



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200580001590.9

[45] 授权公告日 2009 年 12 月 23 日

[11] 授权公告号 CN 100571960C

[22] 申请日 2005.6.3

[21] 申请号 200580001590.9

[86] 国际申请 PCT/JP2005/010235 2005.6.3

[87] 国际公布 WO2006/129369 日 2006.12.7

[85] 进入国家阶段日期 2006.6.12

[73] 专利权人 三菱电机株式会社

地址 日本东京

[72] 发明人 京藤友博 山本达也

[56] 参考文献

CN1287900A 2001.3.21

CN1373500A 2002.10.9

JP2001-334380A 2001.12.4

CN1376100A 2002.10.23

JP2002-1566A 2002.1.8

审查员 刘文镐

[74] 专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理有限公司

代理人 何立波 张天舒

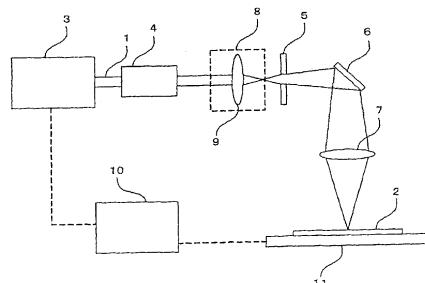
权利要求书 5 页 说明书 18 页 附图 5 页

[54] 发明名称

激光加工方法以及激光加工装置

[57] 摘要

本发明涉及的激光加工装置中，具有：激光振荡器(3)，其输出激光束(1)；掩模(5)，其配置在激光束的光路中，使从激光振荡器(3)输出的激光束成形为希望的直径或者形状；波阵面曲率调整单元(8)，其配置在紧邻在前述掩模(5)前的激光束光路中，使前述掩模(5)上的激光束的波阵面曲率发散；复制透镜(7)，其配置在前述掩模(5)和被加工物(2)之间的激光束光路中，在将透过前述掩模(5)的激光束照射在被加工物(2)表面时，将前述掩模(5)的像复制到被加工物(2)表面上，由此，可以使被加工物(2)表面上的激光束(1)的波阵面曲率(23)发散，所以即使是厚度厚的被加工物(2)，也可以优化加工孔的锥度。



1. 一种激光加工装置，其特征在于，具有：

激光振荡器，其输出激光束；

掩模，其配置在激光束的光路中，将从激光振荡器输出的激光束成形为具有希望的光束直径或者形状；

波阵面曲率调整单元，其配置在紧邻在前述掩模前的激光束光路上，使前述掩模上的激光束的波阵面曲率发散；以及

复制透镜，其配置在前述掩模和被加工物之间的激光束光路中，在将透过前述掩模的激光束照射到被加工物表面时，将前述掩模的像复制到被加工物表面。

2. 根据权利要求 1 所述的激光加工装置，其特征在于，

前述波阵面曲率调整单元使用凹透镜，输出使前述掩模上的激光束波阵面曲率发散的激光束。

3. 根据权利要求 1 所述的激光加工装置，其特征在于，

前述波阵面曲率调整单元使用焦点位于前述掩模前面的凸透镜，输出使前述掩模上的激光束波阵面曲率发散的激光束。

4. 根据权利要求 1 所述的激光加工装置，其特征在于，

前述波阵面曲率调整单元是由 3 个或 3 个以上的透镜构成的复制光学系统，该复制光学系统将激光束光路上的规定位置上的激光束的像作为物点，复制到前述掩模上。

5. 根据权利要求 4 所述的激光加工装置，其特征在于，具有：

驱动装置，其使构成前述复制光学系统的各透镜沿着激光束光轴独立地移动；以及

控制装置，其设定前述各透镜的位置，使前述掩模上的激光束波阵面曲率和/或光束直径成为期望值，通过控制前述驱动装置使各

透镜移动到该设定的位置上。

6. 根据权利要求 5 所述的激光加工装置，其特征在于，前述控制装置，根据记录了与预先设定的波阵面曲率和光束直径相对应的各透镜位置的数据库，设定前述各透镜的位置。

7. 根据权利要求 5 所述的激光加工装置，其特征在于，具备功率传感器，其测定照射到被加工物上的激光束的能量，前述控制装置对由前述功率传感器测定的激光束的能量测定值和能量设定值进行比较，求出使前述测定值成为前述设定值的光束直径，然后设定前述各透镜的位置，以成为该光束直径。

8. 根据权利要求 6 所述的激光加工装置，其特征在于，具备功率传感器，其测定照射到被加工物上的激光束的能量，前述控制装置对由前述功率传感器测定的激光束的能量测定值和能量设定值进行比较，求出使前述测定值成为前述设定值的光束直径，然后设定前述各透镜的位置，以成为该光束直径。

9. 根据权利要求 4 至 8 中任意一项所述的激光加工装置，其特征在于，

前述复制光学系统由 3 个凸透镜构成，在前述复制光学系统的物点位置上的激光束波阵面是平面的情况下，

前述 3 个凸透镜中，如果将前述激光振荡器侧的第 1 透镜的焦距设为 f_1 ，将中央的第 2 透镜的焦距设为 f_2 ，将前述被加工物侧的第 3 透镜的焦距设为 f_3 ，将物点的位置和第 1 透镜之间的距离设为 L_1 ，将第 1 透镜和第 2 透镜之间的距离设为 L_2 ，将第 2 透镜和第 3 透镜之间的距离设为 L_3 ，将第 3 透镜和前述掩模之间的距离设为 L_4 ，则设定 $f_1 \sim f_3$ 以及 $L_1 \sim L_4$ ，使得其满足：

$$-\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_3} + \left(\frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} \right) \frac{L_2}{f_1} + \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right) \frac{L_3}{f_3} - \frac{L_2 L_3}{f_1 f_2 f_3} > 0 \quad .$$

10. 根据权利要求 1 至 8 中任意一项所述的激光加工装置，其特征在于，

具备均匀化光学系统，其配置在前述激光振荡器和前述波阵面曲率调整单元之间的激光束光路中，使激光束的强度分布成为中央部和周边部大致相同的所谓顶帽分布。

11. 根据权利要求 9 所述的激光加工装置，其特征在于，

具备均匀化光学系统，其配置在前述激光振荡器和前述波阵面曲率调整单元之间的激光束光路中，使激光束的强度分布成为中央部和周边部大致相同的所谓顶帽分布。

12. 一种激光加工装置，其具有：

激光振荡器，其输出激光束；

掩模，其配置在前述激光束的光路中，将从激光振荡器输出的激光束成形为具有希望的光束直径或者形状；以及

复制透镜，其配置在前述掩模和被加工物之间的激光束光路中，在将透过前述掩模的激光束照射到被加工物表面时，将前述掩模的像复制到被加工物表面上，其特征在于，具有：

复制光学系统，其由配置在紧邻在前述掩模前的激光束光路上的 3 个或 3 个以上的透镜构成，将激光束光路上的适当位置上的激光束的像作为物点，复制到前述掩模上；

驱动装置，其使构成前述复制光学系统的各透镜沿着激光束光轴独立地移动；以及

控制装置，其设定前述各透镜的位置，使前述掩模上的激光束波阵面曲率和/或光束直径成为期望值，通过控制前述驱动装置使各透镜移动到该设定的位置上。

13. 根据权利要求 12 所述的激光加工装置，其特征在于，
前述控制装置，根据记录了与预先设定的与波阵面曲率和光束
直径相对应的各透镜位置的数据库，设定前述各透镜的位置。

14. 根据权利要求 12 或 13 所述的激光加工装置，其特征在于，
具备功率传感器，其测定照射到被加工物上的激光束能量，
前述控制装置对由前述功率传感器测定的激光束的能量测定值
和能量设定值进行比较，求出使前述测定值成为前述设定值的光束直
径，然后设定前述各透镜的位置，以成为该光束直径。

15. 一种激光加工方法，将对激光振荡器输出的激光束进行成
形的掩模的像复制到被加工物表面，来进行打孔加工，其特征在于，
利用波阵面曲率在被加工物表面上发散的激光束进行加工。

16. 根据权利要求 15 所述的激光加工方法，其特征在于，
通过使前述掩模上的激光束的波阵面曲率发散，来使被加工物
表面上的激光束的波阵面曲率发散。

17. 根据权利要求 16 所述的激光加工方法，其特征在于，
利用插入在前述激光振荡器和前述掩模之间的凹透镜，使前述
掩模上的激光束的波阵面曲率发散。

18. 根据权利要求 16 所述的激光加工方法，其特征在于，
利用插入在前述激光振荡器和前述掩模之间的、焦点位于前述
掩模的前面的凸透镜，使前述掩模上的激光束的波阵面曲率发散。

19. 根据权利要求 17 或 18 所述的激光加工方法，其特征在于，
包含使入射到前述透镜的激光束的强度分布成为在中央部和周
边部大致相同的所谓顶帽分布的工序。

20. 根据权利要求 16 所述的激光加工方法，其特征在于，
利用插入在前述激光振荡器和前述掩模之间的、由 3 个或 3 个
以上的透镜构成的复制光学系统，使前述掩模上的激光束的波阵面曲
率发散。

21. 根据权利要求 20 所述的激光加工方法，其特征在于，
包含使构成前述复制光学系统的各透镜沿着光轴独立移动的第
1 移动工序。

22. 根据权利要求 21 所述的激光加工方法，其特征在于，上述
第 1 移动工序中包含以下工序：

测定照射到被加工物上的激光束的能量的工序；
对利用上述工序测定的测定值和另外设定的能量设定值进行比
较，并计算使前述激光束能量成为设定值的前述复制光学系统的倍率
的工序；
由另外设定的掩模上的激光束波阵面曲率值和前述计算出的倍
率，设定构成前述复制光学系统的各透镜的位置的工序；以及
根据前述设定的各透镜的位置，使各透镜沿着光轴移动的工序。

23. 根据权利要求 20 至 22 中任一项所述的激光加工方法，其
特征在于，

包含使入射到前述复制光学系统的激光束的强度分布成为中央
部和周边部大致相同的所谓顶帽分布的工序。

激光加工方法以及激光加工装置

技术领域

本发明涉及一种激光加工方法及其激光加工装置，其利用激光束对印制电路板等被加工物进行打孔加工。

背景技术

在现有的以对印制电路板等被加工物进行打孔加工为主要目的、将掩模的像复制到被加工物表面来进行加工的激光加工装置以及方法中，其结构为：在光学系统中插入均匀化光学系统，以使激光束的强度分布成为所谓顶帽（top hat）形状，同时使掩模上的激光束的波阵面曲率收敛，由此得到均匀的加工品质（例如，参照专利文献1）。

专利文献1：特开平2002-1566号公报

发明内容

在现有的激光加工装置以及方法中，通过实施上述结构，在被加工物的厚度薄时，能够优化加工孔的加工底面上的孔径（以下称之为底径）和加工表面上的孔径（以下称之为顶径）之间的比例即锥度（=底径/顶径），即能够接近100%。但是，在加工例如厚度超过 $100\mu\text{m}$ 这样厚度的被加工物的情况下，会产生锥度恶化的问题。下面说明其理由。

在现有的激光加工装置以及方法中，在掩模的激光束光路下流侧配置孔径光阑，但在激光束透过掩模后的激光束周边部分的、由掩模引起的衍射的高次部分，被该孔径光阑遮蔽的情况下，激光束的轮廓恶化，顶帽形状被破坏而导致加工品质的降低。因此，为了使加工品质保持均匀，优选如下的结构，即，以使得通过掩模的激光束的衍射的高次成分不被孔径光阑遮蔽的方式，使掩模上的激光束的波阵面曲率收敛，从而使激光束不向孔径光阑发散。因此，在现有的激光加

工装置以及方法中，掩模上的激光束的波阵面曲率收敛。

在将掩模的像复制到被加工物表面的情况下，加工表面上的激光束的波阵面曲率，由掩模上的激光束的波阵面曲率和将掩模的像复制到被加工物表面的复制透镜的复制率确定。通常，在掩模和被加工物之间，透镜系统仅是例如 $f\theta$ 透镜这样的复制透镜，如果比较掩模上的激光束的波阵面曲率和作为复制位置的加工表面上的波阵面曲率，则绝对值按照复制透镜的复制率产生变化，但符号不变化。也就是说，如果掩模上的激光束的波阵面曲率收敛，则被加工物表面的波阵面曲率也收敛。

由此，在现有的激光加工装置以及方法中，为了防止激光束轮廓的恶化而使掩模上的激光束的曲率收敛，因此，结果作为掩模的像的复制位置的被加工物表面上的波阵面曲率也收敛。因此，照射到被加工物上的激光束，成为光束直径从加工表面向加工底面变细的形状，从而成为被加工物的厚度越厚加工底面的光束直径就越细的状况。

其结果，被加工物的厚度越厚，加工孔的底径就越小，成为锥度恶化的原因。

本发明就是为了解决上述问题而提出的，其目的在于，得到一种激光加工装置以及方法，其将掩模的像复制到被加工物的表面上来进行加工，对于厚度厚的被加工物也可以增大加工孔的底径，优化加工孔的锥度。

本发明涉及的激光加工装置，其特征在于，具有：激光振荡器，其输出激光束；掩模，其配置在激光束的光路中，将从激光振荡器输出的激光束成形为希望的直径或者形状；波阵面曲率调整单元，其配置在紧邻在前述掩模前的激光束光路上，使前述掩模上的激光束的波阵面曲率发散；以及复制透镜，其配置在前述掩模和被加工物之间的激光束光路中，在将透过前述掩模的激光束照射到被加工物表面时，将前述掩模的像复制到被加工物表面。

此外，本发明涉及的激光加工方法，是将成形由激光振荡器输出的激光束的掩模的像复制到被加工物表面，来进行打孔加工，其特

征在于，利用波阵面曲率在被加工物表面上发散的激光束进行加工。

发明的效果

本发明通过使被加工物的加工表面上激光束的光束波阵面曲率发散，即使被加工物的厚度厚，也可优化加工孔的锥度。

附图说明

图 1 是表示本发明的实施方式 1 的激光加工方法的说明图。

图 2 是表示本发明的实施方式 1 的激光加工装置的结构图。

图 3 是表示作为本发明的实施方式 1 的激光加工方法的实验结果的图。

图 4 是表示本发明的实施方式 1 的其他激光加工装置的结构图。

图 5 是表示本发明的实施方式 2 的激光加工装置的结构图。

图 6 是表示本发明的实施方式 3 的激光加工装置的结构图。

图 7 是用于说明作为本发明的实施方式 3 的激光加工装置的复制光学系统的示意图。

图 8 是表示存储在作为本发明的实施方式 3 的激光加工装置控制装置中的数据库的图。

图 9 是表示作为本发明的实施方式 3 的激光加工装置的控制方法的流程图。

具体实施方式

实施方式 1

如课题中所述，在现有的激光加工装置以及方法中，因为使掩模上的激光束的波阵面曲率收敛，所以其结果，被加工物上的激光束的波阵面曲率也收敛，照射到被加工物上的激光束成为逐渐变细的形状，存在当被加工物的厚度变厚时加工孔的锥度恶化的问题。因此，发明人研究能否通过使被加工物上的激光束的波阵面曲率发散来改善锥度。

首先，说明通过使被加工物上的激光束的波阵面曲率发散来改

善加工孔的锥度的理由。

图 1 是表示被加工物附近的激光束的形状以及波阵面曲率的示意图。图 1 (a) 表示作为现有的加工方法的掩模上的波阵面曲率收敛的情况，图 1 (b) 表示作为本发明的加工方法的掩模上的波阵面曲率发散的情况。在图 1 中，1 是照射到被加工物上的激光束，2 是作为加工对象的被加工物，21 是被加工物的加工表面，22 是被加工物的加工底面，虚线所示的 23 是激光束 1 的波阵面曲率。另外， W_{1a} 表示现有的加工方法中的加工表面 21 上的光束直径， W_{2a} 表示现有的加工方法中的加工底面 22 上的光束直径， W_{1b} 表示本发明的加工方法中的加工表面 21 上的光束直径， W_{2b} 表示本发明的加工方法中的加工底面 22 上的光束直径。24 是作为激光束 1 最集中位置的所谓束腰位置，25 是掩模的像利用复制透镜被复制而成像的复制位置。

在这里，在将掩模的像复制到被加工物上进行加工的激光加工方法中，因为在加工表面 21 和掩模的像成像的复制位置 25 之间有偏差的情况下，会产生因光学系统的像差等影响而加工孔的圆形度恶化的问题，因此如图 1 所示，希望复制位置 25 和加工表面 21 相吻合。

另外，如图 1 所示，激光束 1 的波阵面曲率 23，在直至束腰位置 24 为止是收敛，光束直径渐渐变细，在束腰位置 24，波阵面曲率 23 成为平面，波阵面曲率 23 在束腰位置 24 之后发散，激光束 1 渐渐变粗。

在现有的加工方法中，由于为了防止激光束 1 的轮廓的恶化，使掩模上的激光束的波阵面曲率收敛，因此复制位置 25 上的波阵面曲率 23 也收敛。即，复制位置 25 位于束腰位置 24 的激光束光路上流侧。如上所述，因为希望复制位置 25 和加工表面 21 一致，因此其结果，如图 1 (a) 所示，加工表面 21 位于束腰位置 24 的激光束光路上流侧，激光束的形状如图 1 (a) 所示，为从加工表面向加工底面变细的形状。

其结果，加工表面 21 上的光束直径 W_{1a} 和加工底面 21 上的光束直径 W_{2a} 之间的关系为

$$W_{1a} \geq W_{2a} \quad (\text{式 1})$$

本来，因为加工表面 21 总是有激光束 1 的输入热量，所以加工孔的底径与加工孔的顶径相比有直径变小的倾向，再加上（式 1）的影响，加工孔的底径进一步变小，锥度恶化。特别是在被加工物的厚度厚时，因为激光束 1 在加工底面 21 上变得更细，并且激光束 1 的输入热量在加工底面 21 侧变得更少，所以锥度的恶化变得显著。

另一方面，在本发明中，通过将掩模上的激光束 1 的波阵面曲率 23 设定为发散，使得复制位置 25 上的波阵面曲率 23 发散。即，复制位置 25 位于束腰位置 24 的激光束光路下流侧。因为希望复制位置 25 和加工表面 21 一致，所以其结果，如图 1 (b) 所示，加工表面 21 位于束腰位置 24 的激光束光路下流侧。从而，激光束 1 的形状如图 1 (b) 所示，成为从加工表面 21 向加工底面 21 逐渐变粗的形状。其结果，加工表面 21 上的光束直径 W_{1b} 和加工底面 21 上的光束直径 W_{2b} 的关系为

$$W_{1b} \leq W_{2b} \quad (\text{式 2})$$

如上所述，因为加工表面 21 总是有激光束 1 的输入热量，所以加工孔的底径有比加工孔的顶径直径小的倾向，但（式 2）的效果起到将其抵消的作用，与图 1 (a) 所示的波阵面曲率收敛的情况相比，加工孔的底径变大，锥度优化。特别是，由于被加工物的厚度越厚，激光束 1 在加工底面 21 上就越粗，因此该效果越显著。

下面，使用图 2 说明用于实现上述加工方法的激光加工装置的一个例子。

图 2 表示用于实施本发明的实施方式 1 中的激光加工装置的结构。在图 2 中，3 是激光振荡器；1 是激光束；4 是均匀化光学系统，其将从激光振荡器 3 输出的激光束 1 的模式形状，从高斯模式分布变换为在整个周边部强度分布均匀的所谓顶帽分布；5 是掩模，其将激光束 1 成形为希望的直径或者形状；6 是反射镜；2 是被加工物；7 是复制透镜，其将掩模 5 的像向被加工物 2 复制。8 是波阵面曲率调整单元，其使利用均匀化光学系统 4 形成的激光束的波阵面曲率在掩模 5 上发散。9 是构成波阵面曲率调整单元 8 的 1 个凸透镜，配置成焦点位于掩模 5 的前面。另外，10 是用于控制激光加工装置整体的

控制装置；11是加工台，其承载被加工物2并使被加工物2在XY方向上移动。

在这里，反射镜6与现有激光加工装置中的孔径光阑相同地，产生屏蔽激光束的衍射光的高次成分的影响。即，反射镜6的有效直径相当于孔径光阑的开口部，仅将入射到反射镜6的有效直径内的激光束引导到复制透镜7，以有效地在加工中使用。

下面，说明图2所示的激光加工装置的基本动作。

首先，从利用控制装置10控制激光输出的打开/关闭等的激光振荡器3输出激光束1，该激光束1利用均匀化光学系统4，变换为在整个激光束周边部强度分布均匀的所谓顶帽分布。然后，被变换为顶帽分布的激光束1透过波阵面曲率调整单元8而到达掩模5。在这里，由于构成波阵面曲率调整单元8的凸透镜9的焦点位于掩模5的前面，因此透过凸透镜9的激光束的波阵面曲率在掩模上发散。然后，利用掩模5成形的激光束被反射镜6利用反射，由复制透镜7变换为规定的倍率，照射到被加工物2上。由此，掩模5的像被复制到被加工物2上，因此，被加工物2上的激光束1的波阵面曲率发散。

并且，通过使加工台11的移动与激光振荡器3的打开/关闭同步，可以在被加工物2的希望位置上进行打孔加工。另外，也可以是以下结构，即，将反射镜6替换成对激光束1进行扫描的电控扫描器，固定被加工物2而由电控扫描器在规定范围内进行打孔加工。

下面说明发明人采用图2所示的激光加工装置实施本发明的加工方法的实验内容以及结果。

在设定为从掩模5到复制透镜7的距离为1500mm、反射镜6的有效直径为 $\phi 30\text{mm}$ 、复制透镜7的焦距为75mm的激光加工装置中，以掩模5上的光束波阵面曲率为参数，实施加工A（目标加工孔径为 $\phi 200\mu\text{m}$ 、被加工物的厚度为 $200\mu\text{m}$ ）、以及加工B（目标加工孔径为 $\phi 120\mu\text{m}$ 、被加工物的厚度为 $50\mu\text{m}$ ）的通孔加工，得到了图3所示的结果。在图3中，横轴表示掩模5上的光束波阵面的曲率半径，符号是发散为正，收敛为负。在负的区域中，波阵面的曲率半径越接近0，即绝对值越小，表示波阵面曲率的发散程度越大，当波阵

面的曲率半径无限大时，表示波阵面是平面。此外，纵轴表示加工孔的锥度。

利用现有的加工方法得到的锥度，在同样条件下的加工中不足 90%，是与图 3 中的波阵面的曲率半径 -10000mm 大致相同的程度。在利用本发明的加工方法中，在波阵面的曲率半径是 -500mm 的程度、加工 A 的情况下，得到了大约 96% 的锥度，此外在加工 B 的情况下，得到了大约 91% 的锥度。由此，特别是在被加工物的厚度厚的加工 A 中，明确地看出，利用本发明的加工方法比现有加工方法优化了锥度。此外，在被加工物的厚度是普通的加工 B 中，得到比现有的稍微优化的锥度。

观察图 3 的加工 A 的曲线可以看出，掩模 5 上的光束波阵面曲率的发散程度越大，锥度越优化，可以说利用波阵面曲率得到了锥度的改善效果。另外，在比较图 3 的加工 A 的曲线和加工 B 的曲线的情况下可以明确，利用使掩模 5 上的波阵面曲率发散得到的锥度改善效果，具有被加工物的厚度越厚、加工孔径越大，效果越好的倾向。

被加工物的厚度越厚效果越好的理由是，如图 1 (b) 的说明中所述，被加工物 2 的厚度越厚，贯穿被加工物 2 的激光束 1 的加工底面的光束直径 W_{2b} 相对于加工表面 21 的光束直径 W_{1b} 越大。

另外，加工孔越大效果越好的理由如下所述。通常，因为加工孔径由掩模直径进行调整，所以加工孔径越大掩模 5 的直径也需要越大。但是，一般的，如果将掩模直径设为 D、激光束的波长设为 λ 、掩模上的衍射中的 0 次衍射光的发散角度设为 θ_1 ，则 θ_1 由以下的（式 3）定义。

$$\theta_1 = 2.44 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{式 3})$$

由此，当增大掩模直径时，掩模上的衍射光的发散角度变小。因为如果掩模上的衍射光的发散变小，则图 2 中激光束 1 的衍射光的高次成分容易入射到反射镜 6 的有效直径内，所以激光束 1 的轮廓恶化小，锥度得到优化。相反，因为如果加工孔径小，则掩模 5 上的衍射光的发散大，衍射光的高次成分变得难以入射到反射镜 6 的有效直

径内，所以光束轮廓恶化，抵消了由使波阵面曲率发散得到的锥度的改善效果。

另外，观察图 3 的加工 B 的曲线，如果过度加大波阵面曲率的发散程度，则产生锥度的恶化。这是由于，因为如果过度加大掩模 5 上的波阵面曲率的发散程度，则从掩模 5 到反射镜 6 的激光束的发散变大，所以掩模 5 上的衍射光的高次成分难以入射到反射镜 6 的有效直径内，因而光束轮廓恶化。此外，当激光束的发散变大时，反射镜 6 上的光束直径也变大，容易受反射镜 6 的像差的影响，这也是原因之一。

在上述中，作为波阵面曲率调整单元 8 使用了 1 个凸透镜 9，但也可以由 1 个凹透镜构成波阵面曲率调整单元 8。图 4 是由 1 个凹透镜 31 构成波阵面曲率调整单元 8 的激光加工装置的结构图。与图 2 所示的激光加工机的不同点仅在于，是将凸透镜 9 换成了凹透镜 31。

在图 2 所示的激光加工机的情况下，因为必须使透过凸透镜 9 的激光束 1 会聚到焦点一次后入射到掩模 5 中，所以在凸透镜 9 和掩模 5 之间必须有某一程度的距离，但在凹透镜 31 的情况下，因为激光束 1 的波阵面在刚透过凹透镜 31 之后就发散，所以存在凹透镜 31 和掩模 5 之间的距离可以缩短，能够紧凑地构成光学系统的优点。另一方面，在使用凸透镜 9 的情况下，因为掩模 5 上的激光束 1 的光束直径可以比凹透镜 31 小，所以存在可以减小掩模 5 上的激光束 1 的能量损失的优点。

根据该实施方式 1，在将掩模的像复制到被加工物表面来进行加工的激光加工装置中，因为可以通过 1 个凸透镜或者凹透镜，使掩模上的激光束的波阵面曲率发散，所以可以使被加工物表面上激光束的波阵面曲率发散，特别是在厚度厚的被加工物的打孔加工中，可以简单地优化加工孔的锥度。

实施方式 2

图 5 表示本发明的实施方式 2 中的激光加工装置的结构，是从实施方式 1 的图 2 中去掉均匀化光学系统 4 的结构。因为其他结构与

图 2 相同，所以省略详细说明。因此，与实施方式 1 动作不同的地方在于，不对从激光振荡器 3 输出的激光束 1 进行光束模式分布的变换。即，加工中使用的激光束 1 的轮廓为所谓的高斯模式分布，为加工孔的锥度容易恶化的光束模式分布。本实施方式中的激光加工装置以及加工方法的目的是，在保持该分布的情况下，通过使被加工物表面上的激光束波阵面曲率发散，来实现加工孔锥度的改善。由此，波阵面曲率调整单元 8 的结构和动作与实施方式 1 相同，也可以由凹透镜构成。

发明人使用图 5 所示的激光加工装置实施的实验的结果如下所述。

实验实施了使用厚度较厚的被加工物的加工 C（目标加工孔径为 $\phi 120 \mu\text{m}$ 、被加工物的厚度为 $200 \mu\text{m}$ ）的打孔加工。在入射光束的波阵面的曲率半径是 300mm 程度的收敛时，加工孔的锥度是 81%，与之相对，在使入射光束的波阵面曲率发散的本发明的加工方法的情况下，在波阵面的曲率半径是 -300mm 程度的发散时，加工孔的锥度为 94%，得到了大幅的改善效果。该值与使用均匀化光学系统使波阵面曲率收敛的现有的加工方法相比较，更优化了锥度，是接近于利用实施方式 1 的加工方法的值。

这意味着，加工孔锥度的改善，在被加工物的厚度薄时，光束轮廓的效果与利用波阵面曲率的被加工物底面上的光束直径扩大的效果相比，是主要的，在被加工物的厚度厚时，利用波阵面曲率的被加工物底面上的光束直径扩大的效果与光束轮廓的效果相比，是主要的。即，可以说，在被加工物的厚度厚时，使激光束的波阵面曲率发散在改善加工孔锥度的方面最具有效果。

由此，特别是在被加工物的厚度厚的情况下，因为即使不使用高价的均匀化光学系统 4，也可以得到对加工孔的锥度大幅改善的效果，因此在不需要实施方式 1 的加工方法那样的效果的情况下，能够利用本实施方式得到廉价的激光加工装置。

实施方式 3

在进行打孔加工的激光加工中，必须根据加工条件调整照射到被加工物上的激光束的能量。要调整激光束的能量，可以考虑使激光束的脉冲宽度变化或调整向激光振荡器的供给功率的方法，但存在如下的问题：有时候如果使脉冲宽度变化则加工品质就会变化，如果使向振荡器的供给功率变化则振荡变得不稳定。因此，通常优选使掩模上的激光束的光束直径变化，来调整透过掩模的激光束能量的方法。

在这里，在实施方式 1 以及 2 中，利用 1 个凸透镜或者凹透镜使掩模上的激光束波阵面曲率发散，但在调整掩模上的激光束的光束直径的情况下，例如可以在透镜上设置驱动装置，使透镜和掩模的距离变化。但是，同时掩模上的激光束波阵面曲率也会变化。例如，在图 2 中，在要加大掩模上的光束直径的情况下，使凸透镜 9 远离掩模 5 即可，但该情况下波阵面曲率的发散程度变小。在该情况下，利用波阵面曲率的锥度改善效果变弱。相反地，在要减小掩模上的光束直径的情况下，使凸透镜 9 靠近掩模 5 即可，该情况下波阵面曲率的发散程度大，锥度改善效果也变好。但是，如图 1 所示，当过度加大波阵面曲率发散程度时，有时反而会引起锥度恶化。

另外，如上所述，加工孔锥度的改善，在被加工物的厚度薄时，光束轮廓的效果与利用波阵面曲率的被加工物底面上的光束直径扩大的效果相比，是主要的，在被加工物的厚度厚时，利用波阵面曲率的被加工物底面上的光束直径扩大的效果与光束轮廓的效果相比，是主要的，因此在被加工物的厚度薄时，也可能产生希望使波阵面曲率收敛的情况。

因此，如果能够各自独立地调整掩模上的激光束波阵面曲率和光束直径，则扩大了加工条件的选择范围，能够由最适合被加工物的材质和厚度以及其他加工条件的波阵面曲率和能量值，进行高品质的加工。本实施方式的目的在于，得到能够各自独立地对掩模上的激光束波的阵面曲率和光束直径进行调整的激光加工装置。

图 6 表示用于实施本发明的实施方式 3 中的激光加工装置的结构。与实施方式 1 的图 2 的最大不同点在于，利用由 3 个凸透镜组成的复制光学系统，构成由图 2 中的 1 个凸透镜构成的波阵面曲率调整

单元 5。

在图 6 中，3 是激光振荡器；1 是激光束；4 是均匀化光学系统，其将从激光振荡器 3 输出的激光束 1 的模式形状，从高斯模式分布变换为在整个周边部均匀的所谓顶帽分布；5 是掩模，其将激光束 1 成形为希望的直径或者形状；6 是反射镜；2 是被加工物；7 是复制透镜，其将掩模 5 的像向被加工物 2 复制；8 是波阵面曲率调整单元，其使利用均匀化光学系统 4 形成的激光束波阵面曲率在掩模 5 上发散。42 是由 3 个透镜组成的复制光学系统，其构成波阵面曲率调整单元 8；43 是由滚珠丝杠等构成驱动装置，其用于使构成复制光学系统 42 的各透镜在光轴方向上移动。此外，41 是掩模变换器，其用于将掩模 5 变换成不同直径或者形状的掩模；10 是控制装置，其用于控制激光加工装置整体；11 是加工台，其承载被加工物 2 并使被加工物 2 在 XY 方向上移动；44 是设置在加工台 11 上的功率传感器，其用于测定照射到被加工物 2 上的激光束 1 的能量。

下面说明图 6 所示的激光加工装置的基本动作。

首先，从利用控制装置 10 控制激光输出的打开/关闭等的激光振荡器 3 输出激光束 1，该激光束 1 利用均匀化光学系统 4 变换为在整个激光束周边部强度分布均匀的所谓顶帽分布。然后，被变换为顶帽分布的激光束利用复制光学系统 42 而被复制到掩模 5 上。在这里，在均匀化光学系统 4 是例如利用掩模等切下激光束的中央部从而变换为顶帽分布的情况下，将该掩模的像作为物点复制到掩模 5 上即可，在均匀化光学系统 4 是例如利用非球面透镜等使强度分布变化而变换为顶帽分布的情况下，将利用该非球面透镜成像的像作为物点复制到掩模 5 上即可。另外，在复制光学系统 42 中，为了使掩模 5 上的激光束的波阵面曲率和光束直径成为希望的值，利用由控制装置 10 控制的驱动装置 9，移动构成复制光学系统 42 的沿透镜光轴的位置。

然后，利用复制光学系统 42 复制到掩模 5 上的激光束 1，由掩模 5 进行光束成形后，通过反射镜 6，利用复制透镜 7 变换成规定的倍率，照射到被加工物 2 上。通过使加工台 11 的移动与激光振荡器

的打开/关闭同步，可以在被加工物 2 的希望的位置上进行打孔加工。另外，也可以为以下结构，即，将反射镜 6 替换成对激光束 1 进行扫描的电控扫描器，固定被加工物 2 而利用电控扫描器在规定范围内进行打孔加工。

另外，在调整进行加工的激光束的能量的情况下，移动加工台 11 以使激光束 1 照射到功率传感器 44 上，以利用功率传感器 44 测定的激光束 1 的能量测定值为基础，调整激光束 1 的能量。

在这里，被加工物 2 上的激光束的波阵面曲率，由掩模 5 上的波阵面曲率和从掩模 5 到复制透镜 7 的距离以及复制透镜 7 的焦距决定。因为从掩模 5 到复制透镜 7 的距离和复制透镜 7 的焦距，对于每个加工装置来说都是固定的，所以为了控制被加工物 2 上的激光束的波阵面曲率，必须控制掩模 5 上的波阵面曲率，因而本发明的复制光学系统 42 有效地发挥作用。

下面使用图 7 说明作为本发明的特征的复制光学系统 42 的作用。

在图 7 中，51 相当于复制光学系统 42 的物点位置，是均匀化光学系统 4 的光束输出位置。例如，在均匀化光学系统 4 是利用掩模等切下激光束的中央部而变换为顶帽分布的情况下，是该掩模位置，在均匀化光学系统 4 是利用非球面透镜等使强度分布变化而变换为顶帽分布的情况下，对应于该非球面透镜的成像位置。52 表示焦距为 f_1 的第 1 透镜；53 表示焦距为 f_2 的第 2 透镜；54 表示焦距为 f_3 的第 3 透镜；55 表示相当于复制光学系统 42 的像点位置的掩模 5 的位置； L_1 表示从光束输出位置 51 到第 1 透镜 52 之间的距离； L_2 表示第 1 透镜 52 和第 2 透镜 53 之间的距离； L_3 表示第 2 透镜 53 和第 3 透镜 54 之间的距离； L_4 表示第 3 透镜 54 和掩模位置 55 之间的距离； L_{all} 表示从均匀化光学系统 4 的光束输出位置 12 到掩模位置 55 之间的距离。

通常，复制光学系统的 ABCD 矩阵由（式 4）表示。

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m & 0 \\ rf & \frac{1}{m} \end{pmatrix} \quad (\text{式 4})$$

在这里, A(=m)表示复制光学系统的倍率。B 在复制光学系统的情况下为 0。C(=rf)被称为波阵面参数, 当入射的光束波阵面的曲率半径是 ∞ 、即波阵面是平面时, 如果给定复制后的波阵面曲率, 并将复制后的波阵面曲率半径设为 R, 则由 (式 5) 表示。

$$R \cong -\frac{m}{rf} \quad (\text{式 } 5)$$

另外, 折射率 1 的空间中的距离 S 的传递矩阵、以及焦距 F 的折射矩阵分别由 (式 6) 、 (式 7) 提供。

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{式 } 6)$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{式 } 7)$$

由于图 7 中的系统矩阵是 (式 6) 和 (式 7) 的组合矩阵, 因此成为 (式 8) 、 (式 9) 。

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{式 } 8)$$

$$= \begin{pmatrix} a + cL_4 & aL_1 + b + cL_1L_4 + dL_4 \\ c & d + cL_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m & 0 \\ rf & \frac{1}{m} \end{pmatrix} \quad (\text{式 } 9)$$

在这里, (式 9) 中的 a、b、c、d 由以下的 (式 10) 表示。

$$a = 1 - \frac{L_2}{f_1} - \frac{L_3}{f_1} - \frac{L_3}{f_2} + \frac{L_2L_3}{f_1f_2}$$

$$b = L_2 + L_3 - \frac{L_2L_3}{f_2}$$

$$c = -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_3} + \left(\frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} \right) \frac{L_2}{f_1} + \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right) \frac{L_3}{f_3} - \frac{L_2L_3}{f_1f_2f_3} \quad (\text{式 } 10)$$

$$d = 1 - \frac{L_2}{f_2} - \frac{L_2}{f_3} - \frac{L_3}{f_3} + \frac{L_2L_3}{f_2f_3}$$

另外, 由于 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 的和是从均匀化光学系统 4 的光束输出位置 12 到掩模位置 55 之间的距离 L_{all} , 因此必须满足下式。

$$L_{all} = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \quad (\text{式 } 11)$$

在本发明的复制光学系统 42 中，因为各透镜焦距 f_1 、 f_2 、 f_3 以及透镜间距离的合计 L_{all} ，是由每个激光加工装置确定的固定参数，所以可变参数是 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 。因此，为了得到希望的光束直径以及波阵面曲率，只要求出与希望的光束直径以及波阵面曲率相对应的倍率 m 和波阵面参数 rf ，利用（式 9）（式 10）（式 11）求出满足了得到的 m 和 rf 的 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 即可。

例如，如果使复制光学系统 42 的物点位置 51 和像点位置 55 上的激光束波阵面的曲率半径同时为 ∞ 、即，使波阵面为平面，则因为由（式 5）， $rf=C=0$ ，因此，成为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & aL_1 + b + dL_4 \\ 0 & d \end{pmatrix} \quad (\text{式 12})$$

对其求解可得到（式 13）～（式 16）。

$$L_1 = \frac{L_{all} - (1+m^2)f_1 - 2f_2 - 2f_3 - \frac{f_1 f_2}{f_3} m - \frac{f_2 f_3}{f_1} \frac{1}{m} - \frac{f_1 f_3}{f_2} m}{1-m^2} \quad (\text{式 13})$$

$$L_2 = f_1 + f_2 + \frac{f_1 f_2}{f_3} m \quad (\text{式 14})$$

$$L_3 = f_2 + f_3 + \frac{f_2 f_3}{f_1} \frac{1}{m} \quad (\text{式 15})$$

$$L_4 = \frac{L_{all} - \left(1 + \frac{1}{m^2}\right) f_3 - 2f_1 - 2f_2 - \frac{f_1 f_2}{f_3} m - \frac{f_2 f_3}{f_1} \frac{1}{m} - \frac{f_1 f_3}{f_2} \frac{1}{m}}{1 - \frac{1}{m^2}} \quad (\text{式 16})$$

但是，这是 $m \neq 1$ 的情况，在 $m=1$ 时， L_1 和 L_4 为满足下式的任意值。

$$L_1 + L_4 - f_1 - f_3 - \frac{f_1 f_3}{f_2} = 0 \quad (\text{式 17})$$

因此，利用上述（式 13）～式（17），如果给定倍率 m ，则可以得到各透镜间距离 $L_1 \sim L_4$ 。

另外，例如，在复制光学系统 42 的物点位置 51 上的激光束波阵面的曲率半径是 ∞ 、即波阵面是平面的情况下，只要使复制光学系

统 42 的像点位置 55 即掩模 5 上的波阵面曲率为发散即可，即，要使（式 5）中 $R < 0$ ，根据（式 5），使 $rf > 0$ 即可。另外，因为根据（式 9）， $c = rf$ ，所以只要满足 $c > 0$ 即可。由此，根据（式 10），选择满足下式的 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 即可。

$$-\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_3} + \left(\frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} \right) \frac{L_2}{f_1} + \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right) \frac{L_3}{f_3} - \frac{L_2 L_3}{f_1 f_2 f_3} > 0 \quad (\text{式 18})$$

如上所述，在 $rf = 0$ 时求出解析解是容易的，但在 rf 为任意值的情况下，由于式子变得复杂，所以可以利用使用了计算机的数值计算求出。这也可以说是，预先制作如图 8 所示的、记录了与适当的波阵面参数 rf 和倍率 m 相对应的各透镜 52～54 的位置数据的数据库，并将数据保存在控制装置 10 中。通常，激光束的输出必须根据加工条件进行微调，因此优选在可能的范围内能够尽量精细地控制，对此，因为通过发明人实施的实验结果可知，波阵面参数 rf 只要在几个数值中选择就足够，因此如图 8 所示，使用以几个数值的波阵面参数 rf 和以几百个数值的倍率 m 来标记的离散数据库即可。另外，在从数据容量的方面考虑，要将数据库的容量降低到必要的最低限度的情况下，可以将倍率 m 的分辨率稍微降低，并利用线性插值计算进行校正。

下面，使用流程图 9 说明图 6 所示的激光加工装置的控制方法的一个例子。

首先，使用激光加工装置的用户，选择振荡器条件（脉冲宽度和光束输出等）、掩模直径或者形状、光束波阵面、加工能量的设定值，作为与加工内容相符合的加工条件，使用输入装置等输入到控制装置 10 中（步骤 S01）。

然后，在控制装置 10 中，比较输入的设定值与当前设定的设定值是否不同，如果变更则重新设定。在图 9 所示的例子中，按振荡器条件、掩模条件的顺序进行确认，但该顺序相反也没关系。

在图 9 中，首先确认振荡器条件是否变更（步骤 S02）。

如果有必要进行变更，则控制装置 10 变更激光振荡器 3 的振荡条件（步骤 S03）。如果没有必要进行变更，则跳过步骤 S03。

然后，确认是否有必要进行掩模的直径或者形状的变更（步骤 S04）。如果有必要进行变更，则控制装置 10 驱动掩模变换器 41，切换为希望的掩模（步骤 S05）。如果没有必要进行变更，则跳过步骤 S05。

然后，确认是否有必要进行波阵面参数 rf 的变更（步骤 S06）。

如果有必要进行变更，则控制装置 10 从保存于控制装置 10 内的存储器中的、图 8 所示的数据库中，选择并读入与所希望的波阵面参数 rf 相对应的复制倍率 m 和复制光学系统 42 内的透镜位置的组合数据（步骤 S07）。如果没有必要进行变更，则跳过步骤 S07。

然后，控制装置 10 驱动加工台 11，使功率传感器 44 移动到激光束照射位置。然后，使激光振荡器 3 动作，将激光束 1 照射到功率传感器 44 上，利用功率传感器 44 测定激光束 1 的能量（步骤 S08）。

然后，控制装置 10 利用功率传感器 44 读取激光束的能量值，与用户输入的规定的加工能量值进行比较。如果利用功率传感器 44 得到的测定值和设定值之间的差在允许范围内，则结束加工条件的设定而开始加工（步骤 S09）。

在步骤 S09 中判断为允许范围外的情况下，控制装置 10 利用由功率传感器 44 得到的测定值与设定值之间的比例，计算掩模 5 上的最佳光束透过率，根据该值，求出复制光学系统 42 的复制倍率 m （步骤 S10）。

从步骤 S07 中读入的数据中选择与求出的复制倍率 m 相对应的复制光学系统 42 内的透镜位置数据（步骤 S11）。这时，在要变更的倍率 m 不在数据库中的情况下，可以选择最接近的倍率 m ，也可以由数据库实施线性插值计算来确定。

根据选择出的透镜位置数据，控制装置 10 控制驱动装置 9，使复制光学系统 42 内的各透镜 52～54 移动到希望的位置上（步骤 S12）。

透镜的移动完成后，返回到步骤 S08，再次进行加工能量的测定。然后，在步骤 S09 中比较测定值和设定值。如果测定值和设定值的差量在允许值范围内，则完成加工条件设定，如果在允许值范围外，

则再次重复步骤 S10、S11、S12，进行测定值和设定值的收敛作业。

综上所述，本发明中的由 3 个透镜 52~54 构成的复制光学系统 42 中，光束波阵面作为加工条件的一部分由用户来选择，倍率作为加工能量的调整参数在内部进行选择，在此基础上，从数据库中求出与其相对应的各透镜 52~54 的位置，根据求出的位置指令，利用例如滚珠丝杠等驱动部 43，进行使各透镜 52~54 在光轴方向上移动的控制。

换言之，通过控制各透镜 52~54 之间的距离，使掩模 5 上的光束直径和光束波阵面曲率变化为适于加工内容的值。

在该实施方式 3 中，表示了由 3 个透镜构成的复制光学系统，但是因为只要具备 3 个或 3 个以上的透镜，就可以同时独立地控制倍率 m 和波阵面参数 rf ，所以可得到与上述结构相同的效果。

另外，在上述实施方式 3 中，将激光束利用均匀化光学系统 4 形成顶帽分布的位置作为物点，利用复制光学系统 42 复制到掩模 5 上，但物点的位置并不限于此。例如，也有希望激光束的强度分布是周边部比中央部高的 M 字分布的加工，该情况下，因为在比均匀化光学系统 4 的成像位置更远的地方激光束成为 M 字分布，所以也可以将该位置作为物点。因为使用环形掩模也可以实现 M 字分布，所以也可以将该环形掩模的位置作为物点的位置。另外，在与实施方式 2 同样地，不使用均匀化光学系统 4 来进行加工时，如果是即使加工条件变动光束直径不变的点也在光路中，则也可以将该点作为物点，将激光束的像复制到掩模 5 上。无论怎样，只要将得到适于实施的加工条件的激光束的像的位置作为物点的位置，从激光束光路中选择并向掩模 5 复制就可以。

根据本实施方式 3，因为可以利用 3 个透镜独立地控制掩模上的光束直径和波阵面曲率，所以在厚度厚的被加工物的打孔加工中，通过使被加工物表面上激光束的波阵面曲率发散，可以优化加工孔的锥度。另外，因为可以得到从收敛到发散为止，各种加工条件下最佳的激光束的波阵面曲率，所以可以保持加工孔锥度的优化。并且，因为可以以不对振荡器条件以及激光束的波阵面曲率产生影响的方式，调

整激光束的能量，所以可以实现稳定的加工。

在本实施方式 3 中，固定复制光学系统内的各透镜的焦距，以各透镜间的距离作为参数来控制，但通过利用（式 9）～（式 11），固定各透镜间距离而控制各透镜的焦距，当然可以得到同样效果。

工业实用性

本发明涉及的激光加工装置以及方法，特别适用于必须对厚度厚的被加工物优化加工孔锥度的激光加工中。

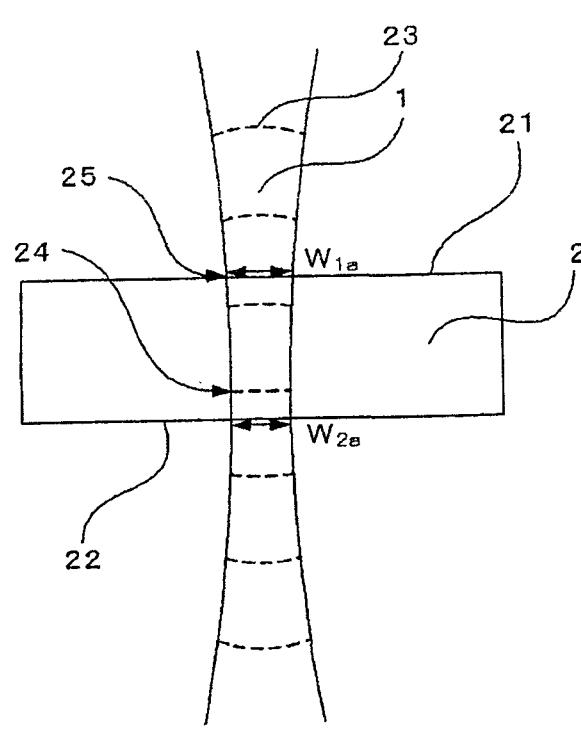


图 1 (a)

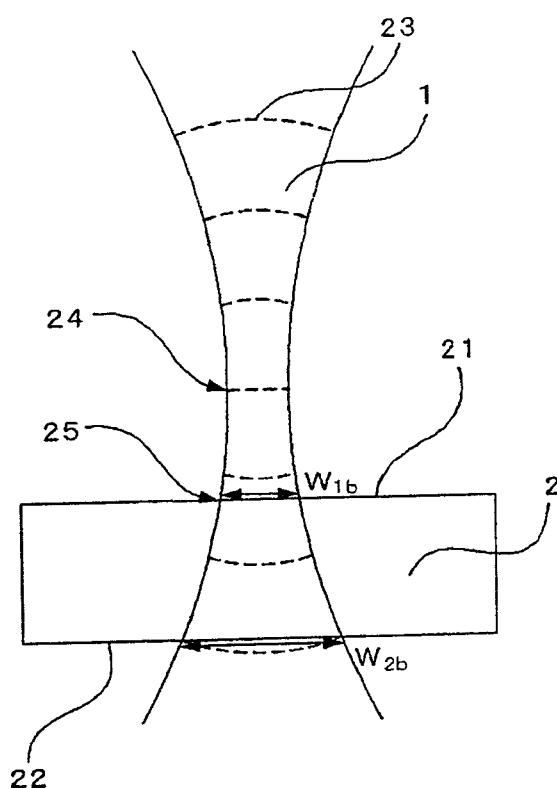


图 1 (b)

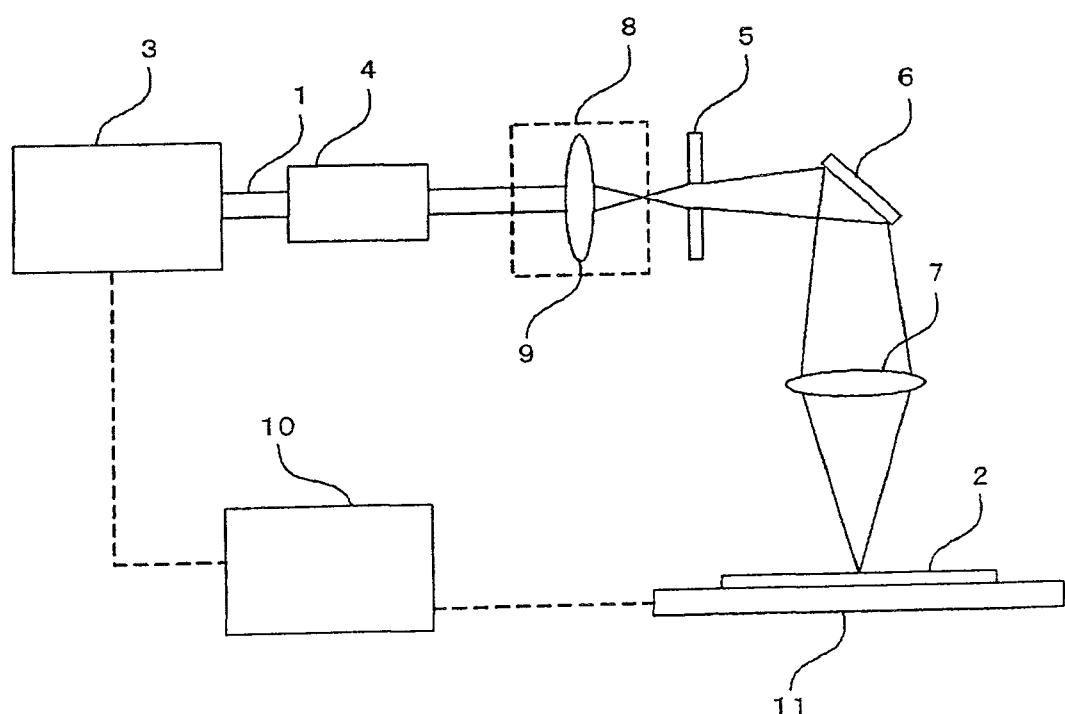


图 2

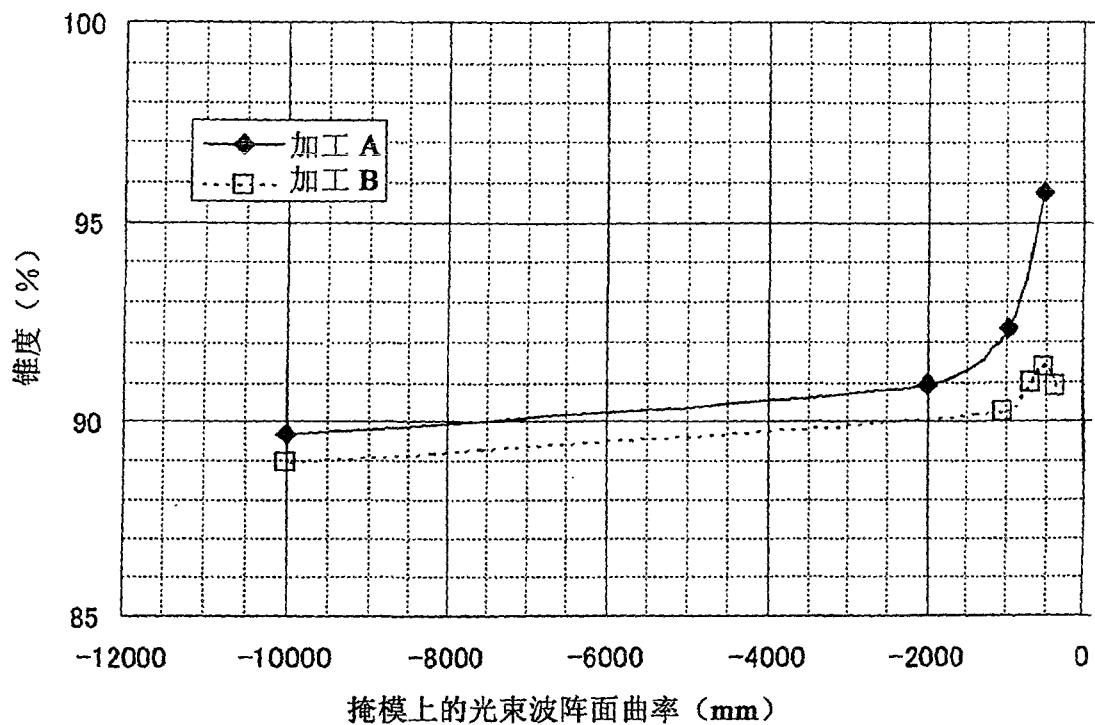


图 3

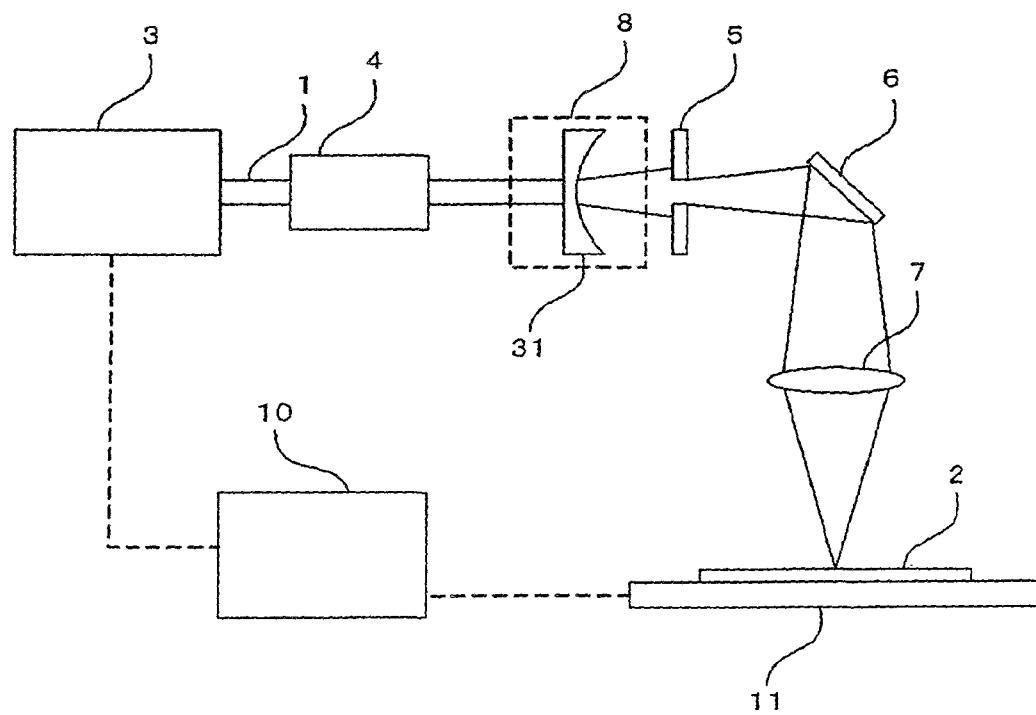


图 4

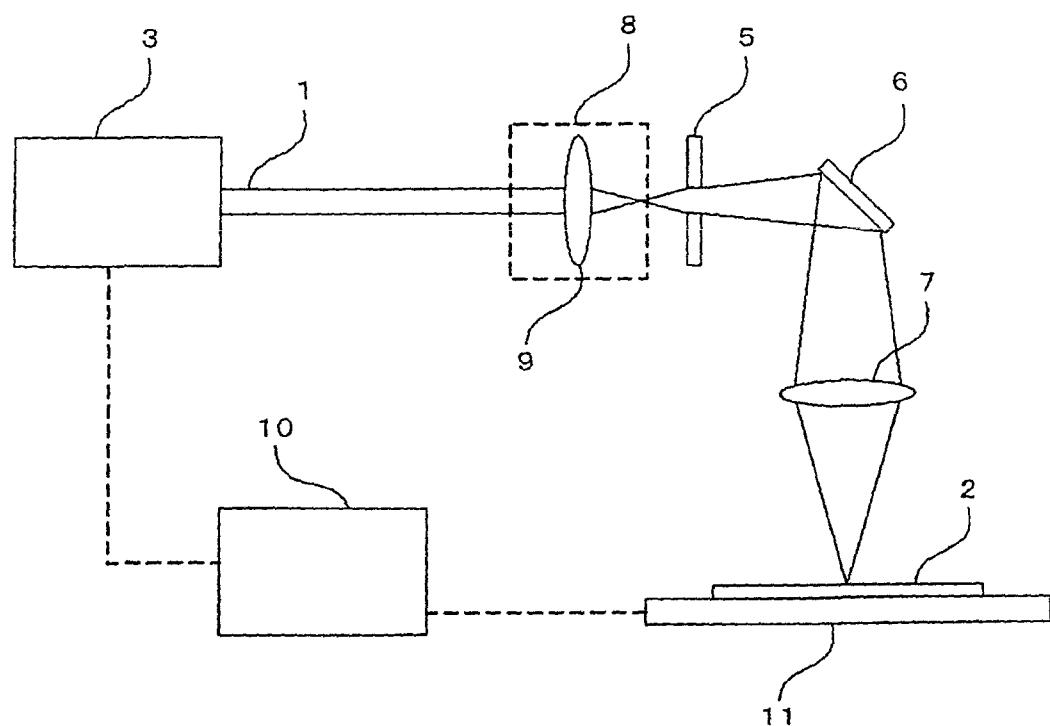


图 5

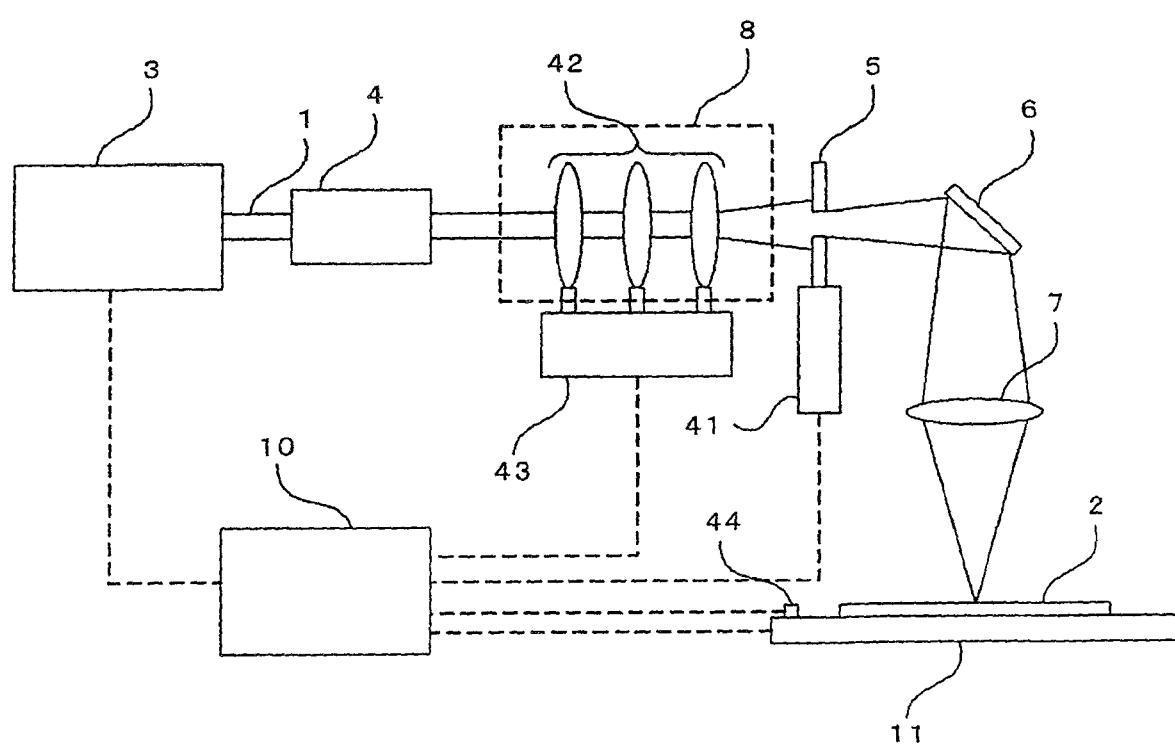


图 6

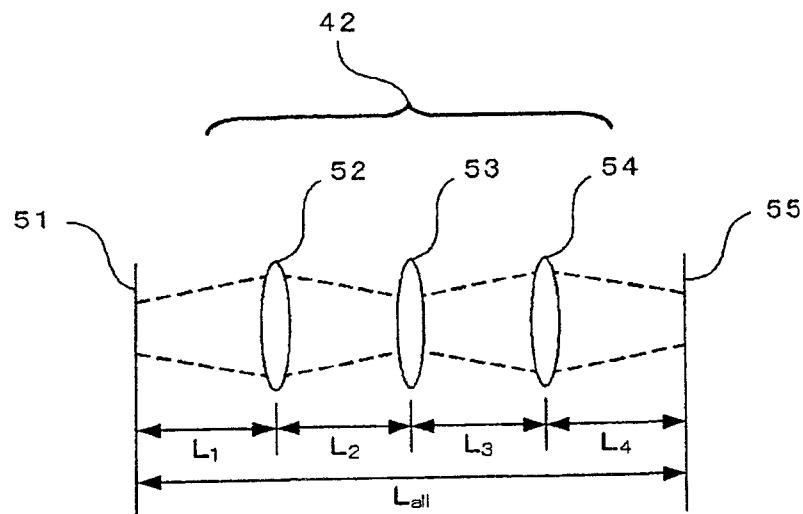


图 7

倍率 m	波阵面参数 $rf=A$...			波阵面参数 $rf=X$		
	透镜 1 位置	透镜 2 位置	透镜 3 位置	透镜 1 位置	透镜 2 位置	透镜 3 位置	透镜 1 位置	透镜 2 位置	透镜 3 位置
0.20
0.21
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

图 8

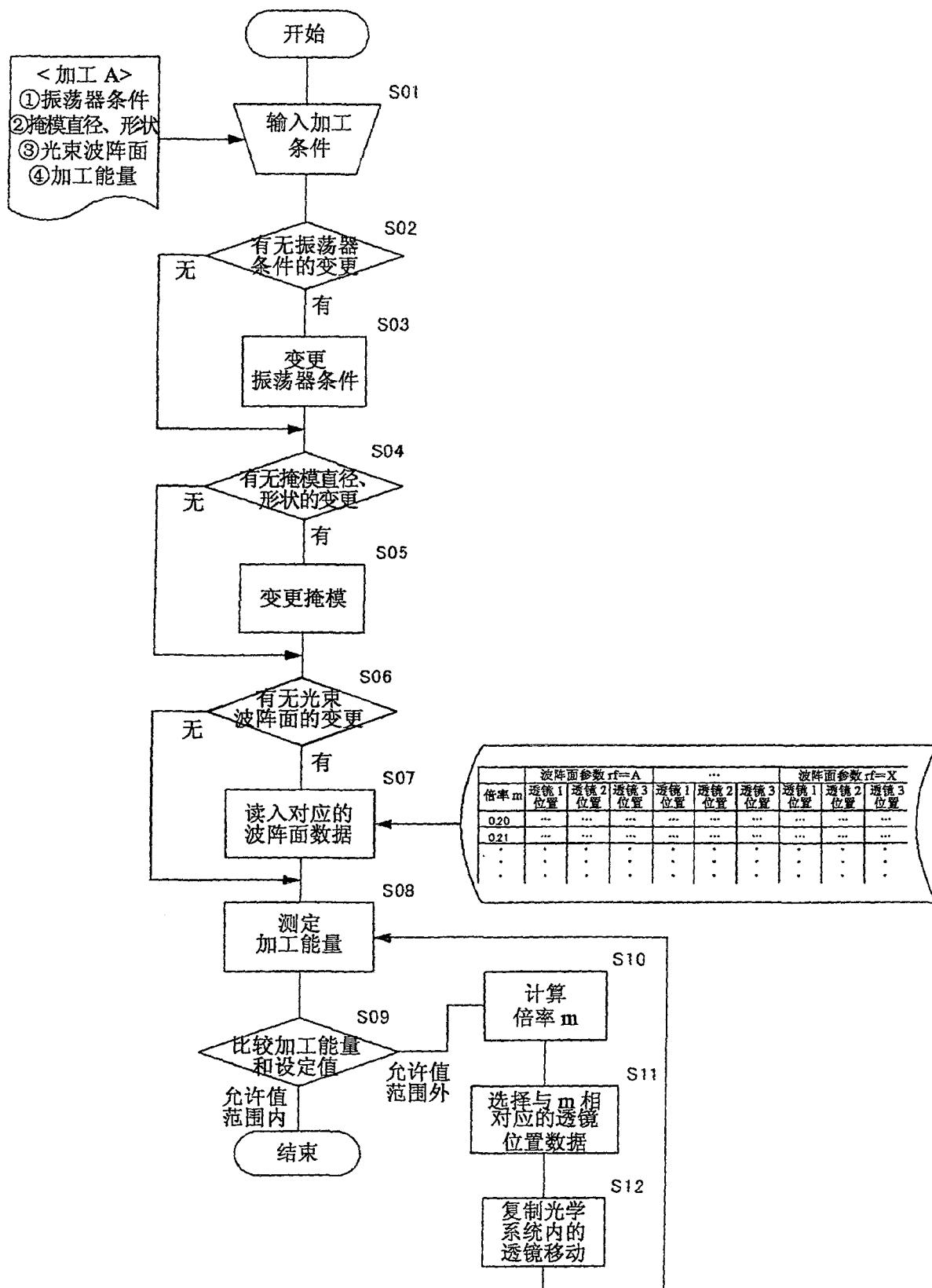


图 9