



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102939184 A

(43) 申请公布日 2013. 02. 20

(21) 申请号 201180022023. 7

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2011. 05. 04

B23K 26/38 (2006. 01)

(30) 优先权数据

61/331, 242 2010. 05. 04 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2012. 10. 31

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2011/035207 2011. 05. 04

(87) PCT申请的公布数据

W02011/140229 EN 2011. 11. 10

(71) 申请人 ESI- 派罗弗特尼克斯雷射股份有限
公司

地址 加拿大魁北克省

(72) 发明人 理察·慕里森 马修·瑞考

(74) 专利代理机构 北京银龙知识产权代理有限
公司 11243

代理人 许静 安利霞

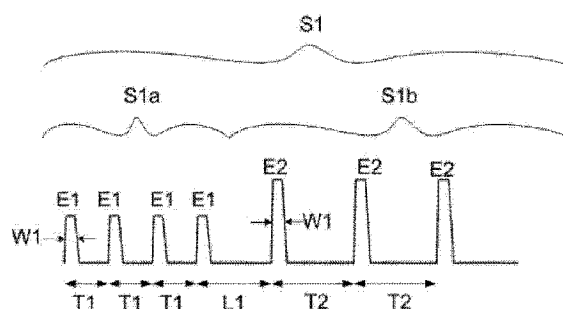
权利要求书 4 页 说明书 16 页 附图 11 页

(54) 发明名称

用于使用激光脉冲序列钻孔的方法和装置

(57) 摘要

提供了在材料中钻孔的激光脉冲序列, 每个脉冲以一个或多个预定的脉冲特征为特征, 所述脉冲特征包括波长、脉冲能量、脉冲间时间间隔、脉冲宽度或脉冲形状。通过将该激光脉冲序列的焦点放置在孔将被钻出的位置处来实现在材料中钻孔。该序列中的一个或多个激光脉冲的一个或多个特征改变, 以便优化钻孔过程。改变该脉冲序列中的一个或多个激光脉冲的特征以优化钻孔过程的能力导致具有期望的属性的孔和高钻孔速率。



1. 一种使用多个激光脉冲在材料中钻孔的方法,所述方法包括:

提供第一组激光脉冲,所述激光脉冲中的每个以第一脉冲能量、第一脉冲宽度、第一脉冲形状、第一波长和第一脉冲间时间间隔为特征;

提供第二组激光脉冲,所述激光脉冲中的每个以第二脉冲能量、第二脉冲宽度、第二脉冲形状、第二波长和第二脉冲间时间间隔为特征,其中至少有下列项之一:所述第二脉冲能量不同于所述第一脉冲能量,所述第二脉冲宽度不同于所述第一脉冲宽度,所述第二脉冲形状不同于所述第一脉冲形状,或所述第二波长不同于所述第一波长;

定向所述第一组激光脉冲以射在激光焦点处;

定向所述第二组激光脉冲以射在所述激光焦点处;以及

在所述材料中钻孔。

2. 如权利要求1所述的方法,其中所述多个激光脉冲由单个激光器提供。

3. 如权利要求1所述的方法,其中所述第一波长等于所述第二波长。

4. 如权利要求3所述的方法,其中所述第一波长和所述第二波长是1064nm。

5. 如权利要求1所述的方法,其中在所述第一组激光脉冲的最后一个脉冲和所述第二组激光脉冲的第一脉冲之间的时间小于所述第一脉冲间时间段或所述第二脉冲间时间段中的较大者的五倍。

6. 如权利要求1所述的方法,还包括:

在提供所述第一组激光脉冲之前确定所述第一脉冲能量、所述第一脉冲宽度和所述第一脉冲形状;以及

在提供所述第二组激光脉冲之前确定所述第二脉冲能量、所述第二脉冲宽度和所述第二脉冲形状,其中至少所述第二脉冲能量不等于所述第一脉冲能量,所述第二脉冲宽度不等于所述第一脉冲宽度,或所述第二脉冲形状与所述第一脉冲形状不相同。

7. 如权利要求6所述的方法,还包括:

在提供所述第一组激光脉冲之前确定所述第一波长和所述第一脉冲间时间间隔;以及在提供所述第二组激光脉冲之前确定所述第二波长和所述第二脉冲间时间间隔。

8. 如权利要求1所述的方法,其中所述材料包括半导体或硅中的至少一个。

9. 如权利要求1所述的方法,其中所述第二波长和所述第二波长中的至少一个小于1064nm。

10. 如权利要求1所述的方法,其中所述第一脉冲宽度等于所述第二脉冲宽度,且所述第一脉冲形状与所述第二脉冲形状相同。

11. 如权利要求1所述的方法,其中所述第一脉冲能量与所述第二脉冲能量相同,且所述第一脉冲形状与所述第二脉冲形状相同。

12. 如权利要求1所述的方法,其中所述第一脉冲能量和所述第二脉冲能量每个大于0.05mJ并小于2mJ。

13. 如权利要求1所述的方法,其中所述第一脉冲宽度和所述第二脉冲宽度每个大于20ns并小于5000ns。

14. 如权利要求1所述的方法,其中在所述第一组激光脉冲的最后一个脉冲和所述第二组激光脉冲的第一脉冲之间的时间实质上与所述第一脉冲间时间间隔相同。

15. 如权利要求1所述的方法,其中在所述第一组激光脉冲的最后一个脉冲和所述第

二组激光脉冲的第一脉冲之间的时间实质上与第二脉冲间时间间隔相同。

16. 一种使用光脉冲序列在材料中钻孔的方法,所述光脉冲中的每个以波长为特征,所述方法包括:

提供一个或多个第一光脉冲作为第一组脉冲,所述第一光脉冲中的每个以第一脉冲能量、第一脉冲宽度和第一脉冲形状为特征;

提供一个或多个第二光脉冲作为第二组脉冲,所述第二光脉冲中的每个以第二脉冲能量、第二脉冲宽度和第二脉冲形状为特征;

提供一个或多个第三光脉冲作为第三组脉冲,所述第三光脉冲中的每个以第三脉冲能量、第三脉冲宽度和第三脉冲形状为特征;

定向所述第一组脉冲以射在所述材料上的一位置处;

定向所述第二组脉冲以射在所述材料上的所述位置处;

定向所述第三组脉冲以射在所述材料上的所述位置处;以及
在所述材料中的所述位置处钻孔。

17. 如权利要求 16 所述的方法,还包括:

在提供所述第一组脉冲之前确定所述第一脉冲能量、所述第一脉冲宽度和所述第一脉冲形状;

在提供所述第二组脉冲之前确定所述第二脉冲能量、所述第二脉冲宽度和所述第二脉冲形状;以及

在提供所述第三组脉冲之前确定所述第三脉冲能量、所述第三脉冲宽度和所述第三脉冲形状,其中至少所述第二脉冲能量不等于所述第一脉冲能量,所述第二脉冲宽度不等于所述第一脉冲宽度,或所述第二脉冲形状与所述第一脉冲形状不相同。

18. 如权利要求 17 所述的方法,其中所述第二脉冲能量不等于所述第三脉冲能量,所述第二脉冲宽度不等于所述第三脉冲宽度,或所述第二脉冲形状与所述第三脉冲形状不相同。

19. 如权利要求 16 所述的方法,其中所述材料包括至少半导体或硅。

20. 如权利要求 16 所述的方法,其中:

所述第一脉冲能量在 0.05mJ 和 2mJ 之间;

所述第二脉冲能量在 0.05mJ 和 2mJ 之间;以及

所述第三脉冲能量在 0.05mJ 和 2mJ 之间。

21. 如权利要求 16 所述的方法,其中:

所述第一脉冲宽度在 20ns 和 5 μ s 之间;

所述第二脉冲宽度在 20ns 和 5 μ s 之间;以及

所述第三脉冲宽度在 20ns 和 5 μ s 之间。

22. 一种使用激光脉冲序列在材料中钻孔的方法,所述方法包括:

提供包括第一组激光脉冲和第二组激光脉冲的所述激光脉冲序列,所述第一组激光脉冲以第一波长、第一脉冲能量、第一脉冲宽度和第一脉冲形状为特征,以及所述第二组激光脉冲以第二波长、第二脉冲能量、第二脉冲宽度和第二脉冲形状为特征,其中所述第一激光脉冲序列至少在波长、脉冲能量、脉冲宽度或脉冲形状中的至少一个上不同于所述第二激光脉冲序列;

定向所述第一组激光脉冲序列中的第一脉冲以射在所述材料上的第一钻孔位置处；

定向所述第一组激光脉冲序列中的随后的脉冲以射在所述材料上的随后的钻孔位置处；

定向所述第二组激光脉冲序列中的第一脉冲以射在所述材料上的所述第一钻孔位置处；以及

定向所述第二组激光脉冲序列中的随后的脉冲以射在所述材料上的所述随后的钻孔位置处。

23. 如权利要求 22 所述的方法,还包括：

提供第三组激光脉冲,所述第三组激光脉冲以第三波长、第三脉冲能量、第三脉冲宽度和第三脉冲形状为特征,其中所述第三激光脉冲序列至少在波长、脉冲能量、脉冲宽度或脉冲形状中的至少一个上不同于至少所述第一激光脉冲序列或所述第二激光脉冲序列；

定向所述第三组激光脉冲序列中的第一脉冲以射在所述材料上的所述第一钻孔位置处；以及

定向所述第三组激光脉冲序列中的随后的脉冲以射在所述材料上的所述随后的钻孔位置处。

24. 如权利要求 23 所述的方法,其中所述第三激光脉冲序列在脉冲宽度上不同于至少所述第一激光脉冲序列或所述第二激光脉冲序列。

25. 如权利要求 23 所述的方法,其中所述第三激光脉冲序列在脉冲形状上不同于至少所述第一激光脉冲序列或所述第二激光脉冲序列。

26. 如权利要求 23 所述的方法,其中所述第三激光脉冲序列在脉冲能量上不同于至少所述第一激光脉冲序列或所述第二激光脉冲序列。

27. 如权利要求 22 所述的方法,其中所述第二激光脉冲序列在脉冲宽度上不同于所述第一激光脉冲序列。

28. 如权利要求 22 所述的方法,其中所述第二激光脉冲序列在脉冲形状上不同于所述第一激光脉冲序列。

29. 如权利要求 22 所述的方法,其中所述第二激光脉冲序列在脉冲能量上不同于所述第一激光脉冲序列。

30. 一种使用激光脉冲序列在材料中钻孔的方法,所述方法包括：

提供激光脉冲序列,所述激光脉冲序列包括以第一波长、第一脉冲能量、第一脉冲宽度和第一脉冲形状为特征的第一激光脉冲,以第二波长、第二脉冲能量、第二脉冲宽度和第二脉冲形状为特征的第二激光脉冲,以及以第三波长、第三脉冲能量、第三脉冲宽度和第三脉冲形状为特征的第三激光脉冲,其中所述第一激光脉冲在波长、脉冲能量、脉冲宽度或脉冲形状中的至少一个上不同于所述第二激光脉冲,而所述第三激光脉冲在波长、脉冲能量、脉冲宽度或脉冲形状中的至少一个上不同于所述第一激光脉冲和所述第二激光脉冲中的至少一个；

定向所述第一激光脉冲以射在所述材料上的钻孔位置处；

定向所述第二激光脉冲以射在所述材料上的所述钻孔位置处；以及

定向所述第三激光脉冲以射在所述材料上的所述钻孔位置处。

31. 如权利要求 30 所述的方法,还包括：

提供随后组的激光脉冲序列;以及

将所述随后组的激光脉冲序列定向在随后的钻孔位置处。

32. 如权利要求 30 所述的方法,其中所述第三激光脉冲在脉冲宽度上不同于至少所述第一激光脉冲或所述第二激光脉冲。

33. 如权利要求 30 所述的方法,其中所述第三激光脉冲在脉冲形状上不同于至少所述第一激光脉冲或所述第二激光脉冲。

34. 如权利要求 30 所述的方法,其中所述第三激光脉冲在脉冲能量上不同于至少所述第一激光脉冲或所述第二激光脉冲。

35. 如权利要求 30 所述的方法,其中所述第二激光脉冲在脉冲宽度上不同于所述第一激光脉冲。

36. 如权利要求 30 所述的方法,其中所述第二激光脉冲在脉冲形状上不同于所述第一激光脉冲。

37. 如权利要求 30 所述的方法,其中所述第二激光脉冲在脉冲能量上不同于所述第一激光脉冲。

用于使用激光脉冲序列钻孔的方法和装置

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求 2010 年 5 月 4 日提交的美国临时专利申请号 61/331,242 的优先权,该临时专利申请的公开特此为了所有目的通过引用被全部并入。

[0003] 发明背景

[0004] 脉冲激光源例如 Nd:YAG 激光器用于对诸如打标、雕刻、微加工和切割的应用执行基于激光的材料处理。以大于每脉冲 0.5mJ 的脉冲能量为特征的很多现有的高功率脉冲激光器依赖于诸如 Q 开关和锁模的技术以产生光脉冲。然而,这样的激光器产生具有由腔几何结构、反射镜反射率等预先确定的特征的光脉冲。因此,这样的激光脉冲通常不能在不危害激光器性能的情况下在场中变化。使用这样的激光器,通常很难实现可变脉冲特征的范围。

[0005] 因此,在本领域中需要涉及脉冲激光源和对这样的脉冲激光源的应用的改进的方法和系统。

[0006] 发明概述

[0007] 本发明通常涉及材料的激光处理。更具体地,本发明涉及使用激光脉冲序列的方法和装置,该激光脉冲序列的属性被特别确定以在激光处理应用中提供提高的处理质量和更高的吞吐量。本发明还涉及使用激光脉冲序列在各种材料中钻孔。然而,本发明具有更广泛的适用性,并可应用于其它应用和材料。

[0008] 脉冲激光源例如 Nd:YAD 激光器用于对诸如打标、雕刻、微加工、切割和钻孔的应用执行基于激光的材料处理。激光器被通常使用的一个这样的过程是在材料中钻小孔。这些小孔有时被称为“通孔”。这些孔可以是完全穿过材料的透眼,或它们可以是在一侧上开始但在材料内的某个点处结束的盲孔。激光器可用于在各种材料中钻孔,这些材料例如包括:半导体例如硅、金属例如铜、陶瓷例如硅石、玻璃和各种其它材料。激光器也用于在由多层不同的材料组成的样本例如由交替的介电质层和铜层组成的电路板中钻孔。

[0009] 使用激光器在样本中钻孔的一种技术是冲击钻孔。在冲击钻孔中,来自激光器的光的一个或多个脉冲被聚焦、成像或定向在材料上的位置,在该位置上需要钻孔。聚焦、成像或定向在材料处的光形成在本文称为激光焦点的斑点。每个脉冲移除一些材料,直到孔达到期望深度或直到孔完全穿过材料。用于冲击钻孔的激光器一般传送具有相等的能量和重复率的激光脉冲流(在该序列内的每个脉冲在时间上相等地远离前一个脉冲和后一个脉冲)。当使用冲击钻孔钻多于一个的孔时,通常有三种方案,在这些方案下激光脉冲可被传送到材料。这些方案包括(i)将第一脉冲序列定向在第一孔,直到该孔完成,并接着将第二脉冲序列定向在第二孔,直到该孔完成,依此类推,直到所有孔完成;或(ii)将第一脉冲定向在第一孔,接着将第二脉冲定向在第二孔,接着将第三脉冲定向在第三孔,依此类推,直到一个脉冲定向在每个孔,并接着重复该序列,直到所有孔完成,或(iii)将第一脉冲序列定向在第一孔,接着将第二脉冲序列定向在第二孔,依此类推,直到脉冲序列定向在每个孔,接着重复该序列,直到所有孔完成。方案(i)称为单行程钻孔过程,而方案(ii)和(iii)称为多行程过程。虽然在一些情况下可能使用来自激光器的仅仅一个脉冲穿过非常薄的材

料钻孔,一般,激光钻孔需要两个或多个激光脉冲的序列。

[0010] 对于钻孔,激光器具有很多优点。激光束可被聚焦到非常小的焦点,以非常快地钻小孔和钻每个孔。激光钻孔是非接触过程,其中激光束可使用包括透镜、反射镜和其它定向装置的光学系统来被远程地定向,或可选地,样本本身可被移动。这样的定向装置可以是被控制成使得光束的重新定位每秒可完成很多次的计算机。因此,使用激光器可以在短时间内段内钻很多孔。激光的参数例如脉冲能量、脉冲宽度(也称为脉冲长度)、时间脉冲形状、峰值功率、平均功率、重复率一般被选择为最佳值,以对期望应用获得最理想的孔属性。这常常意味着为每个应用选择不同的激光器,因为对于很多激光器,激光的参数通常不能在宽范围内也不能独立于彼此而被调节。

[0011] 激光参数包括确定脉冲之间的时间间隔的脉冲重复率。对于很多激光器,重复率的变化也导致脉冲能量的变化。脉冲能量的这个变化可影响正被钻的孔的质量、吞吐量或其它特性。然而,脉冲间间隔本身在很多情况下较不重要,如果脉冲间间隔应改变,则暗示脉冲能量的附随的变化。因此,常常有在钻多个孔时可得到的某种灵活性,使得如果脉冲序列需要钻孔,提供在单独的脉冲之间的时间间隔实际上可能并不要紧,可依靠激光脉冲的其它参数作为期望的参数。本领域的技术人员将认识到,存在庞大数量的变换,在这些变换中, N 个序列的 X 个脉冲可被传送到 N 个孔,以及在那些变换的一些中定向在任一个特定的孔处的序列中的单独脉冲之间的时间间隔可能是高度不规则的。

[0012] 脉冲激光器用于钻孔的一个实例是在硅晶片中钻通孔。激光器在这个特定的应用是有利的,因为在硅晶片中的通孔的所需直径可以小至 $5\mu\text{m}$,而在一些情况下(例如,对于示例性太阳能电池),需要每秒钻数百个通孔。在大部分情况下,在硅晶片中激光钻通孔是制造过程中的制造电子设备的一个步骤。在该过程中的其它步骤常常将对通孔强加质量要求,这些通孔具有某种形状,例如桶形或锥形,侧壁将是光滑的,在孔入口处的切口将具有最大高度,以及入口孔附近的碎片和残留物将被最小化,以及其它特定的要求。为了实现这些质量要求,能够预先确定和选择激光脉冲的最佳特征(包括最佳脉冲能量、脉冲宽度、脉冲重复率、峰值功率或能量、以及时间脉冲形状)是合乎需要的,如对特定的应用适当的。

[0013] 以大于每脉冲 0.1mJ 的脉冲能量为特征的很多现有的高功率脉冲激光器依赖于诸如 Q 开关和锁模的技术以产生光脉冲。这样的激光器产生具有由腔几何结构、反射镜反射率等预先确定的特征的光脉冲。使用这样的激光器,通常很难为手边的应用产生最佳脉冲宽度或脉冲形状。同样,在脉冲序列的中间序列中改变激光脉冲的一个或多个特征例如脉冲能量或重复率可能导致对该序列中的很多脉冲的不希望有的扰动,例如称为超脉动(super-pulsing)的突然的脉冲能量增加或间歇的脉冲能量波动。因此,在很多情况下,激光钻孔具有缺点。

[0014] 本发明涉及使用激光脉冲序列在材料中钻孔的方法,其中一个或多个激光脉冲的一个或多个特征在该序列中改变,以便优化该孔的钻孔过程。在图1示意性示出的一个实施方案中,激光脉冲序列 $S1$ 被提供来在材料中钻孔,其中该序列 $S1$ 包括具有 $T1$ 的脉冲间时间间隔的能量为 $E1$ 的多个脉冲,后面是脉冲间时间间隔 $L1$,接着后面是具有脉冲间时间间隔 $T2$ 的能量为 $E2$ 的另外的多个脉冲。值 $E1$ 、 $E2$ 、 $L1$ 、 $T1$ 、 $T2$ 的选择可被预先确定以优化孔的某些重要特性以及钻孔的速度。在本发明的其它实施方案中,激光脉冲序列被提供来在材料中钻孔,其中该激光脉冲序列可包含具有不同的能量或脉冲间时间间隔或脉冲宽度

或脉冲形状的脉冲,如被预先确定为优化钻孔过程的。脉冲宽度被定义为光脉冲的全宽半高 FWHM。对钻孔的该脉冲序列中的每个脉冲选择的特征被预先确定为提供由此钻出的孔的提高了特性和钻由此钻出的孔的速度(与使用脉冲序列获得的结果比较),其中在该序列中的每个脉冲的特征与该序列中的每个其它脉冲的特征相同。

[0015] 本文描述的本发明的实施方案在激光钻孔中提供了很多优点。图 2a 示出在硅晶片中的激光钻出的通孔的示意性横截面图。在材料中钻的孔以很多属性为特征。例如,通孔可具有桶形,其中入口和出口具有大致相等的尺寸。可选地,通孔可具有锥形,其中入口大于出口,如图 2a 所示。在本发明的实施方案中,脉冲序列用于钻孔,由此一个或多个脉冲特征(包括能量和脉冲间时间间隔)对该序列中的一个或多个脉冲变化,使得因而产生的孔的形状将具有特定的锥形剖面。同样,在本发明的另一实施方案中,提供脉冲序列,由此一个或多个脉冲特征(包括能量和脉冲宽度)对该序列中的一个或多个脉冲变化,使得因而产生的孔的形状将具有某种桶形剖面。在本发明的另一实施方案中,提供脉冲序列,由此一个或多个脉冲特征(包括能量、脉冲间时间间隔、脉冲宽度和时间脉冲形状)变化,使得出口孔的形状将是具有平滑边缘的圆形,且孔的侧壁将是平滑的。因为激光钻孔过程在本质上常常是烧蚀的,紧邻孔入口的表面可展示连接到称为切口的衬底的组合材料的区域。散布在孔的入口附近的表面上,可能有可连接到衬底或呈平放状态未连接的碎片或残留物。在本发明的另一实施方案中,提供脉冲序列来在材料中钻孔,其中在该序列中的初始数量的脉冲的特征被选择以减小爆炸性烧蚀效应,但当孔在硅晶片中变得更深时,该序列中的随后的脉冲被选择以增加钻孔速度,结果是由此钻出的孔的碎片、残留物和切口减小,但与当该序列中的每个脉冲的特征保持不变时获得的该孔比较,钻孔的速度高。在硅晶片中钻孔的过程中,使用其中每个脉冲的特征被预先确定以优化钻孔过程的脉冲序列而不是使用其中脉冲特征在整个序列中都是相同的脉冲序列提供由此钻出的孔的质量和还有由此产生的设备的可靠性的明显提高,以及还有钻孔的速度和因此可接受来前进到下一制造阶段中的设备的数量的产量的明显提高。

[0016] 在本发明的另一实施方案中,提供激光系统以产生激光脉冲序列来在材料中钻孔,使得在该序列中的一个或多个脉冲的一个或多个特征改变,以便优化材料中的孔的钻出。脉冲激光源包括适合于产生种子信号的种源以及具有耦合到种源的第一端口、第二端口和第三端口的光环行器。脉冲激光源还包括适合于产生成形电波形的调制器驱动器和耦合到调制器驱动器并适合于接收成形电波形的振幅调制器。振幅调制器以耦合到光环行器的第二端口的第一侧和第二侧为特征。脉冲激光源还包括以输入端和反射端为特征的第一光放大器。输入端耦合到振幅调制器的第二侧。而且,脉冲激光源包括耦合到光环行器的第三端口的第二光放大器。

[0017] 为了钻 N 个孔,激光系统提供 N 个预定的激光脉冲序列 $S_1, S_2, \dots, S_N$, 每个序列之间有足够长的时间间隔,以允许激光束从样本的一个区域重新定位,其中孔被钻到样本的相邻区域,在该相邻区域中将钻下一个孔。在设计成在均匀的材料例如硅晶片中钻相同的孔的特定实施方案中,提供激光系统以产生激光脉冲序列,使得每个激光序列将与每个其它序列相同,目标是由此钻出的每个孔大致与每个其它孔相同,且激光系统包括在处理系统中,处理系统包括将激光束定向在待钻出的每个孔并控制钻孔过程的装置。在设计成在均匀的材料例如硅晶片中钻相同的孔的特定实施方案中,提供激光系统以产生激光脉冲序

列,使得在每个序列内的某些脉冲将具有与同一序列中的其它激光脉冲明显和有意地不同的激光参数,目标是由此钻出的每个孔大致与每个其它孔相同并具有某些优选的特征,且激光系统包括在处理系统中,处理系统包括将激光束定向在待钻出的每个孔并控制钻孔过程的装置。在设计成在均匀的材料例如硅晶片中钻 N 个不同的孔的特定实施方案中,提供激光系统以产生 N 个预定的激光脉冲序列 S_1 、 S_2 、...、 S_N ,使得在一个或多个序列内的某些脉冲将具有与同一序列中的其它激光脉冲明显和有意地不同的激光参数,且某些序列将包括激光参数不同于包含在其它序列内的激光参数的脉冲,目标是由此钻出的 N 个孔中的某些将具有与晶片中的其它孔的特征不同的某些优选特征,且激光系统包括在处理系统中,处理系统包括将激光束定向在待钻出的每个孔并控制钻孔过程的装置。

[0018] 在另一实施方案中,提供激光系统以使用光束定位系统产生激光脉冲序列,使得脉冲序列 S_1 中的第一脉冲定向在第一孔,然后序列 S_1 中的第二脉冲定向在第二孔,依此类推,直到脉冲序列 S_1 中的最后一个脉冲定向在最后一个孔;此后脉冲序列 S_2 中的第一脉冲定向在第一孔,然后序列 S_2 中的第二脉冲定向在第二孔,依此类推,直到脉冲序列 S_2 中的最后一个脉冲定向在最后一个孔;依此类推,直到每个孔具有定向在其处的完整序列。在总脉冲序列中的任两个连续脉冲之间的时间间隔将具有足够的持续时间以允许光束定位系统将光束从一个孔定向到下一孔,但对改变激光脉冲参数的暂停没有任何进一步的要求。当然,以类似的方式,可能第二行程将包括每孔来自序列 S_2 的两个脉冲。当对部分地穿过每个孔的光学成像系统进行调节时或如果在第二行程中使用不同的激光器来穿过第二层钻孔,一般使用多行程钻孔过程,而不是例如单行程过程(其中每个孔被顺序地钻出)。本领域技术人员将认识到,可能存在很多变换,在这些变换中, X 个脉冲的 N 个序列可被传送到 N 个孔而不是上面概述的两个简单的布置。在本发明的其它实施方案中,提供这些变换中的一个或两个。根据本发明的一些实施方案,在这个脉冲序列期间不需要很长的暂停,以便将激光脉冲参数从脉冲序列改变到下脉冲序列。

[0019] 在又一实施方案中,提供激光系统以使用光束定位系统产生激光脉冲序列,使得脉冲序列 S_1 中的第一脉冲定向在第一孔,然后序列 S_2 中的第一脉冲定向在第二孔,依此类推,直到脉冲序列 S_N 中的第一脉冲定向在第 N 个孔;此后脉冲序列 S_1 中的第二脉冲定向在第一孔,然后序列 S_2 中的第二脉冲定向在第二孔,依此类推,直到脉冲序列 S_N 中的最后一个脉冲定向在第 N 个孔;依此类推,直到每个孔具有定向在其处的完整脉冲序列 S_x 。在总脉冲序列中的任两个连续脉冲之间的时间间隔将具有足够的持续时间以允许光束定位系统将光束从一个孔定向到下一孔。本领域的技术人员将认识到,可能存在很多变换,在这些变换中, X 个脉冲的 N 个序列可被传送到 N 个孔而不是上面概述的两个简单的布置。在本发明的其它实施方案中,提供所有这样的变换。

[0020] 在另一实施方案中,提供激光系统以产生 N 个预定的激光脉冲序列 S_1 、 S_2 、...、 S_N ,每个序列之间有足够长的时间间隔,以允许激光束从一个孔重定向到下一孔,以便预先钻每个孔,且接着激光器可提供 N 个预定的激光脉冲序列 R_1 、 R_2 、...、 R_N ,以完成每个孔的钻出。在这个实施方案中,在至少一个序列中的至少一个脉冲的激光脉冲特性将不同于在该序列中的其它脉冲的激光脉冲特性。激光系统包括在处理系统中,处理系统可操作来将激光束定向在待钻出的每个孔处并控制钻孔过程。激光系统包括在处理系统中,处理系统包括将激光束定向在待钻出的每个孔并控制钻孔过程的装置。这因此是两步骤钻孔过程,其

可用于例如在由两层不同的材料组成的样本中钻通孔。在两步骤钻孔过程的另一实施方案中,可使用两个不同的激光器,一个激光器产生序列 S_1 、 S_2 、... S_N ,而第二激光器产生序列 R_1 、 R_2 、... R_N 。

[0021] 根据本发明的实施方案,提供了使用多个激光脉冲在材料(例如,半导体、硅等)中钻孔的方法。该方法包括提供第一组激光脉冲,激光脉冲中的每个以第一脉冲能量、第一脉冲宽度、第一脉冲形状、第一波长和第一脉冲间时间间隔为特征。该方法还包括提供第二组激光脉冲,激光脉冲中的每个以第二脉冲能量、第二脉冲宽度、第二脉冲形状、第二波长和第二脉冲间时间间隔为特征,其中至少有下列项之一:至少第二脉冲能量不同于第一脉冲能量,第二脉冲宽度不同于第一脉冲宽度,第二脉冲形状不同于第一脉冲形状,或第二波长不同于第一波长。该方法还包括定向第一组激光脉冲以射在激光焦点处,定向第二组激光脉冲以射在激光焦点处,以及在材料中钻孔。作为例子,多个激光脉冲可由单个激光器提供,第一波长可等于第二波长,且第一波长和第二波长可以是 1064nm。在其它实施方案中,第一波长和第二波长中的至少一个小于 1064nm。

[0022] 在一个实施方案中,在第一组激光脉冲的最后一个脉冲和第二组激光脉冲的第一脉冲之间的时间小于第一脉冲间时间段或第二脉冲间时间段中的较大者的五倍。该方法还可包括在提供第一组激光脉冲之前确定第一脉冲能量、第一脉冲宽度和第一脉冲形状,以及在提供第二组激光脉冲之前确定第二脉冲能量、第二脉冲宽度和第二脉冲形状,其中至少第二脉冲能量不等于第一脉冲能量,第二脉冲宽度不等于第一脉冲宽度,或第二脉冲形状与第一脉冲形状不相同。

[0023] 根据一个实施方案,第一组激光脉冲包括单个激光脉冲,且第二组激光脉冲包括单个激光脉冲。第一脉冲宽度可等于第二脉冲宽度,且第一脉冲形状可与第二脉冲形状相同。第一脉冲能量可与第二脉冲能量相同,且第一脉冲形状可与第二脉冲形状相同。第一脉冲能量和第二脉冲能量每个大于 0.05mJ 并小于 2mJ。第一脉冲宽度和第二脉冲宽度每个大于 20ns 并小于 5000ns。在第一组激光脉冲的最后一个脉冲和第二组激光脉冲的第一脉冲之间的时间可大约与第一脉冲间时间间隔相同。在第一组激光脉冲的最后一个脉冲和第二组激光脉冲的第一脉冲之间的时间可大约与第二脉冲间时间间隔相同。

[0024] 根据另一实施方案,该方法还包括在提供第一组激光脉冲之前确定第一脉冲能量、第一脉冲宽度、第一脉冲形状、第一波长和第一脉冲间时间间隔,以及在提供第二组激光脉冲之前确定第二脉冲能量、第二脉冲宽度、第二脉冲形状、第二波长和第二脉冲间时间间隔。

[0025] 根据本发明的实施方案,提供了使用光脉冲序列在材料(例如,半导体、硅等)中钻孔的方法,光脉冲中的每个以波长为特征。该方法包括提供一个或多个第一光脉冲作为第一组脉冲,第一光脉冲中的每个以第一脉冲能量、第一脉冲宽度和第一脉冲形状为特征,以及提供一个或多个第二光脉冲作为第二组脉冲,第二光脉冲中的每个以第二脉冲能量、第二脉冲宽度和第二脉冲形状为特征。该方法还包括提供一个或多个第三光脉冲作为第三组脉冲,第三光脉冲中的每个以第三脉冲能量、第三脉冲宽度和第三脉冲形状为特征,定向第一组脉冲以射在所述材料上的一位置处,定向第二组脉冲以射在所述材料上的该位置处,定向第三组脉冲以射在所述材料上的该位置处。

[0026] 根据另一实施方案,该方法还包括在提供第一组脉冲之前确定第一脉冲能量、第

一脉冲宽度和第一脉冲形状,在提供第二组脉冲之前确定第二脉冲能量、第二脉冲宽度和第二脉冲形状,以及提供第三组脉冲之前确定第三脉冲能量、第三脉冲宽度和第三脉冲形状。在本实施方案中,至少第二脉冲能量可不等于第一脉冲能量,第二脉冲宽度可不等于第一脉冲宽度,或第二脉冲形状可不与第一脉冲形状相同,或第二波长不等于第一波长。第二脉冲能量可不等于第三脉冲能量,第二脉冲宽度可不等于第三脉冲宽度,或第二脉冲形状可不与第三脉冲形状相同。

[0027] 第一脉冲能量可以在 0.05mJ 和 2mJ 之间,第二脉冲能量可以在 0.05mJ 和 2mJ 之间,以及第三脉冲能量可以在 0.05mJ 和 2mJ 之间。第一脉冲宽度可以在 20ns 和 5 μ s 之间,第二脉冲宽度可以在 20ns 和 5 μ s 之间,以及第三脉冲宽度可以在 20ns 和 5 μ s 之间。

[0028] 根据本发明的可选实施方案,提供了使用激光脉冲序列在材料(例如,半导体、硅等)中钻孔的方法。该方法包括提供包括两个或多个脉冲的激光脉冲序列。该激光脉冲序列中的至少一个脉冲在波长、脉冲能量、脉冲宽度或脉冲形状中的至少一个上不同于该脉冲序列中的另一脉冲。该方法还包括定向该激光脉冲序列以射在所述材料上的钻孔位置处并在钻孔位置处钻孔。一个脉冲和另一脉冲可在激光能量上不同。一个脉冲和另一脉冲可在脉冲宽度上不同。一个脉冲和另一脉冲可在脉冲形状上不同。

[0029] 根据本发明的另一实施方案,提供了使用提供激光脉冲序列的一个激光器穿过材料钻孔(例如,桶形状)的方法,每个脉冲以波长(例如,~1064nm)、脉冲能量、脉冲宽度和时间脉冲形状为特征。该方法包括提供激光脉冲序列,其以该序列中的连续脉冲之间的时间间隔为特征,其中没有连续脉冲之间的时间间隔大于 0.01 秒,并使得该序列中的至少一个脉冲的脉冲能量小于该序列中的另一脉冲的脉冲能量,定向这组激光脉冲以射在激光焦点处;以及穿过材料钻孔。该材料可包括半导体材料或硅。

[0030] 在一个实施方案中,该序列中的第一脉冲的能量小于该序列中的至少一个其它脉冲的能量。在另一实施方案中,该序列中的第一脉冲的能量大于 50 μ J 并小于 400 μ J。在一些实施方案中,该序列中的最后一个脉冲的能量大于该序列中的至少一个其它脉冲的能量。作为例子,该序列中的最后一个脉冲的能量可大于 400 μ J 并小于 1000 μ J。该序列中的每个脉冲的时间脉冲形状可以是大致正方形的。

[0031] 根据本发明的特定实施方案,提供了使用提供激光脉冲序列的一个激光器穿过材料钻孔的方法,每个脉冲以波长、脉冲能量、脉冲宽度和时间脉冲形状为特征。该方法包括提供激光脉冲序列,其以该序列中的连续脉冲之间的时间间隔为特征,其中没有连续脉冲之间的时间间隔大于 0.01 秒,并使得该序列中的至少一个脉冲的脉冲宽度小于该序列中的另一脉冲的脉冲宽度,定向这组激光脉冲以射在激光焦点处;以及穿过材料钻孔。

[0032] 该材料可包括半导体材料或硅。波长可以为大约 1064nm。孔可具有锥形形状。该序列中的第一脉冲的脉冲宽度可大于 20ns FWHM 并小于 200nsFWHM。该序列中的最后一个脉冲的脉冲宽度可长于该序列中的另一脉冲的脉冲宽度。该序列中的最后一个脉冲的脉冲宽度可大于 400ns FWHM 并小于 1000ns FWHM。该序列中的每个脉冲的时间脉冲形状可以是大致正方形的。

[0033] 根据本发明的另一特定的实施方案,提供了使用提供激光脉冲序列的一个激光器穿过材料(例如,半导体或硅)钻孔的方法,每个脉冲以波长(例如,1064nm)、脉冲能量、脉冲宽度和时间脉冲形状为特征。该方法包括提供激光脉冲序列,其以该序列中的连续脉冲之

间的时间间隔为特征,其中没有连续脉冲之间的时间间隔大于 0.01 秒,并使得该序列中的至少一个脉冲的时间脉冲形状实质上不同于该序列中的另一脉冲的时间脉冲形状,定向这组激光脉冲以射在激光焦点处;以及穿过材料钻孔。

[0034] 在一个实施方案中,孔的出口侧被明确地界定,且孔的侧壁是平滑的。在另一实施方案中,该序列中的至少一个脉冲的时间脉冲形状具有正方形剖面。该序列中的至少一个脉冲的时间脉冲形状具有跟随有功率平稳段的功率尖峰。

[0035] 根据本发明的实施方案,提供了使用激光脉冲序列在材料中钻多个孔的方法。该方法包括提供包括第一组激光脉冲和第二组激光脉冲的该激光脉冲序列,第一组激光脉冲以第一波长、第一脉冲能量、第一脉冲宽度和第一脉冲形状为特征,而第二组激光脉冲以第二波长、第二脉冲能量、第二脉冲宽度和第二脉冲形状为特征,其中第一激光脉冲序列在波长、脉冲能量、脉冲宽度或脉冲形状中的至少一个上不同于第二激光脉冲序列。该方法还包括定向第一组激光脉冲中的第一脉冲以射在所述材料上的第一钻孔位置处,以及定向第一组激光脉冲中的随后的脉冲以射在所述材料上的随后的钻孔位置处。该方法还包括定向第二组激光脉冲中的第一脉冲以射在所述材料上的第一位置处,以及定向第二组激光脉冲中的随后的脉冲以射在所述材料上的随后的钻孔位置处。

[0036] 根据一些实施方案,该方法此外包括提供第三组激光脉冲,第三组激光脉冲以第三波长、第三脉冲能量、第三脉冲宽度和第三脉冲形状为特征,其中第三激光脉冲序列在波长、脉冲能量、脉冲宽度或脉冲形状中的至少一个上不同于第一激光脉冲序列或第二激光脉冲序列,定向第三组激光脉冲中的第一脉冲以射在所述材料上的第一钻孔位置处,以及定向第三组激光脉冲中的随后的脉冲以射在所述材料上的随后的钻孔位置处。

[0037] 第三激光脉冲序列在脉冲宽度、脉冲形状或脉冲能量上至少不同于第一激光脉冲序列或第二激光脉冲序列。第二激光脉冲序列可在脉冲宽度、脉冲形状或脉冲能量上不同于第一激光脉冲序列。

[0038] 根据可选的实施方案,提供了使用激光脉冲序列在材料中钻孔的方法。该方法包括提供激光脉冲序列,其包括以第一波长、第一脉冲能量、第一脉冲宽度和第一脉冲形状为特征的第一激光脉冲,以第二波长、第二脉冲能量、第二脉冲宽度和第二脉冲形状为特征的第二激光脉冲,以及以第三波长、第三脉冲能量、第三脉冲宽度和第三脉冲形状为特征的第三激光脉冲,其中第一激光脉冲在波长、脉冲能量、脉冲宽度或脉冲形状中的至少一个上不同于第二激光脉冲,而第三激光脉冲在波长、脉冲能量、脉冲宽度或脉冲形状中的至少一个上不同于第一激光脉冲和第二激光脉冲中的至少一个。该方法还包括定向第一激光脉冲以射在所述材料上的钻孔位置处,定向第二激光脉冲以射在所述材料上的该钻孔位置处,以及定向第三激光脉冲以射在所述材料上的该钻孔位置处。

[0039] 在一个实施方案中,该方法还包括提供随后组的激光脉冲序列以及将随后组的激光脉冲序列定向在随后的钻孔位置处。第三激光脉冲可在脉冲宽度、脉冲形状或脉冲能量上不同于至少第一激光脉冲或第二激光脉冲。第二激光脉冲可在脉冲宽度、脉冲形状或脉冲能量上不同于第一激光脉冲。

[0040] 使用本发明实现了优于常规技术的很多益处。例如,在根据本发明的实施方案中,提供了适合于在材料中钻孔的高功率脉冲激光器,其利用与具有可比较的性能特征的激光器相比廉价的紧凑结构。此外,在根据本发明的实施方案中,提供了适合于在材料中钻孔的

脉冲激光器,以便可对激光器进行调节,使得脉冲序列中的一个或多个光脉冲的一个或多个特征可改变以在材料中优化钻孔过程。脉冲特征包括但不限于脉冲能量、相邻脉冲之间的时间间隔、脉冲宽度、脉冲剖面和峰值功率。根据实施方案,很多益处存在,包括例如由此钻出的孔的质量和所处理的物品的产量的提高。在整个本说明书中且在下文特别详细地描述了这些和其它益处。参考接下来的详细描述和附图可更充分认识到本发明的各种额外的目的、特征和优点。

[0041] 附图简述

[0042] 图 1 是示出适合于在材料中钻孔的脉冲序列的实施方案的示意图。在该图中,时间在水平轴上而功率沿着垂直轴;

[0043] 图 2a 示出硅晶片中的激光钻出的通孔(透眼)的示意性横截面图;

[0044] 图 2b 示出硅晶片的示意图,其中示出多个激光钻出的通孔;

[0045] 图 3 是示出适合于在材料中钻孔的脉冲序列的实施方案的示意图。在该图中,时间在水平轴上而功率沿着垂直轴;

[0046] 图 4 是示出适合于在材料中钻孔的脉冲序列的实施方案的示意图。在该图中,时间在水平轴上而功率沿着垂直轴;

[0047] 图 5 是根据本发明的实施方案的具有提供适合于在材料中钻孔的输出的激光脉冲序列的可调谐脉冲特征的脉冲激光器的简化示意图;

[0048] 图 6 是根据本发明的实施方案的具有提供适合于在材料中钻孔的输出的激光脉冲序列的可调谐脉冲特征的脉冲激光器的简化示意图;

[0049] 图 7 是根据本发明的实施方案的适合于在材料中钻孔的激光处理系统的简化示意图;

[0050] 图 8 是根据本发明的实施方案的适合于在材料中钻孔的激光处理系统的简化示意图;

[0051] 图 9 是根据本发明的实施方案的用于使用脉冲序列在材料中钻孔的方法的流程图;

[0052] 图 10 是根据本发明的实施方案的用于使用脉冲序列在材料中钻孔的方法的流程图;

[0053] 图 11 是根据本发明的实施方案的用于使用脉冲序列在材料中钻孔的方法的流程图;

[0054] 图 12 是根据本发明的实施方案的用于使用脉冲序列在材料中钻孔的方法的流程图;以及

[0055] 图 13 是示出适合于在材料中钻孔的脉冲序列的实施方案的示意图。在该图中,时间在水平轴上而功率沿着垂直轴。

[0056] 特定实施方案的详细描述

[0057] 多层电路的技术很多年来在范围从大的多层铜绝缘电路板到极小的硅集成电路的电子工业中是普遍的。集成电路广泛用在电子设备例如电话、计算机、汽车和很多其它设备中。每当使用多层设计时,必须使用孔产生在层之间的连接。在集成电路的制造中使用的硅晶片的情况下,这些孔通常称为通孔。如在图 2b 中示意性示出的,硅晶片一般可包含数千个通孔,所以钻孔的方法必须快速,并对正被制造的设备导致具有理想属性的孔。实际

上,在制造过程中由随后的步骤确定的要求将一般定义这些理想属性。

[0058] 图 2a 示出在硅晶片中的单个通孔的示意性表示。通孔的重要属性包括入口孔和出口孔的尺寸、入口孔和出口孔的椭圆度、入口孔和出口孔的边缘的粗糙度、在入口孔周围的切口的高度、散布在入口孔和出口孔附近的碎片的数量和广度、沉积在入口孔和出口孔附近的表面上的任何残留物的厚度和广度、孔的侧壁的粗糙度、侧壁的曲率和其它属性。因为硅晶片可包含数千通孔,每个通孔的属性大致相同很重要;因此,钻孔过程的再现性也很重要。当然,在硅晶片中钻出的通孔仅仅是在材料中钻出的孔的一个例子,且对于每个特定的应用和材料,将存在每个孔的一组理想属性。

[0059] 用于在材料中钻孔的脉冲激光器的一些实例包括用于在玻璃中钻孔的脉冲 CO₂ 激光器、用于在塑料中钻孔的准分子激光器、用于在硅中钻孔的脉冲 Nd:YAG 激光器、用于穿过铜钻孔的三次谐波到紫外波长的脉冲 Nd:YLF 激光器、用于在印刷电路板的介电绝缘体中钻孔的脉冲 CO₂ 激光器、用于在聚合物中钻孔的脉冲 Nd:YAG 激光器、以及很多其它实例。当脉冲激光器用于在材料中钻孔时,最常用的技术是所谓的冲击钻孔,虽然其它技术存在,例如开孔。在冲击钻孔中,激光束被聚焦或成像到孔被钻出的位置处的激光焦点,且每个单独的脉冲移除某种材料,直到孔的所需深度被达到(盲孔)或孔穿过材料的另一侧(通孔)。

[0060] 对于任何脉冲激光器,存在可被选择来优化钻孔过程的一个或多个操作特征。例如,可能选择激光器的脉冲能量。作为概测法,脉冲能量越高,将被每个脉冲移除材料越多,因此钻孔所需的脉冲的数量越少。在一些情况下,高脉冲能量可能有有害的效应,例如作为碎片和残留物排出的更多的材料、以及壁的增加的粗糙度、以及入口孔和出口孔的边缘。如果这样的效应被认为对特定的应用是不合乎需要的,则使用较低的脉冲能量可能是有利的,较低的脉冲能量可能导致需要更多的脉冲来钻孔。可被选择来加速钻孔过程的另一操作特征是选择高激光重复率,其意味着较小的脉冲间时间间隔。在一些情况下,例如如果有存留一段时间的热引起的效应,短脉冲间时间间隔可能通过背景热的额外聚集或通过其它手段消极地影响孔的质量。可能碰巧由于光与材料的交互作用的物理现象,较长的激光脉冲将比较短的激光脉冲对移除材料更有效。有非常多的可能性。在一般制造情况中,操作人员将执行一系列实验,其中为激光器操作特征选择值,使用具有那些选定的值的脉冲钻样本孔,并检查由此钻出的孔。通过使用激光器操作特征的各种值来钻孔,操作人员将决定哪组值以期望的钻孔速率(每秒孔)提供具有可接受的质量的孔。对于制造过程,激光器将接着被设置为提供具有为每个操作特征选择的最佳值的脉冲,如通过这些实验确定的。

[0061] 根据本发明的实施方案,如上所述在整个发明说明书中预先确定脉冲参数。本文所述的操作不同于一些常规脉冲激光器系统(例如,Q 开关激光器),其按照触发率中的不连续性对连续脉冲有不同的脉冲参数。不是仅仅对作为时间的函数的增益分布作出响应,这是在 Q 开关激光器中的行为,本发明的实施方案提供脉冲参数的积极控制以提供适合于各种钻孔操作的脉冲链。激光器提供具有特定的预定脉冲参数的脉冲的操作可以称为提供具有预定的脉冲特性的脉冲序列。在本发明的实施方案中,在脉冲序列中的脉冲的脉冲特征的选择被预先确定,以便提供使用该脉冲序列钻出的一个或多个孔的期望特性。根据本发明的一些实施方案,通过设置激光器的一个或多个特定的参数来提供预定的脉冲特性,每个特定的参数针对这样的参数可被独立地设置到的许多值中的一个。该方法与一个可调参数被设置到某个值使得激光器的其它不可调参数被激光器设计的结果修改以实现某些期

望特性的操作形成对比。

[0062] 对于大多数常规激光器,改变一些操作特征是不可能或至少非常难的。虽然通常可能选择脉冲能量和脉冲间时间间隔,改变这些值而不停止激光器可能不是可能的。如果试图在没有暂停的情况下改变脉冲操作特征,则结果可能是在很多脉冲稳定之前这些脉冲的脉冲能量的不稳定。例如,如果在没有暂停的情况下产生脉冲间时间间隔的变化,则可能有接下来的几个脉冲的脉冲能量的突然增加。不幸的是,对于一些激光器,常常甚至根本不可能改变一些重要的特征,例如脉冲宽度、峰值功率、或脉冲形状。这是因为这些参数可通过诸如激光增益介质本身或激光器的光谐振腔等来确定。

[0063] 光纤激光器是有源增益介质是光纤的激光器。对于一些光纤激光器,可能改变以前使用其它类型的激光器不可得到的很多操作特征或对这些操作特征编程。选择峰值功率、脉冲宽度和时间脉冲形状的值的能力允许在一些材料处理应用(包括钻孔)中实现的改进。较短的脉冲(其常常具有较高的峰值功率)常常导致较干净的材料移除,因为该过程变成烧蚀的而不是热的。作为一个例子,在材料的任何熔化可出现之前,在短激光脉冲中的能量可在足够短的时间段中沉积。相反,在与材料的较慢的热交互作用中由较长的脉冲熔化的材料可能更易于溅到入口孔附近的表面上,从而形成额外的残留物或碎片。类似地,短激光脉冲常常可实现孔中的较平滑的侧壁。然而,材料移除常常与所传送的能量成比例(至少在能量的某个范围内),所以通常较少的材料将被短脉冲移除,如果脉冲能量小于长脉冲。因此,在实现可接受的孔质量和高钻孔率之间可出现折衷。因此,对于很多材料处理应用,包括钻孔,设置大量操作特征(包括脉冲能量、脉冲间时间间隔、脉冲宽度、峰值功率和脉冲形状)的值的能力促进光纤激光器的使用。

[0064] 现在出现了新的光纤激光器设计,其具有在没有暂停的情况下改变脉冲之间的操作特征的能力。使用这些设计,操作特征的值的变化可被即时实现,而没有随后的脉冲的特征——包括脉冲能量或其它特征——中的任何不稳定性。不是提供激光脉冲序列来钻孔,其中该序列中的所有激光脉冲的每个特征是相同的,改变在脉冲序列的中间的操作特征的值的能力意味着现在可能单独地选择该序列中的每个单独的脉冲(或该序列中的脉冲组)的特征,以便优化钻孔过程。因此,例如,为了使激光脉冲序列在材料中钻孔,该序列中的初始脉冲可具有低脉冲能量和短脉冲间时间间隔,但该序列中的其余脉冲可具有较高的脉冲能量和较长的脉冲间时间间隔。对于用于在材料中钻孔的脉冲序列,可能选择该序列中的每个脉冲的脉冲能量、脉冲间时间间隔、脉冲宽度、峰值功率和脉冲形状的值以优化钻孔过程。

[0065] 根据本发明的实施方案,图 1 是示出单个激光脉冲序列 S1 的示意图,适合于在材料中钻孔的激光脉冲都具有脉冲宽度 W1,其中脉冲能量和脉冲间时间间隔从该序列的第一子序列“S1a”中的 E1 和 T1 分别改变到该序列的第二子序列“S1b”中的 E1 和 T2,以便以最高的钻孔速率提供期望的孔属性。因此,具有能量 E1 和脉冲间时间间隔 T1 的脉冲对于钻该孔的起始部分是有利的,但接着具有能量 E2 和脉冲间时间间隔 T2 的脉冲对于钻该孔的最后部分是有利的。在第一子序列“S1a”和第二子序列“S1b”之间的时间间隔 L1 可具有小于 T1 或 T2 的值、等于 T1 或 T2 的值、或大于 T1 或 T2 的值。在一些实施方案中,值 L1 小于 T1 或 T2 中的较大者的五倍,例如大约 T1 或 T2 中的较大者的两倍。当使用在波长 1064nm 处操作的脉冲光纤激光器在厚度 0.15mm 的硅晶片中钻直径 50 μ m 的孔时,发明人发现,类

似于图 1 所示的脉冲序列的脉冲序列可以按可接受的钻孔速度提供桶形通孔和减小的广度的碎片和残留物。特别是,对前八个脉冲使用具有 $210\mu\text{J}$ 的脉冲能量的宽度 100ns 的相对短的脉冲将减小入口孔附近的残留物的广度。然而,一旦孔起始,其余 40 个脉冲的脉冲能量可增加到 $400\mu\text{J}$ 以增加钻孔速率。如果序列中的所有 48 个脉冲的脉冲宽度是 100ns ,将产生桶形通孔。在本实例中,对于 20 瓦平均功率激光器, $T_1=10.5\mu\text{s}$ 和 $T_2=20\mu\text{s}$ 。 L_1 被选择成与 T_2 相同,即, $20\mu\text{s}$ 。使用这个脉冲序列来在晶片中钻每个孔,激光器的潜在钻孔速率能力是每秒大约 1100 个通孔,以提供在入口孔附近有减小广度的残留物的期望桶形通孔。

[0066] 除了脉冲能量和脉冲间时间间隔以外的其它参数也可改变。根据本发明的另一实施方案,图 3 是示出适合于在材料中钻孔的单个激光脉冲序列 S2 的示意图,其中脉冲能量、脉冲宽度和脉冲间时间间隔分别从该序列的第一子序列“S2a”中的 E_1 、 W_1 和 T_1 改变到该序列的第二子序列“S2b”中的 E_2 、 W_2 和 T_2 ,以便以最高的钻孔速率提供理想的孔属性。因此,具有能量 E_1 、脉冲宽度 W_1 和脉冲间时间间隔 T_1 的脉冲对于钻该孔的起始部分是有利的,但接着具有能量 E_2 、脉冲宽度 W_2 和脉冲间时间间隔 T_2 的脉冲对于钻该孔的最后部分是有利的。在第一子序列“S2a”和第二子序列“S2b”之间的时间间隔 L_1 可具有小于 T_1 或 T_2 的值、等于 T_1 或 T_2 的值、或大于 T_1 或 T_2 的值。在一些实施方案中,值 L_1 是 T_1 或 T_2 中的较大者的五倍,例如大约 T_1 或 T_2 中的较大者的两倍。当使用在波长 1064nm 处操作的脉冲光纤激光器在厚度 0.15mm 的硅晶片上钻直径 $50\mu\text{m}$ 的孔时,发明人发现,类似于图 3 所示的脉冲序列的脉冲序列可以提供锥形通孔和减小广度的碎片和残留物并具有快的钻孔速度。特别是,对前四个脉冲使用 100ns 的相对短的脉冲宽度和 $400\mu\text{J}$ 的脉冲能量将减小入口孔附近的残留物的广度。然而,一旦孔起始,其余 14 个脉冲的脉冲能量可增加到 $600\mu\text{J}$ 且脉冲宽度可增加到 500ns 以增加钻孔速率。使用相对长的脉冲将导致锥形通孔形状。以具有较低能量和较短脉冲宽度的四个短脉冲开始脉冲序列将减小在入口孔处的残留物的广度。在本实例中,时间间隔 T_1 和 T_2 被选择成提供最大激光功率。因此,对于 20 瓦平均功率激光器, $T_1=20\mu\text{s}$ 和 $T_2=30\mu\text{s}$ 。 L_1 被选择成与 T_2 相同,即, $30\mu\text{s}$ 。使用这个脉冲序列来在晶片上钻每个孔,激光器的潜在钻孔速率能力是每秒大约 2000 个通孔,以提供在入口孔附近有减小广度的残留物的期望桶形通孔。

[0067] 并不要求在材料中钻孔的脉冲序列只有两个子序列,其中脉冲特性不同。图 4 示出根据本发明的一个实施方案的适合于在材料中钻孔的脉冲序列,其中该脉冲序列包括 3 个子序列 S3a、S3b 和 S3c。在第一子序列 S3a 中的脉冲具有脉冲能量 E_1 、脉冲宽度 W_1 和脉冲间时间间隔 T_1 。在第二子序列 S3b 中的脉冲具有脉冲能量 E_2 、脉冲宽度 W_2 和脉冲间时间间隔 T_2 。在第三子序列 S3c 中的脉冲具有脉冲能量 E_3 、脉冲间时间间隔 T_3 和由尖峰和平稳段组成的特殊脉冲形状。因此,具有脉冲能量 E_1 、脉冲宽度 W_1 和脉冲间时间间隔 T_1 的脉冲对钻该孔的起始部分将是有利的,但接着具有脉冲能量 E_2 、脉冲宽度 W_2 和脉冲间时间间隔 T_2 的脉冲对钻该孔的中间部分将是有利的,以及具有脉冲能量 E_3 、脉冲间时间间隔 T_3 和特殊脉冲形状的脉冲将适合于钻该孔的最后部分以提供期望的孔出口属性。在第一子序列“S3a”和第二子序列“S3b”之间的时间间隔 L_1 可具有小于 T_1 或 T_2 或 T_3 的值、等于 T_1 或 T_2 或 T_3 的值、或大于 T_1 或 T_2 或 T_3 的值。在一些实施方案中,值 L_1 小于 T_1 或 T_2 或 T_3 中的较大者的五倍,例如大约 T_1 或 T_2 或 T_3 中的较大者的两倍。

[0068] 同样,在第二子序列“S3b”和第三子序列“S3c”之间的时间间隔 L2 可具有小于 T1 或 T2 或 T3 的值、等于 T1 或 T2 或 T3 的值、或大于 T1 或 T2 或 T3 的值。在一些实施方案中,值 L2 小于 T1 或 T2 或 T3 中的较大者的五倍,例如大约 T1 或 T2 或 T3 中的较大者的两倍。当在硅晶片中钻孔时,发明人观察到,形成孔出口的突破过程可能是不可预测的,有时导致具有锯齿状边缘的非圆孔,特别是当使用具有长脉冲宽度的脉冲时。当使用在波长 1064nm 处操作的脉冲光纤激光器在厚度 0.15mm 的硅晶片中钻直径 50 μm 的孔时,发明人发现,类似于图 4 所示的脉冲序列的脉冲序列可以提供锥形形状、在入口孔和圆出口孔处的碎片和残留物的减小广度,并具有高钻孔速度。特别是,对前四个脉冲使用 100ns 的相对短的脉冲宽度和 400 μJ 的脉冲能量将减小入口孔附近的残留物的广度。然而,在接下来的 11 个脉冲的钻孔过程的中间阶段期间,脉冲能量可增加到 600 μJ 且脉冲宽度增加到 500ns 以增加钻孔速率。最后,为了提供圆出口孔,在该序列中的最后 12 个脉冲的脉冲能量降低到 200 μJ ,具有特殊的脉冲形状。特殊的脉冲形状包括宽度为大约 20ns FWHM 的尖峰,后面是大约 80ns FWHM 的平稳段。峰值功率尖峰与平稳段之比大约是 4:1。实际上,在一些情况下,出口孔的有益属性可以在没有特殊脉冲形状的情况下但通过替代地使用具有脉冲能量 200 μJ 和脉冲宽度 100ns 的简单的正方形脉冲形状来实现。以具有较低能量和较短脉冲宽度的四个短脉冲开始脉冲序列将减小在入口孔处的残留物的广度。当钻该孔的中间部分时改变到具有高脉冲能量的较长脉冲将导致高钻孔速度。使用相对长的脉冲将导致锥形通孔。改变到该序列中的最后 12 个脉冲的短脉冲将导致平稳的圆孔出口。在本实例中,时间间隔 T1、T2 和 T3 被选择成提供最大激光功率。因此,对于 20 瓦平均功率激光器, T1=20 μsec 以及 T2=30 μsec 以及 T3=10 μsec 。L1 被选择成与 T2 相同,即,30 μsec 。L2 被选择成与 T3 相同,即,10 μsec 。使用这个脉冲序列来在晶片中钻每个孔,激光器的潜在钻孔速率能力是每秒大约 2000 个通孔,以提供在入口孔和圆出口孔附近有残留物的减小的广度的期望锥形通孔。

[0069] 脉冲特征可以改变的脉冲序列中的子序列的数量不限于仅仅两个或三个。可能有四个、五个、十个、二十个子序列等。实际上,在本发明的实施方案中,可能为在材料中钻孔的该序列中的每个脉冲选择脉冲特征的不同值。可改变的脉冲特征包括脉冲能量、脉冲宽度、时间脉冲形状、脉冲间时间间隔和峰值功率,但不仅仅限于这些脉冲特征。

[0070] 图 13 示出了根据本发明的实施方案的适合于在材料中钻多个孔的脉冲序列 S5,其中该脉冲序列包括两个子序列 S4a 和 S4b。当然,随后的脉冲序列也包括在本发明的范围内。在第一子序列 S4a 中的脉冲包括具有脉冲能量 E1、脉冲宽度 W1 和脉冲间时间间隔 T1 的第一脉冲。第一子序列 S4a 还包括具有脉冲能量 E2、脉冲宽度 W2 和脉冲间时间间隔 T2 的第二脉冲。第一子序列 S4a 还包括具有脉冲能量 E3、脉冲间时间间隔 T3 和由尖峰和平稳段组成的特殊脉冲形状的特殊脉冲的第三脉冲。额外的脉冲可包括在子序列中,且为了示例性目的仅示出三个所示的脉冲。在实施方案中,第一子序列中的三个或多个脉冲定向到用于钻单个孔的材料的位置。具有能量 E1、脉冲宽度 W1 和脉冲间时间间隔 T1 的第一脉冲对钻该孔的起始部分将是有利的,具有能量 E2、脉冲宽度 W2 和脉冲间时间间隔 T2 的第二脉冲对钻该孔的中间部分将是有利的,以及具有能量 E3、脉冲间时间间隔 T3 和特殊脉冲形状的脉冲将适合于钻该孔的最后部分以提供期望的孔出口属性。在第一子序列“S4a”和第二子序列“S4b”之间的时间间隔 T3 可具有小于 T1 或 T2 的值、等于 T1 或 T2 的值、或大于 T1 或 T2 的

值。在一些实施方案中,值 T3 小于 T1 或 T2 或 T3 中的较大者的五倍,例如大约 T1 或 T2 中的较大者的两倍。本领域中普通技术人员将认识到很多变化、修改和可选形式。

[0071] 本描述的本发明的实施方案不限于在硅中钻孔。根据本发明的方法可用于在其它材料中钻孔。同样,根据本发明的方法可用于在由两层或更多层材料组成的样本中钻孔。实际上,在那种情况下,在没有相当大的暂停的情况下改变每层的脉冲特征的能力可能是本质的,以便结合穿过每种材料的孔的高速度钻孔实现最佳孔属性。如果使用单个激光器,则过程将一般是单行程过程,其中每个孔被连续地充分钻出,但其中每个脉冲序列包含被选择成穿过第一层的材料有效地钻孔的脉冲,然后是被选择成穿过第二层的材料有效地钻孔的另外的脉冲,等等。根据本发明的实施方案,穿过第一层钻孔的脉冲的参数可从一个脉冲到另一脉冲改变,以优化第一层的钻孔过程。同样,穿过第二层钻孔的脉冲的参数可从一个脉冲到另一脉冲改变,以优化第二层的钻孔过程。

[0072] 如果使用多于一个的激光器,例如每层一个激光器,则该过程也可以是多行程过程,其中一个激光器在第一行程中穿过整个样本的一层钻每个孔,然后另一激光器在第二行程中穿过整个样本的第二层钻每个孔,对于每个随后的激光器依此类推。根据本发明的实施方案,来自穿过第一层钻孔的第一激光器的脉冲的参数可从一个脉冲到另一脉冲改变,以优化第一层的钻孔过程。同样,来自穿过第二层钻孔的第二激光器的脉冲的参数可从一个脉冲到另一脉冲改变,以优化第二层的钻孔过程,依此类推。

[0073] 参考图 5,示出了能够产生在本申请中公开的类型脉冲序列的激光器系统。该激光器系统包括由电子驱动器 53 供电的振荡器 51,并包括放大器 52。脉冲激光源例如二极管激光器可通过提供脉冲电子驱动信号以简单的方式产生脉冲。脉冲的属性(包括脉冲能量、脉冲宽度、脉冲形状、峰值功率和脉冲间时间间隔)可通过控制由电子驱动器 53 发送到振荡器 51 的电子驱动信号 55 的属性或对其编程来预先确定。来自这样的脉冲激光振荡器的信号接着在激光器放大器例如二极管泵浦固体棒激光器或光纤激光放大器中被放大,以提供在输出的脉冲序列 57 中的每个脉冲的期望属性。

[0074] 振荡器激光器可由半导体激光器、光纤激光器、二极管激光器或分布式反馈二极管激光器组成。在特定的实施方案中,脉冲信号源是在 1064nm 的波长处操作的半导体二极管激光器,其具有一瓦峰值脉冲功率、可改变到高达 200kHz (千赫兹)的重复率、具有子纳秒脉冲上升时间和下降时间的 5 纳秒的脉冲宽度。在可选的实施方案中,脉冲激光源的峰值光功率可以低于或高于一瓦。例如,它可以是 500mW、1 瓦、2 瓦、3 瓦、4 瓦、5 瓦或更大。此外,脉冲宽度可小于或大于 100 纳秒。例如,它可以是 1ns (纳秒)、2ns、5ns、10ns、15ns、20ns 或其它值。振荡器激光器由电子驱动器驱动,使得由电子驱动器提供的电流脉冲的形状控制振荡器激光输出脉冲的形状。

[0075] 来自振荡器 51 的输出在例如由光纤激光放大器或二极管泵浦固体棒激光放大器组成的激光放大器模块 52 中放大。在本发明的一个实施方案中,放大器是光放大器,包括通过光耦合器耦合到掺稀土的光纤回路的泵。通常,半导体泵浦激光器用作泵,虽然光放大器的泵浦可由其它装置实现,如将对本领域的技术人员明显的。在特定的实施方案中,光放大器包括具有大约 $4.8\mu\text{m}$ 的核心直径的 5m 长的掺稀土光纤,并使用铒掺杂到大约 6×10^{24} 个离子/ m^3 的掺杂密度。放大器还包括泵,其为在 976nm 的波长处操作并具有 500mW 的输出功率的 FBG 稳定的半导体激光二极管。在另一特定的实施方案中,光放大器 160 包括具

有大约 $10\ \mu\text{m}$ 的核心直径的 5m 长的掺稀土光纤, 并使用镱掺杂到大约 6×10^{26} 个离子 $/\text{m}^3$ 的掺杂密度。放大器还可包括泵, 其为具有 5W 的输出功率的半导体激光二极管。

[0076] 虽然对掺镱光纤放大器和 1064nm 的激光波长给出了实例, 在本发明的其它实施方案中可使用在 1064nm 处操作或在其它波长处操作的二极管激光器、固态激光器和掺杂光纤的其它实例。这些实例包括例如在波长区域 1550nm 中的掺铒光纤和在波长区域 2 至 $3\ \mu\text{m}$ 中的掺铥光纤。

[0077] 参考图 6, 在本发明的实施方案中, 提供了产生在材料中钻孔的激光脉冲序列的脉冲激光源。2008 年 9 月 27 日发布的标题为“Method and System for Pulsed Laser Source with Shaped Optical Waveforms”的美国专利号 7,428,253 描述了可调谐脉冲激光源的实例, 并特此通过引用被全部并入。此外, 2008 年 9 月 12 日提交的标题为“Method and system for a Pulsed Laser Source Emitting Shaped Optical Waveforms”的美国专利号 12/210,028 也描述了可调谐脉冲激光源的实例, 并特此通过引用被全部并入。此外, 2009 年 6 月 11 日提交的标题为“Stable Tunable High Power Pulsed Laser Source”的美国专利号 61/186,317 也描述了适合于根据本发明的实施方案使用的激光源的实例, 并特此通过引用被全部并入。脉冲激光源包括适合于产生种子信号的种源 110 以及具有耦合到种源的第一端口 114、第二端口 122 和第三端口 116 的光环行器 120。脉冲激光源还包括以耦合到光环行器的第二端口 122 的第一侧 132 和第二侧 134 为特征的振幅调制器。脉冲激光源还包括以输入端 136 和反射端 146 为特征的第一光放大器。输入端耦合到振幅调制器的第二侧 134。而且, 脉冲激光源包括耦合到光环行器的第三端口 116 的第二光放大器 160。虽然图 6 示出了耦合到光环行器的第三端口的一个光放大器 160 的使用, 但这并不是本发明的一些实施方案需要的。在可选的实施方案中, 如对特定的应用适当的, 利用在光循环器的下游的多个光放大器。

[0078] 根据本发明的一个实施方案, 图 7 示出了根据本发明的实施方案的能够使用产生脉冲序列或多个脉冲序列的激光器在工件 304 中钻一个或多个孔的示例性激光处理系统。该系统包括激光源 300、光学系统 302、控制器 305 和位于工件托架 303 的顶部上的工件 304。激光源 300 提供具有某些特征例如波长、脉冲能量、脉冲间时间段、脉冲宽度、时间脉冲形状和其它特征的激光脉冲。序列中的脉冲的这些和其它特征可根据本发明的实施方案来调节以在工件中钻一个或多个孔。在一个实施方案中, 激光器可包括用于使用诸如谐波产生的技术产生不同的波长的装置。

[0079] 光学系统可包括用于将激光束聚焦到工件上的激光焦点的透镜和反射镜, 以及用于将激光焦点定向到工件上的不同位置以钻多于一个的孔的部件。在特定的实施方案中, 用于定向光束的部件可以是安装在电流计上的反射镜。控制器可用于控制光学系统和用于定向光束的部件。例如, 当在工件 304 中钻孔时, 光学系统 302 可由控制器控制以将激光焦点沿着工件的表面从一个位置重定向到另一位置。在另一实施方案中, 光学系统可将激光束聚焦到在工件的表面处或附近的激光焦点, 且工件托架可由控制器控制来移动工件以钻随后的孔。在又一实施方案中, 聚焦激光束的透镜和反射镜可产生具有某些理想的空间参数例如平顶空间剖面的焦点。

[0080] 为了钻 N 个孔, 激光系统提供 N 个预定的激光脉冲序列 $S_1, S_2, \dots, S_N$, 每个序列之间有足够长的时间间隔, 以允许激光焦点从样本的一个区域重新定位, 其中孔被钻到样本

的相邻区域,在该相邻区域中将钻下一个孔。在一个特定的实施方案中,每个脉冲序列将与每个其它序列相同,目标是由此钻出的每个孔大致与每个其它孔相同。在设计成在均匀的材料例如硅晶片中钻相同的孔的特定实施方案中,提供激光系统以产生激光脉冲序列,使得在每个序列内的某些脉冲将具有与该序列中的其它激光脉冲明显和有意地不同的激光参数,目标是由此钻出的每个孔大致与每个其它孔相同并具有某些优选的特征,且激光系统包括在处理系统中,处理系统包括将激光束定向在待钻出的每个孔处并控制钻孔过程的装置。在设计成在均匀的材料例如硅晶片中钻 N 个不同的孔的特定实施方案中,提供激光系统以产生 N 个预定的激光脉冲序列 S_1 、 S_2 、...、 S_N ,使得在一个或多个序列内的某些脉冲将具有与同一序列中的其它激光脉冲明显和有意地不同的激光参数,且某些序列将包括激光参数不同于包含在其它序列内的激光参数的脉冲,目标是由此钻出的 N 个孔中的某些将具有与晶片中的其它孔的特征不同的某些优选特征,且激光系统包括在处理系统中,处理系统包括将激光束定向在待钻出的每个孔处并控制钻孔过程的装置。在另一实施方案中,对一个序列中的脉冲选择的特征可以不同于对另一序列选择的特征。

[0081] 根据本发明的另一实施方案,图 8 示出根据本发明的实施方案的能够使用产生脉冲序列或多个脉冲序列的第一激光源 300 和第二激光源 301 在工件 304 中钻一个或多个孔的示例性激光处理系统。该系统包括第一激光源 300、光学系统 302、控制器 305 和位于工件托架 303 的顶部上的工件 304。第一激光源 300 提供具有某些特征例如波长、脉冲能量、脉冲间时间段、脉冲宽度、时间脉冲形状和其它特征的激光脉冲。序列中的脉冲的这些和其它特征可根据本发明的实施方案来调节。系统还包括第二激光源 301。第二激光源 301 提供具有某些特征例如波长、脉冲能量、脉冲间时间段、脉冲宽度、时间脉冲形状和其它特征的激光脉冲。序列中的脉冲的这些和其它特征可根据本发明的实施方案来调节。与第一激光源 300 和第二激光源 301 相关的脉冲特征可以不同。例如,第一激光源可在第一波长处操作,而第二激光源可在第二波长处操作。脉冲特征中的其它差异可包括激光功率、脉冲能量、脉冲间时间段、脉冲宽度、时间脉冲形状等。

[0082] 光学系统可包括用于将激光束聚焦到工件上的激光焦点的透镜和反射镜,以及用于将激光焦点定向到工件上的不同位置的部件,在这些位置上将钻孔。在特定的实施方案中,用于定向光束的部件可以是安装在电流计上的反射镜。控制器可用于控制光学系统和用于定向光束的部件的运动。例如,当在工件 304 中钻孔时,光学系统 302 可由控制器控制以沿着工件的表面将光束从一个位置移动到另一位置。在另一实施方案中,光学系统可将激光束聚焦到在工件的表面处或附近的激光焦点,且工件托架可由控制器控制来移动工件以钻随后的孔。

[0083] 处理系统可使用单行程或使用多行程在工件中钻一系列孔。在使用两个激光器利用双行程过程在两层样本中钻 N 个孔的本发明的一个实施方案中,第一激光系统可提供 N 个预定的激光脉冲序列 S_1 、 S_2 、...、 S_N ,每个序列之间有足够长的时间间隔,以允许激光束从一个孔重定向到下一孔,以便预先钻每个孔。第二激光器可接着提供 N 个预定的激光脉冲序列 S_1 、 S_2 、...、 S_N ,以完成每个孔的钻出。因此这是双行程钻孔过程,其可例如用于在由两层不同的材料组成的样本例如由一层电介质和一层铜组成的印刷电路板中穿过孔钻出。

[0084] 图 9 是示出根据本发明的实施方案用于使用脉冲序列在材料中钻孔的方法的流程图。该脉冲序列包括第一组脉冲的第一子序列,第一组脉冲以第一脉冲能量、第一脉冲宽

度、第一脉冲形状、第一波长和第一脉冲间时间间隔为特征。第一子序列后面是第二组脉冲的第二子序列,第二组脉冲以第二脉冲能量、第二脉冲宽度、第二脉冲形状、第二波长和第二脉冲间时间间隔为特征。根据本发明的实施方案,至少有下列项之一:第二脉冲能量不同于第一脉冲能量,或第二脉冲宽度不同于第一脉冲宽度,或第二脉冲形状不同于第一脉冲形状,或第二波长不同于第一波长,结果是当该序列中的每个脉冲具有相同的特性时钻出的孔比较,改进的孔被钻出。

[0085] 图 10 是示出根据本发明的实施方案用于使用脉冲序列在材料中钻孔的方法的流程图。在该脉冲序列中,没有脉冲在时间上与紧接着前面或紧接着后面的脉冲分开多于 0.01 秒。根据本发明的实施方案,在该序列中的至少一个脉冲的脉冲能量小于在该序列中的另一脉冲的脉冲能量,结果是当该序列中的每个脉冲具有与该序列中的每个其它脉冲相同的脉冲能量时钻出的孔比较,改进的孔被钻出。

[0086] 图 11 是示出根据本发明的实施方案用于使用脉冲序列在材料中钻孔的方法的流程图。在该脉冲序列中,没有脉冲在时间上与紧接着前面或紧接着后面的脉冲分开多于 0.01 秒。根据本发明的实施方案,在该序列中的至少一个脉冲的脉冲宽度小于在该序列中的另一脉冲的脉冲宽度,结果是当该序列中的每个脉冲具有与该序列中的每个其它脉冲相同的脉冲宽度时钻出的孔比较,改进的孔被钻出。

[0087] 图 12 是示出根据本发明的实施方案用于使用脉冲序列在材料中钻孔的方法的流程图。在该脉冲序列中,没有脉冲在时间上与紧接着前面或紧接着后面的脉冲分开多于 0.01 秒。根据本发明的实施方案,在该序列中的至少一个脉冲的时间脉冲形状实质上不同于在该序列中的另一脉冲的时间脉冲形状,结果是当该序列中的每个脉冲具有与该序列中的每个其它脉冲相同的时间脉冲形状时钻出的孔比较,改进的孔被钻出。

[0088] 虽然关于特定的实施方案及其特定的实例描述了本发明,但应理解,其它实施方案可落在本发明的精神和范围内。因此,本发明的范围应参考所附权利要求以及其等效形式的完全范围来确定。

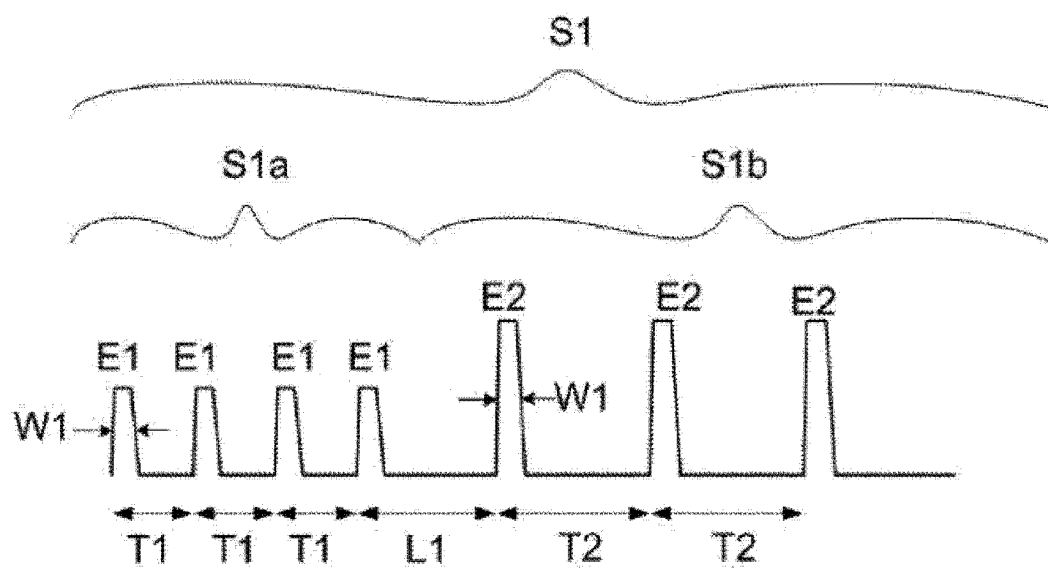


图 1

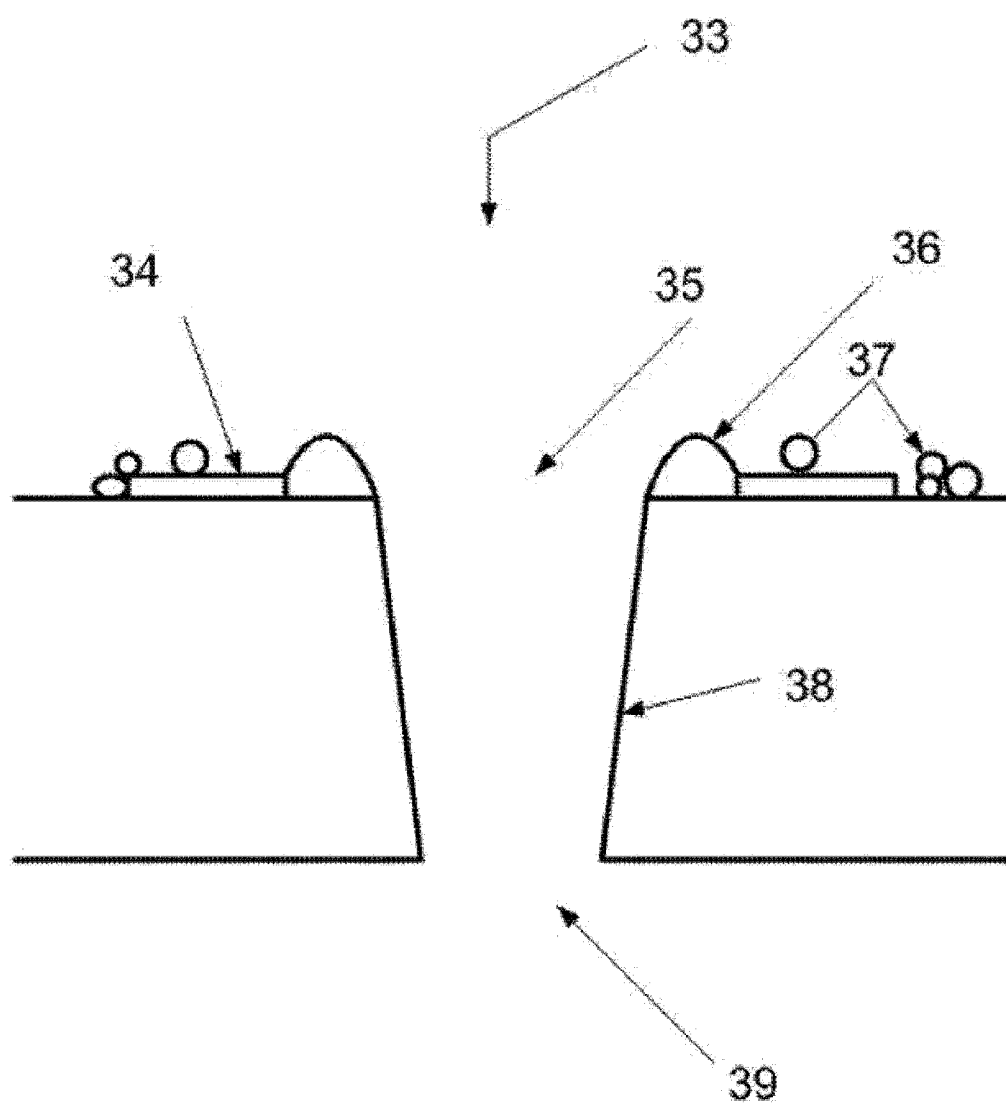


图 2a

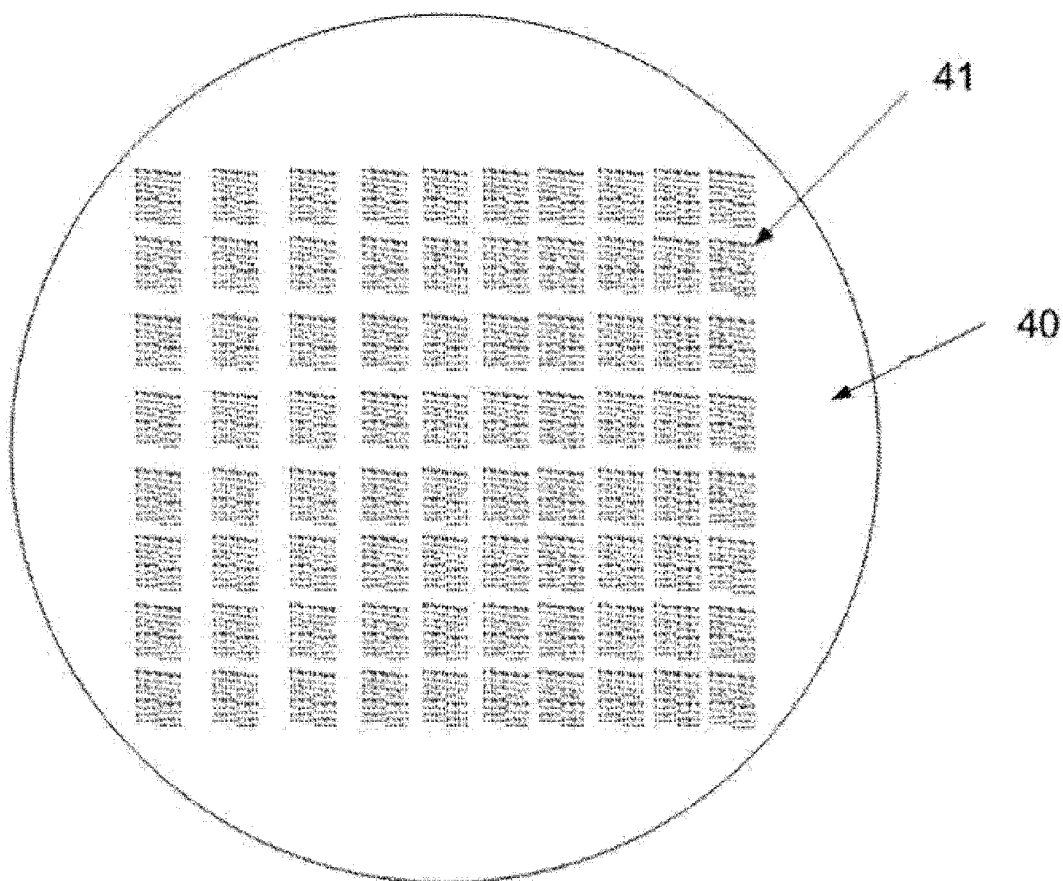


图 2b

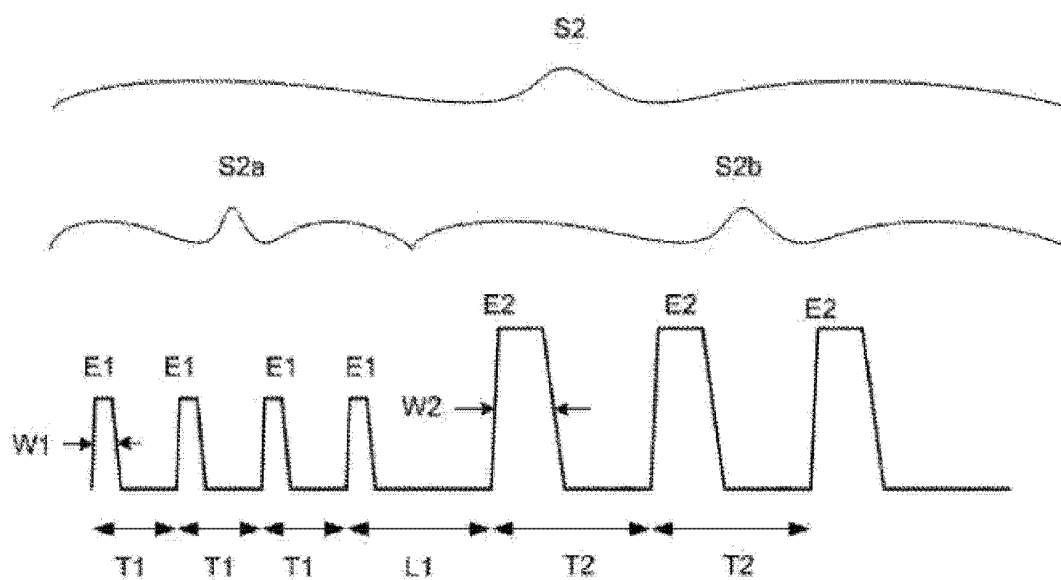


图 3

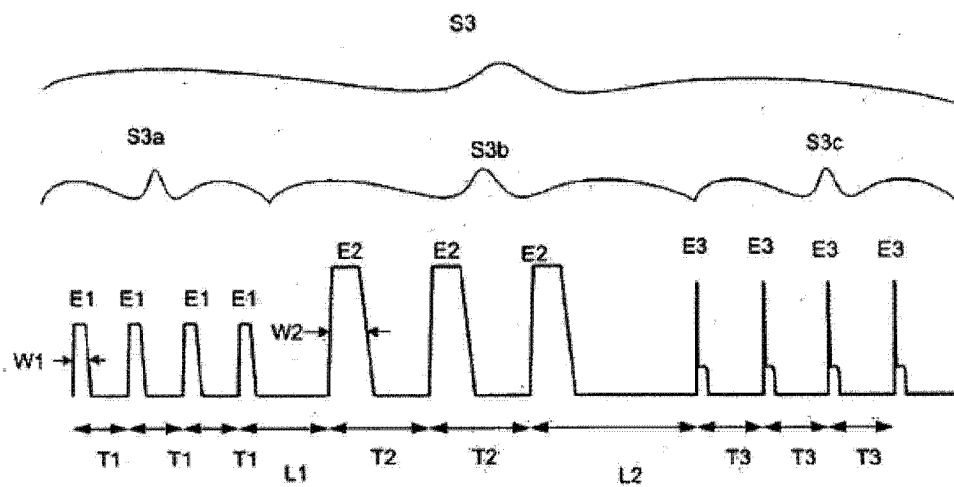


图 4

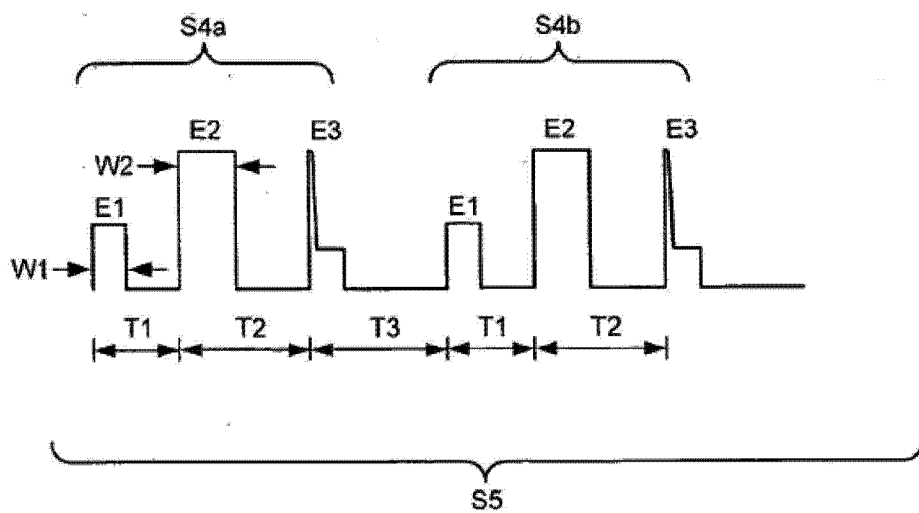


图 13

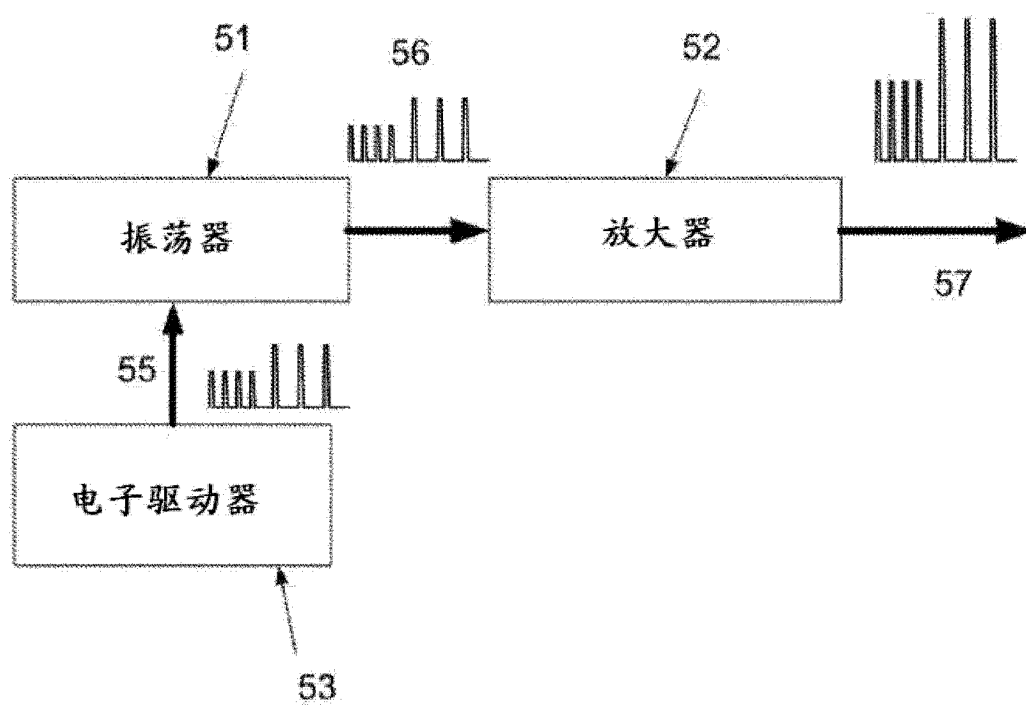


图 5

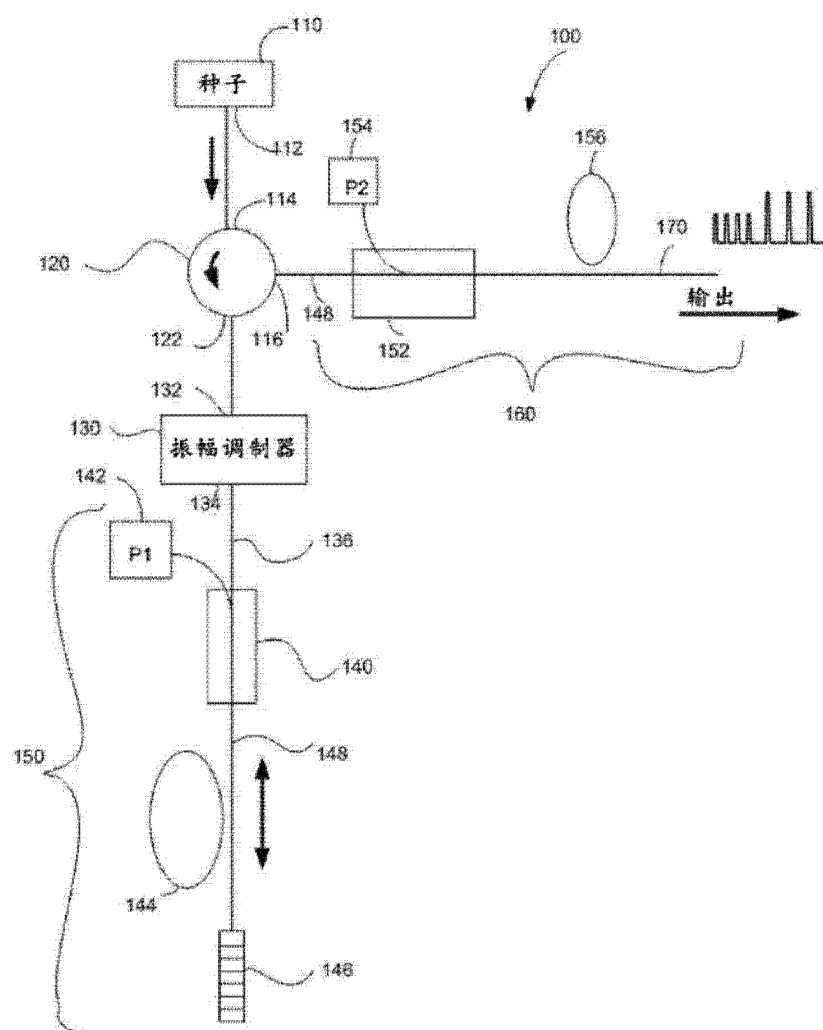


图 6

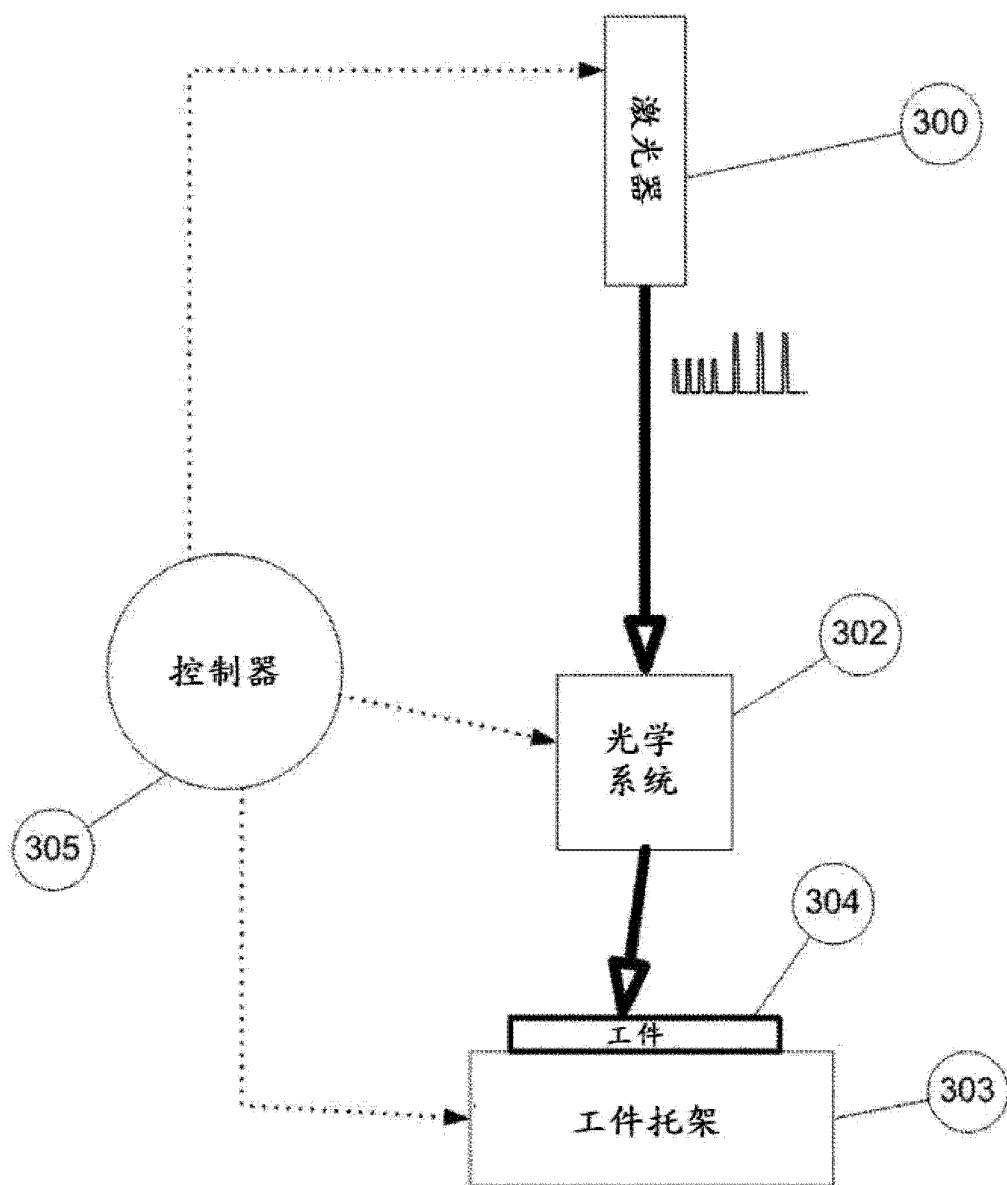


图 7

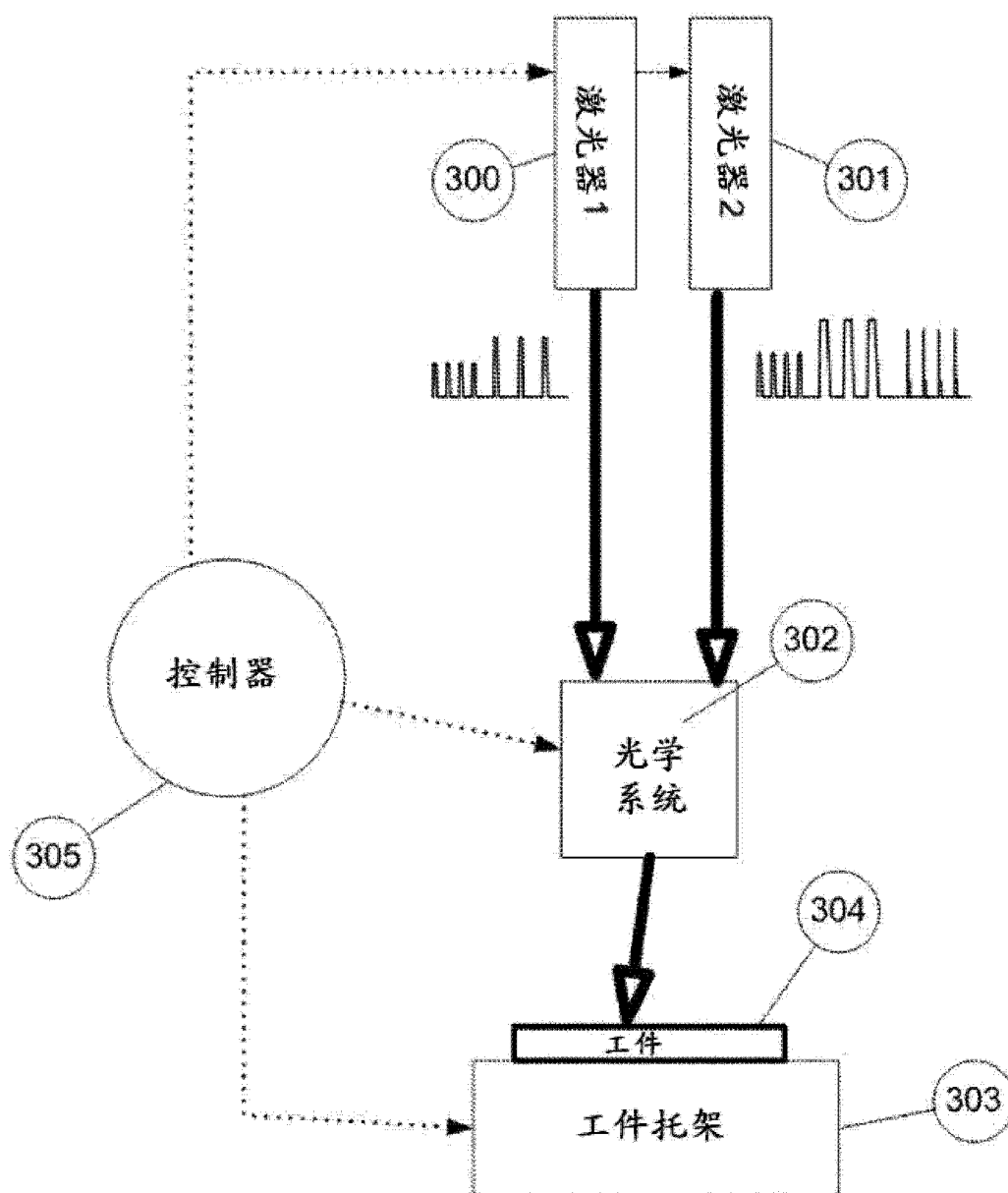


图 8

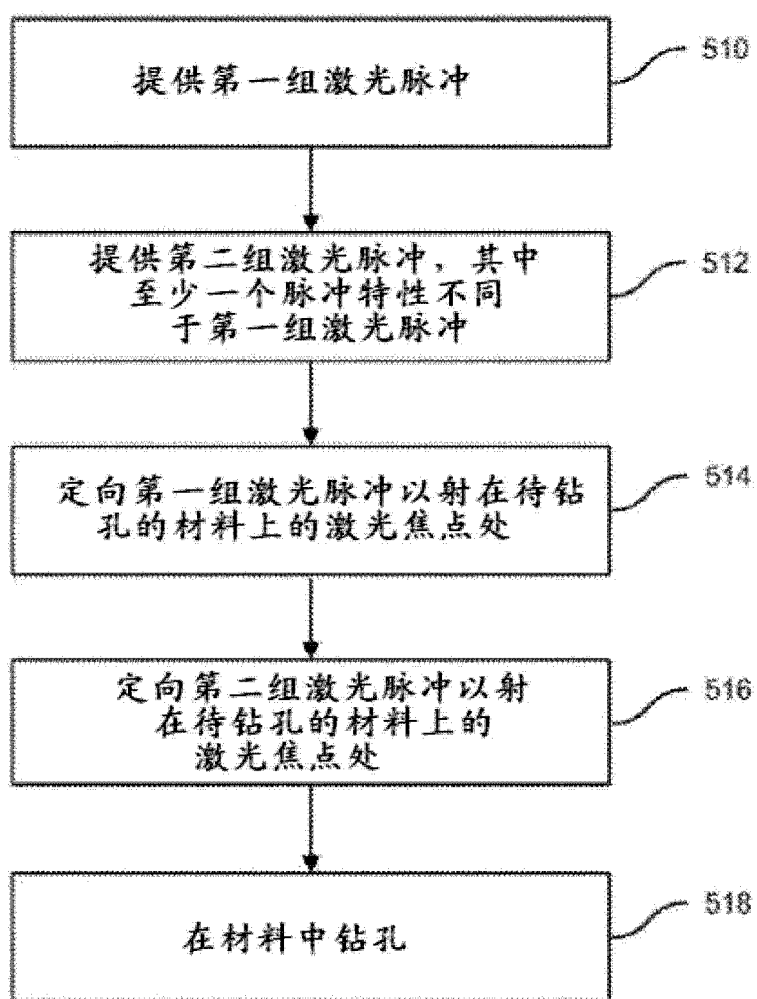


图 9

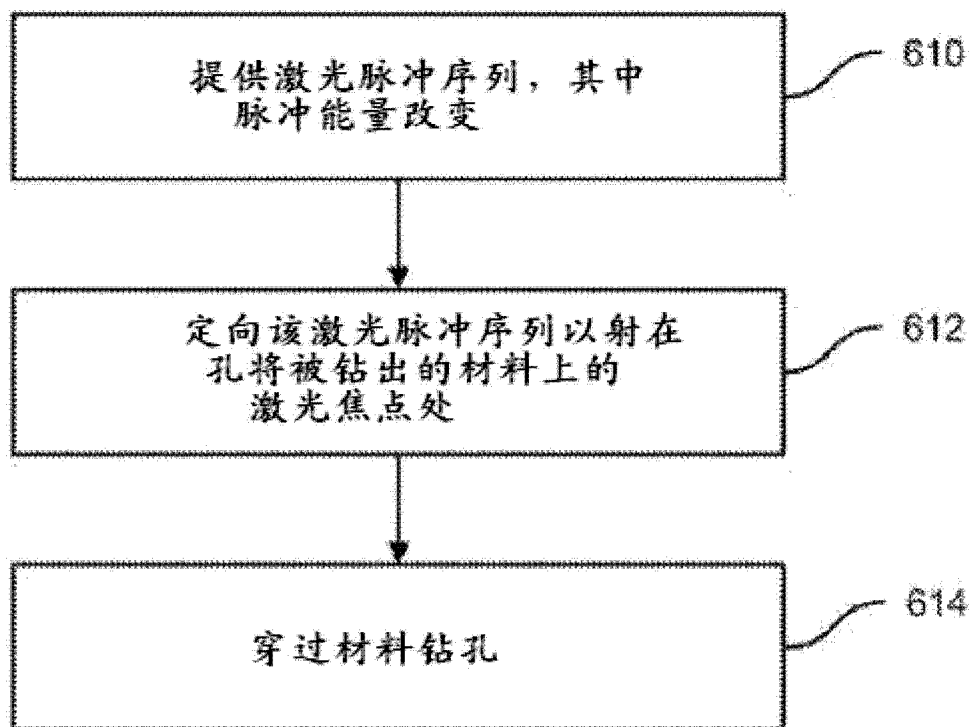


图 10

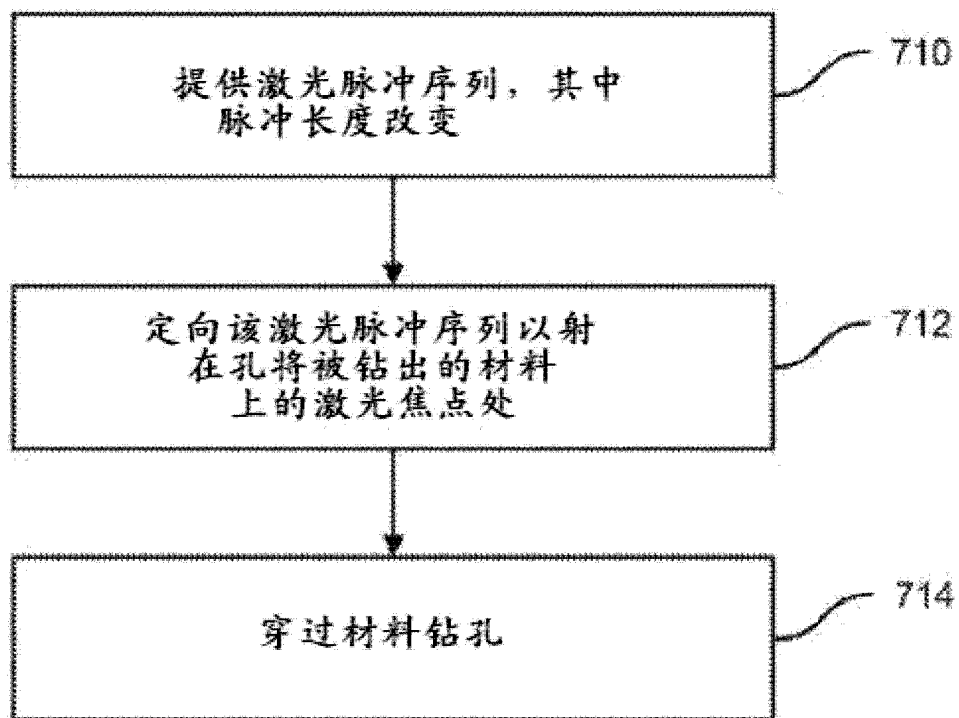


图 11

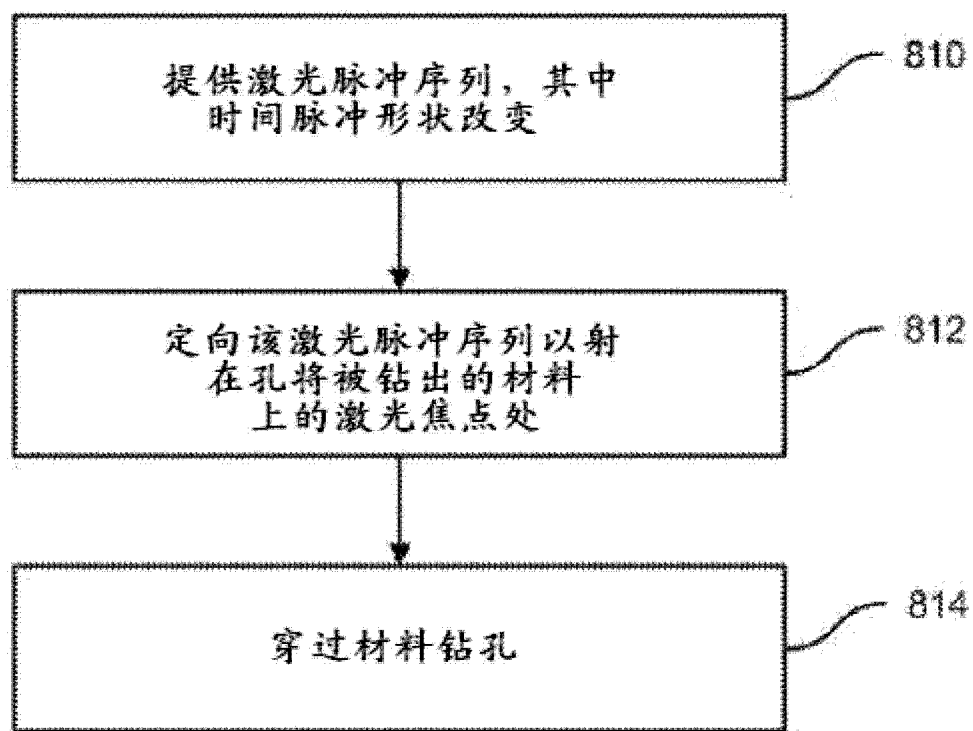


图 12