。

[0049] 图32是表示在激光入射面附近的HC品质的加工裕度的实验结果的表。

[0050] 图33是表示在激光入射面附近的HC品质的加工裕度的实验结果的表。

[0051] 图34是用来说明本发明的其他实施方式的激光加工方法的俯视图。

[0052] 符号说明：

[0053] 1…加工对象物,5a,5m…切断预定线,5p…预备线,7a,7m…改质区域,7p…预备改质区域,12…SiC基板,12a…表面(主面),12b…背面(主面),L…激光,P…聚光点。

具体实施方式

[0054] 以下,参照附图详细地说明本发明的优选实施方式。再有,各图中对于相同或相当的部分赋予相同符号,省略重复的说明。

[0055] 在本发明的一个实施方式的激光加工方法中,通过沿着切断预定线对加工对象物照射激光,从而沿着切断预定线在加工对象物的内部形成改质区域。因此,首先,参照图1~图6说明该改质区域的形成。

[0056] 如图1所示,激光加工装置100具备:对激光L进行脉冲振荡的激光光源101、配置成让激光L的光轴(光路)方向改变90°的分光镜103、以及用来将激光L聚光的聚光用透镜105。另外,激光加工装置100具备:用来支承照射了被聚光用透镜105聚光后的激光L的支承台107、用来让支承台107移动的操作台111、为了调节激光L的输出或脉冲宽度等而控制激光光源101的激光光源控制部102、以及控制操作台111的移动的操作台控制部115。

[0057] 在该激光加工装置100中,从激光光源101出射的激光L,通过分光镜103将其光轴方向改变90°,被聚光用透镜105聚光于载置在支承台107上的加工对象物1的内部。与此同时,让操作台111移动,使加工对象物1相对于激光L沿着切断预定线5相对移动。由此,沿着

切断预定线5的改质区域会形成于加工对象物1。

[0058] 如图2所示,在加工对象物1,设定有用来切断加工对象物1的切断预定线5。切断预定线5是呈直线状延伸的假想线。在加工对象物1内部形成改质区域的情况下,如图3所示,在聚光点P对准加工对象物1的内部的状态下,使激光L沿着切断预定线5(即,图2的箭头A方向)相对地移动。由此,如图4~图6所示,改质区域7沿着切断预定线5形成于加工对象物1的内部,沿着切断预定线5形成的改质区域7成为切断起点区域8。

[0059] 再有,聚光点P是指激光L所聚光的部位。另外,切断预定线5不限于直线状,可以是曲线状,不限于假想线,可以是在加工对象物1表面3上实际描画的线。另外,改质区域7可以是连续形成的情况,也可以是断续形成的情况。另外,改质区域7可以是列状也可以是点状,重点是改质区域7至少形成于加工对象物1的内部即可。另外,会有以改质区域7为起点而形成龟裂的情况,龟裂及改质区域7可以露出加工对象物1的外表面(表面、背面、或外周面)。

[0060] 附带一提,这里的激光L,透过加工对象物1并且特别在加工对象物1内部的聚光点附近被吸收,由此,在加工对象物1形成改质区域7(即,内部吸收型激光加工)。因此,在加工对象物1的表面3几乎不会吸收激光L,因此,加工对象物1的表面3不会熔融。一般而言,在从表面3被熔融除去而形成孔或槽等除去部(表面吸收型激光加工)的情况下,加工区域从表面3侧逐渐向背面侧进展。

[0061] 再者,本实施方式所形成的改质区域,是指密度、折射率、机械强度或其他的物理特性变成与周围不同的状态的区域。作为改质区域,例如有熔融处理区域、裂缝区域、绝缘破坏区域、折射率变化区域等,也有这些混合存在的区域。此外,作为改质区域,也有加工对象物的材料中改质区域的密度与非改质区域的密度相比较发生变化的区域、或形成有晶格缺陷的区域(这些也统称为高密度转移区域)。

[0062] 另外,熔融处理区域或折射率变化区域、改质区域的密度与非改质区域的密度相比较发生变化的区域、形成有晶格缺陷的区域,此外,会有在这些区域的内部、或改质区域与非改质区域的界面内含龟裂(裂纹、微裂缝)的情况。所内含的龟裂有遍及改质区域的全面的情况、或仅形成于一部分或形成于多部分的情况。

[0063] 另外,在本实施方式中,通过沿着切断预定线5形成多个改质点(加工痕),从而形成改质区域7。改质点是指通过脉冲激光的1脉冲的照射(即1脉冲的激光照射:Laser Shot)所形成的改质部分,改质点聚集而成为改质区域7。作为改质点,可以举出裂缝点、熔融处理点或折射率变化点、或这些至少1种混合存在的点等。

[0064] 关于该改质点,优选地,考虑所要求的切断精度、所要求的切断面的平坦性、加工对象物的厚度、种类、结晶方位等,来适当地控制其大小或所产生的龟裂长度。

[0065] 接下来,就本发明的一个实施方式的激光加工方法作详细的说明。如图7所示,加工对象物1是具备SiC基板12的圆形板状(例如直径3英寸、厚度350 μ m)的晶片。如图8所示,SiC基板12具有六方晶系的结晶构造,其晶轴CA相对于SiC基板12的厚度方向而倾斜角度 θ (例如4 $^\circ$)。即,SiC基板12是具有角度 θ 的偏离角的六方晶系SiC基板。如图9所示,SiC基板12具有:与c面成偏离角的角度 θ 的表面(主面)12a及背面(主面)12b。在SiC基板12中,a面相对于SiC基板12的厚度方向(图中的双点划线)倾斜角度 θ ,m面相对于SiC基板12的厚度方向不倾斜。

[0066] 如图7及图9所示,在加工对象物1,沿着与表面12a及a面平行的方向延伸的多条切

断预定线(第1切断预定线)5a和沿着与表面12a及m面平行的方向延伸的多条切断预定线(第2切断预定线)5m呈格子状(例如1mm×1mm)地设定。在SiC基板12的表面12a,在由切断预定线5a,5m划定的各区域形成功能元件,在SiC基板12的背面12b,在由切断预定线5a,5m划定的各区域形成金属配线。功能元件及金属配线,在沿着切断预定线5a,5m切断加工对象物1所得到的各个小片(chip)中构成功率器件。再有,在SiC基板12,在与切断预定线5a平行的方向上形成定向平面6a,在与切断预定线5m平行的方向上形成定向平面6m。

[0067] 将以上的加工对象物1沿着切断预定线5a,5m如下述般进行切断。首先,如图10所示,以覆盖SiC基板12的背面12b的金属配线的方式在加工对象物1上贴附扩展胶带23。接着,如图11(a)所示,将以20ns~100ns的脉冲宽度(更优选以50ns~60ns的脉冲宽度)进行脉冲振荡后的激光L的聚光点P对准于SiC基板12的内部,以脉冲间距为10 μ m~18 μ m的方式(更优选以脉冲间距为12 μ m~14 μ m的方式)沿着切断预定线5a将激光L照射于加工对象物1。由此,沿着切断预定线5a,将作为切断的起点的改质区域(第1改质区域)7a形成在SiC基板12的内部。该改质区域7a为包含熔融处理区域的区域。再有,脉冲间距是指,“激光L的聚光点P相对于加工对象物1的移动速度”除以“脉冲激光L的重复频率”后的值。

[0068] 就改质区域7a的形成作更详细地说明,以SiC基板12的表面12a作为激光入射面而使激光L的聚光点P位于SiC基板12的内部,使聚光点P沿着切断预定线5a相对地移动。然后,让沿着切断预定线5a的聚光点P的相对移动对于1条切断预定线5进行多次(例如8次)。这时,通过每次改变从表面12a到聚光点P的位置的距离,以排列在SiC基板12的厚度方向上的方式对于1条切断预定线5a形成多列(第1列数,例如8列)改质区域7a。这里,以使离SiC基板12的激光入射面即表面12a第2近的改质区域7a比离表面12a最近的改质区域7a更小的方式,从SiC基板12的背面12b侧依次(即,依离激光入射面从远到近的顺序)形成改质区域7a。再有,改质区域7a的大小,例如可以通过使激光L的脉冲能量变化来进行调节。

[0069] 由此,使从各改质区域7a产生的龟裂向SiC基板12的厚度方向伸展而互相连接。特别地,使从离SiC基板12的激光入射面即表面12a最近的改质区域7a向SiC基板12的厚度方向伸展后的龟裂,到达表面12a。这些做法,在将由硬度仅次于钻石的难加工材料所构成的SiC基板12沿着切断预定线5a高精度地切断的方面,是非常重要的。

[0070] 在沿着切断预定线5a形成改质区域7a后,如图11(b)所示,使以20ns~100ns的脉冲宽度(更优选以50ns~60ns的脉冲宽度)进行脉冲振荡后的激光L的聚光点P对准于SiC基板12的内部,以脉冲间距为10 μ m~18 μ m的方式(更优选以脉冲间距为12 μ m~14 μ m的方式)沿着切断预定线5m将激光L照射于加工对象物1。由此,沿着切断预定线5m,将作为切断起点的改质区域(第2改质区域)7m形成在SiC基板12的内部。该改质区域7m为包含熔融处理区域的区域。

[0071] 就改质区域7m的形成作更详细地说明。以SiC基板12的表面12a作为激光入射面而使激光L的聚光点P位于SiC基板12的内部,沿着切断预定线5m使聚光点P相对地移动。然后,让沿着切断预定线5m的聚光点P的相对移动对于1条切断预定线5进行多次(例如6次)。这时,通过每次改变从表面12a到聚光点P的位置的距离,以排列在SiC基板12的厚度方向上的方式对于1条切断预定线5m形成多列(比第1列数更少的第2列数(包含1列的情况),例如6列)改质区域7m。这里,以使离SiC基板12的激光入射面即表面12a最近的改质区域7m比离表面12a第2近的改质区域7m更小的方式,从SiC基板12的背面12b侧依次(即,依离激光入射面

从远到近的顺序)形成改质区域7m。再有,改质区域7m的大小,例如可以通过使激光L的脉冲能量变化来进行调节。

[0072] 由此,使从各改质区域7m产生的龟裂向SiC基板12的厚度方向伸展而互相连接。特别地,让从离SiC基板12的激光入射面即表面12a最近的改质区域7m向SiC基板12的厚度方向伸展后的龟裂,到达表面12a。这些做法,在将由硬度仅次于钻石的难加工材料所构成的SiC基板12沿着切断预定线5m高精度地切断的方面,是非常重要的。

[0073] 沿着切断预定线5m形成改质区域7m后,如图12(a)所示,使扩展胶带23扩张,在该状态下,沿着各切断预定线5m,将刀刃41经由扩展胶带23按压在SiC基板12的背面12b。由此,以改质区域7m为起点沿着切断预定线5m将加工对象物1切断成条状。这时,由于扩展胶带23处于被扩张后的状态,因此如图12(b)所示,切断成条状后的加工对象物1会相互分离。

[0074] 沿着切断预定线5m将加工对象物1切断后,如图13(a)所示,在继续使扩展胶带23扩张的状态下,沿着各切断预定线5a,将刀刃41经由扩展胶带23按压在SiC基板12的背面12b。由此,以改质区域7a为起点沿着切断预定线5a将加工对象物1切断成小片状。这时,由于扩展胶带23处于被扩张后的状态,因此,如图13(b)所示,被切断成小片状后的加工对象物1会相互分离。如以上所述,将加工对象物1沿着切断预定线5a,5m切断成小片状而得到许多功率器件。

[0075] 根据以上的激光加工方法,基于如下的理由,将具备具有与c面成偏离角的角度度的表面12a的六方晶系SiC基板12的板状的加工对象物1沿着切断预定线5a,5m高精度地切断,其结果,可以获得沿着切断预定线5a,5m被高精度地切断后的加工对象物1(即,功率器件)。

[0076] 首先,以脉冲间距为 $10\mu\text{m}\sim 18\mu\text{m}$ 的方式沿着切断预定线5a,5m对加工对象物1照射激光L。若在此条件下对加工对象物1照射激光L,则能够使龟裂容易从改质区域7a,7m向SiC基板12的厚度方向伸展,同时使龟裂难以从改质区域7a,7m向c面方向伸展。此外,如果以脉冲间距为 $12\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 的方式沿着切断预定线5a,5m对加工对象物1照射激光L,则能够使龟裂更容易从改质区域7a,7m向SiC基板12的厚度方向伸展,同时使龟裂更难以从改质区域7a,7m向c面方向伸展。

[0077] 另外,以 $20\text{ns}\sim 100\text{ns}$ 的脉冲宽度让激光L进行脉冲振荡。由此,能够切实地使龟裂容易从改质区域7a,7m向SiC基板12的厚度方向伸展,同时切实地使龟裂难以从改质区域7a,7m向c面方向伸展。此外,如果以 $50\text{ns}\sim 60\text{ns}$ 的脉冲宽度让激光L进行脉冲振荡,则能够更切实地使龟裂容易从改质区域7a,7m向SiC基板12的厚度方向伸展,同时更切实地使龟裂难以从改质区域7a,7m向c面方向伸展。

[0078] 另外,沿着切断预定线5a,使离SiC基板12的激光入射面即表面12a第2近的改质区域7a形成得相对较小。由此,即使a面相对于SiC基板12的厚度方向倾斜,也能够防止从离表面12a第2近的改质区域7a产生的龟裂向a面方向伸展而在与切断预定线5a大幅偏离的状态下到达表面12a。然后,沿着切断预定线5a,使离SiC基板12的激光入射面即表面12a最近的改质区域7a形成得相对较大。由此,虽然处于龟裂难以从改质区域7a向SiC基板12的厚度方向伸展的状态,但能够切实地让龟裂从离表面12a最近的改质区域7a到达表面12a。另外,沿着切断预定线5m,使离SiC基板12的激光入射面即表面12a第2近的改质区域7m形成得相对较大。由此,处于龟裂容易从改质区域7m向SiC基板12的厚度方向伸展的状态,并且能够让从离表面12a第2近的改质区域7m产生的龟裂到达表面12a或其附近。然后,沿着切断预定线

5m,让离SiC基板12的激光入射面即表面12a最近的改质区域7m形成得相对较小。由此,能够防止在表面12a产生损伤,并能切实地让龟裂从改质区域7m到达表面12a。如以上所述,沿着切断预定线5a,能够切实地让龟裂从改质区域7a到达表面12a,另外,沿着切断预定线5m,能够切实地让龟裂从改质区域7m到达表面12a。该效果,与后述的改质区域7a,7m的形成列数或形成顺序无关地发挥,若依据后述改质区域7a,7m的形成列数或形成顺序,则更显著地发挥。

[0079] 另外,沿着1条切断预定线5a,形成比沿着1条切断预定线5m形成改质区域7m的情况更多列的改质区域7a。由此,即使a面相对于SiC基板12的厚度方向倾斜,也能够形成各改质区域7a时防止龟裂从改质区域7a向a面方向大幅伸展,并且成为在所有的改质区域7a间使龟裂在SiC基板12的厚度方向容易连接的状态。另外,沿着1条切断预定线5m,形成比沿着1条切断预定线5a形成改质区域7a的情况更少列的改质区域7m。由此,能够在形成各个改质区域7m时使龟裂从改质区域7m向SiC基板12的厚度方向大幅伸展。如以上所述,能够沿着切断预定线5a让龟裂从改质区域7a向SiC基板12的厚度方向伸展,另外,能够沿着切断预定线5m让龟裂从改质区域7m向SiC基板12的厚度方向伸展。该效果与前述的改质区域7a,7m的形成尺寸或后述的改质区域7a,7m的形成顺序无关地发挥,若依据前述的改质区域7a,7m的形成尺寸或后述的改质区域7a,7m的形成顺序,则更显著地发挥。

[0080] 另外,在用来形成让龟裂向SiC基板12的厚度方向伸展的条件宽松的改质区域7m前,形成用来让龟裂向SiC基板12的厚度方向伸展的条件严格的改质区域7a。由此,在形成改质区域7a时,在切断预定线5a与切断预定线5m交叉的部分,能够防止龟裂从改质区域7a向SiC基板12的厚度方向的伸展受到改质区域7m的阻碍。该效果与前述的改质区域7a,7m的形成尺寸或形成列数无关地发挥。

[0081] 此外,以改质区域7m为起点沿着切断预定线5m将加工对象物1切断,其后,以改质区域7a为起点沿着切断预定线5a将加工对象物1切断。由此,沿着假定为通过形成较少列的改质区域7m而比较难切断的切断预定线5m,将加工对象物1切断,其后,沿着假定为通过形成较多列的改质区域7a而比较容易切断的切断预定线5a,将加工对象物1切断。因此,能够使沿着切断预定线5m将加工对象物1切断所需要的力与沿着切断预定线5a将加工对象物1切断所需要的力均匀化,并使沿着切断预定线5m的切断精度及沿着切断预定线5a的切断精度都更进一步提高。该效果与前述的改质区域7a,7m的形成尺寸或形成列数无关地发挥。

[0082] 图14是表示由上述激光加工方法沿着切断预定线5a切断后的SiC基板12切断面的照片的图。此外,图15是表示由上述激光加工方法沿着切断预定线5m切断后的SiC基板12切断面的照片的图。此外,图16是表示由上述激光加工方法沿着切断预定线5a,5m切断后的SiC基板12的平面照片的图。这里,准备具有 4° 偏离角的厚度 $350\mu\text{m}$ 的六方晶系SiC基板12。

[0083] 首先,如图14所示,沿着切断预定线5a,以排列在SiC基板12的厚度方向上的方式对于1条切断预定线5a形成8列改质区域7a。然后以离SiC基板12的激光入射面即表面12a第2近的改质区域7a比离表面12a最近的改质区域7a更小的方式,从SiC基板12的背面12b侧依次形成改质区域7a。从图14可知,通过形成离表面12a第2近的改质区域7a,能够将改质区域7a产生的龟裂的伸展制止。其结果,如图16所示,切断面相对于切断预定线5a的蛇行被抑制在 $\pm 4\mu\text{m}$ 以下。

[0084] 再有,从表面12a到聚光点P的位置的距离,从SiC基板12的背面12b侧的改质区域

7a开始依次是314.5 μm 、280.0 μm 、246.0 μm 、212.0 μm 、171.5 μm 、123.5 μm 、79.0 μm 、32.0 μm 。另外,激光L的脉冲能量,从SiC基板12的背面12b侧的改质区域7a开始依次是25 μJ 、25 μJ 、25 μJ 、25 μJ 、20 μJ 、15 μJ 、6 μJ 、6 μJ 。

[0085] 此外,如图15所示,沿着切断预定线5m,以排列在SiC基板12的厚度方向上的方式对于1条切断预定线5m形成6列改质区域7m。然后,以使离SiC基板12的激光入射面即表面12a最近的改质区域7m比离表面12a第2近的改质区域7m更小的方式,从SiC基板12的背面12b侧依次形成改质区域7m。从图15可知,通过形成离表面12a第2近的改质区域7m,能够让从改质区域7m产生的龟裂伸展到表面12a或其附近。其结果,如图16所示,切断面相对于切断预定线5m的蛇行被抑制在 $\pm 2\mu\text{m}$ 以下。

[0086] 再有,从表面12a到聚光点P的位置的距离,从SiC基板12的背面12b侧的改质区域7m开始依次是315.5 μm 、264.5 μm 、213.5 μm 、155.0 μm 、95.5 μm 、34.5 μm 。另外,激光L的脉冲能量,从SiC基板12的背面12b侧的改质区域7m开始依次是25 μJ 、25 μJ 、20 μJ 、20 μJ 、15 μJ 、7 μJ 。

[0087] 接下来,就从改质区域7a,7m到达SiC基板12的激光入射面即表面12a的龟裂(以下,称为“半切割”)与从改质区域7a,7m向c面方向伸展的龟裂(以下称为“c面裂纹”)的关系进行说明。这里,如图17及图18所示,在要让龟裂向SiC基板12的厚度方向伸展的情况下,与改质区域7m相比更难以产生半切割且更容易产生c面裂纹的改质区域7a为对象来作说明。

[0088] 图19是表示脉冲宽度与ID阈值、HC阈值及加工裕度的关系的表。这里,让脉冲宽度以1ns、10ns~120ns的范围变化而对于每个脉冲宽度评价ID阈值、HC阈值及加工裕度。另外,图20是表示脉冲间距与ID阈值、HC阈值及加工裕度的关系的表。这里,让脉冲间距以6 μm ~22 μm 的范围变化,对于每个脉冲间距评价ID阈值、HC阈值及加工裕度。

[0089] 再有,ID阈值是指,能够产生c面裂纹的激光L的脉冲能量的最小值,从ID阈值高者(即,不容易产生c面裂纹)开始依次评价为优、良、可、不可。另外,HC阈值是指,能够产生半切割的激光L的脉冲能量的最小值,从HC阈值低者(即,容易产生半切割)开始依次评价为优、良、可、不可。再者,加工裕度是ID阈值与HC阈值的差,从加工裕度大者开始依次评价为优、良、可、不可。然后,综合是依ID阈值、HC阈值、加工裕度的优先顺序进行加权,评价为优、良、可、不可。

[0090] 其结果可知,如图19所示,优选以20ns~100ns的脉冲宽度让激光L进行脉冲振荡,更优选以50ns~60ns的脉冲宽度让激光L进行脉冲振荡。据此,能够抑制c面裂纹的产生,并促进半切割的产生。再有,脉冲宽度是10ns的情况下的ID阈值、加工裕度及综合的各评价,与脉冲宽度20ns的情况下相比更接近不可的可。

[0091] 另外,如图20所示,优选以脉冲间距为10 μm ~18 μm 的方式沿着切断预定线5a,5m对SiC基板12照射激光L,更优选以脉冲间距为11 μm ~15 μm 的方式沿着切断预定线5a,5m对SiC基板12照射激光L,此外,更进一步优选以脉冲间距为12 μm ~14 μm 的方式沿着切断预定线5a,5m对SiC基板12照射激光L。据此,能够抑制c面裂纹的产生并促进半切割的产生。再有,由于脉冲间距为10 μm 时ID阈值的评价为可,因此,如果要更重视抑制c面裂纹产生的话,则更优选使脉冲间距比10 μm 更大。

[0092] 图21~图23是表示激光L以数值孔径0.8聚光的情况下的脉冲宽度及脉冲间距的加工裕度的实验结果的表。这些实验结果成为图19及图20所示的评价根据。获得图21~图23的实验结果时的实验条件如下述般。首先,以具有4° 偏离角的厚度100 μm 的六方晶系SiC

基板12为对象,沿着向与表面12a及a面平行的方向延伸的切断预定线5a使激光L的聚光点P移动。另外,将激光L以数值孔径0.8进行聚光,让聚光点P对准于离SiC基板12的激光入射面即表面12a距离59 μm 的位置。

[0093] 将以上实验条件作为前提,让激光L的能量(脉冲能量)及功率、激光L的脉冲间距分别变化,观察改质区域7a以及半切割和c面裂纹的状态。在图21~图23,激光L的脉冲宽度分别为27ns、40ns、57ns,激光L的脉冲宽度(重复频率)分别为10kHz、20kHz、35kHz。

[0094] 在图21~图23的实验结果中,ST表示不产生半切割,HC表示产生了半切割。另外,ID表示产生了c面裂纹,LV1~LV3表示c面裂纹的产生规模。在沿着2条切断预定线5a分别形成改质区域7a的情况下,对于40mm的区域(20mm \times 2条的区域),将c面裂纹的产生区域未满足150 μm 时作为LV1,将c面裂纹的产生区域未满足450 μm 时作为LV2,将c面裂纹的产生区域为450 μm 以上时作为LV3。在LV1,向与切断预定线5a垂直的方向的c面裂纹的伸展为10 μm ~20 μm ,相对于此,在LV2,LV3,向与切断预定线5a垂直的方向的c面裂纹的伸展最大为100 μm 左右。

[0095] 图24是表示脉冲间距与HC阈值的关系的图表。另外,图25是表示脉冲间距与ID阈值的关系的图表。此外,图26是表示脉冲间距与加工裕度的关系的图表。这些图表是基于图21~图23的实验结果而作成的。如图24及图25所示,若脉冲宽度变大,则HC阈值及ID阈值两者都上升,比起HC阈值的劣化(上升),ID阈值的提高(上升)效果更大。这意味着,如图26所示,若脉冲宽度变大,则加工裕度变大。例如,着眼于脉冲宽度27ns及脉冲宽度57ns的情况,当脉冲间距为12 μm 时,HC阈值从15 μJ 到17 μJ 劣化(上升)2 μJ ,相对于此,ID阈值从17 μJ 到29 μJ 而提高(上升)12 μJ 。再者,在脉冲宽度40ns的情况下,确认与脉冲宽度27ns的情况相比,在脉冲间距10 μm ~16 μm 的范围加工裕度大幅提高。另外,在脉冲宽度57ns的情况下,确认与脉冲宽度27ns的情况相比,在脉冲间距6 μm ~20 μm 的范围加工裕度大幅提高。

[0096] 图27~图29是表示将激光L以数值孔径0.6聚光的情况的脉冲宽度及脉冲间距的加工裕度的实验结果的表。这些实验结果成为图19及图20所示的评价的根据。获得图27~图29的实验结果的实验条件如下所述。首先,以具有与c面成偏离角的角度表面12a的厚度350 μm 的六方晶系SiC基板12作为对象,沿着向与表面12a及a面平行的方向延伸的切断预定线5a使激光L的聚光点P移动。另外,将激光L以数值孔径0.6进行聚光,让聚光点P对准于离SiC基板12的激光入射面即表面12a距离50 μm 的位置。

[0097] 将以上实验条件作为前提,让激光L的能量(脉冲能量)及功率、激光L的脉冲间距分别变化,观察改质区域7a以及半切割和c面裂纹的状态。在图27~图29,激光L的脉冲宽度分别为27ns、40ns、57ns,激光L的脉冲宽度(重复频率)分别为10kHz、20kHz、35kHz。

[0098] 在图27~图29的实验结果中,ST表示不产生半切割,HC表示产生了半切割。另外,ID表示产生了c面裂纹,LV1~LV3表示c面裂纹的产生规模。LV1~LV3的基准是与上述图21~图23的实验结果的情况同样。此外,0D表示当激光L能量变大时,改质区域7a也变大,起因于此而暴走的龟裂大幅偏离切断预定线5a而到达SiC基板12的表面12a。在这种情况下,不对c面裂纹进行评价。但在脉冲宽度40ns及脉冲宽度57ns,在脉冲间距12 μm 以上不发生大规模的c面裂纹。

[0099] 图30是表示脉冲间距与HC阈值的关系的图表。该图是基于图27~图29的实验结果而作成的。如图30所示,在脉冲宽度57ns的情况下,比起脉冲宽度40ns的情况,HC阈值劣化2 μJ ~4 μJ 左右。比起上述数值孔径0.8的情况,在数值孔径0.6的情况下,在激光L的聚光点P

像差的影响变小,因而在脉冲宽度57ns的情况和脉冲宽度40ns的情况成为同等程度的HC阈值。由此可知,如果进行像差修正的话,则即使脉冲宽度变大(至少到60ns为止),HC阈值也不劣化。

[0100] 接下来,就在SiC基板12的激光入射面即表面12a的附近的HC品质的加工裕度的实验结果进行说明。获得图31~图33的实验结果时的实验条件如下所述。首先,以具有4° 偏离角的厚度100 μm 的六方晶系SiC基板12作为对象,沿着向与表面12a及a面平行的方向延伸的切断预定线5a使激光L的聚光点P移动。另外,将激光L以数值孔径0.8进行聚光。

[0101] 首先,在图31的实验结果,分别以27ns,40ns,50ns,57ns的脉冲宽度照射激光L,使用在聚光点位置40.6 μm 产生半切割且在聚光点位置40.6 μm 不产生半切割的能量(脉冲能量),让聚光点位置在25.3 μm ~40.6 μm 的范围变化而观察半切割的状态。激光L的脉冲间距为14 μm 而保持一定。再有,聚光点位置是指从表面12a到聚光点P位置的距离。其结果,几乎没有脉冲宽度所造成的半切割的品质劣化,在脉冲宽度27ns~57ns产生高品质的(半切割相对于切断预定线的蛇行很小)的半切割。另外,脉冲宽度越大则加工裕度越大。若脉冲宽度小,则一部分的半切割容易产生分岔或裂纹(OD)。

[0102] 另外,在图32的实验结果中,分别以27ns,40ns,50ns,57ns的脉冲宽度照射激光L,让脉冲能量在7 μJ ~12 μJ 的范围变化而观察半切割的状态。激光L的脉冲间距为14 μm 而保持一定,聚光点位置为34.5 μm 而保持一定。其结果,几乎没有脉冲宽度所造成的HC阈值的变化。另外,相同脉冲能量产生同等程度品质的半切割。

[0103] 此外,在图33的实验结果中,分别以10 μm ,12 μm ,14 μm ,16 μm ,18 μm 的脉冲间距照射激光L,让脉冲能量在7 μJ ~12 μJ 的范围变化而观察半切割的状态。激光L的脉冲宽度为57ns而保持一定,聚光点位置为34.5 μm 而保持一定。其结果,几乎没有脉冲间距所造成的HC阈值的变化。另外,在聚光点位置为34.5 μm 的情况,相同脉冲能量产生同等程度品质的半切割。

[0104] 接下来,就用来抑制c面裂纹的其他激光加工方法进行说明。首先,准备具备具有与c面成偏离角的角度度的表面12a的六方晶系SiC基板12的板状的加工对象物1,设定切断预定线5a,5m。接着,如图34(a)所示,使激光L的聚光点P对准于SiC基板12的内部,沿着设定于切断预定线5a(5m)的两侧的2条预备线5p将激光L照射于加工对象物1。由此,沿着各预备线5p将预备改质区域7p形成于SiC基板12的内部。该预备改质区域7p为包含熔融处理区域的区域。

[0105] 预备线5p是在与表面12a平行的面内位于切断预定线5a(5m)两侧且向与切断预定线5a(5m)平行的方向延伸的线。再有,在由切断预定线5a,5m所划定的各区域在SiC基板12的表面12a形成有功能元件的情况下,预备线5p从SiC基板12的厚度方向看,优选设定在相邻的功能元件之间的区域内。

[0106] 沿着各预备线5p将激光L照射于加工对象物1时,比起作为切断起点的改质区域7a(7m),从预备改质区域7p更难以在SiC基板12产生龟裂。预备改质区域7p,通过缩小激光L的脉冲能量、脉冲间距、脉冲宽度等,能够使得与作为切断起点的改质区域7a(7m)相比更难以在SiC基板12产生龟裂。

[0107] 沿着预备线5p形成预备改质区域7p后,让激光L的聚光点P对准于SiC基板12的内部,沿着切断预定线5a(5m)将激光L照射于加工对象物1。由此,沿着切断预定线5a(5m)将作为切断起点的改质区域7a(7m)形成于SiC基板12的内部。该改质区域7a(7m)为包含熔融处

理区域的区域。沿着切断预定线5a(5m)形成改质区域7a(7m)后,以改质区域7a(7m)为起点而沿着切断预定线5a(5m)将加工对象物1切断。

[0108] 根据以上的激光加工方法,基于如下的理由,将具备具有与c面成偏离角的角度度的表面12a的六方晶系SiC基板12的板状的加工对象物1沿着切断预定线5a,5m高精度地切断,其结果,可以得到沿着切断预定线5a,5m被高精度地切断后的加工对象物1(即,功率器件)。

[0109] 即,当要沿着切断预定线5a(5m)在SiC基板12的内部形成改质区域7a(7m)时,沿着各预备线5p在SiC基板12的内部形成有预备改质区域7p。于是,预备线5p在与表面12a平行的面内位于切断预定线5a(5m)的两侧且向与切断预定线5a(5m)平行的方向延伸。因此,即使龟裂从改质区域7a(7m)向c面方向伸展,与图34(b)所示的不形成预备改质区域7p的情况相比,如图34(a)所示,该龟裂(c面裂纹)的伸展会被预备改质区域7p抑制。由此,不用考虑龟裂是否容易从改质区域7a(7m)向c面方向伸展,便能够让龟裂容易从改质区域7a(7m)向SiC基板12的厚度方向伸展的方式将激光照射于加工对象物1。再有,预备改质区域7p,由于不需要作为切断起点而起作用(即,促进龟裂从预备改质区域7p向SiC基板12的厚度方向的伸展),因此,通过照射难以在SiC基板12产生龟裂的那样的激光L而形成,因而能够在形成预备改质区域7p时容易抑制龟裂从预备改质区域7p向c面方向伸展。因此,可以将具备具有与c面成偏离角的角度度的主面的六方晶系SiC基板12的板状的加工对象物沿着切断预定线5a(5m)高精度地切断。

[0110] 另外,当形成改质区域7a(7m)时,让激光L的聚光点P对准于离SiC基板12的激光入射面即表面12a规定的距离的情况,在形成预备改质区域7p时也优选让激光L的聚光点P对准于离表面12a相同的距离。据此,能够更切实地抑制龟裂从改质区域7a(7m)向c面方向的伸展。

[0111] 再有,与沿着各预备线5p在SiC基板12的内部形成预备改质区域7p同时地,即使在沿着设定在这些预备线5p间的切断预定线5a(5m)而在SiC基板12的内部形成改质区域7a(7m)的情况下,c面裂纹的伸展也会被预备改质区域7p抑制。在这种情况下,相对于沿着切断预定线5a(5m)的改质区域7a(7m)的形成,优选让沿着预备线5p的预备改质区域7p的形成先进行。

[0112] 产业上的可利用性

[0113] 根据本发明,能够将具备具有与c面成偏离角的角度度的主面的六方晶系SiC基板的板状的加工对象物沿着切断预定线高精度地切断。

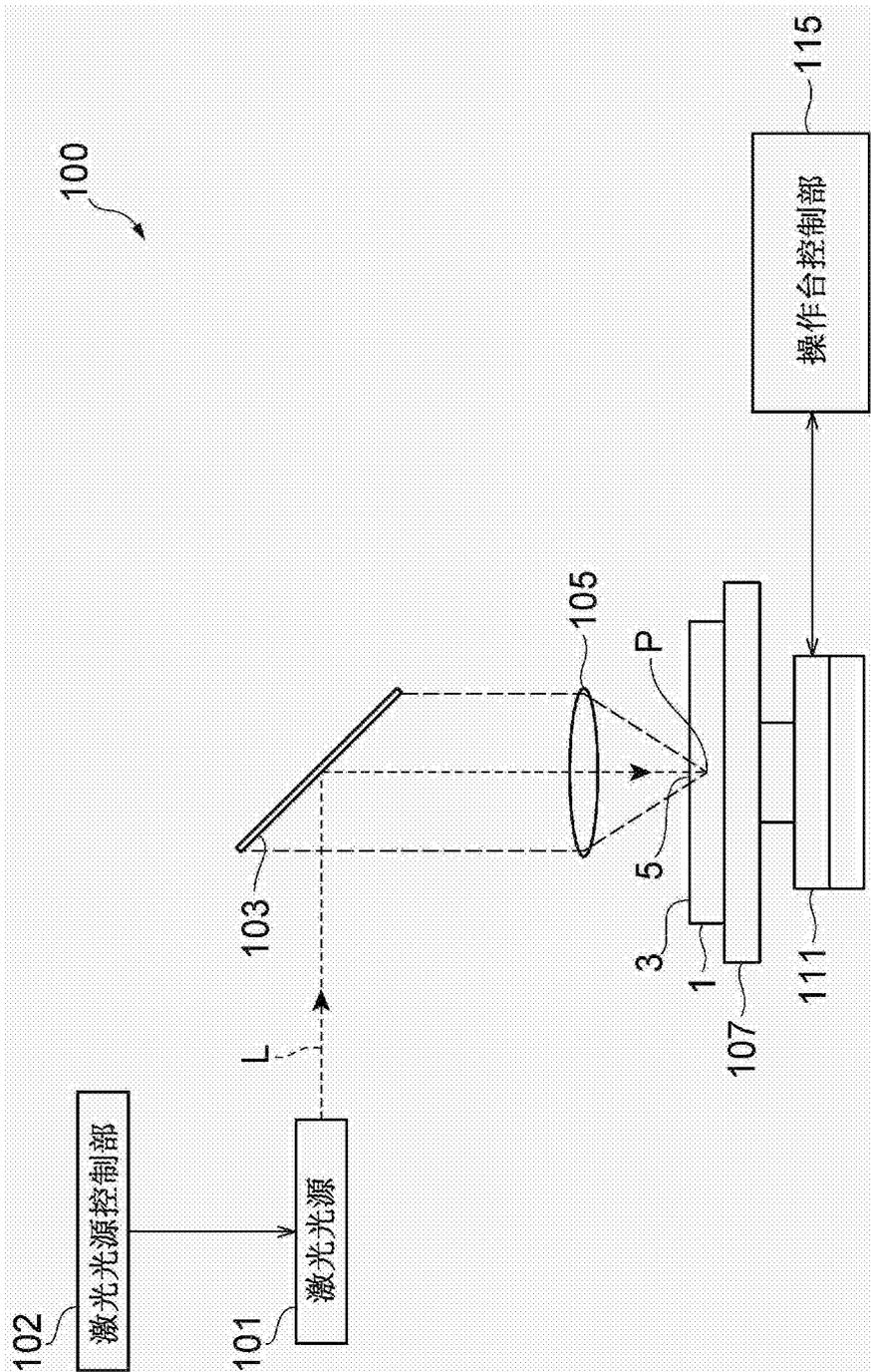


图1

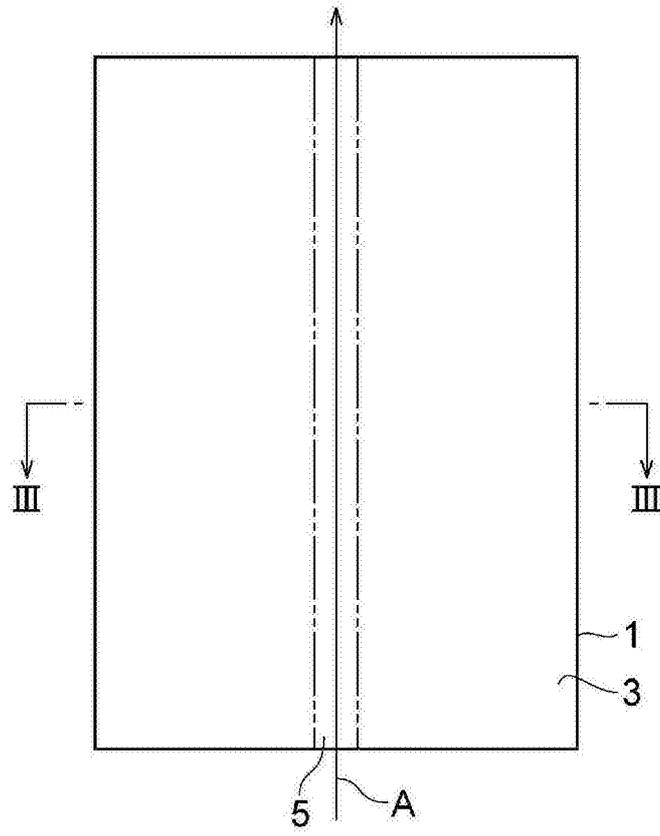


图2

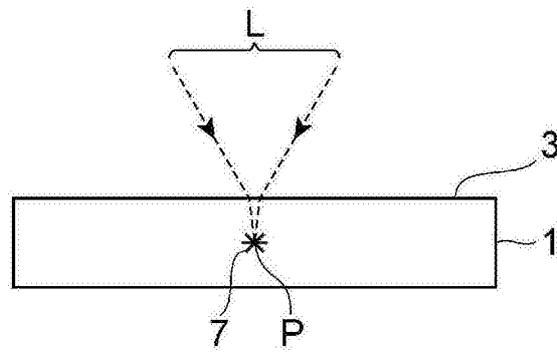


图3

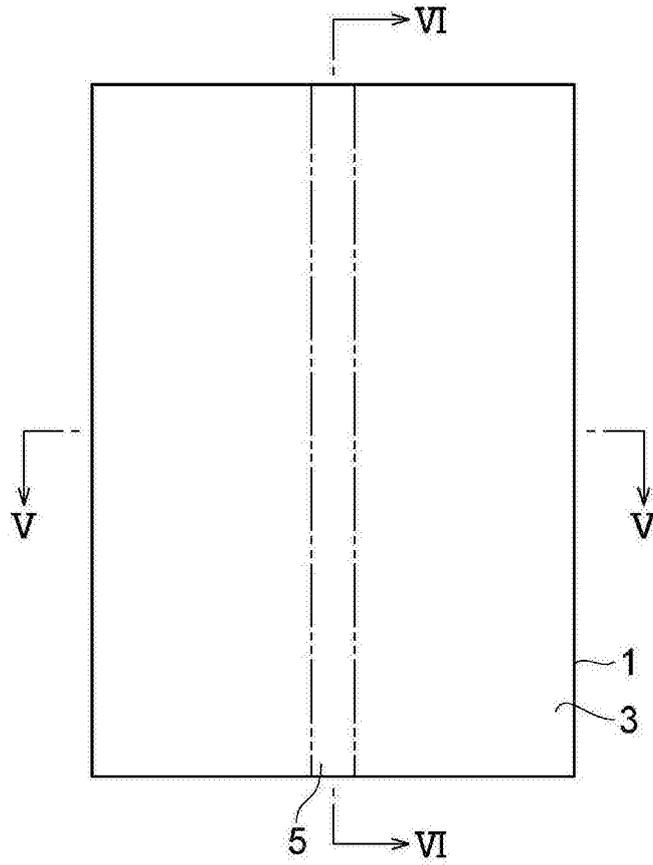


图4

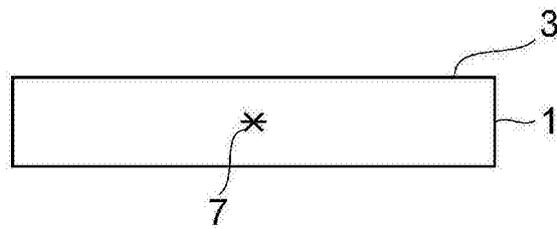


图5

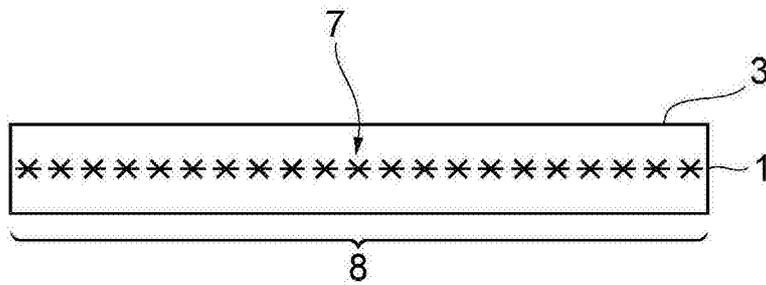


图6

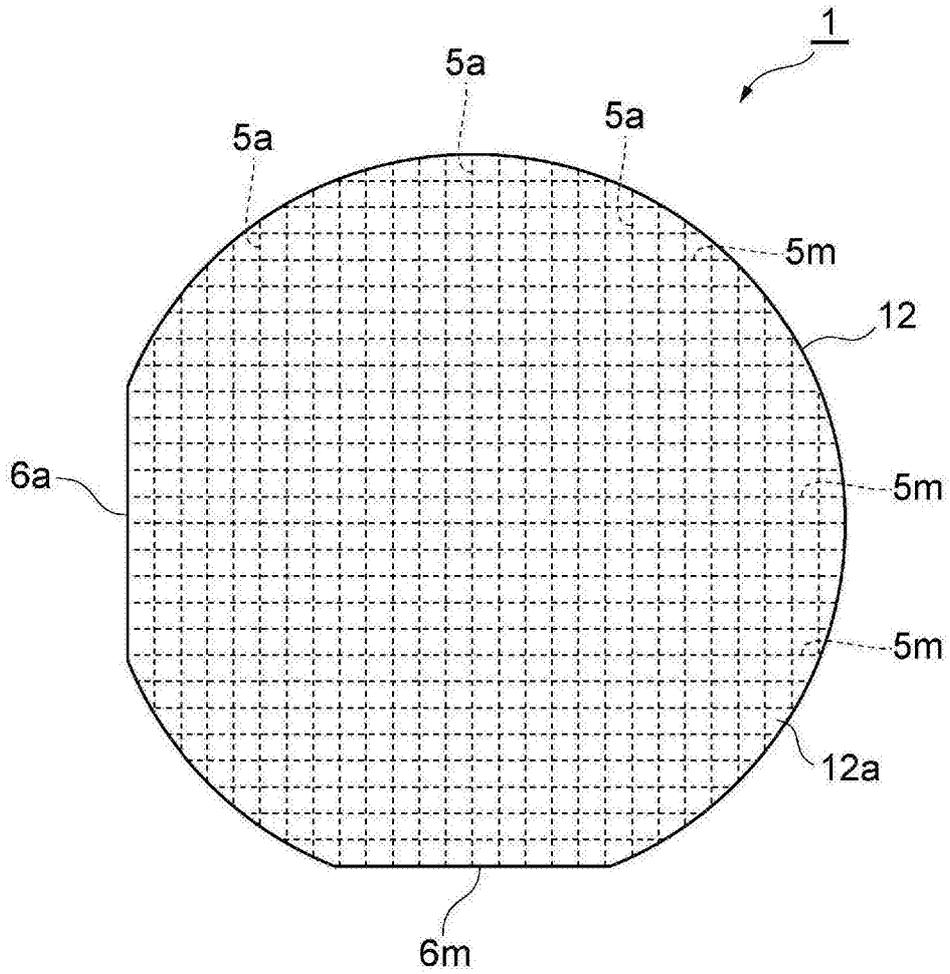


图7

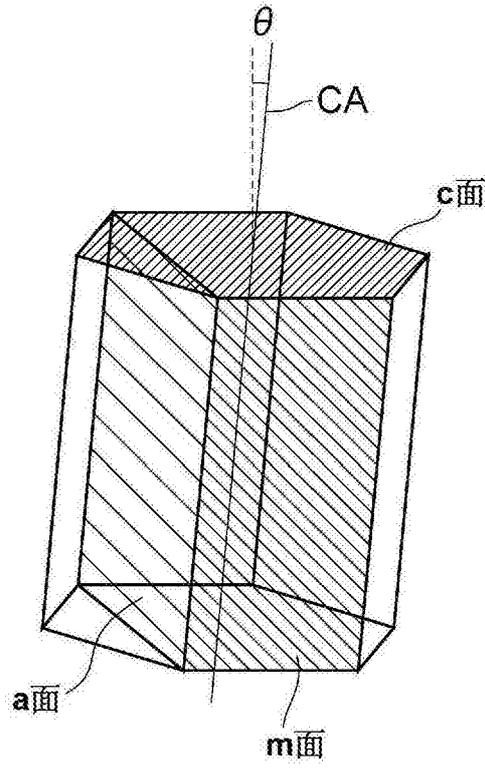


图8

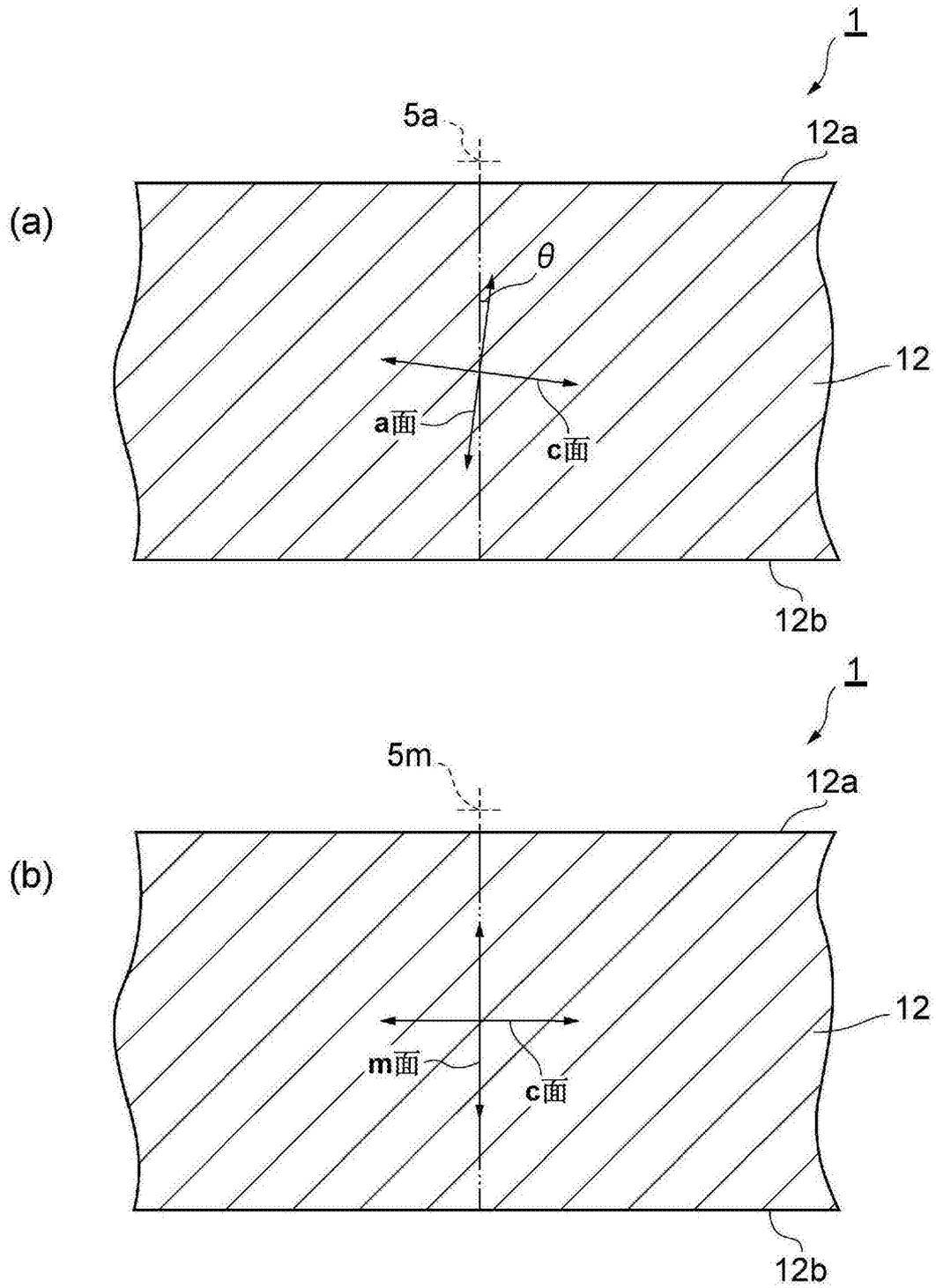


图9

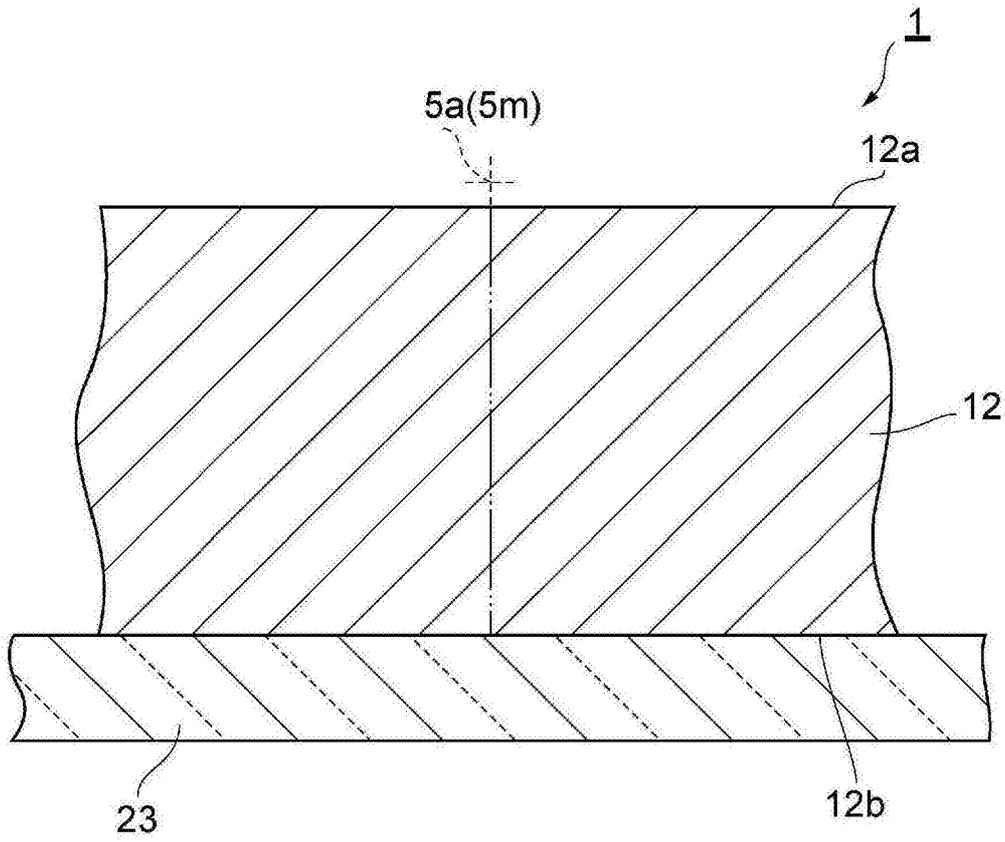


图10

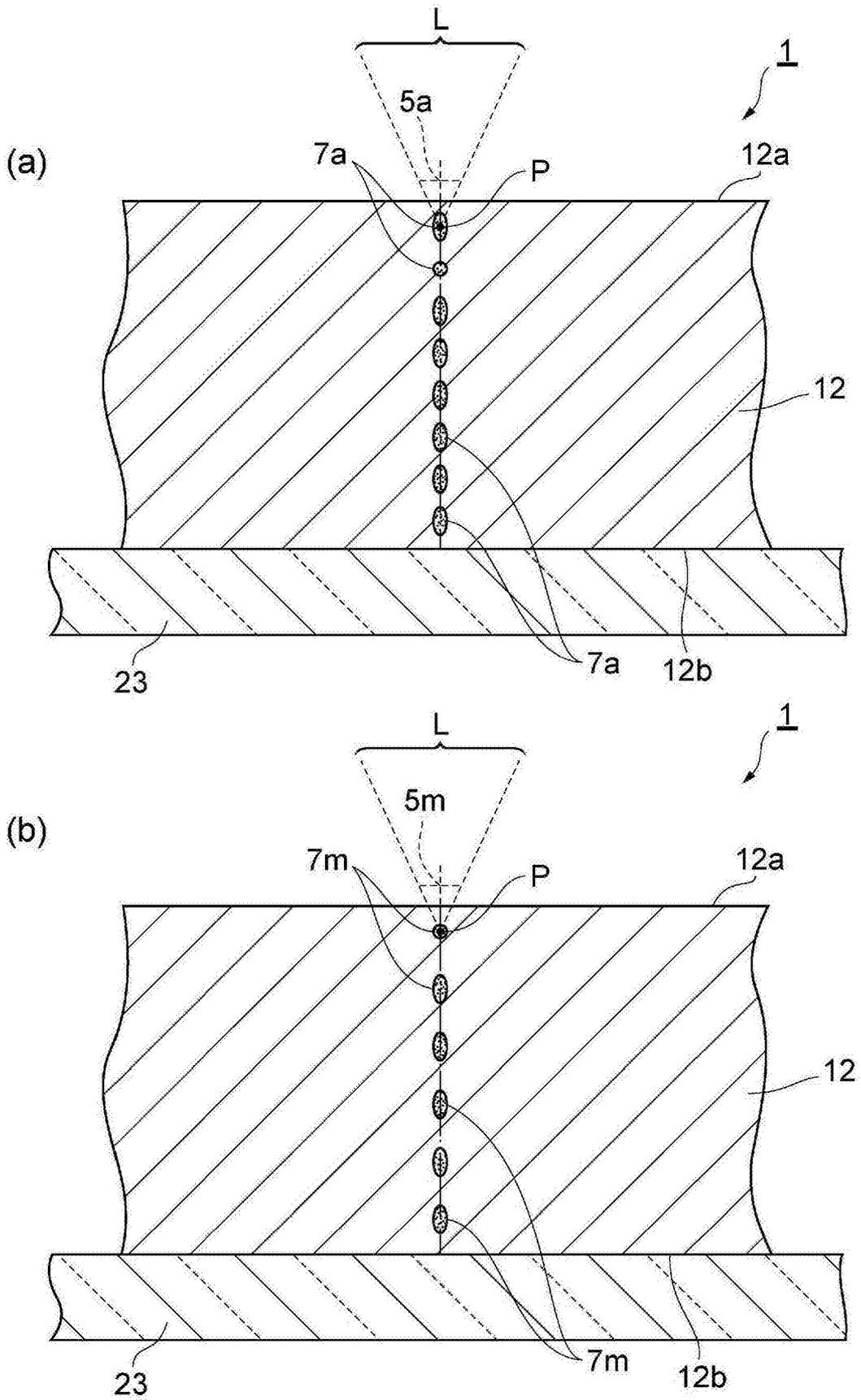


图11

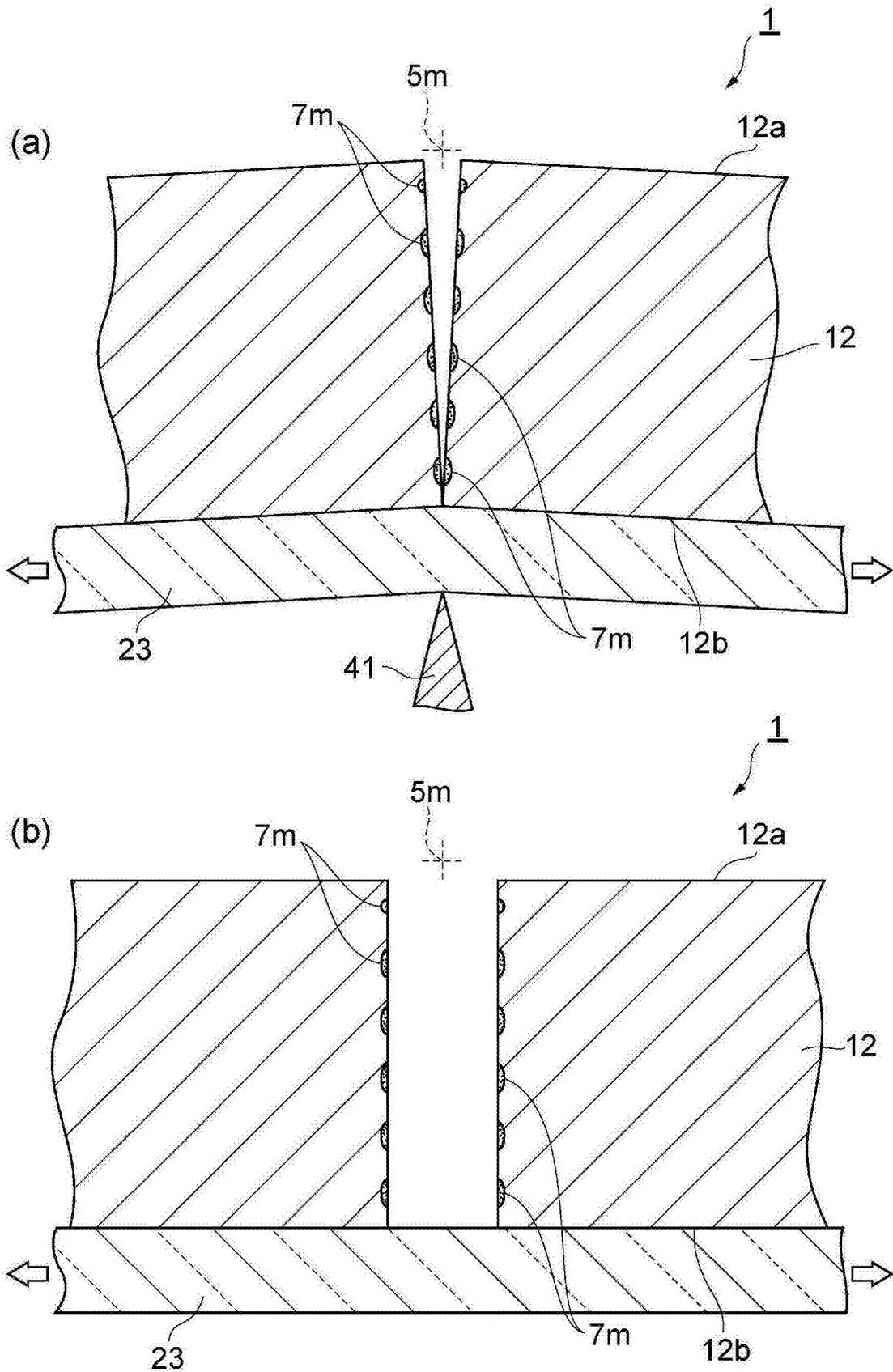


图12

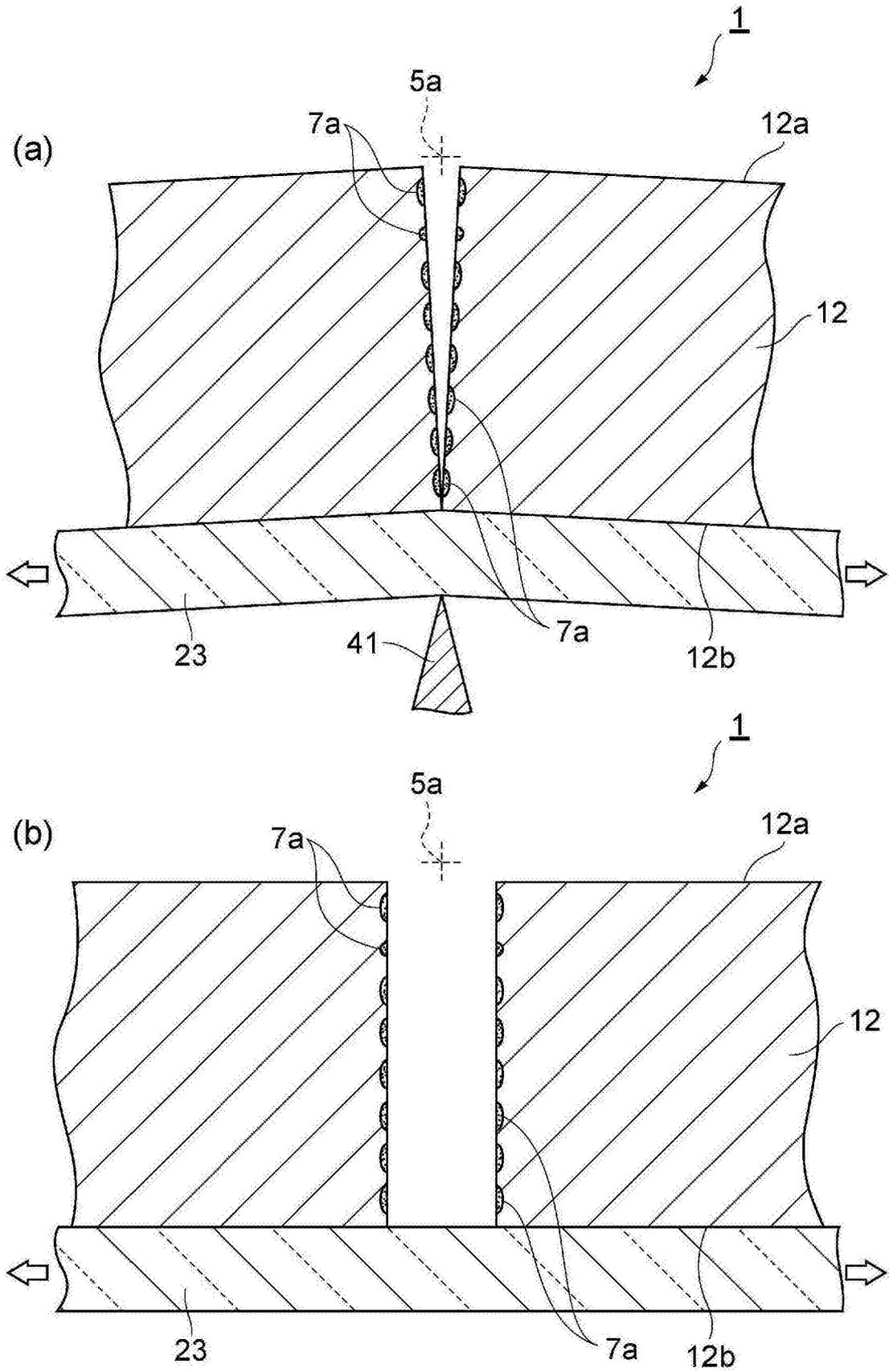


图13

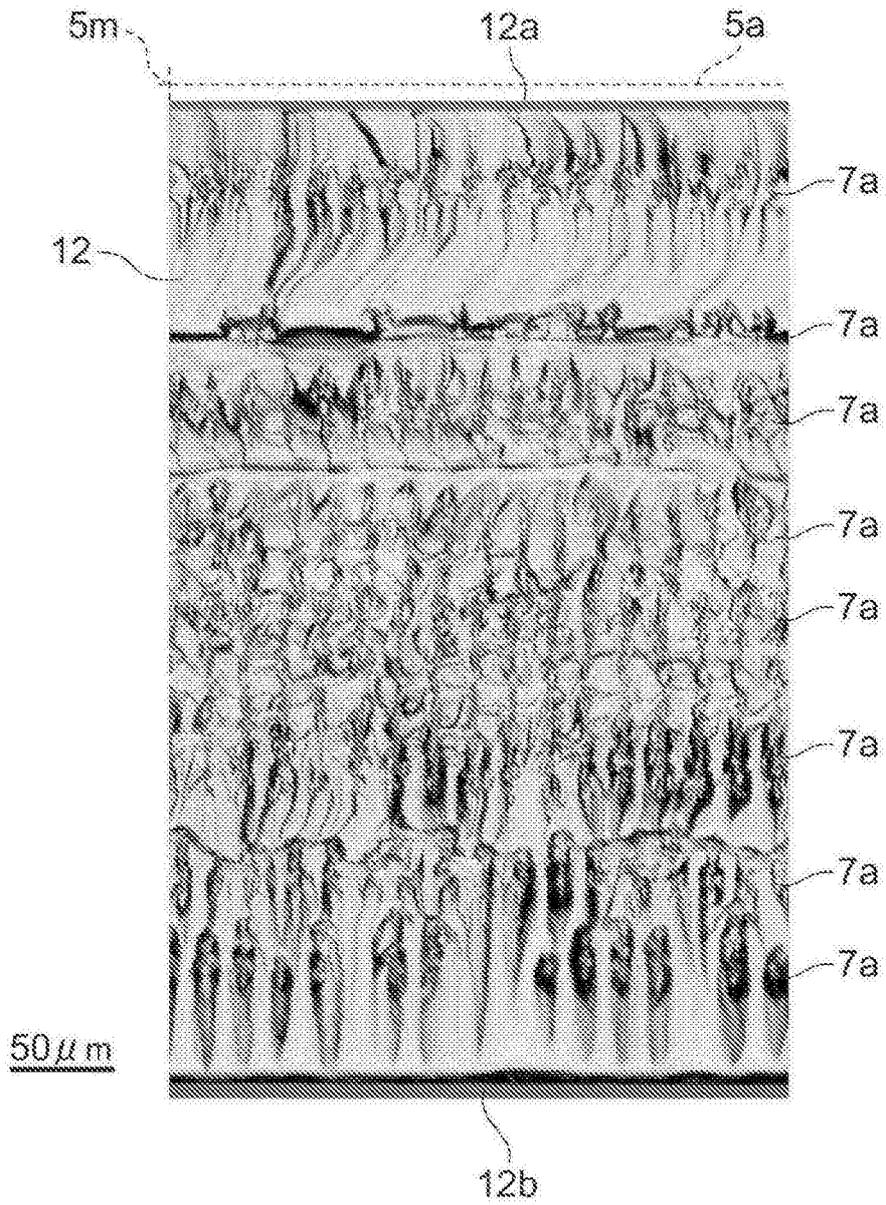


图14

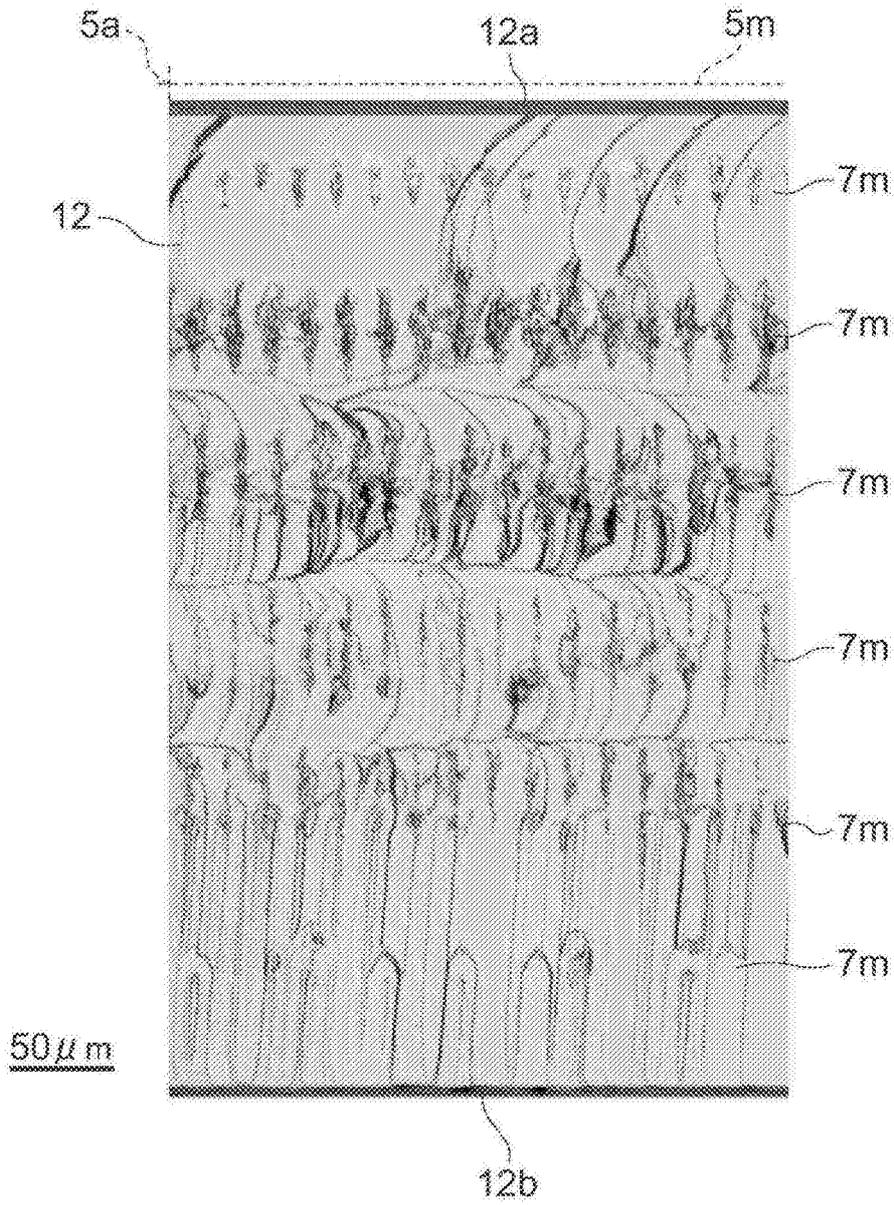


图15

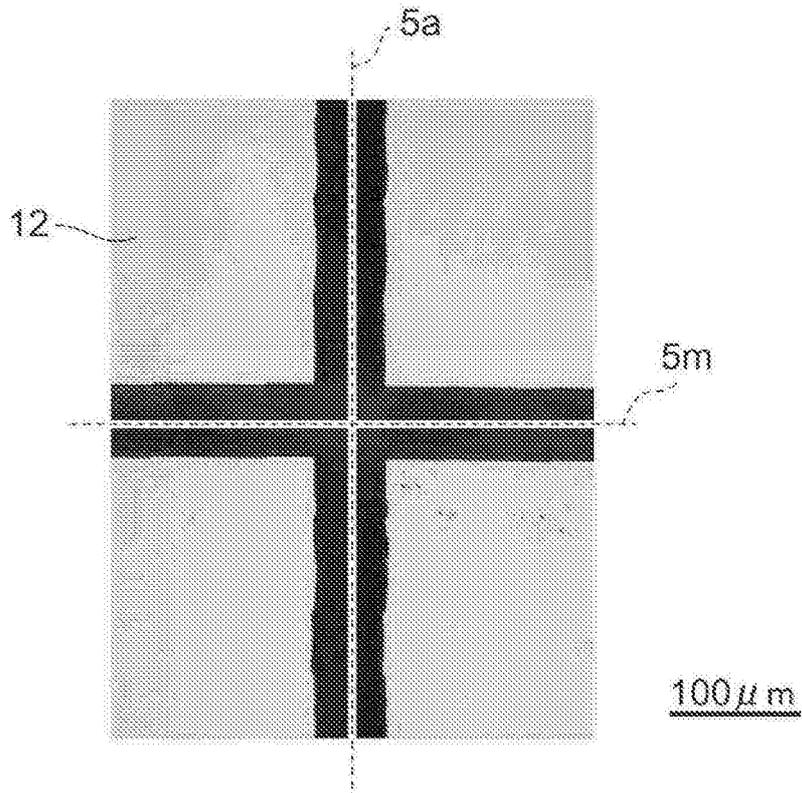


图16

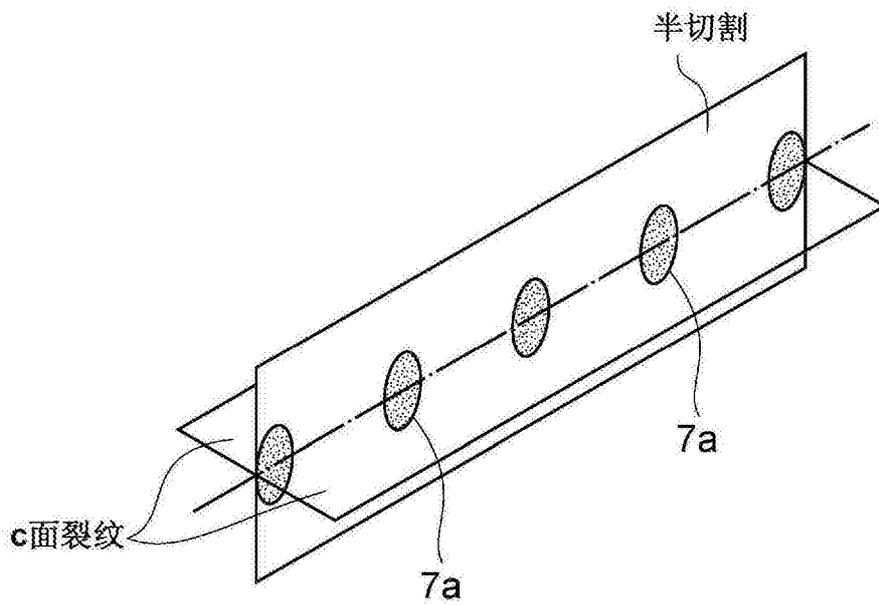


图17

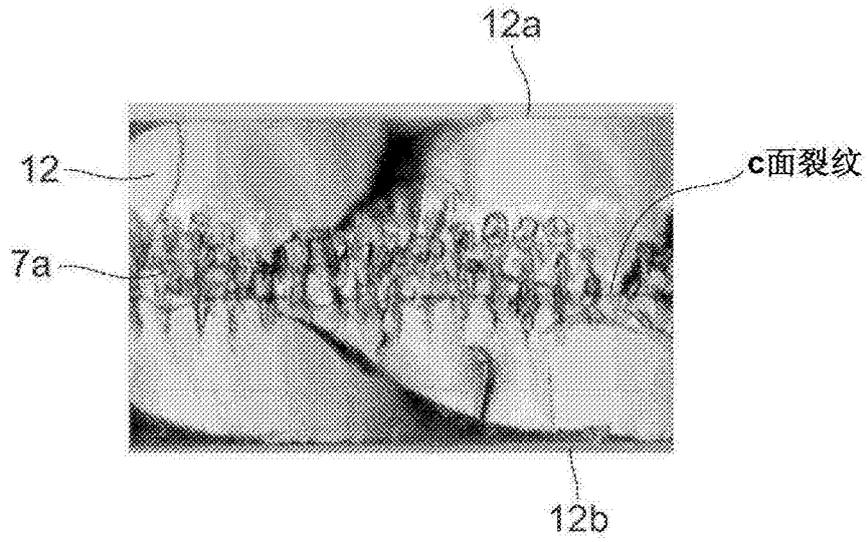


图18

脉冲宽度(ns)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
ID 阈值	不可	可	可	良	良	优	优	优	优	优	优	优
HC 阈值	优	优	优	优	良	良	良	良	可	可	可	不可
加工裕度	不可	可	可	可	良	优	优	良	可	可	可	可
综合	不可	可	可	良	良	优	优	良	良	可	可	不可

图19

脉冲间距(μm)	6	8	10	11	12	14	15	16	18	20	22
ID 阈值	不可	不可	可	良	良	优	优	优	优	优	优
HC 阈值	优	优	良	良	良	良	良	可	可	不可	不可
加工裕度	不可	不可	可	良	良	优	优	良	良	不可	不可
综合	不可	不可	可	良	良	优	优	良	良	不可	不可

图20

脉冲宽度27ns(NA0.8)

能量 (μJ)	功率 (W)	脉冲间距 (μm)																		
		6	8	10	12	14	16	18	20											
11.0	0.110	ST																		
12.0	0.120	ID(5) LV3	ST	ST																
13.0	0.130	ID(10) LV3	HC(10)	HC(6)	ST															
14.0	0.140	ID(10) LV3	ID(10) LV3	ID(8) LV3	ST															
15.0	0.150		HC(12)	HC(12)	HC(10)	ST														
16.0	0.160		ID(15) LV3	HC(12)	HC(12)	HC(12)	ST													
17.0	0.170		ID(19) LV2	ID(17) LV1	ID(12) LV3	HC(12)	HC(8)													
18.0	0.180		ID(17) LV3	HC(15)	HC(17)	HC(15)	HC(12)													
19.0	0.190			ID(17) LV3	ID(19) LV3	HC(17)	HC(12)													
20.0	0.200			HC(19)	ID(17) LV1	HC(17)	HC(12)													
21.0	0.210			ID(24) LV3	ID(20) LV3	ID(17) LV3	HC(14)													
22.0	0.220					HC(19)	HC(15)													
23.0	0.230					HC(24)	HC(15)													
24.0	0.240					ID(19) LV2	HC(21)													
25.0	0.250					ID(24) LV3	ID(19) LV2													
26.0	0.260						ID(19) LV3													
27.0	0.270						ID(16) LV2													
28.0	0.280						ID(19) LV2													
29.0	0.290						ID(26) LV2													

图21

脉冲宽度 57ns(NA0.8)

		脉冲间距(μm)								HC 阈值
能量 (μJ)	功率 (W)	6	8	10	12	14	16	18	20	ID 阈值
11.0	0.220									
12.0	0.240									
13.0	0.455									
14.0	0.490	ST	ST							
15.0	0.525	HC(4)	HC(6)	ST						
16.0	0.560	HC(8)	HC(8)	ST						
17.0	0.595	HC(10)	HC(10)	HC(10)	ST					
18.0	0.630	HC(12)	HC(8)	HC(12)	HC(8)	HC(4)	ST			
19.0	0.665	HC(15)	HC(12)	HC(12)	HC(12)	HC(8)	ST	HC(6)		
20.0	0.700	HC(19)	HC(12)	HC(15)	HC(12)	HC(12)	HC(6)	HC(10)		
21.0	0.735	ID(17)	HC(12)	HC(15)	HC(12)	HC(12)	HC(15)	HC(15)		
22.0	0.770	ID(17)	HC(14)	HC(12)	HC(15)	HC(17)	HC(15)	HC(15)		
23.0	0.805		ID(17)	ID(15)	HC(15)	HC(17)	HC(15)	HC(15)		
24.0	0.840		ID(17)	HC(15)	HC(15)	HC(17)	HC(17)	HC(15)		
25.0	0.875		ID(17)	HC(17)	HC(17)	HC(15)	HC(17)	HC(15)		
26.0	0.910		ID(17)	HC(17)	HC(17)	HC(21)	HC(15)	HC(17)		
27.0	0.945			ID(17)	HC(17)	HC(24)	HC(17)	HC(17)		
28.0	0.980			HC(17)	HC(17)	HC(17)	HC(17)	HC(19)		
29.0	1.015			ID(17)	HC(19)	ID(22)	HC(17)	HC(19)		

图 23

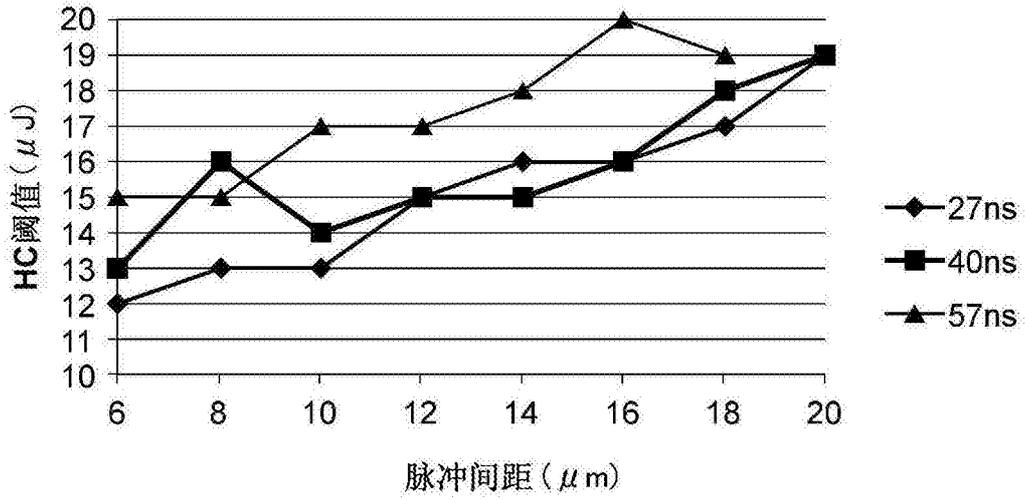


图24

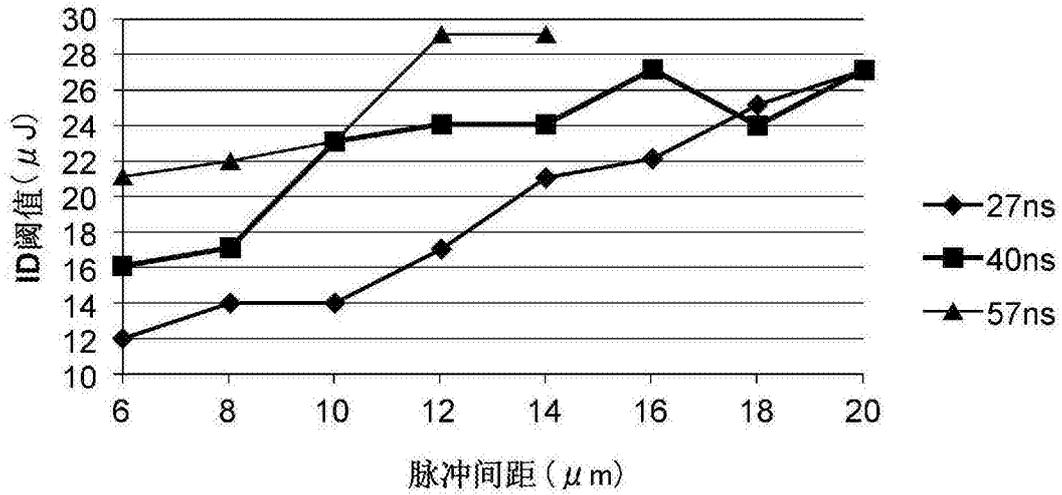


图25

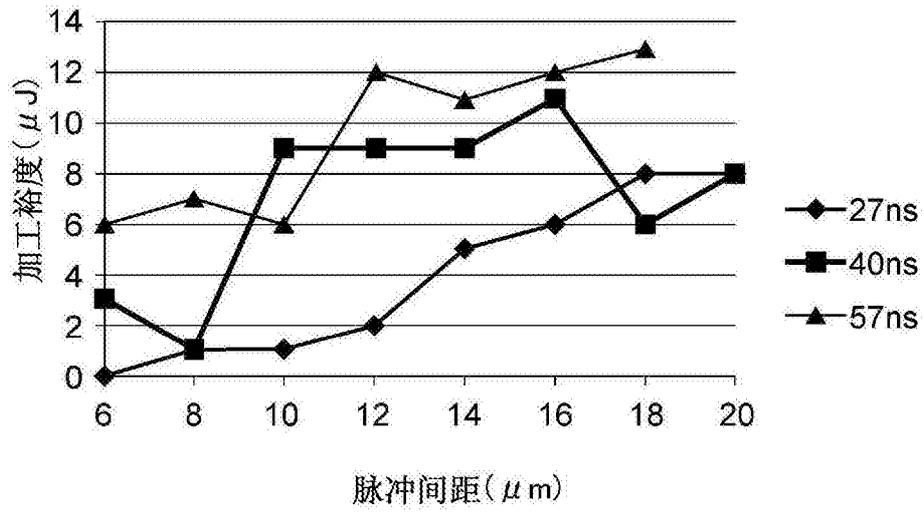


图26

脉冲宽度27ns(NA0.6)

能量 (μ J)	功率 (W)	脉冲间距 (μ m)										HC 阈值	ID 阈值					
		6	8	10	12	14	16	18	20									
6.0	0.060	ST																
7.0	0.070	ID(6) LV3	ST															
8.0	0.080	HC(6)	HC(6)	HC(6)														
9.0	0.090	ID(8) LV2	HC(8)	HC(8)	ST													
10.0	0.100		HC(12)	HC(8)	HC(6)	ST												
11.0	0.110		ID(12) LV1	ID(10)	HC(6)	HC(6)	ST											
12.0	0.120		ID(12) LV1	ID(10) LV3	HC(8)	HC(6)	HC(8)	ST										
13.0	0.130		ID(12) LV1	ID(15) LV3	HC(10)	HC(8)	HC(8)	HC(8)	ST									
14.0	0.140				HC(12)	HC(8)	HC(8)	HC(8)	HC(8)									
15.0	0.150				HC(12)	HC(12)	HC(12)	HC(10)	HC(10)									
16.0	0.160				ID(14) LV1	HC(12)	HC(12)	HC(10)	HC(10)									
17.0	0.170				ID(14) LV1	ID(14) LV1	ID(14) LV1	HC(14) OD	HC(14) OD									
18.0	0.180					ID(16) LV1	ID(16) LV1	HC(15) OD	HC(15) OD									
19.0	0.190					ID(16) LV2	ID(16) LV2	HC(16) OD	HC(16) OD									
20.0	0.200							HC(16) OD	HC(16) OD									

图27

脉冲宽度40ns(NA0.6)

		脉冲间距(μm)									
		6	8	10	12	14	16	18	20		
能量 (μJ)	功率 (W)										
6.0	0.060	ST									
7.0	0.140	ST	ST								
8.0	0.160	LEV3	HC(8)	ST							
9.0	0.180	ID(8)	HC(8)	HC(6)							
10.0	0.200		HC(8)	HC(7)	ST						
11.0	0.220		ID(10)	HC(8)	HC(6)	ST					
12.0	0.240		ID(15)	HC(10)	HC(8)	HC(6)	ST				
13.0	0.260			HC(10)	HC(12)	HC(8)	HC(6)	ST			
14.0	0.280			HC(10)	HC(12)	HC(10)	HC(8)	HC(8)	ST		
15.0	0.300			HC(10)	HC(12)	HC(12)	HC(8)	HC(10)	HC(8)		
16.0	0.320			HC(12)	HC(14)	HC(14)	HC(10)	HC(12)	HC(10)		
17.0	0.340			HC(14)	HC(16)	HC(16)	HC(14)	HC(14)	HC(12)		
18.0	0.360			ID(15)	HC(16)	HC(16)	OD	HC(14)	HC(14)		
19.0	0.380			LV3	HC(16)	HC(16)	OD	HC(16)	HC(14)	OD	
20.0	0.400							HC(16)	OD	OD	

图28

脉冲宽度57ns(NA0.6)

		脉冲间距 (μm)										HC 阈值
		6	8	10	12	14	16	18	20			ID 阈值
能量 (μJ)	功率 (W)											
6.0	0.060											
7.0	0.070											
8.0	0.280		ST									
9.0	0.315	ST	ST	ST								
10.0	0.350	HC(5)	HC(6)	HC(6)	ST							
11.0	0.385	ID(16) LV3	HC(8)	HC(6)	HC(6)	ST						
12.0	0.420	ID(10) LV2	HC(8)	HC(8)	HC(6)	HC(6)						
13.0	0.455		ID(10) LV2	HC(10)	HC(8)	HC(10)	ST					
14.0	0.490		ID(10) LV2	HC(10)	HC(8)	HC(10)	HC(6)	HC(6)				
15.0	0.525		ID(12) LV3	HC(16)	HC(10)	HC(12)	HC(6)	HC(8)				
16.0	0.560			HC(16)	HC(12)	HC(12)	HC(8)	HC(12)				
17.0	0.595			HC(16) OD	HC(12)	HC(12)	HC(8)	HC(15)				
18.0	0.630			ID(16) LV2	HC(16) OD	HC(16) OD	HC(10)	HC(16) OD				
19.0	0.665				HC(16) OD	HC(16) OD	HC(16) OD	HC(16) OD				
20.0	0.700				HC(17) OD	HC(17) OD	HC(16) OD	HC(16) OD				

图29

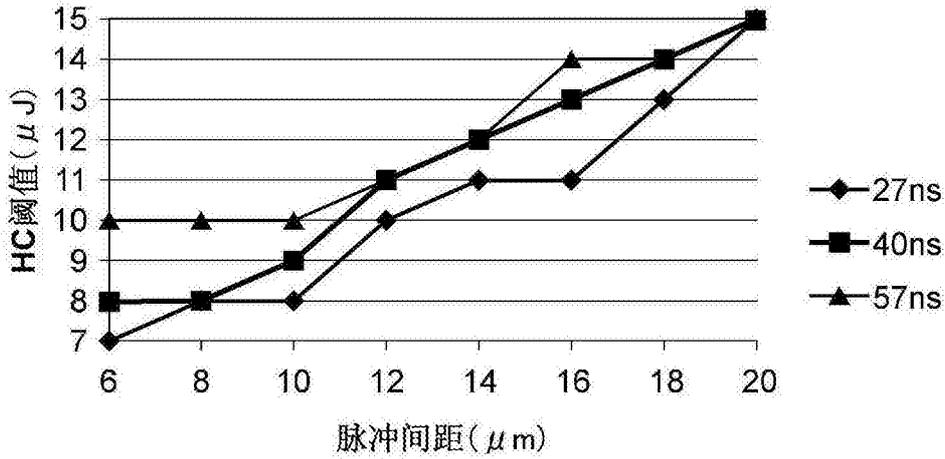


图30

聚光点位置 (μm)	脉冲宽度(ns)/能量(μJ)			
	27/9	40/8	50/10	57/11
25.3	裂纹	裂纹	裂纹多	有分岔
28.4	裂纹	分岔多	分岔多	7
31.5	分岔多	有分岔	7	7
34.5	有分岔	5	7	6
37.6	5	4	5	5
40.6	4	4	4	4
43.7	ST	ST	ST	ST

加工裕度

图31

能量(μJ)	脉冲宽度(ns)			
	27	40	50	57
7	ST	ST	ST	ST
8	ST	ST	3	4
9	4	5	5	6
10	5	7	6	6
11	8	8	7	7
12	8	8	7	8

HC阈值

图32

能量(μJ)	脉冲间距(μm)						HC阈值
	10	12	14	16	18		
7	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
8	3	ST	ST	3	ST	ST	ST
9	5	4	4	4	4	4	4
10	6	5	5	5	5	5	5
11	10	6	6	6	6	6	6
12	10	8	8	8	8	8	7

图33

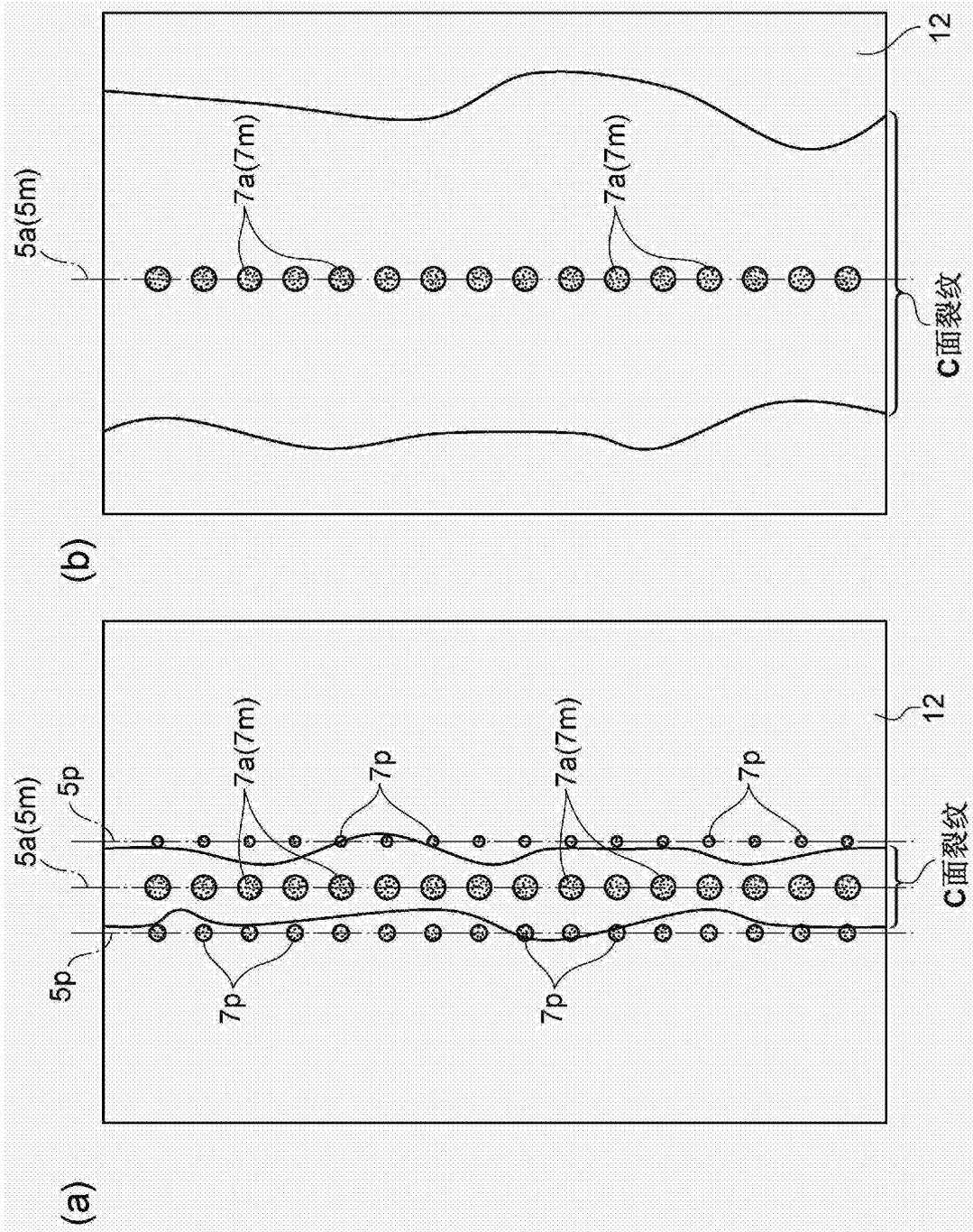


图34