

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H05H 3/04 (2006.01)

G02B 5/32 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02814236.5

[45] 授权公告日 2006年10月18日

[11] 授权公告号 CN 1281103C

[22] 申请日 2002.6.6 [21] 申请号 02814236.5

[30] 优先权

[32] 2001.6.6 [33] US [31] 09/875,812

[86] 国际申请 PCT/US2002/018132 2002.6.6

[87] 国际公布 WO2002/098617 英 2002.12.12

[85] 进入国家阶段日期 2004.1.15

[71] 专利权人 芝加哥大学

地址 美国伊利诺斯州

[72] 发明人 戴维·G·格瑞尔

斯文·奥尔格·贝赫瑞恩

审查员 陈海英

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利

商标事务所

代理人 蒋世迅

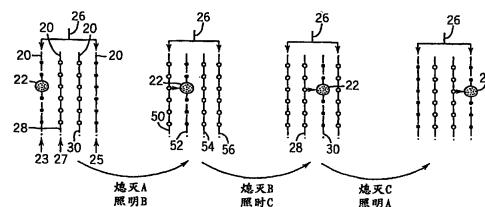
权利要求书 4 页 说明书 12 页 附图 5 页

[54] 发明名称

利用光陷阱的光蠕动泵浦

[57] 摘要

一种用于全息光陷阱或光梯度的方法，其中重复循环少量正确设计的光陷阱阵列用于一般和非常复杂的操作粒子和大量物质。材料的传输是类似于蠕动泵浦的过程，其中全息方式确定俘获或保持簇的序列类似于物理蠕动泵的各个状态。



1. 一种在光陷阱簇之间转移粒子的方法，包括以下步骤：
提供一个激光束；
把该激光束分成多个辅助激光束；
聚焦辅助激光束以建立多个光陷阱；
提供包含多个按顺序排列的簇的第一图形，第二图形和第三图形，每个簇至少包括激光束的一个光陷阱，其中第一图形，第二图形和第三图形是这样排列的，使构成每个图形的簇被每个其他图形的簇分隔开；和

在熄灭前一个图形之后，利用间隔足够接近的激光束顺序照明和熄灭每个图形，以便从一个簇俘获和转移粒子到相邻的簇，其中俘获和转移粒子使粒子从图形上的一个簇传输到相同图形上的相邻簇。

2. 按照权利要求1的方法，其中每个图形中的簇是基本互相平行对准的，且其中粒子的传输沿着与每个图形中簇垂直的大致直线轨道。

3. 按照权利要求1的方法，其中每个图形中簇有曲率半径，且其中粒子的传输大致沿着朝向每个簇曲率中心的轨道。

4. 按照权利要求1的方法，其中多个粒子的转移是跨越每个簇。

5. 按照权利要求4的方法，其中每个簇是按照同心圆方式排列的，以便使多个粒子集中到特定区域或使多个粒子从特定区域散开。

6. 按照权利要求4的方法，还包括步骤：加外场到多个粒子中的每个粒子，其中利用激光束顺序照明和熄灭每个图形，从而改变至少一些粒子相对于仅仅存在外场时这些粒子所取方向的方向。

7. 按照权利要求6的方法，其中所加外场的作用是，当粒子从一个簇传输到下一个紧邻簇时，可以不改变至少一些粒子的方向。

8. 按照权利要求4的方法，其中粒子是大于每个簇上各个光陷阱之间实际间隔的质量的一部分，且其中粒子从一个簇到下一个紧邻

簇的运动导致该质量的实际变形。

9. 按照权利要求 4 的方法，其中粒子是大于每个簇上各个光陷阱之间实际间隔的质量的一部分，且其中粒子从一个簇到下一个紧邻簇的运动导致该质量的实际旋转。

10. 按照权利要求 1 的方法，其中粒子包括部分的生物介质。

11. 一种利用激光束操作多个粒子的方法，包括以下步骤：

提供一个激光束；

把该激光束分成多个辅助激光束；

聚焦辅助激光束以建立多个光陷阱；

提供多个交织图形，每个交织图形至少包括一个簇，每个簇至少包含一个该激光束的光陷阱，该簇的位置与其他图形中簇相邻；

在熄灭前一个图形之后，利用间隔足够接近的激光束顺序照明和熄灭每个图形，以便俘获多个粒子中的一个粒子，其中该粒子是从一个图形上的簇传输到相邻的簇。

12. 按照权利要求 11 的方法，其中多个粒子至少包括部分的生物介质。

13. 按照权利要求 11 的方法，其中多个粒子大于每个簇上各个光陷阱之间的实际间隔，且其中粒子在跨越每个簇时的运动导致多个粒子的实际旋转。

14. 按照权利要求 11 的方法，其中多个粒子大于每个簇上各个光陷阱之间的实际间隔，且其中每个粒子在跨越每个簇时的运动导致多个粒子的实际变形。

15. 按照权利要求 11 的方法，其中每个簇是基本互相平行对准的，且其中多个粒子的传输沿着与每个簇垂直的大致直线轨道。

16. 按照权利要求 11 的方法，其中每个簇有曲率半径，且其中多个粒子的传输大致沿着朝向每个簇曲率中心的轨道。

17. 一种用于操作多个粒子的设备，包括：

一个激光束，被分成了多个辅助激光束，该多个光陷阱是由辅助激光束建立的；

第一图形、第二图形和第三图形，包含多个按顺序间隔开的簇，每个簇包括由激光束形成的光陷阱，其中第一图形，第二图形，和第三图形是这样排列的，每个图形中的簇被每个其他图形中的簇分隔开；和

顺序照明和熄灭每个图形的装置，用于在熄灭前一个图形之后，利用间隔足够接近的激光束顺序照明和熄灭每个图形，从一个簇俘获和转移粒子到下一个邻近簇，且其中粒子的俘获和转移使该粒子从第一图形上的一个簇传输到相同图形上的另一个簇。

18. 按照权利要求 17 的设备，其中粒子是大于每个簇上各个光陷阱之间实际间隔的多个粒子中的一部分，且其中粒子从一个簇到下一个紧邻簇的运动导致多个粒子的实际变形。

19. 按照权利要求 17 的设备，其中粒子是大于每个簇上各个光陷阱之间实际间隔的多个粒子中的一部分，且其中粒子从一个簇到下一个紧邻簇的运动导致多个粒子的实际旋转。

20. 按照权利要求 17 的设备，其中粒子在从一个簇传输到下一个紧邻簇时的方向被加到该粒子上的外场所改变。

21. 按照权利要求 17 的设备，其中粒子在从一个簇传输到下一个紧邻簇时的方向没有被加到该粒子上的外场所改变。

22. 按照权利要求 17 的设备，其中粒子包括部分的生物介质。

23. 按照权利要求 17 的设备，其中每个图形中簇是基本互相平行对准的，且其中粒子的传输沿着与每个图形中的簇垂直的大致直线轨道。

24. 按照权利要求 17 的设备，其中每个图形中簇有曲率半径，且其中粒子的传输大致沿着朝向每个簇曲率中心的轨道。

25. 按照权利要求 17 的设备，其中多个簇是这样排列的，顺序照明和熄灭每个图形可以把多个粒子分成至少两组粒子。

26. 按照权利要求 17 的设备，其中多个簇是这样排列的，顺序照明和熄灭每个图形可以把多个粒子组合成单组粒子。

27. 一种在确定性光梯度的簇之间转移粒子的方法，包括以下

步骤:

提供一个激光束;

聚焦该激光束以建立多个确定性光梯度;

提供包含多个按顺序排列的簇的第一图形, 第二图形和第三图形, 每个簇至少包括该激光束的一个光梯度, 其中第一图形, 第二图形和第三图形是这样排列的, 使构成每个图形的簇被每个其他图形上簇分隔开; 和

在熄灭前一个图形之后, 利用间隔足够接近的激光束顺序照明和熄灭每个图形, 以便从一个簇俘获和转移各个粒子到邻近的簇, 其中每个粒子的俘获和转移是每个粒子从一个图形上的一个簇传输到相同图形上的相邻簇。

28. 按照权利要求 27 的方法, 其中多个粒子大于每个簇上各个光梯度之间的实际间隔, 且其中每个粒子在跨越每个簇时的运动导致多个粒子的实际旋转。

29. 按照权利要求 27 的方法, 其中多个粒子大于每个簇上各个光梯度之间的实际间隔, 且其中每个粒子在跨越每个簇时的运动导致多个粒子的实际变形。

30. 按照权利要求 27 的方法, 其中多个簇是这样排列的, 顺序照明和熄灭每个图形可以把多个粒子分成至少两组粒子。

31. 按照权利要求 27 的方法, 其中多个簇是这样排列的, 顺序照明和熄灭每个图形可以把多个粒子组合成单组粒子。

32. 按照权利要求 27 的方法, 其中多个粒子中至少部分粒子在从一个簇传输到紧邻簇时的方向被加上的外场所改变。

33. 按照权利要求 32 的方法, 其中多个粒子中至少部分粒子在从一个簇传播到紧邻簇时的方向没有被加上的外场所改变。

34. 按照权利要求 27 的方法, 其中多个确定性光梯度中至少一个光梯度包括光陷阱。

利用光陷阱的光蠕动泵浦

技术领域

本发明一般涉及用于控制和操作微小粒子、活动质量或变形结构的方法和设备。更具体地说，本发明涉及按照一般方法和复杂方法利用全息光陷阱以控制和操作粒子和大量物质的方法和设备。

背景技术

最好是，光陷阱利用光梯度力以俘获二维和三维的微米尺度大量物质。全息形式光陷阱可以利用计算机产生的衍射光学元件从单个激光束中建立大量光陷阱。这些光陷阱可以排列成任何所需的结构，它取决于当前的需求。

虽然用于精确和相对高可信度移动粒子的系统是众所周知的，但是，常规的系统对于粒子运动的每个离散步骤要求投影单独的全息图。计算多个全息图是非常费时的，并要求相当大的计算工作量。此外，实现这种计算机产生光陷阱或其他动态光陷阱系统，例如，扫描光夹子，所需要的计算机寻址投影系统往往是非常昂贵的。

发明内容

所以，本发明的一个目的是提供按照一般方法和复杂方法操作粒子和大量物质的一种改进方法。

本发明的另一个目的是提供一种以高精确度和可信度沿预定路径移动粒子的改进方法。

本发明的另一个目的是提供用于操作粒子和大量物质的一种方法，该方法可以免除实现复杂重新排列的计算负担。

根据以上的目的，投影这种光陷阱图形的随时间变化的序列，可以实现光陷阱的动态重新配置，其中每个新图形以足够小的距离更新每个光陷阱的位置，从而使原始图形中俘获的粒子自然地落入到下一个图形中相应的光陷阱中。所以，利用循环通过 (cycling

through) 少量预先计算的全息光陷阱图形, 本发明提供一种用于完成复杂的重新排列物质的方法。可以利用机械方式实现循环, 从而免除通用全息光陷阱系统的计算复杂性和昂贵费用。

本发明提供一种在光陷阱簇之间转移粒子的方法, 包括以下步骤:

提供一个激光束;

把该激光束分成多个辅助激光束;

聚焦辅助激光束以建立多个光陷阱;

提供包含多个按顺序排列的簇的第一图形, 第二图形和第三图形, 每个簇至少包括激光束的一个光陷阱, 其中第一图形, 第二图形和第三图形是这样排列的, 使构成每个图形的簇被每个其他图形的簇分隔开; 和

在熄灭前一个图形之后, 利用间隔足够接近的激光束顺序照明和熄灭每个图形, 以便从一个簇俘获和转移粒子到相邻的簇, 其中俘获和转移粒子使粒子从图形上的一个簇传输到相同图形上的相邻簇。

本发明还提供一种利用激光束操作多个粒子的方法, 包括以下步骤:

提供一个激光束;

把该激光束分成多个辅助激光束;

聚焦辅助激光束以建立多个光陷阱;

提供多个交织图形, 每个交织图形至少包括一个簇, 每个簇至少包含一个该激光束的光陷阱, 该簇的位置与其他图形中簇相邻;

在熄灭前一个图形之后, 利用间隔足够接近的激光束顺序照明和熄灭每个图形, 以便俘获多个粒子中的一个粒子, 其中该粒子是从一个图形上的簇传输到相邻的簇。

本发明提供一种用于操作多个粒子的设备, 包括:

一个激光束, 被分成了多个辅助激光束, 该多个光陷阱是由辅助激光束建立的;

第一图形、第二图形和第三图形, 包含多个按顺序间隔开的

簇，每个簇包括由激光束形成的光陷阱，其中第一图形，第二图形，和第三图形是这样排列的，每个图形中的簇被每个其他图形中的簇分隔开；和

顺序照明和熄灭每个图形的装置，用于在熄灭前一个图形之后，利用间隔足够接近的激光束顺序照明和熄灭每个图形，从一个簇俘获和转移粒子到下一个邻近簇，且其中粒子的俘获和转移使该粒子从第一图形上的一个簇传输到相同图形上的另一个簇。

本发明还提供一种在确定性光梯度的簇之间转移粒子的方法，包括以下步骤：

提供一个激光束；

聚焦该激光束以建立多个确定性光梯度；

提供包含多个按顺序排列的簇的第一图形，第二图形和第三图形，每个簇至少包括该激光束的一个光梯度，其中第一图形，第二图形和第三图形是这样排列的，使构成每个图形的簇被每个其他图形上簇分隔开；和

在熄灭前一个图形之后，利用间隔足够接近的激光束顺序照明和熄灭每个图形，以便从一个簇俘获和转移各个粒子到邻近的簇，其中每个粒子的俘获和转移是每个粒子从一个图形上的一个簇传输到相同图形上的相邻簇。

附图说明

图 1 画出光陷阱簇内光陷阱中俘获的单个粒子，其中虚线表示簇 (manifold) 的位置；

图 2 表示单个粒子从第一图形中的光陷阱簇转移到第二图形中的光陷阱簇；

图 3A-3D 表示光蠕动 (peristalsis) 方法的操作过程；

图 4 表示利用平行直线的光陷阱簇以便沿着与簇垂直的直线轨道转移粒子；

图 5A 表示从图形周围向曲率中心引导粒子的弯曲簇；而图 5B 表示图 5A 中描述的图形如何能够横扫粒子进入通道；

图 6A 表示把一个粒子流分成两个单独粒子流的非均匀弯曲簇；而图 6B 表示把两个单独粒子流合并成单个较大粒子流的非均匀弯曲簇；

图 7A 表示传送粒子离开一个区域的多个同心圆簇；而图 7B 传送粒子进入一个区域的多个同心圆簇；

图 8 是表示响应于施加外场和光蠕动物形，两个粒子的运动；

图 9 表示第一类型粒子向右传输和第二类型粒子向左传输的两级光分离；

图 10 表示利用动态全息光陷阱实现光蠕动；

图 11 表示利用光路系统中透射模式计算机寻址空间光调制器的动态全息光陷阱系统；

图 12 表示以机械方式循环一系列静态计算机产生的衍射光学元件；

图 13 表示利用圆盘周围上排列的计算机产生的透射型衍射光学元件的机械式循环光蠕动物形系统；

图 14 表示多个光陷阱簇俘获扩展的物体和旋转该物体；和

图 15 表示利用光陷阱簇俘获扩展的变形物体。

具体实施方式

光蠕动涉及利用一段时间内投射预先计算的全息图序列以实现大量粒子在大的区域或选择区域上的复杂重新分布。本发明光蠕动的重要方面是，粒子从给定图形上光陷阱的一个簇通过至少两个中间图形非特定转移到下一个图形。术语“图形”的意思是至少包含一个簇。图 1 表示沿直线排列光陷阱 24 的簇 20。每个光陷阱 24 能够俘获所需的粒子 22，且光陷阱 24 之间互相隔开，因此，在没有落入现有的一个光陷阱 24 或被光陷阱 24 中现有粒子阻挡的情况下，粒子 22 不太可能传输通过簇 20。图中的粒子 22 画成球状，但也可以是不规则的形状，或者甚至它可以远远大于光陷阱 24 之间的间隔。

光蠕动的操作方法是通过对光陷阱 24 的簇 20 而释放粒子 22 使它运动。若足够邻近地照明光陷阱 24 的另一个图形，则粒子 22 就被新图形中的一个（或多个）光陷阱 24 俘获。在图 3A-3D 所示的情况下，图形在直线 23 和 25 上包含两个簇 20。然而，下一个图形仅包含一个簇，例如，沿直线 27 上的簇。实际上，粒子 22 是从第一图形 26 中光陷阱 24 的一个簇 20 转移到第二图形 28 中另一个簇 20。图 2 表示这种过程的最简单形式，而图 3A-3D 表示更一般的情况。为了实现粒子 22 的转移，可以首先熄灭第一图形 26；然后照明第二图形 28，其条件是两个图形 26 与 28 之间的间隔是足够短，可以防止被俘获的粒子 22 在被最邻近一个光陷阱 24 俘获之前“漂移”（出光梯度）。在熄灭第一图形 26 之前照明第二图形 28 也是另一个可行实施例，但是实施的操作更复杂。

所以，光陷阱的图形可以包含一个或多个离散光陷阱 24 的簇 20，例如，本发明一个实施例中的离散夹子（tweezer）。每个簇 20 可以包含沿一维曲线或直线排列的几个光陷阱 24，如图 1 所示，也可以是在二维表面上，或三维体积内。由簇 20 集合构成的光陷阱图形概念对于观看光蠕动过程是有用的。

图 3A 更详细地画出特定图形的一个簇 20 上俘获的一个粒子 22，该图形标记为第一图形 26。第一图形包括两个簇 50 和 56。还展示第二熄灭图形 28（这个图形仅有一个簇）和第三熄灭图形 30（仅有一个簇）中俘获簇 52 和 54 的位置。在第一时间步骤，仅仅照明第一图形 26。在图 3B 表示的下一个时间步骤，熄灭第一图形 26 和照明第二图形 28。这个动作把粒子 22 从第一图形 26 的第一簇 50 转移到第二图形 28 的邻近簇 52。在图 3C 表示的下一个时间增量步骤，熄灭第二图形 28 和照明第三图形 30，从而再次转移粒子 22，此时转移到第三图形 30 上的簇 54。在图 3D 表示的最后一个时间步骤，熄灭第三图形 30 和再次照明第一图形 26。这把粒子 22 转移到下一个簇 56 上的第一图形 26。所以，光蠕动是利用循环通过（cycling through）中间图形的一个序列，确定性地从光陷阱图形上的一个簇

20 中转移粒子 22 到相同的第二图形 28 上的另一个簇 20 产生的。

在本发明的最优选实施例中，最少需要三个图形 26，28 和 30，以便从俘获图形上的一个簇 50 确定性地推进粒子 22 到下一个簇 52。若仅仅利用两个相等间隔的图形 26 和 28，则粒子 22 有很大的概率可以前进到下一个簇 52 或回到初始簇 50。在其他一些实施例中，可以利用多于三个图形 26，28 和 30 的图形沿特定的方向转移粒子 22。本领域专业人员熟知照明和熄灭光陷阱 24 的各个簇 20 的方法。

重复地分别循环通过第一图形 26，第二图形 28 和第三图形 30，可以使粒子 22 按照图 3 所示的排列从左到右的运动。相反的顺序可以驱动粒子从右到左。更扩展的图形是由多个簇 20 构成，因此，可以在全息光陷阱系统的整个视场内来回地转移粒子 22。

可以利用各种光蠕动的方法实现粒子 22 集合的重新排列。这些方法包括：在光陷阱 24 的图形内改变簇 20 的连续曲线形状。虽然此处详细描述了单个图形，本领域专业人员容易明白和认识到在簇 20 之间转移所需要的其他中间图形。在此处描述的例子中，粒子流的方向是由重复的箭头表示。

图 4 表示线性光蠕动泵 33 的一个图形 26。可以按顺序激活这个图形 26 中各个簇 20 之间交叉的两个或多个图形（未画出），以便从左到右驱动一个或多个俘获的粒子 22。使顺序反向可以从右到左转移粒子 22。这个图形以及此处描述的所有图形可以沿着任何所需的方向取向。

图 5A 和 5B 表示由弯曲簇 20 构成的图形可用于集中粒子流。相反地，沿相反的方向运行该序列可以扩散粒子 22。这种能力可用于引导粒子 22 从开放区域出来和进入闭合区域，例如，库区。各个簇 20 不必有相等的曲率，在特定的情况下改变曲率是有用的。例如，直线泵浦图形可用于横扫粒子 22 进入聚焦模式。两个簇 20 之间的各个间隔也不必是相等的。与稀疏排列形式的簇 20 比较，具有密集排列形式的簇 20 的图形区较缓慢地转移粒子 22。密集排列的簇 20 更

容易沿运动方向集中粒子 22，而稀疏排列的簇 20 可用于扩散粒子 22。这种方法对于聚焦图形是特别有益的，它可以避免粒子 22 在集中时过分地拥挤。

光陷阱 24 沿簇的分布和密度也可用于控制簇 20 之间粒子 22 的流动。例如，光陷阱 24 可以沿每个簇 20 有均匀的间隔，并且在从一个簇 20 到下一个簇和从一个图形到下一个图形上对准。在其他一些实施例中，沿簇 20 和在两个图形之间的光陷阱 24 有更复杂的排列，它可用于控制粒子 22 沿图形序列的流动。类似地，改变各个光陷阱 24 沿图形中簇 20 的强度和间隔对于控制粒子 22 的传输也是有用的。

引导粒子 22 流动的定型簇 20 也可用于引导粒子 22 进入任何所需的复杂图形。图 6A 所示的例子表示把一个粒子流 22 分成两个粒子流的定型簇 20。在沿相反方向运行时，这种图形可用于把两个（或多个）粒子流组合成一个粒子流。虽然这种方法不是很有效的，因为一旦多个簇 20 合并，一个粒子流中的粒子 22 仍然保持与同一粒子流中其他粒子相邻，但这种方法仍然是有益的。

图 6B 所示的例子表示一种诱导组合粒子流中粒子 22 混合的方法。这个例子说明图形中的簇 20 不必是分离的。这个系统中的图形包含混合区中的交叉形式簇 20。这种交叉可用于交换初始不同粒子流之间的粒子 22。交叉或相交简单的簇 20 以形成较复杂的簇 20，这种方法把统计元素引入到光蠕动。在每个交叉点附近给予粒子 22 一个传输方向的选择。各个粒子 22 选取哪个方向是由序列中一个图形到下一个图形切换处的随机热力所确定。因此，图 6B 所示的交叉可以导致某种程度的混合。

图 7A 和 7B 表示这样一个例子，闭合形式的簇 20 图形可以传输粒子 22 进入或离开一个区域。究竟图形是密集或稀疏区域取决于被投影图形序列的顺序。图 7A 的例子用于从一个区域中清除粒子 22，例如，便于测试悬浮流体或测量孤立的粒子 22。这种图形不必是圆形，也不必局限于平面图形。原则上，三维图形中的二维形式簇 20

可用于吸引材料进入一个体积或从一个体积中推出材料。

此外，应当注意，光俘获与其他外力之间的竞争也是有用的。例如，光俘获与其他外力之间的竞争对于从某个分布中分离粒子 22 是特别有用的。作为例子，考虑悬浮在周围流体中的粒子 22。每个粒子 22 是由本地流场 $\bar{u}(\bar{r})$ 中的粘滞曳力传送，曳力 $\bar{f} = \gamma \bar{u}$ 是由它的曳力系数 γ 确定。对于粘滞流体 η 中半径为 a 的小球，曳力系数 γ 是由公式 $\gamma = 6\pi\eta a$ 给出，并随粒子的半径线性地增大。较大粒子在对抗流动中保持稳定所需的力大于较小粒子所需的力。虽然粘滞曳力是外力的一个例子，但是，电场或磁场的其他外力也属于此处描述的这个实施例。

若外力小于给定的一个光陷阱 24 的光梯度力，则光蠕动传送的粒子 22 运动较大，如以上所描述的。若外力大于光陷阱 24 的光梯度力，则光蠕动仅可以干扰粒子 22 在外场中的运动。在图 8 所示的理想例子中，与外场驱动的情况比较，一种类型粒子 22 被更强地吸引到光陷阱 24。在图 8 所示的例子中，第一粒子 60 比第二粒子 62 更容易被俘获或受外场的影响较弱。所以，第一粒子 60 是由光蠕动传送并可以被收集。第二粒子 62 更强地受到外场的驱动并传输通过光陷阱 24 的图形，或许从它的初始路线转向到某个范围。

图 8 所示实施例中的两种类型粒子 60 和 62 的区别是由于它们对光陷阱 24 的亲合力或它们对外场的响应，或二者。选取这个图形中光陷阱 24 的空间分布，强度和其他特征，就可以分离这些粒子，其选择性是粒子的不同物理特征所确定。

光分离技术有许多重大的优点。光分离发生在沿电泳中所加外场的方向。光分离可以横向传送选取的部分。这意味着光分离可以连续地运行，而不是每次一批。因为光分离取决于全息光陷阱技术，它可容易地适应不同的分离问题。

例如，利用相同的方法和设备，可以相继地应用多级光分离。调谐每一级以提取初始混合多分量样本的特定比率，就可以把样本分成多个分量中的每个分量，从而方便地从流动中横向位移所分类的分

量，或许利用以上描述的技术把它们传送到各个通道或库区。

图 9 中的实施例包含第二级光分离以建立单个分离级。驱动粒子 22 通过该区域的外力指向下方。图 9 中标记为 80 的第一图形选取第一类型 84 的粒子，并移动这些粒子转向右侧，但不收集第二类型 86 的粒子。标记为部分 82 的第二级分离的特征是更强或具有更密集排列的光陷阱 24，它能够偏离外力转向第二类型 86 的粒子 22。如图 9 所示，这第二级图形 82 向左传送，仍进一步增大部分 84 与 86 之间的间隔。虽然两级分离在概念上是独立的，但它们可以是单个图形的光陷阱簇 20。这个过程可以推广到包含多个级及合并转移分离的粒子，用于收集。

如上所述，光蠕动工作是重复地循环通过光陷阱图形的一个序列。图 10 和 11 中以示意图方式表示的动态全息系统是通用的实施装置。在这种情况下，通过把所需的相位调制编码到输入激光束 100 的波前上，计算机寻址空间光调制器 102 建立起实施光陷阱 114 的一个给定图形所需要的激光束 104 的配置。原则上，这种系统能够实现任何的光陷阱图形序列，因此，可以实现任何的光蠕动模式。然而在实际上，空间光调制器 102 有物理限制，例如，空间分辨率，它限制编码图形的复杂性。此外，这种空间光调制器 102 的成本往往很高。

在图 10 所示的实施例中，可以利用动态全息光陷阱 114 完成光蠕动，图 10 是一个典型的实施装置。输入激光束 100 从计算机寻址空间光调制器 (SLM) 102 的表面上反射。SLM 102 把计算机产生的相移图形编码到激光束 100 的波前上，从而把该光束分成一个或多个独立的激光束 104，每个激光束 104 是从 SLM 102 面上中心点 107 射出。透镜 108 和 110 中继这些激光束 104 中的每个激光束到高 NA 物镜 112 后孔径中心处的共轭点。这个物镜 112 把每个激光束 104 聚焦到独立的光陷阱 114，此处为了简单化，图 10 中仅画出一个光陷阱。分色反射镜 116 反射俘获光到物镜 112，而允许成像照明光传输通过，从而使图像是由被俘获粒子形成。更新 SLM 102 编码的相位调制可以出现新的光陷阱 114 图形。按照这种方式循环通过光蠕动图形

的一个序列，以实现相应的光蠕动过程。因为这个系统可以利用软件进行重新配制，它代表光蠕动的通用实施装置。在图 11 所示的另一个实施例中，动态全息光陷阱系统在光路中利用透射模式的计算机寻址空间光调制器 200，其他的配置与图 10 类似。这个系统也可用于利用循环通过俘获图形的一个序列，以实现光蠕动。

实现光蠕动不必要求动态全息光陷阱系统提供的普遍性和重新配置能力。取而代之的是，实现光蠕动最好利用能够投影（小的）静止图形序列的全息光陷阱系统。最简单的优选形式是，实现光蠕动可以是利用机械方式循环通过相位图形序列以实现全息光陷阱图形的相应序列。图 12 表示一个特别有用的实施例。如图 12 所示，实现特定光蠕动过程所需的相位图形被编码在反射型衍射光学元件 304，306 和 308 的表面起伏中。这些光学元件 304，306 和 308 安装到棱镜 300 的表面上，每个光学元件是由电机 302 旋转到位。使电机反向旋转就使图形的序列反向，因此使光蠕动的方向反向。利用电机 302 旋转棱镜 300 使每个图形对着输入激光束，因此，对齐的衍射光学元件 304，306 和 308 所产生的衍射光束都建立光陷阱 114。使电机 302 逐步前进按顺序通过每个图形就可以实现光蠕动。如果需要，可以采用有多于三个图形的棱镜。

安装一系列固定的反射型衍射光学元件 304，306 和 308 到旋转棱镜 300 表面上，在全息光陷阱方法中可以有其他的用途。类似地，透射型衍射光学元件 404，406，408 和 410 可以放置在圆盘 312 的周围，并旋转成如图 13 所示的光束 100 或成为连续的反射光脉冲。除了光蠕动之外，这种情况还有潜在的应用。例如，在图 13 中，旋转每个衍射光学元件 404，406，408 和 410 以形成连续光脉冲，从而可以投影光蠕动序列中的一个图形。

可以制造这样的静态反射型或透射型衍射光学元件，其特征尺寸减小到衍射极限，这些衍射光学元件可以有基本连续的相位编码，因此，可以实现比空间光调制器更复杂的各种俘获图形。可以用很低

的成本生产这种元件，且不需要利用计算机进行操作。通过改变棱镜或衍射光学元件的圆盘，可以改变这种系统中的图形序列。在这个意义上，这种实施装置不如基于计算机寻址空间光调制器的实施装置那样通用。

因为仅仅需要少量预先计算的衍射光学元件以实现光蠕动，所以，也可以利用可交换相位光栅。这种方法的优点是，例如，不需要可能偏离对准和磨损的活动部件，没有可能造成振动并辐射杂散电场和磁场的电机，以及降低功率要求和减小体积。

在薄膜介质上编码高质量相位全息图可以实现相当于片环上的光蠕动。允许高速循环通过大量衍射光学元件，片基全息光陷阱实施装置可以具有光蠕动之外的应用。

光蠕动也可用于粒子和其他物质，例如，生物细胞，它大于光蠕动图形中各个光陷阱之间的实际间隔。类似地，也可以利用光蠕动操作诸如蛋白质，DNA 或分子的物质。通过平移“钉床 (bed of nails)”，仍可以移动钉床光俘获图形上俘获的大物体。然而，不是确定单个俘获区，光蠕动图形可以建立大的陷阱场，适合于固定任何地方找到的大物体。如上所述，利用小的位移更新图形可以位移整个物体。潜在的应用包括：把扩展样本平移到它可以接受测试的区域，旋转被检查的物体，或可控地使物体变形。例如，在图 14 的实施例中，图 14 表示俘获扩展物体 80 的光陷阱簇 20。更新有簇 20 的图形，往往可以旋转扩展物体 80。类似地，图 15 表示俘获扩展变形物体 82 的光陷阱簇 20。物体 82 被较密集光陷阱区强烈地俘获，以及在随后的图形中向外移动这些区域可以拉伸物体 82。

每个光蠕动序列完成一个具体的操作。在某些应用中，要求完成一系列光蠕动操作，该系列的顺序取决于以前操作的结果。例如，光蠕动可用于移动活细胞进入显微镜视场中心用于可重现的观察。然后，第二序列可以旋转该细胞到达所需的取向。然后，第三序列可以实施具体的测试。基于该测试的结果，可以选取附加的光蠕动序列以

收集细胞或进行处理。可以预先计算这些序列中的每个序列，从而免除全息光陷阱系统中的大部分计算负担。类似地，光蠕动操作的不同子序列可以合并到单个程序中，其中第一子序列可以把粒子分成两个或多个不同的粒子流，第二子序列可以从特定位置分散粒子，第三子序列可以把两个独立的粒子流混合成单个粒子流，第四子序列可以把多个粒子集中到粒子区，而且还可以按照各种其他的方法使粒子从一个图形“运动”到另一个图形。以上所描述的子序列各种组合可以合并成单个程序，利用此处描述的各种类型光梯度，可以根据需要按顺序和/或同时利用这些子序列。因为实现任何一个序列需要非常少的衍射光学元件，只需要对建议的实施装置作适度的考虑，就可以在这种多级操作的可用序列集合中进行选取。

此外，实践本发明也可以不利用常规理解的光陷阱，可以要求特定的光梯度以控制粒子。例如，可以建立多个确定性光梯度，并把它们合并到上述的多个簇和图形中。这些确定性光梯度的作用是按顺序“控制”或抑制特定位置中的各个粒子足够长的时间以产生光蠕动效应，而不必形成光陷阱。换句话说，重复地循环通过第一图形，第二图形和第三图形的确定性光梯度，可以使各个粒子沿指定的路径运动。确定性光梯度的意思是，所加的条件足以获得理想的结果，而不仅仅是获得成功的概率。

虽然我们已展示和描述本发明的优选实施例，本领域专业人员应当明白，在不偏离以下权利要求书给出更宽的本发明范围，可以进行各种变化和改进。

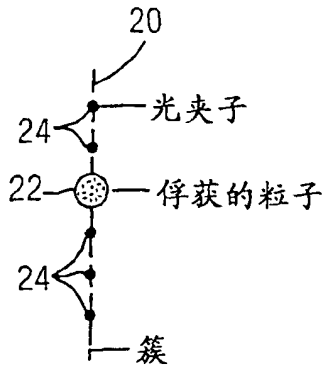


图1

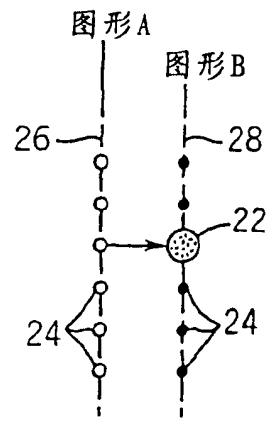


图2

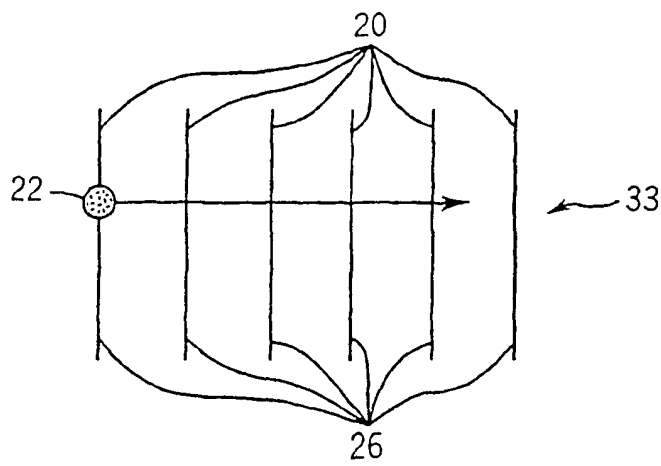
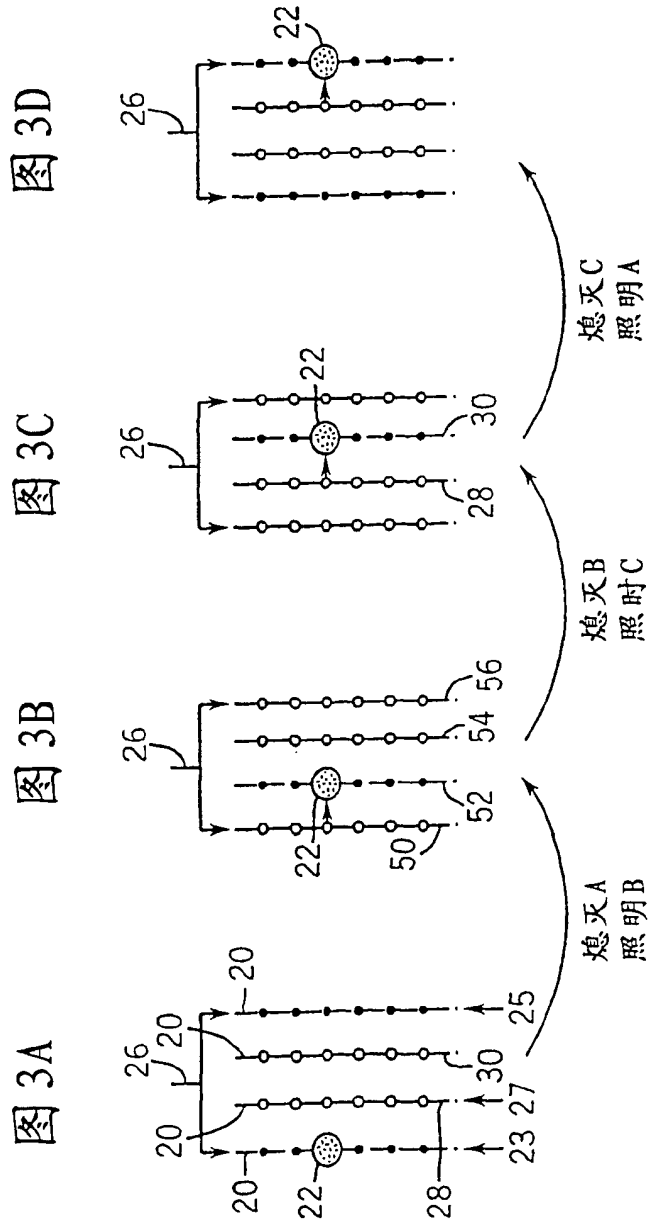


图4



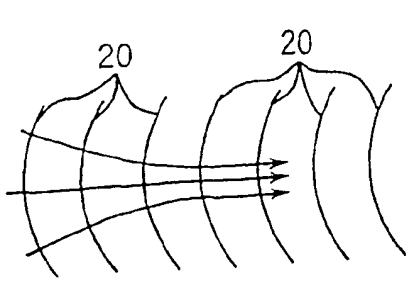


图 5A

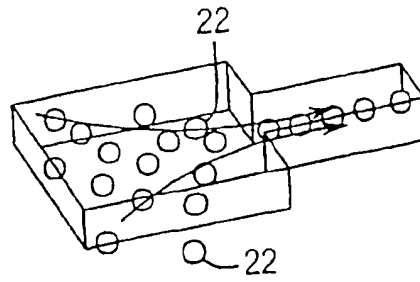


图 5B

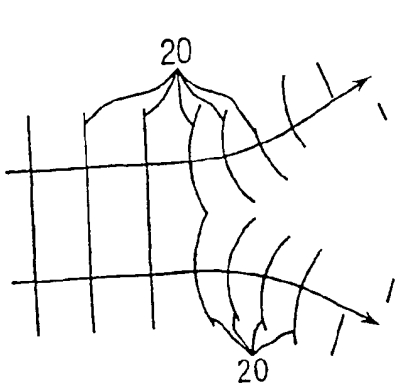


图 6A

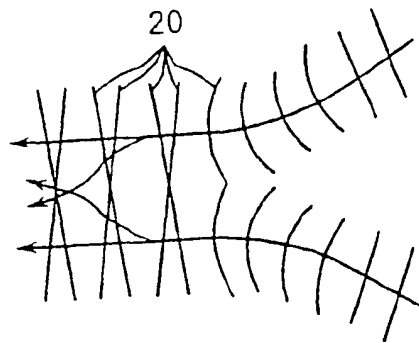


图 6B

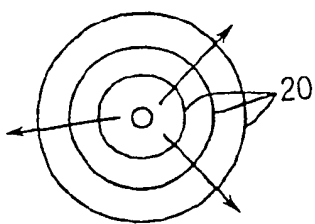


图 7A

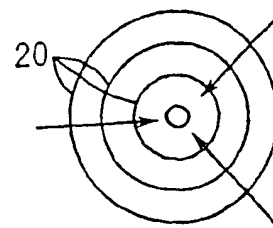


图 7B

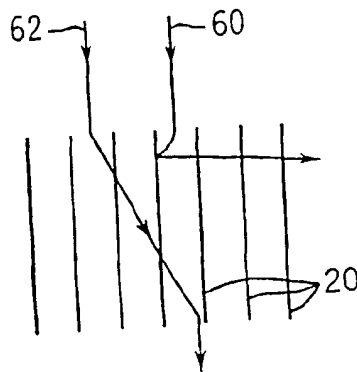
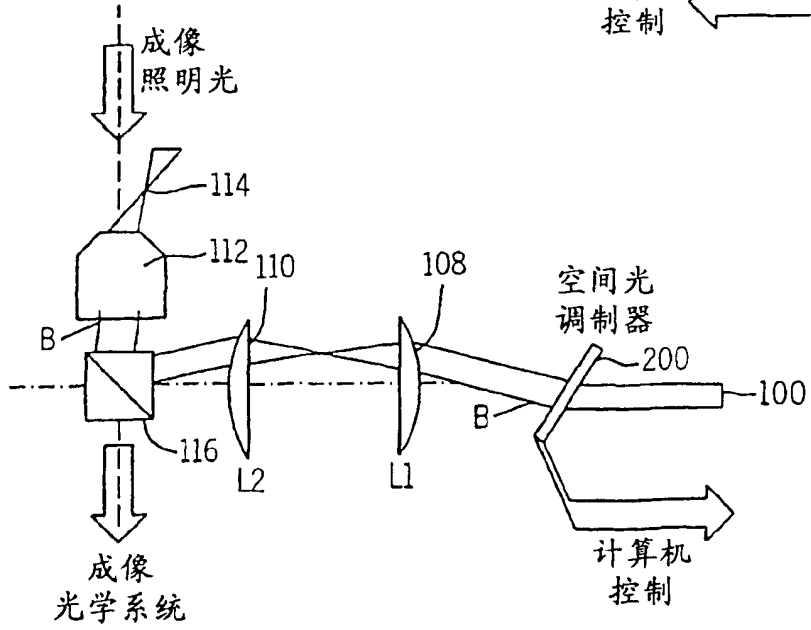
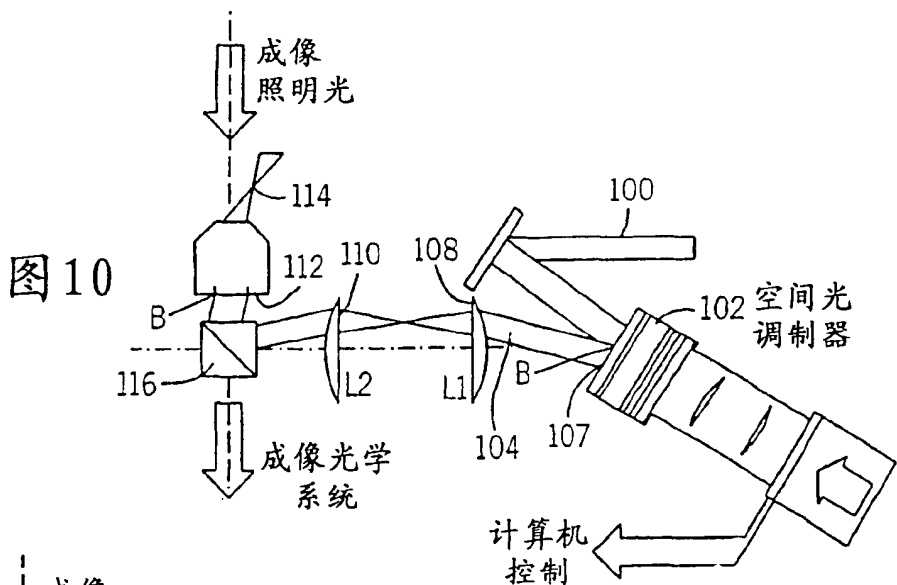
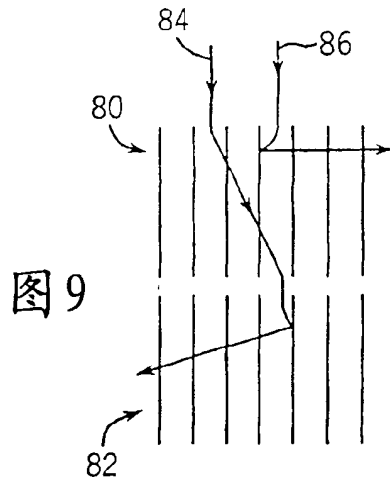


图 8



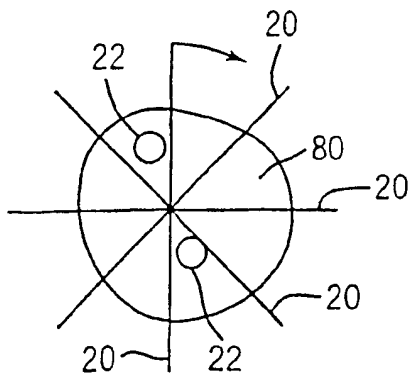
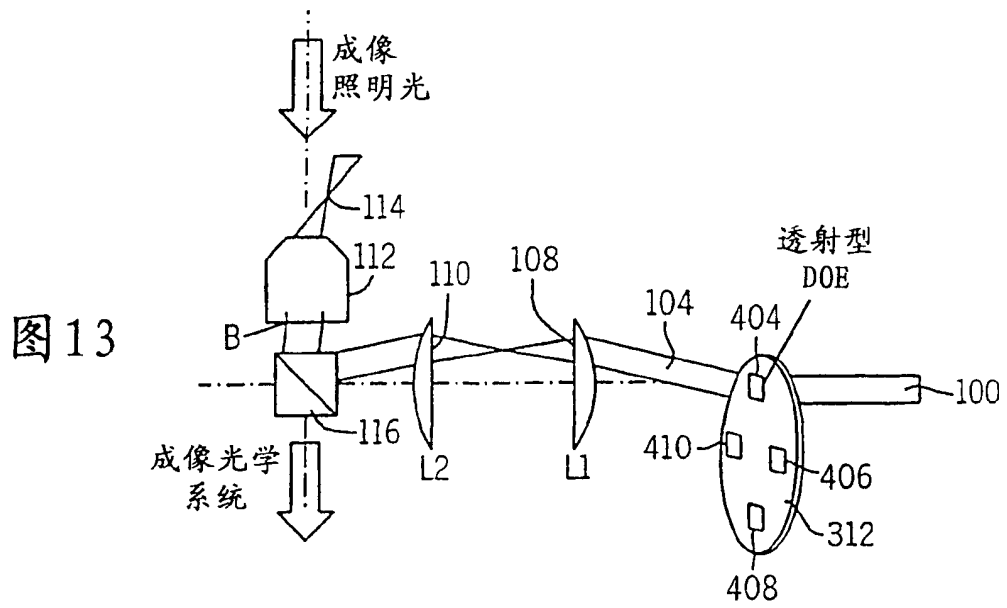
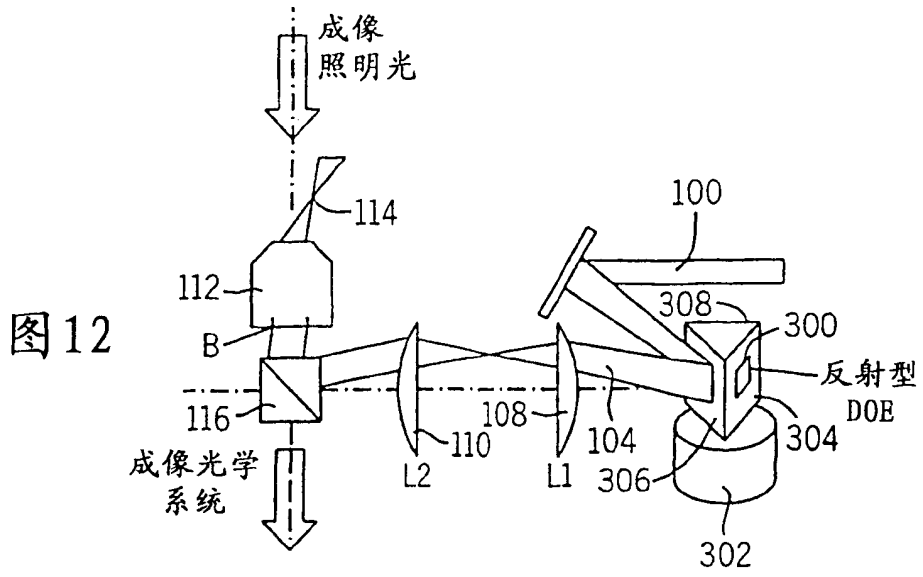


图 14

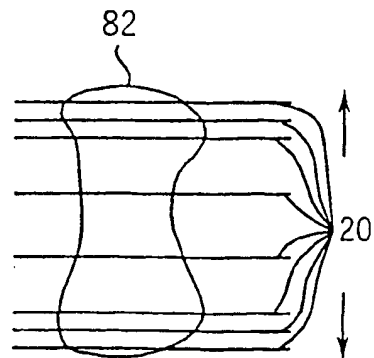


图 15