



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107003530 B

(45)授权公告日 2020.07.24

(21)申请号 201580063154.8

(22)申请日 2015.11.16

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 107003530 A

(43)申请公布日 2017.08.01

(30)优先权数据  
102014116957.3 2014.11.19 DE

(85)PCT国际申请进入国家阶段日  
2017.05.19

(86)PCT国际申请的申请数据  
PCT/EP2015/076707 2015.11.16

(87)PCT国际申请的公布数据  
W02016/079062 DE 2016.05.26

(73)专利权人 通快激光与系统工程有限公司  
地址 德国迪琴根

(72)发明人 D·弗拉姆 D·格罗斯曼  
M·凯泽 J·克莱纳  
M·库姆卡尔

(74)专利代理机构 永新专利商标代理有限公司  
72002

代理人 郭毅

(51)Int.Cl.  
G02B 27/09(2006.01)  
G02B 5/18(2006.01)

(56)对比文件  
CN 101883658 A, 2010.11.10,  
WO 2009040103 A1, 2009.04.02,

审查员 刘丹

权利要求书4页 说明书22页 附图18页

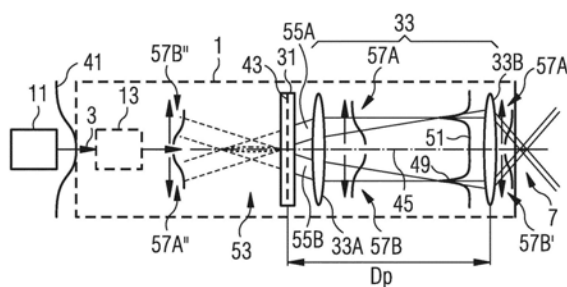
(54)发明名称

用于射束成形的光学系统

(57)摘要

用于为了加工尤其对于激光射束来说很大程度上透明的材料(9)的激光射束(3)的射束成形的光学系统(1),所述加工通过所述材料(9)在沿传播方向(5)拉长的聚焦区(7)中的改性实现,所述光学系统具有射束成形元件(31),该射束成形元件构造用于接收具有横向输入强度特性(41)的所述激光射束(3)并且通过所述横向输入强度特性(31)将射束成形的相位曲线(43)施加给所述激光射束(3)。所述光学系统(1)还具有近场光学器件(33B),该近场光学器件在射束下游以射束成形距离(Dp)相对于所述射束成形元件(31)布置并且该近场光学器件构造用于将所述激光射束(3)聚焦到所述聚焦区(7)中,其中,所施加的相位曲线(43)使得拉长的聚焦区(7)的处于所述射束成形元件(31)前面的虚拟光学图像(53)配属给所述激光射束(3)。此外,所述射束成形距离(Dp)相应于所述激光射束(3)的传播长度,在该传播长度中所施加的相位曲线(43)将所

述横向输入强度特性(41)转化为在所述近场光学器件(33B)的区域中的横向输出强度特性(51),并且所述横向输出强度特性相比于所述输入强度特性(41)具有处于射束轴线(45)外部的局部最大值(49)。



CN 107003530 B

1. 一种用于激光射束 (3) 的射束成形的光学系统 (1), 用于加工对于所述激光射束来说很大程度上透明的材料 (9), 所述加工通过使所述材料 (9) 在沿传播方向 (5) 拉长的聚焦区 (7) 中改性实现, 所述光学系统具有

射束成形元件 (31), 该射束成形元件构造用于接收具有横向输入强度特性 (41) 的所述激光射束 (3) 并且在所述横向输入强度特性 (41) 上给所述激光射束 (3) 施加进行射束成形的相位曲线 (43), 以及

近场光学器件 (33B), 该近场光学器件以相对于所述射束成形元件 (31) 的射束成形距离 ( $D_p$ ) 布置在射束下游并且该近场光学器件构造用于将所述激光射束 (3) 聚焦到所述聚焦区 (7) 中, 其中,

所施加的相位曲线 (43) 使得所述激光射束 (3) 配属有拉长的聚焦区 (7) 的处于所述射束成形元件 (31) 前面的虚拟光学图像 (53), 并且

所述射束成形距离 ( $D_p$ ) 相应于所述激光射束 (3) 的传播长度, 在该传播长度中, 所施加的相位曲线 (43) 将所述横向输入强度特性 (41) 转化为在所述近场光学器件 (33B) 的区域中的横向输出强度特性 (51), 并且所述横向输出强度特性 (51) 与所述横向输入强度特性 (41) 相比具有处于射束轴线 (45) 外部的局部最大值 (49)。

2. 根据权利要求1所述的光学系统 (1), 其中, 所述光学系统 (1) 构造为具有缩小的成像比例的成像系统 (33), 用于成像所述虚拟光学图像 (53) 并且用于产生拉长的聚焦区 (7)。

3. 根据权利要求2所述的光学系统 (1), 其中,

所述射束成形元件 (31) 还作为所述成像系统 (33) 的部分构造用于给所述激光射束 (3) 附加地施加具有聚焦作用的相位曲线, 使得所述虚拟光学图像 (53) 到拉长的聚焦区 (7) 上的成像通过所述射束成形元件 (31) 的附加施加的所述相位曲线实现并且聚焦通过所述近场光学器件 (33B) 实现。

4. 根据权利要求2或3所述的光学系统 (1), 其中,

所述光学系统 (1) 具有靠近所述射束成形元件 (31) 布置的、具有聚焦作用的远场光学器件 (33A), 使得所述虚拟光学图像 (53) 到拉长的聚焦区 (7) 上的成像通过聚焦实现, 所述聚焦通过所述远场光学器件 (33A) 和所述近场光学器件 (33B) 实现。

5. 根据权利要求2或3所述的光学系统 (1), 其中,

所述成像系统 (33) 给所述射束成形元件 (31) 配属在所述虚拟光学图像 (53) 的图像纵向中央的射束下游的图像平面, 并且所述激光射束在所述射束成形元件 (31) 上的横向射束特性存在于所述图像平面中。

6. 根据权利要求5所述的光学系统 (1), 其中,

在所述图像平面区域中存在沿纵向方向的从存在于所述聚焦区中的横向射束特性至具有黑暗中央的横向射束特性的快速翻转, 具有黑暗中央的横向射束特性在所述激光射束 (3) 的基本上横向的高斯射束特性的情况下并且在入射激光射束 (3) 的射束分量方面存在, 所述射束分量产生配属给所述虚拟光学图像的发散的射束区域 (55A, 55B)。

7. 根据权利要求1或2所述的光学系统 (1), 其中,

所述光学系统 (1) 这样构造, 使得基本上仅入射激光射束的中央区域对配属给所述虚拟图像的所述聚焦区 (7) 的处于射束下游的末端有贡献, 使得所述入射激光射束的射束直径的变化不导致所述聚焦区 (7) 的处于射束下游的所述末端的显著纵向移动。

8. 根据权利要求1或2所述的光学系统(1), 其中,

所施加的进行射束成形的所述相位曲线构造用于, 在具有高斯强度分布的入射激光射束的情况下至少对于所述入射激光射束(3)的分量产生配属给所述虚拟光学图像的发散的射束区域(55A, 55B), 该射束区域在衍射的光学射束成形元件(31)的射束下游具有横向强度分布(57A, 57B), 该横向强度分布从内向外降低。

9. 根据权利要求4所述的光学系统(1), 其中,

所述横向强度分布(57A, 57B)存在于所述远场光学器件(33A)的处于射束下游的焦平面(340)的射束上游, 并且

经相位施加的射束区域(55A, 55B)具有横向强度曲线, 该横向强度曲线具有梯级形强度提升的区段, 该横向强度曲线在所述射束成形元件(31)与如下焦平面之间的区域中具有径向向内指向的侧沿(907), 所述焦平面配属给所述近场光学器件(33B)或所述远场光学器件(33A)或给所述射束成形元件(31)附加地施加的具有聚焦作用的相位。

10. 根据权利要求9所述的光学系统(1), 其中,

所述横向强度曲线在所述焦平面与所述聚焦区(7)之间具有径向向外指向的侧沿。

11. 根据权利要求9所述的光学系统(1), 其中,

所述相位曲线(43)使得这种经相位施加的射束分量的聚焦形成具有沿传播方向(5)拉长的聚焦区(7)的反类贝塞尔射束类型的射束特性或反类艾里射束类型的射束特性, 在该射束特性中仅入射激光射束的中央区域对拉长的聚焦区(7)的处于射束下游的末端有贡献。

12. 根据权利要求1或2所述的光学系统(1), 其中,

所述射束成形元件(31)构造为基本上仅起相位调制作用, 使得在施加所述相位曲线(43)时在很大程度上避免幅度调制的情况下保持所述射束成形元件(31)上的所述横向输入强度特性(41)。

13. 根据权利要求1或2所述的光学系统(1), 其中,

所述射束成形元件(31)为了相位施加而构造为空心锥轴棱镜(131A)、空心锥轴棱镜-透镜/反射镜系统(131B)、反射式轴棱镜-透镜/反射镜系统(131C)或可编程或固定写入的、衍射的光学元件(31, 31A, 31B)。

14. 根据权利要求1或2所述的光学系统(1), 其中, 所述射束成形元件(31)还构造用于施加线性相位曲线, 使得通过有效射束分量(203A)的横向射束偏转(230)引起所述有效射束分量(203A)与干扰射束分量(203B)的空间分离。

15. 根据权利要求1或2所述的光学系统(1), 其中,

拉长的聚焦区(7)具有至少10:1的纵横比和/或具有在所述聚焦区上的强度分布的横向延展的最大改变, 所述最大改变处于50%以及更少的区域中。

16. 根据权利要求1或2所述的光学系统(1), 其中,

拉长的聚焦区(7)是反贝塞尔射束类型或反艾里射束类型的射束的聚焦区、或者是沿扩展方向调制的或均匀化的这种射束的聚焦区、或者是多个这种射束或多个这种空间补充的射束的叠加。

17. 根据权利要求1或2所述的光学系统(1), 所述光学系统还具有扫描单元(310), 所述扫描单元用于关于所述材料(9)扫描拉长的聚焦区(7)。

18. 根据权利要求1或2所述的光学系统(1),所述光学系统还具有射束预处理单元(13),所述射束预处理单元用于适配所述激光射束(3)的所述横向输入强度特性(41)、所述输入发散度和/或极化。

19. 根据权利要求1或2所述的光学系统(1),其中,所述相位曲线(43)使得经借助所述相位曲线(43)相位施加的射束的聚焦形成具有沿传播方向(5)拉长的聚焦区(7)的反类贝塞尔射束类型的射束特性或反类艾里射束类型的射束特性,在该射束特性中仅入射激光射束的中央区域对拉长的聚焦区(7)的处于射束下游的末端有贡献。

20. 一种用于加工对于激光射束来说很大程度上透明的材料的激光加工设备(21),所述加工借助激光射束(3)通过使所述材料在沿所述激光射束(3)的传播方向(5)拉长的聚焦区(7)中改性实现,所述激光加工设备具有

激光射束源(11),

根据以上权利要求中任一项所述的光学系统(1),以及

用于支承作为工件的所述材料(9)的工件支承单元(25)。

21. 根据权利要求20所述的激光加工设备,所述激光加工设备还构造用于执行在工件支承单元(25)与聚焦区(7)之间的相对运动,和

所述激光加工设备还具有

控制装置,其构造用于从控制措施组中选择的以下控制措施中的至少一个,所述以下控制措施包括:调节拉长的聚焦区(7)的处于射束下游的末端关于所述工件支承单元(25)的位置以及调节所述激光射束(3)的和所述光学系统(1)的参数,该参数引起拉长的聚焦区(7)向着射束上游方向的延长,其中,基本上在不需要再修正近场光学器件(33B)相对于所述工件支承单元(25)的距离的情况下同时保持拉长的聚焦区(7)的处于射束下游的末端关于所述工件支承单元(25)的位置。

22. 根据权利要求20所述的激光加工设备,其中,所述激光射束源(11)还构造用于产生激光射束,该激光射束通过非线性吸收使所述材料(9)改性。

23. 根据权利要求22所述的激光加工设备,其中,所述激光射束源能够在拉长的聚焦区(7)中聚焦到 $2\text{J}/\text{cm}^2$ 的注量上。

24. 一种用于具有横向输入强度特性(41)的激光射束(3)的射束成型的方法,所述激光射束用于加工对于所述激光射束来说很大程度上透明的材料(9),所述加工通过使所述材料(9)在沿传播方向(5)拉长的聚焦区(7)中改性实现,所述方法具有以下步骤:

在所述横向输入强度特性(41)上施加进行射束成形的相位曲线(43),其中,所施加的相位曲线(43)使得所述激光射束(3)配属有拉长的聚焦区(7)的虚拟光学图像(53),

在射束成形距离( $D_p$ )上传播所述激光射束(3),在该传播之后,所施加的相位曲线(43)已经将所述横向输入强度特性(41)转化为横向输出强度特性(51),使得所述横向输出强度特性(51)与输入强度特性(41)相比具有处于所述射束轴线(45)外部的局部最大值(49),并且

将所述激光射束(3)聚焦到所述聚焦区(7)中,用于形成基于所述输出强度特性(51)的近场。

25. 根据权利要求24所述的方法,其中,施加所述相位曲线(43)的步骤与从以下步骤组中选择的步骤中的至少一个一起进行

很大程度上避免幅度调制，  
附加地施加很大程度上球形的相位曲线，  
附加地施加具有聚焦作用的线性的相位曲线，  
滤出干扰射束分量，  
滤出中央未调制的干扰射束分量，  
并且滤出更高衍射阶数的射束分量。

26. 根据权利要求24或25所述的方法，其中，关于所述材料(9)扫描拉长的聚焦区(7)并且通过增大输入射束直径和/或入射功率引起拉长的聚焦区(7)向着射束上游的方向的延长，其中，基本上在不需要再修正近场光学器件(33B)相对于工件支承单元(25)的距离的情况下同时保持拉长的聚焦区(7)的处于射束下游的末端关于所述工件支承单元(25)的位置。

## 用于射束成形的光学系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种光学系统,其用于激光射束的射束成形并且尤其用于用于加工对于激光射束来说很大程度上透明的材料的激光射束的射束成形。本发明还涉及一种用于射束成形的方法。

### 背景技术

[0002] 使用光的吸收来加工工件的可行方案、尤其通过将局部化的改性引入到工件中,是多种多样的。因此,所谓的体积吸收、即不局限到表面上的吸收提出加工对于激光射束来说很大程度透明的、脆硬的材料可行方案。一般地,体积吸收通过一种非线性吸收来促进,在该非线性吸收中仅在与材料有关的(阈值)强度的情况下进行与材料的相互作用。

[0003] 在这里,非线性吸收理解为光的与强度有关的吸收,该吸收基本不基于光的直接吸收。代替地,所述吸收基于在与入射光(主要是在时间方面被限制的激光脉冲)的相互作用期间的吸收的增加。在此,电子可以通过逆韧致辐射接收如此多的能量,使得通过碰撞释放其他电子,使得电子产生速率超过重组速率。在一定条件下,对于雪崩式吸收所需的起始电子在开始时已经存在或者通过存在的剩余吸收借助线性吸收产生。例如在纳秒激光脉冲中,初始离子化可以导致温度升高,由于该温度升高自由电子的数量增加并且由此接下来的吸收增加。在其他条件下,这种起始电子可以通过多光子化或隧道离子化作为用于公知的非线性吸收机理的示例而产生。在具有例如纳秒以下级脉冲持续时间的超短激光脉冲的情况下,可以使用电子的雪崩式产生。

[0004] 体积吸收可以在对于激光射束来说很大程度上透明的材料(这里简称为透明材料)中用于在拉长的聚焦区域中形成材料的改性。这种改性能够实现材料的分离、钻孔或结构化。为了分离,例如可以产生成排的改性,该改性触发沿所述改性或在所述改性内部的断裂。此外公知的是,为了分离、钻孔和结构化而产生改性,该改性能够实现改性区域的选择性蚀刻(SLE:selective laser etching)。

[0005] 拉长的聚焦区域的产生可以借助变迹的贝塞尔射束(在这里也被称为类贝塞尔射束)实现。这种射束特性可以例如通过轴棱镜或空间光调制器(SLM:spatial light modulator)和具有高斯射束特性的入射激光射束来形成。随后到透明工件中的成像导致用于体积吸收所需的强度。类贝塞尔射束(例如贝塞尔射束)通常具有在处于工件中的射束特性的远场中的环形强度分布。例如以SLM来计算用于类贝塞尔射束的射束成形的相位曲线在Leach等人的“Generation of achromatic Bessel beams using a compensated spatial light modulator”,Opt.Express 14,5581-5587(2006)中说明。

[0006] 此外,公知例如借助多聚焦透镜用于形成成排的强度提高的布置。在此,在远场中、即在聚焦时使待聚焦的激光射束的相位受到影响,该相位影响导致聚焦区的纵向偏移。

### 发明内容

[0007] 本公开文献的一方面的任务是,说明一种光学系统,该光学系统能够实现用于制

定的体积吸收的射束成形。所述任务尤其是,为了加工透明的材料提供沿射束扩展方向拉长的、细长的、具有用于激光加工应用的高纵横比的射束特性 (Strahlprofil)。

[0008] 所述任务中的至少一个任务通过根据权利要求1所述的光学系统、根据权利要求12所述的激光加工设备、通过根据权利要求15所述的用于激光射束的射束成形的方法和通过根据权利要求17所述的用于激光材料加工的方法解决。扩展方案在从属权利要求中说明。

[0009] 在一方面中,公开一种用于激光射束的射束成形的光学系统,用于通过使材料在沿传播方向拉长的聚焦区中改性来加工尤其透明材料。光学系统具有射束成形元件,该射束成形元件构造用于接收具有横向输入强度特性 (Eingangsintensitätsprofil) 的激光射束并且在横向输入强度特性上给激光射束施加进行射束成形的相位曲线 (Phasenverlauf)。此外,光学系统具有近场光学器件,该近场光学器件以相对于射束成形元件的射束成形距离布置在射束下游并且构造用于使激光射束聚焦到聚焦区中。在此,所施加的相位曲线使得激光射束配属有拉长的聚焦区的处于射束成形元件前面的虚拟光学图像,并且射束成形距离相应于激光射束的传播长度,在该传播长度中,所施加的相位曲线将横向输入强度特性转化为在近场光学器件区域中的横向输出强度特性 (Ausgangsintensitätsprofil),该输出强度特性与输入强度特性相比具有处于射束轴线外部的局部最大值。

[0010] 在另一方面中,公开一种用于激光射束的射束成形的光学系统,用于通过使材料改性来加工尤其透明的材料。光学系统具有射束成形元件和近场光学器件,该射束成形元件用于将反类贝塞尔射束类型的射束特性和/或反类艾里射束类型的射束特性的相位曲线施加到激光射束上,所述近场光学器件用于聚焦经相位施加的射束。相位曲线这样选择,使得经相位施加的射束的聚焦形成具有沿激光射束的传播方向拉长的聚焦区的反类贝塞尔射束类型的射束特性和/或反类艾里射束类型的射束特性,其中,尤其仅入射激光射束的中央区域对拉长拉长的聚焦区的处于射束下游的末端有贡献。

[0011] 在另一方面中,用于借助激光射束通过在沿激光射束的传播方向拉长的聚焦区中的材料的改性来加工尤其透明的材料的激光加工设备具有激光射束源、上述形式的光学系统以及用于支承作为待加工工件的材料的工件支承单元。

[0012] 在另一方面中,公开一种用于激光射束的射束成形的方法,该激光射束具有横向输入强度特性,该激光射束用于通过在沿传播方向拉长的聚焦区中的材料的改性来加工尤其透明的材料。所述方法包括步骤:将进行射束成形的相位曲线施加到横向输入强度特性上,其中,所施加的相位曲线使得激光射束配属有拉长的聚焦区的虚拟光学图像。此外,所述方法包括在射束成形距离上传播激光射束的步骤,在该步骤之后,所施加的相位曲线将横向输入强度特性转化为横向输出强度特性,使得横向输出强度特性与输入强度特性相比具有处于射束轴线外部的局部最大值。此外,所述方法包括将激光射束聚焦到聚焦区中的步骤,用于形成基于输出强度特性的近场。

[0013] 在另一方面中,公开一种用于尤其透明的材料的激光材料加工的方法,所述激光材料加工借助激光射束通过使材料改性进行,所述方法具有以下步骤:通过激光射束的相位调制产生具有沿传播方向拉长的聚焦区的反类贝塞尔射束类型的激光射束特性和/或反向加速的射束的激光射束特性,在这里也称为类艾里射束类型的激光射束特性;将拉长的

聚焦区至少部分地定位在待加工的材料中。

[0014] 在另一方面中,公开一种反类贝塞尔射束类型的射束特性和/或反类艾里射束类型的射束特性的使用,用于尤其透明的材料的激光材料加工,所述激光材料加工通过在反类贝塞尔射束类型的射束特性和/或反类艾里射束类型的射束特性的拉长的聚焦区内部的材料改性来进行。在此,反类贝塞尔射束类型的射束特性和/或反类艾里射束类型的射束特性的特征例如可以是在这里作为特性公开的特征中的一个或多个特征,尤其可以是虚拟图像在射束成形元件之前的配属、与相对应的传统射束相比相反的径向幅度/强度曲线以及聚焦区的末端的基本上固定的位置。

## 附图说明

[0015] 在这里公开的方案允许改进现有技术的至少部分方面。参照附图尤其由实施方式的下述描述得出其他特征和其适用性。由附图示出:

[0016] 图1用于激光射束的射束成形的光学系统的示意性示图,

[0017] 图2具有根据图1的光学系统的用于材料加工的激光加工装置的示意性示图,

[0018] 图3光学系统的用于阐释光学作用原理的示意性示图,

[0019] 图4在虚拟光学图像成像之后在拉长的聚焦区中的纵向强度分布的示例,

[0020] 图5在图4中示出的纵向强度分布的ZR截面图,

[0021] 图6根据图4和5对于透明材料在拉长的聚焦区中的改性的示例性实验研究,

[0022] 图7用于阐述实际的强度提高(Intensitätserhöhung)的产生和成像的示意性示图,

[0023] 图8在根据图7的实际的强度提高的成像之后在拉长的聚焦区中的纵向强度分布的示例,

[0024] 图9基于空心椎轴棱镜的光学系统的第一示例的示意性示图,

[0025] 图10基于空心椎轴棱镜的光学系统的第二示例的示意性示图,

[0026] 图11A和图11B用于基于反射式轴棱镜的光学系统的示例的示意性示图,

[0027] 图12基于空间光调制器的光学系统的示例的示意性示图,

[0028] 图13基于透射衍射的光学元件的光学系统的示例的示意性示图,

[0029] 图14在根据图13光学系统中的衍射光学元件中的相位曲线的示例的示意性示图,

[0030] 图15在根据图13的光学系统中的输出强度特性的示例性强度横截面图,

[0031] 图16在图15中示出的强度横截面图的输出强度特性的XY俯视图,

[0032] 图17具有未相位调制的射束分量(Strahlanteil)的过滤的光学系统的示例的示意性示图,

[0033] 图18具有用于分离相位调制的射束分量的线性相位值的基于衍射光学元件的光学系统的示例的示意性示图,

[0034] 图19具有扫描设备的光学系统的示例的示意性示图,

[0035] 图20用于阐释光学系统的成像系统的示意性示图,

[0036] 图21用于阐释光学系统在收敛的激光射束入射的情况下的示意性示图,

[0037] 图22用于阐释具有发散自适应性的光学系统的示意性示图,

[0038] 图23在用于产生平顶强度特性的光学系统中的输出强度特性的示例性强度横截



面，

[0039] 图24在图23中示出的强度横截面图的输出强度特性的XY俯视图，

[0040] 图25由图23和24的输出强度特性得出的纵向强度分布的示例，

[0041] 图26根据图25对于透明材料在拉长的聚焦区中的改性的示例性实验研究，

[0042] 图27在使用多焦点近场光学器件的情况下的纵向强度分布的示例，

[0043] 图28用于通过用于使用在根据图13的光学系统中的衍射光学元件来产生反类艾里射束类型的射束形状的相位曲线的示例的示意性示图，

[0044] 图29根据图28用于产生反类艾里射束类型的射束形状的输出强度特性的示例性强度横截面，

[0045] 图30在图29中示出的强度横截面的输出强度特性的XY俯视图，

[0046] 图31对于以根据图28的相位曲线而产生的反类艾里射束类型的射束形状的在拉长的聚焦区中的纵向强度分布的示例，

[0047] 图32用于结合实际强度提高的成像来阐释虚拟图像的成像的示意性示图，

[0048] 图33A到图33D反类贝塞尔射束在从射束成形元件向近场光学器件传播时的射束特性，以及

[0049] 图34用于阐明图33A到33D的射束特性的位置的沿着射束轴线Z的截面的幅度曲线。

### 具体实施方式

[0050] 在这里所描述的方面部分地基于以下认知：由于在激光加工时所需的高强度在预处理激光射束期间可能已经存在导致光学元件的损坏的强度。考虑到此还认识到，在工件中的拉长的聚焦区的产生可能基于虚拟射束特性的成像。通过该虚拟射束特性的成像的方案可以在光学系统中减小或甚至避免具有强度峰值的区域。还认识到，可以将配属给虚拟射束特性的相位曲线施加给激光射束，该相位曲线使远场中的强度分布发生所期望的变化。尤其认识到，通过归结于这种虚拟的射束特性的远场分布、例如反类贝塞尔射束类型 (inverse Quasi-Bessel-Strahl-aritge) 和/或反类艾里射束类型 (inverse Quasi-Airy-Strahl-aritge) 的强度曲线可以在同一聚焦区中产生特定设计的强度曲线和特别的叠加。在这种强度曲线中可以发生到聚焦区中的横向的能量引入，这尤其允许透明材料的加工。还认识到，与用于实际的强度提高的成像的系统相比，虚拟射束特性的成像的方案可能导致这种光学系统的较短的结构形状。

[0051] 拉长的聚焦区在这里涉及通过光学系统确定的三维强度分布，该强度分布在待加工的材料中确定相互作用的空间尺寸和由此改性的空间尺寸。因此，拉长的聚焦区确定拉长区域，在该拉长区域中，注量 (Fluenz) /强度存在于待加工的材料中，所述注量/强度大于与加工/改性相关的阈值注量 (Schwellenfluenz) /阈值强度。通常地，如果在目标阈值强度方面的三维强度分布的特征是至少10:1、例如20:1以及更大或者30:1以及更大的纵横比 (沿扩展方向的延展与横向延展的比例)，则指的是拉长的聚焦区。这种拉长的聚焦区可以导致具有类似的纵横比的材料的改性。在一些实施方式中，例如也可以形成沿扩展方向彼此平行走向的聚焦区，所述聚焦区中的每个聚焦区具有相应的纵横比。一般地，在这种纵横比中，在聚焦区上的 (有效) 强度分布的横向延展的最大改变处于50%以及更小的区域中、

例如20%以及更小的区域中、例如处于10%以及更小的区域中。

[0052] 在此,可以在拉长的聚焦区中在基本上整个长度上给引起的改性横向地输送能量。这导致,在改性区的初始区域中的材料的改性不具有或者至少几乎不具有对激光射束的如下部分的屏蔽效应,该部分引起在射束下游(即例如在改性区的末端区域中)的材料的改性。在这种意义上,高斯射束不能产生可比较的拉长的聚焦,因为能量输送基本上纵向地并且不横向地进行。

[0053] 对于激光射束来说很大程度上透明的材料的透明性在这里涉及线性吸收。对于低于阈值注量/阈值强度的光来说,对于激光射束来说很大程度上透明的材料例如在直至改性的后末端的长度上吸收入射光的例如小于20%或甚至小于10%。

[0054] 在这里所述的方面部分地还基于以下认知:通过有针对性的射束成形、例如借助衍射光学元件(DOE),可以制定(maßschneidern)在材料中由于非线性吸收而产生的自由电子密度。沿着由此产生的改性可以有针对性地引导裂纹形成,该裂纹形成然后导致工件的分离。

[0055] 在这里所述的方面部分地还基于以下认知:对于DOE,在相位掩模的相位曲线中可以例如在相应的部段(Segment)中设置多个相位曲线。由此尤其可以在多个这种虚拟图像(沿纵向或横向方向)的成像叠加时使用虚拟光学图像、例如反类贝塞尔射束形式的射束形状的方案优点,由此多个成像的相互作用(例如干涉)和空间态势(Konstellation)也可以具有对共同的聚焦区的成形的影响。此外看出,由此产生不对称的“共同的”聚焦区,该聚焦区例如在材料加工时产生用于确定的进给方向或确定的分离方向的优先(Vorzug)。此外看出,这种优先方向通过DOE在光学系统内部的取向/转动在激光加工过程中适配到期望的加工轨迹上。对于数字相位掩模(SLMs等)还可以进行相位曲线的直接操控,以便跟踪优先方向。

[0056] 在这里所述的方面部分地还基于以下认知:通过使用DOE可以将附加的相位曲线施加到射束上,该相位曲线例如简化作为依据的光学系统的构造和/或有效射束分量(Nutzstrahlanteil)的隔离。

[0057] 换言之,现有技术的缺点在一些实施方式中通过光学器件方案至少部分取消,在该光学器件方案中,处于工件区域中、沿扩展方向拉长的射束特性通过所产生的虚拟射束特性的成像而实现。此外,在一些实施方式中,所述光学器件方案既允许在射束特性的傅里叶平面(Fourier-Ebene)的区域内的对于不期望的射束分量的过滤可行方案,又允许射束成形与聚焦的分隔。

[0058] 由该认知所得出的系统和方法还能够实现以高速度和在切割棱边的高质量的情况下分离透明的、脆硬的材料。此外,这种系统和方法可以允许在没有如在切除方法中产生的圆锥角的情况下的分离。尤其在基于不切除的改性的分离中,也可以不产生切除部或仅产生小的切除部,其结果是,材料在加工后仅具有在表面上的少许颗粒。

[0059] 下面参照图1到8一般性地阐述作为基础的光学器件方案。接着阐述光学系统的示例实施方式,该光学系统一方面通过传统的光学器件如透镜和反射镜来转换光学系统(参见图9到11B),另一方面通过衍射光学元件转换光学系统(参见图12到16)。与图17到22相关联地,阐述光学系统与用于过滤和用于扫描的部件和方面的可组合性以及光学系统中的射束走向的通常的方面。接着与图23到32相关联地示出用于材料加工的拉长的聚焦区的示

例性构型,该构型尤其能够通过衍射光学元件实现。参照图33A到33D和34阐述反类贝塞尔射束在在光学系统中从射束成形元件传播至近场光学器件时的射束特性和纵向幅度曲线。

[0060] 图1示出用于激光射束3的射束成形的光学系统1的示意性示图,其目的是在待加工的材料9中产生沿传播方向5的拉长的聚焦区7。一般地,激光射束3通过射束参数如波长、光谱宽度、时间的脉冲形状、脉冲组的构造、射束直径、横向的输入强度特性、横向的输入相位外形、输入发散度和/或偏振来确定。根据图1,激光射束3被输送给用于射束成形、即用于转变一个或多个射束参数的光学系统1。通常地,为了激光材料加工,激光射束3近似是具有横向高斯强度特性的准直高斯射束,该激光射束由激光射束源11、例如超短脉冲高功率激光系统产生。所述转变例如可以以反贝塞尔射束类型或反艾里射束类型的射束形状实现。

[0061] 在图2中示出的激光加工设备21中,光学系统1例如可以用于材料加工。激光加工设备21具有支架系统23和工件支承单元25。支架系统23越过工件支承单元25并且承载激光系统11,该激光系统在图2中例如集成在支架系统23的上横向支架23A中。此外,光学系统1可沿X方向移动地安装在横向支架23A上,使得两个部件相互位置接近地布置。在替代的实施方式中,光学系统11例如可以设置为特有的外部单元,其激光射束3借助光导纤维或者作为自由射束引导到光学系统1。

[0062] 工件支承单元25承载在X-Y平面中延伸的工件。工件是待加工的材料9,例如是玻璃盘或者呈陶瓷或结晶的实施形式(例如蓝宝石或硅)的对于所使用的激光波长很大程度上透明的盘。工件支承单元25允许工件沿Y方向相对于支架系统23的移动,使得与光学系统1的可移动性相结合地可以使用在XY平面中延伸的加工区域。

[0063] 此外,根据图2设置例如光学系统1或横向支架23A的沿Z方向的可移动性,以便可以调节相对于工件的距离。对于沿Z方向走向的截面来说,激光射束通常也沿Z方向(即法向地)指向工件。但是可以提供其他加工轴线,如在图2中示例性地通过悬臂装置27和附加的旋转轴线29表明。相应地,悬臂装置27在根据图2的实施方式中是可选的。此外,可以设置冗余的附加轴线用于更高动态,其方式是:不使工件或光学系统加速,而是使更紧凑的和相应设计的部件加速。

[0064] 激光加工设备21还具有在图1中未详细示出的控制设备,该控制设备例如集成在支架系统23中并且尤其具有用于由使用者输入运行参数的接口。通常,控制设备包括用于操控激光加工设备21的电的、机械的和光学的部件的元件,例如通过操控相应的运行参数,例如泵激光功率、冷却功率、激光设备和/或工件保持装置的方向和速度、用于调节光学元件(例如SLM)的电参数以及光学元件的(例如用于其转动)空间取向。

[0065] 用于具有不同自由度的激光加工设备的其他装置例如在EP 1 688 807 A1中公开。通常,在小工件的情况下仅工件运动并且在大工件的情况下仅激光射束或者——如图2——工件和激光射束运动。此外,可以由激光系统11提供两个或多个光学系统并因此提供两个或多个聚焦区。

[0066] 通过激光加工设备产生的在材料中的改性例如可以用于钻孔、用于通过引起的应力分离、用于焊接、用于实现折射性能的改动或者用于选择性的激光蚀刻。相应地重要的是,可以合适地控制几何形状和改性类型。在此,除了如激光波长、时间的脉冲形状、脉冲数量、产生单个改性的脉冲组中的脉冲的能量和时间间距以及脉冲能量或脉冲组能量的参数之外,射束形状也起到重要作用。

[0067] 拉长的体积改性尤其允许在单个加工步骤中通过沿射束扩展方向延展变长的体积区域的加工。尤其可以在沿进给方向的一位置上在仅一个唯一的改性加工步骤中在大延展上进行加工。通过使用在这里所述的光学系统、射束形状和方法,可以一方面实现更好的加工结果(相比于在沿进给方向的一位置上在相继的改性加工步骤中相互组合的各个改性),另一方面可以降低过程时间和对系统技术的要求。因此为了各个改性而产生多个加工步骤,所述加工步骤增大时间开销并且要求各个改性相互间的相对位置的高开销的保证。

[0068] 此外,拉长的聚焦区可以在加工不平坦的材料时是有用的,因为沿着拉长的聚焦区主要是基本上一致的激光加工条件,使得在这种实施方式中沿扩展方向的相应跟踪可以变得不必需或者仅从待加工材料的位置的偏差大于拉长的聚焦区域的长度开始(考虑需要的加工/渗透深度的情况下)才变得必需。

[0069] 一般地,借助拉长的体积吸收(Volumenabsorption)对于透明材料的加工适用的是:一旦吸收发生,则该吸收自身或者引起的材料特性的改变可以影响激光射束的传播。因此有利的是,基本上不引导如下射束分量穿过值得注意的吸收区域,所述射束分量应引起在工件深处、即沿射束扩展方向在射束下游的改性。

[0070] 换言之,也有利的是,用于在更远的射束下游改性的射束分量以一角度输送给相互作用区。为此的示例是类贝塞尔射束,在该类贝塞尔射束中存在环形的远场分布,该远场分布的环宽度与半径相比典型地是小的。在此,相互作用区的射束分量基本上以该角度旋转对称地输送。这同样适用于这里所述的反类贝塞尔射束或该反类贝塞尔射束的改性或补充,如均匀化的或调制的反类贝塞尔射束。另一示例是反向加速的“类艾里射束类型的”射束,在该射束中射束分量以一偏移角度输送给改性,其中,这明显相切地并且(不像在纯类贝塞尔射束中那样旋转对称地)在弯曲的改性区上进行,例如在弯曲的反类贝塞尔射束中那样。

[0071] 此外,要努力达到的是,仅在努力达到的体积区域中值得注意地超过用于非线性吸收的阈值并且如此选择该体积区域的几何形状,使得该几何形状一方面适用于所期望的应用,但另一方面也不明显干扰至处于更远的射束下游的体积区域的传播。例如可能有利的是,变迹的(apodisiert)贝塞尔射束特性的旁瓣(Nebenmaxima)保持在对于非线性吸收必需的阈值强度以下。

[0072] 考虑到沿进给方向相继的改性,改性的体积的几何形状还可以如此选择,使得在多个改性沿进给方向排成行的情况下之前引入的改性对随后的改性的形成仅具有不明显的影响。

[0073] 如已经提到,为了快速加工可以通过仅一个单个激光脉冲/一个激光脉冲组产生单个改性,使得在这种情况下仅一次移动到工件上的位置。

[0074] 超短脉冲激光能够实现强度(功率密度)的提供,所述强度允许引起在相应长的相互作用区中的足够强的材料改性。在此,改性的几何延展借助射束成形如此确定,使得通过在材料中的非线性吸收产生长延展的、高的自由电子密度。能量到较深区域中的输送横向地进行,使得与高斯聚焦相比,通过之前的等离子体的相互作用防止屏蔽效应。例如可以产生沿纵向方向均匀延展的电子密度或空间高频调制的电子密度。

[0075] 在相应强度的情况下,可以在具有足够高的自由电子密度的区域中出现材料的爆炸式的延展,其中在此产生的震荡波可以产生纳米孔(Nanovoids)。用于改性(改性区)的其

他示例是折射率改变、压缩的和/或拉应力感应的区域、微结晶以及局部的化学计量改变。

[0076] 如一开始所阐述的那样,可以通过这种沿进给方向的改性区的堆积确定裂纹走向。在加工时工件沿经改性的轮廓(Kontur)相应地分离。然后裂纹形成可以直接随后进行或者通过另一过程感应地进行。例如可以在分离未预受力的材料时使用超声斜坡或温度斜坡,以便引起沿经改性的轮廓的之后的分离。单个改性通常不导致裂纹形成。

[0077] 借助制定的射束形状可以产生在材料中和在改性区域之间的不同应力分布,以便使分离过程适配于给定的材料。在此,强烈的空间和时间梯度可以促使微米爆炸或纳米爆炸的产生。

[0078] 在此,改性几何形状主要通过射束成形(并且不通过例如丝状成形(Filamentation)的非线性传播)确定。空间梯度的产生可以通过这里所述的光学系统实现,时间梯度的产生可以通过脉冲序列或脉冲成形进行。

[0079] 一般地,可以通过系统的成像比例、尤其通过成像系统的近场光学器件的焦距和数值孔径实现射束形状的强度分布的缩放(Skalierung)。用于缩放的其他可行方案由使用附加透镜以及射束成形元件和/或远场光学器件得出(参见与图17和22有关的说明)。由此可以影响射束特性在工件中的横向和纵向延展。此外,在用于射束成形的射束路径中使用空间滤光片和光圈,以便对射束进行预处理。

[0080] 在本公开的范畴内可以使用的用于例如超短脉冲激光系统的示例性的激光射束参数以及光学系统和拉长的聚焦区的参数是:

[0081] 脉冲能量 $E_p$ : 1 $\mu$ J到10mJ(例如20 $\mu$ J到1000 $\mu$ J),

[0082] 脉冲组的能量 $E_g$ : 1 $\mu$ J到10mJ

[0083] 波长范围: 红外(IR)、可见(VIS)、紫外(UV)(例如 $2\mu\text{m} > \lambda > 200\text{nm}$ ; 例如1550nm、1064nm、1030nm、515nm、343nm)

[0084] 脉冲持续时间(FWHM): 10fs到50ns(例如200fs到20ns)

[0085] 作用持续时间(取决于进给速度): 小于100ns(例如5ps-15ns)

[0086] 占空比(激光脉冲/脉冲组的作用持续时间相对于重复时间): 小于等于5%, 例如小于等于1%

[0087] 在进入光学系统时的原始射束直径 $D(1/e^2)$ : 例如在1mm到25mm的范围内

[0088] 近场光学器件的焦距: 3mm到100mm(例如10mm到20mm)

[0089] 近场光学器件的数值孔径NA:  $0.15 \leq NA \leq 0.5$

[0090] 材料中的射束特性的长度: 大于20 $\mu\text{m}$

[0091] 材料中的射束特性的最大横向延展,可能沿短的方向: 小于 $20\lambda$

[0092] 纵横比: 大于20

[0093] 沿扩展方向的调制(Modulation): 在聚焦区上大于10个周期

[0094] 在例如用于分离应用的两个相邻改性之间的进给 $d_v$ :  $100\text{nm} < d_v < 10 \cdot$ 沿进给方向的横向延展

[0095] 在作用持续时间期间的进给: 例如小于沿进给方向的横向延展的5%

[0096] 在此,脉冲持续时间与激光脉冲有关并且作用持续时间与时间范围有关,在该时间范围内例如用于在一部位上形成唯一的改性的一组激光脉冲与材料相互作用。在此,作用持续时间相对于当前进给速度是短的,使得所有激光脉冲作为一个群组有助于在一部位

上的改性。

[0097] 如果工件的厚度小于聚焦区的长度,则聚焦区部分处于工件外部,使得可以得到比聚焦区短的改性。可以有利地利用这种情况,以便即使在改变光学器件与工件之间的距离时也稳健地构型加工过程。在一些实施方式中,不延伸穿过整个工件的改性是有利的。尤其可以使聚焦区在工件中的长度和/或其位置适配。一般地,在此要指出的是,由于对于非线性吸收的不同阈值,具有假定一致强度的聚焦区会引起在不同材料中的不同大小的改性。

[0098] 纵横比涉及在待加工材料中的射束特性(聚焦区)的几何形状以及通过射束特性所产生的改性的几何形状。在非对称或沿横向方向调制(例如非旋转对称的或环形的)射束特性的情况下,纵横比通过改性的长度相对于如下延展的比例确定:所述延展是在该长度区域内部出现的沿最短方向的最大横向延展。如果射束特性在此具有沿横向方向的调制、例如在环形的射束特性的情况下,则纵横比与最大值的宽度有关,在环形射束特性的情况下即与环厚度(Ringstärke)有关。在形成多个沿横向方向间隔开的改性体积时,纵横比与单个改性的横向延展有关。在射束特性沿扩展方向调制的情况下(例如由于干涉(Interferenzen)),纵横比与上级(übergeordnet)的总长度有关。

[0099] 由射束成形元件和聚焦透镜(近场光学器件)之间的尤其大于近场光学器件的焦距 $f_N$ 的距离 $d$ 以及近场光学器件相对于空气的 $NA > 0.15$ 出发,射束成形元件的所使用的角度谱 $\alpha$ 处于 $\tan(\alpha) < f \cdot NA / d < NA / 2$ 范围中、并且优选处于 $\tan(\alpha) > f \cdot NA / (d \cdot 4)$ 范围中。

[0100] 前述参数范围可以在切边粗糙度 $R_a$ 例如小于 $1\mu\text{m}$ 时允许直到例如 $5\text{mm}$ 以及更大(典型地为 $100\mu\text{m}$ 到 $1.1\text{mm}$ )的材料厚度的加工。

[0101] 光学系统1还可以具有用于适配激光射束3的射束参数如射束直径、输入强度特性、输入发散度和/或极化的射束预处理单元13。例如,脉冲式激光系统的具有例如 $5\text{mm}$ 射束直径、在波长大约 $1030\text{nm}$ 时 $6\text{ps}$ 脉冲长度的激光射束被耦合到光学系统1中并且被引导至射束成形元件31。

[0102] 图3示出光学系统1的示意性构造,用于阐述作用原理。光学系统1基于射束成形元件31和成像系统33。射束成形元件31构造用于接收激光射束3。相应地,该射束成形元件适配于激光射束3的横向输入强度特性41。此外,射束成形元件31构造成在横向输入强度特性41上给激光射束3施加射束成形的相位曲线43(在图1中以虚线示意性表明)。所施加的相位曲线43使得激光射束3配属有(基本上)拉长的聚焦区7的处于射束成形元件31前面的虚拟光学图像53。因此,射束成形元件31产生虚拟射束特性,该射束特性处于射束成形元件31的射束上游,但不相应于实际处于那里的射束走向。

[0103] 成像系统33如此设计,使得将虚拟的射束特性成像到激光加工设备的如下区域中,工件在加工期间定位在该区域中。在图3中,成像系统为此示例性地具有沿射束方向的第一聚焦元件(在这里称为远场光学器件33A)以及沿射束方向的第二聚焦元件(在这里称为近场光学器件33B)。

[0104] 远场光学器件33A设置在相位施加(Phasenaufprägung)的区域中并且在图3中示例性地在射束成形元件31的射束下游以透镜形状显示。如下面所阐述,远场光学器件33A也可以在射束成形元件31前面不远处布置、由在射束成形元件前面和后面的部件组成和/或完全或部分集成到该射束成形元件中。

[0105] 在射束成形元件31中的相位施加之后,激光射束3根据成像系统33传播一射束成形距离 $D_p$ 直至近场光学器件33B。在此,射束成形距离 $D_p$ 相应于激光射束3的传播长度,在该传播长度中,所施加的相位曲线43将横向输入强度特性41转化为在近场光学元件33B上的横向输出强度特性51。在这里,光学系统中的输出强度特性51包括这种横向强度特性,该横向强度特性通过相位施加确定。这通常最晚在近场光学器件前的焦距区域中或在近场光学器件的区域中进行。

[0106] 为了实施虚拟射束特性的方案,对于在光学系统中由激光射束3待经过的传播长度(从射束成形元件31直至近场光学器件33B)得出下述思考。一般地,光学系统形成具有远场聚焦作用和近场聚焦作用的成像系统33。后者通过近场光学器件33B并因此通过近场焦距 $f_N$ 确定。前者通过远场聚焦作用和所属的远场焦距 $f_F$ 确定。远场焦距 $f_F$ 可以通过独立的远场光学器件33A实现和/或集成到射束成形元件中。为此也参见图20。成像系统33具有X比1的成像比例,其中,用于缩小虚拟图形的X通常大于1。例如成像比例实施为大于等于1:1、例如大于等于5:1、10:1、20:1、30:1或者40:1。换言之,在该成像的定义中,系数X描述了聚焦区的横向大小到虚拟外形的放大。角度相应地减小。要注意的是,成像比例以二次方的形式进入到外形的长度中。相应地,虚拟图像的纵向长度例如对于成像比例10:1以系数100缩小并且对于成像比例20:1以系数400缩小。

[0107] 在成像比例为1:1时适用 $f_N = f_F$ ,假定重叠校正焦平面。一般地适用于 $f_F = Xf_N$ 。如果远场光学器件33A集成到射束成形元件中,则该射束成形元件处于相对于近场光学器件的 $f_N + f_F$ 的距离中,即典型地处于两个光学器件的焦距的总和的区域中。对于1:1或者缩小的光学系统来说,传播长度由此相应于近场光学器件的焦距的至少两倍。

[0108] 如果将远场光学器件33A和射束成形元件31分开并且假设虚拟光学图像不应(尤其不在对于聚焦区重要的强度区域内)与射束成形元件重叠,则射束成形元件至少以距离 $I/2$ 布置在虚拟射束特性53的纵向中央的射束下游。在此,长度I是虚拟射束特性53关于重要强度区域的纵向尺寸。虚拟射束特性53的纵向中央例如处于远场光学器件33A的输入侧焦平面中,该焦平面处于与近场光学器件33B的 $f_N + f_F$ 的距离中。在该情况下,传播长度 $d = f_N + 2f_F - I/2 = (1+2X)f_N - I/2$ ,即小于 $f_N + 2f_F = (1+2X)f_N$ 或者换言之小于光学器件之间的距离加上 $f_F$ 。

[0109] 对于距离 $d = f_N + f_F = (1+X)f_N$ ,即使在变大的射束扩展的情况下也可以成像虚拟射束特性53的同样变大的长度I,其中,如在这里之后阐述的那样可以保持外形的定义末端。

[0110] 一般要提到的是,由于原始射束发散和收敛以及在成像系统有偏差的校正中可能产生上述考虑的偏差。相对于实际强度提高的可比较的成像、即具有可比较的成像比例的成像,射束成形元件更近地布置(参见对于图7和8的相应讨论)。通常距离即处于 $(1+2X)f_N \geq d \geq 2f_N$ 。

[0111] 通过所施加的相位,横向输出强度特性51与输入强度特性41相比具有至少一个处于射束轴线45外部的局部最大值49。该处于射束轴线45外部的局部最大值49导致到聚焦区7中的横向能量输入。使射束成形元件31而定,横向输出强度特性51的局部最大值49相对于射束轴线45旋转对称地形成——如在图3中以剖视图表明——或者该局部最大值可以仅在方位角的角范围中形成(参见例如图29和30)。一般地,射束轴线通过横向射束特性的射束重心定义。通常可以给光学系统配属光轴,该光轴通常经过射束成形元件的对称点(例如经

过DOE的中央或者反射式空心锥轴棱镜(Hohlkegel-Axicon)的尖端)走向。在射束旋转对称和相应的精确校正的情况下,射束轴线与光学系统的光轴可以至少区段式地一致。

[0112] 局部最大值可以被视为输出强度特性51的普遍性的特征,其中,尤其对于反类贝塞尔射束类型的射束形状可以形成具有倾斜的和缓慢下降的侧沿(Flanke)的典型子结构。该子结构可以基于射束成形元件和/或远场光学元件的聚焦作用在所配属的远场焦平面的区域中反向。输出强度特性尤其可以在该远场平面的区域中特别“尖锐地”示出局部最大值,或者例如在反类贝塞尔射束类型的射束形状中,局部最大值已经可以非常快地在射束成形元件之后形成。但是子结构的方面可能由于在相位施加中的各种不同可能性而改变。

[0113] 虚拟射束特性的方案可以一方面减小光学系统1的结构长度并且另一方面在光学系统1中避免具有明显强度提高的拉长射束特性的形成。成像系统33如此构型,使得在光学系统1内部构成该虚拟射束特性的远场并且在近场光学器件33B中的聚焦可以借助普通的聚焦部件、例如透镜、反射镜、显微镜物镜或上述器件的组合进行。在此,“普通的”在这里在意义上应理解为:特有的射束形状基本上通过射束成形元件31并且不通过近场光学器件33B来施加。

[0114] 为了说明,在图3中标明射束走向,该射束走向相应于在这里被称为反类贝塞尔射束的射束。为此,在射束成形元件31的射束下游以实线来说明射束走向。在射束成形元件31的射束上游,替代于入射准直射束3,以虚线概要地绘出类似于实际的类贝塞尔射束的虚拟射束特性。

[0115] 类似于通常的类贝塞尔射束,反类贝塞尔射束也具有在远场光学器件33A的焦平面中的环结构。但是在示意性剖视图中表明的发散的射束区域55A、55B(所述射束区域照射到远场光学器件33A上)不由“实际的”类贝塞尔射束特性产生,而是直接由射束成形元件31与入射激光射束3的相互作用产生。由于该直接相互作用,射束区域55A、55B在其横向强度分布中通过激光射束3的横向射束特性41被施加。相应地,在沿径向方向的高斯输入射束中,强度原理上在射束区域55A、55B中从内向外减小。由于射束区域55A、55B的发散,相应地在射束轴线上典型地构造用于相位调制的射束分量的较低强度的(在理想情况下无强度)区域。在此,射束分量的发散、相应地发散的射束分量在这里也与远离射束轴线运动的射束分量有关。但是在该区域中未相位调制的射束和/或附加相位调制的射束分量可以叠加。在射束在光学系统中在形成反贝塞尔射束类型的射束的过程中的发展方面参见图33和34。该强度特性在横向强度区域57A和57B中示意性表明。要指出的是,沿着传播长度的强度曲线可以根据所施加的相位曲线43而改变。但是,在初始区域(即靠近射束成形单元31的射束区域55A、55B)中,由于主要作为纯相位掩模起作用的射束成形元件31,激光射束3的入射强度特性对于发散的相位调制的射束分量至少占主要部分。

[0116] 为了清楚地解释反类贝塞尔射束,在图3中还示意性地表明强度曲线57A'和57B'。在此假设,射束成形元件31仅影响相位并且不影响幅度。看出的是,通过远场光学器件33A的聚焦(或射束成形元件31的相应的远场作用)使强度曲线在光学系统1的输出端处翻转,使得在形成拉长的聚焦区7时在射束轴线45上首先叠加低强度,所述低强度由入射高斯射束特性的下降的侧沿产生。随后叠加较高强度,所述较高强度由入射高斯射束特性的中间区域产生。为此提到,不仅要考虑在射束成形元件上的强度,而且也要考虑有用的面积。在旋转对称的情况下,距离相应二次方地考虑。如尤其关于图4阐述,纵向强度特性恰好终止



在射束分量与输入外形的中央相交的区域中。虽然在该中央中存在最大强度,但是面积接近零。此外要指出的是,在聚焦区后又存在翻转的强度曲线,该强度曲线相应于在射束成形元件之后的强度曲线57A、57B(假设与材料没有相互作用)。

[0117] 由于通过成像系统33的成像,相应地关于虚拟射束形状存在在图3中示意性表明的入射虚拟强度曲线57A”和57B”,所述强度曲线基本上相应于强度曲线57A’和57B’。

[0118] 与类贝塞尔射束相比相反的该强度曲线引起既在聚焦区7又在虚拟的射束特性、即光学图像53中的用于反类贝塞尔射束的特定纵向强度曲线,因为在这里射束区域55A、55B的叠加虚拟地进行。对于针对普通的类贝塞尔射束的相应讨论参照图7和8和所属说明。

[0119] 图4示例性地说明在拉长的聚焦区7中的纵向强度分布61,如该强度分布可以计算用于反类贝塞尔射束形状的虚拟光学图像53的成像。在Z方向上是标准的强度I。要指出的是,根据到材料9上的正常入射(沿Z方向)的扩展方向不是强制的,并且如与图2有关地阐释的那样,可以替代地以相对于Z方向的角度实现该扩展方向。

[0120] 在图4中看出在大于100微米上的首先缓慢的强度增长61A(低(外部)强度的初始叠加)直到强度最大值,接着是剧烈的强度降低61B(高(中央)强度的叠加)。因此,对于反贝塞尔射束形状得出沿扩展反向(在图4中的Z方向)的纵向强度分布的清晰的边界。如尤其参照在图3中示出的强度曲线57A’和57B’可看出,该清晰的边界基于:纵向强度分布61的末端归因于入射激光射束的射束中央值的贡献,所述入射激光射束具有虽然高的强度但在剧烈减小(接近零)的面积上。换言之,所述末端以虚拟射束特性的成像为基础,在所述射束特性中,在中部对于反类贝塞尔射束产生孔。在强度下降时在末端处的剧烈梯度以在输入外形的中央中的高强度为基础,但是通过消失的面积受限制。对于理想的成像系统,强度分布61的纵向尺寸通过虚拟外形的位置和成像尺度定义。如果工件还具有较高的折射率,则射束特性相应地延长。

[0121] 对此要补充的是,在激光加工设备中的清晰的边界导致,改性的沿扩展方向在前面的末端即使在入射横向射束特性放大时基本上是沿扩展方向静止的。改性仅在后面的区域中改变其延展,即,当激光射束的输入射束直径变大时,该改性可以向着近场光学器件延展。因此,清晰的边界关于工件支承件或工件本身的一次调节的位置可以避免在改性的射束下游的高强度。对此的区别在于,输入射束直径的放大在实际的强度提高的成像时导致改性沿扩展方向的延长,即,例如延长到工件支承件中,这可能导致该工件支承件的损伤。

[0122] 图5示出针对在图4中示出的纵向强度分布61的在聚焦区7中的强度的示例性X-Z截面63。要指出的是,在这里部分的灰度显示如图5、30和31的灰度显示基于颜色显示,使得可以黑暗地示出强度/幅度的最大值。例如聚焦区7的中央(最大强度)在图5中黑暗地示出并且由较低强度的较明亮的区域包围。类似地适用于在图30和31中的聚焦区707。可看出在横向延展几微米的情况下聚焦区7在几百微米上的拉长构造。通过非线性吸收的阈值性能,这种射束特性可以在工件中引起清楚定义的拉长的改性。聚焦区7的拉长的形状具有例如一纵横比,即,聚焦区的长度与在该长度内部沿横向最短方向出现的最大延展的比例(后者在非旋转对称的外形的情况下),该比例处于10:1到1000:1、例如20:1或更高、例如50:1到400:1的范围内。

[0123] 如果消除在图4中示出的幅度侧的(Amplituden-seitig)沿扩展方向未调制的反类贝塞尔射束的射束形状,则可以通过射束成形元件31在远场中附加地引起幅度再分布,

该幅度再分布例如可以用于沿扩展方向的强度调制。但是在此得出的在聚焦区7前的强度分布不再以非常明显的形状描绘出“反转”。然而在纵向强度特性的初始区域和结束区域中经常示出反向 (Invertierung) 的开始, 例如缓慢增长和快速下降。此外, (相位决定的) 幅度再分布可以通过射束成形元件31的相位曲线恰好准确地调节到反向的强度分布上, 以便引起例如一种纵向平顶强度特性 (Flat-top-Intensitätsprofil)。

[0124] 补充地, 保持得到下述特征来关于“实际的”射束形状进行限界: 在实际的高斯输入射束的情况下, 例如在实际的轴棱镜中在近场光学器件与聚焦区之间存在一平面, 输入射束的缩小的高斯横向射束特性处于该平面中并且可以相应地使该射束特性可见。相应的成像在虚拟光学图像的方案中存在。但是在该情况下图像平面处于聚焦区后面, 缩小的高斯横向射束特性处于该图像平面中。可以相应地使横向射束特性可见。这一般适用于针对在这里所设想的反向射束形状的相位掩模, 当该相位掩模通过高斯射束特性被照亮时。特别地, 缩小的高斯横向射束特性处于射束成形元件的图像平面中并且由此一般直接处于聚焦区的射束下游。由于已经实现的发散, 因此该高斯横向射束特性明显大于在聚焦区中的反类贝塞尔射束类型的射束的横向射束特性。同样地, 该射束特性在强度方面小得多。

[0125] 可看出输入射束的被成像的高斯横向射束特性在射束特性的结构的快速翻转 (Umschlagen)、即在小的横向区域上的剧烈变化处的位置。因此例如反类贝塞尔射束类型的射束处于聚焦区中。在经过射束成形元件的图像平面时, “近似地”立即在中央形成黑暗点。这在反类贝塞尔射束的情况下在聚焦区开端是不同的。在那里由于高斯射束特性的边缘区域的增大的叠加而形成反类贝塞尔射束类型的射束的由黑暗中央至在中央中填充的横向强度特性的过渡。换言之, 强度在更大的区域上沿纵向方向增大, 而该强度在末端减小。在末端上, 所述过渡相应清楚地尖锐地被限界。要补充的是, 为了实际的贝塞尔射束类型的强度提高的成像, 末端上和开端上的性能互换, 即在贝塞尔射束特性的末端上较缓慢地形成黑暗点。

[0126] 如之前所阐述, 使用虚拟射束特性的方案因此对待实施的相位施加和在聚焦区域7中得到的强度曲线产生影响。

[0127] 图6说明改性区65, 该改性区在用于研究在材料中形成改性的实验研究的范畴内产生。每个改性区65源于与一组激光脉冲、例如具有间距为大约14ns的两个6ps的脉冲的相互作用。改性区的形状与根据图4和5所假设的拉长的聚焦区7的形状一致。最大长度通过拉长的聚焦区7的几何形状在所需的强度/注量的情况下限界。

[0128] 上面四个接收 (Aufnahmen) 说明在脉冲组能量 $E_g$ 为大约20 $\mu$ J到40 $\mu$ J时的阈值性能。下面四个接收说明拉长的改性区65在脉冲组能量 $E_g$ 为大约30 $\mu$ J到200 $\mu$ J时的造型。在总能量 $E_g$ 增加时, 改性区沿射束进入 (近场光学器件) 的方向延长, 因为在聚焦区7的更长的区域中达到对于非线性吸收的阈值强度。改性沿射束扩展方向的末端在其部位上基本是静止的, 也就是说尤其没有近场光学器件 (33B) 相对于待加工工件的距离的再修正。尤其当在较小强度情况下改性阈值处于射束特性中时, 在小能量的情况下, 由于产生的沿纵向方向的梯度, 出现后末端的最初的沿射束方向的漂移。但是该漂移在中等和高能量时减少, 因为反类贝塞尔射束类型的射束特性的产生沿扩展方向具有隐含的 (implizit) 最大后末端。

[0129] 在改性的纵向尺寸改变时的类似性能也针对入射激光射束3的径向增大的射束直径而得出。在这种情况下, 改性区也沿射束进入 (近场光学器件) 的方向延长, 因为入射激光

射束3的径向外侧附加的强度区域将能量引导到缓慢的强度增长61A(即具有小斜度的强度增长)的区域中的纵向强度区域中。强度分布的最大值相应地沿射束进入的方向移动。相反地,改性沿射束扩展方向的末端在其位置方面基本静止,因为该部位通过入射激光射束3的射束中部供给以能量。对此要提及的是,在改动的反类贝塞尔射束类型的射束形状中也可以观察到该性能。例如对于与图23到26相关讨论的平顶射束形状来说,在改变射束直径时,改性的末端的位置基本上不改变。对于这样改变的入射强度特性来说,射束成形元件还可能不再导致优化的平顶结构,使得能够得出强度中的调制和可能的开端改变。

[0130] 图7用于阐述射束引导,在该射束引导中,实际的强度提高71通过射束成形光学器件73、例如轴棱镜产生。这相应于已知的类贝塞尔射束的形成。强度提高71接着通过望远镜系统75在形成聚焦区77的情况下成像到工件9中。如在图7中示出,在这种结构中存在危险,即实际的强度提高71损坏望远镜系统75的远场光学器件79,尤其当要实现小结构长度时。在这里所述实施虚拟图像的方案的光学系统(例如参见图3)规避了该损伤射束引导的光学器件的风险。

[0131] 图8完整地说明在根据图7的结构中得出的沿Z方向的纵向强度分布81。在开始时的剧烈增长81A之后达到强度最大值,在该强度最大值之后强度再下降。在低强度时开始缓慢减停的下降81B(小斜度的减停的下降)。看出图4和8的纵向强度分布61和81的原理上的反转,在该反转中将在末端处的“清晰的边界”由“清晰的开端”替代。

[0132] 对于这种类贝塞尔射束,以具有入射高斯射束特性83的激光射束的透射轴棱镜导致叠加的射束区域85A、85B,其强度权重导致实际的纵向强度分布81(首先是高斯射束特性83的中央区域的强度的叠加,然后是高斯射束特性83的低(外部)强度的叠加)。为了阐述,又示意性地表明在远场光学器件79的射束下游的强度曲线87A和87B和在聚焦区77的射束上游的强度曲线87A'和87B'。

[0133] 下面阐述光学系统的不同示例性的配置,所述光学系统实施虚拟的强度提高的方案。所述配置包括透射式和反射式射束成形元件,其中,相位曲线的施加尤其折射、反射或衍射地进行。已述部件如激光系统11参见前面的说明。

[0134] 考虑到射束成形光学器件73与近场光学器件的距离,可以类似地给用于虚拟图像的思考假设下述值。在实际的射束特性中,长度I的待成像的实际射束特性的中部典型地处于远场光学器件的输入侧的焦距中。典型的距离至少是 $f_N+2f_F+I/2=(1+2X)f_N+I/2$ ,即大于 $f_N+2f_F$ ,或者换言之,大于光学器件之间的距离加上 $f_F$ 。

[0135] 图9示出借助空心锥轴棱镜131A的折射的射束成形。该空心锥轴棱镜产生在空心锥轴棱镜131A的射束上游的虚拟反类贝塞尔射束特性153A。该空心锥轴棱镜在图9中通过虚线表明,实际的强度提高不存在于该区域中。此外,在根据图9的实施方式中,远场光学器件沿射束扩展方向在空心锥轴棱镜131A的射束下游实施为平凸透镜133A。近场光学器件33B引起激光射束到聚焦区7中的聚焦,使得虚拟反类贝塞尔射束特性153A作为聚焦区7的虚拟光学图像配属给激光射束。

[0136] 图10示出具有空心锥轴棱镜-透镜系统131B的实施方式,该空心锥轴棱镜-透镜系统作为折射式射束成形元件而使用。在此,远场光学器件作为凸的透镜面133B集成到射束成形元件中,该透镜面布置在空心锥轴棱镜的输入侧上。该结构同样产生虚拟反类贝塞尔射束特性153B。

[0137] 图11A说明具有反射式射束成形元件——尤其反射式轴棱镜-反射镜系统131C——的实施方式。射束成形元件的高反射性的表面如此成形,使得反射轴棱镜的射束成形特性与起聚焦作用的空心反射镜的形成远场的部件组合。相应地,轴棱镜-反射镜系统131C既实现射束成形的功能又实现远场光学器件的功能。虚拟的反类贝塞尔射束特性153C在轴棱镜-反射镜系统131C的背侧表明,即在不由激光射束3穿过的区域中表明。

[0138] 如在图11A中还示出,激光系统11的激光射束3在射束适配单元13后通过转向镜140耦合到光学系统1中。转向镜140例如布置在轴棱镜-反射镜系统131C和近场光学器件33B之间的光轴上并且使射束转向到射束成形元件131C上。在一些实施方式中,转向镜例如可以是中央穿孔的,以便使尽可能少的光线转向到射束成形元件131C的光学上可能有缺陷的中央区域上。除了下面关于图17和18所述滤光方面之外在此补充地注明的是,转向镜140同时阻挡不希望的中央射束分量,使得该射束分量不通过近场光学器件33B聚焦。

[0139] 图11B示出基于反射式射束成形元件的光学系统的另一实施方式。在此,呈反射式轴棱镜-反射镜系统131C形式的射束成形元件经过穿孔的转向镜140'的开口141以激光射束3被照亮。反射的和经相位施加的射束在形成例如环形远场之后照射到转向镜140'上。该转向镜将射束转向到近场光学器件33B上用于聚焦到拉长的聚焦区中。因此,开口还用作反射射束的中央区域的一种滤光片/光圈。

[0140] 在具有反射式射束成形元件的另一实施方式中,光学系统具有反射式轴棱镜、穿孔的离轴抛物面镜和近场光学器件。反射式轴棱镜为了射束成形具有圆锥形磨削的基体,其圆锥表面被高反射性地涂覆。激光射束可以经过在离轴抛物面镜中的开口射入到反射式轴棱镜上。被反射的和经射束成形的射束然后照射到离轴抛物面镜上,该离轴抛物面镜使射束转向到近场光学器件33B上并且同时使其准直。

[0141] 图12和13示出具有数字化的射束成形元件的光学系统的实施方式。在此,数字化可以涉及相移和/或横向结构(例如像素结构)的离散值的使用。空间光调制器(SLMs)的使用是通过可编程的或者固定写入的衍射光学元件(DOE)实施射束成形的多个不同可能性中的一个。

[0142] 衍射光学元件除了容易产生一个或多个虚拟射束特性、例如一个或多个空心锥轴棱镜的相应的相位施加之外允许例如用于纵向强度分布的均匀化的有针对性的修改。在此,相位中的偏差关于例如空心锥轴棱镜相位(并因此来自反类贝塞尔射束)处于小于等于50%——例如小于等于20%或小于等于10%的范围中。一般地,与例如光刻制造的、固定写入的DOEs相比,SLMs在横向较粗糙分辨率的情况下允许非常精细的相位改变。固定写入的DOEs例如具有平面平行的梯级,其厚度确定相位。在此,光刻制造允许高的横向分辨率。双级可以引起实际的和虚拟的相位外形。只有大于两个的相位偏移(Phasenhub)的数量可以引起在用于虚拟射束特性的优选方向的意义上的差别。因此,四个或八个或更多个相位偏移可以允许关于虚拟射束特性的有效射束成形。但是离散化可以引起并列(Nebenordnungen),所述并列可以例如被滤出。一般地,可以将多个光学元件组合在一个DOE中,其方式是:在该DOE中确定所有元件的透射函数(例如空心锥轴棱镜和透镜);各个相位函数的相加( $\exp(-li(\phi_1+\phi_2+\dots))$ )。附加地或替代地,可以实现各个透射函数的一种叠加(Superposition)。为了确定相位曲线开始时参照Leach等人的公开文献。用于连续的微结构的制造方法包括例如模拟光刻或纳米压印光刻。

[0143] 在这里将衍射光学射束成形元件(可以是可调节的SLM或固定写入的DOE)的结构方面的、引起相位施加并且平面构造的元件称为相位掩模。根据DOE的实施方式可以将所述元件在透射或反射中使用,以便对激光射束施加相位曲线。

[0144] 在图12中使用空间光调制器31A在反射中来进行相位施加。空间光调制器31A例如基于“液晶覆硅”(LCOS),该液晶覆硅能够实现可对于单个像素编程的相移。空间光调制器还可以基于微系统(MEMS)、微型光电机械系统(MOEMS)或微镜矩阵系统。在SLMs中,像素例如可以电子地操控,以便在横向输入强度特性上引起特定的相位施加。电子可操控性例如能够实现相位的在线调节和由此的聚焦区7的适配,例如根据待加工的材料或对激光波动的反应。在根据图12的装置中,例如可以将用于产生虚拟反类贝塞尔射束特性的衍射轴棱镜的功能与远场光学器件的形成远场的作用通过空间光调制器31A的相移结合起来。替代地,固定写入的反射DOE可以作为射束成形的元件31A使用。

[0145] 图13是基于DOE 31B的光学系统的示意性示图,在该系统中相位施加固定地写入到DOE 31B中。DOE 31B在这种情况下使用在入射中。如在图12那样,例如导致虚拟类贝塞尔射束特性的相移和远场光学器件的聚焦特性在DOE 31B中组合。

[0146] 图9到13的光学系统可以导致输出强度特性,所述输出强度特性相应于反类贝塞尔射束特性并且所述输出强度特性配属有虚拟光学图像。

[0147] 图14说明相位曲线243的示例,如其可以例如设置在DOE 31B中那样。相位曲线243是旋转对称的。可看出环形相位分布,其频率沿径向方向调制。所述环指明旋转对称的虚拟类贝塞尔射束特性的产生。频率调制指出远场光学器件的相位分量到用于射束成形的相位曲线中的集成。在图14中表明在 $\pm\pi$ 范围内的相位。在替代实施方式中,也可以在DOE相位掩模中实施离散的如双或多级(例如在0到 $2\pi$ 的相移范围中的4个或更多个层级)相位曲线。

[0148] 图15和16以强度横截面(图15)和2D俯视图(图16)示例性地说明输出强度特性251。可看出环形围绕射束轴线45走向的强度最大值249。几乎没有强度存在于射束中央处。

[0149] 在一些实施方式中,到反类贝塞尔射束中的转变没有完全进行,使得例如具有高斯射束特性的未相位调制的剩余射束相应地叠加在环形强度特性上。图15示意性点划线式地表明这种未相位调制的射束分量252。

[0150] 在图15中的强度分布的最大值249是用于局部强度最大值的示例,通过该强度最大值修改横向输出强度特性区域中的原始输出强度特性(例如高斯射束特性)。环结构的旋转对称通过反类贝塞尔射束特性的旋转对称引起。在替代的实施方式中,局部强度最大值可以限制到方位角的角区域上。此外,受方位角限制的和/或环形的局部最大值的叠加可以存在。

[0151] 在使用折射式空心锥轴棱镜(参见图9和10)来产生反类贝塞尔射束类型的输出强度特性时,可能在不完美的轴棱镜的尖端以不希望的角度产生不希望的射束分量。即使在衍射射束成形元件中也可能出现不希望的射束分量。例如可能在激光射束的远场中存在不可忽略的未相位调制的射束分量或附加的衍射阶数。

[0152] 在此公开的光学系统由于远场部件的使用使滤光片的引入和形状选择变得容易,以便将这种起干扰作用的射束分量滤出。尤其可以容易地将这种在傅里叶平面中的不希望的射束分量从所希望的射束分量(有效射束)中分离。

[0153] 参照图15的未相位调制的射束分量252,图17示出示例性的光学系统,该光学系统

基于在图3中示出的光学系统1。但是附加地进行在成像系统33的傅里叶平面的区域中的未相位调制分量的过滤。示例地，在图17中表明在近场光学器件33B的射束上游的空间滤光单元220。

[0154] 滤光单元220具有围绕射束轴线45的中央区域，该中央区域例如阻挡在图15中表明的未相位调制的射束分量252的高斯形式的强度分布。滤光单元220可以通过DOE或SLM附加地具有径向处于外部的区段来阻挡更高阶的衍射。

[0155] 因此，通常设置滤光单元220用来抑制未相位调制的基本模式以及更高阶的衍射以及在这里公开的不同的折射、反射或衍射的射束成形元件的散射。在输出强度特性旋转对称时通常也旋转对称地构造滤光单元。在一些实施方式中可以仅设置滤光单元220的单个区段或者甚至不设置过滤装置。

[0156] 衍射的射束成形元件允许另一方案 (Ansatz) 来抑制未相位调制的射束分量。在此有针对性地施加用于使相位调制的射束分量转向的附加相位值。

[0157] 图18示出例如一光学系统，在该光学系统中衍射式光学元件31附加地设有线性相位值。线性相位值导致相位调制的射束203A的转向230。未相位调制的射束分量203B不转向并且照射到例如滤光单元222上。

[0158] 图19示出光学系统的另一实施方式，该光学系统附加地为了实施扫描方案而利用远场部件的使用。通常扫描系统允许聚焦区7在一定区域中移动。一般地，通过射束成形与近场聚焦的分离可能的是，尤其设置对于体积吸收有利的远心扫描方案。在一些实施方式中还可以调节位置和角度。相应地，这种扫描系统可以允许将精细的轮廓写入工件中。

[0159] 在图19的实施方式中，扫描镜310布置在近场光学器件333B的像侧焦平面中。扫描镜310使在输出强度分布区域中的激光射束转向到在侧面布置的近场光学器件333B中。在傅里叶平面中的转向引起：虽然有位置偏差但是将扩展方向保持在工件中。扫描区域本身由近场光学器件333B的大小确定。

[0160] 如果扫描镜310不精确地布置在近场光学器件333B的焦平面中或者该扫描镜关于该焦平面运动，则可以由此调节拉长的聚焦区的取向、尤其由图2中的Z方向的角度偏差。

[0161] 图20示例性地参照根据图13中示出的光学系统的配置阐述基础的成像特性。光学系统包括射束成形元件31，该射束成形元件也充当远场光学器件并且由此通过焦距 $f_N$ 表征。在图20中远场光学器件和近场光学器件的焦平面相互重叠。相应地，在图20中虚线地表明仅一个焦平面340。在重叠的焦平面的配置中，成像系统在平面的波阵面入射时通常使虚拟射束形状253成像到拉长的聚焦区7上，例如反类贝塞尔射束特性、反向调制的或均匀化的类贝塞尔射束特性作为用于反向准贝塞尔/艾里射束类型的射束形状的示例。

[0162] 然而焦平面不必总是相互重叠。例如成像系统可以适配于预给定的射束发散度，但是激光射束3以另一发散度入射。在这种情况下，拉长的聚焦区7总是配属有处于射束成形元件前面的虚拟光学图像，但是不必存在完美的成像。类似的情况可以在成像系统的有意的误差校正、例如与扫描设备有关地得出。

[0163] 图20还说明概念“远场光学器件”和“近场光学器件”。远场光学器件产生虚拟射束走向253在远场焦距 $f_F$ 区域中的远场。如前面已经阐述的那样，远场光学器件可以在其功能中分配，例如由一个或多个在射束成形元件前和/或后并且与该射束成形元件间隔开布置的部件构成和/或集成到射束成形元件中。近场光学器件以较小焦距 $f_N$ 使射束向着工件聚

焦并因此形成聚焦区。因此,不仅虚拟射束特性53关于远场光学器件的远场而且聚焦区7关于近场光学器件33B的远场存在于焦平面340的区域中。

[0164] 即使在不完美的成像中(例如远场和近场光学器件的焦平面不重叠),基本上可以在聚焦区中存在可接受的强度曲线,因为照射到近场光学器件上的强度特性仅稍微改变。

[0165] 例如在反类贝塞尔射束形状的情况下,第一聚焦通过在成像系统中的远场光学器件引起环大小在近场光学器件上的适配。就此而言,远场光学器件具有对在附图中表明的环直径的聚焦作用,直至一种中间焦点变小。

[0166] 图21阐释在用于下述情况的光学系统中的射束走向:收敛的激光射束3'照射到射束成形元件31上。激光射束的相位调制的分量303A聚焦到延展的聚焦区7上。由于入射激光射束3'的收敛(并且可能由于分开的起聚焦作用的远场光学器件或者到射束成形元件31的相位曲线中的集成),未相位调制的分量303B(点划线式地示出)在传播长度 $D_p$ 过程中继续变窄并且照射到近场光学器件33B的中央区域上。由此构造用于未相位调制的射束分量303B的焦点350,该焦点比拉长的聚焦区7更靠近近场透镜33B。未相位调制的分量在焦点350后面剧烈发散,使得在工件中就未相位调制的射束分量303B而言不再达到导致非线性吸收的强度。因此,在这种构型中可以取消未相位调制的射束分量303B的过滤。

[0167] 然而可以在焦点350的区域中(或者当射束强烈聚焦时甚至在远场和近场光学器件之间)设置空间定位(lokalisiert)的滤光单元,以便使未相位调制的射束分量303B从相互作用区和工件中脱离出来。

[0168] 图22示出光学系统,该光学系统在射束成形单元31的射束上游配备有附加透镜400。透镜400——例如附加的起聚焦作用的部件——处于相对于射束成形元件31的距离 $D_A$ 处。

[0169] 射束成形元件31具有相位曲线,该相位曲线被调节到特定射束直径上。通过透镜400关于射束成形单元31的可移动性可以使射束成形元件的照亮分量、即在射束成形元件31上的输入强度特性的射束直径适配。

[0170] 在一些实施方式中,在射束成形元件31前面的透镜400可以在射束成形元件31的相位掩模中被补偿,使得成像不改变或者使仅0阶、即未相位调制的分量聚焦。

[0171] 一般地,透镜400也可以理解为远场光学器件的部件。如果远场光学器件由多个可相互移动并且可相对于近场光学器件移动的部件组成,那么成像尺度可以通过合适的移动改变。在一些实施方式中可以使透镜400、射束成形元件或二者共同移动,以便适配光学系统1的成像尺度。在一些实施方式中,透镜400可以作为第一望远镜部分透镜(Teleskop-Teil-Linse)用于在射束成形元件上的射束直径的适配,其中,第二望远镜部分透镜被包括到相位掩模中。

[0172] 在一些实施方式中可以使透镜400移动,以便尤其为了纵向平顶射束形状或多点形成而实施原始射束的精细适配。

[0173] 如果这样选择输入射束:在射束成形元件31上存在收敛的或发散的射束,那么也可以相应于图21有一定可能取消用于未相位调制的射束分量403B的滤光单元。即,用于在工件中的非线性吸收的强度仅由相位调制的射束分量403A实现。

[0174] 衍射式光学元件允许在输入强度特性上的数字化的和例如基于像素的相位适配。根据反类贝塞尔射束形状的强度曲线例如可以产生在聚焦区7中的纵向平顶强度特性。为

此这样影响射束成形元件中的相位曲线,使得在输出强度特性中的强度值从形成强度最大值和贝塞尔射束的尾迹(Ausläufern)的区域中离开并且通过相位改变这样径向地再分配,使得在之后的通过近场光学器件33B的聚焦中使上升区域61A和下降区域61B增强或者尽可能地避免延展的尾迹(例如通过功率的从尾迹到均匀化区域中的移动)。

[0175] 相应的输出强度特性551在图23(强度横截面)和图24(2D俯视图)中示出。可看出,(与图15相比)在图23的强度横截面中局部最大值沿径向方向扩宽并且被调制。存在相应的径向延展的调制的环结构549。

[0176] 图25示出这种输出强度分布551的聚焦。得出在沿Z方向大于700 $\mu\text{m}$ 的区域上的纵向准均匀化的强度分布(平顶)561。

[0177] 图26类似于图6地示出在透明材料9中的改性区565(改性)。上面四个接收又说明脉冲组能量 $E_g$ 为大约20 $\mu\text{J}$ 到40 $\mu\text{J}$ 时的阈值性能,下面四个接收示出大约30 $\mu\text{J}$ 到200 $\mu\text{J}$ 的增大的脉冲组能量。可看出,在超过阈值时改性区基本上总是在工件9中在沿Z方向的不同延展区域上形成。这基于仅具有短的上升和下降的近似恒定的强度。但是随着能量的增大不仅改性区的强度变大而且其横向延展变大。

[0178] 在图27中示出另一实施方式,该实施方式允许沿扩展方向达到一系列的强度提高。但是可以进行在近场光学器件33B的像侧的焦平面区域中的补充的相位施加,如横向和/或纵向的多点相位施加。特别在图27中看出,一系列的三个强度最大值661A、661B和661C,所述一系列的三个强度最大值分别具有根据图4的强度曲线。

[0179] 所述一系列的三个强度最大值可以通过纵向多点相位施加或者使用作为近场光学器件33B的多焦点透镜(Multifokallinse)来产生。因此例如可以在傅里叶平面区域中(近场光学器件33B的焦平面)或靠近近场光学器件33B设置附加的衍射光学元件,该元件提供对于三个焦点的附加相位调制。这种相位适配例如由EP 1 212 166 B1公知。

[0180] 与图28到31相关联地说明拉长的聚焦区7对于加速的艾里射束类型的射束形状的情况的另一可能构造。

[0181] 图28示出相位曲线743,如该相位曲线可以在射束成形元件31中施加到输入强度特性上。在此,相位曲线743包括对于产生加速的射束所需的相位曲线和凹形透镜的相位曲线,该凹形透镜的相位曲线补偿原始射束发散。一般地,加速射束的相位掩模产生好的准直的射束,该射束不显著地在传播距离上改变并且通过近场部件聚焦到所谓的加速射束形状中。

[0182] 图29和30以截面图(图29)和俯视图(图30)说明所属的输出强度特性751。可看出,强度最大值稍微从中央(即射束轴线45旁边)沿Y方向移动。因此,横向输出强度特性751关于输入强度特性通过处于射束轴线45外部的局部最大值749修改。

[0183] 这种输出强度特性751的聚焦导致在在图31中示出的、拉长的和弯曲的聚焦区707。该聚焦区允许,当聚焦区例如沿Y方向被引导到这种材料的边缘上时,这种加速的射束特性也可以与不透明的介质相结合地使用。产生的相互作用例如导致材料侧的圆角。在另一实施方式中,这种射束特性可以与透明材料一起使用来实现具有弯曲截面的切割。

[0184] 在一些实施方式中,例如可以这样构造光学系统,使得不仅产生根据图7的实际强度提高,而且产生根据图3的虚拟强度提高。以该方式可以扩宽改性区的纵向延展。

[0185] 图32示意性示出具有双DOE 31C的示例的光学系统。如果激光射束3落到双DOE



31C上,则一方面形成实际强度提高871、例如在DOE 871的射束下游的类贝塞尔射束。另一方面形成射束分量,该射束分量配属有拉长的聚焦区807A的处于DOE 871的射束上游的虚拟图像853,例如呈反类贝塞尔射束类型。

[0186] 光学系统还包括具有远场光学器件833A和近场光学器件833B的望远镜系统833。望远镜系统既使虚拟图像853也使实际强度提高871成像到待加工的材料9中。为此将双DOE 31C定位到远场光学器件833A的焦平面中或附近。

[0187] 所述成像导致延长的相互作用区域,该相互作用区域包括拉长的聚焦区807A和源于实际强度提高871的聚焦区807B。在得出的一系列相继的聚焦区807A和807B中,(反向)类贝塞尔射束的强度首先根据在图4中示出的强度曲线走向,然后根据在图8中示出的强度曲线走向。因此得出具有通过剧烈的强度下降61B和剧烈的强度上升81A形成的低强度中间空间的强度曲线。该低强度中间空间可以例如在加工成对相互叠置的工件时设置在接触区的区域中。此外,该方案允许,在相同的输入射束直径和相同的由光学系统遮盖的角度范围的情况下能够实现用于相互作用的两倍长度。

[0188] 在一些实施方式中,可以将未相位调制的分量聚焦相互叠置的聚焦区807A和807B之间的区域中。所属的高斯焦点807C示意性地同样在图32中表明。在这种实施方式中,还能够实现衍射效率的适配,因为使用未相位调制的射束用于填充强度间隙。

[0189] 在这里示例性地参照所选择的虚拟射束特性描述一些方面。一般地,可以将这些方面传输为在这里描述为(反向)虚拟射束形状的射束类型如反向准贝塞尔/艾里射束类型的射束形状,例如反类贝塞尔射束特性或反向调制或均匀化的类贝塞尔射束特性。

[0190] 与图33A到33D和34相关联地阐述反类贝塞尔射束借助射束特性和幅度曲线从射束成形元件至近场光学器件的传播。较明亮灰度值相应于较大的幅度。相应的反类贝塞尔射束可以通过在这里所述的折射、反射或衍射的光学系统产生,例如通过(空心锥)轴棱镜系统和DOE系统。DOE系统例如可以基于相位掩模的在图14中示出的相位曲线,其中,除了对于反类贝塞尔射束所需的相位还设有起聚焦作用的相位值。

[0191] 假设,具有旋转对称的高斯射束特性的激光射束射入到射束成形元件上。高斯射束特性具有经过射束中央高斯形式走向的横向幅度曲线。图33A、33B、33C和33D分别示出射束特性900A、900B、900C和900D和所属的示意性幅度曲线902A、902B、902C和902D的发展,后者直接处于在 $z=0\text{mm}$ 处的射束成形元件后面并且以一距离 $z=10\text{mm}$ 、 $z=50\text{mm}$ 处于射束下游以及处于紧接着的近场部件的在 $z=200\text{mm}$ 处的焦平面中。假设转化至100%,即不产生例如呈未相位调制的或扩散的光的形式的干扰射束分量。

[0192] 图34示出沿着射束轴线Z从在 $z=0\text{mm}$ 处的射束成形元件的输出端出发直至在 $z=250\text{mm}$ 处的近场透镜的截面的幅度曲线。射束特性900A、900B、900C和900D的位置在图34中以箭头示出。

[0193] 可看出,由于纯相位掩模直接在射束成形元件后面存在类似于高斯射束的高斯射束特性900A和高斯幅度曲线902A。但是由于所施加的、导致附加发散的相位立即形成清晰限界的孔。在 $z=10\text{mm}$ 时已经在射束特性的中央处看出清楚的黑色点904。该黑色点变得越来越大。同时形成具有高幅度的环区域906。

[0194] 环区域906向内清晰限界,这通过在径向幅度/强度分布中的梯级形状看出。圆形围绕的梯级的侧沿907指向射束轴线/射束中央。随着 $z$ 值的增大,侧沿907的对置区段相互

漂移,即中央的清晰限界的孔快速地在直径方面增大 ( $D1 < D2$ )。

[0195] 在径向幅度/强度分布中,环区域906随着z值增大向外越来越快地下降。该发展示意性地幅度曲线902A到902C的下降的侧沿908A到908C中示出。在远场中、即例如在施加的聚焦(远场)作用和近场光学器件的叠加的焦平面中,清晰的环908D在射束特性900D中已经形成,该环接着又膨胀(参见图34)。在此,形成在外侧上的清晰的棱边,即所述梯级通过其侧沿指向外部。

[0196] 在图34中看出在黑暗的、沿Z方向扩展的区域910A与沿Z方向变窄的和明亮的边缘区域910B之间的过渡中的清晰棱边,其中,在较明亮的边缘区域910B中的灰度值首先在径向内部并且然后从焦平面开始在径向外外部增高。

[0197] 所述射束特性和幅度分布的原理上的性能允许具有高斯输入射束的光学系统的测试,在该测试中首先形成具有向内倾斜指向的侧沿的孔并且由此导致在远场中在射束轴线外部的局部最大值。射束特性由内部区域和在聚焦区的区域中的成像可以使相应的射束特性可识别。在此,光学系统的使用不强制地限制到高斯射束上。还要注意的,附图由对于理想情况的计算得出。如果例如使用非理想的DOE,则可能使所述未相位调制的分量或实际类贝塞尔射束的更高阶或一部分(例如在双掩模的情况下)处于射束轴线上并且所述“孔”以强度填充。

[0198] 因此,反类贝塞尔射束可以在幅度曲线和由此在强度特性中尤其具有梯级,所述梯级具有倾斜侧沿。该侧沿尤其可以在靠近射束成形元件的区域中向内指向,例如在直到远场的一半的区域中并且尤其在射束成形元件的射束下游的远场光学器件的聚焦长度的区域中。对于没有在射束轴线上的基础的“简单的”反类贝塞尔射束,幅度/强度在梯级区域中从接近零增大到相位调制的射束分量的最大值。在此,(在相位调制的射束分量中的)梯级的成形也针对例如具有在射束成形元件上基本上恒定的径向强度(径向平顶)的入射射束给定,因为所述梯级基本上涉及射束中央。

[0199] 之前所述在远场焦平面的射束上游的射束特性在该远场焦平面之后径向反向直至聚焦区。在聚焦区后该射束特性还径向反向一次,使得在那里——在没有与待加工材料的相互作用情况下——又可以调节梯级形状。射束特性例如可以通过量取在相应部位上的射束来进行分析,这在光学系统中在射束成形元件后面或在聚焦区前面或后面进行。尤其在允许中央干扰射束的阻挡的布置中可以如此在聚焦区域前面和后面分析相位调制的射束分量的强度曲线。

[0200] 本发明的上下文还参照申请人在同一天递交的德文专利申请,该专利申请尤其涉及在产生反类贝塞尔射束类型或反类艾里射束类型的射束形状时使用DOE的可行方案。该申请的内容在这里全部被包含在内。如其中一般性地阐述的那样,可以例如在产生多个(反向)类贝塞尔射束时形成多个梯级,所述梯级在涉及虚拟图像的情况下,尤其可以具有强烈施加的、在相应纵向区段中可以具有向内(在远场焦平面前面和在聚焦区后面)或者说向外(在远场焦平面与聚焦区之间)指向的侧沿。

[0201] 在这里公开的方面的其他实施方式和/或扩展方案总结如下:

[0202] 横向输出强度特性可以相应于虚拟光学图像的远场强度特性和/或聚焦区关于近场光学器件的远场强度特性。

[0203] 激光射束的预给定的输入射束形状可以具有横向输入强度特性、射束直径、横向

输入相位外形、输入发散度和/或极化并且光学系统可以构造用于将预给定的输入射束形状转化为在近场光学器件的输出端上的收敛的输出射束形状,其中,输出射束形状的近场形成拉长的聚焦区。

[0204] 光学系统可以具有在近场光学器件的像侧的焦平面区域中的补充的相位施加单元,尤其用于横向和/或纵向的多点相位施加。

[0205] 一般地,在这里所述的聚焦元件如远场光学器件或近场光学器件可以实施为例如透镜、反射镜、DOE或上述器件的组合。

[0206] 此外,可以将这里相对于所述实施例附加的光学元件添加到光学系统中。此外,可以在成像系统中添加中间成像,以便例如能够在像侧的焦平面区域中既实现过滤功能又同时实现扫描运动。由此像侧的焦平面(例如在图20中的图像平面340)自身可以例如通过附加的光学系统来成像。替代地或附加地,这种光学中间系统可以允许例如在扫描应用中实现放大的工作距离和/或工作场的放大。

[0207] 明确强调的是,出于原始公开的目的,同样出于限定所要求保护的发明的目的,所有在说明书中和/或权利要求书中公开的特征应视为相互分开和独立的,与在实施方式中和/或在权利要求中的特征组合无关。明确坚持的是,出于原始公开的目的,同样出于限定所要求保护的发明的目的,所有范围说明或单位组的说明公开任意可能的中间值或单位子组,尤其也公开范围说明的界限。

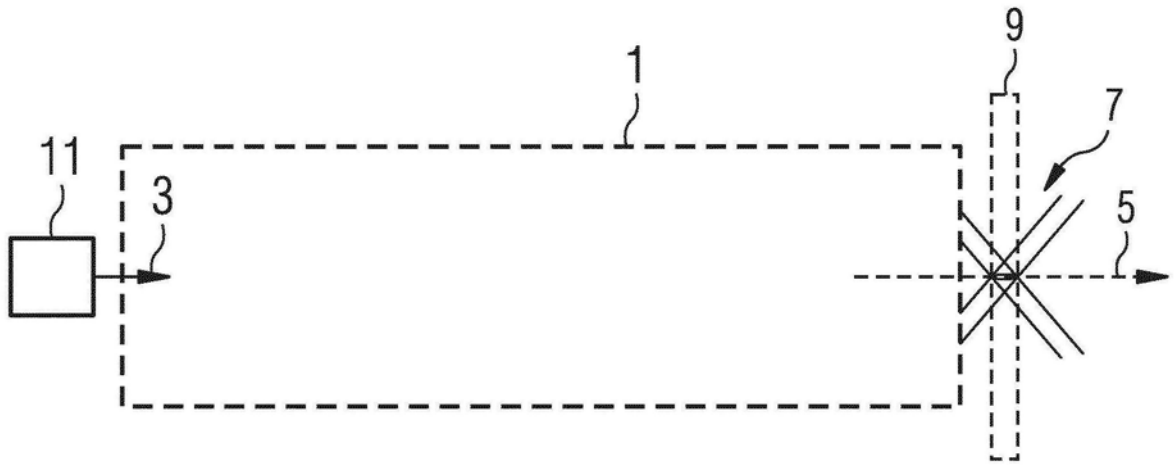


图1

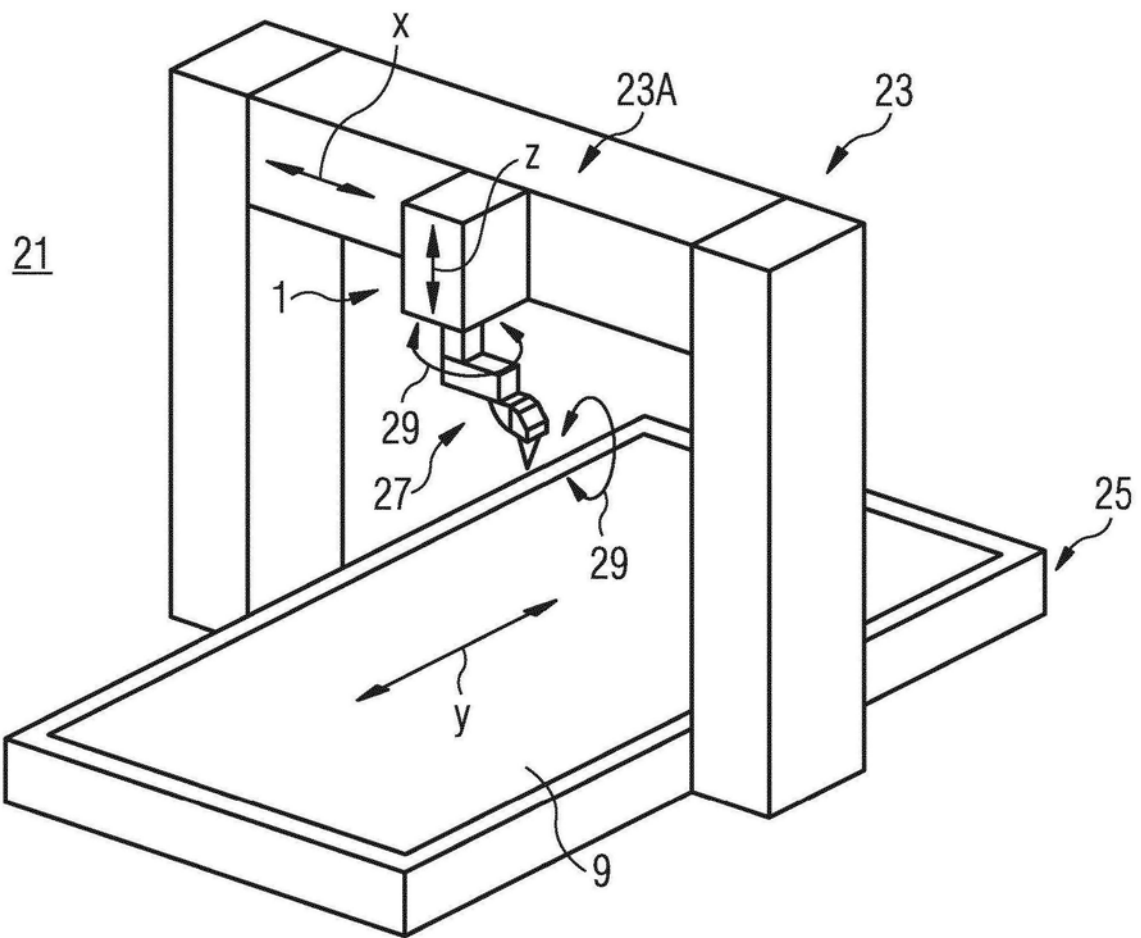


图2

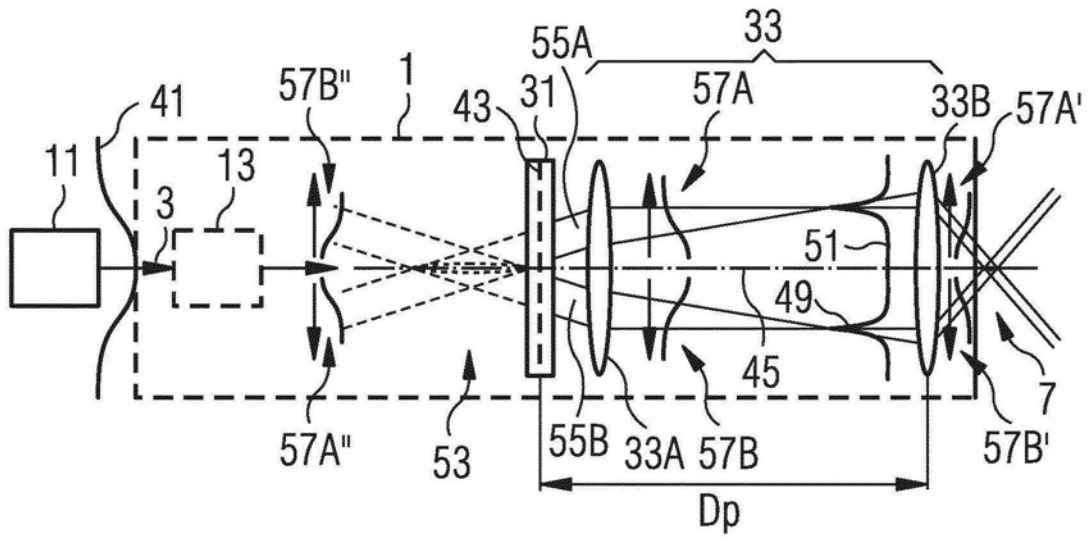


图3

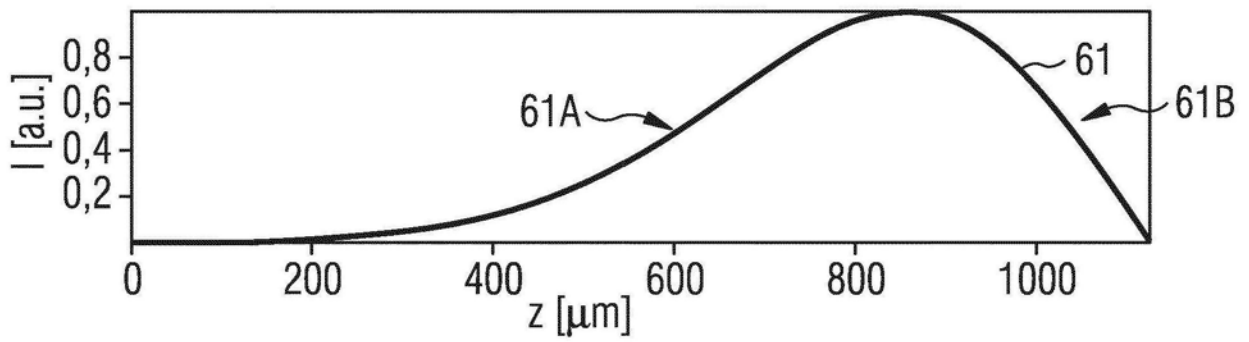


图4

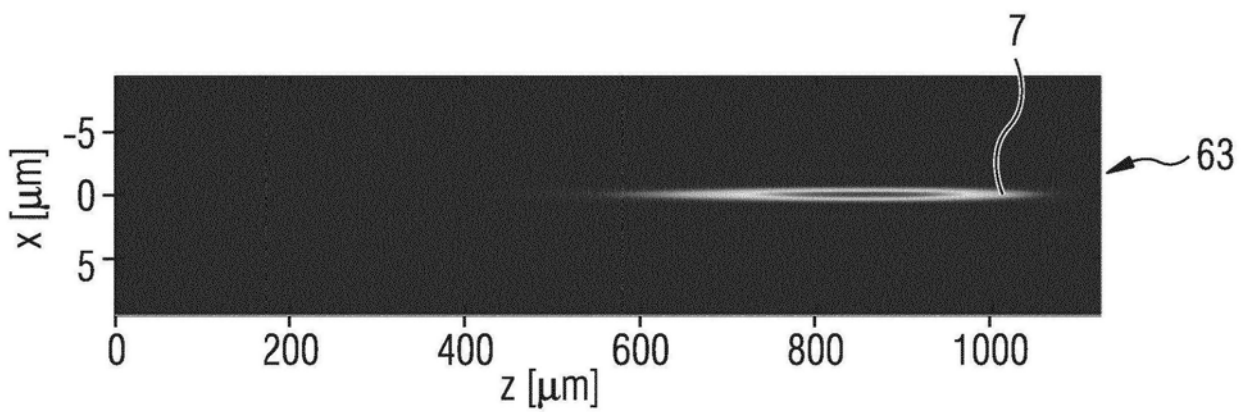


图5

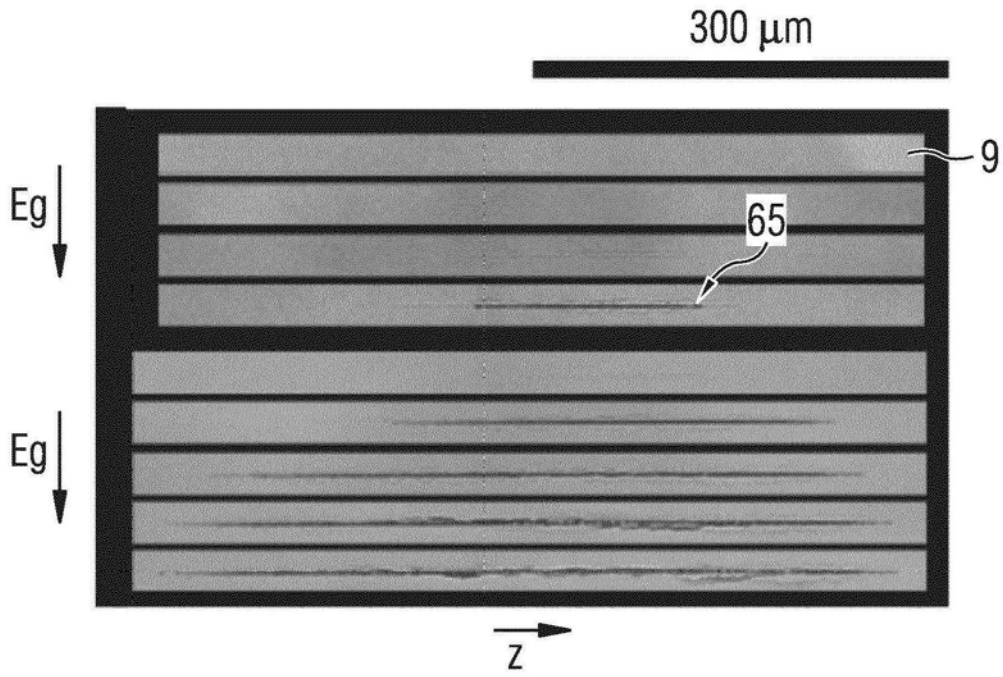


图6

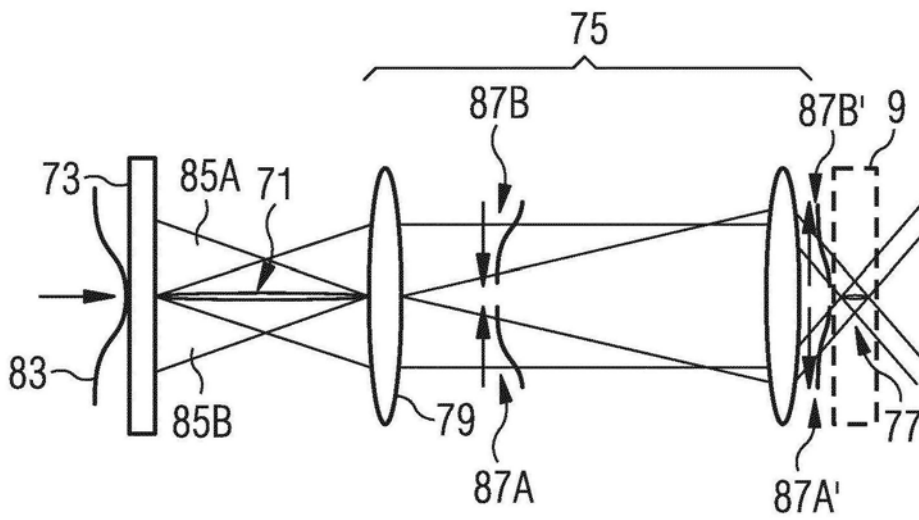


图7

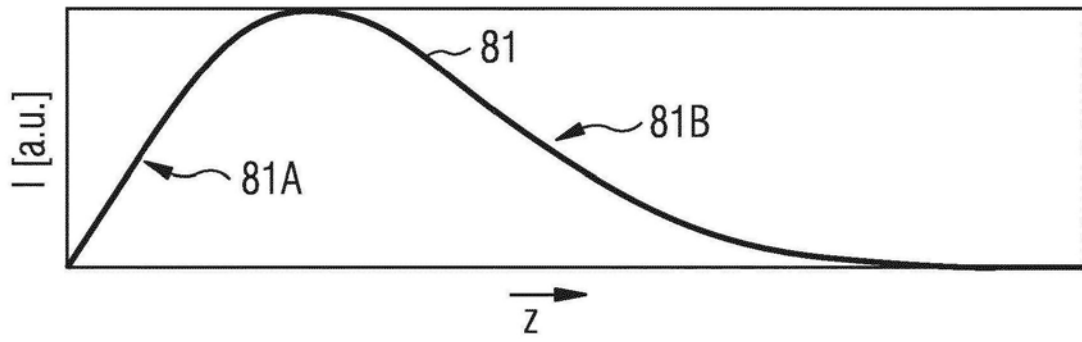


图8

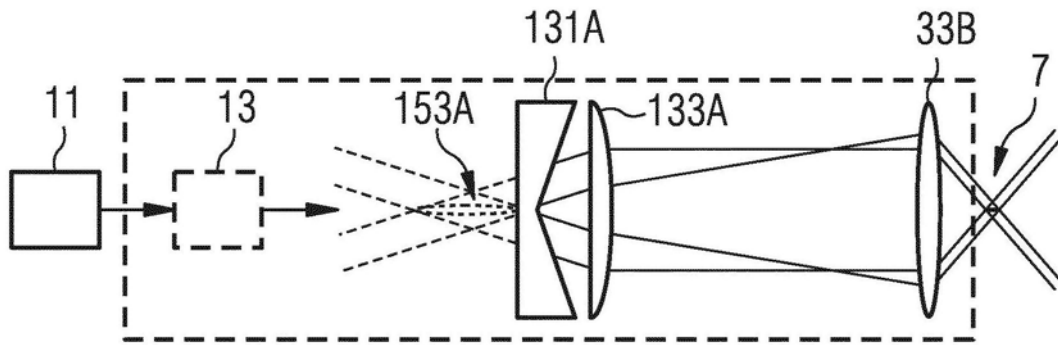


图9

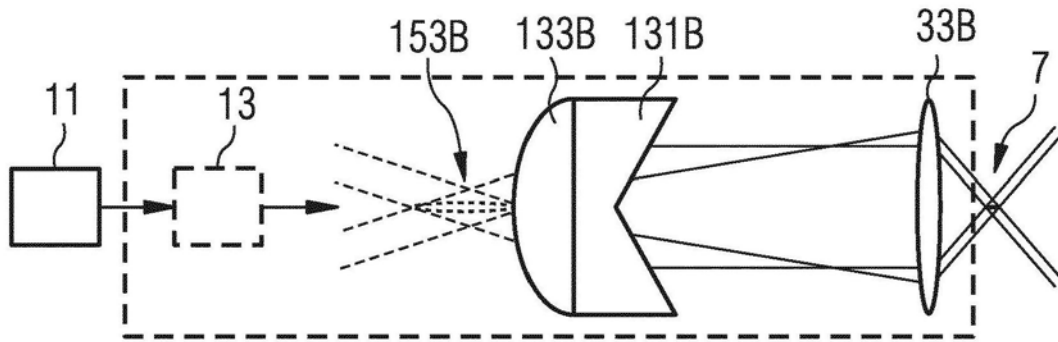


图10

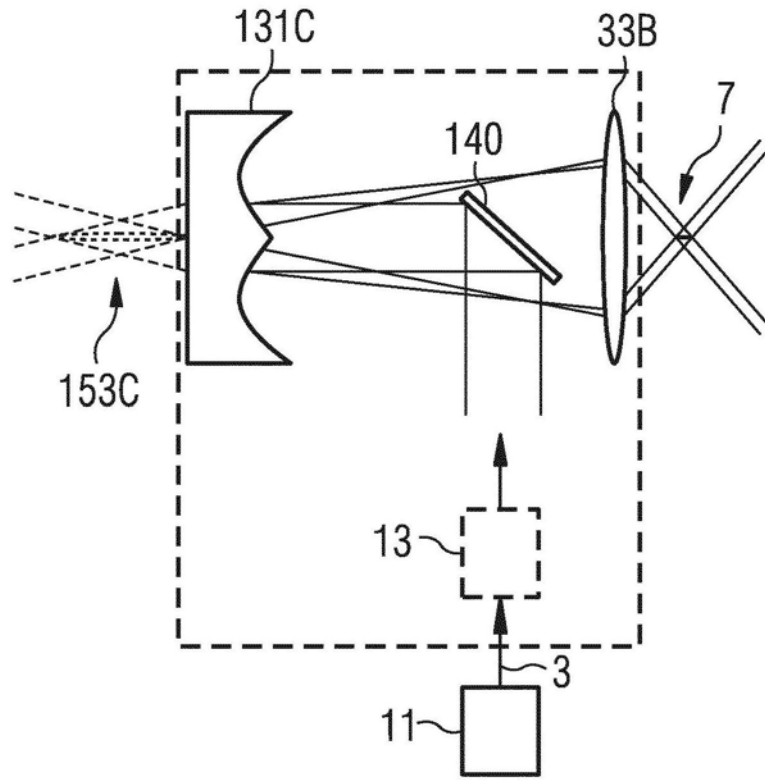


图11A

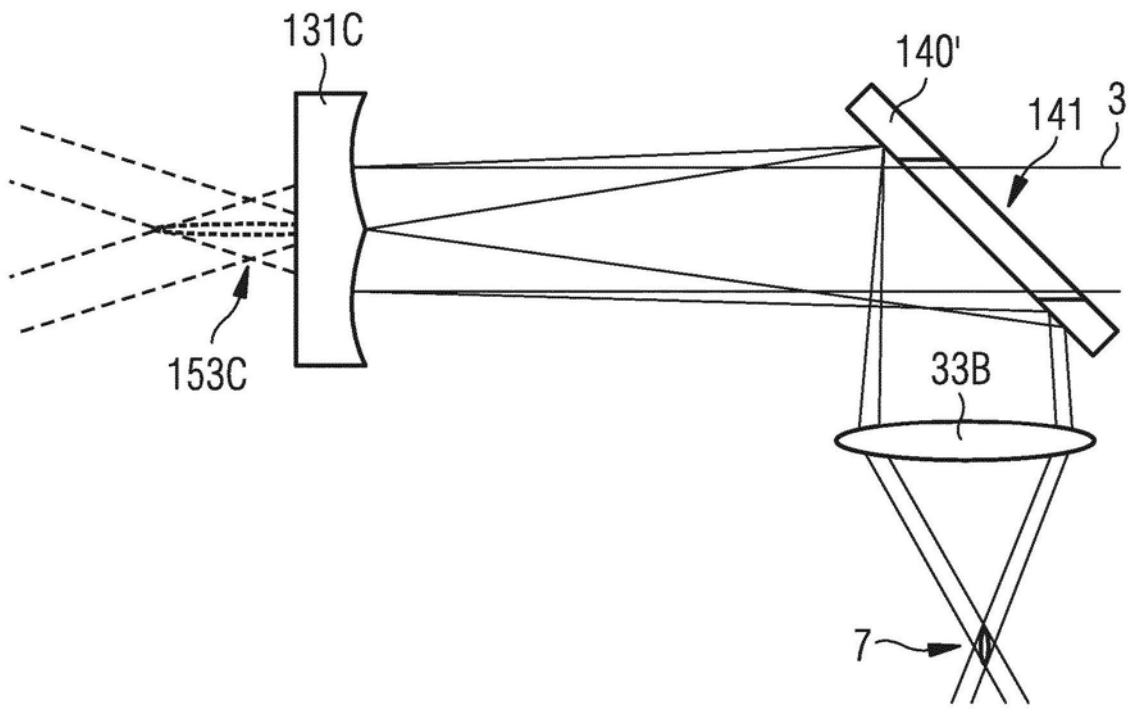


图11B



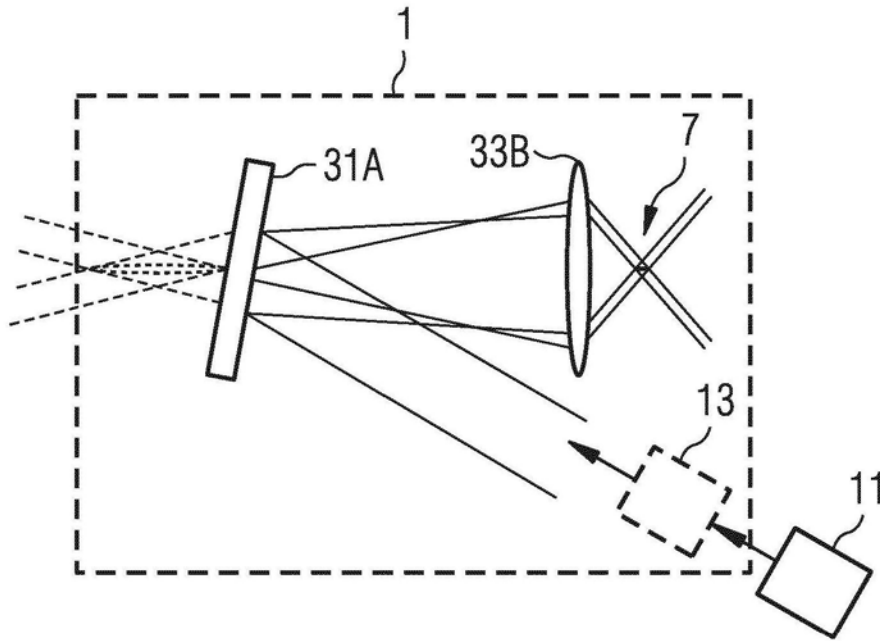


图12

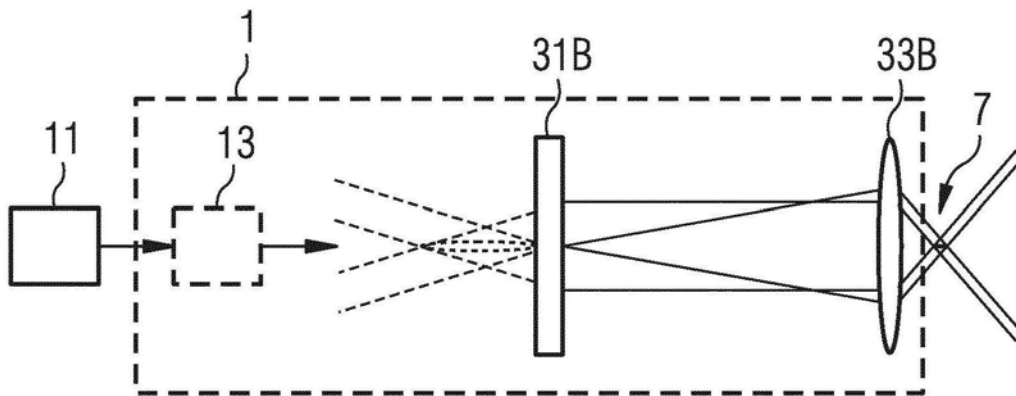


图13

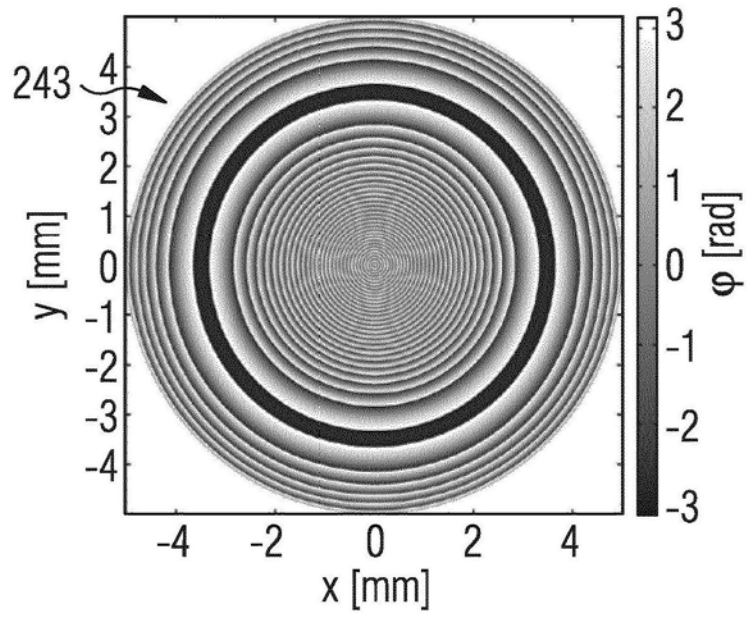


图14

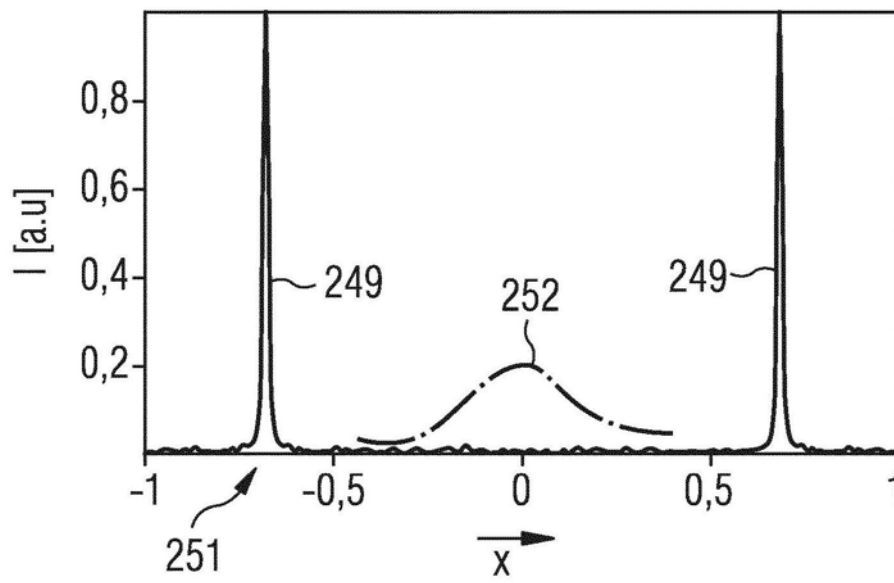


图15

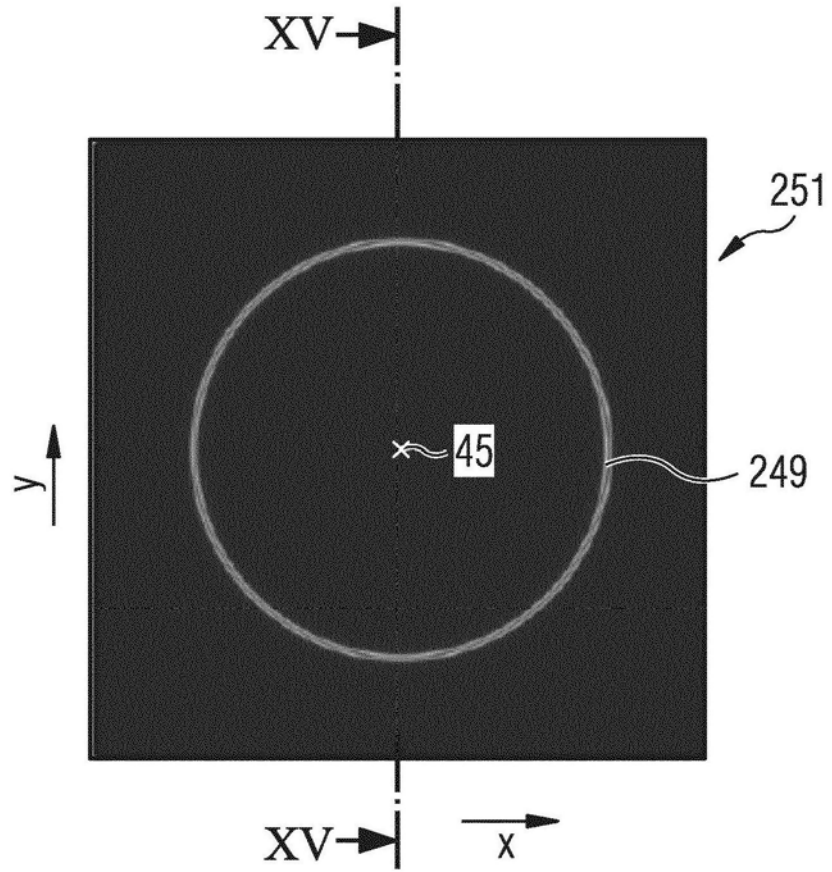


图16

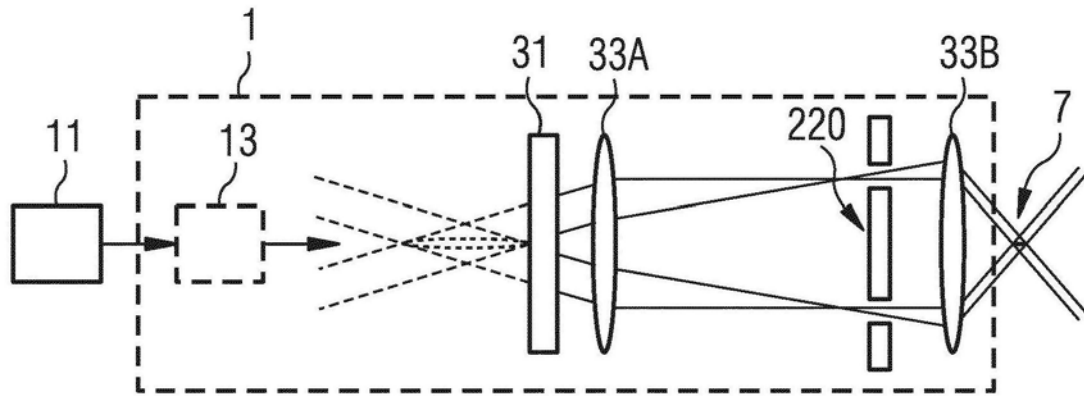


图17

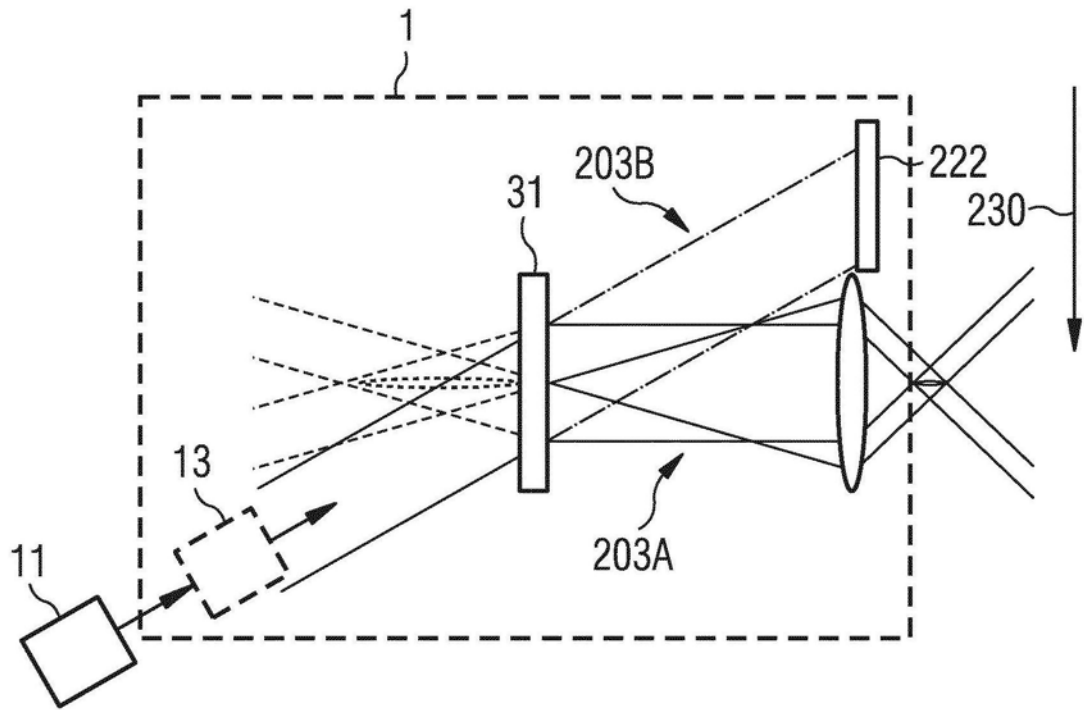


图18

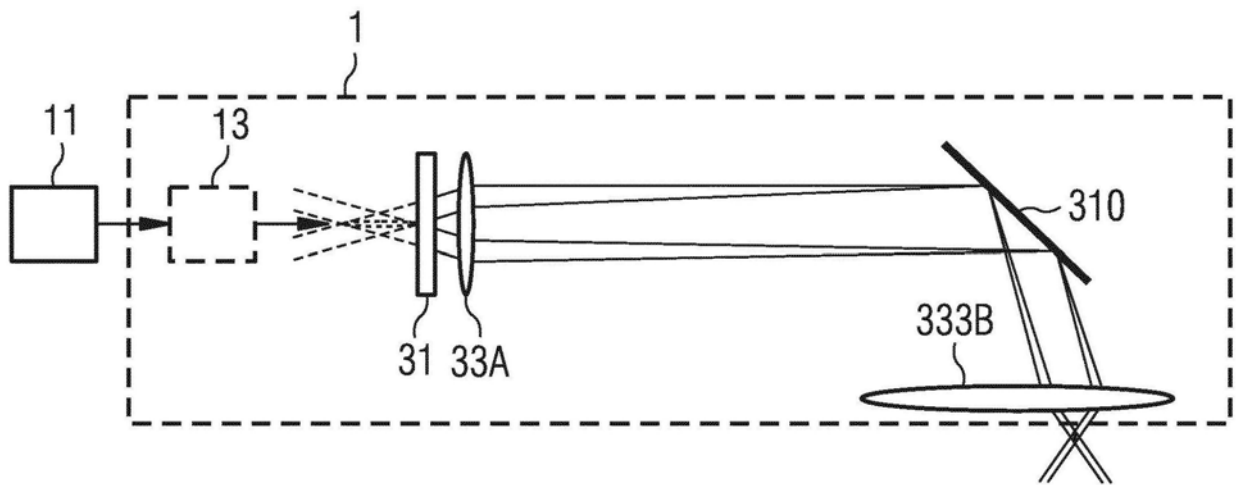


图19

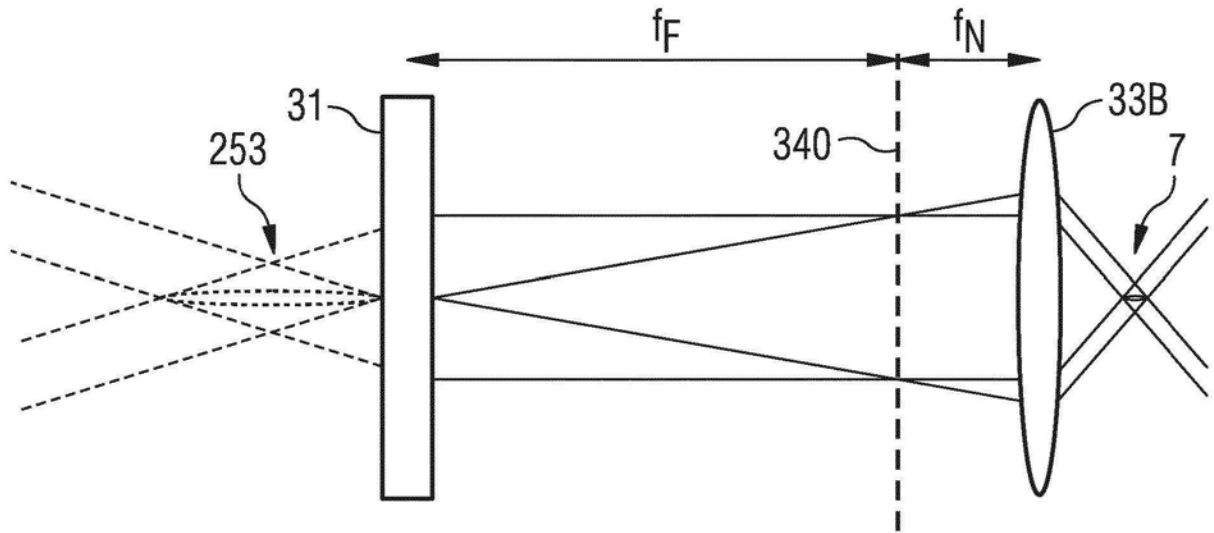


图20

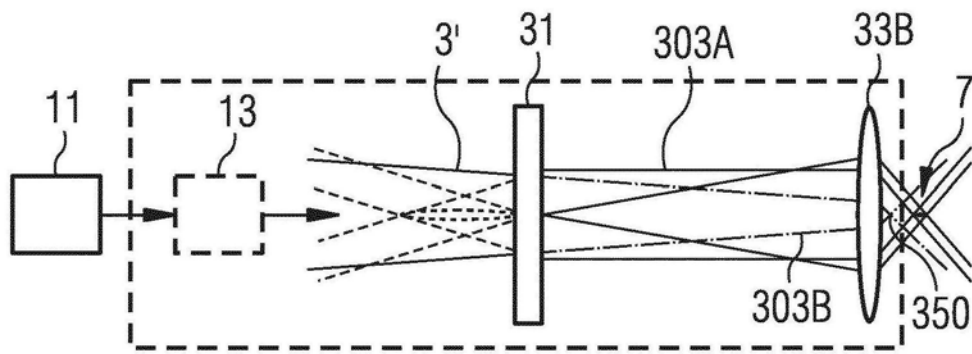


图21

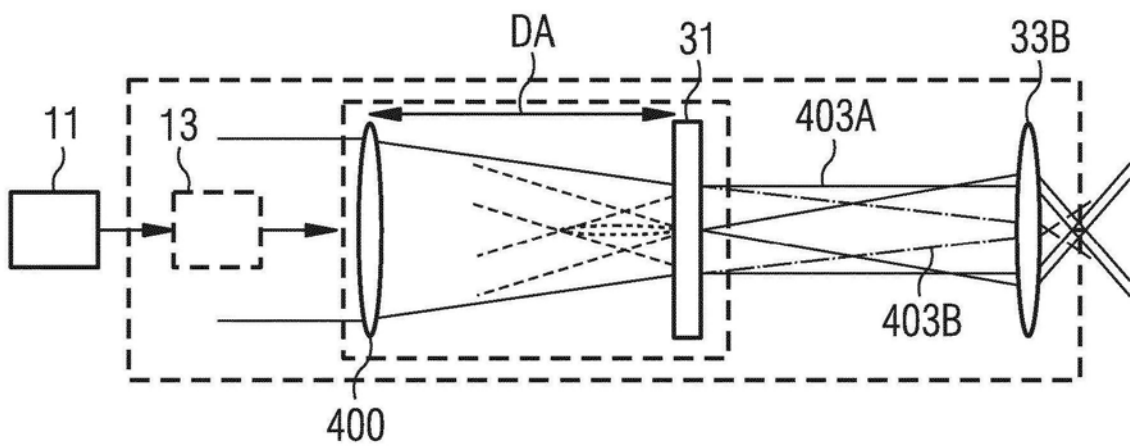


图22

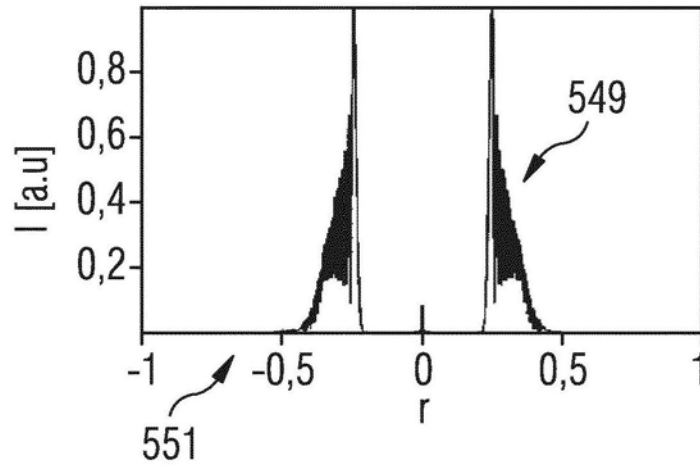


图23

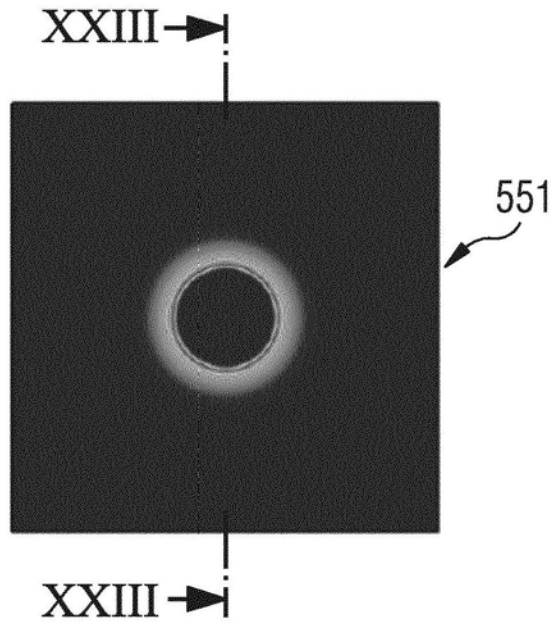


图24

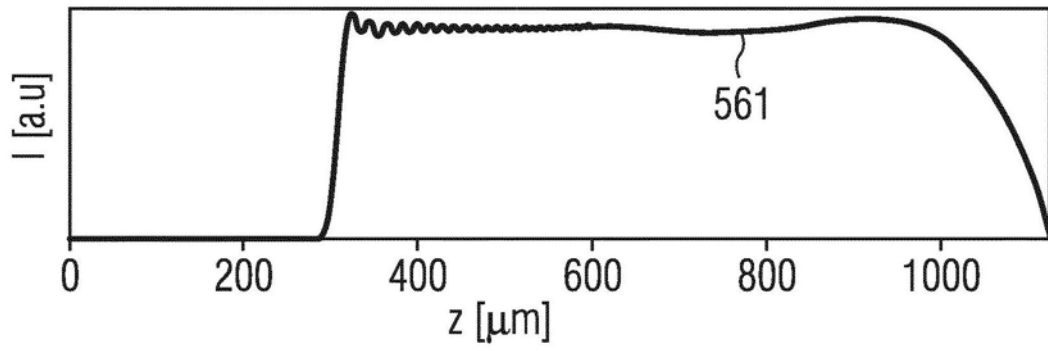


图25

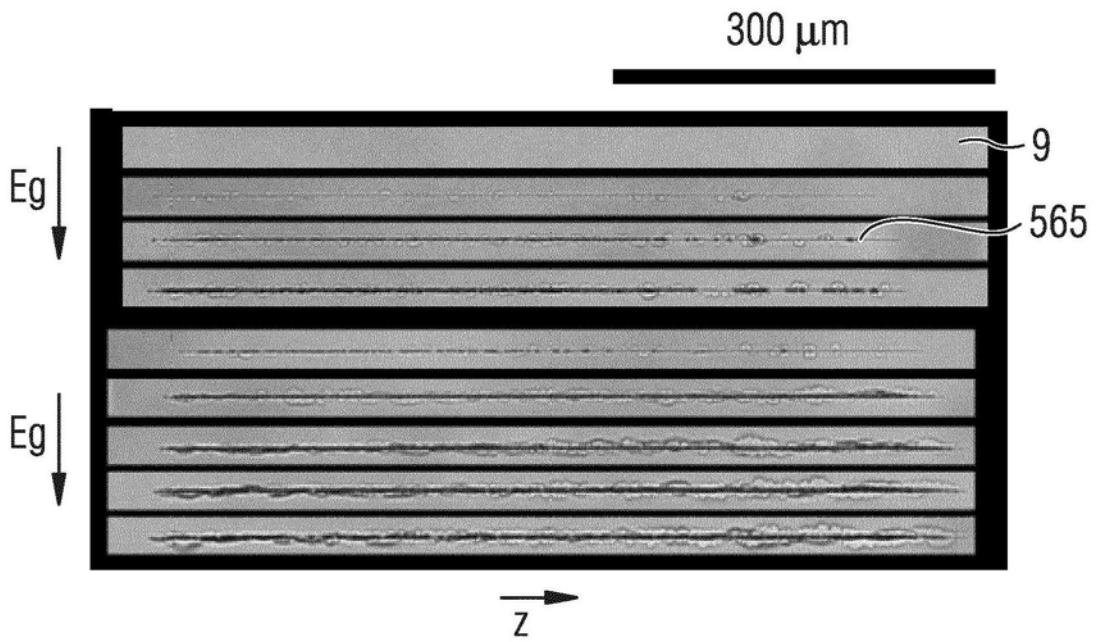


图26

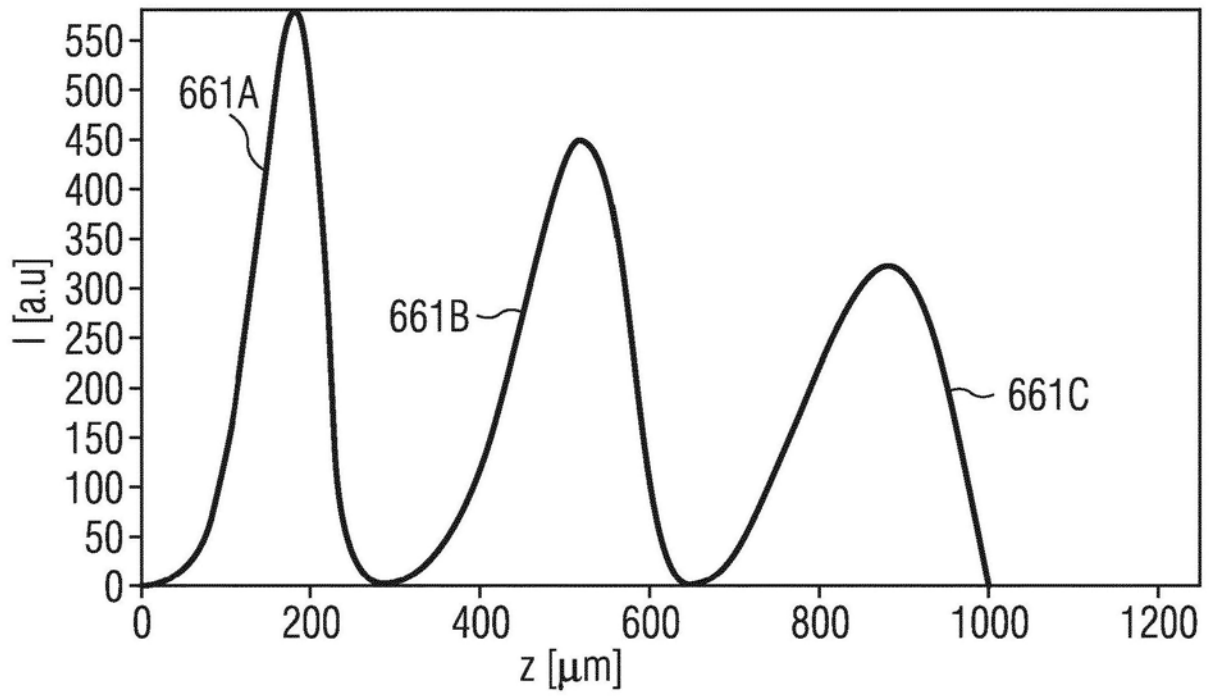


图27

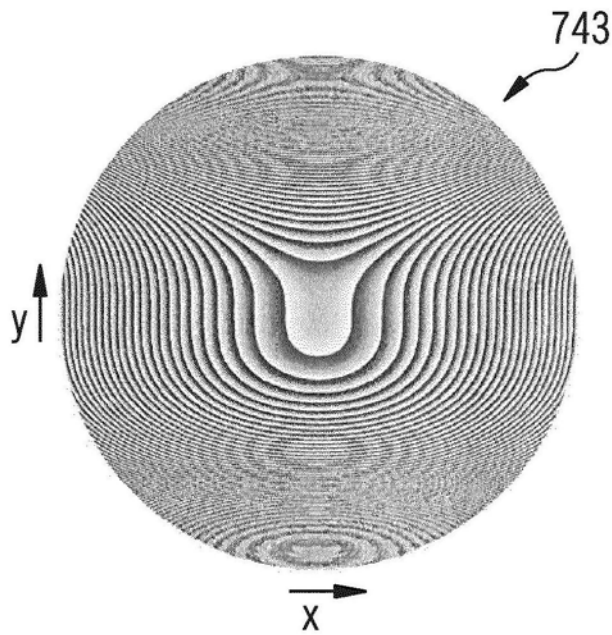


图28



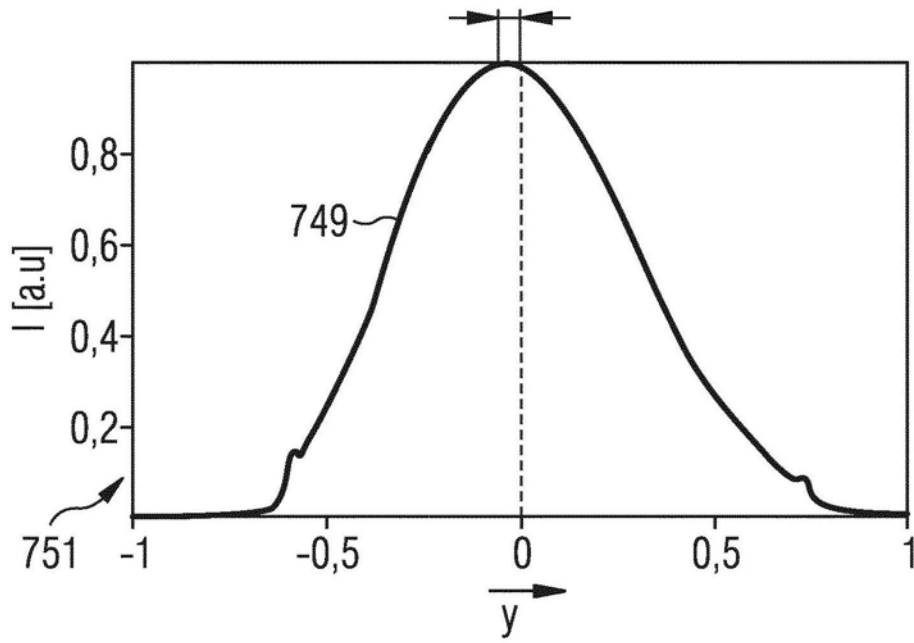


图29

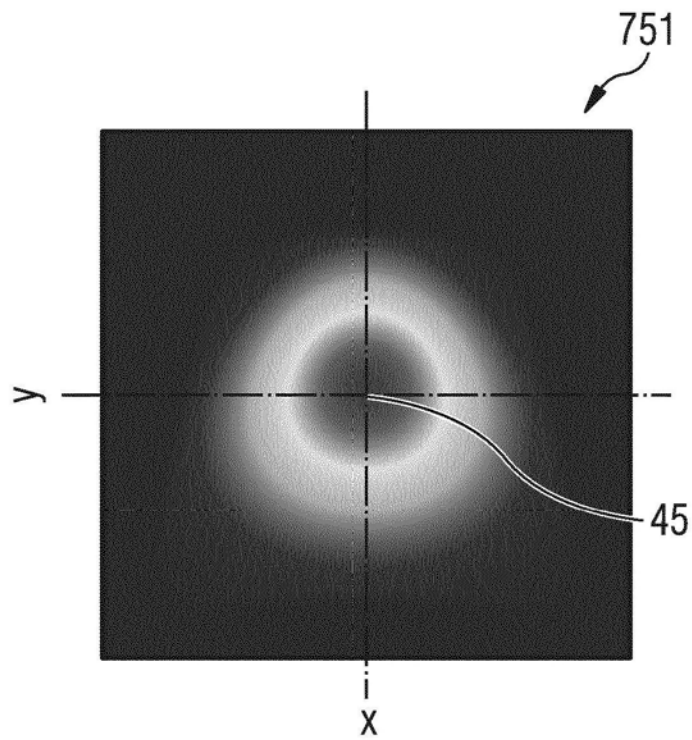


图30

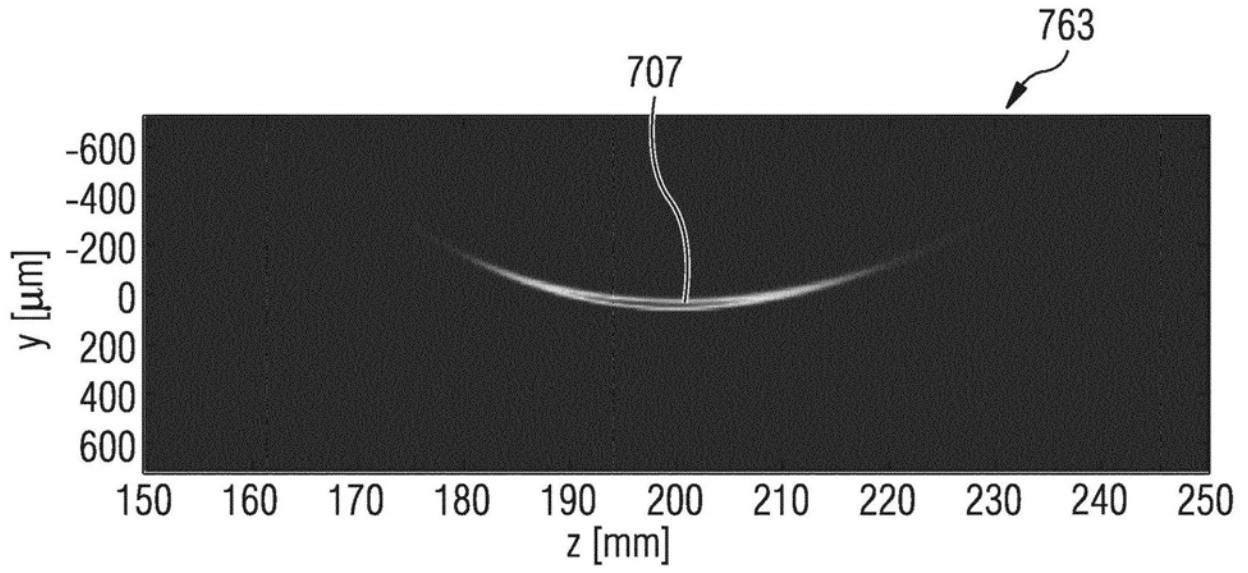


图31

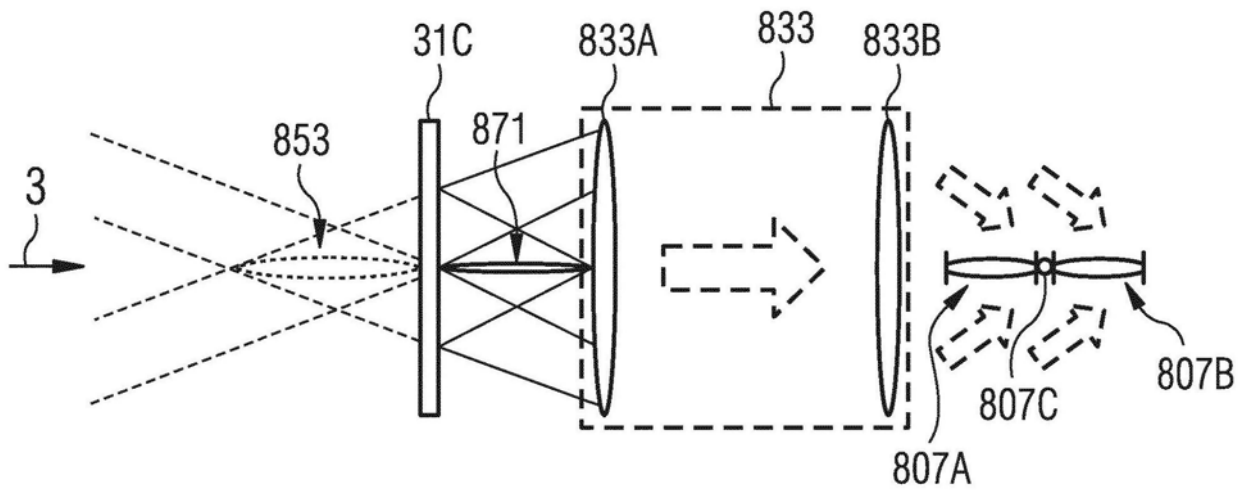


图32

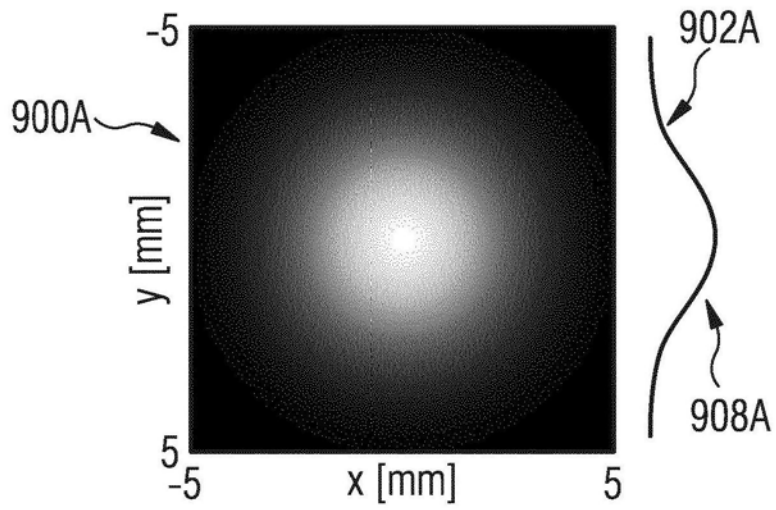


图33A

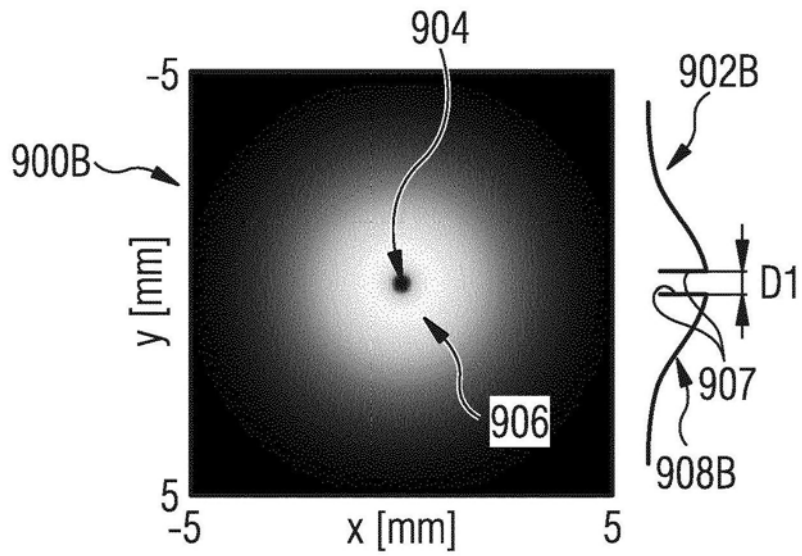


图33B

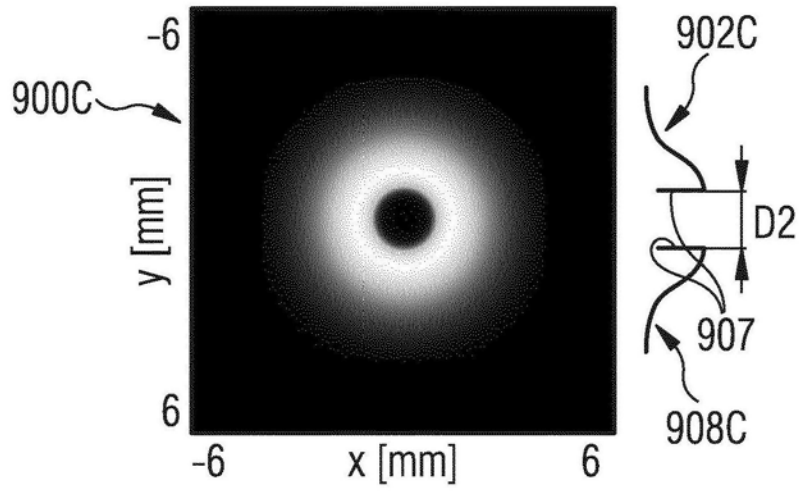


图33C

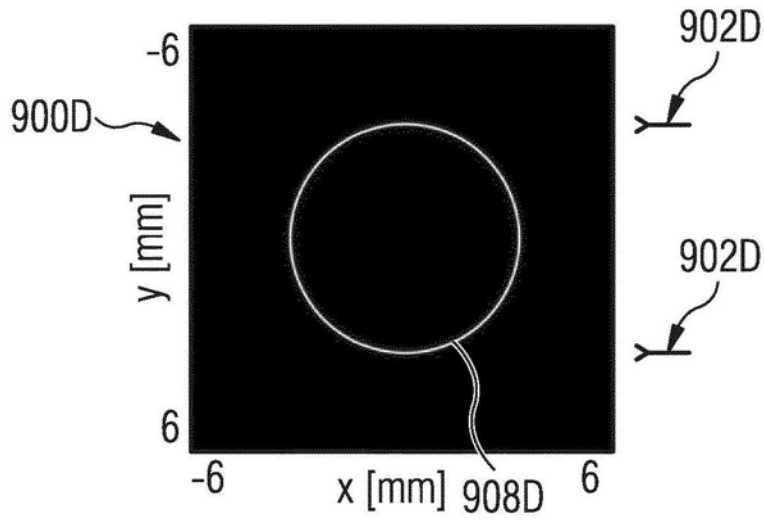


图33D

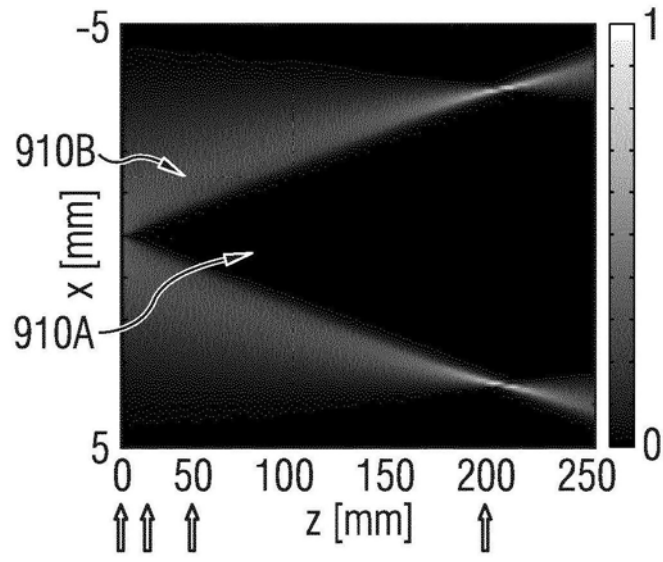


图34