



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101733547 A

(43) 申请公布日 2010.06.16

(21) 申请号 200910225275.4

(22) 申请日 2009.11.18

(30) 优先权数据

102008058535.1 2008.11.21 DE

(71) 申请人 蒂萨公司

地址 德国汉堡

(72) 发明人 阿恩·库普斯 斯文·雷特

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 吴培善

(51) Int. Cl.

B23K 26/00 (2006.01)

B23K 26/18 (2006.01)

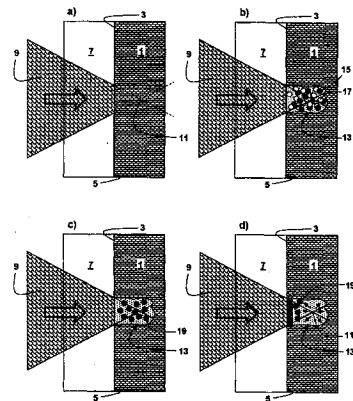
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 1 页

(54) 发明名称

用高能辐射加工材料的方法

(57) 摘要

本发明提供用高能辐射加工材料的方法，其中用高能辐射，具体地用激光束 (9) 照射聚合物基体 (1)，其中辐射聚焦于焦点 (11)，设置焦点 (11) 以使其位于面向辐射的聚合物基体表面之后，并引起聚合物基体 (1) 的材料去除，从而在聚合物基体 (1) 内形成反应空间 (13)。



1. 一种用高能辐射加工材料的方法,其中用高能辐射,具体地用激光束(9)照射聚合物基体(1),其中所述辐射聚焦于焦点(11),设置所述焦点(11)以使其位于面向所述辐射的聚合物基体表面(3)之后,并引起所述聚合物基体(1)的材料去除,从而在所述聚合物基体(1)内形成反应空间(13)。

2. 权利要求1的方法,其中在材料去除之后反应物(15,17)出现在所述反应空间(13)中,所述反应空间(13)内的反应物(15,17)在用高能辐射,具体地用激光束(9)照射反应空间(13)时反应,从而形成产物(19)。

3. 权利要求1或2的方法,其中所述反应空间(13)空间上由所述聚合物基体(1)和工件(7)限定,所述工件(7)与所述聚合物基体(1)接触并可透过所述辐射的波长,优选玻璃基材(7),所述辐射在穿过工件(7)之后撞击到聚合物基体(1)上。

4. 权利要求2或3的方法,其中当用高能辐射,具体地用激光束(9)照射所述反应空间(13)时,所述产物(19)沉积在所述工件(7)上,所述工件(7)与聚合物基体(1)接触并可透过所述辐射的波长。

5. 前述任一项权利要求的方法,其中形成所述反应空间(13),以使所述反应空间(13)具有直径为20-200 μm ,优选约70 μm 且深度为10-100 μm ,优选约40 μm 的空间范围。

6. 前述任一项权利要求的方法,其中通过脉冲激光束(9)的第一脉冲形成所述反应空间(13),并用脉冲激光束(9)的第二脉冲照射所述反应空间(13)。

7. 前述任一项权利要求的方法,其中通过用高能辐射,具体地用激光束(9)照射所述聚合物基体(1),在所述聚合物基体(1)内形成在局部相邻排列的多个反应空间(13)。

8. 权利要求7的方法,其中所述辐射为脉冲激光束(9),在照射过程中使所述脉冲束(9)相对于所述聚合物基体(1)横向移动或使所述聚合物基体(1)相对于所述脉冲束(9)横向移动。

9. 权利要求7或8的方法,其中形成所述反应空间(13),以使相邻反应空间(13)的空间范围重叠至少25%。

10. 前述任一项权利要求的方法,其中所述辐射用脉冲激光(9)并以10kHz至300kHz的脉冲频率产生。

11. 前述任一项权利要求的方法,其中所述焦点(11)位于反应空间(13)内、位于聚合物基体(1)内或位于聚合物基体(1)之后。

12. 前述任一项权利要求的方法,其中设置所述焦点(11),以使所述聚合物基体(1)的表面(3)处的辐射功率密度小于 $3\text{J}/\text{cm}^2$ 。

13. 前述任一项权利要求的方法,其中设置所述焦点(11),以使所述反应空间(13)内的最大辐射功率密度为至少 $5\text{J}/\text{cm}^2$,优选至少 $10\text{J}/\text{cm}^2$ 。

14. 权利要求4至13中任一项的方法用于标记或标注工件(17)的用途,所述工件(7)可透过所述辐射的波长。

用高能辐射加工材料的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及用高能辐射加工材料的方法,其中用高能辐射,具体地用激光束照射聚合物基体。

背景技术

[0002] 用激光束加工材料是工业上现有的方法并特别用于焊接、切割、钻孔和去除各种材料。用激光束加工材料所涉及的作用机理的多样性和复杂性是以已试验确定或模拟确定的工艺参数使用激光束的原因。在参数与所用激光的可调变量和所得加工产物如何关联方面,激光强度和经受辐射作用的时间特别重要。

[0003] 已知在借助激光加工材料时将聚焦激光束射在待加工工件的表面上。通常对聚焦位置进行选择,以便聚焦透镜相对于工件表面的距离使获得最小激光束径向范围成为可能。由此在工件表面上提供最大的激光强度。

[0004] 由于激光功率与焦点范围的特定比例,传递给工件的能量密度急剧增加。激光能量的耦合在工件表面引起相变过程,进而可获得特定的加工结果。

[0005] 在表面处理领域中,将借助脉冲激光束通过轰击从工件表面除去材料称为激光烧蚀。

[0006] 传递给工件的激光光子能量可造成化学键断开,在非金属的情况下短激光脉冲还可引起库仑爆炸。这意味着电子离开固体 (solid body),库仑斥力使一部分剩余的正离子加速离开表面。

[0007] 使用纳秒范围的激光脉冲时,在激光脉冲持续过程中激光能量致使表面升温(在原子热运动的意义上)。由于有限的热传导仅允许向体内缓慢地传递能量,因而辐射能量集中于非常小的区域。因而,工件在该区域达到非常高的温度,可能出现材料的急剧气化。使用大功率密度的激光时,通过热电离或直接由激光光子引起的电离,可产生被去除材料的电子和离子的等离子体,等离子体离子可加速达到超过 100eV 的能量。

[0008] 将可实现烧蚀的最小功率或能量密度(在给定的波长和脉冲宽度下)称为烧蚀阈值。采用高于该阈值的能量密度时,烧蚀速度明显提高。

[0009] 因而,激光烧蚀例如可代替硬质材料的机械刻印用于材料的目标去除或用于钻出极小的孔洞。作为选择,被去除的材料还可用于涂覆另一工件的表面,这些技术称为脉冲激光沉积 (Pulsed Laser Deposition) (PLD) 或激光转印膜 (Laser Transfer Film) (LTF)。

[0010] 激光烧蚀的缺点在于:在激光烧蚀过程中以及之后不久,被抛起的熔体、飞溅物和冷却凝固产生的物质的细小颗粒常常作为堆积物沉积在加工区周围。可通过工艺气体将这些分解产物从加工位置除去。然而,通常,在采用激光工艺进行加工的过程中这些分解产物表现出负面效应并构成加工结果质量的决定性因素。

[0011] 通常,通过设定激光参数以及与工艺气体反应努力使这些效应最小化。在多种材料待加工的情况下,可利用吸收特性,在短时间内采用高的激光强度照射所述材料。通常,通过将激光聚焦于工件表面,来实现激光能量的最大耦合。辐射向热量的能量转换具有在

那里形成热影响区的效应,其中热效应造成所需的加工结果。然而,由此,热传导和对流造成的强烈热过程以及气化和等离子体的形成可能对周围区域造成负面效应。

[0012] 在材料的比导热系数小而导致热量分布不佳的情况下,在边界面和 / 或周围区域可能出现过热,结果使得材料经历不期望的结构变化。特别是在非晶态和结晶材料(例如玻璃、陶瓷和结晶金属如硅)的情况下,问题在于这种高能输入可造成负面效应例如应力和开裂,从而损害待加工材料的质量。

[0013] 如果激光束以基谐模式(TEM₀₀模式)振荡,则激光束可以最佳的可行方式聚焦,且其能量分布遵循高斯曲线。通过借助聚焦透镜适当地设定焦距,可实现 40 μm 至 120 μm 的最小光束直径并使光束射向工件表面。按照常规,当焦点设置在工件表面上时,最大激光束脉冲功率密度(J/cm²)作用于工件。如果激光束的焦平面没有位于工件表面上,则脉冲功率密度可能过低,结果激光束仅仅使表面升温,而没有在材料中引起任何永久性的变化。

[0014] 如果在聚焦于表面时吸收能超过阈值,则能量输入引起材料的相变。尽管由此引起的变化不一定伴随材料聚集状态的改变,但材料表面的升温导致在工件中形成温度场。大的温度梯度引起热应力,冷却阶段之后热应力常常作为残余应力保留在工件中。然而,由于升温阶段热膨胀引起的塑性变形(低于 450℃ 的温度下),机械应力也可能保留在固体中。然而,热影响区中形成的结构变化还可留下光学可见的缺陷,例如形成弧坑、空腔和微裂纹。

[0015] 所有用激光束加工材料的已知方法的共同特征在于:使激光束射在材料表面上,所述材料吸收激光波长并允许尽可能少的光穿过。由此产生的效果是光仅仅透过材料到达较小的深度且热影响区由受辐照表面决定。热影响区的局部限定还具有限制向材料进行绝对能量传递的作用。另外,单位时间可去除的材料量取决于热影响区的大小。另一方面,通常不期望增大受辐照表面并且不期望通过提高激光功率对此进行补偿来获得所需的脉冲功率密度。原因在于:当将要获得特别精密的加工结果时,例如在极精细或微观切口、孔洞、标记等的情况下,用激光束加工材料通常精确地进行。

发明内容

[0016] 因而,本发明的目的是提供用高能辐射加工材料的改进方法,其中在不明显损害加工结果的情况增大热影响区。

[0017] 根据本发明,提供用高能辐射加工材料的方法,其中用高能辐射,具体地用激光束照射聚合物基体,其中辐射聚焦在焦点上,设置所述焦点以使其位于面向辐射的聚合物基体表面之后,并在聚合物基体上引起材料的去除,从而在聚合物基体内形成反应空间。

[0018] 在这种情况下,待加工材料可以是聚合物基体本身或与聚合物基体接触且可透过辐射波长的工件,优选玻璃基材。

[0019] 用于实现该目的的聚合物基体是基于聚合物成分的任意基体。除了聚合物成分以外,基体还可包括任意所需的非聚合物成分,仅要求主要成分应在性质上为聚合的。具体地,术语“聚合物基体”还表示基础聚合物的混合物。在特别优选的实施方案中,聚合物基体为热固性聚合物基体。已证实热固性材料特别适用于形成反应空间。

[0020] 本发明的方法引起聚合物基体的材料去除,进而形成反应空间。本申请中的术语“反应空间”是适于容纳可能在该反应空间中发生的所需反应的反应物的空腔。在反应空间

形成过程中这些反应物优选由形成反应空间的聚合物基体区域的材料形成。

[0021] 反应空间的形成具有增大热影响区的作用,而加工没有因此明显受损。这是因为辐射射入反应空间区域的深度大于射入不含反应空间的聚合物基体的深度。优选地,在形成反应空间之后,粉状反应物存在于反应空间内,反应空间内粉状反应物与聚合物基体中的结合形式的 (bound form) 反应物相比更大程度地吸收辐射。

[0022] 出于多种原因,有利的是反应空间在空间上由聚合物基体和接触聚合物基体并可透过辐射波长的工件(优选玻璃基材)两者限定。一方面,工件可以是待加工例如待标记或标注的实际材料。另一方面,反应空间因此在空间上完全封闭,没有对聚合物基体的表面开放。因而,反应物不能够离开反应空间,从而在反应空间形成之后可全部用于在反应空间内进行所需的反应。可能期望,在材料去除之后反应物存在于反应空间内,且反应空间内的反应物在用高能辐射(具体地用激光束)照射反应空间的条件下反应形成产物。

[0023] 聚合物基体例如可具有钛供体以及碳供体。适宜的钛供体有纯钛或含钛化合物,所述含钛化合物具有经受能量作用时在短时间内提供游离钛作为反应物的能力 (affinity)。在适当的情况下,还可经由含钛中间体提供游离钛。碳供体提供游离碳(特别是在能量辐射下)。碳供体可以是含碳化合物和/或未结合的游离碳。可通过聚合物基体本身提供碳供体,或者可存在例如炭黑形式的附加碳组分。另外,聚合物基体还可包括诸如聚合物、吸收剂等其它组分。由于辐射的作用,例如通过破坏含钛化合物和含碳化合物来提供钛和碳反应物,这些反应物当在反应空间内经受辐射作用时形成所需的碳化钛产物。优选地,在 700°C 至 2200°C 的局部温度下,用炭黑或超纯石墨还原二氧化钛,形成碳化钛和一氧化碳。是辐射产生了在反应空间中进行反应所需的温度。

[0024] 形成聚合物基体,使得聚合物基体主要通过粉化 (pulverization) 响应激光辐射,从而释放出各反应物(更具体的,钛和碳),并使所述反应物可进行反应而形成碳化钛。

[0025] 例如,对于标记诸如玻璃基材等工件而言,优选的是,当用高能辐射,具体地用激光束照射反应空间时,由反应物产生的产物例如碳化钛沉积在与聚合物基体接触的工件例如玻璃基材上。因而,辐射在穿过可透过辐射波长的工件之后撞击在聚合物基体或反应空间上。

[0026] 反应空间优选具有直径为 20-200 μm 及深度为 10-100 μm 的空间范围。已证实在反应空间具有直径为约 70 μm 及深度为约 40 μm 的空间范围时获得最佳结果。用作辐射源的是波长为 1060nm 或 1064nm 的纤维耦合二极管端泵浦激光器 (fibre-coupled diode end pumped laser),该激光器具有 12W 的输出功率。

[0027] 在该方法的优选实施方案中,通过第一激光脉冲形成反应空间,然后用第二激光脉冲照射该反应空间。因而,第一激光脉冲形成反应空间和优选存在于反应空间内的粉状反应物,并通过第二激光脉冲辅助反应物反应生成所需的产物,优选地通过爆炸性气化 (explosive vaporization) 将产物推至邻接反应空间的透明工件的表面上。

[0028] 此外,有利的是,通过用高能辐射(具体地用激光束)照射聚合物基体,在聚合物基体内形成在局部彼此相邻排列的多个反应空间。在这种情况下,辐射优选为脉冲束,在辐射过程中使脉冲束相对于聚合物基体横向移动或者使聚合物基体相对于脉冲束横向移动。在本文中,有利的是相邻的反应空间的空间范围重叠至少 25%。在这种情况下,脉冲频率以及脉冲束和聚合物基体之间的相对移动速度即标注速度相应地相互配合。因此,可形成反

应空间的邻接结构,例如线或表面区域。这可能是有利的,特别是在标记或标注工件的情况下。

[0029] 优选用脉冲激光器并以 10kHz-300kHz 的脉冲频率 (pulse rate) 产生辐射。例如为了在工件上获得线状或二维标记或标注,高脉冲频率是有利的,无论是使激光束相对于工件和聚合物基体横向移动还是使工件和聚合物基体相对于激光束横向移动。因而甚至以高的标注速度实现激光脉冲的重叠,以形成具有最高可能质量的线状或二维结构。另外,在较高的脉冲频率下,使反应空间反复经受激光脉冲的作用,以便可耦合更多的辐射能量。

[0030] 在本发明的方法中,辐射聚焦于焦点,设置辐射的焦点以使其位于面向辐射的聚合物基体表面之后。在这种情况下,优选在焦点区域内形成反应空间。然而,焦点还可位于聚合物基体中更深的位置或甚至位于聚合物基体之后。具体地,在材料层限定反应空间的情况下,可能有利的是,设置焦点以使聚合物基体表面处的辐射功率密度小于 $3\text{J}/\text{cm}^2$ 。在本文中表面相应于在形成反应空间之前沿聚合物基体表面的平面。在工件与聚合物基体接触的情况下,表面相应于由工件形成的反应空间边界。这使得工件免受不良热效应,即不存在工件质量的永久损害而仅仅是热效应。为了同时实现反应空间的有效形成和所需的反应,有利的是设置焦点以使反应空间内的最大辐射功率密度为至少 $5\text{J}/\text{cm}^2$,优选至少 $10\text{J}/\text{cm}^2$ 。因而,与已知方法相比,本发明方法的优势在于:有意设置离焦 (defocusing),即特别地将焦点设置于工件表面而是设置于更深的聚合物层面或设置于聚合物基体之后。

[0031] 从而激光束焦点处的最大脉冲功率密度没有位于边界层。由此保证最大能量输入引入与边界层相距一定距离的材料且不良热效应不会影响邻接的工件。

[0032] 另外,离焦还使激光能量引起空腔内反应物的有效转变,因为能量转化直接发生在粉状反应物处。

[0033] 实现具有最大可能局部分辨率的材料加工的常规方法通常将辐射聚焦于工件表面或设置最小可能的离焦。如果焦点位置位于工件表面的前面则称为负离焦,如果焦点位置位于工件表面之后则称为正离焦。因而,为了实现本发明的目的,应设置正离焦。

[0034] 尽管离焦使得聚合物基体表面或与其接触的工件中的光束直径增大,但本发明方法没有常规方法的输入材料的能量过低的效应,而是形成反应空间,从而允许辐射将能量引入更深的平面。由于在边界层处没有产生可能有害于相邻工件的最大热效应,因而是有利的。

[0035] 采用设定的光束截面时,产生在层上部的区域引起受控解聚的脉冲能量密度。只有在基体中形成的空腔深度较大时才能够获得最大脉冲功率密度。因而,最大能量输入仅引入较深的平面。

[0036] 空腔中产生的颗粒大部分在较深的弧坑区域中直接从固相转变为气相。解聚产生的反应物由于受热而反应形成所需的产物,产物由于爆炸和 / 或气体喷射而被高速吹离该相互作用区域并撞击在玻璃表面上。因而,该相互作用区域作为局部限定的反应空间,在该反应空间中激光束基本上完全转化为热能。

[0037] 采用本发明的方法可消除对玻璃基材的任意有害作用,例如应力、开裂和热效应引起的气化。将该方法用于标记或标注玻璃基材时,离焦引起的沉积标记或标注的边缘锐度的降低可忽略不计。

[0038] 因此,本发明包括以下实施方式:

[0039] 实施方式 1. 一种用高能辐射加工材料的方法,其中用高能辐射,具体地用激光束(9)照射聚合物基体(1),其中所述辐射聚焦于焦点(11),设置所述焦点(11)以使其位于面向所述辐射的聚合物基体表面(3)之后,并引起所述聚合物基体(1)的材料去除,从而在所述聚合物基体(1)内形成反应空间(13)。

[0040] 实施方式 2. 实施方式 1 的方法,其中在材料去除之后反应物(15,17)出现在所述反应空间(13)中,所述反应空间(13)内的反应物(15,17)在用高能辐射,具体地用激光束(9)照射反应空间(13)时反应,从而形成产物(19)。

[0041] 实施方式 3. 实施方式 1 或 2 的方法,其中所述反应空间(13)空间上由所述聚合物基体(1)和工件(7)限定,所述工件(7)与所述聚合物基体(1)接触并可透过所述辐射的波长,优选玻璃基材(7),所述辐射在穿过工件(7)之后撞击到聚合物基体(1)上。

[0042] 实施方式 4. 实施方式 2 或 3 的方法,其中当用高能辐射,具体地用激光束(9)照射所述反应空间(13)时,所述产物(19)沉积在所述工件(7)上,所述工件(7)与聚合物基体(1)接触并可透过所述辐射的波长。

[0043] 实施方式 5. 前述任一项实施方式的方法,其中形成所述反应空间(13),以使所述反应空间(13)具有直径为 20-200 μm ,优选约 70 μm 且深度为 10-100 μm ,优选约 40 μm 的空间范围。

[0044] 实施方式 6. 前述任一项实施方式的方法,其中通过脉冲激光束(9)的第一脉冲形成所述反应空间(13),并用脉冲激光束(9)的第二脉冲照射所述反应空间(13)。

[0045] 实施方式 7. 前述任一项实施方式的方法,其中通过用高能辐射,具体地用激光束(9)照射所述聚合物基体(1),在所述聚合物基体(1)内形成在局部相邻排列的多个反应空间(13)。

[0046] 实施方式 8. 实施方式 7 的方法,其中所述辐射为脉冲激光束(9),在照射过程中使所述脉冲束(9)相对于所述聚合物基体(1)横向移动或使所述聚合物基体(1)相对于所述脉冲束(9)横向移动。

[0047] 实施方式 9. 实施方式 7 或 8 的方法,其中形成所述反应空间(13),以使相邻反应空间(13)的空间范围重叠至少 25%。

[0048] 实施方式 10. 前述任一项实施方式的方法,其中所述辐射用脉冲激光(9)并以 10kHz 至 300kHz 的脉冲频率产生。

[0049] 实施方式 11. 前述任一项实施方式的方法,其中所述焦点(11)位于反应空间(13)内、位于聚合物基体(1)内或位于聚合物基体(1)之后。

[0050] 实施方式 12. 前述任一项实施方式的方法,其中设置所述焦点(11),以使所述聚合物基体(1)的表面(3)处的辐射功率密度小于 $3\text{J}/\text{cm}^2$ 。

[0051] 实施方式 13. 前述任一项实施方式的方法,其中设置所述焦点(11),以使所述反应空间(13)内的最大辐射功率密度为至少 $5\text{J}/\text{cm}^2$,优选至少 $10\text{J}/\text{cm}^2$ 。

[0052] 实施方式 14. 实施方式 4 至 13 中任一项的方法用于标记或标注工件(17)的用途,所述工件(7)可透过所述辐射的波长。

[0053] 以下参照附图更详细地说明有利的示例性实施方案。

附图说明

[0054] 图 1a 至 1d 示出根据本发明的方法在与玻璃基材接触的聚合物基体中形成反应空间的各个阶段。

具体实施方式

[0055] 图 1a 示出了聚合物基体 1, 该聚合物基体 1 的表面 3 与玻璃基材 7 的表面 5 直接接触。聚焦脉冲激光束 9 形式的高能辐射穿过玻璃基材 7 射到聚合物基体 1 的表面 3 上。玻璃基材 7 可透过辐射波长, 而聚合物基体 1 几乎完全吸收辐射。设定图 1a 中激光束 9 的虚焦点 11, 以使该焦点 11 精确地在聚合物基体 1 的内部在聚合物基体 1 的表面 3 之后与聚合物基体 1 的表面 3 或玻璃基材 7 的表面 5 相距一定距离, 从而实现正离焦。出于示例的目的, 在图 1a 中由虚线表示虚焦点 11。出于示例的目的, 放大激光束 9 的聚焦强度。因而, 不是最大脉冲功率密度而仅是小于 $3\text{J}/\text{cm}^2$ 的脉冲功率密度撞击在表面 3 上, 这是因为由于正离焦受辐照表面的面积大于焦点 11 处的面积。小于 $3\text{J}/\text{cm}^2$ 的脉冲功率密度具有如下效果: 相邻的玻璃基材 7 及其表面 5 免受负面影响且没有遭受任何有害的热影响。另一方面, 聚合物基体 1 的表面区域 3 吸收高能辐射并升温, 直至热能大到使聚合物基体 1 粉化。聚合物基体 1 的粉化区域至少部分地可透过辐射。在表面区域 3 粉化过程中, 激光束 9 到达较大的穿透深度, 从而到达较深的区域。由于正离焦, 激光束 9 在这种情况下更强烈地聚焦于更深的区域, 从而具有较大的脉冲功率密度并传递给构成聚合物基体 1 的材料。在经受激光束 9 作用时, 该过程持续进行直至焦点 11 并超出, 从而形成反应空间 13。形成反应空间 13 所需的作用时间可相应于激光束 9 的第一脉冲的持续时间。

[0056] 在图 1b 中, 反应空间 13 达到其所需的尺寸, 在反应空间 13 内实现超过 $10\text{J}/\text{cm}^2$ 的最大脉冲功率密度。图 1a 中的虚焦点 9 变为图 1b 中反应空间 13 内的实焦点 9。这并不是必需的, 因为可通过经受激光束作用的时间设定反应空间 13 的尺寸。焦点 9 可在整个方法过程中保持为虚焦点, 甚至位于聚合物基体 1 以外或聚合物基体 1 之后。在反应空间 13 内, 反应物 15、17 以粉状物质的形式存在并提供所需的反应。在该实施方案中, 反应物 15、17 为二氧化钛 15 和炭黑形式的纯碳 17。

[0057] 图 1c 示出了优选示例性实施方案的下述阶段: 例如由于激光束 9 的第二脉冲的作用, 反应物 15、17 发生反应, 形成产物 19。在这种情况下, 在辐射引起的 700°C 至 2200°C 的局部温度下在反应空间 13 内用纯碳 17 还原二氧化钛 15, 形成产物碳化钛 19。

[0058] 如图 1d 所示, 进一步经受激光束 9 的第二脉冲形式的辐射具有在反应空间 13 内引起粉化物质爆炸性气化的效果。在这种情况下, 所产生的碳化钛 19 被推至玻璃基材 7 的表面 5 并沉积于其上。沉积于玻璃基材 7 上的碳化钛 19 例如可作为玻璃基材 7 的标记或标注。

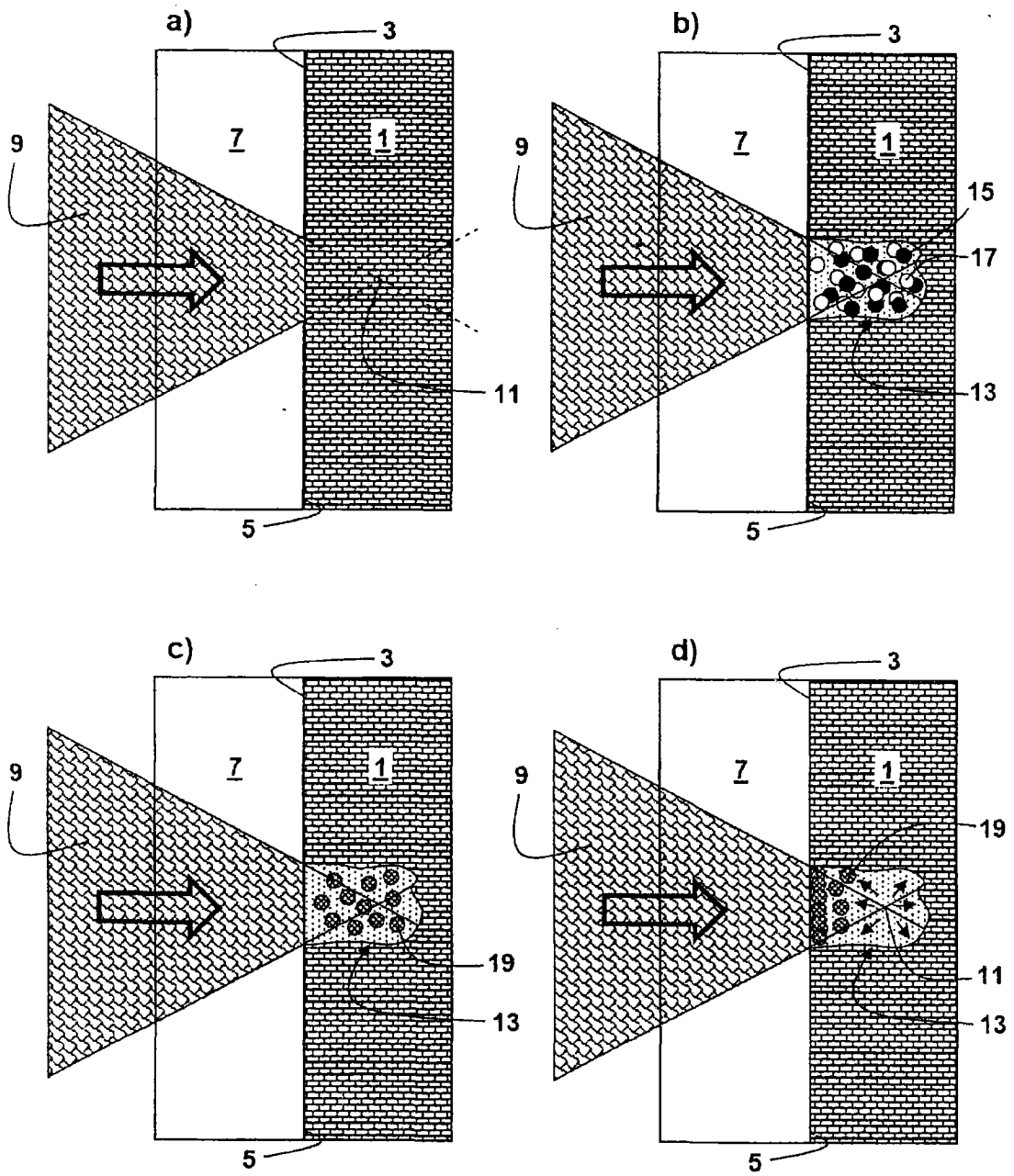


图 1