

## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101910821 B

(45) 授权公告日 2012.09.05

(21) 申请号 200880123951.0

(56) 对比文件

(22) 申请日 2008.12.02

WO 2004033059 A2, 2004.04.22, 全文.

(30) 优先权数据

CN 2570775 Y, 2003.09.03, 全文.

60/992,192 2007.12.04 US

US 2007/0146703 A1, 2007.06.28, 全文.

61/005,336 2007.12.04 US

US 5262841 A, 1993.11.16, 全文.

61/107,397 2008.10.22 US

US 6256096 B1, 2001.07.03, 全文.

(85) PCT申请进入国家阶段日

US 6067157 A, 2000.05.23, 全文.

2010.07.05

审查员 李思源

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2008/085236 2008.12.02

(87) PCT申请的公布数据

W02009/073649 EN 2009.06.11

(73) 专利权人 粒子监测系统有限公司

地址 美国科罗拉多

(72) 发明人 J·米切爾 J·桑貝格 D·A·塞尔

(74) 专利代理机构 北京北翔知识产权代理有限

公司 11285

代理人 杨勇 郑建晖

(51) Int. Cl.

G01N 21/00 (2006.01)

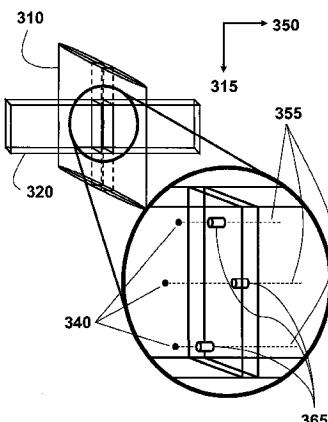
权利要求书 3 页 说明书 11 页 附图 14 页

(54) 发明名称

非正交粒子检测系统和方法

(57) 摘要

此处描述的是一种粒子检测系统，其能够对粒子和电磁辐射束的相互作用进行空间解析。利用特定的电磁辐射束横截面形状和取向，可改进粒子检测系统的检测灵敏度。还提供了以一种使背景信号低，并且能对粒子所散射或发射的电磁辐射进行空间解析的方式来检测粒子和确定粒子大小的方法。



1. 粒子检测系统，包括：

流体池，用于容纳沿一个流向流过所述流体池的流体；

源，用于生成电磁辐射束，其具有包括一长轴和一短轴的横截面轮廓，所述源被放置为导引所述辐射束经过所述流体池，其中在所述长轴和所述流向之间的角度是非正交的，其中在所述流体中包含的粒子与所述辐射束相互作用，从而生成散射的或发射的电磁辐射；

一个光学系统，用于收集或导引所述散射或发射的电磁辐射到一个二维检测器，其中所述光学系统具有被放置为与所述长轴非正交的光轴；以及

所述二维检测器被放置为与所述流体池光通信，用于接收所述散射或发射的电磁辐射的至少一部分，其中所述二维检测器被放置为非正交于所述光学系统的所述光轴。

2. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述二维检测器包括检测器元件阵列，其被放置为使得多个所述检测器元件接收所述散射或发射的电磁辐射。

3. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述角度选自 5° 至 85° 的范围。

4. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述横截面轮廓具有椭圆或矩形的外形。

5. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述横截面轮廓具有沿着所述短轴的选自 5 μm 和 100 μm 之间的宽度。

6. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述横截面轮廓具有沿着所述长轴的选自 50 μm 和 1200 μm 之间的宽度。

7. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述横截面轮廓的宽度沿着所述长轴延伸到或超过所述流体池的边缘。

8. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述流体池的横截面轮廓具有平行于所述辐射束的传播轴的第一较长边以及垂直于所述辐射束的所述传播轴的第二较短边。

9. 根据权利要求 8 所述的粒子检测系统，其中所述第一较长边具有选自 0.25mm 至 10mm 的宽度。

10. 根据权利要求 8 所述的粒子检测系统，其中所述第二较短边具有选自 80 μm 至 500 μm 的宽度。

11. 根据权利要求 8 所述的粒子检测系统，其中所述流体池的长宽比大于或等于 20。

12. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述辐射束的传播轴正交于所述流向。

13. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述辐射束的传播轴非正交于所述流向。

14. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述光学系统将所述散射或发射的辐射成像到所述二维检测器上。

15. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述散射或发射的电磁辐射被所述光学系统聚焦成所述二维检测器上的一个点，该点具有选自 5 μm 至 80 μm 之间的尺寸。

16. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述二维检测器具有如下取向：该取向被布置为允许在二维检测器的有效区域上具有所述散射或发射的电磁辐射的锐聚焦图像。

17. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统，其中所述二维检测器具有如下取向：该取向被布置为允许提供所述散射或发射的电磁辐射的空间解析图像，其中所述散射或发射的电磁辐射沿着平行于辐射束传播轴的第一轴和平行于辐射束横截面轮廓的长轴的第二轴而

被空间解析。

18. 根据权利要求 1 所述的粒子检测系统, 其中所述二维检测器能够执行时延积分。

19. 检测粒子的方法, 所述方法包括下列步骤 :

在具有一个流向的流体中提供粒子 ;

使电磁辐射束通过所述流体, 所述辐射束具有包括一长轴和一短轴的横截面轮廓, 其中在所述长轴和所述流向之间的角度是非正交的, 且其中所述粒子和所述辐射束相互作用, 从而产生散射的或发射的电磁辐射 ;

使用光学系统将所述散射或发射的电磁辐射收集和导引到一个二维检测器上, 其中所述光学系统具有被放置为与所述长轴非正交的光轴; 并且

使用二维检测器检测所述散射或发射的电磁辐射的至少一部分, 其中所述二维检测器被放置为非正交于所述光学系统的所述光轴, 从而检测所述粒子。

20. 根据权利要求 19 所述的方法, 其中所述光学系统将所述散射或发射的辐射成像到所述二维检测器上。

21. 根据权利要求 19 所述的方法, 其中所述二维检测器包括检测器元件阵列, 其被放置使得多个检测器元件接收所述散射或发射的电磁辐射。

22. 根据权利要求 19 所述的方法, 其中所述角度选自 5° 至 85° 的范围。

23. 根据权利要求 19 所述的方法, 其中所述二维检测器具有如下取向 : 该取向被布置为允许在二维检测器的有效区域上具有所述散射或发射的电磁辐射的锐聚焦图像。

24. 根据权利要求 19 所述的方法, 其中所述二维检测器具有如下取向 : 该取向被布置为允许提供所述散射或发射的电磁辐射的空间解析图像, 其中所述散射或发射的电磁辐射沿着平行于辐射束传播轴的第一方向和平行于辐射束横截面轮廓的长轴的第二方向而被空间解析。

25. 对粒子和电磁辐射束的相互作用进行空间解析的方法, 所述方法包括下列步骤 :

提供悬浮于沿一个流向流动的流体之内的粒子 ;

使电磁辐射束通过所述流体, 其中所述辐射束具有包括一长轴和一短轴的横截面轮廓, 且其中在所述长轴和所述流向之间的角度是非正交的, 且其中所述粒子和所述辐射束相互作用, 从而生成散射或发射的电磁辐射 ;

使用光学系统将所述散射或发射的电磁辐射收集和导引到一个二维检测器上, 其中所述光学系统具有被放置为与所述长轴非正交的光轴, 其中所述二维检测器被放置为非正交于所述光学系统的所述光轴; 以及

使用所述二维检测器检测所述散射或发射的电磁辐射的至少一部分, 从而沿着平行于所述辐射束的传播轴的第一方向和平行于所述辐射束的横截面轮廓的长轴的第二方向对所述散射或发射的电磁辐射进行空间解析。

26. 根据权利要求 25 所述的方法, 其中, 从围绕所述流体的流体池的壁散射或发射的电磁辐射开始对所述散射或发射的电磁辐射进行空间解析。

27. 根据权利要求 25 所述的方法, 其中由第一粒子和所述辐射束相互作用所产生的散射或发射的电磁辐射被成像到所述二维检测器的第一位置上, 而与所述第一粒子具有不同位置的第二粒子和所述辐射束相互作用所产生的散射或发射的电磁辐射, 被成像到所述二维检测器的第二位置上。

28. 根据权利要求 25 所述的方法,还包括如下步骤:分析由所述检测器提供的响应于所述散射或发射的电磁辐射的信号。

29. 根据权利要求 28 所述的方法,其中所述分析包括选自以下组中的一种或多种技术,该组包括:时延积分、图像阈值分析、图像形状分析、脉冲高度分析和脉冲宽度分析。

30. 一种确定粒子大小的方法,该方法包括下列步骤:

提供悬浮于沿一个流向流过一个流体池的流体之内的粒子;

使电磁辐射束通过所述流体,其中所述辐射束具有包括一长轴和一短轴的横截面轮廓,且其中在所述长轴和所述流向之间的角度是非正交的,且其中所述粒子和所述辐射束相互作用,从而生成散射或发射的电磁辐射;

使用光学系统将所述散射或发射的电磁辐射收集和导引到一个二维检测器上,其中所述光学系统具有被放置为与所述长轴非正交的光轴,其中所述二维检测器被放置为非正交于所述光学系统的所述光轴;

将所述散射或发射的电磁辐射的至少一部分成像到所述二维检测器上;

确定被成像在所述二维检测器上的所述散射或发射的电磁辐射的强度;并且

将被成像在所述二维检测器上的所述散射或发射的电磁辐射的强度和一个或多个参考阈值进行比较,从而确定所述粒子的尺寸。

31. 根据权利要求 30 所述的方法,其中所述参考阈值依赖于所述粒子在所述流体池之内的位置。

32. 根据权利要求 30 所述的方法,还包括在将被成像在所述二维检测器上的所述散射或发射的电磁辐射的强度和一个或多个参考阈值进行比较的步骤之前,确定所述粒子在所述流体池之内的位置的步骤。

33. 根据权利要求 32 所述的方法,还包括在将被成像在所述二维检测器上的所述散射或发射的电磁辐射的强度和一个或多个参考阈值进行比较的步骤之前,使用所述粒子在所述流体池内的所述位置来确定所述一个或多个参考阈值的步骤。

## 非正交粒子检测系统和方法

[0001] 相关申请的交叉参引

[0002] 本申请要求分别于 2007 年 12 月 4 日、2007 年 12 月 4 日和 2008 年 10 月 22 日提交的美国临时专利申请 No. 61/005, 336、No. 60/992, 192 和 No. 61/107, 397 的权益，所述文献由此均以参引方式整体纳入本文。

[0003] 关于联邦资助的研究或开发的声明

[0004] 无。

### 背景技术

[0005] 本发明属于光学粒子计数器领域。本发明主要涉及能够在空间上解析由粒子散射或发射的电磁辐射的光学粒子计数器。本发明还涉及用于检测粒子和确定粒子大小的方法，以及空间上解析粒子和电磁辐射束的相互作用的方法。

[0006] 大部分微污染 (micro-contamination) 工业都依赖于使用粒子计数器，例如在以下许多美国专利中所描述的粒子计数器，其中包括美国专利 No. 3, 851, 169、No. 4, 348, 111、No. 4, 957, 363、No. 5, 085, 500、No. 5, 121, 988、No. 5, 467, 188、No. 5, 642, 193、No. 5, 864, 399、No. 5, 920, 388、No. 5, 946, 092 和 No. 7, 053, 783。美国专利 No. 4, 728, 190、No. 6, 859, 277、No. 7, 030, 980 和 No. 5, 282, 151 也公开了粒子计数器，且由此以参引方式整体纳入本文。气溶胶粒子计数器通常用于测量在净化室和净化区域中浮在空中的粒子污染。液相粒子计数器通常用于测量在水处理和化学加工工业中的粒子污染。

[0007] 能够空间地解析由粒子散射或发射的电磁辐射的粒子计数器通常采用二维检测器，诸如在美国专利 No. 5, 282, 151 中描述的粒子检测器。美国专利 No. 7, 170, 601 和美国专利申请公开文本 No. US2006/0001874 A1 也公开了一种粒子计数器，其能够空间地解析由粒子散射或发射的电磁辐射。这些光学粒子计数器在平行于流体流向的方向上收集所散射或发射的电磁辐射，并且能够沿着垂直于流体流向的方向空间地解析所散射或发射的电磁辐射。然而，这些粒子计数器，缺乏在平行于流体流向的方向上空间地解析所散射或发射的电磁辐射的能力。本文所描述的粒子检测系统利用了这样一种几何结构：其允许不仅在垂直于流体流向的方向上、而且在平行于流体流向的方向上空间地解析由粒子散射或发射的电磁辐射。

### 发明内容

[0008] 此处公开的是一种粒子检测系统，其能够对粒子和电磁辐射束的相互作用进行空间解析。使用特定的电磁辐射束横截面形状和取向，可提高粒子检测系统的检测敏感度。此处还描述了以一种使背景信号低，并且能对粒子所散射或发射的电磁辐射进行空间解析的方式来检测粒子和确定粒子大小的方法。

[0009] 在一个实施方案中，粒子检测系统包括：流体池，用于容纳沿一个流向流过所述流体池的流体；源，用于生成电磁辐射束，其具有包括一长轴和一短轴的横截面轮廓，所述源被放置为导引所述辐射束经过所述流体池，其中所述辐射束的横截面轮廓的长轴和所述流

向之间的角度是非正交的,且其中包含在所述流体中的粒子与所述辐射束相互作用,从而生成散射的或发射的电磁辐射;以及二维检测器,其被放置为与所述流体池光通信,用于接收所述散射或发射的电磁辐射的至少一部分。

[0010] 此等粒子检测系统可用在检测粒子和/或确定粒子大小的方法中。在一个实施方案中,这方面的方法包括如下步骤:在具有一个流向的流体中提供粒子;使电磁辐射束通过所述流体,所述辐射束具有包括一长轴和一短轴的横截面轮廓,其中在所述长轴和所述流向之间的角度是非正交的,且其中所述粒子和所述辐射束相互作用,从而产生散射的或发射的电磁辐射;并且使用二维检测器检测所述散射或发射的电磁辐射的至少一部分,从而检测所述粒子。在对于某些应用优选的实施方案中,所述散射或发射的电磁辐射被光学系统收集或导引到所述二维检测器上。在一些实施方案中,在所述辐射束横截面长轴和所述流向之间的角度是非平行的。

[0011] 可用于此处所描述的方法和系统的光学元件包括但不限于:透镜、反射镜、滤光器、分束器、光纤、光学波导、窗口、孔、狭缝、棱镜、光栅、偏光器、波片、晶体、以及这些或其他光学元件的任何组合。在对于某些应用优选的一个实施方案中,所述散射或发射的电磁辐射被所述光学系统成像到所述二维检测器上。对于某些实施方案,粒子计数器可选地包括光学系统的自动聚焦,以将从粒子散射或发射的辐射正确地成像到二维检测器之上。

[0012] 在对于某些应用优选的实施方案中,有用的二维检测器包括一个检测器元件阵列,其被放置以使得多个检测器元件接收所述散射或发射的电磁辐射。在用于检测粒子或确定粒子大小的系统和方法中可以使用任何二维检测器,所述二维检测器包括但不限于:光电检测器的二维阵列、电荷耦合器件(CCD)检测器、互补金属氧化物半导体(CMOS)检测器、金属氧化物半导体(MOS)检测器、有源像素传感器、微通道板检测器、光电倍增管的二维阵列、光电二极管的二维阵列、光电晶体管的二维阵列、光敏电阻的二维阵列,或者光导薄膜。

[0013] 在对于某些应用优选的一个示例实施方案中,二维检测器具有如下取向:该取向被布置为允许在二维检测器的有效区域上具有所散射或发射的电磁辐射的锐聚焦图像。在对于某些应用优选的一个示例实施方案中,二维检测器具有如下取向:该取向被布置为允许提供所散射或发射的电磁辐射的空间解析图像,其中所述散射或发射的电磁辐射沿着平行于辐射束传播轴的第一方向和平行于流动方向的第二方向而被空间解析。在另一个实施方案中,二维检测器的取向允许提供所述散射或发射的电磁辐射沿着平行于所述辐射束的传播轴的第一方向和沿着平行于所述辐射束的横截面轮廓的长轴的第二方向的空间解析图像。

[0014] 在另一方面,提供了对粒子和电磁辐射束的相互作用进行空间解析的方法。此方面的方法包括下列步骤:提供悬浮于沿一个流向流动的流体之内的粒子;使电磁辐射束通过所述流体,其中所述辐射束具有包括一长轴和一短轴的横截面轮廓,且其中在所述长轴和所述流向之间的角度是非正交的,且其中所述粒子和所述辐射束相互作用,从而生成散射或发射的电磁辐射;且将所述散射和发射的电磁辐射的至少一部分导引到一个二维检测器上,从而沿着平行于所述辐射束的传播轴的第一方向和平行于所述辐射束的横截面轮廓的长轴的第二方向对所述散射的或发射的电磁辐射进行空间解析。对于一些实施方案,当所散射或发射的电磁辐射到达二维检测器时,其被该二维检测器所检测,从而生成相应于

所述散射或发射的电磁辐射的强度的多个输出信号。在某些实施方案中，在所述辐射束横截面长轴和所述流向之间的角度是非平行的。

[0015] 在对于某些应用优选的一个实施方案中，从围绕所述流体的流体池的壁散射或发射的电磁辐射开始对所述散射或发射的电磁辐射进行空间解析。在另一个实施方案中，由第一粒子与所述辐射束相互作用而散射或发射的电磁辐射被成像到所述二维检测器的第一位置上，而与所述第一粒子具有不同位置的第二粒子和所述辐射束相互作用所产生的散射或发射的电磁辐射，被成像到所述二维检测器的第二位置上。

[0016] 在这方面的一些实施方案中，该方法还包括分析由所述检测器提供的响应于所述散射的或发射的电磁辐射的信号。在一个实施方案中，所述分析包括如下一种或多种技术，所述技术包括：时延积分 (TDI)、图像阈值分析、图像形状分析、脉冲高度分析、脉冲宽度分析，或可用于检测粒子的其他技术。

[0017] 在另一方面，提供了用于确定粒子大小的方法。这方面的方法包括下列步骤：提供悬浮于沿一个流向流过所述流体池的流体之内的粒子；使电磁辐射束通过所述流体，其中所述辐射束具有包括一长轴和一短轴的横截面轮廓，且其中在所述长轴和所述流向之间的角度是非正交的，且其中所述粒子和所述辐射束相互作用，从而生成散射或发射的电磁辐射；将所述散射或发射的电磁辐射的至少一部分成像到二维检测器上；确定在所述二维检测器上的所述散射或发射的电磁辐射的强度；并且将所述散射或发射的电磁辐射的强度和一个或多个参考阈值进行比较，从而确定所述粒子的尺寸。例如，所述参考阈值可相应于从已知尺寸的粒子散射或辐射的电磁辐射的强度；如果从一个粒子散射或发射的电磁辐射的强度落在两个参考阈值之间，则该粒子的大小就被确定在相应于那些参考阈值的已知粒子尺寸之间。

[0018] 在此方面的实施方案中，参考阈值依赖于粒子在流体池内的位置。在另一个实施方案中，参考阈值依赖于流体的流率。在又一个实施方案中，流体的流率可依赖于在流体池内的位置；例如，在流体池壁附近流动的流体可比在流体池中心附近流动的流体流得慢。在另一个实施方案中，所述参考阈值依赖于辐射束的强度。在另一个实施方案中，所述参考阈值既依赖于所述辐射束的强度，也依赖于在所述流体池之内的位置。

[0019] 在对于某些应用优选的实施方案中，该方法还可包括确定粒子在流体池之内的位置的步骤。在某些实施方案中，此步骤被优选为发生在将所散射或发射的电磁辐射的强度与一个或多个参考阈值进行比较的步骤之前。在另一个实施方案中，粒子在流体池之内的位置被用于确定一个或多个用于随后的比较过程的参考阈值。

[0020] 不希望被任何具体理论所界定，此处可能存在对于和本发明有关的深层原理的信念或理解的讨论。应承认，无论关于机制上的任何解释或假说的最终正确程度如何，本发明的实施方案无论如何均可以是可操作的且是有用的。

## 附图说明

[0021] 图 1 提供了粒子检测系统的一个实施方案的示意图。

[0022] 图 2A 提供了粒子检测系统的一个实施方案的透视图。

[0023] 图 2B 提供了粒子检测系统的一个实施方案的透视图。

[0024] 图 3A 示出了照射着粒子检测系统中的流体池的电磁辐射束的另一透视图。

- [0025] 图 3B 示出了图 3A 的一个区域的放大图。
- [0026] 图 3C 示出了图 3A 的流体池的俯视图。
- [0027] 图 3D 示出了图 3A 的流体池沿着流体流向的视图。
- [0028] 图 3E 示出了图 3A 的流体池的侧视图。
- [0029] 图 4A 示出了粒子检测系统的二维检测器检测到的图像，其中在辐射束横截面轮廓长轴和流向之间的角度是 90°。
- [0030] 图 4B 示出了粒子检测系统的二维检测器检测到的图像，其中在辐射束横截面轮廓长轴和流向之间的角度是 45°。
- [0031] 图 4C 示出了粒子检测系统的二维检测器检测到的图像，其中在辐射束横截面轮廓长轴和流向之间的角度是 21°。
- [0032] 图 5 示出的数据描绘了在辐射束横截面轮廓长轴和流向之间的不同角度下，粒子检测系统对 80nm 粒子的计数效率。
- [0033] 图 6 示出的数据描绘了在辐射束横截面轮廓长轴和流向之间的不同角度下，粒子检测系统对 125nm 粒子的计数效率。
- [0034] 图 7 示出的数据总结了在辐射束横截面轮廓长轴和流向之间的不同角度下，对 80nm 和 125nm 粒子的计数效率。
- [0035] 图 8 示出了示例毛细管装配台 (capillary mount)。
- [0036] 图 9 示出了示例自动聚焦系统。

## 具体实施方式

[0037] 总体来说，此处所用的术语和词组具有本领域公认的含义，其可通过参照标准文本、期刊文献和本领域技术人员公知的文本获得。下面的限定被提供用于明确它们在本发明文本中的具体使用。

[0038] “流向”指的是当流体流动时与大量流体正在移动的方向相平行的轴。对于流经直的流体池的流体，流向平行于大量流体前进的路径。对于流经弯曲流体池的流体，流向可被视为和大量流体前进的路径相切。

[0039] “辐射束传播轴”指的是和电磁辐射束的行进方向平行的轴。

[0040] “横截面轮廓”指的是以与传播轴或行进轴成直角切过一个对象的平面所形成的轮廓。例如，电磁辐射束的横截面轮廓是由垂直于辐射束传播轴的平面所形成的辐射束轮廓。流体池的横截面轮廓是由垂直于流向的平面所形成的流体池的轮廓。

[0041] “长轴”指的是与一个形状的最长轴相平行的轴。例如，椭圆的长轴平行于椭圆最长的直径，而矩形的长轴平行于矩形的长边。

[0042] “短轴”指的是和一个形状的最短的轴平行的轴。例如，椭圆的短轴平行于椭圆的最短直径，而矩形的短轴平行于矩形的短边。

[0043] “光通信”指的是对组件进行定向，使得组件被布置为允许光或电磁辐射在组件之间传播。

[0044] “光轴”指的是电磁辐射传播穿过系统所沿的方向。

[0045] “点尺寸”指的是一个点或对象的图像被一个或多个透镜聚集成的尺寸。一般，点尺寸指的是均方根 (RMS) 点尺寸。RMS 点尺寸是包括总能量的 66%——例如电磁辐射的聚

焦辐射束的总能量的 66%——的点的尺寸。

[0046] “二维检测器”指的是这样的检测器，其能够在检测器的有效区域中在两个方向上空间地解析输入信号（例如，电磁辐射）。二维检测器能够生成一个图像，例如相应于检测器的有效区域上的强度图案的图像。优选的二维检测器包括检测器元件或像素的阵列，例如：光电检测器的二维阵列、电荷耦合器件 (CCD) 检测器、互补金属氧化物半导体 (CMOS) 检测器、金属氧化物半导体 (MOS) 检测器、有源像素传感器、微通道板检测器、光电倍增管的二维阵列、光电二极管的二维阵列、光电晶体管的二维阵列、光敏电阻的二维阵列，或者光导薄膜。

[0047] “粒子”指的是通常被视为污染物的小对象。粒子可以是由摩擦行为产生的任何材料——例如当两个表面机械接触且有机械运动时。粒子可由材料的聚集体组成，所述材料诸如尘土、灰尘、烟、灰、水、煤烟、金属、矿物质，或这些或其他材料或污染物的任何组合。“粒子”也可以指生物粒子，例如，病毒、孢子以及微生物，包括细菌、真菌、古生菌、原生生物、其他单细胞微生物，特别是具有大约 1-15  $\mu\text{m}$  大小的微生物。粒子可指吸收或散射光从而可被光学粒子计数器检测到的任何小的对象。如此处所用，“粒子”旨在排除载体流体的单个原子或分子，例如水分子、氧分子、氦原子、氮分子等等。本发明的一些实施方案能够对粒子进行检测、确定大小和 / 或计数，所述粒子包括具有大于 50nm、100nm、1  $\mu\text{m}$  或更大，或者 10  $\mu\text{m}$  或更大尺寸的材料聚集体。具体的粒子包括具有选自 50nm 至 50  $\mu\text{m}$  的尺寸、选自 100nm 至 10  $\mu\text{m}$  的尺寸，或者选自 500nm 至 5  $\mu\text{m}$  的尺寸。

[0048] 一些实施方案的粒子检测系统包括这样的流体池：其用于容纳沿一个流向流经所述流体池的流体。在对于一些应用优选的一个实施方案中，所述流体池包括壁透明的采样单元。可用的流体池包括能够输送流体的流体池，所述流体包括液体或气体。流体的流向也提供了用于限定此处描述的系统和方法的附加组件的参考轴。在一个实施方案中，该流体池具有这样的横截面轮廓：其具有第一较长边和第二较短边。在一些实施方案中，第一较长边具有选自 0.25mm 至 10mm 范围的长度，优选为 5mm。在一些实施方案中，所述第二较短边具有选自 80  $\mu\text{m}$  到 500  $\mu\text{m}$  的范围的宽度，优选为 100  $\mu\text{m}$ 。在一个实施方案中，所述流体池横截面具有的长宽比大于等于 20，或大于等于 50，所述长宽比等于较长边的长度除以较短边的宽度。在一些实施方案中，该流体池的第一较长边对齐平行于电磁辐射束传播轴，而该流体池的第二较短边对齐垂直于电磁辐射束传播轴。

[0049] 一些实施方案的粒子检测系统也包括一个源，其用于生成电磁辐射束。在一个优选实施方案中，电磁辐射束的横截面轮廓具有一个长轴和一个短轴。这样的横截面轮廓可由源自身形成，或者可由该源结合一个或多个辐射束成形元件而形成，所述该成形元件包括透镜、反射镜、孔或其他辐射束成形元件。在一些实施方案中，辐射束横截面轮廓具有椭圆形或矩形的形状。在其他实施方案中，辐射束横截面轮廓具有基本椭圆形或基本矩形的形状。在对于一些应用优选的实施方案中，辐射束横截面轮廓具有沿着短轴的选自 5  $\mu\text{m}$  和 100  $\mu\text{m}$  之间的宽度，优选为 40  $\mu\text{m}$ 。在对于一些应用优选的另一实施方案中，辐射束横截面轮廓具有沿着长轴的选自 50  $\mu\text{m}$  和 1200  $\mu\text{m}$  之间的宽度，优选为 600  $\mu\text{m}$ 。在示例实施方案中，辐射束横截面的宽度沿着长轴延伸到或超过流体池的壁。在此实施方案和其他实施方案中，粒子检测系统能够提供流体的体积分析。在另一实施方案中，辐射束横截面轮廓的宽度沿着长轴未到达流体池的壁。在此实施方案和其他实施方案中，粒子检测系统能够提供

流体的非体积分析。

[0050] 在一个优选实施方案中,所述源被布置为导引辐射束穿过一个流体池,使在辐射束横截面轮廓的长轴和流向之间的角度是非正交的。对于一些实施方案,在辐射束横截面轮廓的长轴和流向之间的角度选自 5° 至 85° 的范围,或者优选地选自 16° 至 26° 的范围,或者更优选地选自 20° 至 22° 的范围。然而,在一些实施方案中,辐射束横截面轮廓长轴可与流向正交或平行。

[0051] 在另一个实施方案中的粒子检测系统进一步包括被放置为和流体池光通信的二维检测器。被放置为和流体池光通信的检测器,用于检测与辐射束相互作用的粒子所散射或发射的电磁辐射的至少一部分。在对于一些应用优选的实施方案中,二维检测器包括检测器元件阵列,所述检测器元件阵列被放置使得多个检测器元件接收所散射或发射的电磁辐射的至少一部分。有用的二维检测器包括但不限于:光电检测器的二维阵列、CCD 检测器、CMOS 检测器、MOS 检测器、有源像素传感器、微通道板检测器、光电信增管的二维阵列、光电二极管的二维阵列、光电晶体管的二维阵列、光敏电阻的二维阵列,或者光导薄膜。

[0052] 此方面的一些实施方案还可包括一个光学系统。这种系统的光学元件用于使电磁辐射束成形,或者用于收集或导引与辐射束相互作用的粒子所散射或发射的电磁辐射到所述二维检测器上。光学系统可包括一个或多个光学元件。例如,光学系统可包括两个非球面透镜。有用的光学元件包括:透镜、反射镜、滤光器、分束器、光纤、光学波导、窗口、孔、狭缝、棱镜、光栅、偏光器、波片、晶体、以及这些或其他成形、聚焦或导引元件的任何组合。在对于某些应用优选的一个实施方案中,所述光学系统将所散射或发射的辐射成像到二维检测器上。在另一个实施方案中,所散射或发射的电磁辐射被聚焦成二维检测器上的一个点,该点具有选自 5 μm 至 80 μm 范围的大小,优选是 12 μm。

[0053] 用于收集或导引所述所散射或发射的电磁辐射的光学系统,被优选地置于流体池和二维检测器之间。在一个实施方案中,二维检测器被定位为与将辐射束收集或导引到该二维检测器上的光学系统的光轴非正交。该实施方案中的非正交指的是包括有源元件的二维检测器的平面相对于光学系统的光轴的位置关系。

[0054] 另一个实施方案中,该光学系统的光轴被定向为和辐射束横截面轮廓的长轴非正交。在一个示例实施方案中,二维检测器具有如下取向:该取向被布置为允许在二维检测器的有效区域上具有所散射或发射的电磁辐射的锐聚焦图像。在另一个示例实施方案中,二维检测器具有如下取向:该取向被布置为允许提供所散射或发射的电磁辐射的空间解析图像,其中所述散射或发射的电磁辐射沿着平行于辐射束传播轴的第一轴和平行于辐射束横截面轮廓的长轴的第二轴而被空间解析。

[0055] 现在参照附图,图 1 示出了粒子检测系统的一个实施方案的示意图。如图中所示,源 100 产生被导引通过流体池 120 的电磁辐射束 110,流体池平行于辐射束传播轴 115。在此实施方案中,辐射束 110 被透镜 130 成形和导引,然后进入流体池 120。流经流体池 120 的悬浮于该流体中的粒子与辐射束 110 相互作用时生成散射的或发射的电磁辐射 160。光学系统 170 沿着光学检测轴 175 收集或聚焦所散射的或发射的电磁辐射 160 到二维检测器 180 上。在此实施方案中,光学系统 170 包括两个非球面透镜。

[0056] 图 2A 示出了一个粒子检测系统实施方案的透视图。在此实施方案中,源 200 产生电磁辐射束 210,其被导引通过流体池 220。辐射束 210 被透镜 230 成形和导引,然后进入

流体池 220。在这一实施方案中,辐射束 210 被透镜 230 成形以具有椭圆形状的横截面轮廓 235,该椭圆形状具有和轴 205 平行的长轴,以及和流向 250 正交的传播轴。粒子 240 流过平行于流向 250 的流体池 220。横截面轮廓长轴 205 和流向 250 形成一个角度 290。粒子流过被辐射束 210 照射的流体池 220 的区域,并且和该辐射束相互作用,生成所散射的或发射的电磁辐射 260。所散射或发射的电磁辐射 260 沿着光学检测轴 275 被光学系统 270 收集并且导引到二维检测器 280 之上。在这一实施方案中,二维检测器 280 和光学检测轴 275 非正交。

[0057] 图 2B 示出了另一粒子检测系统实施方案的透视图。在这一实施方案中,源 200 生成被导引通过流体池 220 的电磁辐射束 210。辐射束 210 被透镜 230 成形和导引,然后进入流体池 220。在此实施方案中,辐射束 210 被透镜 230 成形以具有椭圆形状的横截面轮廓 235,该椭圆形状具有平行于轴 205 的长轴,以及和流向 250 非正交的传播轴。粒子 240 流过平行于流向 250 的流体池 220。在此实施方案中,流向 250 和横截面轮廓长轴 205 是正交的。粒子流过被辐射束 210 照射的流体池 220 的区域且和该辐射束相互作用,产生散射的或发射的电磁照射 260。散射或发射的电磁辐射 260 沿着光学检测轴 275 被光学系统 270 收集并且被导引到二维检测器 280 上。在这一实施方案中,二维检测器 280 和光学检测轴 275 非正交。

[0058] 图 3A 示出了照射着流体池的电磁辐射束的另一透视图。在本图中,辐射束 310 平行于辐射束传播轴 315 行进。在流体池 320 中流动的粒子和流体,平行于流向 350 行进。图 3B 示出了流体池 320 的一个区域的放大图。粒子 340 平行于流向 350 沿着轨迹 355 移动,并且在区域 365 和辐射束 310 相互作用,在这里它们生成散射的或发射的电磁辐射。图 3C、3D 和 3E 示出了流体池 320 和辐射束 310 的各种不同视图。图 3C 示出了沿着辐射束的传播轴观察的流体池 320 和辐射束的视图。在此视图中示出了辐射束的横截面轮廓 335。在这一实施方案中,横截面剖面 335 具有椭圆形状。图 3C 还示出了此视图的一组轴,显示了流向 350,光学收集轴 375 和辐射束横截面轮廓长轴 305。在流向 350 和辐射束横截面轮廓长轴 305 之间形成了角度 390。在各种不同实施方案中,角度 390 不等于 90°,也就是说流向 350 和辐射束横截面轮廓长轴 305 是非正交的。然而,在某些实施方案中,角度 390 是 90°。图 3D 示出了沿着流向观察的流体池 320 的视图。辐射束 310 沿着辐射束传播轴 315 传播,照射着流体池 320。由粒子和辐射束 310 相互作用所产生的散射或发射的辐射沿着光学收集轴 375 被收集。图 3E 示出了沿着光学收集轴的视图。粒子和流体沿流向 350 流经流体池 320。辐射束 310 沿着辐射束传播轴 315 传播,照射着流体池 320。在此实施方案中,仅流体池 320 的一小部分被辐射束 310 照射。被照射的区域在图 3E 中由虚线示出。然而,所有流体流经该辐射束。

[0059] 通过下列非限制性实施例,可以进一步理解本发明:

[0060] 实施例 1:粒子检测器图像和计数效率:

[0061] 图 4A、4B 和 4C 示出了在辐射束横截面轮廓长轴和流向之间的不同角度下,由一个粒子检测系统实施方案的二维检测器所检测到的图像。这些灰度图像表示了由二维检测器观察到的强度,其中黑色是低强度,白色是高强度。这些图像展示了和图 3E 的流体池的视图相似的视图。在这些图像中,在图像顶部的亮白点表示了,在所述辐射束进入所述流体池之处,由所述辐射束与流体池的壁相互作用所产生的散射的或发射的电磁辐射。在图像底

部的亮白点表示了在所述辐射束离开所述流体池之处,由所述辐射束与流体池的壁相互作用所产生的散射的或发射的电磁辐射。在这些图像中,具有 125nm 尺寸的粒子在流体中沿着流向 350 行进,辐射束沿着轴 315 传播。在这些图像中的插图示出了流体池沿着辐射束传播轴的视图,示出了辐射束横截面轮廓长轴 305 相对于流体池和流向 350 的取向。

[0062] 在图 4A 中,辐射束横截面轮廓长轴 305 垂直于流向 350,也即,角度 390 是  $90^\circ$ 。在图像中心的亮白点是在流体池的壁上的污染物所导致的。从图像顶部传播到图像底部的微弱线 (faint line),表示了由流体池内的流体与沿着轴 315 传播的辐射束相互作用所散射的电磁辐射。在图 4A 的图像中,比其周围更亮的一个微弱点可指示检测到了单个粒子 (由图像中的箭头所示)。亮白点可能是在与该辐射束相互作用的流体池的壁上的污染物所导致的。在此方向,被诸如此类的污染物所散射或发射的电磁辐射落在粒子可能行进的流动区域处,从而使模糊了对这些区域中的粒子的检测。当角度 390 不等于  $90^\circ$  时,流体池的壁上的污染物将显示为偏向该图像的左侧或右侧,并且不模糊如此大的区域。

[0063] 在图 4B 中,辐射束横截面轮廓长轴 305 和流向 350 形成大约  $45^\circ$  的角度 390。沿着图像左侧的两个亮白点是流体池的壁上的污染物导致的。如前所述,由于该辐射束的横截面轮廓现在处于  $45^\circ$  的角度 390,故来自该污染物的被散射或发射的电磁辐射不再模糊流动区域的大部分,而是出现在图像的侧面。从图像顶部行进至图像底部的微弱闪光,表示流体池中的流体与沿着轴 315 传播的辐射束相互作用而被散射的电磁辐射。在图 4B 中的图像里,比周围明亮的多个微弱点可指示检测到了多个粒子 (图像中的箭头所示的 3 个示例)。利用图 4A 的几何结构——其中角度 390 是  $90^\circ$ ,将有可能由于位于图像左侧的最上面的明亮污染物点而模糊了对长箭头所指示的粒子的检测。这示出了非正交几何形状在减少噪声和增加检测效率及敏感度方面的有用优点。此外,当辐射束横截面轮廓长轴 305 和流向 350 非正交时,例如在图 4B 中,在二维检测器上检测到散射的或发射的辐射的位置就和流体池中散射或发射的辐射的起原点的位置有关。例如,图像左侧的明亮污染物点显示为是来自该流体池的一侧上的污染物,如插图中的部分 395 所示,而长箭头所指示的粒子显示为是来自该流体池的相对一侧附近行进的粒子,如插图中的部分 340 所示。

[0064] 在图 4C 中,辐射束横截面轮廓长轴 305 被对准为和流向 350 成大约  $21^\circ$  的角度 390。从图像顶部行进到图像底部的微弱闪光表示了流体池中的流体与沿着轴 315 行进的辐射束相互作用而散射的电磁辐射。在图 4C 的图像中,比周围亮的多个微弱点指示了检测到多个粒子 (图中箭头所示的 5 个示例)。除了将散射或发射的电磁辐射与流体池的壁分开之外,当辐射束横截面轮廓长轴 305 非正交于流向 350 时,所述粒子穿过辐射束的距离更长,导致更多的光被散射且能够检测到更小的粒子。

[0065] 具有 80nm 和 125nm 尺寸的聚苯乙烯胶乳粒子被允许流过粒子检测系统,以确定所述粒子的计数效率。在流向和辐射束横截面轮廓长轴之间的角度在 3 个方向上变化:在流向和辐射束横截面轮廓长轴之间的角度为  $21^\circ$ ;在流向和辐射束横截面轮廓长轴之间的角度为  $45^\circ$ ;以及在流向和辐射束横截面轮廓长轴之间的角度为  $90^\circ$ 。图 5 示出的数据描绘了对 80nm 粒子的计数效率,其与流向和辐射束横截面轮廓长轴之间的角度有关。如图 5 中所见,随着该角度从  $21^\circ$  增加至  $45^\circ$  再增加到  $90^\circ$ ,80nm 粒子的计数效率下降。图 6 示出了类似的数据,其描绘了 125nm 粒子的计数效率。如图 6 中所示,125nm 粒子的计数效率在  $21^\circ$  和  $45^\circ$  时接近于 100%,但在  $90^\circ$  角时显著下降到小于 80% 计数效率。图 7 总结了

80nm 和 125nm 聚苯乙烯胶乳粒子的计数效率。

[0066] 实施例 2 : 用于粒子计数的具有一体密封件的毛细管装配台

[0067] 困扰液体粒子计数器的一个问题在于, 缺乏用于将样本毛细管密封至一个流体池的耐化学作用的密封件。解决此问题的一个途径是使用如下的固定器或装配台, 其包括不起反应的和实质刚性的聚合物, 例如 80 肖氏硬度 D 的 Kel-f, 用以形成毛细管入口的密封件。该固定器或装配台包括在毛细管孔周围与该固定器或装配台一体的一个或多个同轴密封件。这减少了潜在的泄漏通路的数目, 排除了会被错误安装的组件, 并且降低了公差的数量以保证更为均匀的密封压力。在实施方案中, 粒子计数器或粒子检测系统包括这样一个毛细管装配台。

[0068] 本发明的基于成像的粒子计数器可选地包括用于粒子计数的具有一体密封件的毛细管装配台, 例如, 使用通过加工或模制被形成的刚性聚合物 (例如, 80 肖氏硬度 D 的 Kel-f) 来形成与该固定器一体的围绕毛细管孔周围的多个同轴密封件。使用具有一体密封件的毛细管装配台对于某些应用是有益的, 因为它削减了潜在的泄漏路径的数量, 排除了会被不正确安装的组件, 并且降低了公差数量以保证更为均匀的密封压力。

[0069] 图 8 示出了示例毛细管装配台 800 的立体图。毛细管装配台 800 包括多个密封区域 801, 用于形成毛细管的密封件。毛细管装配台 800 还包括一个流体池以及多个窗口区域 802, 用于允许激光束进入和离开流体池。还包括了附加的窗口区域 803, 以将散射的光传输到检测器。对于某些实施方案, 毛细管装配台 800 是一个整体结构, 即它包括单块材料, 用于形成一个或多个毛细管的密封件。

[0070] 实施例 3 : 非正交粒子检测器的自动聚焦

[0071] 为了最大化粒子传输时间、覆盖面积, 并最小化景深, 粒子检测器中的激光路径相对于毛细管单元倾斜。在一个实施方案中, 辐射束横截面轮廓长轴被定向为非正交于该毛细管单元内的流向。在又一个实施方案中, 辐射束传播轴被定向为非正交于该毛细管单元之内的流向。例如, 这些轴可被定向在 69° 或 21° 的相对角。为了收集从该流体中的粒子散射或由其发射的辐射并保证适当的聚焦, 检测器和毛细管均相对于任一传感器成像光学器件——例如如上所述的光学系统——倾斜。本发明的基于成像的粒子计数器, 可选地包括使用粒子点尺寸或激光束结构或两者组合的自动聚焦。

[0072] 沿着成像光学器件的光轴的检测器的位置可以通过平移来调节, 以达到对散射或发射的辐射的最佳聚焦, 但在平移的整个范围内也必须将该图像保持在检测器上的同一位置。用于实现这一点的方法包括, 将该检测器安装为与成像光学器件的光轴成固定角度, 并且沿着成像轴平移该检测器以聚焦。在一个实施方案中, 该检测器被安装在与光轴对齐的线性轨道系统上, 用于沿着该光轴平移该检测器。在一个具体实施方案中, 安装了一个弹簧来将成像光学器件预加载使靠在一个成一角度的平面的一侧, 以增加平移步进电机 (translation steppermotor) 的精度 (例如 5 倍或更多), 以允许对于步进电机的每一步存在更小的线性移动 (例如 2 μm 或更少)。在一个实施方案中, 粒子计数器或粒子检测系统包括自动聚焦系统。

[0073] 图 9 示出了一个具体的自动聚焦系统实施方案 900。一个毛细管单元被安装在毛细管装配台 901 中, 检测器 902 被安装为相对于位于块 903 之内的成像光学器件成一定角度。线性轨道系统 904 被附接至检测器 902 和步进马达 905, 其用于沿着位于块 903 之内的

成像光学器件的光轴将检测器 902 平移。

[0074] 实施例 3 : 检测器阵列处理

[0075] 在实施方案中,由粒子与粒子检测系统的电磁辐射束相互作用而散射或发射电磁辐射;检测到达该二维检测器的所散射的或发射的电磁辐射,从而生成多个相应于散射的或发射的电磁辐射的强度的输出信号。这些输出信号可被进一步处理和 / 或分析,以确定该粒子的特性。

[0076] 对于某些实施方案,来自二维检测器的每个元件的输出信号被记录或传输至处理器以便进一步分析。然而,对于其他实施方案,来自该二维检测器的元件的子阵列(也即,仅一部分)的输出信号被记录或传输到处理器以便进一步分析。以此方式,可以选择二维检测器的一个子集用于检测或探测粒子的特性。在一个具体实施方案中,在确定粒子的特性过程中,仅利用了子阵列的输出信号的一部分。这样的感兴趣区域例如可用于对所检测的粒子产生更好的尺寸解析度和 / 或防止正在进行检测的样本体积的增长。

[0077] 例如,整个二维检测器可对粒子检测系统的整个流体池成像。特定的子阵列可相应于流体池的成像区域的输出信号,所述成像区域如被电磁辐射束照射的流体池区域。作为另一个实施例,子阵列可相应于除该流体池的壁之外的由电磁辐射束照射的流体池的成像区域的输出信号。感兴趣区域例如可包括相应于被电磁辐射束的中心所照射的流体池的成像区域和 / 或相应于电磁辐射束的强度基本均匀之处的输出信号。

[0078] 关于通过参引和变化而纳入的声明

[0079] 在本申请中的所有参引,例如包括公布的或授权的专利或等同物的专利文本;专利申请公布文本;以及非专利文献文件或其他源材料;均在此通过参引方式以其整体纳入本文,如同通过参引被单独纳入,以每个参引至少部分不与本申请的公开内容前后矛盾为限(例如,部分前后矛盾的参考文献除了该参考文献的部分前后矛盾的那部分之外通过参引方式被纳入)。分别于 2007 年 12 月 4 日、2007 年 12 月 4 日和 2008 年 10 月 22 日提交的美国临时申请 61/005,336、60/992,192 和 61/107,397,通过参引方式以其整体纳入于此。由发明人 Mitchell、Sandberg、Sehler、Williamson 和 Rice 作出的、代理人卷号为 171-07、于 2008 年 12 月 2 日提交的且题为“Two-Dimensional Optical Imaging Methods and Systems for Particle Detection”的美国非临时申请,通过参引以其整体纳入于此。

[0080] 在此说明书中提及的所有专利和公开文本都指示了本发明所属技术领域中的技术人员的技术水平。此处引用的参考文献通过整体纳入的方式来指示现有技术,在某些情况下指示了这些文献的提交日的现有技术,如果需要,可以考虑,将此信息用于排除(例如,不要求保护)现有技术中的特定实施方案。例如,当要求保护化合物时,应理解,现有技术中已知的化合物——包括此处参考文献中(尤其是在所引用的专利文件中)公开的某些化合物——将不被包括在本权利要求中。

[0081] 当此处公开一组代替物时,应理解那些组和所有子组中的所有单个成员,包括组成员的任何异构体和对映体,以及可使用代替物形成的化合物的类,均被分别地公开。当要求保护化合物时,应理解本领域中公知的化合物,包括在参考文献中公开的化合物,均不被包括在内。当此处使用马库什组或其他组时,该组的所有个体成员以及该组的所有可能的组合或子组合都将被单独地包括在本公开内容中。

[0082] 除非另有说明,此处所描述或列举的组件的每种组成或组合都可被用来实施本发

明。化合物的具体名称意为示例性的，因为众所周知，本领域技术人员可以对相同的化合物进行不同命名。当此处例如以配方或化学命名来描述化合物，导致该化合物的特定的异构体或对映体不明确时，本说明书意为单独地或任何组合地包括所描述的化合物的每个异构体或对映体。本领域技术人员将理解，可在本发明的实践中无需借助过多试验来采用除了具体列举的那些之外的方法、器件元件、原材料以及合成方法。任何这种方法、器件元件、原材料以及合成方法的本领域公知的功能等同物，均意为包括在本发明中。无论何时当在本说明书中给出一个范围时，例如温度范围、时间范围或成分范围，所有的中间范围和子范围，以及在范围中包括的个别值，均意为包括在本公开内容中。

[0083] 如此处所用，“包含”与“包括”、“含有”或者“其特征在于”是同义的，且是包容性的或开放式的，且不排除另外的、未提及的要素或方法步骤。如此处所用，“由……组成”排除了在所要求保护的要素中未说明的任何要素、步骤或组分。如此处所用，“基本由……组成”并不排除未实质影响权利要求的基本和新颖特性的材料或步骤。此处提到的术语“包含”，尤其在对合成物的组件的描述中，或在对装置的元件的描述中，被理解为涵盖了主要由所述组件或元件组成的、以及由所述组件或元件组成的那些合成物和方法。在此示例性描述的本发明可在缺少未在此处具体公开的任何一个或多个元件、任何一个或多个限制条件的情况下被适当实施。

[0084] 所采用的术语和表述被用于描述的目的而非限制，且无意在这些术语和表述的使用中排除所示的和所描述的特征的任何等同物或其部分，但应认识到，在所要求保护的本发明的范围内各种不同修改均是可能的。因此应理解，虽然已经通过优选实施方案和可选特征具体地公开了本发明，本领域技术人员可采用对此处公开的概念的修改和变化，且这样的修改和变化被视为处于如所附权利要求限定的本发明的范围之内。

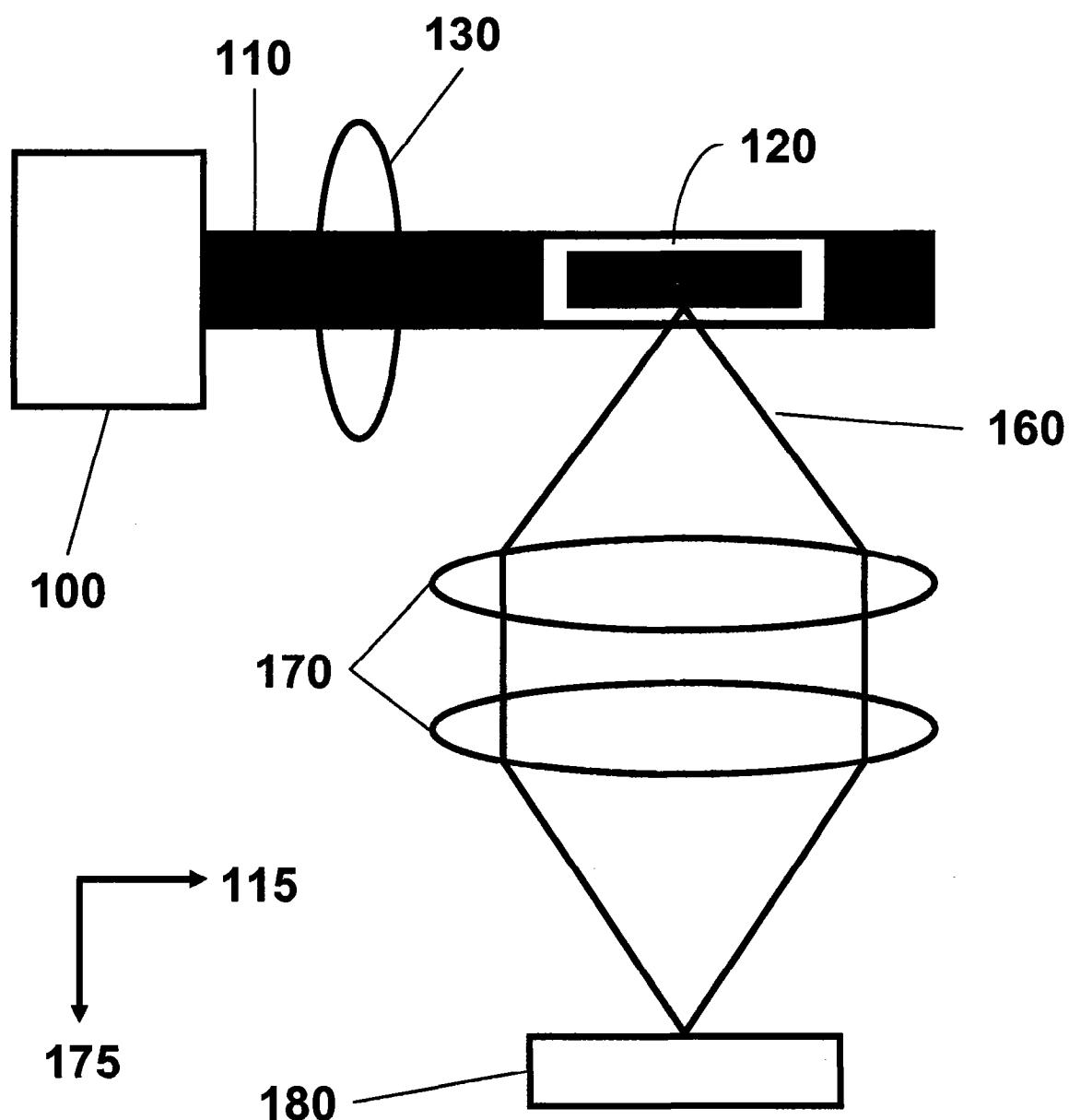


图 1

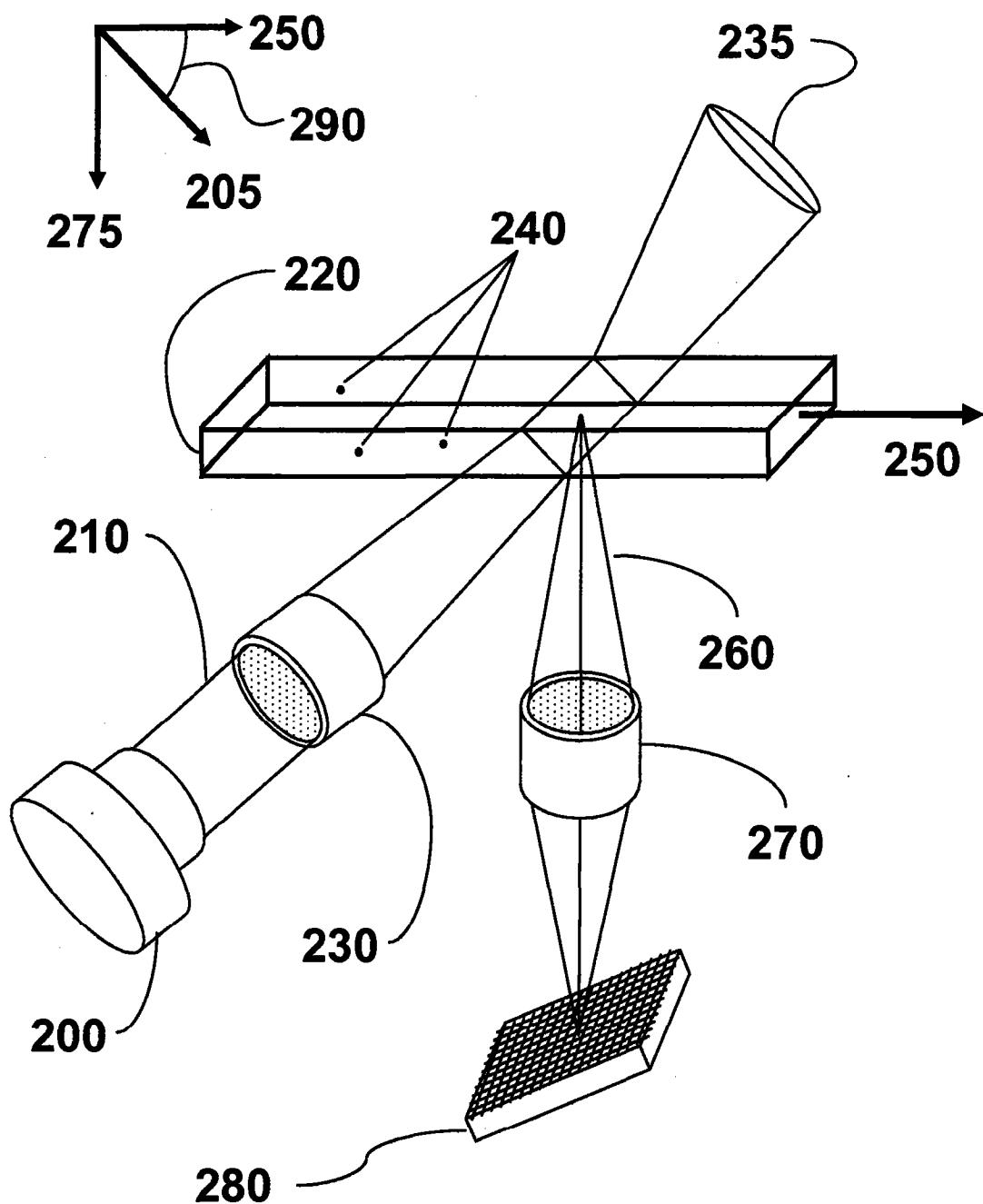


图 2A

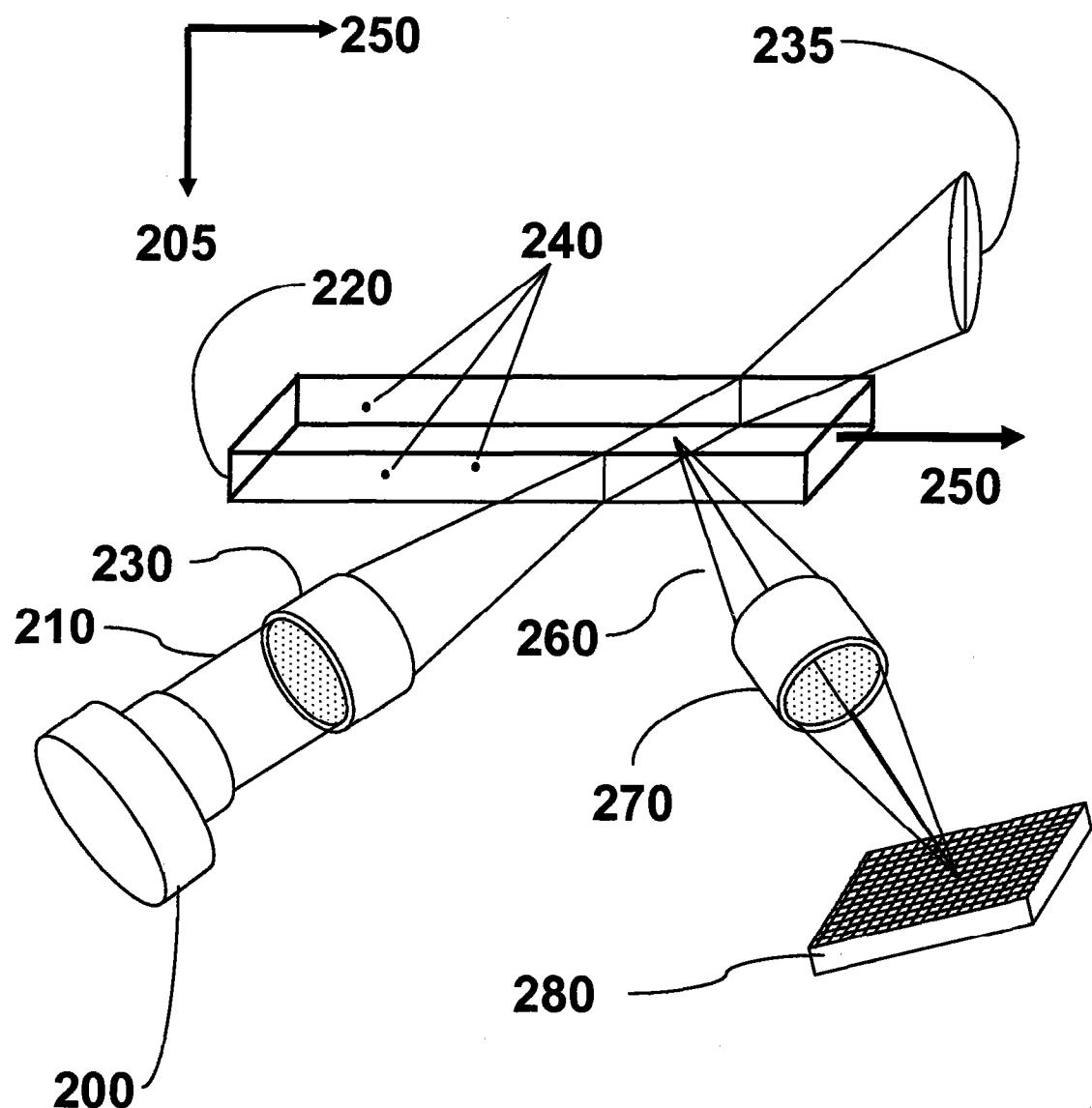


图 2B

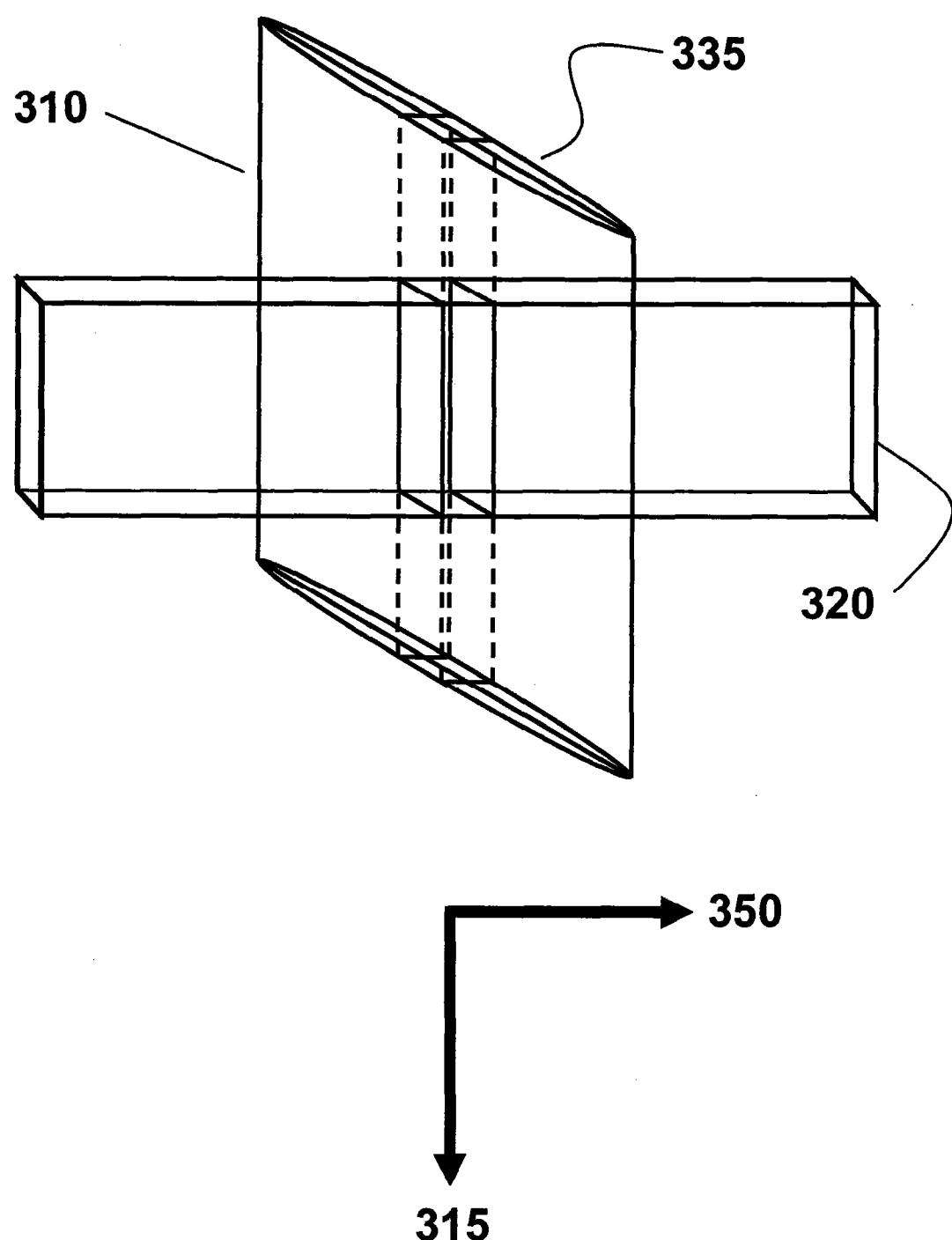


图 3A

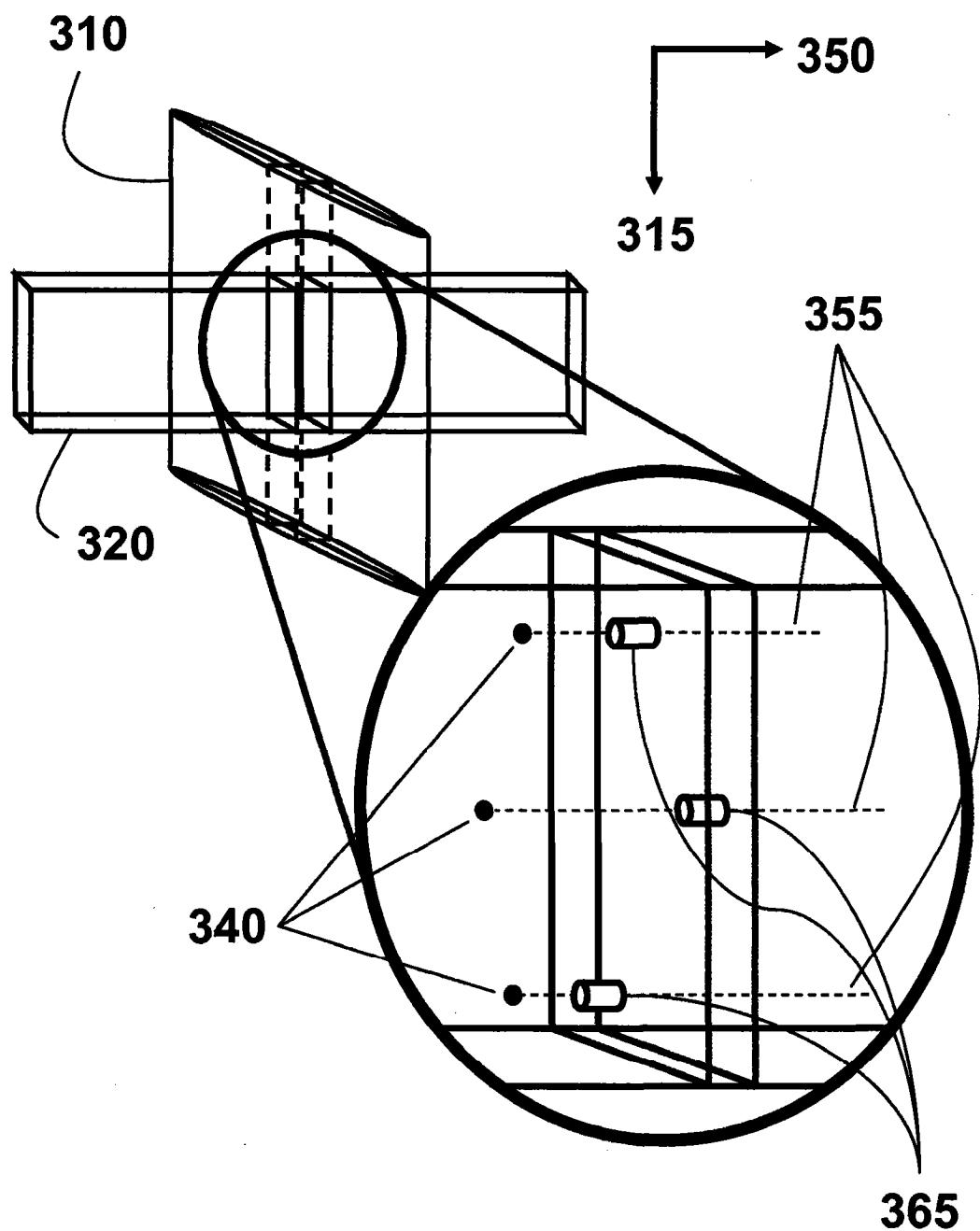


图 3B

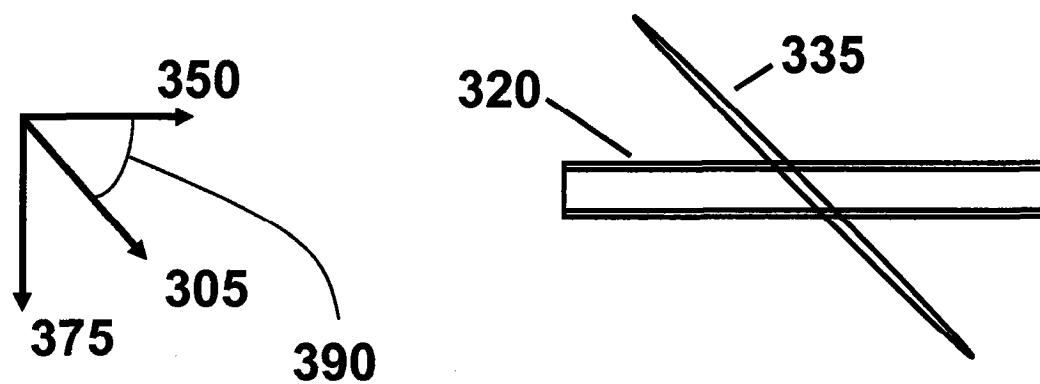


图 3C

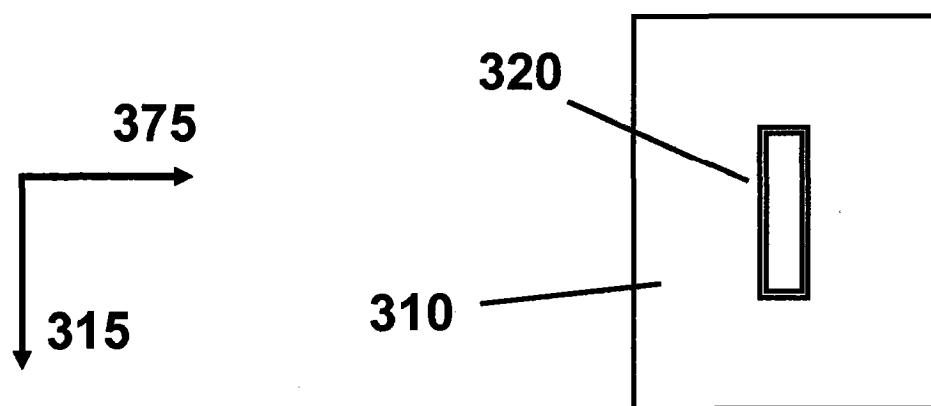


图 3D

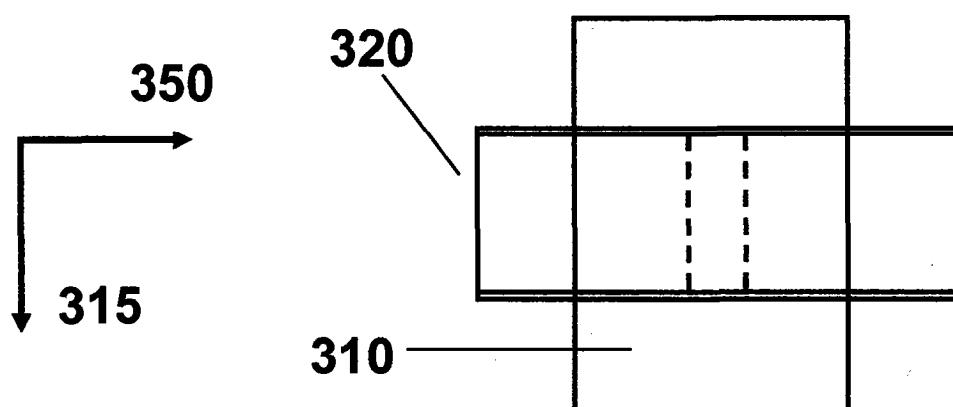


图 3E

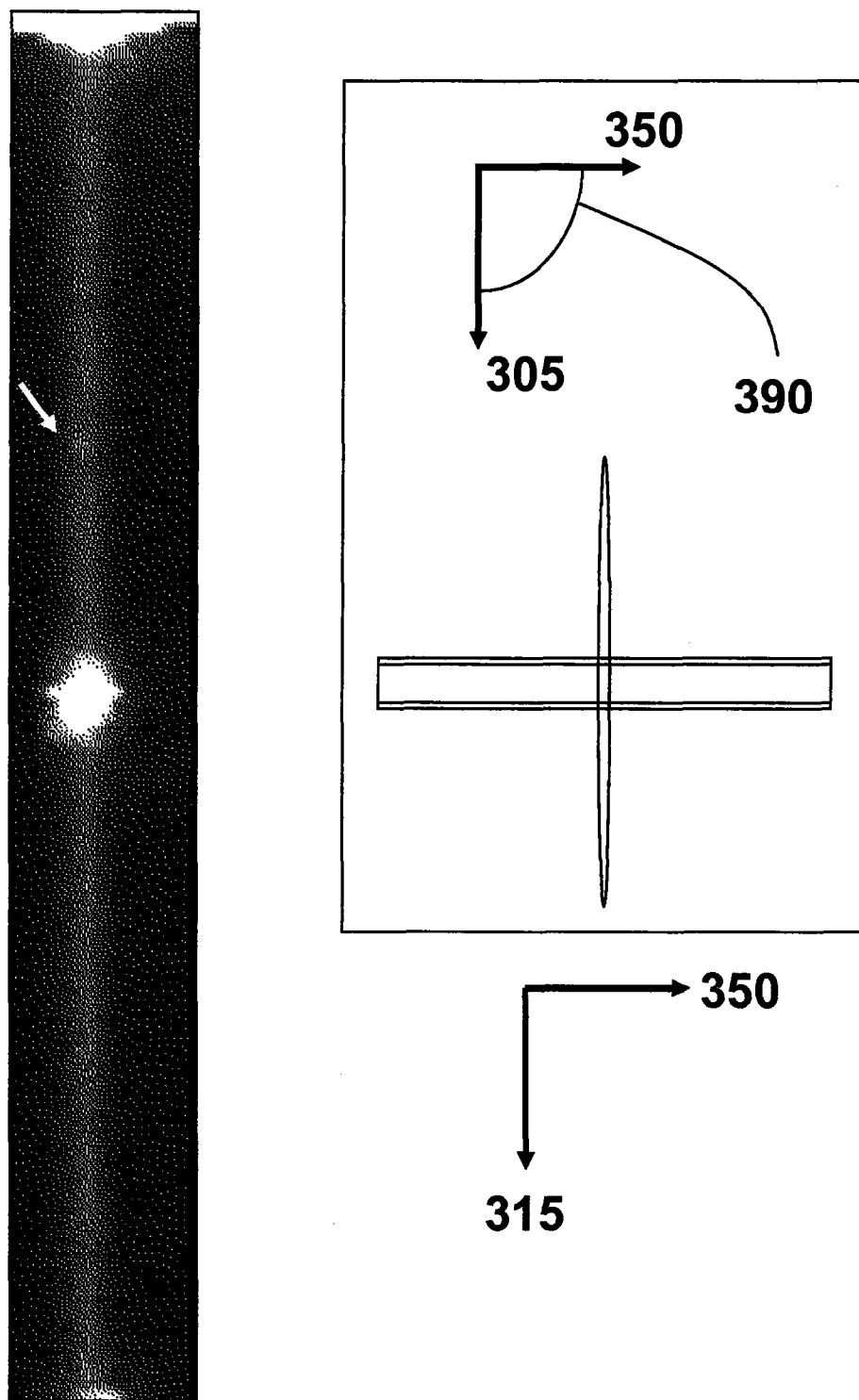


图 4A

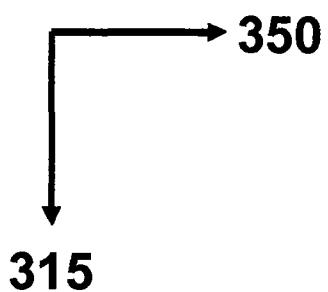
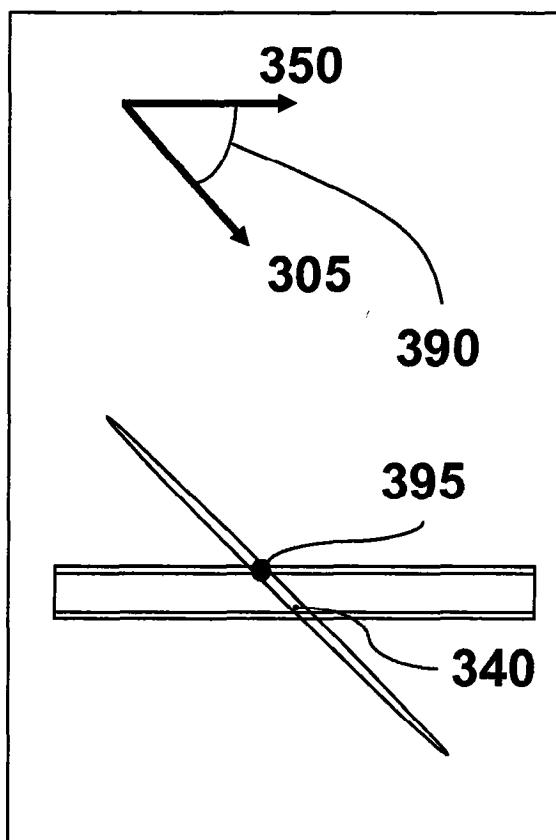
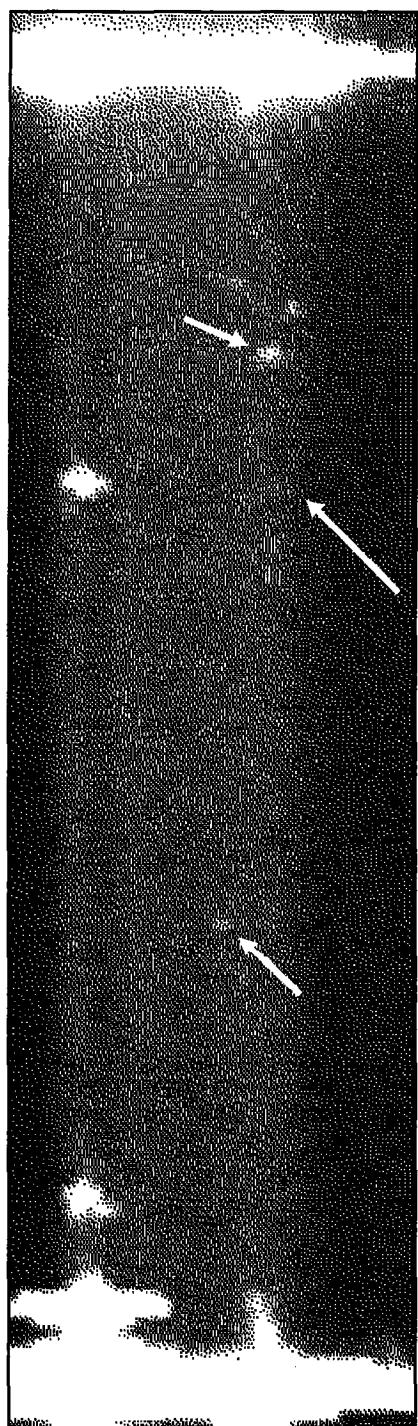


图 4B

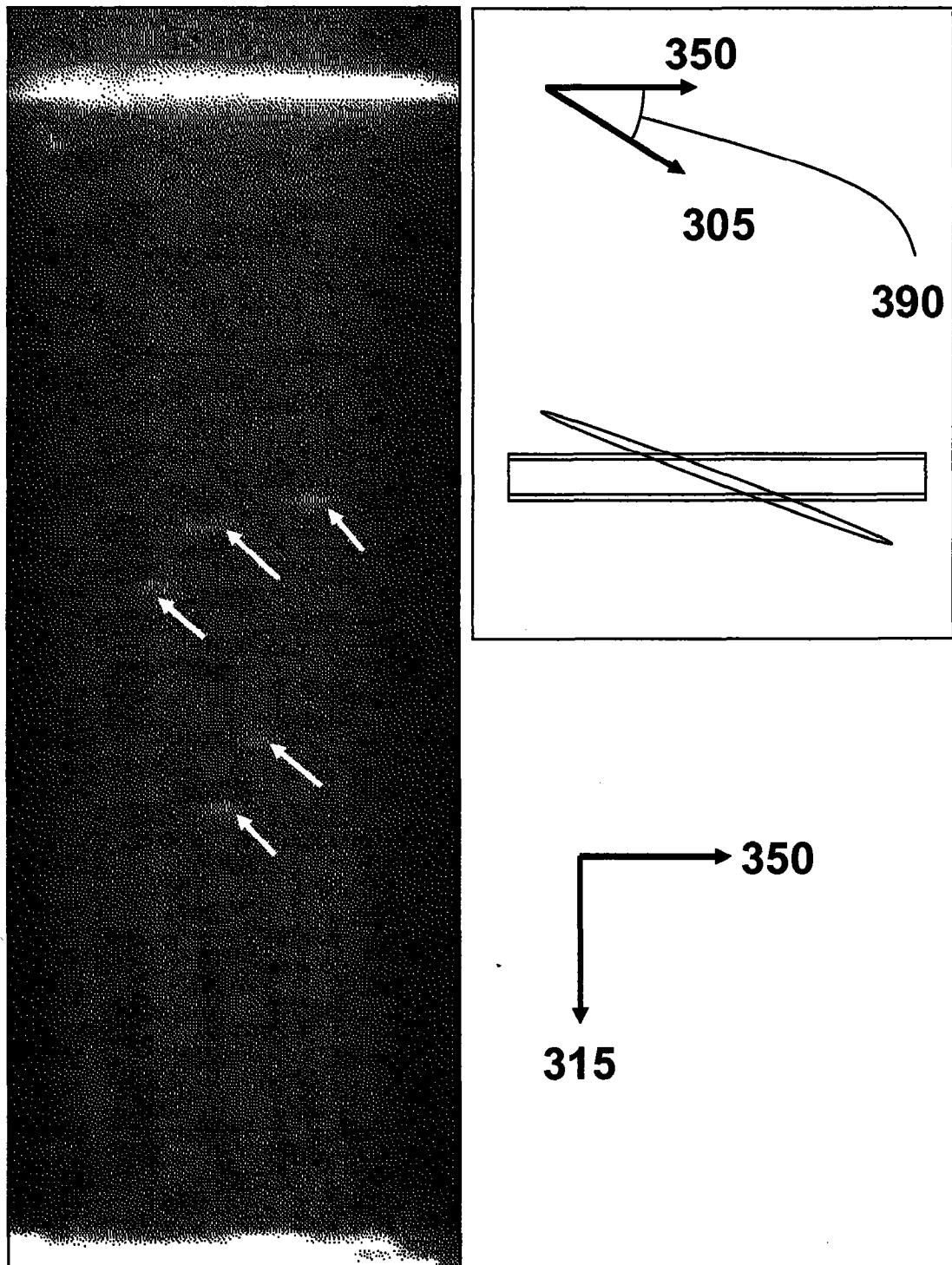


图 4C

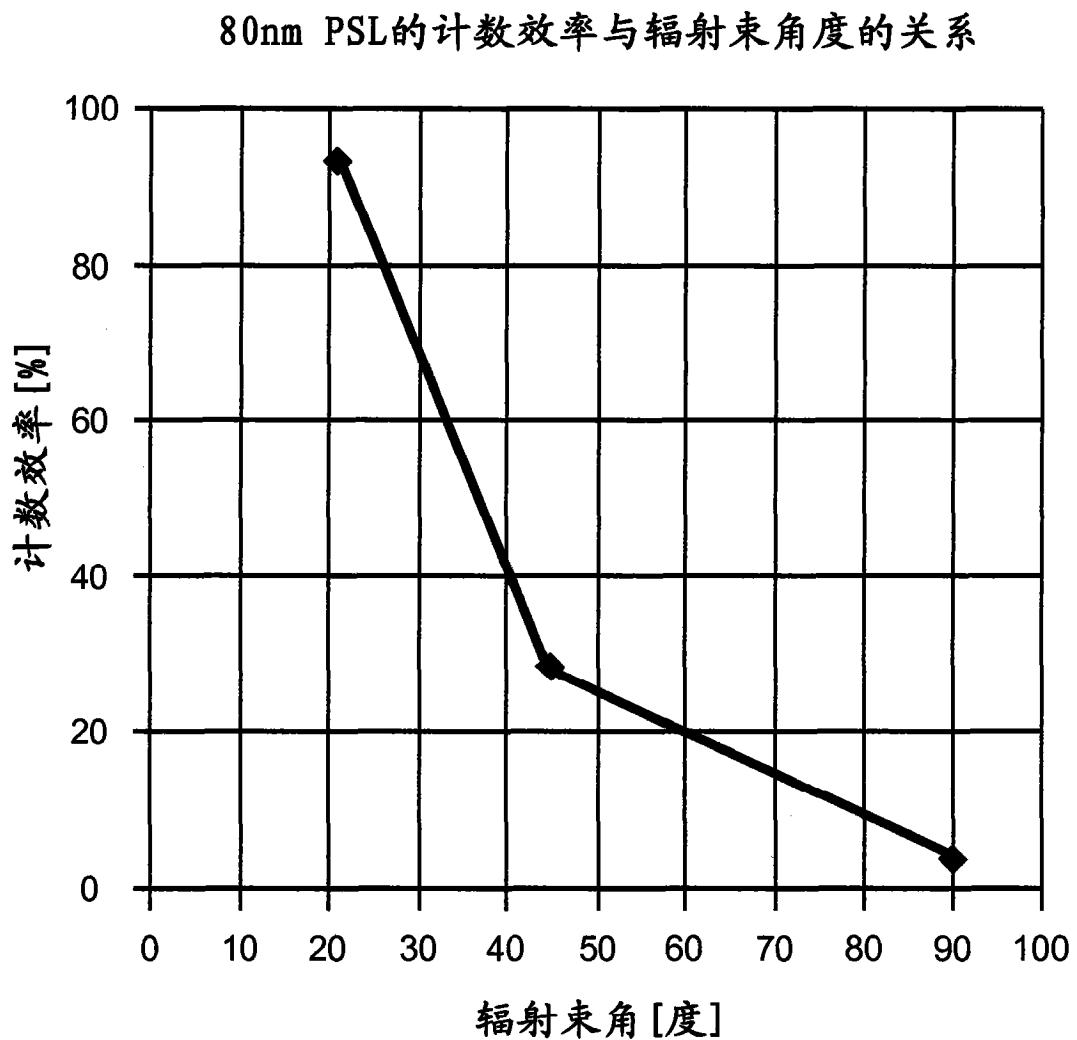


图 5

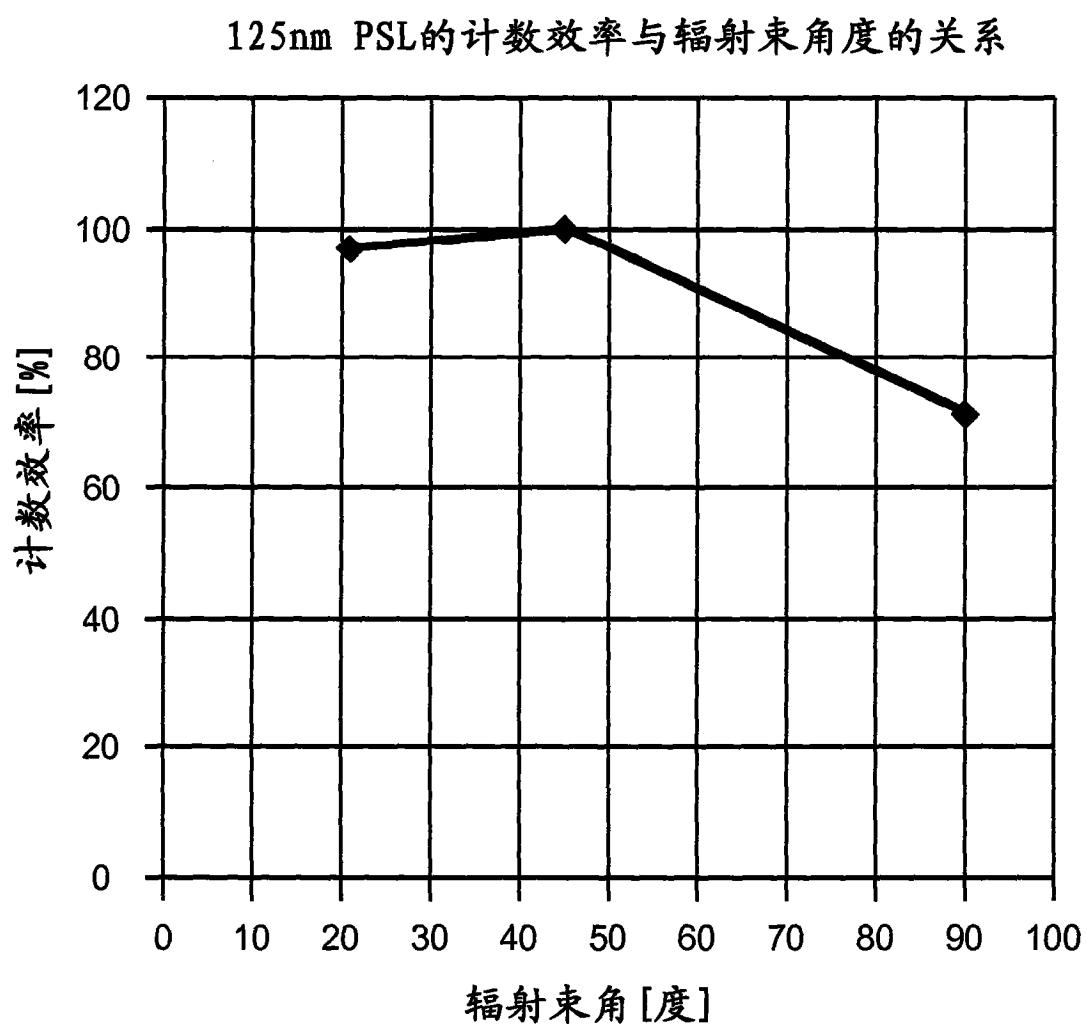
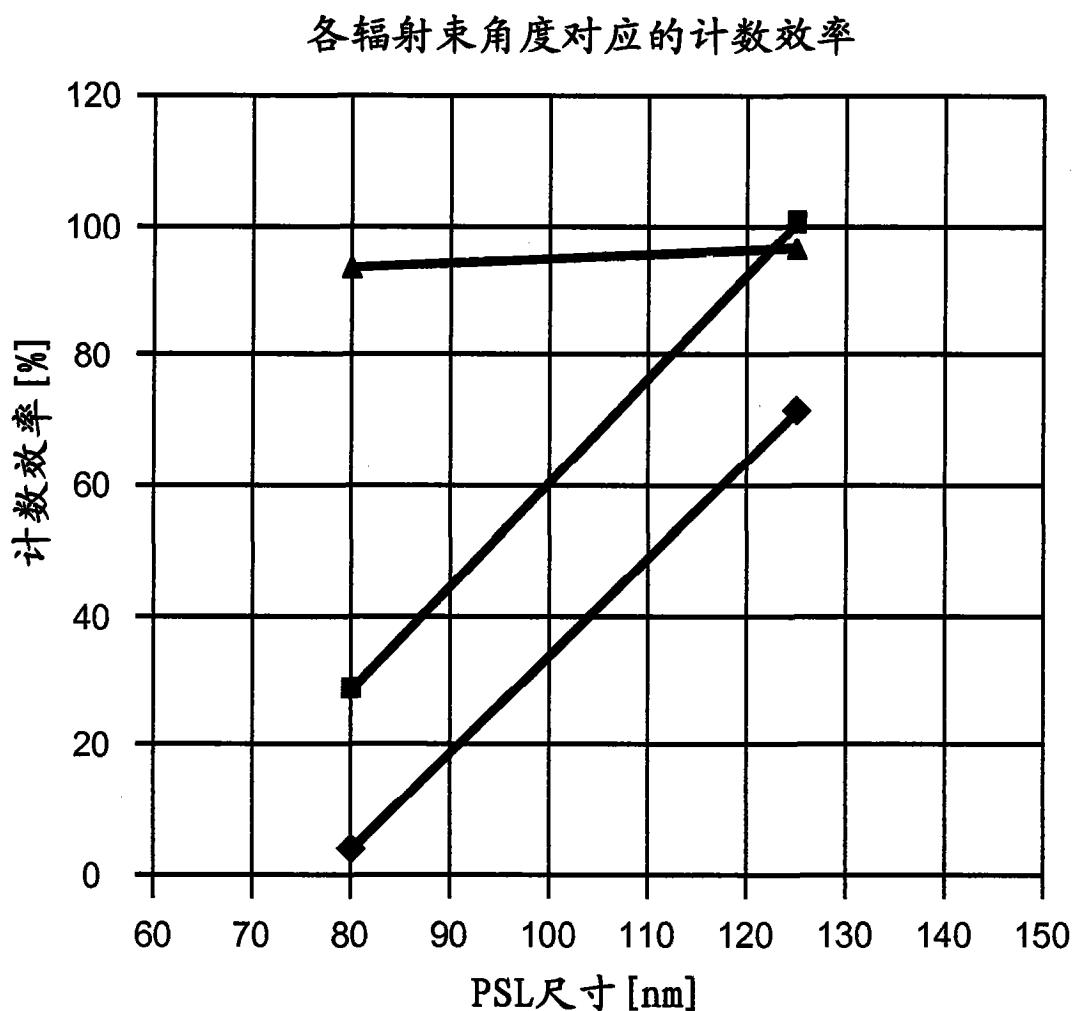


图 6



- ◆ 长轴和流向成 $90^\circ$  角
- 长轴和流向成 $45^\circ$  角
- ▲ 长轴和流向成 $21^\circ$  角

图 7

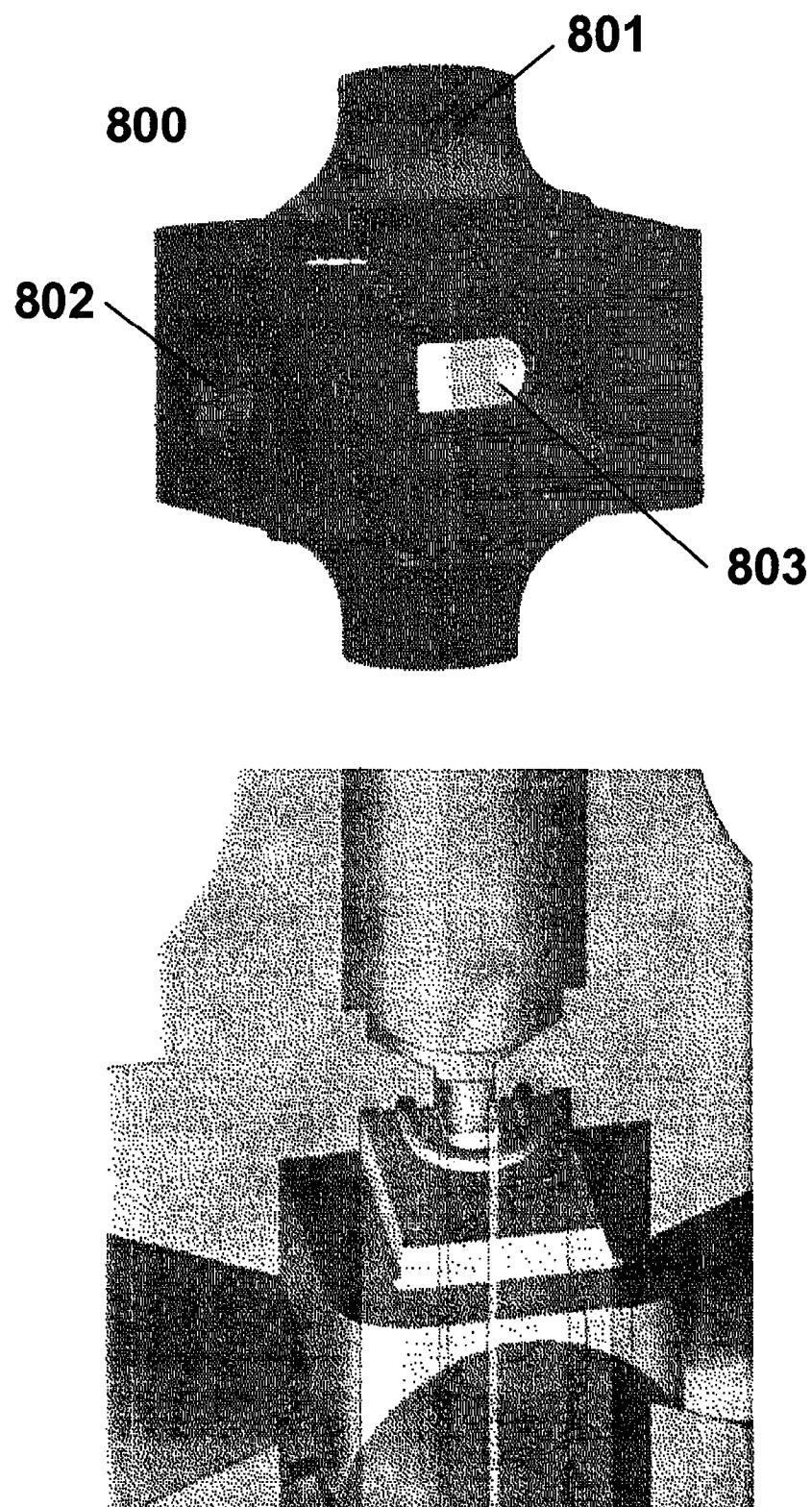


图 8

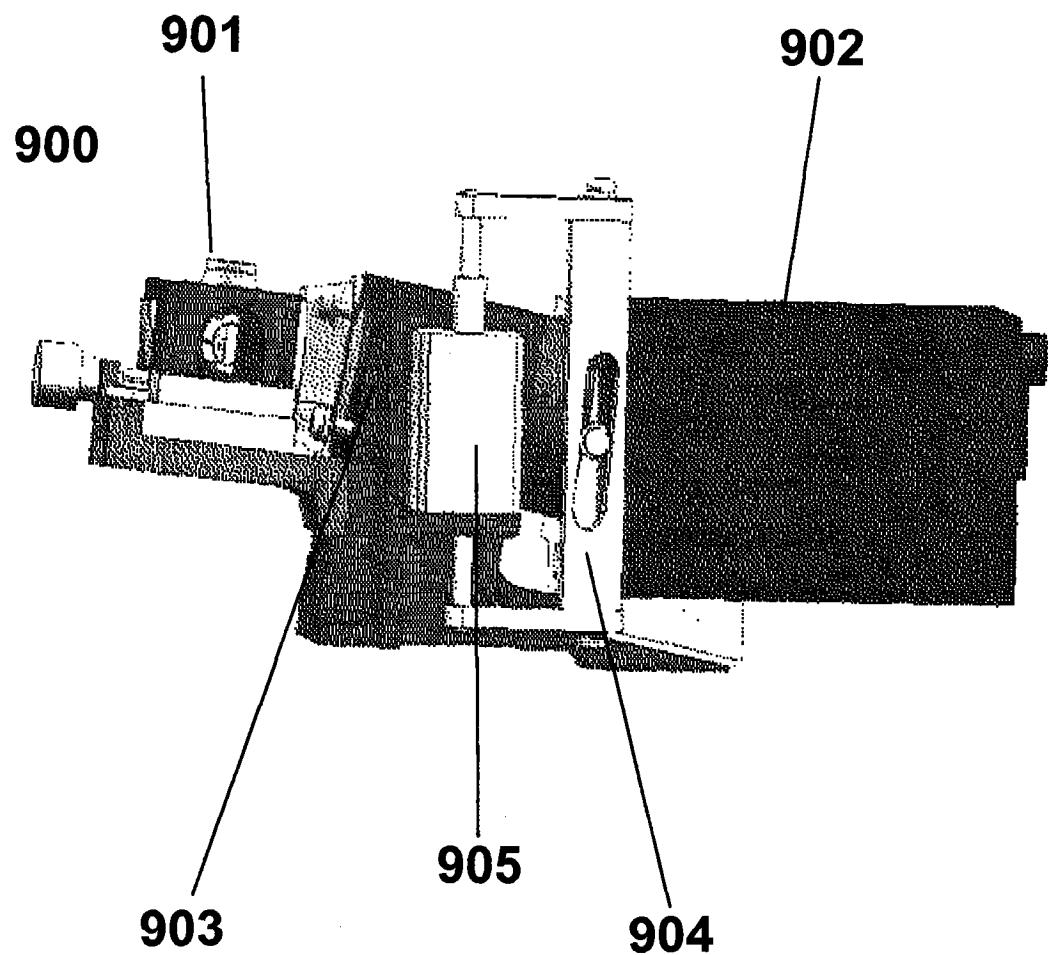


图 9