

对颗粒进行光学计数、测量尺寸的高灵敏传感器及方法

申请号：[03821924.7](#)

申请日：2003-06-18

申请(专利权)人 [微粒筛分系统公司](#)

地址 [美国加利福尼亚州](#)

发明(设计)人 [D F 尼科利](#) [P 托姆巴斯](#)

主分类号 [G01N15/06](#)

分类号 [G01N15/06](#) [G01N21/49](#) [G01N21/85](#) [G01V8/00](#)

公开(公告)号 1682105

公开(公告)日 2005-10-12

专利代理机构 [中国专利代理\(香港\)有限公司](#)

代理人 [邹光新](#) [张志醒](#)



(10) 授权公告号 CN 1682105 B

(45) 授权公告日 2014. 02. 26

(51) Int. Cl.

G01N 15/06 (2006.01)

G01N 21/49 (2006.01)

G01N 21/85 (2006.01)

G01V 8/00 (2006.01)

(56) 对比文件

D. J. HOLVE. In Situ Optical «Particle

Sizing Technique». «JORNAL OF ENERGY». 1980,

第4卷(第4期), 176-183.

审查员 杨莉莎

(73) 专利权人 安捷伦科技有限公司

地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 D·F·尼科利 P·托姆巴斯

(74) 专利代理机构 北京东方亿思知识产权代理

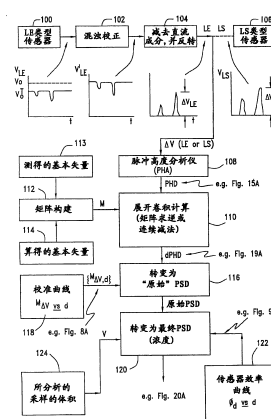
有限责任公司 11258

代理人 李晓冬 南霆

权利要求书4页 说明书48页 附图43页

对颗粒进行光学计数、测量尺寸的高灵敏传感器及方法

一种单颗粒光学传感器,该传感器具有高的灵敏度,并且响应于较浓的悬浮物,使用较窄的光束非均匀地照射光学传感器区域。该区域小于流动通道,从而传感器仅响应于流动通过该通道的总颗粒数中的一部分,探测具有任意相关直径的大量颗粒。因为不同的颗粒轨迹流动通过受到不同强度照射的区域部分,所以对结果展开卷积。使用了两种展开卷积方法:改进的矩阵求逆或连续减法。这两种方法都使用了利用经验测量得到的或通过理论模型计算得到的多个基本矢量,并且通过这些基本矢量得到剩余的基本矢量。对传感器进行混浊补偿。公开了几种使用消光或光散射探测,或者同时使用这两者的实施例。



1. 用于对流体悬浮物中的颗粒进行单颗粒光学尺寸测量的传感器装置,包含:
使所述悬浮物流动通过物理上精确定义的测量流动通道的装置;

有效导引具有轴线的窄光束通过所述测量流动通道从而在所述测量流动通道内形成光学传感区域的照射装置,所述光束和所述光学传感区域相对于所述测量流动通道的尺寸具有这样的尺寸,使得所述传感器装置仅响应于流动通过所述测量流动通道的全部颗粒中的一部分,由此所述传感器装置有效地响应于浓的流体悬浮物,所述光束具有最大强度部分并且对于从所述最大强度部分开始在垂直于所述轴线的方向上隔开的位置具有连续减弱的强度,由此所述颗粒中的一些具有通过所述最大强度部分的轨迹,而所述颗粒的另一些具有通过所述强度较弱部分的轨迹,并且所述颗粒的还有一些可能具有在所述区域之外的轨迹;

用于对来自所述区域的光进行光探测从而提供脉冲高度信号的探测器装置,其中每个脉冲高度信号都响应于流动通过所述区域的颗粒,所述脉冲高度信号是被测颗粒的尺寸和轨迹的函数,给定尺寸的颗粒当流动通过所述区域的所述最大强度部分时提供最大脉冲高度信号,而当流动通过所述区域的所述较弱强度部分时提供较弱的脉冲高度信号,所述脉冲高度信号共同地形成脉冲高度分布 PHD ;以及

用于对所述脉冲高度分布在数学上进行展开卷积以便从中提取所述流体悬浮物中所述颗粒的颗粒尺寸分布 PSD 的装置。

2. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述光束的所述最大强度部分是所述光束的中央部分。

3. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述传感器装置探测与所述流体悬浮物有关的、具有任意给定直径或直径范围的数量很大的颗粒。

4. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述测量流动通道的厚度方向平行于光束的轴线,宽度方向垂直于所述光束轴线,以及流动方向基本上垂直于所述厚度和宽度方向,并且其中所述光束在所述宽度方向上比所述测量流动通道窄。

5. 如权利要求 4 所述的传感器装置,其中所述光束的聚焦场的深度显著大于所述厚度,并且所述光束的有效宽度在整个所述厚度上基本上不变化。

6. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述光束在垂直于所述光束轴线相对的位置之间具有有效宽度,并且在这两个位置处所述较弱强度下降到所述最大强度的给定比例,对所述有效宽度进行选择以便可以有效测量感兴趣的颗粒的尺寸。

7. 如权利要求 6 所述的传感器装置,其中所述最大强度的所述给定比例是 $1/e^2$,其中 e 是自然对数系统的基数,所述有效宽度基本上是要被测量的最大颗粒尺寸的 $1/2$ 。

8. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述光束具有高斯强度分布。

9. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述光束具有圆形横截面。

10. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述光束具有椭圆横截面,并且该椭圆横截面在垂直于颗粒流动方向的方向上变宽。

11. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述探测器装置包含消光类型探测器。

12. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述探测器装置包含消光类型探测器和光散射类型探测器两者。

13. 如权利要求 12 所述的传感器装置,其中所述光散射类型探测器装置包含用于使来

自所述区域的散射光的一部分通过掩模从而选出位于第一和第二角度之间的散射光的装置,以及用于将透射通过所述区域的所述光引导到一个消光类型 (LE) 探测器的装置。

14. 如权利要求 12 所述的传感器装置,其中所述探测器装置包含用于使来自所述光学传感区域 (OSZ) 的所述光的一部分偏转到所述消光探测器的反射镜。

15. 如权利要求 12 所述的传感器装置,其中所述照射装置包含光源和用于将光从所述光源传输到所述光学传感区域并且使所述光投射通过所述区域的光纤装置。

16. 如权利要求 12 所述的传感器装置,其中所述探测器装置包含用于将通过所述光学传感区域的所述光传输到所述消光类型探测器的光纤装置。

17. 如权利要求 12 所述的传感器装置,其中所述探测器装置包含用于使从所述区域散射的所述光的一部分通过掩模从而选出位于第一和第二角度之间的散射光的装置,以及用于将所述光的所述部分传输到光散射类型 (LS) 探测器的光纤装置。

18. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述探测器装置包含光散射类型探测器。

19. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述照射装置提供被引导通过位于所述测量流动通道内的一对光学传感区域的两个光束,每个光束具有与不同范围的颗粒尺寸相兼容的有效宽度。

20. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述探测器装置包含光散射探测器,以及用于使从所述区域散射的光通过掩模装置的装置,其中该掩模装置包含多个掩模以及用于选出所述掩模之一的装置,其中该选出的掩模用于使从所述区域散射的所述光通过,并且每个掩模规定了所述光被散射的不同角度范围。

21. 如权利要求 20 所述的传感器装置,其中所述掩模位于可旋转轮上,并且通过将所述轮子旋转到希望的位置从而选择掩模。

22. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述照射装置使宽的准直光束投射通过所述光学传感区域,并且包含接收孔径从而仅捕获那些紧密围绕在所述光束的所述轴线周围的光线,因此将所述光束在垂直于所述光束的所述轴线方向上的有效宽度降低到基本上等于被测最大颗粒尺寸的 1/2 的宽度,以及将所述光线耦合到所述探测器装置的装置。

23. 如权利要求 22 所述的传感器装置,其中耦合所述光线的所述装置包含光纤装置。

24. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中具有每种相关尺寸的统计数量很大的颗粒流动通过所述光学传感区域。

25. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述流体悬浮物是浓的并且所述装置进一步包含用于补偿所述悬浮物的混浊的装置。

26. 如权利要求 25 所述的传感器装置,其中所述探测器装置按照消光原理进行工作并且提供具有基线电压电平的信号,并且所述脉冲高度信号表现为从所述基线电压电平向下延伸的脉冲,并且其中用于补偿所述悬浮物的混浊的所述装置包含感应所述基线电压电平并且自动将所述电平增加到近似等于所述悬浮物中无混浊情况下出现的所述基线电压电平的装置。

27. 如权利要求 25 所述的传感器装置,其中所述探测器装置按照消光原理进行工作并且提供具有基线电压电平的信号,并且其中用于补偿混浊的所述装置包含用于响应所述流体悬浮物并不混浊情况下的所述基线电压电平与所述混浊流体悬浮物的所述基线电压电平之比从而校正所述脉冲高度信号的计算机装置。

28. 如权利要求 25 所述的传感器装置,其中所述探测器装置按照消光原理进行工作并且提供具有基线电压电平的信号,并且其中用于补偿混浊的所述装置包含用于响应所述流体悬浮物并不混浊情况下的所述基线电压电平与用于所述混浊流体悬浮物的所述基线电压电平之比,通过增加由所述照射装置产生的光量从而调整所述光束强度的装置。

29. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中所述颗粒轨迹在所述测量流动通道的宽度上基本上一致地分布。

30. 如权利要求 1 所述的传感器装置,其中用于对所述脉冲高度分布展开卷积的所述装置包含基本矢量和源矢量,其中每个基本矢量对应于一种特定的颗粒尺寸,并且源矢量代表由所述探测器装置探测到的对于一种流体悬浮物的测得的脉冲高度分布,所述装置还包含使用一种展开卷积算法从而根据所述脉冲高度分布得到所述颗粒尺寸分布的装置。

31. 如权利要求 30 所述的传感器装置,其中所述基本矢量中的至少一些基本矢量的值基于对具有已知尺寸的颗粒的测量结果。

32. 如权利要求 30 所述的传感器装置,其中所述基本矢量中的一些基本矢量的值基于对具有已知尺寸的颗粒的测量结果,并且其它所述基本矢量是根据所述基本矢量中的所述一些基本矢量通过内插和 / 或外插计算得到的。

33. 如权利要求 30 所述的传感器装置,其中所述基本矢量是计算得到的。

34. 如权利要求 30 所述的传感器装置,其中所述基本矢量为矩阵的列基本矢量,并且使用展开卷积算法的所述装置执行矩阵求逆和矢量乘法。

35. 如权利要求 30 所述的传感器装置,其中使用展开卷积算法的所述装置执行连续减法。

36. 如权利要求 30 所述的传感器装置,其中使用展开卷积算法的所述装置提供展开卷积后的脉冲高度分布 dPHD,并且所述装置进一步包含提供脉冲高度和直径之间关系的校准曲线的装置,以及使用所述校准曲线从而将 dPHD 中每个展开卷积后的脉冲高度值转换为与该脉冲高度值相关的唯一颗粒直径,从而产生“原始”颗粒尺寸分布 PSD 的装置,以及通过使所述原始 PSD 乘以值 $1/\phi_d$ 从而使其重新归一化,并由此将所述原始 PSD 转换为最终 PSD 的装置,其中 ϕ_d 是对于每种尺寸的颗粒来说,由所述装置实际探测到的颗粒所占的比例。

37. 如权利要求 30 所述的传感器装置,其中所述传感器装置仅响应于流动通过所述测量流动通道的总颗粒数中的一部分。

38. 一种利用光学方法测量流体悬浮物中颗粒尺寸的方法,包含:

使所述悬浮物流动通过单颗粒光学测量尺寸传感器装置的物理上精确定义的测量流动通道,其中将具有轴线的光束导引通过所述测量流动通道,从而在所述测量流动通道内形成光学传感区域,所述光束和所述光学传感区域相对于所述测量流动通道的尺寸具有这样的尺寸,使得所述传感器装置仅响应于流动通过所述测量流动通道全部颗粒中的一部分,由此所述传感器装置有效地响应于浓的流体悬浮物,所述光束具有所述光束中的最大强度部分并且对于所述光束中在与所述轴线垂直的方向上隔开的多个位置具有连续减弱的强度,由此所述颗粒中的一部分具有通过所述最大强度部分的轨迹,而所述颗粒的另一部分具有通过所述强度较弱部分的轨迹,并且所述颗粒的还有一部分可能具有在所述区域之外的轨迹;

对来自所述区域的光进行探测从而提供脉冲高度信号,每个脉冲高度信号都响应于流动通过所述区域的颗粒,所述脉冲高度信号是被测颗粒的尺寸和轨迹的函数,所述脉冲高度信号共同地形成脉冲高度分布 PHD;以及

对所述 PHD 进行数学上的展开卷积和处理以便从所述 PHD 中提取所述流体悬浮物中所述颗粒的颗粒尺寸分布 PSD。

39. 如权利要求 38 所述的方法,其中对所述 PHD 进行数学上的展开卷积的步骤包含:通过测量对流过所述单颗粒光学测量尺寸装置的已知尺寸颗粒的响应,确定至少一个经验性基本矢量的值;以及根据所述经验性基本矢量,通过内插和/或外插对应于其它尺寸颗粒的其它基本矢量从而计算所述其它基本矢量。

40. 如权利要求 39 所述的方法,进一步包含确定流动通过所述单颗粒光学测量尺寸装置的已知尺寸颗粒的其他经验性基本矢量的值;以及根据至少一个经验性基本矢量和所述其他经验性基本矢量,通过内插和/或外插对应于其它尺寸颗粒的所述其它基本矢量,从而计算所述其它基本矢量。

41. 如权利要求 39 所述的方法,进一步包含确定对应于至少一种尺寸颗粒的至少一个算得的基本矢量的值。

42. 如权利要求 41 所述的方法,进一步包含根据算得的基本矢量,通过内插和/或外插所述其它基本矢量从而计算对应于其它尺寸颗粒的其它基本矢量。

43. 如权利要求 38 所述的方法,其中对所述 PHD 展开卷积和处理的步骤包含:建立具有多个列的矩阵,每列包含基本矢量,所述每个基本矢量包含对应于所述装置的光探测器对已知尺寸颗粒的响应的所述已知尺寸颗粒的脉冲高度分布,每个连续列包含用于具有连续增大尺寸的颗粒的基本矢量,所述矩阵还具有类似的多个行,每行对应于连续的脉冲高度通道,每个通道包含一个范围的脉冲高度,连续的行对应于连续增大的脉冲高度,每列的基本矢量对于一行在一个位置处具有最大计数脉冲高度值,该最大计数脉冲高度值与对应于和所述列的基本矢量相关的所述已知尺寸颗粒的脉冲高度通道相关,用于连续列的所述最大计数脉冲高度值被安排在所述矩阵的对角线上;通过将对应于一个列中大于所述最大计数脉冲高度值的脉冲高度值的所有项设置为零,从而修改所述矩阵;以及使用展开卷积算法从而执行所述脉冲高度分布和所修改的所述矩阵的矩阵求逆和矢量乘法。

44. 如权利要求 43 所述的方法,其中对于所述基本矢量中的一部分,通过引导所述已知尺寸颗粒使其流过所述装置并且提供所述装置对所述已知尺寸颗粒的响应,从而根据经验得到所述光探测器对所述已知尺寸颗粒的所述响应;以及根据所述基本矢量的一部分,通过内插和/或外插对于所述其余基本矢量的所述光探测器的所述响应,从而计算其余基本矢量的响应。

45. 如权利要求 38 所述的方法,其中对所述 PHD 进行数学上的展开卷积的步骤包含:使用展开卷积算法从而提供展开卷积后的脉冲高度分布 dPHD,并且所述方法进一步包含提供脉冲高度和直径之间关系的校准曲线,以及使用所述校准曲线将该 dPHD 中每个展开卷积后的脉冲高度值转换为与该脉冲高度值相关的唯一颗粒直径,从而产生“原始”颗粒尺寸分布 PSD,以及通过使所述原始 PSD 乘以值 $1/\phi_d$ 从而使其重新归一化,并由此将所述原始 PSD 转换为最终 PSD,其中 ϕ_d 是对于每种颗粒尺寸来说,由所述装置实际探测到的颗粒所占的比例。

对颗粒进行光学计数、测量尺寸的高灵敏传感器及方法

[0001] 发明背景

[0002] 1. 发明领域

[0003] 本发明涉及用于光学传感的方法和装置,包含对流体悬浮物中具有不同尺寸的单颗粒进行计数和测量尺寸,并且本发明尤其涉及这样的方法和装置,这些方法和装置与常规设计的光学传感器相比可以实现更高的灵敏度和重合浓度。

[0004] 2. 相关技术描述

[0005] 有必要回顾一下光学颗粒计数的常规方法的理论基础,下文中将光学颗粒计数称作单颗粒光学传感(SPOS)。用于实施SPOS的传感器基于消光(LE)或光散射(LS)的物理技术,或者结合使用两者的物理技术。常规SPOS传感器的光学设计基于在图1中示意表示的LE技术。使包含气体或液体的一种流体流过物理流动通道10,在该流体中悬浮有不同尺寸的颗粒,并且该物理流动通道10典型地具有矩形横截面。规定该流动通道的两个相对的平行表面12和14是不透明的,而垂直于这对不透明表面的其余两个相对的平行表面16和18是透明的,其包含流动通道10的“前”窗和“后”窗。具有合适形状的光束20进入流动通道10的前窗16,通过流动的流体和颗粒,从后窗18离开该流动通道10,并且投射到距离较远的消光探测器 D_{LE} 。

[0006] 将前窗16和后窗18在沿着由x轴规定的方向上的宽度定义为“a”(图1)。将流动通道10在沿着由平行于入射光束光轴的y轴规定的方向上的宽度定义为“b”。使得我们关注的悬浮颗粒沿着由z轴定义的方向(图1中从顶部到底部)以一种稳定的适当流动速度F通过流动通道10,其中表示该流动速度的单位为毫升(ml)/秒或者毫升(ml)/分钟。

[0007] 传感器的光学传感区域22(“OSZ”)或“观察体积”是由流动通道10的四个内表面和横穿该通道10的带状光束规定的空间区域。得到的OSZ的形状类似于一个薄的、近似为矩形的板(具有如下所述的凹的上表面和下表面),其中将其最小厚度定义为 $2w$,并且它的方向垂直于流动通道10的纵轴(图1)。典型的照射光源24是激光二极管,发出椭圆形光束或圆形光束,而且该光束沿着两个互相正交的轴中的每个轴都具有高斯强度分布,并且在该光束的中央处具有最大强度。为了生成与流动通道10的前窗和后窗一起规定OSZ所需的入射光束形状,典型地需要两种光学元件。第一种光学元件通常为透镜26,用于使起始的准直光束聚焦到流动通道10的中心处(x-y平面)。聚焦光束“腰部”或宽度 $2w$ 与该透镜的焦距成正比,并且与起始的准直光束宽度成反比,其中该起始准直光束的宽度由其 $1/e^2$ 强度值规定。如果聚焦光束的横截面不是圆形的,那么该聚焦光束的宽度 $2w$ 还取决于光束的方向。

[0008] 第二种光学元件典型地是圆柱透镜28,用于“散焦”,并且由此使得光束在一个方向上变宽,即沿着x轴方向变宽。实际上,圆柱透镜28使得光束转变成平行于x轴横穿流动通道10的聚焦“线光源”,而如果没有该圆柱透镜28的话,该光束将会是投射到流动通道上的均匀聚焦光束(具有椭圆或圆形的横截面)。选择圆柱透镜28的焦距和位置,从而使在流动通道中心处得到的沿x轴的光束宽度(由其 $1/e^2$ 强度点规定)远远大于流动通道10的宽度a。因此,传感器的前窗16仅捕获高斯光束的顶部部分,并且在该部分中的强度

几乎是均匀的。为了获得最佳传感器分辨率,必须要求入射强度在流动通道 10 的宽度方向(x 轴方向)上的分布基本是均匀的。得到的带状光束沿 z 轴的强度分布也是高斯分布,在 OSZ 的中心处最亮并且在其“上”和“下”边缘/表面处下降到 $1/e^2$,其中在这些强度点之间的距离规定了 OSZ 的厚度 $2w$ 。

[0009] OSZ22 的形状不同于图 1 中显示的理想化的、矩形板形状。而是, OSZ 在 y-z 平面的横截面形状类似于蝴蝶结,或者沙漏,这是因为入射光束沿着 y 轴聚焦造成的。但是,假设传感器的光学设计已经得到了最优化,那么聚焦透镜的焦距将会远远大于流动通道的深度 b 。因此,聚焦光束的“场深度”将会显著大于流动通道的深度 b ,其中该“场深度”定义为在该点处光束厚度扩展到 $2^{-2} \times 2w$ 的两点之间沿 y 轴的距离。因此,沿 y 轴的光强度变化将会最小。

[0010] 带状光束通过流体颗粒悬浮物并且投射到适当的光探测器 D_{LE} 上(典型地是硅光电二极管)。当 OSZ 中没有颗粒时,探测器 D_{LE} 接收到最大照射。通过 OSZ 的颗粒会即刻“阻断”投射到探测器 D_{LE} 上的少部分入射光束,这使得探测器 D_{LE} 的光电流输出和相应的由适当信号调整装置产生的电压“ V_{LE} ”的即刻下降。得到的信号包含高度为 ΔV_{LE} 的负向脉冲 30,而该脉冲叠加在具有相对较大幅度 V_0 的直流“基线”电平 32 上,如图 2 示意表示的情况。显然,颗粒越大,脉冲高度 ΔV_{LE} 的绝对幅度就越大,并且脉冲高度 ΔV_{LE} 与 V_0 之间的比值也就越大。

[0011] 由电路 34 对探测器信号 V_{LE} 进行处理,该电路通过从 V_{LE} 中减去固定的直流电压或者使用适当的高通滤波器进行“交流耦合”,从而有效地去除该基线电压 V_0 。这使得可以捕获所需的具有不同高度 ΔV_{LE} 的负向脉冲。然后,进一步“调整”所得到的信号脉冲,典型地包含对其进行反转和放大。使用快速、高分辨率模拟/数字(A/D)转换器使每个脉冲数字化,这使得可以以较高的准确度确定脉冲的高度。通过使用具有已知直径 d 的“标准”颗粒(典型的是聚苯乙烯胶乳球)生成一个校准表,其中直径 d 的范围跨越所需的尺寸范围。将该 ΔV_{LE} vs d 的分立值的集合存储在计算机存储器中,并且典型地将其显示为 $\log \Delta V_{LE}$ vs $\log d$,其中通过一条连续曲线连接这些点。通过校准表值的内插,可以容易地将该测得的脉冲高度 ΔV_{LE} 的集合转化为颗粒直径 d 的集合。

[0012] 大体上,有几种物理机制可以对消光效应有贡献。这些物理机制包含折射、反射、衍射、散射以及吸收。对于显著大于入射光波长(入射光束波长典型地为 0.6–0.9 微米(μm))的颗粒来说,折射和反射这两种机制在 LE 效应中占据主导地位。在折射的情况下,分别根据颗粒的折射率比周围流体的折射率大还是小,而使入射到颗粒上的光射线偏向光束的轴线或者偏离光束的轴线。如果两种折射率差别足够大并且(小)探测器元件 D_{LE} 距离流动通道足够远,那么折射光射线将会发生足够大的偏转,使得它们不会投射到探测器 D_{LE} 上,从而产生需要的信号 ΔV_{LE} 。反射机制必然伴随折射,并且颗粒和流体之间的折射率“对比”越大,由颗粒反射的入射光所占的比例也就越大。典型地,衍射现象对 LE 信号具有可以忽略的影响,这是因为与主要强度的最大值和最小值相关的角度小于由远处的探测器 D_{LE} 规定的典型立体角。

[0013] 但是,与此不同的是,光散射现象典型地对 LE 信号具有重要贡献。对于其尺寸与入射光波长相当或者小于入射光波长的颗粒来说,散射是占主导地位的机制。散射光强度的幅度和角度分布取决于颗粒的尺寸、形状以及方向,还取决于折射率之间的差和光束的

波长。公知的 Mie 散射理论和瑞利散射理论详细描述了光散射强度的特性。散射偏离入射光束光轴的光量越大,到达消光探测器 D_{LE} 的光通量就越小。

[0014] 对于被高度染色的颗粒来说,吸收机制是显著的。这种效应的程度取决于入射光的波长,还取决于颗粒的尺寸。对于尺寸显著大于波长的颗粒来说,吸收对总 LE 信号的贡献是显著的。

[0015] 在颗粒尺寸和 LE 信号的幅度 ΔV_{LE} 之间存在一种简单的、近似的关系。当 OSZ 中没有颗粒时,入射到探测器 D_{LE} 上的总光通量与照射的面积 A_0 成正比。这可以近似地表示为:

$$[0016] \quad A_0 \approx 2aw \quad (1)$$

[0017] 假设入射到流动通道 10 上的光束强度沿该流动通道的宽度 a 和在光束的厚度 $2w$ 上都是均匀的(即假设该光束具有矩形分布,而不是具有高斯分布)。

[0018] 如果额外再做出简化假设,其中假设颗粒完全阻断投射到该颗粒上的光(即,理想的 100%消光),那么由该颗粒阻断的光的比例为 $\Delta A/A_0$,其中 ΔA 代表颗粒的横截面积。所以,对于直径小于 $2w$ 的颗粒来说,消光信号的脉冲高度 ΔV_{LE} 可以表示为:

$$[0019] \quad \Delta V_{LE} = (\Delta A/A_0) V_0 \quad (2)$$

[0020] 为了简化,假设颗粒是球形的并且是均质的,从而避免了与颗粒形状和方向有关的复杂细节。因此,对于直径为 d 的颗粒,量 ΔA 可以通过下式得到

$$[0021] \quad \Delta A = \pi d^2/4 \quad (3)$$

[0022] 如果颗粒阻断了小于 100%的入射到其上的光,例如其中对于消光来说占据主导地位机制主要是光散射,而不是折射和反射,那么量 ΔA 代表“有效”横截面积,并且该面积小于实际物理面积。

[0023] 可以通过下式得到通过 OSZ 的颗粒速度 v

$$[0024] \quad v = F/ab \quad (4)$$

[0025] 脉冲宽度 Δt 代表颗粒通过 OSZ,即通过规定了宽度 $2w$ 的 $1/e^2$ 强度点之间的时间。如果相比于量 $2w$,忽略了颗粒的尺寸,那么可以通过下式得到脉冲宽度

$$[0026] \quad \Delta t = 2w/v \quad (5)$$

[0027] 有指导意义的是,计算用于典型的 LE 传感器,即型号为 LE400-1E 的传感器(颗粒测量尺寸系统, Santa Barbara, CA) 的上述参数值,其中 $a = 400 \mu m$, $b = 1000 \mu m$, $2w \approx 35 \mu m$,并且假设 $F = 60 ml/min$ 。

$$[0028] \quad A_0 = 1.4 \times 10^4 \mu m^2$$

$$[0029] \quad v = 250 cm/sec$$

$$[0030] \quad \Delta t = 14 \times 10^{-6} sec = 14 \mu sec$$

[0031] 可以可靠探测到的(即其中 ΔV_{LE} 超过典型的 r. m. s 噪声水平至少两倍)典型的最小颗粒直径大约为 $1.3 \mu m$ 。这对应于一种为 0.000095 或小于 0.01% 的物理阻断比 $\Delta A/A_0$ 。

[0032] 理论上,增加光源的强度并不会对消光类型传感器的灵敏度产生影响或者是降低消光类型传感器的颗粒尺寸极限。对于给定的基线电压 V_0 ,脉冲高度 ΔV_{LE} 仅取决于由颗粒有效阻断的被照射探测器面积所占的比例 $\Delta A/A_0$ 。(将在后面讨论样本混浊的影响。)仅当较强的光源具有较弱的噪声时,传感器才能可靠地探测有效阻断区域的微小比例变化,

并且因此可以可靠探测较小的颗粒直径。但是,任何由增加了的 S/N 比所导致的性能提高仅代表了一种二阶效应,并且通常起不到显著作用。

[0033] 使用上述用于 LE 类型传感器的参数,我们可以得到对 OSZ 的有效体积 V_{OSZ} 的估计。

$$[0034] \quad V_{OSZ} = 2abw = 1.4 \times 10^7 \mu m^3 = 1.4 \times 10^{-5} cm^3 \quad (6)$$

[0035] OSZ 体积的倒数 $1/V_{OSZ}$ 等于 $1 cm^3$ 流体中 (即 1ml) 包含的“观察体积”的数量,即对于上述例子, $1/V_{OSZ} \approx 7 \times 10^4$ 。

[0036] 量 $1/V_{OSZ}$ 提供了对传感器的“重合极限”的一种度量,即在假设颗粒在整个流体内部均匀隔开并且每个颗粒在任意给定时间实际上占据一个观察体积的情况下,颗粒每次一个地通过 OSZ 时的颗粒浓度 (颗粒数 /ml)。当然,实际上颗粒是在整个流体中随机分布的。因此,该颗粒浓度相对于该“理想值”应该有显著的降低,即按照 10 : 1 或者更大的比例降低,从而确保在 OSZ 中每次仅出现一个颗粒。通常将传感器的实际重合极限定义为这样一种浓度,在该浓度下,仅有 1% 的颗粒数与同时通过 OSZ 的两个或多个颗粒相关,这可能会导致具有被放大的脉冲高度的单个被测脉冲。因此,传感器的有效重合极限典型地仅为 $1/V_{OSZ}$ 值的 10% (或者更少)。通过上述例子,这意味着重合浓度大约为 7000 个颗粒 /ml。实际上,给定设计的传感器的重合极限还是颗粒尺寸的函数。在颗粒非常精细,即颗粒的直径远远小于 OSZ 的有效厚度 $2w$ 的情况下,所指示的值是合适的。当颗粒的尺寸与参数 $2w$ 相当或者大于 $2w$ 时,该重合极限会显著降低。因此,实际上我们通常选择在颗粒浓度仅为上述给定值的 50% (或更少) 的情况下收集数据,从而消除错误的颗粒“计数”以及所得到的颗粒尺寸分布 (PSD) 的畸变。

[0037] 对于涉及较浓的悬浮和扩散的用途,非常希望增加传感器的重合浓度,以便需要对起始样本进行较小程度的稀释。第一,这种改进降低了稀释该样本所需要的清洁流体的体积,并且降低了稀释流体必须无颗粒污染物的程度。第二,并且是更重要的,如果有可能导致 PSD 的显著变化,例如由于颗粒聚集度的提高,那么对开始较浓的悬浮物的较大程度稀释就可能是不可行的。例子包含通过被称作化学机械平面化 (CMP) 的方法实现的用于处理半导体晶片的 pH 敏感氧化物“浆”。另外,对于多种用途而言,并不必要但有效的是增加 SPOS 方法的灵敏度,即降低最小可探测颗粒尺寸。重合浓度的提高和 LE 类型传感器的灵敏度的改善通常是相关的,并且可以通过多种方式来同时实现对这两个参数的改善。

[0038] 提高消光类型传感器的灵敏度的最显而易见的方法是降低照射的横截面积 A_0 。使用上面的例子,可以通过降低侧面通道尺寸 a , 或者降低入射光束厚度 $2w$, 或者降低这两者从而实现提高灵敏度。关于后一种工作的过程,仅可以将 OSZ 的有效厚度 $2w$ 降低到一个有限的程度。这种限制是由聚焦透镜的焦距、流动通道的深度以及起始光束的宽度之间的关系导致的。考虑到高斯光束光学元件的特性和由衍射导致的限制,实际上不可能使参数 $2w$ 降低到低于大约 $5 \mu m$ 以下。这种降低仅代表了对于在上面的例子中假设的 $35 \mu m$ 值的七倍的改善。而且,为了获得用于较小颗粒的较高尺寸分辨率,有效的是保持消光脉冲高度 ΔV_{LE} 对颗粒直径 d 的二次方依赖性,这种二次方依赖性仅对于 (远远) 小于 $2w$ 的 d 值才能获得。因此,为了实现用于多种重要用途的最佳性能,通常不希望使 OSZ 的厚度显著薄于大约 $10 \mu m$ 。

[0039] 相反,降低 OSZ 的侧面尺寸 a 则似乎更有吸引力,例如从 $400 \mu m$ (使用上面的例子) 降低到 $40 \mu m$ 。对于第一个近似 (忽略非线性信号 / 噪声效应), 该 A_0 的十倍降低会

导致有效横截面积 ΔA_{LE} 的类似的十倍降低,而该降低是实现一种给定的阻断区域的比例 $\Delta A_{LE}/A_0$ 所需的。

[0040] 这种流动通道 10 的宽度的十倍降低还会导致另一个显著优势。OSZ 的体积(等式 6)也会降低十倍,这导致重合浓度也降低十倍。因此,工作样本浓度可以提高十倍,这使得开始较浓的颗粒扩散所需的稀释程度降低十倍。当然,不是通过使上述通道宽度 a 降低十倍,而是通过使通道深度 b 降低十倍也可以实现相同的重合浓度的十倍增加。但是,将不会获得传感器灵敏度的提高。显然,尽管尺寸“ a ”和“ b ”就确定 V_{OSZ} 而言会起到相同的作用,并且因此对确定重合浓度会起到相同的作用,但是就影响传感器灵敏度而言,它们起到的作用是不同的。

[0041] 不幸的是,所提出的方法中存在一个严重的劣势。实际上不可能将尺寸 a (或 b)降低到这样一种程度(即显著小于 $100\ \mu\text{m}$),这是由于那些对于熟悉 SPOS 技术使用的任何人来说都是十分明显的原因。这样小的尺寸几乎会导致流动通道 10 的阻断,这是因为在稀释的流体中不可避免会存在污染物(“脏的”)颗粒和/或存在相对于样本来说较大的颗粒,例如尺寸过大的“异类”,和较小的“基本”颗粒的聚集。通常,LE 类型传感器中流动通道 10 的最小侧面尺寸(a 或者是 b)应该至少比我们所关注的样本中可能存在的最大颗粒大至少两倍,并且优选的是大三倍到四倍。否则,频繁发生流动通道的阻断将会不可避免,从而抵消了 SPOS 技术相对于可替换的被称作“电子区域”或“阻抗孔”传感(如“Coulter counter”,由 Beckman-Coulter Inc, Hialeah, FL 制造)的单颗粒传感技术的主要优势之一。

[0042] 原有的增加常规 SPOS 类型传感器灵敏度的方法之一是使用光散射(LS)的方法,而不是使用消光的方法。如果使用 LS 技术,那么当 OSZ 中没有颗粒时,背景,或者基线信号在理想情况下为零。(实际上,由于污染物和溶剂分子的散射,再加上光源、探测器和放大器的贡献,总是存在低电平噪声。)因此,对于一种给定的颗粒尺寸和组成,简单地通过提高光源的强度,就可以增加由通过 OSZ 的颗粒导致产生的被测信号脉冲的高度。通过这一简单快捷的手段就可以实现能够探测 $0.2\ \mu\text{m}$ 甚至更小的单个颗粒的传感器。

[0043] 幸运的是,通过采用一种完全不同的测量方法,与常规的 LE 或 LS 传感器相比,通过 SPOS 装置可以实现显著更高的灵敏度和重合浓度。得到的新装置和方法构成了本发明的基础。该新传感器的光学设计中的最显著的差别在于用于规定 OSZ 的光束。现在该光束包含探测流动通道 10 的窄区域的薄“笔状”光(与 y 轴对准),而不是类似于延伸到整个流动通道上的薄“带状”光(即在 x - y 平面中,图 1)。该光束典型地具有一种近似的高斯强度分布和圆横截面,实际上仅照射流过该传感器的颗粒的一小部分。得到的照射面积 A_0 远远小于常规传感器中的典型值,该常规传感器要求光束横跨流动通道 10 的整个宽度(x 轴)。根据定义,新光束的强度在侧面方向(x 轴)和颗粒流动方向(z 轴)上的强度都非常不均匀。

[0044] 因此,根据通过传感器的颗粒的轨迹,这些颗粒必然暴露于不同的最大光强度的不同水平(即在 $z = 0$ 处)。现在,由颗粒生成的信号脉冲高度不仅取决于它的尺寸,还取决于它通过流动通道 10 的路径。对于给定的颗粒尺寸,通过照射光束中央的颗粒将会产生具有最大高度的 LE(或 LS)脉冲,其中在光束中央处的强度最高,而那些通过具有较小强度区域的颗粒将会产生具有相应降低了的高度的脉冲。因此,使用强度分布不均匀(通常,但

不必是高斯)的光束会导致所谓的“轨迹模糊”问题。许多研究者已经尝试使用多种方法来解决这一问题。

[0045] 二十多年前, D. J. Holve 和 S. A. Self 在 *Applied Optics*, Vol. 18, No. 10, pp. 1632-1652 (1979) 中以及 D. J. Holve, 在 *J. Energy*, Vol. 4, No. 4, pp. 176-183 (1980) 中就讨论过在远程原处测量由不受限制的颗粒导致的散射光信号的情况下的轨迹模糊问题。使用了一种基于非负最小平方 (NNLS) 过程的数学展开卷积方法, 从而“反转”了由在自由空间内移动的燃烧颗粒产生的测量得到的光散射脉冲高度的集合。测量体积由具有高斯强度分布的带状(椭圆)光束、偏轴远距离针孔和探测器规定, 并且反转成像在光束上。Holve 等人明确地否定了公知的矩阵求逆方法, 这是因为他们认为当将该方法应用于他们的典型光散射数据时, 该方法是无效的。根据所提供的结果和解释, 很明显的是, 使用他们的光散射方法和 NNLS 展开卷积过程所能获得的 PSD 分辨率和准确度较差。多模分布要求彼此间距较大的颗粒尺寸种群, 从而使用所提到的装置和方法可以合理“干净”地解决这种多模分布。

[0046] 如在 Holve 的文章中公开的, 从中探测到散射光的测量区域源自照射光束的一部分横截面。如将会讨论的那样, 本发明还使用强度在空间上不均匀的光束, 优选的是这种光束具有圆形高斯分布。但是, 本发明充分地“包容”了这种不均匀性。也就是说, 测量区域包含光束的整个横截面而不只是包含具有最高(以及变化最小)强度的中央区域。使得将要对其进行计数和测量尺寸的颗粒均匀流过受限的、精确定义的空间(流动通道), 在该空间中所测量的任意给定尺寸的颗粒比例是固定的并且最终是已知的。从其中收集数据的区域类似也是固定并且是精确定义的, 而且该区域对颤动和光学失准有较大的抵抗能力。考虑到与本发明有关的物理设计的固有稳定性和不同特性, 如果与根据 Holve 方法获得的结果相比, 我们发现 PSD 结果不仅具有高的灵敏度, 而且具有优越的、无前例的颗粒尺寸分辨率, 那么我们不应该感到惊奇。另外, 我们还可以看到, Holve 的系统仅限于将光散射用作探测方法。相反, 本发明中提出的新装置和方法可以制成无论是基于光散射还是基于消光都同样有效的各种可能的传感器。

[0047] 部分因为使用 Holve 等人描述的装置和方法所获得的 PSD 结果的有限质量, 所以随后我们意识到需要开发出替换的方法, 这些方法使得可以有效地将高斯光束用于颗粒尺寸确定。当然, 如果合适, 最简单的解决方法是消除高斯光束其本身, 这是问题的根源。在美国专利 3851169 (1974) 中, Foxvag 提出了改变激光束的强度分布, 从而降低其高斯分布中固有的非均匀性。另外, G. Grehan 和 G. Gouesbet 在 *Appl. Optics*, Vol. 25, No. 19, pp. 3527-3537 (1986) 中描述了在聚焦之前的扩展光束中使用一种“反高斯”校正滤波器, 由此产生了“平顶”光束分布, 从而在扩展的区域上具有基本上均匀的强度。Fujimori 等人在美国专利 5316983 (1994) 中使用了一种“软”滤波器从而将高斯激光束转化为平坦的强度分布。

[0048] 其它的方法涉及在物理上对流动颗粒进行限制, 从而迫使它们通过激光束的中央部分, 在该中央部分的强度基本上是均匀的。J. Heyder 在 *Aerosol Science*, Vol. 2, p. 341 (1971) 中描述了一个例子。Bowen 等人在美国专利 4850707 (1989) 中也采用了一种方法, 使用了一种具有高斯强度分布的聚焦椭圆激光束, 并且该椭圆的主轴远远长于包含流动颗粒的液力聚焦“通道”的宽度。因此, 当所有颗粒通过光束时, 它们都暴露于基

本上相同的最大强度。

[0049] Hodkinson 在 Appl. Optics, Vol. 5, p. 893(1966) 中和 Gravitt 在美国专利 3835315(1974) 中较早地提出了一种用于调节高斯光束的方法, 该方法是确定在两个不同的散射角同时探测到的峰值散射强度信号的比。理想情况下, 该比值不取决于入射到颗粒上的强度, 并且根据 Mic 理论, 该比值仅与颗粒的尺寸有关。使用 Hirleman, Jr. 等人在美国专利 4188121(1980) 中提出的方法, 可以提高该方法的可靠性。测量多于两个散射角度的峰值散射强度并且计算所有散射强度值对的比值。将这些比值与校准曲线进行比较, 从而确定颗粒直径。

[0050] 提出了几种方法, 用于仅选择那些基本上通过高斯光束中央的颗粒。J. R. Fincke 等人在 J. Phys. E :Sci. Instrum, Vol. 21, pp. 367-370(1988) 中描述了一种类似于 Holve 等人使用的装置的方案, 该方案用于收集来自远距离原处测量体积的偏轴散射光。使用了一种分束器, 用于将散射光分布在两个探测器之间, 其中每个探测器都具有自己的针孔孔径。其中一个孔径小于测量体积中的光束腰部。该探测器用于“选择”适用于由第二探测器测量的颗粒, 其中该第二探测器具有相当大的孔径, 这可以确保这些颗粒基本上通过光束的中央, 并且因此可以用于计数和测量尺寸。尽管该方法具有简单性和明显的吸引力, 但是它最终还是被作者否定了, 这是因为很难保持各种光学元件之间准确的、稳定的对准。(如上所述, 这种否定并非与 Holve 等人获得的 PSD 结果的有限质量无关。)

[0051] 另一些方法提出使用两个具有不同直径的同心激光束, 这两个激光束聚焦到公共区域, 颗粒可以横向流动通过该区域, 并且外侧光束的直径显著大于内侧光束的直径。使用两个探测器测量由通过每个各自光束的颗粒散射的光信号的幅度, 并且这些光束具有不同的波长(色彩)或偏振态。只有那些通过较大测量光束的中央部分的颗粒根据较小的“确认”光束产生信号, 其中在较大测量光束的中央部分的强度基本上是均匀的。Goulas 等人在美国专利 4348111(1982) 和 Adrian 在美国专利 4387993(1983) 中描述了使用两种不同色彩的光束的方案。Bachalo 在美国专利 4854705(1989) 中描述了同心两光束方法的一种变形。使用了一种数学等式来处理两个独立测量得到的信号幅度以及已知的光束直径和强度, 从而确定颗粒轨迹, 并且最终确定颗粒尺寸。Knollenberg 在美国专利 4636075(1987) 中描述了这种方法的一种变形, 其中使用具有不同偏振态的两个聚焦、同心光束。使用一种拉长的、椭圆光束形状来降低获得可接受的颗粒尺寸分辨率和较高的浓度极限所需的光束直径比。

[0052] Flinsenberg 等人在美国专利 4444500(1984) 中描述了双光束方法的另一种变型。再一次使用了宽“测量”光束和较窄的“确认”光束, 但是在这种情况下, 后者位于前者之外, 这使得两个光束具有相同的色彩和偏振态。包含两个光束轴线的平面平行于颗粒的流动速度方向。使得通过每个光束分别探测到的两个散射信号完全重合, 就可以确保仅对这样一些颗粒进行计数和测量尺寸, 这些颗粒横穿该窄光束, 并且因此横穿了宽测量光束的中央区域。Hirleman, Jr. 等人还在美国专利 4251733(1981) 中描述了双光束方法的另一种变型。通过使用两个物理上分开的高斯光束, 可以根据两个散射光信号脉冲的相对幅度从而确定颗粒轨迹。这又使得可以计算在沿着颗粒轨迹的任何地方入射到颗粒的强度, 并且根据该强度可以确定颗粒尺寸。

[0053] 其它方法利用了激光多普勒测速中经常使用的干涉测量技术, 也就是使两个

相干激光光束相交从而在空间局部区域获得固定的边缘图案。如果轨迹上的差别可以得到解决或补偿,那么根据峰值散射强度可以确定颗粒尺寸。Erdmann 等人在美国专利 4179218(1979) 中提出了一种直接的方案,这种方案认识到了该颗粒可以产生与每个颗粒通过的边缘数量有关的一系列散射光脉冲。脉冲的数量确定了颗粒与由边缘图案确定的“探测”体积的中央有多接近,在该中央处边缘数量是最大的并且强度也是最大的,其对应于每个高斯光束的中央。C. F. Hess 在 Appl. Optics, Vol. 23, No. 23, pp. 4375-4382(1984) 中和在美国专利 4537507(1985) 中提出了一种可替换的方法。在一种实施例中,两个具有不同尺寸的相干光束相交,从而形成了一种边缘图案。该较小的光束“识别”较大光束的中央区域,并且在该中央区域处具有基本上均匀(最大)的强度。包含最大交流调制的信号指示出,颗粒已经通过了该边缘图案的中央,并且因此通过了较大光束的中央。在通过低通滤波作用去除了交流成分后,从“基础”(直流)信号中提取颗粒的尺寸。在第二实施例中,将具有同一种色彩的两个相交激光束用于在具有第二种色彩的较大第三光束的中央处确定边缘图案。第一探测器根据散射光信号的交流成分确定颗粒是否基本上通过了该边缘图案的中央。如果确定为是,记录通过第二探测器获得的由该大光束产生的散射光的脉冲高度。Bachalo 在美国专利 4329054(1982) 中提出了通过使用具有不同色彩或偏振态的附加的小“指针”光束从而区分边缘图案的中央部分,其中该边缘图案的中央部分对应于每个高斯光束的中央部分,而该附加的小“指针”光束响应于一个单独的探测器装置。

[0054] 最后,为了解决高斯光束/轨迹模糊问题,已经提出了多种其它技术。Bonin 等人在美国专利 5943130(1999) 中描述了一种用于使聚焦激光束快速扫描通过测量体积的方法,其中这种扫描会导致每当光束穿过颗粒时就会产生散射强度脉冲。考虑到高的扫描频率和速度以及较低的颗粒速度,当每个颗粒在测量体积中时,它都会被扫描几次。可以使得到的多个脉冲重合光束强度分布,并且利用一种使颗粒尺寸与散射光强度相关的校准响应函数可以将该高斯配合的最大值映射到颗粒直径。DeFreez 等人在美国专利 6111642(2000) 中提出了一种“流动孔径”技术。设计一种颗粒/流体传递喷嘴从而使出现的颗粒的侧面速度分布近似与激光束的高斯强度分布相匹配。散射信号的积分时间的增加近似地补偿了入射光水平的降低,其中散射信号的积分时间的增加是由较低的速度造成的,而入射光水平的降低是由颗粒轨迹与光轴之间距离增加导致的。因此,在理想情况下,净积分散射信号独立于颗粒轨迹。Girvin 等人在美国专利 6016194(2000) 中提出了一种改进方法,该方法使用一种线性探测器阵列从而单独地探测基本上与每种颗粒轨迹相关的散射光信号。可以调整每个探测器元件的增益从而补偿侧面方向上系统的净信号响应中剩余的变化,其中该变化是由喷嘴速度和激光束强度分布之间的不完全匹配、不同探测器效率之间的差别以及其它影响因素导致的。

[0055] 发明概述

[0056] 本发明的目的是提供一种 SPOS 装置和方法,该装置和方法可以提供显著较高的灵敏度并且能够有效地响应于流体悬浮物,其中该流体悬浮物相对较浓,并且其颗粒浓度高于本领域中常见的颗粒浓度,并且因此不需将流体悬浮物稀释到现有技术 SPOS 装置所要求的稀释程度。

[0057] 根据本发明的 SPOS 装置使得悬浮物流过物理上精确定义的测量流动通道。引导较窄的光束通过该测量流动通道从而照射测量流动通道内的光学传感区域,该光束和光学

传感区域的尺寸与测量流动通道的尺寸相关,从而该 SPOS 装置响应于流过测量流动通道的颗粒总数的一小部分,这导致该 SPOS 装置会有效地响应于较浓的流体悬浮物。光束非均匀地照射光学传感区域,该光束具有中央最大强度部分并且在离开该最大强度部分的不同位置处具有连续降低的强度,从而一些颗粒具有通过该最大强度部分的轨迹,而另一些颗粒具有通过较低强度部分的轨迹,并且还有一些颗粒具有位于该区域之外的轨迹。

[0058] 测量流动通道的厚度尺寸方向与光束的轴线方向相同,宽度或侧面尺寸方向垂直于光束,并且流动方向垂直于该厚度和宽度尺寸方向。在宽度方向上,光束远远窄于测量流动通道,而且该光束受到聚焦后其宽度场远远大于厚度尺寸,从而光束具有在厚度尺寸上基本保持不变的有效宽度。选择被定义为在光束中两个相对位置之间的宽度的有效宽度,其中在该两个位置处所述激光强度下降到所述最大强度的给定的比例,例如 $1/e^2$,从而在要被测量尺寸的颗粒范围内可以有效地测量颗粒的尺寸,并且典型的情况是该有效宽度基本上为要被测量尺寸的最大颗粒尺寸的 $1/2$ 。光束的强度在侧面方向上和颗粒流动的方向上是十分不均匀的,并且可能具有高斯强度分布。光束的截面可能是圆形的或是椭圆形的,并且与在平行于颗粒流动的方向上相比,光束在垂直于颗粒流动方向上的截面更宽。

[0059] 本发明的 SPOS 装置使用了一种光探测器并且可以按照消光或光散射原理进行工作。实际上,一些传感器实施例同时包含这两种探测技术。该光探测器探测来自该区域的光,从而提供脉冲高度信号,其中每个脉冲高度信号响应于流过所述区域的颗粒,并且该脉冲高度信号是被测颗粒的尺寸和轨迹的函数,以及当给定尺寸的颗粒流过该区域的最大强度部分时该颗粒提供最大脉冲高度信号,而流过该区域的较小强度位置时该颗粒提供较小的脉冲高度信号。这些脉冲高度信号共同形成一种脉冲高度分布 (PHD)。统计数量很大的给定尺寸的颗粒流过该区域的较小强度位置。

[0060] 使用不均匀光束会导致“轨迹模糊”问题。为此,该装置和方法包含用于对脉冲高度分布进行数学上展开卷积运算的装置,从而提供悬浮物中颗粒的颗粒尺寸分布。根据本发明,该展开卷积方法相对于现有技术中描述的展开卷积有了改进。本发明提出使用两种展开卷积技术:一种技术使用矩阵求逆,另一种使用连续减法。

[0061] 这两种技术都使用矩阵。根据本发明,建立矩阵的过程得到了简化。该矩阵具有列基本矢量,每个基本矢量对应于特定的颗粒尺寸。在现有技术中,已经有人提出根据实际经验使所有列基本矢量的值基于具有均匀、已知尺寸的颗粒的测量结果。因为该矩阵可能具有大量的列(在本申请中提出了 32、64 和 128),所以根据本发明,仅这些列基本矢量中的一个或几个需要按照经验以已知尺寸颗粒的测量结果为基础,或者可替换的,这些列基本矢量都不需要按照经验以已知尺寸颗粒的测量结果为基础。通过根据经验得到的列基本矢量进行内插或者外插从而计算其余的列基本矢量。本发明还提出,还可以根据理论模型计算这些列基本矢量中的一些或者全部。如果通过这种方法计算出了它们中的一些,那么可以通过根据由现有数据计算得到的列基本矢量进行内插和/或外插,计算其余列基本矢量。

[0062] 提出通过矩阵求逆从而修改展开卷积的方法。每个列基本矢量对于一行在一个位置处具有最大计数脉冲高度,该最大计数脉冲高度与对应于和该列基本矢量相关的已知尺寸颗粒的脉冲高度通道相关,并且连续列的最大计数脉冲高度值设置在矩阵的对角线上。通过将该对角线之下的所有项都设置为零从而对该矩阵进行修改,也就是说将一个列中对

应于大于该最大计数脉冲高度值的脉冲高度值的所有项都设置为零。这改善了结果的准确度、信噪比以及可复现性。

[0063] 所提出的通过连续减法进行展开卷积的方法涉及建立具有多个列的矩阵,每列都包含基本矢量,而该基本矢量包含已知尺寸颗粒的脉冲高度分布,每个连续列都包含连续变大尺寸颗粒的基本矢量,以及包含最大尺寸颗粒的脉冲高度分布的最大尺寸基本矢量。该连续减法算法包含以下步骤:

[0064] 以行中最大数量值对应于最大脉冲高度的基本矢量开始;

[0065] 用一个系数按比例缩放列基本矢量,其中该系数对应于 PHD 中与该列序号匹配的行的值;从该 PHD 中减去所述按比例缩放的基本矢量,从而形成展开卷积的 PHD (dPHD) 的一个元素,该减法的结果是得到了具有较小颗粒总数的中间 PHD 矢量;

[0066] 使用剩余的基本矢量重复该过程,直到整个 PHD 基本上被消耗完并且形成了展开卷积的 dPHD 的所有元素。

[0067] 使用脉冲高度和直径之间关系的校准曲线,可以将 dPHD 中每个展开卷积后的脉冲高度值转换为唯一的颗粒直径,其中该直径与该脉冲高度值有关,从而产生原始的颗粒尺寸分布 PSD。通过对该原始 PSD 进行归一化可以将其转化为最终 PSD,其中该归一化是通过使该原始 PSD 乘以值 $1/\phi_d$ 实现的,其中 ϕ_d 是由所述装置实际探测到的颗粒对于每种尺寸 d 的颗粒所占的比例。

[0068] 当流体悬浮物比较浓时,消光类型的传感器可能会受到混浊的影响。可以通过三种方法之一提供对混浊的补偿。第一,感应混浊和非混浊液体的基线电压电平并且计算比值,并且使用该比值增加消光信号的幅度,从而使得混浊液体的基线电压电平近似增加到非混浊液体的基线电压电平。第二,根据计算得到的比值校正由混浊液体产生的脉冲高度信号。第三,根据该比值对起始光束的强度进行调整从而补偿混浊。

[0069] 本发明的一种实施例包含一种消光 (LE) 探测器和一种光散射 (LS) 探测器。来自该区域的散射光通过掩模投射到该 (LS) 探测器上,其中该掩模用于选择与光束的夹角在第一和第二角度之间的散射光。将透射通过该区域的光引导到该 LE 探测器。另一种实施例使用光纤,将光从光源传输到光学传感区域并使所述光投射通过该区域,以及使用光纤,将光从该区域传输到 LE 探测器。来自该区域的散射光通过掩模,该掩模用于选择与光束的夹角在第一和第二角度之间的散射光,并且由该 LS 探测器收集该散射光。还有一种实施例包含光源和分束器,该分束器用于提供被引导通过位于测量流动通道内的一对光学传感区域的两束光,每个光束都具有与不同范围的颗粒尺寸相兼容的有效宽度。另一种实施例包含光散射探测器和用于使一部分光通过位于可旋转轮上的多个掩模之一的装置,还包含用于通过使该轮旋转 to 需要的方向来选择这些掩模之一的装置,其中每个掩模规定了不同的角度,在该角度之间对光进行收集和散射。最后一种实施例使较宽的准直光束投射通过光学传感区域。该光束具有中央轴线,以及仅捕获那些紧密围绕该光束中央轴线的光射线的接收孔径。这使得光束的有效宽度在垂直于光束轴线的方向上基本上降低到所要测量尺寸的最大颗粒尺寸的 $1/2$ 。光纤将光射线耦合到探测器中。

[0070] 附图简述

[0071] 参考附图,可以更充分地理解本发明的这些和其它目的、特征以及优势,其中

[0072] 图 1 是传统的常规现有技术 LE 传感器中典型使用的光学方案的简化框图;

- [0073] 图 2 是由图 1 的常规 LE 传感器产生的取决于时间的输出信号电压的简化表示；
- [0074] 图 3 是本发明的 LE 类型传感器的简化框图，下文中将其称作“新 LE 类型传感器”，其使用较窄的聚焦光束照射在较薄的流动通道中流动的颗粒；
- [0075] 图 4 显示了一种通过图 3 的 LE 类型传感器获得的典型脉冲高度分布 (PHD)，其使用了直径为 $1.588\text{ }\mu\text{m}$ 的均匀聚苯乙烯乳胶（标准）颗粒；
- [0076] 图 5 是显示了对于具有非均匀、高斯强度分布的入射光束而言，颗粒轨迹和得到的 PHD 之间关系的示意图；
- [0077] 图 6 比较了使用该新 LE 类型传感器获得的直径为 $1.588\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.013\text{ }\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯乳胶（标准）颗粒的 PHD；
- [0078] 图 7 比较了使用该新 LE 类型传感器获得的用于八种不同尺寸的均匀聚苯乙烯乳胶（标准）颗粒的 PHD，其中这八种尺寸为： $0.806\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.993\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.361\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.588\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.013\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5.03\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10.15\text{ }\mu\text{m}$ 以及 $20.0\text{ }\mu\text{m}$ ；
- [0079] 图 8A 显示了用于图 7 中显示的八种聚苯乙烯乳胶（标准）颗粒悬浮物的最大测量得到的脉冲高度与颗粒直径之间的关系；
- [0080] 图 8B 对用于最大脉冲高度（被表示为 100% 消光的比例）与颗粒直径之间关系的理论预测（理想的消光，高斯光束）和试验结果（图 8A，实线圈）进行了比较，其中理论曲线所显示的光束宽度 ($1/e^2$) 为 $10\text{ }\mu\text{m}$ （开方块）、 $11\text{ }\mu\text{m}$ （开圆圈）以及 $12\text{ }\mu\text{m}$ （开三角）；
- [0081] 图 9 显示了作为颗粒直径 d 的函数的被测传感器效率在 0.806 到 $20.0\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒直径范围内对颗粒直径的依赖性；
- [0082] 图 10 显示了对于不同光束宽度的最大脉冲高度（表示为 100% 消光比）和颗粒直径之间关系的理论预测（理想的消光，高斯光束），其中这些光束宽度为： $6\text{ }\mu\text{m}$ （开圆圈）、 $9\text{ }\mu\text{m}$ （开方块）、 $12\text{ }\mu\text{m}$ （开三角）、 $15\text{ }\mu\text{m}$ （闭圆圈）、 $18\text{ }\mu\text{m}$ （闭方块）以及 $21\text{ }\mu\text{m}$ （闭三角）；
- [0083] 图 11 是本发明的 LS 类型传感器的简化框图，下文中将该 LS 类型传感器称作“新 LS 类型传感器”，其使用较窄的、聚焦光束照射在较薄的流动通道中流动的颗粒；
- [0084] 图 12 是由新 LS 类型传感器产生的取决于时间的输出信号电压的简化表示；
- [0085] 图 13A 和 13B 包含能够用于对测量得到的 PHD 数据展开卷积的两种数学算法（分别是矩阵求逆和连续减法）的流程图；
- [0086] 图 14 是总结新 LE 类型传感器和 LS 类型传感器的工作和结构的流程图，包含获得 PSD 所需的测量和计算步骤；
- [0087] 图 15A 显示了使用新 LE 类型传感器通过样本“A”（乳胶的三模式， $0.993\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.361\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.588\text{ }\mu\text{m}$ ）获得的被测 PHD（64 通道分辨率）；
- [0088] 图 15B 显示了使用新 LE 类型传感器通过样本“B”（与样本“A”相同，但仅有 50% 的 $0.993\text{ }\mu\text{m}$ 乳胶）获得的被测 PHD；
- [0089] 图 15C 显示了使用新 LE 类型传感器通过样本“C”（与样本“A”相同，但仅有 25% 的 $0.993\text{ }\mu\text{m}$ 乳胶）获得的被测 PHD；
- [0090] 图 16A 和 16B 显示了一种用于对被测 PHD 展开卷积的代表性 32×32 矩阵，其中该矩阵是通过位于从 0.722 到 $20.0\text{ }\mu\text{m}$ 的尺寸范围内的九个测得的基本矢量得到的；
- [0091] 图 17 显示了通过三模式样本“A”、“B”和“C”获得的被测 PHD 矢量 (32×1)（与图 15A、15B、15C 中相同，但具有 32 通道分辨率），以及使用矩阵求逆和连续减法通过展开卷积

获得的 dPHD 矢量,其中该展开卷积使用了图 16A 和 16B 中的三种测得的 PHD 矢量的矩阵;

[0092] 图 18A 显示了使用矩阵求逆算法,通过用于样本“A”(乳胶三模式,图 15A) 的被测 PHD 从而计算获得的 dPHD(64 通道);

[0093] 图 18B 显示了使用矩阵求逆算法,通过用于样本“B”(乳胶三模式,图 15B) 的被测 PHD 从而计算获得的 dPHD;

[0094] 图 18C 显示了使用矩阵求逆算法,通过用于样本“C”(乳胶三模式,图 15C) 的被测 PHD 从而计算获得的 dPHD;

[0095] 图 19A 显示了使用连续减法,通过用于样本“A”(乳胶三模式,图 15A) 的被测 PHD 从而计算获得的 dPHD(64 通道);

[0096] 图 19B 显示了使用连续减法,通过用于样本“B”(乳胶三模式,图 15B) 的被测 PHD 从而计算获得的 dPHD;

[0097] 图 19C 显示了使用连续减法,通过用于样本“C”(乳胶三模式,图 15C) 的被测 PHD 从而计算获得的 dPHD;

[0098] 图 20A 显示了使用校准曲线(图 8A)和传感器效率(图 9),通过算得的 dPHD(图 19A) 获得的用于样本“A”的 PSD(浓度);

[0099] 图 20B 显示了使用校准曲线(图 8A)和传感器效率(图 9),通过算得的 dPHD(图 19B) 获得的用于样本“B”的 PSD(浓度);

[0100] 图 20C 显示了使用校准曲线(图 8A)和传感器效率(图 9),通过算得的 dPHD(图 19C) 获得的用于样本“C”的 PSD(浓度);

[0101] 图 21A 显示了为脂肪乳胶(体积占 0.05%) 样本测量得到的 PHD(32 通道);

[0102] 图 21B 显示了为与图 21A 中使用的相同样本测量得到的 PHD,但是添加了具有 $0.993\text{ }\mu\text{m}$ 乳胶颗粒 ($3.25\times 10^5/\text{ml}$) 的低浓度“突出”;

[0103] 图 21C 显示了为与图 21B 中使用的相同样本测量得到的 PHD,但是仅加入了 25% 具有 $0.993\text{ }\mu\text{m}$ 乳胶颗粒 ($8.13\times 10^4/\text{ml}$) 的低浓度“突出”;

[0104] 图 22A 显示了通过对图 21A 中的 PHD 展开卷积(连续减法)从而计算获得的 dPHD(有效脉冲高度区域);

[0105] 图 22B 显示了通过对图 21B 中的 PHD 展开卷积(连续减法)从而计算获得的 dPHD(有效脉冲高度区域);

[0106] 图 22C 显示了通过对图 21C 中的 PHD 展开卷积(连续减法)从而计算获得的 dPHD(有效脉冲高度区域);

[0107] 图 23A 显示了使用校准曲线(图 8A)和传感器效率(图 9),根据算得的 dPHD(图 22A) 获得的 PSD(浓度,扩展尺寸);

[0108] 图 23B 显示了使用校准曲线(图 8A)和传感器效率(图 9),根据算得的 dPHD(图 22B) 获得的 PSD(浓度,扩展尺寸);

[0109] 图 23C 显示了使用校准曲线(图 8A)和传感器效率(图 9),根据算得的 dPHD(图 22C) 获得的 PSD(浓度,扩展尺寸);

[0110] 图 24A 显示了根据包含脂肪乳胶(体积占 0.5%) 和乳胶颗粒 (2.013 和 $10.15\text{ }\mu\text{m}$) 的“突出”的混浊样本测量得到的 PHD(64 通道),而并没有对样本混浊对信号电压的影响进行校正;

- [0111] 图 24B 显示了根据图 24A 的 PHD 计算得到的 dPHD(连续减法)；
- [0112] 图 24C 显示了使用校准曲线(图 8A),根据图 24B 的 dPHD 获得的“原始”PSD(没有对传感器效率进行校正)；
- [0113] 图 25A 显示了根据与 24A 中相同的样本获得的被测 PHD(64 通道),但是将基线信号电平提高到了没有混浊情况下的正常水平；
- [0114] 图 25B 显示了根据图 25A 的 PHD 计算获得的 dPHD(连续减法)；
- [0115] 图 25C 显示了使用校准曲线(图 8A),根据图 25B 中计算得到的 dPHD 获得的“原始”PSD(没有对传感器效率进行校正)；
- [0116] 图 26A、26B 和 26C 是显示三种技术的框图,这三种技术可以用于补偿样本混浊对新 LE 类型传感器产生的信号的影响；
- [0117] 图 27A 显示了为用于 CMP 处理的含水硅浆(充分浓的)测量得到的 PHD(32 通道)；
- [0118] 图 27B 显示了根据图 27A 中的 PHD 计算得到的 dPHD(连续减法,有效脉冲高度区域,扩展尺寸)；
- [0119] 图 27C 显示了使用校准曲线(图 8A)和传感器效率(图 9),根据图 27B 中算得的 dPHD 获得的 PSD(浓度,扩展尺寸)；
- [0120] 图 28A 显示了为与图 27A 中所使用的相同硅浆样本获得的被测 PHD(32 通道),但是其中添加了 $0.993\ \mu\text{m}$ 乳胶颗粒($1.30 \times 10^5/\text{ml}$)的低浓度“突出”；
- [0121] 图 28B 显示了根据图 28A 中的 PHD 计算得到的 dPHD(连续减法,扩展尺寸)；
- [0122] 图 28C 显示了使用校准曲线(图 8A)和传感器效率(图 9),根据图 28B 中计算得到的 dPHD 获得的 PSD(浓度,扩展的比例)；
- [0123] 图 29 是显示本发明第一优选实施例的框图；
- [0124] 图 30 是显示本发明第二实施例的框图；
- [0125] 图 31 是显示本发明第三实施例的框图；
- [0126] 图 32 是显示本发明第四实施例的框图；
- [0127] 图 33 是显示本发明第五实施例的框图；以及
- [0128] 图 34 是显示本发明第六实施例的框图。

[0129] 发明详述

[0130] 本发明的装置和方法是由传感器根据消光或光散射实现的,该传感器用于对流体悬浮物中的颗粒进行计数和测量尺寸。使得一定数量的悬浮物以受控流速在受限的、精确定义的测量流动通道中流过该新传感器。与常规现有技术中同类传感器一样,该新传感器响应于单个颗粒通过“光学传感区域”,或称为 OSZ。因此,与现有的传感器一样,该新传感器也可以归类为单颗粒光学传感(SPOS)装置。但是,如通过下面的描述可以知道的那样,该新传感器的特征与使用常规 SPOS 方法获得的那些特征有显著的区别。为了简化起见,下面的多数描述将涉及一种新的消光或者 LE 类型传感器。但是,如将在下面讨论的那样,通过简单的变化,可以同样有效地将该新装置和方法用于实现光散射或者 LS 类型 SPOS 装置。每种新传感器,无论是 LE 类型还是 LS 类型,都被设计成在显著高于常规 SPOS 装置的浓度下有效工作,并且还设计用于提供显著较高的灵敏度。

[0131] 实现 SPOS 传感器重合浓度的显著增加要求 OSZ 体积 V_{OSZ} 类似地大幅降低。如果将降低流动通道 10 的深度 b 用作降低 V_{OSZ} 的手段,那么为了避免尺寸过大的颗粒导致的流动

通道 10 的频繁阻塞,对该深度 b 所能降低到的程度是有实际限制的。因此,要求显著降低照射流动通道中的流体颗粒混合物和投射到探测器 D_{LS} 上的入射光束的横截面积 A_0 。当然,降低受照射面积 A_0 会产生另一个重要的优势,那就是最小可探测颗粒直径的显著降低。参数 A_0 越小,通过 OSZ 中央的给定尺寸的颗粒就会立刻“阻断”(即折射、反射、散射和吸收)入射到流动通道和探测器上的全部光的越大比例。

[0132] 该新 SP0S 方法的主要限定特征并不简单只是受照射区域的尺寸 A_0 的显著下降,从而导致 V_{OSZ} 的显著降低和灵敏度的提高。而是,该方法考虑到了由此规定的照射光束以及得到的 OSZ 的特性。如图 3 中所示,在本光学设计中含有两种固有的重要、新颖的特征。第一,单独由入射光束(连同测量流动通道 35 的前窗 36 和后窗 37)规定了 OSZ。沿着 x 轴限制流体颗粒悬浮物的侧壁 38 和 39 不再对规定 OSZ 起作用(图 3)。第二,不可以再用单个值描述与 OSZ 有关的物理体积;而是,它现在取决于被测颗粒的尺寸。

[0133] 如在图 3 中示意的那样,该新方法利用激光源 40 发出的光束 41 照射测量流动通道 35,其中透镜 42 对该光束进行聚焦从而形成具有较窄横截面的光束 44,即小于常规 LE 类型传感器中流动通道的典型受照射宽度 a (图 1)。因此,由“笔状”光束 46 以及流动通道的前窗和后窗近似规定了所得到的 OSZ,其中该前窗和后窗之间的距离为尺寸 b 。图 3 中的示意图提供了由聚焦光束 46 规定的 OSZ 的简化图形。第一,如图 3 中表示的近似圆柱形区域所暗示的那样,包含 OSZ 的照射区域并没有界限分明地规定出来。而是,如将在下面讨论的那样,OSZ 的外边界是“模糊的”,其延伸到所示的区域之外。第二,假设已经使通过流动通道 10 的光束聚焦,那么该光束的宽度典型是不均匀的。而是,在聚焦光束情况下,该光束的宽度在测量通道 35 的深度上是变化的。光束腰在通道的深度上的变化程度取决于该聚焦光束场的深度,其中将该聚焦光束场的深度定义为光束腰在该处增长到其最小值的 2-1 倍的点之间的距离(y 轴)。理想情况下,该场的深度远远大于通道厚度 b ,这导致在整个流动通道上的相对均匀的光束宽度。

[0134] 因此,除了照射光的显著不同的强度分布之外,该新传感器的物理设计还具有根本性的改变。在常规设计中,流动通道 10 的物理宽度和 OSZ 的有效宽度(x 轴)是相同的,并且等于尺寸“ a ”。但是,该新传感器中流动通道的物理宽度(也定义为“ a ”)典型地远远大于入射光束的标称宽度 $2w$,并且因此对 OSZ 没有显著影响。因此,对于使确定了流动通道(和 OSZ)深度 b 的前窗 36 和后窗 37 分开的隔离器(或者小板子)38 和 39 来说,不再要求它们是不透明的或者就光学度量标准而言是平滑的,从而避免由边缘导致的散射。这是一种显著的优势,使得可以更容易地和更廉价地制造流动通道。

[0135] 通常情况下,使用一种“圆”光束是方便而有效的,其中入射强度理想地仅取决于距离光轴(与 y 轴重合,并且 $x = z = 0$,如图 3 中所示)的径向距离 r 。典型的是,使用一种“高斯”光束,即一种具有高斯强度分布的光束,并且在 $y = b/2$ 处,用下式在焦平面(光束的腰最小)中对该高斯强度分布进行描述

$$[0136] \quad I(r) = I_0 \exp(-2r^2/w^2) \quad (7)$$

[0137] 其中对于假设的圆光束, $r^2 = x^2 + z^2$ 。

[0138] 量 $2w$ 是包含多数入射光通量的虚构圆柱的直径。其表面上的强度等于 $1/e^2$,其中 e 是自然对数的基数,或者等于光束中央处($r = 0$)强度值 I_0 的 0.135 倍。基本上 100% 的包含在入射光束中的光通量(除了光学界面处的反射和光束中的颗粒的消光作用导致

的损失之外)横穿流动通道中的流体颗粒混合物并且投射到远处的探测器 D_{LE} 上。这使得探测器 D_{LE} 所提供的消光信号 V_{LE} 的形式是一种向下延伸的脉冲,其中该脉冲类似于图 2 中在 I/V 转换器放大器 34 的输出处的脉冲 30。

[0139] 这些特性与常规 LE 类型传感器中使用的照射方案有显著的不同。在常规方法中,起始光束沿着流动通道的侧(x)轴极大地扩展,从而其宽度($1/e^2$ 强度)远远大于前窗(和 OSZ)的宽度 a 。因此,入射光强沿着 x 轴(即对于 $y = z = 0$)有较小变化,其中光束沿着 x 轴进入流动通道,这是因为光在沿 x 轴扩展的高斯光束的顶部处被捕获。因此,通过 OSZ 的颗粒将会经历基本上相同的最大光束强度(即在 $z = 0$ 处),而无论该颗粒的轨迹如何。理想情况下,规定轨迹的 x 和 y 的特定值对得到的传感器响应,即脉冲高度没有任何影响。

[0140] 常规光学设计和用于该新传感器中的方案之间的差别不会比此更大了。在该新传感器中,通过精心的设计,可以使得入射强度按照流动通道宽度上位置的函数具有很大的变化。在其中入射光束具有对称(圆形)高斯分布的情况下,由等式(7)给出了强度的变化,其中 $r = x$ 。在光束的中央处($x = z = 0$)获得了最大强度 I_0 ,其中为了简化, $x = 0$ 代表通道的中间点(并且侧壁在 $x = \pm a/2$ 处)。我们可以注意到, $x = \pm w, z = 0$ 处的强度基本上降低到了 $0.135I_0$ 。随着离开光束的距离的增加,强度下降很快,例如在 $x = \pm 2w, z = 0$ 处下降到 $0.018I_0$,以及在 $x = \pm 4w, z = 0$ 处下降到 $0.00033I_0$ 。

[0141] 由颗粒通过该新 OSZ 从而产生的消光信号是具有深远意义的。第一,如对于常规 LE 类型传感器的情况一样,由颗粒通过 OSZ 产生的脉冲高度 ΔV_{LE} 通常是随着颗粒尺寸的增加而增加的,其中所有其它因素保持作用相等。通常,颗粒越大,就会从入射光束中“去除”越大比例的光,从而入射光束不能到达探测器 D_{LE} 。但是,现在通过使用该新传感器,从光束“去除”的光所占的比例取决于颗粒的准确轨迹,更加具体地说,就是颗粒距离光束中央($x = 0$)的最小距离 $|x|$ 。(如上面讨论的那样,如果场具有适当大的深度,并且假设光束宽度沿着流动通道的深度方向上近似不变,那么对于第一近似,传感器的响应将不会随轨迹在 y 轴上的值而发生显著变化。)

[0142] 对于具有给定尺寸和成分的颗粒而言(为了简化,下文中假设颗粒是球形的并且是均质的),当颗粒通过光束中央($x = 0$)时获得了最大“信号”或者脉冲高度。具有给定的有效横截面积 ΔA 的颗粒在光束中央处阻断最大量的入射光,其中在该处的强度是最大的。沿着不同轨迹通过流动通道的相同尺寸颗粒所受到的最大水平照射是变化的,但是变小的,这些颗粒与光轴之间的最小距离 $|x|$ 不同。与光轴的距离越远,入射到颗粒上的积分强度也就越低,因此,从光束中去除的光通量也就越少,并且得到的脉冲高度也就越小。因此,该响应包含一种具有脉冲高度的连续“频谱”,其范围从对于通过光束中央的轨迹为脉冲高度最大值,到对于远离入射光束($|x| \gg w$)的轨迹的脉冲高度基本上为零(即不能区分该脉冲高度和噪声波动)。最大脉冲高度取决于光束腰 $2w$ 和颗粒尺寸,以及在某些情况下取决于颗粒和周围液体的折射率。(这取决于就对于总消光信号的贡献而言,光散射与折射和反射相比占据了多大的比例)。一种关键的假设是,颗粒轨迹是在流动通道中是随机分布的(即以相同的频率发生)。考虑到所使用的流动通道的典型尺寸和较低的流动速度,这种假设通常是有效的。还假设了通过传感器的颗粒的数量足够大,从而对于具有任意给定的 x 轴值(即在任意(窄)的 x 值范围上)的轨迹来说,可以忽略具有该轨迹的颗粒数量的统计波动。

[0143] 因此,对于该新传感器来说,颗粒尺寸和脉冲高度之间的关系与通过常规设计的传感器获得的关系有很大区别。在常规设计传感器中,给定尺寸(和成分)的颗粒导致具有几乎一致高度的脉冲,而无论它们的轨迹如何。这一特征对于常规 SP0S 方法而言最重要的传感器设计目标。例如,当测量具有基本上一致尺寸的聚苯乙烯乳胶“标准”颗粒时,脉冲高度典型地会出现小变化,而这种变化是由对于给定的 z 轴值,在 OSZ 内的入射光束强度沿着 x 轴和 y 轴发生变化导致的。这些变化最终确定了传感器的分辨率。因此,得到的 PSD 宽度主要取决于 OSZ 上的残余非均匀照射,而不是颗粒直径的实际范围。

[0144] 相比而言,对于该新传感器设计而言,颗粒尺寸分辨率具有明显的恶化。当单个颗粒通过传感器时,它导致了一种消光脉冲,该消光脉冲的高度 ΔV_{LE} 可以在给定的最大值和基本上为零的范围内变化。反过来,如果是单个的被测脉冲,那么不可能仅根据该脉冲高度的信息就确定产生该脉冲的颗粒尺寸。例如,较小但是直接通过光轴的颗粒产生对于该种尺寸(和成分)颗粒来说是有可能得到的最大脉冲高度。可替换的,根据颗粒尺寸和轨迹,大的多但是相对远离光轴通过的颗粒产生实际上相同的脉冲高度。尽管与小颗粒相比,大颗粒可以截获更大的入射照射面积,但是入射到大颗粒上的平均强度小于入射到小颗粒上的强度。因此,得到的脉冲高度可能与小颗粒产生的脉冲高度相同。显然,有无数个颗粒直径和最小光束轨迹距离的对 $\{d, |x|\}$ 可以产生相同的脉冲高度。颗粒直径 d 和得到的脉冲高度 ΔV_{LE} 实际上是互相“分离”。这就是在上述的相关技术描述中提到的“轨迹模糊”问题,二十多年来该问题一直激励着研究者寻找一种基于光散射的新方案,以使用高斯光束确定颗粒尺寸。

[0145] 上述的轨迹模糊问题的影响好像使得新的窄光束传感器相对而言不能用于需要的颗粒测量尺寸用途。但是,令人高兴的是,这样一种悲观的估计是没有道理的。仅当人们坚持将该新方法来获得单个颗粒或者相对较少数量的颗粒的尺寸时,该新 LE 类型传感器的分辨率才是差的。如将在后面说明的那样,可以通过对脉冲高度数据进行适当的数学展开卷积,将与该新传感器相关的表面上较差的尺寸分辨率恢复到一种非常可以接受的水平。由于下面这个原因,可以实现有效传感器分辨率的大大提高:该新传感器是用于面对包含在感兴趣的样本中具有每个相关直径或者直径范围的统计数量很大的颗粒。正是这种条件使得该新传感方法对于颗粒尺寸分析非常有效,并且这种条件与“污染物”用途中的情况形成了鲜明的对比。在那种情况下,使传感器暴露于数量较少的任意给定尺寸的颗粒,在这种情况下通常不能获得统计上大量的颗粒。

[0146] 该新聚焦光束传感器的“原始”响应,类似于其常规 SP0S 传感器,包含脉冲高度分布 (PHD),即颗粒“计数”与脉冲高度 ΔV_{LE} 之间关系的直方图。脉冲高度比例图典型地分为较大数量(如 32、64 或 128)的“通道”或“箱”,其中每个通道包含脉冲高度电压的适当窄的范围,从而规定了 PHD 的电压分辨率。通常方便的是,建立在对数电压比例图上均匀间隔的通道。对新脉冲的测量导致存储在直方图中的适当脉冲高度通道中的颗粒数的值加一。理想情况下,用足够长的时间从感兴趣的颗粒悬浮物中收集数据,从而得到的 PHD 从数量统计上看是可靠的,并且因此是平滑的和可复现的。这意味着对于所有 I ,例如在有 128 个通道的情况下为 $1 \leq I \leq 128$,在第 I 个脉冲高度通道中收集的颗粒数的值 N_I 从统计来看是大量的,相对于由统计“噪声”导致的波动具有压倒性的优势。假设是 Poisson 统计,那么这意味着对于所有 I , $N_I \gg N_{I2}^{-2}$ 。

[0147] 图 4 中显示了由该新 LE 类型传感器产生的 PHD 的一种代表性例子。该样本包含直径为 $1.588 \mu\text{m}$ 的均匀聚苯乙烯乳胶颗粒 (Duke, Scientific, Palo, Alto, CA) 的 10000 : 1 (按照体积) 原料悬浮物水稀释液。在 48 秒的数据收集时间内, 由总共 83702 个颗粒产生了该 PHD。所使用的流动速度为 $20\text{ml}/\text{min}$, 这使得所分析的总样本体积为 16ml , 平均脉冲率为 $1744/\text{sec}$ 。按照重量, 该原料悬浮物的浓度为 1% 。如果颗粒体积 V_p 等于 $2.10 \times 10^{-12}\text{cm}^3$, 以及密度 ρ 等于 1.05 , 那么这等效于数量浓度为 $4.54 \times 10^9/\text{ml}$ 。稀释后, 流过该传感器的颗粒浓度为 $4.54 \times 10^5/\text{ml}$ 。该值远远高于常规 LE 类型传感器典型推荐的浓度水平 (即为了避免显著的重合效应), 实际上是高出 50 倍还要多。实际上, 还可以显著提高该浓度 (至少两倍), 而不会引入由重合效应导致的 PHD 形状的显著畸变。

[0148] 仅是因为该新传感器仅响应于通过它的颗粒总数的一小部分, 才可能有如此高水平的颗粒浓度。使用图 4 的例子, 通过该传感器的颗粒总数 N_T 为 $N_T \approx 4.54 \times 10^5/\text{ml} \times 16\text{ml} = 7.26 \times 10^6$ 。传感器实际上响应的颗粒数 N_p 为 83702, 从而得到了图 4 的 PHD。因此, 对测量得到的 PHD 实际上有贡献的直径为 $d = 1.588 \mu\text{m}$ 的颗粒所占比例 ϕ_d 为 1.15×10^{-2} 或者 0.0115, 其中通过 $\phi_d = N_p/N_T$ 规定了该 ϕ_d 。将比例 ϕ_d 称作“传感器效率”。

[0149] 如果发现该传感器效率相当小, 那么我们不应当感到奇怪。在其中是紧密聚焦光束的情况下, 流动通道的宽度 a 必将远远大于该聚焦光束的标称宽度 $2w$ 。因此, 通过传感器的多数颗粒暴露于可忽略的光强水平, 这是因为它们的轨迹距离光轴较远, 即 $|x| \gg w$ 。因此, 仅全部颗粒的一小部分可以“阻断”足够的光从而获得相对于占据优势的噪声水平来说是可探测的脉冲。绝大多数颗粒通过传感器而并没有被探测到。

[0150] 尽管这种局限性似乎是严重的, 但是实际上它的影响不大, 这是因为两个原因。第一, 产生可探测、可测量脉冲的颗粒的比例 ϕ_d 对于给定的传感器宽度 a 来说是固定的, 即使该值随颗粒直径 d 而发生变化。第二, 该新传感方法用于为根据规定在开始时很浓的样本确定颗粒尺寸分布 (PSD)。如果需要进行稀释的话, 那么即使在稀释之后, 任意给定尺寸 (即位于任意 (窄的) 尺寸范围之内) 的颗粒的浓度根据定义还是较高的。假设一种合适的流动速度和数据收集时间, 那么得到的 PHD 将会具有一种可接受的信噪比, 并且具有低水平的统计波动。因此, 即使可获得颗粒中的仅一小部分会对原始数据起作用, 得到的 PHD 还是代表样本中被忽略的绝大多数颗粒。因此, 可以通过该“低效的”新传感器获得代表整个样本的可靠和准确的 PSD。

[0151] 估计虚构的、近似为圆柱型的体积的宽度 $2w_d$ 是有效的, 该体积环绕着光轴, 并且该宽度代表直径为 d 的颗粒的有效 OSZ。根据定义, 通过该虚构区域的任何颗粒都将导致可以被探测到和量化的脉冲 (即通过其脉冲高度)。该宽度 $2w_d$ 直接相关于传感器效率 ϕ_d , 并且由下式定义

$$[0152] \quad 2w_d = \phi_d \times a \quad (8)$$

[0153] 图 4 中显示的 PHD 是通过具有为 2mm 或 $2000 \mu\text{m}$ 的流动通道宽度的传感器获得的。因此, 根据等式 8, 可以得到对于 $1.588 \mu\text{m}$ 颗粒的情况, $2w_d = 23 \mu\text{m}$ 。对于与此相同的传感器, 所估计的光束宽度在 10 到 $11 \mu\text{m}$ 之间 (在下面对其进行讨论)。因此, 对于 $1.588 \mu\text{m}$ 颗粒, 圆柱形状的 OSZ 的有效宽度略微大于高斯光束标称宽度的两倍。

[0154] 图 4 中显示的 PHD 还具有几个另外的值得注意的特征。第一, 由于颗粒轨迹横跨较大的 $|x|$ 值范围, 所以均匀颗粒通过传感器实际上产生了包含宽的脉冲高度范围的 PHD。

在这种情况下,这些脉冲高度的范围从大约为 5 毫伏 (mV) 的单个脉冲探测阈值 (由占据优势的均方根噪声水平决定) 到分布的标称“端点”的近似为 326mV 的最大值。(这并不包含少量的“异类”脉冲,其中这些脉冲是由延伸到 500mV 的颗粒聚集和尺寸过大的基本颗粒导致的)。考虑到颗粒的均匀性,那么这种 65 倍脉冲高度范围只能归因于颗粒轨迹的差别。(通过第一近似,我们可以忽略光束宽度在流动通道深度上的变化,如前面讨论过的那样。)

[0155] 第二,如预料的那样,该 PHD 具有极高的不对称性,在较小的脉冲高度方向上具有极大的弯曲。显然,有很多颗粒轨迹对大范围的 $|x|$ 值 (以及,因此对光束强度) 进行采样,而只有相对较少的颗粒轨迹接近了高斯分布的中央部分,在该中央部分处,强度基本上是均匀的。该 PHD 随着脉冲高度增加,颗粒数量展现出了一种宽的、平滑的上升趋势,从而加速上升到较陡的峰值,随后是迅速下降到代表零脉冲事件的基线。在分布的上端处的该陡峭的“截止”规定了最大脉冲高度,下文中称作 $^M\Delta V_{LE}$ 。在图 4 中显示的 PHD 的情况下,该值大约为 326mV。在该最大值处收集到的数量代表了通过或非常接近光束中央 (即 $x \approx 0$ 的轨迹) 的颗粒,而在光束中央处由颗粒“阻断”的总入射光通量的比例是可能得到的最大值。在较小脉冲高度通道中收集到的颗粒数代表了远离光轴通过的颗粒;参数 $|x|$ 越大,得到的脉冲高度越小。

[0156] 图 5 显示了颗粒轨迹和得到的脉冲高度之间的关系。轨迹“A”产生了具有最大脉冲高度 $^M\Delta V_{LE}$ 的消光脉冲,其中该最大脉冲高度紧临 PHD 的上部截止之前。轨迹“B”、“C”、“D”和“E”与光轴之间的距离逐渐增大,这些轨迹产生了具有相应降低的脉冲高度的脉冲,并且颗粒数量也逐渐降低。最终,随着脉冲高度在图中 5 的 PHD 的下方左侧角落处到达探测极限 ($\approx 5\text{mV}$),每通道的颗粒数量接近零。

[0157] 如前面讨论过的那样,PHD 的复现能力应该仅取决于不同通道中包含的颗粒数量大于统计波动的程度。因此,PHD 的“可靠性”(即平滑性和复现性)应该取决于一次测量期间计数的颗粒总数。对于给定的颗粒尺寸,显然存在最小数量的应该被计数和分析的脉冲,如果低于该最小数量,那么 PHD 应该会由于统计噪声从而在每次测量中展现出显著的、不可复现的“结构”。而且,该新传感器产生的 PHD 仅适用于这样一种情况:在数据收集期间,探测到了较大数量的、具有统计意义数量的相同尺寸的颗粒。仅当这种条件成立时,我们才可以获得最佳的、可复现的 PHD 结果,并且使用在下面讨论的方法可以通过该 PHD 结果获得相应准确的、具有代表性的颗粒尺寸分布 (PSD) 结果。

[0158] 在图 4 中所示的使用 $1.588\mu\text{m}$ 聚苯乙烯乳胶产生 PHD 的情况下,对一种新鲜的 16ml 相同原料悬浮物所进行的第二测量得到了非常类似的 PHD 结果,其中探测到了 83327 个颗粒。颗粒总数的差别精确位于均方根 (289) 范围之内。我们可以试探性地得出以下结论:由传感器采样的用于每次测量的颗粒数量足够大,从而产生具有可接受复现性的 PHD (通过互相重叠两个或多个 PHD 从而得到证实)。

[0159] 根据上面的讨论,我们可以清楚地看到,使新传感器暴露于较大的颗粒应该会产生偏向较大脉冲高度的 PHD。具体而言,对应于通过或非常接近于光轴的颗粒轨迹的最大脉冲高度 $^M\Delta V_{LE}$ 一定会增加。如图 6 中所示,比较 $d = 1.588\mu\text{m}$ 情况下获得的 PHD “A”和 $d = 2.013\mu\text{m}$ 情况下获得的 PHD “B”,我们可以发现情况的确如此。后者包含浓度为 0.45% (wt) 的聚苯乙烯乳胶球 (Duke Scientific) 的 2000 : 1(vol) 原料悬浮物稀释液,等同于 1.0×10^9 颗粒 /ml。使用图 4 中使用的相同数据收集时间和流动速度以及由此得到的平均

计数率 1.739/sec, 通过总共 83481 个颗粒产生 PHD “B”。

[0160] 非常明显的是, PHD “B” ($2.013\ \mu\text{m}$) 和 PHD “A” ($1.588\ \mu\text{m}$) 的形状非常相似。仅有的显著区别是最大脉冲高度 $^M\Delta V_{LE}$ 的值, 现在该值在 482mV 处出现。PHD “B” 的峰值似乎比观察较小颗粒得到的值更陡峭 (即更窄)。但是, 考虑到脉冲高度通道在对数电压比例图中具有相同的宽度, 那么该评价就主要是认知的问题。因此, 与位于比例图中较低脉冲高度值处 (如 326mV) 的通道相比, 位于较高脉冲高度值处 (如 482mV) 的通道将会包含较宽的电压范围。

[0161] 通过第一近似, 简单地通过沿着 x 轴按照线性方式将用于 $d = 1.588\ \mu\text{m}$ 情况的 PHD “拉伸” 到较高脉冲高度值, 可以通过用于 $d = 1.588\ \mu\text{m}$ 的 PHD 得到用于 $d = 2.013\ \mu\text{m}$ 的 PHD, 从而使这两个 PHD 曲线的最大截止 “边缘” 重合。通过将一个乘法系数应用于与 PHD “A” 的每个通道相关的脉冲高度值, 可以实现上述这种作用。该系数等于用于 PHD “B” 的最大脉冲高度 $^M\Delta V_{LE}$ 除以用于 PHD “A” 的对应值, 即 $482/326 = 1.48$ 。

[0162] 比较所获得的用于一系列均匀颗粒尺寸群的 PHD 是有指导意义的, 其中这些均匀颗粒尺寸群包含较大范围的颗粒直径。图 7 中显示了并在表 1 中总结了, 所获得的用于直径范围从 0.806 到 $20.00\ \mu\text{m}$ 的统计数量很大的聚苯乙烯乳胶标准颗粒的单个 PHD 的代表性结果。(注意: 可以使用相同的传感器和光学参数, 获得用于近似为 $0.6\ \mu\text{m}$ 大小的颗粒的 PHD, 该 PHD 具有降低了的、但是可接受的信噪比。) 与前面一样, 使用 $20\text{ml}/\text{min}$ 的流动速度, 通过测量 16ml 适当稀释的原料悬浮物从而获得图 7 所示的每个 PHD。用绝对值 (mV) 和 5V 或 5000mV (“基线” 电压, V_0) 的百分比来表示最大脉冲高度 $^M\Delta V_{LE}$ 。这是代表入射光通量的 100% 消光的可能出现的最大脉冲高度。在图 7 中, 将每个 PHD 都绘制成相对数量分布, 即每个通道中的数量除以为进行研究的样本收集到的总数。

[0163] 如上面讨论过的那样, 可以通过采用最近的较小尺寸的 PHD (即 “B”), 并使用合适的乘法系数 $^M\Delta V_{LE}(\text{“C”}) / ^M\Delta V_{LE}(\text{“B”})$ 使其向较大脉冲高度值移动, 从而近似得到图 7 中任意给定的 PHD (如 “C”)。因为 PHD 具有自相似性, 所以这是可以实现的。该过程非常有效, 因为可以将其用于计算, 而不是测量用于任意颗粒尺寸的相当精确的 PHD, 其中这些颗粒尺寸位于已经测量的 PHD 所用于的尺寸之间。如将在下面讨论的那样, 该操作是用于对测得的 PHD 进行 “展开卷积” 的数学过程的一个重要步骤。

[0164] 通过图 7 (和表 1) 我们可以清楚地看到, 由该新传感方法产生的用于均匀尺寸颗粒的 PHD 可以探测颗粒直径的较小变化。如图 8A 中所示, 最大脉冲高度 $^M\Delta V_{LE}$ 在较宽的 (即大于 25 倍) 的尺寸范围内随着颗粒尺寸的增加而显著增加。尽管由给定尺寸的颗粒产生的 PHD 是宽的并且根据定义在分辨率方面是差的, 但是实际上, 我们可以提出表面上相矛盾的意见, 即该新传感方法的尺寸 “分辨率” 实际上是较高的。下面, 通过结合这样一个过程, 该观点将变得明显: 该过程用于对通过具有不同尺寸的颗粒混合体获得的 PHD 数据进行 “反转” 或展开卷积, 从而最终获得感兴趣的 PSD。目前, 指出下面这一点就足够了: 图 7 的结果说明了颗粒尺寸的较小变化会导致与 $^M\Delta V_{LE}$ 有关的电压的显著、可测量的变化。如将在下面看到的那样, 信号响应的该特征是一种必要 (尽管并非是充分的) 条件, 它使得可以将展开卷积过程用于从测得的 PHD 中提取具有较高分辨率的 PSD。

[0165] 有指导意义的是, 将测得的光阻断率, 即表示为最大饱和电压 V_0 (5 伏) 的百分比的 $^M\Delta V_{LE}$, 与由普通光阻断模型预测的值进行比较。这假设了一个颗粒, 无论其尺寸如何, 都

有效地去除了入射到其上的 100% 的光,其中入射光投射到面积为 $\pi d^2/4$ 的圆盘上,从而忽略了光散射对 LE 信号的贡献,而光散射在尺寸足够小的情况下占据主导地位。图 8B 中显示了该比较,其中具有三组模型计算,并且假设宽度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ (开方块)、 $11\text{ }\mu\text{m}$ (闭圆圈) 和 $12\text{ }\mu\text{m}$ (开三角) 的高斯光束。(这些值与使用移动狭缝光束分布器对光束腰进行独立测量所得到的结果是一致的: $12\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 。)

[0166] 如可以从图 8B 中看到的,用于 $d = 5.03\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10.15\text{ }\mu\text{m}$ 的 $^M\Delta V_{LE}$ (实圆圈) 的测量值与 $10\text{ }\mu\text{m}$ (开方块) 和 $11\text{ }\mu\text{m}$ (开圆圈) 的假设光束宽度最接近相符,其中 $^M\Delta V_{LE}$ 表示为最大可能值 V_0 (5 伏) 的百分比。因此,平均值 $10.5\text{ }\mu\text{m}$ 代表最佳估计。在该 $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ 尺寸范围的上端,简单光折射应该在消光现象中占据主导地位。低于 $5\text{ }\mu\text{m}$,这种相符性就没那么好了,并且随着颗粒尺寸的降低,这种相符性也逐渐降低。实际上,该区域的理论值应该低于测量值,这是因为所使用的自然模型忽略了光散射效应。颗粒越小,散射对总 LE 信号的相关贡献量也就越大,并且因此如上面观察到的那样,理论值和测量值之间的差别程度也就越大。

[0167] 如果有效光束宽度大约为 $10.5\text{ }\mu\text{m}$,那么得到的用于 $^M\Delta V_{LE}$ 的值应该接近用于显著大于该尺寸的颗粒的“饱和值”。具体而言,没有被通过光束中央的 $10\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒阻断,而被 $20\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒阻断的光束在总光通量中所占的比例在下降。因此, $^M\Delta V_{LE}$ 比 d 的斜度,无论是测得的还是算得的,随着 d 的增加而“翻滚”,逐渐接近用于大于大约 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的 d 值的 100% $^M\Delta V_{LE}$ 。在该比例图的小直径端, $^M\Delta V_{LE}$ 比 d 的斜度随着 d 的降低而降低,这是因为散射对 LE 信号的贡献变小。因此,在整个尺寸比例图上光阻断率的曲线的形状类似于 S 形。不幸的是,测得的信号和算得的光阻断率在 $d = 20\text{ }\mu\text{m}$ 处的相符性并不像在 5.03 和 $10.15\text{ }\mu\text{m}$ 处那样好。算得的用于 10 和 $11\text{ }\mu\text{m}$ 的光束宽度的比值分别为 99% 和 98%;而测得的比值“仅为”90%。该差异的可能原因是不理想的光束强度分布,该强度分布与根据模型假设的理想高斯形状有显著的差别。不理想光学元件的存在、不完全的光束圆形化以及可能出现的失准都可能导致在光束高强度区域周围的较低强度光区域的非对称图案。即使与主光束有关的大多数光线有效受到大颗粒的阻断,对应于这些非理想区域的光线也可以到达探测器。因此, $20\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒通过光轴会导致入射光的小于 100% 的消光。

[0168] 重要的是,理解传感器效率 ϕ_d 对颗粒直径 d 的依赖。颗粒越大,颗粒可以截获或“阻断”的入射光通量的比例也就越大。因此,与较小的颗粒相比,大颗粒可以在离光轴较远的地方被检测到,而该较小的颗粒可能会消失,即使它与该较大颗粒的轨迹相同,或者甚至离光轴更近。因此,很明显的是,可以被检测到并且对 PHD 有贡献的颗粒所占比例(定义为 ϕ_d),随着颗粒尺寸的增加而增加(除了由 Mie 散射原理所描述的散射强度随颗粒尺寸的非单调变化效应。)

[0169] 图 9 显示了基于图 7 和表 1 中所示的结果,对于尺寸范围在 $0.806\text{--}20.0\text{ }\mu\text{m}$ 之间的聚苯乙烯乳胶颗粒所获得的 ϕ_d 比 d 的值。为了计算各种 ϕ_d 值,有必要独立确定在各个 PHD 测量期间通过传感器的颗粒总数。通过测量按照合适(非常大)的系数进行稀释的已知体积的每种悬浮物,可以确定这些值,其中使用具有大约 100% 计数效率的常规传感器(基于 LE 和 LS 方法的结合)进行测量。通过用在 PHD 测量期间计数的颗粒值除以流过传感器的悬浮物体积中存在的全部颗粒数,可以获得用于每个直径 d 的 ϕ_d 值。

[0170] 如图 9 中所示, ϕ_d 值随着颗粒直径的降低而单调降低,从用于 $d = 20.0\text{ }\mu\text{m}$ 的

0.030 降低到用于 $d = 0.0806 \mu\text{m}$ 的 0.0053, 这代表了几乎是六倍的降低。如预料的那样, OSZ 的有效宽度随着颗粒直径的降低而缩减。当颗粒尺寸低于大约 $1.5 \mu\text{m}$ 时, 该新传感器的效率“翻转”并且以增加的斜率立即下降到零。该特征简单地证实了当将 LE 方法用于足够小的颗粒时, 该方法是不能起到作用的, 即使其中光束宽度小到 $10 \mu\text{m}$ 。就是在该点处, 使用 LS 方法 (将在下面讨论) 变为有效的。但是, 通过图 7 我们还可以清楚地看到, 对于颗粒直径小到 $0.8 \mu\text{m}$ (甚至更小) 的情况, PHD 结果具有好的信噪比。

[0171] 因为 w_d 与 ϕ_d 成比例, 所以我们可以清楚地看到, 如图 9 中所示, 有效 OSZ 的宽度随颗粒直径的增加而增加, 而其增加的方式与 ϕ_d 随 d 增加的方式相同。如上面讨论的那样, 所分析的颗粒越大, 光束的影响就沿着 x 轴就延伸到流动通道上越远的地方。可以将其当作该新传感器的“非线性”响应, 其中它的效率总体上随着颗粒直径的增加而增加。这种特性对于通过对 PHD 进行展开卷积获得想要得到的 PHD 的过程有重要的意义, 特别是对于包含宽范围颗粒尺寸的样本。

[0172] 根据等式 8 我们可以清楚地看到, 流动通道宽度的降低可以提高传感器对于所有直径的效率。这将使较大 (但是仍然小) 比例的颗粒通过光束影响的区域, 即有效 OSZ。因此, 在理论上, 简单地通过降低尺寸“a”就可以提高传感器对于所有尺寸颗粒的效率。但是, 实际上, 有两个原因导致进行这种“提高”并不是有效的或者是值得做的。

[0173] 第一, 尺寸“a”的降低意味着流动通道的横截面积 $A_F = a \times b$ 相应的降低。但是, 在不会对样本悬浮物的流动产生过多阻碍的情况下, 对于就该面积可以降低到多低存在一种实际的限制。另外, 该尺寸的降低会导致测得的脉冲高度的误差, 这是由于所导致的颗粒的高速度引起的。对于给定的流动速度 F , 通过 OSZ 的颗粒的速度与尺寸“a”的变化趋势相反 (等式 4)。如果该速度太快, 那么所得到的信号脉冲相应地将在时间上变得更窄, 这会潜在地导致与放大器装置带宽有关的测得的脉冲高度的误差 (即降低)。我们可以通过降低流动速度来避免这一问题。但是, 这将降低测量得到的 PHD 的统计准确度, 即在一段给定时间内, 所能探测到的每种相关尺寸的颗粒将会成比例减少。

[0174] 可替换的, 我们可以考虑增加流动通道的深度 b , 将其作为补偿宽度 a 降低的一种手段, 从而使量 A_F 基本上保持恒定, 并且由此将颗粒速度恢复到可接受的值。但是, 这会导致两种不良结果。第一, 用于每种颗粒尺寸的有效 OSZ 的体积将会正比于“b”的增加而增加 (假设 OSZ 的有效宽度没有变化)。重合浓度将会按照“b”的增加系数而降低, 由此对该新传感器应用于比较浓的悬浮物的能力起到了不良影响。第二, “b”的显著增加会导致 PHD 和得到的 PSD 的分辨率降低, 这是由于光束 (假设该光束是聚焦的) 宽度和流动通道深度上的有效 OSZ 的较大变化造成的。使 PHD 的理想上陡峭的“截止”在最大脉冲高度 $M \Delta V_{LE}$ 处变宽, 这会导致通过对 PHD 进行展开卷积获得的 PSD 的分辨率的降低。

[0175] 因此, 通过上述方法中的一个或多个极大地增加传感器效率是不现实的。幸运的是, 这种性能上的“限制”实际上并不是缺点, 尽管表面上似乎如此。实际上, 在至少一个重要方面中, 它是优点。第一, 如上面讨论的那样, 该新传感器用于暴露于比较浓的样本。探测到的颗粒的小比例 (如通过图 9, 为 0.005 到 0.03) 仍然转化成对 PHD 有贡献的每种尺寸颗粒的较大的绝对数量。第二, 并且是更重要的, 较低的传感器效率为要求对起始样本悬浮物进行预先稀释的用途提供了显著的优势。根据图 9 中显示的值, 用于该新传感器的重合浓度值比通过常规 LE 类型传感器获得的对应值大大约 $1/\phi_d$ 倍, 即大大约 30 到 200 倍。

(该比较假设对于常规 LE 类型传感器具有相同的光束宽度 $2w$ 、流动通道尺寸 a 和 b 。)因此,对较浓悬浮物所进行的稀释就比常规传感器所需的稀释程度小得多,即小 $1/\phi_d$ 倍。因此,稀释流体(如水、有机溶液等等)可以相应地比通常使用的稀释流体“脏”(就污染物颗粒而言)。实际上,这是一个重要的优势。

[0176] 通过上述讨论和图 8A 和 8B 中显示的结果,很明显的是,该新传感器对于其直径显著大于光束宽度的颗粒具有降低的分辨率。这里,名词“分辨率”指对于颗粒直径的给定(单位)变化, $^M\Delta V_{LE}$ 的变化,即 $^M\Delta V_{LE}$ 比 d 的斜率。在尺寸比例图的小尺寸端,该斜率随着 d 的降低而降低,并且因此分辨率也随着 d 的降低而降低。考虑到普遍存在的噪声波动,由可以测量得到的最小脉冲高度 ΔV_{LE} 确定探测最小颗粒的阈值。应该理解,该新传感方法可以在其上产生可接受的分辨率的颗粒直径范围取决于对光束宽度的选择,此时所有其它变量保持不变。如果光束宽度显著增加,那么 $^M\Delta V_{LE}$ 比 d 的最大斜率区域,即曲线的拐点,将向较大颗粒尺寸方向偏移;光束宽度越大,偏移也就越大。然后,可以将传感器有效地用于以可接受的分辨率获得用于较大颗粒的 PSD。总之,根据对光束宽度的选择,可以将使用该新传感方法获得的 PHD 响应“缩放”到较大的颗粒直径。图 10 显示了光束宽度对于算得的 $^M\Delta V_{LE}$ 比 d 的 S 形曲线的影响(假设 100% 的消光)。所使用的光束宽度包含 $6\mu m$ (开圆圈)、 $9\mu m$ (开方块)、 $12\mu m$ (开三角)、 $15\mu m$ (闭圆圈)、 $18\mu m$ (闭方块)以及 $21\mu m$ (闭三角)。在最后一种情况下,对应于 10 到 90% 饱和范围内的最大脉冲高度,可接受的分辨率范围偏移了 $5\text{--}30\mu m$ 。

[0177] 相反,如果光束尺寸显著降低,那么 $^M\Delta V_{LE}$ 比 d 的最大斜率点将向较低直径方向偏移。但是,应该理解,可以被探测到的颗粒最小尺寸不会出现相应的显著降低。理论上,对于给定(小)颗粒直径的 $^M\Delta V_{LE}$ 值将会随着光束宽度的降低而增加。但是实际上,该新 LE 类型传感器可以在颗粒尺寸比例图的低端获得的性能改善是有限制的。第一,衍射原理会对能够获得多小的光束施加一种限制。实际上,在 $3\text{--}5\mu m$ 这种尺寸下,聚焦光束场的深度将会非常窄,这要求使用非常薄的流动通道从而在通道深度上实现光束宽度(并且因此 OSZ 宽度)的可接受的最小变化。考虑到用于通道深度的实际值(即 $b > 100\mu m$),为了避免频繁的阻塞,不可避免的要求光束宽度在通道深度上具有显著的变化。这将对最大脉冲高度截止的陡峭程度和得到的 PSD 的分辨率产生不良影响。

[0178] 第二,在颗粒尺寸比例图的小尺寸端,光散射机制将会在 LE 信号中占据主导地位。尽管聚焦光束的宽度降低,但是从光束中有效去除的入射光通量的绝对比例非常小,并且会随着颗粒直径的降低而降低。理论上,任意高背景信号电平 V_0 的存在并不会影响探测器以及相关电子系统探测叠加在 V_0 上并具有非常小高度的脉冲的能力。但是,实际上,对于可以测量得到的 ΔV_{LE} 有一个下限,这是由与光源、探测器、信号调节装置和电源有关的多种“噪声”源所导致的 ΔV_{LE} 波动造成的。样本悬浮物中的污染物颗粒也对测得的信号波动有贡献。当脉冲高度下降到低于某个值时,脉冲实际上消失了,即不能区分该脉冲和由这些噪声源导致的 ΔV_{LE} 波动。

[0179] 因此,采用以窄聚焦光束对受限空间内的颗粒进行照射的该新方法增加灵敏度,就要求将探测模式从消光转变为光散射(LS)。那么,当颗粒通过 OSZ 时所产生的信号就会取决于由颗粒产生的散射光强度在所选散射角范围内的幅度和角度分布。有效的信号脉冲将不再会受到与入射光束有关的高背景光水平的影响,而这种情况会在使用 LE 方法时发

生。图 11 中示意显示了典型地用于实施该新 LS 测量方法的简单光学方案。该装置在许多基本方面,即包含光源 40、聚焦光学元件 42 以及薄的测量流动通道 35,与用于该新 LE 类型传感器(图 3)的装置是相同的。特别的是,我们典型地使用具有高斯强度分布的窄聚焦光束 46,并且该光束通过具有薄的尺寸 b 的流动通道,这种方案与用于该新 LE 类型传感器的方案基本上是相同的。两种方案典型的唯一不同之处在于光束宽度 $2w$,其中与该新 LE 类型传感器相比,该 LS 类型新方法可以选择使用更小的光束宽度,从而获得更高的灵敏度。

[0180] 该新 LS 类型传感器与 LE 类型传感器相比的主要设计差别在于添加了光收集装置,典型地为一个或多个透镜,从而收集来自通过 OSZ 的单个颗粒的散射光线,其中这些散射光线是由入射光束产生的。该透镜系统设计用于收集位于特别的、最佳角度范围内的散射光,其典型地包含较小的散射角度。在图 11 显示的方案中,将掩模 50 放置在第一收集透镜的前面。掩模 50 包含外部不透明环 52 和内部不透明区域 54,它们构成了透明环 56。掩模 50 仅允许散射角为 θ 的光线投射到第一收集透镜 62 上,其中 θ 位于由角 θ_1 和 θ_2 规定的虚拟环形圆锥之内(即 $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$)。典型的,该透镜的中央位于入射光束的轴线上,并且与流动通道的中央之间具有合适的距离(即该透镜的焦距),这可以使得该透镜捕获来自 OSZ 的部分偏离的散射光线,并且这些散射光线变成近似是准直的。然后,可以使用第二透镜 64 将得到的平行散射光线聚焦到适当的(小面积)探测器 D_{LS} 上。由一个或多个电子电路对该得到的信号进行“调节”,并且这些电子电路典型地包含电流到电压的转换功能和放大功能。

[0181] 如上面所暗示的,由该光学方案产生的信号 V_{LS} 和图 2 中显示的由 LE 类型传感器产生的信号 V_{LE} 之间存在一种至关重要的差别。与该 LE 类型传感器不同,该 LS 类型传感器通过设计防止了来自流动通道后窗的入射光束到达探测器 D_{LS} 。取而代之,通过适当的小的不透明光束“光阑”(如内部不透明区域 54)“捕获”入射光束,或者通过小反射镜使入射光束偏转从而远离用于收集来自 OSZ 的散射光线的透镜。因此,在 LS 信号 V_{LS} 中现在不存在较大的“基线”电平 V_0 ,其中该 V_0 必然存在于由 LE 类型传感器产生的总信号 V_{LE} 中。理想地,该新“基线”信号电平为零,即当没有颗粒时在 OSZ 中不会存在由光源产生的散射光。实际上,当然的,由于流动通道的后窗表面上的缺陷或者粘在上面的污染物,将会存在少量由来自流动通道的前窗和/或后窗表面散射的光导致的背景光。另外,由于悬浮在稀释流体中的小污染物颗粒所导致的散射,背景光可能会出现波动。还有,对于某些样本,背景光可能会出现波动,这是由大量超精细颗粒产生的,这些颗粒包含总颗粒数中的大部分,但是这些颗粒太小以至于无法对其进行单独探测。

[0182] 当具有足够大尺寸的颗粒通过由入射高斯光束和流动通道 35 的前窗和后窗规定的 OSZ 时,由探测器 D_{LS} 和相关信号调节电路产生的输出信号中会出现瞬时脉冲。通常情况下,假设这些颗粒具有相同的轨迹,我们自然地认为颗粒越大,由较大颗粒散射的光量就越多,那么因此信号脉冲的高度也就越大。如果情况果真如此的话,那么输出信号 V_{LS} 将会类似于图 12 中示意显示的用于具有增加的直径($d_1 < d_2 < d_3$)的颗粒和相同 $|x|$ 值的输出信号。实际上,实际的脉冲高度不仅取决于颗粒的尺寸,还取决于颗粒的成分,具体而言就是颗粒对于入射波长的折射率(以及周围流体的折射率)和吸收率(如果存在的话)。脉冲高度还取决于光束的波长,以及如果颗粒不是球形和均质的,那么脉冲高度还取决于颗粒通过 OSZ 时的取向。最后,对于尺寸与波长相当或大于波长的颗粒,散射强度随散射角的

变化而有显著变化。因此,在这种情况下,脉冲高度取决于收集和测量散射光的角度范围。

[0183] 经典 Mie 散射原理对散射光“辐射图案”(即强度与角度之间的关系)与所有这些变量之间的关系进行了描述,其中考虑到了散射光波在颗粒内的互相干涉。通常情况下,颗粒越大,颗粒内干涉所导致的散射强度的角度依赖性也就越复杂(即各向异性的)。为了使 LS 类型传感器的响应和性能最优化,必须将对散射光的收集限制在一定的角度 θ 范围内,对于该角度范围,在最大可能或期望的尺寸范围内,净集成响应 ΔV_{LE} 随着具有给定成分(即折射率)的颗粒直径 d 的增加而单调增加。通常,可以通过选择接近正向的较小角度范围($\theta_1 < \theta < \theta_2$)从而满足该要求。通过这种方式,我们可以避免由强度随角度发生变化导致的集成散射强度随着颗粒尺寸的增加反而降低的现象,并且这种现象对于较大的角度由于 Mie 颗粒内干涉的原因而特别明显。

[0184] 由新 LS 类型传感器产生的信号 V_{LS} 在两个特征方面与由 LE 类型传感器产生的 V_{LE} 信号有显著不同。第一,由颗粒通过 OSZ 导致的信号脉冲和“总”信号 V_{LS} 在 LS 类型传感器的情况下基本上是相同的。在 LS 类型传感器中不存在 LE 类型传感器中伴随我们所研究的脉冲出现的较高背景信号电平。(同样的情况也适用于常规 LS 类型传感器。它包含图 1 中显示的方案,并且类似地添加了一个或多个用于收集和测量除入射光束之外的来自 OSZ 的一定角度范围散射光的透镜和探测器装置。)因此,在导致低幅度脉冲的较小颗粒的情况下,实际上使用 LS 方法获得的信噪比应该显著地优于使用 LE 方法所能获得的信噪比。如果颗粒越小,得到的脉冲越弱,那么随着脉冲接近占据主导地位的噪声波动,该优势也就越重要。理解 LS 方法相对于 LE 方法的固有优势的一种方法是意识到 LS 方法基于“零探测”。也就是说,理想地,在零背景信号的情况下进行脉冲的数量探测。从信号/噪声角度看,这与用于 LE 方法的情况形成了鲜明对比,其中该 LE 方法要求高的“普通模式丢弃”。“普通模式”信号 V_0 总是存在于原始信号 V_{LE} 中,并且必须被减去或者被抑制,从而提取出我们所感兴趣的信号脉冲(通常该脉冲是小的)。

[0185] LS 信号 V_{LS} 还有另一个重要的和有区别性的特征。通过增加入射光束的功率,理论上可以提高与 ΔV_{LS} 测量结果有关的信噪比,从而增加 OSZ 内所有点处入射到颗粒上的光强度。因此,理论上我们可以像在常规 LS 传感器中那样,通过增加光源的功率从而降低新 LS 传感器的探测尺寸下限。最终,根据与悬浮物流体和/或光源和探测系统有关的噪声波动,可以实现最低的尺寸极限。当然,如上面讨论的那样,通过降低入射光束的宽度 $2w$,也可以提高新 LS 类型传感器的颗粒尺寸下限,其中假设入射光束的功率不变。这显然会增加入射到通过光轴($x = 0$)的颗粒上的最大强度,并且因此也会增加用于给定尺寸颗粒的所得到的最大脉冲的高度。但是,由于受到衍射理论的限制(建立最小光束宽度)和过长的场深度导致聚焦光束在流动通道深度 b 上过大的变化,这种提高灵敏度的方法最终达到一个削弱返回点。

[0186] 相反,光源功率的增加对使用 LE 方法所能测量的最低颗粒尺寸则具有较小的影响。例如,光源功率变为原来的二倍会导致基线信号电平变为原来的二倍,即 $2V_0$ (图 2)。由具有相同尺寸和轨迹的颗粒产生的脉冲高度 ΔV_{LE} 也将变为原来的二倍,溅射光束宽度没有变化。但是,与较高的基线信号电平有关的噪声波动的均方根幅度典型地也会近似变为原来的二倍,这是因为这些波动通常与光源有关并且因此与输出功率成比例。因此,我们可以预计对于 LE 类型传感器而言,信号/噪声水平有很小提高或者没有提高。因此,提高光

源的功率只会导致 LE 方法可实现的探测尺寸下限有很小的降低或者不会导致降低。仅当与光源有关的信噪比随着功率的增加而提高时才可以实现提高。

[0187] 当均匀尺寸的颗粒流动通过新 LS 类型传感器时,根据它们的轨迹,它们单独暴露于最大入射强度的不同值,这些值由等式 7 给出,其中 $r = x, z = 0$ 。(为了简化,可以假设颗粒远远小于光束宽度,使得给定颗粒上的每个点在任意给定时刻都暴露于相同的强度。)因此,与在新 LE 类型传感器中相同,由给定尺寸的颗粒产生的脉冲高度 ΔV_{LS} 取决于距离入射光轴 ($z = 0$) 最近的距离 $|x|$ 。距离 $|x|$ 越小,值 ΔV_{LS} 越大。因此,与新 LE 方法类似,当均匀颗粒悬浮物以一种合适的流动速度通过新 LS 类型传感器时,它会产生变化较大的脉冲高度 ΔV_{LS} 分布。得到的 PHD 的形状在性质上与使用新 LE 方法获得的 PHD 高度非对称形状很相似,图 4、6 和 7 对此进行了举例说明。也就是说,脉冲计数 (y 轴) 在最小可测量脉冲高度处 (恰好高于噪声波动) 较小并且随着脉冲高度 ΔV_{LS} 的增加而增加。脉冲计数值在最大脉冲高度处积累到峰值,称作 $^M \Delta V_{LS}$,对应于用于 $|x| \approx 0$ 时的颗粒轨迹。假设颗粒浓度低于用于该尺寸颗粒的重合浓度 (在前面讨论过),那么理想情况下上面的脉冲计数 $^M \Delta V_{LS}$ 下降到零,从而在任意给定时刻最多有一个颗粒有效地占据 OSZ。当然,与那些用于通过新 LE 方法产生典型 PHD 的颗粒相比,使用该新 LS 方法获得的 PHD 通常适合较小颗粒,并且通常都是这种情况。

[0188] 如上面所述,利用新 LS 方法产生的用于均匀颗粒的 PHD 的形状,即脉冲计数与 ΔV_{LS} 的关系,在性质上类似于利用新 LE 方法产生的用于均匀 (典型地较大) 颗粒的 PHD 的形状。两种 PHD 都具有一个显著特征,那就是在它们各自的峰值脉冲计数之后跟有一个陡峭的“截止”,其中该峰值与最大脉冲高度值 $^M \Delta V_{LS}$ 和 $^M \Delta V_{LE}$ 相符。但是,应该理解,尽管两种 PHD 在性质上是相似的,但是它们的形状有大量差别,即使对于相同的颗粒尺寸,例如 $d = 1 \mu m$,情况也是如此。新 LS 类型传感器的“前端”设计,即聚焦光束和较薄的流动通道,与用于新 LE 类型中的“前端”设计基本上是相同的。因此,两种类型的传感器的区别之处就在于光探测的装置和方法以及由每种方法产生的响应脉冲的类型和幅度,即使在具有相同尺寸颗粒的情况下也是如此。对于新 LS 方法,响应仅由光散射产生,并且如果其它相关变量保持不变的话,它的幅度 ΔV_{LS} 与入射到颗粒上的光强度成比例。

[0189] 相反,对于新 LE 方法,响应的幅度 ΔV_{LE} 是入射到颗粒上的强度的更为复杂的函数。第一,该响应是由多种物理效应,即折射 (和反射) 以及光散射联合作用的结果。但是,散射现象以一种“相反”的形式表现了自己的作用。也就是说,入射光通量的一小部分在它们到达探测器之前被从光束中去除。第二,在利用新 LE 方法的典型尺寸范围内,在颗粒上的入射强度有很大不同。因此,并不令人惊奇的是, $|x|$ 的给定变化导致的脉冲高度的成比例变化取决于颗粒尺寸和轨迹,并且通常对于两种方法来说是不同的。类似的,脉冲高度随颗粒直径的成比例变化取决于颗粒直径和轨迹,并且通常对于两种方法来说也是不同的。为了获得对两种方法产生的 PSD 的详细形状的可靠理论估计,就要求严格应用用于不同尺寸颗粒的折射、反射和散射物理理论基础 (Mie 理论),并且还要严格应用高斯光束光学元件。

[0190] 通过上面的讨论,很明显的是,就变化的颗粒尺寸而言,新 LS 类型 PHD 的特性与新 LE 类型 PHD 的特性是近似的,如图 7 中显示的那样。尽管新 LS 类型 PHD 的详细形状 (脉冲数与 ΔV_{LS} 的关系) 与新 LE 类型 PHD 的详细形状之间存在差别,但是两种类型的 PHD 具

有一个共同的特征。对应于较大的颗粒直径,一个 PHD 会向较高的脉冲高度值偏移。特别的,并且是更重要的,最大脉冲高度值 $^M \Delta V_{LS}$ 随着颗粒尺寸的增加而逐渐增加。当然,该特性假设了新 LS 类型传感器被适当和准确地设计,具有适当的探测散射角度范围,从而确保 $^M \Delta V_{LS}$ 与 d 的单调响应。存在两个互相竞争的效应。一方面,收集散射光的角度范围越大,得到的脉冲高度 ΔV_{LS} 就越大,因此对于给定尺寸颗粒的信噪比也就越大,这会导致高的灵敏度,即一种较低的颗粒尺寸探测极限。另一方面,所收集的散射角度和实际角度范围自身越小,颗粒内 Mie 干涉的效应也就越小(并且后果越不严重)。因此,探测到的散射强度发生“反转”的可能性也就越小,即在希望得到的尺寸范围内 $^M \Delta V_{LS}$ 和 d 之间的关系具有单调特性。

[0191] 如前面对新 LE 类型 PHD 所进行的讨论,通过使用适当的比例系数将新 LS 类型 PHD 向较高 ΔV_{LS} 值的方向“拉伸”,就可以以合理的准确度通过对较小尺寸 $d = d_1$ 测得的 PHD 构建用于给定颗粒直径 $d = d_2$ 的新 LS 类型 PHD。(通常情况下,优选的是使用对数脉冲-高度比例图,即脉冲数与 ΔV_{LS} 的对数之间的关系。)该比例系数通过最终和初始最大截止脉冲高度值的比确定,即 $^M \Delta V_{LS}(d_2) / ^M \Delta V_{LS}(d_1)$ 。实际上,与通过新 LE 方法一样,我们可以使用包含具有适当直径间隔的理想尺寸范围的均匀颗粒悬浮物集合测量一组新 LS 类型的 PHD。然后,可以通过利用适当的比例系数所进行的线性拉伸操作,在两个相邻的测得的 PHD 之间进行插值,从而计算得到对应于这两个测得的尺寸之间的任意尺寸的 PHD。

[0192] 最后,除了由两种新方法产生的 PHD 形状的相似点/不同点之外,还有新 LS 类型传感器的响应的另一特征,即在性质上类似于,但是在数量上不同于新 LE 类型传感器的相应的特征。该特征就是有效 OSZ 的宽度 $2w_d$,以及通过等式 8 与 $2w_d$ 和流动通道宽度 a 相关的相应的传感器效率 ϕ_d 。对于新 LE 类型传感器,参数 ϕ_d 说明了下面这个事实的原因:在数据收集期间通过传感器的总颗粒数中仅有一小部分被探测到并且因此对 PHD 有贡献。在上面结合新 LE 类型传感器进行描述的涉及虚构的、近似圆柱形 OSZ 的相同概念也适用于新 LS 类型传感器。对于具有给定直径的颗粒,在固定的、选择的散射角范围上收集的集成散射光强度随入射到颗粒上的光强的降低而降低。因此,颗粒轨迹离入射光轴的最近距离 $|x|$ (即 $z = 0$) 越大,响应的幅度 ΔV_{LS} 就越小。在一些最大 $|x|$ 值处,脉冲高度会充分降低从而实际上不能从总信号 V_{LS} 中占据主导地位的噪声波动中区分出该脉冲,由此使得颗粒不能得到探测。因此,该 $|x|$ 值规定了用于具有给定直径 d 的颗粒的有效(近似圆柱形) OSZ 的半径 w_d 。然后可以使用等式 8 容易地确定用于该尺寸的传感器效率。

[0193] 因此,很明显的是,颗粒直径 d 越大,颗粒最接近入射光轴而同时仍然允许颗粒被探测到的距离 $|x|$ 越大。因此,颗粒越大,有效 OSZ 的宽度 $2w_d$ 越大,并且因此用于该较大尺寸颗粒的传感器效率 ϕ_d 也越大。 ϕ_d (或 $2w_d$) 和 d 之间的这种单调关系假设了正确设计新 LS 类型传感器,从而在感兴趣的尺寸范围内, ΔV_{LS} 随着具有给定成分的颗粒直径 d 的增加而单调增加。因此,用于新 LS 类型传感器的 ϕ_d 会随着 d 的增加而增加,这与在新 LE 类型传感器中相同。但是,我们不应该期望 ϕ_d 随 d 的增加会遵循与图 9 中总结的为新 LE 方法发现的关系相同的关系。在性质上,我们应该期望 ϕ_d 与 d 之间关系的特征对于新 LS 方法和 LE 方法来说都是相同的。但是,在数量上,我们应该期望这两种方法的该特性的细节将彼此不同,这是由于散射和折射/反射(减去小的散射贡献量)的物理特性之间的本质差别造成的。

[0194] 就传感器效率而言,还存在新 LS 响应与新 LE 传感器的另外的、重要的不同特性。如已经讨论过的那样,通过增加入射光功率并假设所有其它设计参数保持不变,可以提高新 LS 类型传感器的灵敏度,即颗粒尺寸下限降低了。与该提高相关的是传感器效率 ϕ_d 的提高。考虑到为给定颗粒尺寸获得的脉冲高度 ΔV_{LS} 和轨迹距离 $|x|$ 会随着入射到颗粒上的光强的增加而成比例地增加,上述这点是很明显的。因此,轨迹可以距离光轴更远,而同时仍然可以实现对颗粒的探测。因此,用于具有相同直径 d 的颗粒的有效 OSZ 的宽度 $2w_d$ 和相应效率 ϕ_d 将会随着入射光功率的增加而增加(按照某种非线性函数方式)。得到的曲线描述了 ϕ_d 和 d 之间的关系(图 9 中显示了用于新 LE 类型传感器的该曲线),并且将按照某种方式向用于每个值 d 的一组较高 ϕ_d 值方向移动。

[0195] 总而言之,就入射光束功率而言,新 LS 类型传感器的特性在性质上和数量上都与新 LE 类型传感器的特性不同,并且至少有两个重要的不同之处。第一,用于新 LS 类型传感器的尺寸探测阈值通常会随着入射光功率的增加而增加。这种特性典型地并不适用于新 LE 类型传感器,除非与光源相关的信噪比也随光束功率的增加而增加(或者,使用一种不同的“更安静的”光源和/或探测器以及相关的信号调节电路)。第二,与新 LS 类型传感器相关的传感器效率通常也会随着入射光功率的增加而增加。典型地不会获得新 LE 类型传感器的该特性,除非与功率增加的光源相关的信噪比有改善。

[0196] 最后,如果入射光功率增加,那么由新 LS 类型传感器产生的用于具有给定尺寸和成分的颗粒的 PHD 将会按照比例向较高的脉冲高度值方向移动。因此,由新 LS 类型传感器产生的响应的该方面意味着由包含具有不同尺寸的均匀颗粒的一组样本产生的 PHD 集合仅对于特定入射光功率而言才有数量意义。如果功率增加了,那么 PHD 将会相应地向较高脉冲高度值方向移动。有趣的是,该特性与对于新 LE 类型传感器所期望和观察到的特性类似,尽管是由于不同的原因引起的。如果入射光功率增加了给定的百分比,那么“基线”电压 V_0 和脉冲高度 ΔV_{LS} 都会按照相同的百分比增加。因此,图 7 中显示的用于特定颗粒直径集合的 PHD 将会在脉冲高度值上向上移动相同的百分比。

[0197] 现在,我们将考虑一个关键的任务,就是将通过悬浮颗粒样本获得的“原始”数据,即 PHD 转换成我们最终希望实现的颗粒尺寸分布,或 PSD。有效的是,在概念上将该任务与常规 LE 类型或 LS 类型传感器中要求的操作进行比较。在常规 LE 或 LS 类型传感中,由颗粒通过 OSZ 导致的脉冲高度几乎与它的轨迹无关,这是因为入射光的强度被设计为对于给定 z 轴值(如 $z = 0$)其在流动通道中(即沿着 x 轴)是近似恒定的。因此,理想情况下,给定尺寸的颗粒会导致具有基本上相同高度的脉冲,并且因此得到的 PHD 实际上等效于最终希望得到的 PHD。在给定的、测得的脉冲高度 ΔV_{LE} (或者 ΔV_{LS})与颗粒直径 d 之间都存在一一对应的关系。如果较大或较小尺寸的颗粒通过传感器,那么得到的脉冲高度就分别会较大或者较小。包含脉冲高度与颗粒直径之间关系的“校准曲线”是利用简单的内插根据 PHD 获得 PSD 所唯一需要的。使用常规 SPOS 方法获得原始 PHD 数据等效于确定最终的、希望得到的 PSD。

[0198] 相反,如上面所讨论的,新 LE(或 LS)类型传感器的响应是非常“周折的”。即使在具有单一尺寸的颗粒这种最简单的情况下,得到的 PHD 包含宽范围的脉冲高度,即从仅仅高于占据主导地位的噪声波动的最小值开始,到与该尺寸有关的最大值 $^M \Delta V_{LE}$ (或 $^M \Delta V_{LS}$)。因此,在具有变化较大的颗粒尺寸的情况下,得到的 PHD 包含更宽范围的脉冲高度。在脉冲

高度和脉冲尺寸之间不再有简单的对应关系。因此,将包含在 PHD 中的颗粒计数与脉冲高度值之比的集合转换为希望得到的尺寸分布,即颗粒计数比颗粒直径就不再是一个简单直接的过程了。

[0199] 将 PHD 转换为希望得到的 PHD 要求三个不同的过程。第一,必须使用专用数学算法使原始 PHD 反转,或展开卷积。它的目的是将由新 LE (或 LS) 类型传感器产生的“宽范围”PHD 转换为实际上等效于使用常规 LE (或 LS) 类型传感器得到的“陡峭的”理想化 PHD。这样一种理想化的、展开卷积后的 PHD,下文中称作 dPHD,具有这样一个特性,即具有给定高度的所有脉冲 ΔV_{LE} (或 ΔV_{LS}) 都专属于具有给定尺寸的颗粒 (总是假设颗粒具有给定的成分)。该 dPHD 等效于在所有对原始 PHD 有贡献的颗粒都通过入射光束的中央 (轴) 的情况下所获得的 dPHD。

[0200] 然后执行第二直接过程。通过校准曲线 (如图 8A 中所示的曲线) 的简单内插从 dPHD 获得初级的或者“原始的”PSD,其中该曲线适用于所使用的特定的新 LE (或 LS) 类型传感器。该过程允许将 dPHD 中的每个展开卷积脉冲高度值一一转换为与该值相关的唯一颗粒直径,从而产生原始 PSD。然后,需要进行第三过程将由此获得的原始 PSD 转换为在数量上准确的最终 PSD。原始 PSD 的每个直径通道中的颗粒数量是实际上对测得的 PHD 起作用的该尺寸颗粒数量。如上面讨论的那样,典型的是,这仅是在数据收集期间存在于通过传感器的样本悬浮物体积中相同尺寸 (即在由直径通道规定的尺寸范围之内) 颗粒总数的一小部分。由新 LE (或 LS) 类型探测器实际探测到的该部分颗粒的比例 ϕ_d 随着颗粒直径的 d 的变化而有显著变化,如图 9 中所示。因此,在第三过程也就是最后的过程中,用适用于每个直径通道的值 $1/\phi_d$ 乘以包含在该原始 PSD 直径通道中的颗粒数量。该操作产生最终的、我们希望得到的 PSD,该 PSD 描述了我们所估计的存在于在数据获取期间通过传感器的样本悬浮物中的每种尺寸颗粒的数量。可以利用内插,根据传感器效率曲线 ϕ_d 比 d ,获得用于每个直径值 d 的值 $1/\phi_d$ 。

[0201] 这里提出了两种独立的用于对测量得到的 PHD 展开卷积以获得 dPHD 的算法,下文中称作“矩阵求逆”和“连续减法”。实施这两种算法中的任意一种都要基于这样一个特性,即与常规 SPOS 传感器一样,新 LE (或 LS) 类型传感器的响应是累加性的。因为通过传感器的颗粒一次会导致一个信号脉冲,所以可将得到的 PHD 看作包含对应于多种尺寸颗粒的单个 PHD 的线性组合,或者加权总和,其中这些单个 PHD 称作“基本矢量” (该术语在线性代数中是公知的)。这些基本矢量中的每个都代表系统对统计数量很大的具有单个给定尺寸的颗粒的响应。例子包含图 4 中显示的用于 $d = 1.588 \mu m$ 的 PHD,以及图 7 中显示的八个 PHD。

[0202] 可以将测量得到的 PHD 称作 $PHD(\Delta V)$,其中取决于所使用的新传感器的类型, ΔV 代表脉冲高度 ΔV_{LE} 或 ΔV_{LS} 。它被认为是通过 N 个基本矢量的线性组合得到的,这些基本矢量称作 $PHD_1(\Delta V)$,其中 $I = 1, 2, \dots, N$ 。 $PHD_1(\Delta V)$ 是用于 $d = d_1$ 的矢量; $PHD_2(\Delta V)$ 是用于 $d = d_2$ 的矢量, \dots 并且 $PHD_N(\Delta V)$ 是用于 $d = d_N$ 的矢量。因此,可以将 $PHD(\Delta V)$ 写作

$$[0203] \quad PHD(\Delta V) = c_1 PHD_1(\Delta V) + c_2 PHD_2(\Delta V) + \dots + c_N PHD_N(\Delta V) \quad (9)$$

[0204] 这些加权系数 c_1, c_2, \dots, c_N 组成了希望得到的等式 9 的解。这些系数代表了每个 dPHD 通道中的值。

[0205] 图 7 中显示的八个测量得到的 PHD 组成了可以用于对任意测得的 PHD 展开卷积的基本矢量。但是,很明显的是,这些矢量太少以至于不能通过计算得到具有可接受脉冲高度分辨率的 dPHD,并且因此不能通过计算得到具有相应可接受尺寸分辨率的 PSD。典型的是,我们必须使用大量基本矢量,这些基本矢量之间的间距更紧密(就脉冲高度而言),以便可以在最终 PSD 中获得合理的分辨率。通过测量类似的大量均匀颗粒样本从而获得适当间隔的较大数量(如 32、64 或 128)基本矢量是不实际的(如果可能的话,考虑到了缺乏足够多样的市场上可以购买到的颗粒尺寸标准)。

[0206] 但是,根据本发明,所要求的大量基本矢量可以从试验性产生的较少数量的矢量(如图 7 中显示的八个矢量)开始,通过一个或多个直接过程获得。如前面讨论过的,可以通过沿脉冲高度轴“拉伸”已经存在的(如试验确定的)具有较小最大脉冲高度值的 PHD,从而获得具有希望得到的最大脉冲高度值 $^M\Delta V_{LE}$ (或 $^M\Delta V_{LS}$)的 PHD。将已经存在的 PHD 的每个通道的脉冲高度值乘以一个系数,其中该系数等于“目标”值 $^M\Delta V_{LE}$ (或 $^M\Delta V_{LS}$)与较低值的比值。相反地,可以将具有高于“目标”值的较大最大脉冲高度值的 PHD“压缩”到希望得到的值,并且这种压缩是通过将较小的最大脉冲高度值与较大的最大脉冲高度值的比值(小于单位值)用作乘法系数从而实现的。因此,在理论上,通过小的基本矢量起始集合(测得的),使用这些拉伸或压缩操作,可以获得任意数量的基本矢量。如果不是试验性地确定少数基本矢量,那么还可以通过简单理论模型计算这些少数的基本矢量。然后,可以通过对这些“算得的”基本矢量进行内插和/或外插从而计算得到剩余的列基本矢量。还可以通过该理论模型计算所有要求得到的基本矢量。

[0207] 可以使用两种算法解等式 9。图 13A 中的流程图示意性地总结了称作矩阵求逆的常规的、公知的方法。有两个起始量 PHD 和 M。用黑体写出的量 PHD 是一个 $1 \times N$ 列矢量,包含“源”数据。第一(即顶部)列值是测得的 PHD 的第一通道中的颗粒数。第二列值是测得的 PHD 的第二通道中的颗粒数,依此类推。最后,第 N 列(即底部)值是测得的 PHD 的第 N(最后)通道中的颗粒数。根据希望得到的 PSD 的分辨率选择参数 N,其中参数 N 等于脉冲高度通道(以及对应的原始 PSD 的颗粒直径通道)的数量。典型值为 32、64 以及 128。量 M 是包含 N 个基本矢量的方形($N \times N$)矩阵,每个基本矢量都是一个单独的 $1 \times N$ 列矢量。因此,M 的第一列包含 $PHD_1(\Delta V)$;第二列包含 $PHD_2(\Delta V)$;... 以及第 N 列包含 $PHD_N(\Delta V)$ 。

[0208] 通过线性代数的知识可以得到等式 9 的解,

$$[0209] \quad c = M^{-1} * PHD \quad (10)$$

[0210] 其中 M^{-1} 是矩阵 M 的逆矩阵。使 M^{-1} 乘以源矢量 PHD 会产生希望得到的结果,即 $1 \times N$ 列矢量 c,而该矢量 c 是构成希望得到的 dPHD 矢量的一部分。必须使 N 个通道中的每个单独内容(值)乘以适当的系数,从而首先使这些内容的和,即 $c_1 + c_2 + \dots + c_N$,等于对测得的 PHD 有贡献的颗粒总数,因此确保了颗粒的总数恒定。

[0211] 称作连续减法的第二种方法用于解等式 9。这代表了用于对测得的 PHD 展开卷积的一种新颖和有效的技术。在新 LE(或 LS) 类型传感器的情况下,该连续减法方法提供了一种用于对 PHD 展开卷积的特别有效和有用的过程。如上面讨论的那样,LE(或 LS) 类型传感器的响应的与众不同之处在于用于均匀尺寸颗粒的 PHD 形状。具体而言,该形状具有高度的非对称性,具有陡峭的截止,并且因此具有精确定义的最大脉冲高度值 $^M\Delta V_{LE}$ (或 $^M\Delta V_{LS}$)。从展开卷积过程的角度来看,这是一个非常重要和有用的特性。具有最大脉冲高度值的 PHD

通道（假设它包含统计上大量的颗粒）标识了 PSD 中可能存在的最大颗粒尺寸（除了尺寸过大的异类）。这是一种基本矢量的直径 d_1 ，其中该基本矢量具有与在测得的 PHD 中发现的最大脉冲高度相符的最大脉冲高度值。

[0212] 该连续减法算法在概念上是简单的。从起始 PHD 中减去带有适当加权或比例、系数的最大尺寸基本矢量 $PHD_1(\Delta V)$ 的贡献量（其中加权或比例、系数反映了对原始 PSD 起作用的该尺寸颗粒的数量）。该减法的结果是得到“中间”PHD 矢量，它具有较小的颗粒总数和较小的剩余最大脉冲高度值。然后，使用对应于更小尺寸颗粒的剩余基本矢量连续重复该操作，直到整个起始 PHD 实际上“消失了”，或者基本上“被消耗了”为止，从而实际上没有了有用的颗粒或有用的通道。

[0213] 图 13B 中的流程图示意性地描述了该连续减法算法。复制起始测得的 PHD 列矢量，并且将其作为中间列矢量 b 。另外，最终将变成解（dPHD）的列矢量 c ，被初始化为零（即一个全零的 $1 \times N$ 列矢量）。如前面那样，该 $N \times N$ 方形矩阵 M 包含被选择用于执行展开卷积的 N 个基本矢量。然后使用计算“循环”： $I = N, N-1, \dots, 1$ 以及，在 I 循环内， $J = N, N-1, \dots, 1$ 。在较大的 I 循环中，以 $I = N$ 作为开始，并且将矩阵 M 的第 I 列乘以矢量 b 的第 I 个元素。这就变成新的 $1 \times N$ 列矢量，称作 a 。然后，将矢量 c 中的第 I 个元素设置为与矢量 b 的第 I 个元素相等，并且从矢量 b 中减去矢量 a 。

[0214] 接下来，计算进入次要的 J 循环。从 $J = N$ 开始，根据矢量 b 中第 J 个元素的值做出决定。如果该值小于零，那么将该第 J 个元素设置为零。在该第 J 个元素大于零或等于零这两种情况下，该 J 循环都跳回到开始处，对 $J = N-1$ 也重复此询问，并且按照相同的方式一直进行到 $J = 1$ 。在 J 循环结束之后，计算返回到 I 循环的开始处。然后对于 $I = N-1$ 重复进行 I 循环内的操作。这些操作包含计算矢量 a ，使矢量 c 的第 I 个元素与矢量 b 的第 I 个元素相等，以及从矢量 b 中减去矢量 a 。在 I 循环的所有循环进行完之后，我们可以获得矢量 c ，即希望得到的 dPHD。

[0215] 图 14 包含总结了本发明的 LE（或 LS）类型传感器的操作结构和发明方法的示意图，包含了获得最终希望得到的 PSD 所需的所有测量和计算步骤。结合图 3 的传感器描述了本发明的原理，并且包含本发明原理的 LE 类型传感器 100 响应于比较浓的颗粒悬浮物，从而产生输出 V_{LE} 。可以观察到，输出 V_{LE} 的电压基线电平 V_0^T 低于没有混浊时的基线电压 V_0 。这种在电压上的降低是由混浊导致的，而混浊是由通过传感器 100 的比较浓的悬浮物引入的。在 102 处引入混浊校正，这导致总信号 V_{LE}^1 ，并且基线电压水平提高到 V_0 。通过 104 处的减法，可以从 V_{LE}^2 中有效地去除信号的直流成分（或交流耦合），并且信号还在 104 处反转从而产生脉冲高度信号 ΔV_{LE} 。可替换的，同样包含本发明的原理的 LS 类型传感器 106 也可以提供脉冲高度信号 ΔV_{LS} 。如图 15A 中所示，脉冲高度分析仪 108 将脉冲高度信号 ΔV （ ΔV_{LE} 或 ΔV_{LS} ）组织成脉冲高度分布 PHD。在 110 处执行使用了矩阵求逆或连续减法的展开卷积计算，从而产生展开卷积后的 PHD，即 dPHD。该展开卷积计算需要矩阵 M ，其中该矩阵 M 在 112 处构建，并且具有与特定颗粒直径相对应的列基本矢量。如将在下面解释的，这些列基本矢量是在 113 处通过发送已知尺寸的多个颗粒由传感器（LE 或 LS）测量得到或者在 114 处计算得到。

[0216] 如图 19A 中所示，dPHD 在 116 处通过使用校准曲线 118 被转换为“原始”PSD（颗粒尺寸分布），其中该曲线绘制了如图 8A 中所示的脉冲高度 $^M \Delta V$ 与颗粒直径之间的关系。

然后,在 120 处将该原始 PSD 转换为最终 PSD 结果。通过使原始 PSD 乘以图 9 中所示的来自传感器效率曲线 122 的 $1/\Phi_d$,从而使原始 PSD 归一化,并且在 124 处通过来自样本体积分析的体积因数对原始 PSD 进行调整。

[0217] 为了获得具有最高可能的可复现性和分辨率的 PSD,有必要对从中通过展开卷积获得了 PSD 的测得的 PHD 的质量进行最优化,具体而言,要对该测得的 PHD 的信噪比和可复现性进行最优化。因此,如已经指出的那样,具有每种相关尺寸(即每种小范围的相关尺寸)的统计上的大量颗粒必须通过新传感器的 OSZ 并且被检测到。但是,还有另一种同样关键的因素影响着 PHD(以及随后得到的 PSD)结果的质量。这涉及与照射光束的空间分布相对应的颗粒轨迹,如下面讨论的那样。

[0218] 回顾图 4 中显示的用于均匀 ($1.588\ \mu\text{m}$) 聚苯乙烯乳胶球的 PHD 是有效的。很明显的是,该 PHD 具有高的动态范围,即用于(近似)最高脉冲高度通道的颗粒计数(≈ 5600)与测量得到的用于最低通道的颗粒数量的高比值。该高比值的原因是:对流体和颗粒通过该新传感器流动通道的流动进行设计,从而产生通过通道宽度(x 轴)的基本上一致的颗粒轨迹分布。以近似相等的概率对所有轨迹中离光轴最近的距离 $|x|$ 进行采样。因此,特别的是,颗粒将会通过光束的中央部分(即具有图 5 中接近于 A 的轨迹),这导致最大数量的颗粒处于基本上最大的脉冲高度值处。颗粒还将以相等的概率通过所有强度较小的区域,在连续减小的脉冲高度值处产生连续减少的颗粒数量。

[0219] 如果颗粒流动以这样一种方式发生畸变从而导致对值 $|x|$ 的不均匀采样,那么用于均匀颗粒的得到的 PHD 的形状将会与图 4 中显示的形状不同。具体而言,在低等级的装置中(如具有差的流体设计),这些轨迹可能以这样一种方式聚集,从而导致颗粒避开光束的中央、高强度区域。在这种情况下,PHD 的高数量峰值部分实际上会被截断,这导致最大数量与最小数量之间的较小比值。

[0220] 如果颗粒轨迹分布中存在显著的空间不均匀性,那么必须将该非理想分布保留用于所有 PHD 测量。这些基本矢量,无论是测量得到的还是计算得到的,都必须相关于与在对未知样本测量期间产生的相同非均匀轨迹分布。否则,dPHD 和相应的 PSD 将会出现显著的畸变。实际上,考虑到所涉及的变量数量,很难(如果可能的话)在延长了的时间段内保持颗粒轨迹的一种特定的、非均匀的空间分布。因此,实际上有必要以这样一种方式设计流动通道和相关的流体系统,以及照射/探测光学系统,从而产生基本上均匀的轨迹空间分布。

[0221] 有指导意义的是,使用具有简单的、已知尺寸分布的样本,检测用于将测得的 PHD 转换为原始 PSD 的展开卷积过程的有效性。图 15A、15B 和 15C 显示了使用新 LE 类型传感器获得的 PHD,其中该 PHD 用于一系列的三种均匀聚苯乙烯乳胶“标准”颗粒(Duke, Scientific, Palo, Alto, CA)的混合物,每个包含三种尺寸: $0.993\ \mu\text{m}$ 、 $1.361\ \mu\text{m}$ 以及 $1.588\ \mu\text{m}$ 。通过使 16ml 的颗粒悬浮物以流速 $F = 20\text{ml}/\text{min}$ 通过传感器从而获得每个 PHD,这导致了 48 秒的数据收集时间。使用 64 个通道构建这些 PHD,其中这些通道均匀地分布在 ΔV_{LE} 对数比例图上,从 5mv 到 5000mv。选择 64 通道和 16ml 样本体积导致每个通道中所收集的颗粒数量具有可接受的低统计波动,产生了在展开卷积之后稳定的、可复现的 dPHD,以及产生了得到的 PSD 中非常好的尺寸分辨率,如下面可以看到的那样。

[0222] 图 15A 中使用的样本包含 0.5ml 预先稀释的 $0.993\ \mu\text{m}$ 乳胶原料,加上 1ml 预先稀释 $1.361\ \mu\text{m}$ 乳胶原料,加上 2ml 预先稀释的 $1.588\ \mu\text{m}$ 乳胶原料。在所有情况下,原始乳胶

原料包含 1% (w/w) 固体 (密度 $\rho = 1.05$), 并且预先稀释系数为 1000 : 1。图 15B 中使用的样本与图 15A 中使用的样本相同, 除了仅使用了一半数量的 0.993 μm 乳胶原料 (即不是使用了 0.5ml, 而是使用了 0.25ml)。图 15C 中使用的样本与图 15B 中使用的样本相同, 除了 0.993 μm 乳胶原料的数量再次降低了两倍 (即不是使用了 0.25ml, 而是使用了 0.125ml)。在这三种 PHD 中包含的颗粒数量分别为 102911 (A), 90709 (B) 以及 81827 (C)。

[0223] 图 15A、15B 和 15C 中显示的 PHD 具有重要的性质上的特征, 如下面所述。第一, 如预期的那样, 在每个 PHD 中都有宽范围的 ΔV_{LE} 值, 并且具有在前面对应于均匀尺寸颗粒看到的 (如在图 4、6 和 7 中) 特征性的“左衰落”形状 (即从高 ΔV_{LE} 值下降到低 ΔV_{LE} 值)。尽管获得了宽范围的脉冲高度, 但是潜在的 PSD 的三模式特征对于这三种样本的每一个都是非常显而易见的。第二, 在每个 PHD 中都有特征性的陡峭的“截止”, 其中该截止规定了用于整个分布的 PHD 的上端, 即最大脉冲高度值 $^M\Delta V_{LE}$, 如可以在用于均匀尺寸颗粒的 PHD 中看到的一样。对于所有这三种样本, $^M\Delta V_{LE}$ 的值 (即在最高通道的中点处) 都是 326mV。 (如前面讨论过的那样, 这忽略了由于尺寸过大颗粒和可能存在的重复导致的在较大脉冲高度处少量颗粒的存在。)

[0224] 通过将上述展开卷积过程应用于图 15A、15B、15C 中显示的测得的 PHD 以验证它们的有效性。有指导意义的是, 比较使用相同数据通过所提出的两种展开卷积算法获得的 dPHD 结果。第一, 显示可以用于通过这两种技术中任意一种对测得的 PHD 矢量展开卷积的示例性矩阵是有效的。为了便于显示包含在该矩阵和矢量中的多个项, 使用低通道分辨率 32 是有效的, 而不是使用图 15A、15B、15C 中用的 PHD 的值 64。因此, 在图 16A 和 16B 中, 显示了适当的 32×32 矩阵, 其中为了便于显示将所有项都四舍五入为小数点后三位数。

[0225] 该矩阵的每行与连续脉冲高度通道相对应, 其中增加的行序号指示增加的脉冲高度信号。如上面讨论的那样, 该矩阵的每列代表与一种颗粒尺寸相对应的基本矢量。如前面讨论过的那样, 通过测量用于多个均匀聚苯乙烯乳胶颗粒的 PHD, 根据试验获得了这些基本矢量中的九个。将测得的每个基本矢量分配给矩阵中这样的列: 这些列的最大数值位于矩阵对角线线上, 即在该处行序号与列序号是相同的。在图 16A 和 16B 中显示的 32×32 示例中, 测得的基本矢量 (与所指示的直径有关) 占据列 #6 (0.722 μm)、#8 (0.806 μm)、#12 (0.993 μm)、#17 (1.361 μm)、#19 (1.588 μm)、#20 (2.013 μm)、#26 (5.03 μm)、#29 (10.15 μm) 以及 #31 (20 μm)。已经对用于每列基本矢量的项进行了归一化, 从而在每种情况下的峰值都是单位值。然后, 用“理论性”基本矢量填充该矩阵中剩余的 23 个空列, 其中所获得的每个项都是通过对位于相应项附近的测得的矢量进行内插或外插而实现的, 这等效于前面讨论过的“伸展”操作。

[0226] 图 17 中显示了代表用于这三个不同样本的测得的 32 通道 PHD 的源数据列矢量。 (将图 15A、15B、15C 中显示的 PHD 中的相邻通道对的内容相加, 从而获得必要的 32 通道值)。图 17 中还显示了分别用于这三个不同样本的通过对 PHD 展开卷积获得的结果, 其中该展开卷积是通过矩阵求逆的方法得到的 (图 13A)。每个得到的 dPHD 都清楚地证实了 (即使通过这种表的形式) 每个分布的三模式特征, 显示了三种乳胶尺寸标准的较“分明”的分离 (考虑到使用 32 通道所导致的分辨率限制)。通过直接的矩阵求逆过程, 并且在没有做出涉及潜在 PSD 形状假设的情况下, 成功地“去除”了由于传感器响应对颗粒轨迹的依赖性导致的脉冲高度在宽频谱范围内的“模糊”, 而在原始 PHD 中可以看到这种“模糊”。

[0227] 有几个细节值得注意。第一,可以使用新 SPOS 方法通过“整理”用于反转测得的 PHD 数据的矩阵从而持续获得较高质量的 dPHD 结果,即包含很少的(并且仅低幅度的)伪“噪声”分布,如图 17 中所示。这包含将位于对角线上单位元素之下的次级项(其中多数典型地在开始时较小)设置为零。这些项与该列中那些脉冲高度值大于最大数脉冲高度值的脉冲计数相对应。第二,通过矩阵求逆算法产生的每个 dPHD 典型地包含用于多个通道(箱)的负值。显然,应该将这些非物理值设定为零。然后,对剩余通道中的项进行重新归一化,从而颗粒总数等于在对应的测得的 PHD 中原始收集到的颗粒总数。第三,与用于图 17 中 dPHD 的三个主要峰值(即具有三个最大颗粒数的通道)相关的脉冲高度对于三个样本是相同的,即 65mV(行 12)、198mV(行 17)以及 309mV(行 19)。对图 8A 的校准曲线进行内插会产生对应的颗粒直径,即 $0.94\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 以及 $1.55\mu\text{m}$ 。考虑到被选中用于该矩阵求逆计算的 32 通道的有限分辨率,这些值应该被认为是与已知尺寸相符的。最后,确实至少近似观察到了从样本 A 到 B 到 C 的 $0.933\mu\text{m}$ 颗粒(行 12)数量上的逐渐的、两倍的降低(将在下面讨论)。

[0228] 接下来,将这些结果与使用新方法(连续减法)根据相同起始 PHD 数据获得的 dPHD 进行比较是有效的,其中使用了相同的 32 通道分辨率。矩阵和测得的 PHD 列矢量与那些用于矩阵求逆的矢量是相同的。同样在图 17 中显示了使用连续减法算法获得的 dPHD。显然,在通过这两种不同展开卷积过程产生的值之间存在一种通道间(即 dPHD 列矢量中的列与列之间)很好的相符性。具体而言,对于与这三个期望得到的乳胶峰值相关的通道(包含行 11-3 和 16-22)基本上是相符的。仅在低幅度的临时伪项中存在偏差,其中这些低幅度的临时伪项在较低脉冲高度通道中占据主导地位(即行 1-10 号)。之所以发生这些情况是因为求逆算法中没有充分考虑到潜在的 PHD 数据中不可避免的统计噪声。矩阵求逆方法比连续减法算法会产生更多的这种贡献量。考虑到连续减法算法所占有的另外“信息”和如此产生的 dPHD 系统性地从最大脉冲高度通道演化为最小脉冲高度通道这一事实,我们对上述这点就不会感到惊奇。在任何情况下,除了上述的小噪声贡献量,我们可以得到下面关于由这两种展开卷积过程产生的 dPHD 结果的结论:1) 非常好,考虑到绝对准确度(即对应于脉冲高度值的颗粒直径)和分辨率;以及 2) 基本上是相同的。

[0229] 通过使用更高的、64 通道分辨率从相同的 PHD 数据获得的 dPHD 结果,可以加强上述这些结论。现在,起始 PHD 包含 64×1 列矢量,对应于图 15A、15B、15C 中显示的 64 通道数据。该矩阵为 64×64 阵列,所具有的项数量是图 16A 和 16B 中显示的矩阵的项数量的 4 倍。而且,将九个测得的基本矢量用于作为构建该 64×64 矩阵的起始点。通过与前面分析中产生 32×1 基本矢量所用相同的测得的 PHD 获得这些新 64×1 (列)矢量。这些新矢量占据列的 11 号($0.722\mu\text{m}$)、15 号($0.806\mu\text{m}$)、24 号($0.993\mu\text{m}$)、34 号($1.361\mu\text{m}$)、37 号($1.588\mu\text{m}$)、41 号($2.013\mu\text{m}$)、51 号($5.03\mu\text{m}$)、58 号($10.15\mu\text{m}$)以及 61 号($20.0\mu\text{m}$)。

[0230] 图 18A、18B、18C 中显示了通过矩阵求逆获得的 64 通道 dPHD。图 19A、19B、19C 中显示了通过连续减法获得的对应的结果。此外,这两套结果之间非常相符,可以与图 17 中总结的使用 32 通道分辨率观察到的相符程度相比。如前面那样,三个峰值分离得很分明,但是具有两倍的脉冲高度分辨率的优势。在矩阵求逆结果(图 18A、18B、18C)的较低脉冲高度区域还可以观察到的一些不重要的“噪声”贡献量,而对于 64 通道连续减法结果(图 19A、19B、19C)则几乎观察不到人为的结果。因此,我们可以再次得到这样的结论:使用连

续减法算法获得的 dPHD 结果略微优于通过矩阵求逆获得的结果。

[0231] 为了将 dPHD 结果（通过这两种展开卷积算法中的任意一种获得的）转换为希望得到的最终 PSD 结果，只剩下两个直接的计算过程。第一，使用用于所使用的传感器的标准校准曲线，即图 8A 中显示的曲线，必须将 dPHD 转换为“原始”PSD。第二，考虑到较低的传感器效率 ϕ_d ，必须将得到的原始 PSD 对于所有测得的颗粒尺寸进行归一化。因此，原始 PSD 的每个通道中包含的颗粒数量必须乘以相关用于该通道的直径 d 的系数 $1/\phi_d$ ，其中通过内插从图 9 获得 ϕ_d 。所得到的归一化值代表所估计的存在于在数据收集期间通过传感器的样本悬浮物体积中每种尺寸颗粒的数量。使这些数量除以样本体积（对于上述的三模式乳胶样本为 16ml）会得到所估计的样本悬浮物中每种尺寸颗粒的浓度。图 20A、20B、20C 中显示了得到的“浓度”PSD，对应于通过连续减法获得的 dPHD（图 19A、19B、19C）并且表示为样本悬浮物的每 ml 中的颗粒数量（除以 1000）。

[0232] 有指导意义的是，将使用新 LE 类型传感器获得三种 PSD 中每个数量峰值中发现的颗粒浓度与独立获得的估计量进行比较。使用具有 100% 计数效率的常规（联合 LE+LS）SPOS 仪器测量用于制备样本 A、B 和 C 的单个原料乳胶悬浮物的浓度。为了避免由重合效应所导致的测得 PHD 的畸变，要求采用浓度高得多的稀释系数。表 II 中总结了这些比较。使属于图 20A、20B、20C 中浓度 PSD 的三个“峰值”中的每个的直方图条的贡献量相加，以获得所显示的用于每种乳胶标准尺寸的浓度。

[0233] 显然，考虑到所使用的任何展开卷积过程的固有局限性，包括这里讨论的两种方法的固有局限性，该相符性是非常好的。当然，我们不能期望使用新 LE 类型传感器获得的 PSD 的分辨率和绝对准确度就像使用常规传感器获得的那样好。但是，考虑到所使用光学设计上的根本不同和所需要的较复杂的展开卷积方法，应该说使用新 LE 类型传感器获得的结果的质量还是很好的。最后，重要的是认识到下面这点：图 20A、20B、20C 中显示的 PSD 结果极大地优于由任何“整体”技术产生的典型结果，其中所有尺寸的颗粒同时对测量得到的信号起作用。对于后者来说，为了获得所估计的 PSD，必须使用一种适当的算法使其反转，而所获得的估计的 PSD 通常具有相对有限的分辨率和准确度。这样的整体技术包含作为频率的函数的超声衰减，以及著名的“激光衍射”，该技术基于经典 Mie 散射和 Fraunhofer 衍射的结合。

[0234] 接下来，有指导意义的是，检查新 LE 类型传感器对于包含连续的（“平滑”）、较宽颗粒直径分布的样本悬浮物的响应。具体而言，将精力集中于“多数为亚微米”的胶态悬浮物是有效的，其中绝大多数颗粒，即使基于体积加权，也都小于 1 微米（1 μm ）。很多具有商用意义和研究意义的应用都设计使用这种胶态悬浮物。例子包含：1) 超精细无机颗粒的水“泥浆”，通常为氧化物，例如硅氧化物、铝氧化物以及铈氧化物，它们被用于半导体集成电路制造过程当中的硅晶片表面的 CMP 处理；2) 设计用于静脉注射的均质水中油乳剂，用于肠道外营养、药物运送（如麻醉）以及作为用于超声成像的对比剂；3) 墨水、染料和颜料，用于墨水注入和常规打印；4) 均质人工饮料乳剂，包含可食用油滴，其包含调味剂和调色剂，表面涂有乳化剂并且悬浮于水中；5) 水纸涂层扩散，典型地包含碳酸钙、高岭土、二氧化钛或者有机聚合体，例如乳胶；6) 聚合体悬浮物，用于油漆、涂层以及粘合剂。

[0235] 对于这些应用和其它应用来说，通常可以确定样本悬浮物中的最大颗粒是有效的，即那些包含 PSD 的最外面“尾部”的颗粒（如大于 $\approx 1 \mu\text{m}$ ）的数量和尺寸分布。获知

PSD 尾部中颗粒的体积或者质量所占比例（即在总颗粒体积或质量中所占的百分比）通常为我们所研究的乳剂、悬浮物或者扩散的质量和 / 或稳定性提供了明确指示。如果该材料是胶状不稳定的,那么占据 PSD 尾部的颗粒的体积比例将会随着时间“增长”,并且此时系统向不可逆聚集和 / 或相位分离发展。对整个 PSD 的描述,典型需要一种“整体”技术,例如激光衍射或动态光散射,并且这种描述在本质上通常缺乏探测与颗粒 / 滴聚集早期相关的 PSD 小变化所需的灵敏度。相反,SPOS 技术可以探测与多种不稳定阶段相关的 PSD 数量上非常小的变化,这是因为这种技术仅响应包含于 PSD 最外面尾部的较大颗粒。即使基于体积加权,该尾部也可能仅包含在整个 PSD 中占很小比例（典型地小于 $< 0.1\%$ ）的颗粒。但是,PSD 的这种小比例经常为整个悬浮物的稳定提供一种唯一的“窗口”。

[0236] 就 SPOS 技术得到悬浮或扩散的质量信息的能力而言,可以得到与上面相同的结论。SPOS 方法已经被证实对于确定多种基于颗粒产品的质量是非常有效的,如果不是必要的,甚至是在没有讨论长期稳定性问题的时候。这些产品或中间处理材料的质量通常与位于 PSD 尾部的外侧区域的颗粒所占比例有很大的关系。通常必须使这些颗粒的存在数量最小化,或者全部排除,以确保产品质量和性能。因此,可以使用为尾部获得的数量或体积加权 PSD 来优化用于控制颗粒制造过程的参数。后者的例子包含用于油 / 水乳剂的制备的均质化和 Microfluidization™(Microfluidics Corp., Newton, MA),其中压力、温度、孔尺寸、成分的化学计量、通过的数量以及其它变量都对 PSD 有影响。其它例子包含用于产生聚合体的乳剂聚合化（使用一批、半批或连续反应器）,以及压粉和磨粉。D. F. Driscoll 等人在 Int' J. Pharm, Vol. 219, pp. 21-37 (2001) 中描述了与用于确定可注入油脂乳剂的稳定性和质量的激光衍射相比,常规 LE 类型 SPOS 方法的优越性。

[0237] 与常规传感方法相比,新 LE 类型传感方法提供了两种潜在的显著优势。第一,需要对开始的较浓悬浮物进行程度小得多的稀释。该特征通常是非常重要的,即对于那些可能会变得胶化不稳定并且因此易于发生聚集的系统是非常重要的,这是由于常规 LE 或 LS 传感器为了避免颗粒重合而通常要求进行大量稀释所导致的。一个重要的例子包含 CMP 浆,其中通过颗粒表面上的电荷使其稳定并且通过周围流体的较高或较低的 pH 使其得以保持。对这些浆的显著（100 或 1000 倍）稀释可能会使 pH 发生足够大的变化从而显著降低颗粒上的电势,这使得在相邻颗粒之间产生 Van der Waals 吸引力,从而克服静电斥力,因而有助于产生聚集。

[0238] 第二,新 LE 类型 SPOS 方法通常可以获得可接受的低尺寸阈值（如 $< 0.7 \mu\text{m}$ ）,而不需要借助单独的 LS 测量,即单独使用消光。得到的 LE 类型信号对流动通道内表面的恶化相对不敏感,这是由于颗粒吸收（涂层）或由悬浮流体引起的化学所致的损失（如刻蚀）所导致的。尽管由于流体表面界面处强烈的散射,这些效应会使 LS 类型传感器的性能显著恶化,但是除了在极端情况下,它们通常对 LE 信号的质量具有较小的影响。因此,对于多数重要应用来说,在长时间内,对于流动通道的维护（清洁）的要求是较低的。

[0239] 考虑到上述因素,回顾可以通过新 LE 类型传感器获得的、用于典型的较浓的胶状悬浮物的一些典型结果是有效的。图 21A、21B、21C 到 23A、23B、23C 总结了用于包含用于肠道外营养的可注入（水中油）油脂乳剂的三种样本的结果。每种样本包含浓度大约为 0.05%（按照体积）的油脂滴,而这是通过“原料”液体乳剂 (Liposyn III, 20% (w/v), Abbott Laboratories, N. Chicago, IL) 的 400 : 1 稀释后获得的。这等效于最终悬浮物的

每 ml 滴体积比例为 5×10^{-4} 。样本“A”仅包含油脂滴,而样本“B”和“C”包含加入的均匀 $0.933 \mu\text{m}$ 聚苯乙烯乳胶颗粒,其中对于“B”为 3.25×10^5 颗粒 /ml,对于“C”为 8.13×10^4 颗粒 /ml。如果按照体积比例表示的话,所加入的乳胶“突出”等效于对于“B”为每 ml 悬浮物加入 1.67×10^{-7} ml,对于“C”为每 ml 悬浮物加入 4.17×10^{-8} ml。与油脂滴的体积比例相比,所加入的乳胶突出浓度分别等效于 334ppm(每百万的部分数)和 84ppm。

[0240] 图 21A、21B、21C 分别显示了对于三种样本的测得的 PHD,其中使用了 32 个脉冲高度通道,并且这些通道间隔均匀地分布在对数比例图上。在每种情况下,从 16ml 的样本体积开始,以 20ml/min 的流动速度,在 48 秒的时间内收集数据。对于高于大约 14mV 的脉冲高度,用于样本 A 的 PHD 显示出了随着脉冲高度的增加而平滑降低的被测颗粒数量。考虑到对于具有大于分布的平均尺寸(大约 $0.2 \mu\text{m}$)的颗粒来说,潜在的 PSD 应该具有相似的随着液滴尺寸增加而降低的数量(在下面将得到证实),上述情况就不会令人惊奇了。PHD 下降到低于 14mV 的情况是由于对于所使用的探测器来说,最大脉冲高度 $^M \Delta V_{LE}$ 小于 14mV 的颗粒太小(即小于大约 $0.7 \mu\text{m}$),以至于无法单独探测到它们。传感器效率在低于此电平后会迅速下降。用于样本 B 的 PHD 清楚地显示出了由于加入的乳胶突出而导致的混浊。对于由样本 C 产生的 PHD 也会出现同样的情况,但是由于所添加乳胶颗粒的 4 倍减少从而表现出了显著较小的影响。

[0241] 图 22A、22B、22C 分别显示了使用连续减法算法,通过对图 21A、21B、21C 的 PHD 进行展开卷积从而获得的 dPHD。这些 dPHD 展现了预期的恶化特性,模仿了预期的油脂滴的潜在尺寸分布。现在,在图 22B 中可以更加清楚地看到所添加的乳胶突出,并且在图 22C 中比在图 22B 中稍模糊地看到所加入的乳胶突出。所显示的 dPHD 仅用于 $^M \Delta V_{LE} \geq 21.3\text{mV}$,这是因为低于此值,由于探测力和分辨率的降低以及颗粒重合等原因,分布将会发生畸变并且不可靠。这些效应会导致上面提到过的在图 21A、21B、21C 中看到的测得的 PHD 中的“翻滚”。

[0242] 图 23A、23B、23C 显示了以原始悬浮物中颗粒浓度表示的对于三种样本所得到的 PSD。如前面讨论过的那样,使用图 8A 中的校准曲线和图 9 中的传感器效率曲线,从而通过对应的图 22A、22B、22C 的 dPHD 获得这些 PSD。垂直浓度轴得到了极大的扩展,从而可以更加清楚地看到分布的详细情况。在图 23B、23C 中可以清楚地看到加入的乳胶突出的影响。

[0243] 有指导意义的是,在数量上比较每种乳胶突出的测得的影响和预期的影响之间的关系。已知的加入乳胶的浓度对于样本 B 大约为 2.33×10^5 颗粒 /ml,对于样本 C 大约为 5.83×10^4 颗粒 /ml。通过分别从用于样本 B 和 C 的 PSD 中减去用于样本 A 的 PSD 从而估计得到对应的测量值。通过将 0.90 到 1.06 微米的四个直方图考虑在内,可以解释由添加的乳胶导致的对 PSD 的多数贡献量。与实际添加的值 $3.25 \times 10^5/\text{ml}$ 相比,得到的用于样本 B 的提高后的颗粒浓度为 $3.01 \times 10^5/\text{ml}$ 。用于样本 C 的相应值为 $8.85 \times 10^4/\text{ml}$ (测得的)比 $8.13 \times 10^4/\text{ml}$ (已知的)。考虑到加入乳胶颗粒的较小浓度和展开卷积过程的固有的苛刻特征,以及获得最终 PSD 所需的相应计算,应该认为上述两组值是非常相符的。

[0244] 上述直方图代表了使用新 LE 方法在常规情况下可以获得的结果,其中这些结果用于多种胶状悬浮和扩散的 PSD 的大颗粒尾部。通常,出于前面提到过的原因,有必要或是为了方便,需要程度尽可能小地稀释开始时较浓的样本。因此,在许多情况下,通过流动通道的悬浮物的浓度较高,并且因此必定非常混浊。因此,与通过比较透明的样本的光强度相

比,通过该混浊样本的光强度在流动通道的厚度 b 上显著下降。

[0245] 对于得到的 LE 信号 ΔV_{LE} 来说,有两个结果。第一,在 (OSZ 中) 无颗粒情况下足够大以用于产生可探测脉冲的“基线”直流电平 V_0 将会降低。理想情况下,根据 Beer 法则,称作 V_0^T 的新基线电压电平与无混浊情况下的电平 V_0 相关,

$$[0246] \quad V_0^T = V_0 \exp(-\alpha x) \quad (11)$$

[0247] 其中 x 是光束横穿样本通过的距离 (即 $x = b$), 并且 α 是吸收或衰减的相关系数,通常以 cm^{-1} 为单位来表示。如果假设样本不过分混浊,那么可以假设等式 11 是准确的,从而由于强的多重散射,将不会展现出理想化的衰减与距离之间关系的特性。

[0248] 样本混浊的第二种结果是:由通过 OSZ 的可探测颗粒导致的 (负向) 脉冲的高度 (电压) 也会下降。对于给定的颗粒,得到的测得脉冲高度 ΔV_{LE}^T 与没有混浊情况下脉冲高度值 ΔV_{LE} 相比,其值将会下降,并且如果混浊不很严重并且是线性系统响应的话,那么下降的比例与 V_0^T 相对于 V_0 下降的比例是相同的。因此,如果不对脉冲高度集合做出校正,那么得到的 PHD 将会系统性地向较低脉冲高度值方向移动。对于通过对 PHD 展开卷积从而获得的 dPHD 来说,情况也是一样的。因此,得到的 PSD 将会向较小的颗粒直径方向移动,即样本中所有颗粒的尺寸都会被系统性低估。

[0249] 有几种用于解决由样本混浊导致的脉冲高度变小问题的方法,其中该问题典型地是由于大量超精细颗粒位于尺寸探测阈值之下导致的,即这些颗粒太小从而对 PHD 没有直接贡献。在第一种、最简单的方法中,可以将每个测得的脉冲高度“重新归一化”(实时进行或者在数据收集之后进行)到它无混浊情况下的“理想”值 ΔV_{LE} ,该值 ΔV_{LE} 通过下式与测得的脉冲高度 ΔV_{LE}^T 相关,

$$[0250] \quad \Delta V_{LE} = (V_0/V_0^T) \times \Delta V_{LE}^T \quad (12)$$

[0251] 比例系数为 V_0/V_0^T ,其中需要将所有测得的脉冲高度乘以该比例系数从而获得对应于可忽略混浊的一组新的理想化脉冲高度。通过使基本上无颗粒的流体通过传感器可以容易地测量无样本混浊情况下的基线电压电平 V_0 。可以将该值存储起来以备,如在要分析一种混浊样本时可以使用该值,或者可以使用清洁流体在每次新的样本分析之前对该值进行重新测量。通过在数据收集之前,使一部分样本悬浮物通过传感器可以测量存在混浊情况下的基线电平 V_0^T 。

[0252] 至少有两种方法可以确定 V_0^T 。最容易的模拟方法包含使用具有适当 (RC) 时间常数的有源或无源滤波器,在适当的时间内 (如 1 秒) 测量总信号 $V_{LE}(t)$ 的时间平均值。可以使用静态或流动悬浮物从而测量该平均值。在后一种情况下,由于可探测颗粒导致的分立脉冲将会影响测得的平均值。但是,考虑到平均脉冲速率典型地低于 10000/sec 并且脉冲宽度通常短于 10-12 μsec ,从而通常情况下该影响的程度是较小的,其导致脉冲具有小于 10% 的“占空比”。测量 V_0^T 的第二种方法包含在混浊样本流过传感器时使总信号 $V_{LE}(t)$ 的较大部分 (如 10-100msec) 数字化 (使用模拟到数字转换器),并且在收集用于该样本的脉冲高度数据之前分析得到的数字化信号。可以将适当编程的计算机用于识别和测量位于分立脉冲任意一侧并且对应于希望得到的基线电平 V_0^T 的信号“平坦”(除了由噪声导致的小波动之外) 部分。

[0253] 图 26A 是用于通过将脉冲高度重新归一化到无混浊情况下的预期值,从而补偿混浊的装置的一种实施例的框图。该传感器具有光源 126 和聚焦透镜 127,其中该聚焦透镜将

光束 128 导引通过测量流动通道 130, 并且该光束照亮测量流动通道 130 之内的光学传感区域 131。流体悬浮颗粒 132 流动通过测量流动通道 130, 并且流动通过测量流动通道 130 的一小部分颗粒 132 流动通过光学传感区域 131。当颗粒 132 流动通过光学传感区域 131 时, 光受到阻断并且 LE 类型光探测器 D_{LE} 探测到该阻断, 并将其作为从基线电压 V_0^T 向下延伸的脉冲 134。可以观察到, 基线电压 V_0^T 和脉冲 134 小于流体悬浮物并不混浊情况下得到的基线电压 V_0 和脉冲 135。转换器 136 响应于颗粒 132 的通过而将光探测器 D_{LE} 产生的电流信号 $I_{LE}(t)$ 转换成电压信号 $V_{LE}(t)$ 。

[0254] 为了计算校正系数 G , 一种非混浊液体通过该系统并且在 138 处测量基线电压 V_0 。然后, 被测悬浮物通过该系统并且在 140 处测量基线电压 V_0^T 。然后在 142 处计算比 $G = V_0/V_0^T$ 。

[0255] 对转换器 136 产生的信号 $V_{LE}(t)$ 进行处理, 通过使用交流耦合从该信号中减去直流部分, 并且使得到的信号在 144 处反转。然后, 由可调整增益放大器 146 对输出 $\Delta V_{LE}^T(t)$ 进行放大, 其中该放大器的增益受到校正系数 G 控制。如在图 148 中看到的, 校正后的信号 $\Delta V_{LE}(t)$ 包含具有正确脉冲高度 150 的正确测量尺寸的脉冲。

[0256] 图 24A、24B、24C 和图 25A、25B、25C 分别总结了使用上述第一种方法对测量得到的脉冲高度进行重新归一化之前和重新归一化之后用于混浊样本的典型结果。该样本包含较浓的油脂滴的“双突出”悬浮物, 并且是通过与前面使用的相同的原料乳胶得到的。油脂滴浓度大约为 0.5% (按照体积), 即比用于前面讨论过的测量的浓度大十倍。从视觉角度看, 得到的悬浮物高度混浊。将均匀乳胶颗粒 ($2.013 \mu m$ 和 $10.15 \mu m$) 的两个“突出”添加到混浊样本悬浮物中。所添加的乳胶颗粒浓度足够大从而可以在数据收集期间产生足够的、统计上稳定的数量, 但是颗粒数量足够小从而对于悬浮物的总混浊性具有可以忽略的影响。

[0257] 图 24A 显示了用于浓缩油脂滴和添加的乳胶颗粒的混合物的测得的 PHD (64 通道)。图 24B 显示了通过展开卷积 (连续减法) 根据该 PHD 获得的 dPHD。图 24C 显示了对于传感器效率进行校正之前的得到的原始 PSD。很明显, 与乳胶突出有关的两个峰值向基本上低于不存在浓缩油脂滴情况下获得的用于双模型乳胶混合物自身的值低得多的直径方向移动。显示出的这两个峰值的平均直径大约为 $1.5 \mu m$ 和 $6.5 \mu m$ 。

[0258] 测得的用于该混浊样本的平均基线电平 V_0^T 为 3.45 伏, 这相对于无混浊情况下获得的 5.00 伏的正常值有显著的降低。因此, 应该可以通过使用为 $5.00/3.45$ 或者 1.45 的系数对原始 PHD 重新归一化并且重复展开卷积计算从而恢复准确的 PSD 结果。图 25A 中显示了重新归一化得到的 PHD, 并且图 25B 中显示了通过展开卷积 (连续减法) 获得的 dPHD。图 25C 中显示了对应的原始 PSD。现在, 相关于乳胶突出 (大约为 $1.9 \mu m$ 和 $9.8 \mu m$) 的两个峰值的位置就非常接近于预期值了。

[0259] 还有一种方法可以用于处理显著混浊的样本。可以将信号处理系统设计为可以自动调整的, 从而在开始时, 即在收集脉冲高度数据之前就基本上消除了混浊的影响。通过适当的信号调节装置可以使起始的、受到抑制的基线电平 V_0^T 增加, 从而使它接近于无混浊情况下获得的值 V_0 。例如, 可以使用具有可调整、压控增益的放大器装置。可以将反馈电路装置用于感应被调节的输出信号的幅度并且增加该放大器装置的增益, 直到输出基线电压达到希望得到的“理想”电平 V_0 为止。图 26B 中显示了该第二种方法。与前面一样, 转换器 136 提供信号 $V_{LE}(t)$ 。在这种情况下, 由可调整增益放大器 152 对该信号进行放大, 并且该

放大器的增益受到校正系数 G 的控制。对放大后的信号 $G \times V_{LE}(t)$ 进行调整,使得基线电平等于“理想”电平 V_0 。现在,对该信号进行处理,这些处理包含减去直流成分以及在 154 处使脉冲反转,从而再一次产生图 148 中所示的具有正确脉冲高度 150 的正确尺寸脉冲的输出。

[0260] 可替换的,可以将用于控制颗粒尺寸测量装置的计算机用于(结合数模转换器)控制放大器装置的增益,从而达到希望实现的基线电平 V_0 。在另一种方法中,可以将一种模拟乘法器装置用于使未校正的起始信号 $V_{LE}(t)$ 乘以实际上等于 V_0/V_0^T 的第二电压,其中在数据收集之前或数据收集期间通过 $V_{LE}(t)$ 的时间平均获得 V_0^T 的值。

[0261] 这些用于将 V_0^T 提高到 V_0 的电子方法实际上包含一种自动增益控制或者 AGC 系统,该系统对样本混浊的变化导致的基线电平的变化进行一次性(在数据收集之前)或连续(在数据收集期间)的补偿。然后,如上面讨论过的那样,使用希望的展开卷积算法和相关过程收集和分析数据。得到的 PHD 基本上是准确的,并且并不向较低直径方向移动,而如果不是如此的话,混浊将会导致发生这种情况。(该结论假设混浊并不是过大的以致导致非线性响应)。

[0262] 存在一种与上述第二种方法相关的第三种方法,该方法基本上可以用于将基线电平恢复到无混浊情况下获得的值。并不是使用具有可调整增益的放大器装置来增加输出信号,而是使光源装置的强度增加相同的希望的系数 V_0/V_0^T 。该方法假设在通常情况下,该光源装置的输出功率小于可实现输出功率的一半,这使得如果需要的话可以实现 2 倍输出或者更大的增加。图 26C 中显示了该方法,其中控制系数 G 控制光源 126 提供的光束强度。然后,直接将来自转换器 136 的输出信号 $V_{LE}(t)$ 连接到要对其进行处理 156 处,在该处减去直流成分并且使脉冲反转。再一次正确地估计了输出脉冲 150 的尺寸。

[0263] 图 21A、21B、21C 到图 23A、23B、23C 中总结了在数据收集之前将基线电平恢复到 V_0 的该第二种方法,其中该方法用于测量 0.05% 油脂乳胶样本(光面的和有突出的)。与无混浊情况下 $V_x = 5.00$ 伏相比,未校正的测得基线电平 V_0^T 为 4.82 伏。通过等式 11 和 $x = 0.02\text{cm}$,我们可以获得 $\alpha = 1.83\text{cm}^{-1}$ 。在图 24A、24B、24C 和图 25A、25B、25C 显示的 0.5% 油脂乳胶样本中,用于 V_0^T 的测得的值 3.45 伏意味着 $\alpha = 18.55\text{cm}^{-1}$,该值在理论上应该比用于浓度比其小十倍的浓缩样本的值 α 大十倍。实际上,存在很好的相符性。小的差异可以归因于试验误差或由多重散射导致的偏离了 Beer 法则。

[0264] 图 27A、27B、27C 以及图 28A、28B、28C 总结了将新 LE 类型传感器用于另一种胶状悬浮物的结果(32 通道分辨率),其中该胶状悬浮物是一种含水硅浆,浓度为 12.5% (vol),其用于 CMP 处理。可以在不进行稀释的情况下对每个样本进行测量,这是因为硅的折射率较接近于水的折射率值。尽管得到的混浊仍然是显著的,但是它还是远远低于用于相同浓度悬浮物的典型值,其中这些相同浓度的悬浮物中包含的颗粒的折射率与周围液体折射率的匹配程度较差。

[0265] 图 27A 显示了用于完全浓缩硅 CMP 浆的测得的 PHD。图 27B 中显示了可靠脉冲高度范围内的得到的 dPHD(扩展的 y 轴)。图 27C 中显示了表示为原始样本悬浮物中颗粒浓度的得到的 PSD。使 y 轴扩展了 20 倍从而着重表现了位于 PSD 尾部的较低浓度的颗粒。

[0266] 然后,使相同的起始硅浆带有非常低浓度的 $0.993 \mu\text{m}$ 乳胶颗粒,即 $1.30 \times 10^5/\text{ml}$ 。图 28A 中显示了测得的 PHD 并且图 28B 中显示了得到的 dPHD,其中乳胶突出的影响是非常

明显的。图 28C 中显示了最终的浓度 PSD。可以容易地探测到添加的乳胶颗粒。如果考虑到这些添加的乳胶突出仅代表总颗粒体积的大约 0.5ppm,那么这对于新 LE 类型传感器来说是一种突出的能力。因此,该方法具有足够的灵敏度从而可以对由于多种物理和化学应力因素导致的基于硅的 CMP 浆中的异类颗粒族进行可靠的和大量的探测。这种潜在的有破坏作用的过大尺寸颗粒的增加经常与 CMP 处理过程中晶片表面上缺陷的增加相关,而这会导致可用集成电路装置的产量降低。如果具有在处理期间监视潜在不稳定 CMP 浆的“健康状态”的能力,并且这种能力对有问题的颗粒的浓度的非常微小变化具有灵敏度以及需要程度很小的稀释或不需要稀释,那么这种能力代表了 CMP 浆度量学中的一个显著进步。

[0267]

表 1

| [0268] | 颗粒直径 | 稀释 / 浓度 | 数量 /16ml | 最大脉冲高度 ΔV_{LE} |
|--------|---------------------|-------------------------|----------|------------------------|
| [0269] | 0.806 μm (“A”) | 800,000 : 1 of 10% (wt) | 37,870 | 33mV (0.66% of 5V) |
| [0270] | 0.993 μm (“B”) | 40,000 : 1 of 1% (wt) | 73,377 | 81mV (1.62%) |
| [0271] | 1.361 μm (“C”) | 20,000 : 1 of 1% (wt) | 56,815 | 221mV (4.42%) |
| [0272] | 1.588 μm (“D”) | 10,000 : 1 of 1% (wt) | 83,702 | 326mV (6.52%) |
| [0273] | 2.013 μm (“E”) | 2,000 : 1 of 0.45% (wt) | 83,481 | 482mV (9.64%) |
| [0274] | 5.030 μm (“F”) | 100 : 1 of 0.3% (wt) | 97,983 | 1552mV (31.0%) |
| [0275] | 10.15 μm (“G”) | 40 : 1 of 0.2% (wt) | 31,423 | 3385mV (67.7%) |
| [0276] | 20.00 μm (“H”) | 20 : 1 of 0.3% (wt) | 14,833 | 4473mV (89.5%) |

[0277]

表 2

[0278] 乳液浓度 (颗粒数 /ml) – 算得的 PSD 与预期值之间的关系 (*)

| [0279] | | 0.993 μm 峰值 | 1.361 μm 峰值 | 1.588 μm 峰值 |
|--------|----|------------------|------------------|------------------|
| [0280] | 样本 | 1 预期的 PSD | 预期的 PSD | 预期的 PSD |
| [0281] | A | 318 325 | 165 177 | 242 272 |
| [0282] | B | 168 163 | 190 177 | 252 272 |
| [0283] | C | 67 81 | 187 177 | 272 272 |

[0284] 图 29 示意显示了本发明的第一优选实施例,其中该实施例将本发明的新 LE 类型和 LS 类型 SPOS 传感包含在单个传感器中,并且具有两个独立的输出信号 V_{LE} 和 V_{LS} 。得到的双“LE+LS”设计提供了提高了的能力和灵活性,使得可以在较大颗粒尺寸范围内进行单颗粒计数和尺寸测量。可将 LS 类型传感器子系统用于使尺寸范围扩展到低于新 LE 类型传感器子系统提供的探测下限。颗粒尺寸下限所能扩展到的程度取决于多个参数。这些参数包含:测量流动通道内窄(典型地是聚焦的)光束的宽度 $2w$;光源的功率;散射光被收集用于实施新 LS 类型传感功能的角度范围;以及物理特性,包含颗粒和悬浮物流体的折射率。

[0285] 新的双 LE+LS 传感器包含一个光源 160,其优选地包含激光光电二极管模块,该模块典型地具有 600 到 1100 纳米 (nm) 范围内的输出波长。由该光源产生的光束 162 优选是准直的(平行的)并且是“圆形的”,即强度仅是与中央轴线的距离 r 的函数。进一步,该光束优选地沿任意垂直于光束传播轴线的轴线具有高斯强度分布,如等式 7 所描述的那样。新 LE+LS 类型传感器还包含聚焦装置 164,典型地为单片透镜或多片透镜,可以使起始准直光束 162 在 OSZ 168 中测量流动通道 166 的中央处聚焦为希望得到的光束宽度 $2w$,其与希望得到的颗粒尺寸范围相一致。假设该聚焦装置具有适当的焦距长度,那么就会产生用于

聚焦光束场的宽度和深度的可接受的值。后者优选地显著长于流动通道的厚度 b , 从而使得到的 PSD 的分辨率最优化。

[0286] 测量流动通道 166 是由适当的透明材料制成的, 其中该透明材料可以是例如玻璃、石英或蓝宝石, 或者是半透明材料, 例如 PTFE (如由 DuPont 制造的 Teflon™), 或者其它对于工作波长足够透明并且与流体颗粒混合物相兼容的适合塑料。典型的要求具备一种适当的流体系统, 其包含流动泵装置和用于对起始样本悬浮物进行自动稀释的可选装置 (可选), 从而有助于颗粒流体悬浮物稳定地流过流动通道 166。通常将流动速度 F 选择为与用于产生用于 LE 或 LS 类型传感器的校准曲线的值相同或接近。

[0287] 流动通道的厚度 b 应该足够小, 从而实现高的重合浓度极限以及尽可能均匀的光束宽度 (理想情况下 $b \ll$ 光场深度), 这会导致提高了的用于最终 PSD 的分辨率。但是, 它必须足够大, 从而防止由尺寸过大颗粒 (如流体 / 稀释液中的聚集的原颗粒和污染物) 导致的频繁阻塞。另外还选择流动通道的宽度 a , 从而在这两种互相竞争的影响之间实现妥协。较大的值会降低对流动的流体颗粒混合物的阻挡并且降低给定流动速度 F 的速率 (并且增加脉冲宽度)。但是, 参数 a 越大, 那么对于任意给定颗粒直径 d 来说, 传感器效率 ϕ_d 越低。这导致样本中较小比例的颗粒会对测得的 PHD 和最终 PSD 有实际贡献, 而该比例如果太小的话, 则可能并不是希望得到的。

[0288] 新 LE+LS 传感器包含两个独立的光收集和探测子系统, 并且这两个子系统用于独立地提取希望得到的 LE 和 LS 类型信号。可以使用小的光反射装置 (如反射镜) 来捕获 LE 类型信号, 其中该光反射装置所在的位置使得在入射窄光束 167 通过流动通道和流体颗粒混合物之后被截获。因此, 得到的透射光束 169 偏离该组合传感器的光轴, 并且投射到附近的光探测装置 D_{LE} 。该光探测装置典型地包含小面积、固态 (硅) 探测器, 该探测器工作于线性区域并且具有与光源 160 的波长相匹配的频谱响应, 因此可以提供具有可接受信号 / 噪声 (S/N) 比的输出信号。该探测器装置的典型输出是电流 (光电流), 并且可以由电流 - 电压转换器 (“互导”放大器) 170 对该电流进行处理, 从而得到通常希望得到的随时间变化的电压 $V_{EL}(t)$ 形式的输出信号, 如图 2 中所示。

[0289] 可替换的, 可以将小探测器元件直接放在光束从流动通道中通过后的光路上, 从而不再需要上述的中间的光反射装置。无论使用了反射镜还是探测器元件 “捕获” 透射光束, 都有两个要求。第一, 所使用的装置必须起到有效光束 “光阑” 的作用。也就是说, 它必须可以防止任何大比例的到达光通量被反射回到流动通道, 从而因此变成 “偏离” 光源。通过来自多个光学表面的不需要的内反射, 部分该偏离光可以到达散射探测器装置 D_{LS} , 从而通过使部分入射光强添加到得到的 LS 信号中从而破坏了该得到的 LS 信号。第二, 用于捕获 LE 信号的装置必须足够小, 从而不截获、并且因此不阻断来自任何角度的要被该光探测装置 D_{LS} 捕获和重新导引到该光探测装置 D_{LS} 的散射光线, 如下面讨论的那样。

[0290] 分别地, 在散射角 θ 的范围内收集源自通过 OSZ 168 的颗粒的散射光, 并且 $\theta_1 < \theta < \theta_2$, 其中由适当的孔径装置规定 θ_1 和 θ_2 , 并且该孔径装置例如由具有外部不透明部分 174、透明中部部分 176 以及内部不透明部分 178 的照相底片制成的环形掩模 172。由掩模 172 选择的散射光线可以投射到具有适当焦距长度和位置的收集透镜 180 上, 该透镜将发散的散射光线转换为近似平行的光束 182。然后, 典型地使用第二透镜 184 使光线重新聚焦到较小的光探测装置 D_{LS} 。与在 LE 子系统的情况一样, D_{LS} 的输出信号典型是电流,

典型地可以通过互导放大器 186 对该电流进行可选的处理,从而最终的输出是随时间变化的电压 $V_{LS}(t)$ 的形式,如图 2 中所示。

[0291] 通过脉冲高度分析仪 188 和 189,将信号 $V_{LE}(t)$ 和 $V_{LS}(t)$ 组织成各自的脉冲高度分布 PHD。然后,在计算机展开卷积装置 190 和 191 中分别对这两个 PHD 展开卷积,其中这两个计算机展开卷积装置最终计算一对各自的颗粒尺寸分布 PSD 192 和 193。

[0292] 很明显的是,简单地通过去掉(或者首先就没有安装)与不需要的子系统相关的光学元件、探测装置和信号调节电路,就可以仅将该实施例实现为一种 LE 类型传感器或 LS 类型传感器。在这种情况下,调整测量流动通道内聚焦光束的宽度 $2w$ 是有效的,从而使得到的 LE 或 LS 类型传感器的性能最优化。如前面讨论过的那样,该参数将影响用于两种传感模式的不同可用颗粒尺寸范围、重合浓度极限以及最小可探测颗粒尺寸。

[0293] 图 30 中显示了第二实施例。为了实现最大的能力和灵活性,该实施例也包含 LE 和 LS 类型子系统。但是,与在第一实施例中一样,如果需要的话,仅需要提供两个子系统中任意一个所需的器件。该实施例与图 29 的实施例之间的主要不同之处在于,在该实施例中使用光纤将来自远处光源 194 的光传输到传感器中,并且将捕获的 LE 和 LS 光“信号”从传感器传输到远处的光探测装置,该光探测装置类似地位于传感器之外。该设计的主要特点在于在传感器内物理上并不存在电子器件或相关电路。因此,基于该设计的传感器在传感器位置上并不需要电源,并且根据定义,基于该设计的传感器不会受到电子干扰的影响,其中电子干扰包含可能存在于紧邻使用传感器位置的偏离电磁辐射。

[0294] 如图 30 中所示,使用光纤 190 将光从外部光源 194 传输到传感器外壳内。有效、但不必要的是,使用单模光纤(而不是多模光纤)来实现这一目的。当这种类型的光纤与远处的激光光电二极管光源 194(该光源与适当的透镜 198 共同将光注入到光纤 190 的输入端)结合使用时,它实际上起到了光学“空间滤波器”或波导的作用。通过仅支持一种模式的光辐射,该光纤在其输出端输出空间上“干净”的圆形光束 199,并且该光束具有希望得到的高斯强度分布。通过使用简单的光学器件,如图 30 中显示的两个聚焦透镜 200 和 201,发散圆锥形光束在测量流动通道 166 内最终聚焦成具有希望得到的最终宽度 $2w$ 的窄光束 202,如上面讨论的那样。

[0295] 光纤 204 用于捕获透射通过流动通道的聚焦光束,并将其传输到连接到信号调节电路 206 的光探测装置 D_{LE} ,而该信号调节电路和光探测装置都位于传感器之外。光纤 208 用于捕获源自 OSZ 168 的具有一定散射角范围的散射光线,可选地使用类似于在第一实施例中用于实施 LS 子系统的那些光学器件,其中包含具有不透明部分 174 和 178 以及透明部分 176 的掩模 172,以及透镜 180 和 184。捕获的散射光传输到连接到信号调节装置 210 的单独的光探测装置 D_{LS} ,而该信号调节装置和光探测装置也都位于传感器之外。典型地,将光纤 204 和 208 选择为多模光纤。通常,由例如光纤 190 的单模光纤为光输入提供的空间滤波特性典型地对于光收集是没有用的。多模光纤的纤芯较大,从而使得它可以更容易地捕获感兴趣的所有光线,由此有助于 LE 和 LS 探测子系统的光学对准。在 PHA 188 和 189 处对信号调节装置 206 提供的信号 $V_{LE}(t)$ 和 $V_{LS}(t)$ 进行分析,并且在 190 和 191 处展开卷积从而提供各自的 PSD。

[0296] 如所示的,图 30 的实施例产生了一种电子无源传感器。因此,该设计对于恶劣环境中的颗粒尺寸测量具有潜在的用处,而经常会在“在线”过程监视中遇到这种恶劣环境。

这种例子涉及爆炸环境。基于图 30 的实施例的传感器,使得在传感器的使用 / 安装处不再需要麻烦和昂贵的防爆外壳(包含惰性气体净化系统)。另一个例子是包含高电平电磁辐射或电子电源线噪声的环境,其中这些高电平电磁辐射或电子电源线噪声会导致电子电路容易受到所致噪声的影响。通过使用图 30 的实施例,光源和探测装置可以位于远处,在该处的电子环境较安静并且对电子屏蔽的要求也没那样苛刻。

[0297] 该实施例的另一个优势在于降低了的复杂度,以及因此降低了费用。这对于要求在不同位置处有多个传感器的用途来说是非常大的优势,在这种应用中替换和服务是重要的考虑因素。除了由于与颗粒污染源(涂覆)和 / 或溶剂相关的刻蚀对内表面造成了损伤以致可能需要替换流动通道之外,不需要替换其它器件。而是,在中央位置处需要进行与替换激光光电二极管光源和维修电子电路(相关于光探测装置)相关的不可预测的、耗时的、昂贵的服务。根据推测,通过在集中的、最优化的位置实现多数传感器服务功能,可以降低或避免在使用传感器的位置由环境提出的挑战,这些环境挑战包含极端的温度和湿度、危险 / 爆炸性空气以及难以触及。

[0298] 图 31 中显示了第三实施例,该实施例将本发明的两种不同的 LE 类型传感装置包含进同一个物理传感器中。该新“双 LE 类型”传感器包含相似的光源 160,该光源典型地与图 29 的实施例中使用的激光光电二极管模块是同一种类型,并且产生准直的、圆形的、具有高斯强度分布光束 162。(可替换的,如在图 30 的实施例中那样,可以由光纤从外部光源装置将起始光束传输进来)。由分束器装置 214 将该光束分成具有近似相等强度的两个光束 212 和 213。(典型的可接受强度比范围从 50/50 到 60/40,或者甚至是 70/30)。

[0299] 在 216 处,在测量流动通道 166 的中央处,通过分束器 214 的原始光束部分的宽度降低到希望得到的值 $2w_1$ 。通过使用适当的聚焦装置 218,该光束通过第一 OSZ 219,并且该聚焦装置典型是单片或多片透镜,其与图 29 中实施例中使用的装置类似。在该光束通过流动通道之后,其投射到光探测装置 D_{LE1} ,并且该光探测装置典型地包含较小的硅光电二极管。在 220 处,典型地使用互导放大器对得到的光电流信号进行处理,从而产生希望得到的随时间变化的 LE 类型信号 $V_{LE1}(t)$ 。(可替换的,可以使用光纤捕获透射光通量并将其传输到原处光探测装置,如在第二实施例中那样)。在 222 处对信号 $V_{LE1}(t)$ 进行分析,从而产生 PHD,并且在 224 处展开卷积,最终形成希望得到的 PSD。

[0300] 如结合图 8A 和 10 在上面讨论过的那样,对于任意给定的光束宽度,存在一种颗粒直径范围,并且在该直径范围内具有可接受的响应灵敏度,即随着颗粒直径 d 的小变化,最大脉冲高度 $^M \Delta V_{LE}$ 会有显著变化。对于在上面进行了广泛讨论的 $10\text{--}11\text{ }\mu\text{m}$ 的光束宽度,在 1 到 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的近似尺寸范围内可以获得可接受的灵敏度和分辨率,即从光束宽度的十分之一到光束宽度的二倍,或者 $(0.1\text{--}2) \times (2w_1)$ 。

[0301] 因此,有效的是,通过相同的传感器提供另一种 LE 类型测量,并且对于该测量来说,其有效测量尺寸范围的低尺寸端近似在该第一种新 LE 子系统结束的高尺寸端处开始,如使用上面的例子在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 处开始。如果由该第二 LE 类型子系统在流动通道中产生的光束宽度 $2w_2$ 遵循近似关系 $2 \times (2w_1) \approx 0.1 \times (2w_2)$ 或者 $(2w_2) \approx 20 \times (2w_1)$,那么这就可以得到实现。如果使用上述例子,那么这就意味着第二聚焦光束的宽度为 $200\text{ }\mu\text{m}$,从而对于第二 LE 类型子系统近似为 20 到 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的有效尺寸范围。

[0302] 如图 31 中所示,可以容易地实现该第二 LE 类型子系统。使用适当取向的反射镜

226, 可以将受到分束器 214 偏转的原始光束部分 213 重新导向到流动通道。使用适当的聚焦装置 228 使光束 213 的宽度在流动通道内降低到希望得到的 $2w_2$ 。显然, 该聚焦装置的焦距长度和位置与要求用于聚焦光束 212 的相应参数不同。可替换的, 如果光束 213 的宽度已经接近于该第二 LE 类型子系统希望得到的值, 那么它可以直接通过流动通道而不使用聚焦装置。将第二光束 213 导引通过测量流动通道 166 中的第二 OSZ 232, 并且到达第二光探测器 D_{LE2} 。在 234 处对信号进行调节从而得到信号 $V_{LE2}(t)$, 并且在 236 处对该信号进行分析, 从而产生 PHD, 并且在 238 处对该 PHD 进行展开卷积, 最终形成希望得到的 PSD。

[0303] 图 31 中的插图 230 显示了用于两个 LE 类型子系统的传感器响应之间的关系, 即 ${}^M\Delta V_{LE1}$ 比 d 以及 ${}^M\Delta V_{LE2}$ 比 d 。使用上述例子, 通过该双 LE 类型子系统可以分析宽范围的颗粒直径, 保守估计的颗粒直径范围为 1 到 $400\mu m$ 。

[0304] 由两个新 LE 类型子系统产生的信号彼此之间是独立的。大体上, 由每个子系统产生的 PHD 是由完全不同的颗粒产生的。如果每个 PHD 包含统计数量很大的颗粒 (即在每个脉冲高度信道中), 那么在一次分析测量期间由一个子系统探测到的部分颗粒或全部颗粒是否也被另一个子系统探测到就不重要了。如果两个光束的光轴精确地“对准” (即具有相同的 x 轴值), 并且假设第二光束大于第一光束, 那么通过由第一光束规定的 OSZ 的所有颗粒应该也通过由第二光束规定的 OSZ。实际上, 有必要在两个间隔内收集数据, 首先对于较小的第一光束以较高的浓度收集, 然后对于较大的第二光束以较低的浓度收集, 从而避免重合效应。

[0305] 图 32A 中显示了第四实施例。除了光学 LE 类型传感器, 该实施例还包含本发明的 LS 类型传感器, 并且该 LS 类型传感器包含用于选择不同角度范围的装置, 其中在这些角度范围内收集散射光并且将它们导引到探测装置 D_{LS} , 从而获得希望得到的 LS 信号 $V_{LS}(t)$ 。如上面讨论过的那样, 散射强度不仅是颗粒尺寸的函数, 也是颗粒和周围流体的折射率的函数。适当选择该角度范围会使总强度信号得到最大化, 而同时可以避免积分强度与颗粒直径之间关系的响应曲线中的“反转” (非单调特性)。因此, 对传感器性能的最优化通常要求对于感兴趣的每种用途 (颗粒类型) 采用不同的角度范围。

[0306] 如显示的那样, 通过旋转包含几个不同孔径掩模 241、242、243 以及 244 的轮, 可以选择希望得到的角度范围。每个掩模被设计为仅允许位于希望得到的角度范围内的散射光线透射通过, 从而允许它们到达光收集透镜。将该轮旋转到几个适当位置的其中一个, 其中每个位置可以确保希望得到的掩模的正确对准, 即掩模的中央位于由入射光束和透镜规定的光轴上。可以手动地将轮子旋转到希望得到的位置, 并且然后锁定在该位置。可替换的, 可以使用微型电机 246 (如步进电机类型) 以及齿轮和皮带系统 248, 利用来自传感器中央控制系统的电信号, 从而自动地定位所需的掩模。

[0307] 图 32B 表示了正视图, 其中清晰表示了四个掩模 241-244。图 32B 中的插图指示了可能使用的四种类型的角度范围, 其中这些角度范围分别由最小和最大的接受角 θ_1 和 θ_2 规定。掩模 241 选择窄范围的小角度, 即 θ_1 和 θ_2 都较小。掩模 242 选择宽范围的角度, 即 θ_1 小, 而 θ_2 较大。掩模 243 选择窄范围的较大角度, 即 θ_1 较大, 而 θ_2 仅比它大一些。掩模 244 选择宽范围的较大角度, 即 θ_1 较大, 而 θ_2 比它大很多。

[0308] 图 32A 中显示的其它器件与图 29 的实施例中具有相同附图标记的器件是相同的。

[0309] 在该实施例的一种变型中, 可以用由金属或塑料制成的薄矩形板或者卡片来替代

图 32A 中的旋转轮,其中这些板或卡片包含单个孔径掩模。将该卡片插入到位于传感器外壳侧面上适当位置处的插槽,这会使该孔径掩模与流动通道和收集透镜之间形成正确的对准。通过插入包含用于某种特定样本的适当孔径掩模的特殊卡片,可以选择用于测量该特定样本的所需角度范围。然后,如上面讨论过的那样,在对原始 PHD 数据进行处理之后,使用对应于所选择的角度范围的校准曲线从而获得 PSD。

[0310] 可替换的,在该实施例的另一种变型中,可以用单个的可调整环代替图 32B 中的旋转轮,其中该可调整环包含围绕在可调整的内部不透明可变光阑周围的可调整的外部不透明可变光阑,并且外部不透明可变光阑与内部不透明可变光阑具有相同的中央轴线。该内部和外部不透明可变光阑之间的环形区域是透明的,这使得源自流动通道中 OSZ 的散射光线到达光收集透镜,并且最终到达 LS 探测器装置 D_{LS} 。由该可调整透明环的内部和外部周长规定了散射角范围,其中在该散射角范围内,散射光线被收集并且对 LS 信号有贡献。在其中的一种形式中,可以使用一种机械装置,如两个独立的类似于用于照相机中的可调整的机械可变光阑的装置,来调整该环形接收区域。在其中的另一种形式中,可以使用一种电光装置,例如二维液晶显示器,从而实现该可调整环。通过将适当的电压施加到两组相邻的环形半透明电极,在两个不透明的内部和外部区域之间可以规定出近似透明的环形区域。我们可以选择所需的散射角 θ 范围,其中 $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$,并且这是通过将电压施加到两组相邻的环形电极从而得以实现的,其中这两组电极规定了我们希望是不透明的区域,即 $\theta < \theta_1$ 和 $\theta > \theta_2$ 。

[0311] 图 33 中显示了第五实施例。与其它实施例一样,该实施例包含本发明的新 LE 类型或 LS 类型 SPOS 子系统,或者同时包含这两种子系统,并且使用单个光源和光束聚焦装置来规定 OSZ。第六实施例的区别特征是使用了具有椭圆高斯强度分布的光束,而不是用于其它实施例中的圆形高斯分布。仍然由等式 7 描述了得到的流动通道中聚焦光束的强度分布,但是其中由量 $(x/p)^2 + (z/q)^2$ 代替了量 I^2/w^2 ,并且 $p > q$ 。参数 p 和 q 分别是光束的椭圆形虚构表面的半主轴和半次轴,并且在该表面上强度降低到 $(1/e^2) \times I_0$,或者 $0.135I_0$,其中 I_0 是光束中央处 ($x = z = 0$) 的强度。将得到的椭圆聚焦光束的“纵横”比规定为 p/q ,其中该纵横比为该聚焦光束被拉伸的程度。在特定情况下,其中 $p/q = 1$,该椭圆光束变成圆形光束。

[0312] 通过激光光电二极管光源可以提供椭圆光束,其中该激光光电二极管光源典型地在校准之前提供椭圆光束,以作为开始。通过圆柱透镜组合或非球面透镜也可以得到这种形状的光束。当要求具有特定纵横比的椭圆光束时,可以结合使用激光光源和这些类型的透镜,或者使用这样一种组合从而形成具有可调整纵横比的光源。因此,光源 250 可以是投射出具有适当纵横比的光束的激光光源,或者它可以包含圆柱透镜和 / 或非球面透镜的组合以提供所需的椭圆光束 252 的纵横比。然后,透镜 254 使椭圆光束聚焦到测量流动通道 166 中的 OSZ。然后,光探测器 D_{LE} 探测到来自 OSZ 的光束。然后,通过在 256 处对输出信号进行调节从而产生信号 $V_{LE}(t)$ 。在 PHA 258 中对该信号进行分析,从而得到 PHD,并且在 259 处对该 PHD 展开卷积,从而最终产生所需的 PSD。

[0313] 与前面一样,该聚焦装置使入射光束的横截面尺寸在流动通道内变小。现在,得到的聚焦光束的“宽度”仅对于特别选择的正交于光轴的轴线才有意义。尽管单个参数 $2w$ 足以用于描述圆形光束的宽度,但是现在需要两个参数 $2p$ 和 $2q$ 来描述椭圆光束。聚焦椭

圆高斯光束的纵横比与聚焦之前的原始（准直的）光束的纵横比是一样的。如图 33 中所示，通常情况下，聚焦椭圆光束在流动通道中所需的取向的形式是使宽度为 $2p$ 的主轴垂直于颗粒流动方向。该轴线还平行于 x 轴，其中该轴沿着规定流动通道的宽度 a 的方向（图 3）。宽度为 $2q$ 的聚焦光束的次轴平行于 z 轴和流动方向。

[0314] 光束的形状从圆形变成椭圆形会导致几种显著的后果，其中光束形状的这种变化会导致照射区域进一步扩展到流动通道的宽度 a 之外。第一，得到的 OSZ 也具有椭圆形横截面。与对于圆形光束的情况相比，现在具有给定水平的入射光强度从光束的中央轴线 ($x = z = 0$) 进一步向外扩展。因此，流动通过通道的较大比例颗粒会使将要检测的 LE（或 LS）信号中的必然混浊度达到最小值，并且由此对测得的 PHD 有贡献。因此，与宽度为 $2w$ 的圆形光束相比，如果假设两种光束具有相同的总强度（即光通量），并且 $2p > 2w$ ，那么对应于给定的颗粒直径 d ，传感器效率 ϕ_d 将会增加。表面上看， ϕ_d 的增加代表了传感器性能的改善。但是，这种“增益”伴有传感器重合浓度极限的下降。如果主要目标是使在不需要进一步稀释的情况下可以对起始样本悬浮物进行测量的浓度最大化，那么以重合浓度的下降为代价实现的 ϕ_d 的改善可能会导致净劣势。本发明的新 LE 或 LS 类型传感器的一种主要的定义性特征是，该传感器获得较准确和可复现 PSD 的能力，而无需考虑这样一种事实：通过该传感器的颗粒中仅有较小的一部分实际上对测得的结果有贡献。必要的只是在每个相关脉冲高度通道中收集到统计数量很大的颗粒。

[0315] 用椭圆光束代替正常圆形光束的第二个后果是，传感器的灵敏度会有一定程度的恶化。由于沿流动通道的宽度方向拉长了光束，受到入射聚焦光束照射的横截面积以及因此相应的 OSZ 的横截面积会增加。因此，从消光方面来看，与圆形光束的受阻断部分相比，受到给定尺寸颗粒有效“阻断”的受照射区域的比例减小了，其中 $2w = 2q$ ，但是 $2w < 2p$ 。因此，传感器的最小可探测颗粒尺寸阈值将会高于用于圆形光束的阈值。

[0316] 相比之下，椭圆光束导致的第三个后果是有优势的。得到的探测器会具有较高的分辨率，即大体上 PHD 会对尺寸基本相同的颗粒提供“更清楚”的区分。现在，有较长的区域沿着 x 轴扩展，并且在该区域内入射光强基本上是相同的。这构成了高斯强度分布的“顶部”，该分布的长度沿主轴扩展。因此，存在具有不同 $|x|$ 值的轨迹的较大集合，并且当颗粒沿着这些轨迹通过 OSZ 时，它们暴露于类似的强度。因此，PHD 对于具有给定尺寸均匀颗粒的响应变得“更加陡峭”。在紧邻和包含 PHD 峰值的窄范围脉冲高度内，存在较大比例的颗粒，并且对于低于最大截止值的脉冲高度，分布更加迅速地降低到较低数值。因此，对于用于对 PHD 展开卷积的各种基本矢量来说情况也是如此，这会导致得到的 dPHD 和相应的 PSD 具有较高的分辨率。该最后一种特征仅包含椭圆形光束的潜在优势，这与上述伴随产生的劣势相比具有更重要的意义。用户必须根据用途来确定是净优势还是净劣势。

[0317] 有益的是认识到这样的事实：椭圆形光束代表从传感器照射的一种“极端”到另一种“极端”的演化过程中的中间步骤。在本发明引入的传感器设计谱线的一端，存在一种宽度为 $2w$ 的“严格”圆形光束，其产生可能实现的最窄照射区域，并且因此产生最大的非均匀响应。不同的颗粒轨迹会导致对于相同尺寸的颗粒具有最大范围的脉冲高度，如在前面广泛讨论过的那样。存在一种与该最大非均匀照射相关的主要劣势，即在脉冲高度和颗粒尺寸之间存在可能出现的最大模糊，而这要求使用一种展开卷积过程从而根据测得的 PHD“恢复”合理可靠的 PSD。

[0318] 在传感器设计谱线的另一端,存在常规 LE 或 LS 类型传感器使用的常规照射方案,并且我们之前已经对其进行了回顾(图 1),其中薄的“刀锋状”入射光延伸穿过流动通道。理想情况下,入射光强沿着 x 轴(如在最大强度处, $z = 0$)会有非常小的变化。对于任意给定的 x 轴值,沿着 z 轴的变化遵循高斯分布。在该另一种“极端”情况中,由给定尺寸颗粒产生的脉冲高度在理想情况下对于所有轨迹都是相同的。因此,测得的 PHD 不要求进行展开卷积过程,这是因为除了相差校准系数之外,它实际上等效于最终希望得到的 PSD。这种情况代表了传感器特性中最完全的折衷方案,以较差的灵敏度和显著降低的重合浓度为代价换取可能实现的最高分辨率。该用于常规 LE 或 LS 类型传感器中的照射方案,在概念上是通过使用椭圆形光束,并且“拉伸”其主轴使 p/q 在理想极限中接近于无穷,从而得以实现的。很明显的是,将具有适度纵横比(如 $p/q = 2$ 到 4)的椭圆形光束用于新 LE 或 LS 类型传感器中会导致传感器性能上的折衷。如果通过某种方法使得颗粒尺寸分辨率得到了改善,那么作为代价,灵敏度和重合浓度就会下降。

[0319] 图 34 中显示了新 LE 类型传感器的第六实施例。光源 262 产生准直的较宽的起始光束 261,并且该光束通过流动通道 166,而没有使用其它六个实施例中所使用的聚焦装置。典型的是,得到的圆柱形 OSZ 的有效宽度将会大到不可接受的程度,这会产生较差的灵敏度(即较高的最小直径阈值)和较低的重合浓度。通过使用一种新装置可以实现用于 OSZ 的较窄的、更加可接受的有效宽度,其中该新装置用于限制一种区域,并且来自该区域的透射光线会对 LE 信号有贡献。通过使用位于图 34 中 LE 类型传感器设计方案的“探测侧”(与光源侧相对)的特殊准直光学系统可以实现这一目的。

[0320] 例如,可以使用特殊设计的梯度折射率(“GRIN”)准直透镜 262,其具有非常窄的接收角度范围和适当小的孔径尺寸,从而捕获传输通过流动通道的总光通量中较小的一部分。典型的是,可以通过光纤 264 将来自 GRIN 准直透镜 262 的输出容易地传输到光探测装置 D_{LE} ,其中该光探测装置 D_{LE} 连接到适当的信号调节电路 266,并且会产生所需的 LE 信号 V_{LE} ,该信号适用于在 PHA 268 处进行的后续处理和 270 处的展开卷积,如在上面广泛讨论过的那样。GRIN 准直透镜 262 根据其接收孔径在理想情况下仅捕获那些紧密围绕在入射光束 261 的中央轴线附近的光线 263,从而降低得到的 OSZ 的有效宽度。实际上,GRIN 器件 262 仅捕获位于与入射(透射通过的)光束 261 的高斯强度分布的顶部或顶部附近的光线。

[0321] 因此,得到的 OSZ 上的照射强度是较均匀的,并且在由 GRIN 透镜 262 规定的圆柱区域之外具有基本上为零的较陡峭的“截止”。因此,如果具有较宽的起始光束,那么对于给定颗粒直径 d 的传感器效率 ϕ_d 比不是在这种条件下获得的传感器效率要小。这还会导致对于较小颗粒具有较高的灵敏度和较高的重合浓度。在这种情况下,OSZ 的横截面更加接近于一种具有均匀强度的圆柱,其具有一种“硬”的虚构表面,并且在此之外的强度迅速下降到零。大体上,得到的 PHD 具有较高、较窄的峰值,这是因为通过 OSZ 的颗粒会导致脉冲具有较为相似的高度。因此,得到的 PSD 具有更好的尺寸分辨率。不可避免的一种劣势是在直径比例图的高端会有较差的尺寸分辨率,这是由于 OSZ 的更加陡峭的截止(“硬”的外部边界)造成的。基于图 34 中显示的简单方案,得到的传感器的特征和性能将会取决于 GRIN 透镜 262 的详细设计指标。

[0322] 尽管显示了用于 PHD 的展开卷积中的矩阵,但是可以按照多种方式改变该矩阵,其中该矩阵在垂直的列和在矩阵上水平延伸的行中具有基本矢量,并且该垂直列的颗粒尺

寸按照从左到右的顺序增加,而该行的脉冲高度按照从上到下的顺序增加。例如,列基本矢量可以变成行基本矢量,或者该列的颗粒尺寸增加可以按照从右到左的顺序增加。如果使用了行基本矢量,那么颗粒尺寸可以按照从上到下或从下到上的顺序增加。类似的是,如果使用了脉冲高度列,那么脉冲高度通道可以按照从左到右或者从右到左的顺序增加。还应该注意到,可以将包含测得的 PHD 的列数据源矢量安排成一行和 / 或可以在一种方向上或者在相反的方向上增加。因此,应该理解,当用于本说明书和权利要求中时,术语“列”和“行”是可以互换的并且增加的方向是可以逆转的。

[0323] 尽管已经特别显示了本发明,并且参考本发明的优选实施例对本发明进行了描述,但是本领域的技术人员应该理解,可以对本发明进行上述和其它的形式和细节上的改变,而不偏离本发明的精神和范围。

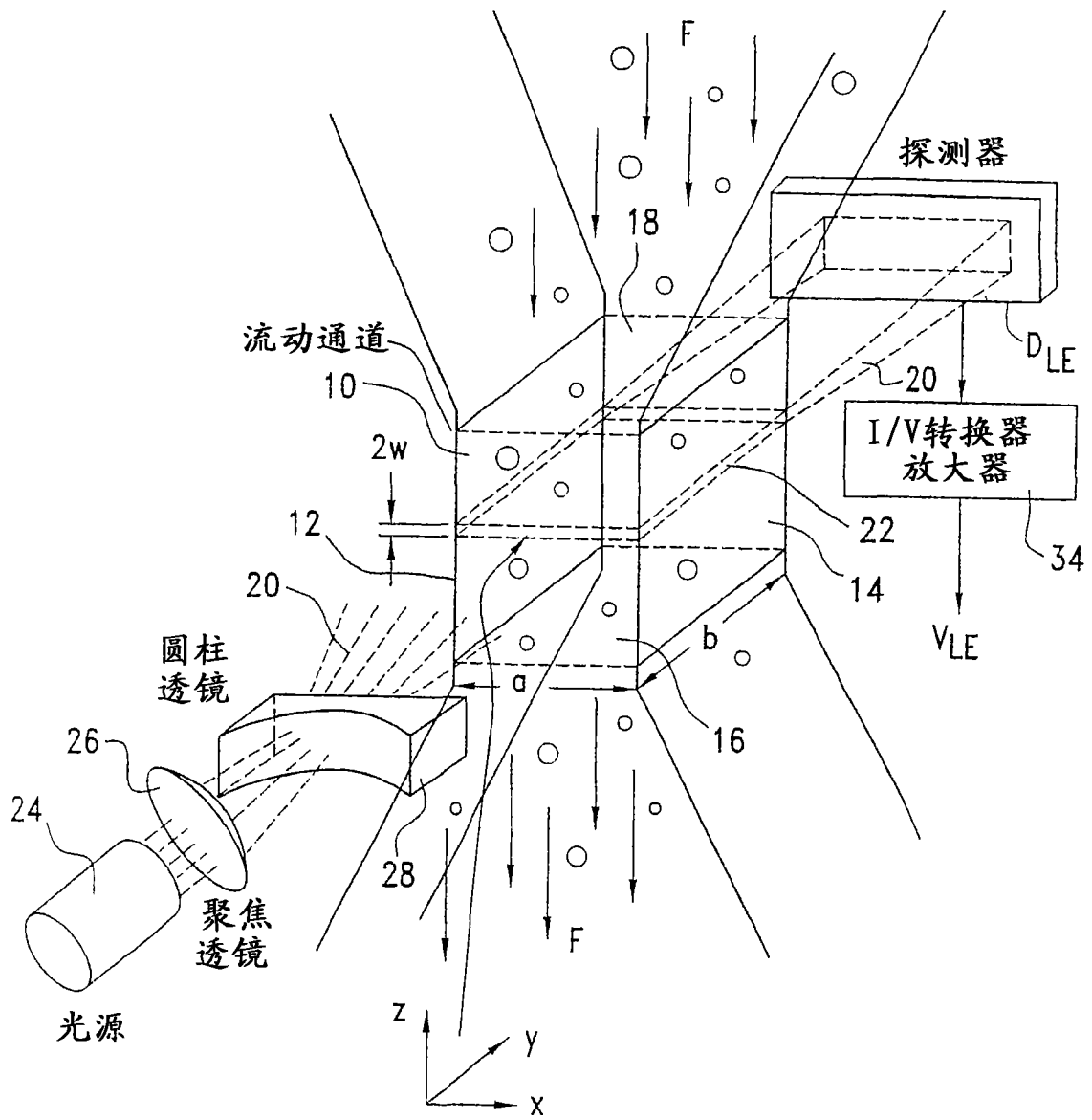


图 1
(现有技术)

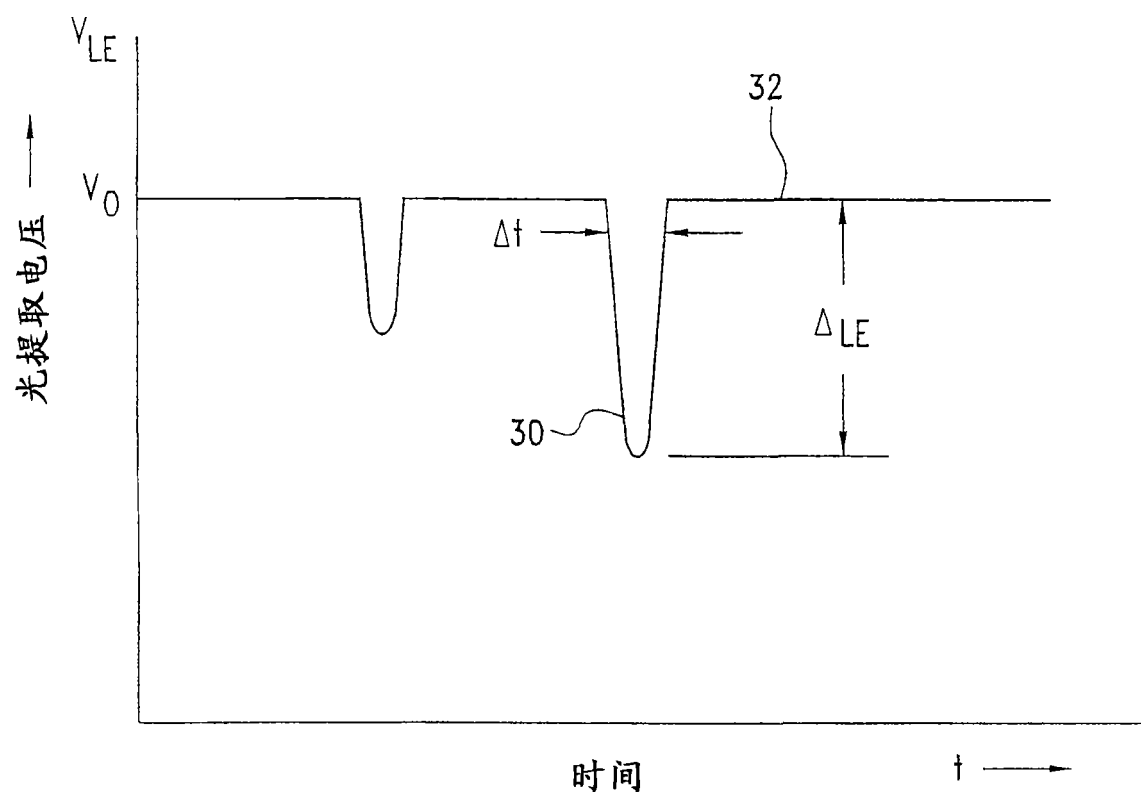


图 2
(现有技术)

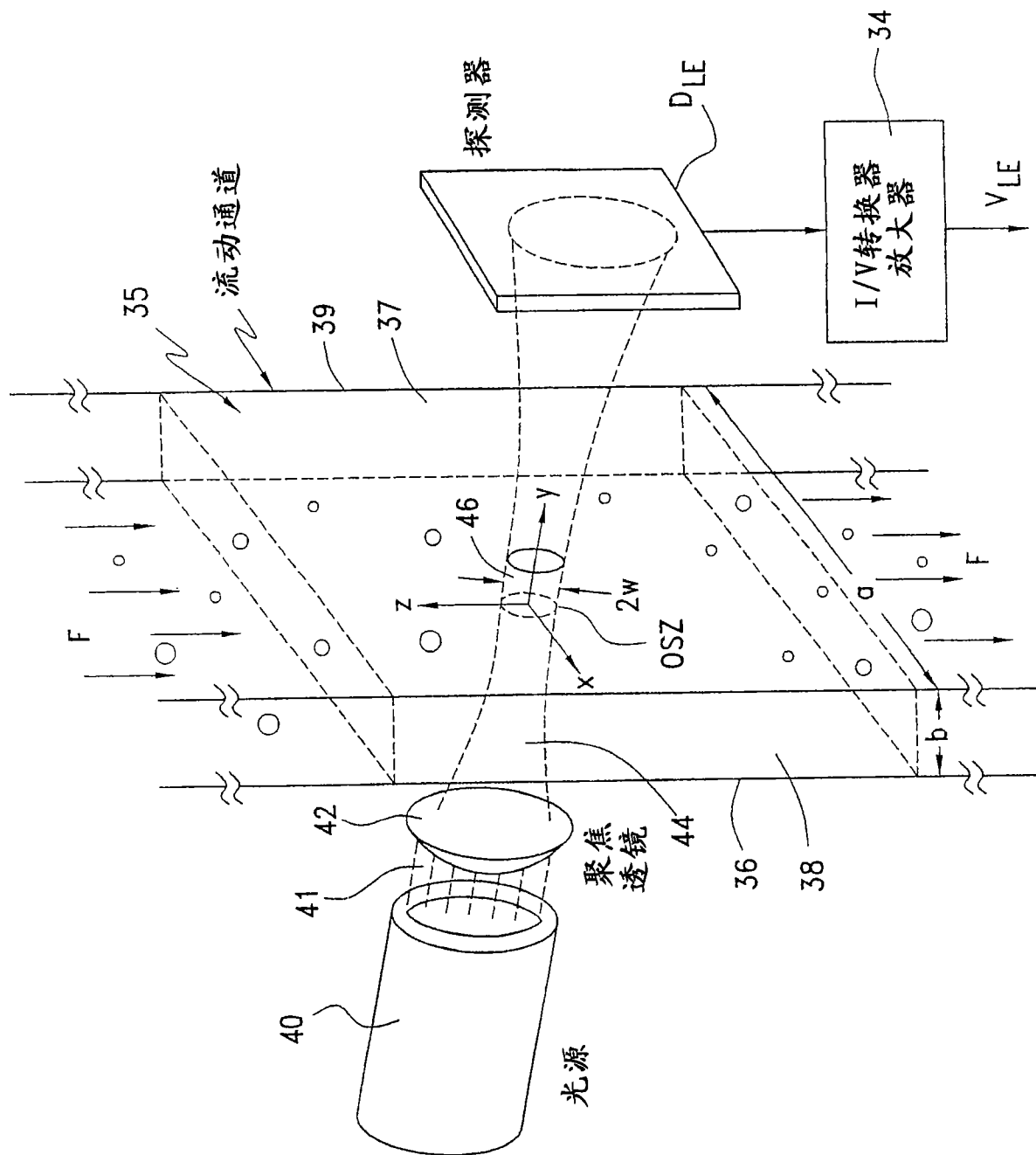


图 3

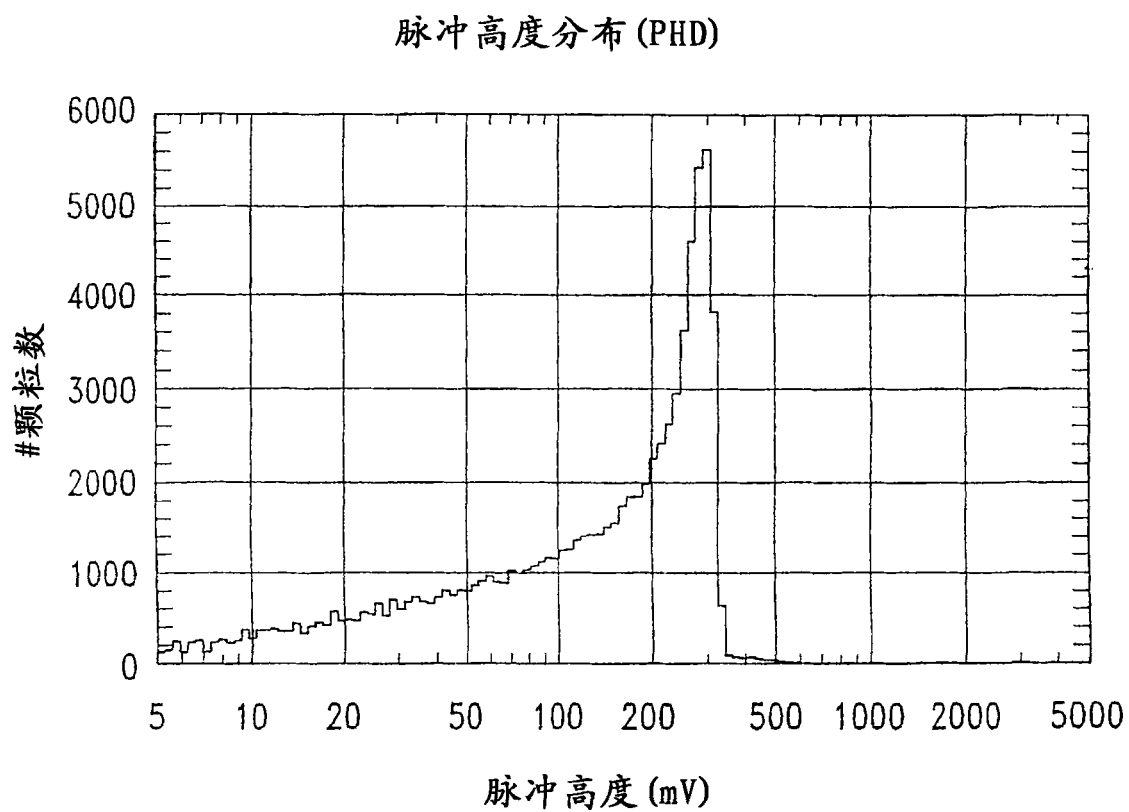


图 4

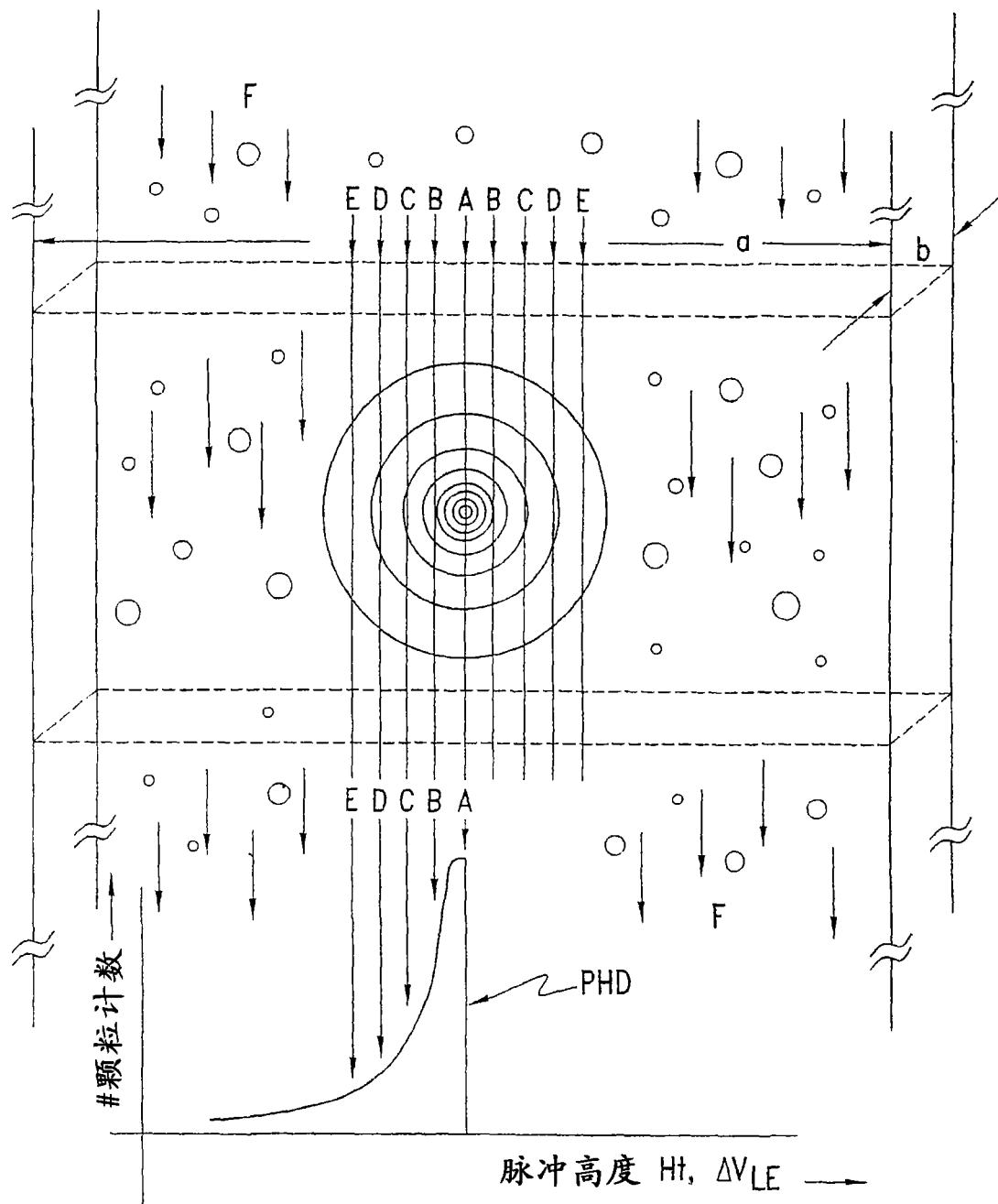


图 5

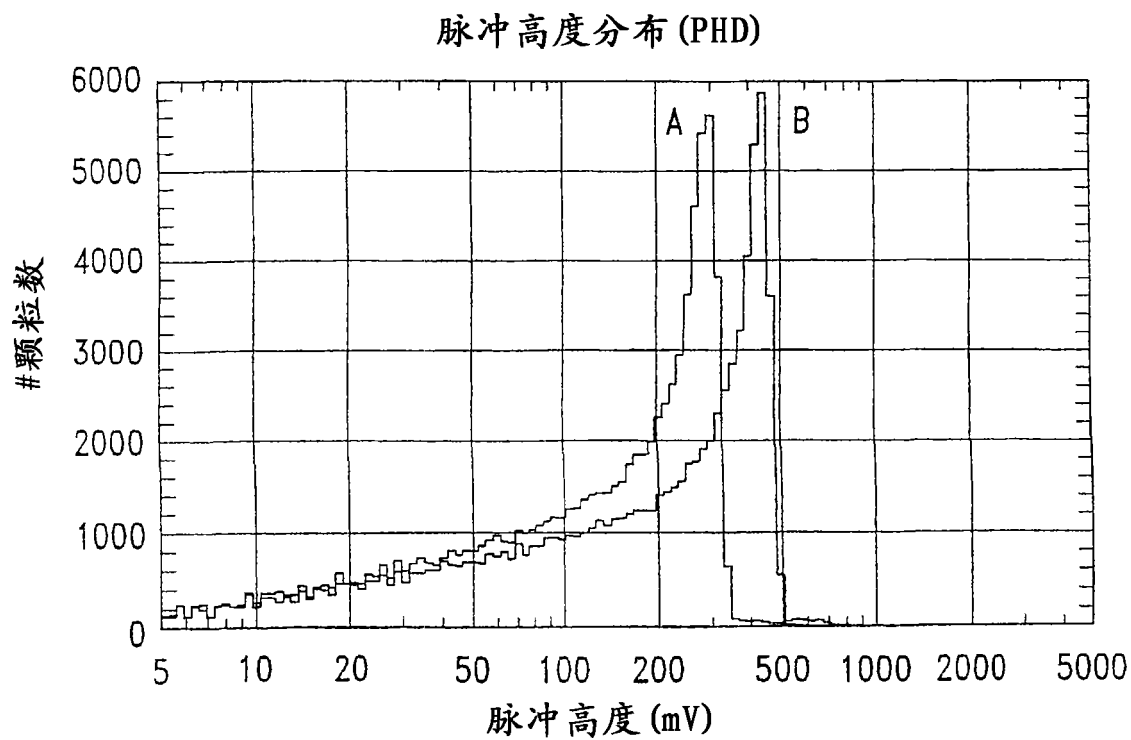


图 6

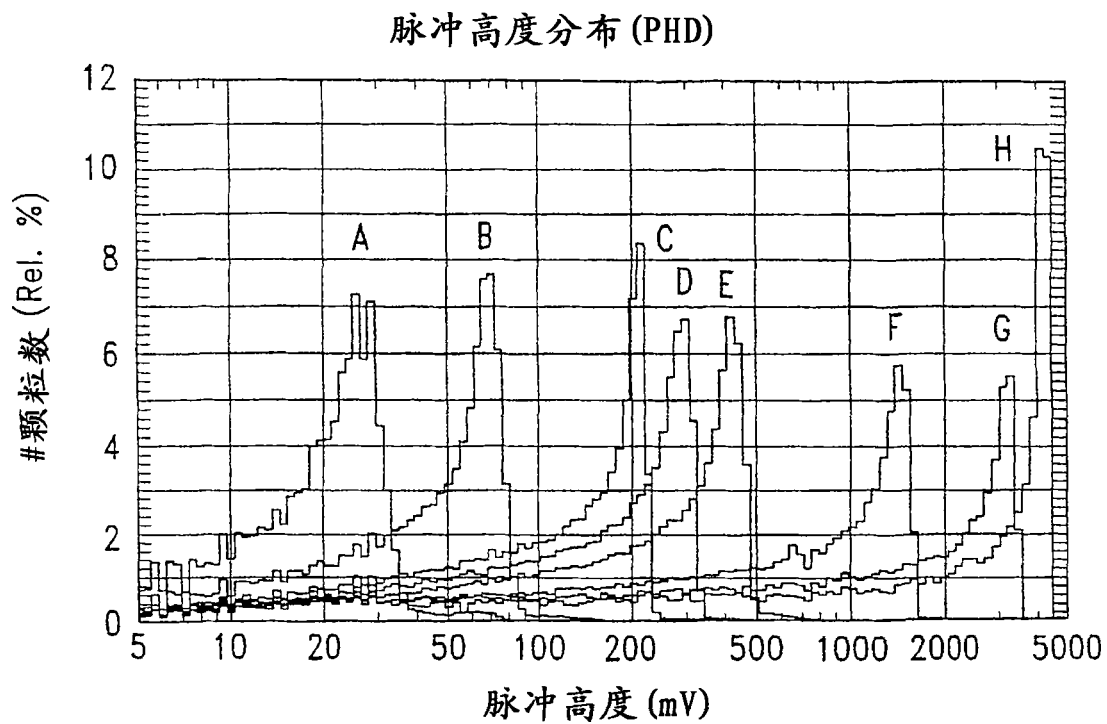


图 7

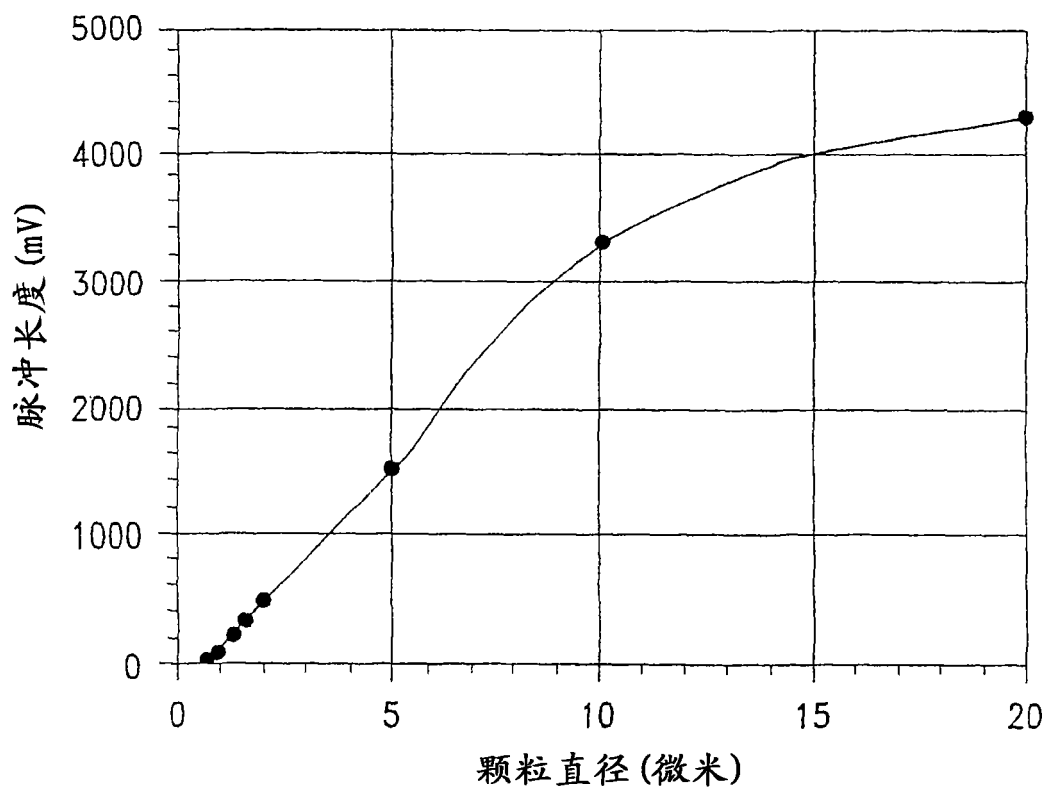


图 8A

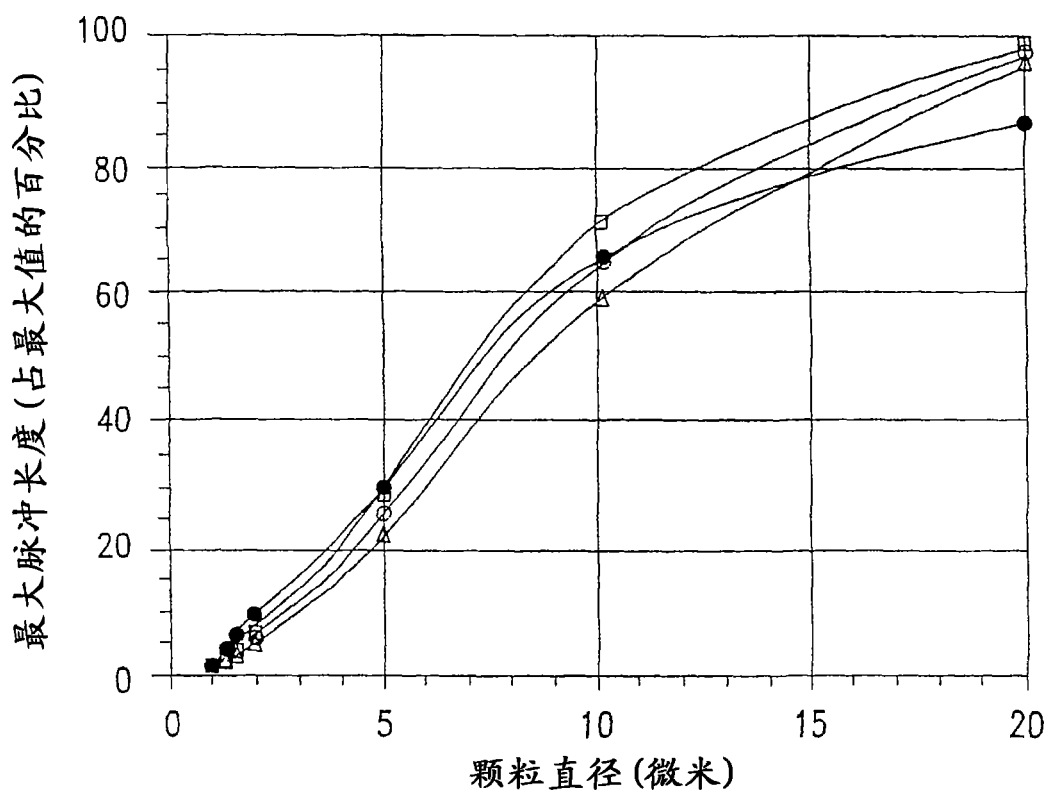


图 8B

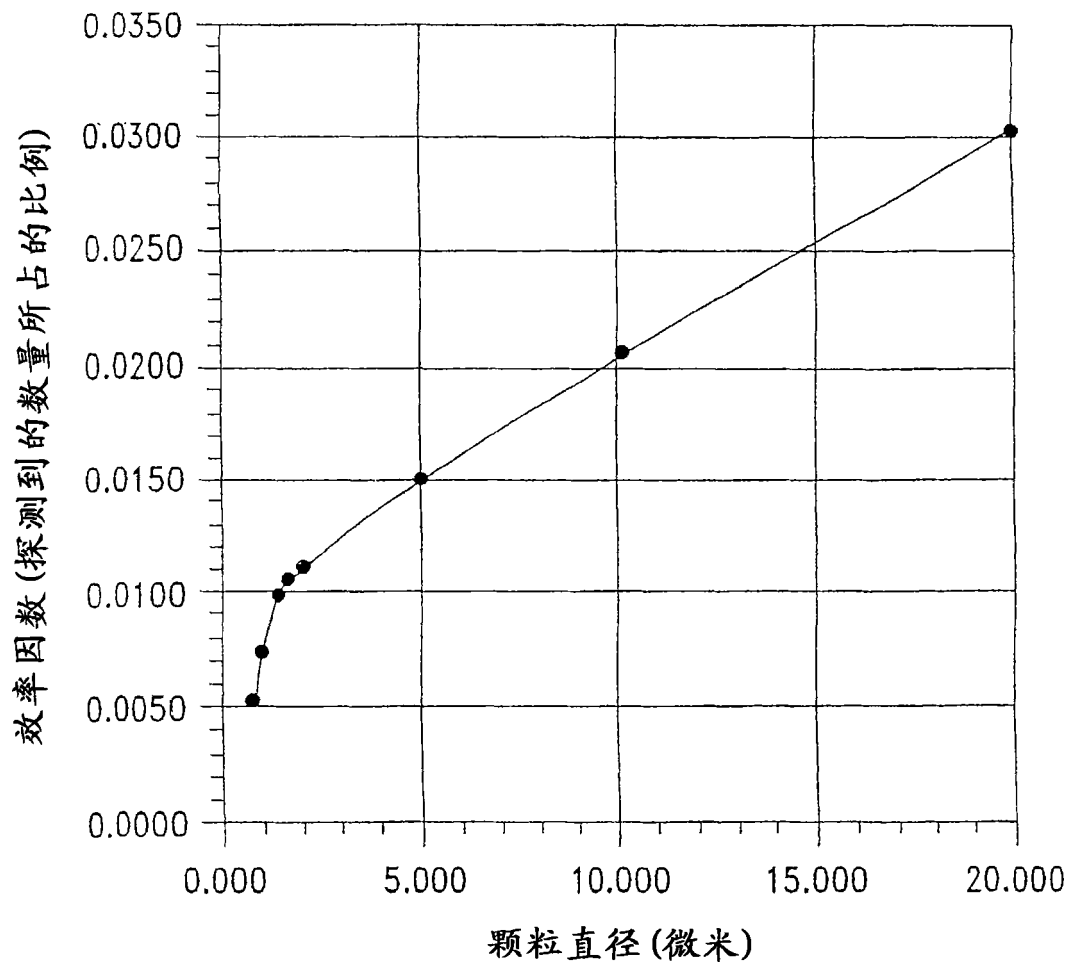


图 9

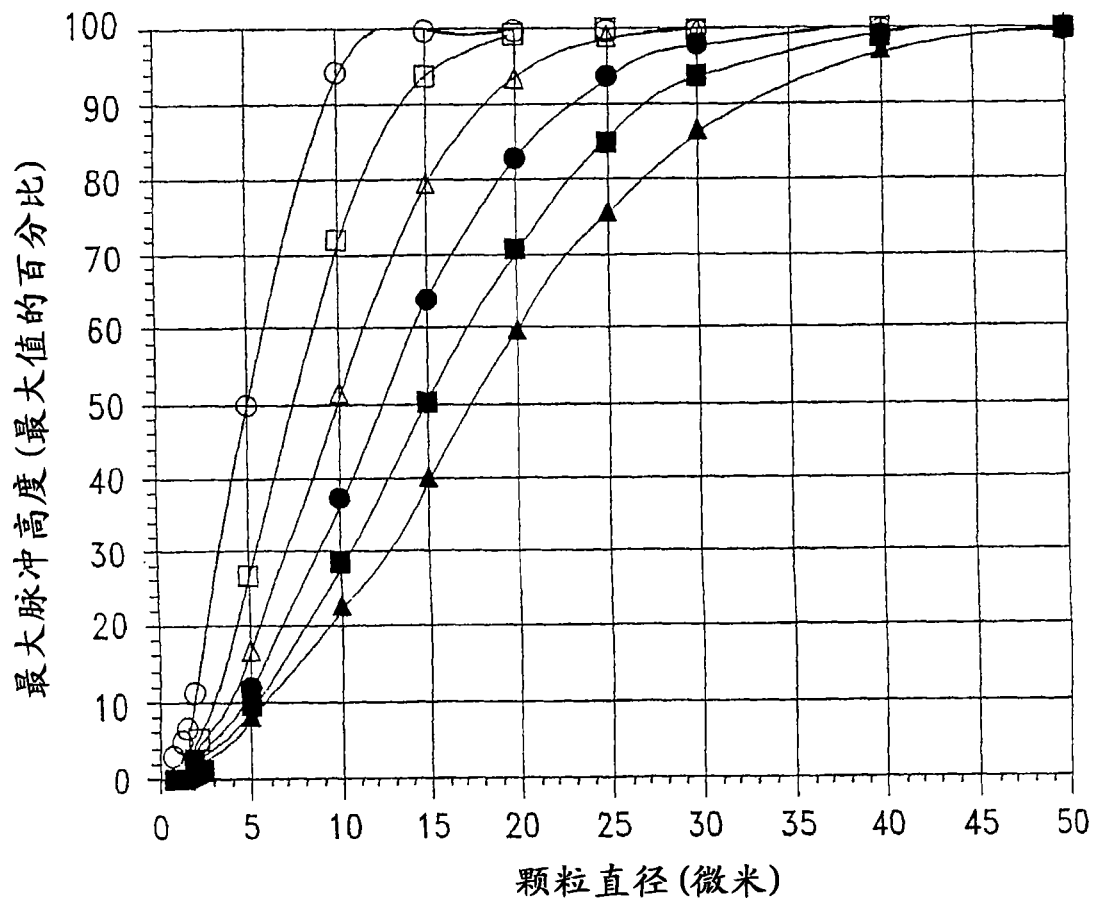


图 10

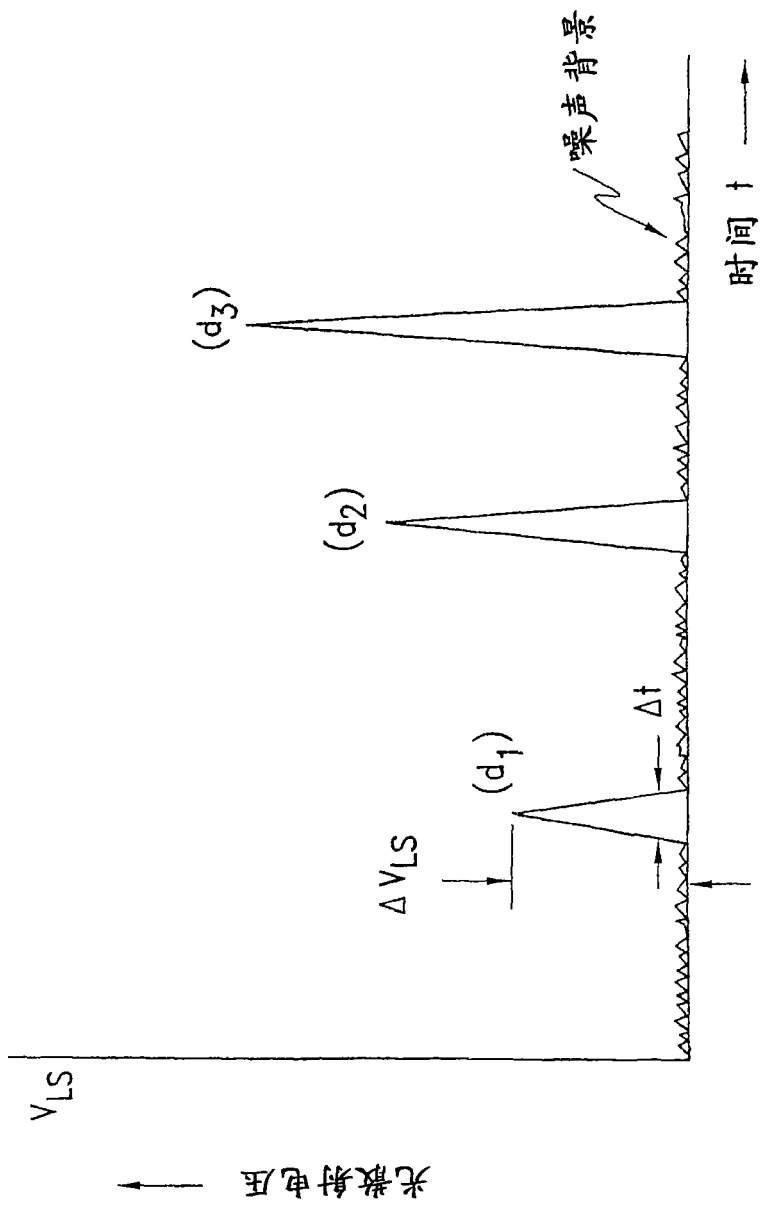


图 12

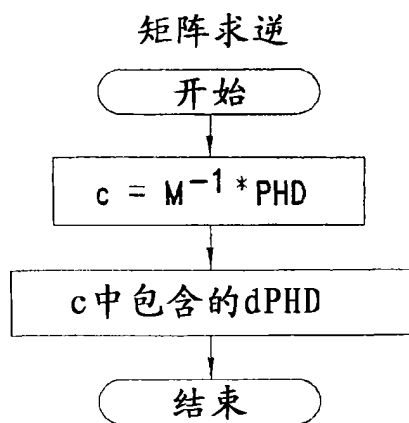


图 13A

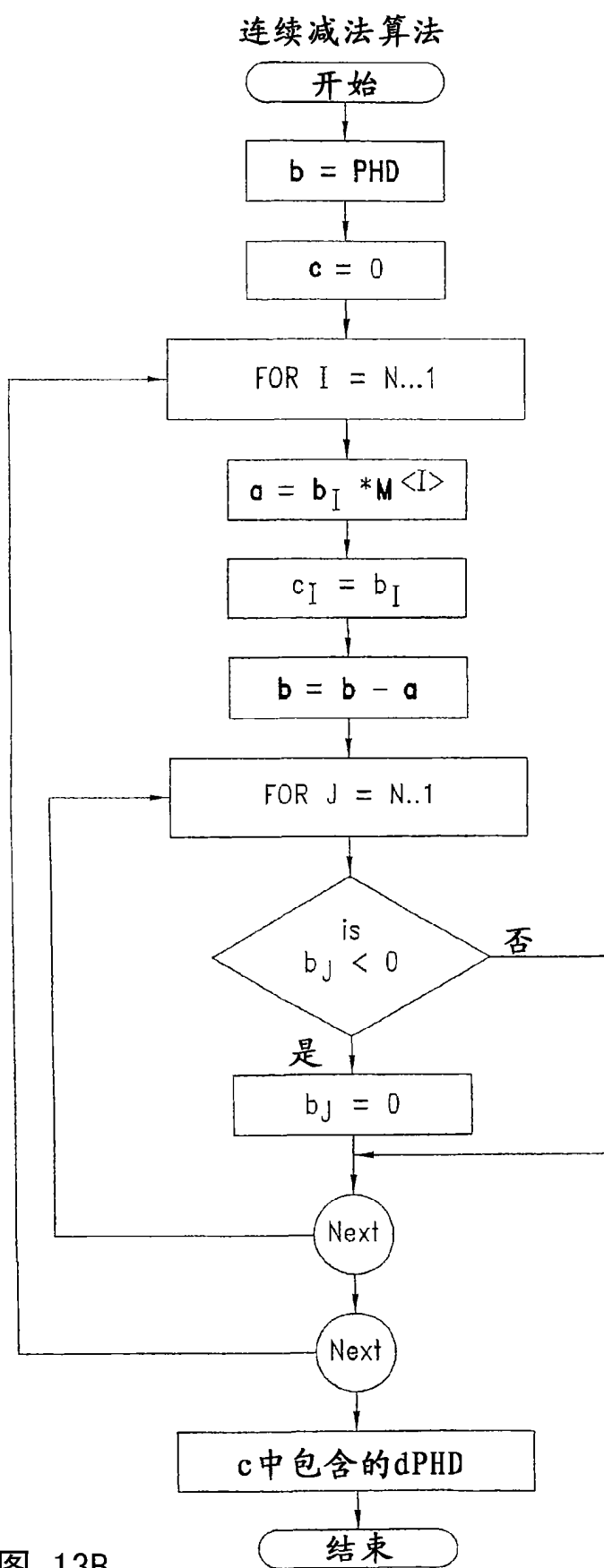


图 13B

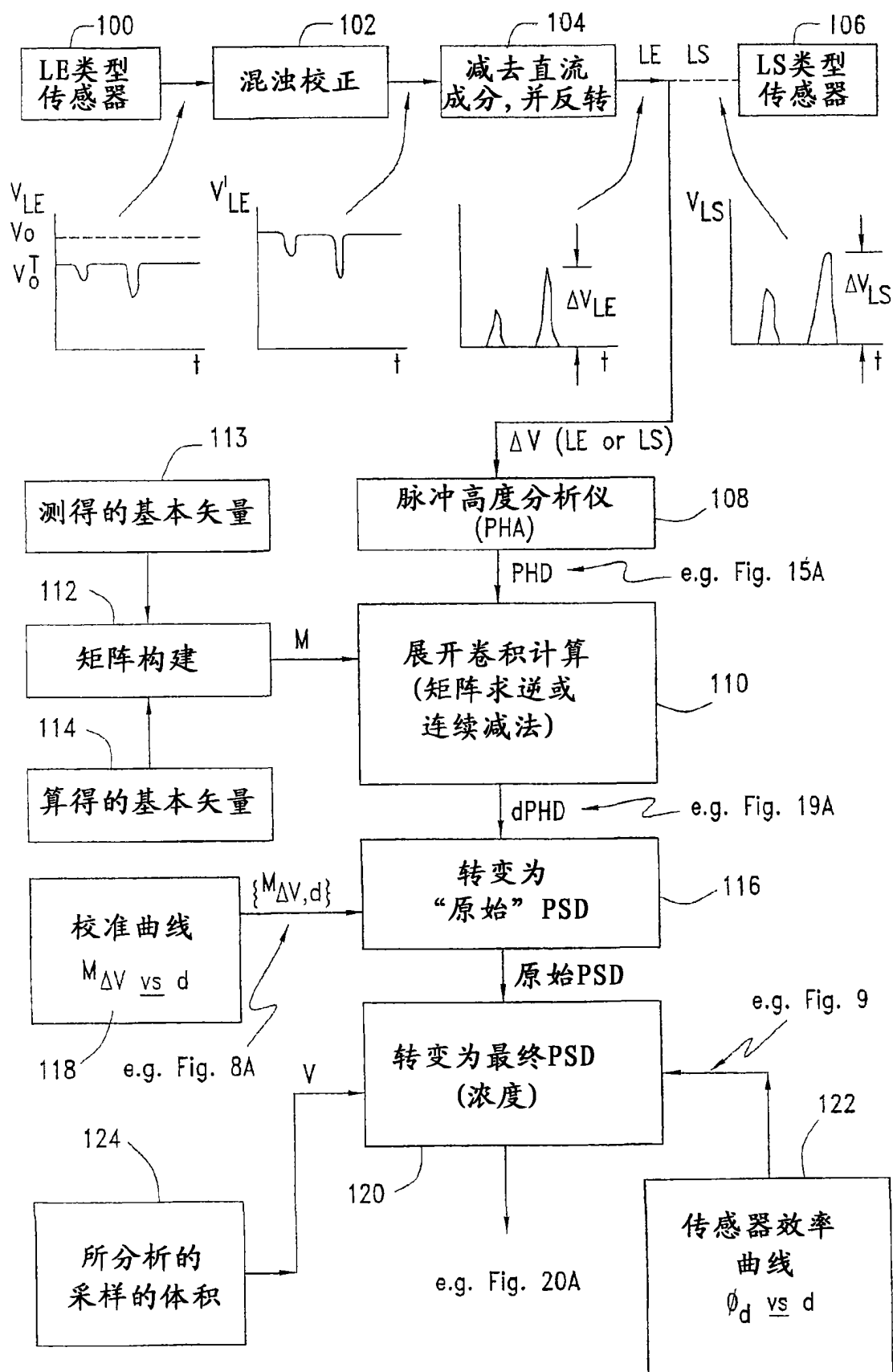


图 14

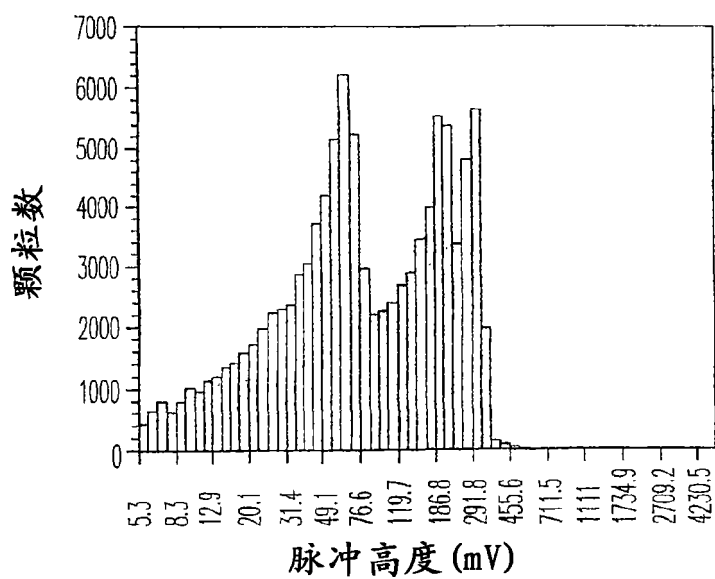


图 15A

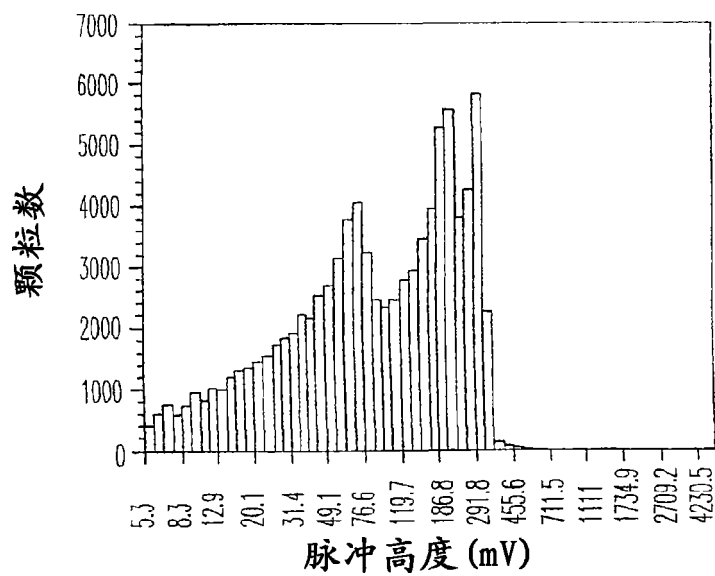


图 15B

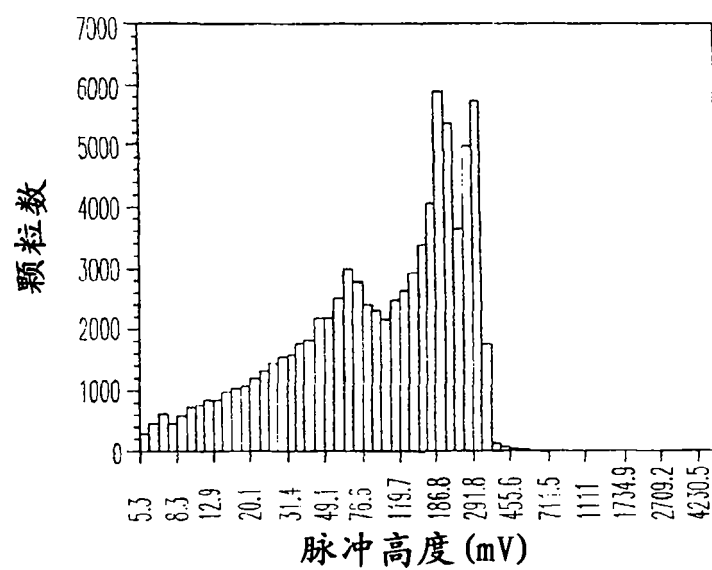


图 15C

| | 列1 | 列2 | 列3 | 列4 | 列5 | 列6 | 列7 | 列8 | 列9 | 列10 | 列11 | 列12 | 列13 | 列14 | 列15 | 列16 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 行1 | 1 | 0.983 | 0.704 | 0.482 | 0.358 | 0.252 | 0.218 | 0.127 | 0.126 | 0.116 | 0.095 | 0.059 | 0.066 | 0.068 | 0.069 | 0.0 |
| 行2 | 0.264 | 1 | 0.983 | 0.704 | 0.482 | 0.358 | 0.242 | 0.184 | 0.133 | 0.125 | 0.11 | 0.084 | 0.07 | 0.072 | 0.072 | 0.072 |
| 行3 | 0.053 | 0.264 | 1 | 0.983 | 0.704 | 0.482 | 0.321 | 0.233 | 0.182 | 0.138 | 0.124 | 0.105 | 0.092 | 0.08 | 0.079 | 0.077 |
| 行4 | 0.041 | 0.053 | 0.264 | 1 | 0.983 | 0.704 | 0.42 | 0.283 | 0.226 | 0.18 | 0.143 | 0.123 | 0.114 | 0.1 | 0.09 | 0.085 |
| 行5 | 0.026 | 0.041 | 0.053 | 0.264 | 1 | 0.983 | 0.613 | 0.359 | 0.277 | 0.219 | 0.178 | 0.148 | 0.131 | 0.124 | 0.107 | 0.101 |
| 行6 | 0.006 | 0.026 | 0.041 | 0.053 | 0.264 | 1 | 0.88 | 0.523 | 0.344 | 0.27 | 0.212 | 0.176 | 0.155 | 0.139 | 0.133 | 0.115 |
| 行7 | 0.003 | 0.006 | 0.026 | 0.041 | 0.053 | 0.264 | 1 | 0.777 | 0.487 | 0.33 | 0.263 | 0.206 | 0.181 | 0.162 | 0.147 | 0.143 |
| 行8 | 0.001 | 0.003 | 0.006 | 0.026 | 0.041 | 0.053 | 0.271 | 1 | 0.713 | 0.451 | 0.316 | 0.256 | 0.212 | 0.186 | 0.169 | 0.155 |
| 行9 | 0 | 0.001 | 0.003 | 0.006 | 0.026 | 0.041 | 0.046 | 0.277 | 1 | 0.649 | 0.415 | 0.302 | 0.257 | 0.219 | 0.192 | 0.176 |
| 行10 | 0 | 0 | 0.001 | 0.003 | 0.006 | 0.026 | 0.037 | 0.039 | 0.308 | 1 | 0.584 | 0.379 | 0.3 | 0.257 | 0.225 | 0.197 |
| 行11 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.003 | 0.006 | 0.03 | 0.034 | 0.034 | 0.339 | 1 | 0.52 | 0.375 | 0.298 | 0.258 | 0.232 |
| 行12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.003 | 0.007 | 0.034 | 0.03 | 0.029 | 0.37 | 1 | 0.512 | 0.371 | 0.297 | 0.259 |
| 行13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.003 | 0.009 | 0.028 | 0.025 | 0.025 | 0.401 | 1 | 0.505 | 0.367 | 0.295 |
| 行14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.003 | 0.007 | 0.021 | 0.02 | 0.02 | 0.352 | 1 | 0.497 | 0.364 |
| 行15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.002 | 0.005 | 0.015 | 0.015 | 0.018 | 0.302 | 1 | 0.489 |
| 行16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.008 | 0.014 | 0.016 | 0.252 | 1 |
| 行17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.007 | 0.012 | 0.014 | 0.203 |
| 行18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.001 | 0.005 | 0.011 | 0.012 |
| 行19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.004 | 0.004 |
| 行20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.002 |
| 行21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

图 16A

| | 列17 | 列18 | 列19 | 列20 | 列21 | 列22 | 列23 | 列24 | 列25 | 列26 | 列27 | 列28 | 列29 | 列30 | 列31 | 列32 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 行1 | 0.039 | 0.046 | 0.041 | 0.03 | 0.04 | 0.043 | 0.047 | 0.046 | 0.045 | 0.036 | 0.059 | 0.07 | 0.062 | 0.059 | 0.046 | 0.044 |
| 行2 | 0.055 | 0.055 | 0.054 | 0.042 | 0.043 | 0.05 | 0.05 | 0.053 | 0.05 | 0.048 | 0.055 | 0.082 | 0.086 | 0.07 | 0.056 | 0.048 |
| 行3 | 0.076 | 0.071 | 0.071 | 0.056 | 0.053 | 0.055 | 0.05 | 0.056 | 0.059 | 0.054 | 0.075 | 0.094 | 0.104 | 0.081 | 0.078 | 0.056 |
| 行4 | 0.081 | 0.085 | 0.088 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.067 | 0.071 | 0.063 | 0.065 | 0.082 | 0.103 | 0.122 | 0.089 | 0.075 | 0.078 |
| 行5 | 0.092 | 0.099 | 0.093 | 0.073 | 0.073 | 0.072 | 0.075 | 0.08 | 0.081 | 0.069 | 0.093 | 0.109 | 0.131 | 0.108 | 0.075 | 0.075 |
| 行6 | 0.111 | 0.109 | 0.118 | 0.093 | 0.081 | 0.082 | 0.08 | 0.086 | 0.092 | 0.091 | 0.101 | 0.122 | 0.136 | 0.114 | 0.094 | 0.075 |
| 行7 | 0.123 | 0.133 | 0.125 | 0.102 | 0.1 | 0.09 | 0.091 | 0.089 | 0.098 | 0.105 | 0.113 | 0.132 | 0.151 | 0.116 | 0.098 | 0.094 |
| 行8 | 0.153 | 0.147 | 0.155 | 0.114 | 0.108 | 0.107 | 0.098 | 0.099 | 0.097 | 0.109 | 0.118 | 0.134 | 0.164 | 0.115 | 0.095 | 0.098 |
| 行9 | 0.163 | 0.171 | 0.171 | 0.118 | 0.119 | 0.114 | 0.114 | 0.107 | 0.108 | 0.105 | 0.118 | 0.13 | 0.156 | 0.117 | 0.08 | 0.095 |
| 行10 | 0.183 | 0.189 | 0.189 | 0.134 | 0.127 | 0.124 | 0.121 | 0.12 | 0.115 | 0.117 | 0.122 | 0.127 | 0.143 | 0.112 | 0.07 | 0.08 |
| 行11 | 0.202 | 0.212 | 0.216 | 0.154 | 0.141 | 0.135 | 0.129 | 0.127 | 0.127 | 0.124 | 0.127 | 0.138 | 0.137 | 0.114 | 0.068 | 0.07 |
| 行12 | 0.238 | 0.236 | 0.242 | 0.176 | 0.16 | 0.148 | 0.143 | 0.133 | 0.134 | 0.134 | 0.13 | 0.137 | 0.154 | 0.113 | 0.085 | 0.068 |
| 行13 | 0.259 | 0.274 | 0.271 | 0.192 | 0.182 | 0.166 | 0.154 | 0.152 | 0.138 | 0.14 | 0.144 | 0.137 | 0.147 | 0.12 | 0.089 | 0.085 |
| 行14 | 0.293 | 0.31 | 0.309 | 0.213 | 0.197 | 0.188 | 0.172 | 0.161 | 0.16 | 0.143 | 0.145 | 0.154 | 0.143 | 0.114 | 0.085 | 0.089 |
| 行15 | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.242 | 0.219 | 0.203 | 0.194 | 0.178 | 0.168 | 0.168 | 0.153 | 0.15 | 0.164 | 0.124 | 0.08 | 0.085 |
| 行16 | 0.481 | 0.453 | 0.426 | 0.274 | 0.246 | 0.225 | 0.208 | 0.2 | 0.184 | 0.174 | 0.176 | 0.162 | 0.155 | 0.13 | 0.105 | 0.08 |
| 行17 | 1 | 0.685 | 0.547 | 0.321 | 0.283 | 0.25 | 0.231 | 0.214 | 0.206 | 0.189 | 0.182 | 0.183 | 0.172 | 0.133 | 0.096 | 0.105 |
| 行18 | 0.153 | 1 | 0.888 | 0.407 | 0.324 | 0.291 | 0.255 | 0.237 | 0.219 | 0.212 | 0.196 | 0.19 | 0.191 | 0.136 | 0.111 | 0.096 |
| 行19 | 0.01 | 0.085 | 1 | 0.526 | 0.413 | 0.326 | 0.3 | 0.259 | 0.243 | 0.225 | 0.209 | 0.203 | 0.197 | 0.155 | 0.1 | 0.11 |
| 行20 | 0.008 | 0.009 | 0.017 | 1 | 0.548 | 0.42 | 0.328 | 0.308 | 0.263 | 0.249 | 0.228 | 0.206 | 0.21 | 0.153 | 0.118 | 0.1 |
| 行21 | 0.001 | 0.005 | 0.009 | 0.513 | 1 | 0.571 | 0.426 | 0.33 | 0.317 | 0.267 | 0.242 | 0.232 | 0.204 | 0.162 | 0.109 | 0.119 |
| 行22 | 0 | 0 | 0.002 | 0.029 | 0.43 | 1 | 0.594 | 0.432 | 0.333 | 0.325 | 0.273 | 0.234 | 0.235 | 0.158 | 0.114 | 0.109 |
| 行23 | 0 | 0 | 0 | 0.012 | 0.025 | 0.347 | 1 | 0.616 | 0.438 | 0.335 | 0.315 | 0.28 | 0.227 | 0.187 | 0.113 | 0.114 |
| 行24 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.01 | 0.021 | 0.265 | 1 | 0.639 | 0.444 | 0.337 | 0.305 | 0.286 | 0.18 | 0.138 | 0.113 |
| 行25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.008 | 0.017 | 0.182 | 1 | 0.662 | 0.431 | 0.339 | 0.295 | 0.223 | 0.133 | 0.138 |
| 行26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.006 | 0.013 | 0.099 | 1 | 0.619 | 0.417 | 0.341 | 0.236 | 0.16 | 0.133 |
| 行27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0.01 | 0.017 | 1 | 0.577 | 0.403 | 0.295 | 0.178 | 0.16 |
| 行28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.002 | 0.006 | 0.19 | 1 | 0.535 | 0.295 | 0.178 | 0.16 |
| 行29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0.364 | 1 | 0.355 | 0.249 | 0.178 |
| 行30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.002 | 0.538 | 1 | 0.307 | 0.249 |
| 行31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.596 | 0.307 | 0.249 |
| 行32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.269 | 1 | 0.596 |

图 16B

| 脉冲 高度 (mV) | 测得的PHD数据 | | | 展开卷积结果 矩阵求逆 | | | 展开卷积结果 连续减法 | | |
|------------------|----------|-------|-------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|
| | PHD-A | PHD-B | PHD-C | dPHD-A | dPHD-B | dPHD-C | dPHD-A | dPHD-B | dPHD-C |
| 行1 | 1077 | 1019 | 738 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行2 | 1527 | 1344 | 1061 | 197 | 138 | 464 | 0 | 253 | 0 |
| 行3 | 1883 | 1669 | 1275 | 33 | 487 | 0 | 0 | 22 | 0 |
| 行4 | 2166 | 1842 | 1580 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行5 | 2512 | 2205 | 1789 | 0 | 116 | 365 | 0 | 0 | 0 |
| 行6 | 3280 | 2649 | 2095 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行7 | 3765 | 2999 | 2511 | 99 | 401 | 161 | 0 | 17 | 0 |
| 行8 | 4569 | 3538 | 2995 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行9 | 5305 | 4099 | 3366 | 0 | 172 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行10 | 6334 | 4683 | 4001 | 0 | 0 | 438 | 0 | 0 | 408 |
| 行11 | 8093 | 5840 | 4680 | 1838 | 1082 | 1237 | 1843 | 1107 | 1171 |
| 行12 | 11725 | 7831 | 5762 | 28485 | 14138 | 7582 | 28592 | 14299 | 7601 |
| 行13 | 6312 | 5703 | 4698 | 9474 | 6511 | 2469 | 9381 | 6585 | 1992 |
| 行14 | 4556 | 4787 | 4656 | 0 | 22 | 0 | 0 | 22 | 0 |
| 行15 | 5576 | 5732 | 5555 | 465 | 56 | 0 | 467 | 57 | 0 |
| 行16 | 7062 | 7427 | 7445 | 2776 | 3279 | 2435 | 2794 | 3321 | 2481 |
| 行17 | 10375 | 10853 | 11239 | 23151 | 24988 | 25093 | 23270 | 25264 | 25649 |
| 行18 | 7632 | 8075 | 8609 | 1435 | 3861 | 8580 | 1442 | 3909 | 8777 |
| 行19 | 8210 | 8093 | 7477 | 33255 | 34347 | 31941 | 33423 | 34738 | 32660 |
| 行20 | 211 | 213 | 205 | 666 | 737 | 720 | 669 | 745 | 732 |
| 行21 | 86 | 72 | 70 | 308 | 267 | 273 | 310 | 261 | 280 |
| 行22 | 19 | 18 | 12 | 70 | 73 | 48 | 70 | 65 | 53 |
| 行23 | 3 | 1 | 1 | 12 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 行24 | 0 | 4 | 1 | 0 | 4 | 4 | 0 | 9 | 4 |
| 行25 | 3 | 4 | 0 | 8 | 4 | 0 | 8 | 9 | 0 |
| 行26 | 1 | 4 | 2 | 0 | 13 | 4 | 0 | 13 | 4 |
| 行27 | 1 | 2 | 1 | 0 | 4 | 4 | 0 | 4 | 4 |
| 行28 | 1 | 2 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 行29 | 3 | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 行30 | 3 | 0 | 1 | 12 | 0 | 4 | 12 | 0 | 4 |
| 行31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 行32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5.6 | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | |
| 8.7 | | | | | | | | | |
| 10.9 | | | | | | | | | |
| 13.6 | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | |
| 21.3 | | | | | | | | | |
| 26.6 | | | | | | | | | |
| 33.2 | | | | | | | | | |
| 41.5 | | | | | | | | | |
| 51.9 | | | | | | | | | |
| 64.8 | | | | | | | | | |
| 81 | | | | | | | | | |
| 101.2 | | | | | | | | | |
| 126.5 | | | | | | | | | |
| 158.1 | | | | | | | | | |
| 197.6 | | | | | | | | | |
| 246.9 | | | | | | | | | |
| 308.5 | | | | | | | | | |
| 385.5 | | | | | | | | | |
| 481.7 | | | | | | | | | |
| 602 | | | | | | | | | |
| 752.2 | | | | | | | | | |
| 940 | | | | | | | | | |
| 1174.7 | | | | | | | | | |
| 1467.9 | | | | | | | | | |
| 1834.3 | | | | | | | | | |
| 2292.2 | | | | | | | | | |
| 2864.4 | | | | | | | | | |
| 3579.4 | | | | | | | | | |
| 4441.9 | | | | | | | | | |
| 5420 | | | | | | | | | |

图 17

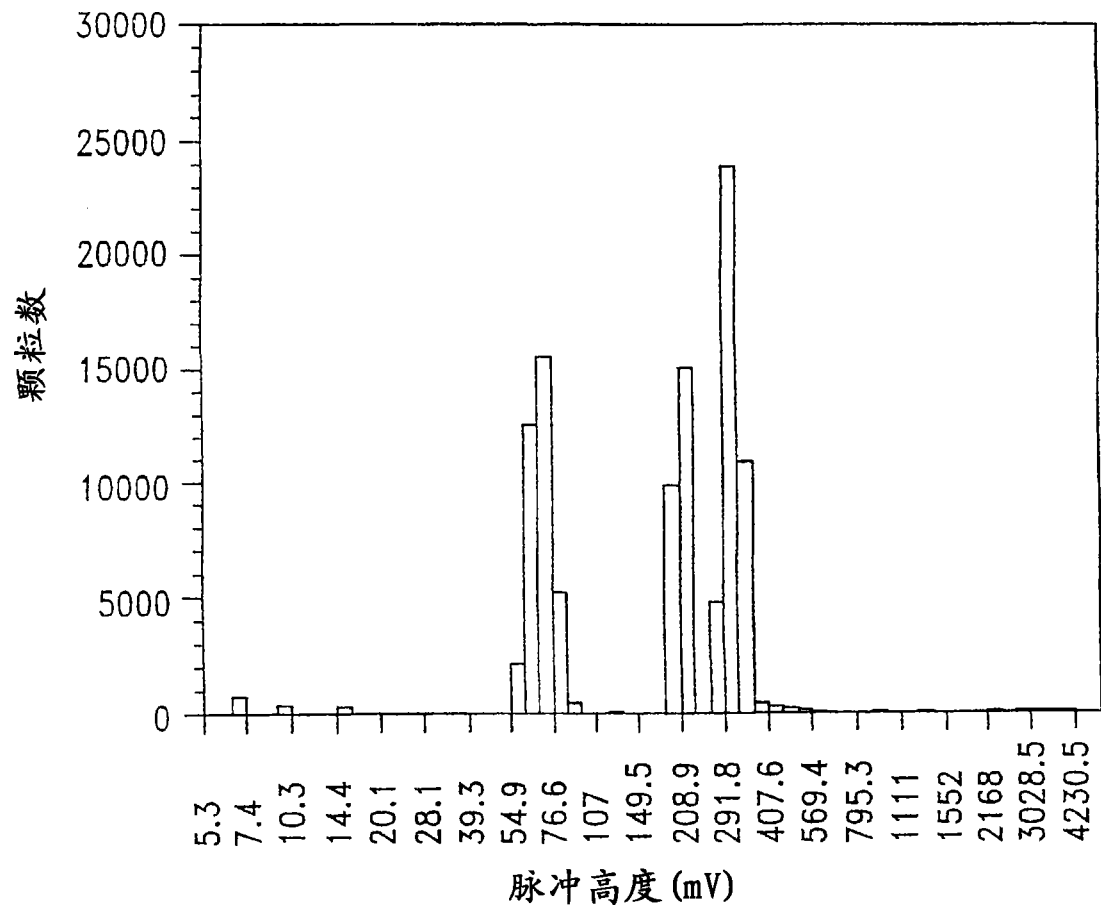


图 18A

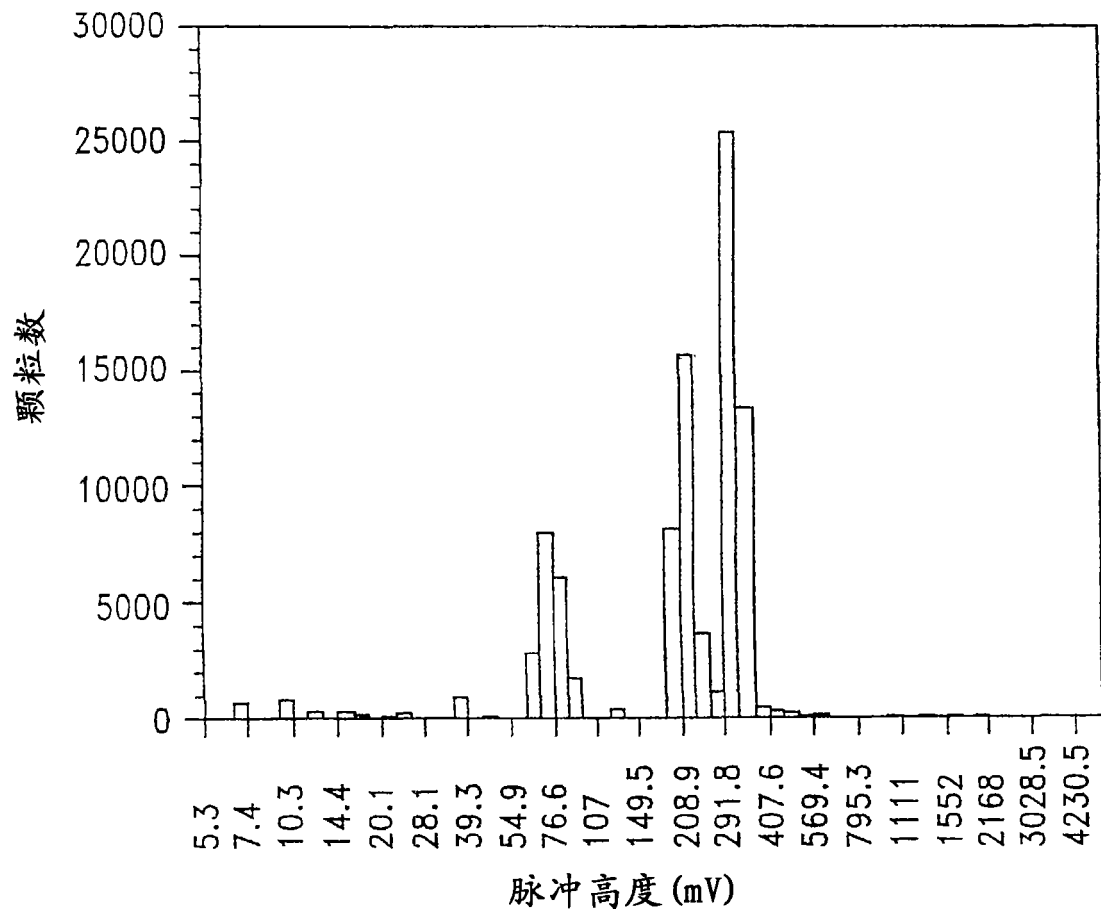


图 18B

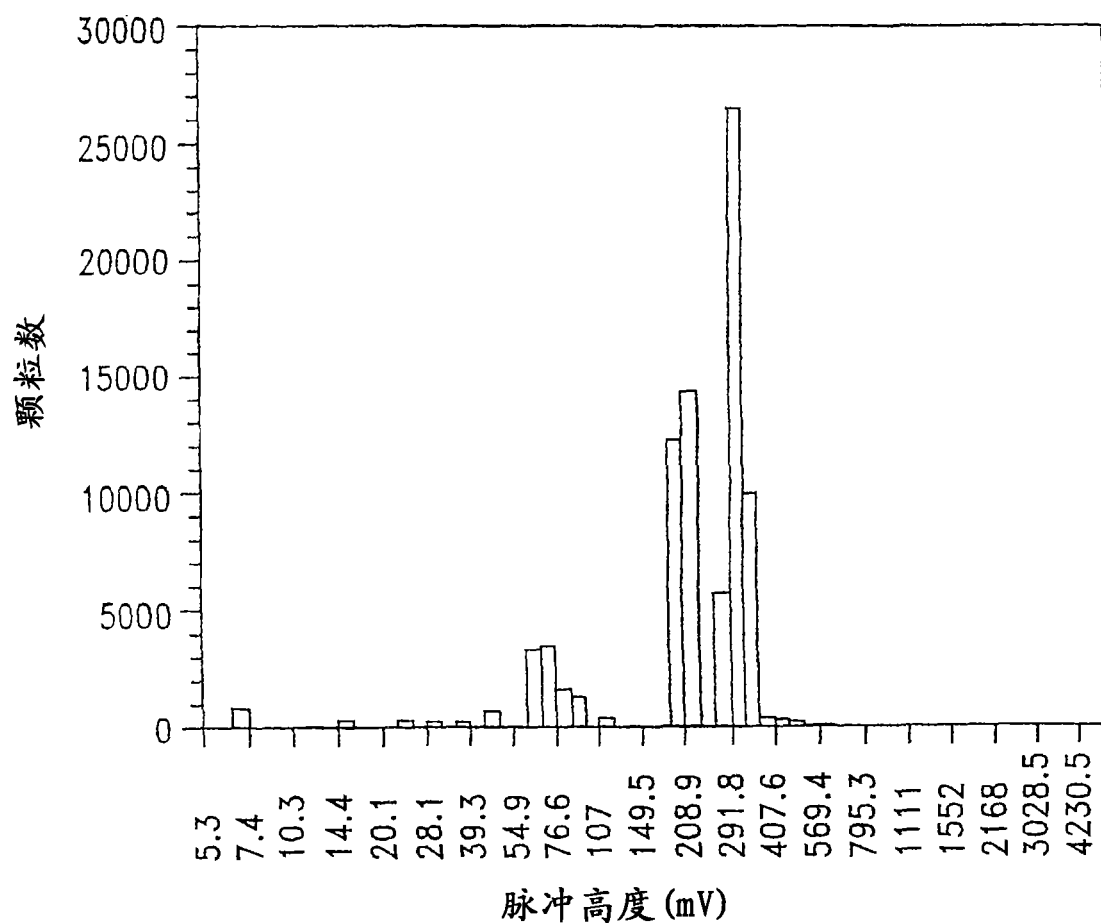


图 18C

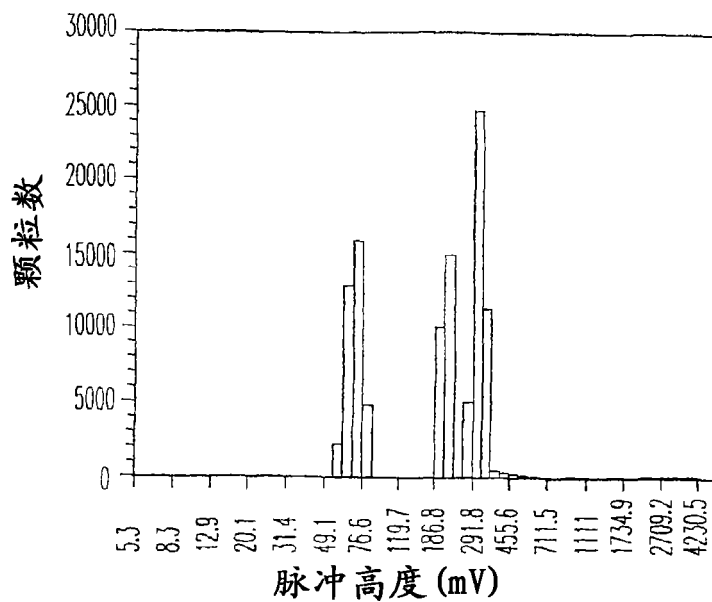


图 19A

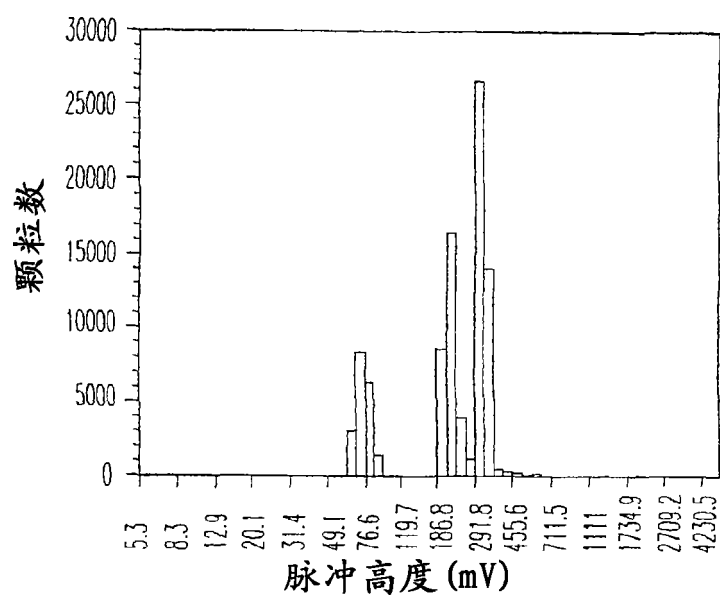


图 19B

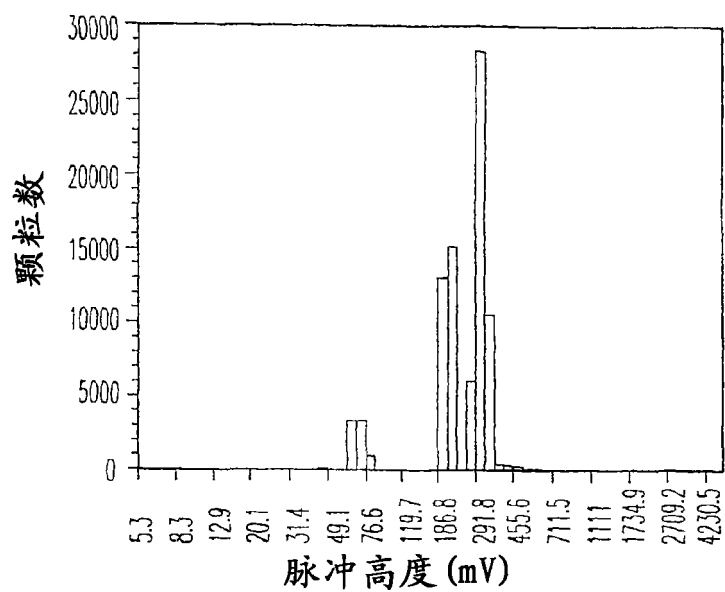


图 19C

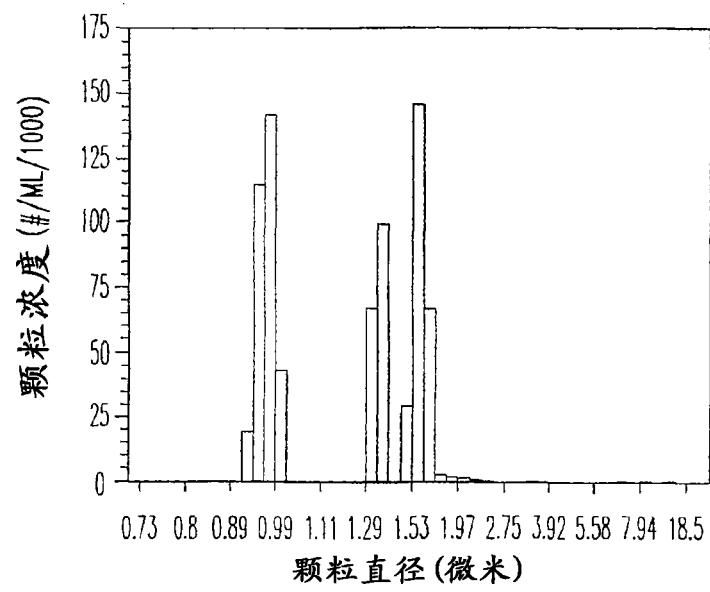


图 20A

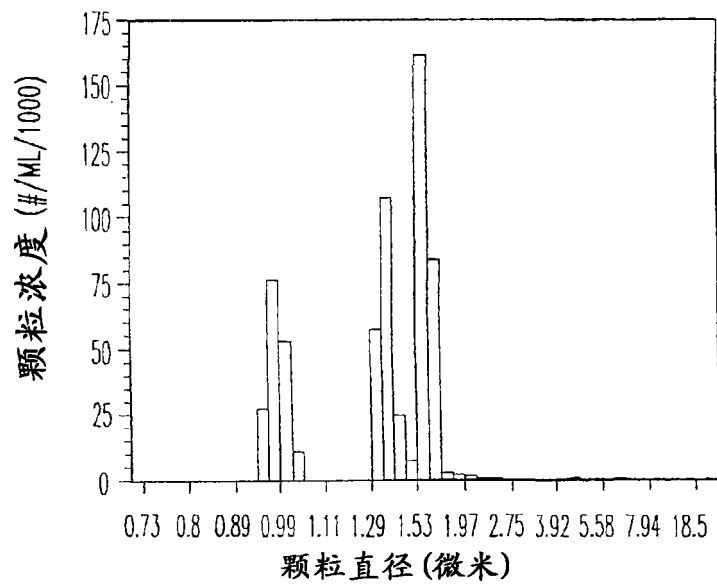


图 20B

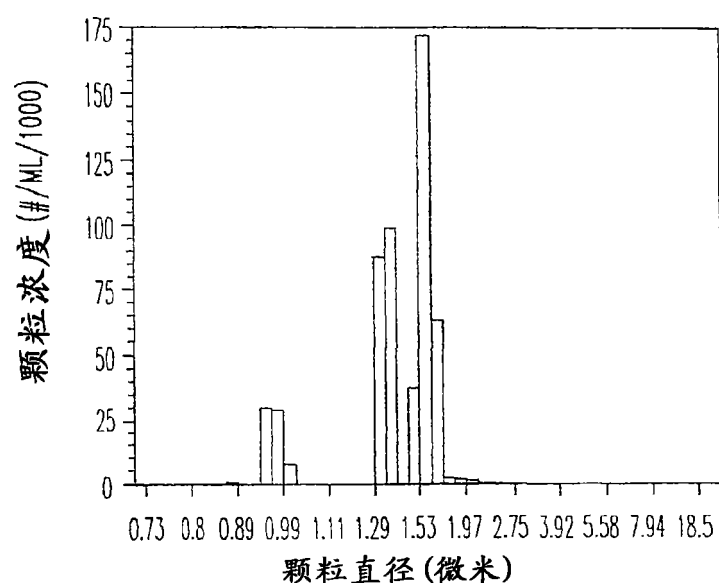


图 20C

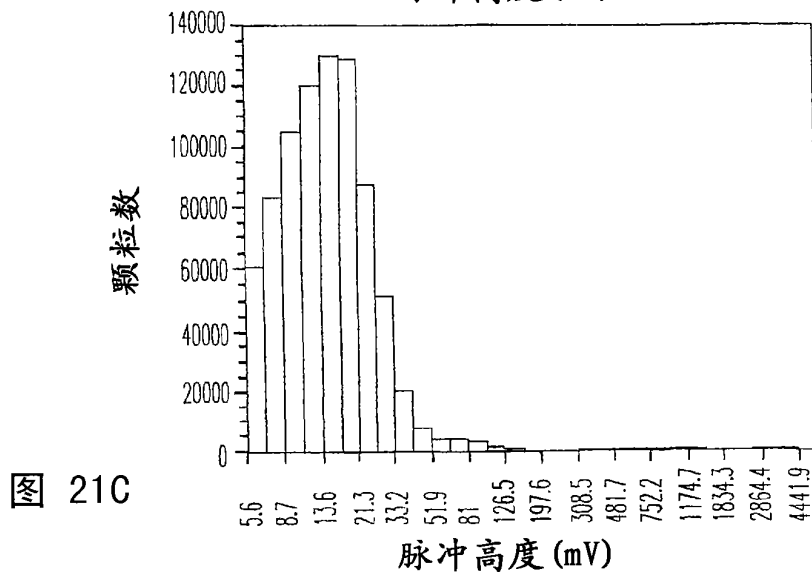
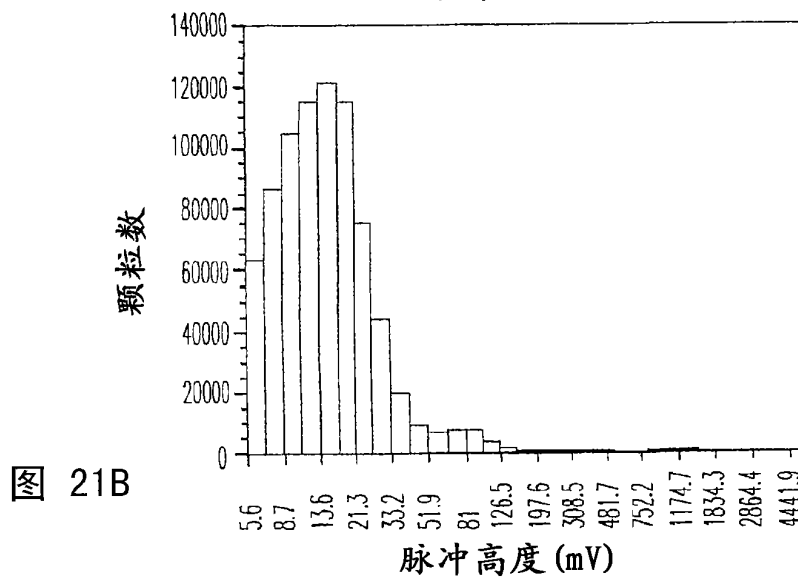
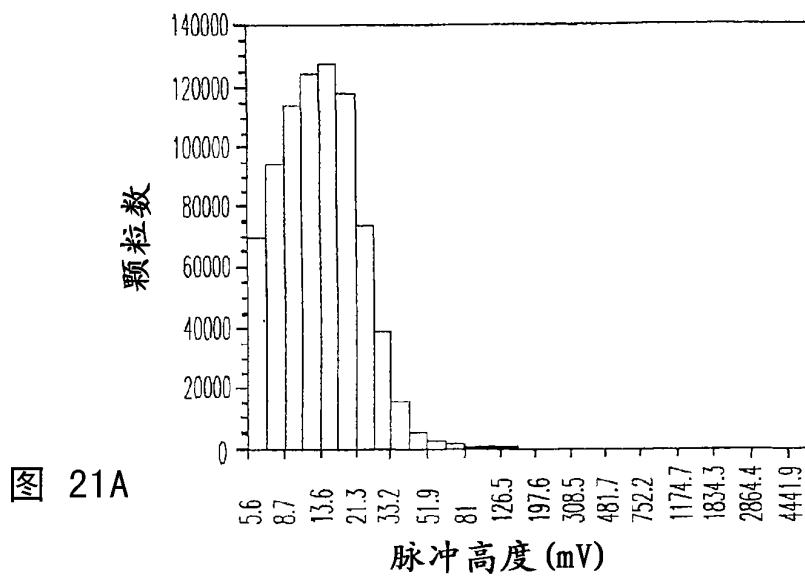


图 22A

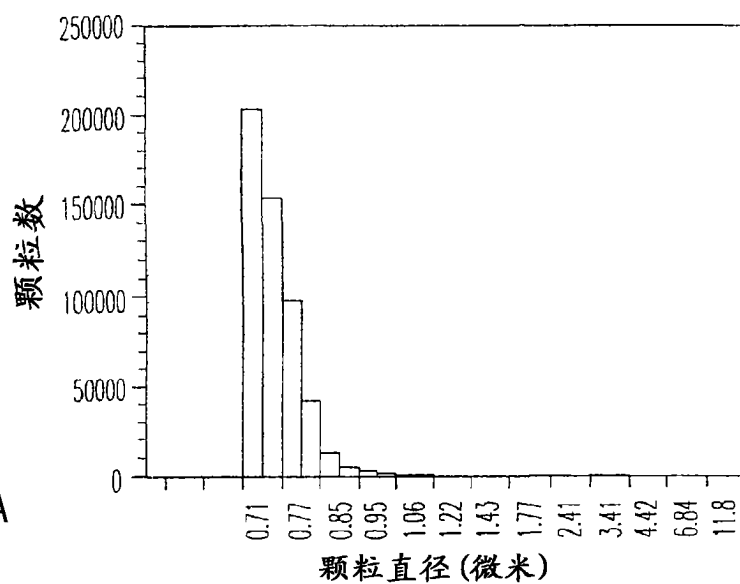


图 22B

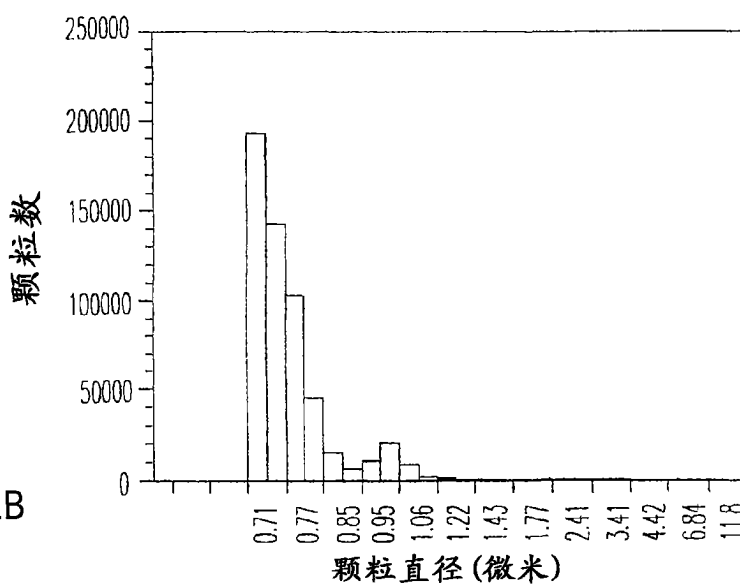
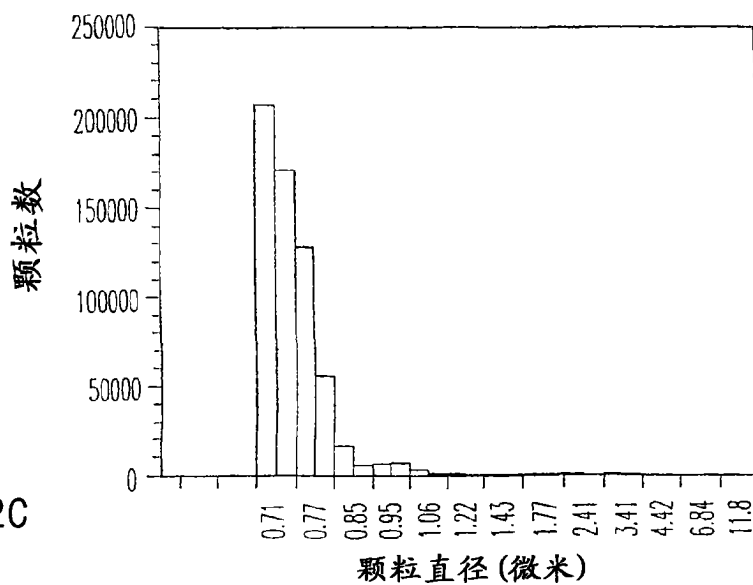


图 22C



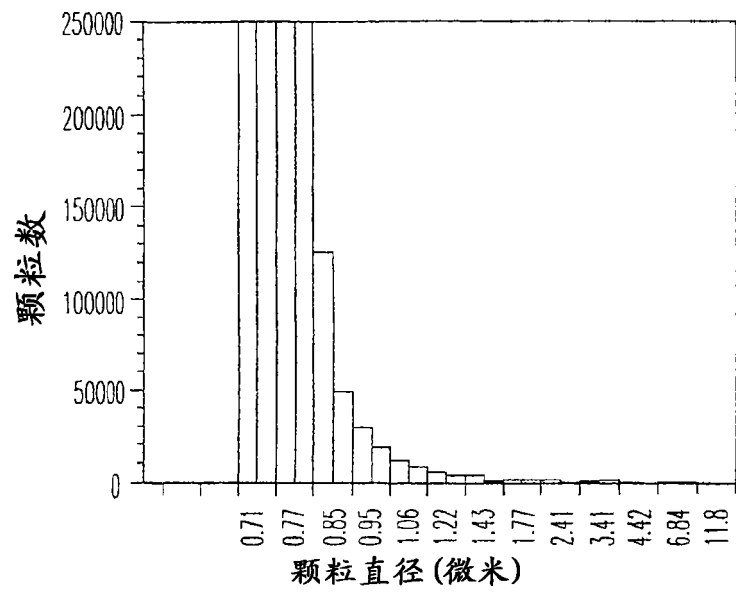


图 23A

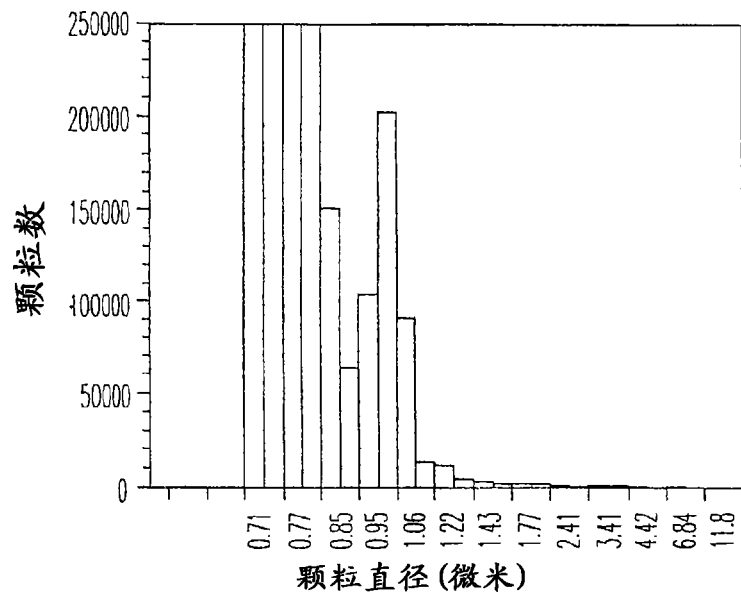


图 23B

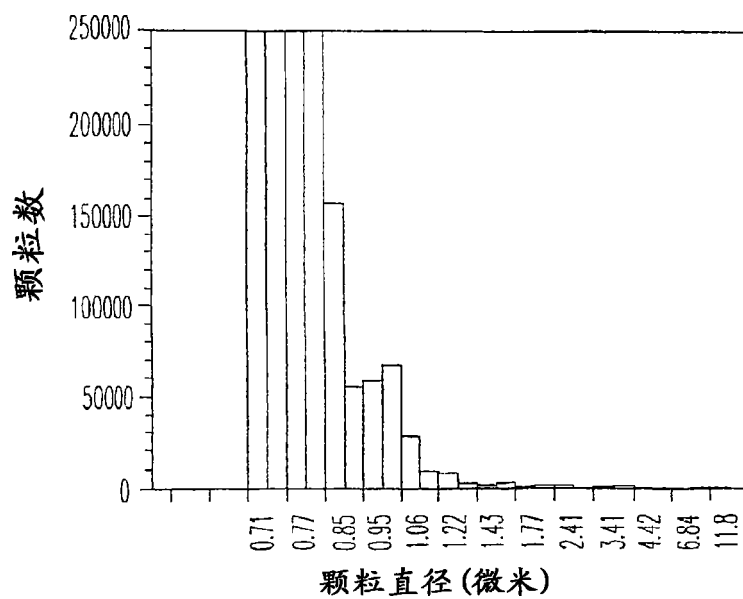


图 23C

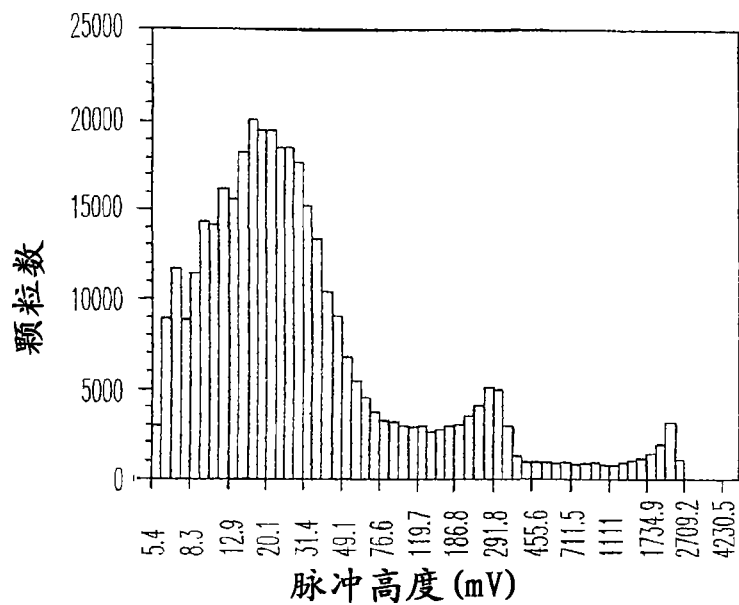


图 24A

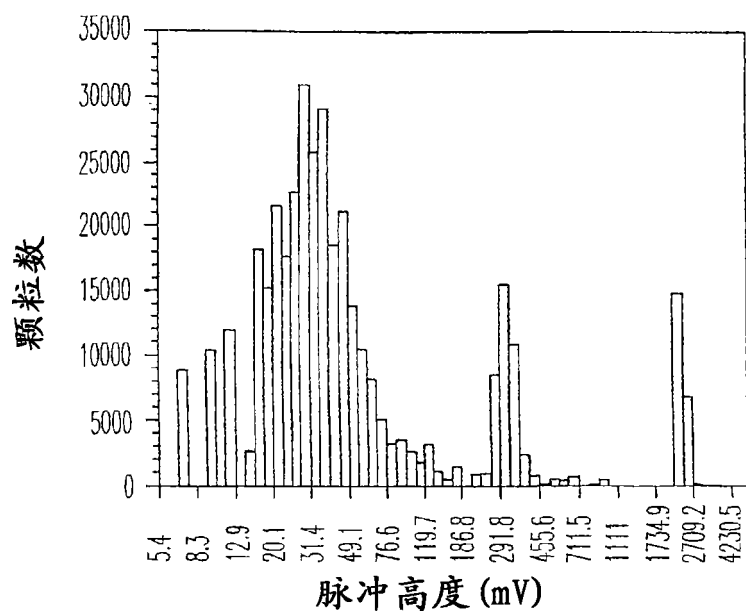


图 24B

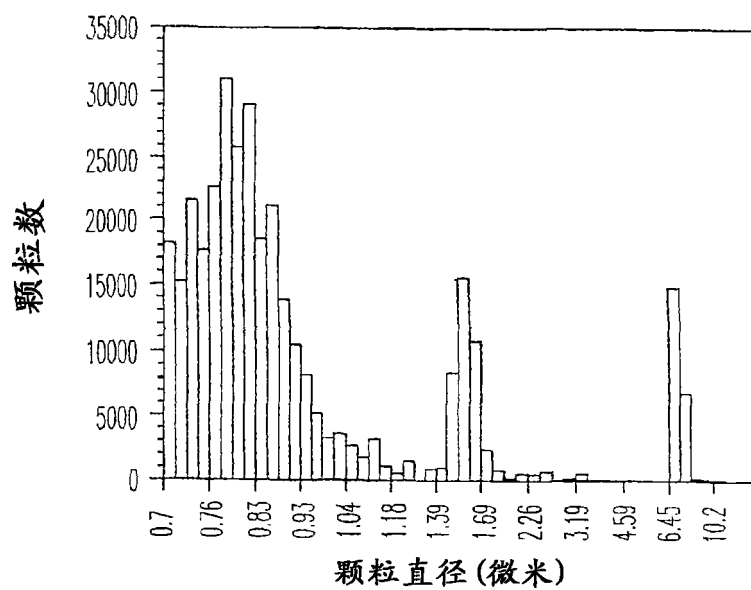


图 24C

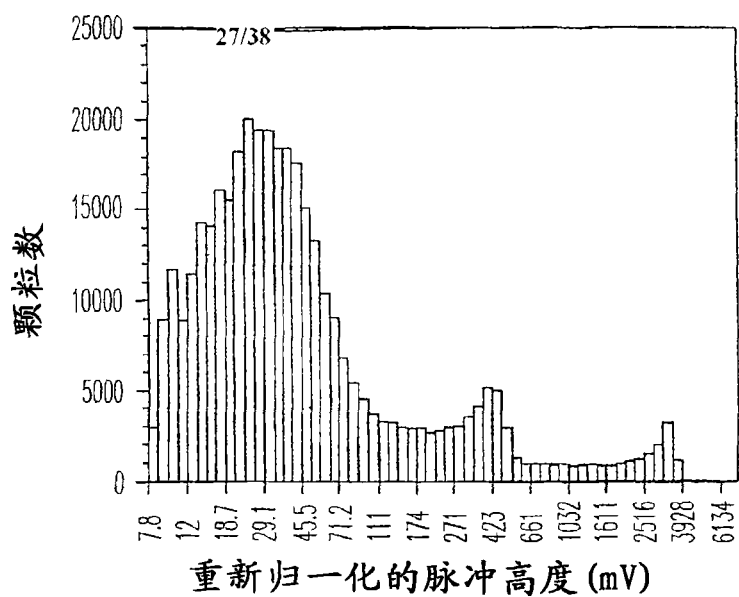


图 25A

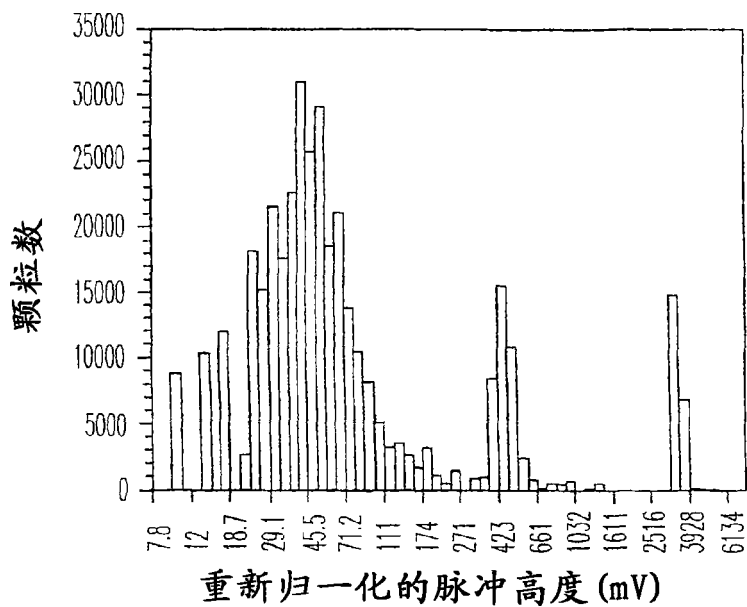


图 25B

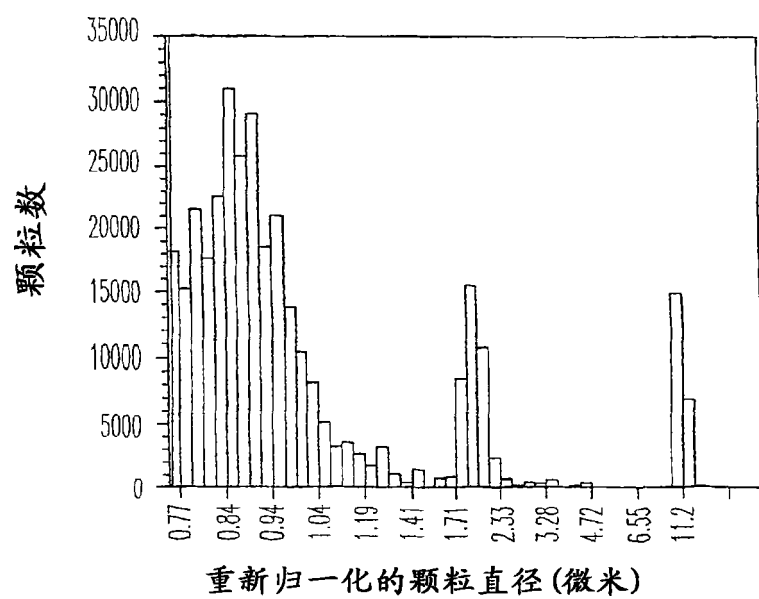


图 25C

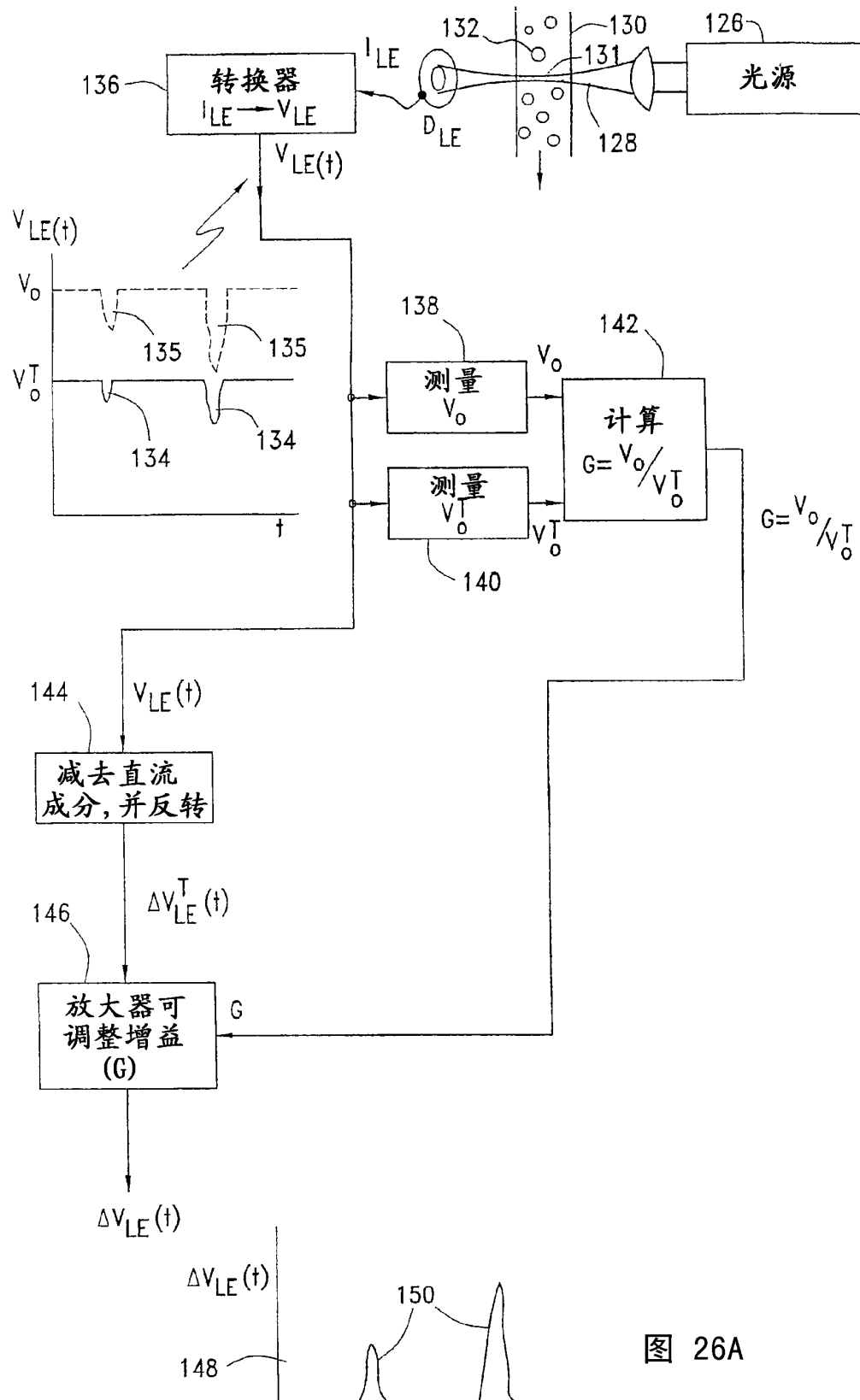


图 26A

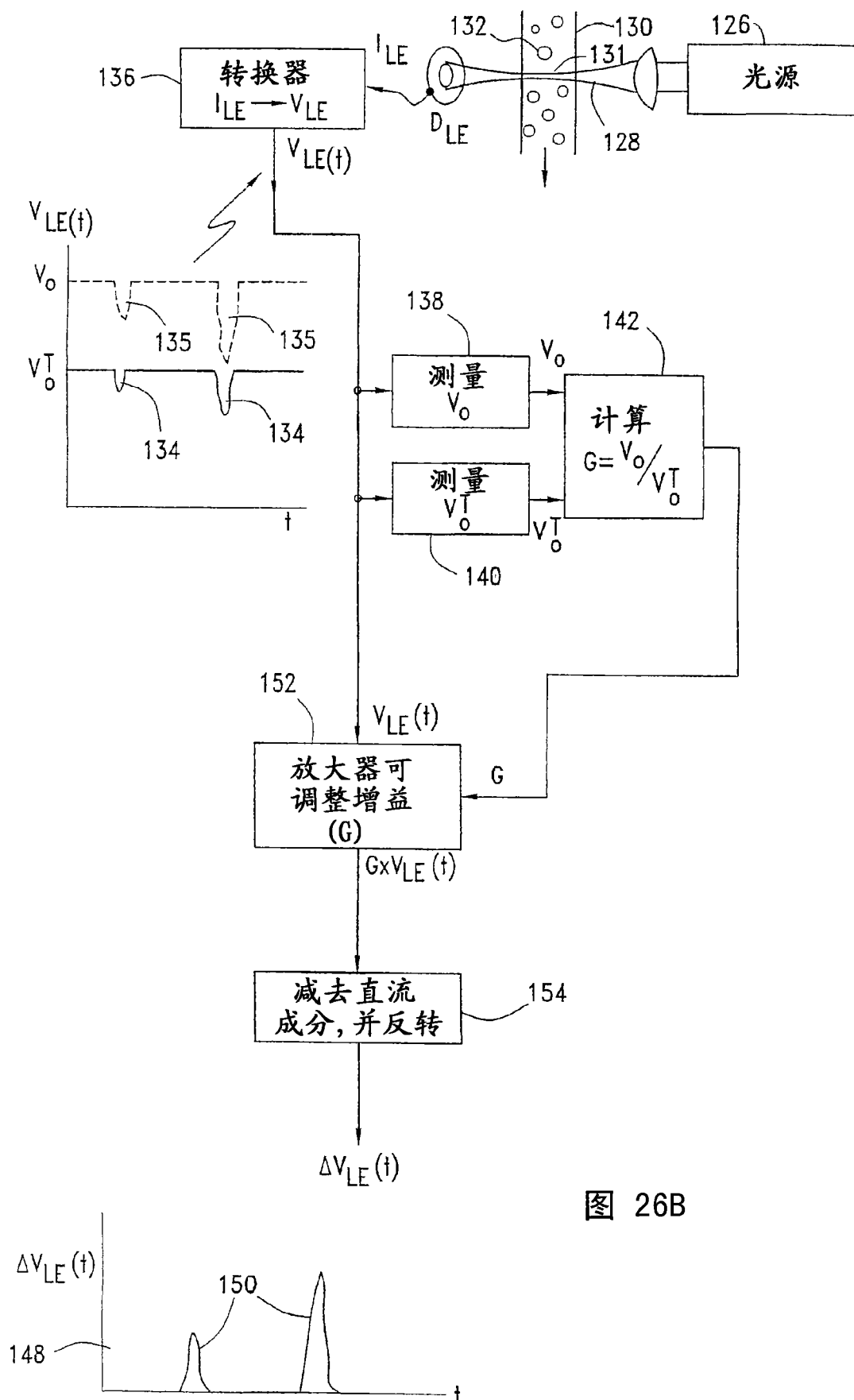


图 26B

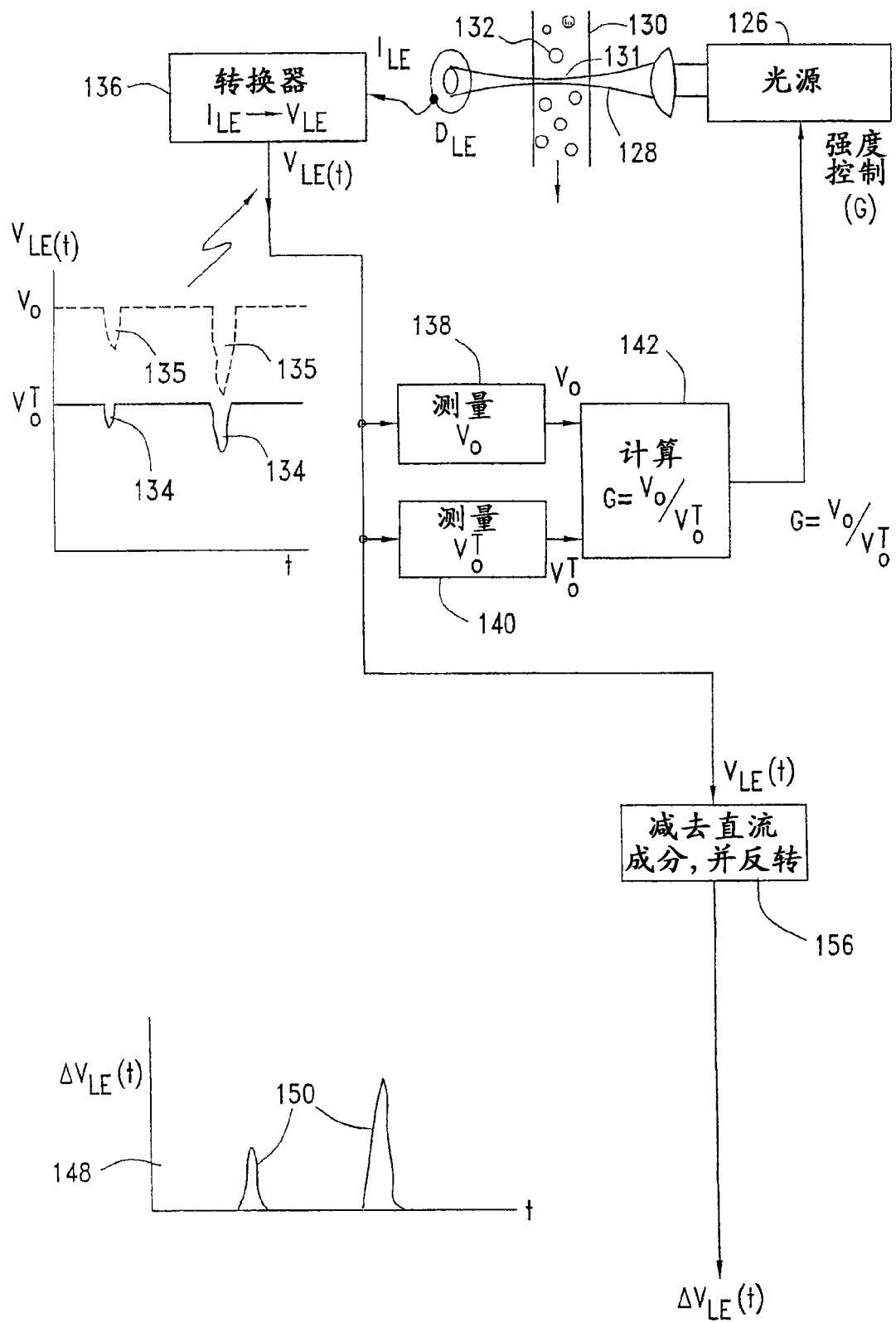


图 26C

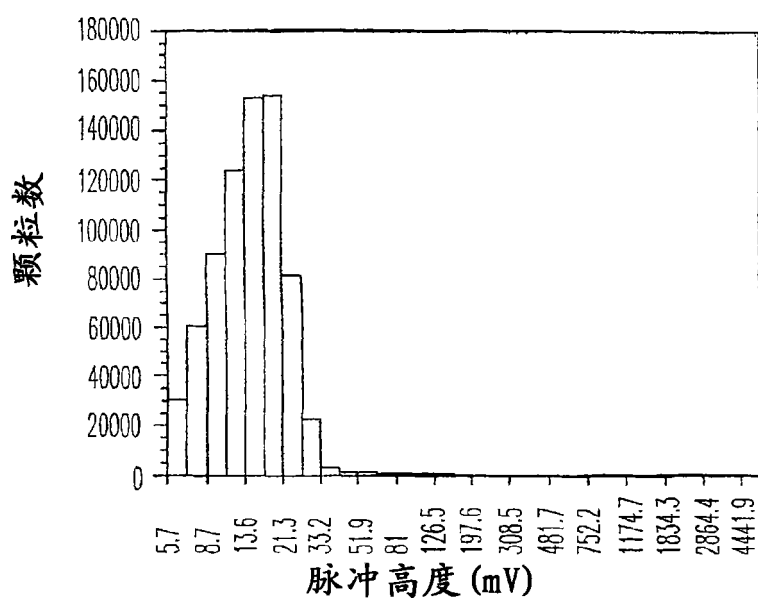


图 27A

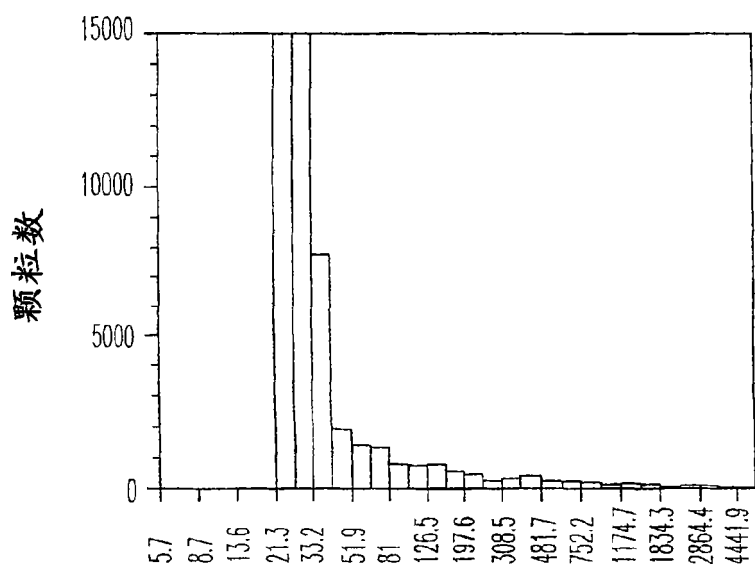


图 27B

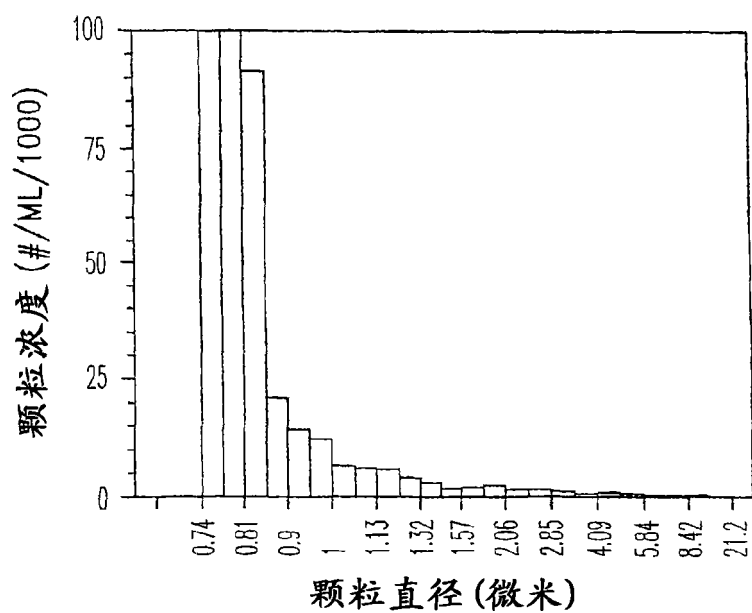


图 27C

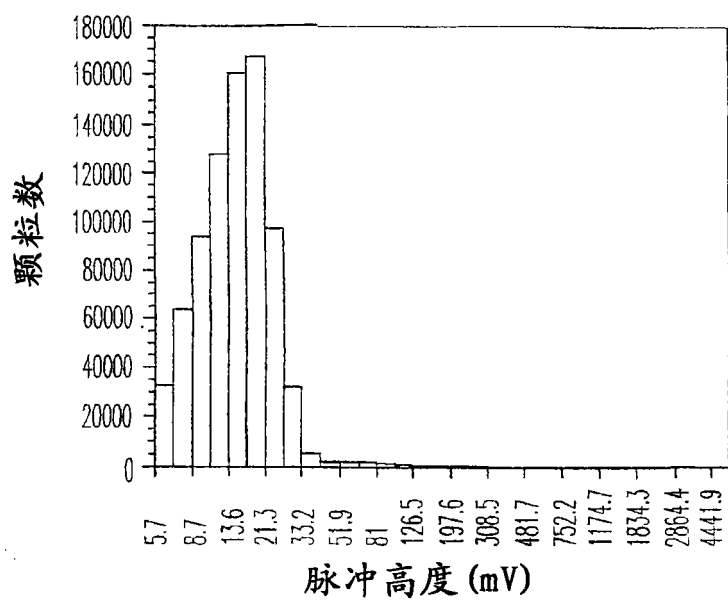


图 28A

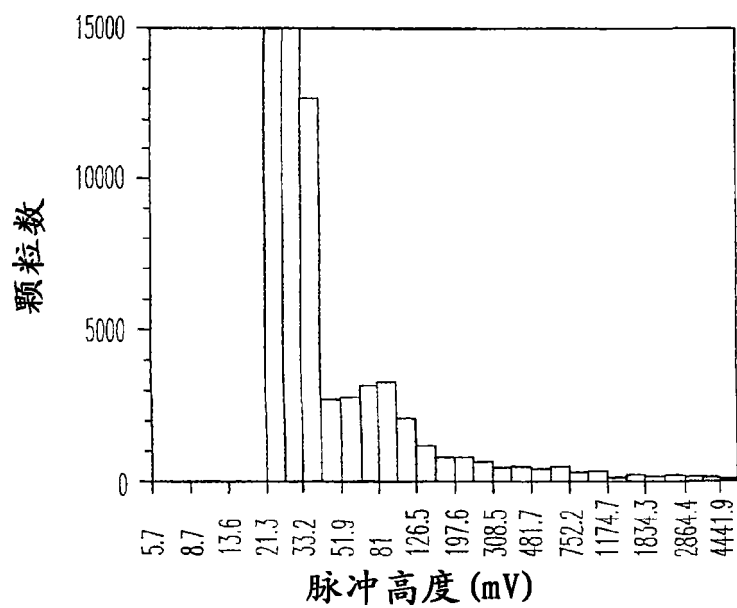


图 28B

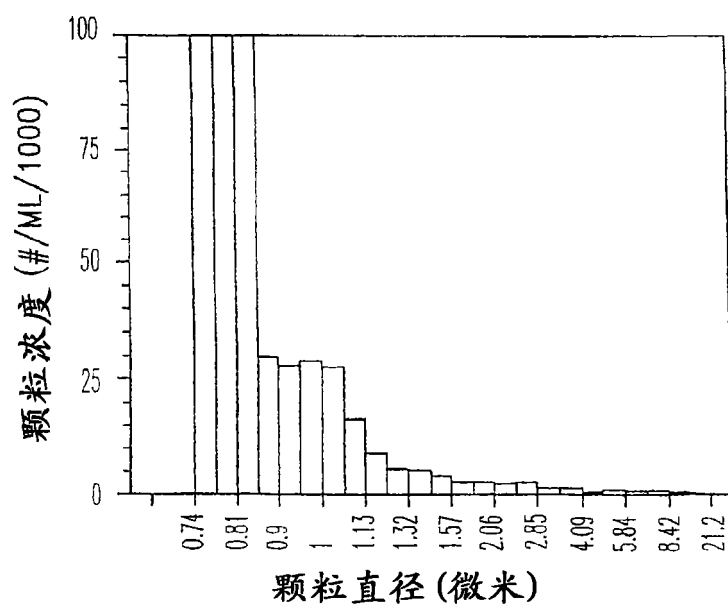


图 28C

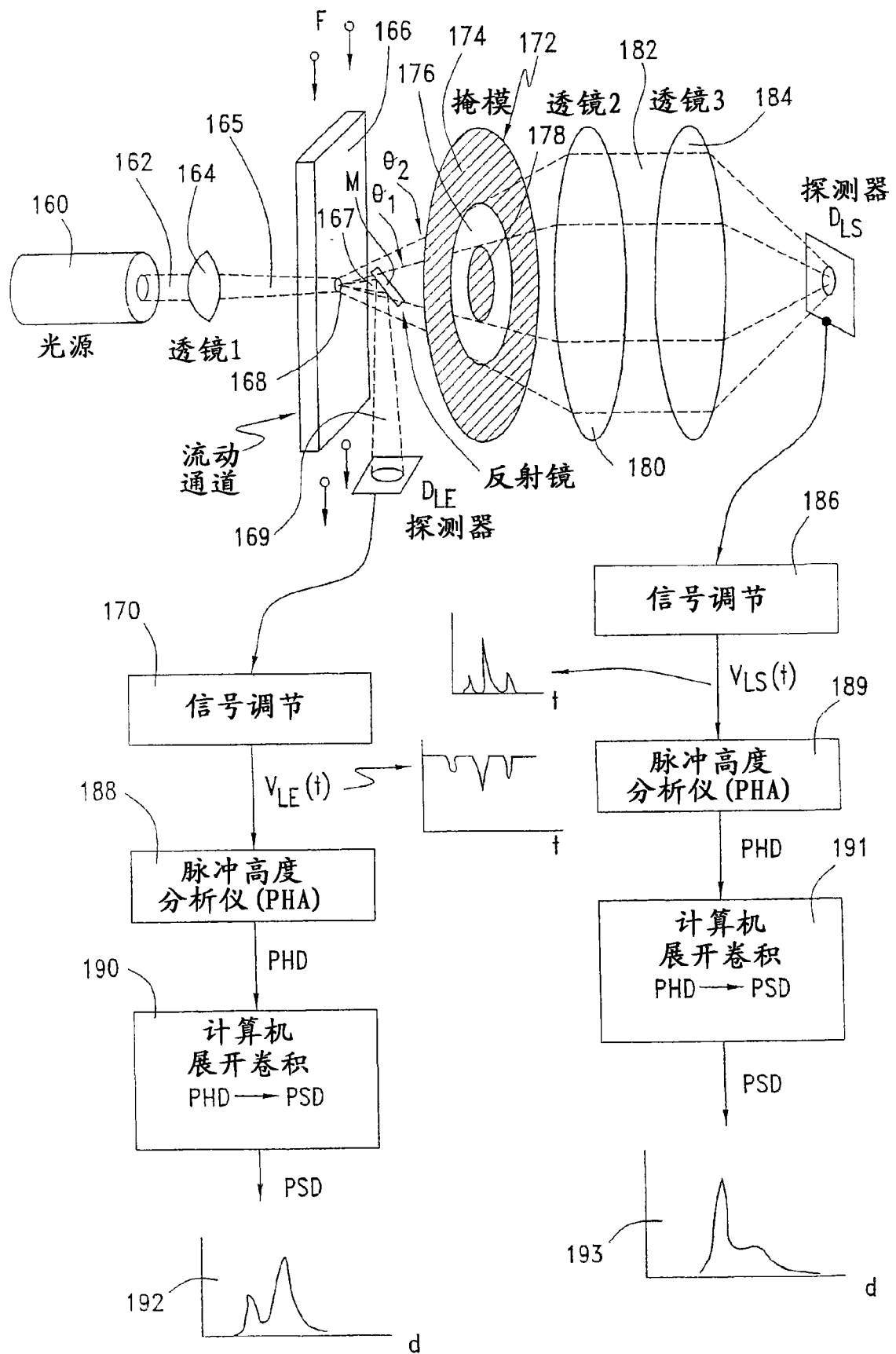


图 29

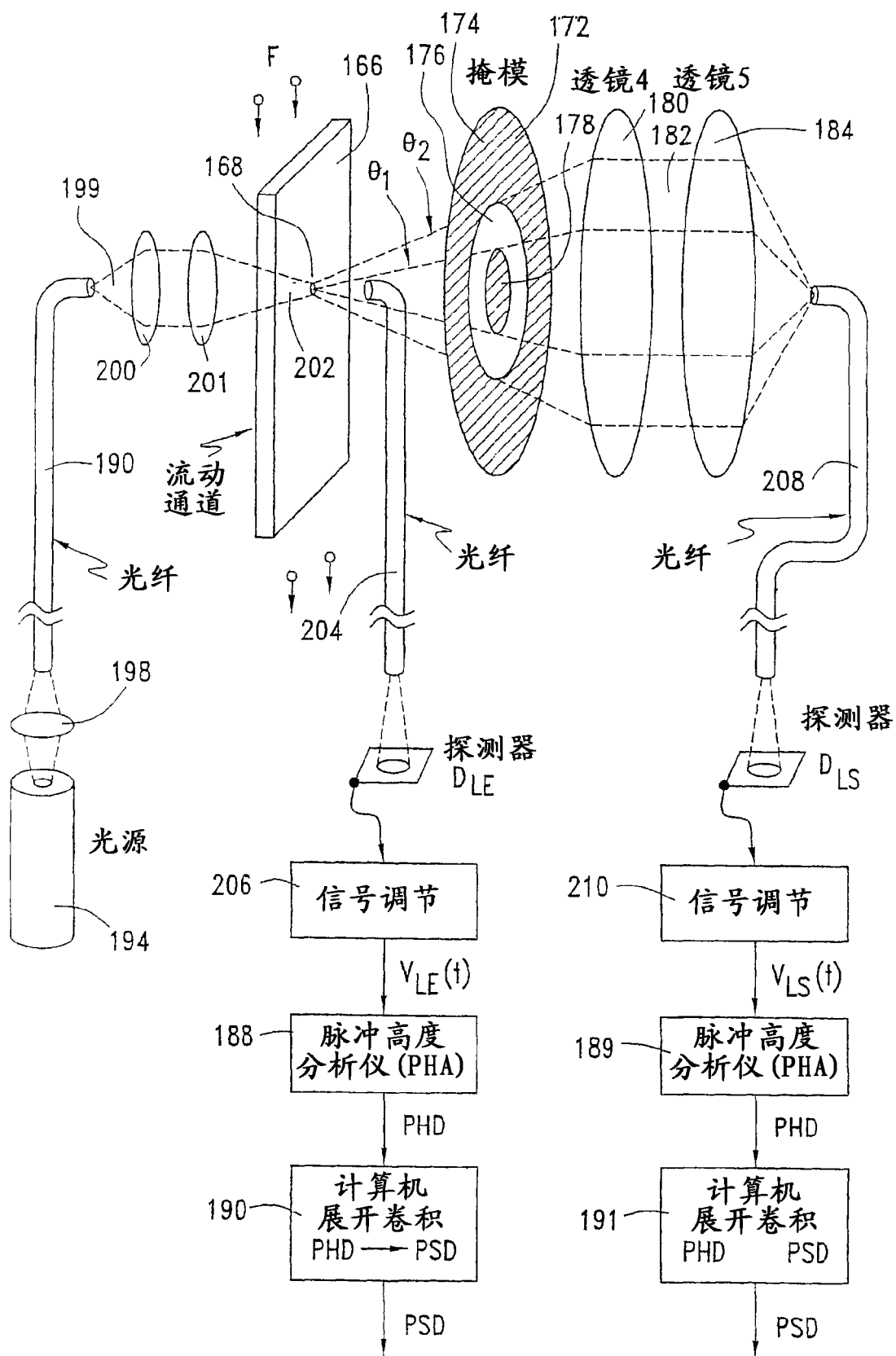


图 30

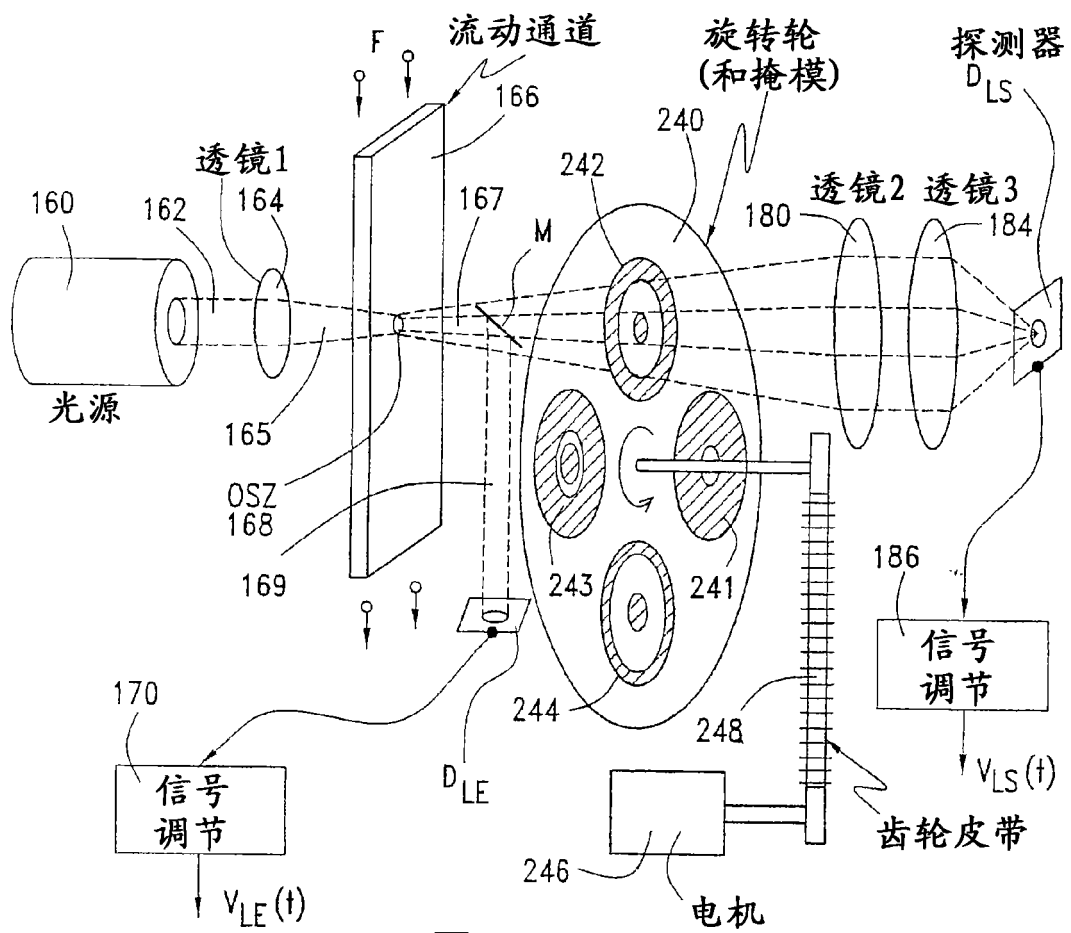


图 32A

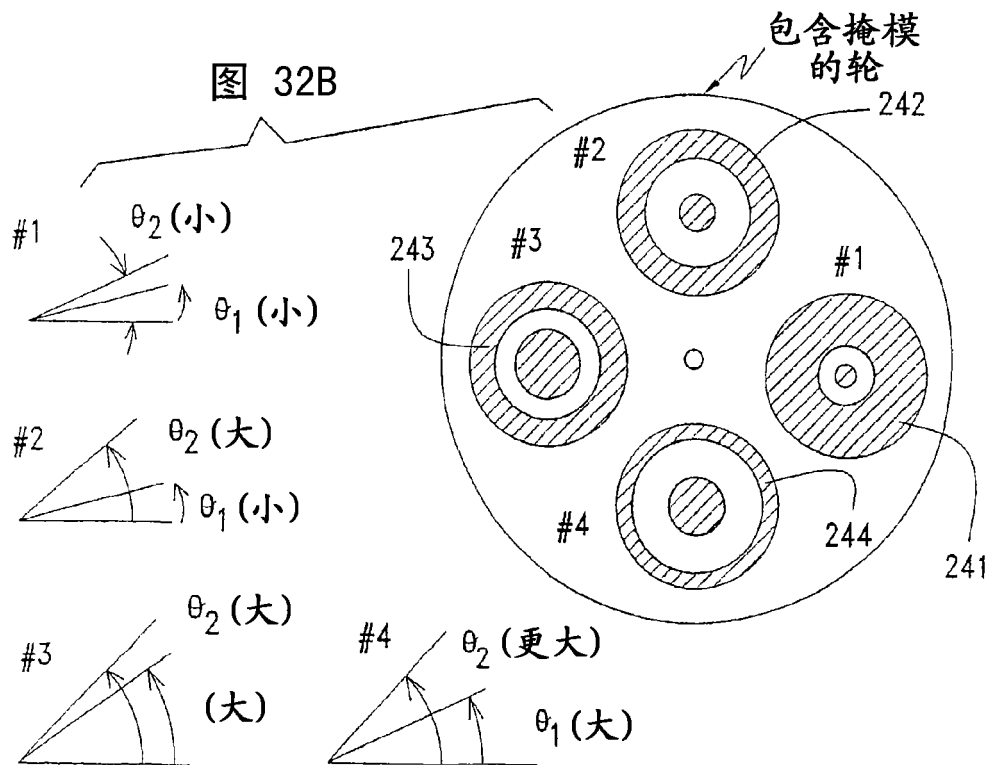


图 32B

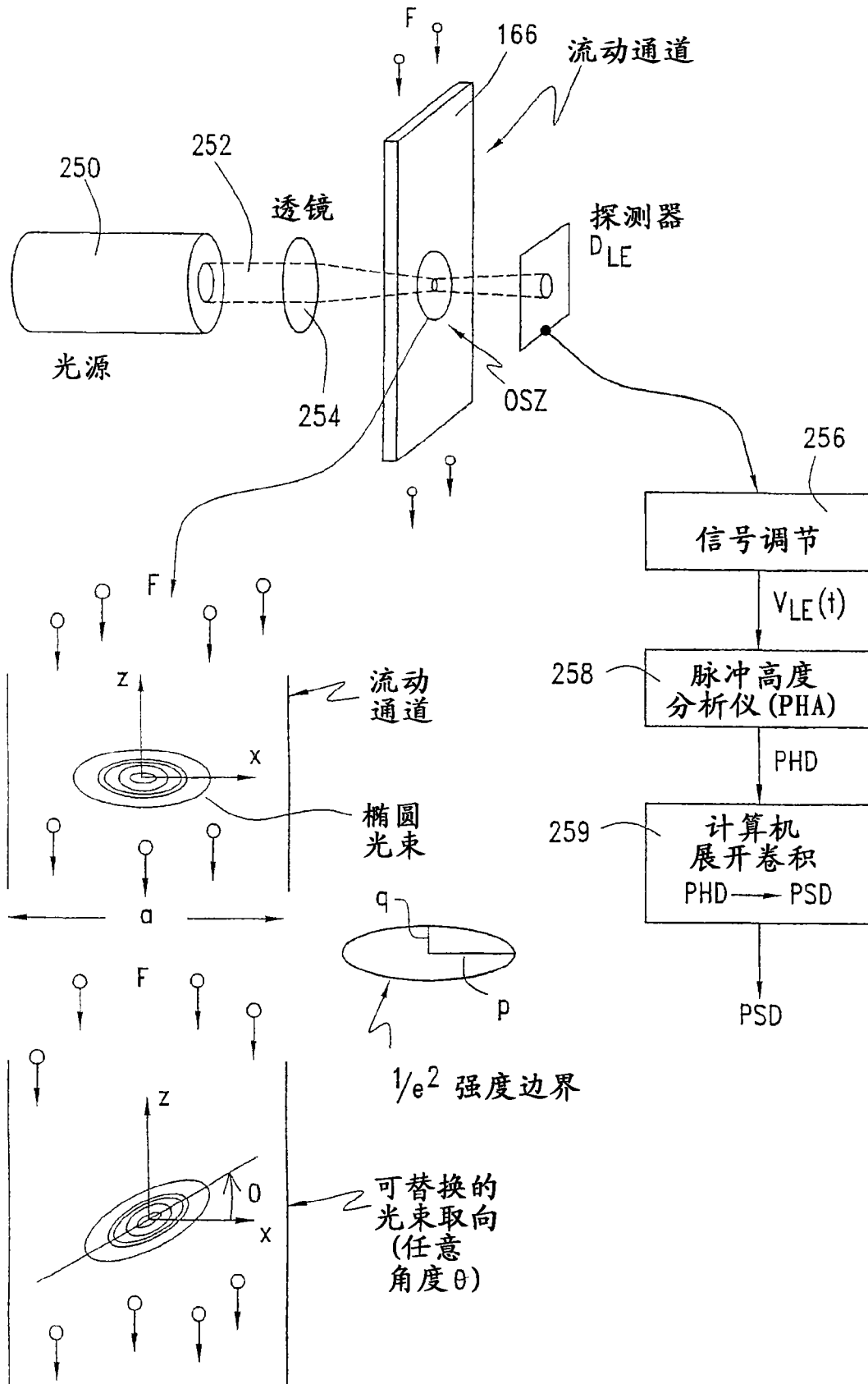


图 33

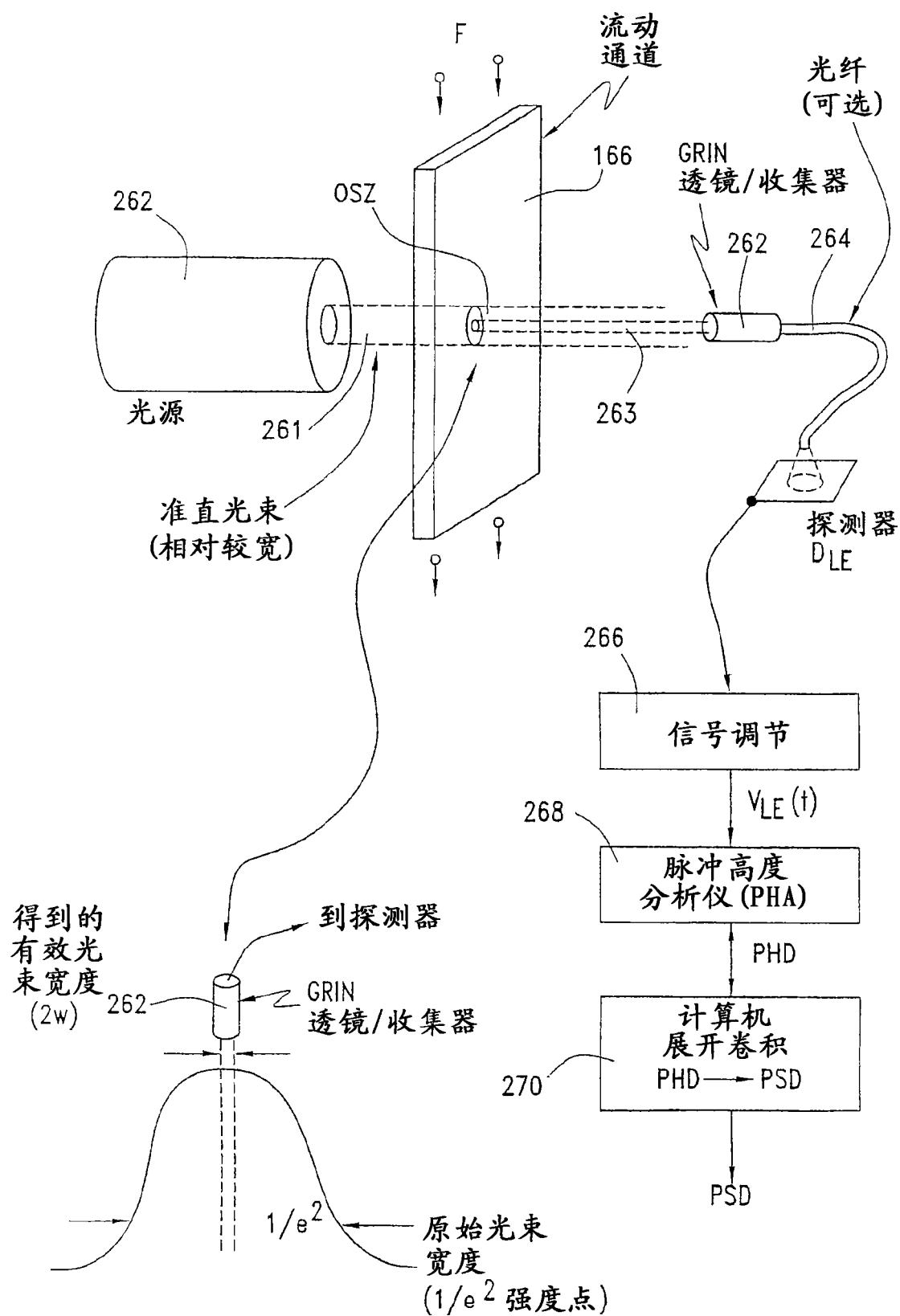


图 34