



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108291863 B

(45)授权公告日 2020.07.03

(21)申请号 201580084797.0

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2015.10.02

G01N 15/10(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108291863 A

(56)对比文件

(43)申请公布日 2018.07.17

CN 103454203 A,2013.12.18,

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

US 6507400 B1,2003.01.14,

2018.05.24

EP 1507136 B1,2012.10.17,

(86)PCT国际申请的申请数据

US 7554661 B2,2009.06.30,

PCT/CA2015/050995 2015.10.02

US 4735504 A,1988.04.05,

(87)PCT国际申请的公布数据

US 6067157 A,2000.05.23,

W02017/054070 EN 2017.04.06

US 2013252237 A1,2013.09.26,

(73)专利权人 国家光学研究所

CN 1932475 A,2007.03.21,

地址 加拿大魁北克

孙昕.基于Mie散射理论测量微小球粒粒径

(72)发明人 D·坎廷

的数值模拟及实验研究.《中国优秀硕士学位论

(74)专利代理机构 北京汇知杰知识产权代理有

文全文数据库》.2006,(第6期),

限公司 11587

审查员 王嘉妮

代理人 李洁 董江虹

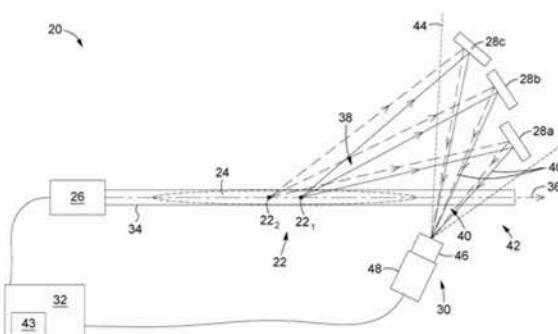
权利要求书3页 说明书22页 附图27页

(54)发明名称

用于使用光散射技术进行个体颗粒尺寸测  
量的系统和方法

(57)摘要

提供了一种颗粒尺寸测量系统,其包括:产  
生光束的光源,所述光束用于照射监测体积中的  
颗粒;多个光偏转器,每个光偏转器被定位成接  
收并偏转由颗粒散射的光;以及图像捕获设备,  
其收集由每个光偏转器偏转的散射光。图像捕获  
设备输出包括多个子图像的图像,每个子图像由  
从多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转  
的收集光产生。每个颗粒在每个子图像中被成像  
为光点,与每个颗粒相关联的多个光点对应于多  
个散射角。该系统还包括处理单元,该处理单元  
被配置为识别这些子图像中的与每个颗粒相关  
联的光点,计算与每个光点相关联的光点参数,  
并且由每个颗粒相关的光点参数确定每个颗粒  
的尺寸。还提供了一种颗粒尺寸测量方法。



1. 一种颗粒尺寸测量系统，包括：
  - 产生光束的光源，所述光束照射包含在监测体积中的颗粒；
  - 多个光偏转器，每个光偏转器被定位成接收并偏转由被照射颗粒散射的光；
  - 图像捕获设备，其收集来自每个光偏转器的偏转散射光，所述图像捕获设备输出包括多个子图像的图像，每个子图像由从所述多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生，每个被照射颗粒在所述多个子图像中的每个子图像中被成像为光点，与每个被照射颗粒相关联的多个光点对应于以多个散射角散射的光；和
    - 从所述图像捕获设备接收所述图像的处理单元，所述处理单元被配置为针对每个被照射颗粒：识别所述多个子图像中的与所述被照射颗粒相关联的多个光点，确定与所述多个光点中的每个光点相关联的光点参数，以及从多个所述光点参数确定所述被照射颗粒的尺寸。
2. 根据权利要求1所述的颗粒尺寸测量系统，其中，每个光偏转器被定位成偏转由所述颗粒散射的光的相应前向散射分量。
3. 根据权利要求2所述的颗粒尺寸测量系统，其中，对于每个被照射颗粒，所述多个散射角中的每一个散射角相对于所述光束的传播方向小于35°。
4. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，其中，所述多个光偏转器由三个光偏转器组成。
5. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，其中，所述多个光偏转器由多个光反射器组成。
6. 根据权利要求5所述的颗粒尺寸测量系统，其中，所述多个光反射器包括平面镜。
7. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，其中，所述多个光偏转器的表面法线全部平行于公共平面。
8. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，其中，每个光偏转器被定位成使得由所述光偏转器偏转的散射光在不与所述光束的光轴交叉的情况下到达所述图像捕获设备。
9. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，其中，所述光源是激光源或发光二极管源。
10. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，还包括用于将所述光束转化成扇形束的束调节元件。
11. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，还包括壳体，所述壳体包围至少所述多个光偏转器和所述图像捕获设备，所述壳体包括用于允许由所述颗粒散射的光的一部分透射到所述壳体内并到达所述多个光偏转器的光学窗口。
12. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，其中，对于每个被照射颗粒，所述处理单元被配置为确定一个能量参数作为所述光点参数，所述能量参数指示包含在与所述被照射颗粒相关联的光点中的光能量的量。
13. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，其中，所述处理单元被配置为由与每个被照射颗粒相关联的所述光点参数的一个或多个比率来确定所述被照射颗粒的尺寸。
14. 根据权利要求1至3中任一项所述的颗粒尺寸测量系统，其中，所述处理单元被配置

为由多个所述光点参数与参考数据的比较来确定每个被照射颗粒的尺寸。

15. 根据权利要求14所述的颗粒尺寸测量系统,其中,所述参考数据从基于米氏散射理论的数值模型获得。

16. 一种用于颗粒尺寸测量系统的成像模块,所述成像模块包括:

-多个光偏转器,每个光偏转器被定位成接收并偏转由包含在监测体积中并被光束照射的颗粒散射的光;和

-图像捕获设备,其收集来自每个光偏转器的偏转散射光,所述图像捕获设备输出包括多个子图像的图像,每个子图像由从所述多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生,每个被照射颗粒在所述多个子图像中的每个子图像中被成像为光点,与每个被照射颗粒相关联的多个光点对应于以多个散射角散射的光并且由各自的光点参数表征,多个光点参数的组合指示与其相关联的被照射颗粒的尺寸。

17. 根据权利要求16所述的成像模块,还包括壳体,所述壳体包围所述多个光偏转器和所述图像捕获设备,所述壳体包括用于允许由所述颗粒散射的光的一部分透射到所述壳体内并到达所述多个光偏转器的光学窗口。

18. 根据权利要求16或17所述的成像模块,所述成像模块与其上存储计算机可执行指令的计算机可读存储器相结合,所述计算机可执行指令在由计算机执行时执行以下步骤:

-接收由所述图像捕获设备获取的图像;以及,针对每个被照射颗粒,

-识别所述多个子图像中的与所述被照射颗粒相关联的多个光点,确定与所述多个光点中的每个光点相关联的光点参数,以及从多个所述光点参数确定所述被照射颗粒的尺寸。

19. 一种计算机可读存储器,其上存储计算机可执行指令,所述计算机可执行指令在由计算机执行时执行以下步骤:

-从用于颗粒尺寸测量系统的成像模块接收图像,所述成像模块包括:

多个光偏转器,每个光偏转器被定位成接收和偏转由包含在监测体积中并被光束照射的颗粒散射的光;和

图像捕获设备,其收集来自每个光偏转器的偏转散射光,所述图像捕获设备输出包括多个子图像的图像,每个子图像由从所述多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生,每个被照射颗粒在所述多个子图像中的每个子图像中被成像为光点,与每个被照射颗粒相关联的多个光点对应于以多个散射角散射的光并且由各自的光点参数表征,多个光点参数的组合指示与其相关联的被照射颗粒的尺寸;以及,

针对每个被照射颗粒,

-识别所述多个子图像中的与所述被照射颗粒相关联的多个光点,确定与所述多个光点中的每个光点相关联的光点参数,以及从多个所述光点参数确定所述被照射颗粒的尺寸。

20. 一种颗粒尺寸测量方法,包括以下步骤:

-照射包含在监测体积中的颗粒;

-利用多个光偏转器接收并偏转由被照射颗粒散射的光;

-利用图像捕获设备收集来自每个光偏转器的偏转散射光并对所述偏转散射光成像;

-输出由所述图像捕获设备产生的图像,所述图像包括多个子图像,每个子图像由从所

述多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生,每个被照射颗粒在所述多个子图像中的每个子图像中被成像为光点,与每个被照射颗粒相关联的多个光点对应于以多个散射角散射的光;以及针对每个被照射颗粒,

-识别所述多个子图像中的与所述被照射颗粒相关联的多个光点,确定与所述多个光点中的每个光点相关联的光点参数,以及从多个所述光点参数确定所述被照射颗粒的尺寸。

21. 根据权利要求20所述的颗粒尺寸测量方法,其中,利用所述多个光偏转器接收和偏转的、由所述被照射颗粒散射的光是前向散射光。

22. 根据权利要求20或21所述的颗粒尺寸测量方法,其中,对于每个被照射颗粒,确定与所述多个光点中的每个光点相关联的光点参数的步骤包括确定一个能量参数,所述能量参数指示包含在与所述被照射颗粒相关联的所述光点中的光能量的量。

23. 根据权利要求20或21所述的颗粒尺寸测量方法,其中,确定每个被照射颗粒的尺寸的步骤包括:获得与每个被照射颗粒相关联的所述光点参数的一个或多个比率,以及将所述一个或多个比率与参考数据进行比较。

## 用于使用光散射技术进行个体颗粒尺寸测量的系统和方法

### 技术领域

[0001] 总体技术领域涉及颗粒尺寸测量技术，并且尤其涉及用于使用光散射进行个体颗粒尺寸测量的系统和方法。

### 背景技术

[0002] 空中悬浮的颗粒物 (PM) 在全球范围内受到越来越多的关注，并且已知其会对人体健康、环境和气候变化具有显著不利影响。世界各地的许多大城市都经历了PM浓度水平超过可接受阈值的频繁出现和/或很长的时段。2014年，世界卫生组织估计，环境空气污染导致的死亡人数占全世界总死亡人数的6.7%。研究还由与在大城市中进行的PM测量的相关性分析建立了空气污染与中风之间的联系，而其他研究将空气污染与儿童自闭症和学习障碍联系起来。空中悬浮的PM可以具有不同的来源和化学成分，并且可以远距离传播，使得旨在管理它们的法规变得越来越严格和复杂。环境监测方面的最新趋势和进展也导致了PM控制和管理方面的新需求。

[0003] 已知基于光散射的颗粒尺寸测量技术并且其已经用于不同领域以及不同类型的材料。这些技术通常涉及提供颗粒样本、照射样本、测量由颗粒散射的光以及分析散射测量结果以获得颗粒尺寸信息。颗粒尺寸分布也可以通过关于各个颗粒随时间所累积的统计数据来获得，或者通过使用应用于代表性样本群体的反演方法来获得。

[0004] 一些市场上可买到的系统使用光散射来确定颗粒的尺寸，通常使用激光二极管来产生用于颗粒照射的光束。通常由对环境介质的一部分进行采样的基于真空的泵送系统将颗粒供应到腔室。腔室的尺寸通常是小的，其具有数量级为几毫米 (mm) 长的侧壁。光束通常提供对颗粒的均匀照射，以降低由于不同的散射信号可能源于由光束的不同部分所照射的颗粒这一事实而引起的测量误差。光学检测器通常测量以相对于照射光束的传播方向约90°的散射角从颗粒散射的光量。这样的“侧向”散射检测方案可以允许将颗粒尺寸测量系统做得更紧凑并且减少到达检测器的杂散光的量。

[0005] 已知上面讨论的颗粒尺寸测量系统具有一些缺点和限制。首先，以90°散射的光的强度通常对颗粒的组成非常敏感。因此，根据颗粒组成对颗粒尺寸测量系统进行适当的校准通常是不可避免的，以确保有意义的颗粒尺寸测量。另外，通常与常规颗粒尺寸测量系统一起使用的基于真空的泵送系统容易受到机械磨损和损坏。因此，这些泵送系统通常需要仔细的检查和维护，这又可能会使颗粒尺寸测量系统的运行成本显著增加。通常还必须对泵送系统进行校准以确保将颗粒供应到腔室的供应速率是已知的，这是因为其值会影响每单位时间所分析的颗粒数量。常规系统的再一个限制来自于这样的事实，即颗粒是从环境介质中采样的并通过泵送系统被供应到腔室。采样过程可能导致不同的测量误差和偏差，这是例如由于入口被偏向于特定的颗粒尺寸，由于颗粒因为撞击系统部件而破裂，由于颗粒沉积在壁表面上等。

[0006] 已经开发了其他类型的颗粒尺寸测量系统，其中检测前向散射光而非侧向散射光。在这样的系统中，原则上可以使检测到的散射信号的强度对颗粒组成不太敏感。然而，

这些系统通常依赖于比如上面提到的反演方法,其产生的是颗粒尺寸分布而非各个颗粒的尺寸,并且常常需要应用颗粒组成的模型或先验知识。

[0007] 因此,在使用光散射来确定样品中各个颗粒的尺寸同时还对颗粒组成不太敏感并涉及较少的机械维护的颗粒尺寸测量系统和方法的开发方面仍存在许多挑战。

## 发明内容

[0008] 根据一个方面,提供了一种颗粒尺寸测量系统。所述颗粒尺寸测量系统包括:

[0009] -产生光束的光源,所述光束照射包含在监测体积中的颗粒;

[0010] -多个光偏转器,每个光偏转器被定位成接收并偏转由被照射颗粒散射的光;

[0011] -图像捕获设备,其收集来自每个光偏转器的偏转散射光,图像捕获设备输出包括多个子图像的图像,每个子图像由从多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生,每个被照射颗粒在多个子图像中的每个子图像中被成像为光点,与每个被照射颗粒相关联的多个光点对应于以多个散射角散射的光;和

[0012] -从图像捕获设备接收图像的处理单元,该处理单元被配置为,针对每个被照射颗粒,识别多个子图像中的与该被照射颗粒相关联的多个光点,确定与多个光点中的每个光点相关联的光点参数,并且从多个光点参数确定该被照射颗粒的尺寸。

[0013] 根据另一方面,提供了一种用于颗粒尺寸测量系统的成像模块。所述成像模块包括:

[0014] -多个光偏转器,每个光偏转器被定位成接收并偏转由包含在监测体积中并被光束照射的颗粒所散射的光;和

[0015] -图像捕获设备,其收集来自每个光偏转器的偏转散射光,图像捕获设备输出包括多个子图像的图像,每个子图像由从多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生,每个被照射颗粒在多个子图像中的每个子图像中被成像为光点,与每个被照射颗粒相关联的多个光点对应于以多个散射角散射的光并且由各自的光点参数表征,多个光点参数的组合指示与其相关联的被照射颗粒的尺寸。

[0016] 根据另一方面,提供了一种与计算机可读存储器相结合的如本文所述的成像模块,该计算机可读存储器在其上存储计算机可执行指令,所述计算机可执行指令在由计算机执行时执行以下步骤:

[0017] -接收由图像捕获设备获取的图像;并且针对每个被照射颗粒,

[0018] -识别多个子图像中的与该被照射颗粒相关联的多个光点,确定与多个光点中的每个光点相关联的光点参数,并且从多个光点参数确定该被照射颗粒的尺寸。

[0019] 根据另一方面,提供了一种其上存储计算机可执行指令的计算机可读存储器,所述计算机可执行指令在由计算机执行时执行以下步骤:

[0020] -从用于颗粒尺寸测量系统的成像模块接收图像,所述成像模块包括:

[0021] o多个光偏转器,每个光偏转器被定位成接收和偏转由包含在监测体积中并被光束照射的颗粒散射的光;和

[0022] o图像捕获设备,其收集来自每个光偏转器的偏转散射光,图像捕获设备输出包括多个子图像的图像,每个子图像由从多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生,每个被照射颗粒在多个子图像中的每个子图像中被成像为光点,与每个被照射颗粒

相关联的多个光点对应于以多个散射角散射的光并且由各自的光点参数表征,多个光点参数的组合指示与其相关联的被照射颗粒的尺寸;以及针对每个被照射颗粒,

[0023] -识别多个子图像中的与该被照射颗粒相关联的多个光点,确定与多个光点中的每个光点相关联的光点参数,并且从多个光点参数确定该被照射颗粒的尺寸。

[0024] 根据另一方面,提供了一种颗粒尺寸测量方法。该方法包括以下步骤:

[0025] -照射包含在监测体积中的颗粒;

[0026] -利用多个光偏转器接收并偏转由被照射颗粒散射的光;

[0027] -利用图像捕获设备收集来自每个光偏转器的偏转散射光并对该偏转散射光成像;

[0028] -输出由图像捕获设备产生的图像,所述图像包括多个子图像,每个子图像由从多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生,每个被照射颗粒在多个子图像中的每个子图像中被成像为光点,与每个被照射颗粒相关联的多个光点对应于以多个散射角散射的光;以及针对每个被照射颗粒,

[0029] -识别多个子图像中的与该被照射颗粒相关联的多个光点,确定与多个光点中的每个光点相关联的光点参数,并且从多个光点参数确定该被照射颗粒的尺寸。

[0030] 参照附图阅读本发明的优选实施方案后将会更好地理解本发明的实施方案的其他特征和优点。

## 附图说明

[0031] 图1A至1C为不同直径的粉尘状颗粒在被用波长为532纳米(nm)的光照射时的数值计算的散射截面曲线,其被绘制为散射角的函数。在图1C中,每个点代表1°的散射角范围内的平均值。

[0032] 图2A和图2B是在532nm的波长下针对各对散射角(1.5°和5°:实线;1.5°和25°:短虚线;以及5°和25°:长虚线)计算的散射截面的比率,其被绘制为粉尘状颗粒的直径的函数。图2A中覆盖角为0.1°,图2B中覆盖角为0.3°。

[0033] 图3示出了在532nm的波长下球形石英颗粒的数值计算的散射截面曲线,其被绘制为粒径的函数。每条曲线对应于范围从1°至180°的一个不同散射角。

[0034] 图4A至4D示出了在905nm的波长下三种不同的颗粒组成(碳质、石英和粉尘状气溶胶颗粒)的数值计算的散射截面曲线,其被绘制为散射角的函数。图4A至4D中的每一个对应于一个不同的粒径,即图4A:0.7微米( $\mu\text{m}$ ) ;图4B:1.5 $\mu\text{m}$ ;图4C:5 $\mu\text{m}$ ;以及图4D:10 $\mu\text{m}$ 。

[0035] 图5是根据一实施方案的颗粒尺寸测量系统的示意顶视图。

[0036] 图6A至6C是根据另一实施方案的同一颗粒尺寸测量系统的示意顶视图。图6A至图6C中的每一个例示了颗粒尺寸测量系统的多个光偏转器中的一个的覆盖角。

[0037] 图7是根据另一实施方案的颗粒尺寸测量系统的示意顶视图。

[0038] 图8是颗粒尺寸测量系统的两个实施方案的示意顶视图,这两个实施方案共享相同的光源和相同的处理单元。

[0039] 图9是根据另一实施方案的颗粒尺寸测量系统的示意顶视图,其中颗粒尺寸测量系统适于与个人防护装备一起使用。

[0040] 图10是根据另一实施方案的颗粒尺寸测量系统的示意顶视图。

- [0041] 图11是根据另一实施方案的颗粒尺寸测量系统的示意顶视图。
- [0042] 图12是根据另一实施方案的颗粒尺寸测量系统的示意顶视图。
- [0043] 图13是根据另一实施方案的颗粒尺寸测量系统的示意顶视图。
- [0044] 图14A和图14B分别是根据另一实施方案的颗粒尺寸测量系统的示意顶视图和侧视图。
- [0045] 图15A和图15B分别是根据另一实施方案的颗粒尺寸测量系统的示意顶视图和侧视图,其中照射监测体积中的颗粒的光束是扇形束。
- [0046] 图16是由图5的颗粒尺寸测量系统获取的图像的示意表示。
- [0047] 图17是根据一实施方案的颗粒尺寸测量方法的流程图。

## 具体实施方式

[0048] 在以下描述中,附图中的相似特征已经被给予相似的附图标记,并且为了不过度妨碍图,如果在一些图前面的图中已经标识出一些元件,在所述一些图中可能不对这些元件进行标示。在此还应该理解,附图的元件不一定按比例绘制,这是因为着重于清楚地例示出本实施方案的元件和结构。

- [0049] 总体概述-使用光散射技术的颗粒尺寸测量

[0050] 本说明书总体涉及用于确定包含在监测体积中的各个颗粒的尺寸的技术。根据不同的方面,提供了一种颗粒尺寸测量系统、一种用于颗粒尺寸测量系统的成像模块以及一种颗粒尺寸测量方法。本技术总体上使用光散射来在原位确定关于各个颗粒的尺寸的信息,而且在一些实施方案中还确定关于一个或多个其他颗粒特性的信息,所述其它颗粒特性包括但不限于体积内的位置、形状、组成、相和光吸收。在一些实施方式中,本技术还可以用于由随时间或跨大监测体积所测量的各个颗粒尺寸来确定流体介质中的一群颗粒的颗粒尺寸分布。

[0051] 本文描述的技术在需要确定包含在主介质中的各个颗粒的尺寸的任何应用中可能特别有用。举例来说,本技术可用于空气质量监测,以确定颗粒尺寸分布,尤其是空中悬浮的PM的PM2.5(最大达 $2.5\mu\text{m}$ 尺寸的PM)和PM10(最大达 $10\mu\text{m}$ 尺寸的PM)含量。本技术也可以用于对产生各种类型的气溶胶的过程(例如像发电厂)进行排放监测。其他应用可包括尾矿池监测和实时控制来自用于降低由采矿作业(例如采煤)所释放的粉尘的喷水器的水滴的尺寸分布。本技术还可用于制药药物生产的过程监测和控制,在制药药物生产中颗粒状药物的尺寸可影响药物递送过程的效率。又一种可能的应用包括对透明固体材料(例如玻璃)的质量评估,以检测和确定可散射光的团块和/或表面缺陷的尺寸。

[0052] 如本文所使用的,术语“颗粒”及其任何变体广义地指能够对入射到其上的光进行散射的任何单独的质量、结构或折射率不均匀性或以上各项的任意组合。应该理解的是,原则上,术语“颗粒”并不意味着在尺寸、形状或组成方面受到限制。例如,一些实施方案可适用于确定基本球形的颗粒的尺寸,所述基本球形的颗粒具有约 $0.1\mu\text{m}$ 至 $100\mu\text{m}$ 、尤其是约 $0.2\mu\text{m}$ 至 $40\mu\text{m}$ 的直径范围,然而,在其他实施例中可以设想其他形状和尺寸。颗粒和颗粒悬浮、分散、包含或以其他方式定位于其中的主介质都可以是气态、液态或固态的,只要颗粒和主介质具有不同的折射率。主介质可以是透明或半透明的。举例来说,在一些实施方案中,颗粒可以是悬浮在气体或液体介质中的固体颗粒。除非另有说明,否则术语“颗粒尺寸”及其

任何变体在此指颗粒的直径。

[0053] 如本文所使用的,术语“散射”及其任何变体在广义上指由于与一个或多个颗粒的物理相互作用而由一个或多个颗粒引起的光分散。所涉及的机制可以包括但不限于反射、折射、吸收和衍射以及发出荧光、发出磷光或发出冷光现象。取决于起作用的特定物理过程,散射可以伴随有或不伴随有散射光相对于照射颗粒的光的波长偏移。

[0054] 如本文所使用的,术语“光”、“光学的”及其任何变体旨在指代电磁波谱的任何合适区域中的电磁辐射,并且具体地,不限于可见光,而是还可以包括太赫兹、红外和紫外线范围。举例来说,在一些实施方案中,术语“光”和“光学的”可以涵盖具有范围从约350nm至1000nm的波长的电磁辐射。

[0055] 本领域中已知,光散射可以被分类为“前向散射”、“后向散射”和“侧向散射”。术语“前向散射”、“后向散射”和“侧向散射”是指在分别与入射光束的传播方向成小于90°、大于90°和接近90°的角度的方向上散射的光。如下面将进一步讨论的,在一些实施方式中,本文所述的颗粒尺寸测量技术可以使用小角度的前向散射以便消除或至少降低颗粒尺寸测定对颗粒的折射率(以及因此对颗粒的组成)的依赖性。

[0056] 参照图1A和图1B,已知对于小散射角而言,给定波长下的前向散射截面通常随散射角而单调减小。如本文所使用的,术语“小散射角”通常指的是当以弧度表示时小于光波长与粒径之比的散射角。还已知,最小散射角与粒径成反比变化,在该最小散射角,角散射截面的值等于在零度时的其最大值的一半。原则上,如例如J.Raymond Hodkinson的“Particle Sizing by Means of the Forward Scattering Lobe”应用光学第5卷第5期第839-844页(1966)中所述,这些特性可以使得能够从单个颗粒的主要前向散射波瓣实现颗粒尺寸测量。

[0057] 举例来说,在本技术的一些实施方案中,可以通过如下方式确定颗粒的尺寸:收集不同散射角的前向散射光,然后使用由米氏理论或由另一适当的光散射理论获得的参考数据确定在选定的光波长下更好地匹配测量数据的颗粒尺寸。如本领域中已知的,米氏散射理论根据各向同性和均匀的球形颗粒的尺寸、折射率和入射光的波长提供来自该颗粒的散射光强度的完整角度分布。

[0058] 根据本文描述的技术,以两个或更多个散射角测量由颗粒散射的光量。在一些实施方式中,可以在两个或更多个所测得的散射信号之间获得一个或多个比率。然后可以将这个或多个比率与参考数据,例如由米氏理论计算出的理论比率,进行比较以确定颗粒的尺寸。

[0059] 应该理解的是,实现这样的方法可能涉及仔细选择在给定波长下将其测量散射信号的不同散射角。举例来说,如图1A和图1B中可见的,对于直径在约0.2μm至8μm范围内的颗粒,角散射截面对于小于约5°的散射角具有单调性。然而,对于大于8μm的颗粒,可以看出,即使在小散射角的情况下,角散射截面也根据散射角而振荡。这些振荡是由颗粒的不同部分所散射的波之间的依赖于角度的干涉而造成的。如图1C中可见的,通过在1°的散射角范围(或覆盖角)上对曲线的每个点进行平均,这些振荡的振幅趋于减小。应该指出的是,大多数从工业厂房释放的颗粒通常不是完美的球形。在一些实施方式中,颗粒的非球形特征可以具有可以使角散射截面的振荡减弱的平均效应。

[0060] 转向图2A和图2B,例示了针对各对散射角——即1.5°和5°(实线),1.5°和25°(短

虚线)以及 $5^\circ$ 和 $25^\circ$ (长虚线)——计算的散射截面的比率的曲线。每个比率被绘制为用532nm波长的光照射的粉尘状颗粒的直径的函数。图2A中覆盖角为 $0.1^\circ$ ,图2B中覆盖角为 $0.3^\circ$ 。图2B中的较大覆盖角旨在模拟用于收集散射光的光学器件中孔径的存在。

[0061] 如图2A和图2B中可见的,对于最大达约 $7\mu\text{m}$ 的直径而言, $1.5^\circ$ 和 $5^\circ$ 处的散射强度之间的比率(实线)单调增加,这使得原则上可以仅由该比率确定小于 $7\mu\text{m}$ 的颗粒的尺寸。然而,对于大于 $7\mu\text{m}$ 的直径振荡的存在可以防止或者至少使得更难以适当地确定该范围内的颗粒尺寸。此外,由于对于 $0.1$ 至 $1\mu\text{m}$ 之间的直径,比率几乎是恒定的,所以仅从该比率可能不容易区分出这个范围内的颗粒,但是如果在分析中考虑 $1.5^\circ$ 和 $25^\circ$ 处的散射强度之间的比率(短虚线)以及 $5^\circ$ 和 $25^\circ$ 处的散射强度之间的比率(长虚线)中的一个或这两者,则可以容易地区分出这个范围内的颗粒。

[0062] 图2A还示出,对于大于 $7\mu\text{m}$ 的颗粒,一些直径范围会显示出这三个比率的值的相似组合,从而防止或至少使得难以以足够的精确度确定颗粒尺寸。在这种情况下,从图2B看出,收集光学器件的孔径可以提供平均效应,该平均效应趋于根据直径使比率中的振荡减弱并且可以减轻图2A中观察到的至少一些模糊性。具体而言,看出,对于较大的颗粒(即超过约 $20\mu\text{m}$ ),比率中的振荡被更强烈地衰减,因此减小了观察到相似比率值的粒径范围,并且反过来提高了尺寸辨别能力。

[0063] 现在参考图3,例示了532nm波长下球形石英颗粒的所计算的角散射截面曲线,其被绘制为粒径的函数,每条曲线对应于 $1^\circ$ 至 $180^\circ$ 之间的一个不同散射角。看出,对于小散射角(即小于 $5^\circ$ ),当粒径从 $0.2\mu\text{m}$ 增加到 $1\mu\text{m}$ 时角散射截面变化最高达三个数量级,粒径在 $1\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ 之间增加时角散射截面变化两个到三个数量级,并且粒径在 $10\mu\text{m}$ 至 $40\mu\text{m}$ 之间增加时角散射截面变化一个数量级或更少,即粒径在 $0.2\mu\text{m}$ 至 $40\mu\text{m}$ 之间增加时角散射截面总共变化六至七个数量级。因此,在一些实施方式中,在小的前向散射角下测量的散射信号的强度可以提供对颗粒尺寸的数量级的估计。换句话说,所测量的散射强度的绝对值可以用来获得对颗粒尺寸的粗略估计。将从这一预分类获得的结果与从一对或多对散射角下的散射强度的比率收集的信息相结合可以允许在将测量数据与参考数据进行比较时以提高的精确度确定颗粒尺寸。

[0064] 图3还例示了在一些实施方式中仔细选择不同观察角度以允许以足够的精确度确定小颗粒的尺寸的益处。举例来说,在具有约 $0.2\mu\text{m}$ 至 $0.6\mu\text{m}$ 的直径的颗粒的情况下,在 $1^\circ$ 至 $10^\circ$ 范围内的不同观察角度之间几乎不会感觉到信号差异。

[0065] 可能影响颗粒尺寸测量的有效性的另一方面为对颗粒组成或等价地对颗粒折射率的依赖性。参照图4A至图4D,例示了在905nm的波长下三种不同的颗粒组成(碳质、石英和粉尘状气溶胶颗粒)的所计算的角散射截面曲线,其被绘制为散射角的函数,图4A至图4D中的每一个对应于一个不同的颗粒尺寸(分别为 $0.7\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 的直径)。图4A至图4D中描绘的曲线是假设颗粒的单模对数正态分布来计算的,以避免或至少减弱大散射角下振荡的影响。

[0066] 如图4A中所见的,在 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 之间的整个散射角范围内,较小颗粒(即小于光波长)的角散射截面可以不可忽略地取决于颗粒组成。更具体地,看出,对于较小的颗粒而言,强吸收颗粒散射光的程度不如弱吸收颗粒强。然而,对于主衍射波瓣(即小于 $90^\circ$ ),相对角度特性通常不显著地取决于颗粒组成。因此,使用所测量的散射信号的绝对值和相对值两

者来确定颗粒尺寸对于其组成不是先验已知的较小颗粒而言可能是有用的。

[0067] 同时,图4B至图4D表明,在小的前向散射角下(即,在约 $1^{\circ}$ 至 $5^{\circ}$ 之间),较大颗粒(即大于光波长的颗粒)的角散射截面基本上与颗粒组成无关。因此,在一些实施方式中,可以使用在小散射角下测量的前向散射信号之间的关系(例如比率)来确定或至少估计各个颗粒的尺寸,而无需事先知道它们的组成。相比之下,图4A至图4D还例示了,随着散射角增大,颗粒组成可能对确定颗粒尺寸的能力具有显著影响。这可以至少部分地解释为什么基于侧向散射测量的现有颗粒尺寸测量系统通常需要根据颗粒组成进行校准。

[0068] 颗粒尺寸测量系统

[0069] 总体参照图5至图15B,例示了用于确定存在于监测体积24中的颗粒22的尺寸的颗粒尺寸测量系统20的各示例实施方案。这些颗粒在下文中总体统称为22,但单独地称为22<sub>1</sub>和22<sub>2</sub>。大体地描述并且如下面更详细讨论的那样,颗粒尺寸测量系统20总体包括四个主要部件,即光源26、多个光偏转器28a至28c、图像捕获设备30和处理单元32。

[0070] 光源26产生随后沿着光轴36传播的光束34,光束34照射包含在监测体积24中的颗粒22。如本文所使用的,术语“监测体积”指一个空间区域,该空间区域包含由光束照射的颗粒并被限定成使得从该空间区域中的每个被照射颗粒散射的光在从多个光偏转器偏转之后以多个不同的散射角被收集。换句话说,监测体积表示可以经由多个光偏转器中的每一个由图像捕获设备来成像的光束部分。因此,将理解,监测体积不仅由光束的横截面面积限定,而且由每个光偏转器在图像捕获设备的视场中的位置限定。就这一点而言,应当注意,术语“位置”及其任何派生词在本文中指对象在空间中的全部位置信息,包括位置和方向坐标。

[0071] 应当注意,在一些情况下,可以针对位于如本文所定义的“监测体积”之外但是其散射光的一部分由图像捕获设备经由多个光偏转器中的至少一个收集的被照射颗粒来获得颗粒尺寸信息。举例来说,在可以由多对散射角下的散射强度的比率来确定颗粒尺寸的实施方式中,可以仅由图像捕获设备经由两个光偏转器所收集的散射光来确定给定颗粒的尺寸,即使颗粒尺寸测量系统包括多于两个这种光偏转器。

[0072] 总体而言,监测体积24中的被照射颗粒22导致光束34向所有方向散射。每个光偏转器28a至28c被定位成接收并偏转来自监测体积24中的每个被照射颗粒22的某一散射角范围内的散射光38。如上所述,在一些实施方案中,光偏转器28a至28c可以被配置为将前向散射光偏转到图像捕获设备30上。更具体地,在这样的实施方案中,每个光偏转器28a至28c可以被定位成使得偏转从存在于监测体积24中的每个颗粒22散射的光38的相应前向散射分量。换句话说,对于每个颗粒22,由每个光偏转器28a至28c覆盖的散射角范围被限制为相对于光束34沿着光轴36的传播方向小于 $90^{\circ}$ 的散射角。举例来说,在一些实施方案中,由每个光偏转器28a至28c偏转的前向散射分量表示相对于光束34的传播方向以小于 $35^{\circ}$ 的角度散射的光38。

[0073] 图像捕获设备30收集来自多个光偏转器28a至28c中的每一个光偏转器的、在其视场内的偏转散射光40。为此目的,图像捕获设备30可以包括收集光学器件46,该收集光学器件适于收集来自多个光偏转器28a至28c的偏转散射光40。图像捕获设备30还输出包括多个子图像的图像,其中每个子图像由从多个光偏转器28a至28c中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生。每个被照射颗粒22在每个子图像中被成像为光点,使得与给定颗粒22相关

联的多个光点对应于由该颗粒22以多个不同散射角散射的光。

[0074] 处理单元32然后从图像捕获设备30接收图像。如本文所使用的，术语“处理单元”表示颗粒尺寸测量系统的、至少部分地控制和执行操作颗粒尺寸测量系统所需的功能的实体，所述操作包括但不限于从由图像捕获设备获取的图像确定颗粒尺寸。处理单元32可以被实现为单个单元或多个互连的处理子单元。而且，处理单元32可以由计算机、微处理器、微控制器、中央处理单元(CPU)或由任何其他类型的处理资源或被配置为共同作为处理单元运行的这样的处理资源的任何组合来体现。处理单元32可以设置在一个或多个通用计算机内和/或任何其他合适的计算设备内。而且，处理单元32可以用硬件、软件、固件或其任何组合来实现，并且可以经由适当的通信端口连接到颗粒尺寸测量系统20的各部件。

[0075] 对于每个被照射颗粒22，处理单元32首先被配置为识别多个子图像中的与颗粒22相关联的多个光点。将领会的是，通过适当地了解或校准光束34、光偏转器28a至28c和图像捕获设备30的相对位置，可能可以将监测体积24中的位置与每个子图像中可见的每个光点相关联。换句话说，有可能确定在监测体积24中的特定位置处由每个被照射颗粒22散射的光将在从光偏转器28a至28c中的一个对应的光偏转器偏转之后在每个子图像中于何处形成光点。

[0076] 处理单元32还被配置成确定与多个光点中的每一个相关联的光点参数，并且从多个光点参数确定被照射颗粒22的尺寸。在一些实施方式中，每个光点参数可以是包含在与其相关联的光点中的光能量的量的能量参数。在其他实施方式中，光点参数可以对应于，但不限于，光点的尺寸、形状、偏振或光谱含量或其任何组合。当光点参数是能量参数时，处理单元32可以被配置为计算或以其他方式获得与每个被照射颗粒22相关联的能量参数之间的一个或多个比率。在这种情况下，可以由一个或多个比率与参考数据的比较来确定每个被照射颗粒22的尺寸。举例来说，参考数据可以从基于米氏散射理论或另一适合的理论框架(例如，瑞利(Rayleigh)或弗劳恩霍夫(Fraunhofer)散射理论)的数值或分析模型获得，从而允许获得颗粒的参考散射响应。特别地，获得参考数据的方式并不意在限制本文描述的技术的应用范围。

[0077] 值得一提的是，本文描述的技术可以采用相对信号(例如，信号比率)而非绝对信号。在一些实施方案中，使用相对信号可以使颗粒尺寸测量系统20对照射颗粒的光束的横向辐照度分布中的均匀性波动较不敏感。因此，在这样的情况下，由于散射信号的比率被用于颗粒尺寸测量，所以光束在均匀性和/或功率稳定性方面可能不需要满足特定的要求。而且，被照射颗粒22可以位于监测体积24中的任何位置，而不显著降低尺寸测定的有效性。

[0078] 还应该注意的是，在一些实施方式中，光偏转器28a至28c和图像捕获设备30可以限定用于颗粒尺寸测量系统20的成像模块42。在下面呈现的示例实施方案中，成像模块42被描绘和描述为形成颗粒尺寸测量系统20的一部分。然而，将理解的是，在其他实施方案中，成像模块42可以作为用于与其他部件一起用于颗粒尺寸测量系统的单独的集成单元来制造和销售，所述其他部件例如但不限于光源和处理单元。然而，在任一种情况下，成像模块42都包括多个光偏转器28a至28c和图像捕获设备30，所述多个光偏转器被定位成接收并偏转包含在监测体积24中并且被光束34照射的被照射颗粒22所散射的光38，所述图像捕获设备用于收集来自光偏转器28a至28c中的每个的偏转散射光40。

[0079] 在一些实施方式中，成像模块42可以与其上存储计算机可执行指令的计算机可读

存储器43相结合使用,所述计算机可执行指令在由计算机或处理单元32执行时执行某些步骤。这些步骤可以包括但不限于,接收由成像模块42的图像捕获设备30获取的图像,以及针对每个被照射颗粒22:识别多个子图像中的与被照射颗粒22相关联的多个光点;确定与多个光点中的每个光点相关联的光点参数;并且从多个光点参数确定被照射颗粒22的尺寸。

[0080] 如本文所使用的,术语“计算机可读存储器”意在指非暂时性且有形的计算机产品,其可以存储和传送用于根据由图像捕获设备获取的图像执行颗粒尺寸测量分析的可执行指令。计算机可读存储器43可以是任何计算机数据存储设备或这样的设备的组件,所述这样的设备包括例如:临时存储单元,比如随机存取存储器(RAM)或动态RAM;永久存储装置,比如硬盘;光存储设备,比如CD或DVD(可重写或一次写入/只读);闪存;和/或其他非暂时性存储器技术。如本领域普通技术人员可以理解的,可以设置多个这样的存储设备。计算机可读存储器43可以与处理单元32相关联,耦合到该处理单元32,或包含在该处理单元32中,其中处理单元32被配置为执行存储在计算机可读存储器43中的指令。

[0081] 现在将参照图5至图15B的示例实施方案在下面给出关于颗粒尺寸测量系统和用于其中的成像模块的各种结构和操作特征的更多细节。

[0082] 更具体地参照图5,示出了颗粒尺寸测量系统20的第一示例实施方案。颗粒尺寸测量系统20首先包括光源26。光源26产生照射包含在监测体积24中的颗粒22的光束34,以便使得光束34的一部分由被照射颗粒22散射。每个被照射颗粒22从监测体积24中的相应位置产生散射光38。将认识到,尽管为了清楚起见,图5描绘了从仅两个颗粒22<sub>1</sub>、22<sub>2</sub>散射的光38,但实践中,在任何给定时间包含于监测体积24中的颗粒的数量可以根据具体应用而不同。

[0083] 光源26可以通过适于产生适合于基于光散射的颗粒尺寸测量应用的光束34的任何适当的装置或装置的组合来体现。举例来说,在一些实施方式中,光源26可以是激光源,该激光源被配置为产生准直激光束形式的光束34,该光束例如具有几毫弧度量级(例如介于1和3毫弧度之间)的相对小的发散度。激光束可以是单色的,尽管其光谱可以在其中心波长的任一侧扩展一定程度。激光束可以被偏振或者不被偏振,并且可以以连续波方式和脉冲方式两者工作。

[0084] 举例来说,在非限制性实施方案中,光源26可以是产生具有532nm的波长、小于1nm的线宽、在 $1/e^2$ 处小于2.5mm全宽的光束直径、近似高斯横向辐照度分布并且携带大约10毫瓦(mW)的平均功率的激光束的倍频二极管泵浦固态Nd:YAG激光器模块。当然,适用于产生具有合适特性的激光束的各种其他类型的激光源可以用于执行本技术,所述其他类型的激光源比如,举例而言气体激光器、固态激光器、二极管激光器、染料激光器、光纤激光器等。光源的选择可由若干因素决定,所述因素包括但不限于波长、功率、空间和光谱分布以及对于脉冲光源而言的脉冲特性。

[0085] 将理解的是,光束34的辐照度在其横截面面积上通常不均匀,一般在靠近光轴36和光源26的区域中较大。这意味着入射到颗粒22上的光的辐照度通常将随着监测体积24中的颗粒位置而变化。结果,散射光的强度也将取决于监测体积24内的颗粒位置。在一些实施方式中,使用具有不均匀辐照度分布比如高斯分布的光束34可以有利地扩展可以用颗粒尺寸测量系统20测量的颗粒尺寸范围。

[0086] 短暂地转到图15A和图15B,照射存在于监测体积24中的颗粒22的光束沿其横向尺寸之一可以呈扇形。在这种情况下,颗粒尺寸测量系统还可以包括布置在光源26和监测体

积24之间的束调节元件68,该束调节元件用于将光束34成形或转换成扇形束70。如下面进一步描述的,使用扇形束70可以提供一种使监测体积24的尺寸增加(例如,增加一到三个数量级)的方式,这在低颗粒浓度下可能是有利的。

[0087] 光束34的波长可以处于可见范围内以匹配大多数市场上可买到的图像捕获设备,或者处于适于待测量的特定粒径范围的电磁波谱的任何适当部分中。举例来说,可以利用的经验法则是,对于小于25°的观察角度,如果光波长大约是待测量的粒径的两倍,可以实现适当的颗粒尺寸测量,因为其会在最小和最大观察角度之间产生大于1.2的信号比率。例如,对于具有大于250nm直径的颗粒,利用低于500nm的波长,以5°和25°散射的强度之间的信号水平差异通常将大于20%。

[0088] 除了激光源之外,在一些实施方案中可以使用其他类型的光源,包括但不限于发光二极管(LED)和其他宽带光源。举例来说,可以使用具有范围从几nm到大约10nm的线宽的二极管激光源或具有在30nm的范围内的线宽的光纤耦合LED。可以用合适的光束准直器对从光纤耦合LED发射出的光束进行准直,以得到具有所需或所期望的尺寸特性的照射光束。例如,这可以允许光束随着距光源的距离增加而从平顶(top-hat)分布变成高斯横向辐照度分布。在一些实施方式中,平顶束的相对平坦的横截面辐照度分布可以使对绝对散射强度测量数据的分析和对颗粒尺寸分布的计算简化。

[0089] 应该注意的是,由于扩展的LED发射光谱提供对散射截面的平均,当使用LED源时,可以使作为尺寸和散射角的函数的颗粒散射响应中的振荡显著减小。因此,根据所涉及的尺寸和波长范围,米氏散射理论可以提供关于这些振荡的程度的信息。如果需要,然后可以实施用于使颗粒尺寸测量分析中的这些振荡的振幅降低的策略。

[0090] 另外的实施方案可以使用具有宽光谱带宽的光源,可能会结合光谱分辨的图像捕获设备或与二向色或Bayer(拜耳)光学滤波器组合或不组合的多个图像捕获设备。宽带光源的一种替代方案可以涉及使用产生具有不同颜色并且变得共线的单色光束的多个光源。在又一些实施方案中,光源可以通过具有频率转换能力的用于提供两个或三个输出波长(例如,1064nm、532nm和355nm)的多频源(例如,Nd:YAG激光器)来体现。这样的光源可以通过扩展可测量的颗粒尺寸的范围来提供补充的颗粒尺寸分布信息,其中较短和较长波长下的光散射通常分别对较小和较大的颗粒更敏感。应该注意,与具有光谱解析成像能力的图像捕获设备相结合使用多频或宽带光源可以允许从相同的系统获得关于颗粒尺寸和组成两者的信息。

[0091] 在图5的实施方案中,颗粒尺寸测量系统20还包括多个光偏转器28a至28c,其中的每一个光偏转器被定位成接收并偏转从被照射颗粒22散射的光38。如本文所使用的,术语“光偏转器”意在指可以至少部分地重定向入射到其上的光的光程的光学元件或光学元件的组合。每个光偏转器可以通过反射元件、折射元件或衍射元件或其组合来体现。光偏转器的非限制性示例包括平面和曲面镜、分束器、棱镜、滤光器、衍射光栅和全息元件。

[0092] 在所例示的实施方案中提供了三个光偏转器28a至28c,然而,其他实施方案可以包括两个光偏转器或三个以上的光偏转器。特别是,一对光偏转器可足以用于针对有限的颗粒尺寸范围实现适当的颗粒尺寸测量。取决于应用,光偏转器可以相互不同或相同。

[0093] 在图5的实施方案中,多个光偏转器28a至28c由通过平面镜体现的三个光反射器组成。在光束34的波长下,所述平面镜可以具有高于90%的反射率,但是在其他实施方案中

可以使用不同的反射率值。平面镜可以具有相同或不同的尺寸。例如，在图5中，第一和第二光偏转器28a、28b是边长为25mm的方形镜，而第三光偏转器28c是边长为50mm的方形镜。提供这些尺寸仅用于说明的目的，因此在其他实施方案中，光偏转器28a至28c的尺寸和形状可以不同。在图5的实施方案中，光偏转器28a至28c中的每个相对于预期的监测体积被定位，以拦截和偏转从被照射颗粒22散射的光38的相应前向散射分量，每个前向散射分量都位于一个不同的散射角范围内。

[0094] 如上所述，在一些实施方案中，颗粒尺寸测量系统20可以有利地基于以不同的小前向散射角测量的散射强度的比率来确定各个颗粒尺寸，以消除或至少减轻颗粒组成对尺寸确定分析的影响。另外，在一些情况下，多个光偏转器28a至28c可以被定位成使得它们的表面法线平行于公共水平面，该公共水平面在本文中被称为“系统平面”。在图5中，系统平面平行于页面平面并且包含光束34的光轴36和图像捕获设备30的光轴两者。

[0095] 为了更有效地使用图像捕获设备30的可用光敏表面，可以对每个光偏转器28a至28c的竖向尺寸进行选择以匹配图像捕获设备30的视场的竖向尺寸。此外，如图15A和图15B中所描绘的，照射颗粒22的光束34可以被成形为扇形束，其中扇形束的平面垂直于系统平面定向。在这样的实施方式中，可以使用图像捕获设备30的光敏表面的更大部分，且可能是该光敏表面的全部。

[0096] 仍然参照图5，每个光偏转器28a至28c可以由相对于光轴36的角度 $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$ ，距光轴36的距离以及距图像捕获设备30的距离来表征。每个光偏转器28a至28c的角度 $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$ 在本文中被定义为在照射光束34的光轴36和在监测体积24中的散射点与该偏转器28a至28c的中心之间延伸的线之间所形成的角度，使得从散射点散射并撞击在该偏转器28a至28c的中心上的光沿着在收集光学器件46的出射平面处与图像捕获设备30的光轴相交的路径偏转。每个光偏转器28a至28c距光轴36的距离对应于该光偏转器28a至28c的中心与对应的散射角 $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$ 的顶点在光轴36上的位置之间的距离。最后，每个光偏转器28a至28c距图像捕获设备30的距离对应于该光偏转器28a至28c的中心与图像捕获设备30的光轴在收集光学器件46的出射平面上的交点之间的距离。

[0097] 在一些实施方式中，可以在图5中例示的“主”光偏转器28a至28c的上方和/或下方添加附加的光偏转器(未示出)。这些附加的光偏转器中的每一个都可以由平面镜来体现并且相对于监测体积24略微不同地定向。当主光偏转器28a至28c的偏转表面的表面法线平行于图5中的系统平面时，附加的光偏转器的偏转表面的表面法线不平行于该系统平面。提供这些附加的光偏转器可以提高颗粒尺寸测定的精确度，尤其是当包含在监测体积24中的颗粒的尺寸范围宽时。另外，通过使附加的光偏转器相对于主光偏转器28a至28c倾斜，可以使用图像捕获设备30的光敏表面的较大部分。

[0098] 在图5的实施方案中，颗粒尺寸测量系统20还包括图像捕获设备30，该图像捕获设备收集来自光偏转器28a至28c中的每个的、在其视场44内接收的偏转散射光40。有利地，可以使用单个图像捕获设备来收集来自每个光偏转器的偏转散射光。如本文所使用的，术语“图像捕获设备”指能够获取表示监测体积中的被照射颗粒所散射的光并且包含关于监测体积中的被照射颗粒的空间分布的信息的图像使得监测体积中不同位置处的颗粒被成像在图像中的不同区域上的任何设备或设备的组合。术语“视场”指可以由图像捕获设备成像的场景的角度范围。如上所述，在一些实施方案中，如果光源具有宽光谱带宽或者如果使用

发射不同光谱范围内的光的多个光源,可以设置多于一个图像捕获设备。然而,在这样的情况下,图像捕获设备中的每个通常会被配置为收集来自每个光偏转器的偏转散射光。

[0099] 图像捕获设备30的视场44至少部分地包含,并且在一些情况下完全包含,每个光偏转器28a至28c。此外,在一些实施方式中,通过多个光偏转器28a至28c尽可能多地填充图像捕获设备30的视场44可能是有利的。事实上,通常不能从与相邻光偏转器之间的死区相对应的图像区域检索与包含在监测体积24中的颗粒22有关的有价值信息。

[0100] 在图5的实施方案中,图像捕获设备30可以包括收集光学器件46,该收集光学器件适于收集来自多个光偏转器28a至28c的偏转散射光40。收集光学器件46可以包括透镜、反射镜、滤光器、光纤,以及任何其他合适的反射、折射和/或衍射光学部件。例如,在所例示的实施方案中,收集光学器件46包括物镜。在非限制性的示例实施方案中,图像捕获设备30可以具有20°的视场,其中物镜具有12.5mm的焦距和1.4的f值,但是在其他实施方案中可以使用其他参数值。

[0101] 图像捕获设备还可以包括传感器阵列48。术语“传感器阵列”在本文中指由能够检测从场景入射到其上的电磁辐射并且通常通过将检测到的辐射转换成电数据来生成场景图像的多个光敏元件(像素)组成的设备。取决于应用,像素可以布置成二维或线性阵列。术语“像素数据”指与每个像素相关联的图像信息,并且可以包括指示在某一时间段内由像素吸收的电磁能量的总量的强度数据。

[0102] 传感器阵列48可以通过互补金属氧化物半导体(CMOS)或电荷耦合器件(CCD)图像传感器来体现,但是可以替代地使用其他类型的传感器阵列(例如电荷注入器件或光电二极管阵列)。举例来说,在非限制性实施方案中,传感器阵列由CCD图像传感器来体现,该CCD图像传感器由具有7.4μm方形像素的640x480像素组成。

[0103] 结合图16参考图5,图像捕获设备30被配置为输出由多个子图像52a至52c组成的图像50,其中的每个子图像由从多个光偏转器28a至28c中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生。将理解的是,监测体积24中的每个被照射颗粒22在多个子图像52a至52c中的每个子图像中会被成像为光点54(在下文中总体统称为54,但单独称为54a<sub>1</sub>、54a<sub>2</sub>、54b<sub>1</sub>、54b<sub>2</sub>、54c<sub>1</sub>和54c<sub>2</sub>)。因此,与每个颗粒22相关联的多个光点54对应于以多个散射角散射的光。

[0104] 举例来说,在图16中,图像50包括分别与图5中所描绘的三个光偏转器28a至28c相關的三个子图像52a至52c。每个子图像52a至52c包括两个光点54,每个光点54与监测体积24中的两个被照射颗粒22<sub>1</sub>、22<sub>2</sub>中的一个相关联。更具体地,第一子图像52a包括表示由第一颗粒22<sub>1</sub>散射并由第一光偏转器28a偏转的光的第一光点54a<sub>1</sub>和表示由第二颗粒22<sub>2</sub>散射并由第一光偏转器28a偏转的光的第二光点54a<sub>2</sub>。同时,第二子图像52b包括表示由第一颗粒22<sub>1</sub>散射并由第二光偏转器28b偏转的光的第一光点54b<sub>1</sub>和表示由第二颗粒22<sub>2</sub>散射并由第二光偏转器28b偏转的光的第二光点54b<sub>2</sub>。最后,第三子图像52c包括表示由第一颗粒22<sub>1</sub>散射并被第三光偏转器28c偏转的光的第一光点54c<sub>1</sub>以及表示由第二颗粒22<sub>2</sub>散射并被第三光偏转器28c偏转的光的第二光点54c<sub>2</sub>。应该注意的是,图16中的光点54的尺寸、形状和间隙不一定按比例绘制。

[0105] 将理解的是,当入射到监测体积24中的颗粒22上的光束34是笔形束并且当多个光偏转器28a至28c的偏转表面的表面法线平行于公共平面时,则由图像捕获设备30获取的光点54总体上将沿着图像50中的线散布。然而,在颗粒尺寸测量系统20的其他配置中,光点54

可以沿着图像50的两个维度形成,而不偏离本文描述的技术的范围。

[0106] 将理解的是,使用单个图像捕获设备的一个可能的优点在于,对从多个光偏转器中的不同光偏转器接收的散射光信号的测量可以通过图像捕获设备的曝光时间自动同步。相反,使用多个独立的图像捕获设备,这些图像捕获设备中的每个从多个光偏转器中的一个对应的光偏转器收集散射光可能并不直截了当。实际上,取决于测量的时间分辨率和颗粒穿过监测体积的传输时间,当采用多于一个图像捕获设备时,解释和分析结果可能变得相当复杂。

[0107] 还将理解的是,给定颗粒与图像捕获设备之间的散射路径长度通常会根据多个光偏转器中的哪一个光偏转器将图像捕获设备上的散射光进行了重定向而改变。因此,对于每个颗粒,不同子图像中的光点通常不会以相同的效率聚焦。取决于应用,这可能会或可能不会提供优点。举例来说,在图5的实施方案中,对于经由第三光偏转器28c到达图像捕获设备30的散射光,散射路径长度更长。因此,如果代表给定颗粒的光点在第三子图像中清晰聚焦,它可能在第一和第二子图像中稍微模糊。在所有条件相同的情况下,相比于对于第一和第二子图像中的每个中较大的、较少聚焦的光点而言,对于第三子图像中较小的、更聚焦的光点而言测得的信号趋于更加强烈。然而,这一差异可以至少部分地由以下事实补偿:对于第三光偏转器28c,散射截面效率趋于较小。这特别是由于与第一和第二光偏转器28a、28b相比第三光偏转器28c偏转以更大的散射角并且在更小的立体角内散射的光这一事实。因此,利用与不同光偏转器28a至28c相关联的不同散射截面效率可以提供一种更有效地使用图像捕获设备30的可用动态范围的方式。

[0108] 将理解的是,颗粒在监测体积中通常不是静止的,这是因为它们由主介质中的空气或液体流携带。举例来说,对于具有约4mm的直径和在垂直于光轴36的方向上约1米每秒(m/s)的空气速度的光束而言,颗粒穿过光束宽度的传输时间为4毫秒(ms)。市场上可买到的图像捕获设备的曝光时间可以是1ms量级的,并且在一些情况下,可以低至10微秒(μs)。在上面的实施例中,使用大于4ms的曝光时间以及33帧每秒的刷新速率可以增加使颗粒在图像获取过程中穿过光束的中心区域的可能性,并且因此可以增加检测到颗粒的可能性。因此,通过增加曝光时间,由于更多颗粒会穿过光束,颗粒尺寸测量系统所监测的体积的大小会有效地增加。

[0109] 当颗粒浓度小时(例如,当在曝光时间期间监测体积中平均存在一个或少于一个颗粒时),通过增加曝光时间来增加监测体积的有效大小的可能性可能是有用的。此外,如果对于给定颗粒图像捕获设备所检测的信号强度表示阈值水平以上的多个相邻像素的总和,则该信号强度也将增加,这反映了移动颗粒可能在由图像捕获设备获取的图像中产生线性踪迹这一事实。

[0110] 还值得一提的是,通过增加曝光时间,给定颗粒通过光束的高强度区域的可能性通常也增加,从而使得颗粒是更容易检测到的。但是,在高颗粒浓度下,增加曝光时间可能会增加重合颗粒检测的可能性,这又可能影响尺寸测定分析。还或许可以在某一时间段内使用不同的曝光时间,该时间段例如超过一分钟或一秒。

[0111] 图像捕获设备获取图像的速率也可能随时间影响监测体积。举例来说,在一些实施方式中,可以选择图像捕获设备的刷新速率,以便避免在一个图像中的光束的一个区域中并且在随后的图像中的该光束的另一个区域中检测到某个颗粒,因为这可以人为地增加

对应粒径的计数和浓度水平,特别是对于在靠近监测体积边缘处仍然可以被检测到的较大颗粒而言。

[0112] 因此将理解的是,取决于颗粒浓度水平,可能需要在图像捕获设备的曝光时间、刷新速率、孔径大小和焦深之间作出折中,以便在不同的颗粒尺寸范围上提供精确的颗粒尺寸测量能力以及可以据以确定颗粒尺寸分布信息的精确统计结果。

[0113] 在一些实施方式中,减弱或至少管理环境光条件以便在不同环境条件下操作颗粒尺寸测量系统可能是有利的。环境光本身通常可以以两种方式显现在图像捕获设备所获取的图像中。首先,环境光可以照射存在于图像捕获设备的视场中的背景对象,这又可以在图像中产生信号。其次,环境光可以照射监测体积中的颗粒,从而产生散射光,这会增加由照射光束引起的散射光。

[0114] 因此,在一些实施方式中,可能希望或需要减少环境光污染,例如利用时间滤波(例如,通过使用脉冲或调制光源结合同步检测方案)或空间滤波(例如,通过在监测体积周围和/或在光源附近使用专用偏转器或挡板)。特别地,在非限制性示例实施方案中,光源的功率可以与图像捕获设备同步地被调制或脉冲化。在这种情况下,如果在每个调制或脉冲处改变功率输出,假设颗粒尺寸分布在功率调制或脉冲的时间段内变化不大,则可以根据不同时间的不同光源功率的组合来实现扩展的等效动态范围。在这样的实施方式中,可能更容易将检测颗粒的概率和有效监测体积的大小各自取决于颗粒尺寸的方式纳入考虑,从而可能针对不同类别的颗粒尺寸优化整体统计。

[0115] 在图5的实施方案中,颗粒尺寸测量系统20还包括处理单元32,该处理单元从包括在处理单元32中的计算机可读存储器43中检索由图像捕获设备30获取的图像。在这种情况下,处理单元32被配置为执行存储在计算机可读存储器43中的指令。在一些实施方案中,处理单元32和图像捕获设备30可以被集成为单个单元。在其他实施方案中,处理单元32和图像捕获设备30可以明显分开。在这种情况下,处理单元32可以经由有线或无线通信链路可操作地连接到图像捕获设备30。在一些实施方案中,如图5中所描绘的,处理单元32还可以连接到颗粒尺寸测量系统20的其他部件,例如光源26。

[0116] 取决于应用,处理单元32可以在从图像捕获设备30接收到图像时(即,实时地或接近实时地)开始分析图像,或者可以存储图像供以后分析。

[0117] 再次参照图5和图16两者,处理单元32被配置为识别多个子图像52a至52c中的与每个颗粒22相关联的多个光点54。应该注意的是,通过空间和图像坐标之间的适当映射可能可以确定,在监测体积24中的给定位置处从颗粒22散射的光在从光偏转器28a至28c中的给定光偏转器偏转之后被记录在每个子图像52a至52c的哪些像素上。与给定被照射颗粒22相关联的不同光点54因此可以提供以不同散射角从颗粒22散射的光的强度分布的度量。

[0118] 换句话说,光点识别过程可以使得能够为图像捕获设备30获取的图像50中的每个光点54分配观察角度和距离。使用图像50中的光点位置与监测体积24中的颗粒位置之间的此映射,通过考虑与不同的光偏转器28a至28c相关联的观察距离的差异,可以解释不同观察角度下信号强度的差异。在一些实施方式中,对与每个颗粒相关联的光点54的识别可以涉及在对应于监测体积24的图像50的区域中搜索和识别在某些阈值以上的像素信号水平。阈值可能先前已通过校准建立。光点可以通过对其信号水平在预定阈值之一以上的相邻像素进行分组来定义。

[0119] 应当注意的是,使用多个光偏转器来形成由对应的多个子图像组成的图像——其中每个子图像代表监测体积的一个不同观察角度,类似于使用多个图像捕获设备来从不同的视点获得关于监测体积的信息。这种技术也称为立体成像。如本领域中已知的,立体成像可以允许通过识别如从不同有利位置观察到的对象的特征和将其关联来评估对象在三维空间中的位置。

[0120] 通过适当地校准光偏转器和图像捕获设备相对于彼此以及相对于光束的位置,本技术可以利用与在立体成像中使用的原理类似的原理将由图像捕获设备获取的图像中的光点位置映射到监测体积中的颗粒位置。该映射可以允许确定每个颗粒相对于图像捕获设备和多个光偏转器的角度和距离。该位置信息可用于适当地比较测量数据和参考数据。此外,取决于图像捕获设备的分辨率,关于颗粒位置的信息不仅可以沿着光束的光轴获得,而且可以在其横截面内获得。

[0121] 在一些实施方式中,当使用关于光束的横向辐照度分布和颗粒在其横截面内的位置的信息时,可以获得更精确的对颗粒尺寸分布的确定。基于比较散射强度信号的大小的颗粒分类通常会取决于颗粒在照射光束的横截面区域内的位置。如上所述,辐照度在光束的横截面区域上通常不是均匀的,在光束的中心处通常较大并且朝向其周边逐渐减小。散射光强度取决于入射光强度,其将遵循相同的规律。

[0122] 处理单元32还被配置成为关联到给定颗粒22的多个光点54中的每个光点计算光点参数。如上所述,在一些实施方式中,光点参数可以是能量参数,能量参数中的每个指示包含在与其相关联的光点52中的能量的量。在其他实施方式中,光点参数可对应于光点的尺寸、形状、光谱含量或其任何组合。确定特定光点的光点参数可以包括对属于该光点的所有像素的像素信号求和。在一些实施方式中,可以通过考虑与光点相关联的散射颗粒的观察距离来校正每个光点的信号强度。

[0123] 处理单元32还被配置为由与被照射颗粒22中的每一个被照射颗粒相关联的多个光点参数计算该被照射颗粒的尺寸。在一些实施方式中,处理单元32可以被配置为由光点参数(例如,能量参数)之间的一个或多个比率确定每个被照射颗粒22的尺寸。举例来说,在由多个光偏转器偏转后由图像捕获设备30收集的散射光的散射角分别为 $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$ 的实施方案中,可以计算以下比率中的一个或多个: $R_1(\theta_a, \theta_b) = I_{\theta_a}/I_{\theta_b}$ 、 $R_2(\theta_a, \theta_c) = I_{\theta_a}/I_{\theta_c}$ 和 $R_3(\theta_b, \theta_c) = I_{\theta_b}/I_{\theta_c}$ 。在这些比率中,量 $I_{\theta_a}$ 、 $I_{\theta_b}$ 和 $I_{\theta_c}$ 对应于以等于 $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$ 的散射角从被照射颗粒22散射的收集光的强度。

[0124] 处理单元32还可以被配置为由一个或多个强度比率 $R_1(\theta_a, \theta_b)$ 、 $R_2(\theta_a, \theta_c)$ 和 $R_3(\theta_b, \theta_c)$ 与参考数据的比较来确定与每组光点54相关联的颗粒22的尺寸。将理解的是,尽管根据光偏转器28a至28c的数量可以计算某一数量的强度比率,但是如果使用较少数量的比率允许足够精确的颗粒尺寸测定的话,不是在每次计算中都需要使用所有这些比率。

[0125] 另外,如上所述,参考数据可以从基于米氏散射理论或另一合适理论的模型获得。举例来说,可以使用米氏理论来针对在图像中识别的每个颗粒计算一系列颗粒尺寸的比率 $R_1(\theta_a, \theta_b)$ 、 $R_2(\theta_a, \theta_c)$ 和 $R_3(\theta_b, \theta_c)$ 的理论值,并找出其这些比率最佳地拟合从测量数据获得的比率的颗粒尺寸。将理解的是,已知许多计算方法可用于对颗粒的散射响应进行数值或分析建模,可以使用各种技术来获得参考数据。替代地或附加地,参考数据的至少一部分可以源自存储在数据库中的先前计算和/或测量的实验数据。这样的数据库可以包括针对一

些颗粒尺寸、组成、形状、距离、散射角等的参考数据。取决于应用,获得参考数据的步骤以及将参考数据与测量数据进行比较的步骤可以各自实时地或接近实时地执行,或者作为测量后步骤来追溯地执行。

[0126] 在一些实施方式中,米氏散射理论可以用于计算照射光束的相应波长下针对一系列散射角和一系列颗粒尺寸的颗粒角散射截面。该计算也可以针对与不同颗粒组成对应的不同折射率来执行。举例来说,在一个非限制性实施方案中,可以选择三个不同的折射率,对应于石英颗粒、粉尘状颗粒和煤颗粒。如果需要或期望,也可以将光偏振纳入考虑。

[0127] 考虑到在每个观察角度下颗粒尺寸测量系统的覆盖角,然后可以计算在不同观察角度下测量的并且与属于同一颗粒的光点相关联的散射强度的比率。与一个颗粒相关联的每组光点应该包括至少两个光点,以便从所述光点计算至少一个比率。可选地,也可以将照射颗粒的光束的光谱含量纳入考虑。最后,找到以其计算的比值最佳地匹配于测得的比率的颗粒尺寸。在一些实施方式中,可以在评估最佳匹配时将包括可能由外推饱和信号计算得出的信号水平和比率的标准纳入考虑。该过程可以针对每组光点重复。

[0128] 如上所述,给定颗粒与图像捕获设备之间的散射路径长度通常会根据是多个光偏转器中的哪一个将散射光重定向到图像捕获设备上而变化。在一些实施方式中,这些不同的散射路径长度可能显著影响从不同的光偏转器接收到的散射光的测量强度,并且当将以多对散射角测量的散射强度之间的比率与参考数据进行比较时,需要将这些不同的散射路径长度纳入考虑。

[0129] 还将理解的是,通常,与由图像捕获设备获取的监测体积的图像中的给定光点相关联的散射角覆盖围绕一主值的一定的散射角范围(例如,小于1°)。该散射角范围可以根据散射颗粒在监测体积中的位置以及根据哪个光偏转器参与收集过程而变化。不同散射角范围的跨度可能影响所测量的散射信号的强度,并且在比较测量数据和参考数据时必须被纳入考虑。

[0130] 值得一提的是,尽管一些实施方式可能使用不同散射角处的散射强度之间的比率或其他关系,但是替代地或附加地,其他实施方式可以使用散射强度的绝对值。如上所述,绝对测量结果可用于将每个颗粒预分类为属于不同颗粒尺寸范围之一。举例来说,可以使用不同角度处的散射强度的绝对值来将监测体积中的颗粒预分类为小的(例如,具有小于1μm的直径)、中等的(例如,具有1μm至10μm的直径)和大的(例如,具有大于10μm的直径)。应该理解的是,使用绝对测量结果的颗粒尺寸测量可能比仅基于相对测量结果的颗粒尺寸测量对可以确定颗粒位置的精确度更敏感。

[0131] 如上所述,光源可以由多波长或宽带源来体现,而图像捕获设备可以具有光谱成像能力。在这样的实施方式中,在由图像捕获设备获取的图像中识别的光点可以包含关于以不同散射角收集的散射光的光谱含量的信息。反过来,该光谱含量可以用于获得关于颗粒尺寸和组成两者的信息。在一些实施方式中,可以测量所收集的散射光的偏振以便产生关于较小颗粒(例如,直径小于200nm)的尺寸、形状、相(例如固态或液态)和/或所述颗粒的组成的信息。

[0132] 在一些实施方式中,颗粒尺寸测量系统可以有利地允许检测位于监测体积内不同位置处的颗粒。因此,在一些实施方式中,与使用基于真空的泵送系统将颗粒供应到光学询问区域的常规技术相比,利用本技术可以使监测体积更大。

[0133] 本技术的一些实施方案的另一优点在于,所述实施方案可以允许由每次测量或每个图像确定多于一个颗粒的尺寸。这在利用传统的光散射颗粒计数器的情况下通常是不可能的,这是因为它们通常就在光检测区域中同时通过的颗粒之间没有干涉的情况下可以测量的颗粒浓度水平而言受到限制。相反地,本文描述的一些技术可以在监测体积中不同位置处的颗粒提供不同的多组散射信号,除非所述颗粒叠加或粘在一起。

[0134] 由于可以实现相对较大的监测体积,通过在较短的时间段内提供统计上代表性的颗粒尺寸分布,本技术在低浓度水平下也可以是有利的。在一些实施方式中,如果监测体积足够大,可以通过将在监测体积上顺序获取的或者针对监测体积内的多个颗粒同时获取的个体颗粒尺寸测量结果相结合来获得颗粒尺寸分布。

[0135] 本文描述的技术的一些实施方式的另一可能的优点在于,它们可以允许在原位从远距离位置(standoff position)执行非侵入式颗粒尺寸测量。具体地,在一些实施方式中,可以在露天环境中实现颗粒尺寸测量,并且不需要从环境介质采样颗粒并通过基于真空的泵送系统将颗粒供应至监测体积。原位测量可以防止或至少减少由颗粒采样过程和/或颗粒尺寸测量系统本身和任何相关联的部件的存在(例如,偏向于某个颗粒尺寸的入口、由于撞击系统部件而破碎的颗粒以及在壁表面上的颗粒沉积等)所引起的环境扰动、干扰和偏差。此外,通过在原位测量,通常不需要校准和维护泵送装备来确保正确了解监测体积中颗粒的供应速率。当然,应该理解的是,在一些实施方式中,可以使用泵送系统而不偏离本技术的范围。

[0136] 本文描述的技术允许基于来自不同颗粒的散射光对应于由图像捕获设备获取的图像中的不同光点的假设来确定监测体积中的各个颗粒的尺寸。换句话说,假定颗粒尺寸测量系统将一次在监测体积中的给定位置检测到仅一个颗粒。在一些实施方式中,为了实现这一假设,空间的某个区域内的平均颗粒数量应不超过1。在第一近似中,这意味着监测体积中颗粒之间的平均距离应该足以在由图像捕获设备获取的图像中产生不同的光点。换句话说,从不同颗粒散射的光信号应该优选不在图像上重叠。否则,以足够的精确度来确定颗粒尺寸可能变得更具挑战性。

[0137] 在本文描述的技术中,在大多数环境和职业健康及安全应用中,在光束的一部分内检测到的颗粒的数量通常可以小于1。另外,当颗粒浓度增加到使得以某一观察角度检测到的颗粒的数量变得大于1的值时,可能可以减小视场或者提高图像捕获设备的分辨率使得减少在任何单个像素上成像的监测体积部分的平均大小。

[0138] 参照图6A至图6C的实施方案,举例来说,具有 $640(H) \times 480(V)$ 像素和 $20^\circ$ 视场的图像捕获设备30将以每像素 $0.03125^\circ$ 的角分辨率为特征。每个光偏转器28a至28c可以被定位成覆盖图像捕获设备30的视场的约 $6.3^\circ$ 。这样的配置将允许针对存在于监测体积24中的每个颗粒22以三个不同观察角度 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ 测量散射光。

[0139] 参考图6A,假设与第一光偏转器28a相关联的最小散射角 $\theta_{a,min}$ 等于 $1^\circ$ ,则最大散射角 $\theta_{a,max}$ 将等于 $7.3^\circ$ 。应理解的是,以 $\theta_{a,min}$ 至 $\theta_{a,max}$ 范围内的不同散射角收集的散射光会源自沿着光束34的光轴36的不同位置,与散射角 $\theta_{a,max}$ 相关联的位置比与散射角 $\theta_{a,min}$ 相关联的位置更接近第一光偏转器28a。

[0140] 图6B描绘了由第二光偏转器28b覆盖的在最小散射角和最大散射角 $\theta_{b,min}, \theta_{b,max}$ 之间的沿光轴36的区间64b,而图6C描绘了由第三光偏转器28c覆盖的在最小散射角和最大散

射角 $\theta_{c,min}$ 、 $\theta_{c,max}$ 之间的沿光轴36的区间64c。虽然三个光偏转器28a至28c中的每一个都被定位成覆盖图像捕获设备30的视场的大约6.3°，但是在每个偏转器28a至28c的覆盖角内的区间64a至64c的长度显著不同。

[0141] 应该注意的是，颗粒尺寸测量系统20的监测体积24对应于三个区间64a至64c的重叠部，使得监测体积24中的被照射颗粒22将在由图像捕获设备30获取的图像中形成三个不同的光点，每个光点对应于不同的观察角度和不同的散射路径长度。然后，如上所述，可以由从颗粒22散射并且在分别从三个光偏转器28a到28c偏转之后以三个不同的观察角度 $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$ 测量的光的强度 $I_{\theta_a}$ 、 $I_{\theta_b}$ 和 $I_{\theta_c}$ 来计算三个不同的比率 $R_1 = I_{\theta_a}/I_{\theta_b}$ 、 $R_2 = I_{\theta_a}/I_{\theta_c}$ 和 $R_3 = I_{\theta_b}/I_{\theta_c}$ 。

[0142] 如图6A至图6C所示，在一些实施方式中，每个光偏转器28a至28c可以允许图像捕获设备30沿着光轴36观看光束34的相对较大的部分并且从多个观察角度收集存在于监测体积中的每个被照射颗粒所散射的光。应该理解的是，具有相对较大的监测体积24同时确保一次至多一个颗粒22存在于光束34的一个小部分上可以允许多个颗粒成像在由图像捕获设备30获取的图像的不同区域上。还参照图16，然后可以变得可以将图像50中强度在某个阈值以上的每个光点54的位置与监测体积24中的相应颗粒位置以及与光偏转器28a至28c中的一个光偏转器相关联的相应观察角度 $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$ 相关联。

[0143] 在一些实施方式中，具有流过监测体积24的颗粒而非静止的颗粒可以使颗粒尺寸测量系统20较不易对颗粒运动产生影响以及因此较不易对颗粒尺寸分布产生影响。颗粒运动还可以确保或帮助确保颗粒不会被计数多于一次。通常，只要图像捕获设备30所获取的连续图像之间的时间保持长于颗粒穿过光束的传输时间，这就是真的。举例来说，假设光束34的直径为0.5cm并且颗粒以20cm/s的速度垂直于光轴36流动，则只要连续图像的获取之间的时间长于25ms，监测体积中的颗粒群体就会在连续图像之间刷新。如果颗粒速度增加到2m/s，则连续图像之间的时间可缩短到2.5ms。

[0144] 现在参考图7，示出了颗粒尺寸测量系统20的另一实施方案。该实施方案与上面参照图5描述的实施方案共享许多特征，因为它总体上包括光源26、多个光偏转器28a至28c、图像捕获设备30和处理单元32。在图7的实施方案中，颗粒尺寸测量系统20还包括壳体56，该壳体包围至少多个偏转器28a至28c和图像捕获设备30。在一些实施方式中，光源26和处理单元32中的任一个或两者也可以设置在壳体56内部以便于在现场部署颗粒尺寸测量系统20。

[0145] 如本文所使用的，术语“壳体”指的是限定用于在其中容纳颗粒尺寸测量系统的至少多个偏转器和图像捕获设备的空间的外壳。壳体56可以形成为单个整体结构或者可以由被连接以形成壳体的两个或更多个壳体部分形成。在一些实施方案中，壳体56可以例如在环境或工业监测应用中，特别是在露天条件下，防止或有助于防止诸如雨、雪、薄雾、大雾、灰尘、花粉等异物在现场部署期间到达光偏转器28a至28c和图像捕获设备30。壳体56还可以降低由于对颗粒尺寸测量系统20的意外冲击或疏忽不当处理而引起的光偏转器28a至28c、图像捕获设备30或其他部件损坏或失调的风险。在一些实施方式中，壳体56可以平滑地成形，例如具有倒圆的边缘，以最小化或至少减少气流干扰和湍流，并且因此有利于其周围的空气流动不受阻碍。在一些实施方式中，壳体56可以是便携式的。

[0146] 在一些实施方式中，图7的成像模块42可以作为用于与光源26和处理单元32一起

使用以形成颗粒尺寸测量系统20的单个单元来制造并销售。在这种情况下,成像模块42可以包括设置有光学窗口62并且包围多个光偏转器28a至28c和图像捕获设备30的壳体56。成像模块42可以进一步与包含计算机可读存储器43的套件组合在一起销售或者以包含计算机可读存储器43的套件销售,计算机可读存储器43被配置为以允许处理单元32执行存储在计算机可读存储器43中的指令的方式耦合到处理单元32。然后,计算机可读存储器43可以由诸如例如硬盘、CD、DVD或闪存之类的非暂时性存储设备来体现,而处理单元32可以由个人计算机来体现。

[0147] 在图7的实施方案中,光源26被设置在壳体56的外部并且被定位在距监测体积24的一投射距离处。然而,在其他实施方案中,光源26可以位于壳体56内部。当光源26处于壳体56外部时,可以通过使用设置在壳体56上的对准小孔58a、58b将光源26产生的光束34相对于壳体56对准。替代地,可以由位置敏感检测器替换对准小孔58a、58b中的一个或两个。为了更好的安全性,还可以在对准小孔58a、58b的下游设置束流捕集器60。当颗粒尺寸测量系统20在现场使用时,壳体56和光源26可以各自安装在三脚架或其他类型的安装设备(未示出)上以提供稳定的定位。在一些实施方式中,光源26可以安装在可调安装设备(未示出)上以便于相对于设置在壳体56上的小孔58a、58b对准光束34。

[0148] 仍然参考图7,壳体56还可以包括光学窗口62,用于允许从颗粒22散射的光38的一部分在壳体56内部透射并且到达多个光偏转器28a至28c,这多个光偏转器又将使散射光38朝向图像捕获设备30偏转。将理解的是,光学窗口62可以通过被限定为穿过壳体56的开口或孔隙或者通过被配置为透射感兴趣波长的光的适当光学器件(例如,玻璃板)来体现。在一些实施方式中,可以安排工程措施以避免灰尘或其他异物积聚在光学窗口62的外表面上,例如通过在其上施加专用涂层或在其前方提供空气幕。在一些实施方式中,只要光学窗口62可以透射入射在其上的散射光38的足够大部分,颗粒尺寸测量系统20就可以不受光学窗口62上的异物积聚的显著影响。在监测体积24中的颗粒22在图像捕获设备30上产生清晰的聚焦图像同时存在于光学窗口62上的灰尘颗粒的图像完全模糊不清的实施方式中,可能尤其如此。

[0149] 在一些实施方式中,光学窗口62可以由孔隙来体现。在这种情况下,壳体56的内部可以相对于壳体56的外部并因此相对于监测体积24被正加压。在这样的情况下,保持壳体56内部的正压可以确保或有助于确保空气通过孔隙连续地从壳体56出来,以防止或帮助防止空中悬浮的物质到达光偏转器28a至28c和图像捕获设备30的物镜。

[0150] 现在转向图8,在一些实施方式中,相同的光源26可以与两个不同的成像模块42'、42"一起使用,从而形成两个颗粒尺寸测量系统20'、20"。在图8中,每个成像模块42'、42"包括其中容纳多个光偏转器28a'至28c'、28a"至28c"和图像捕获设备30'、30"的壳体56'、56"。两个颗粒尺寸测量系统20'、20"可以被配置为使用用于光偏转器28a'到28c'、28a"到28c"和图像捕获设备30'、30"的不同布置来询问基本相同的监测体积24。结果是,两个颗粒尺寸测量系统20'、20"可以测量不同散射角下的散射强度,以提供不同但互补的颗粒尺寸信息。在图8中,两个颗粒尺寸测量系统20'、20"使用相同的处理单元32,尽管可以替代地使用不同的处理单元。在一些情况下,两个成像模块42'、42"的壳体56'、56"可以使得两个颗粒尺寸测量系统20'、20"被配置为检测两个不同系统平面中——例如两个垂直的系统平面中——的散射光的方式相对于彼此定向。这样的配置可以提供与监测体积24中的颗粒22

的形状有关的信息。

[0151] 本技术的一些实施方案的有利方面在于颗粒尺寸测量系统的尺寸可以是可缩放的。例如,比如图7和8中所描绘的实施方式可以部署在现场,用于其中可以将光偏转器与监测体积分开大约几分米到几米的范围的距离的环境或工业过程排放应用。

[0152] 现在参考图9,在其他实施方式中,颗粒尺寸测量系统20可以被缩放以集成到比如头盔和安全眼镜之类的个人防护装备中。在这种情况下,系统20的部件之间的特征尺寸和间隔可以变成几厘米量级。还预期的是,这种缩小版本的颗粒尺寸测量系统可以在配备有摄像机的移动设备诸如手机、智能手机或平板电脑等上实现。在这样的实施方式中,图像捕获设备可以由移动设备本身的摄像机来体现。此外,可以在移动设备上提供应用程序或系统软件,以控制和检索由摄像机获取的图像,并且在移动设备本身上或通过基于网络或云的手段远程处理测量数据以获得颗粒尺寸信息。

[0153] 现在参考图10至图14B,示出了颗粒尺寸测量系统20的其他实施方案。再次地,这些实施方案与上面参照图5描述的实施方案共享许多特征,因为它们总体上包括光源26、多个光偏转器28a至28c、图像捕获设备30和处理单元32。但是,图10至图14B的实施方案与图5的实施方案的不同之处在于用于光偏转器28a至28c和图像捕获设备30的位置配置。就相对动态范围和观察角度而言,每种配置可能具有不同的优点。

[0154] 首先参考图10,颗粒尺寸测量系统20的所例示的实施方案描绘了,通过适当地改变光偏转器28a至28c中的一个光偏转器(即,图10中的第三光偏转器28c)的位置和尺寸两者,可以改变由图像捕获设备30收集的散射光的路径长度和观察角度,同时在图像捕获设备30的视场44中保持相同的覆盖角。

[0155] 现在参考图11,例示了颗粒尺寸测量系统20的另一实施方案。在该实施方案中,多个光偏转器28a至28c的位置与图5中的相同,但是它们的取向以及图像捕获设备30的位置是不同的。首先,会看到,图像捕获设备30和多个光偏转器28a至28c全部位于光束34的同一侧。这意味着,多个光偏转器28a至28c中的每个光偏转器被定位成将从颗粒22散射的光背离光轴36(即,光束34的传播方向)偏转。换句话说,由光偏转器28a至28c中的每个偏转的散射光在不与光束34交叉的情况下到达图像捕获设备30。将理解的是,将图像捕获设备30定位在与光偏转器28a至28c相同的侧减少了偏转散射光(即,在从光偏转器28a至28c中的一个光偏转器偏转之后由图像捕获设备30收集的散射光)与直接散射光(即,在没有从光偏转器28a至28c中的一个光偏转器的偏转的情况下由图像捕获设备30直接收集的散射光)之间干涉的可能性。

[0156] 其次,与图5中所例示的实施方案相比,图11中的第三光偏转器28c与图像捕获设备30之间的距离较短。如果来自第三光偏转器28c的偏转散射光也在图像捕获设备30上在焦点上被接收,而来自第一和第二光偏转器28a、28b中的每个光偏转器的偏转散射光被稍微偏离焦点接收,则在与第三光偏转器相关联的观察角度下测量的信号的强度将会增强。

[0157] 参照图12,例示了颗粒尺寸测量系统20的另一实施方案。在该实施方案中,由于第三偏转器28c和图像捕获设备30之间的距离较短,从第三光偏转器28c接收的散射光的强度的增强甚至可能大于图11的实施方案中的增强。

[0158] 参考图13,例示了颗粒尺寸测量系统20的另一实施方案,其中,多个光偏转器28a至28c由凹面镜而非平面镜体现。凹面镜不仅朝向图像捕获设备30偏转从被照射颗粒22散

射的光38,而且还至少部分地将其聚焦。结果是,可以收集更大比例的偏转散射光40,从而增加图像的对应像素上的信号电平。还将理解的是,可以选择反射镜曲率,使得偏转散射光对于反射镜中的每个而言在焦点上被收集。在这样的实施方式中,图像捕获设备30可能无须设置有其自身的成像光学器件(例如,物镜)。将理解的是,颗粒尺寸测量系统20的其他实施方案可以替代地或附加地使用凸面镜作为光偏转器。

[0159] 图13的实施方案的另一优点在于,由图像捕获设备30获取的图像中的每个光点的角含量表示较大范围的散射角。如上所述,每个光点代表在从光偏转器28a至28c中的一个给定光偏转器偏转之后被收集的、从给定颗粒22所散射的光。结果是,可以减小较大颗粒的角散射截面中的振荡,这可以便于分析散射测量数据。

[0160] 然而,使用凹面而非平面镜通常会减小由图像捕获设备30获取的每个图像中的监测体积24的尺寸。同时,较小的监测体积24伴随着图像捕获设备30可实现的空间分辨率的增加,并且因此伴随着最小间隔的减小,在该最小间隔之下,在由图像捕获设备30获取的图像中无法区分相邻颗粒。因此,在大颗粒浓度水平的情况下使用凹面镜可能是有利的。

[0161] 现在参考图14A和14B,示出了颗粒尺寸测量系统20的另一实施方案,其包括两个附加的光偏转器28d、28e以收集从颗粒22向后散射的光66。在所例示的实施方案中,第四光偏转器28d是凹面镜并且第五光偏转器28e是凸面镜,但是在其他实施方案中可以使用其他布置。图14A和14B中所示的布置可以确保或有助于确保,对于一定范围的散射角,后向散射光66适当地聚焦在图像捕获设备30上。在这方面,在图14A和14B的实施方案中,后向散射光的光程长度可能显著超过前向散射光的光程长度。因此,如果使用平面而非曲面镜将后向散射光重定向到图像捕获设备30上,所得到的后向散射光和前向散射光的散射强度的差异可能变得大至足以阻止颗粒尺寸测定或至少使颗粒尺寸测定复杂化,尤其是考虑到对于大于光波长的颗粒,给定距离处的后向散射光的强度通常比前向散射光的强度小得多。

[0162] 还值得一提的是,在一些实施方式中,可以从前向散射光和后向散射光的比率取得关于颗粒的组成或折射率的有价值信息。举例来说,将关于颗粒组成的信息与从接收自前三个光偏转器28a至28c的散射光获得的关于颗粒尺寸的信息相组合可以提供,在某些情况下甚至是针对混合在气溶胶云中的颗粒提供,区分具有不同组成的各个颗粒的手段。在这样的实施方案中,可以针对不同的颗粒组成独立地确定颗粒尺寸分布。举例来说,已知在烟雾环境中的粉尘状颗粒可能会因为与烟雾气体的化学反应而改变组成,所述烟雾气体比如,举例而言臭氧、NO<sub>x</sub>和SO<sub>x</sub>。在这种情况下,比如图14A和14B中所例示的颗粒尺寸测量系统的实施方案可以允许实时地和/或针对不同的颗粒尺寸评估这种化学反应用于颗粒组成的影响。

### [0163] 颗粒尺寸测量方法

[0164] 根据另一方面,提供了一种颗粒尺寸测量方法。图17描绘了方法100的一实施方案的流程图,作为示例,该方法可以利用如上面参照图5至图15B的实施方案所述的颗粒尺寸测量系统或者利用另一颗粒尺寸测量系统来执行。

[0165] 方法100首先包括照射包含在监测体积中的颗粒以使入射在颗粒上的一部分光被散射的步骤102。

[0166] 方法100还包括利用多个光偏转器接收和偏转由被照射颗粒散射的光的步骤104。光偏转器可以通过反射或折射光学元件来体现,所述反射或折射光学元件比如,举例而言

平面和曲面镜、分束器和棱镜。更具体地，每个光偏转器可以定位成使得偏转从监测体积中的每个颗粒散射的光的相应分量，对应于相应的散射角范围。在一些实施方式中，利用多个光偏转器接收和偏转的、由被照射颗粒散射的光可以是前向散射光。

[0167] 方法100还包括利用图像捕获设备收集来自每个光偏转器的偏转散射光并对所述偏转散射光成像的步骤106。有利地，在一些实施方式中，单个图像捕获设备可以用于收集来自多个光偏转器中的每个光偏转器的偏转散射光。

[0168] 方法100接下来包括输出由该图像捕获设备从该图像捕获设备所收集的偏转散射光产生的图像的步骤108。图像包括多个子图像，其中每个子图像由从多个光偏转器中的一个相应的光偏转器偏转的收集光产生。每个被照射颗粒在每个子图像中被成像为光点，使得与给定颗粒相关联的多个光点对应于由该颗粒以多个不同散射角散射的光。

[0169] 方法100还包括识别多个子图像中的与每个被照射颗粒相关联的多个光点的步骤110。特别地，通过适当地了解或校准照射颗粒的光束、光偏转器和获取监测体积的图像的图像捕获设备的相对位置，可能可以将监测体积中的位置与每个子图像中的每个光点相关联。换句话说，可能可以确定在监测体积中的特定位置处由每个被照射颗粒散射的光在从光偏转器中的一个对应的光偏转器偏转之后将在每个子图像中于何处形成光点。

[0170] 方法100接下来包括针对每个被照射颗粒确定与多个光点中的每个光点相关联的光点参数的步骤112，随后是从与每个被照射颗粒相关联的多个光点参数确定该被照射颗粒的尺寸的步骤114。在一些实施方式中，确定与每个光点相关联的光点参数的步骤112可以包括确定指示包含在与其相关联的光点中的光能量的量的能量参数。在其他实施方式中，光点参数可对应于光点的尺寸、形状、偏振或光谱含量，或以上各项的任何组合。

[0171] 在一些实施方式中，确定每个被照射颗粒的尺寸的步骤114可以包括计算或以其他方式获得与每个被照射颗粒相关联的光点参数的一个或多个比率，并且将一个或多个比率与参考数据进行比较。举例来说，参考数据可以从基于米氏散射理论或允许获得颗粒的参考散射响应的另一合适的理论框架的数值或分析模型来获得。特别地，获得参考数据的方式并不意在限制本方法100的应用范围。

[0172] 值得一提的是，本文中描述的方法100可以采用相对信号而非绝对信号。在一些实施方案中，使用相对信号或比率可以使得颗粒尺寸测量方法100对照射颗粒的光束的横向辐照度分布中的均匀性波动较不敏感。结果是，当散射信号的比率被用于颗粒尺寸测量时，光束可能不需要满足均匀性和/或功率稳定性方面的特定要求。此外，被照射颗粒的位置可以在监测体积内变化，而不会降低尺寸测定的有效性。

[0173] 当然，在不偏离本发明的范围的情况下，可以对上述实施方案进行许多修改。

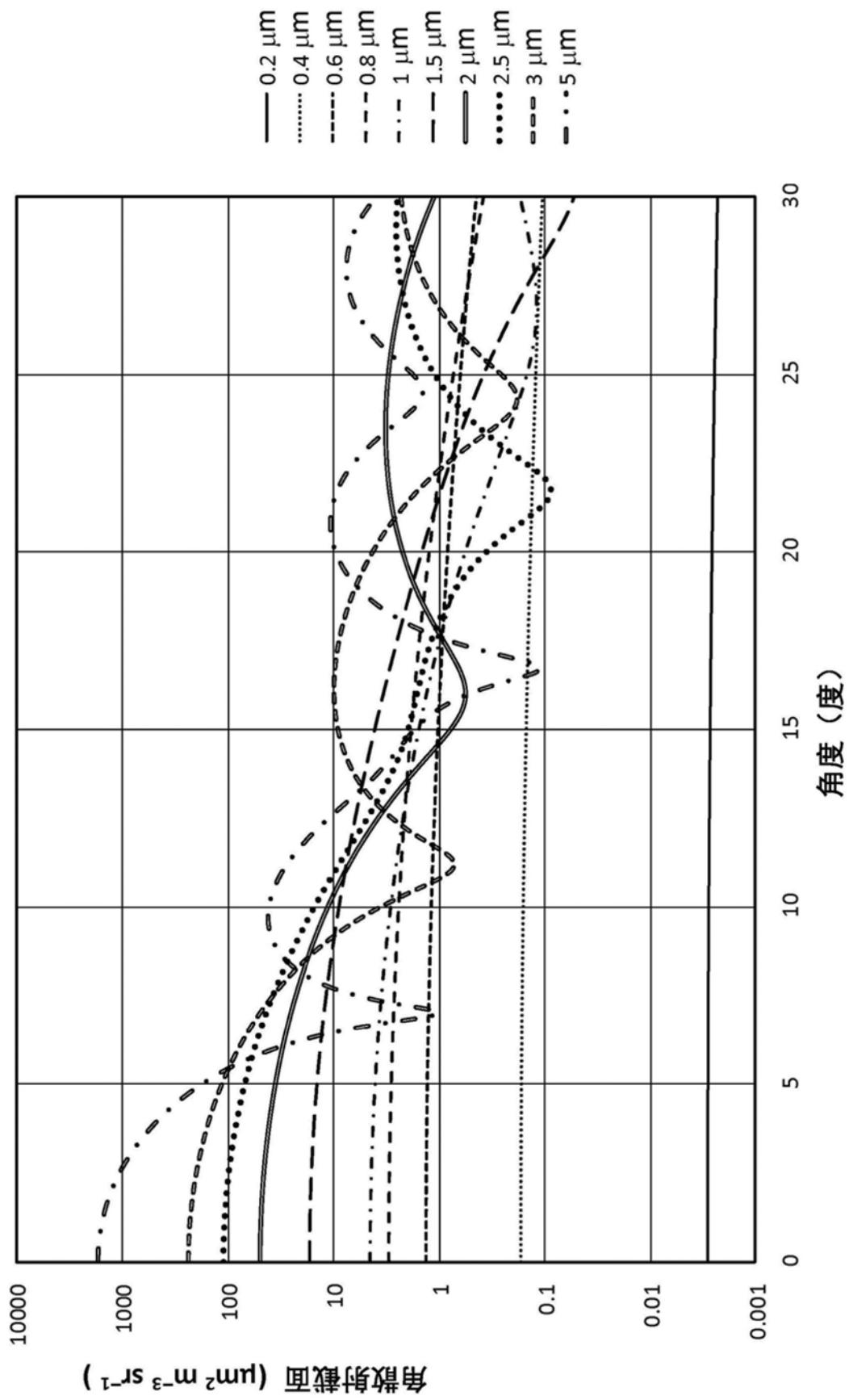


图1A

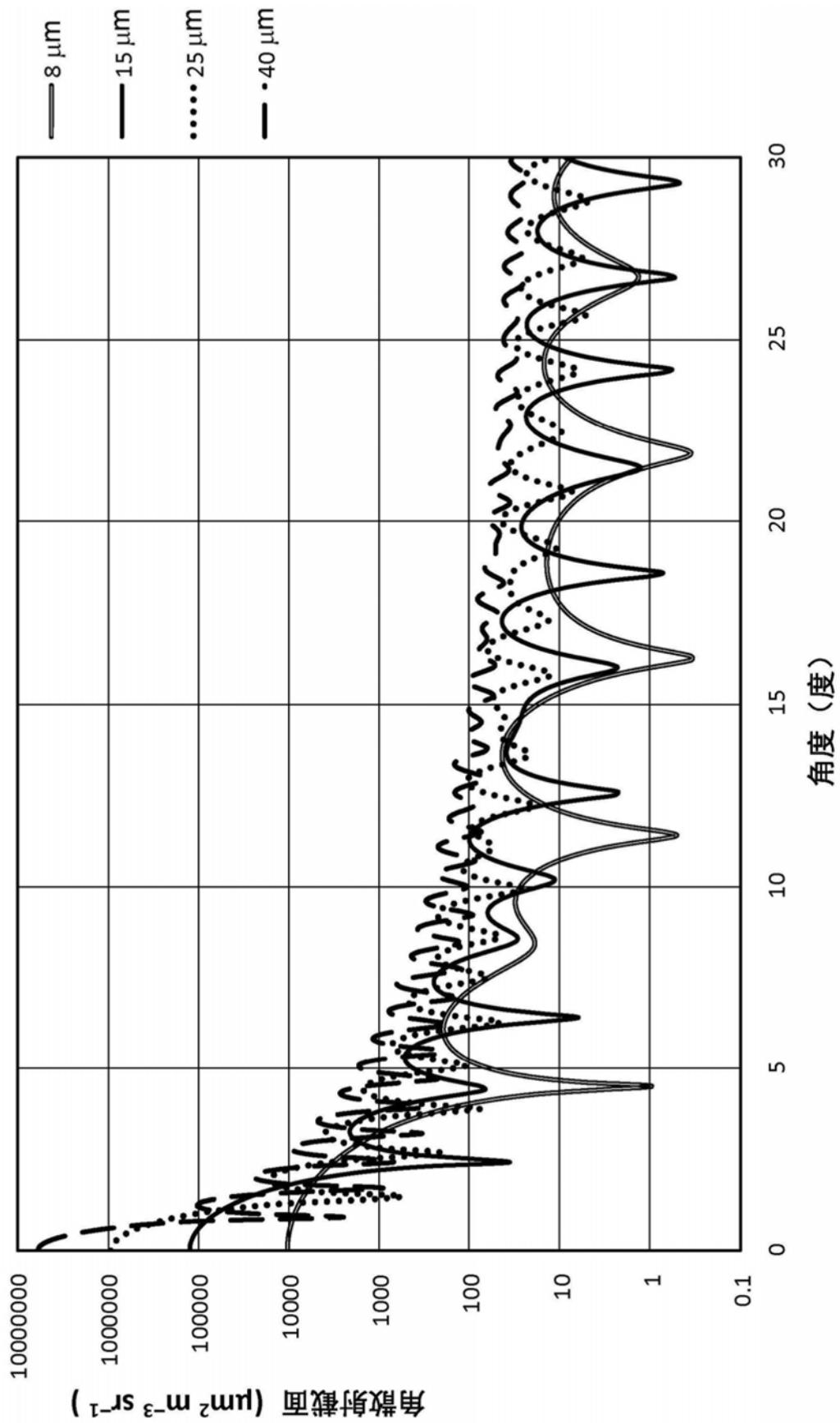


图1B

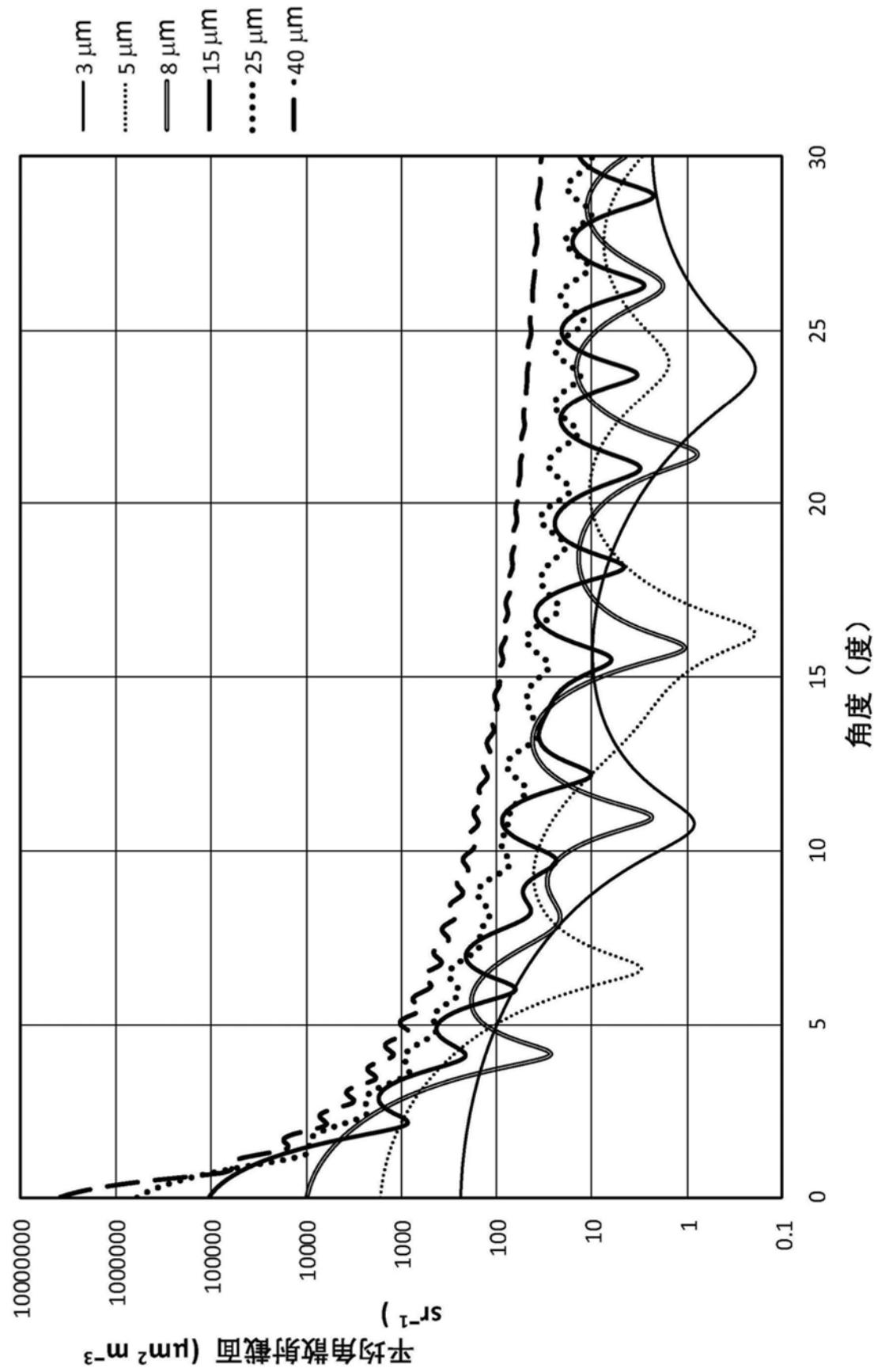


图1C

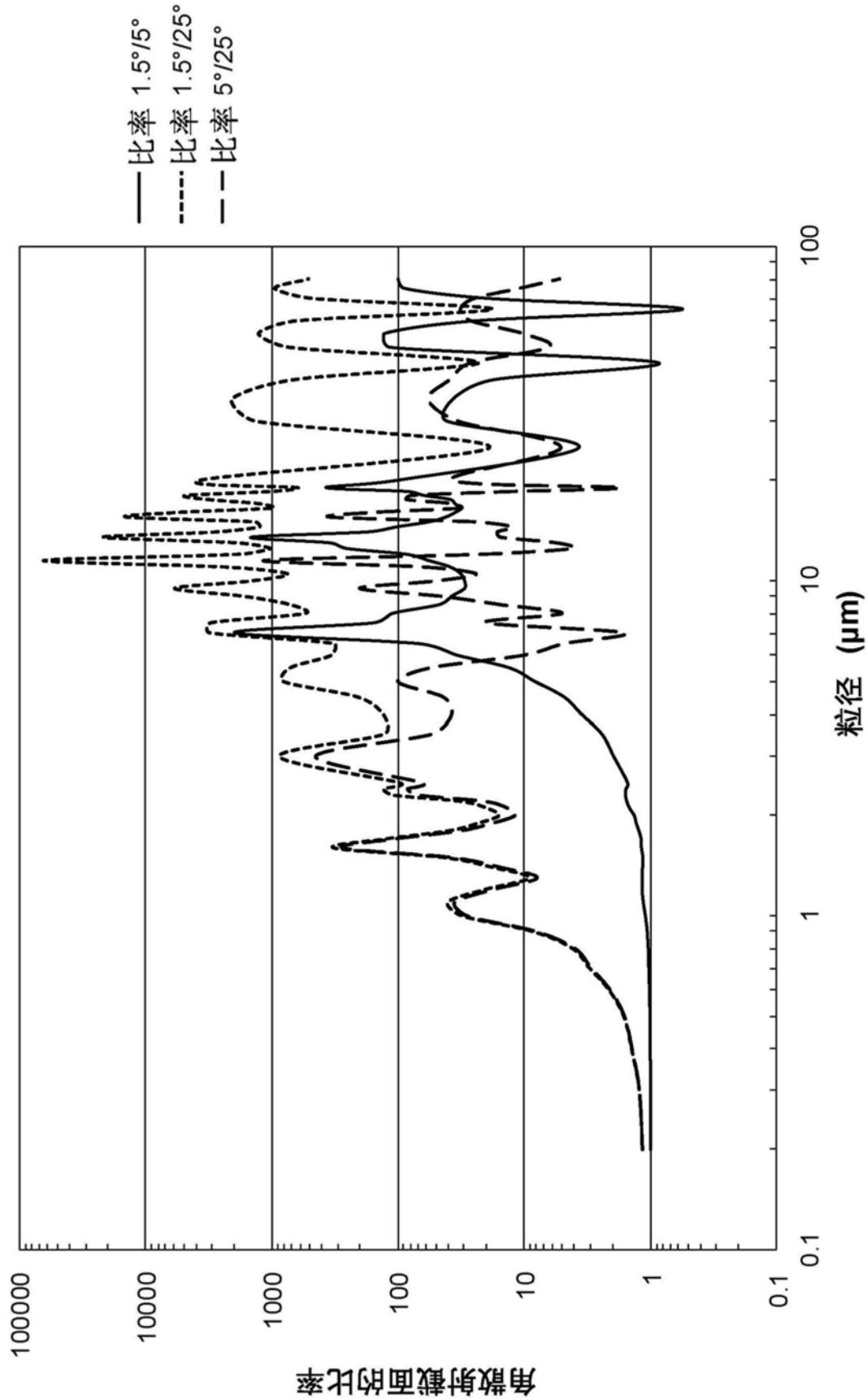


图2A

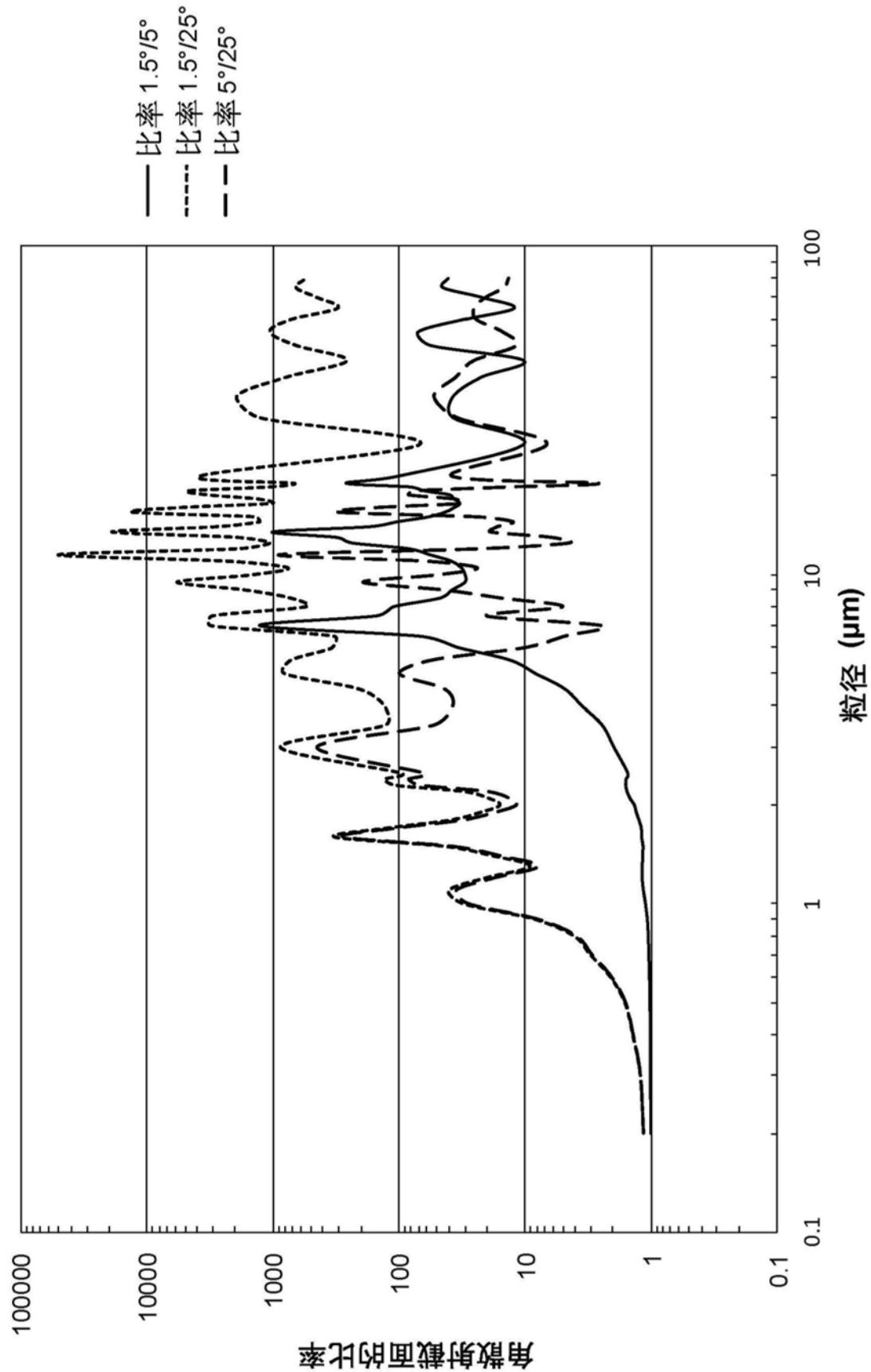


图2B

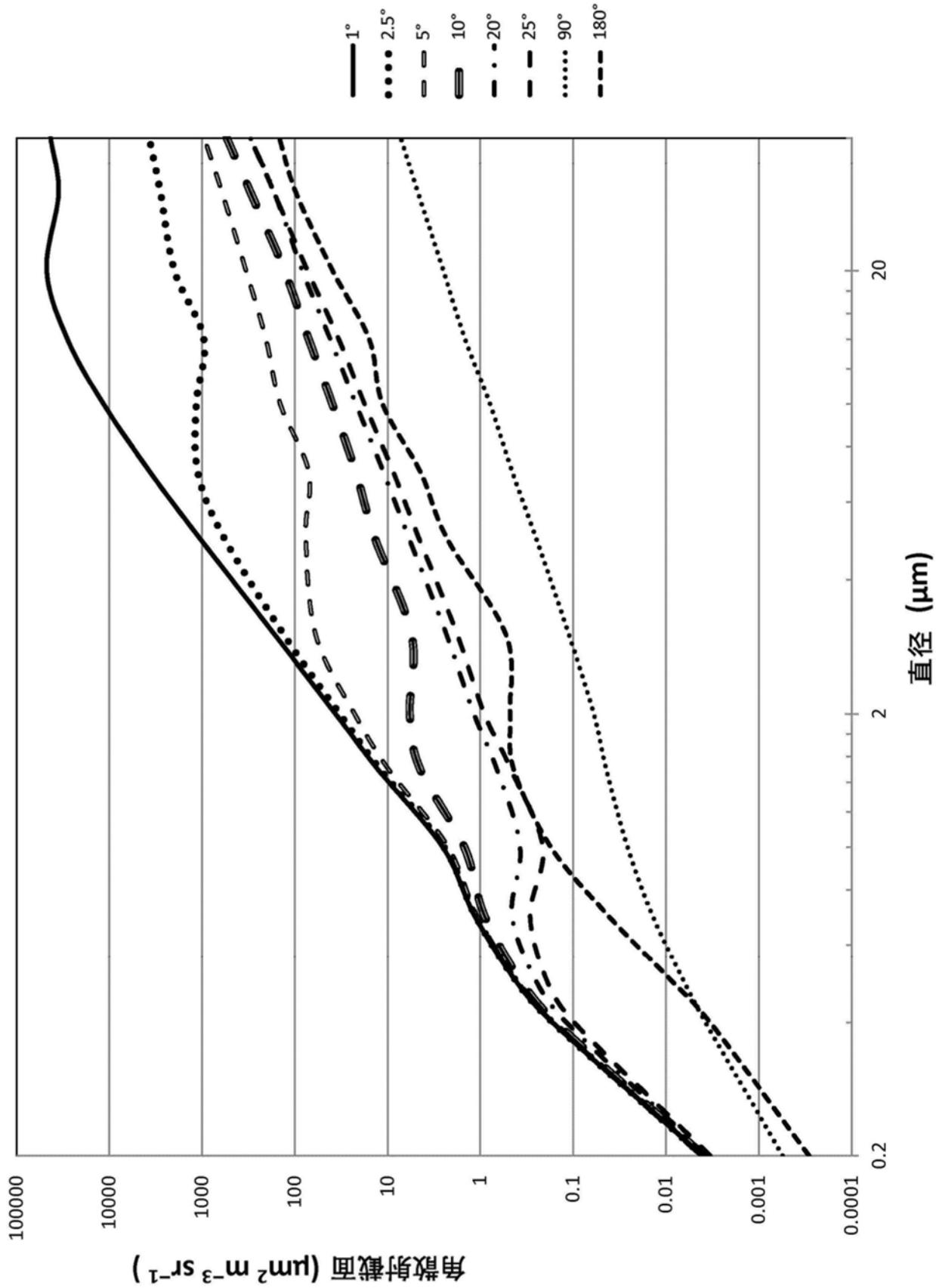


图3

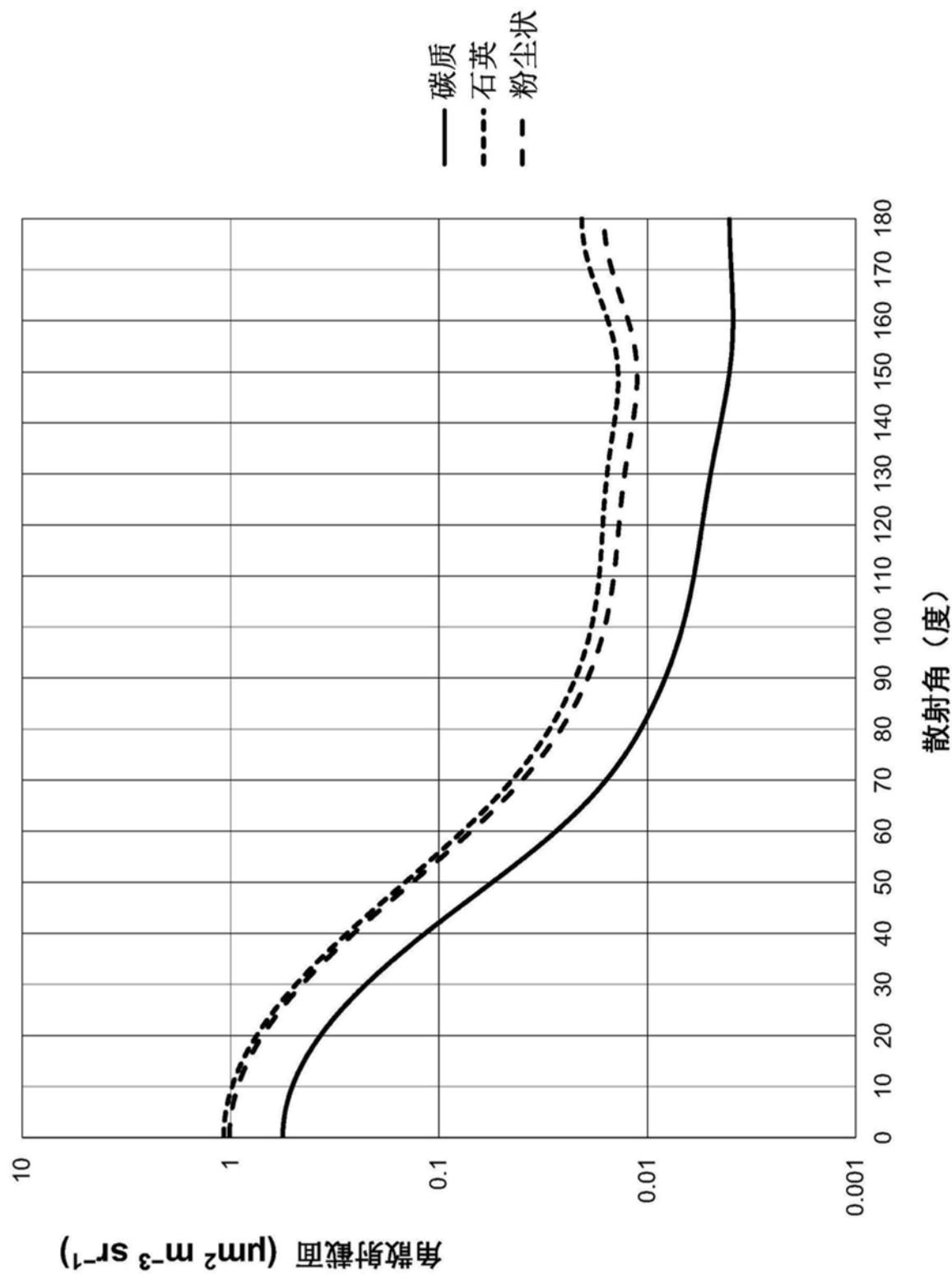


图4A

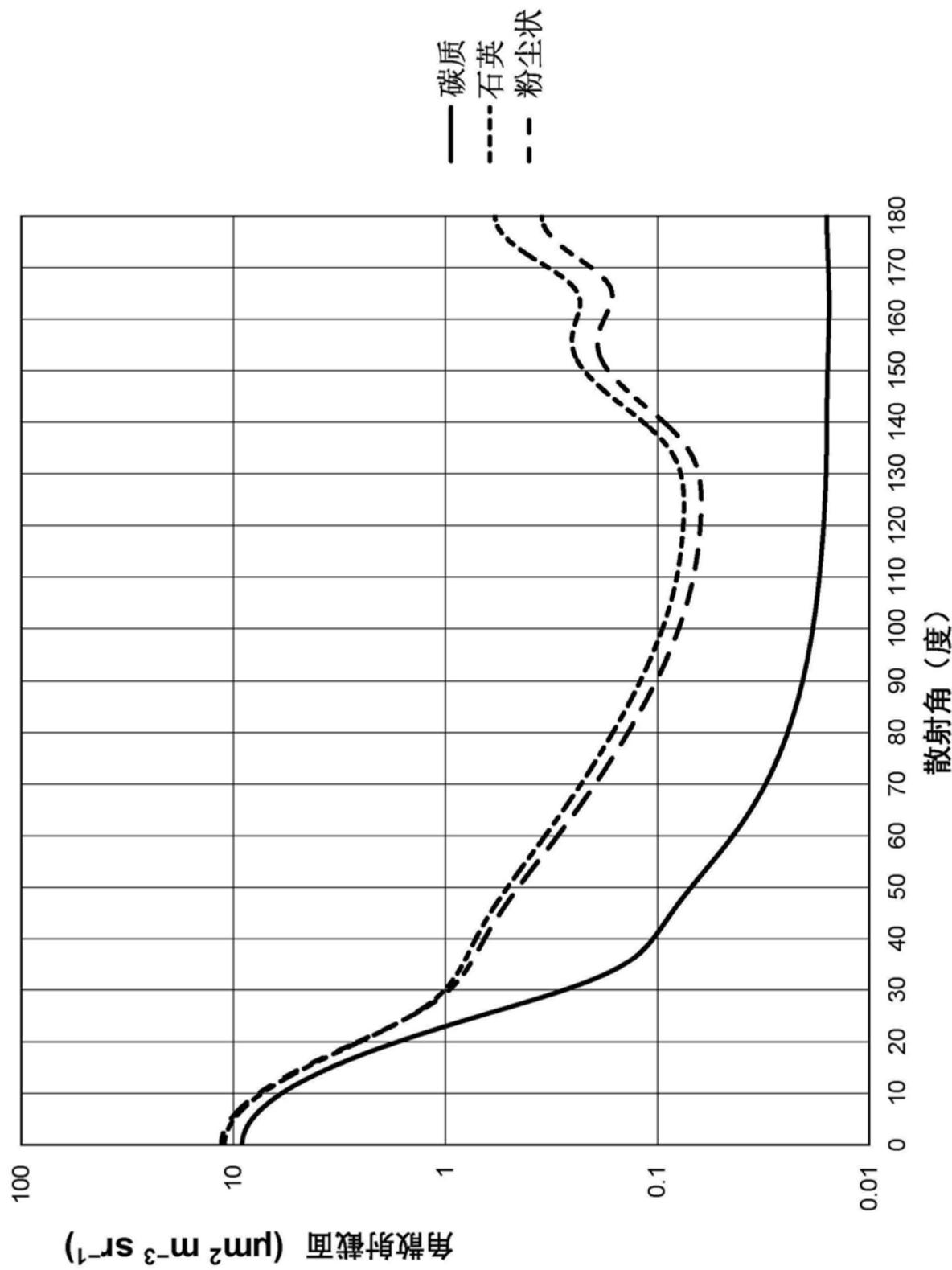


图4B

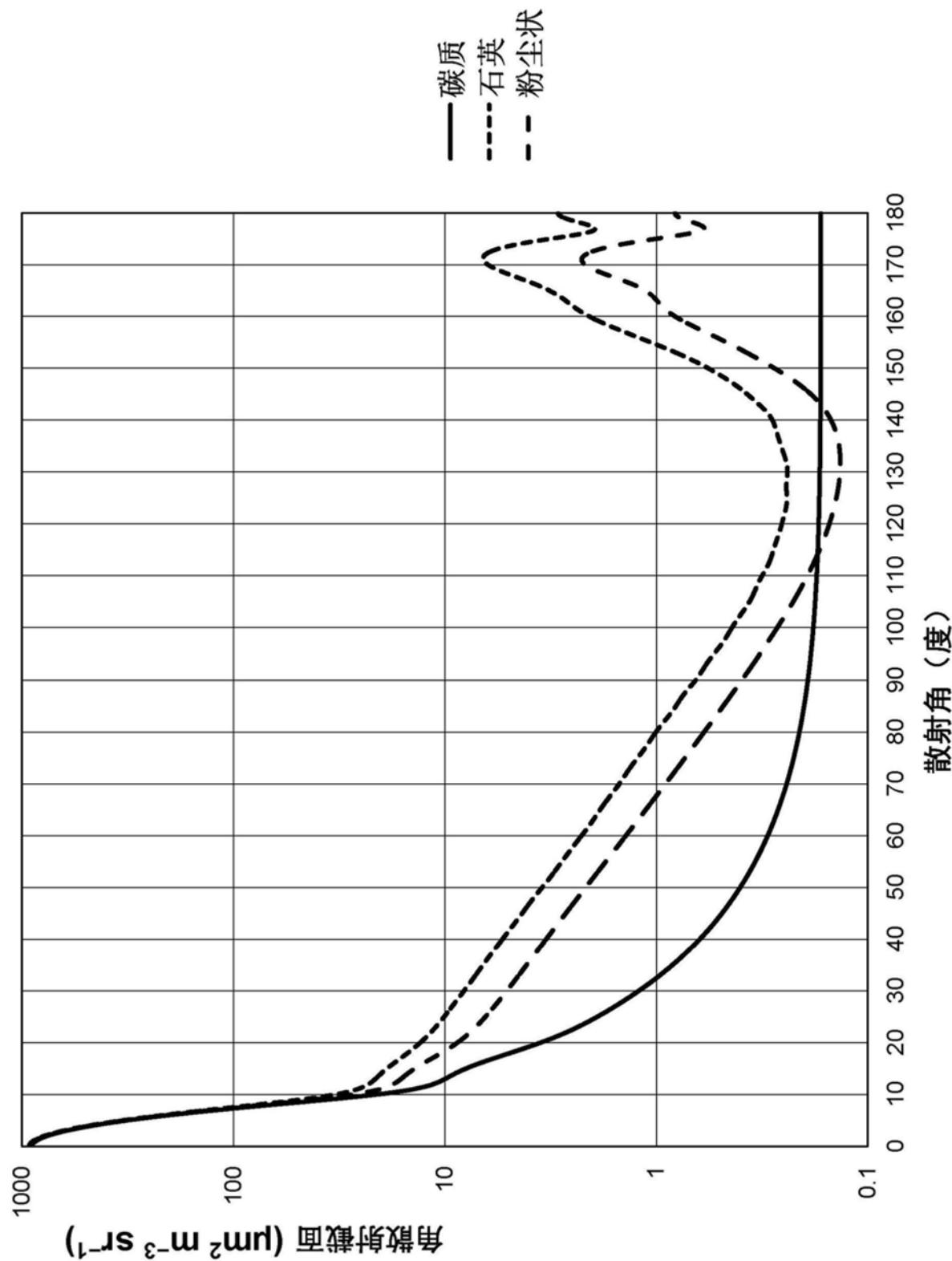


图4C

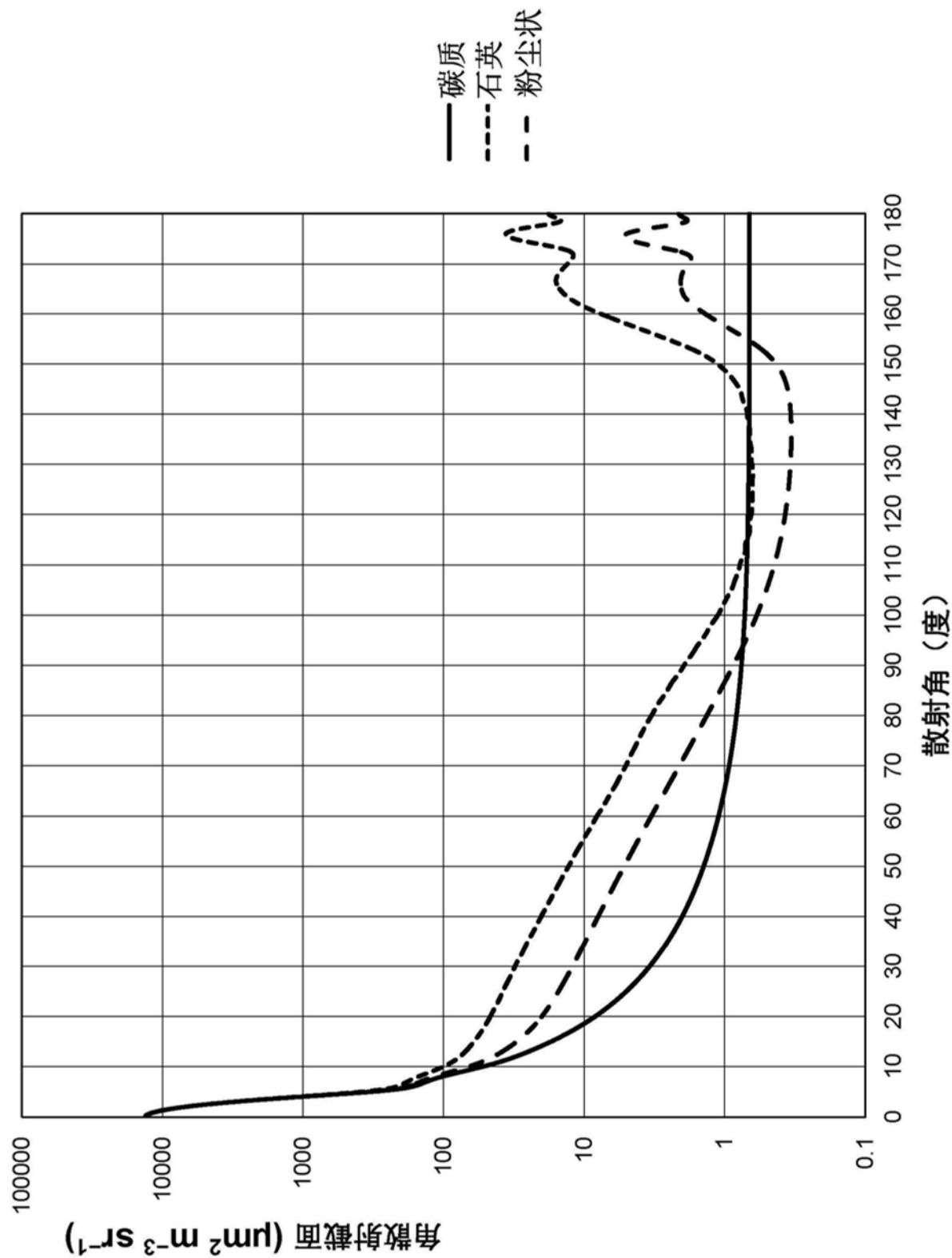


图4D

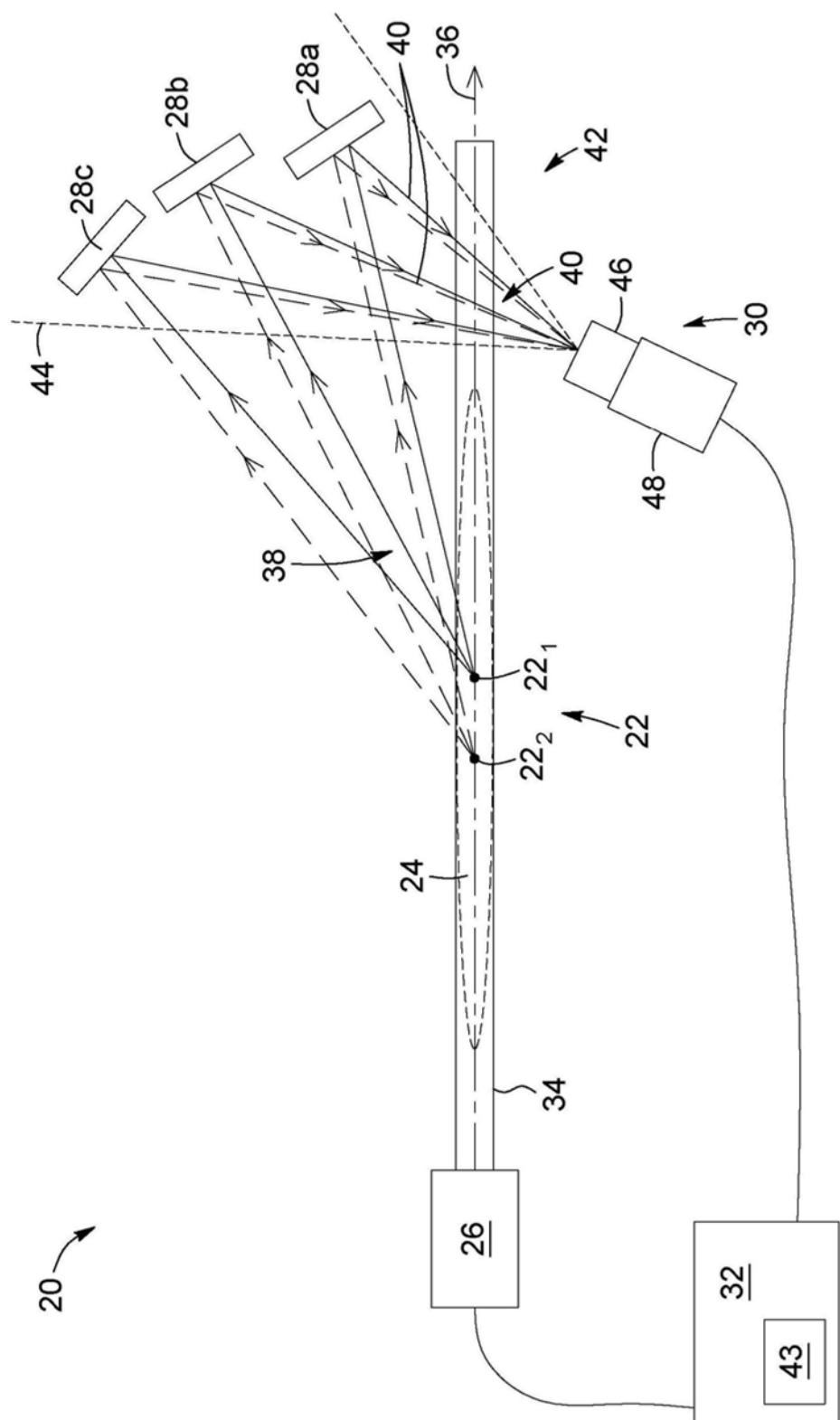


图5

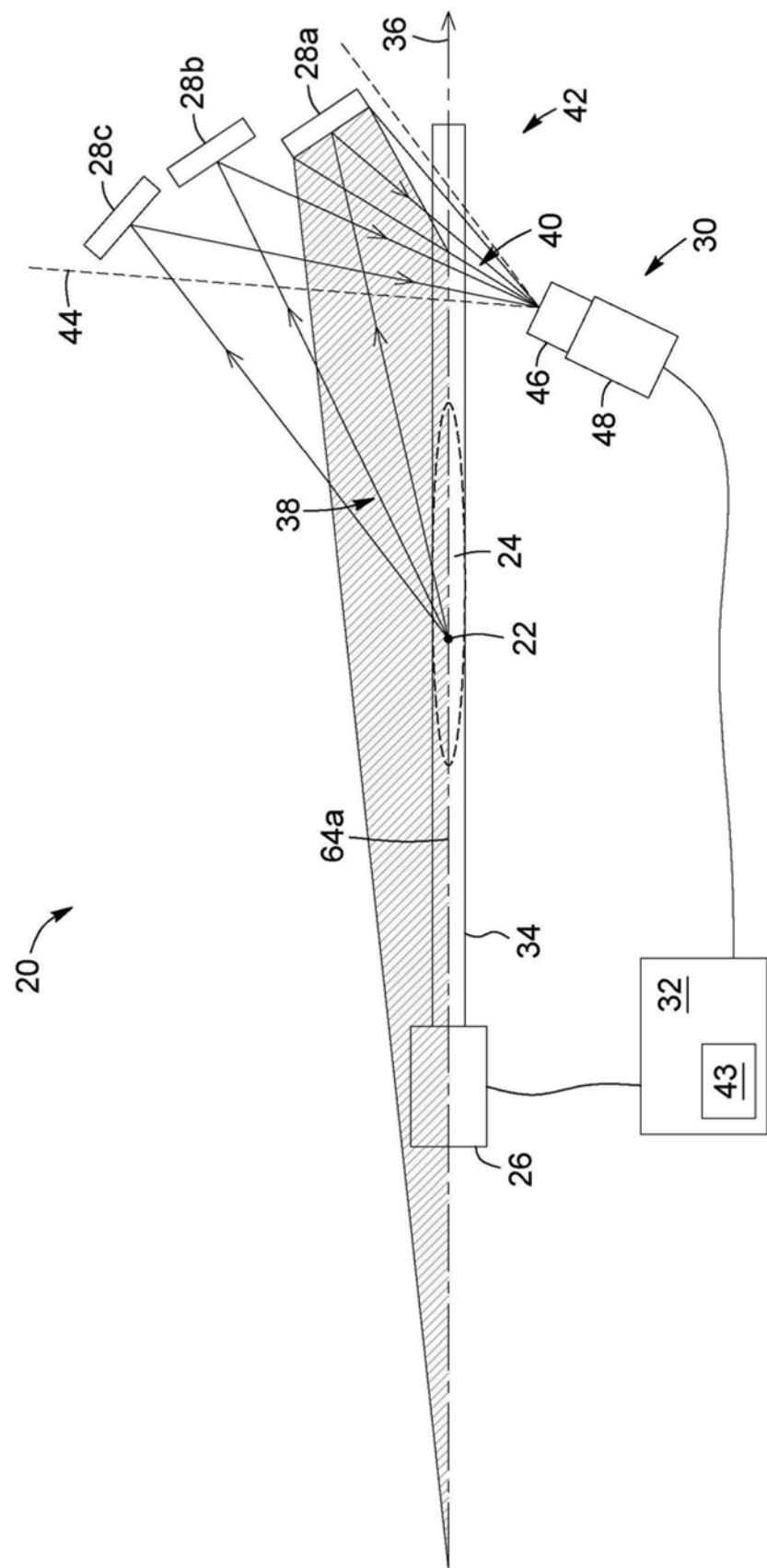


图6A

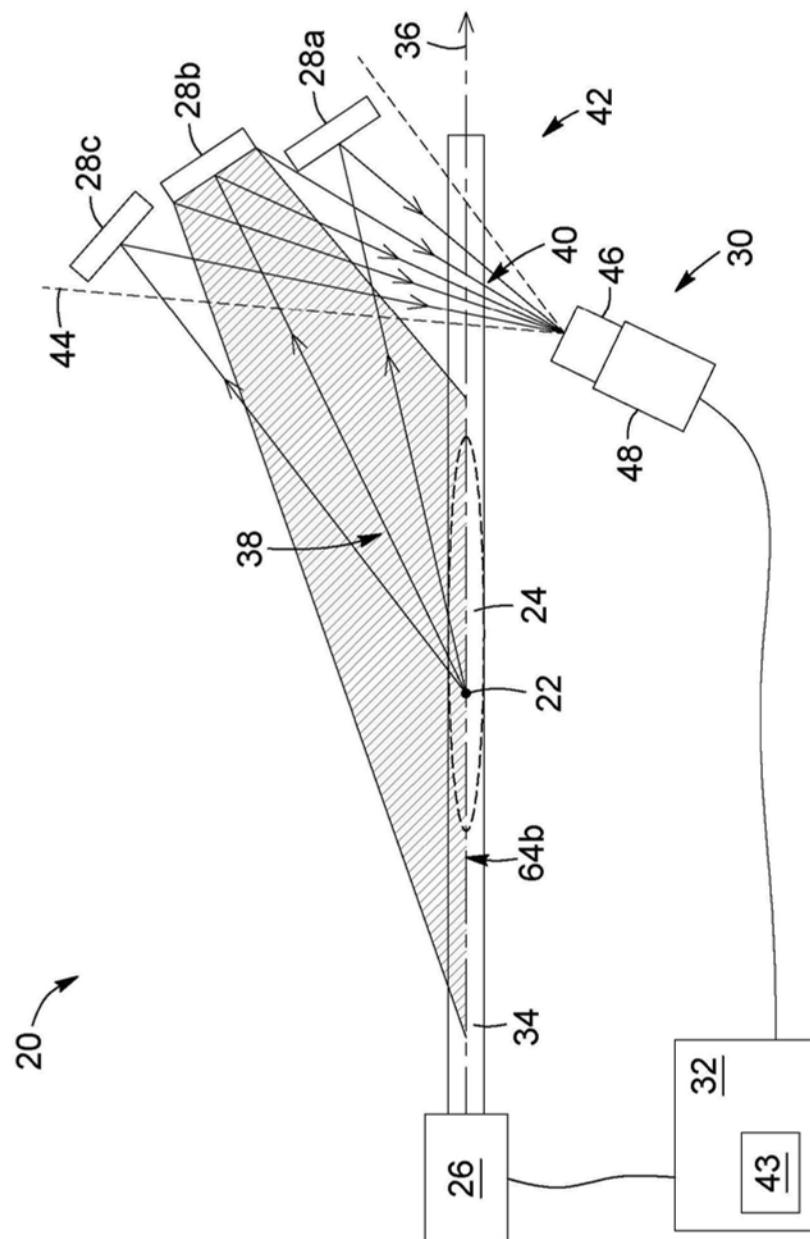


图6B

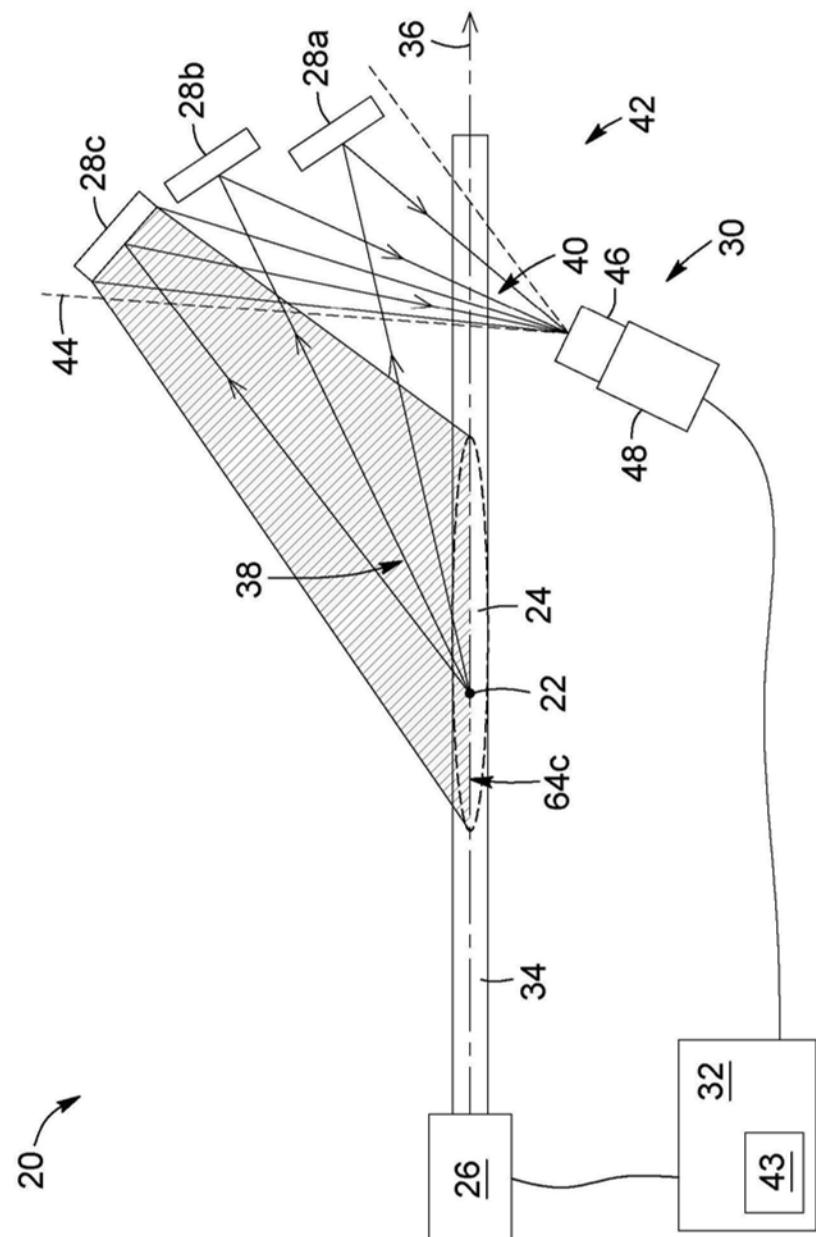


图6C

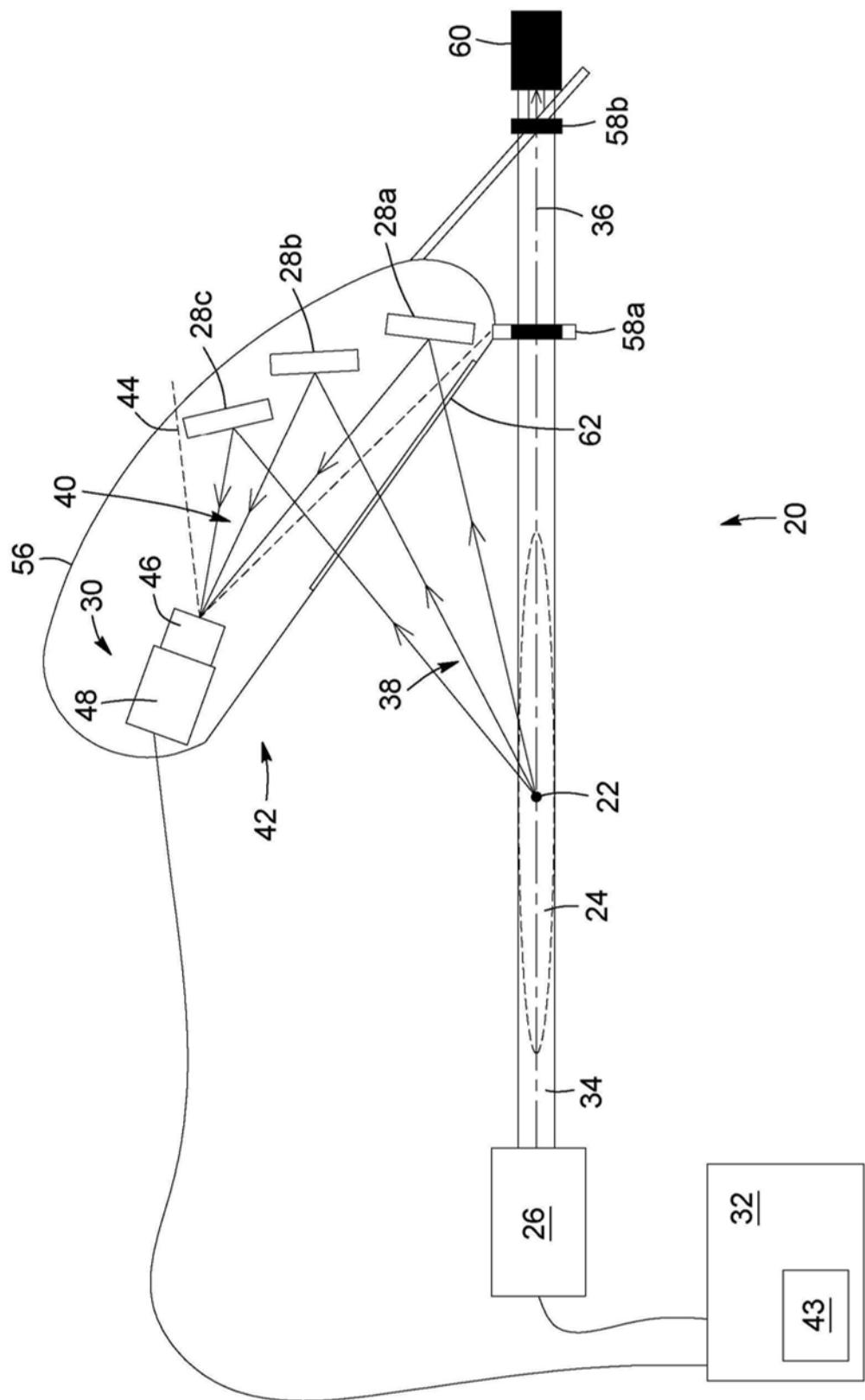


图7

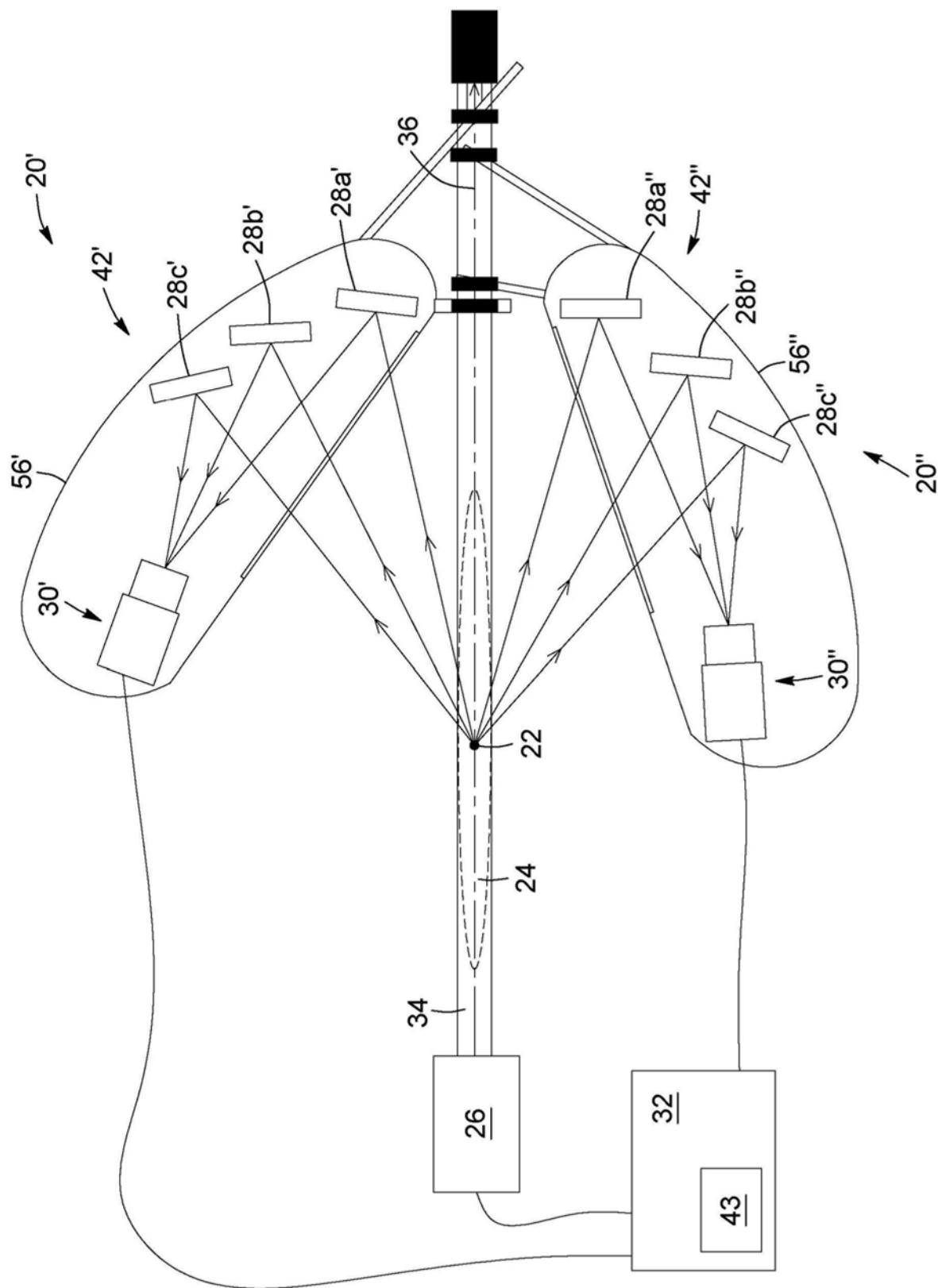


图8

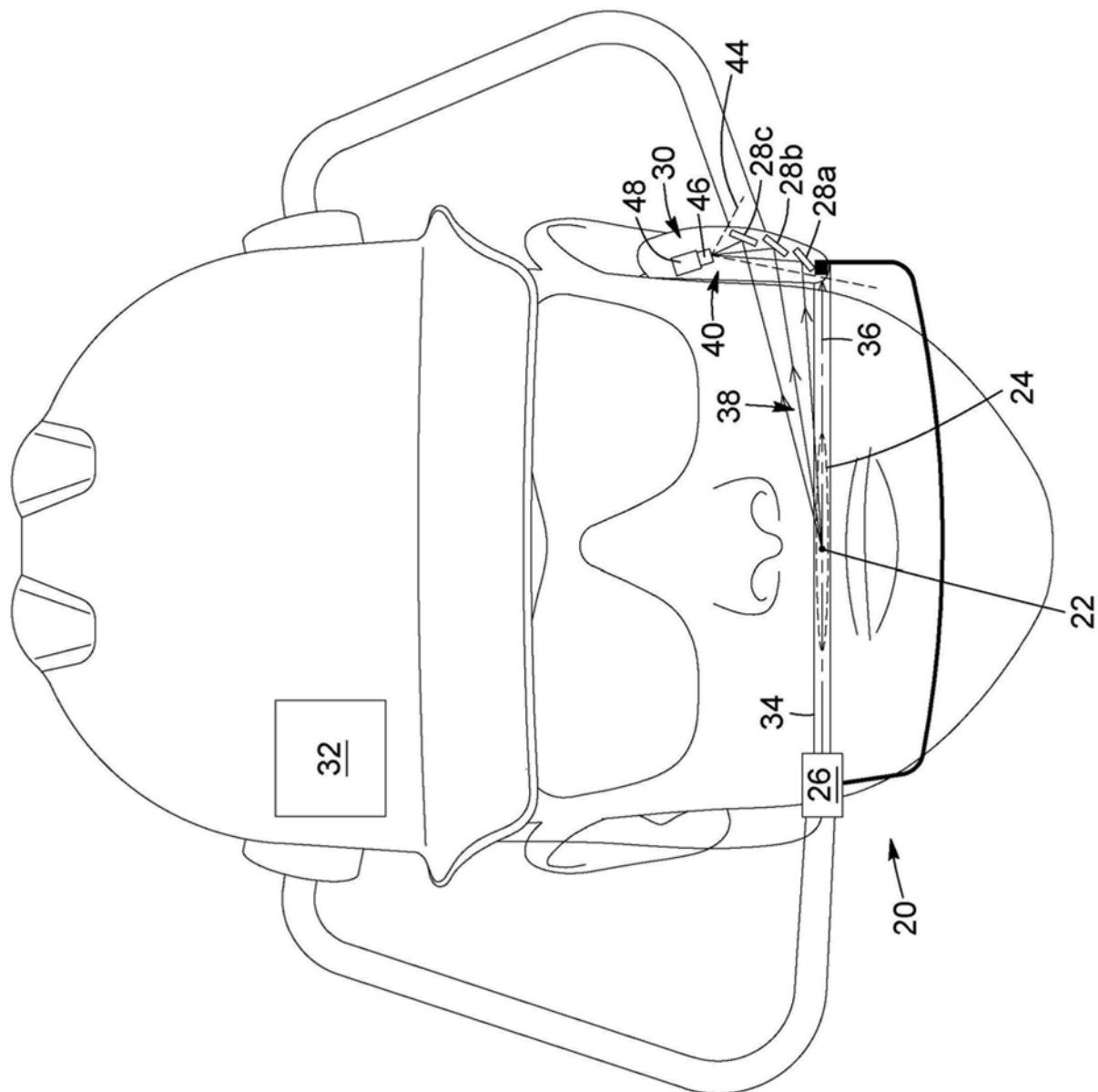


图9

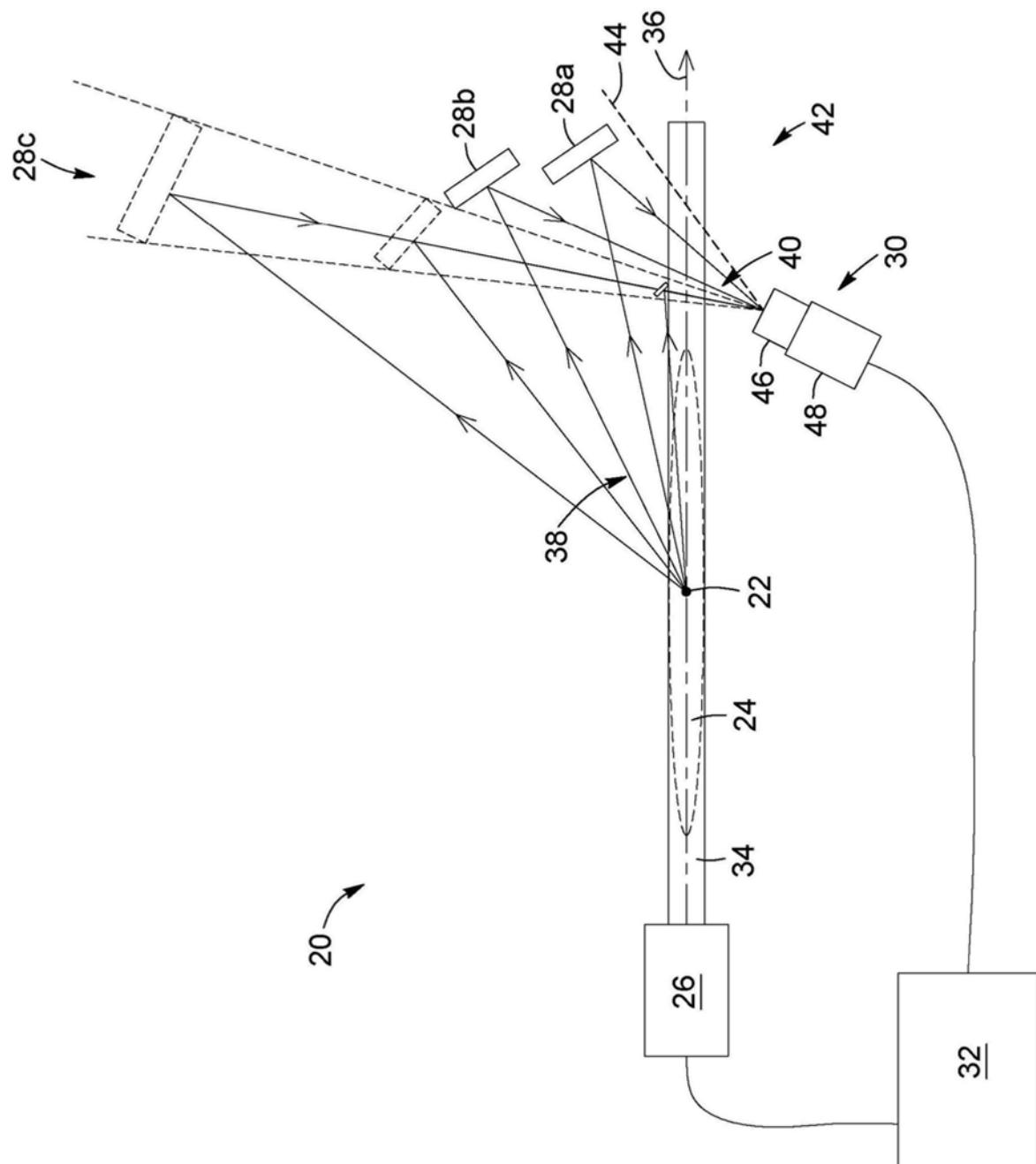


图10

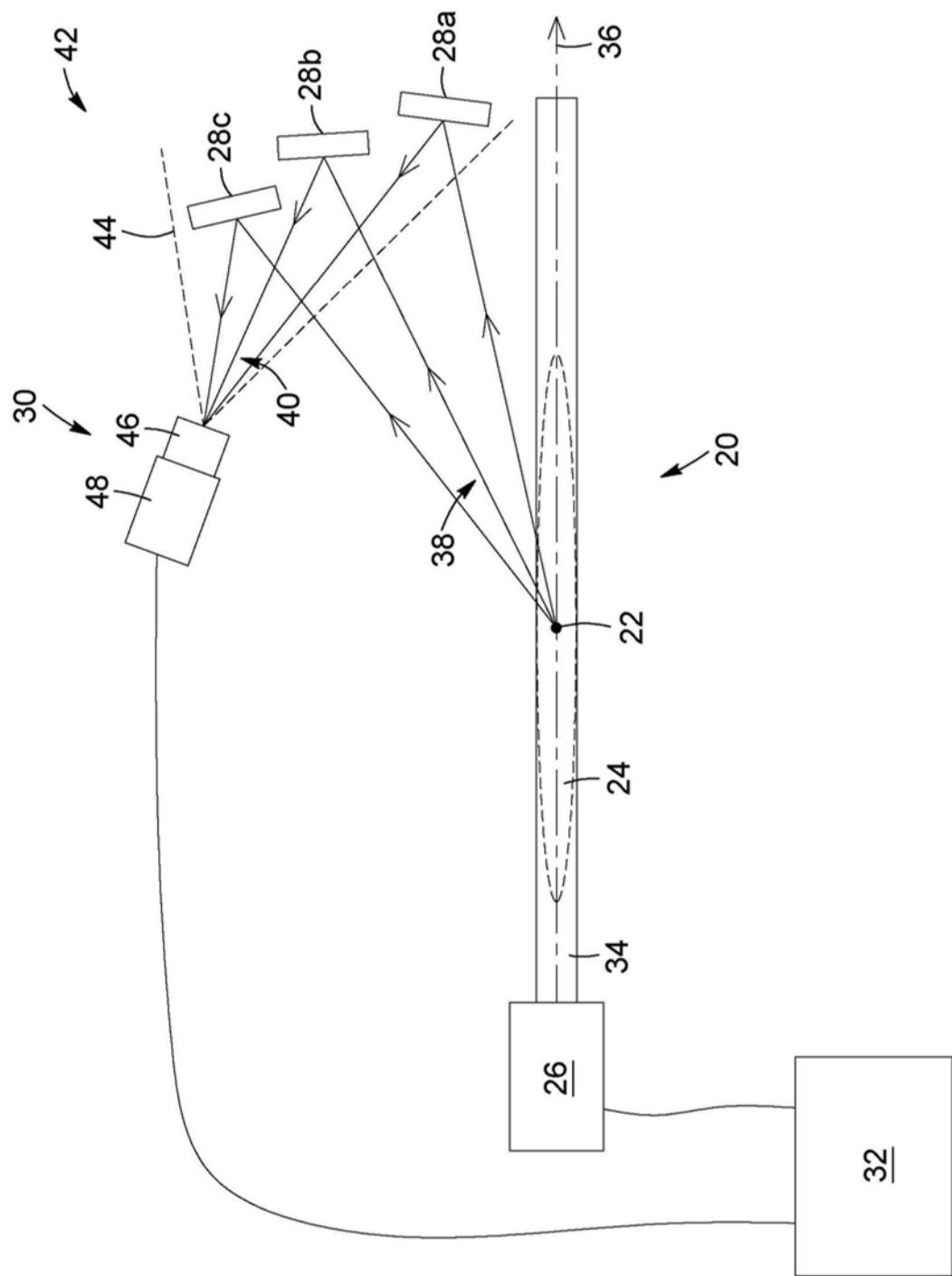


图11

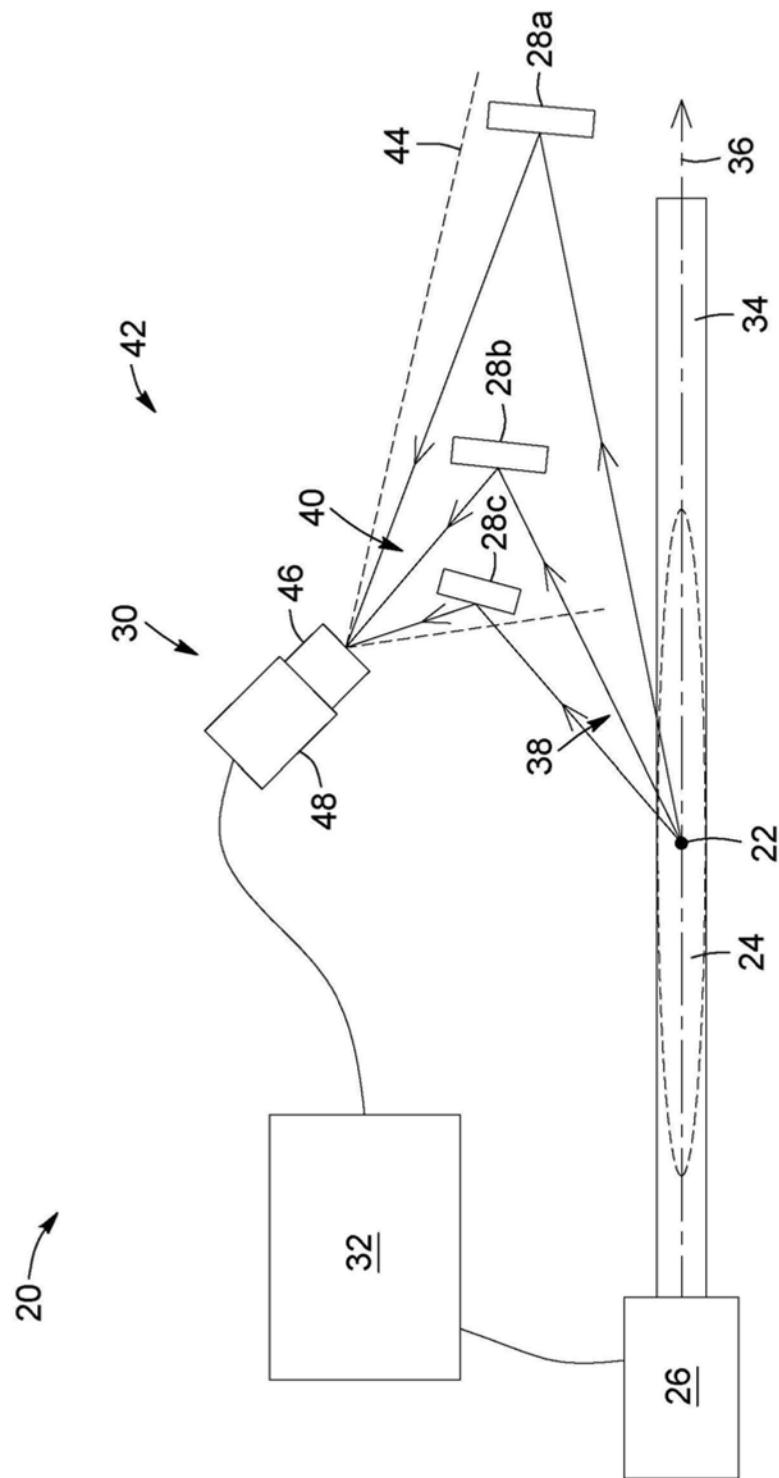


图12

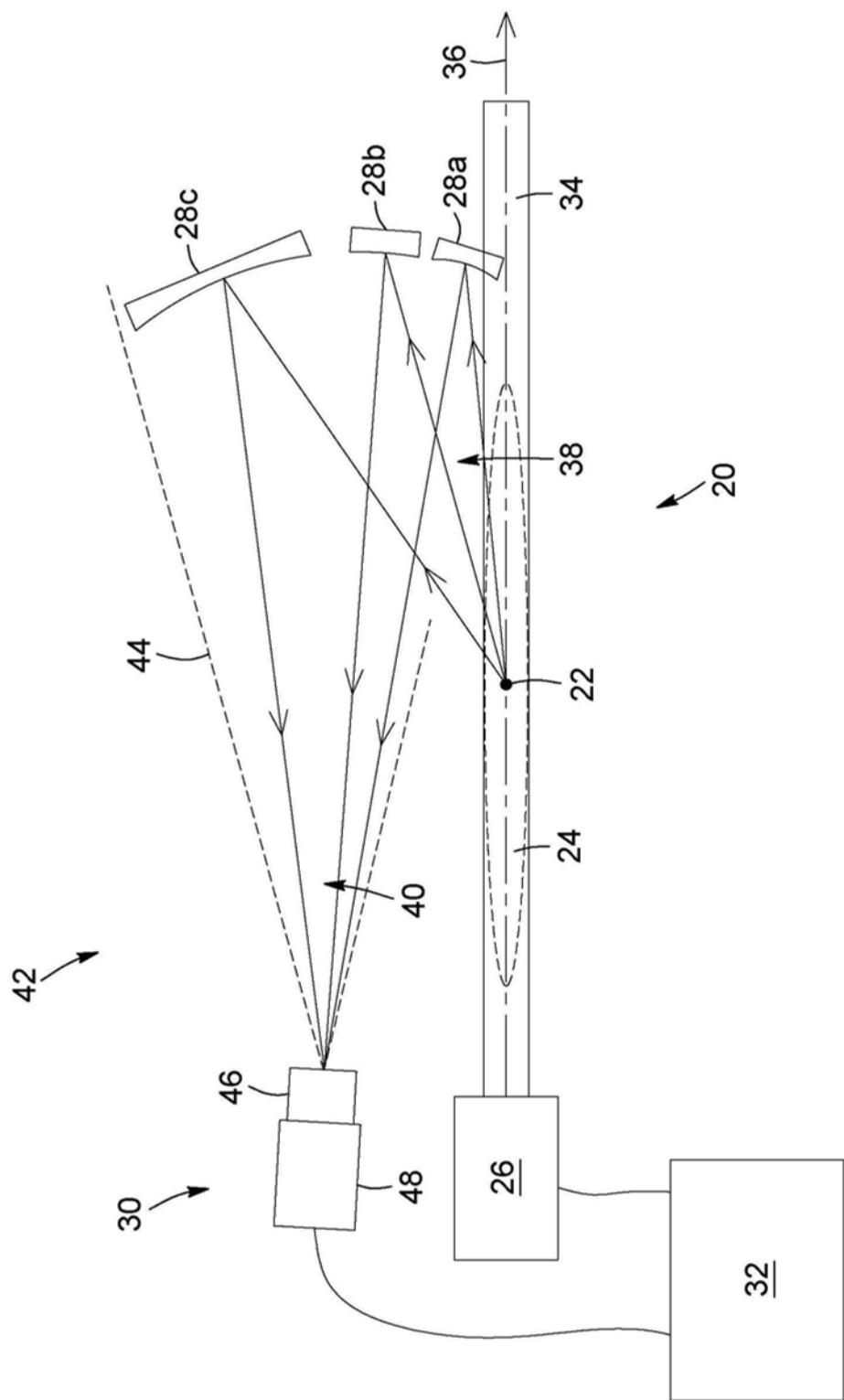


图13

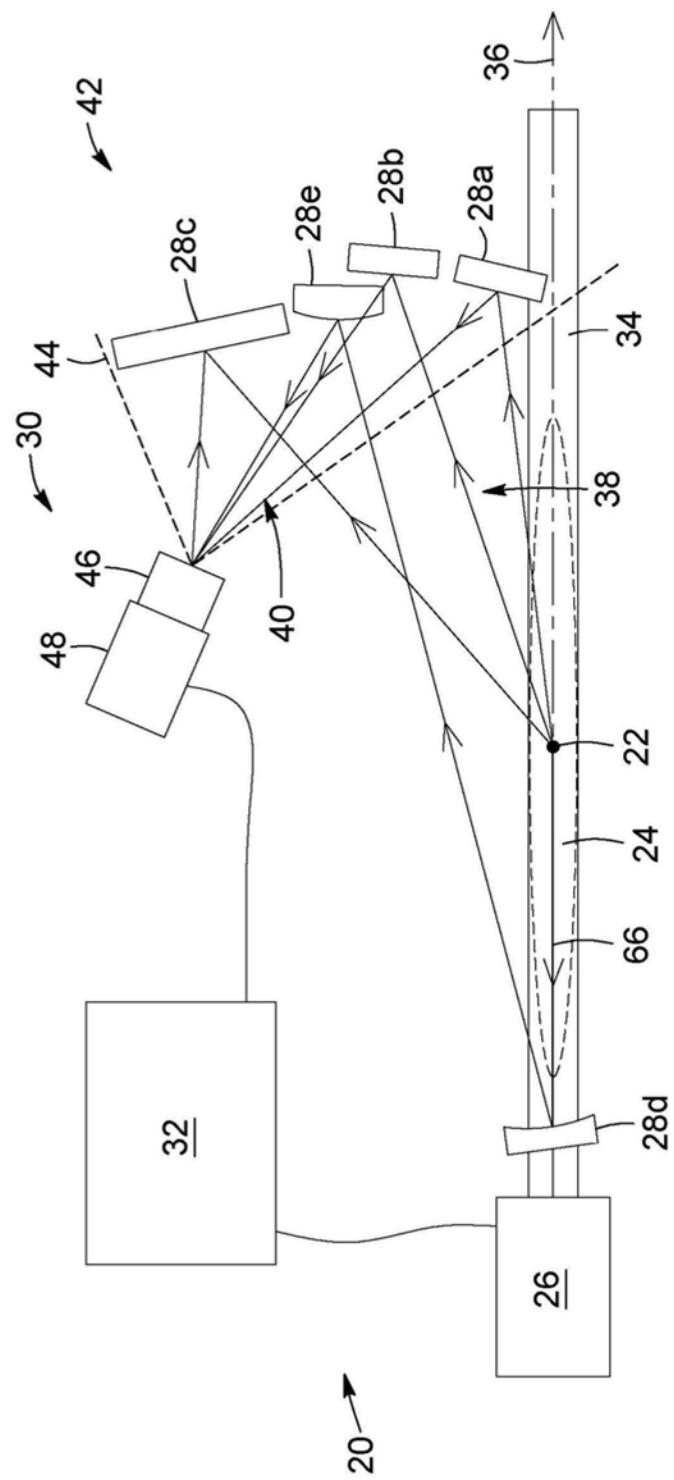


图14A

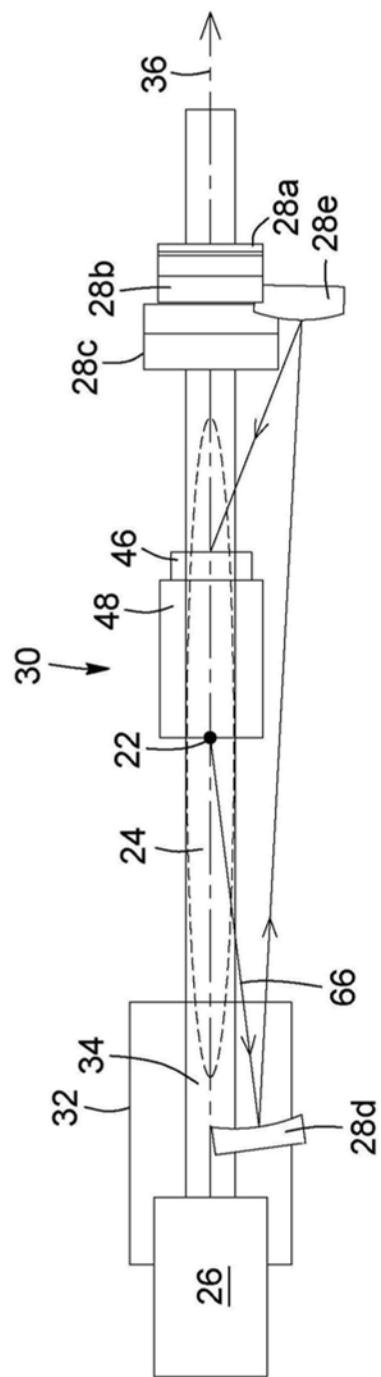


图14B

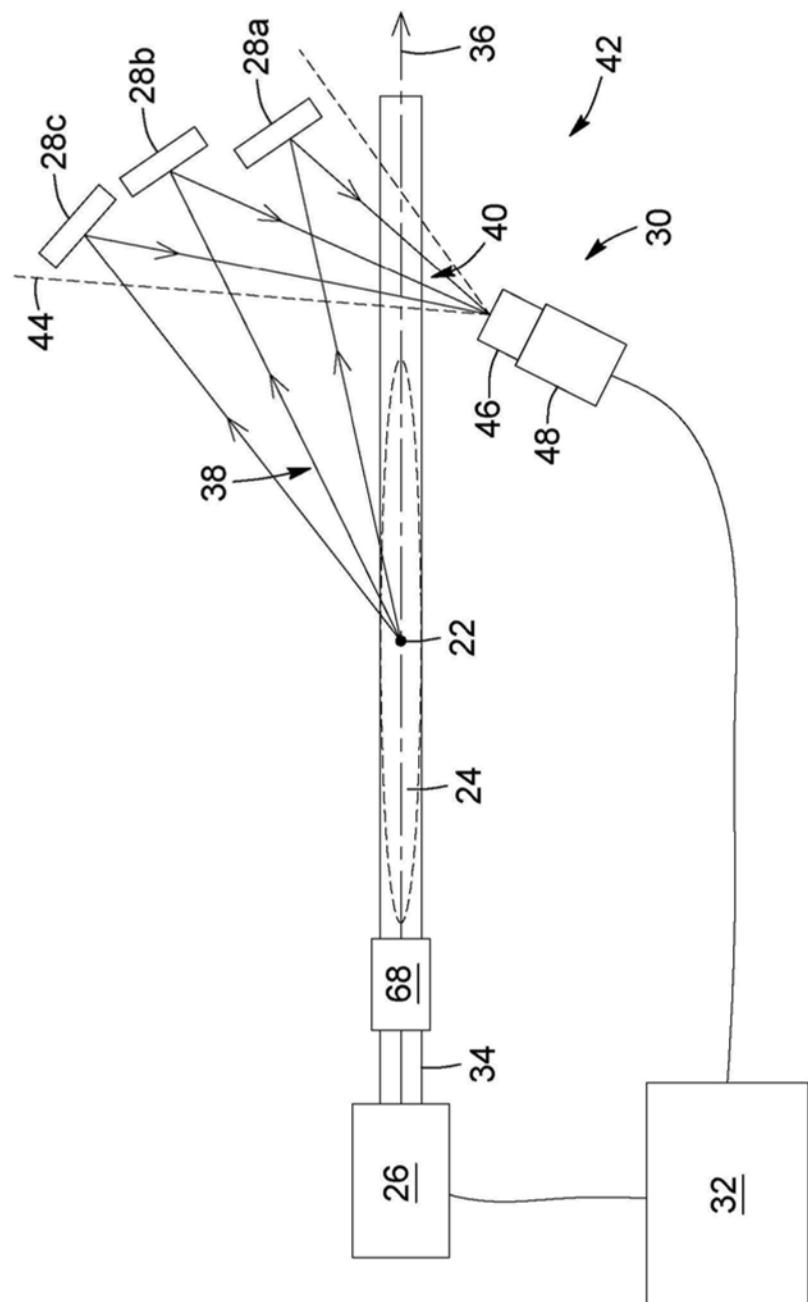


图15A

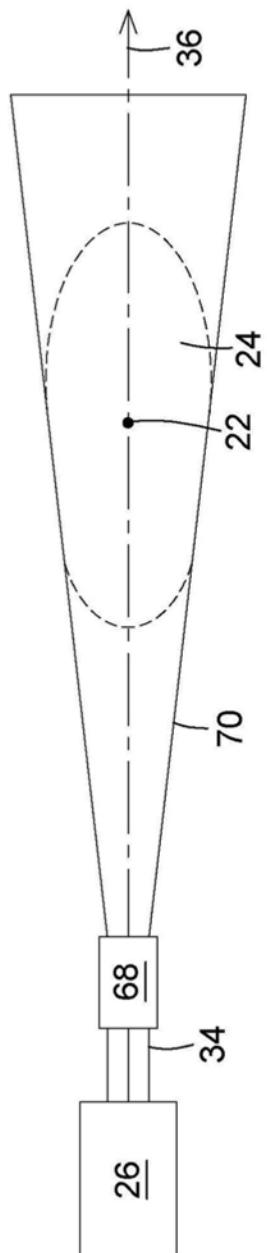


图15B

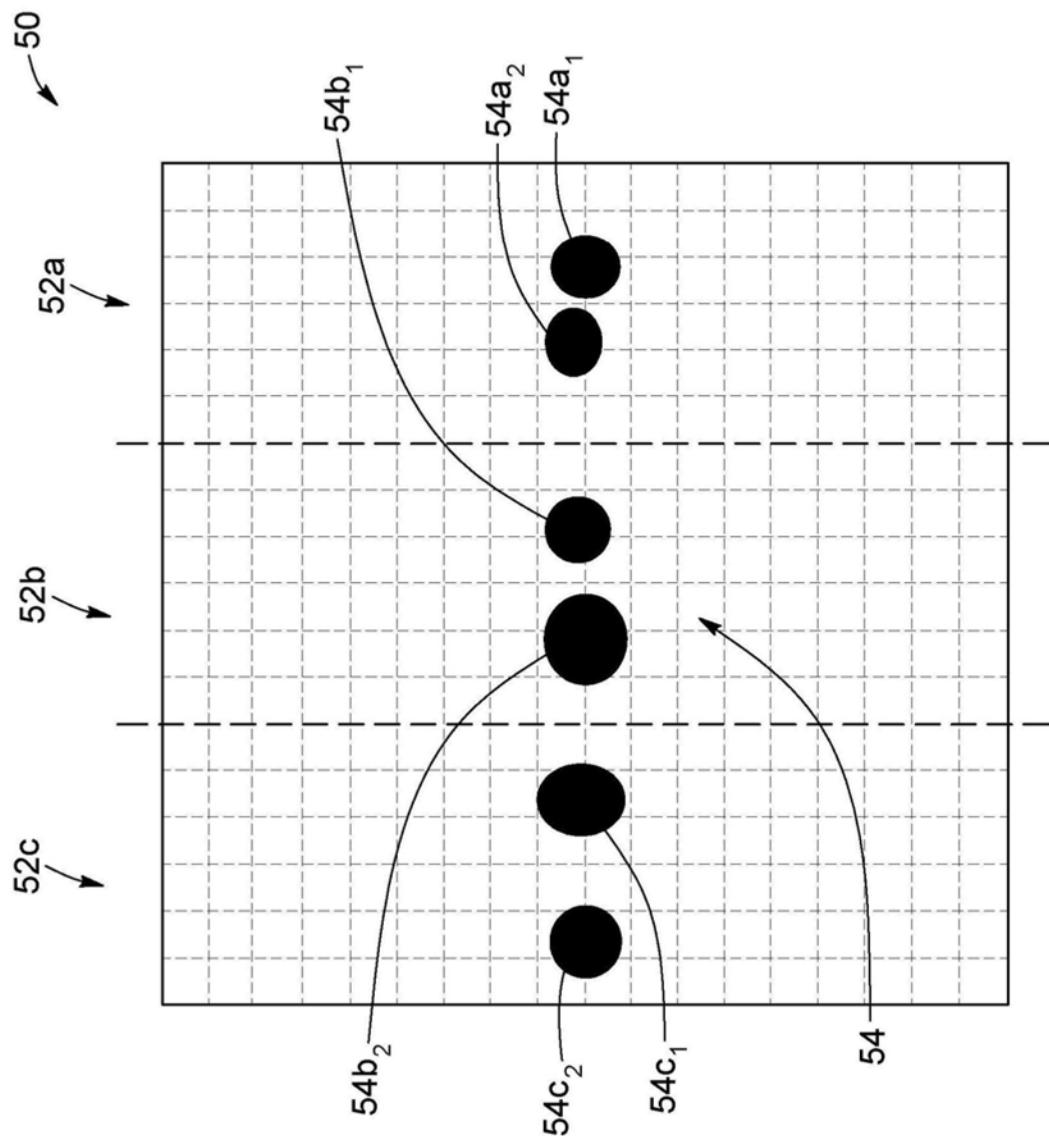


图16

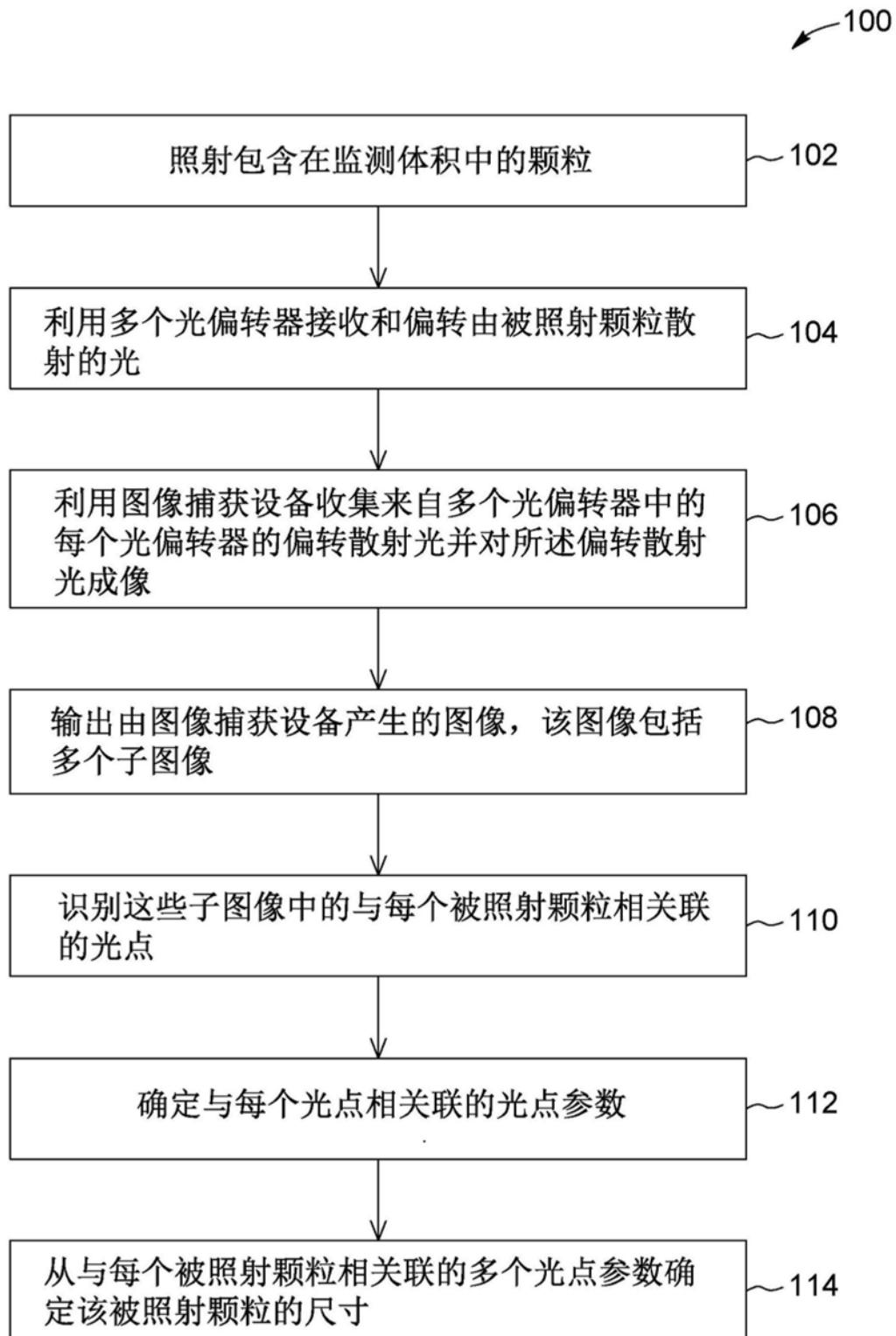


图17