



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110773736 A

(43)申请公布日 2020.02.11

(21)申请号 201910411786.9

(22)申请日 2019.05.17

(30)优先权数据

15/983,866 2018.05.18 US

(71)申请人 II-VI特拉华有限公司

地址 美国特拉华州

(72)发明人 M·A·沃隆特佐夫

(74)专利代理机构 北京市金杜律师事务所

11256

代理人 苏娟

(51)Int.Cl.

B22F 3/105(2006.01)

B33Y 10/00(2015.01)

B33Y 30/00(2015.01)

B33Y 50/02(2015.01)

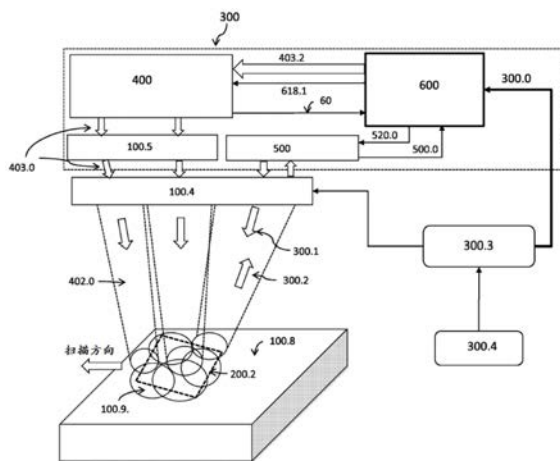
权利要求书4页 说明书28页 附图31页

(54)发明名称

利用光纤阵列激光源和自适应多光束整形的金属中的增材制造

(57)摘要

一种系统,所述系统使用由光纤阵列系统产生的可单独控制的激光束的可扩展阵列将材料加工成对象。单独光束的自适应控制可以包括单独光束的光束功率、焦斑宽度、质心位置、扫描定向、幅度与频率、活塞相和偏振状态。激光束阵列可以成簇地布置并且被配置成提供窄加工线,或可以线性地布置并且被配置成振荡并提供宽加工线。这些系统还可以具有:一组材料传感器,所述一组材料传感器直接在处理之前、在处理期间和直接在处理之后采集关于材料和环境的信息;或一组热管理模块,所述一组热管理模块对材料进行预热和后热以控制热梯度;或两者。



1. 一种增材制造系统,所述增材制造系统包括:
 - (a) 制造表面,所述制造表面包括材料;
 - (b) 激光模块,所述激光模块包括一组振荡光束模块,所述振荡光束模块被配置成产生振荡激光焦斑的线性阵列,以在所述材料上产生包括一组互连加工区段的加工线,每个振荡光束模块包括:
 - (i) 激光束传递光纤,所述激光束传递光纤包括光纤连接到激光电源的第一区段和包括光纤尖端的第二区段,其中所述第二区段被安装到可操作以使所述光纤尖端沿着一个轴线振荡的致动器,并且其中所述激光电源可操作以向所述光纤尖端提供激光功率;以及
 - (ii) 透镜,所述透镜被配置成将所述光纤尖端重新成像到所述材料上以形成激光焦斑;
 - (c) 台架系统,所述台架系统适合于将所述激光模块保持在所述制造表面上方并且可操作以沿着正交于所述加工线的线移动或扫描所述激光阵列模块;
 - (d) 控制器,所述控制器被配置成:接收包括界定目标对象的一组坐标的目标对象定义,并且在增材制造过程期间创建所述目标对象,并且至少部分地基于所述目标对象定义:
 - (i) 向所述激光电源提供信号以控制由每个振荡光束模块传输的输出激光功率;
 - (ii) 向所述台架系统提供信号以控制所述台架系统沿着正交于所述加工线的所述线的所述移动;以及
 - (iii) 向所述振荡光束模块提供信号以控制所述振荡激光焦斑线性阵列的一个或多个振荡特性。
2. 如权利要求1所述的增材制造系统,其中所述振荡激光焦斑线性阵列的所述一个或多个振荡特性包括所述振荡激光焦斑线性阵列的每个振荡激光焦斑的振荡幅度、频率和波形。
3. 如权利要求1所述的增材制造系统,其中所述振荡激光焦斑线性阵列的每个振荡激光焦斑大小几乎相同。
4. 如权利要求1所述的增材制造系统,其中:
 - (a) 所述一组振荡光束模块包括至少一个振荡光束模块;
 - (b) 所述一组振荡光束模块的每个振荡光束模块包括具有约10mm的直径和约十的缩放因子的所述透镜;并且
 - (c) 所述激光模块被配置成产生具有以下各项的所述振荡激光焦斑线性阵列:
 - (i) 所述振荡激光焦斑线性阵列的每个振荡激光焦斑的中心之间的标称距离为约15mm;
 - (ii) 来自所述光纤尖端的传输光束具有约10 μ m的宽度;以及
 - (iii) 每个振荡激光焦斑具有约100 μ m的宽度。
5. 如权利要求1所述的增材制造系统,其中所述一组振荡光束模块的每个振荡光束模块包括具有约十的缩放因子的所述透镜,并且其中所述控制器还被配置成:
 - (a) 使每个振荡光束模块的所述光纤尖端以介于约1.0mm与约1.5mm之间的振荡幅度,从而使每个振荡激光焦斑具有介于约10mm与约15mm之间的幅度;以及
 - (b) 使每个振荡光束模块的所述光纤尖端以介于每秒约3m与约5m之间的速度振荡,从而使每个振荡激光焦斑具有介于每秒约30m与约50m之间的速度。

6. 如权利要求5所述的增材制造系统,其中向所述一组振荡光束模块的每个光纤尖端提供的所述激光功率在约50W至约1.0kW之间。

7. 如权利要求1所述的增材制造系统,其中所述激光模块被配置成:

(a) 产生具有介于约25cm与约35cm之间的宽度的所述加工线;以及

(b) 以介于每小时约400立方厘米与约1600立方厘米之间的构建速率来创建所述目标对象。

8. 如权利要求1所述的增材制造系统,所述增材制造系统还包括以下各项中的一者:

(a) 预处理激光模块,所述预处理激光模块包括第二组振荡光束模块,其中所述预处理激光模块定位在所述激光模块前面,其中所述控制器还被配置成操作所述预处理激光模块以在所述材料上产生预加工线,并且其中所述预加工线被配置成在处理之前将所述材料预热到预处理温度;

(b) 后处理激光模块,所述后处理激光模块包括第三组振荡光束模块,其中所述后处理激光模块定位在所述激光模块后面,其中所述控制器还被配置成操作所述后处理激光模块以在所述材料上产生后加工线,并且其中所述后加工线被配置成控制所述材料达后处理温度的冷却速率。

9. 如权利要求8所述的增材制造系统,所述增材制造系统还包括所述预处理激光模块和所述后处理激光模块两者,其中所述预处理温度和所述后处理温度各自低于包括振荡激光焦斑的所述加工线将所述材料加热到的处理温度。

10. 如权利要求9所述的增材制造系统,其中所述预处理温度和所述后处理温度被配置成减小在创建期间的所述目标对象的表面上的热梯度。

11. 一种振荡光束模块,所述振荡光束模块包括:

(a) 激光束传递光纤,所述激光束传递光纤包括光纤连接到激光电源的第一区段和包括光纤尖端的第二区段,其中所述第二区段被安装到可操作以使所述光纤尖端沿着一个轴线振荡的致动器,并且其中所述激光电源可操作以向所述光纤尖端提供激光功率;

(b) 所述致动器,所述致动器可操作以基于从振荡控制器接收的振荡控制信号而使所述光纤尖端沿着所述单一轴线振荡;以及

(c) 透镜,所述透镜定位在经由所述光纤尖端传输的所述激光束的路径内并且适合于使来自所述光纤尖端的所述激光束重新成像并在目标上产生焦斑;

其中所述振荡光束模块被配置成在所述光纤尖端由所述致动器振荡以沿着加工线产生振荡的焦斑时产生所述焦斑。

12. 如权利要求11所述的振荡光束模块,其中所述透镜相对于所述光纤尖端和所述目标定位以在所述目标上产生所述激光焦斑,并且其中所述透镜被配置成提供来自所述光纤尖端的所述激光束的缩放因子。

13. 如权利要求11所述的振荡光束模块,其中所述激光电源被配置成以包括第一幅值、第二幅值和第三幅值的幅值提供所述激光功率,并且其中所述振荡的激光焦斑被配置成使所述目标处的材料:

(a) 在所述振荡的激光焦斑从以所述第一幅值接收的激光功率产生时经历预熔融温度变化;

(b) 在所述振荡的激光焦斑从以所述第二幅值接收的激光功率产生时经历熔融温度变

化;以及

(C) 在所述振荡的激光焦斑从以所述第三幅值接收的激光功率产生时经历后熔融温度变化。

14. 如权利要求11所述的振荡光束模块,其中:

(a) 所述振荡控制信号被配置成提供控制信号,所述控制信号包括第一增大控制电压和第二减小控制电压;

(b) 所述致动器被配置成响应所述第一增大控制电压而使所述光纤尖端沿着所述一个轴线在第一方向上移位;以及

(c) 所述致动器被配置成响应所述第二减小控制电压而使所述光纤尖端沿着所述一个轴线在第二方向上移位。

15. 如权利要求14所述的振荡光束模块,其中所述致动器包括压电陶瓷材料或压电晶体材料中的一者。

16. 如权利要求11所述的振荡光束模块,所述振荡光束模块还包括:

(a) 探测光束光纤,所述探测光束光纤连接到探测激光电源,所述探测光束光纤包括探测光束光纤尖端,其中所述探测光束光纤被安装到可操作以使所述探测光束光纤尖端沿着正交于所述加工线的所述轴线振荡的致动器,并且其中所述探测激光电源可操作以向所述探测光束光纤尖端提供激光功率;

(b) 探测光束透镜,所述探测光束透镜定位在经由所述探测光束光纤尖端传输的探测激光束的路径内并且适合于将来自所述探测光束光纤尖端的所述探测激光束重新成像并在所述目标上产生探测光束焦斑;

(c) 光检测器,所述光检测器被配置成接收来自振荡的探测光束的背向散射光并且向图像处理器提供背向散射光功率测量信号以作为一组线性扫描图像数据;

其中所述一组线性扫描图像数据包括所述目标的扫描图像。

17. 如权利要求11所述的振荡光束模块,其中所述一组线性扫描图像数据被配置成通过所述图像处理器与一个或多个其他组的线性扫描图像数据组合,以产生所述目标的组合式线性扫描图像。

18. 一种用于广域激光增材制造的方法,所述方法包括以下步骤:

(a) 在目标表面上方在台架系统上定位振荡光束模块的线性阵列;

(b) 接收目标对象定义;

(c) 向所述振荡光束模块线性阵列提供激光功率以在所述目标表面处产生来自每个振荡光束模块的光纤尖端的焦斑的线性阵列;

(d) 向所述振荡光束模块线性阵列提供振荡信号,以致使所述振荡光束模块线性阵列中的每一者的致动器使所述振荡光束模块线性阵列中的每一者的所述光纤尖端沿着一个轴线振荡,以在所述目标表面处产生加工线,其中所述加工线包括振荡焦斑的线性阵列;

(e) 提供台架控制信号,以致使所述台架系统使所述振荡光束模块线性阵列沿着第二轴线并且基本上平行于所述目标表面移动,由此致使所述加工线沿着所述目标表面的所述第二轴线移动;以及

(f) 使用所述加工线,在所述目标表面处由材料产生目标对象;

其中所述激光功率、所述振荡信号和所述台架控制信号是基于所述目标对象定义而确

定。

19. 如权利要求18所述的方法,所述方法还包括以下步骤:

(a) 在所述台架系统上定位探测光束模块的线性阵列;

b) 从所述探测光束模块线性阵列在所述目标表面处产生探测光束线,其中所述探测光束线包括振荡探测光束焦斑的线性阵列,并且其中所述探测光束线具有与所述加工线基本上相同的长度;

(c) 在所述探测光束模块线性阵列中的每一者的光检测器处接收来自所述目标对象的一组背向散射光;以及

(d) 基于所述组背向散射光而产生所述目标对象的组合式扫描图像。

20. 如权利要求18所述的方法,所述方法还包括以下步骤:

(a) 在所述台架系统上定位热管理振荡光束模块的线性阵列;

(b) 从所述热管理振荡光束模块线性阵列在所述目标表面处产生热管理加工线,其中:

(i) 所述热管理加工线包括振荡热管理焦斑的线性阵列;

(ii) 所述热管理加工线具有与所述加工线基本上相同的长度;以及

(iii) 所述热管理加工线被配置成将所述材料加热到第一温度,所述第一温度低于所述材料由所述加工线加热到的第二温度;以及

(c) 使用所述热管理振荡光束模块线性阵列,通过增加所述目标对象在创建期间经受温度变化经过的时间的长度来减小所述目标对象上的热梯度。

利用光纤阵列激光源和自适应多光束整形的金属中的增材制造

[0001] 优先权

[0002] 本申请是在2017年7月6日提交的题为“利用光纤阵列激光源和自适应多光束整形的金属中的增材制造(Additive Manufacturing in Metals with a Fiber Array Laser Source and Adaptive Multi-Beam Shaping)”的美国非临时专利申请15/642,884的部分接续案。

技术领域

[0003] 所公开的技术涉及用于使用具有对时空激光功率分布的自适应整形的多光束光纤阵列激光电源的金属增材制造的系统,和原位传感系统。

背景技术

[0004] 激光是用于材料处理和金属增材制造(例如激光增材制造(LAM)技术)的常见电源。作为一个实例,金属粉末床LAM涉及能够在制造过程期间升高和降低的制造平台或床。将金属粉末的薄层均匀地散布在所述床上,然后使用激光按所要图案将金属粉末加热,使得金属粉末熔融、然后冷却,同时能够将未受影响的粉末材料扫掉,从而只留下新形成的层。在用激光形成每个层之后,将粉末平台降低,并且金属粉末的新层散布在旧层上。如此,通过以下步骤能够一次一个层地形成三维对象:降低平台,添加新的粉末层,然后使用激光将粉末按所要对象体积的形状熔融到新的粉末层中,在新的粉末层中,粉末接着冷却、固结成金属并且与前一层结合[1至4]。用于LAM的现有激光电源的主要缺点是缺少对在激光能量沉积期间的激光束时空特性的主动和/或自适应控制,和缺少用于表征在每个层的LAM处理期间和之后在处理光束前面和在处理光束与热影响区(HAZ)内熔融并且固结成金属材料的原料的恰当原位传感技术。这些实时传感技术的缺少妨碍光束控制技术的发展和实现,所述光束控制技术包括对LAM过程的可编程、前馈和反馈控制以改善LAM创建的产品和部件的生产率、重复率和质量[5]。

[0005] 也已经发现,难以利用单一激光束来达成微结构和表面光洁度的所要改善、残余应力的减轻和加工速度的提高。本文中所公开的能够同时地投影多个特性能够单独地进行控制的激光束的高级电源和控制系统的可用性将为LAM创造新的机会,所述特性例如光学功率、焦斑大小、指向和调向特性。

[0006] 最近的技术发展可以指示检查用于材料处理和LAM的多光束可控激光电源的优点和用于所述电源开发系统的趋势。目前,已经证实了适应于激光材料处理和LAM的几个双光束和四光束激光系统[6至7]。现有多光束LAM系统针对每个光束利用将单独的光学系列,所述光学系列由产生激光束(100.2)之激光源(100.1)、光束成形(100.3)、扫描(100.4)和聚焦(100.5)光学部件组成。图1图示用于使用N个投影光束(100.6)来独立处理原料的LAM系统,所述投影光束在粉末床表面(100.8)或其他制造点工件处形成焦斑(100.7)。针对N光束LAM,需要额外的光束组合光学部件(100.9)以用于具有共同定位或紧密定位的焦斑的LAM

处理,如图2中所示。扩展如图1和图2所示的现有多光束LAM系统以包括大量单独控制激光束将需要集成类似于图1和图2所示的光学系列的多个光学系列,从而产生非常大型、沉重并且昂贵的LAM系统。另外,所演示的多光束LAM系统不包括用于反馈控制的传感器,并且因此不能提供基于工件传感数据对激光束特性的动态修改。本文中所公开的系统和方法提供这些问题的解决方法。

[0007] 现有LAM系统的另一主要缺点是所述系统主要基于所谓的单点处理技术[5、9]。在图1和图2所图示的系统中,精确聚焦的投影激光束(100.6)形成高度局部化(点)热源,用光束扫描光学部件(例如,振镜)来快速地栅格化(扫描)所述热源以用于原料的选择性激光熔融(selective laser melting;SLM)。

[0008] 这种单点处理LAM技术承受几个主要缺点:

[0009] A. 高度局部化(点)热源,所述热源由精确聚焦的激光束在粉末床或其他制造工件处产生,在处理材料中形成大的热梯度。对这个点热源的扫描产生细长的熔池,所述熔池在高扫描速度下由于瑞利不稳定性而分解成断开的球[10、11]。大的热梯度和这些球化效应均对表面粗糙度有不利影响,导致LAM中的残余应力和开裂,并且限制生产率。请注意,通过在更快的扫描速度下使用更高的激光功率来提高LAM生产率的尝试会使表面光洁度和残余应力变得更差[12];

[0010] B. 在单点处理中,在约五十微米到几百微米范围内的激光束斑点直径仅轻微地超过特性粉末颗粒大小(对于Ti-6Al-4V合金为约10到45 μm [13])。结果是微小的处理体积,在所述体积中含有相比较少的具有不同大小的粉末颗粒。由于激光束吸收率和材料的温度升高取决于颗粒大小,因此小处理体积内的原料的任何变化将引起热耗散的各向异性、局部温度梯度的变化和熔池中的强烈流体流[14到16]-直接影响LAM产生部件的质量的所有主要因素;以及

[0011] C. 利用单一激光束的处理需要高速焦斑栅格化(扫描),以避免不可接受的长制造时间。这又导致极高的加热速率,从而引起粉末床层或材料中的来自蒸发流和来自自由蒸发反冲和喷射引起的溅落的干扰[5、16]。高加热速率也使实现LAM过程参数的实时传感和控制变得困难,或甚至不可能。

[0012] 当前单点LAM技术的这些缺点能够用本文中所公开的系统和方法来缓解。

[0013] 超越常规单点SLM的最近尝试是被称为二极管区域熔融(Diode Area Melting; DAM)的增材制造过程的实现方式[17]。DAM经由使用多个激光斑点而将低功率单独可寻址激光二极管发射体的阵列用于并行原料处理。DAM方法具有阻碍所述方法从当前早期实验室实验转变到LAM产业的几个原理问题。激光二极管的巨大并且高度不对称的发散导致椭圆形低质量光束,所述低质量光束难以集中(聚焦)成具有足以使原料熔融的功率密度的斑点。为了增大每个单独激光斑点内的功率,这些二极管堆叠阵列原则上能够组合。然而,激光源的这种复用使这些高度发散光束的聚焦变得更复杂[18]。另外,粉末床表面或材料上的激光斑点不能被单独地控制。这导致不能实现自适应时空功率整形的高度空间不均匀的组合式激光强度。本文中所公开的新颖部件、系统和方法提供上文所讨论的问题以及常规系统中存在的其他问题的解决方法。

附图说明

[0014] 如发明人所考虑的,随后的图式和详细描述意图仅为说明性的,而不意图限制本发明的范围。

[0015] 图1是激光增材制造系统的示意性图解,所述系统使用具有独立激光源、光束成形、扫描和聚焦光学部件的两个或更多个($N=2,3,\dots$)投影光束在粉末床的不同区域或其他工件材料表面处形成焦斑以用于同时制造几个部分;

[0016] 图2是激光增材制造系统的示意性图解,所述系统利用两个或更多个($N=2,3,\dots$)光束组合光学系统将两个或更多个($N=2,3,\dots$)投影光束聚焦在粉末床或其他工件材料表面处;

[0017] 图3是自适应多光束光纤阵列激光增材制造系统(AMBFA-LAM)的名义示意图;

[0018] 图4是自适应多光束光纤阵列激光增材制造系统(AMBFA-LAM)的另一名义示意图;

[0019] 图5是附接有光学接收器和传感模块的示例性光纤阵列发射器的多光束发射器截面图的名义示意图;

[0020] 图6是由七个基于光纤的激光发射器和附接的四个传感模块组成的示例性光纤阵列激光头系统的正面透视图

[0021] 图7是示例性基于光纤的激光发射器模块的名义示意图;

[0022] 图8是具有控制器的示例性多通道光学功率放大器(MOPA)光纤系统的示意性框图;

[0023] 图9是具有基于虚拟透镜的光纤阵列激光头的示例性AMBFA-LAM系统的名义示意图;

[0024] 图10是多光束栅格化系统的示例性总成的名义示意图,所述系统利用附接到台架系统的基于虚拟透镜的激光头,所述台架系统具有用于粉末床表面或制造点处的多光束焦斑指向的光束指向镜和材料传感模块;

[0025] 图11是示例性光束栅格化系统的名义示意图,所述系统使用具有准直光束的光纤阵列激光头和附接有用于粉末床表面或制造点处的多光束焦斑指向的光束指向镜和聚焦透镜的台架系统;

[0026] 图12是具有材料传感模块的示例性AMBFA-LAM系统总成的名义示意图;

[0027] 图13是具有材料传感模块的示例性基于虚拟透镜的光纤阵列激光头的正面透视图;

[0028] 图14是包括探测光束激光照明器和光学接收器的示例性材料传感模块的名义示意图;

[0029] 图15是示例性探测光束激光收发器(PBLT)传感器的名义示意图;

[0030] 图16是示出AMBFA-LAM装置能够执行的多种示例性光束整形方法的图解视图;

[0031] 图17是利用图16的光束整形方法的7光束AMBFA-LAM系统的材料微结构控制的实验证据的可视化,图17示出了利用常规单光束SLM处理方法所获得的结果(左边)与使用多光束SLM处理所获得的结果(右边)结果之间在材料微结构上的显著差异;

[0032] 图18是示例性AMBFA-LAM装置的示意性框图,所述装置利用具有用于多光束自适应整形的控制器的非相干多通道光学功率放大器(IMOPA)系统;

[0033] 图19是具有多光束控制能力的示例性自适应光束整形系统的名义示意图;

- [0034] 图20是在模拟使用期间的示例性广域激光增材制造 (WALAM) 系统的正面透视图, 所述图示出示例性台架、示例性WALAM激光模块及示例性制造区域;
- [0035] 图21是WALAM激光模块在模拟使用期间的正面透视图;
- [0036] 图22是在盖从二十个示例性振荡光束模块移除的情况下的WALAM激光模块在模拟使用期间的正面透视图;
- [0037] 图23是具有五个振荡光束模块的阵列的WALAM系统在模拟使用期间的名义示意图;
- [0038] 图24是在盖被移除以示出内部部件的情况下的在模拟使用期间的示例性振荡光束模块的正面透视图;
- [0039] 图25是在盖被移除以示出内部部件的情况下的在模拟使用期间的示例性振荡光束模块的侧视名义示意图;
- [0040] 图26是在盖被移除以示出内部部件的情况下的在模拟使用期间的示例性振荡光束模块的侧视名义示意图;
- [0041] 图27示出划分成三个单独区域的示例性制造区域的自上而下图解视图;
- [0042] 图28A示出单一不振荡高斯形状焦斑的在制造区域处的模拟激光功率密度分布;
- [0043] 图28B示出对应于图28A的在制造区域处的温度分布;
- [0044] 图28C示出振荡高斯形状焦斑的在制造区域处的模拟激光功率密度分布;
- [0045] 图28D示出对应于图28C的在制造区域处的温度分布;
- [0046] 图29示出在增材制造期间的粉末材料预热和熔融的周期循环的图;
- [0047] 图30示出具有热管理能力的示例性WALAM激光模块的底部透视图;
- [0048] 图31示出具有表面传感与成像能力的示例性WALAM激光模块的底部透视图;
- [0049] 图32示出在模拟使用期间的具有表面传感与成像能力的示例性WALAM激光模块;
- [0050] 图33示出在模拟使用期间的在盖被移除的情况下的具有表面传感与成像能力的示例性振荡光束模块;以及
- [0051] 图34示出在模拟使用期间的具有表面传感与成像能力的示例性振荡光束模块的名义示意图。

具体实施方式

[0052] 本发明已经构想出新颖技术, 出于说明目的, 所述新颖技术在本文中公开为在粉末床和其他类型的金属中的激光增材制造 (LAM) -也被称为选择性激光熔融 (SLM)、直接沉积、线进给及其他类似过程-的情况下应用。尽管发明人的技术的公开申请满足金属中的LAM的领域中的长期未能满足的需求, 但是应当理解, 发明者的技术不限于以本文中所陈述的精确方式来实现, 而是可以其他方式来实现, 而不存在由所属领域的技术人员根据本公开进行的过度实验。因此, 本文中所陈述的实例仅应理解为说明性的, 并且不应被视为限制性的。

[0053] AMBFA-LAM系统配置

[0054] 在图3中图示了本文中所公开的可被称为AMBFA-LAM的自适应多光束光纤阵列激光增材制造系统, 并且在图4中图示一变形。也可以被称为激光发射器模块的AMBFA-LAM系统 (300) 可以自包含在单个壳体、底座或模块内, 或可以跨一个或多个壳体、模块或装置散

布。AMBFA-LAM系统(300)包含也可以被称为激光发射器或多光束发射器的多光束光纤阵列激光头(400),所述激光头可以具有集成式光束指向和/或聚焦模块、光束成形光学部件(100.5)、一个或多个粉末床传感模块(500)、具控制器的多通道光学功率放大器(MOPA)光纤系统(600)、光束栅格化控制器(300.3)和目标对象定义数据(300.4),所述目标对象定义数据可以由增材制造CAD软件或另一源产生,所述增材制造CAD软件或另一源提供也可以被称为目标对象的待制造对象的参数。AMBFA-LAM系统产生多个近衍射极限质量激光束,以用于粉末床表面(100.8)上的原料材料的同时预热、完全熔融和后热。在一些实现方式中,AMBFA-LAM系统(300)可以包括集成式和/或附接式无源(基于图像的)和有源(基于探测激光的)粉末床传感模块(500),所述粉末床传感模块可以检测背向散射探测光束光(300.2)。

[0055] 尽管图3示出使用粉末床类型制造点的LAM系统,但是应当理解,本文中所公开的技术的实施方案可以供除粉末床以外的制造点使用,并且这种技术的一些实施方案可以依赖于线进给制造点或直接沉积制造点。制造商的线进给点使用线、线圈、棒或其他形式的固体材料,所述固体材料被放置在制造点处,因而成为激光束的目标。随着材料熔融,新长度的线或线圈可以进给到熔融带中,并且可以视需要移动或调整材料和激光以形成所要对象。直接能量沉积制造点使用喷嘴或其他喷涂机构以视需要将粉末状材料喷涂到熔融带中。沉积喷嘴常常紧接所述激光头而安装,并且整个组件可视需要定位和定向,以形成所以没目标。这些制造类型、粉末床、线进给和直接能量沉积中的每一者具有优点和缺点,并且各自可以用于本文中所公开的技术的实施方案中,如基于例如所要成本、复杂度、耐用性、环境和使用类型的因素可期望的。

[0056] 尽管本文中所描述的技术可以在不同实施方案中使用不同制造点类型,但是为了清楚起见,图式和描述将主要描绘并且描述粉末床类型系统。在粉末床应用中,由AMBFA-LAM光纤阵列激光头发射的处理光束和传感探测光束使用光束栅格化(扫描)系统(100.4)越过粉末床表面移动,所述光束栅格化(扫描)系统是基于振镜和或不同类型的扫描镜和/或高精度x-y定位台架平台。目标对象定义数据包括材料表面处的多光束位置的坐标,和定义材料处的激光功率的时空分布的一组多光束参数,这也可被称为光束整形方法。在越过粉末床表面的多光束栅格化的时间顺序中,将目标对象定义数据发送到光束栅格化控制器(300.3)。光束栅格化控制器(300.3)向光束栅格化系统(100.4)供应多光束位置坐标,所述光束栅格化系统基于目标对象定义(300.4)而提供在粉末床表面处的光束的配置的定位。包括定义光束整形方法的多个光束参数的集合的目标对象定义数据的子集(300.0)将由光束栅格化控制器(300.3)发送到下文所描述的MOPA系统(600)的光束整形控制器(618)。目标对象定义的处理、接收和传输可以由一个或多个处理器或装置执行,并且可以由以各种方式布置和配置的处理器执行。所属领域的技术人员将根据本文中的公开内容了解替代实现方式。举例来说,在一个实现方式中,光束栅格化控制器(300.3)和光束整形控制器(618)可以是同一个处理器、控制器或装置,使得目标对象定义的部分或全部可以提供到正在那个单一控制器上执行的不同方法或函数,所述控制器接着可向其他装置提供控制信号。

[0057] 光纤阵列激光头和传感模块

[0058] 在这一章节中,我们讨论所公开的用于金属中的AM的AMBFA-LAM系统和方法中所使用的基础硬件,所述系统和方法具有光纤阵列激光源和自适应多光束整形。所公开的对包含AMBFA-LAM的元件、模块和子系统的选择以及所述元件、模块和子系统的组合和功能性

是以新颖方式布置和配置,以特别地解决LAM应用中对自适应光束整形的需要。因此,AMBFA-LAM装置(300)包括多种对金属LAM应用有用的创新元件、模块、子系统和功能性。

[0059] 图3和4中的AMBFA-LAM装置(300)能够装配成具有针对也被称为光纤阵列激光头的光纤阵列激光发射器(400)和针对具有控制器的多通道光学功率放大器(MOPA)系统(600)的不同配置。AMBFA-LAM装置(300)还可以包括集成式粉末床或材料传感模块(500)、光束成形光学部件(100.5)和光束栅格化(扫描)系统(100.4)。图5示出附接有传感模块(500)的示例性光纤阵列发射器装置(400)的正面透视图。光纤阵列激光头(400)用于发射单一或多个激光束(403.0),所述激光束是使用光束成形光学部件(100.5)聚焦到粉末床表面(100.8)处的加工区(200.2)中。所发射的光束的焦斑可以使用光束栅格化(扫描)系统(100.4)在粉末床表面上栅格化。如上文所讨论,这种技术的实施方案可以使用线进给或直接沉积系统而不是粉末床,在这种情况下,可以替换或修改光束栅格化系统(100.4)以移动并且定向光束和线或光束和材料沉积喷嘴。

[0060] 材料传感模块(500)用于表征以下各项:(a)在LAM处理之前的粉末颗粒、(b)在LAM处理期间的熔池和(c)直接在处理之后固结成金属轨迹。这些材料传感模块还可以提供对投影到粉末床表面上的激光束的特性的前馈和/或反馈控制,前馈和/或反馈控制能够用于改善LAM生产率和质量。材料传感模块(500)能够集成到光纤阵列激光头中或附接到光纤阵列激光头,如图5和图6所图示,或为光束成形(100.5)或光束栅格化(100.4)系统的部分,或独立地在这些装置上使用。材料传感模块(500)可以包括一个或几个成像传感器(500.4)、一个或多个探测激光照明器(500.1)和其他部件。材料传感模块(500)还可以利用相同或不同的波长,包括一个或多个光学接收器(500.2)和一个或多个探测激光收发器(500.3)。

[0061] 图5中的光纤阵列激光头装置(400)被示出为由一组致密包装的基于光纤的激光发射器(400.3)组成,所述激光发射器发射用于金属LAM中的多光束选择性激光熔化(SLM)的激光束(小射束)。小射束的阵列也被称为组合式光束[19]。基于光纤的激光发射器(400.3)能够集成到一个或多个光纤阵列簇(400.1),所述光纤阵列簇是通过使用一个或多个基于光纤的激光发射器来建构,如图5所示。尽管图5的实施方案示出具有在七个致密包装的基于光纤的激光发射器(400.3)-也被称为子孔径-上组成的三个光纤阵列簇(400.1)的光纤阵列发射器,其中子孔径的精确数目和光纤阵列簇的数目将基于如装置(400)的价格、所要大小和能力的因素和其他因素改变。图6另外示出示例性光纤阵列激光头系统(400)的3D视图(410.0),所述系统由具有七个致密包装的基于光纤的激光发射器的单一光纤阵列簇组成。图6中的光纤阵列簇(410.0)具有四个附接至其的传感模块(500)。

[0062] 图7的实施方案示出示例性基于光纤的激光发射器(FBLT)模块(400.3)。集成式致密包装阵列的FBLT模块形成用于发射多个光束(403.0)的光纤阵列激光头(400)。FBLT模块具有集成能力以用于在粉末床或其他材料表面处的所发射光束(403.0)电子指向和调向。额外能力可以包括允许对激光束焦斑(100.9)在粉末床或材料处的宽度的电子控制的发射光束发散控制。如下文所描述,针对LAM的用于粉末材料处的激光功率空间分布的可控整形的所公开的方法和算法将FBLT模块能力用于发射光束指向、调向和焦斑宽度控制。

[0063] FBLT模块可以包括一个或多个集成传感器(403.9)、(403.10)和(403.18),在此也被称为光束传感器(60),以用于实时测量发射光束偏振、活塞相(piston phase)和功率。偏振(403.11)和活塞相(403.12)传感器的输出信号能够用于使用如下文所描述的MOPA系统

(600)的对应控制器来稳定(锁定)由光纤阵列激光头(400)发射的多个光束的偏振状态(偏振锁定)和活塞相(锁相)。输出信号(403.11)、(403.12)和(403.19)被提供到MOPA(600)。偏振和锁相能力是针对LAM的用于多光束强度分布的时空控制的所公开技术的部分。如图3所示,MOPA系统(600)也可以被配置成提供来自光束整形控制器(618)的信号(618.1),和接收来自光束传感器(60)的信号,所述光束传感器可以包括相位(403.10)、偏振(403.9)和功率(403.18)传感器中的一种或多种。

[0064] 图7中的FBLT模块使用由单个透镜或几个透镜和/或镜子组成的光束成形光学系统(403.1)。这种光学系统将从传递光纤的尖端(403.3)发射的激光束变换成输出小射束(403.0)。图7中的示例性光束成形系统(400.3)由三个透镜组成:小尺寸的准直(403.15)透镜和负(403.14)透镜,和输出光束成形透镜(403.17)。进入FBLT模块的呈单模高斯形状激光束形式的光能是由MOPA光纤系统(600)传递。为了提供所发射激光束的角指向和调向的能力,传递光纤(403.2)的具有光纤尖端(403.3)的末端块可以装配在光纤尖端定位模块(403.4)内,所述定位模块能够提供光纤尖端在正交于激光束传播轴线的方向上的电气控制x位移和y位移[20、21]。光纤尖端位移导致所发射激光束的角偏差,和粉末床或其他材料表面处的焦斑足迹(100.9)的对应位移。对光纤尖端x位移和y位移的控制是使用电气信号(403.5)来执行,所述电气信号是由控制器(403.6)响应来自MOPA系统(600)的光束整形控制器(618)的输入信号(618.1)而产生。

[0065] 所发射激光束的角调向也能够使用所公开的透镜x/y定位模块(403.13)来实现,所述透镜x/y定位模块能够实现小尺寸负透镜(403.14)-光束成形光学系统(403.1)的部分-在正交于激光束传播轴线的方向上的可控x和y高精度位移。透镜x和y位移产生出射光束波前尖端和倾斜,从而导致所发射激光束传播方向的角偏差。透镜x-y位置控制是通过施加电气控制信号(403.5)来执行,所述电气控制信号是使用来自MOPA系统(600)的光束整形控制器(618)的输入控制信号(618.1)在控制器(403.6)中产生。在光束尾部区(403.8)内的光束的一部分被光束成形光学部件的孔径剪除并且用于利用光束传感器(60)来传感光束特性。

[0066] 图7中的FBLT模块(400.3)可以包括针对所发射光束发散控制的额外能力,发射控制反过来更改投影到粉末床或材料表面上的焦斑的大小。光束发散控制能够使用所公开的透镜z定位模块(403.16)来实现,所述透镜z定位模块能够实现小尺寸透镜(403.15)沿着激光束传播方向(沿着光学z轴)的可控位移。

[0067] 多通道光学功率放大器(MOPA)光纤系统

[0068] 在图3和4中图示了作为AMBFA-LAM装置(300)的部分的具控制器的基础光纤光学部件硬件,在本文中被称为多通道光学功率放大器(MOPA)光纤系统。在金属LAM的所描述应用中,MOPA系统(600)被用于到光纤阵列激光头(400)的激光功率传递和自适应光束整形。

[0069] 图8中示出了示例性MOPA光纤系统(600)的示意图。图8中的MOPA系统(600)示出为由以下基础模块组成:

[0070] 具有光学模块的单模窄线宽度种子激光(601),所述光学模块提供耦合到单模偏振维持(PM)光纤中的激光束(602)。

[0071] 耦合到单模PM光纤中的种子激光的激光束进入光纤分路器(606),所述光纤分路器将输入光束近乎相等地分配在几个(1到N个)单模PM光纤通道(606.1)之间。光纤通道

(606.1)的数目对应于由光纤阵列光束激光头(400)发射的光束的数目。在分裂到光纤通道(606.1)中之前,激光束可以由光纤前置放大器(605)放大,并且在一些高光学功率LAM应用中,另外经过调相以增大线宽度并且因此减轻光纤中的非线性效应[22]。激光束线宽度增大(线加宽)是使用特殊的线加宽电子模块(603)来执行,所述线加宽电子模块向光纤集成调相器(604)供应高(GHz速率)随机信号[23,24]。请注意,在一些实现方式中,在使用宽线种子激光(602)的情况下,可以不需要线加宽。

[0072] 图8中的MOPA光纤系统(600)的所有光纤通道(606.1)是由相同的光纤集成部件组成。出于这个原因,图8的实施方案仅示出单个光纤通道(606.2)的这些光纤集成部件。在于光纤分路器(606)中分裂成N个通道之后,每个激光束穿过例如基于铌酸锂(LiNbO₃)的可控移相器(607)[23]。MOPA系统的移相器引入光纤通道(606.1)中的光程差(OPD)的可控变化(修改)。对OPD的可控修改是由活塞相控制器(615)引入并且导致所发射小射束(403.0)的孔径平均(活塞)相的对应变化。施加到移相器(607)的控制电压(617)是使用如在下文更详细地描述的一种或另一种光束整形方法在一活塞相控制器(615)中产生。

[0073] 关于本文中所公开的自适应光束整形方法,这种活塞相控制器可以在下文所描述的以下体系中操作:相位随机化(615.1)、阶梯模式光束调向(615.2)、锁相(615.3)和时间复用控制(616)。时间复用控制单元(616)用于选择和/或时间复用活塞相控制器(615)的操作体系。

[0074] 在穿过移相器(607)之后,具有已调制OPD的激光束将使用功率光纤放大器(611)放大,并且经由传递光纤(403.2)进入光纤阵列激光头总成(400)的基于光纤的激光发射器(FBLT)的阵列。FBLT模块(400.3)在上文描述并且在图7中图示。

[0075] 在LAM的需要额外控制所发射光束偏振状态的光束整形应用中,PM光纤将由光纤接头点(608)与如图8所示的非PM传递光纤衔接。相应地,在这种情况下,功率光纤放大器(611)也可以基于非PM单模光纤。在这些应用中,对所发射光束偏振状态的控制是使用偏振控制器(610)来执行,所述偏振控制器被配置成接收来自光束整形控制器(618)的信号(619.3)。所述控制信号被施加到偏振调整器(609)。偏振控制器(610)接收来自偏振传感器(403.9)的信号(403.11)。这些传感器可以相对于光纤阵列激光系统(400)在外部或集成到光纤阵列系统(400)中,如图7中的(403.9)所示。

[0076] 请注意,对全部由光纤阵列发射的光束产生相同的偏振状态的偏振控制-也被称为偏振锁定-是高功率(kW级)光纤阵列系统通常所需的,所述高功率(kW级)光纤阵列系统故意地在MOPA系统中使用非PM光纤和光纤元件,以便减小光纤中的非线性效应[22]。在基于PM单模或低模数(LMN)PM光纤的MOPA光纤系统中,可能不需要偏振锁定。在可能不需要用于光束整形的活塞相和偏振控制的LAM应用中,MOPA系统(600)可以基于非PM光纤和光纤部件和子系统,或包括至其中。在被称为非相干MOPA的这种MOPA系统配置中,不需要移相器(607)和偏振调整器(609)以及对应的活塞相控制器和偏振控制器和传感器。具有非相干MOPA的AMBFA-LAM系统(300)具有减小的自适应光束整形能力,所述能力可以包括在粉末床或其他材料表面处的所发射小射束(403.0)电子指向、调向和焦斑控制。

[0077] AMBFA-LAM光束成形和栅格化系统

[0078] 实现在此被称为基于虚拟透镜的光纤阵列激光头的光纤阵列激光头装置(400)和被称为远程SLM的选择激光熔融(SLM)方法的下述配置,在没有外部光束成形光学部件

(100.5)的情况下(例如在没有常规F- θ 光束聚焦透镜[25]的情况下)和/或在没有常规光束栅格化(104)系统(例如基于振镜散射体[26])的情况下,可以使用图3中的AMBFA-LAM系统(300)。在图9中图示了这种基于虚拟透镜的光纤阵列激光头(401)。在此图解中,AMBFA-LAM系统的光纤阵列激光头(401)产生聚焦光束的阵列,所述聚焦光束的焦斑位于与激光头相距预定义距离L定位的粉末床或材料表面处。

[0079] 在基于虚拟透镜的光纤阵列激光头总成(401)中,图7中所示的每个基于光纤的激光发射器(FBLT)模块(400.3)含有光束成形光学系统(403.1),所述光束成形光学系统被设计成将小射束聚焦在与激光头相距距离L处。为了在粉末床或材料表面处的加工区中重叠或定位光束的焦斑,以预先计算的角度 $\{\alpha_j\}$ ($j=1, \dots, N$)将基于光纤的激光发射器模块(400.3)装配在特殊设计的安装保持器(400.1)内,所述角度取决于到工件的所选距离L,如图9所示。基于虚拟透镜的光纤阵列激光头总成(401)以光束在工件的指定目标点区域内的焦斑为中心,类似于利用在光纤阵列激光头(400)前面的大孔径光束成形光学部件(100.5)(例如常规或F- θ 透镜)可达成的情况,所述光纤阵列激光头(400)由产生准直输出光束(403.0)的基于光纤的发射器模块(400.3)组成,如图3和图6所示。

[0080] 基于虚拟透镜的光纤阵列激光头(401)与粉末床表面(100.8)之间的距离L能够基于技术驱使的需求来规定,并且可明显超过利用常规基镜的扫描器(例如,具有振镜的扫描器[26])的目前所使用的金属3D打印系统的20到50cm上限。激光头与原料之间的距离L的显著(三倍到五倍)增大的可能性非常理想,所述增加能够利用所公开的基于虚拟透镜的光纤阵列激光头装置(401)实现,而不会导致组合式激光束焦斑大小的不可接受放大,并且不需要额外的大孔径、沉重且昂贵的光束成形光学部件。这种扩大范围(远程)LAM防止激光头和传感器光学部件被在粉末床或材料表面处的热影响区(HAZ)中所产生的热和碎屑污染。请注意,为了保持焦斑大小不随光束聚焦距离L增大而改变,我们可以成比例地增大光纤阵列激光头的光学孔径大小并且提供小射束活塞相的锁定。

[0081] 与工件相距较长距离L另外允许用如图9和图10所示的高精度、高速度的x-y台架系统(404.0)来替换常规的基于镜的光束栅格化系统。图10示出使用基于虚拟透镜的光纤阵列激光头和x-y台架系统的光束栅格化系统(404.2)。对于粉末床或材料表面处的组合式光束栅格化,基于虚拟透镜的光纤阵列激光头(401)可以直接附接到台架平台(404.0)并且与所述台架平台一起移动,如图9所示,或可以用于照明附接到x-y台架系统的光束指向镜的简单总成,如图10所示,其中附接到台架系统的镜 M_1 和 M_2 提供指向粉末床表面(100.8)的焦斑。镜 M_1 附接到在x方向上移动的可移动平台(404.1),而 M_1 和 M_2 镜均能够在正交y方向上独立地移动,因此提供光束栅格化。请注意,由于激光头(401)与粉末床(100.8)之间的距离L在光束栅格化期间改变,因此特性焦斑大小d也发生变化。对于长距离L和相对小的LAM工作包络,焦斑大小变化的这种不当效应小。否则,对于大面积LAM处理,焦斑大小变化的效应能够使用图7中的具有透镜z定位模块(403.16)的基于光纤的发射器(400.3)的焦距的对应可控变化来减轻。在图11中图示了另一可能选项,图11示出使用具有准直光束的光纤阵列激光头和x-y台架系统的光束栅格化系统(404.5)。在这种多光束栅格化方法中,光纤阵列激光头(400)产生准直光束,使用聚焦透镜(404.4)将准直光束聚焦到粉末床或材料表面上。这个透镜直接在指向镜 M_1 之后附接到移动x方向平台(404.3),并且与这个镜一起移动。

[0082] 总之,所公开的用于远程多光束激光功率沉积到粉末床或材料表面中的具有基于

虚拟透镜的光纤阵列激光头和基于x-y台架平台的光束栅格化系统的系统和方法允许：(a) 消除例如F- θ 透镜的常规光束成形(100.5)系统和例如基于振镜的系统的束栅格化(100.4)系统；(b) 增大制造点处的工作空间包络，因而在制造较大零件时提供LAM的额外灵活性；和(c) 减小对LAM构建零件和激光束传递光学部件两者的激光束诱发的热冲击。

[0083] AMBFA-LAM材料传感系统

[0084] 这一章节描述在此公开的传感方法和装置，所述方法和装置能够用于LAM过程的原位性能特性化或用于多光束参数和粉末床表面或材料表面处的时空强度分布的前馈和反馈控制，或用于这两种情况。这些传感方法和系统包括：

[0085] (a) 用于表征在LAM处理光束前面的粉末颗粒的方法和系统，在此被称为粉末颗粒传感(PPS)；

[0086] (b) 用于传感在处理光束之后在热影响区中固结成金属粉末材料的方法和系统，在此被称为处理后轨迹传感(PTS)；和

[0087] (c) 用于熔池表征的方法和系统，在此被称为熔池传感(MPS)。

[0088] 所公开的传感方法是基于利用探测激光束的粉末床表面或材料表面主动询问，以用于以下各项的原位表征：(a) 在处理光束前面的粉末材料；(b) 在加工区内；和(c) 在材料固结成金属处理后轨迹。除了基于探测激光的传感之外，AMBFA-LAM材料传感能力还可以通过可见、近红外、中间红外和远红外谱带中的无源成像来增强。图12的示意图图示包括以下各项的材料传感模块：粉末颗粒传感(PPS)模块(500.5)、熔池传感(MPS)模块(500.6)和处理后轨迹传感(PTS)模块(500.7)。

[0089] 所述AMBFA-LAM材料传感器利用一个或多个探测光束激光照明器(500.1)和一个或多个光学接收器(500.2)。所述传感器可以在与处理光束(402.0)相同或不同的波长下操作。

[0090] 材料传感模块可以直接附接到如图12所示的光纤阵列激光头(400)，或附接到图9和图13中的基于虚拟透镜的光纤阵列激光头(401)，或可以附接到如图10和图11所示的x-y台架系统(404.1)的移动平台，并且因此在沿着处理轨迹(500.8)的扫描方向(500.11)上随处理光束(402.0)移动，从而形成熔池(500.9)并且在熔池(500.9)冷却后留下固结成金属的轨迹(500.10)，如图12中所示。

[0091] 在图14中图示了由探测光束激光照明器(500.1)及光学接收器(500.2)组成的材料传感模块的名义示意图。探测光束激光照明器(PBLI)和光学接收器可以集成到如图15中所示的单探测光束激光收发器(PBLT)装置(520.3)中。PBLT基于来自PBLI控制器(523.6)的一个或多个探测光束信号(523.5)而发射探测激光束(300.1)，并且接收背向散射光(500.12)。在下文讨论所公开的基于探测光束激光收发器的传感器。

[0092] 在图13中示出了附接有传感模块的示例性基于虚拟透镜的光纤阵列激光头(401)的示意图。所述传感模块包括：粉末颗粒传感器(500.5)、处理后轨迹传感器(501.0)和熔池传感器(500.6)。粉末颗粒传感器(PPS)和处理后轨迹传感器(PTS)均基于图15中所示的探测光束激光收发器(520.3)，而熔池传感器(MPS)包括在图13和图14中图示并且在下文描述的光学(500.2)装置和散斑成像接收器(500.13)装置两者。

[0093] 图14的示意图图示由探测光束激光照明器(500.1)和光学接收器(500.2)组成的材料传感模块。这种材料传感器可以用作粉末颗粒传感器(500.5)、熔池传感器(500.6)、处

理后轨迹传感器 (500.7) 或其任何组合。请注意, 这些材料传感模块还可以基于在图15中图示并且在下文描述的探测光束激光收发器 (520.3)。

[0094] 图14中的PBLI装置 (500.1) 的光学示意图和功能性类似于上文所描述并且在图7中描绘的基于光纤的激光发射器 (400.3)。所述PBLI装置使用将激光束耦合到单模光纤 (523.2) 中的单模探测光束激光 (523.15)。耦合到光纤中的光束被传递到光纤尖端 (403.3), 所述光纤尖端被安装在上述的光纤尖端x-y定位器模块 (403.4) 内。PBLI光束成形系统 (523.1) 在材料表面处提供所述光纤尖端的大小可缩放的图像, 从而导致在制造材料处形成探测光束焦斑。探测光束焦斑大小可以例如与幅值相似或小于处理光束焦斑。PBLI装置 (500.1) 中的光纤尖端定位器模块 (403.4) 被用于: (a) 以相对于处理光束焦斑的预设偏移距离沿着处理光束轨迹 (沿着处理轮廓LAM构建零件) 使探测光束焦斑居中; 和 (b) 在图13所示的正交于轨迹线方向 (501.1) 的方向上快速地 (几kHz的速度) 扫描探测光束焦斑。处理光束和探测光束的焦斑之间的偏移距离将由图14和图8所示的粉末床传感器的控制器 (620) 来设置。类似于所描述的图7中的基于光纤的激光发射器 (FBLT) 模块, PBLI装置 (500.1) 可以包括用于使用透镜z-定位模块 (403.16) 来控制探测光束焦斑的大小的额外能力。焦斑扫描也可以使用在图14和图7两者中也示出并且在上文描述的透镜x/y定位模块 (523.13) 来执行。

[0095] 图14中的材料传感模块包括光学接收器 (500.2), 所述光学接收器由例如透镜的接收器光学部件 (523.1) 和光检测器 (523.7) 组成。测量在接收器光学部件进入孔径内的背向散射光 (500.12) 的功率和其他特性的光学接收器 (500.2) 在此被称为桶中功率 (power-in-the-bucket; PIB) 光学接收器。可用于粉末床传感模块中的另一光学接收器类型在此被称为散斑成像接收器 (SIR)。在散斑成像型光学接收器中, 使用成像光阵列, 而不是光检测器 (523.7)。SIR型装置的接收器光学部件 (523.1) 被设计成在材料表面与接收器光学部件 (523.1) 的进入孔径之间的选定距离 L_{sp} 处提供背向散射散斑场的缩放图像。请注意, 在以处理光束波长操作的熔池传感器 (MPS) 的情况下, 不需要探测光束激光照明器。这些MPS装置的光学接收器 (PIB或SIR或两者) 使用处理光束的背向散射光, 如在图13中由熔池PIB (500.6) 和散斑成像 (500.13) 接收器所示。为了更好的信噪比, 光学接收器 (500.2) 可以包括调谐到探测光束激光照明器的光学波长的带通滤波器 (未示出)。

[0096] 在此公开并且在图15中图示的探测光束激光收发器 (PBLT) 传感器 (520.3) 组合探测光束激光照明器与桶中功率接收器的功能。PBLT传感器 (520.3) 是基于多芯光纤 (MCF), 而不是常规单芯光纤, 如在图14中的探测光束激光照明器 (500.1) 中。MCF具有中心纤芯和一个或几个外周纤芯。渐缩多芯光纤连接器 (523.10) 导引来自被称为接收光纤 (523.3) 的各个光纤的每个纤芯的光。探测激光束耦合到MCF的中心芯中, 并且在通过PBLT光束成形光学系统 (523.1) 之后在材料表面上形成探测光束焦斑。散射离开材料表面的光向后传播到PBLT传感器孔径。背向散射光的一部分耦合到MCF外周芯中, 并且经由渐缩多芯光纤连接器 (523.10) 和接收的光纤 (523.3) 传递到光检测器 (5.23.7)。组合由光检测器记录的光电流, 并且将对应信号 (500.0) 传递到MOPA系统 (600) 的光束整形控制器 (618) 和/或传感数据收集与分析模块 (530)。MOPA系统 (600) 还可以向粉末床传感模块 (500) 提供一个或多个控制信号 (520.0)。

[0097] LAM过程表征的方法和基于材料传感的控制

[0098] 在所公开的材料传感方法中,探测光束和处理光束的焦斑以两者之间具有恒定偏移距离的方式一起前进。这允许在整个制造过程中的粉末颗粒、熔池和处理后轨迹的实时表征。

[0099] 对从用作粉末颗粒传感器 (PPS) 的PBLT传感器 (520.3) 接收的信号的分析提供关于直接在处理光束前面的原料性质 (例如粉末颗粒吸收性、大小分布和填充密度) 的原位信息。

[0100] 类似地,对由用作处理后轨迹传感器 (PTS) 的PBLT传感器 (520.3) 记录的信号的分析能够用于表征后加工区。

[0101] 类似地,对由用作熔池传感器 (MPS) 的PBLT传感器 (520.3) 记录的信号的分析能够用于表征熔池区。请注意,MPS装置可以用不同于处理光束的波长来操作。PBLT传感器的输出信号能够用于主光束的前馈控制。

[0102] 在此公开的材料传感方法中,PBLT传感器 (520.3) 可以作为共聚焦显微镜而操作,并且提供在处理光束前面、内和后面的沿着处理轨迹在材料表面上的小区域的实况流成像。在共焦成像操作体系中,探测光束焦斑在正交于处理零件反方向的方向上进行连续扫描,如图13所示。在扫描速度明显超过处理光束速度的情况下,PBLT能够记录相对于处理光束在前面、内、后面或其任何组合情况下的材料表面的线扫描图像的连续流。

[0103] 使用所公开方法的LAM过程表征和自适应光束整形可以基于对背向散射探测光的统计特性的分析。散射离开材料表面的探测光束光的统计特性取决于被照明粉末颗粒的微结构和粗糙度,取决于熔池表面性质,并且取决于处理后轨迹的金属表面的特性。如通过材料传感器测量的这些背向散射光特性可用于LAM过程表征和自适应光束整形。

[0104] 本文中公开一种使用对散射离开材料的探测激光束的分析来原位表征在LAM过程期间固结成金属轨迹的材料的方法。所公开的传感方法也可以用于LAM过程参数最优化和前馈控制。在用于处理后轨迹特性化的这种方法中,球化缺陷在固结金属中的出现是由接收的信号中出现相对低的频率和深波动来指示,而未完全熔融的烧结粉末颗粒的数目和/或材料孔隙率的增加可经由接收的信号平均值的整体减小看出。从材料传感器接收的这一数据能够用于在制造过程期间的LAM参数的前馈和反馈控制与最优化。

[0105] 本文中公开一种利用所描述的材料传感器实现粉末床金属SLM期间的熔池表征的方法。在理想(所要)LAM处理条件下,熔池在空间上均匀(不含有断开球),占据组合式多光束足迹内的最大可能(对于固定总激光功率)面积,并且不具有蒸发流和溅落。针对这些理想条件,背向散射探测激光的功率的最大部分将从充当镜表面的熔池反射。对于相对于正交于材料表面的轴线稍微倾斜的探测光束,从熔池反射的光未击中PIB类型光学接收器,从而产生低PIB度量值。不管造成原因(流体流、球化效应、溅落等)如何,在这种“完美”熔池内出现不均匀性将导致镜反射背向散射光分量和散射离开这些不均匀性的广角光减少。这种情况反过来将导致所记录的PIB信号的对应增大。类似地,如果熔池过小和/或材料表面上的光束足迹覆盖相当大部分的未固结成金属粉末或烧结颗粒,则散射离开这些颗粒的光将导致较大的PIB度量信号值。

[0106] 这些基于物理学的考虑建议,下文所描述的利用光束整形参数的反馈控制来实现所记录的PIB度量信号的最小化可导致光滑的大小最优熔池且因此高质量LAM产生零件的形成。请注意,由于冶金过程对激光束强度分布的控制系统诱发的变化的有限响应时间,自

适应光束整形可以基于时间平均PIB度量信号的最小化。

[0107] 基于PIB度量最小化在所描述的自适应光束整形过程期间形成的熔池可以固结成从高质量零件制造的视点看并非最优或甚至不可接受的形状。能够另外强加对控制参数的特定约束以将熔池保持在所要形状(例如,沿着处理方向伸长的矩形)内。这些约束可以包括对控制参数与预选择值的可能偏差的限制。因此,监测熔池传感器的PIB信号提供在此所公开的用于经由多光束强度分布的前馈和/或反馈控制的原位熔池表征和实时LAM过程最优化的方法。

[0108] 用于时空光束整形的AMBFA-LAM能力和方法

[0109] AMBFA-LAM装置(300)的用于控制材料表面处的激光功率时空分布的能力-也被称为光束整形-可以包括:

[0110] (a) 使用图8中的MOPA系统的光束功率控制器(612)来控制投影到动力珠表面或其他制造点的光束功率 $\{p_j\}$,其中 $j=1, \dots, N$ 并且 N 是由光纤阵列激光头(400)发射的光束的数目,所述光束功率控制器被配置成接收来自功率传感器的信号(403.19)和/或来自光束整形控制器(618)的信号(619.3);

[0111] (b) 使用图7中的基于光纤的激光发射器(400.3)装置的光纤尖端 x/y 定位器(403.4)和/或透镜 x/y 定位器(403.13)模块和MOPA系统的光束整形控制器(618)来控制焦斑足迹(100.9)的质心坐标 $\{r_j\}$,其中 r_j 是描述材料表面处的第 j 个焦斑质心位置的2D向量;

[0112] (c) 使用集成到基于光纤的激光发射器(400.3)中的透镜 z 定位器(403.16)模块来控制焦斑(100.9)的半径 $\{a_j\}$;

[0113] (d) 使用基于光纤的激光发射器(400.3)装置的光纤尖端 x/y 定位器(403.4)和/或透镜 x/y 定位器(403.13)模块和MOPA系统的光束整形控制器(618)来控制焦斑的调向参数,包括调向幅度 $\{s_j\}$ 、角方向向量 $\{\theta_j\}$ 和频率 $\{\omega_j\}$;

[0114] (e) 使用偏振调整器(609)、来自偏振传感器(403.11)的信号和MOPA系统(600)的偏振控制器(610)来控制处理光束的偏振状态,例如控制线性偏振光束的角向量 $\{m_j\}$;和

[0115] (f) 使用MOPA系统(600)的活塞相控制器(615)、度量信号(614.1)和/或来自光检测器(916)的信号和移相器(607)来控制所发射光束的活塞相。

[0116] 为了简化记法,用于光束整形的所述组控制参数在此表示为 $\{u_m\}$,其中 $m=1, \dots, M$,并且 M 是用于特定光束整形任务的控制项的总数。请注意,视AMBFA-LAM装置(300)配置和光束整形需求而定,控制能力可以包括全部[(a)到(e)]的上述选项,或受选项的选中集合限制。

[0117] 在图16中图示了AMBFA-LAM装置(300)的公开的光束整形方法。所述方法包括但不限于:

[0118] A. 与全部或几个多光束重叠的非相干组合,所述非相干组合可通过控制处理光束焦斑质心 $\{r_j\}$ 来达成。这种光束整形方法是由图16中的图式(700.1)图示;

[0119] B. 引起焦斑大小减小和工件处的功率密度的对应增大的多光束相控(也被称为相干组合)。分析已示出,AMBFA-LAM激光源的 N 个光束的相控可导致材料表面处的焦斑峰值强度的近似 N 倍增大[22]。图16中的图式(700.1)和(700.2)图示七个光束的也被称为非相控(700.1)的非相干和也被称为相控(700.2)的相干组合情况下的在材料表面处的处理光束焦斑。请注意,多光束相控导致与处理光束中心波瓣相距一距离定位的旁瓣的出现,如图式

(700.2)所示。位于熔池外的旁瓣能够起到探测光束的作用,所述探测光束可用作用于材料传感的探测光束。光束的相干组合可使用相位传感器(403.12)的输出信号(403.13)来实现,所述相位传感器可以集成到如图7所示的光纤阵列激光头(400)的基于光纤的发射器模块(400.3)中,或可以沿着所发射激光束(403.0)的光学系列定位,或两种情况。相位传感器(403.12)的输出信号由度量处理器(614)使用,所述度量处理器计算表征活塞相与所要锁相条件值的偏差的度量信号(614.1)。使用所述度量信号,锁相控制器(615.3)计算施加到图8中所示的MOPA系统(600)的移相器(607)的控制信号(617)。所述控制信号是经由使用一个或另一活塞相控制算法将度量信号(614.1)和来自光检测器(916)的起到度量信号作用的信号(917)最优化而产生,所述算法例如随机并行梯度下降(SPGD)[27,28]、多抖动[29]或LOCSET[30]。在[31]中描述了可以用于MOPA系统(600)中的示例性活塞相传感技术和多光束相控控制算法。多光束相控可以用于对部件的轮廓的高分辨率LAM处理,以改善表面光洁度;

[0120] C. 对多光束活塞相的可控随机化导致组合式焦斑内的改善的激光功率空间均匀性。处理多光束焦斑(非相干组合)在材料表面处的重叠可以导致由干扰效应造成的强度的随机空间与时间变化。在所公开的多光束相位随机化方法中,多光束LAM处理的这些寄生干扰效应可使用由光纤阵列激光头(400)发射的光束(403.0)的活塞相的快速(MHz到GHz速率)随机化来减轻。使用图8中所示的MOPA系统的相位随机化控制器(615.1)来执行活塞相随机化,活塞相随机化产生随机活塞相的快速更新序列。活塞相随机化导致干扰效应减轻和工件上的激光能量沉积的空间均匀性的对应改善。具有活塞相随机化操作体系的这种AMBFA-LAM系统将由图16中的图式(700.3)图示。使用多光束的活塞相的随机化的光束整形可降低冷却和加热速率,并且改善LAM生产零件或部件的质量;

[0121] D. 使用阶梯模式光束扫描技术来控制表面材料处的激光功率密度的空间分布。通过对阶梯模式操作体系中的活塞相的同步控制,能够在高(几十MHz)速度下扫描相干组合的光束的焦斑[32]。所公开的用于LAM的阶梯模式光束整形方法可使用MOPA系统(600)的阶梯模式光束调向控制器(615.2)来实现。在LAM应用中,阶梯模式电子光束扫描可例如用于产生几乎均匀的强度分布的扩大正方形焦斑。用图16中的图(700.4)来图示使用2D阶梯模式光束扫描的这种光束整形方法。阶梯模式光束整形可以用于控制导致微结构和材料机械性质修改的加热和冷却速率,改善增材制造产品的表面光洁度;

[0122] E. 叠加用于材料熔融的高度局部化光束与用于表面处理的宽光束,所述叠加使用所公开的提供相干与非相干光束组合操作体系之间的快速(>100kHz)切换的时间复用光束整形方法。时间复用导致对应于非相干和相干光束组合的焦斑的快速振荡。在对于LAM冶金转化典型的时间尺度下,激光束强度分布的这种时间复用与使用两个具有不同焦斑直径的光束的同时激光能量沉积产生相同的结果。相干组合式(较小直径)光束(701.2)能够用于形成熔池形成,而第二(较大直径)光束(701.1)能够用于粉末颗粒预热和用于熔池固结成金属的缓慢冷却过程。通过控制相干和非相干光束组合的持续时间,任何所要的激光功率比能够分布在处理(熔融)光束与在熔池附近的用于表面处理的光束功率之间。这种光束整形方法将由图16中的图式(700.5)来图示。时间复用激光功率沉积光束整形方法还能够应用于其他时空多光束控制操作体系。图16中的图(700.6)图示经由一个或多个重叠光束的垂直线扫描与其他光束的阶梯模式2D扫描之间的时间复用所获得的强度分布。

[0123] F. 具有粉末颗粒的同时预热和固结成金属材料的退火的粉末材料熔融能够通过所公开的光束整形方法来实现,所述光束整形方法控制多光束焦斑质心坐标 $\{r_j\}$ 和/或半径 $\{a_j\}$, 和/或调向功率 $\{p_j\}$, 和/或光束调向参数 $\{s_j\}$ 、 $\{\theta_j\}$ 和 $\{\omega_j\}$ 。图16中的图(700.7)、(700.8)和(700.9)给出这种光束整形方法的实例,包括:(a)用于预热和冷却速率控制的多个三角形光束(700.7);(b)用于较快LAM处理和生产率增加和用于控制冷却和加热速率的多个成线的光束(700.8);(c)由图式(700.9)和(701)图示的斜坡形状强度分布。这种形状的光束能够使用所公开的各种光束整形技术而获得,例如通过扫描部分重叠的多个光束。在斜坡形状光束中,逐渐的强度增加用于预热,高均匀功率密度用于熔融,而逐渐的强度减小用于熔池冷却。

[0124] 所公开的引起具有粉末颗粒的同时预热和/或固结成金属材料的退火的粉末材料熔融的光束整形方法可用于控制材料微结构,并且能够用于具有空间变化的材料微结构和机械性质的LAM产生的部件的工程化。在图17中图示了在利用使用所公开的光束整形方法的粉末材料的SLM处理来控制底板(800.3)上的IN718合金的伽玛晶粒的生长时的明显差异的实验证据。利用扫描电子显微镜获得的电子背散射衍射(electron backscatter diffraction;EBSD)反极图(inverse pole figure;IPF)图(800)示出两个样本中的截然不同的柱状微结构,一个样本(800.1)使用常规SLM方法进行处理,而第二样本(800.2)使用利用七个正方形的光束的光束整形。与IPF图(800.1)中的沉积在IN718底板(800.3)上的材料(800.4)的极大伽玛型晶粒结构相比,注意IPF图(800.2)中的小等轴晶粒。

[0125] 图17中的结果是使用所公开的AMBFA-LAM装置(300)的示例性原型作为激光源而获得。

[0126] 所描述的光束整形方法的减少数目可使用图8中的MOPA系统(600)的简化选项来实现。通过图18来图示这个被称为非相干MOPA(IMOPA)系统(900)。IMOPA利用包含光纤耦合激光(901)或具有具额外光纤放大器(611)的光纤激光的独立光纤通道。对所发射的多光束功率的控制可通过将功率控制信号(902)施加到光纤耦合激光或光纤放大器来执行。图18中的IMOPA系统的光束整形控制器(活塞相和偏振控制器除外)与图8中的MOPA系统的所描述控制器相同。

[0127] 用于LAM的多光束激光功率分布的时空控制的算法

[0128] 本文中公开针对使用AMBFA-LAM系统(300)的多光束激光功率分布的时空控制可应用的示例性控制算法。在AMBFA-LAM激光源产生N个相互非相干高斯光束的情况下,组合式光束在材料表面处的时空强度分布能够通过表1中所示的函数来描述,所述函数取决于上述的3N个控制参数($\{r_j\}$ 、 $\{p_j\}$ 和 $\{a_j\}$)。

[0129]

$$I(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=1}^N p_j(t) \exp \left[-|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j(t)|^2 / a_j^2(t) \right].$$

[0130] 表1:时空强度分布函数

[0131] 考虑以下在此公开的光束整形方法:

[0132] 使用误差度量最小化的可编程光束整形。可编程控制可用于计算提供所要(参考)

强度分布 $I_{\text{ref}}(\mathbf{r})$ 的最优近似的多光束参数 $\{r_j\}$ 、 $\{p_j\}$ 和 $\{a_j\}$ 。这种参考强度分布可使用分析和/或基于物理学的考虑来选择。在所公开的可编程光束整形算法中,能够经由表2的误差度量的最小化来获得最优控制参数和参考强度部分的最佳近似,其中积分是针对材料表面平面执行。表2的误差度量的最小化可以在一组基于物理学的条件和针对冶金过程的约束条件下执行,所述条件例如处理体积内的温度梯度的可接受范围、熔融特定大小的粉末颗粒所需的功率密度水平、组合式光束栅格化速度等。

[0133]

$$J(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N, p_1, \dots, p_N, a_1, \dots, a_N) = \iint [I(\mathbf{r}) - I_{\text{ref}}(\mathbf{r})]^2 d^2\mathbf{r}$$

[0134] 表2:用于使用光束整形控制参数的参考强度分布的最优近似的计算的误差度量

[0135] 在所公开的算法中,可编程光束整形是基于随机并行梯度下降 (SPGD) 最优化 [27, 27]。为了简化记法,将控制参数 $\{r_j\} = \{x_j, y_j\}$ 、 $\{a_j\}$ 和 $\{p_j\}$ ($j=1, \dots, N$) 表示为 $\{u_m\}$ ($m=1, \dots, 4N$), 其中 $u_j = x_j$, $u_{j+N} = y_j$, $u_{j+2N} = a_j$ 并且 $u_{j+3N} = p_j$ 。使用这种记法,焦平面强度分布是 $4N$ 个控制参数的函数 $I(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r}; u_1, \dots, u_{4N})$ 。经由表2的SPGD误差度量最小化的迭代过程来定义这些参数的最优值,其中 $u_m^{(n)}$ 、 $\gamma^{(n)} = \gamma(J^{(n)})$ 、 $\delta J^{(n)}$ 和 N_{SPGD} 分别是控制项、增益因数、第 n 次迭代时的误差度量变化和SPGD迭代的数目。表3中的误差度量变化 $\delta J^{(n)}$ 由控制参数 $\{u_m^{(n)}\}$ 的小幅度随机扰动 $\{\delta u_m^{(n)}\} = \alpha^{(n)} \{\zeta_m^{(n)}\}$ 产生,其中 $\{\zeta_m^{(n)}\}$ 是在区间 $[-1, 1]$ 内具有均匀机率分布的随机数,并且 $\alpha^{(n)} = \alpha(J^{(n)}) \ll 1$ 是扰动幅度。为了将迭代过程收敛加速,能够使用参考 [33] 中所描述的SPGD控制算法版本,但增益和扰动幅度将作出自适应改变。在表3的等式中的参数被恰当选择的情况下,SPGD迭代产生误差度量最小化和所要(参考)强度分布 $I_{\text{ref}}(\mathbf{r})$ 的对应最优近似。

[0136]

$$u_m^{(n+1)} = u_m^{(n)} + \gamma^{(n)} \delta J^{(n)} \delta u_m^{(n)}, m = 1, \dots, 4N_{\text{SPGD}},$$

[0137] 表3:用于控制参数更新的SPGD迭代算法

[0138] 自适应光束整形控制系统。可编程光束整形的主要潜在问题中的一个可编程光束整形需要准确地知道激光系统和SLM过程参数并且在时间上固定。在实际LAM条件下,原料特性、所发射光束的形状和功率、光束指向中的误差等中始终存在不确定性和变异。图8中的光束整形控制 (618) 包括本文中所公开的前馈 (618.1A)、反馈 (618.1B) 和可编程 (618C) 控制系统,能够经由实时自适应光束整形参数调整来解决这些不确定性。在图8、图18和图19中图示了利用AMBFA-LAM装置 (300) 的多光束控制能力(例如,如上文参考图16所描述的A到F)的自适应光束整形系统的示意图。

[0139] 在图19中的自适应光束整形系统 (914) 中,分束器 (910.1) 将一小部分的处理激光束 (402.0) 功率改向到例如透镜的光学图像成形系统 (911),所述光学图像成形系统在光阵列 (913) 处形成激光束焦斑 (100.7) 强度分布的缩放拷贝,被称为焦斑 (912) 的共轭像。所述

光阵列在以具有时间间隔 Δt 的时间序列 $\{t_n\}$, ($n=1, \dots$) 捕捉强度的共轭像 $\alpha I(\beta r, t_n)$ 。捕捉到的图像 $\alpha I(\beta r, t_n)$ 表示在材料表面处的强度分布 $I(r, t_n)$ 的缩放拷贝, 其中 α 和 β 是预定义并且已知的缩放因子。捕捉到的图像 $\{\alpha I(\beta r, t_n)\}$ 经过数字化, 并且将对应信号 (918) 发送到 MOPA 系统 (600) 的光束整形控制器 (618)。使用包括捕捉到的图像 $\{\alpha I(\beta r, t_n)\}$ 、缩放因子 α 和 β 和所要 (参考) 强度分布函数 $I_{ref}(r)$ 的可用数据, 光束整形控制器 (618) 计算表 2 的误差度量。同一控制器 (618) 反复地更新所述光束整形控制参数, 例如 $\{r_j\} = \{x_j, y_j\}$ 、 $\{a_j\}$ 和 $\{p_j\}$ ($j=1, \dots, N$), 以将表 2 的误差度量减到最小。光束整形控制参数更新是使用一个或另一最优化算法、例如表 3 的 SPGD 最优化算法来执行。

[0140] 图 19 中的由分束器 (910.1)、具针孔的掩模 (915) 和光检测器 (916) 组成的额外传感模块可用于上述的光束整形方法 (例如, 如上文参考图 16 所描述的 B 到 E) 的实际执行: 多光束相控 (B); 多光束活塞相的可控随机化 (C); 使用阶梯模式光束扫描技术的空间分布控制 (D); 被称为时间复用光束整形方法的相干与非相干光束组合操作体系之间的切换 (E)。为了实现这些光束整形方法, 将来自光检测器的信号 (917) 发送到 MOPA 系统 (600) 的活塞相控制器 (615)。使用例如 SPGD 的锁相算法将这个信号最大化可导致由光纤阵列激光头 (400) 发射的光束在光检测器 (916) 处且因此在粉末床表面 (100.8) 或其他材料表面处的相控 (相干组合)。同一信号 (917) 能够用于在额外阶梯模式光束调向信号施加到移相器 (607) 的情况下维持材料表面处的多个光束的相干组合。时间复用控制器 (616) 提供相干组合、非相干组合与活塞相的可控随机化之间的切换, 从而实现上述的光束整形方法 (例如, B 到 E)。

[0141] 额外的光束整形机会包括上文所描述的利用来自材料传感模块 (500) 的信号 (500.0)。

[0142] 示例性系统和方法

[0143] 在下文讨论本文中所公开的 AMBFA-LAM (300) 硬件和系统的一些而非全部创新和特征。

[0144] AMBFA-LAM 系统架构, 其提供对用于 LAM 的材料表面处的多光束激光功率时空分布 (在本文中被称作光束整形) 的可编程、前馈和反馈控制的能力。

[0145] 透镜定位器模块, 其允许控制材料处的焦斑的宽度。

[0146] 基于光纤的激光发射器模块, 其具有用于所发射激光束焦斑的每个或几个或全部以下参数的电子控制的集成能力: 宽度、质心位置 (指向坐标)、调向频率、角度和幅度。对这些多光束特性的控制提供可以用于在 LAM 处理期间的金属材料处的激光功率分布的自适应时空控制 (整形) 的能力。

[0147] 基于光纤的激光收发器模块, 其具有用于所发射激光束焦斑的每个或几个或全部参数的电子控制的集成能力, 和用于同时传感所发射激光束的每个或几个或全部以下参数的额外能力: 功率、活塞相和偏振。

[0148] 基于探测激光与桶中功率 (PIB) 接收器的材料传感器, 在此被称为 PL-PIB 传感器, 所述传感器用于以下各项的原位表征: (a) 在 LAM 处理光束前面的粉末材料 (粉末材料 PL-PIB 传感器); (b) 在 LAM 加工区内的熔池 (熔池 PL-PIB 传感器); 和 (c) 固结成金属 LAM 处理后轨迹 (处理后轨迹 PL-PIB 传感器)。

[0149] 基于探测光束激光收发器的材料传感器, 在此被称为 PBLT 传感器, 所述传感器组合探测光束激光照明器和桶中功率接收器的功能。

[0150] 上述AMBFA-LAM(300)系统允许多种新颖的方法和过程,所述方法和过程包括:

[0151] 基于具有激光功率分布的时空控制的自适应光纤阵列激光技术的用于金属中的多光束选择性激光熔化(SLM)方法。

[0152] 用于关于AMBFA-LAM的远程SLM的虚拟透镜。

[0153] 用于控制SLM的多光束功率分布的方法,包括:(a)可编程控制、(b)前馈控制和(c)反馈(自适应)控制。

[0154] 基于对将用于多光束参数和时空强度分布的前馈和反馈控制的探测和/或处理激光束的分析的用于LAM的原位传感的方法,包括:(a)用于传感在LAM处理光束前面的粉末材料的方法;(b)用于传感在处理光束之后在热影响区中的固结成金属粉末材料的方法;和(c)用于熔池传感的方法。

[0155] 基于作为共聚焦显微镜操作的PBLT传感器的材料传感方法,所述PBLT传感器提供在处理光束前面、内和后面的沿着处理轨迹在材料表面上的小区域的实况流成像。

[0156] 针对金属粉末或其他材料LAM处理的方法包括:

[0157] 利用引起焦斑大小的减小和工件处的激光功率密度的对应增大的多光束相控(也被称为相干组合)的LAM处理-用于LAM构建零件或部件的轮廓的高分辨率处理的有效技术。

[0158] 利用多光束相位的可控随机化的LAM处理,所述随机化导致干扰效应的叠加和LAM的指定加工区内的激光功率空间均匀性的改善。

[0159] 利用相干组合式光束的阶梯模式扫描的LAM处理,所述LAM处理针对用于高分辨率零件轮廓处理的细长(线)光束内和/或用于处理零件的块状材料区域的矩形形状区域内的空间均匀功率分布。

[0160] 利用多光束相控与相位随机化之间的时间复用的LAM处理,所述时间复用用于同时粉末材料预热、熔融和固结成金属材料的处理,以改善LAM产生的零件质量(例如,改善表面光洁度,减小残余应力,降低分层风险,和其他改进)。

[0161] 利用多光束强度图案的LAM处理,所述多光束强度图案能够经由在熔池附近的每个光束的焦斑位置的可控位移或/和周期性振荡来实现对加热和冷却速率和加工速度的增加的最优控制

[0162] 利用由接近材料表面加工区的热气流造成的热诱发相位偏差的自适应补偿的LAM处理,相位偏差可以导致加工区内及其附近的激光功率分布的时空波动,这可能会对沉积材料的表面光洁度有不利影响。

[0163] 广域激光增材制造(WALAM):概念、方法和装置

[0164] 尽管已经讨论了自适应多光束光纤阵列激光增材制造的许多特征、系统和方法,但是许多选项是可能的。所述选项包括以不同配置来布置图5中的光纤发射器(403.3)和粉末床传感模块(500),和执行超出在图16的上下文中所示出并讨论的方法的不同光束整形方法。

[0165] 一个此类多光束光纤阵列激光增材制造选项在本文中被称为广域激光增材制造(WALAM)。WALAM概念包括使用激光电源的增材制造,所述激光电源包含快速振荡激光束的线性阵列,和任选补充的探测光束激光收发器的线性阵列和用于热影响区(HAZ)中的热管理和制造材料传感的激光源。WALAM概念使用上文在AMBFA-LAM的背景下讨论的相同特征和部件中的多个,并且保持所述系统的主要优点。同时,所描述的WALAM手段、方法和装置提供

超出已经公开的手段、方法和装置的优点,所述优点可能是需要高构建速率和金属3D打印部件的改善的3D打印分辨率、精度和机械特性的LAM实现所需要的。在WALAM手段能够有效地实行的实现方式中,所公开的概念、方法和装置能够显著地(数量级地)减少构建时间,改善3D打印分辨率(两倍或更高),增强构建零件的热和机械性质,而完全不会对上文讨论的自适应多光束增材制造的复杂性有明显影响。

[0166] 图20、21示出WALAM金属3D打印系统(1000)的两个正面透视图,所述打印系统使用WALAM激光模块(1001)以用于处理粉末材料。在图22和23中更详细地示出的WALAM激光模块(1001)表示N个(即一个或多个)被称为OBM的振荡光束模块(1002)的线性阵列。图22、23中的OBM的数目对应为20和5。OBM与彼此的中心分开一距离d,并且装配以形成产生N个(即一个或多个)发散(例如高斯形状)激光束(1003)的线性阵列的WALAM激光模块(1001),所述激光束从在OBM(1002)内的传递光纤(1005)的尖端(1004)发射。透镜(1006)的线性阵列将所发射光束(1003)聚焦到粉末床表面(1007)的制造区上,从而产生宽度 w_F 的焦斑(1008)(例如高斯形状斑点)。WALAM激光模块(1001)的每个透镜(1006)的直径 d_{lens} 选择成不超过邻近OBM(1002)的中心之间的距离d,所述距离对应于光纤尖端(1004)之间的距离。透镜焦距F选择成使光纤尖端(1004)按缩放因子 $M=w_F/w_{beam}$ 重新成像到粉末床表面(1007)上,所述缩放因子等于焦斑宽度 w_F 与在光纤尖端(1004)末端处的发射光束的宽度 w_{beam} 的比。WALAM激光模块(1001)经设计和对准以确保全部焦斑(1008)在粉末床表面(1007)处沿着加工线(1009)定位,并且邻近焦斑的中心之间的标称距离是d。在WALAM激光模块(1001)的可能实现方式实例中,上文所提及的参数是: $d=15mm$, $N=20$, $d_{lens}=10mm$, $w_{beam}=10\mu m$, $w_F=100\mu m$ 和 $M=10$ 。

[0167] OBM(1002)的光纤尖端(1004)可以连续振荡,或沿着y轴(1010)按振荡幅度 l_{tip} 和速度 v_{tip} 来回地移动,振荡幅度和速度能够使用在控制器(1012)中产生并施加到OBM(1002)的电子控制信号(1011)来独立地调整或设置到预定义值。光纤尖端的振荡导致激光焦斑(1008)沿着同一y轴(1010)的对应振荡。应容易理解,与光纤尖端振荡幅度和速度相比,焦斑振荡幅度 l_F 和速度 v_F 达到M倍。在WALAM激光模块(1001)的可能实现方式实例中,上文所提及的参数是: $M=10$, $l_{tip}=1.5mm$, $v_{tip}=5m/秒$ 和相应地 $l_F=15mm$, $v_F=50m/秒$ 。

[0168] 在WALAM概念中,激光功率从WALAM激光源(1013)经由传递光纤(1005)单独地传递到每个OBM(1002),并且能够针对每个OBM(1002)单独地控制。

[0169] 在将足够高的激光功率用于粉末材料熔融的情况下,WALAM激光模块(1001)的每个振荡焦斑(1008)形成长度 l_{pool} 的细长或雪茄型熔池(1014),所述长度在当无激光功率时的 w_F 到等于相邻OBM(1002)的透镜(1006)的中心之间的距离d的范围内。在所公开的WALAM方法中,焦斑(1008)的振荡幅度 l_F 或等效的,焦斑振荡角范围(1015)被选择为能够沿着加工线(1009)产生连续熔融轨迹(1016),如图21中所示。熔融轨迹(1016)由多个熔池(1014)组成,所述熔池由邻近振荡焦斑(1008)在粉末床表面(1007)处形成,如图21中所示。视制造部件的几何形状而定,相邻的熔池(1014)可以互连或分离。应当理解,在WALAM制造方法中,各个熔池的长度应通过调制传递到每个OBM的激光功率和/或光纤尖端振荡幅度来控制。

[0170] 参考图20,WALAM激光模块(1001)被安装在沿着x轴(1018)前进的高精度台架系统(1017)上,以便在表面(1007)和冷却后面的材料的固结成金属的已加工区(1019)上形成沿着x轴移动的熔融轨迹(1016)。

[0171] 应当理解,高精度台架系统(1017)可以能够使WALAM激光模块(1001)沿着x轴(1018)和y轴(1010)移动,如制造部件比通过WALAM激光模块(1001)能够产生的熔融轨迹(1016)宽的应用可能需要的。

[0172] 参考图22、23,能够看到,WALAM激光模块(1001)包括多个OBM(1002),每一者经由传递光纤(1005)接收光学功率。如可见的,WALAM激光模块(1001)的模块性允许容易地扩展OBM(1002)的数目,以提供所要长度的加工线(1009)和对应的熔融轨迹(1016)。

[0173] 参考图23,图23示出光纤连接到激光电源(1013)的WALAM激光模块(1001)的图解视图,所述激光电源(1013)能够包含MOPA激光系统(600)或一排光纤激光,或两者的组合。激光电源(1013)被装配成在传递光纤(1005)的尖端(1004)处提供多个单模高斯激光束(例如单模高斯光束),所述传递光纤位于WALAM激光模块(1001)的OBM(1002)内。可能需要激光电源(1013)以用于操作冷却、电功率和光束功率控制器(1020),并且在一些示例性实现方式中可以提供一个或几十个、二十个或更多的激光束,所述激光束经由传递光纤(1005)发送到OBM(1002)。

[0174] 激光电源(1013)与WALAM控制器(1012)电连接,所述WALAM控制包括:光束功率控制器(1020),所述光束功率控制器被配置成控制和/或调制由OBM(1002)激光束(1003)传输的功率;OBM控制器(1021),所述OBM控制器被配置成控制例如振荡频率和/或幅度的振荡参数,并且控制一个或多个OBM(1002)的焦斑(1008)的位置偏移;和目标对象定义数据控制器(1022),所述目标对象定义数据控制器可以由增材制造CAD软件或另一源产生,提供待使用WALAM方法和系统制造的对象参数并且向光束功率控制器(1020)和OBM控制器(1021)供应指令。光束功率控制器(1020)能够可控地改变材料处理频率带宽(例如高达约一kHz或更高)所需的每个激光束(1003)的功率。

[0175] 现在参考图24到26,并且特别集中于图24,图24示出在侧盖被移除的情况下的OBM(1002)的正面透视图,能够理解,形成振荡激光焦斑(1008)的激光束(1003)的振荡运动将通过按周期T重复t次将控制电压施加到压电致动器(1023)来实现,所述压电致动器装配在每个OBM(1002)内。激光束(1003)将经由附接到压电致动器(1023)的传递光纤(1005)传递到OBM(1002),并且通过OBM(1002)的聚焦透镜(1006)将传递光纤的光纤尖端(1004)重新成像到粉末材料表面(1007)上的加工线(1009)。

[0176] 如已经讨论的,WALAM激光模块(1001)由OBM(1002)的线性激光阵列组成,并且能够发射相隔距离d的一组N个高斯形状激光束(1003),所述激光束聚焦在表面(1007)处的粉末材料上。现在参考图25和26,每个示例性OBM(1002)具有快速(例如>1.0kHz速率)激光焦斑(1008)振荡的能力。在零到d范围内的焦斑振荡幅度 l_F 和激光功率均能够在材料处理频率带宽(例如高达约几kHz或更高)所需的振荡循环期间加以控制。

[0177] WALAM激光模块(1001)中的光束的数目可扩展,使得所述激光模块可以含有任何所需数目个OBM(1002)。一些示例性实现方式可以视意图应用而含有一个或更多的OBM(1002),这是因为支持额外OBM的需求以基本上线性地方式增加,这归因于WALAM概念的模块性质。这些示例性OBM(1002)可以被配置用于发射具有不同功率的激光束,其中激光功率的示例性范围在每激光束约50W至1.0kW之间。

[0178] 图25示出具有压电致动器(1023)的OBM(1002)在模拟使用期间的更详细的侧面正视图。OBM(1002)的压电致动器(1023)包含一组两个或更多个压电板(1024),在所述压电板

的两侧上沉积有例如使用一层胶水 (1025) 牢固地附接的电极, 将激光功率从WALAM激光电源 (1013) 转移到光纤尖端 (1004) 的一段激光束传递光纤 (1005), 和附接并保持压电致动器板与传递光纤总成的固定器 (1026)。使用电线 (1027) 将所述压电板连接到WALAM控制器 (1012)。

[0179] 图25中的压电致动器 (1023) 处于中立位置, 因此, 压电板 (1024) 各自成直线, 并且大致附接到压电板 (1024) 的末端的光纤尖端 (1004) 瞄准基本上垂直于粉末床表面 (1007) 的方向。因此, 由聚焦透镜 (1006) 形成的激光焦斑 (1008) 近似地位于由OBM (1002) 的单个振荡焦斑 (1008) 沿着加工线 (1009) 产生的熔池 (1014) 的中点处。

[0180] 图26示出具有压电致动器 (1023) 的OBM (1002) 在模拟使用期间在将控制电压通过WALAM控制器 (1012) 施加到压电板 (1024) 时的另一侧面正视图, 电压施加导致压电致动器 (1023) 沿着其长度相对于固定器 (1026) 弯曲并且导致光纤尖端 (1004) 沿着y轴 (1010) 移位因此, 由聚焦透镜 (1006) 投影的焦斑 (1008) 也远离熔池 (1014) 的中点移位, 所述移位由沿着加工线 (1009) 的OBM (1002) 的单个振荡焦斑 (1008) 产生。因此, 通过向压电致动器提供交变控制电压 (即, 使压电致动器 (1023) 向右弯曲一距离的一个电压, 和使压电致动器 (1023) 向左弯曲一距离的一个电压) 以使光纤尖端 (1004) 位移, 焦斑 (1008) 能够在第一和第二方向上快速且准确地移动, 并且在材料表面 (1007) 上形成雪茄形振荡光束 (1003), 其中足够激光功率能够沿着加工线 (1009) 形成熔池 (1014)。

[0181] 一个示例性压电致动器 (1023) 能够视二态元件设计而定, 在约 ± 100 -150伏特的电信号施加到压电致动器电极 (1027) 的情况下, 在介于约1.0kHz与约2kHz之间的谐振频率下提供介于约1.0mm与约1.5mm之间的光纤尖端 (1004) 的位移 l_{tip} 。OBM (1002) 的聚焦透镜 (1006) 以放大因数M将光纤尖端 (1004) 重新成像, 从而导致焦斑 (1008) 振荡幅度 l_F 增大相同倍数: $l_F = M l_{tip}$ 。当与由压电陶瓷材料制成的压电致动器 (1023) 相比时, 由压电晶体材料制造压电致动器 (1023) 允许在约200%与约300%之间的位移幅度增加。

[0182] 为了在包括光束焦斑运动方向变化的振荡循环期间在粉末床或其他表面 (1007) 处提供均匀的激光功率密度, 三角形控制信号可经由WALAM控制器 (1012) 提供以驱动压电致动器 (1023)。还有可能使用正弦形状控制信号, 但是激光功率在振荡循环应进行连续调整或调制以沿着振荡光束焦斑 (1008) 的加工线 (1009) 提供均匀激光功率密度。

[0183] 现在参考图21、23, 为了用从振荡焦斑 (1008) 产生的互连熔池产生细长的熔融轨迹 (1016), 焦斑 (1008) 振荡幅度 l_F 应等于或超过OBM中心之间的距离d。在热转移和熔池形成和固化的时间尺度上, 使用快速振荡或雪茄型光束的激光功率的沉积对材料热动力具有类似影响。

[0184] 在激光功率足够的情况下, 雪茄形互连光束可形成具有长度 $L_{track} = N_d$ 和宽度 $w_{pool} \approx \kappa w$ 的连续熔融轨迹 (1016), 其中w是焦斑宽度, 并且系数 κ 通常视粉末材料和加工参数而在大约1.2到1.5的范围内。举例来说, 在一个示例性WALAM系统 (1000) 具有二十个相隔距离 $d = 15\text{mm}$ 的OBM (1002) 的情况下, 熔融轨迹 (1016) 长度大致等于 $L_{track} = N_d = 30\text{cm}$ 。

[0185] WALAM激光模块 (1001) 的每个OBM (1002) 具有控制激光功率和单个振荡焦斑 (1008) 的振荡幅度或等效地长度 l_F 的能力。用于示例性WALAM激光功率系统 (1013) 的激光源能够提供在振荡循环期间的所传输功率的调制, 高达约20kHz频率带宽。一个具有适合WALAM激光功率系统 (1013) 的一个或多个特征的示例性激光源是来自IPG Photonics Inc

的YLM-100-1064。

[0186] WALAM工作包络可扩展性、划线和分割

[0187] 对于具有不超过 $L_{\text{track}}=Nd$ 的单一尺寸的LAM制造零件,能够在WALAM激光模块的仅单次扫描期间处理一个粉末层。立即处理极宽区域的粉末材料的这种能力是WALAM方法的一个显著优点。

[0188] 对于较大零件的LAM处理,WALAM激光模块(1001)可以装配在例如高精度台架系统(1017)的具有足够大的工作包络的2D台架系统中。在这种情况下,在每个单次扫描结束时,台架臂可以使WALAM激光模块(1001)正交于扫描方向移位距离 $L_{\text{track}}=Nd$ 以用于处理原料的另一区域。可以重复这一划线过程,直到整层的原料被处理,所述划线过程包括在沿着x轴(1018)的线性扫描期间的粉末材料处理和无激光功率时的沿着y轴(1010)的整个激光模块移位。图27示出具有划分成三个加工区的加工区(1019)的示例性粉末床的自上而下图解视图。如可见的,加工区(1019)的总宽度超过WALAM激光模块(1001)的加工线(1009)的长度。上述的划线过程可导致WALAM激光模块在第一加工区(1028)上沿着x轴(1018)扫描。在到达第一加工区(1028)的末端之后,WALAM激光模块可断电,然后沿着y轴(1010)移位,直到WALAM激光模块与第二加工区(1029)对准。WALAM激光模块可通电,并且可沿着x轴(1018)扫描第二加工区(1029)。可再次对第三加工区(1030)重复这个过程,诸如此类。

[0189] 这个WALAM划线过程可受益于对已知位移的修改和用于常规单光束粉末窗SLM系统的分割算法。从算法观点看,所属领域的技术人员根据本公开将容易了解所述益处和修改。一般的分割算法提供切割网格上的主动点的坐标,对于所述主动点,激光电源将通电。在WALAM系统(1000)使用由WALAM激光模块(1001)产生的振荡光束的线性激光阵列的情况下,切割网格可以在必要时沿着WALAM激光模块扫描方向x轴(1018)定向并重新计算,并且视主动点相对于OBM(1002)的中心的位置而定,将沿着加工线(1009)的主动点分成N个线性子集的阵列。每个主动点线性子集因而可以通过单个振荡激光焦斑(1008)来处理。上述划线过程和分割算法可以由适当配置的WALAM CAD软件包、插件或软件模块来执行。

[0190] WALAM激光功率扩展

[0191] 与相等宽度 w 的常规高斯光束的加工区 $S_{\text{Gauss}} \propto w^2$ 相比,由WALAM激光模块(1001)的每个振荡光束产生的雪茄型光束足迹具有大得多的面积 $S_{\text{cigar}} \propto I_F w$ 。这暗示到振荡光束转化允许激光功率增大到 $\eta = S_{\text{cigar}} / S_{\text{Gauss}} \propto I_F / w$ 倍,却不改变原料处的激光功率密度,或LAM处理空间分辨率。在利用振荡光束的LAM处理的情况下,空间分辨率可以由焦斑大小 w 而不是振荡幅度 I_F 确定。

[0192] 对于具有二十个具有最大可用振荡幅度 $I_F = 15\text{mm}$ 和焦斑宽度 $w = 100\mu\text{m}$ 的OBM(1002)的示例性WALAM 3D打印系统(1000),每个光束的激光功率能够相对于利用宽 $100\mu\text{m}$ 的单个高斯形状光束的对应常规粉末床SLM系统增大到 $\eta \propto 150$ 倍数。所属领域的技术人员根据本公开容易了解,WALAM概念提供在不牺牲三维打印空间分辨率的情况下可扩展地增大激光功率的实质可能。

[0193] WALAM OBM产生的温度温度廓线

[0194] 图28A示出功率550W并且宽度 $w = 500\mu\text{m}$ 的单个不振荡高斯形状焦斑(1031)的在制造区(1007)的表面处的模拟激光功率密度分布,而图28B示出粉末床表面(1007)处的对应

温度分布(1032)。图28C示出功率与不振荡高斯形状焦斑(1031)相同并且焦斑宽度为 $w=250\mu\text{m}$ 的振荡高斯形状焦斑(1033)的模拟功率密度分布,而图28D示出对应的温度分布。两种光束正以 1.0m/秒 速度沿着x轴(1018)或从左到右移动,并且图28C中的焦斑的振荡是沿着y轴(1010)执行。所述模拟是针对块体Ti-6Al-4V材料执行。图28B和28D中的熔池由实心黑色区域示出。

[0195] 参考图28,能够看到,振荡高斯形状焦斑(1033)具有沿着振荡方向或沿着y轴(1010)基本上均匀的功率密度分布。与由常规不振荡高斯焦斑(1031)产生的温度分布(1032)相比,振荡焦斑(1033)产生更均匀的温度分布(1034),这能够防止粉末材料过热和蒸发,同时还减少烧结和部分熔融区域。这些模拟指示,使用振荡光束(1033)的LAM中的激光能量沉积能够提供改善的三维打印空间分辨率和表面质量,同时还减小构建零件中的机械应力和孔隙率。

[0196] WALAM构建速率估计

[0197] WALAM系统(1000)的一个显著优点是有可能极大地提高增材制造构建速率。为了说明这个优点,将提供利用具有类似激光功率和处理材料的WALAM系统(1000)和常规粉末床SLM系统达成的示例性构建速率之间的比较。

[0198] 对于常规系统,假设粉末床SLM系统以宽度 w 的单个高斯形状焦斑、激光功率 P 和扫描速度 v_{conv} 操作。为了简单起见,所产生的零件可以是边长为 L 的立方体部件。在常规3D打印机中熔融单个轨迹所需的时间能够估计为 $\tau_{\text{track}}=L/v_{\text{conv}}$ 。处理单个粉末层所需的轨迹的数目是 $N_{\text{track}}=L/w_{\text{track}}$,其中 w_{track} 是熔融轨迹宽度。相应地,处理全部单个粉末层所需的时间是 $T_{\text{layer}}^{\text{conv}}=N_{\text{track}}\tau_{\text{track}}=L^2/(w_{\text{track}}v_{\text{conv}})$ 。使用关系 $w_{\text{track}}\propto\kappa w$,我们得到 $T_{\text{layer}}^{\text{conv}}\propto L^2/(\kappa w v_{\text{conv}})$,以作为立方体部件在常规SLM系统上的构建时间。

[0199] 继续所述实例,现在假设使用由 N 个振荡光束的线性阵列组成的WALAM系统(1000)来制造相同的立方体,所述振荡光束具有与常规系统相同的激光功率消耗和光束特性(即,光束宽度 w 和功率 P)。WALAM激光模块(1001)的OBM(1002)彼此分开距离 $d=L/N$,并且焦斑振荡幅度为 $l_F=d$ 。在WALAM激光模块(1001)沿着x轴(1018)的速度等于 v_{WALAM} 的情况下,单个粉末层处理将在时间 $T_{\text{layer}}^{\text{WALAM}}=L/v_{\text{WALAM}}$ 中完成。如上文所提及,为了保持粉末材料处的平均激光功率密度在两种LAM系统中相等,台架扫描速度 v_{WALAM} 应小于 v_{conv} 一因数 $\eta=S_{\text{cigar}}/S_{\text{Gauss}}\propto d/w$,即 $v_{\text{WALAM}}=v_{\text{conv}}/\eta=v_{\text{conv}}w/d$ 。相应地,对于WALAM系统的单个层处理时间,我们得到立方体部件的估计构建时间: $T_{\text{layer}}^{\text{WALAM}}=Ld/(v_{\text{conv}}w)$ 。

[0200] 构建速率的增益能够通过处理单个粉末层所需的时间的比: $G=T_{\text{layer}}^{\text{conv}}/T_{\text{layer}}^{\text{WALAM}}$ 来估计。利用示例性WALAM系统配置($l_F=d$ 和 $Nd=L$),所述增益将由以下简单表达式给出:

$$[0201] \quad G=T_{\text{layer}}^{\text{conv}}/T_{\text{layer}}^{\text{WALAM}}\propto L/\kappa d=N/\kappa$$

[0202] 应用本文中所公开的原理,此估计表明构建速率随WALAM激光模块(1001)中的OBM(1002)的数目线性地增大。如从物理学观点看,根据本公开,所属领域的技术人员容易了解这个结果:通过使用 N 个光束使总激光功率增大到 N 倍,应当有可能熔融 N 倍的粉末材料,并且相应地,LAM零件制造的生产率可能近似增大到 N 倍。

[0203] 对于具有二十个OBM(1002)的示例性WALAM系统(1000),如图22中所示,当与对应的常规单光束粉末床SLM系统相比时,预期构建速率 $G=N/\kappa$ 为约16倍(假设 $\kappa=1.25$)。

[0204] 初步分析表明,示例性WALAM系统(1000)的激光功率能够在焦斑大小($w=100\mu\text{m}$)不改变的情况下可能从每光束100W增加到1.0kW,这意味处理分辨率不受负面影响,而是和常规系统一样。举例来说,对于常规SLM系统,估计使用1.0kW激光束的处理会需要焦斑大小增大到约400到500 μm 之间,以避免靶材料过热和蒸发。

[0205] 每光束100W到1.0kW的激光功率增加可受益于高精度台架系统(1017)扫描速度的成比例(即10倍)增加:从 $v_{\text{WALAM}}=(w/d)v_{\text{conv}}$ 到 $v_{\text{WALAM}}=(10w/d)v_{\text{conv}}$ 。所得扫描速度仍明显(即,倍数是 $v_{\text{conv}}/v_{\text{WALAM}}=0.1d/w$)低于许多常规粉末床SLM机器的扫描速度 v_{conv} 。作为另外实例,考虑示例性WALAM系统(1000)具有 $P=1.0\text{kW}$ 、光束大小 $w=100\mu\text{m}$ 和激光焦斑振荡幅度 $l_F=d=15\text{mm}$ 。在这种情况下,示例性扫描速度 $v_{\text{WALAM}}=(10w/d)v_{\text{conv}}=v_{\text{conv}}/150$ 在与利用1.0kW光束操作的常规粉末床SLM系统相比时降低到原来的150之一。

[0206] 根据本文中的公开,所属领域的技术人员容易了解,WALAM系统(1000)提供从约25 cm^3 /小时/光束的当前构建速率到约1600 cm^3 /小时的构建速率的显著LAM构建速率增加的可能,却不会很大地影响或甚至改善三维打印分辨率。在包含七个1.0kW级光纤激光的一个示例性实现方式中,单个零件制造的预期构建速率将在约500 cm^3 /小时与约560 cm^3 /小时之间。

[0207] WALAM光束整形和热梯度管理

[0208] 如所提及的,通过允许明显更高的构建速率,示例性WALAM系统(1000)在与对应的常规三维SLM系统相比时仍可以用相当低的扫描速度(倍数是 $\eta \square l_F/w$)操作。举例来说,与在常规单光束kW级粉末床SLM系统中在约2m/秒与约3m/秒之间相比,具有七个1.0kW级光纤激光的WALAM系统(1000)的允许最优材料处理的足够扫描速度可低至在约10cm/秒与约15cm/秒之间。低扫描速度允许明显较低的热梯度,并且因此允许所产生零件中的较小材料应力、孔隙率和开裂。

[0209] 利用低扫描速度的原料处理还在保持WALAM激光模块(1001)的高精度台架系统(1017)的正-反型运动的循环中提供使用粉末颗粒预热的微结构控制的机会。参考图29,图29图示粉末材料预热和熔融的周期循环。上部图(1035)展示随时间变化的WALAM激光模块(1001)沿着扫描方向的位移 δ_x ,而下部图(1036)展示激光功率P的相应变化。

[0210] 一个风险是前后移动高精度台架系统(1017)臂可导致所述臂的振动。这种振动在使用WALAM系统(1000)时可能的相对于低(几cm/秒)的台架运动速度下可能不成问题,WALAM系统(1000)允许台架速度在维持相对高的建筑速率同时大大减小。这一风险也可以通过将光束整形和热管理能力集成到WALAM激光模块(1001)中来解决。

[0211] 一种示例性光束整形和热管理技术是经由加工线(1009)前面的粉末材料预热和熔融轨迹(1016)后面的固结材料的受控冷却的原位温度梯度控制。参考图30,图30示出OBM的三个线性阵列的总成(1037)的正面透视图,所述总成由用于材料熔融的WALAM激光模块(1001)、用于粉末材料预热的OBM的类似线性阵列(1038)和用于在熔融区后面的固结材料的可控热管理的OBM的类似线性阵列(1039)组成。WALAM激光模块(1001)在利用OBM线性阵列的材料处理所需的正常功率输出下仍工作,而定位在WALAM激光模块(1001)前面的OBM的线性阵列(1038)在较低发射功率下工作,使得靶材料在由WALAM激光模块(1001)处理之前

能够更逐渐地被加热。OBM的后加工线性阵列(1039)定位在WALAM激光模块(1001)后面,并且在较低发射功率下操作,使得靶材料固结在使用WALAM激光模块(1001)的材料熔融之后能够减慢。OBM的预热线性阵列(1038)、WALAM激光模块(1001)和OBM的后加工线性阵列(1039)的组合允许材料的可控热管理,以改善AM产生部件的质量。OBM的全部三个线性阵列可以共享同一个WALAM激光电源(1013)。激光功率分裂在OBM的这些线性阵列之间能够使用常规光纤分路器(未示出)来执行。

[0212] 另一示例性光束整形和热管理技术可基于对特殊设计的衍射光学部件元件(DOE)的利用,DOE被直接放置在图23中的OBM(1002)的聚焦透镜(1006)前面或后面。DOE能够设计成将所发射激光束功率的一部分均匀地再分配到以处理激光焦斑(1008)为中心的几mm大小区域中。由DOE再分配的功率可以提供在处理光束前面的粉末材料的所要预热,并且减慢在熔融轨迹后面的材料的冷却速率。

[0213] WALAM原位传感

[0214] 利用WALAM激光模块(1001)的粉末材料处理也提供集成传感器以用于在材料处理期间实时监测临界参数的优点。例如OBM(1002)的WALAM激光模块部件的可扩展和模块化结构允许基于振荡探测激光束的线性阵列来集成传感模块,而不会显著影响WALAM激光模块(1001)的总设计或特征。

[0215] 参考图31,所述图示出设计和特征与WALAM激光模块(1001)类似的具有两个传感器阵列模块(1041)和(1042)的WALAM激光模块(1001)的总成(1040)的底部透视图。第一传感器阵列模块(1041)位于WALAM激光模块(1001)前面,并且用于传感在熔融轨迹(1016)前面的粉末材料。第二传感器阵列模块(1042)位于WALAM激光模块(1001)后面,并且用于传感在熔融轨迹(1016)后面的经处理材料。请注意,WALAM原位传感系统可以仅具有第一或第二或两种传感器阵列模块(1041)和(1042)。

[0216] 参考图32,所述图示例性示出WALAM激光模块(1001)的总成(1043)和被配置成发射N个振荡探测光束(1044)的第二传感器阵列模块(1042),所述振荡探测光束的雪茄形足迹沿着WALAM激光模块(1001)的加工线(1009)互连和定向,如图32中所示。当WALAM激光模块(1001)和传感器阵列模块(1042)均沿着x轴(1018)移动时,探测光束的焦斑在熔融轨迹(1016)后面在已加工材料处沿着y轴(1010)振荡。

[0217] 传感器阵列模块(1042)和/或(1041)可以包含振荡探测光束模块或OPBM(1045),OPBM基本上类似于WALAM激光模块(1001)中所使用的OBM(1002)。OPBM(1045)能够与OBM(1002)一起集成到单个材料处理与探测光束传感模块(1046)中,如图33中所示,或构建为独立模块并且与OBM(1002)一起装配,如图31所示。

[0218] 图33示出组合式材料处理与探测光束传感模块(1046)的一个示例性实现方式的正面透视图。如可见的,组合式模块(1046)类似于OBM(1002),但是含有两组压电致动器(1023),一组压电致动器用于产生用于材料处理的振荡焦斑(1008),而一组压电致动器用于产生探测光束(1047)之振荡焦斑。或者,在OPBM(1045)和OBM(1002)分开的实现方式中,由一个或多个OPBM(1045)组成的传感器阵列模块(1041)和/或(1042)可以在使用之前模块化地添加或从WALAM激光模块(1001)移除。

[0219] 图34示出示例性OPBM(1045)的图解视图。OPBM(1045)作为基于单模光纤和光纤元件的光纤光学部件激光收发器而操作。由光纤耦合激光(1048)产生的激光束经由光纤环行

器(1049)传播,并且发射离开附接到OPBM(1045)的压电致动器(1023)的传递光纤(1005)的光纤尖端(1004)。OPBM(1045)的透镜(1006)在粉末材料(1007)处重新成像所述光纤尖端,从而在加工线(1009)后面或前面形成探测光束焦斑(1047),如图32、34中所示。背向散射光耦合到传递光纤(1005)的同一光纤尖端(1004)中,并且将光纤环行器(1049)重定向到OPBM(1045)的光纤耦合光检测器(1050)。探测光束(1044)的波长可相对于WALAM激光模块(1001)的处理激光束不同以更容易进行光学滤波。从每个OPBM(1045)获得的线扫描数据(1051)可以使用线性扫描图像处理器(1052)以数字方式组合,从而产生在加工线(1009)后面的已加工区(1019)的广域高度放大图像(1053),或在加工线(1009)前面的粉末材料表面(1007)的广域高度放大图像。

[0220] 在所发射激光功率足够的情况下,相同的探测光束(1044)能够提供在熔融线前面的粉末材料预热,并且在熔融区之后减慢冷却速率,如关于图30和本文中公开的其他热管理技术所讨论。利用探测光束(1044)的热梯度管理可使用短激光波长有效地执行,对于短激光波长,最常用的粉末材料的吸收性比在常用的处理 $1.06\mu\text{m}$ 波长下高。波长 $0.53\mu\text{m}$ (绿色)可以是一个示例性选择,这归因于商业光纤激光和光纤元件在这个波长下的可用性。

[0221] 参考书目

[0222] [1]W.E.Frazier,“Metal Additive Manufacturing:A Review”,DOI:10.1007/s11665-014-0958-z,JMEPEG(2014)23:1917-1928

[0223] [2]E.Herderick,Additive Manufacturing of Metals:A Review,Proceedings of MS&T_11,Additive Manufacturing of Metals,Columbus,OH,(2011).

[0224] [3].NIST,“Measurement Science Roadmap for Metal-Based Additive Manufacturing,”US Department of Commerce,National Institute of Standards and Technology,Prepared by Energetics Incorporated,May(2013)

[0225] [4].J.Scott,N.Gupta,C.Weber,S.Newsome,T.Wohlbers,and T.Caffrey,Additive Manufacturing:Status and Opportunities,IDA,Science and Technology Policy Institute,Washington,DC,2012

[0226] [5]W.Sames,F.List,S.Pannala,R.Dehoff,S.Babu,“The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing,”International Materials Reviews,(2016).

[0227] [6]H.Herfurth,“Multi-beam Laser Additive Manufacturing”,CTMA Annual Meeting,Fraunhofer USA&Center for lasers and plasmas in advanced manufacturing,University of Michigan,(2013).

[0228] [7]M.Kraetzsch,J.Standfuss,A.Klotzbach,J.Kaspar,B.Brenner,and E.Beyer,Laser beam welding with high-frequency beam oscillation:welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers,in Lasers in Manufacturing 2011-Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing 12,142-149(2011).

[0229] [9]I.Mingareev and M.Richardson,“Laser Additive Manufacturing:Going Main stream,”Opt.&Photon.News,24-31,Feb(2017).

[0230] [10]C.Korner,A.Bauereiss,E.Attar,“Fundamental Consolidation

Mechanisms During Selective Beam Melting of Powders:Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering,”21(8):085011,(2013) .

[0231] [11]W.King,A.Anderson,R.Ferencz,N.Hodge,C.Kamath,S.Khairallah, Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore NationalLaboratory.Materials Science and Technology 31(8) : 957-968, (2015) .

[0232] [12]C.Boley,S.Khairallah,A.Rubenchik,“Calculation of Laser Absorption by Metal Powders in Additive Manufacturing,”Applied Optics 54(9):2477-2482, (2015) .

[0233] [13]B.Liu,R.Wildman,C.Tuck,I.Ashcroft,R Hague,“Investigation the Effect of Particle Size Distribution on Processing Parameters Optimization in Selective Laser Melting Process,”In Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium,University ofTexas at Austin,Austin.pp 227-238, (2011) .

[0234] [14]A.Spierings,N.Herres,G.Levy,“Influence of the Particle Size Distribution on Surface Quality and Mechanical Properties in AM Steel Parts,” Rapid Prototyping Journal 17(3):195-202, (2011) .

[0235] [15]Y.Lee,M.Nordin,S.Babu,D.Farson,“Influence of Fluid Convection onWeld Pool Formation in Laser Cladding,”Welding Jounal 93(8):292S-300S, (2014)

[0236] [16]Y.Lee,M.Nordin,S.Babu,D.Farson,“Effect of Fluid Convection on Dendrite Arm Spacing in Laser Deposition,”Metallurgical and Materials Transactions B 45(4):1520-1529, (2014) .

[0237] [17]M.Zavala-Arredondo,N.Boone,J.Willmott,D.Childs,P.Ivanov,K.Groom, K.Mumtaz,“Laser Diode Area Melting for High-speed Additive Manufacturing of Metallic Components,”Materials and Design 117,305-315, (2017) .

[0238] [18]S.Hengesbach,R.Poprawe,D.Hoffmann,M.Traub,T.Schwarz,C.Holly, F.Eibl,A.Weisheit,S.Vogt,S.Britten,M.Ungers,U.Thombansen,C.Engelmann, V.Mamuschkin,P.Lott,“Brightness and Average Power as Driver for Advancements in Diode Lasers and their Applications”,Proc.SPIE 9348,High-Power Diode Laser Technology and Applications XIII,93480B, (2015) .

[0239] [19]M.A.Vorontsov,G.Filimonov,V.Ovchinnikov,E.Polnau,S.L Lachinova, T.Weyrauch,and J.Mangano,“Comparative efficiency analysis of fiber-array and conventional beam director systems in volume turbulence,”Appl.Optics,55,N.15, May20,4170-4185 (2016) .

[0240] [20]L.A.Beresnev and M.A.Vorontsov,Compact fiber optic positioner with wide frequency bandwidth,United States Patent Application Publication No.U.S.2012/0224824 A1 (2012) .

[0241] [21]M.A.Vorontsov,T.Weyrauch,L.A.Beresnev,G.W.Carhart,L.Liu,and K.Aschenbach,Adaptive array of phase-locked fiber collimators:Analysis and

- experimental demonstration, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 15, 269–280 (2009).
- [0242] [22] A. Brignon, ed., Coherent Laser Beam Combining (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2013).
- [0243] [23] www.EOSPACE.com
- [0244] [24] T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, J. Mangano, V. Ovchinnikov, D. Bricker, E. Polnau, and A. Rostov, “Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km,” Optics Letters, February 15, V. 41, N. 4, 840–843 (2016).
- [0245] [25] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6430
- [0246] [26] www.scanlab.de
- [0247] [27] M. A. Vorontsov, and V. P. Sivokon, “Stochastic parallel gradient descent technique for high-resolution wavefront phase distortion correction,” JOSA A, Vol. 15, No. 10, 2745–2758 (1998).
- [0248] [28] M. A. Vorontsov, and G. Carhart, “Adaptive wavefront control with asynchronous stochastic parallel gradient descent clusters,” JOSA A, Vol. 23, No. 9, 2613–2622 Sept. (2006).

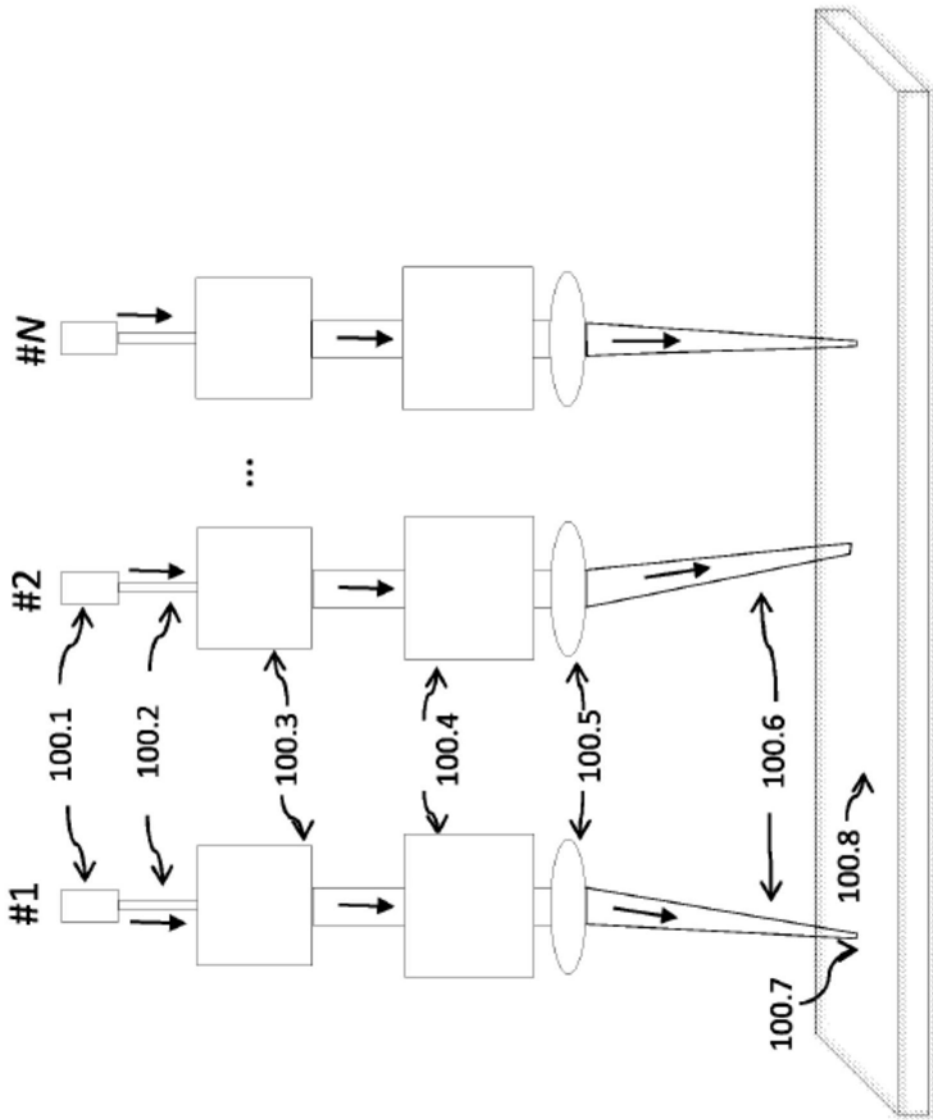


图1

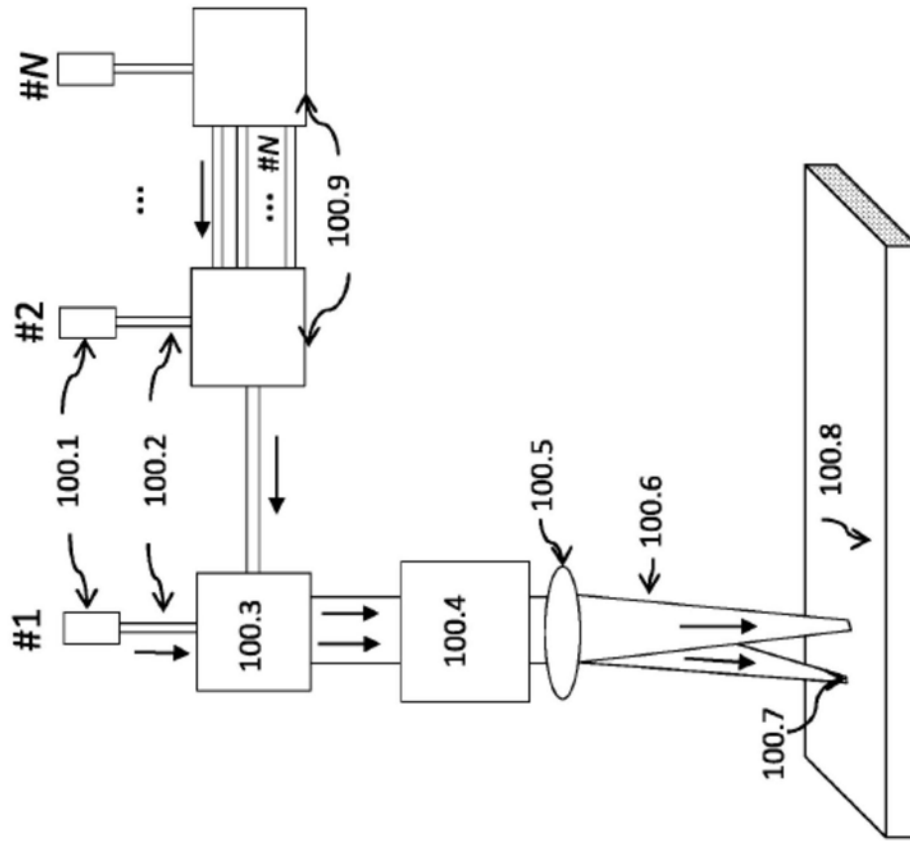


图2

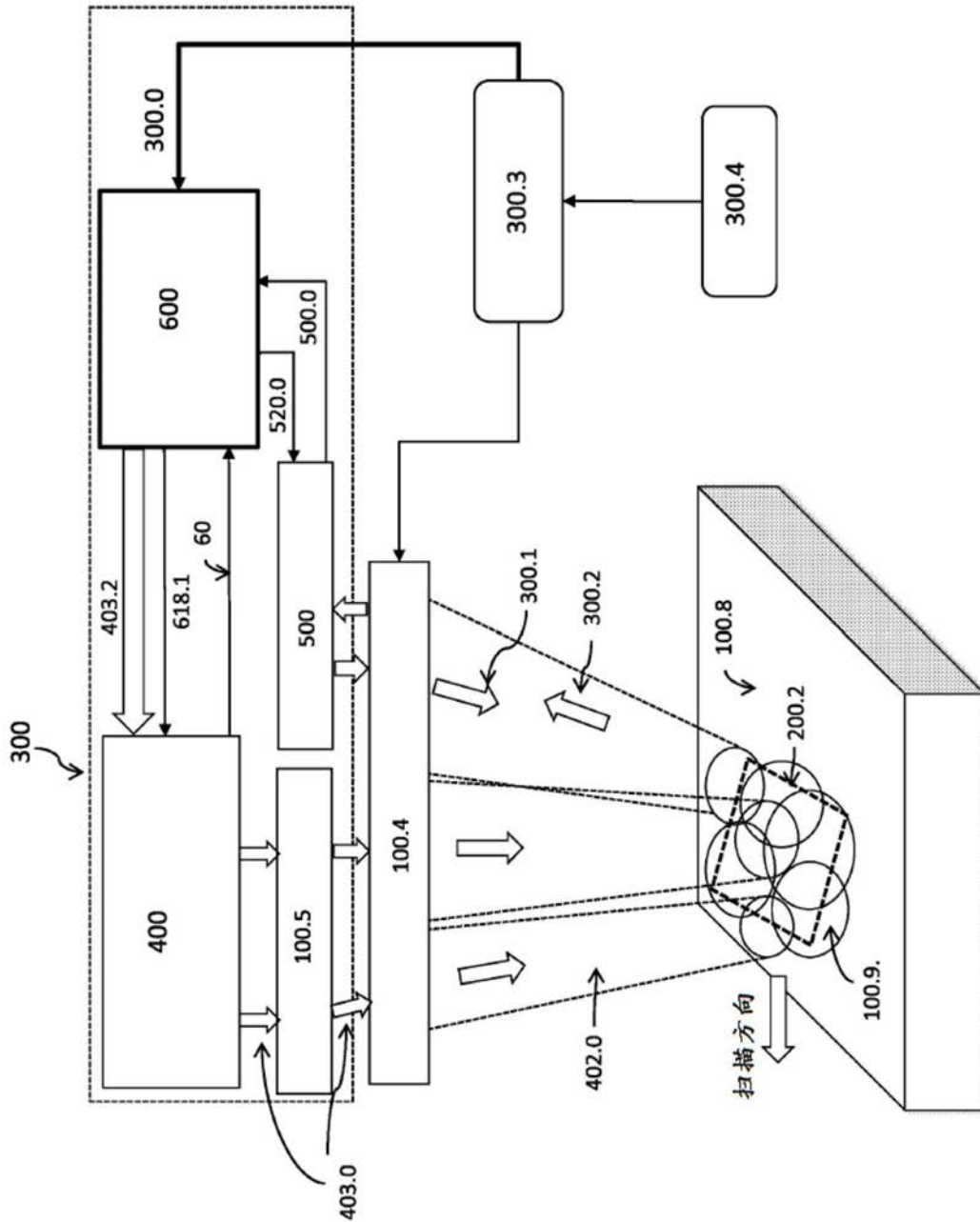


图3

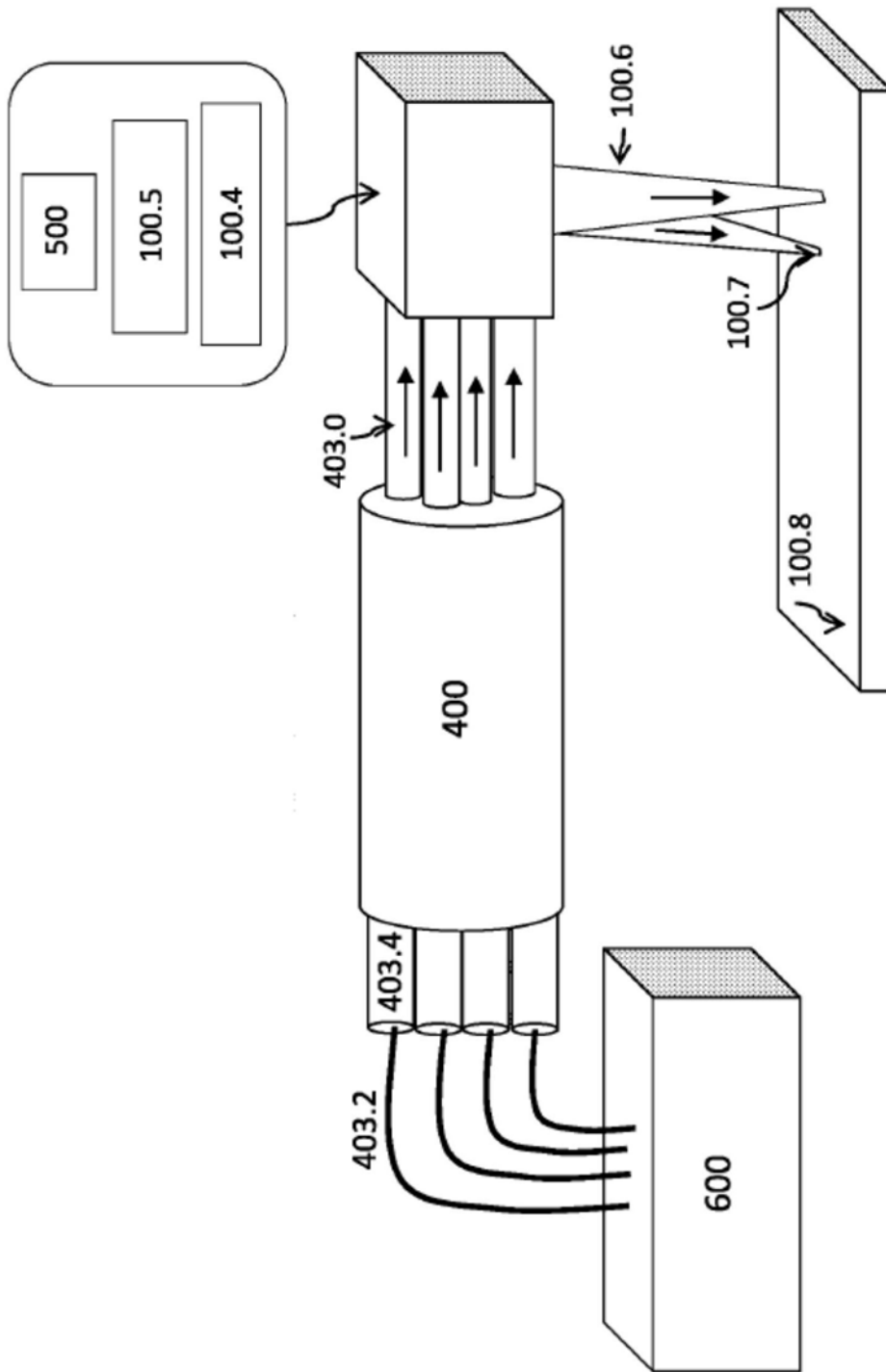


图4

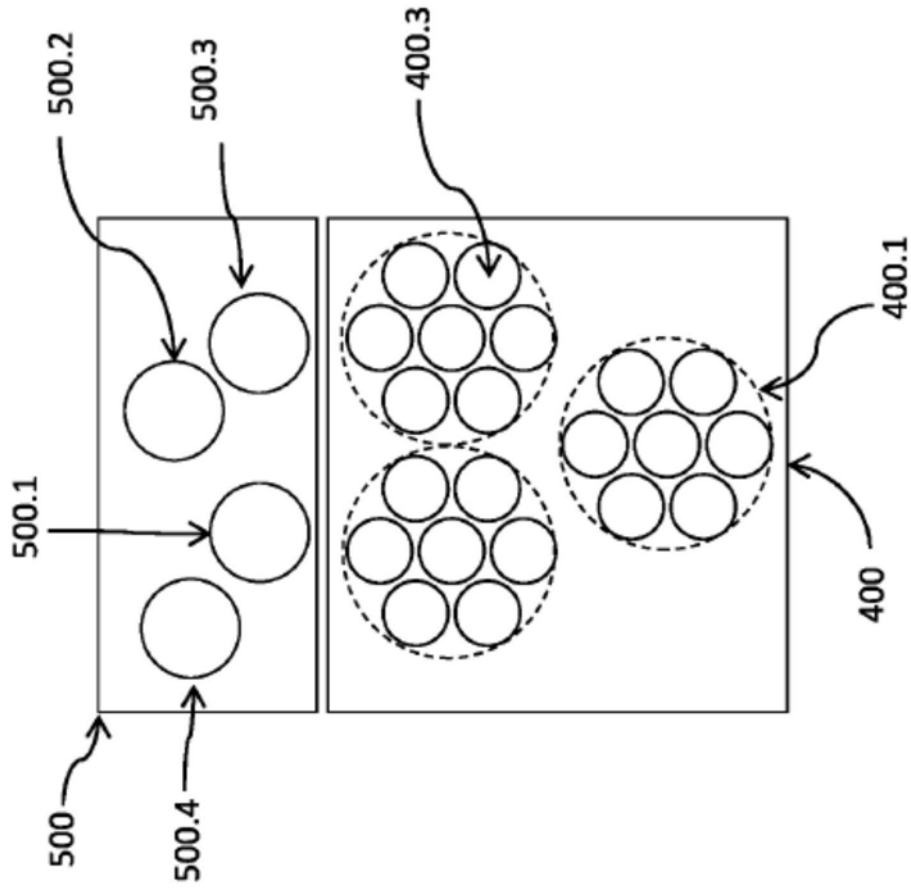


图5

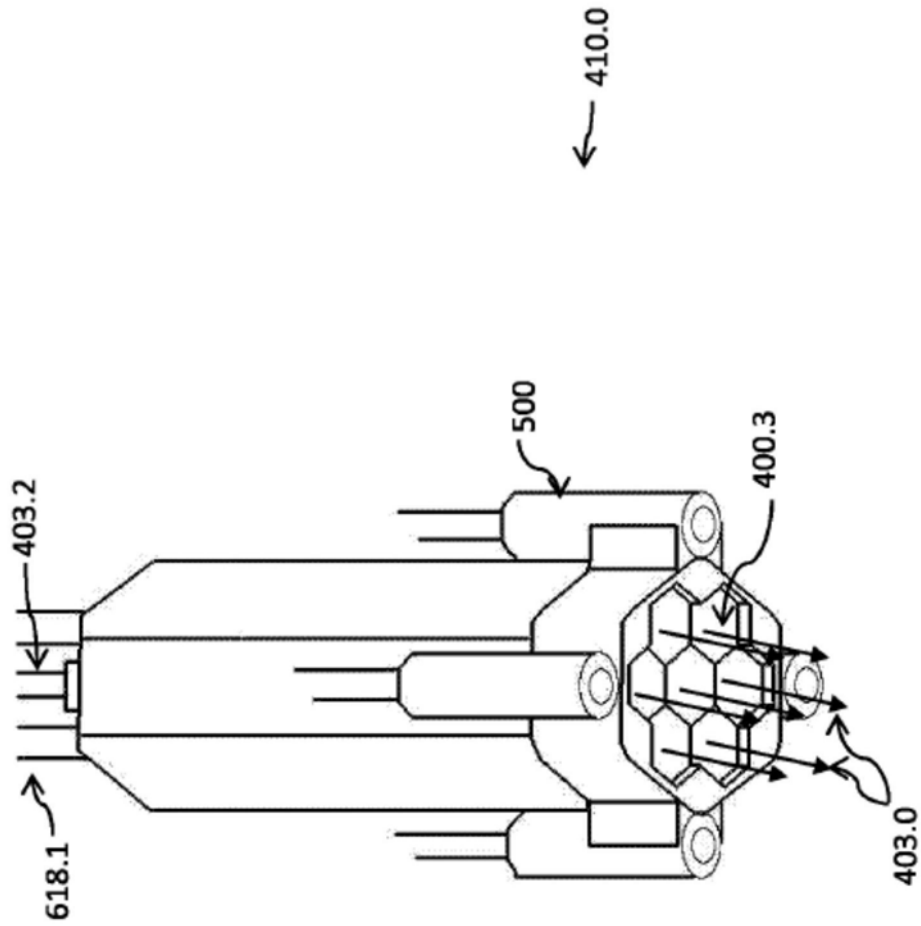


图6

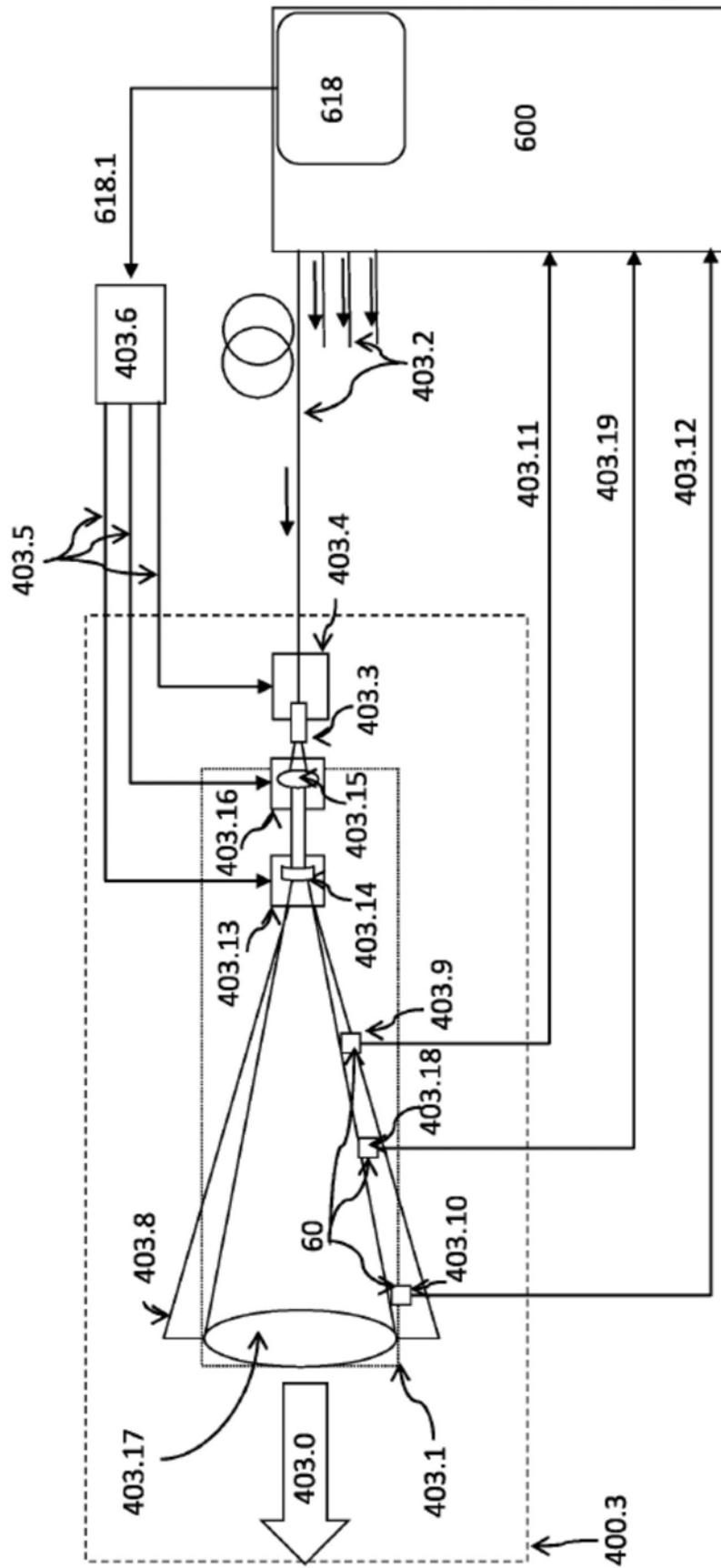


图7

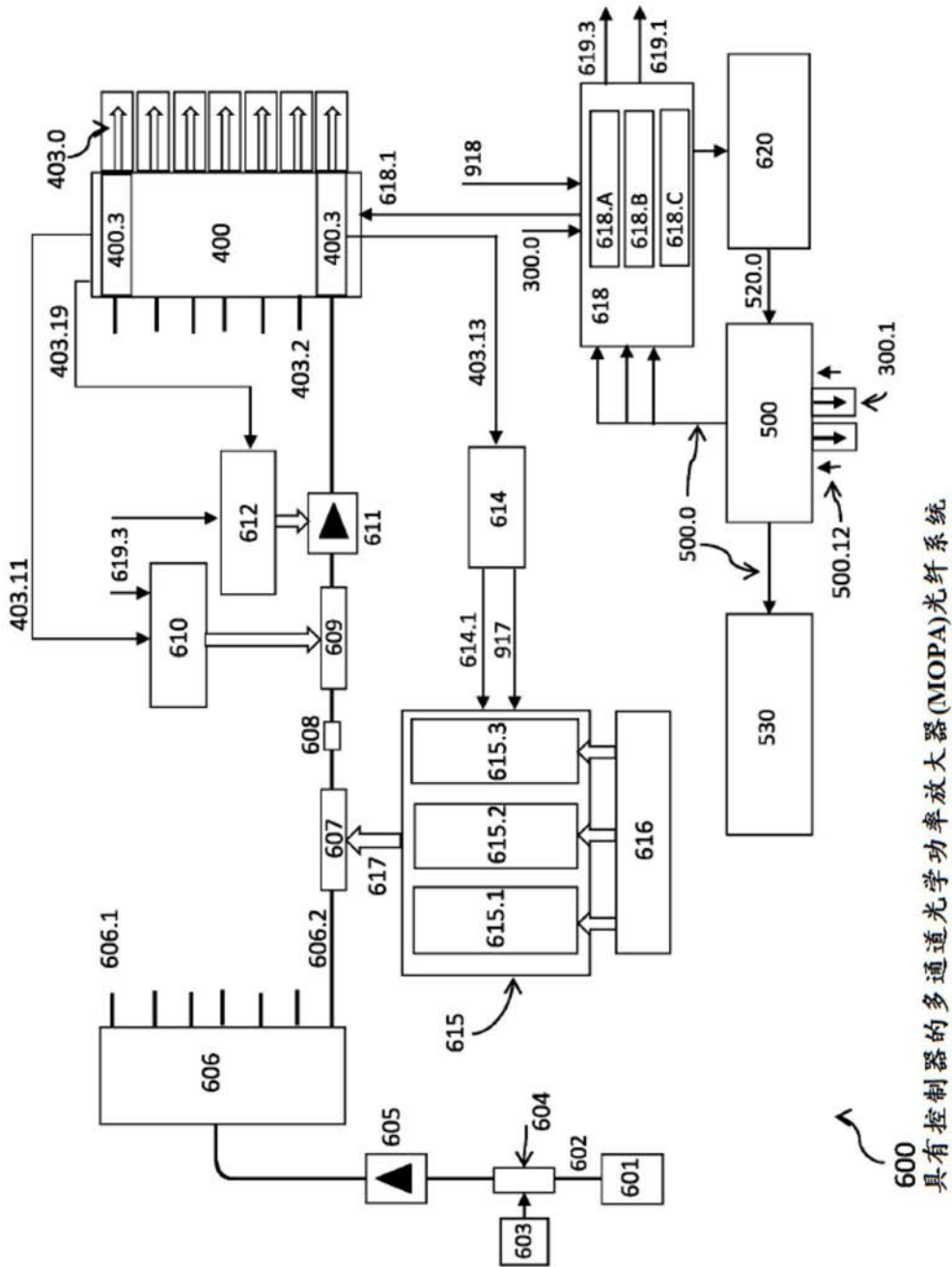


图8

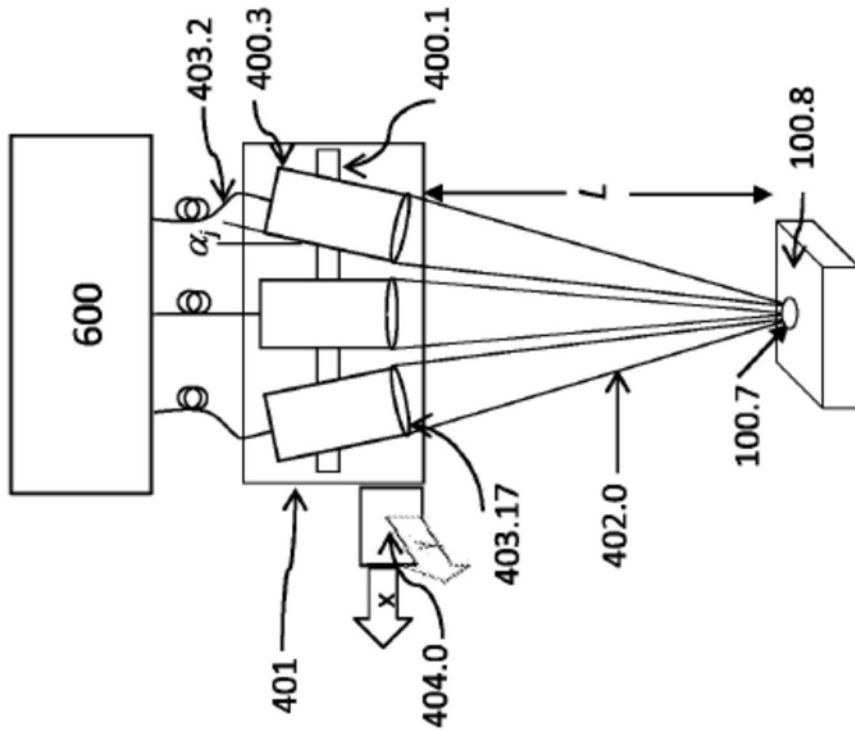


图9

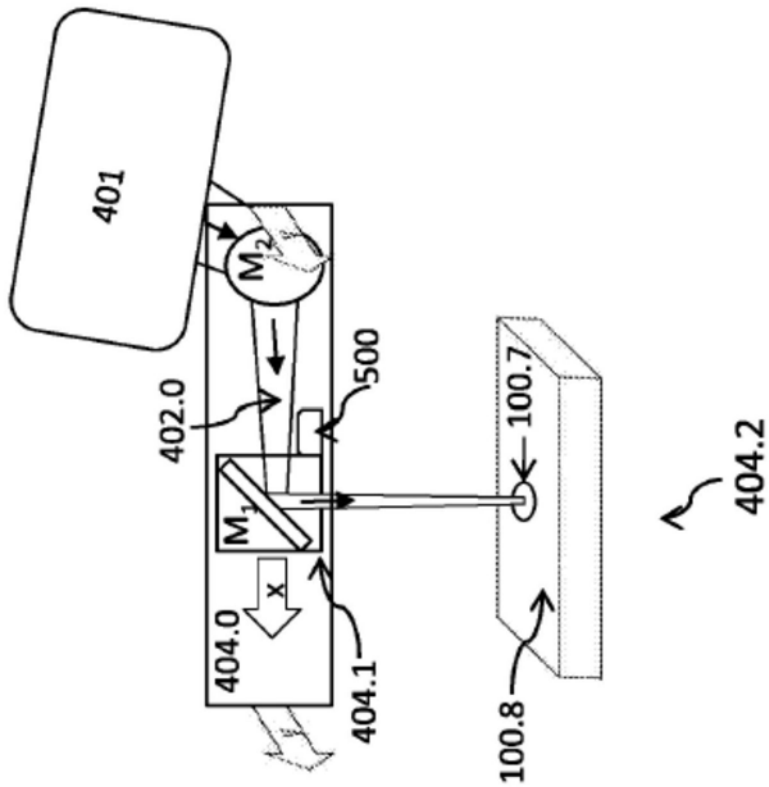


图10

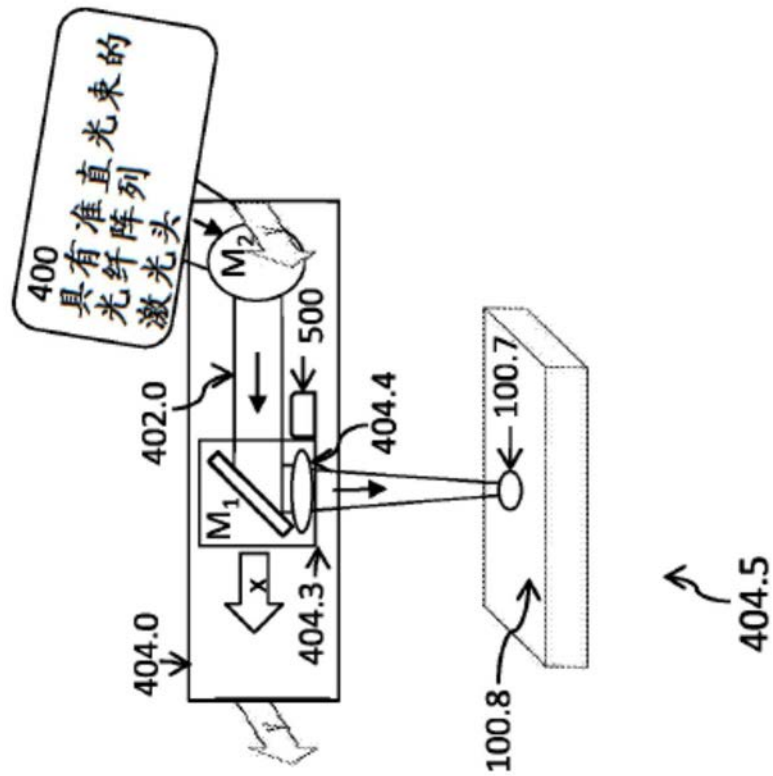


图11

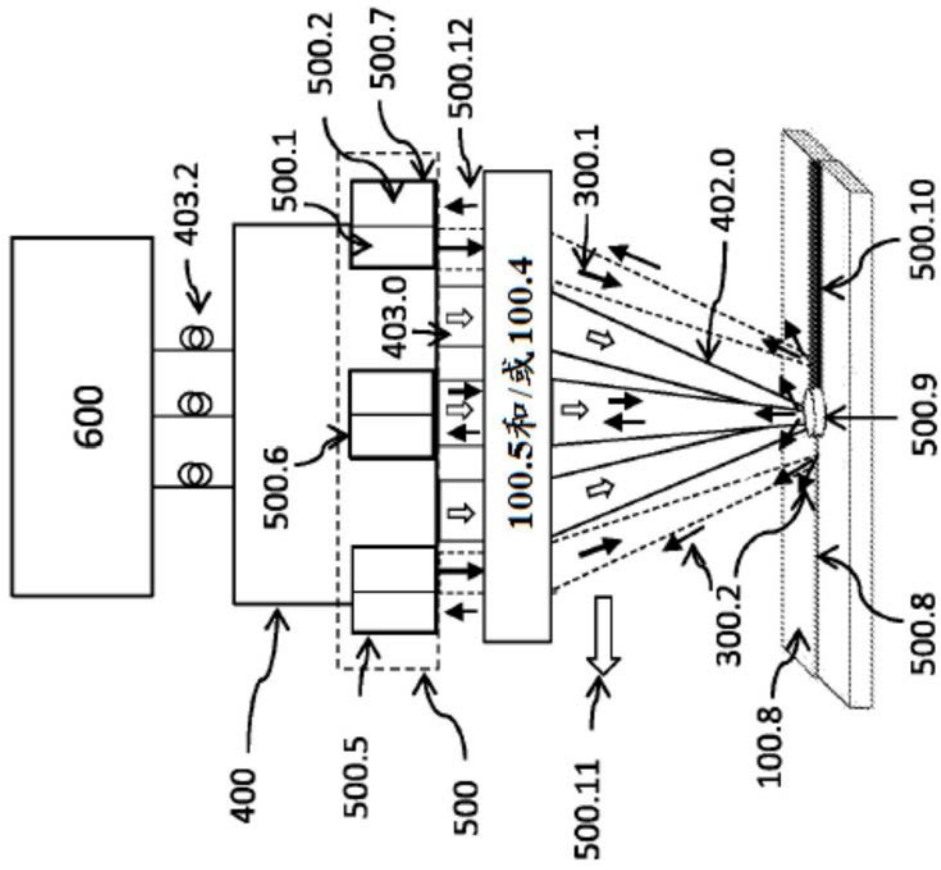


图12

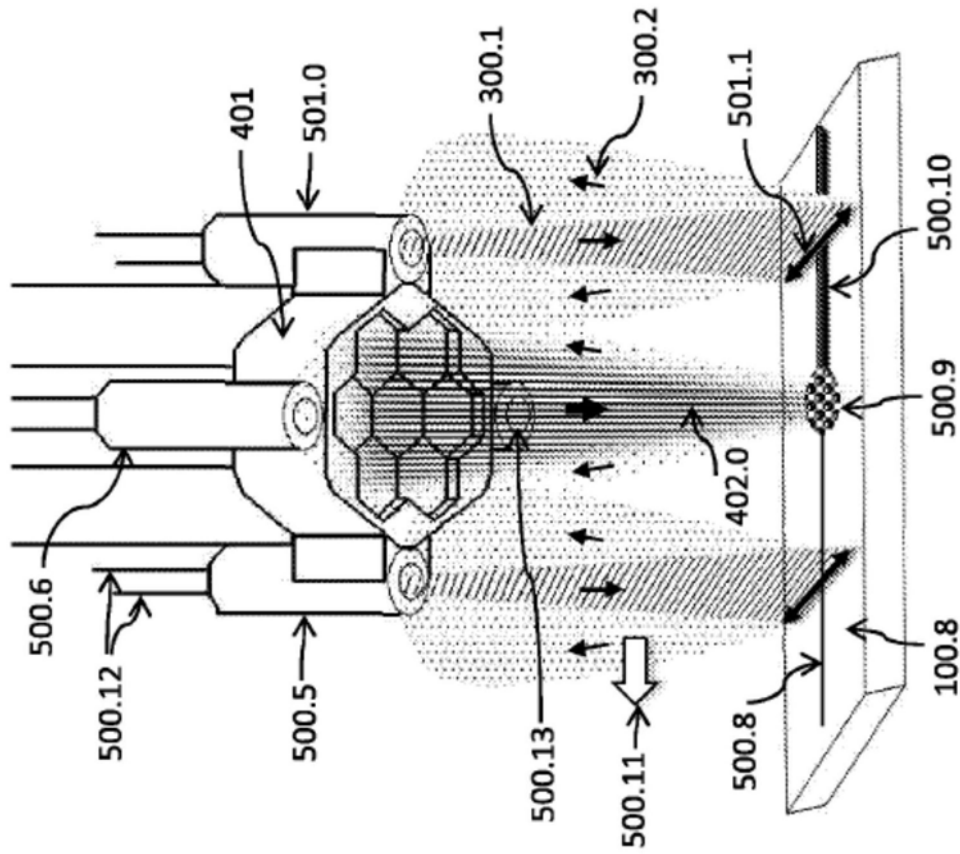


图13

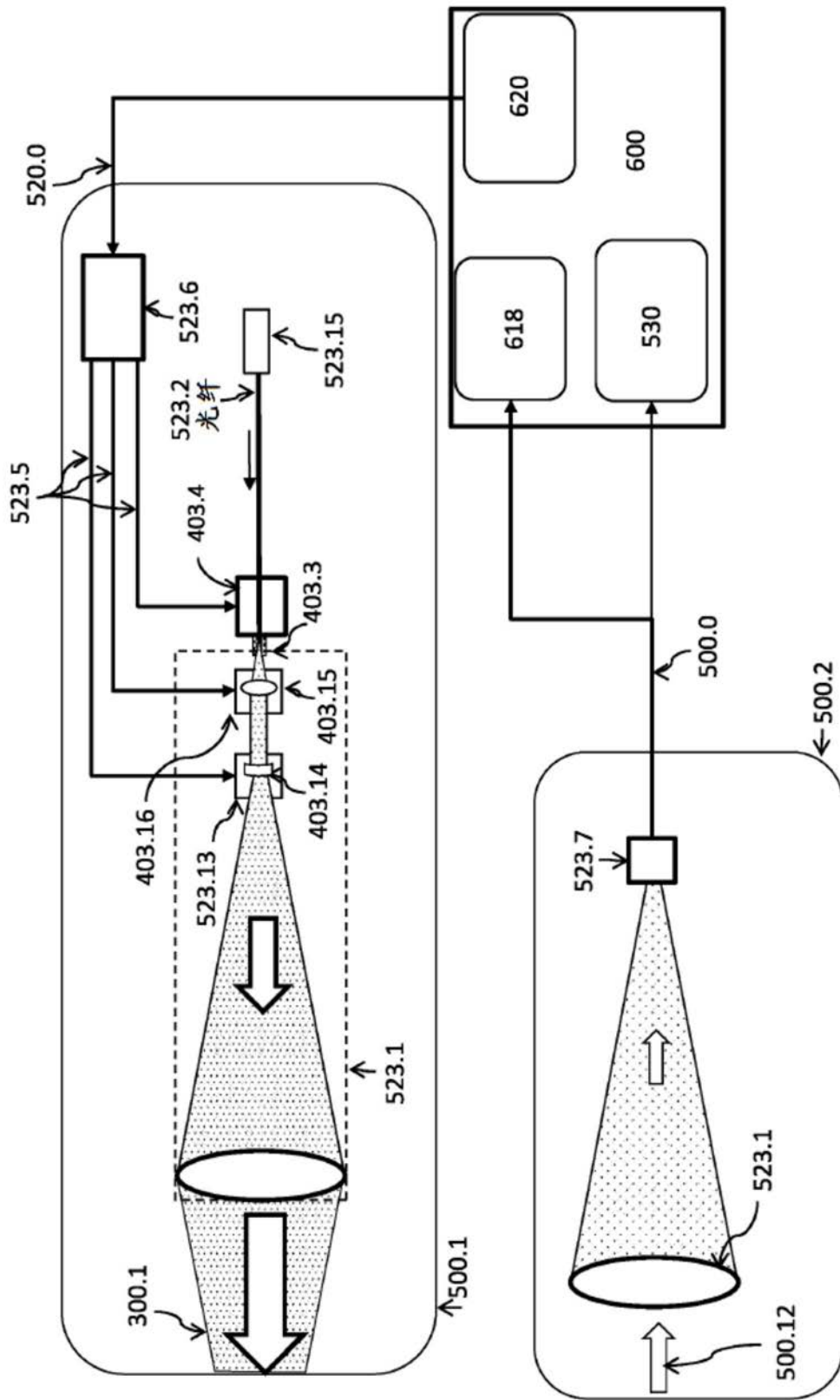


图14

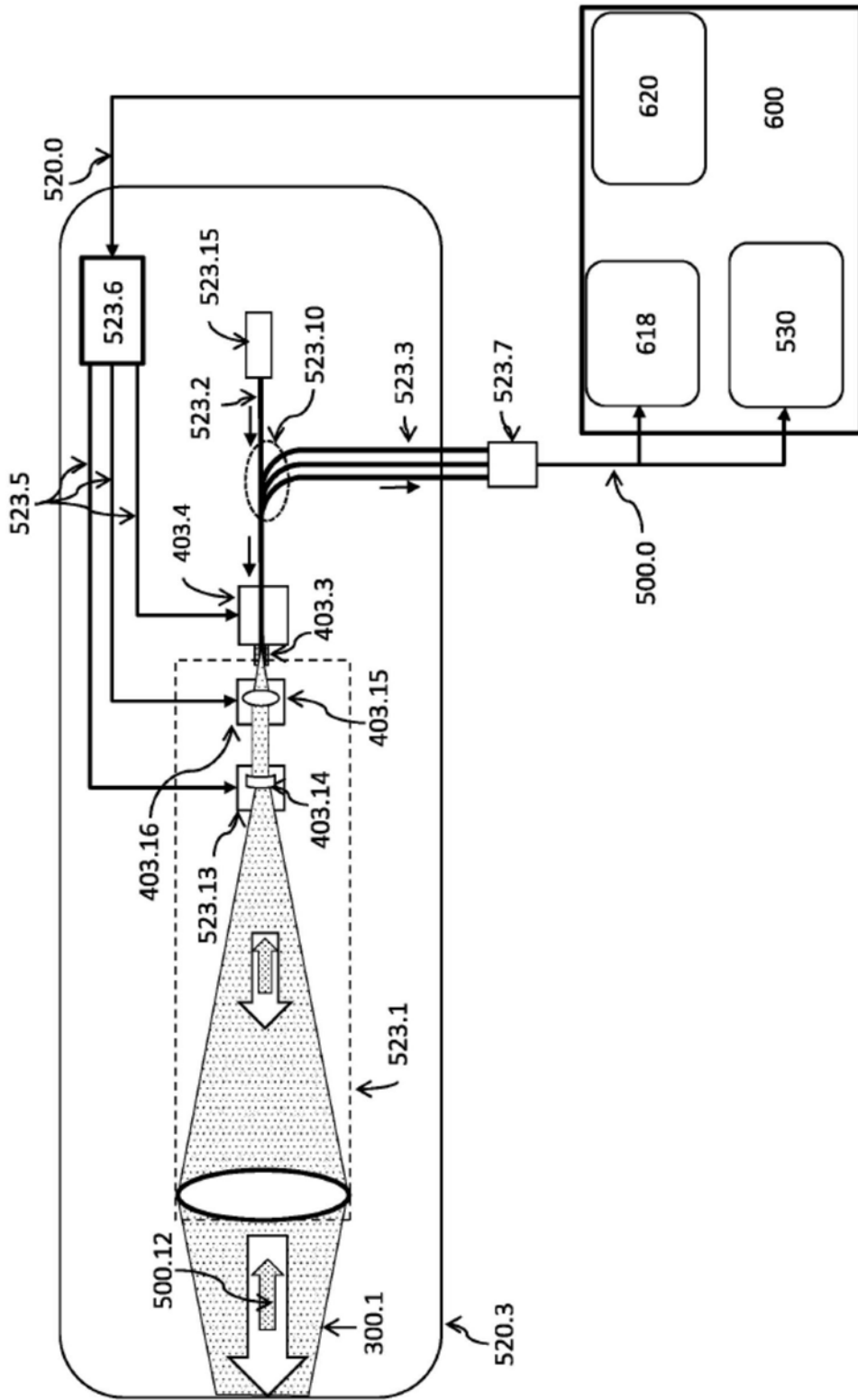


图15

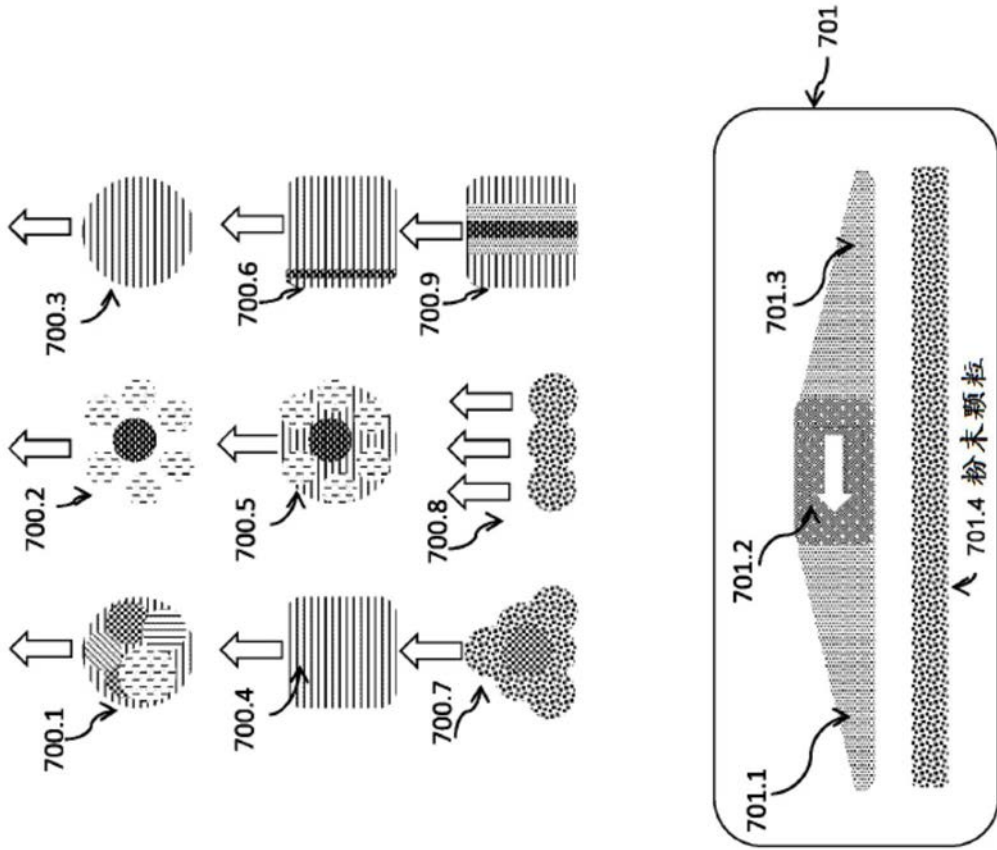


图16

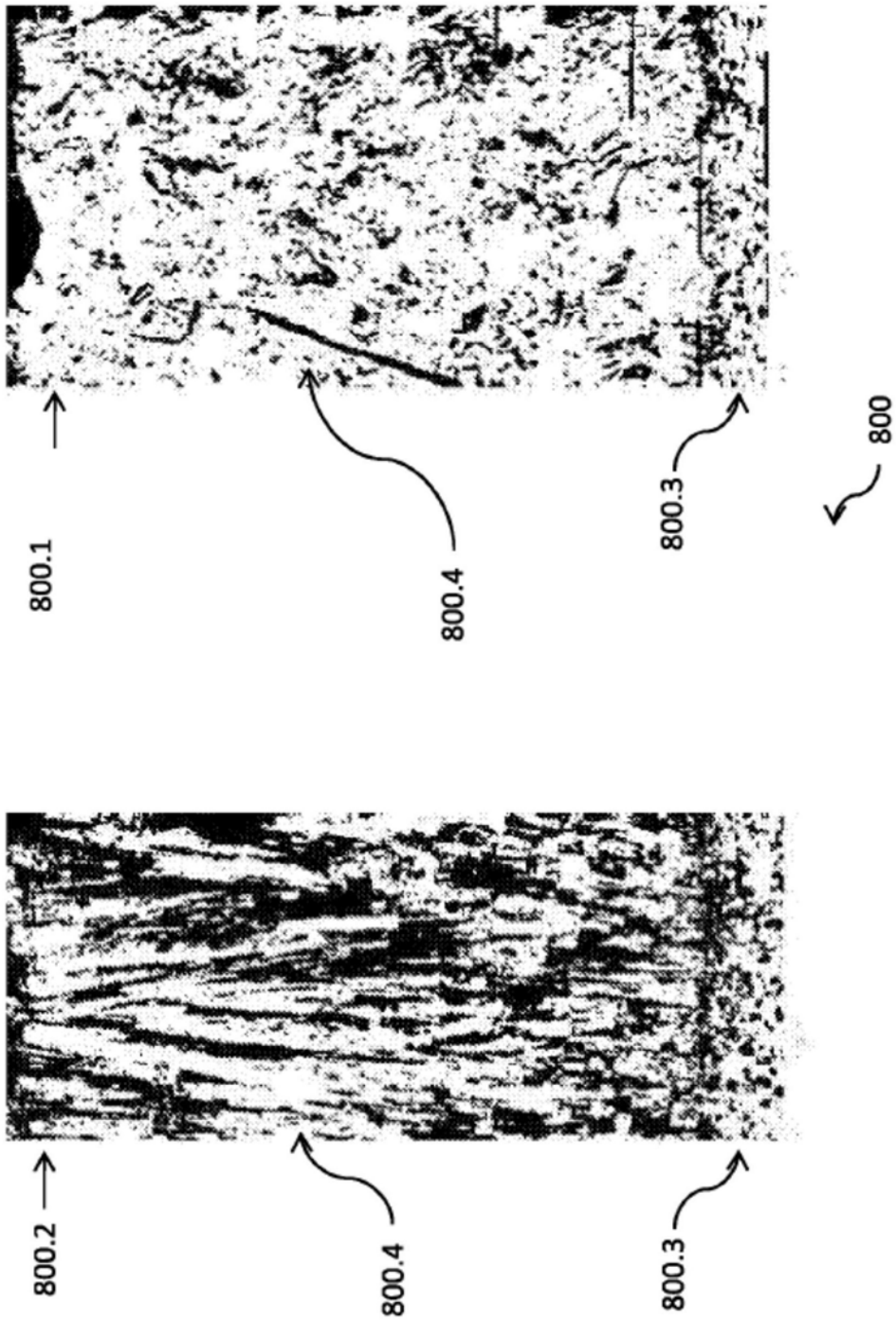


图17

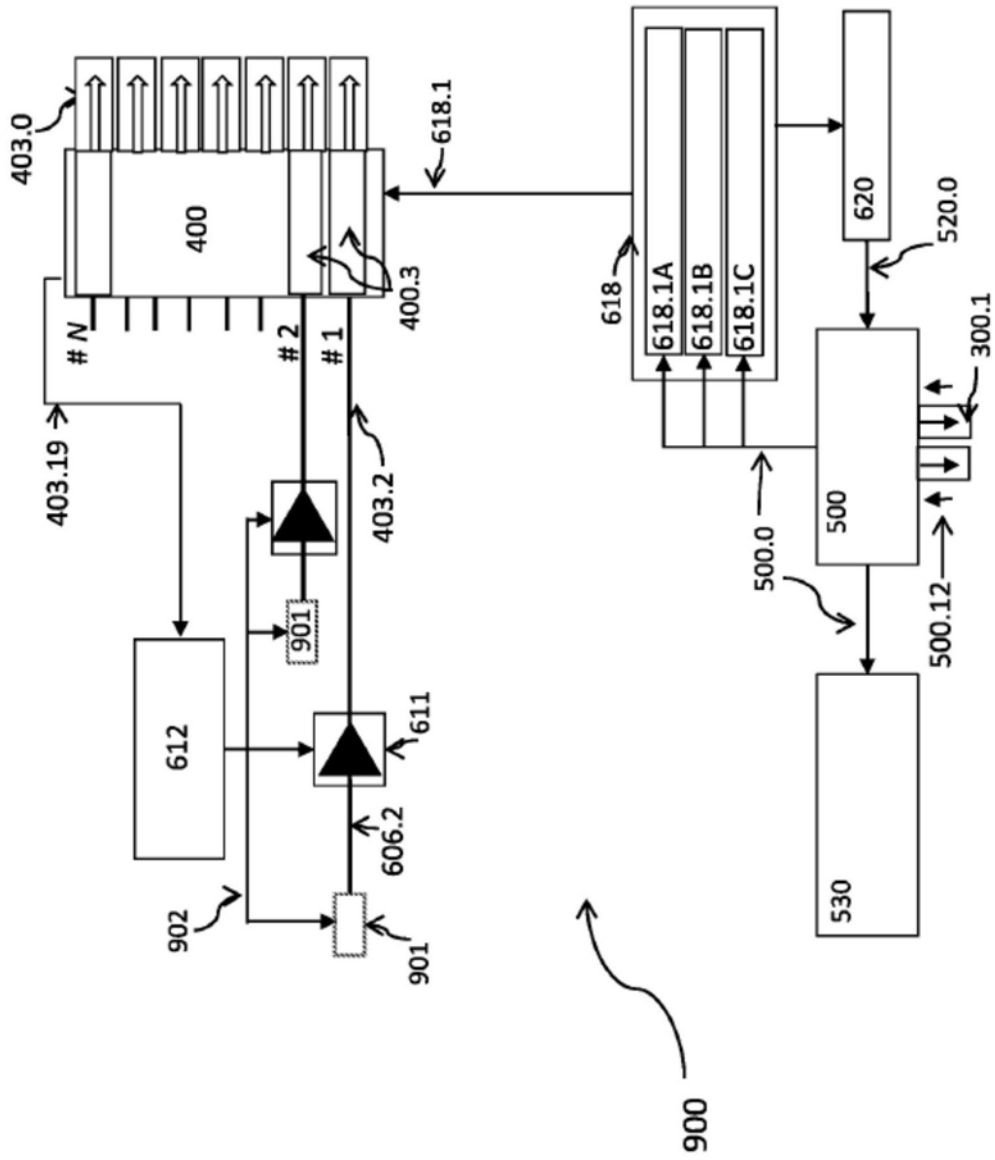


图18

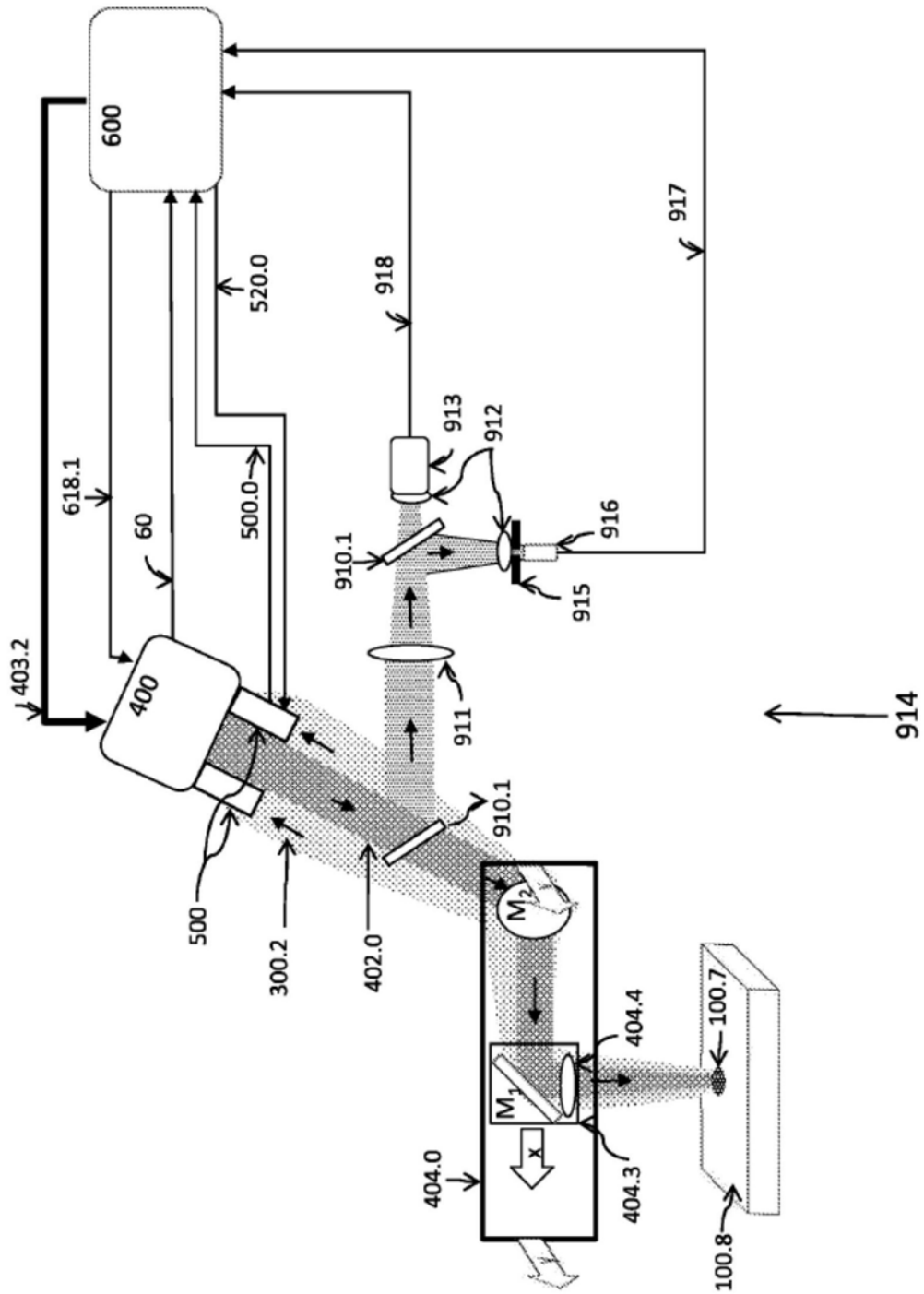


图19

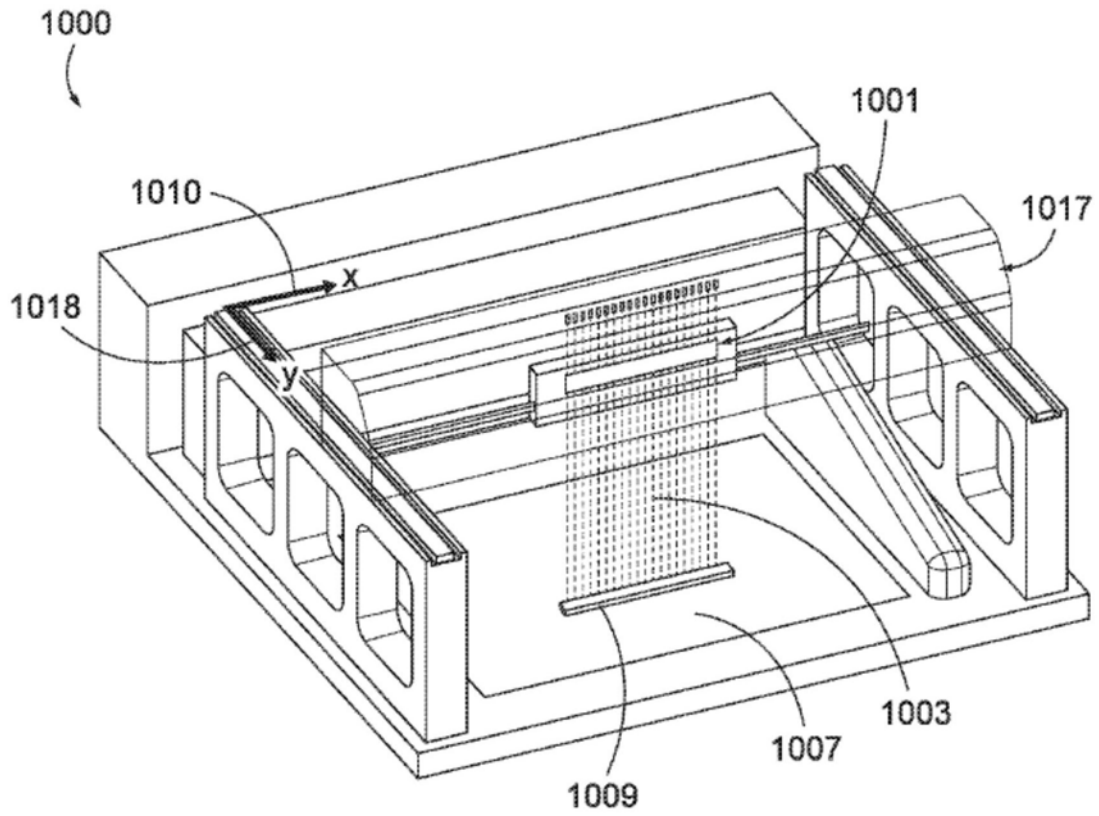


图20

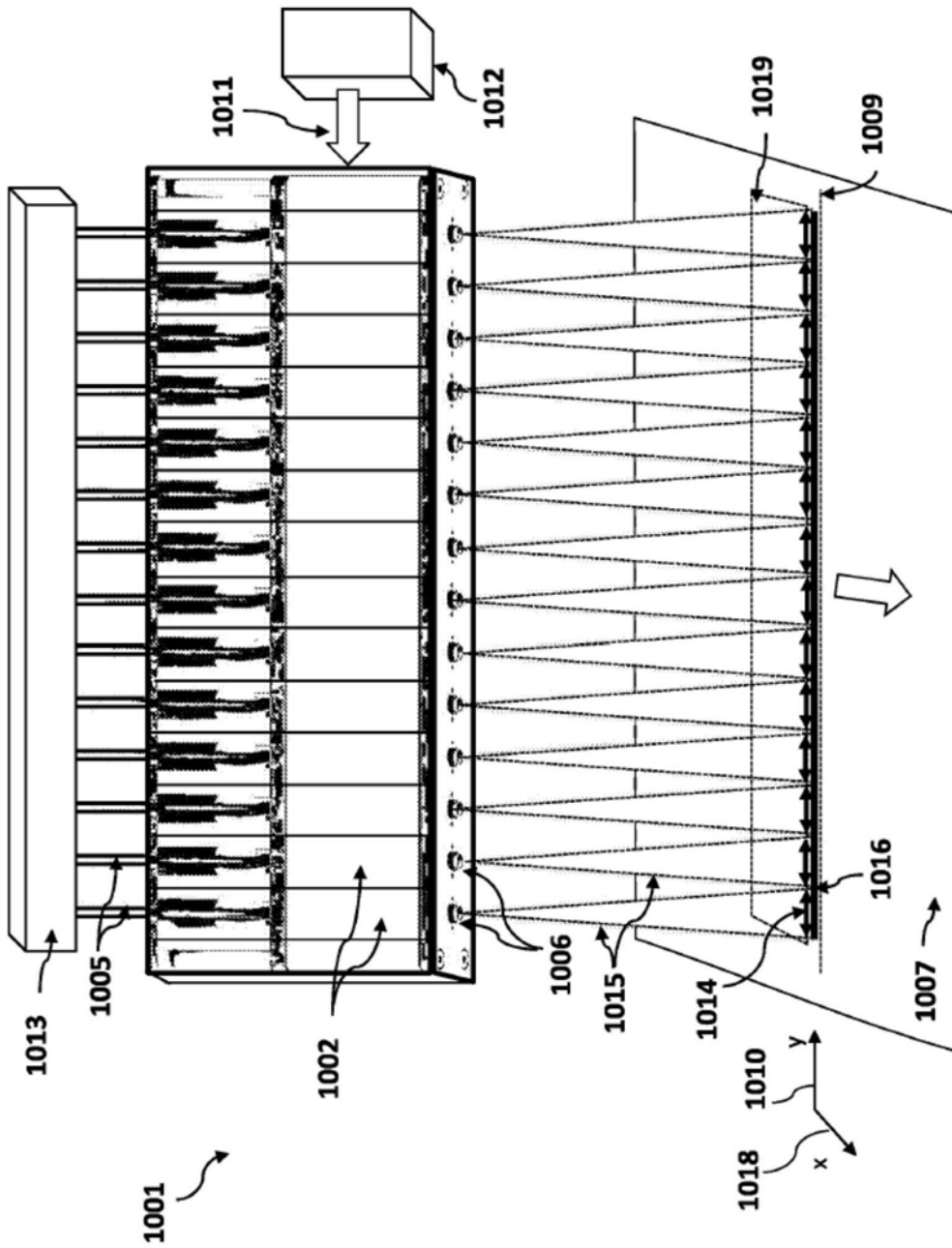


图21

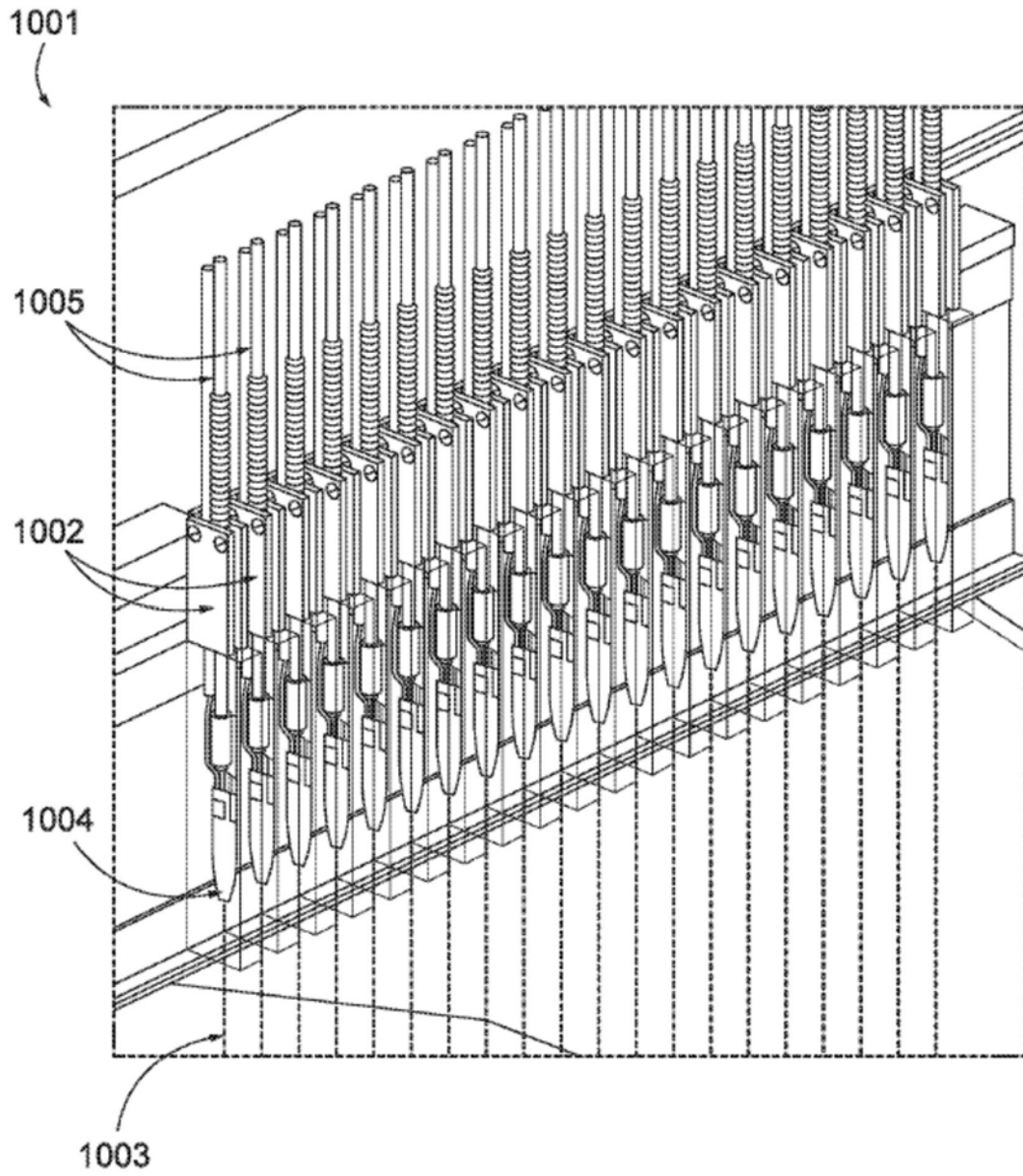


图22

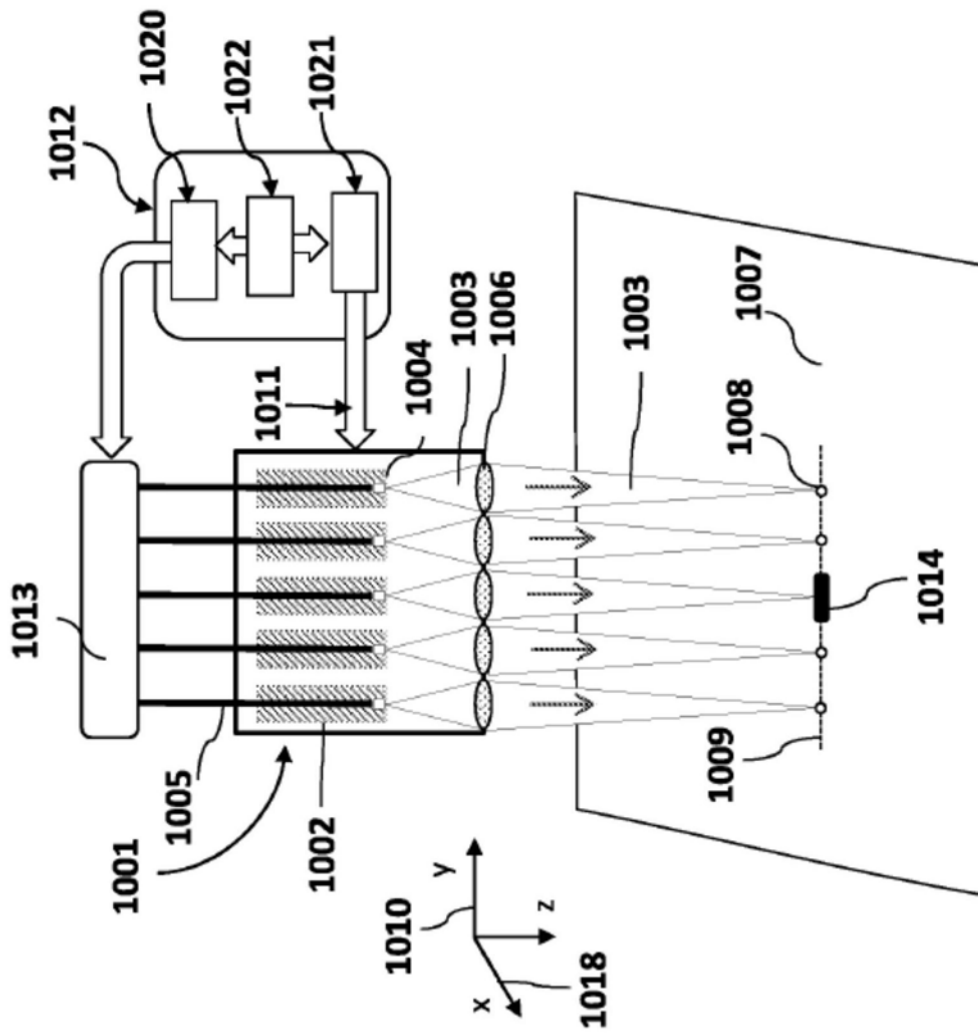


图23

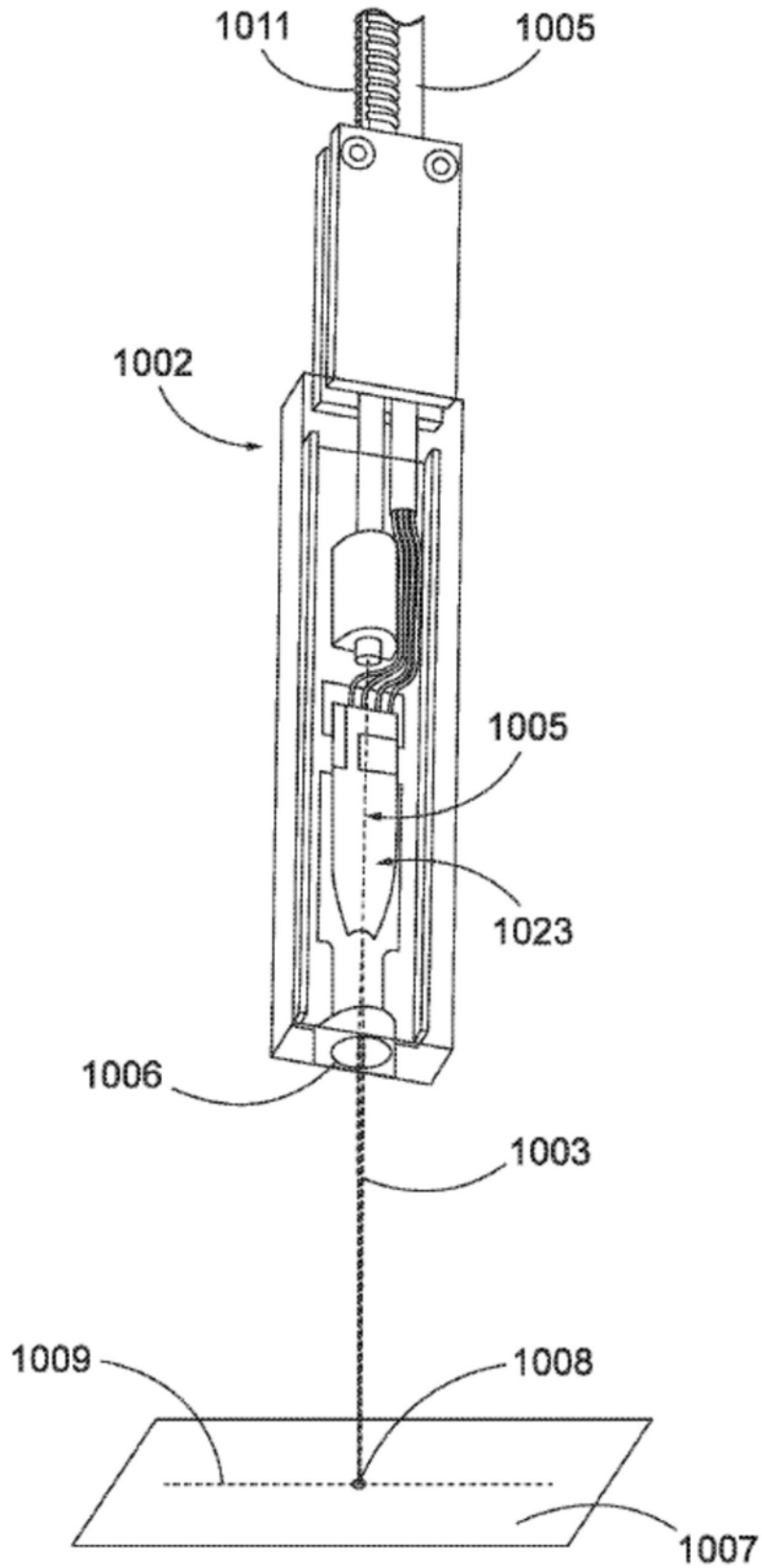


图24

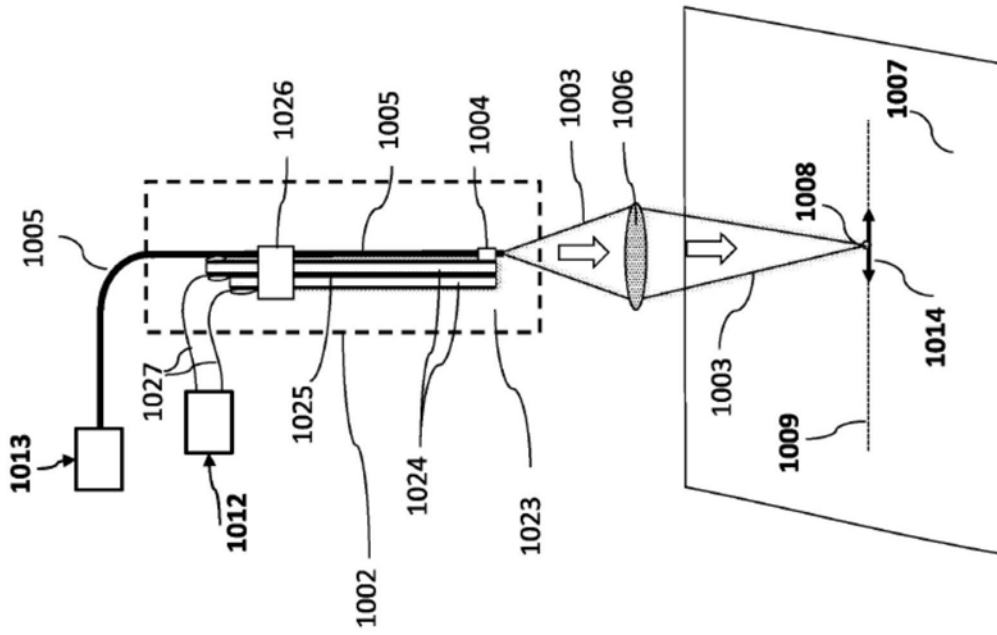


图25

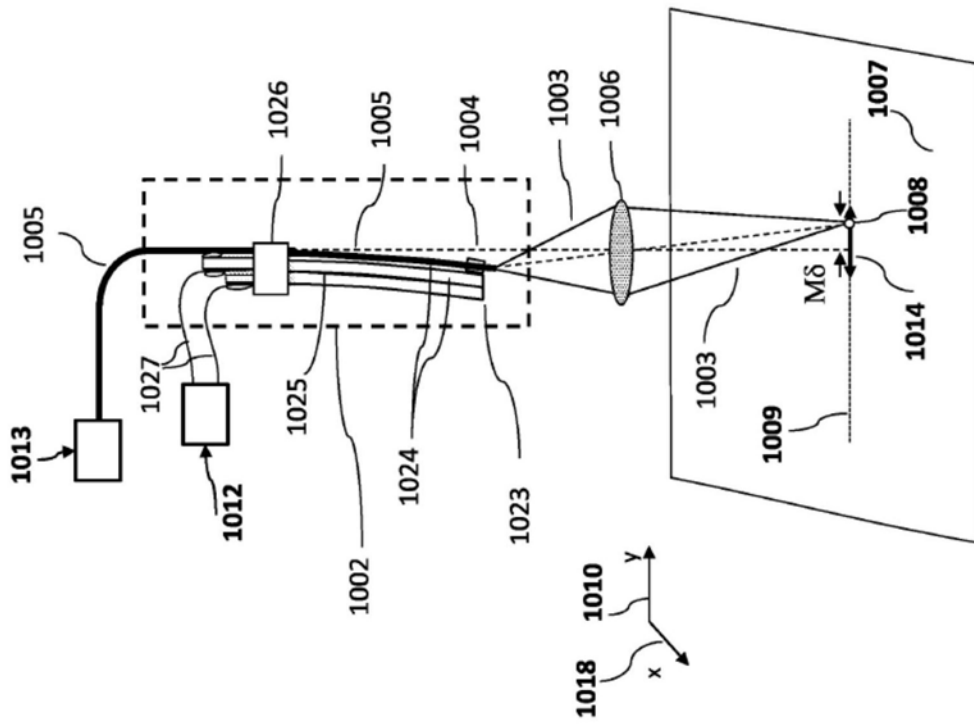


图26

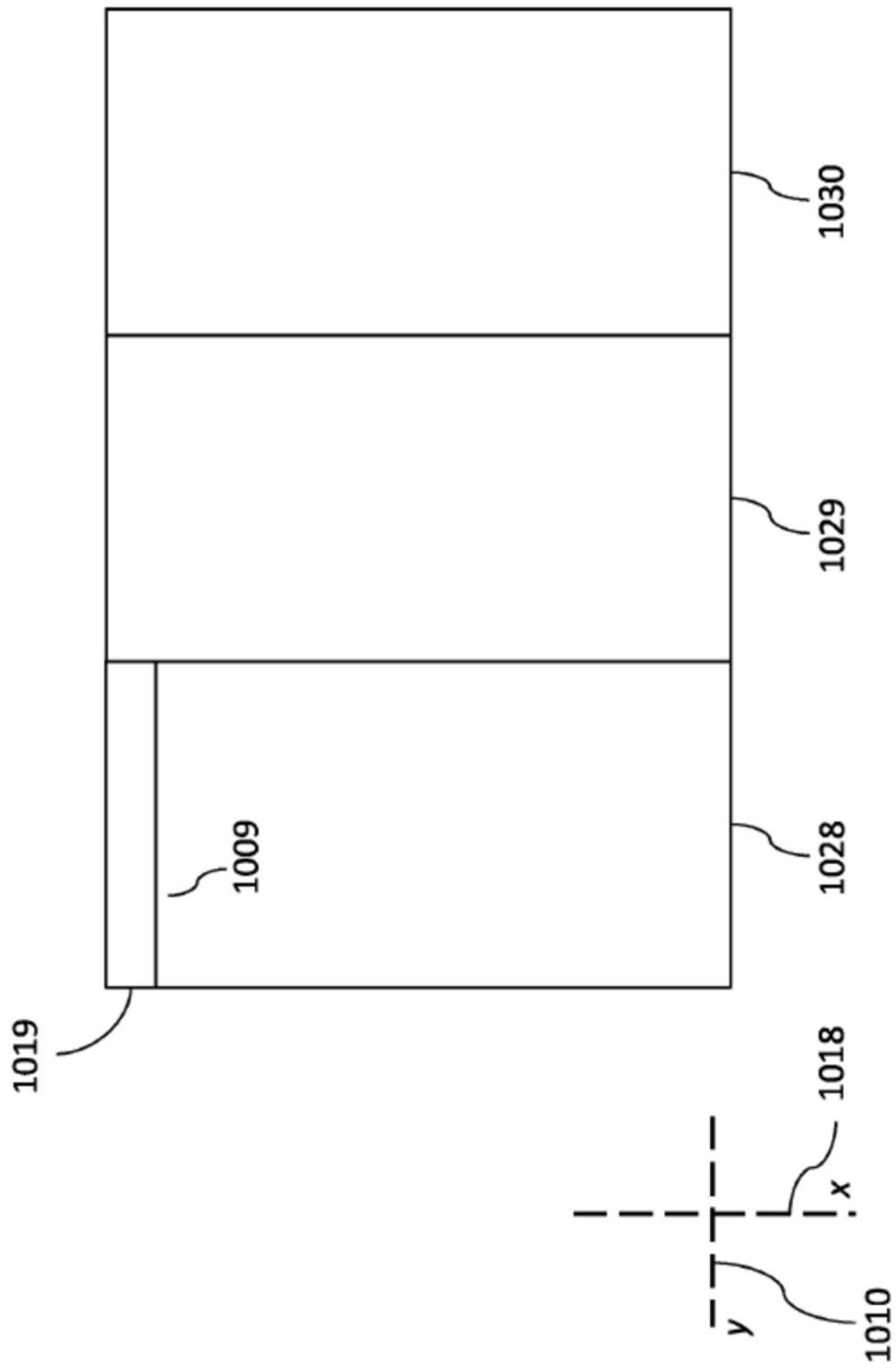


图27

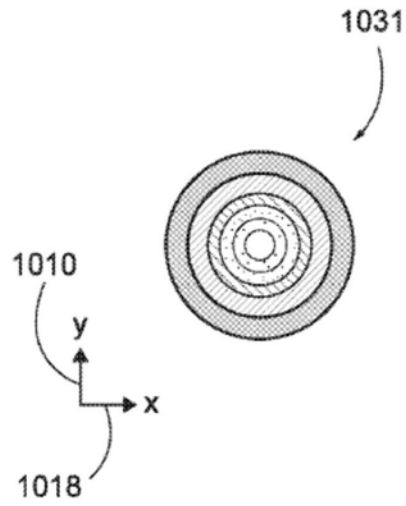


图28A

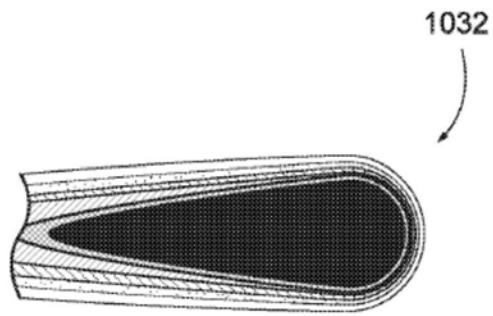


图28B

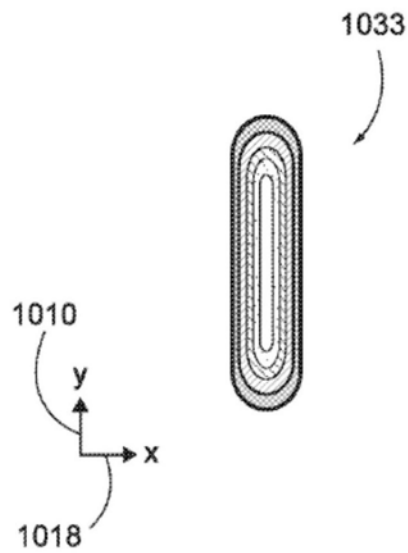


图28C

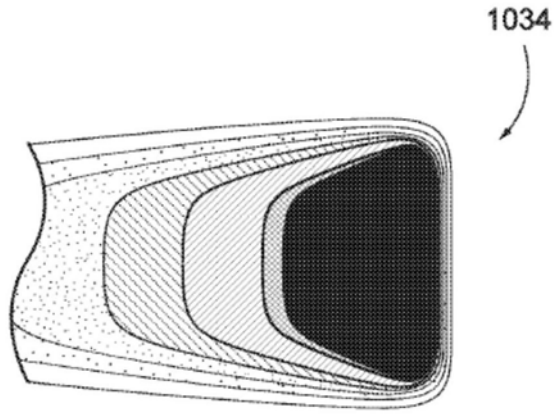


图28D

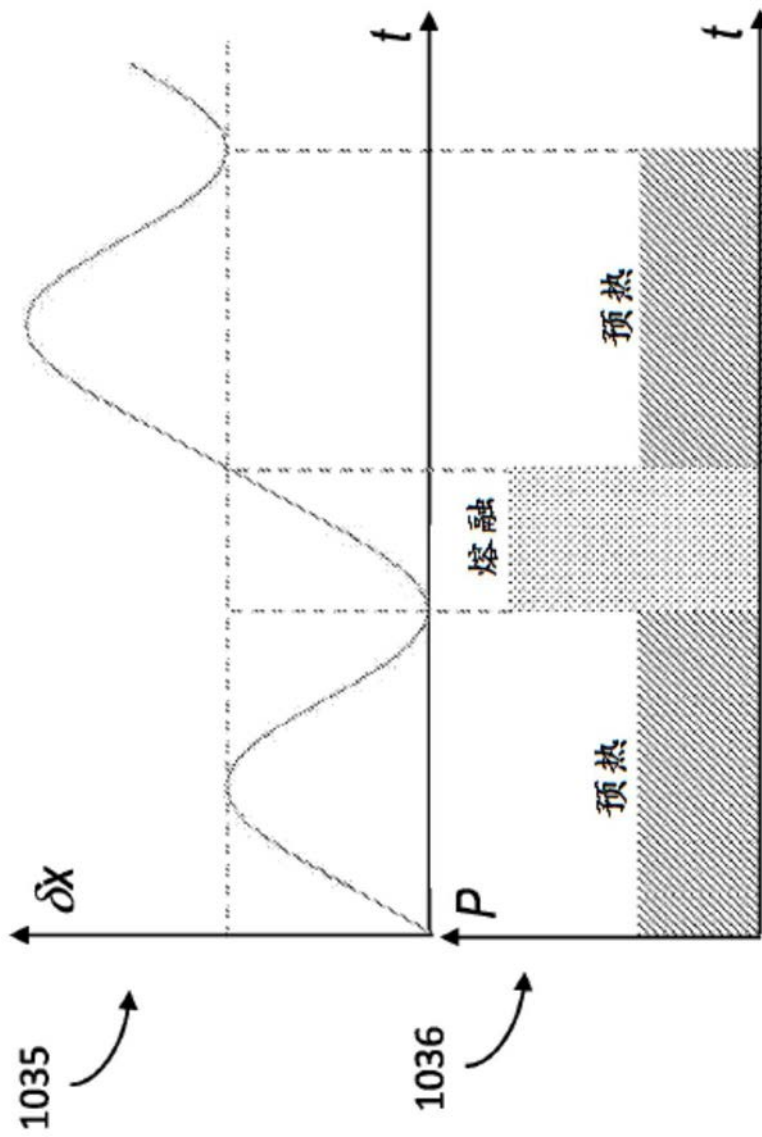


图29

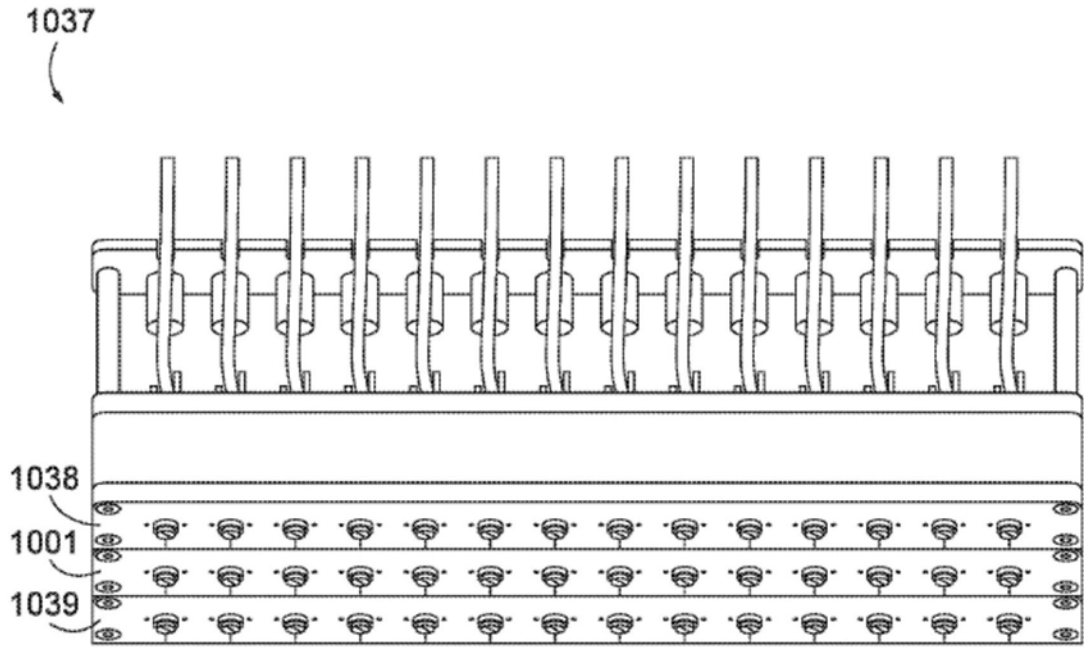


图30

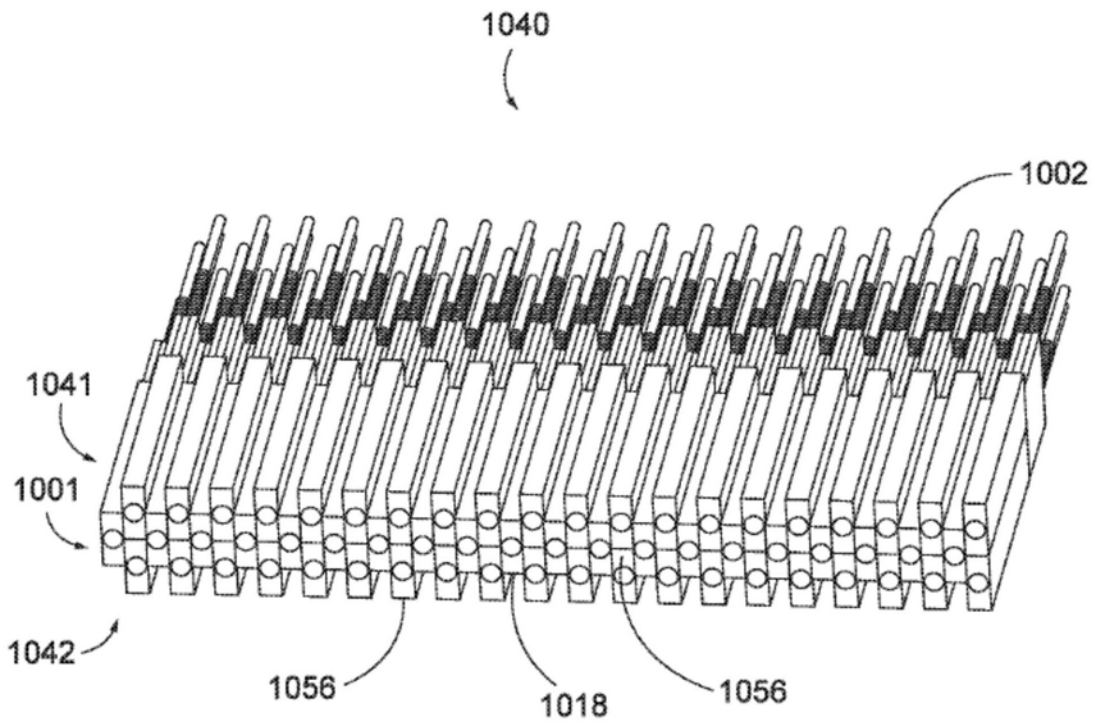


图31

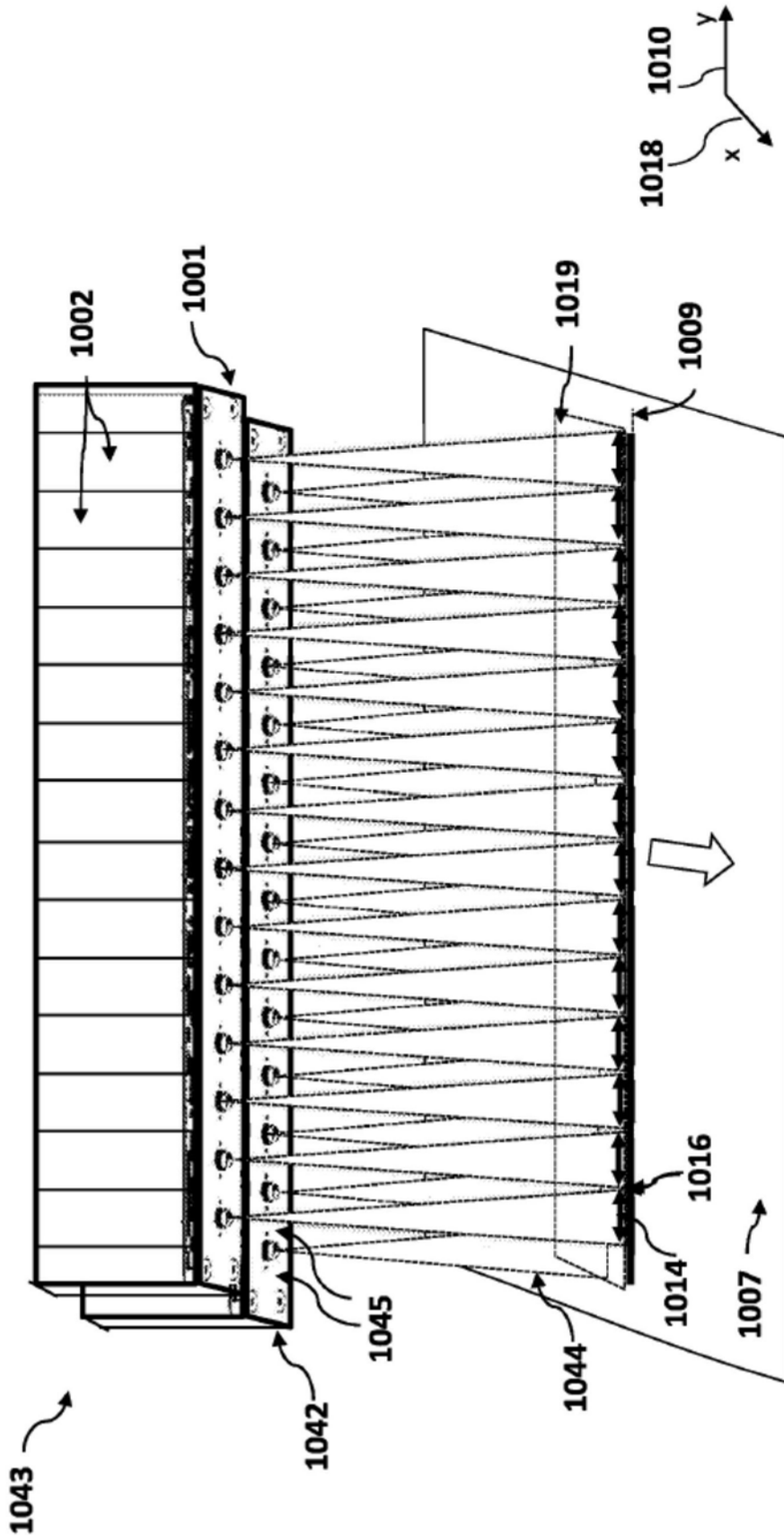


图32

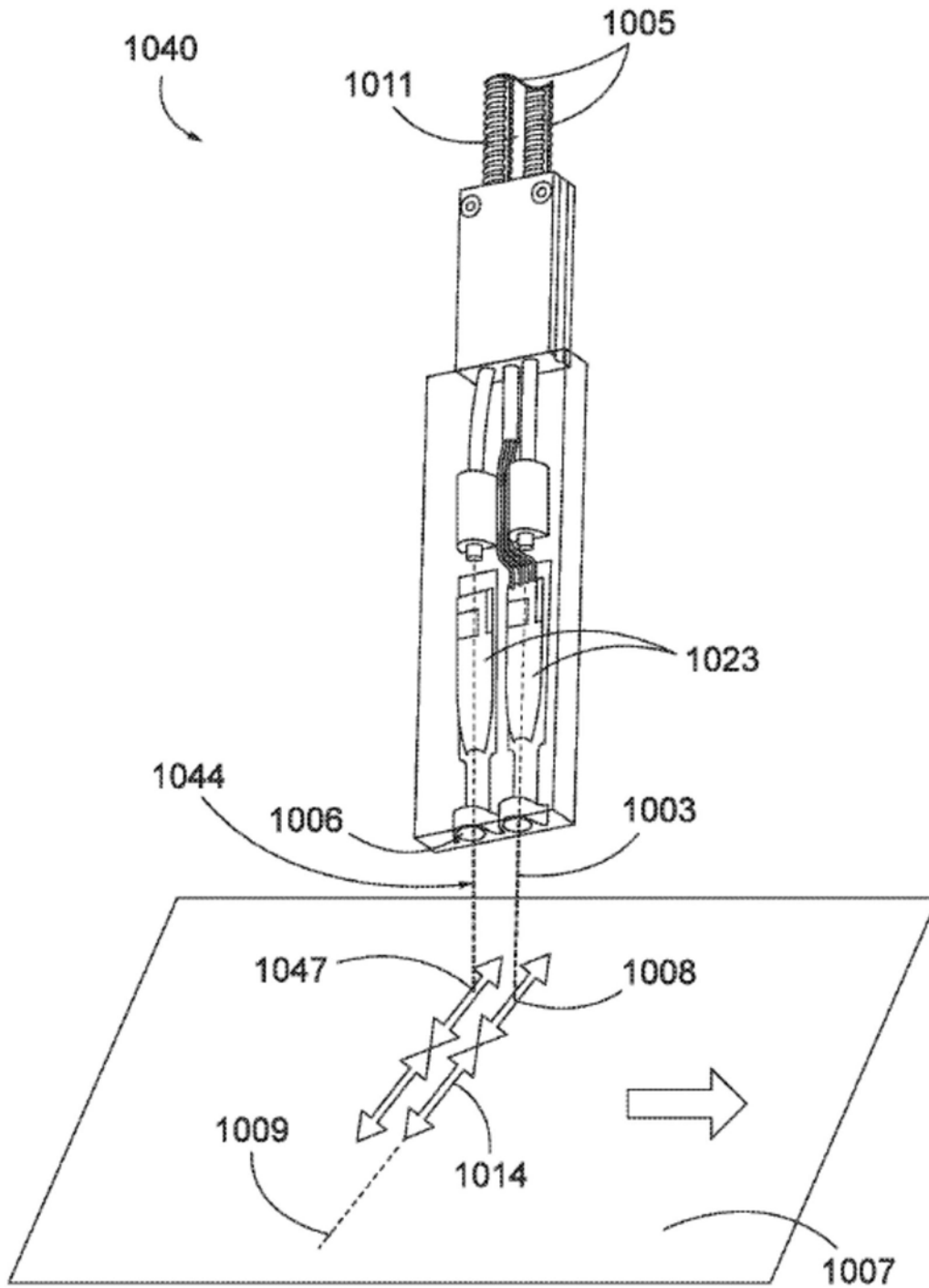


图33

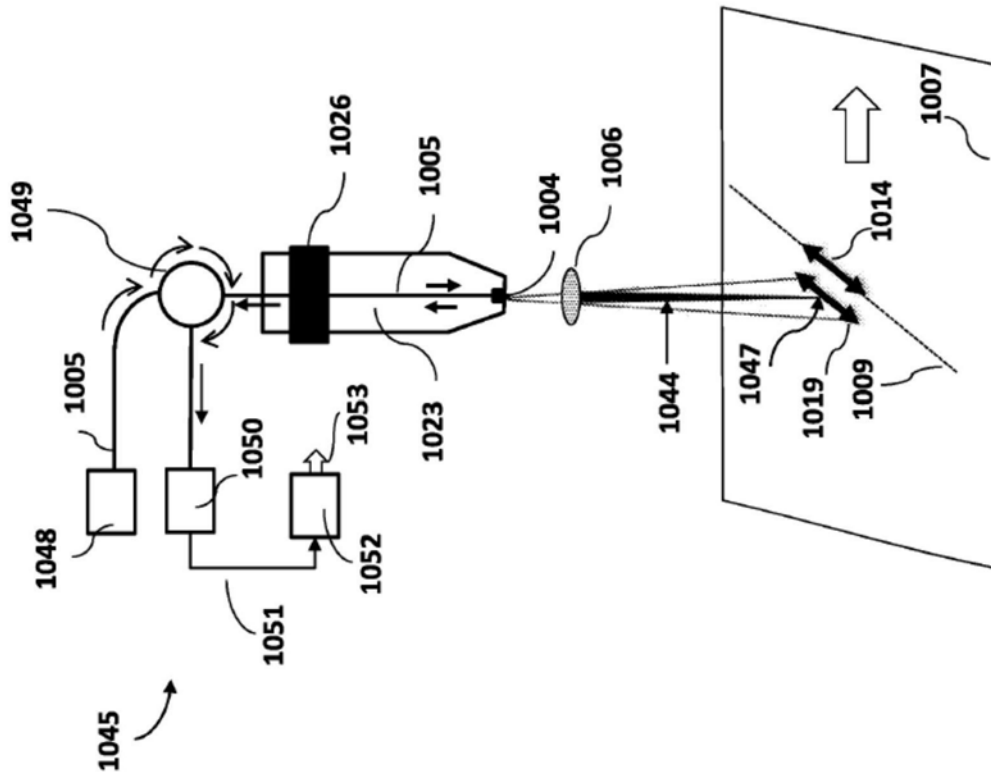


图34