

文章编号 1004-924X(2011)10-2355-11

镀膜光纤探针近场捕获的模拟与实验

刘炳辉^{1,2*}, 杨立军², 王 扬²

(1 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为提高近场捕获的能力与灵活性,研究了一种利用镀膜光纤探针对接纳米微粒进行近场捕获的方法。采用麦克斯韦应力张量和三维时域有限差分方法建立了近场中纳米微粒的作用力模型,通过光阱力与其他作用力的比较讨论了近场捕获的稳定性,并根据各轴向光阱力的分布情况分析纳米微粒的捕获尺寸与捕获位置。结果表明,只有当微粒尺寸小于探针孔径时才存在捕获效果,探针尖端不同位置出现不同捕获过程,在光阱力的作用下微粒最终被捕获至孔径边缘并形成圆状分布。结合纳米定位与检测方法,设计了全光纤低损耗的光纤探针近场捕获系统,并对120 nm的聚苯乙烯微粒进行了捕获实验。结果表明,采用极低的激光功率能把粒径为激光波长1/7的纳米微粒捕获至光纤探针尖端,并形成内径与探针孔径一致的圆环状分布。该计算与实验结果为近场纳米操作的实验研究打下了基础。

关键词:近场捕获;光阱力;三维时域有限差分法;麦克斯韦应力张量;光纤探针

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2355

Simulation and experiments of near-field trapping using metal-coated optical fiber probe

LIU Bing-hui^{1,2*}, YANG Li-jun², WANG Yang²

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, China; 2. School of Mechatronics Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: richelaw@163.com

Abstract: A near-field trapping method for nanoparticles by a metal-coated optical fiber probe is proposed to improve the nanomanipulation technology. By applying a Maxwell stress tensor and 3D Finite Difference Time Domain (FDTD) methods, the physical properties of trapping stability, particle sizes and trapping positions in the near-field trapping are revealed. The effect of trapping forces acted on a nanoparticle along three axis directions on the trapping positions is studied, and different trapping positions are generated in the aperture edge in polarization direction and the center surface of the probe tip. Numerical results indicate that the Near-field Scanning Optical Microscopy (NSOM) probe is able to trap nanoparticles in a circular shape with lower laser intensity ($\sim 1040 \text{ W/mm}^2$) than that ($\sim 10^5 \text{ W/mm}^2$) required by a conventional optical manipulator. A near-field optical trapping system using

收稿日期: 2011-01-12; 修订日期: 2011-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (No. 90923041); 机器人技术与系统国家重点实验室 (哈尔滨工业大学) 开放研究基金重点项目 (No. SKLRS-2010-2D-10); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. HIT.NSRIF.201171); 高等学校学科创新引智计划资助项目 (No. B07018)

the tapered metal-coated fiber probe is designed. A NSOM probe, a polarized semiconductor laser and a laser scanning confocal microscope are applied to pushing the trapping resolution further down to 120 nm. In experiments, 120-nm polystyrene particles are trapped in multi-circular shape with a minimum size of 400 nm at a resolution of $\lambda/7$ (λ : laser wavelength) and d (d : tip diameter of NSOM probe), respectively, which agrees well with the simulated result. The method proposed in the paper largely promotes the role of near-field optical manipulation.

Key words: near-field optical trapping; optical trapping force; three dimensional Finite Difference Time Domain(FDTD) method; Maxwell stress tensor; optical fiber probe

1 引言

自从 1990 年美国圣荷塞 IBM 公司 Almaden 研究中心的 D. Eigler 等人^[1]首次实现原子搬迁以来,纳米操作便开始引起学者的关注。借助纳米操作技术,人们可以随意加工和组装出三维微机电系统(MEMS)元件,操作微小生物对象或移动微机器人系统^[2-4]。近场光镊作为一种重要的纳米操作技术,利用光的动量改变来实现微粒的无接触、无损伤捕获与操作,已在生物学和表面科学等领域得到了广泛的应用。

近场光镊能突破衍射极限,利用局域增强场所产生的强梯度力来捕获微粒,可实现对粒径为几十纳米至几百纳米的微粒的捕获。在理论计算上,刘秀梅等人^[5]用数值模拟的方法研究了光纤探针的近场光学分布;Tanaka 等人^[6]建立了光纤探针捕获纳米微粒的模型,并对隐失场与微粒的相互作用进行了分析;Chaumet 等人^[7]对利用具有无孔钨探针的近场扫描光学显微镜(NSOM)在玻璃基底上有选择性地捕获纳米微粒进行了研究;王克逸^[8]和张国平^[9]分别对光纤探针型近场光镊捕获纳米介质球进行了理论分析和仿真计算;Okamoto 等人^[10]对玻璃基底上金属纳米小孔的近场捕获能力进行了计算。在实验实现上,Gu 等人^[11-12]通过光学器件将全内反射产生的隐失场进行聚焦,利用聚焦隐失场进行了近场实验研究;Kwak 等人^[13]通过金属膜上的纳米小孔对 200 nm 的乳胶微粒进行了近场捕获,并利用荧光强度与荧光增强进行了观察;Mellor 等人^[14]利用相干隐失波对微粒进行了排列,同时对排列图案与微粒大小和激光偏振态的关系进行了研究。上述

研究表明,利用近场增强效应可以克服外界干扰力实现对纳米微粒的操作,但近场操作技术目前仍处于初始研究阶段,微粒的捕获体积比较大,操作系统柔性工作能力不够,实验上还没有得到令人满意的结果。此外,探针型近场光镊还仅限于理论上的数值模拟,其操作稳定性、捕获尺寸和捕获位置还需作进一步的分析。

由于棱镜全内反射产生的隐失场偏弱,利用全内反射隐失场很难克服外界干扰来操作更小尺寸的纳米微粒,而金属膜小孔捕获方案中光路结构又比较固定,其操作灵活性受到一定限制。为提高近场捕获的能力与灵活性,本文根据探针尖端附近局域增强场能产生强梯度力的现象,采用镀金属膜的光纤探针尖对更小的纳米微粒进行了光学捕获。在近场光镊纳米操作过程中,光纤探针会对样品表面电磁场产生局部扰动,为分析系统的近场捕获能力,需要对探针与样品间的相互作用力进行研究。本文基于三维时域有限差分法(3D FDTD)和麦克斯韦应力张量推导出了近场光阱力的计算公式,并利用该方法计算了 NSOM 镀膜光纤探针近场捕获中纳米微粒所受的光作用力。通过对作用力特性的分析获得了近场捕获的稳定性,微粒捕获尺寸和具体的捕获位置。在此基础上设计了光纤探针近场捕获系统,实现了纳米微粒的捕获,为由下至上的纳米制备技术打下了基础。

2 光阱力计算

纳米微粒的近场捕获是复杂的,并且容易受细微、难以量化的近场性质的影响,为分析系统的近场捕获能力,需要对探针与样品的相互作用力

进行研究。目前对于远场光镊光阱力的计算已有三种模型。当微粒的大小与入射光波长相比非常小时(瑞利粒径 $d \ll \lambda$),采用电磁模型把微粒当作电偶极子进行处理^[15]。当微粒的大小与入射波长相比充分大时(米氏粒径 $d \gg 10\lambda$),可以采用较为简单的射线光学模型进行处理^[16]。当微粒尺寸与波长相近时,目前尚未有成熟的理论处理方法。一般认为,基于电磁场动量守恒定律的计算模型是有效的^[17],该方法也适用于瑞利粒子与米氏粒子。在近场光镊中,由于探针的尖端尺度和微粒的尺度都小于光波长,因此不能用远场光镊中常用的射线光学模型来分析微粒的受力情况,必须采用电磁场理论等适用近场光学的理论方法。由于电磁模型中偶极近似带来的限制以及分别计算梯度力和散射力带来的误差^[15],本文基于三维时域有限差分方法和麦克斯韦应力张量对近场光阱力的计算公式进行推导。

本质上,电磁场与物体的相互作用为电磁场与带电微粒的相互作用,当电磁场入射到物体上,由于物体内的带电微粒受到电磁场的作用而使物体受到一定的总力。物体受力后它的动量会发生变化,同时电磁波的运动状态发生改变,电磁场本身的动量也随之发生变化。考虑到空间某区域有电荷分布,电荷受到的电磁场作用力 \mathbf{f} 由下式表示^[18]:

$$\mathbf{f} = \rho \mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

式中 $\rho = \nabla \cdot \mathbf{D}$, $\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H}$ 。式(1)左边等于电荷系统的动量密度变化率,因而右边应该可以化为含有电磁场动量密度变化和表示场内动量转移的一些量。为此,用麦克斯韦方程组把(1)式右边完全用场量表示:

$$\mathbf{f} = [\epsilon_0 (\nabla \cdot \mathbf{E}) \mathbf{E} + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \cdot \mathbf{B}) \mathbf{B} + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \epsilon_0 (\nabla \times \mathbf{E}) \times \mathbf{E}] - \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数, μ_0 为真空磁导率。右边最后一项代表区域内电磁场的动量密度的改变率,经计算右边方括号内可以化作一个张量:

$$\mathbf{T} = -\epsilon_0 \mathbf{E} \mathbf{E} - \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \mathbf{B} + \frac{1}{2} \mathbf{I} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right), \quad (3)$$

式中 \mathbf{T} 为麦克斯韦应力张量。对于稳态分布的电磁场,电磁场的电磁动量变化率为零,那么物体的动量变化率,也即电磁场作用于物体的总作用力等于麦克斯韦应力张量在界面 S 上的面积分,

亦即:

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{f} d\tau = - \oint_S \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS, \quad (4)$$

基于微分形式的麦克斯韦旋度方程,应用 Yee 元胞进行差分离散^[19-20],使每一个磁场分量周围有 4 个电场分量,同时每一个电场分量周围同样有 4 个磁场分量,电场和磁场在时间和空间上交替抽样。考虑三维连续偏振平面波的入射情形,光波经探针尖与微粒散射后出现退极化现象,出射电磁场在 3 个方向都存在分量,从公式(4)可推得 3 个方向的受力公式:

$$\mathbf{F}_x = \oint_S \left(-\frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2 + \mu_0 \mu_r H^2}{2} \mathbf{e}_x + \epsilon_0 \epsilon_r E_x^2 \mathbf{e}_x + \mu_0 \mu_r H_x^2 \mathbf{e}_x \right) dS, \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_y = \oint_S \left(-\frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2 + \mu_0 \mu_r H^2}{2} \mathbf{e}_y + \epsilon_0 \epsilon_r E_y^2 \mathbf{e}_y + \mu_0 \mu_r H_y^2 \mathbf{e}_y \right) dS, \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_z = \oint_S \left(-\frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2 + \mu_0 \mu_r H^2}{2} \mathbf{e}_z + \epsilon_0 \epsilon_r E_z^2 \mathbf{e}_z + \mu_0 \mu_r H_z^2 \mathbf{e}_z \right) dS, \quad (7)$$

其中 ϵ_0, ϵ_r 分别为真空介电常数和介质的相对介电常数, μ_0, μ_r 分别为真空磁导率和介质的相对磁导率, $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ 分别为 x, y, z 方向的单位矢量。

根据各轴向力公式选定包围微粒区域的合适边界,经过相应的电磁场分量的积分计算,即可得到作用于微粒上的光作用力,锥形镀膜光纤探针近场捕获的三维光阱力计算模型如图 1 所示。根据优化计算^[21],当锥角越大、孔径越大、镀合适膜厚并且入射波长越小时,探针尖端的出射光强越大并具有较大的通光效率,故取锥角 $\theta = 90^\circ$ 、孔径 $\varphi_2 = 400 \text{ nm}$ 、膜厚 $T = 140 \text{ nm}$ 和入射波长 $\lambda = 808 \text{ nm}$ 。光纤探针纤芯折射率为 1.5,探针置于折射率为 1.32 的介质中,半径为 10 nm 的微粒置于针尖附近,微粒密度为 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,折射率为 1.8。激光的入射方向和偏振方向如矢量 \mathbf{K} 和 \mathbf{E} 所示,调节激光的输出功率,使耦合进入光纤探针的功率达到探针的最大光学输入能量 $400 \mu\text{W}$ 。整个计算空间划分为 $320 \times 315 \times 210$ 个网格单元,计算步长为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3 \text{ nm}$,时间步长为 $\Delta t = \Delta x / 2c$,其中 c 为真空中的光速。为了不在网格截断处引起波的明显反射,计算中在截断处设置吸收边界, xoy 面采用 Liao 吸收边界条件,由于 xoz 面的电场是垂直分量,故用 PEC 边界保持垂直分量不变,而 yoz 面则用 PMC 边界保持

因此纵向光阱力是一个与微粒大小有关的物理量, 光纤探针型近场光镊对于相对较小的微粒存在一个 z 向捕获作用, 而对于相对较大的微粒则不能形成捕获。

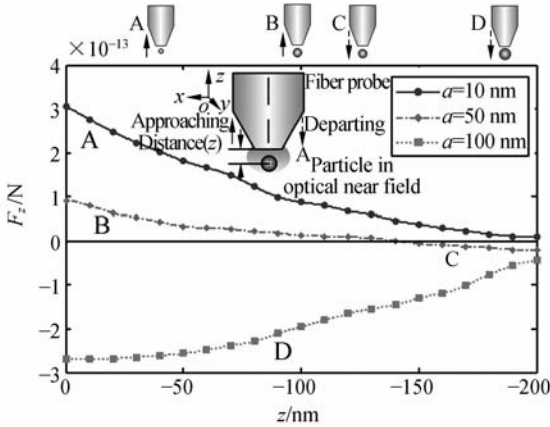


图 2 不同半径微粒的 z 向光阱力分布曲线
Fig. 2 Trapping force acting on the particle with different radii along z -axis direction

微粒半径为 $a=10$ nm, 计算后得到微粒在光场中沿 z 轴在不同位置的 y 向光阱力曲线如图 3 所示。图中纵坐标为 y 向光阱力, 横坐标为偏离光纤探针中心轴线的距离。由于光场在 $x=0$ 平面上具有对称性, 所以图中只给出了微粒位于 y 轴正半轴上的 y 向光阱力分布, y 轴负半轴上的 y 向光阱力分布与此完全相同。曲线中光阱力的负值表示光场对微粒的作用力指向探针轴线的方向, 即有将微粒吸引到轴心线上的趋势。从图中可以看出, 光场的对称性使得位于轴心的微粒所受的 y 向光阱力的合力为 0。当微粒离针尖越近, y 向光阱力的最大值越大, 但其作用范围随之减小。在距离针尖 70 nm 的位置, y 向光阱力经历了一个先增大后减小的过程, 其作用区域也在探针孔径范围左右, 该力的作用始终使微粒向探针轴线方向运动, 并最终将微粒束缚于轴心线上。在距离针尖 10 nm 的位置上, y 向光阱力在靠近探针轴线处表现为吸引力, 随后变为排斥作用力, 在孔径边缘处改变符号再次表现为吸引力, 距离探针轴线越远, y 向光阱力越小。因此, 在 $z=-10$ nm 平面上沿 y 方向有 3 个稳定捕获位置, 微粒有可能被捕获至探针轴线或孔径边缘处。在针尖端面处, y 向光阱力先使微粒向远离探针轴线的方向运动, 然后在孔径边缘处改变作用方向使微粒向探针轴线方向运动, 这表明在孔径边缘

出存在稳定的捕获点。因此在针尖端面处, 微粒沿 y 方向存在位于孔径边缘处的两个捕获点。由此可以得出结论, 随着距离针尖位置的不同, 在近场中沿 y 方向的捕获位置也不同。

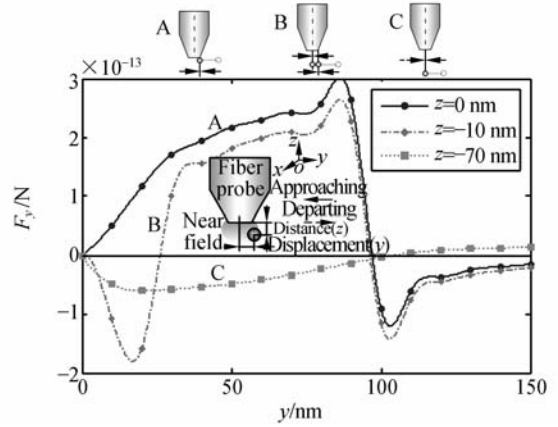


图 3 微粒沿 z 轴在不同位置的 y 向光阱力分布曲线
Fig. 3 Trapping force along y -axis direction acting on the particle at different heights above the aperture plane

图 4 为相同微粒在光场中沿 z 轴在不同位置的 x 向光阱力分布曲线, 该分布曲线与远场光镊横向光阱力的分布曲线类似, 与实际情况符合。图中纵坐标为 x 向光阱力, 横坐标为偏离探针轴线的距离。可以看出, 在锥形镀膜光纤探针的近场光场中, x 向光阱力经历了一个先增大后减小的过程, 在 x 向光阱力的作用下微粒始终向探针轴心运动, 并最终束缚在轴心线上。受入射光偏振性的影响, 微粒在光场中沿 z 轴在不同位置的 x 向光阱力的平均值比相同情况下 y 向光阱力的平均值要小。从图中还可以看出, 由于光场具有对称性, 微粒位于轴心时所受的 x 向光阱力的合力为零, 且随着与针尖距离的减小, x 向光阱力的最大值增大, 其作用范围则随之变小。

结合纵向和横向光阱力分布属性来看, 当直径很小的纳米微粒置于离探针出射孔非常近的 y 向孔径边缘区域时, 它在光阱力的作用下将被捕获至孔径边缘处, 而当微粒置于针尖近场的其他区域时, 它将向探针轴线运动, 并最终被捕获到针尖中心表面处。对于直径较大的纳米微粒它将始终向探针轴线运动, 并最终捕获至针尖中心表面。根据光纤探针横截面光场分析可知^[26], 当线偏振光经过近场光纤探针后会出现退极化现象, 由于出射光场产生了其他偏振分量, 此时光纤出射光

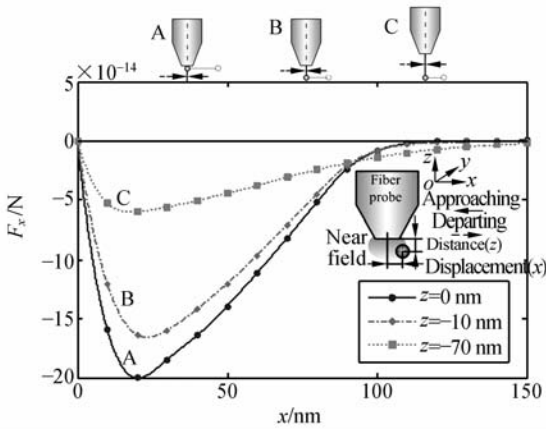


图 4 微粒沿 z 轴在不同位置的 x 向光阱力分布曲线
 Fig. 4 Trapping force along x -axis direction acting on the particle at different heights above the aperture plane

场实际变成为主偏振方向为入射偏振方向的部分偏振光。此外,由于单模非保偏光纤存在随环境温度和应力变化的双折射现象,实验中光波在光纤中传输时其偏振态会发生随机变化。根据入射光为 y 向偏振时的近场光阱力分析,可得入射光为随机偏振时微粒在探针近场范围内的捕获情况,如图 5 所示。与理想条件下微粒被捕获至针尖的两极点位置不同,在实际情况中当直径很小的纳米微粒置于离探针出射孔非常近的孔径边缘区域时,它将被捕获至孔径边缘处而成圆状分布。

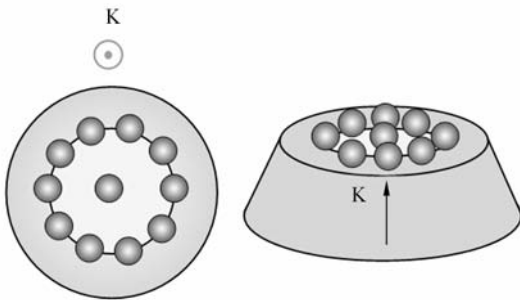


图 5 实际情况下光纤探针近场捕获位置示意图
 Fig. 5 Schematic diagram of trapping position using an actual metal-coated fiber probe

3 实验装置的设计

在上述光阱力特性分析的基础上,本文设计了光纤探针近场捕获系统,如图 6 所示。实验系

统中显微镜是重要的装置,它不仅提供了显微观测手段,而且在捕获过程中也起着重要作用。本实验采用名义直径为 120 nm 的聚苯乙烯微粒作为操作对象,其折射率为 1.8,密度为 $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。由于微粒尺寸超出了光学显微镜的分辨极限^[27],为判断纳米微粒的捕获情况,本系统选用激光扫描共焦显微镜(LSCM)(OLYMPUS OLS3000)来对捕获过程进行实时观测。捕获光源采用波长为 808 nm 的半导体激光器(Lumics LU0808M100),为实现功率的连续调节,在光源保偏尾纤后加法兰可调光衰减器,通过调节驱动源电流和功率衰减器来调节功率。由于对光纤探针直接出射功率的检测受到纳米微粒、样品室尺寸等诸多因素的限制,因此系统采用分光比为 94.8:5.2 的光纤分路器对出射功率进行间接测量。输出的保偏激光经光纤偏振旋转器(OZ Optics)来调整偏振方向,随后由光纤分路器(OZ Optics)分出一束激光给光纤功率计(Connet JW3203R)作功率监测,另一束通过光纤适配器直接与通光孔径为 400 nm 的 NSOM 单模光纤探针(NT-MDT MF004)连接。由于 NSOM 光纤不具有保偏性,此时激光偏振方向会发生改变。这种全光纤的低损耗耦合光路避免了使用空间光学器件,解除了需将光学器件固定于光学平台上的限制,其良好的光路传输性能将大大增强纳米捕获的稳定性。

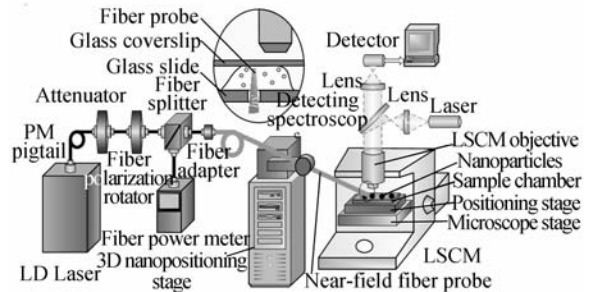


图 6 光纤探针近场捕获实验系统示意图
 Fig. 6 Schematic diagram of the experimental setup for trapping particles in near-field using a NSOM probe

为调节光纤探针与待捕获微粒之间在三维空间上的相对位置,要求调整台在三维方向上能进行连续地调节。三维调整台的设计要考虑以下几个因素:根据实际需要选择合适的操作方式,能够对近场捕获的位置灵活控制;由于近场捕获对象

多为纳米量级的物体,所以光纤调节精度至少为纳米量级;近场捕获系统只能产生飞牛量级的捕获力,对振动干扰敏感,所以系统的隔振性能与稳定性要好。考虑到以上因素,系统中光纤探针的角度调节采用一维角度调节转台,位移调节采用三维压电纳米定位工作台(PI P-517.3)。为获得更大的定位尺寸,在纳米运动平台下增加一个三维微位移工作台。

将聚苯乙烯样品溶液置于载玻片上后,玻片上大范围的液体在重力作用下流动,使观察无法进行。为解决样品溶液流动性的问题,实验中用玻璃胶形成狭小空间,利用毛细现象原理将少量样本液体注入载玻片与盖玻片中,从而形成一个较稳定的观察区域。利用这种样品池激光扫描共焦显微镜在 14 400 倍 ($100\times$ objective, $6\times$ zoom) 的最大放大倍率下能清楚地观察到盖玻片下表面处 120 nm 的聚苯乙烯微粒。为了获得一个适于观察的稳定捕获区域,在上述样品池底部玻片的边缘处尝试加工出一个微小开口,再从开口端将光纤探针引入捕获区域并调节至盖玻片底部。实验过程中发现,由于开口处的样品溶液太薄,实验进行起来并不方便。为防止样品溶液的过快蒸发,对样品池进行改进使其半封闭腔高度增加至 1 mm,如图 6 中的插入图所示。当激光扫描共焦显微镜的成像截面到了样品深处,观察得到的图像质量会急剧下降。当盖玻片厚度大约为 170 μm 时,样品厚度应小于 50 μm ,虽然实验中采用的薄盖玻片(约 100 μm)能提供较大的工作距离,但此时样品溶液的厚度(约 1 mm)远大于该工作距离,因此实验观察结果较为模糊。

4 实验与结果

图 7 所示为光纤探针近场捕获实验装置图。激光扫描共焦显微镜上配备的图像处理系统可以对捕获过程进行实时观察,根据观察结果随时对系统进行参数调整,配备的充气平衡精密隔振系统可以消除外界干扰。三维压电纳米定位工作台的控制箱由压电陶瓷(PbZrTiO_3 , PZT)驱动放大模块、伺服控制模块和显示/接口模块组成,实验中选用电容传感器伺服控制模块、三通道低压压电陶瓷驱动放大器模块和含有 IEEE-488 及 RS-232 接口的显示模块,并采用外部信号控制。由

于实验样品为聚苯乙烯小球悬浮液,为防止微球聚团,样品经超声波水浴振荡 30 min 后混合均匀,之后将样品用超滤蒸馏水进行稀释。

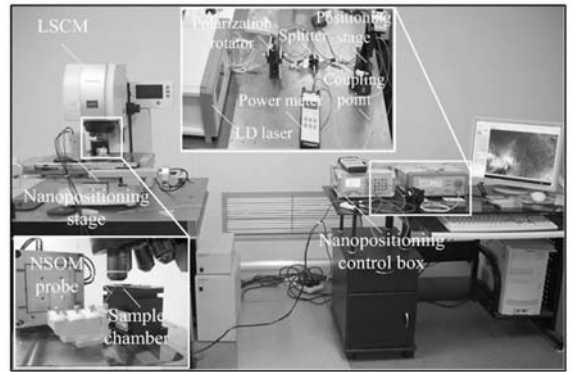


图 7 近场捕获实验系统图

Fig. 7 Experimental equipment of near-field optical trapping

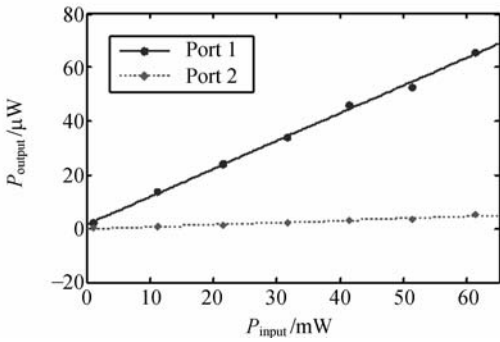
考虑到后向反射光对光源功率稳定性的影响,实验中尽量减少光纤活动连接头的使用。光路中的光学器件连接部分都采用 APC 型接头方式,以减小后向反射,由于 NSOM 光纤的入射端为裸光纤,故该处采用热融焊接的方式将其与带 APC 型接头的尾纤连接。图 8 给出了光纤焊接的具体过程,实验中采用光纤熔接机(FSM-45F-LDF)对光纤进行焊接。在热融焊接过程中,首先对尾纤与 NSOM 光纤的焊接端进行切割、清洗,切割后两光纤端面倾斜角仅相差 0.1° ;然后对光纤切平端实施加热使其纤芯发生热扩散;经过对通光功率的监测,当热扩散使 NSOM 光纤的纤芯直径和数值孔径与尾纤接近时对两光纤进行焊接;最后对焊接部分进行涂覆以完成 NSOM 光纤与尾纤的低损耗连接。



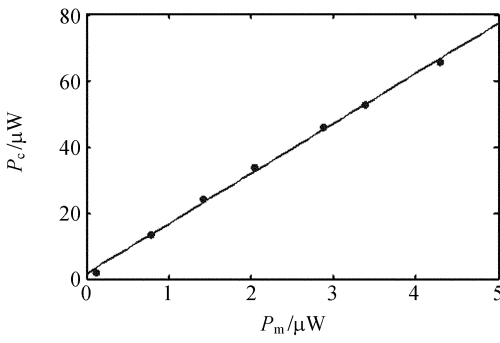
图 8 近场光纤与带尾纤光源的低损耗耦合

Fig. 8 Low-loss coupling between the NSOM fiber probe and the PM pigtail

纳米捕获中微粒受力与激光功率成正比,为实现稳定捕获,必须先对功率进行标定。调节激光器的驱动电流使其对光路的输入功率能够进行连续调节。在功率衰减器固定的衰减率下,通过标定激光输入功率与光纤分路器两个输出功率的关系,可以得到全光纤耦合光路的线性损耗情况,如图 9(a)所示。为避免损坏 NSOM 光纤探针,实验中将耦合进入光纤的功率控制在其最大输入功率 $400 \mu\text{W}$ 以下,图 9(b)为耦合进入 NSOM 光纤探针的激光功率与功率计显示功率的关系。通过光纤探针入射功率—检测功率曲线可知,检测功率必须维持在 $26.33 \mu\text{W}$ 以下,才不致损伤 NSOM 探针。



(a) 输入功率-分路器输出功率曲线
(a) Input power-output power curve

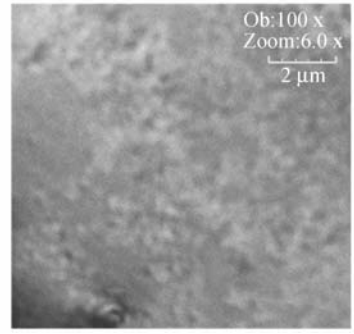


(b) 近场光纤探针入射功率-检测功率曲线
(b) Coupled power-measured power curve

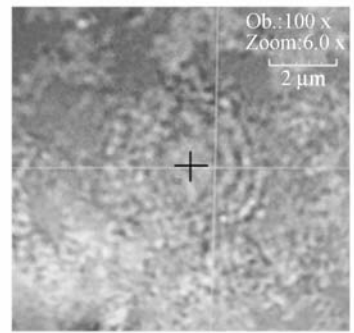
图 9 全光纤光路系统的功率标定

Fig. 9 Power calibration of all-optical fiber near-field trapping system

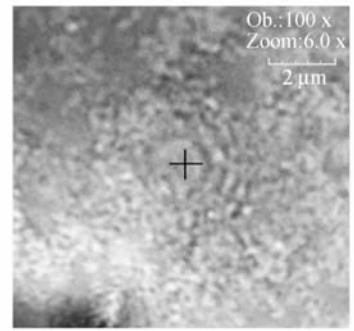
样品池置于共焦显微镜的载物台上,实验中光纤探针用钢管进行保护,调节好光纤探针的插入角度后,利用三维调整台将光纤探针探入到载玻片下的液体样品池内,并调节至盖玻片底部。



(a) 未开启光源
(a) Before turning on the laser



(b) 开启光源后
(b) After turning on the laser



(c) 关闭光源后
(c) After turning off the laser

图 10 NSOM 光纤探针近场捕获纳米微粒的图像
Fig. 10 Near-field trapping images of nanoparticles using the NSOM probe

将调节好插入位置和角度的探针移入视场后调整激光器的输出功率,使光纤探针针尖处增强场产生的光阱力适于捕获样品,如图 10(a)所示。光纤探针放置在盖玻片的底部位置上,光源打开一段时间后发现,视野内悬浮的聚苯乙烯微粒开始

运动,不同位置的小球运动方向和速度有所不同,调整检测功率到 $20 \mu\text{W}$ 后发现,光纤探针附近浮起的微粒都向针尖方向运动,并且距离越近微粒移动速度越快,最终运动到针尖的微粒出现了预期的捕获现象,形成了规则的圆形分布。由于微粒浓度较大,在光阱力的作用下外层微粒也逐渐向探针针尖方向运动,最终被捕获形成多重圆环形状,如图 10(b)所示。图 10(c)显示,当光源关闭后,在外界干扰力的作用下微粒的排布形状出现了一定的破坏。

根据对近场操作中各种力的分析可知,在毛细管力和光阱力的共同作用下微粒将更容易被捕获。由于实验中的微粒尺寸已达到扫描共焦显微镜的观察极限,故观察结果较为模糊,但通过放大实验结果图可以看到,在光阱力的作用下微粒被捕获至探针孔径边界区域,形成内层圆形分布(直径约 400 nm),而在探针孔处的毛细管力作用下针尖周围的微粒也被捕获至探针附近,从而形成外层圆形分布(分布直径约 $3\sim 4 \mu\text{m}$)。虽然微粒在探针附近形成的捕获区域已超出了近场范围,但该实验结果表明在两种力的共同作用下微粒最终能捕获至探针附近并形成多重圆环形状。

当利用棱镜全内反射产生的隐失场对微粒进行操作时,微粒形成线状排列,而当利用金属膜上的小孔将微粒捕获于孔内时,微粒无规则分布。与现有实验结果相比,本实验不仅将微粒捕获于探针孔径处,还将微粒排列成多重圆环形状,实现了直径小至 120 nm 的微粒的捕获。根据现有研究成果可知^[28],当探针出射孔径为微米级时,若

探针出射能量密度较大,则探针尖端会产生气泡并出现微对流现象。对于本实验中探针孔径为纳米级的情况,下阶段的研究任务是增大激光能量,对探针出射光场在水中可能形成的微对流情况进行仿真,并就对流溶液中微粒的聚集状态进行相应分析,以获取微粒在探针附近的新的捕获情况。

5 结 论

本文根据动量守恒原理,结合麦克斯韦应力张量方程和三维时域有限差分法对光纤探针近场捕获中的光阱力进行了计算,并设计实验系统对计算结果进行了验证。通过对光纤探针近场捕获稳定性、所捕获微粒尺寸和位置的分析可知,只有当微粒尺寸小于探针孔径时才存在捕获效果,并且随初始位置的不同,微粒将被捕获至孔径两边缘或针尖中心表面,而在实际情况下纳米微粒将被捕获至孔径各边缘而形成圆状分布。实验结果表明,NSOM 探针产生的近场光阱力能克服各种干扰力的影响,对 120 nm 的纳米微粒进行捕获并形成内径为 400 nm 的多层圆形分布。该系统可以方便地调整光阱位置和强度,大大地提高了近场捕获效率,为后续的近场操作试验打下了良好的基础。为分析微粒在高能量密度的探针尖端处的捕获情况,下一步需要对探针出射光场在水中可能形成的微对流情况进行研究。同时为克服纳米微粒的检测问题,可进一步地采用掺荧光材料的实验样品,通过荧光检测来准确获得纳米微粒的捕获状态。

参考文献:

- [1] EIGLER D M, SCHWERIZER E K. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope [J]. *Nature*, 1990, 344: 524-526.
- [2] HWANG J, POTOTSCHNIG M, LETTOW R, *et al.*. A single-molecule optical transistor [J]. *Nature*, 2009, 460: 76-80.
- [3] SANG IE, YASUHIRO T, TERUTAKE H. Novel contact probing method using single fiber optical trapping probe [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(3): 235-242.
- [4] BEAULAC R, SCHNEIDER L, ARCHER PI, *et*

al.. Light-induced spontaneous magnetization in doped colloidal quantum dots [J]. *Science*, 2009, 325(5943): 973-976.

- [5] 刘秀梅, 王佳. 用时域有限差分方法研究光纤微探针近场分布特性[J]. *光学学报*, 2001, 21(10): 1234-1238.
- LIU X M, WANG J. Characterization of near-field distribution of optical fiber probe by FDTD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 21(10): 1234-1238. (in Chinese)
- [6] TANAKA M. Boundary integral equations for computer aided design of near-field optics [J]. *Electronics and Communications in Japan*, 1996, 79

- (11):101-108.
- [7] VESPERINAS M N, CHAUMET P C, RAHMANI A. Near-field photonic forces [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 2004,362:719-737.
- [8] WANG K Y, JIN Z, HUANG W H. The possibility of trapping and manipulating a nanometer scale particle by the SNOM tip [J]. *Optics Communications*, 1998, 149:38-42.
- [9] ZHANG G P, ZHU Z R, LI Y P, *et al.*. Numerical analysis of near-field optical trapping using tapered fiber probe [J]. *SPIE*, 2000, 4082:321-328.
- [10] OKAMOTO K, KAWATA S. Radiation force exerted on subwavelength particles near a nanoaperture [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(22): 4534-4537.
- [11] GU M, KURIAKOSE S, GAN X S. A single beam near-field laser trap for optical stretching, folding and rotation of erythrocytes [J]. *Optics Express*, 2007, 15(3):1369-1375.
- [12] REECE P J, CHÁVEZ V G, DHOLAKIA K. Near-field optical micromanipulation with cavity enhanced evanescent waves [J]. *Applied Physics Letters*, 2006,88:221116.
- [13] KWAK E S, ONUTA T D, AMARIE D, *et al.*. Optical trapping with integrated near-field apertures [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004,108(36):13607-13612.
- [14] MELLOR C D, BAIN C D, LEKNER J. Pattern formation in evanescent wave optical traps [J]. *SPIE*, 2005,5930:59301C-1-10.
- [15] NEUMAN K C, BLOCK S M. Optical trapping [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004,75 (9):2787-2809.
- [16] SVOBODA K, BLOCK S M. Biological applications of optical forces [J]. *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structures*, 1994, 23 (1):247-285.
- [17] BARTON J P, ALEXANDER D R, SCHAUB S A. Theoretical determination of net radiation force and torque for a spherical particle illuminated by a focused laser beam [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66:4594.
- [18] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996,14(3):302-307.
- [19] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 第一版, 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 232.
- GE D B, YAN Y B. *Electromagnetic Wave and FDTD* [M]. First Edition, Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2002:232. (in Chinese)
- [20] TAFLOVE A. *Computational Electrodynamics: the Finite Difference Time Domain Method* [M]. Second Edition, Norwood: Artech House, 2000:156.
- [21] 刘炳辉, 杨立军, 王扬, 等. 光纤探针型近场光镊光强分布特性的数值模拟[C]. 第八届中国国际纳米科技研讨会, 2009:Z048.
- LIU B H, YANG L J, WANG Y, *et al.*. The numerical simulation of the near-field properties of near-field optical tweezers probe [C]. *8th Chinese International Nanoscience and Technology Symposium*, 2009:Z048. (in Chinese)
- [22] MUR G. Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1981, EMC-23(4):377-382.
- [23] LIU B H, YANG L J, WANG Y. Simulation of near-field optical manipulator using the combination of a NSOM probe and an AFM metallic probe [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011,109(10): 104317-104317-6.
- [24] LIU B H, YANG L J, WANG Y, *et al.*. Particles nanomanipulation by the enhanced evanescent field through a near-field scanning optical microscopy probe [J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2011,169(1):171-177.
- [25] HU ZH, WANG J, LIANG J W. Manipulation of yeast cells by a tapered fiber probe and measurement of optical trapping force [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2005, 47:S9-S12.
- [26] LIU B H, YANG L J, WANG Y. Light distribution analysis of optical fiber probe-based near-field optical tweezers using FDTD [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 188:012-029.
- [27] 朱星. 近场光学与近场光学显微镜[J]. 北京大学

学报(自然科学版), 1997, 33(3):396.

ZHU X. Near-field optics and near-field microscopy: the basic principles and their applications [J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 1997, 33(3):396. (in Chinese)

[28] TAYLOR R, HNATOVSKY C. Trapping and mixing of particles in water using a microbubble attached to an NSOM fiber probe [J]. *Optics Express*, 2004, 12(5):916-928.

作者简介:



刘炳辉(1981—),男,湖南衡阳人,博士研究生,2005年于吉林大学获学士学位,2007年于哈尔滨工业大学获硕士学位,主要研究方向为激光近场纳米操作技术。E-mail: richelaw@163.com



杨立军(1972—),男,辽宁锦州人,博士,副教授,1995年于辽宁工学院获学士学位,2002年、2007年于哈尔滨工业大学分别获硕士、博士学位,主要研究方向为激光无模成型加工与复合纳米操作技术等。E-mail: yljtj@hit.edu.cn

导师简介:



王 扬(1960—),男,四川成都人,博士、教授、博士生导师,1982年、1988年、1999年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士、博士学位,主要研究方向为特种加工及特殊材料激光加工。E-mail: wyyh@hit.edu.cn

●下期预告

激光电子经纬仪动态跟踪引导系统设计

周 虎,郝继贵,张滋黎,叶声华

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

为提高电子经纬仪工作效率,实现大空间范围内目标点的动态测量,设计了一种基于视觉的激光电子经纬仪跟踪引导系统。首先,介绍了跟踪引导系统结构组成并分析了外置扫描设备以及激光电子经纬仪的运动特性。接着,在建立扫描设备运动学模型的基础上,说明了利用空间坐标转换关系,通过光轴搜索法实现经纬仪激光点自动引导的策略。然后,说明了镜头的变焦控制方法。最后,提出了基于扩展 Kalman 滤波估值的运动目标动态跟踪方法,最终将动态目标物与经纬仪激光点同时定位于摄像机视场中心区域。结果:实验结果表明,所提方法能够正确预测估计运动目标状态,经纬仪激光点引导精度最终可达 $0.08^\circ/\text{m}$ 。该系统结合了激光跟踪动态测量以及电子经纬仪不受测量目标类型限制的优势,使得基于激光电子经纬仪的传统空间角度交汇方法应用于动态精密测量领域成为可能。