激光波长对纳米光纤俘获和输送 聚苯乙烯微球的影响*

李英 胡艳军

(广东医学院信息工程学院,东莞 523808)

(2013年8月26日收到;2013年10月3日收到修改稿)

研究激光波长对纳米光纤俘获和输送聚苯乙烯微球能力的影响.理论分析结果表明,当光纤直径和激光 功率一定时,随着激光波长的增大,光纤外面倏逝波的分布范围和强度都变大,微球所受到的光梯度力和散射 力也随之增大,这意味着纳米光纤俘获和输送微球的能力随着激光波长的增大而增强.实验现象和理论预测 完全符合.将三种波长的激光分别导入直径为600 nm的光纤中,通过实验观察发现,随着激光波长的增大, 俘获微球所需要的临界功率变小,意味着光纤俘获微球的能力增强;而当激光功率一定时,随着激光波长的增 大,微球的运动速度也增大,说明光纤输送微球的能力增强.

关键词:激光波长,纳米光纤,倏逝波,俘获和输送 PACS: 87.80.Cc, 42.50.wK, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.63.048703

1引言

光俘获和操控微纳颗粒、病毒及生物分子的方 法在物理、医学、微纳光子学及生物光子学等领域 具有非常广泛的应用前景^[1-10].随着光操控技术 的日益发展,研究如何构筑结构紧凑、成本低廉、灵 活方便的光操控系统,已成为当前的热点之一.由 单模光纤通过热熔法拉制而成的纳米光纤,具有制 作简单、成本低廉、柔韧性好等特点,在尺寸上也有 明显的优势,是构筑紧凑型光操控系统的最佳选择 之一. 纳米光纤表面存在着较强的倏逝波, 可以将 光纤附近的微颗粒俘获到光纤表面,并使之沿着光 的传播方向运动[11-13]. 光纤接头与带有单模光纤 输出端口的激光器直接连接,插入损耗非常小,可 以在较低的激光功率下长距离地操控微颗粒. 比 如,将直径为700 nm的光纤置于微流通道中,导入 与微流方向相反的激光后,可以实现颗粒在微流槽 中的反向输送^[14].借助纳米光纤良好的柔韧性的 特点,可沿任意弯曲的路径输送聚苯乙烯微球[15]. 当不同波长的激光导入相同直径的纳米光纤中时, 光纤表面倏逝波的分布不同,对颗粒的俘获和输 送能力也是不同的.因此,本文主要研究激光波长 对纳米光纤俘获和输送聚苯乙烯微球能力的影响. 首先利用时域有限差分(3D-FDTD)方法对直径为 600 nm 的光纤中导入不同波长的激光时的光场分 布情况进行模拟,并在此基础上分析计算微球所受 到的光力,得到激光波长与光纤俘获和输送能力的 关系,然后通过实验给予进一步的证明.

2 理论分析

当激光在置于水中的纳米光纤中传输时,有一部分光能量以倏逝波的形式在光纤外面的包层水中传播. 倏逝波能对处于其中的颗粒产生光梯度力(F_g)和散射力(F_s)的作用.其中,光梯度力与光强梯度成正比,将颗粒拉向光强最强处,在光梯度力的作用下,颗粒将被俘获到光纤表面;光散射力与光的强度成正比,方向与光的传播方向一致,在

^{*} 湛江市科技攻关计划 (批准号: 2013B01257) 资助的课题.

[†]通讯作者. E-mail: xingziliying@126.com

^{© 2014} 中国物理学会 Chinese Physical Society

光散射力的作用下,颗粒将沿着光纤表面运动^[16].为了弄清倏逝波在光纤表面的分布情况,我们用 3D-FDTD 方法模拟计算了纳米光纤中导入不同波 长的激光时,其表面光场的分布情况.在模拟中,取 光纤和水的折射率分别为1.46和1.33,我们主要考 虑三种波长的激光,即 $\lambda_a = 532 \text{ nm}, \lambda_b = 650 \text{ nm}, \lambda_c = 980 \text{ nm}, 光纤的直径为600 \text{ nm}, 光纤中的激 光功率归一化到1 W. 图1表示导入三种波长的激光,随$

着激光波长的增大,光纤外面倏逝波的分布范围 和强度均变大. 由模拟计算可知波长为532,650 和980 nm的激光所产生倏逝波的穿透深度分别为 360,460和690 nm. 即当激光功率一定时,光纤外 面的倏逝波在导入长波长的激光时会更强. 这个现 象说明,当激光波长较小时,大部分光能量都被限 制在光纤内,光纤表面的倏逝波也相对较弱. 而随 着激光波长的增大,意味着更多的光能量在光纤外 面传播.



图 1 导入三种波长的激光时, 直径为 600 nm 的光纤横截面的电场分布

颗粒在光纤表面附近所受到的光力可由麦克 斯韦张量沿着颗粒表面的积分计算获得:

$$\langle T_{\rm M} \rangle = DE^* + HB^* - 1/2(D \cdot E^* + H \cdot B^*)I,$$
 (1)

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{o}} = \oint_{S} (\langle \boldsymbol{T}_{\mathrm{M}} \rangle \cdot \boldsymbol{n}) \mathrm{d}\boldsymbol{s},$$
 (2)

(2) 式中, *F*。即为颗粒所受到的光力, 该力有两个 方向的分量, 沿着光传播方向的分量为光散射力 (*F*_s), 是由于颗粒对光场的散射引起的, 使颗粒沿 着光的传播方向运动; 与散射力方向垂直的力为光 梯度力(*F*_g), 是由于电介质颗粒在不均匀的电磁场 中的极化所引起的, 方向指向电磁场较强的方向, 使得颗粒朝着光场较强的地方运动, 在光梯度力的 作用下, 颗粒将被俘获到光纤表面.

用 3D-FDTD 方法模拟计算直径为 700 nm 的 聚苯乙烯微球置于光纤表面时所受到的光力,在 模拟中,聚苯乙烯微球的折射率为 1.59,光纤的直 径为 600 nm,导入的激光波长分别为 532,650 和 980 nm. 图 2 表示聚苯乙烯微球置于光纤表面时光 纤纵向截面的电场分布情况,根据 (2)式可计算出 微球置于光纤表面时所受到的光梯度力和散射力. 由图可以看出,当激光波长从532 nm增大到650 和980 nm时,微球所受到的梯度力(Fg)从11.6 pN 增大到15.5和26.1 pN,散射力(Fs)从6.7 pN增大 到8.2和14.3 pN.即当光纤和微球的直径一定时, 微球所受到的光梯度力和散射力均随着激光波长 的增大而增加.这是因为随着激光波长的增大,倏 逝波的穿透深度也变大,意味着更多的光能量在光 纤外面传播,即作用于微球的倏逝波强度和范围均 变大,而微球所受到的光散射力和梯度力是由麦克 斯韦张量沿微球表面的积分计算获得的,因此微球 所受的光力也随之变大.也就是说,随着激光波长 的不断增大,光纤对微球的俘获和输送能力也是逐 渐增强的.

3 实验装置

实验装置如图 3 所示,纳米光纤是锥形光纤均 匀的腰部部分,是由普通单模光纤通过热熔法拉制 而成,具体拉制过程如下:首先,将单模光纤的中 间部分剥去保护层和涂覆层,得到裸光纤,并将裸 光纤的两端分别固定在两个三维的调节架上,将酒 精灯的火焰调节成中等火焰并保持稳定,用外焰加 热裸光纤,直至光纤充分软化时,快速地拉伸光纤;







图3 实验装置示意图

当光纤的直径达到5μm左右时,调小酒精灯的火 焰,使光纤受热减慢,拉伸速度也减慢,直到光纤直 径达到实验所需要的尺寸为止.光纤的尺寸越小, 光纤外面倏逝波所占的比例就越大.实验中所使用 的光纤直径约为600 nm,其两端用两个高精度的 三维调节架固定.其中的一端通过接头直接与带有 单模光纤输出端口的激光器相连接,插入损耗非常 小.实验中,将直径为700 nm的聚苯乙烯微球用去 离子水稀释(微球和水的比例为1:1000),并利用 超声振动机将聚苯乙烯微球水溶液超声20 min,使 微球在水溶液中均匀分布.接着,用移液管滴几滴 聚苯乙烯微球水溶液到玻璃片上光纤所在的位置, 直到光纤完全浸入到水溶液中为止.接有照相机的 光学显微镜直接与计算机相连接,可利用视频软件 实时监测实验现象.

4 实验结果与讨论

首先观察直径为600 nm的光纤中导入波长为532 nm的激光时,对700 nm的聚苯乙烯微球俘获和输送的情况.输入功率是在激光光源的输出端用功率计测得.通过实验发现,当激光功率增大到11 mW时,光纤附近的微球将会在倏逝波所产生的光梯度力的作用下被俘获到光纤表面,并在光散射







图4 (网刊彩色) 在三种激光波长的作用下, 700 nm 的 聚苯乙烯微球沿着直径为 600 nm 的光纤运动的连续光学 显微镜图片

力的作用下,沿着光的传播方向运动.图4(a)表示 导入25 mW的532 nm的激光时,微球A被光纤表 面的倏逝波俘获和输送的光学显微镜图片,由于 微球对倏逝波的散射作用,微球看起来是一个亮 斑.由图可以看出,在4s的时间内,微球沿着光纤 移动了48.4 μm的距离,因此微球的运动速度约为 12.1 µm/s. 将激光波长调为650 nm 后, 通过缓慢 增加功率发现, 当激光功率增大到10 mW时, 微球 就能被俘获到光纤表面,并沿着光的传播方向运 动. 图 4 (b) 为通入 25 mW 的 650 nm 激光时, 微球 B沿光纤运动的图片,其速度约为17.2 μm/s. 而将 激光波长调为980 nm 后发现, 当激光功率增大到 7 mW时,光纤就可以对微球进行稳定的俘获和输 送. 图 4 (c) 给出导入 25 mW 的 980 nm 激光时, 微 球C沿光纤运动的情形,运动速度约为26.5 μm/s. 由此可知,随着激光波长的增大,可稳定俘获和输 送微球的临界功率是变小的; 而当激光功率一定 时,随着激光波长的增大,沿光纤运动的微球的速 度也是增大的. 由于微球沿光纤运动的速度与其所 受到的光散射力成线性增加的关系,因此,微球所 受到光散射力也是增大的,说明光纤捕获和输送微 球的能力随着激光波长的增大而增强,该实验现象 与理论分析是完全符合的.

图5表示分别将三种波长的激光导入直径为 600 nm的光纤中后,实验测得的多个聚苯乙烯微 球沿光纤运动的平均速度和输入功率之间的关系. 由图可以看出,当激光波长一定时,微球的运动速 度随输入功率的增加而增大;而当激光功率一定 时,随着激光波长的增大,微球沿光纤运动的速度 也是逐渐增大的.



图 5 实验测得的微球的平均速度与输入功率之间的关系

5 结 论

本文通过理论和实验证明了激光波长对纳米 光纤俘获和输送聚苯乙烯微球能力的影响,结果 表明,在直径为600 nm 的光纤中分别导入波长为 532,650 和980 nm 的激光,随着激光波长的增大, 俘获微球所需的临界功率变小;而当激光功率一定 时,光纤输送微球的速度随着激光波长的增大而 增大,光纤俘获和输送微球的能力也随之增强.该 技术可以广泛应用于纳米科学和生命科学等研究 领域.

参考文献

- [1] Fazal F M, Block S M 2011 Nat. Photon. 5 318
- [2] Applegate R W, Squier J, Vestad T, Oakey J, Marr D
 W M, Bado P, Dugan M A, Said A A 2006 Lab. Chip.
 6 422
- [3] Sun Y Y, Yuan X C, Ong L S, Bu J, Zhu S W, Liu R 2007 Appl. Phys. Lett. **90** 0311071
- [4] Ran L L, Guo Z Y, Qu S L 2012 Chin. Phys. B 21 104206
- [5] Li Y, Guo H L, Huang L, Qu E, Li Z L, Li Z Y 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 014214
- [6] Guffey M J, Scherer N F 2010 Nano Lett. 10 4302
- [7] Min T L, Mears P J, Chubiz L M, Rao C V, Golding I, Chemla Y R 2009 Nat. Methods 6 831
- [8] Grier D G 2003 Nature 424 810
- [9] Carmon G, Feingold M 2011 Opt. Lett. 36 40
- [10] Hu G J, Li J, Long Q, Tao T, Zhang G X, Wu X P 2011
 Acta Phys. Sin. 60 030301 (in Chinese)[胡耿军, 李静, 龙 潜, 陶陶, 张恭轩, 伍小平 2011 物理学报 60 030301]
- [11] Brambilla G, Murugan G S, Wilkinson J S, Richardson D J 2007 Opt. Lett. **32** 3041
- [12] Xu L L, Li Y, Li B J 2012 New J. Phys. 14 033020
- [13] Xin H B, Li B J 2011 Opt. Express 19 13285
- [14] Xu C, Lei H X, Zhang Y, Li B J 2012 Opt. Express 20 1930
- [15] Li Y, Xu L L, Li B J 2012 J. Nanopart. Res. 14 799
- [16] Neuman K C, Block S M 2004 Rev. Sci. Instrum. 75 2787

Laser wavelength influence on capture and delivery of polystyrene microspheres using nanofibers^{*}

Li Ying[†] Hu Yan-Jun

(School of Information Engineering, Guangdong Medical College, Dongguan 523808, China)(Received 26 August 2013; revised manuscript received 3 October 2013)

Abstract

In the paper we study the effects of laser wavelength on capture and delivery of polystyrene microspheres using a nanofiber. Theoretical analysis shows that when the fiber diameter and the power of the laser are fixed, with the increase of the laser wavelength, the range and intensity of evanescent wave outside optical fiber become large and light gradient and scattering forces exerted on spheres also increase, which means that the ability to capture and transportation of spheres using nanofiber increases with the laser wavelength. The experimental phenomena and theoretical predictions are completely consistent with each other, when the lasers with three wavelengths are separately injected into the fiber with a diameter of 600 nm, with the increase of the wavelength, the critical power becomes small, and when the laser power is constant, with the increase of the wavelength, velocities of spheres also increase, showing that the ability to capture and transport the microsheres is enhanced.

Keywords:laser wavelength, nanofiber, evanescent field, capture and deliveryPACS:87.80.Cc, 42.50.wK, 42.81.QbDOI:10.7498/aps.63.048703

^{*} Project supported by the Key Science and Technology Program of Zhanjiang, China (Grant No. 2013B01257).

[†] Corresponding author. E-mail: xingziliying@126.com