



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113436777 B

(45) 授权公告日 2022. 01. 14

(21) 申请号 202110993558.4

(22) 申请日 2021.08.27

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113436777 A

(43) 申请公布日 2021.09.24

(73) 专利权人 之江实验室  
地址 311121 浙江省杭州市余杭区文一西路1818号中国人工智能小镇10号楼  
专利权人 浙江大学

(72) 发明人 李翠红 马园园 高晓文 刘铭  
傅振海 胡慧珠

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务有限公司  
33200  
代理人 林松海

(51) Int. Cl.

G21K 1/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106653136 A, 2017.05.10

CN 105759074 A, 2016.07.13

CN 112485163 A, 2021.03.12

CN 105759074 A, 2016.07.13

CN 101788571 A, 2010.07.28

US 2010282984 A1, 2010.11.11

US 2020116623 A1, 2020.04.16

韩翔, 陈鑫麟, 熊威 等. 真空光镊系统及其在精密测量中的研究进展.《中国激光》.2021, 第48卷(第4期), 187-206.

审查员 卑晓峰

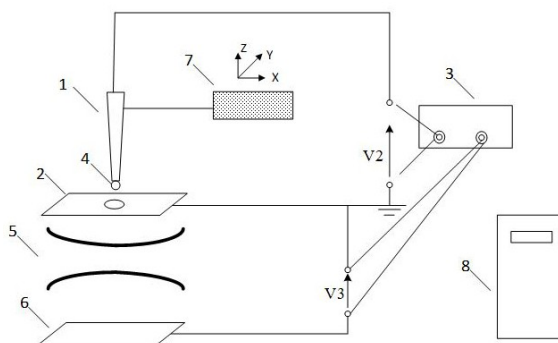
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54) 发明名称

基于探针的双向电泳力光阱起支方法及装置与应用

(57) 摘要

本发明公开了一种基于探针的双向电泳力光阱起支方法及装置与应用。基于双向电泳力利用微尺度的探针使目标微粒脱离基板并捕获目标微粒；将带有目标微粒的探针移动至光阱上方，在目标微粒极性弛豫时间内在探针与光阱上方的电极板间施加反向电场，使目标微粒从探针上脱附；打开光阱，在光阱两侧的电极板间施加电场，调节目标微粒速度至光阱可捕获的速度并且位移至光阱的有效捕获范围内，使目标微粒被光阱捕获。光阱起支装置，包括探针、探针基板、电源、光阱、下极板、位移调节器以及控制系统。本发明通过静电微操控技术实现在空气或真空中的固态粒子精准起支，通过制备阵列化的探针系统，可以应用于集成化的高灵敏光阱传感系统。



1. 一种基于探针的双向电泳力光阱起支方法,其特征在于,在真空或空气环境下,基于双向电泳力利用微尺度的探针使目标微粒脱离基板并捕获目标微粒;然后将带有目标微粒的探针移动至光阱上方,在目标微粒极性弛豫时间内在探针与光阱上方的电极板间施加反向电场,形成反向双向电泳力,使目标微粒从探针上脱附;打开光阱,在光阱两侧的电极板间施加电场,调节目标微粒速度至光阱可捕获的速度并且位移至光阱的有效捕获范围内,使目标微粒被光阱捕获,之后关闭所有电场。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述的探针是阵列式的探针结构,从而实现多次粒子释放与光阱捕获。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述的探针位置可移动。

4. 一种采用根据权利要求1所述的方法的光阱起支装置,其特征在于,包括探针、探针基板、电源、光阱、下极板、位移调节器以及控制系统,探针基板的表面放置一个或多个目标微粒,探针基板设有一个中孔,电源用于控制探针与探针基板以及探针基板与下极板之间的电压,位移调节器用于调控探针与探针基板的相对位置;目标微粒被释放后经探针基板的中孔下落,被电极基板与下极板之间的电场调控速度,进入光阱的有效捕获区域后被光阱捕获,控制系统用于控制位移调节器,以及通过时序控制电源电压V1、V2、V3以及光阱的开启时间。

5. 根据权利要求4所述的装置,其特征在于,所述的探针安装在位移调节器上。

6. 根据权利要求4所述的装置,其特征在于,所述的探针的表面镀有一层绝缘层,避免探针系统短路。

7. 一种根据权利要求4所述的装置的应用方法,其特征在于,

目标微粒选用直径为 $5\mu\text{m}$ 的二氧化硅微球,真空度范围为 $10^{-2}$ - $10^{-6}$  mbar,电压V1设置为0-5V,电压V2设置为-400V- -1000V,电压V1与电压V2的切换时间小于0.1ms,电压V2的脉冲宽度为1-10ms,电压V3设置为0-10V;光阱由1064nm波长激光器出射的聚焦光束形成;

1) 在 $t_0=0$ 时刻,打开电压V1,在探针与样品基板间施加电压V1,使探针捕获目标微粒;

2) 将探针移动到光阱的正上方,调节位移调节器,使待释放目标微粒位于光阱正上方;

3) 打开光阱,在探针基板与光阱下方电极板间施加电压V3;

4) 在时间 $t_1$ 内,将探针与探针基板间的电压快速由V1切换至V2,并持续时间 $t_2$ ,微粒从探针脱附,在探针基板与光阱下方电极板间电压V3作用下,目标微粒减速运动;

5) 目标微粒再经过时间 $t_3$ 后进入光阱的有效捕获区域,光阱捕获微粒,关闭电源。

## 基于探针的双向电泳力光阱起支方法及装置与应用

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于探针的双向电泳力光阱起支方法及装置与应用。

### 背景技术

[0002] 在惯性传感仪器中,敏感单元的初始悬浮称为起支,例如在静电悬浮加速度计中,对作为定子的质量块进行悬浮控制之后才能进行惯性测量。起支技术是悬浮式传感仪器的一项实用化关键技术。

[0003] 空气或真空环境下微粒的快速起抛和捕获一直是光阱领域的一个技术难点。现有的方案有三种,分别是振动脱附法、喷雾悬浮法和激光声释法。振动脱附法通过压电陶瓷高频振动使干粉状的微粒脱离基板表面;喷雾悬浮法将微粒的悬浮液雾化,使包裹着微粒的小液滴飘散到自由空间中;激光声释法利用利用高能脉冲激光作用到样品基板,产生高能声波使粒子与基板脱附进入自由空间。这三种方案具有不同的适用场景:由于微粒受到的粘附力与其直径的平方成反比,微粒尺寸越小,振动脱附法对压电装置的驱动能力要求越高,该方案仅适用于微米尺寸的微粒;对于尺寸更小的纳米粒子,喷雾悬浮法多采用挥发性较强的溶液(如丙醇),这样液滴里的溶液成分可以被快速挥发而不影响微粒的捕获;激光声释法可以上述两种粒子的可以在真空或空气中实现通过控制单个脉冲能量的大小实现不同尺寸微粒的释放。

[0004] 起支技术在实施过程中,微粒离开载体表面后有一定的初速度,需要额外的耗散机制才能实现稳定捕获;由于光阱力中形成势阱的梯度力为保守力,如果不利用外界阻尼力降低微粒的起支速度,微粒无法被光阱稳定捕获。现有的起支方案均利用了空气阻尼降低微粒的起支速度,因此只能在常压下实施,且在微粒被捕获后将实验气压抽至真空。此外,在抽真空过程,如果不施加辅助的冷却手段,微粒将因气流、振动、吸热等因素从光阱中逃逸。

[0005] 现有的光阱起支方案大多无法在高真空环境下直接实现微粒的稳定捕获,无法兼容真空光阱系统,此外,常压下捕获后再抽真空的操作过程也增加了真空光阱实验的时长,增大了操作的复杂性。CN112466506A中利用光阱与paul阱结合局域激光脉冲释放的粒子可以实现真空下微粒精准起支,但是该技术装置复杂度高,难以解决光阱集成应用问题。

### 发明内容

[0006] 为了克服现有技术的不足,本发明的目的是提供一种基于探针的双向电泳力光阱起支方法及装置与应用。

[0007] 一种基于探针的双向电泳力光阱起支方法,在真空或空气环境下,基于双向电泳力利用微尺度的探针使目标微粒脱离基板并捕获目标微粒;然后将带有目标微粒的探针移动至光阱上方,在目标微粒极性弛豫时间内在探针与光阱上方的电极板间施加反向电场,形成反向双向电泳力,使目标微粒从探针上脱附;打开光阱,在光阱两侧的电极板间施加电场,调节目标微粒速度至光阱可捕获的速度并且位移至光阱的有效捕获范围内,使目标

微粒被光阱捕获,之后关闭所有电场。

[0008] 所述的探针是阵列式的探针结构,从而实现多次粒子释放与光阱捕获。

[0009] 所述的探针位置可移动。

[0010] 一种采用所述的方法的光阱起支装置,包括探针、探针基板、电源、光阱、下极板、位移调节器以及控制系统,探针基板的表面放置一个或多个目标微粒,探针基板设有一个中孔,电源用于控制探针与探针基板以及探针基板与下极板之间的电压,位移调节器用于调控探针与探针基板的相对位置;目标微粒被释放后经探针基板的中孔下落,被电极基板与下极板之间的电场调控速度,进入光阱的有效捕获区域后被光阱捕获,控制系统用于控制位移调节器,以及通过时序控制电源电压V1、V2、V3以及光阱的开启时间。

[0011] 所述的探针安装在位移调节器上。

[0012] 所述的探针的表面镀有一层绝缘层,避免探针系统短路。

[0013] 一种所述的装置的应用方法,目标微粒选用直径为5 $\mu\text{m}$ 的二氧化硅微球,真空度范围为 $10^{-2}$ - $10^{-6}$ mbar,电压V1设置为0-5V,电压V2设置为-400V- -1000V,电压V1与电压V2的切换时间小于0.1ms,电压V2的脉冲宽度为1-10ms,电压V3设置为0-10V;光阱由1064nm波长激光器出射的聚焦光束形成;

[0014] 1)在 $t_0=0$ 时刻,打开电压V1,在探针与样品基板间施加电压V1,使探针捕获目标微粒;

[0015] 2)将探针移动到光阱的正上方,调节位移调节器,使待释放目标微粒位于光阱正上方;

[0016] 3)打开光阱,在探针基板与光阱下方电极板间施加电压V3;

[0017] 4)在时间 $t_1$ 内,将探针与探针基板间的电压快速由V1切换至V2,并持续时间 $t_2$ ,微粒从探针脱附,在探针基板与光阱下方电极板间电压V3作用下,目标微粒减速运动;

[0018] 5)目标微粒再经过时间 $t_3$ 后进入光阱的有效捕获区域,光阱捕获微粒,关闭电源。

[0019] 本发明的有益效果:

[0020] 本发明提出了一种可以在真空或空气中实现光阱起支微粒的方案,解决一般起支方法带来的精准起支困难的问题。通过阵列化的探针系统微加工,本方案可以用于集成光阱系统的研制,实现重复的腔内起支。

[0021] 本装置也可以应用与其他悬浮系统的起支,如电阱、磁阱以及光、电、磁的复合阱中。

## 附图说明

[0022] 图1为本发明装置的探针系统的一种结构示意图。

[0023] 图2为本发明装置的一种结构示意图。

[0024] 图3为本发明装置的阵列化探针系统结构示意图。

[0025] 图4为本发明基于探针的双向电泳力光阱起支方法的一种控制时序图。

[0026] 图中,探针1、探针基板2、电源3、微粒4、光阱5、下极板6、位移调节器7、控制系统8。

## 具体实施方式

[0027] 首先阐述本发明的方法和设计原理。

[0028] 在真空环境下,当带电探针靠近探针基板上的目标微粒时,目标微粒在双向电泳力的作用下会被探针吸附而脱离基板;将探针系统转移至光阱的正上方,探针基板的中孔对准光阱中心,调控探针位置对准光阱中心;在目标微粒极性弛豫时间内快速切换探针与探针基板间的电场,目标微粒会受到反向电泳力作用被探针释放;在电场力的引导下,目标微粒通过探针基板中孔向下掉落,在探针基板与光阱下方的基板间施加电场,调节目标微粒的下落速度,从而使目标微粒进入光阱有效捕获区域并被光阱捕获。

[0029] 在真空环境下,空气阻尼太小,脱离探针后的目标微粒具有一定的初速度,很容易脱离光阱的有效捕获区域,因此利用电场调控微粒速度,使目标微粒能够不冲出光阱有效捕获区域而被捕获。

[0030] 另外,显然对于本领域技术人员来说,本发明也可以适用非真空环境。

[0031] 以下结合附图和实施例对本发明做进一步的阐述。

[0032] 装置实施例

[0033] 如图1、图2所示,光阱起支装置包括探针1、探针基板2、电源3、微粒4、光阱5、下极板6、位移调节器7以及控制系统8。探针基板2表面放置一个或多个目标微粒4。电源3控制探针1与探针基板2之间的电压,实现微粒的捕获与释放,位移调节器7精密调控探针1与探针基板的相对位置;探针1上的微粒4被释放后经探针基板2的中孔下落进入光阱区域,被电极基板2与下极板6之间的电场调控速度进入光阱5的有效捕获区域被其捕获。控制系统8可以控制位移调节器7,也可以通过时序控制电源信号V1、V2、V3以及光阱5的开启时间。

[0034] 应用实施例

[0035] 本应用实施例的真空度范围为 $10^{-2}$ - $10^{-6}$ mbar。

[0036] 目标微粒选用直径为5 $\mu$ m的二氧化硅微球。基板材料可选用导电硅片,探针选择加工的钨材料。

[0037] 电压V1设置为0-5V,电压V2设置为-400V- -1000V,电压V1与电压V2的切换时间小于0.1ms,电压V2的脉冲宽度为1-10ms,电压V3设置为0-10V;所有电压的产生可以由一个电源控制。光阱由1064nm波长激光器出射的聚焦光束形成,其有效捕获区域的尺寸在微米量级。所有位移调节器、电压信号可以统一由一个控制装置精密调控。

[0038] 如图4所示,操作步骤如下:

[0039] 1) 在 $t=0$ 时刻,打开电源3,在探针与样品基板间施加电压V1,使探针捕获目标微粒;

[0040] 2) 将探针系统移动到光阱的正上方,调节探针位移调节器,使待释放目标颗粒位于光阱正上方;

[0041] 3) 打开光阱,在探针基板与光阱下方电极板间施加电压V3;

[0042] 4) 在时间 $t_1$ 内,将探针与探针基板间的电压快速由V1切换至V2,并持续时间 $t_2$ ,目标微粒从探针脱离,在探针基板与光阱下方电极板间电压V3作用下,目标微粒减速其运动;

[0043] 5) 目标微粒再经过时间 $t_3$ 后进入光阱的有效捕获区域,光阱捕获目标微粒,关闭电源。

[0044] 上述实施例仅表达了本发明的一种实施方式,其描述较为具体和详细,但并不能因此而理解为对本发明的限制。应当指出的是,对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本发明的保护范围。

[0045] 比如:1)根据捕获光路的不同,形成的光阱可以是单光束光阱,也可以是双光束光阱。

[0046] 2)目标微粒是已知尺寸、密度和散射特性的光学均匀介质微粒,尺寸为纳米到微米量级。

[0047] 3)光阱和离子阱所在环境可以为空气或真空;即本发明方法和装置也可用于常压下的微粒光悬浮。

[0048] 4)离子阱不限定为案例中提及的保罗阱,也可以是其他类型的离子阱;其结构也不限定为线性离子阱结构,也可以是其他类型的结构。

[0049] 5)本发明中探针上的微粒捕获操作需要显微系统辅助,对于集成系统,可以先在显微条件下通过阵列化的探针制备阵列化的微球捕获探针系统,如图3所示,再将探针集成到光阱系统中,通过每一次选择探针投选择起支微粒实现重复的集成光阱系统腔内起支。

[0050] 所述的各技术特征可以进行组合,为使描述简洁,未对各个技术特征所有可能的组合都进行描述,然而,只要这些技术特征的组合不存在矛盾,都应当认为是本说明书记载的范围。本发明的保护范围应以所附权利要求为准。

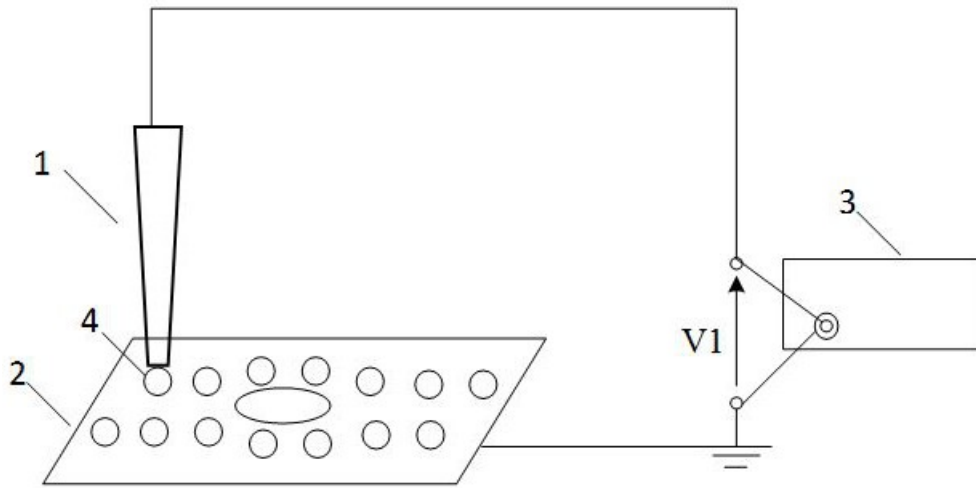


图1

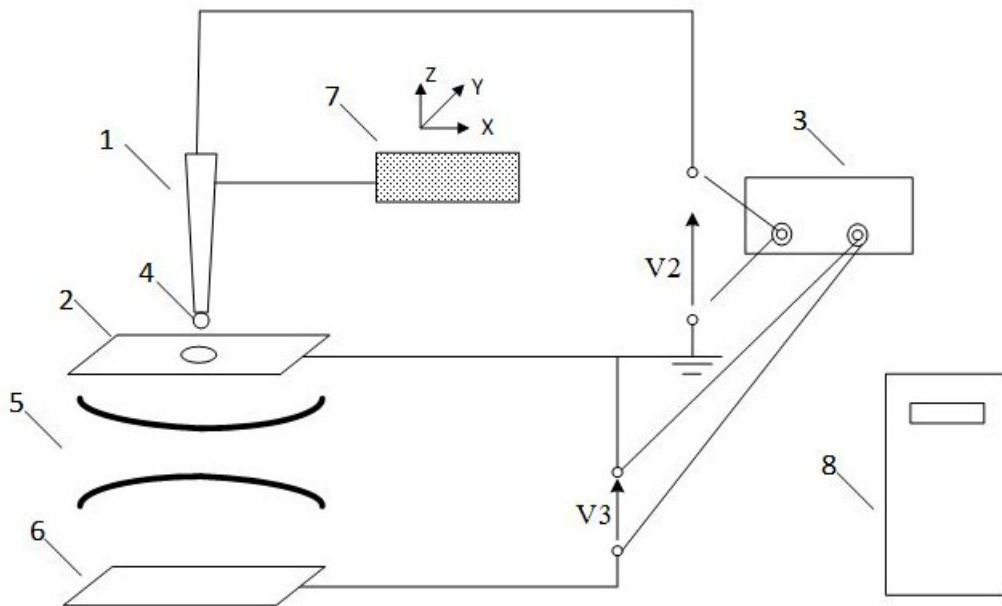


图2

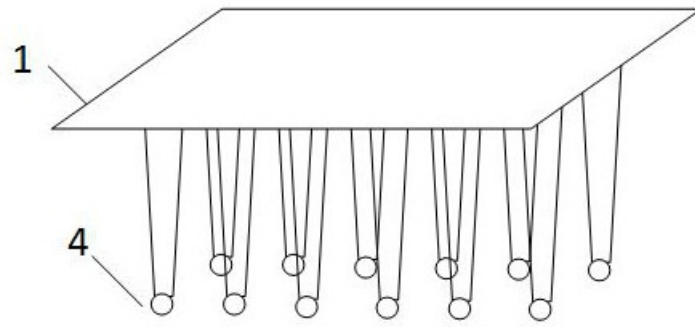


图3

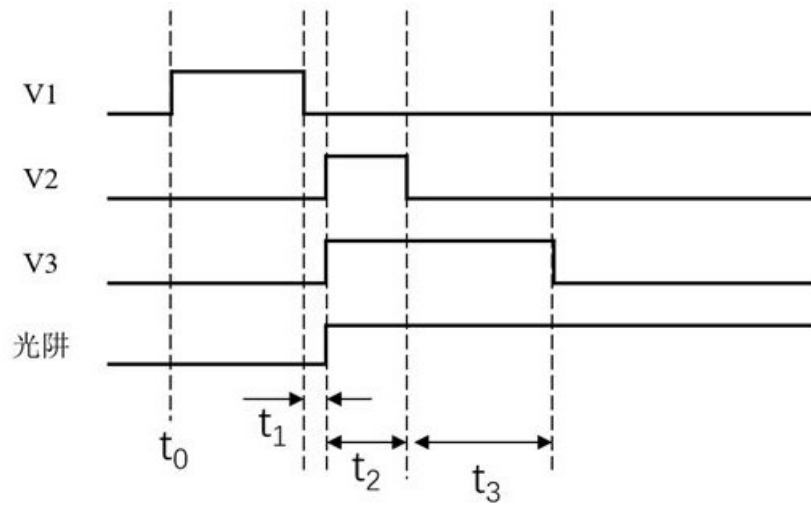


图4