

# 用金纳米棒修饰的亚微米光纤定点输送微颗粒的研究

李英 胡艳军

(广东医学院信息工程学院, 广东 东莞 523808)

**摘要** 通过热熔拉法将单模光纤拉制成亚微米尺寸的光纤,并借助光学显微镜的定位作用,在亚微米光纤的特定位置沉积金纳米棒(长度和中截面直径分别为 80 nm 和 20 nm)。利用光纤倏逝波激发金纳米棒的局域表面等离子共振(LSPR)。由于强的共振吸收和光热效应,当激光功率增加到 30 mW 时,亚微米光纤上沉积金纳米棒的位置会产生一个微米尺寸的气泡,激光在该位置将被等离子共振吸收和气泡散射掉,在气泡后面位置的光纤中观察不到光的传输。靠近光纤的 900 nm 的聚苯乙烯颗粒被倏逝波所产生的梯度力捕获到光纤表面,并在散射力的作用下沿着光的传播方向运动,当颗粒运动到气泡位置时,将会停止向前运动。该技术可用于微米颗粒的定点输送。

**关键词** 光纤光学;定点输送;气泡;微颗粒

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.070602

## Position Designated Delivery of Microparticles Using a Submicron Fiber Decorated with Gold Nanorods

Li Ying Hu Yanjun

(School of Information Engineering, Guangdong Medical College, Dongguan, Guangdong 523808, China)

**Abstract** The submicron fiber is fabricated by drawing a single-mode optical fiber through a flame-heated treatment. Gold nanorods (length and middle-section diameter are 80 nm and 20 nm, respectively) are deposited on the designated position of the submicro fiber by the positioning function of optical microscope, and the local surface plasmon resonance (LSPR) of gold nanorods is excited by the evanescent wave around the fiber. When the optical power increases to 30 mW, due to strong plasmon absorption and photothermal conversion, a microbubble forms at the position of the fiber decorated with the gold nanorods. Therefore, the laser light at this position is absorbed by plasmon resonance and scattered by the bubble. Optical transmission is not observed behind the bubble. Polystyrene particles (900 nm in diameter) near the fiber can be trapped by the gradient force, and then delivered along the direction of light propagation due to the scattering force induced by the evanescent wave. Once the particles move to the position of the bubble, they will stop their advancing. This technology can be used for targeted delivery of microparticles.

**Key words** fiber optics; position-designated delivery; bubble; microparticle

**OCIS codes** 060.2310; 140.3510; 350.4855

## 1 引言

自从美国科学家 Ashkin 等<sup>[1]</sup>在 1986 年利用聚焦后的激光束成功地捕获和操控微米颗粒后,这种无损伤、非接触、高精度的光镊技术在 20 多年来得到了广泛的发展和應用,已经成为了物理学、化学、生物学、医学、微细加工等领域的重要研究工具<sup>[2-10]</sup>。但是基于远场的光镊技术也存在一些不足,如仪器体积较庞大、工作距离短以及样品移动自由度小等,很难操控位于狭窄位置(如毛细血管)中的颗粒。

随后发展起来的基于倏逝波的近场光操控技术较好地解决了这些问题。用倏逝波操控颗粒最先是由 Kawata 等<sup>[11]</sup>提出的,他们利用全反射棱镜表面存在的倏逝波,使颗粒在倏逝波的作用下沿着光传播的方向运动。另外,一些平面波导器件也被用来对颗粒进行捕获和操控<sup>[12-13]</sup>。颗粒被强梯度力捕获到波导表面,

收稿日期: 2013-01-08; 收到修改稿日期: 2013-02-19; 网络出版日期: 2013-06-20

基金项目: 广东医学院青年基金(XQ1221)

作者简介: 李英(1976—),女,硕士,讲师,主要从事光操控方面的研究。E-mail: xingziliying@126.com

并在散射力的推动下沿着波导表面运动。利用这种方法可以捕获和操控微米颗粒、金属颗粒和生物细胞等。

然而,由于平面波导的制作工艺比较复杂,成本比较高,激光必须经过透镜耦合才能进入波导,在耦合过程中插入损耗比较大,实际操作中需要高功率的激光。而亚微米尺寸的光纤就能克服这些不足<sup>[14-15]</sup>。用加热的方法将单模光纤拉制成亚微米光纤,其表面存在较强的倏逝波;激光器通过跳线直接与光纤连接,插入损耗较小,可以在较低的功率下操控微米或亚微米的颗粒。但是,利用亚微米光纤只能使颗粒沿着光的传播路径运动,而不能实现颗粒的定点输送。为了解决这个难题,我们将金纳米棒沉积在亚微米光纤的特定位置,当金纳米棒的局域表面等离子体共振(LSPR)被亚微米光纤的倏逝波激发时,金纳米棒表面的局域电磁场会极大地增强,并伴随着强烈的共振吸收<sup>[16-19]</sup>。金纳米棒表面的水溶液会在很短的时间内达到沸点,从而产生一个微米尺寸的蒸汽气泡<sup>[20]</sup>。当颗粒沿着亚微米光纤运动到该位置时,将停止向前运动。利用该技术可以实现微颗粒的定点输送。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,由单模光纤拉制而成的亚微米光纤的直径为  $0.9\ \mu\text{m}$ ,长度约为  $3000\ \mu\text{m}$ 。为了使金纳米棒(长度和中截面直径分别为  $80\ \text{nm}$  和  $20\ \text{nm}$ )沉积在亚微米光纤上。在金纳米棒溶液中加入盐酸,将溶液的 pH 值调到 3,并用超声振动机将溶液超声振动 20 min,以使纳米棒分布均匀。接着,将亚微米光纤和  $808\ \text{nm}$  的激光器相连接,并借助显微镜的定位作用,用移液管吸取一滴金纳米棒溶液滴到光纤的指定位置。打开激光器,将功率调到  $5\ \text{mW}$ ,光纤表面的倏逝波所产生的梯度力以及等离子体热效应能够加速金纳米棒的沉积。30 s 后用乙醇和纯水将光纤冲洗干净,这样,金纳米棒就很牢固地粘在光纤上了。在实验中,金纳米棒修饰的亚微米光纤被悬置在微流槽中,槽的宽度为  $850\ \mu\text{m}$ ,深度为  $120\ \mu\text{m}$ ,是通过氢氟酸腐蚀石英片的方法制成的。光纤的两端被固定在两个微调节架上,一端通过光纤跳线和  $808\ \text{nm}$  的激光器相连。实验中先用微流泵注入纯水,直到亚微米光纤完全浸没到纯水中为止。接着,用移液管将  $900\ \text{nm}$  的聚苯乙烯颗粒注入到微流槽的左端,即光纤的输入端。实验在光学显微镜下进行,与显微镜相连的 CCD 将图像传送到与之相连的计算机显示器上,这样可以很方便地对样品进行观察和精确定位。

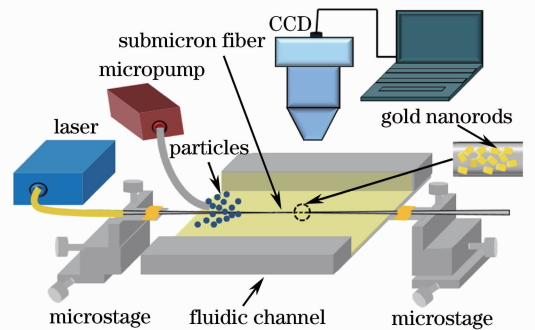


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

## 3 实验结果和讨论

图 2(a)是用紫外可见近红外分光光度计测量得到的金纳米棒的吸收谱线,由图可知,金纳米棒的纵向

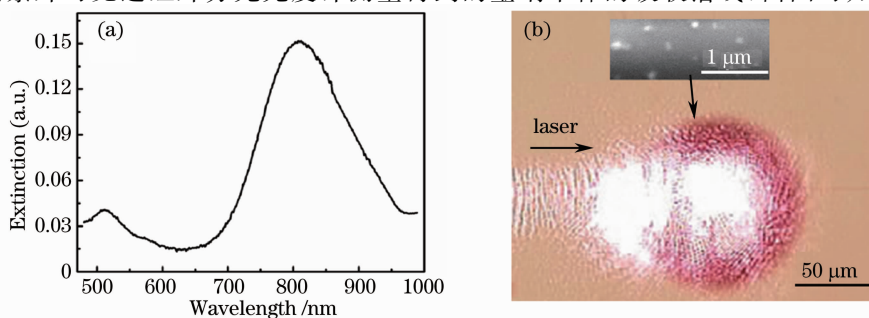


图 2 (a) 金纳米棒的消光谱; (b) 光纤上沉积金纳米棒的位置产生气泡的光学显微镜图片

Fig. 2 (a) Experimental extinction spectrum of gold nanorods; (b) optical microscopic image of a bubble formed on the submicron fiber decorated with gold nanorods

等离子共振波长为 808 nm。因此,当 808 nm 的激光通入到亚微米光纤中时,光纤的倏逝波可以有效激发沉积在光纤表面特定位置的金纳米棒的 LSPR,使得该位置成为一个局域的热源。在实验中可以观察到,当激光功率增大到 30 mW 的时候,由于强烈的局域等离子共振吸收,约 30  $\mu\text{m}$  长度范围内的金纳米棒表面的水被快速加热并达到沸点,从而在该处形成一个蒸汽气泡,如图 2(b) 所示。图 2(b) 中的插图 of 金纳米棒(白色的点)修饰的亚微米光纤的扫描电子显微镜图片。因为 LSPR 对光的强吸收以及气泡对光的散射作用,在气泡后面位置的光纤中,已经观察不到光的传输了。

当 808 nm 的激光通入到亚微米光纤中时,光纤附近的颗粒将被倏逝波所产生的梯度力捕获到光纤表面,并在作用在其上的散射力的作用下沿着光的传播方向运动<sup>[21]</sup>。图 3 是激光功率为 30 mW 时,用光学显微镜拍摄的一系列连续的图片,相邻两张图片的时间间隔是 1 s。一个 900 nm 的聚苯乙烯颗粒(黑色箭头所指)被亚微米光纤倏逝波所产生的梯度力捕获到光纤表面,并在散射力的作用下沿着光纤运动,颗粒的运动速度约为 53  $\mu\text{m}/\text{s}$ 。气泡的直径约为 114  $\mu\text{m}$ ,由于 LSPR 的激发和气泡的作用,光在气泡位置已经全部被吸收或散射掉,气泡后面部分的光纤已经没有光了,当然也就不会对颗粒有捕获和推动作用了。所以,当颗粒沿着亚微米光纤运动到光纤和气泡交界的位置(精度约为 15  $\mu\text{m}$ ),将停止沿光纤的运动。利用该技术可以将微颗粒输送到确定位置。我们可以在亚微米光纤的不同位置沉积金纳米棒,从而实现确定位置微颗粒的输送。

## 4 结 论

利用亚微米光纤的倏逝波激发金纳米棒的 LSPR,由于强的共振吸收,可在亚微米光纤的确定位置产生一个蒸汽气泡。当微颗粒在倏逝波的作用下沿着光纤运动到气泡所在的位置时,将会停止向前运动。该技术可用于微颗粒的定点输送,也可以用于核/壳结构药物颗粒的定点输送和释放,药物颗粒在倏逝场的作用下沿着光纤运动到金纳米棒所在的区域,并在局部的高温作用下破裂释放药物,从而达到治疗的目的。

## 参 考 文 献

- 1 A Ashkin, J M Dziedzic, J E W Bjorkholm, *et al.*. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particle[J]. *Opt Lett*, 1986, 11(5): 288–290.
- 2 A Ashkin, J M Dziedzic. Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria[J]. *Science*, 1987, 235(4795): 1517–1520.
- 3 S M Block, L S B Goldstein, B J Schnapp. Bead movement by single kinesin molecules studied with optical tweezers[J]. *Nature*, 1990, 348(6299): 348–352.
- 4 Li Yinmei, Lou Liren. Nanometer optical tweezers technology: an emerging nano biotechnology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(1): 1–5.  
李银妹, 楼立人. 纳米光镊技术——新兴的纳米生物技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, 40(1): 1–5.
- 5 M Ozkan, M Wang, C Ozkan, *et al.*. Optical manipulation of objects and biological cells in microfluidic devices[J]. *Biomed Microdevices*, 2003, 5(1): 61–67.
- 6 Wu Zhihui, Mo Hua, Huang Daizheng, *et al.*. Red blood cells in patients with arrhythmias using optical tweezers Raman spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(2): 021701.  
吴智辉, 莫华, 黄代政, 等. 心律失常患者红细胞的光镊拉曼光谱[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(2): 021701.
- 7 Sun Qing, Ren Yuxuan, Yao Kun, *et al.*. Algorithm for diffractive optical element of array optical tweezers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0109003.  
孙晴, 任煜轩, 姚焜, 等. 阵列光镊衍射元件的算法设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0109003.
- 8 Li Baojun, Xin Hongbao, Zhang Yao, *et al.*. Progress of optical trapping and manipulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011,

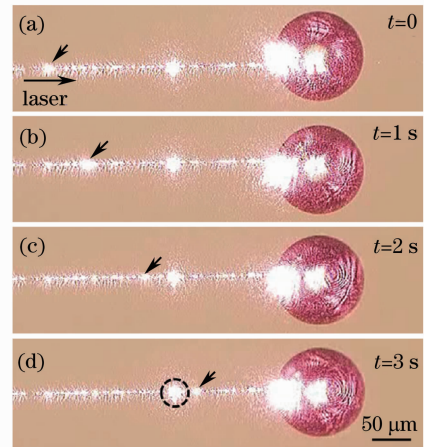


图 3 900 nm 的聚苯乙烯颗粒(黑色箭头所指)沿着金纳米棒修饰的亚微米光纤运动的光学显微镜图片  
Fig. 3 Optical images of a 900 nm polystyrene particle (indicated by the black arrow) moving along a submicron fiber decorated with gold nanorods

- 31(9): 0900126.  
李宝军, 辛洪宝, 张 垚, 等. 光捕获和光操控研究进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900126.
- 9 Tao Tao, Jing Li, Qian Long, *et al.*. 3D trapping and manipulation of micro-particles using holographic optical tweezers with optimized computer-generated holograms[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(12): 120010.
- 10 Mincheng Zhong, Guosheng Xue, Jinhua Zhou, *et al.*. Measurement of interaction force between RGD-peptide and Hela cell surface by optical tweezers[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(10): 101701.
- 11 S. Kawata, T. Sugiura. Movement of micrometer-sized particles in the evanescent field of a laser beam[J]. Opt Lett, 1992, 17(11): 772–774.
- 12 T Tanakaa, S Yamamoto. Optically induced propulsion of small particles in an evenescent field of higher propagation mode in a multimode, channeled waveguide[J]. Appl Phys Lett, 2000, 77(20): 3131–3133.
- 13 S Y Lin, E Schonbrun, K Crozier. Optical manipulation with planar silicon microring resonators[J]. Nano Lett, 2010, 10(7): 2408–2411.
- 14 G Brambilla, G S Murugan, J S Wilkinson, *et al.*. Optical manipulation of microspheres along a subwavelength optical wire [J]. Opt Lett, 2007, 32(20): 3041–3043.
- 15 Y Li, L L Xu, B J Li. Optical delivery of nanospheres using arbitrary bending nanofibers[J]. J Nanopart Res, 2012, 14(4): 799.
- 16 W H Ni, H J Chen, X S Kou, *et al.*. Optical fiber-excited surface plasmon resonance spectroscopy of single and ensemble gold nanorods[J]. J Phys Chem C, 2008, 112(22): 8105–8109.
- 17 Z W Liu, W H Hung, M Aykol, *et al.*. Optical manipulation of plasmonic nanoparticles, bubble formation and patterning of SERS aggregates[J]. Nanotechnology, 2010, 21(10): 105304.
- 18 G Baffou, C Girard, R Quidant. Mapping heat origin in plasmonic structures[J]. Phys Rev Lett, 2010, 104(13): 136805.
- 19 J S Donner, G Baffou, D McCloskey, *et al.*. Plasmon-assisted optofluidics[J]. ACS Nano, 2011, 5(7): 5457–5462.
- 20 E Messina, E Cavallaro, A Cacciola, *et al.*. Plasmon-enhanced optical trapping of gold nanoaggregates with selected optical properties[J]. ACS Nano, 2011, 5(2): 905–913.
- 21 D G Grier. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424(6950): 810–816.