

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 9 月 1 日 (01.09.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/178902 A1

(51) 国际专利分类号:
G01Q 30/20 (2010.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/078355

(22) 国际申请日: 2021 年 2 月 28 日 (28.02.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(72) 发明人: 田鹤(TIAN, He); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 孙土来(SUN, Tulai); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 任天星(REN, Tianxing); 中国浙江省杭州市西湖区

余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 张婉如(ZHANG, Wanru); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 陈鑫铠(CHEN, Xinkai); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 张泽(ZHANG, Ze); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 北京威禾知识产权代理有限公司(BEIJING WEIHE IP AGENCY COMPANY LIMITED); 中国北京市朝阳区北辰东路八号汇宾大厦 A 座 12 层 1205 室, Beijing 100101 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,

(54) Title: METHOD AND APPARATUS FOR MANIPULATING TINY OBJECT

(54) 发明名称: 一种操控微小物体的方法和装置

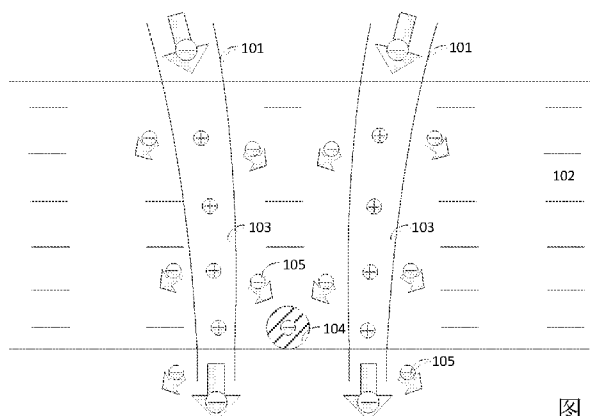


图 1

(57) Abstract: The present invention relates to a method for manipulating a tiny object, the method comprising: providing one or more charged particle beams; forming one or more non-uniform charge distributions in a fluid medium, wherein the one or more non-uniform charge distributions apply one or more gradient forces to one or more portions of a tiny object; and controlling one or more of the one or more gradient forces to change the motion state of the tiny object. The present invention extends manipulation to the nanometer dimension, and can be applied to various microscopic tiny objects such as conductors, non-conductors, and living or non-living biological cells or organelles, and therefore surely promotes great progress in the fields of physics, chemistry, biology and medicine.

(57) 摘要: 本发明涉及一种操控微小物体的方法, 包括: 提供一个或多个荷电粒子束; 在流体介质中形成一个或多个非均匀的电荷分布, 其中所述一个或多个非均匀的电荷分布向微小物体的一个或多个部分施加一个或多个梯度力; 以及控制所述一个或多个梯度力中一者或多者改变所述微小物体的运动状态。本发明的不但将操控扩展到纳米尺度, 能够应用于导体、非导体、活体或非活体的生物细胞或细胞器等各种微观世界的微小物体, 必将推动物理学、化学、生物学、医学领域取得巨大进步。

GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

一种操控微小物体的方法和装置

技术领域

本发明涉及物理领域，特别地涉及一种操控微小物体的方法和装置电子镊子。

背景技术

对于微观物体的操控一直以来是人类的梦想。无数的科幻书籍和电影为人们勾画出了很多想象的完美画面，例如通过微机械制造便携式设备，利用纳米机器人治疗疾病等。这样的场景也正一步一步地变为现实。1970 年，阿希金（Ashikin）观测到利用光学力能够捕获微米级颗粒。在此之后，光镊被发明出来并发展成为许多研究领域的强大的工具。“光镊”也因此获得 2018 年诺贝尔物理学奖。其他方法也被开发出来用于微观物体的操控。例如，原子力显微镜（AFM）可以操控单个原子。利用声表面波的声镊可以捕获大于几百纳米的颗粒。

纳米材料的量子效应和表面/界面效应引发了物理学、化学、生物学等领域的一系列革命。然而，纳米尺度物体的精准操控却缺少有效的方法。人们一直期待新的操控技术能够解决这一问题。

发明内容

针对现有技术中存在的技术问题，本发明提出了一种操控微小物体的方法，包括：提供一个或多个荷电粒子束；在流体介质中形成一个或多个非均匀的电荷分布，其中所述一个或多个非均匀的电荷分布向微小物体的一个或多个部分施加一个或多个梯度力；以及控制所述一个或多个梯度力中一者或多者改变所述微小物体的运动状态。

如上所述的方法，其中所述梯度力为库仑力。

如上所述的方法，其中所述一个或多个荷电粒子束使得所述微小物体的所述一个或多个部分带电。

如上所述的方法，其中所述一个或多个非均匀的电荷分布是一个或多个荷电粒子束的探针穿过和/或扫描所述流体介质中的一个或多个区域形成的。

如上所述的方法，其中至少一个所述荷电粒子束的探针或探针扫描的区域间隔并靠近所述微小物体。

如上所述的方法，其中至少一个所述探针或探针扫描区域与所述微小物体表面具有对应的形状。

如上所述的方法，其中在竖直方向上至少一个所述探针或探针扫描区域包括束颈区域，其经配置以将在竖直方向上对所述微小物体的整体或一部分施加梯度力。

如上所述的方法，其中所述一个或多个梯度力捕获所述微小物体。

如上所述的方法，进一步包括：通过改变至少一个所述荷电粒子束的剂量率改变其梯度力。

如上所述的方法，进一步包括：通过改变至少一个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的形状改变所述梯度力。

如上所述的方法，进一步包括：通过改变所述荷电粒子束探针或探针扫描区域相对所述微小物体的位置改变所述梯度力。

如上所述的方法，进一步包括：通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的水平位置水平移动所述微小物体。

如上所述的方法，进一步包括：通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的竖直位置调整所述微小物体的高度。

如上所述的方法，进一步包括：通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域之间的相对位置转动所述微小物体。

根据本发明的另一个方面，提供一种操控微小物体的装置，包括：一个或多个荷电粒子枪，其经配置以提供一个或多个荷电粒子束；一个或多个调节装置，其经配置以调节所述一个或多个荷电粒子束；以及流体介质腔室，其经配置以容纳流体介质和微小物体，其中，经调节的一个或多个荷电粒子束在流体介质中形成一个或多个非均匀的电荷分布，从而向所述微小物体的一个或多个部分施加一个或多个梯度力；其中，所述一个或多个调节装置经配置以通过调节所述一个或多个荷电粒子束控制一个或多个梯度力中一者或多者改变所述微小物体的运动状态。

如上所述的装置，其中所述荷电粒子枪包括电子枪。

如上所述的装置，其中所述流体介质腔室包括液体胞室（liquid cell）。

如上所述的装置，其中所述调节装置包括电磁透镜。

如上所述的装置，其中所述调节装置包括光阑。

如上所述的装置，其中所述调节装置包括涡旋束装置，其经配置以产生携带轨道角动量的荷电粒子束。

如上所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过改变至少一个所述荷电粒子束的剂量率改变其梯度力。

如上所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过改变至少一个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的形状改变所述梯度力。

如上所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过改变所述荷电粒子束探针或探针扫描区域相对所述微小物体的位置改变所述梯度力。

如上所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的水平位置水平移动所述微小物体。

如上所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的竖直位置调整所述微小物体的高度。

如上所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过调整一个或多个所述荷

电粒子束探针或探针扫描区域之间的相对位置转动所述微小物体。

本发明的不但将操控扩展到纳米尺度，能够应用于导体、非导体、活体或非活体的生物细胞或细胞器等各种微观世界的微小物体，必将推动物理学、化学、生物学、医学领域取得巨大进步。

5

附图说明

下面，将结合附图对本发明的优选实施方式进行进一步详细的说明，其中：

图 1 和图 2 是根据本发明一个实施例的电子镊子工作原理的示意图；

图 3 和图 4 是根据本发明另一个实施例的电子镊子工作原理的示意图；

10 图 5A-图 5C 是根据本发明一个实施例利用涡旋电子束实施金属钯（Pd）颗粒操控的实施例；

图 6A-图 6C 示出了图 5A-图 5C 实施例中 Pd 粒子位于不同中心偏离位置处的电势分布的理论计算结果，图 6D 示出了 EVB 电子涡流的密度分布以及电势分布，图 6E 示出了水平方向上库仑力的变化情况；

15 图 7A-图 7D 示出了根据本发明的实施例不同形状的电子束探针或探针扫描区域；

图 8A 和图 8B 是根据本发明一个实施例移动微小物体高度的示意图；

图 9 是根据本发明的实施例不同因素对库仑力的影响；

图 10A 是根据本发明一个实施例改变微小物体角度的示意图；

20 图 10B 是根据本发明另一个实施例改变微小物体角度的示意图；

图 10C 是根据本发明一个实施例旋转微小物体角度的示意图；

图 11 是根据本发明一个实施例的纳米粒子操控和装配实例；

图 12 是图 11 所示实施例中字母“J”的纳米粒子操控和装配过程的照片；

图 13 是根据本发明一个实施例的操控微小物体装置的结构示意图；

25 图 14 是根据本发明另一个实施例的操控微小物体的示意图；

图 15 是根据本发明另一个实施例的操控微小物体的示意图；

图 16 是根据本发明一个实施例的操控微小物体的装置的示意图；

图 17A-图 17C 示出了根据本发明实施例的制造微装置的示意图；

图 18 示出根据本发明一个实施例的制造微装置方法的流程图；

5 图 19 示出根据本发明一个实施例的制造微装置的装置结构示意图；以及
图 20A-图 20C 是根据本发明一个实施例的微装置制造过程示意图。

具体实施方式

为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明
10 实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，
所描述的实施例是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的
实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他
实施例，都属于本发明保护的范围。

在以下的详细描述中，可以参看作为本申请一部分用来说明本申请的特定
15 实施例的各个说明书附图。在附图中，相似的附图标记在不同图式中描述大体
上类似的组件。本申请的各个特定实施例在以下进行了足够详细的描述，使得
具备本领域相关知识和技术的普通技术人员能够实施本申请的技术方案。应当
理解，还可以利用其它实施例或者对本申请的实施例进行结构、逻辑或者电性
的改变。

20 本发明提出了一种利用荷电粒子束，例如电子束，实现高精度操控微观物
体的解决方案，不仅能够实现纳米尺度三维加旋转的 4D 高精度操控，而且也
能够实现更高尺度（例如微米尺度或以上）的高精度操控，将成为一种物理学、
化学、生物学等领域的基础工具，从而带来整个科技领域的革命性进步。

如本文中所定义的，“荷电粒子”包括电子、质子以及其他带电粒子，如
25 α 粒子、 Ga^+ 或 Xe^+ 等。虽然在以下的描述中多数情况下以电子作为荷电粒子

的实例进行描述，如所理解的，经加速的质子形成的质子束也可能应用于本发明，并且理论上能够获得更高的分辨率。当然，随着荷电粒子质量的增加，加速这些粒子也需要更高的能量。因此，本发明的荷电粒子将不限于电子，其他的荷电粒子，例如质子、 α 粒子 (He^+)、 Ga^+ 或 Xe^+ 等也能够应用于本发明之中。

如本文中所定义的，“荷电粒子束”所指为荷电粒子经加速而形成的束流。荷电粒子束中单个荷电粒子的能量能够表征荷电粒子经加速的程度。荷电粒子束的剂量率 (dose rate) 表征单位时间内通过单位面积的电荷数量，能够反映荷电粒子束中荷电粒子的密度。

如本文中所定义的，“电子束”所指为电子经加速后形成的束流，其已经被广泛应用于透射电镜与扫描电镜、电子束光刻、电子束曝光、电子束焊接等诸多领域。

如本文中所定义的，“探针”所指为荷电粒子束接近目标区域的部分。在一些实施例中，通过例如电磁透镜、光阑等调节装置能够调整荷电粒子束的聚焦位置以及波束构型，从而控制探针的形状。在一些实施例中，通过例如扫描线圈等调节装置能够控制荷电粒子束的扫描区域，即探针的扫描区域。

如本文中所定义的，“微小物体”所指为三个维度的尺寸在亚埃、1/10 纳米、1/4 纳米、1/2 纳米或 1 纳米尺度、数纳米尺度、数十纳米尺度、数百纳米尺度、微米尺度或微米尺度以上的物体；或者，两个维度的尺寸在亚埃、1/10 纳米、1/4 纳米、1/2 纳米或 1 纳米尺度、数纳米尺度、数十纳米尺度、数百纳米尺度、微米尺度或微米尺度以上的物体；或者，一个维度的尺寸在亚埃、1/10 纳米、1/4 纳米、1/2 纳米或 1 纳米尺度、数纳米尺度、数十纳米尺度、数百纳米尺度、微米尺度或微米尺度以上的物体。

如本文中所定义的，“流体介质”所指为具有流动性的物质，其包括液体、胶体、气体等。当荷电粒子束经过流体介质时，一部分荷电粒子会与流体介质

发生相互作用。一方面，流体介质的流动性能够减少操控微小物体时的阻力，另一方面，流体介质的密度也使得存在足够数量与荷电粒子发生相互作用的流体介质，以产生操作微小物体时所需的力。在一些实施例中，流体介质可以为水或者其他物质的水溶液。在一些实施例中，流体介质也可以为有机溶剂或者其他物质溶解于有机溶剂中形成的溶液。在某些实施例中，流体介质也可以为悬浊液，乳浊液或者胶体。

如本文中所定义的，“电荷分布”所指为正负电荷在空间中的散布位置。由于荷电粒子束经过流体介质并与流体介质发生相互作用是一个持续的过程，在流体介质中以及被操控微小物体上的电荷分布是电荷动态平衡形成的表现结果。荷电粒子束的构型和在流体介质中的位置能够经设计和高精度控制，从而在指定的区域形成电荷分布。

如本文中所定义的，“梯度力”所指为电荷分布不均匀而对带电微小物体产生的力效应。不同的电荷分布和电性能够产生不同的梯度力。例如，带电微小物体周围区域中荷电粒子束形成的电荷分布能够产生拉力或者推力。环形或大致呈环形形状的电荷分布可以形成梯度力的“力阱”。当带电微小物体位于“力阱”中时，带电微小物体能够被束缚于“力阱”中而被“捕获”。

如本文中所定义的，“操控”所指为改变物体的相对位置、相对角度和两者中的任意一种情况。两个物体分别具有各自的方向。如果两者之间各自方向的相对角度发生改变即可认为相对角度发生改变。换言之，即使相对位置不变，相对角度也可能发生变化。

以下以“电子镊子”的实施例为例，详细说明本发明的技术方案。

图 1 和图 2 是根据本发明一个实施例的电子镊子工作原理的示意图；其中图 1 是平行于流体介质层表面的剖视图，图 2 是垂直于流体介质层表面的俯视图。在本实施例中，微小物体为导体，例如金属。如图所示，受控的电子束 101

从流体介质层（即流体介质）102 中穿过。电子束 101 穿过流体介质层 102 的部分大致为一个环形区域 103。微小物体 104 位于电子束 101 在流体介质层中的环形区域 102 之中。在电子束 101 穿过流体介质层 102 的过程中，部分入射电子与流体介质发生相互作用激发出二次电子 105。大部分入射电子即使发生非弹性碰撞后也未停留在流体介质层 102 中而是仍然继续从流体介质层 102 中穿出。因此，流体介质层 102 中电子束穿过的区域 103 由于损失电子而成为带正电的区域。

另一方面，由于微小物体 104 本身为导体，经激发的二次电子 105 能够进入微小物体 104 之中。二次电子 105 可能在微小物体 104 中进一步发生非弹性散射而产生低能的级联二次电子，而本身的能量也会进一步降低。由于导体逸出功的限制，部分低能的二次电子和级联二次电子并不会脱离微小物体 104。因此，微小物体 104 由于增加电子而带负电。由此，带负电的微小物体 104 被带正电的环形区域 103 包围，并且被束缚于其中。如图 2 所示，微小物体 104 与环形区域 103 之间库伦力的合力 F_c 指向环形区域 103 的中心。如果带负电的微小物体 104 的位置偏离环形区域 103 的中心，库伦力 F_c 将会将微小物体 104 推回到环形区域 103 的中心。在流体介质层 102 中非均匀的电荷分布（即，带正电的环形区域 103）形成了梯度力，即库仑力，从而为微小物体的操纵提供了基础。

这样，当电子束 101 经控制而发生位置改变时，环形区域 103 的中心位置也发生改变，库伦力 F_c 将使得微小物体 104 的位置也随之改变并移动到环形区域 103 新的中心位置。看起来，就好像微小物体 104 被无形的“镊子”夹起，从原来的位置移动到了新位置。

图 3 和图 4 是根据本发明另一个实施例的电子镊子工作原理的示意图；其中图 3 是平行于流体介质层表面的剖视图，图 4 是垂直于流体介质层表面的俯视图。在本实施例中，微小物体为非导体，例如绝缘体。电子束 301 与流体介

质层 302 的相互作用与图 1 和图 2 所示实施例的情况相同，这里不再赘述。经激发的二次电子 305 能够进入微小物体 304 之中产生级联二次电子并且部分级联二次电子将脱离微小物体 304 而使得微小物体 304 带正电。带正电的微小物体 304 被带正电的环形区域 303 包围，并且被束缚于其中。如图 4 所示，微小物体 304 与环形区域 303 之间库伦力的合力 F_c 也同样指向环形区域 303 的中心。这样，当环形区域 103 的中心位置也发生改变时，库伦力 F_c 将使得微小物体 304 的位置也随之改变并移动到环形区域 303 新的中心位置。看起来，就好像微小物体 304 被无形的“镊子”夹起，从原来的位置移动到了新位置。

以上仅仅是为了方便理解非限制性地对本发明可能的原理进行了表述，实际发生的过程可能更为复杂。因此，本发明并不限于上述描述，也不限于上述描述中的物理理论。

在一些实施例中，电子束为平面波或球面波。通过光阑等调节装置能够调整电子束的构型，从而定义电子束探针的形状。当电子束透射穿过流体介质时，在流体介质中形成非均匀的电荷分布。电子束探针的形状即定义了非均匀的电荷分布的区域。

在一些实施例中，电子束为涡旋波，即涡旋电子束 (Electron Vortex Beam, EVB)。涡旋波也被称为具有拓扑电荷的波或具有相位奇点的波。涡旋波首先是在无线电波中发现的，其携带轨道角动量(OAM)，拓扑电荷 m 是非零整数，例如+1 或-1。电子波的波长很短 (皮米量级)，适于创建原子尺度的涡旋波。目前 EVB 的应用在电镜和电子能量损失谱学 (EELS) 等相关技术中已经比较成熟。当 EVB 透射穿过流体介质时，在流体介质中形成环形或大致呈环形的非均匀电荷分布。这样的探针形状能够方便地用于捕获微小物体。现有技术中已有多种产生 EVB 的方法，这些都在本发明的范围之内。

在一些实施例中，利用电子束快速扫描流体介质的一个区域产生非均匀的电荷分布。因为电子束扫描的速度远远高于流体介质中电荷分布的变化速度，

通过扫描流体介质中区域而形成的非均匀的电荷分布与电子束探针透射穿过流体介质中同样区域形成的非均匀的电荷分布并没有本质区别。电子束探针扫描的形状即定义了非均匀的电荷分布的区域。

图 5A-图 5C 是根据本发明一个实施例利用涡旋电子束实施金属钯（Pd）颗粒操控的实施例。在本实施例中，包括多个纳米尺度 Pd 颗粒的水层被封闭在 K-kit 液体胞室（liquid cell）并放入透射电镜（TEM）中。通过电子枪产生大约 200 keV 的高能电子束，再经过全息光阑产生 EVB。利用 EVB 在水层中形成环形的不均匀电荷分布实现纳米尺度 Pd 颗粒的操纵。

图 5A 示出了在水层中 EVB 形成带正电的环形区域的示意图。与图 2 的情况类似，待移动的 Pd 颗粒被包围在 EVB 形成的环形区域之中。图 5B 示出了使用 EVB 移动 Pd 颗粒全过程的电镜照片。被移动的 Pd 颗粒的尺寸大约在 20nm 左右。t=0 s 时刻，待移动的 Pd 颗粒位于右上方，左下方的两个颗粒作为移动的目标位置和参考物。如图所示，从 t=0 s 到 t=25 s 时刻，右上方的 Pd 颗粒从远离左下方两个颗粒的位置移动到靠近左下方两个颗粒的位置。为了方便理解，图 5C 示出了不同时刻 EVB 移动 Pd 颗粒整个过程的示意图。

根据电磁理论，自由电荷的存在会产生极化。所有电荷的分布满足泊松方程：

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{r}) = -\frac{1}{\epsilon_0} (\rho_f + \rho_{p-f} + \rho_p),$$

其中， ρ_f 代表自由电荷的电荷密度； ρ_{p-f} 代表自由电荷附近极化电荷的电荷密度； ρ_p 代表界面上极化电荷的电荷密度； ϵ_0 代表真空中的介电常数。合并前两项，以上方程为：

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{r}) = -\left(\frac{1}{\epsilon} \rho_f + \frac{1}{\epsilon_0} \rho_p\right).$$

其中， ϵ 代表介质的介电常数。

假定待移动 Pd 颗粒为球形，那么自由电荷的电势为：

$$\phi_f(\mathbf{r}) = \int \frac{\rho_f(\mathbf{r}')}{4\pi\epsilon(\mathbf{r}')|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} d\mathbf{r}'.$$

接下来，通过电场来获得界面处的极化电荷：

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla\phi(\mathbf{r}) \approx -\nabla\phi_f(\mathbf{r}).$$

5 其中，E 表示金属表面极化电场。极化电荷的密度可以通过以下方程给出：

$$\rho_p = -\mathbf{e}_n \cdot (\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1);$$

$$\mathbf{P} = (\epsilon - \epsilon_0)\mathbf{E},$$

其中， $\mathbf{e}_n$ 表示界面处由样品指向流体介质的单位法向量， $\mathbf{P}_2$ 表示界面附近样品一侧的极化强度， $\mathbf{P}_1$ 表示界面附近流体介质一侧的极化强度。

根据高斯定理，自由电荷周围区域的极化电荷为：

$$10 \quad Q_{p-f} = -(1 - \epsilon_0/\epsilon) \int \rho_f(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$$

由此，由于极化而产生的极化电势为：

$$\phi_p(\mathbf{r}) = -Q_{p-f} \int \frac{\rho_p(\mathbf{r}')}{4\pi\epsilon_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| \int \rho_p(\mathbf{r}'') d\mathbf{r}''} d\mathbf{r}'$$

其中， ρ 代表极化电荷在界面出的分布。最终，能够得出所有电荷的分布满足如下公式：

$$15 \quad \phi(\mathbf{r}) = \phi_f(\mathbf{r}) + \phi_p(\mathbf{r}) = \int \frac{\rho_f(\mathbf{r}')}{4\pi\epsilon(\mathbf{r}')|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} d\mathbf{r} - Q_{p-f} \int \frac{\rho_p(\mathbf{r}')}{4\pi\epsilon_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| \int \rho_p(\mathbf{r}'') d\mathbf{r}''} d\mathbf{r}'.$$

图 6A-图 6C 示出了 Pd 粒子位于不同中心偏离位置处的电势分布的理论计算结果。随着偏置距离的增大，Pd 颗粒的电势发生了显著的变化，这是由于沉积在 Pd 颗粒中的电子减少引起的。其中在图 6A 中偏离中心 10 nm 时，电势分布的不均匀性最高，库仑力处于较高的水平；在图 6B 中偏离中心 20 nm 时，Pd 粒子贴近 EVB 形成的电荷区域，电势分布的不均匀性显著降低，库仑

力大幅下降；在图 6C 中偏离中心 30 nm 时，Pd 粒子进入 EVB 形成的电荷区域，电势分布的不均匀性很低，库仑力处于最低的水平。由于库仑力是操纵微小物体的基础，从图 6A-图 6C 中不难看出，操纵的较佳范围是 EVB 在水中所形成环形区域内。如果超过这一范围，用于操纵微小物体的力将大幅度下降。

5 图 6D 示出了 EVB 电子涡流的密度分布以及电势分布，其中位于上方的是密度分布而位于下方的是电势分布。图 6E 中示出了水平方向上库仑力的情况，其中库仑力在中心偏离大约 10 nm 处达到极值然后逐渐下降。库仑力的方向始终指向中心。图 6D 和图 6E 说明了由于电荷分布的不均匀性所形成的梯度力与电荷分布的关系以及梯度力形成的“力阱”。待移动微小物体被束缚于“力
10 阱”中并能够随着“力阱”的位置移动而改变位置，从而实现微小物体的精确操控。

电子束探针或探针扫描的区域还可以有其他形状。图 7A-图 7D 示出了不同形状的电子束探针或探针扫描区域。如图所示，电子束探针或探针扫描区域可以为环形、弧形等形状。如所理解的，本文中所指的形状都包括大致呈或者
15 不规则的某一形状。

在一些实施例中，电子束探针或探针扫描区域围绕或至少部分围绕所述微小物体。在图 7A 中，电子束探针或探针扫描区域为半环形，在库仑力为吸引力的情况下，仍能够很方便的操控微小物体。在图 7B 中，电子束探针或探针扫描区域为深弧形，微小物体被容纳于弧形半封闭的区域之中。无论库仑力为
20 吸引力还是排斥力，都能够很好的用于操控微小物体。在图 7C 中，电子束探针或探针扫描区域为间断的半环形，这样的形状并不影响操控。在一些实施例中，电子束探针或探针扫描区域可以仅仅是靠近微小物体。这样，同样能够向微小物体施加库仑力。在图 7D 中，电子束探针或探针扫描区域靠近微小物体，从而向微小物体施加库仑力。电子束探针或探针扫描区的形状与微小物体的形
25 状相对应。在图 7E 中，微小物体的体积沿长度方向延伸。电子束探针或探针

扫描区域同样沿长度方向延伸，并从与长度方向垂直的方向上靠近微小物体，以施加足够的库仑力。

在一些实施例中，所述微小物体不超出或进入电子束探针或探针扫描区域的范围。当电子束探针或探针扫描与微小物体重叠时，电荷分布将发生明显改变，用于操控微小物体的梯度力会大幅度减小。因此，通常情况下，微小物体并不接触电子束探针或探针扫描区域。当然，本发明也并不完全排除这种情况。

图 8A 和图 8B 是根据本发明一个实施例移动微小物体高度的示意图。如图所示，在竖直方向上电子束探针或探针扫描区域的形状包括如图中虚线所示的束颈区域（neck region）。如所理解的，在由于电子束交叉（cross-over）形成的束颈区域中，电子束具有更高的剂量率。当束颈区域与微小物体足够接近时，能够在竖直方向上施加梯度力。当然，水平方向上的梯度力也是仍存在的。由此，在本实施例中，在“捕获”微小物体后，能够实现 3 个维度的自由操控。如图 8B 所示，在第一次移动中，微小物体在 X-Y 平面的投影并未发生变化，高度从第一高度升到第二高度；接下来，在第二次移动中，从水平位置和高度都不同的第一位置移动到第二位置，微小物体在 X-Y 平面的投影和高度都发生变化。本领域技术人员理解，还存在其他改变微小物体高度的方式。实际上，以本发明的任何方式“捕获”微小物体后，改变电子束探针或探针扫描区域的聚焦位置的高度都可能改变微小物体的竖直位置。

图 9 是根据本发明的实施例库仑力的不同影响因素；其中，a. 表示不同的 EVB 电子束剂量率（dose rate）对于库仑力的影响，如图所示，随着电子束剂量率的增加，库仑力逐渐上升，与理论计算非常符合。b. 表示非 EVB 的环形电子束的情况下电子束剂量率与库仑力之间的关系。如图所示，非 EVB 的环形电子束对实验结果影响不大。c. 表示探针与颗粒尺寸之比对于库仑力的影响，如图所示，随着探针，即电子束在流体介质中形成的环形区域，的尺寸逐渐增加，库仑力快速增加并在接近 1.5 倍时到达极值，然后逐渐下降并在大约 2 倍

之后减小到非常小的幅度并随后基本保持不变。有趣的是，如果将待移动微小物体假定为正方形而探针的形状为圆形，那么微小物体大约为圆形区域内出现的最大正方形时，库仑力达到极值。由此，可以说明保证待移动物体不进入探针区域的最小探针尺寸对应库仑力的极值。因此，可以通过调整探针的尺寸和形状来调节用于操控微小物体的库仑力。d. 表示对于非金属的二氧化硅 SiO_2 颗粒，电子束剂量率与库仑力之间的关系。如图所示，对于非导体微小物体，本发明的方案同样能够实现精确操控，虽然用于操控的库仑力相比于导体的微小物体稍小。

在一些实施例中，通过改变电子束探针或探针扫描区域的剂量率改变所述梯度力的大小。剂量率越高，库仑力也越大。在一些实施例中，通过改变电子束探针或探针扫描区域相对所述微小物体的位置改变所述梯度力。在电子束探针或探针扫描区域与微小物体间隔的情况下，电子束探针或探针扫描区域越接近，库仑力也越大。在一些实施例中，通过改变所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的形状改变所述梯度力的大小。所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的形状与微小物体的外形匹配度越高，相对的面积越大，库仑力也越大。在一些实施例中，根据操控操作不同，可以灵活地调整电子束探针或探针扫描区域的剂量率、扫描区域的形状和位置，从而获得所需力，实现高精细度的微小物体操控。

在以上的实施例中，已经说明了通过调整电子束探针或探针扫描区域的水平位置和竖直位置调整所述微小物体的水平位置和高度。在一些实施例中，还可以利用电子束转动微小物体。

图 10A 是根据本发明一个实施例改变微小物体角度的示意图。如图所示，在初始位置，半环形的电子束探针或探针扫描区域围绕微小物体，微小物体的尖端指向第一方向。通过调整电子束探针或探针扫描区域，将其从微小物体的第一方向移动至与第一方向垂直的第二方向，微小物体的尖端也从指向第一方

向改变为指向第二方向。

图 10B 是根据本发明另一个实施例改变微小物体角度的示意图。如图所示，在初始位置，电子束探针或探针扫描区域在第一方向上接近微小物体，微小物体的尖端指向第一方向。通过调整电子束探针或探针扫描区域，将其从微小物体的第一方向移动至与第一方向垂直的第二方向，微小物体的尖端也从指向第一方向改变为指向第二方向。

图 10C 是根据本发明一个实施例旋转微小物体角度的示意图。如图所示，EVB 直接作用于微小物体上，EVB 与微小物体之间发生相互作用并转移携带的角动量，从而使得微小物体发生旋转。

图 11 是根据本发明一个实施例的纳米粒子操控和装配实例。如图所示，利用 EVB 捕获多个纳米尺度的金属 Pd 粒子，通过高精度的操控和装配形成了“浙江大学”的英文缩写“ZJU”的图案。图 12 是图 11 所示实施例中字母“J”的一些纳米粒子操控和装配过程的照片。如图 11 和图 12 所示实施例所展示的，本发明的技术方案在纳米领域高精度的操控和组装能力并不是断言的，而是已被实验所证实，将成为本发明未来众多可能应用的基础。

图 13 是根据本发明一个实施例的操控微小物体装置的结构示意图。如图所示，操控微小物体的装置，包括：电子枪 1301，其经配置以提供电子束；流体介质腔室 1302，其经配置以容纳流体介质和微小物体。电子束在流体介质腔室内的流体介质中形成非均匀的电荷分布；以使得将梯度力施加于所述微小物体。如图所示，本实施例的装置还包括一个或多个调节装置 1303-1305，其经配置以调节来自所述电子枪产生的电子束。

在一些实施例中，电子枪 1301 可以为热发射电子枪或者场发射电子枪。如本领域技术人员所理解的，其他的电子枪也可以应用于本发明中以提供电子束。

在一些实施例中，流体介质腔室 1302 可以为封闭的腔室，流体介质和微

小物体容纳于腔室中。例如，流体介质腔室 1302 可以包括液体胞室 (liquid cell)。在一些实施例中，对于挥发度非常小的流体介质，也可以采用非封闭的或者敞口的腔室容纳流体介质和微小物体，例如，流体介质腔室 1302 可以包括桶体，在桶体的底面上承载流体介质层。如本领域技术人员所理解的，其他
5 类型的封闭或非封闭的能够容纳流体介质的腔室也可以应用于本发明中。

在一些实施例中，调节装置包括电磁透镜，例如第一和第二聚光镜 1303 和 1304。通过调节电磁透镜能够调整电子束聚焦位置、束斑大小、电子束强度、单色性等诸多属性。在一些实施例中，调节装置包括光阑，例如在第二聚光镜 1304 处的光阑 1305。通过不同的光阑能够得到不同构型、聚焦位置和轨道角
10 动量的电子束。例如，光阑 1305 可以为计算光阑、环形光阑、弧形光阑中的一者。

如本领域技术人员所理解的，现有技术中有关电子束调节的方法以及调节装置还有其他各种各样的方式。这些电子束的调节方法和调节装置都可以应用于本发明中以获得所需的电子束探针或探针扫描区域。这些都在本发明的范围
15 内，在此不再赘述。

在一些实施例中，调节装置包括涡旋束装置，其经配置以产生携带轨道角动量的涡旋电子束 (EVB)。如前所述，现有技术中已有多种产生 EVB 的方法。以下仅以计算全息光阑举例说明，通过调控电子束的相位，形成螺旋相位结构而获得涡旋电子束。但本发明的方案并不局限于此。

20 根据量子力学波函数的概念，结合德布罗意 de Broglie 物质波的概念与薛定谔方程推导出涡旋电子束的最简洁的物理表达形式：

de Broglie 物质波：

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \quad (h: \text{普朗克常量}; p: \text{动量}. \lambda: \text{波长})$$

薛定谔方程：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \phi = H \phi \quad (H: \text{哈密顿算符})$$

涡旋电子束的表达式:

$$\phi_l(r, \varphi, z) = e^{ik_z z} e^{il\varphi} J_l(k_\perp r)$$

其中: $\hbar$ 是普朗克常量; p 是动量; λ 是波长; r, φ, z 是涡旋电子束的三维坐标; l 是轨道角动量特征值 (即拓扑荷数); J_l 是 l 次圆柱形泊松方程; $k_\perp$ 是涡旋电子束的横向动量。

根据上述理论, 拓扑荷数直接取决于电子的相位。因此, 通过计算光阑来调控电子束的相位, 可获得具有不同拓扑荷数 (即不同轨道角动量) 的涡旋电子束 EVB。

在本发明的一些实施例中, 通过调节装置能够调整所述电子束的探针或探针扫描区域的水平位置、竖直位置、和/或相对于所述微小物体的角度从而水平移动、竖直方向上移动、转动所述微小物体的位置或者实现以上操控的组合。在一些实施例中, 通过调节装置能够调整所述电子束针对所述微小物体的角动量转移, 从而使得所述微小物体旋转。

在微观的力相互作用中, 库仑力是很强的力。而且, 由于与电荷的数量有关, 库仑力的大小具有很宽调整范围, 这为完成微小物体的复杂操控提供了基础。而且, 不仅仅限于纳米尺度, 显然本发明一些实施例中的方案也能够应用于微米或更高尺度微小物体的操控。如果与其他尺度的微观物体操控技术相结合, 那么有机会实现更具实用性和灵活性的微观操作。

通过以上实施例不难看出, 本发明的技术方案不但实现了 4D 的微小物体的高精度操控, 而且是一种非接触式的操控, 不容易对被操控的微小物体造成损伤。进一步地, 本发明的技术方案不但将操控扩展到纳米尺度, 能够应用于导体、非导体、活体或非活体的生物细胞或细胞器等各种微观世界的微小物体, 必将推动物理学、化学、生物学、医学领域取得的巨大进步, 从而改变整个人

类科技的历史进程。

本发明还包括针对微小物体实现更为复杂操控的技术方案。

图 14 是根据本发明另一个实施例的操控微小物体的示意图。如图所示，
5 流体介质中包括了第一电子束探针或探针扫描区域 1401 和第二电子束探针或
探针扫描区域 1402。第一电子束探针或探针扫描区域 1401 形成的非均匀电荷
分布向微小物体施加第一梯度力 F_{C1} ；第二电子束探针或探针扫描区域 1401 形
成的非均匀电荷分布向微小物体施加第二梯度力 F_{C2} 。在第一梯度力和第二梯
度力共同作用下，微小物体的运动状态从静止转变为以速度 v 匀速运动（考虑
10 阻力）。

在本实施例中，如图所示，微小物体出现了局部带电的情况。在微小物体
的第一部分 1403 出现了与第一电子束探针或探针扫描区域 1401 对应的电荷；
在第二部分 1404 出现了与第二电子束探针或探针扫描区域 1402 对应的电荷。
无论微小物体是导体还是非导体都会出现这种局部带电的情况。这使得本发明
15 的操控相比于对微小物体的整体操控更为精细。同样地，如果微小物体的体积
较大，通过多个电子束探针或探针扫描区域的操控也同样增加方便，而且成本
也更低。因此，这样的方式赋予了微小物体操纵更大的灵活性。

图 15 是根据本发明另一个实施例的操控微小物体的示意图。如图所示，
流体介质中包括了第一电子束探针或探针扫描区域 1501 和第二电子束探针或
20 探针扫描区域 1502。微小物体 1503 大致呈棒状，沿其长度方向延伸。第一电
子束探针或探针扫描区域 1501 靠近微小物体 1503 的一端；而第二电子束探针
或探针扫描区域 1502 也同样沿长度方向延伸，并从与长度方向垂直的方向靠
近棒体。微小物体 1503 与第一电子束探针或探针扫描区域 1501 接近的端部出
现电荷 1504，与第二电子束探针或探针扫描区域 1502 接近的棒体一段出现了
25 电荷 1505。当第一电子束探针或探针扫描区域 1501 保持不动，而第二电子束

探针或探针扫描区域 1502 推动棒状的微小物体 1503 以其端部为轴以角速度 w 旋转。

在一些实施例中，电子束探针或探针扫描的区域尽可能靠近所述微小物体，以施加更大的梯度力；但仍保持与微小物体相间隔。在一些实施例中，电子束探针或探针扫描区域与所述微小物体表面具有对应的形状。例如，微小物体表面是弧形，电子束探针或探针扫描的区域也可以为弧形。同样地，在竖直方向上至少一个所述探针或探针扫描区域可以包括束颈区域，其将在竖直方向上对所述微小物体的一部分施加梯度力，从而控制微小物体或其一部分的高度。

控制梯度力大小的方式也可以与之前的实施例相同。在一些实施例中，可以通过改变至少一个所述荷电粒子束的剂量率改变其梯度力；通过改变至少一个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的形状改变所述梯度力；或者，通过改变所述荷电粒子束探针或探针扫描区域相对所述微小物体的位置改变所述梯度力。当然，也可以采用以上改变梯度力大小方式的组合，选取最优的方式来获得所需的用于操控的梯度力。

在一些实施例中，可以通过多个梯度力“捕获”所述微小物体，将微小物体保持在相对静止的状态。在此状态下，如果改变电子束探针或探针扫描区域的水平位置，就能够水平移动所述微小物体或其一部分的位置；如果改变探针或探针扫描区域的竖直位置，就能够调整所述微小物体或其一部分的高度；如果改变电子束探针或探针扫描区域之间的相对位置转动所述微小物体。

图 14 和图 15 的实施例所示的操控方法，如果以电子束探针扫描区域来施加梯度力，那么类似于图 13 所示的实施例的装置即可以实施。然而，在一些情况下，为了实施更为复杂的操控，也可以采用多电子枪以及多套调节装置的方式来实施。

图 16 是根据本发明一个实施例的操控微小物体的装置的示意图。如图所

示，本实施例的装置包括：第一电子枪 1601 和第二电子枪 1602 以及与二者分别对应的第一组聚光镜 1603 和 1605 和第二组聚光镜 1604 和 1606，其中聚光镜 1605 和 1606 可以放置计算光阑。第一组聚光镜 1603 和 1605 和第二组聚光镜 1604 和 1606 分别将两个不同的电子束导向到流体介质腔室 1610，其容纳流体介质和待操控的微小物体。以第一组聚光镜 1603 和 1605 和第二组聚光镜 1604 和 1606 为代表的两组调节装置能够各自独立地调节来自不同电子枪 1601 和 1602 的电子束，实现不同梯度力的独立控制，从而能够更加方便灵活地控制微小物体的运动状态。

如本领域技术人员所理解的，图 13 和图 16 的实施例仅仅是本发明用于操控微小物体的装置说明性的实施例。由于电子束的操控技术已经相当成熟，各种各样的改进和变型层出不穷。这些改进和变型都可以应用于本发明中从而获得操控更为精确和灵活的微小物体操控装置。

本发明不仅包括捕获和移动微小物体，还包括连接微小物体以制造微装置的方法和装置。

如本文中所定义的，“连接”所指为使两个物体成为关联的一体。在连接后，其中一个物体运动状态的改变将可能影响到另一个物体。在一些实施例中，连接后的两个物体将成为一个整体；在一些实施例中，连接后的两个物体仍可以保留部分的独立性。

如本文所定义的，“接触”所指为两个物体之间的距离足够接近，以使得虽然二者之间可能仍存在距离，但是其与两个物体相互碰触的效果大致相同。换言之，两个微小物体即使接触，二者之间可能仍存在相比其尺寸而言更小的距离。

对于包括纳米尺度在内的微小物体而言，可以采用多种方法将其连接。在一些实施例中，可以直接采用电子束焊接的方式将两个微小物体连接在一起。

微小物体的适用范围包括：金属和低熔点有机材料如树脂、塑料等。例如，可

以使用电子束加热两个接触的第一微小物体与第二微小物体，使得第一微小物体与第二微小物体全部或部分融化。由于电子束加热可控性非常高，电子束加热能够高度可选择地将希望的两个微小物体焊接在一起。

在一些实施例中，也可以采用激光加热的方法来连接两个微小物体。然而，
5 受激光波长的限制，激光将会使得某个区域中金属的微小物体全部或部分融化并焊接在一起。例如，可以将两个接触的第一微小物体与第二微小物体置于某个选定的区域中，调节激光使其聚焦在选定的区域，从而将该区域中的第一微小物体和第二微小物体焊接在一起。在一些实施例中，激光加热的方法能够一次连接多个接触的微小物体，以提高效率。

10 对于不适于采用焊接方式连接的微小物体，例如高熔点材料（如 SiO_2 等）或者包括容易出现高温分解或直接挥发的材料的微小物体，则可以采用其他方式来进行连接。在一些实施例中，可以在微小物体的表面包覆热固化材料或辐照固化材料，然后在使用电子束或激光加热的方式或辐照方式将这些微小物体连接。再或者，在两个微小物体之间包括粘接剂，在两个微小物体接触后通过
15 粘结剂的固化将这些微小物体连接在一起。

在一些实施例中，第一微小物体和第二微小物体的表面可以包覆包括酚醛树脂以及六亚甲基四胺的膜层。利用电子束将第一微小物体和/或第二微小物体移动并相互接触后，直接使用电子束加热两个接触的第一微小物体和第二微小物体，两个接触的微小物体的膜层融化后并进一步发生热固化反应，从而使
20 得第一微小物体和第二微小物体连接在一起。再例如，利用电子束将第一微小物体和/或第二微小物体移动到某个选定的区域中并相互接触后，调节激光使其聚焦在该选定的区域，从而将该区域中的第一微小物体和第二微小物体通过膜层之间的热固化反应连接在一起。如所理解的，以上的实施例仅仅是微小物体表面包括热固化材料的说明性实施例。在一些实施例中，微小物体可能本身
25 即为热固化材料。或者，在一些实施例中，其他类型的热固化树脂等也可以应

用于本发明的方案之中。

在一些实施例中，微小物体的表面包覆包括辐照固化材料的膜层，例如包括 UV 固化剂和淀粉的表面层。同样地，利用电子束将第一微小物体和第二微小物体移动到某个选定的区域中，使用紫外光 UV 辐照该选定的区域，从而将该区域中的第一微小物体和第二微小物体通过辐照固化反应连接在一起。如所理解的，以上的实施例仅仅是微小物体表面包括辐照固化材料层的说明性实施例。其他类型的辐照固化材料也可以应用于本发明的方案之中。

在一些实施例中，流体介质层中包括多个粘合剂颗粒。利用电子束将粘合剂颗粒移动到第一微小物体和第二微小物体之间并与二者都相互接触，直接使用电子束加热粘合剂使得粘合剂软化从而将两个微小物体通过粘合剂相互接触；然后，再使得粘合剂固化从而第一微小物体和第二微小物体连接在一起。同样地，也可以通过激光加热的方式实现通过粘合剂的微小物体粘合。对于某些类型的粘合剂，辐照固化的方式也同样可行。

在一些实施例中，微小物体可能部分是金属或低熔点材料而部分是非金属材料。用于与其他微小物体连接的部分是金属或低熔点材料部分，而其他部分不受影响。

以上的多种连接方式可以根据实际需求组合使用。

进一步地，如所理解的，通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的水平位置能够定义第一微小物体和所述第二微小物体的水平接触位置；通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的竖直位置能够定义第一微小物体和所述第二微小物体的高度接触位置；再进一步，通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域与所述第一微小物体之间的相对位置定义所述第一微小物体和所述第二微小物体之间的接触角度。由此，相互连接的第一微小物体和第二微小物体能够在任意位置以任意角度相互连接。这为复杂微装置的制造提供了基础。

图 17A-图 17C 示出了根据本发明实施例的制造微装置的示意图。在图 17A 中，在第一时刻，提供了多个微小物体。各个微小物体时分散的，相互并不接触。在第二时刻，利用一个或多个电子束移动多个微小物体并且使它们相互接触。此时，各个微小物体的排列与希望的微装置大致相同。在第三时刻，通过
5 以上介绍的连接方式将各个微小物体连接，从而得到了希望的微装置，即沿长度方向延伸的棒状微小物体。在图 17B 和图 17C 中分别示出了棒状的微小物体与其他微小物体的连接以及棒状微小物体之间的连接。如所理解的，棒状的微小物体可能如图 17A 所示由更小的微小物体所组成的。

在一些实施例中，如所理解的，图 13 或图 16 的操控微小物体的装置也可
10 以用于制造微装置，其包括的电子枪经配置能够在流体介质腔室完成微小物体之间的连接。

在一些实施例中，用于制造微装置的装置可以进一步包括激光装置，其经配置以加热包括两个以上微小物体所在位置的区域。在一些实施例中，用于制造微装置的装置可以进一步包括辐照装置，其经配置以辐照包括两个以上微小
15 物体所在位置的区域。

如所理解的，以上的实施例仅仅是示出了制造微装置的说明性实例。由于本发明将微小物体的操控延伸到了纳米尺度，因此利用本发明的方法能够实现纳米或以上尺度微装置的制造；进一步地，由于本发明的高精确性和灵活性，使得利用本发明的方法能够实现复杂微装置的制造。这些都是技术领域的巨大
20 进步。

进一步地，本发明还包括了自动或至少部分自动地制造微装置的方案。

图 18 示出了根据本发明一个实施例的制造微装置方法的流程图。如图所示，该方法包括如下步骤：在步骤 1810，获取多个微小物体的位置。在一些实施例中，获取微装置制造区域的图像。微装置制造区域可以为流体介质腔室的全部或一部分。使用透射电镜（TEM）或扫描电镜（SEM）的原理及装置，通
25

过透射电子或者扫描产生的二次电子都能够方便地对微装置制造区域成像，从而获得微装置制造区域的图像。

在一些实施例中，该方法进一步包括：识别微装置制造区域图像中多个微小物体的种类和位置。通过识别能够了解微装置制造区域已有的微小物体的种类和位置，并建立资源库以方便后续算法的使用，从而实现微装置的自动制造。由于微装置制造区域可能包括大小、材料、形状不同的多个微小物体；而且，这些微小物体之间可能相互接触或者相互重叠的，在一些实施例中，通过深度学习的人工智能算法来识别不同种类的微小物体。

举例而言，已知微小物体的种类，将包括多个微小物体的微装置制造区域的图片集作为训练数据，其中图片集中所包括的多个微小物体是经过人工标注的。通过 CNN 或者其他有监督学习的人工智能神经网络来创建识别模型，输出不同种类的微小物体的识别结果和位置。当然，以上仅仅是一种举例说明，基于其他人工智能神经网络的有监督或无监督的算法也可以应用于此，本发明并不做任何限制。

在一些实施例中，识别微装置制造区域图像中多个微小物体的种类和位置后，建立资源库来分类管理经识别的微小物体。例如，可以建立资源表来实现这一目的。如下表 1 是一个这样的资源表的实例。

表 1

资源类型	位置 1	位置 2	位置 3
块 1 (直径 10-20nm)	(X11/Y11/Z11)	..	..
块 2 (直径 20-30nm)	(X21/Y21/Z21)	..	..
棒 1 (直径 1, 长度 1)	(X11/Y11/Z11, A11/B11/C11)	..	..
棒 2 (直径 1, 长度 2)	(X21/Y21/Z21, A21/B21/C21)	..	..
...			

其中，块 1 和块 2 分别代表直径不同的块状微小物体，(X11/Y11/Z11) 和 (X21/Y21/Z21) 分别代表了它们在微装置制造区域的位置（例如中心所在的位置）；棒 1 和棒 2 分别代表直径相同但长度不同的棒状微小物体，(X11/Y11/Z11, A11/B11/C11) 和 (X21/Y21/Z21, A21/B21/C21) 分别代表了它们在微装置制造区域的位置（例如中心所在的位置）和延伸的方向（例如延伸方向在三个方向的投影角度）。

在步骤 1820，获取微装置的装配步骤。在一些实施例中，对于希望制造的微装置，将其制造过程分解为多个装配步骤。这些装配步骤包括：基于微小物体的种类和/或数量形成中间部件的步骤；以及将中间部件与微小物体或其他中间部件连接的步骤等。

在一些实施例中，装配步骤包括将两个以上微小物体移动位置；将经连接的两个以上微小物体移动位置；将接触的两个以上微小物体连接；将连接后的两个以上微小物体与另一微小物体再连接；将两个以上经连接的两个以上微小物体再连接；以及同时连接两个接触的微小物体、两个经连接的两个以上微小物体或者两者组合。

如所理解的，同样的微装置可能对应多个不同的装配步骤。获取与微装置的制造有关的这些装配步骤能够为后续的自动装配提供基础。

在一些实施例中，至少部分基于多个微小物体的种类调整该微装置的装配步骤。综合考虑资源库中所展示的微装置制造区域中已有的微小物体资源以及各个装配步骤要求的微小物体资源，对装配步骤进行调整能够更加高效地完成微装置的装配。

在一些实施例中，至少部分基于多个微小物体的位置调整所述微装置的所述装配步骤。不同的微小物体位置决定了移动这些微小物体所需的能量和时间。为了更加高效地进行微装置的制造，也可以根据多个微小物体的位置调整所述微装置的所述装配步骤。例如，如果某几个微小物体距离较近，而且它们

适于加工成某个装配步骤所需的中间部件，那么可以调整装配步骤就近加工该中间部件，然后再进行后续装配。

进一步地，由于电子束探针或其探针扫描区域是数量有限的，也有必要合理规划以充分利用电子束资源，提高微装置的制造效率。

5 在一些实施例中，至少部分基于多个微小物体的种类确定利用一个或多个荷电粒子束移动多个微小物体中一者或多者的方式。如所理解的，既可以使用一个电子束探针或其探针扫描区域“捕获”微小物体，也可以使用多个电子束探针或其探针扫描区域“捕获”微小物体。根据多个微小物体的种类以及中间部件的种类和/或移动的距离可以合理地安排移动多个微小物体或中间部件的方式。

10 在一些实施例中，至少基于多个微小物体的位置规划利用一个或多个荷电粒子束移动多个微小物体中一者或多者的顺序和路线。如所理解的，多个微小物体的位置不同，中间部件的位置也可能不同。因此，可以合理地安排移动哪些微小物体或中间部件以及移动的顺序和路线，提高微装置的制造效率。

15 在一些实施例中，至少部分基于微装置的装配步骤规划利用一个或多个荷电粒子束移动多个微小物体中一者或多者的顺序和路线。如所理解，装配步骤的先后顺序也会对微小物体的移动产生影响。因此，可以根据装配步骤合理地安排移动哪些微小物体或中间部件以及移动的顺序和路线，提高微装置的制造效率。

20 如所理解的，本领域技术人员能够综合考虑以上或其他因素，组合地使用上述方法或其他方法，获得适合的经优化的微装置步骤。

 在步骤 1830，至少部分自动地利用一个或多个荷电粒子束移动所述多个微小物体并且按所述装配步骤形成所述微装置。在获得了装配步骤后，可以将每个装配步骤再分解为多个动作，再将多个动作转换成对于电子束探针或者探
25 针扫描区域的控制指令。这些控制指令能够自动或至少部分自动地操控电子束

调节装置，执行每个装配步骤的各个动作，完成各个装配步骤，从而获得希望的微装置。

图 19 示出了根据本发明一个实施例的制造微装置的装置结构示意图。如图所示，本实施例的制造微装置的装置，包括：电子枪 1901，其经配置以提供
5 电子束；流体介质腔室 1902，其经配置以容纳流体介质和多个微小物体；包括聚光镜 1903 和 1904 以及计算光阑 1905 的一个或多个调节装置；处理器 1910；成像装置 1920，其经配置以获取多个微小物体在流体介质腔室中的图像；其中，处理器 1902 经配置以根据成像装置获得的流体介质腔室中的图像获取所述多个微小物体的位置；根据希望的微装置，获取微装置的装配步骤；以及控制一
10 个或多个调节装置至少部分自动地利用一个或多个荷电粒子束移动所述多个微小物体并且按所述装配步骤形成所述微装置。如所理解的，处理器 1910 还可以经配置执行以下功能：识别所述图像中所述多个微小物体的种类和位置；以及，调整微装置的装配步骤。

在一些实施例中，本实施例的装置还包括激光装置，处理器 1910 还经配
15 置以控制所述激光装置同时连接两个以上接触的微小物体、两个以上接触的经连接的两个以上微小物体或者两者组合。

在一些实施例中，本实施例的装置还包括辐照装置，处理器 1910 还经配置以控制所述辐照装置同时连接两个以上接触的微小物体、两个以上接触的经连接的两个以上微小物体或者两者组合。

20 图 20A-图 20C 是根据本发明一个实施例的微装置制造过程示意图。如图所示，希望制造的微装置是一个插合装置，包括插槽和插头。在图 20A 中，微装置制造区域中散布着多个微小物体，其中既包括多个块状微小物体，也包括多个棒状的微小物体。在获得微装置制造区域的图像并经识别后，能够获得微装置制造区域中包括的多个微小物体资源。

25 进一步地，根据希望制造的微装置的结果，获取其装配步骤：（1）利用分

散的块状微小物体形成插槽；（2）利用两个棒状微小物体形成插头；（3）同时连接形成插槽和插头的微小物体；以及（4）将插头插入到插槽中。

在图 20B 中，多个块状微小物体被移动并放置以形成大致插槽的形状；以及两个棒状微小物体被移动以形成大致插头的形状。

5 在图 20C 中，经过激光加热整个微装置制造区域，多个块状微小物体被连接形成插槽，其中插槽的开口宽度与棒状微小物体的直径大致相当。两个棒状微小物体被连接形成插头。然后，插头被移动以插入到插槽中。由此，实现希望

10 本发明的微装置的自动或者至少部分自动装配能够极大地提高微装置的制造效率，为以流水线方式大规模地进行微装置的制造提供了条件，也为本发明的工业化应用提供了基础。

15 上述实施例仅供说明本发明之用，而并非是对本发明的限制，有关技术领域的普通技术人员，在不脱离本发明范围的情况下，还可以做出各种变化和变型，因此，所有等同的技术方案也应属于本发明公开的范畴。

权 利 要 求 书

1. 一种操控微小物体的方法，包括：

提供一个或多个荷电粒子束；

在流体介质中形成一个或多个非均匀的电荷分布，其中所述一个或多个非
5 均匀的电荷分布向微小物体的一个或多个部分施加一个或多个梯度力；以及控制所述一个或多个梯度力中一者或多者改变所述微小物体的运动状态。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述梯度力为库仑力。

3. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述一个或多个荷电粒子束使得所述
微小物体的所述一个或多个部分带电。

10 4. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述一个或多个非均匀的电荷分布是一个或多个荷电粒子束的探针穿过和/或扫描所述流体介质中的一个或多个区域形成的。

5. 根据权利要求 4 所述的方法，其中至少一个所述荷电粒子束的探针或探针扫描的区域间隔并靠近所述微小物体。

15 6. 根据权利要求 4 所述的方法，其中至少一个所述探针或探针扫描区域与所述微小物体表面具有对应的形状。

7. 根据权利要求 4 所述的方法，其中在竖直方向上至少一个所述探针或探针扫描区域包括束颈区域，其经配置以将在竖直方向上对所述微小物体的整体或一部分施加梯度力。

20 8. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述一个或多个梯度力捕获所述微小物体。

9. 根据权利要求 1 所述的方法，进一步包括：通过改变至少一个所述荷电粒子束的剂量率改变其梯度力。

25 10. 根据权利要求 1 所述的方法，进一步包括：通过改变至少一个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的形状改变所述梯度力。

11. 根据权利要求 1 所述的方法, 进一步包括: 通过改变所述荷电粒子束探针或探针扫描区域相对所述微小物体的位置改变所述梯度力。

12. 根据权利要求 1 所述的方法, 进一步包括: 通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的水平位置水平移动所述微小物体。

5 13. 根据权利要求 1 所述的方法, 进一步包括: 通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的竖直位置调整所述微小物体的高度。

14. 根据权利要求 1 所述的方法, 进一步包括: 通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域之间的相对位置转动所述微小物体。

15. 一种操控微小物体的装置, 包括:

10 一个或多个荷电粒子枪, 其经配置以提供一个或多个荷电粒子束;
一个或多个调节装置, 其经配置以调节所述一个或多个荷电粒子束; 以及
流体介质腔室, 其经配置以容纳流体介质和微小物体, 其中, 经调节的一个或多个荷电粒子束在流体介质中形成一个或多个非均匀的电荷分布, 从而向所述微小物体的一个或多个部分施加一个或多个梯度力;

15 其中, 所述一个或多个调节装置经配置以通过调节所述一个或多个荷电粒子束控制一个或多个梯度力中一者或多者改变所述微小物体的运动状态。

16. 根据权利要求 15 所述的装置, 其中所述荷电粒子枪包括电子枪。

17. 根据权利要求 15 所述的装置, 其中所述流体介质腔室包括液体胞室 (liquid cell)。

20 18. 根据权利要求 15 所述的装置, 其中所述调节装置包括电磁透镜。

19. 根据权利要求 15 所述的装置, 其中所述调节装置包括光阑。

20. 根据权利要求 15 所述的装置, 其中所述调节装置包括涡旋束装置, 其经配置以产生携带轨道角动量的荷电粒子束。

21. 根据权利要求 15 所述的装置, 其中所述调节装置经配置以通过改变
25 至少一个所述荷电粒子束的剂量率改变其梯度力。

22. 根据权利要求 15 所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过改变至少一个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的形状改变所述梯度力。

23. 根据权利要求 15 所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过改变所述荷电粒子束探针或探针扫描区域相对所述微小物体的位置改变所述梯度力。

24. 根据权利要求 15 所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的水平位置水平移动所述微小物体。

25. 根据权利要求 15 所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域的竖直位置调整所述微小物体的高度。

26. 根据权利要求 15 所述的装置，其中所述调节装置经配置以通过调整一个或多个所述荷电粒子束探针或探针扫描区域之间的相对位置转动所述微小物体。

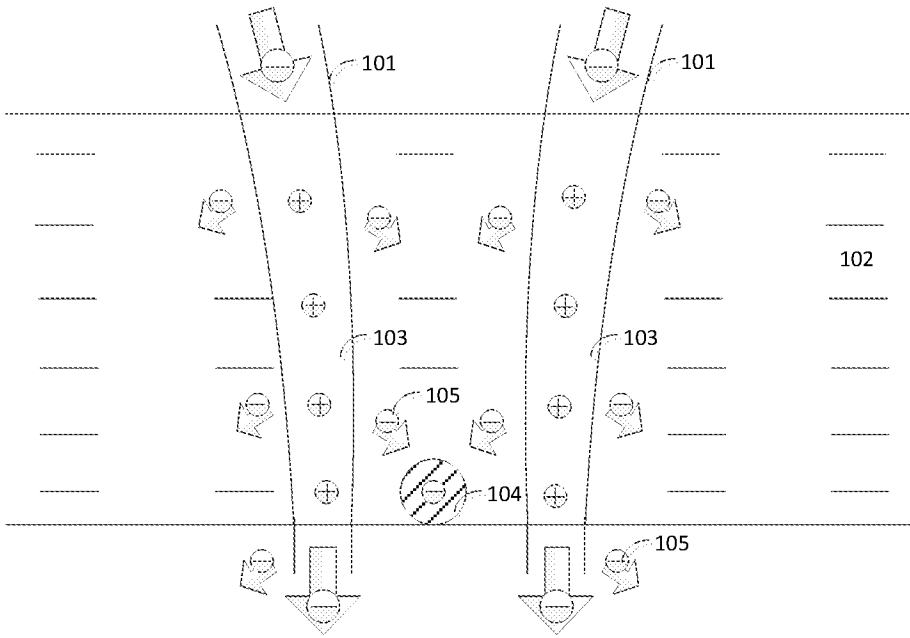


图 1

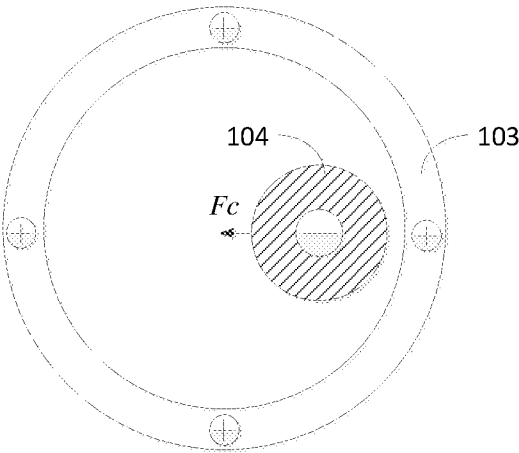


图 2

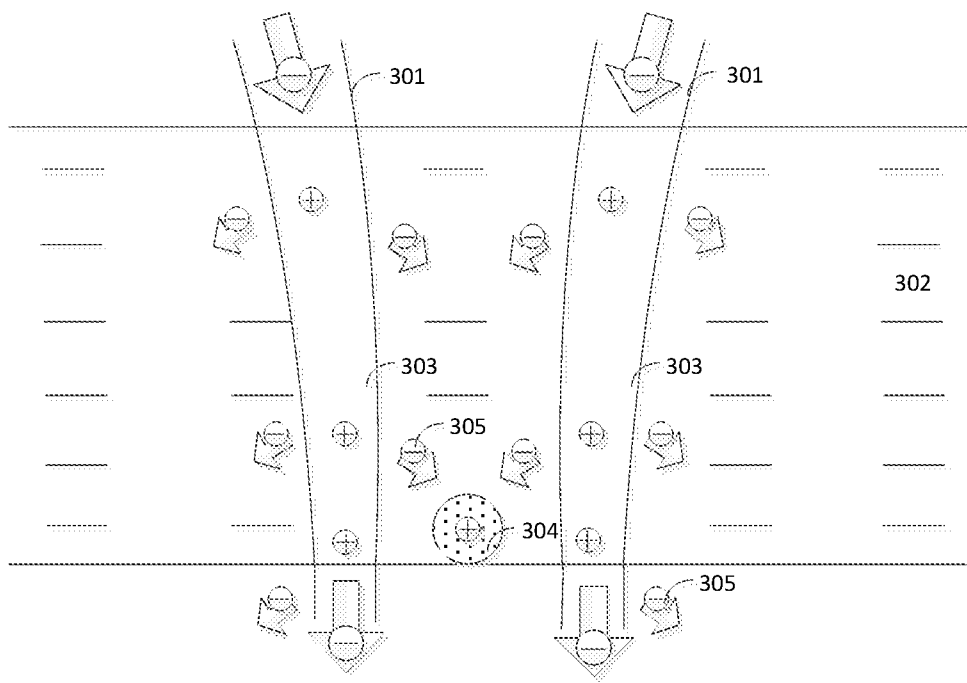


图 3

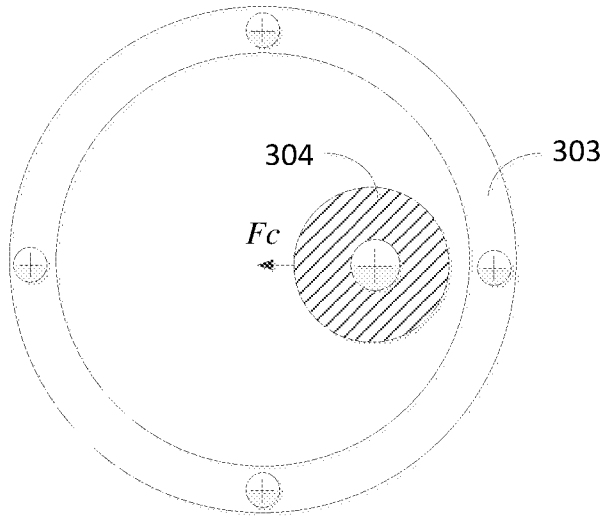


图 4

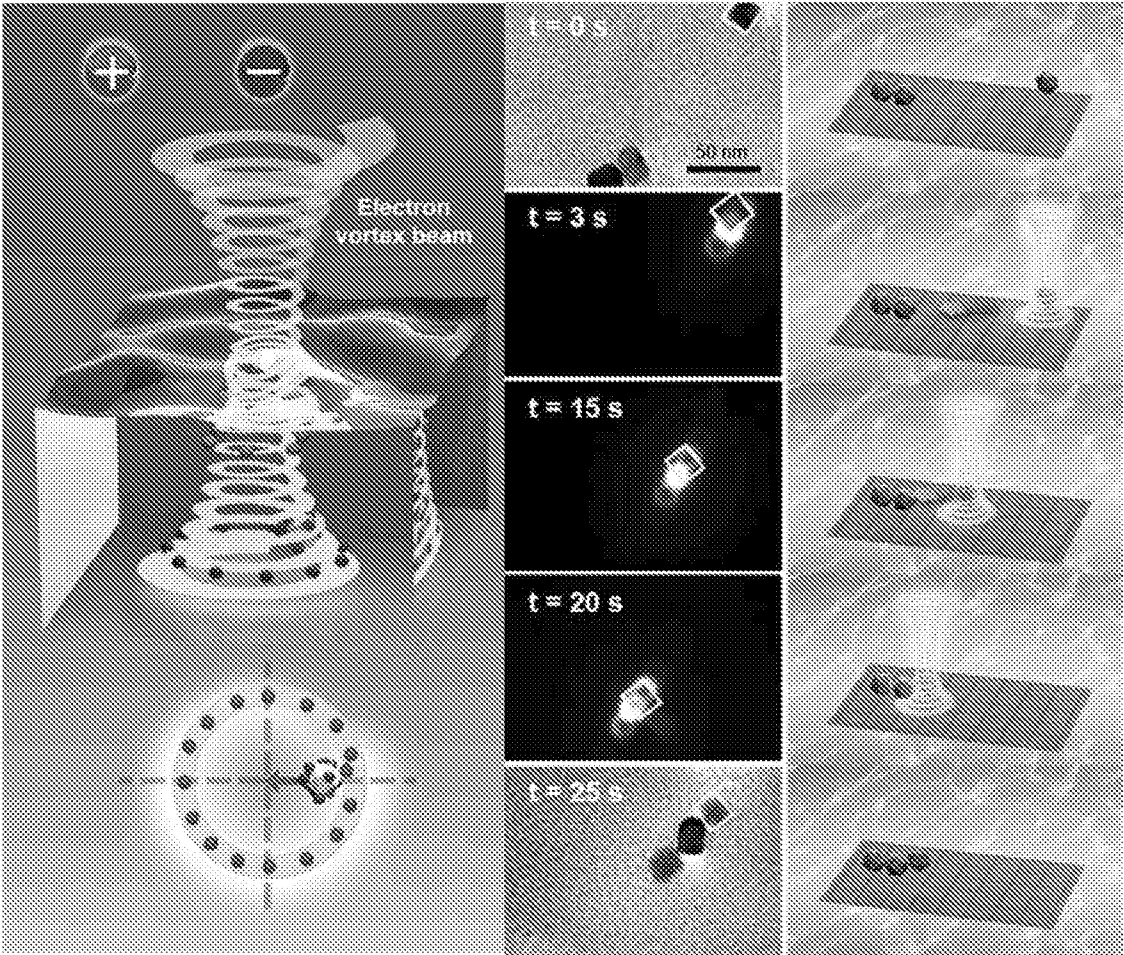


图5A

图5B

图5C

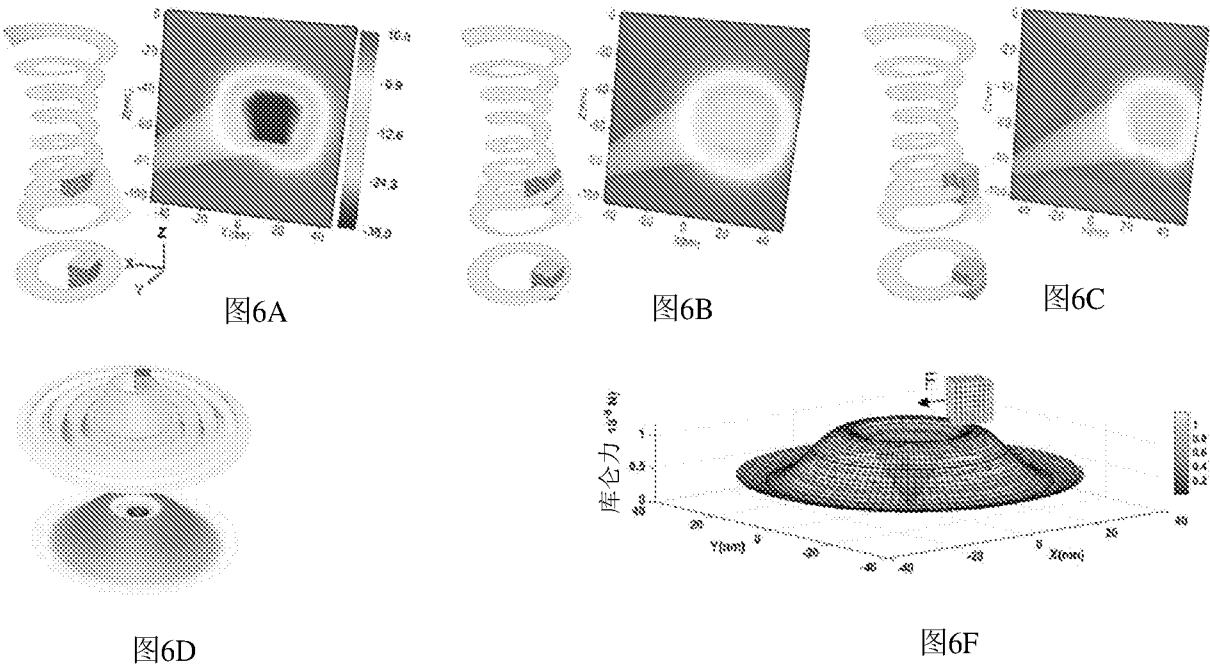


图6A

图6B

图6C

图6D

图6F

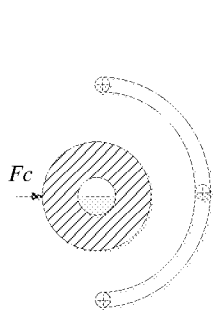


图7A

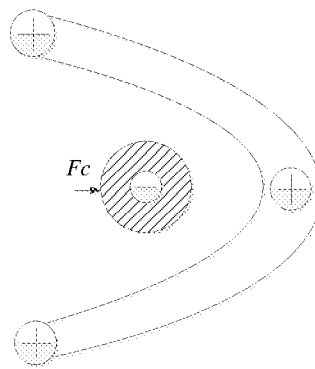


图7B

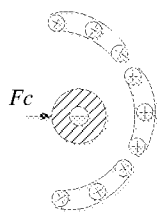


图7C

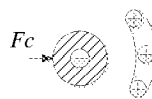


图7D

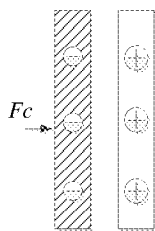


图7E

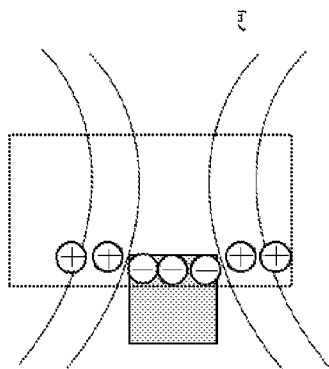


图 8A

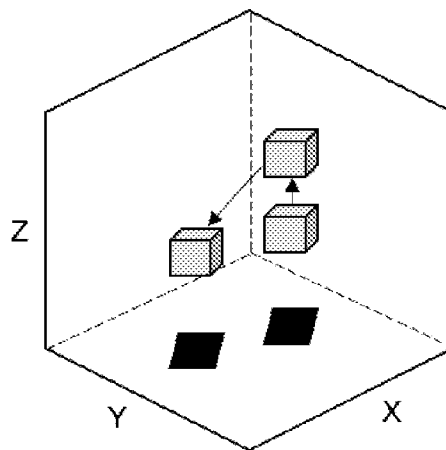


图 8B

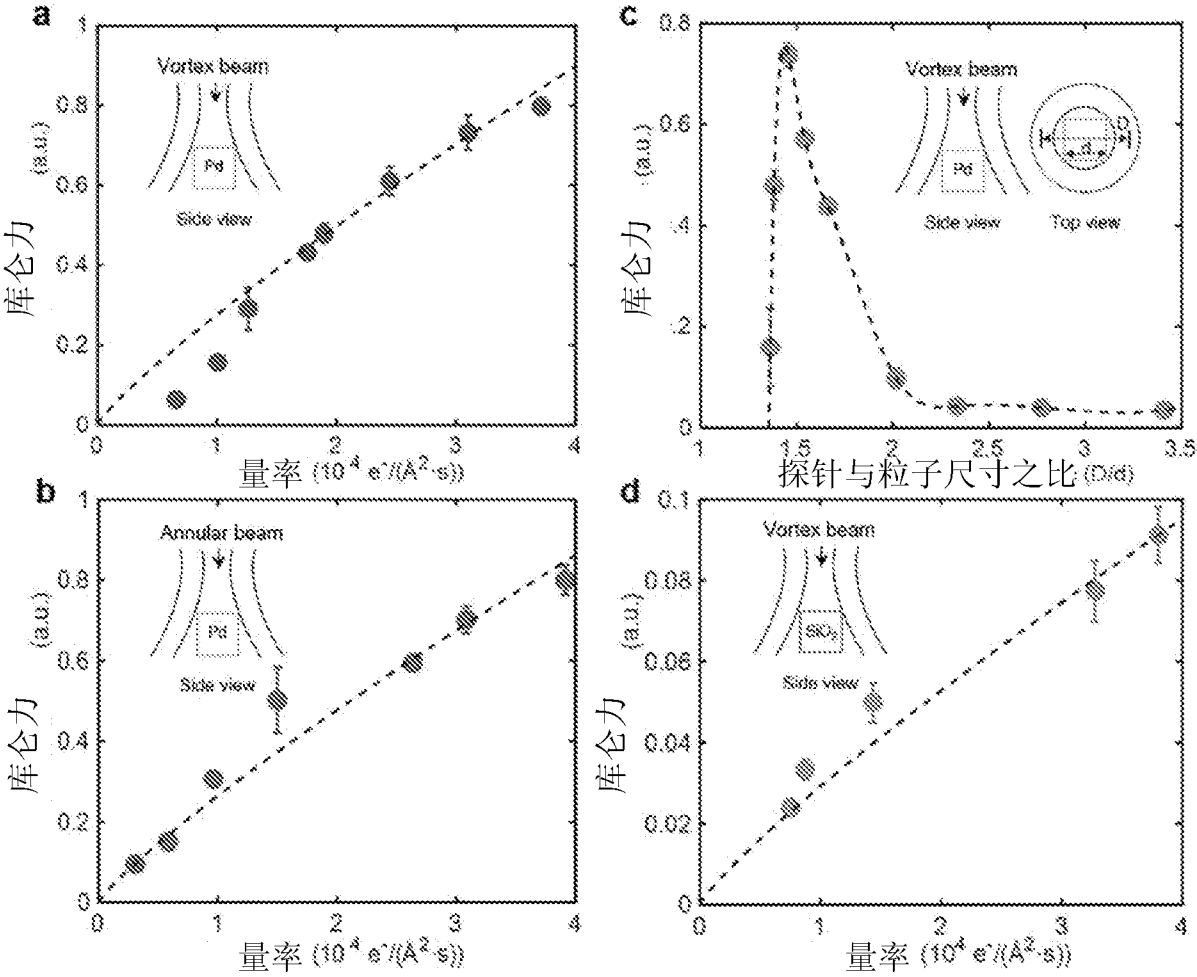


图 10

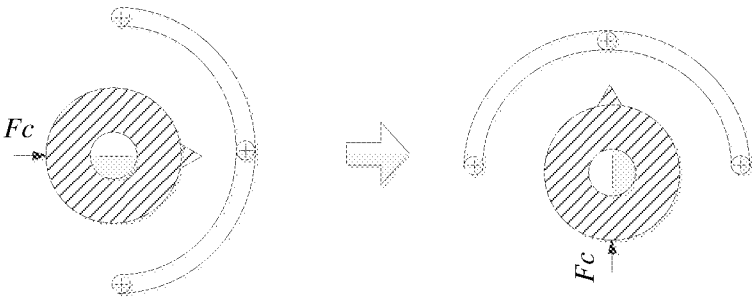


图 10A

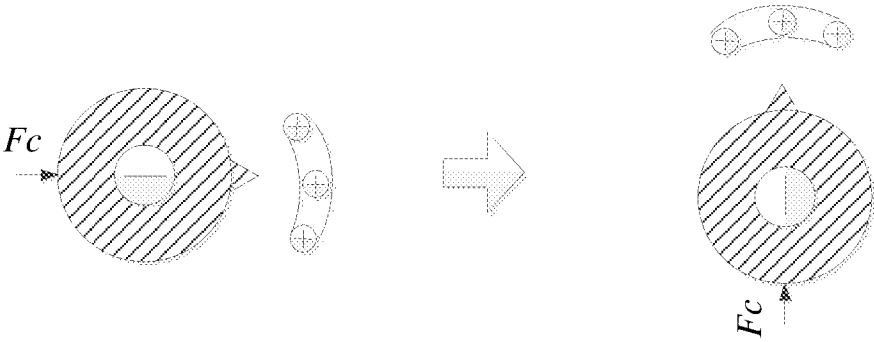


图 10B

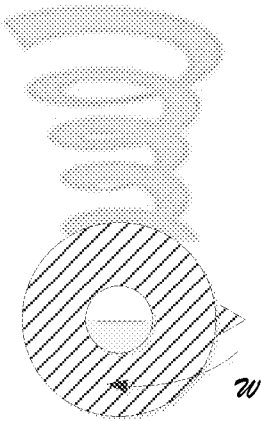


图 10C

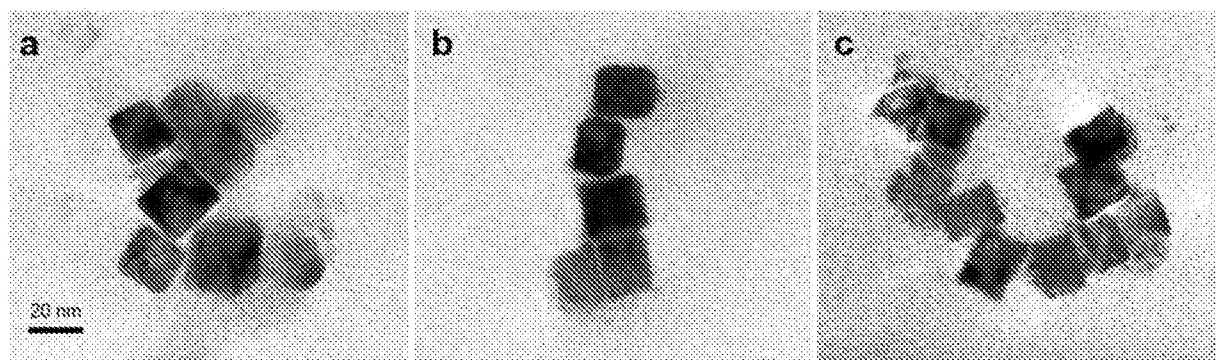


图 11

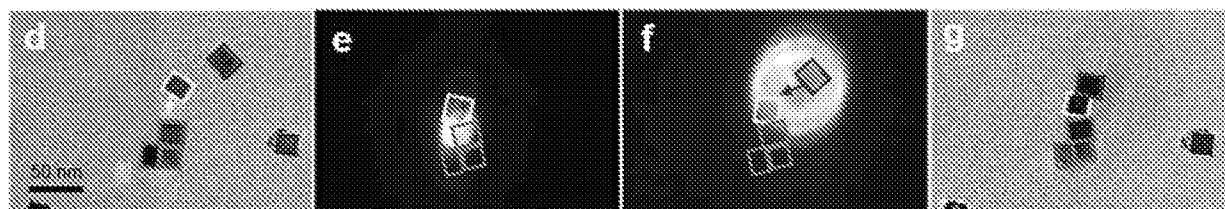


图 12

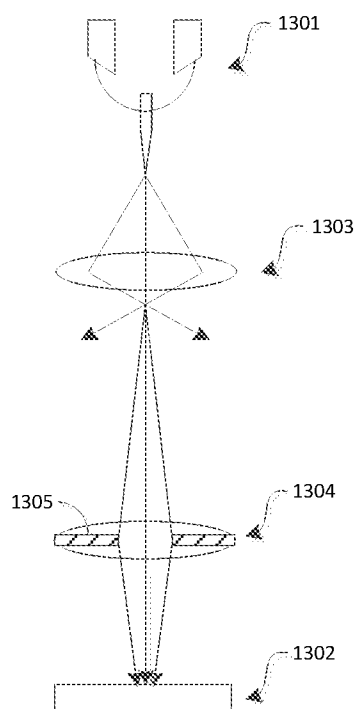


图 13

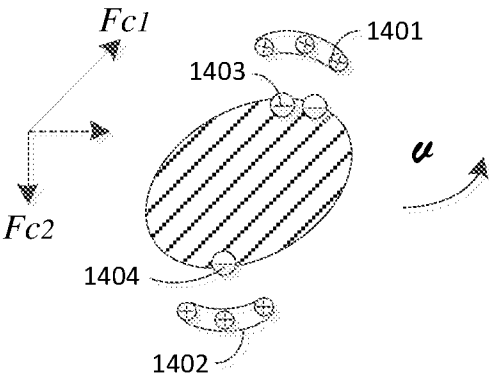


图 14

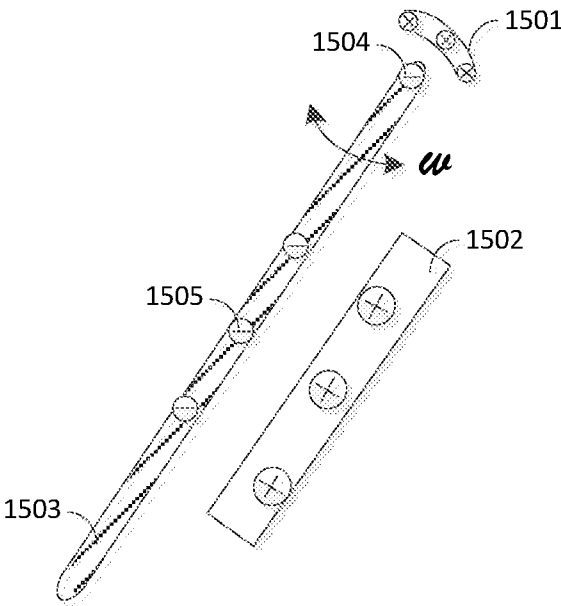


图 15

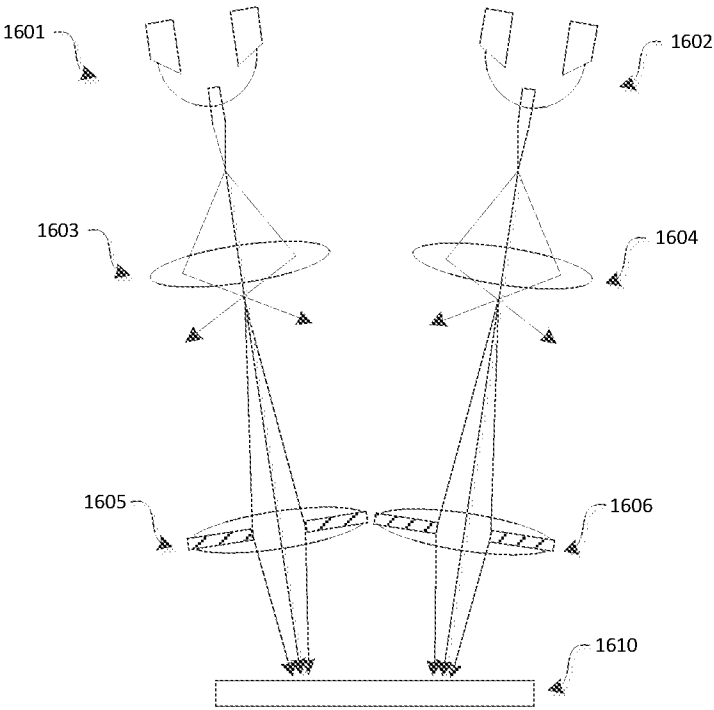


图 16

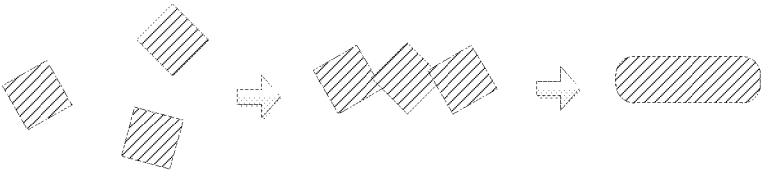


图17A



图17B

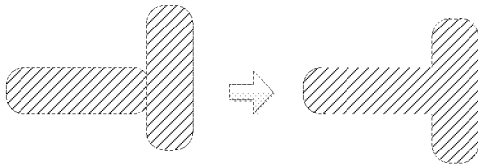


图17C

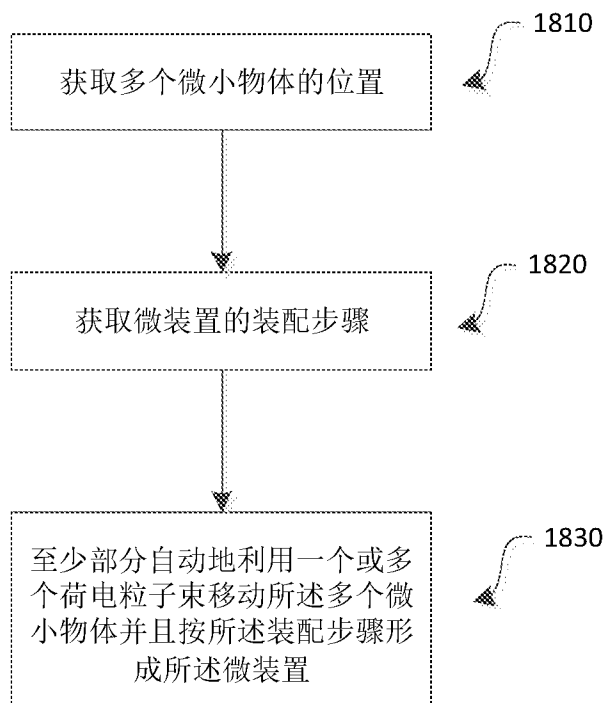


图 18

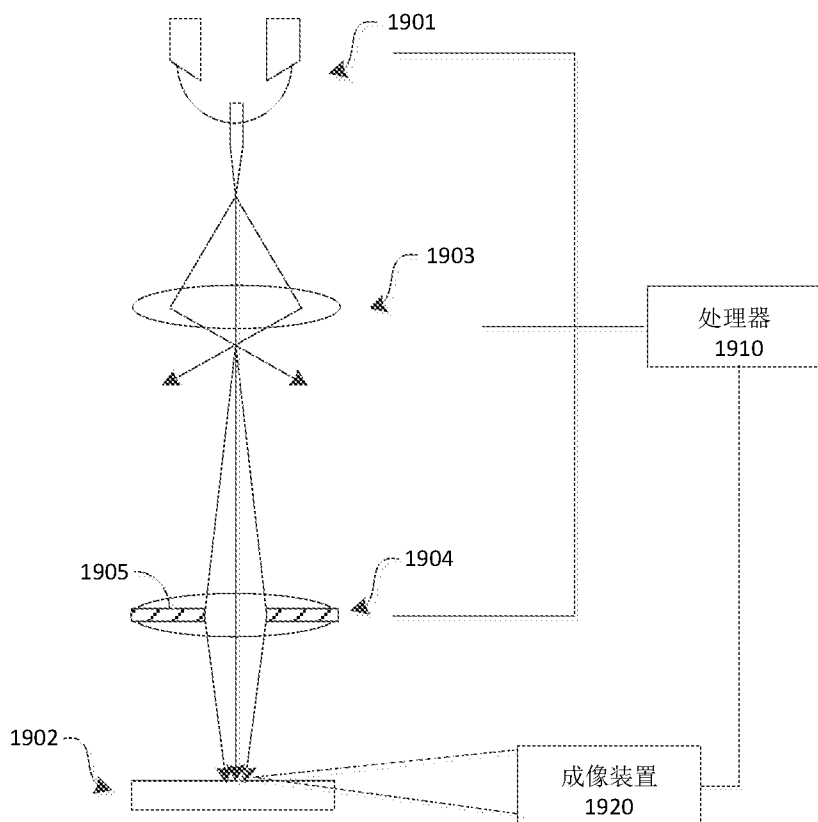


图 19

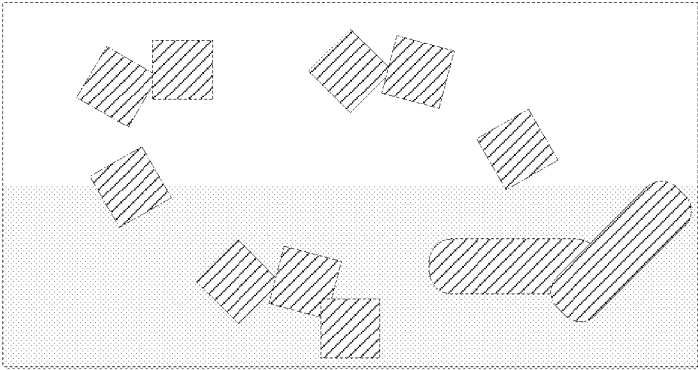


图20A

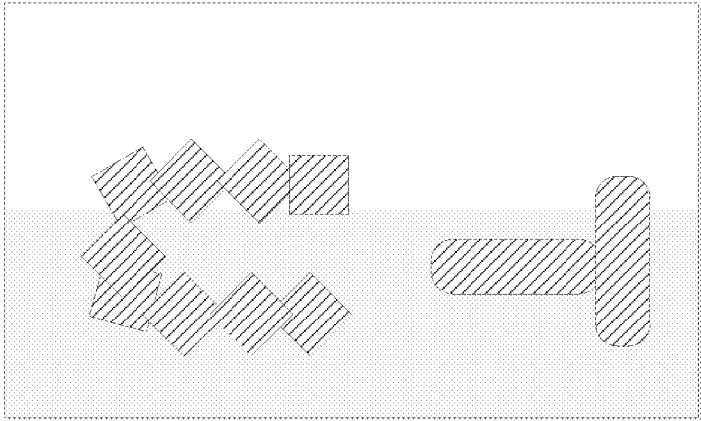


图20B

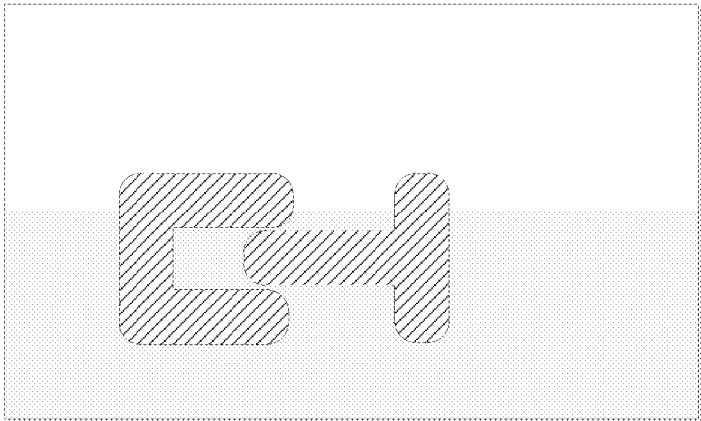


图20C

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/078355

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01Q 30/20(2010.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01Q

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; CNKI; VEN; USTXT; EPTXT; WOTXT; IEEE: 浙江大学, 田鹤, 孙土来, 任天星, 张婉如, 陈鑫铠, 张泽, 操控, 操作, 捕获, 移动, 纳米, 微小, 颗粒, 微粒, 荷电, 粒子束, 电子束, 质子束, 流体, 液体, 气体, 胶体, 梯度力, 库仑力, manipul+, operat+, handl+, nano+, particle?, charg+, beam, bunch, fluid, liquid, gas+, gradient force, coulomb+ force

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	Haimei Zheng et al. "Electron Beam Manipulation of Nanoparticles" <i>Nano Letters</i> , Vol. 12, No. 11, 04 October 2012 (2012-10-04), ISSN: 1530-6984, pp. 5644-5647	1-26
A	CN 110687142 A (NANJING UNIVERSITY) 14 January 2020 (2020-01-14) entire document	1-26
A	CN 1292496 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 25 April 2001 (2001-04-25) entire document	1-26
A	CN 211293469 U (SOUTH CHINA NORMAL UNIVERSITY) 18 August 2020 (2020-08-18) entire document	1-26
A	CN 111816344 A (ZHEJIANG UNIVERSITY et al.) 23 October 2020 (2020-10-23) entire document	1-26
A	CN 101788571 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 28 July 2010 (2010-07-28) entire document	1-26
A	WO 2020100077 A1 (INDIAN INSTITUTE OF SCIENCE) 22 May 2020 (2020-05-22) entire document	1-26



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

22 October 2021

Date of mailing of the international search report

09 November 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/078355

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)
CN	110687142	A	14 January 2020	None		
CN	1292496	A	25 April 2001	CN	1111279	C 11 June 2003
CN	211293469	U	18 August 2020	None		
CN	111816344	A	23 October 2020	None		
CN	101788571	A	28 July 2010	CN	101788571	B 12 March 2014
WO	2020100077	A1	22 May 2020	EP	3881054	A1 22 September 2021
				IN	201841042881	A 15 May 2020

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/078355

A. 主题的分类 G01Q 30/20 (2010.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G01Q 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNABS; CNTXT; CNKI; VEN; USTXT; EPTXT; WOTXT; IEEE: 浙江大学, 田鹤, 孙土来, 任天星, 张婉如, 陈鑫铠, 张泽, 操控, 操作, 捕获, 移动, 纳米, 微小, 颗粒, 微粒, 荷电, 粒子束, 电子束, 质子束, 流体, 液体, 气体, 胶体, 梯度力, 库仑力, manipulatio+, operatio+, handl+, nano+, particle?, charg+, beam, bunch, fluid, liquid, gas +, gradient force, coulomb+ force		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	Haimei Zheng 等. "Electron Beam Manipulation of Nanoparticles" NANO LETTERS, 第12卷, 第11期, 2012年 10月 4日 (2012 - 10 - 04), ISSN: 1530-6984, 第5644-5647页	1-26
A	CN 110687142 A (南京大学) 2020年 1月 14日 (2020 - 01 - 14) 全文	1-26
A	CN 1292496 A (清华大学) 2001年 4月 25日 (2001 - 04 - 25) 全文	1-26
A	CN 211293469 U (华南师范大学) 2020年 8月 18日 (2020 - 08 - 18) 全文	1-26
A	CN 111816344 A (浙江大学 等) 2020年 10月 23日 (2020 - 10 - 23) 全文	1-26
A	CN 101788571 A (哈尔滨工业大学) 2010年 7月 28日 (2010 - 07 - 28) 全文	1-26
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 2021年 10月 22日		国际检索报告邮寄日期 2021年 11月 9日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 张清娟 电话号码 (86-512)88997014

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	W0 2020100077 A1 (INDIAN INST SCIENT) 2020年 5月 22日 (2020 - 05 - 22) 全文	1-26

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/078355

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	110687142	A	2020年 1月 14日	无	
CN	1292496	A	2001年 4月 25日	CN	1111279 C 2003年 6月 11日
CN	211293469	U	2020年 8月 18日	无	
CN	111816344	A	2020年 10月 23日	无	
CN	101788571	A	2010年 7月 28日	CN	101788571 B 2014年 3月 12日
WO	2020100077	A1	2020年 5月 22日	EP	3881054 A1 2021年 9月 22日
				IN	201841042881 A 2020年 5月 15日