



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101788571 B

(45) 授权公告日 2014. 03. 12

(21) 申请号 201010102044. 7 347-350.

(22) 申请日 2010. 01. 28 审查员 张沫

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学
地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

(72) 发明人 杨立军 王扬 刘炳辉 王懋露

(51) Int. Cl.
G01Q 30/20 (2010. 01)
G01Q 60/24 (2010. 01)
G01Q 60/38 (2010. 01)

(56) 对比文件
CN 1292496 A, 2001. 04. 25, 说明书第 4 页第 20 行至第 5 页最后 1 行, 图 3, 4.

WO 2007/149534 A3, 2007. 12. 27, 说明书摘要, 摘要附图.

US 5445011 A, 1995. 08. 29, 图 1-4.

蔡微等. 基于三维纳米定位平台的扫描近场光学显微镜. 《红外与激光工程》. 2009, 第 38 卷

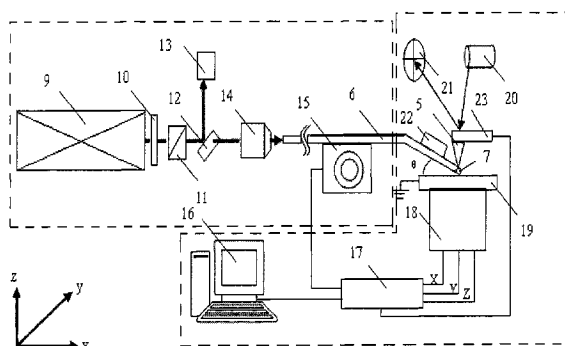
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法

(57) 摘要

一种复合激光近场光镊与 AFM 探针进行纳米操作的方法。它是一种从 AFM 系统样品室与外部的接口将光纤探针型近场光镊引入样品室, 利用复合后产生的耦合力效应进行样品微粒纳米操作的方法。将 AFM 探针置于光纤探针的近场区域后, AFM 探针局域增强光场与光纤探针出射光场耦合后形成的三维稳定光阱能平衡外界干扰力, 可实现纳米微粒稳定高效的捕获。



1. 一种激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法,其特征在于,使激光与多个近场探针相互作用获得近场局域增强光场,利用该近场局域增强光场对纳米微粒的光梯度力来实现捕获、移动、释放、拉伸和扭转的复杂三维操作,同时利用 AFM 系统的纳米级分辨率来实现纳米操作过程的精确观测与定位,包括探针复合与目标选择定位及纳米操作两部分,所述探针复合与目标选择定位包括以下步骤:

(1) 首先采用 AFM 的粗调系统粗略地选择密度和分散度合适的纳米微粒区域;

(2) 之后通过 AFM 的扫描微进给系统将 AFM 探针逼近纳米微粒,对单个纳米微粒进行精确定位;

(3) 确定好纳米微粒的选择定位后,利用三维调整台将光纤探针和 AFM 探针的距离缩小到近场范围,在微逼近过程中采用间距测控器使二者保持一定的近场距离以适于纳米操作;

所述纳米操作包括以下步骤:

(1) 将复合探针移动到待操作纳米微粒处后,调整激光器的输出功率,使光纤探针与 AFM 探针的耦合增强场产生的梯度力适于操作样品;

(2) 接着调整光纤探针的位置使之适于实现特定动作,捕获纳米微粒后调整 AFM 探针并使光纤探针随之作同步移动;

(3) 之后利用 AFM 信号处理和显示系统实时监控与观测操作结果,对纳米微粒实现精确的观测与定位;

(4) 最后将纳米微粒移动到设定位置后调整激光功率,减小梯度力在新位置释放纳米微粒。

2. 根据权利要求 1 所述的纳米操作方法,其特征在于,所述的近场探针采用尖端具有纳米孔径的镀金属膜光纤探针和具有纳米针尖的 AFM 镀金膜硅探针。

3. 根据权利要求 2 所述的纳米操作方法,其特征在于,所述的尖端具有纳米孔径的镀金属膜光纤探针是由光纤/硅/氮化硅材料制成,尖端具有直径小于 100 纳米的通光小孔,该孔径光纤探针是在单模或具有梯度折射率的裸光纤探针的尖端锥面上镀一层金属膜。

4. 根据权利要求 1 所述的纳米操作方法,其特征在于,所述的激光与近场探针相互作用的方法是将激光耦合进光纤探针,在探针的尖端形成沿三维方向迅速衰减的边缘增强隐失场;处在该隐失场下的 AFM 探针在尖端近场范围内形成局域增强场。

5. 根据权利要求 1 所述的纳米操作方法,其特征在于,所述的近场局域耦合增强光场存在对纳米微粒的梯度作用力场,形成的光阱将纳米微粒稳定捕获并约束于光强极点附近,可实现纳米操作。

6. 根据权利要求 1 所述的纳米操作方法,其特征在于,所述的纳米操作方法是在近场光镊的近场区域加入 AFM 探针,利用 AFM 探针的场增强效应来克服近场光镊中光纤探针出射功率低、隐失场偏弱的问题,由 AFM 探针局域增强光场与光纤探针出射光场耦合后形成的三维稳定光阱能平衡外界干扰力,可实现纳米微粒稳定高效的捕获。

7. 根据权利要求 1 所述的纳米操作方法,其特征在于,所述的纳米操作过程是当光纤探针移动时,被捕获的纳米微粒也随之移动。

8. 根据权利要求 1 所述的纳米操作方法,其特征在于,当采用双光纤探针和 AFM 探针组成多近场探针时,在 AFM 探针与双光纤探针耦合场的作用下,通过改变双光纤探针与样品

间的空间位置、移动方向和激光功率,可实现对纳米微粒的捕获、移动、释放、拉伸和扭转的三维操作。

9. 根据权利要求1所述的纳米操作方法,其特征在于,所述的纳米操作方法是利用AFM的信号处理和显示系统实时监控与观测操作结果对纳米微粒实现精确的观测与定位。

一种激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法

技术领域

[0001] 本发明属于近场光学和纳米操作领域,特别涉及一种激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法。

背景技术

[0002] 自从 1990 年美国圣荷塞 IBM 公司的 Almaden 研究中心的 D. Eigler 等人首次实现原子搬迁以来,纳米操作开始引起学者的关注。纳米操作是指通过外力施加和传感反馈实现对纳米尺度的物体推拉、定位、剪切等操作。近几年来纳米结构节点的导电连接,以及纳米电子器件和外电路的链接封装使精确的纳米操作技术越来越重要。目前纳米操作技术得到各发达国家的高度重视并已获得了一定的进展,借助于纳米操作技术,人们可以随意加工和组装出三维 MEMS 元件、操作微小生物对象、或是移动微机器人系统。

[0003] 现有的纳米操作装置一般采用扫描探针显微镜 (SPM) 和激光光镊。以 STM 为核心的纳米操作系统主要用于原子和分子的操作,以 AFM 为核心的纳米操作系统则可对平面上纳米对象进行机械操作,如操作纳米粒子、碳纳米管,进行纳米压印等,也可以对生物对象进行操作。由于 AFM 可在各种环境中成像,因此这种系统在纳米科技研究中具有广泛的应用。虽然基于 SPM 的纳米操作系统构建相对容易,但单探针只能完成简单的二维操作,极大地限制了其柔性工作能力。基于激光光镊的纳米操作系统具有非接触、无损伤地操作微纳尺度粒子的特性。传统光镊利用光与物质相互作用表现出的动量传递力学效应而形成的三维梯度光学势阱来捕获微粒,目前已有成熟的理论与实验基础,在生物学和表面科学等领域得到了广泛的应用,但由于受到光学衍射极限的限制,传统光镊都不能捕获更小的微粒。

[0004] 最近发展起来的近场光镊突破衍射极限,利用探针尖附近隐失场形成的局域增强场所产生的强梯度力能实现对几十纳米至几纳米微粒的捕获。光纤探针型近场光镊借助外界辅助克服外界干扰力(如重力和布朗运动)可实现样品微粒的稳定操作,当利用多个近场探针对样品施以不同的梯度力时,更可实现复杂的纳米操作。该方法比传统光镊更加灵活,光纤探针深入样品池中增大了粒子的操作范围,操作精度也从微米级发展至纳米级,但目前该方法还仅限于理论上的数值模拟研究,近场光纤探针极低的通光效率阻碍了其发展,偏弱的隐失场导致近场光镊在液体中操作起来很困难,更难以在真空或空气中有选择性地捕获纳米粒子。此外,近场光镊对单个纳米微粒的观测和定位目前主要是通过测量散射光的强弱变化来判断粒子是否被捕获,这种方法往往只能对一群纳米粒子的状况加以判断,并不适合对单个纳米粒子进行观测和定位。因为无法直接观察,寻找并直接定位纳米粒子就比较困难,因此要想实现近场光镊对单个纳米粒子的操作,就必须解决单个纳米粒子的精确观测与定位问题。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于为克服近场光镊和 AFM 操作系统的不足,集成近场光镊与 AFM 操作系统各自优点,提出一种激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法,运用该方

法对纳米微粒进行有效、精确的操作与观测,使之既具有足够高的分辨率又能实现高效灵活的操作。

[0006] 本发明提出的激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作系统的结构包括光纤探针型近场光镊和 AFM 系统:光纤探针型近场光镊包括激光器、半波片、偏振光束分路器、光束分路器、发射光功率检测焦耳计、物镜和光纤耦合器、激光器使用光纤、XYZ 三维操作台及间距测控器;AFM 系统包括粗调系统、扫描微进给系统、带显示器的主机、控制电路、压电陶瓷扫描管、样品室、探头、半导体激光器、调准镜及四象限位置检测器。该纳米操作方法利用 AFM 系统样品室与外部的接口将光纤探针型近场光镊引入样品室后,借助三维调整台对光纤激光束入射至 AFM 针尖的角度进行校正调整,之后通过计算机程序控制压电陶瓷扫描管使样品室在平面 X 轴和 Y 轴方向上移动,调整 AFM 探针并使光纤探针随之作同步移动进行操作,同时利用 AFM 系统的微机信号处理和显示系统对操作过程进行实时监控。

[0007] 本发明提出的激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法要实现近场梯度力形成、纳米操作和实时监控与观测三部分功能,能用于活体生物微粒的捕获或纳米微粒的操作与组装。因为激光与多个近场探针相互作用后会产生近场局域耦合增强光场,因此本发明提出的复合纳米操作方法不仅能实现纳米微粒的捕获和转移交接,还可对捕获微粒进行旋转、翻转等空间状态的调节,利用 AFM 系统的纳米级分辨率可实现纳米操作过程的精确观测与定位。与常规远场光镊系统相比,本发明提出的复合纳米操作系统不仅成本低,结构简单、易安装,而且还可以方便地修改光阱位置和强度,能大大提高近场光镊的捕获效率和捕获功能,使近场光镊的实验研究得到新的突破。

[0008] 实现近场光学纳米操作的基本原理是利用探针尖附近局域增强隐失场产生的强梯度力来捕获纳米微粒。处于不均匀光场中的纳米粒子除受到梯度力作用之外,还受到外界干扰力(如重力和布朗运动)的影响,当光场形成的梯度力大于外界干扰力时,对纳米微粒起主导作用的梯度力将微粒捕获在光强极点附近,在针尖处形成由光学梯度场产生的光阱。纳米微粒受到的光梯度力方向可根据光动力学原理来判断,梯度力大小可由时域有限差分法和麦克斯韦应力张量积分计算出来。对于确定的粒子,探针尖端必须产生足够强的梯度力才能将粒子稳定地束缚在光阱中。

[0009] 为获得足够强的梯度力,激光照明金属探针引起的尖端近场增强效应在纳米操作中得到了广泛应用。常规的聚焦光束照明方法容易使针尖受热膨胀而污染、损伤样品,同时激光的直接照射也容易破坏样品表面和 AFM 器件(如 AFM 微悬臂等)。根据近场光学理论,AFM 探针在隐失场的照明下也可实现尖端近场增强。利用近场光镊中光纤探针产生的隐失场照明 AFM 针尖,不仅能准确地从 AFM 探针前部引入激光束,避免样品和 AFM 器件的损伤,同时多近场探针间的耦合场还能改善近场光镊的纳米操作效果。在光纤探针隐失场的照射下,曲率半径为纳米量级的 AFM 探针尖表面中特定直径的金属微粒会产生表面等离子体激元共振,被激发的表面等离子体激元沿表面传输在针尖处能产生局域近场增强,该增强场能克服光纤探针型近场光镊的隐失场偏弱问题。

[0010] 利用本发明提出的方法,可以将 AFM 探针置于光纤探针的近场区域,利用 AFM 探针的场增强效应来克服近场光镊中光纤探针出射功率低、隐失场偏弱的问题,由 AFM 探针局域增强光场与光纤探针出射光场耦合后形成的三维稳定光阱可平衡外界干扰力,从而实现纳米微粒的稳定操作。当采用双光纤探针和 AFM 探针组成多近场探针时,AFM 探针与双光

纤探针间的耦合场也能形成稳定的三维梯度力光阱,通过改变双光纤探针与样品间的空间位置、移动方向和激光功率等参数,可实现对纳米微粒的捕获、移动、释放、拉伸和扭转等复杂三维操作。在纳米操作过程中利用 AFM 的信号处理和显示系统可进行实时监控与观测,精确地实现纳米微粒的观测与定位。本发明提出的复合纳米操作方法能适应更多和更小尺寸的生物细胞、生物分子与纳米微粒非接触、无损伤的纳米操作需求,可扩大激光纳米操作技术在生命科学与表面科学中的应用范围。

[0011] 针对本发明提出的激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法,光纤探针型近场光镊系统包括激光光源、光耦合器和近场探针来形成近场局域光场。近场探针采用尖端具有纳米孔径的镀金属膜光纤探针,该孔径型光纤探针由光纤/硅/氮化硅材料制成,在单模或具有梯度折射率的裸光纤探针的尖端锥面上镀一层金属膜,尖端具有直径小于 100 纳米的通光小孔。为实现复合工作,系统应具备光纤探针与 AFM 探针之间相对位置的控制机构,如间距控制和三维调整台等。光纤探针型近场光镊经 AFM 系统样品室与外部的接口引入样品室,各个功能的机构可以独立,也可以互相交错。

[0012] 本发明提出的激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法具体可包括:探针复合与目标选择定位及纳米操作两部分,所说的探针复合与目标选择定位包括以下步骤:

[0013] (1) 首先采用 AFM 的粗调系统粗略地选择密度和分散度合适的纳米微粒区域;

[0014] (2) 之后通过 AFM 的扫描微进给系统将 AFM 探针逼近纳米微粒,对单个纳米微粒进行精确定位;

[0015] (3) 确定好纳米微粒的选择定位后,利用三维调整台将光纤探针和 AFM 探针的距离缩小到近场范围,在微逼近过程中采用间距测控器使二者保持一定的近场距离以适于纳米操作;

[0016] 所说的纳米操作包括以下步骤:

[0017] (1) 将复合探针移动到待操作纳米微粒处后,调整激光器的输出功率,使光纤探针与 AFM 探针的耦合增强场产生的梯度力适于操作样品;

[0018] (2) 接着调整光纤探针的位置使之适于实现特定动作,捕获纳米微粒后调整 AFM 探针并使光纤探针随之作同步移动;

[0019] (3) 之后利用 AFM 信号处理和显示系统实时监控与观测操作结果,对纳米微粒实现精确的观测与定位;

[0020] (4) 最后将纳米微粒移动到设定位置后调整激光功率,减小梯度力在新位置释放纳米微粒。

[0021] 本发明提出的这种激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法具有如下主要特征:

[0022] (1) 光纤探针型近场光镊与 AFM 探针相复合的系统结构简单、便于调整、成本低;

[0023] (2) 由于近场光纤光强极点不在光束焦点处,所以捕获点十分容易观察;

[0024] (3) 近场光纤深入到样品室的微探头结构在样品池里形成光阱,增大了捕获和操作的范围,同时被捕获的纳米微粒可以自由移动,提高了操作的灵活性;

[0025] (4) 采用 AFM 系统的微机信号处理和显示系统来完成对纳米操作的监测,与传统的通过测量散射光强弱变化来判断粒子定位的方法不同;

[0026] (5) 捕获系统与观测系统分离,对系统中增加激光计量和光谱仪等设备有较大的

自由度。

[0027] 本发明提出的这种激光近场光镊与 AFM 探针相复合的纳米操作方法具有如下优点：

[0028] (1) 克服近场光镊中光纤探针隐失场偏弱、梯度力不足的问题,可实现纳米微粒的稳定操作,为近场光镊的实验研究带来新的突破；

[0029] (2) 集成激光近场光镊与 AFM 探针操作的优点,可完成纳米微粒的捕获、移动、释放、拉伸和扭转等复杂三维操作,弥补 AFM 系统可以实现更小尺度的操作但选择性不如激光近场光镊的缺点,极大地提高纳米操作系统的柔性工作能力；

[0030] (3) 操作方便,可实时监控与观测纳米操作过程,准确地判断纳米粒子是否被捕获,既具精细的结构分辨能力又能实现动态操作与功能研究；

[0031] (4) 操作过程可以避免样品和 AFM 系统器件的损伤,操作与控制机构均由现有纳米操作系统复合而成,结构合理,技术要求不高,成本较低,维修方便。

附图说明

[0032] 图 1 为激光近场光镊与 AFM 探针相复合的近场局域光场分布 :1- 纤芯 ;2- 金属膜 ;3- 截断区 ;4- 锥形针尖 ;

[0033] 图 2 为激光近场光镊与 AFM 探针相复合的近场操作示意图 :5-AFM 探针 ;6- 光纤探针 ;7- 纳米微粒 ;8- 样品池 ;

[0034] 图 3 为单光纤探针型近场光镊与 AFM 探针相复合的结构示意图 :9- 氦氛激光器 ;10- 半波片 ;11- 偏振光束分路器 ;12- 光束分路器 ;13- 功率检测焦耳计 ;14- 光纤耦合器 ;15- 三维调整台 ;16-AFM 信号处理和显示系统 ;17- 反馈电路 ;18- 压电陶瓷扫描管 ;19- 样品室 ;20- 半导体激光器 ;21- 检测器 ;22- 间距测控器 ;23- 硅悬臂梁 ;

[0035] 图 4 为双光纤探针型近场光镊与 AFM 探针相复合的原理结构图 :24- 光纤探针 ;25- 间距测控器 ;26- 三维调整台 ;27- 调准镜。

具体实施方式

[0036] 以下结合实施例和附图对本发明作进一步说明：

[0037] 图 1 为激光近场光镊与 AFM 探针相复合的近场局域光场分布。数值计算模型如图 1(a) 所示,该图为复合探针的剖面图,光纤探针的左段可视为一段向左无限延伸的充有介质的传导区,右段是锥形结构的微米区及亚波长的圆形开口,AFM 探针取有限长圆锥形铜探针。采用三维时域有限差分方法进行仿真计算,可获得复合探针各平面上的光传播特性与近场分布特性,如图 1(b) (c) (d) 所示。计算中纤芯 1 为二氧化硅,光纤外层的金属膜 2 为铝层,有限长 AFM 探针截断区 3 为二氧化硅材料,锥形针尖 4 为铜,计算中金属导电率均设为无限大。光纤探针针尖孔径中心设为坐标原点,入射光取波长为 632.8nm 的均匀平面波,沿 Y 方向偏振并沿 -Z 方向从光纤探针的大端入射,各电场分量分别为 $E_x = E_z = 0, E_y = -1V/m$ 。所需计算的整个三维空间划分为 $120 \times 178 \times 101$ 个网格单元阵列,每个单元格在 XYZ 坐标方向的网格空间步长分别为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10nm$,时间步长为 $\Delta t = \Delta x/2c$,其中 c 为真空中的光速。光纤探针出射孔直径为 200nm,金属膜层 2 厚 140nm,锥角取 90° ,AFM 探针锥形针尖 4 长 600nm,截断区 3 半径为 275nm,光纤探针和 AFM 探针在 Z 轴上的间距取

150nm,入射角为 90° 。复合探针分别在 $x = 0, y = 0$ 和 $z = -150\text{nm}$ 平面内的电场分布如图1(b)(c)(d)所示。从计算结果可以看出,激光向光纤探针针尖传播过程中很大部分被金属膜向内反射并与入射光叠加,在探针内部沿轴线方向形成很强的驻波场,截止面将光纤探针内部光场分成了两部分,探针中直径大于截止直径的部分为波叠加形成的驻波图样,另一部分通过截止面以指数衰减形式传出去,在光纤探针孔径边缘处表现出较弱的场增强现象,随后在AFM探针针尖处产生显著的局域增强场,光纤探针出射的隐失场得到极大增强,这种场增强效应随着AFM探针离光纤探针距离的增加而迅速衰减。综上所述,近场光镊光纤探针与AFM探针相复合的近场分布具有很强的三维梯度场,AFM探针的加入增大了近场光镊的捕获能力,如果将样品置于该梯度场中,必然受到逆梯度方向的力而被捕获。

[0038] 图2为激光近场光镊与AFM探针相复合的近场操作示意图。复合探针局域耦合增强光场对纳米微粒的作用力示意图如图2(a)所示。AFM探针5局域增强光场与光纤探针6出射光场耦合后形成稳定的三维光阱,纳米微粒7在光阱中受到的梯度力大小可由时域有限差分法和麦克斯韦应力张量积分来计算,梯度力方向可根据光动力学原理来判断。由光镊力学原理可知,折射率大于周围介质的纳米微粒7处在非均匀分布的强光场中时,它将受到一个指向光强极点的梯度力,当该梯度力足够克服重力和布朗运动等外界干扰力时,就能够将处于光场中的纳米微粒7捕获并将其束缚在光强极点附近的某个位置上。成功捕获样品后调整AFM探针5并使光纤探针6随之作同步移动。如图2(b)所示,在初始位置I,纳米微粒7被复合探针捕获,当AFM探针5移动时,光纤探针6随之作同步移动,两探针间距离保持一定,纳米微粒7也随之离开样品池8底部,当到达目标位置II时,减小激光功率,纳米微粒7被释放。

[0039] 实施例1:采用单光纤探针型近场光镊与AFM探针相复合的纳米操作方法实现纳米微粒的操作。

[0040] 该方法结构示意图如图3所示,结合图3详细说明复合纳米操作方法的具体步骤如下:

[0041] 氩氦激光器9的输出激光通过半波片10后分出一束光由功率检测焦耳计13作功率监测,此后从光纤耦合器14进入光纤探针6。首先采用AFM的扫描微进给系统将AFM探针5逼近样品,对单个纳米微粒7进行精确定位,此后依靠间距测控器22产生的反馈信息控制三维调整台15来带动光纤探针6,使其逼近AFM探针5并将两者间的距离保持在纳米量级,通过逼近和间距控制完成AFM探针5与光纤探针6的复合过程。复合探针实现对待操作纳米微粒7的选择定位后,调整激光器9的输出功率,使光纤探针6与AFM探针5的耦合增强场产生的梯度力适于操作样品,随后调整光纤探针6的位置使之便于实现捕获。成功捕获纳米微粒7后调整AFM探针5实现特定的纳米操作,借助三维调整台15可对光纤探针6进行校正调整,以使之随AFM探针5作同步移动。在纳米操作过程中,AFM探针5的针尖固定不动,通过压电陶瓷扫描管18由计算机程序控制使样品室19在平面X轴和Y轴方向上移动,利用AFM信号处理和显示系统16实时监控与观测操作结果,对纳米微粒7实现精确的观测与定位。复合探针与纳米微粒7相互作用时,针尖5和样品间的作用力导致硅悬臂梁23发生形变,引起半导体激光器20的反射激光束在检测器21中的位置发生改变,检测器21中不同象限间所接收到的激光强度代表悬臂梁23变形量的大小,在反馈电路17的作用下,微悬臂形变通过压电陶瓷管18伸缩进行补偿从而控制AFM探针5的Z向移动。

将纳米微粒 7 移动到设定位置后,调整激光功率,减小梯度力以在新的位置释放样品。

[0042] 实施例 2:利用双光纤探针型近场光镊与 AFM 探针相复合进行复杂的三维操作。

[0043] 该方法原理结构如图 4 所示,结合图 4 详细说明复杂三维操作方法的具体步骤如下:

[0044] 首先采用 AFM 的粗调系统粗略地选择密度和分散度合适的样品区域,然后利用 AFM 的扫描微进给系统将 AFM 探针 5 逼近纳米微粒 7,对单个纳米微粒 7 进行精确定位。在确定好纳米微粒 7 的选择定位后,利用三维调整台 15 将光纤探针 6 和 AFM 探针 5 的距离缩小到近场范围,在微逼近过程中采用间距测控器 22 使二者保持在一定的近场距离。之后另一个经样品室与外部的接口引入样品室 19 的光纤探针 24 采用同样的方式逼近 AFM 探针 5,通过间距测控器 25 控制其与 AFM 探针 5 和光纤探针 6 的空间距离。在进行纳米操作时,两个光纤探针可以当作独立的近场光镊,分别对不同的操作对象进行纳米操作,也可以相互配合来完成单光纤探针型近场光镊难以完成的任务。通过改变双光纤探针与样品间的空间位置、移动方向和激光入射功率等参数,可实现对纳米微粒 7 的捕获、移动、释放、拉伸和扭转等复杂三维操作。如果将其中一个激光光源选定合适的波长,那么就可能形成光刀,在该系统上利用近场光镊对生物粒子进行捕获、旋转和翻转的同时,还可对细胞或细胞器进行打孔、切割。

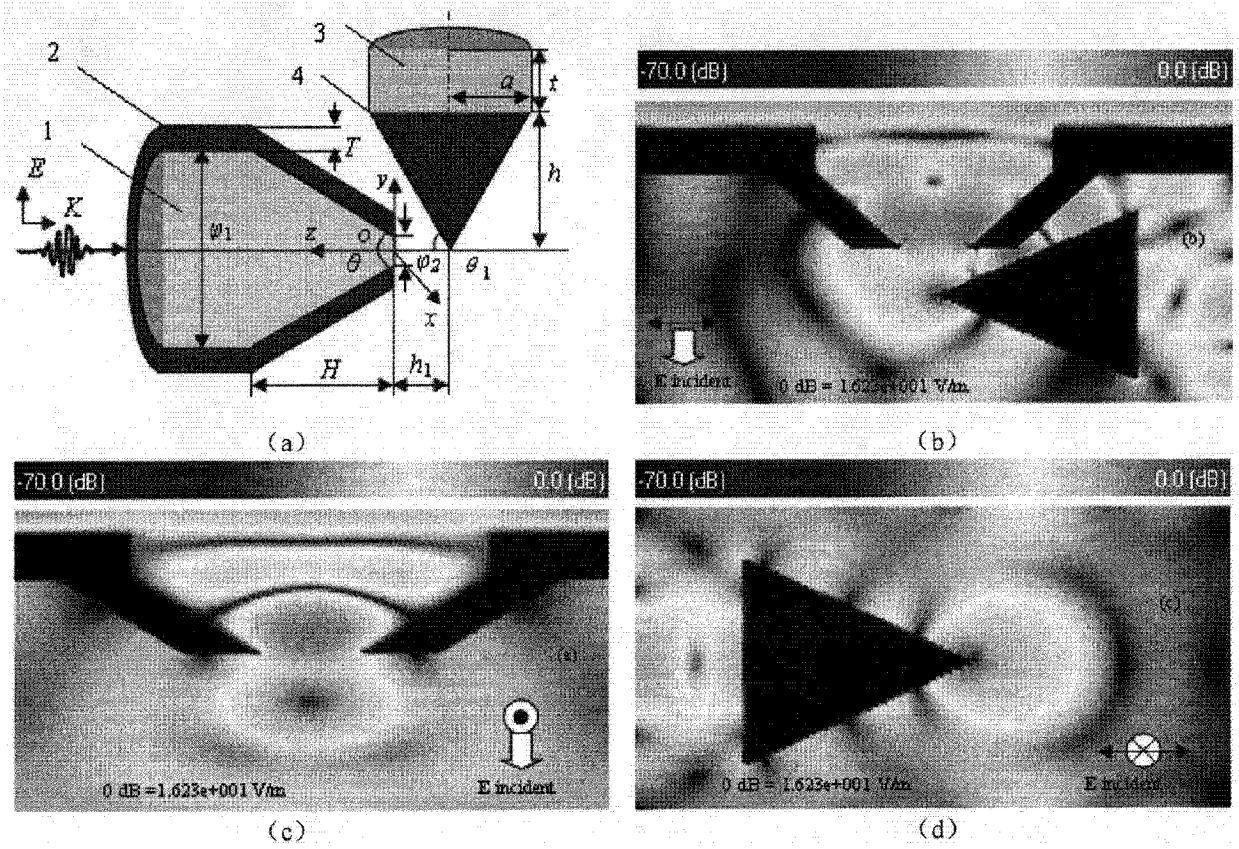


图 1

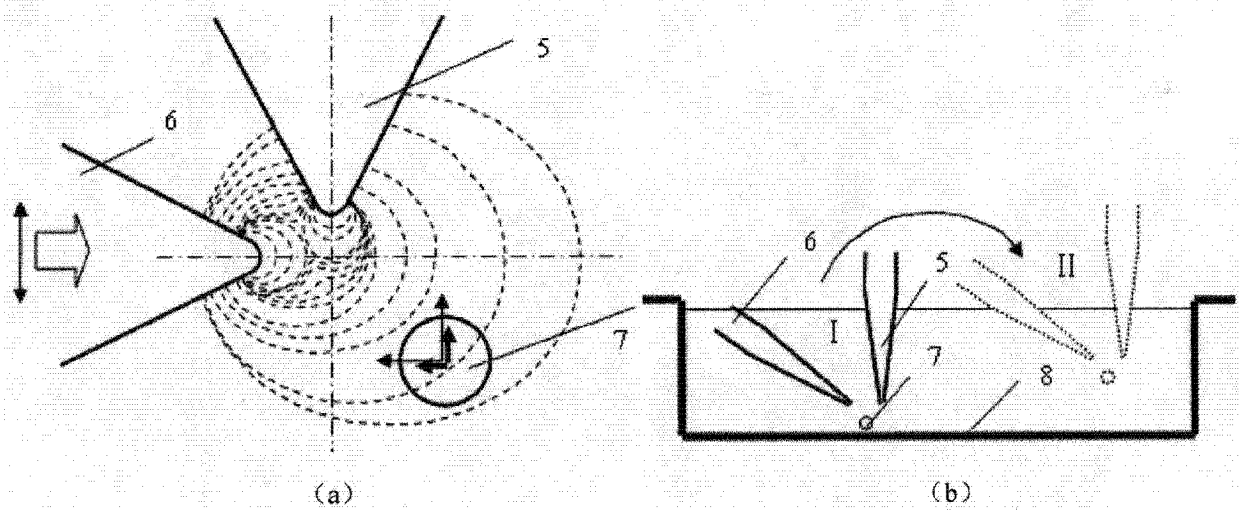


图 2

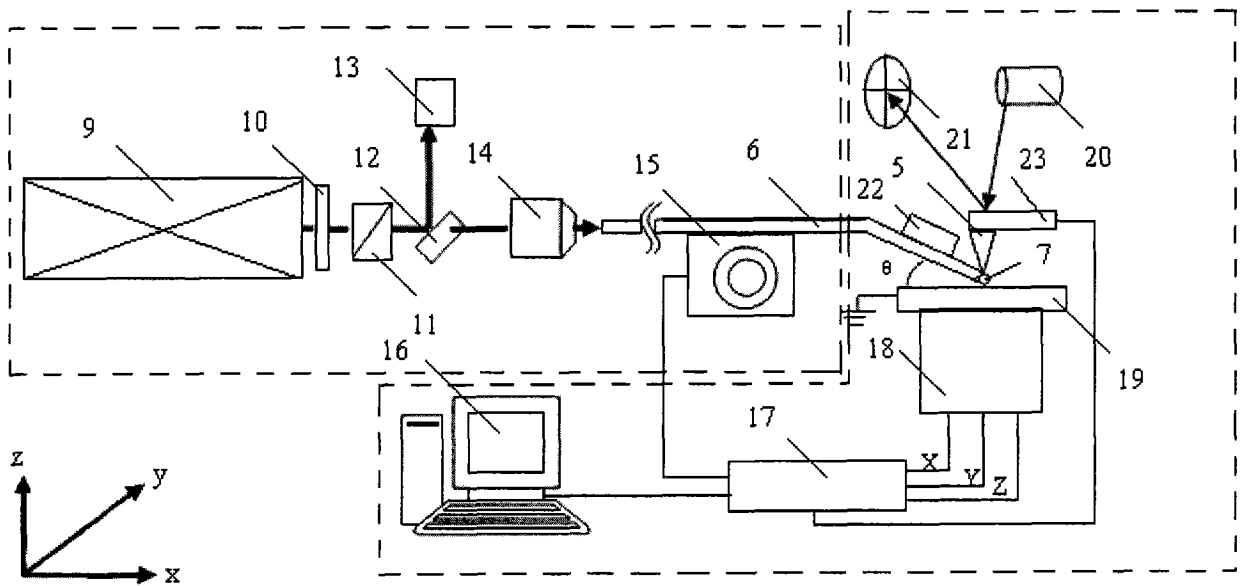


图 3

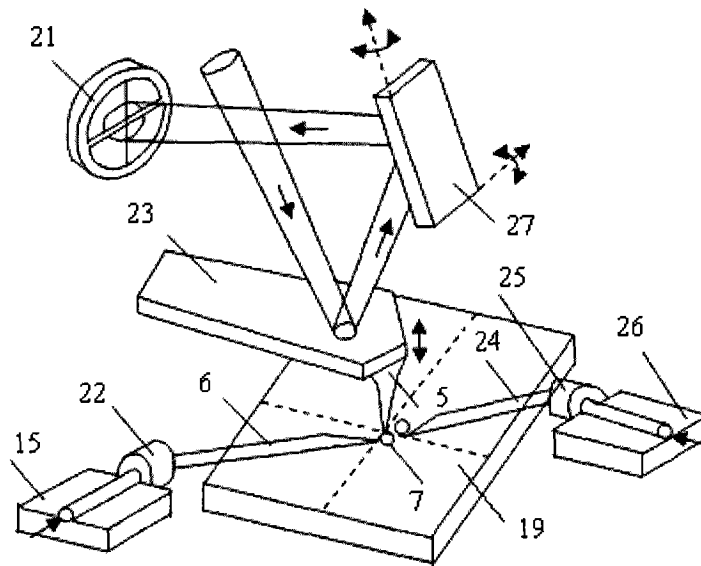


图 4