

激光复合 AFM 探针捕获纳米微粒的作用力分析

马丽心¹ 郑纯¹ 李丹婷¹ 杨立军²

¹哈尔滨商业大学轻工学院, 黑龙江 哈尔滨 150028

²哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 基于纳米尺寸材料的微操作提出了一种局域增强隐失场理论, 其中的隐失场产生于光纤探针与原子力显微镜 (AFM) 探针耦合作用。根据近场光学原理, 采用傅里叶变换方法推导出隐失场产生的机理, 并讨论影响其强弱的因素。为了得到足够大的捕获纳米级微粒的力, 通过采用复合光纤探针与 AFM 探针, 根据金属表面等离子体共振原理, 使传播波和隐失波会聚于 AFM 锥形探针针尖处形成增强的电磁波。对纳米级物体的捕获、移动等操作表明提出的理论可以用于微观科学的前沿领域。

关键词 纤维光学; 原子力显微镜; 纳米操作; 局域场增强; 隐失场; 近场耦合

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.070601

Analysis of Force to Capture Nanoparticles by Composite Laser AFM probe

Ma Lixin¹ Zheng Chun¹ Li Danting¹ Yang Lijun²

¹School of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150028, China

²School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Based on micro operations on nanoscale materials, a locally enhanced evanescent field theory is proposed, in which the evanescent field is produced from coupling of optical fiber probe and atomic force microscope (AFM) probe. According to the principle of near-field optics, the Fourier transform is used to deduce the evanescent field generation mechanism, and the factors affecting its strength are discussed. In order to get the force strong enough to capture the nanoscale objects, based on the metal surface plasma resonance principle, composite optical fiber probe and AFM probe solution is used to make the propagated wave and evanescent wave converge at the conical AFM probe tip and form enhanced electromagnetic wave. The operations such as capture of nanoscale objects and movement indicate that the theory can be used in the field of microcosmic science frontier.

Key words fiber optics; atomic force microscope; nanomanipulation; local field enhancement; evanescent field; near-field coupling

OCIS codes 060.2310; 060.3510; 140.3298; 140.3460

1 引言

在纳米技术快速发展和人们对高科技产品的微型化结构、集成化功能强烈需求的前提下, 生产制造结构复杂、组件微小的小型系统成为纳米操作技术发展的方向^[1-3], 纳米操作成为纳米科技领域的研究热点后, 又在组装纳米机电系统、微小生物操作、信息存储、医学、包装材料等领域表现出其高效、可靠和适应性强的特点^[4-6]。同时纳米操作技术的发展也可望改变纳米包装材料单一的现状, 纳米包装材料是应用纳米技术将相尺寸为 100 nm 的物体分散后通过纳米合成、添加、改性等操作制备成具有纳米尺寸特殊功能的新材料, 纳米级保鲜、抗菌材料等被广泛地应用在食品包装中^[7]。

纳米操作的作用对象尺寸介于 1~1000 nm 之间。以往对小物体进行纳米操作的主要途径是推动-接触模式。例如, 原子力显微镜 (AFM) 探针正是通过推动纳米小物体进行操作^[8], 该方法也只限于简单的二维机

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-03; 网络出版日期: 2015-06-19

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E201243)

作者简介: 马丽心(1960—), 女, 教授, 主要从事制造系统工程方面的研究。E-mail: 13796617159@126.com

械操纵,捕获和有规律释放等操作问题尚未得到很好的解决^[9-11],对于较小、较重的物体就难以实现操纵。近期得到迅速发展的近场光镊捕获受到广大学者的关注与研究,其主要是根据光纤探针尖部照射激光时产生的局域增强隐失场来完成微粒捕获^[12-13],激光^[14]复合原子力显微镜探针后产生增强近场操纵纳米微粒这一技术出现,不仅解决了传统接触式操作引起的弊端,还在纳米加工、制造领域带来了新的突破。然而,这种近场操作可实现的基本原理是利用激光辐照 AFM 探针形成的局域增强隐失场产生的光阱力对纳米微粒进行操纵。为准确完成纳米微粒的操纵,要对增强隐失场和光阱力进行分析研究。

2 隐失场产生机理

为解决衍射极限和接触性操作带来的困难,可以利用激光耦合原子力显微镜探针的操作方法,这是一种非接触、无损伤的可控制操作,主要是利用局域增强的隐失场来实现,在近场空间内,好比是一个拥有强吸附力的网来带动纳米微粒进行移动,整个过程中纳米微粒都不会与产生该隐失场的纳米级探针针尖相接触。隐失场是存在于近场光学中可以突破衍射极限的一种局域增强场。在光与样品发生相互作用后,就会在样品表面形成一种带有样品信息的特殊光场,利用这种光场的分布特性来呈现操作对象情况。无论是用传播波还是隐失波照射到频率较高的物体上都会在此产生新的隐失场,如果一个纳米级尺寸的小物体作为被照射物^[15-17],可以将隐失场转化为传播场和新的隐失场,这一相互转化的过程中,将会有光阱力作用到这个尺寸微小的物体上,解决了纳米级物体搬运过程中力的问题。具体转化过程如图 1 所示。

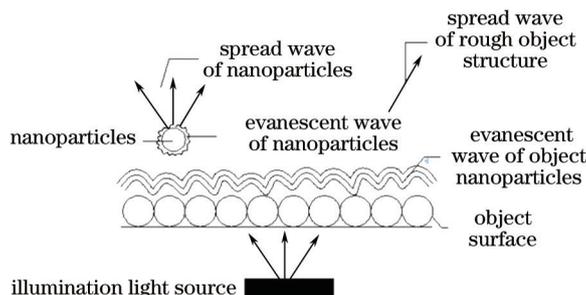


图 1 隐失场产生机理示意图

Fig.1 Schematic diagram of evanescent field mechanism

当光源照射物体时,物体表面的光场由两种光学成分构成,一种是由物体粗糙结构产生的可以向远处传播的传播场,另一种是由物体纳米结构产生的局限于物体表面,在物体之外会迅速衰减的非辐射隐失场。可以利用隐失场区照射一个纳米级尺寸的微粒,纳米级微粒表面同样也产生了传播场和隐失场,因为是利用隐失场照明高频物体,所以新产生的隐失场能够在远小于波长距离的范围内呈现出局域增强的现象。

上述为隐失场产生的机理,经过一些有效耦合场处理,近场空间内能够存在一种不需要接触就可以对纳米量级的物体进行操作的力,这种力正是由操纵物体的探针针尖附近微小空间内产生的隐失场形成的。

3 耦合场分析

激光在光纤探针中传输,会产生部分反射激光和部分泄漏激光,其中泄漏的激光可在光纤探针针尖处形成迅速衰减的隐失场,这种隐失场场强很小,难以完成对纳米微粒的定位操作。但是利用光纤探针尖端的隐失光照明镀有金属薄膜的 AFM 探针时,AFM 探针尖端处会产生一个增强的隐失场,这个隐失场足以提供操作纳米微粒的作用力,提出的增大这种捕获力的方案就是采用双探针耦合。采用光纤探针通入激光照射在微纳探针针尖上,使其产生局域增强场,光纤探针复合微纳探针工作原理如图 2 所示。

对近场空间的光学理论研究可以得知,无论是用远处存在的可传播波还是利用近场内的隐失波照明高频物体都可以产生快速减弱的隐失场。可以利用傅里叶变换确定复振幅与空间频谱的关系。

$$E(x, y, 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(f_x, f_y, 0) \exp[2\pi i(f_x x + f_y y)] df_x df_y, \quad (1)$$

式中 $E(x, y, 0)$ 表示复振幅, F 表示空间频率, f_x 、 f_y 分别表示 x 、 y 方向的空间频率分量(rad/m)。光照射到样品 z 平面时,复振幅与空间频率也同样满足

$$E(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(f_x, f_y, z) \exp[2\pi i(f_x x + f_y y)] df_x df_y, \quad (2)$$

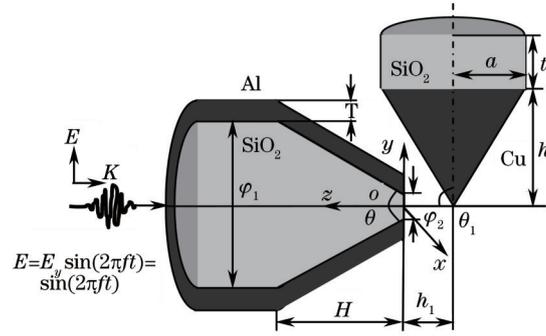


图2 复合探针工作原理示意图

Fig.2 Diagram of composite probe working principle

复振幅 $E(x, y, z)$ 满足标量亥姆霍兹方程:

$$\nabla^2 E(x, y, z) + k_i^2 E(x, y, z) = 0, \quad (3)$$

式中 k_i 表示总空间频率, $k_i = 2\pi/\lambda$ 。

将(2)式代入(3)式可得

$$F(f_x, f_y, z) = B(f_x, f_y) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 (f_x^2 + f_y^2)} \cdot z\right], \quad (4)$$

式中 $B(f_x, f_y)$ 为待定系数, 由初始条件确定。

$z=0$ 时为样品平面, 所以空间频谱为 $F(f_x, f_y, 0)$, (4)式可写为

$$F(f_x, f_y, z) = F(f_x, f_y, 0) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 (f_x^2 + f_y^2)} \cdot z\right], \quad (5)$$

最后将(5)式代入(2)式中可得

$$E(x, y, z) = \iint_{\Sigma} \{F(f_x, f_y, 0) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 (f_x^2 + f_y^2)} \cdot z\right] \exp[2\pi i (f_x x + f_y y)]\} df_x df_y, \quad (6)$$

可见探测面 z 上的复振幅与样品平面上的复振幅成线性叠加关系, 比例因子为传播因子, 波的传播方向取决于 f_x, f_y 的大小。

根据上述分析, (6)式可以具体分为两种情况。首先当 $\lambda^2 (f_x^2 + f_y^2) - 1 \leq 0$ 时, (5)式的指数部分为虚部, 即空间频率的每一分量向前传播可以形成传播波和非辐射波。其次是当 $\lambda^2 (f_x^2 + f_y^2) - 1 > 0$ 时, 物体的外形尺寸也就成了光场中分布的高空间频率 f_x, f_y , 其中(5)式中的指数部分为负数。表明空间频谱随着 z 值的增加以指数规律减小, 即这种波只能局限于物体表面纳米级范围内, 在远处会随距离增加而减弱到零。

隐失场增强的原理是基于表面等离子体激元理论, 这里的等离子体是所有自由电子都被激发的状态, 是由浓度相同的正、负电荷构成的, 在这两种电荷中一定有一种电荷是能够做迁移运动的, 当金属表层的等离子体与诱发产生等离子体的隐失光有相同的频率时, 金属表面就会产生等离子体共振。表面等离子体激元形成一种沿着金属表面传播的电磁波, 这种电磁波只可以在其切线方向传播。在针尖上的传播路线也就是沿着针尖的锥度向针尖会聚, 最终探针尖端形成一个具有很大场强的隐失场。由于隐失场与物体作用过程中主要是电场与物体的相互作用, 激发产生的表面等离子体激元, 可以在探针附近形成比激发电场强度倍乃至数十倍的电场, 其振动频率可表示为

$$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + 2\varepsilon_m}} = \left[\frac{Ne^2}{\varepsilon(\omega)m(1 + 2\varepsilon_m)} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

式中 ω_p 为等离子体激元的频率, ε_m 为周围材料的介电常数, N 为价电子浓度, e 为电子电量, m 为电子有效质量, $\varepsilon(\omega)$ 为材料的介电常数。

探针尖端可视为半径为 r 的纳米颗粒, 在距其距离为 d 处, 由探针表面等离子体激元引起的增强电场为

$$E_{sp} = r^3 \frac{\varepsilon(\omega) - \varepsilon_m}{\varepsilon(\omega) + 2\varepsilon_m} E_0 \frac{1}{(r+d)^3}. \quad (8)$$

因为表面等离子体产生的增强电场和入射的光场方向一致, (8)式可表示为简化后的标量叠加, 亦即该

处的电场强度应该等于入射场与表面等离子体电场的叠加,即

$$E_M = E_0 + E_{sp} = E_0 \left[1 + r^3 \frac{\varepsilon(\omega) - \varepsilon_m}{\varepsilon(\omega) + 2\varepsilon_m} \frac{1}{(r+d)^3} \right], \quad (9)$$

式中中括号里面的部分称为局域场增强系数 FEF(也称作增益因子)。

理论研究表明,镀膜光纤探针耦合 AFM 探针可以产生局域增强场,利用此增强场可以实现对纳米量级物体的稳定操作。其本质是平面内电场在工作,图 3 所示为 x 和 z 平面内总电场 $|E|$ 的分布情况。

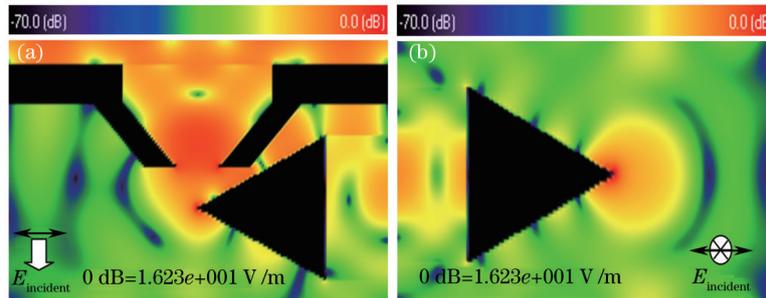


图 3 激光复合微纳探针产生的光场瞬态分布图。(a) $x=0$ 平面; (b) $z=-150$ nm 平面

Fig.3 Instantaneous field distribution by combining laser and micro-nano probe. (a) $x=0$ plane; (b) $z=-150$ nm plane

4 应用前景

实现了近场隐失场增强这一突破后,不仅可以利用其对纳米微粒进行捕获、移动和放置等操作,而且可以甩掉衍射极限的大包袱,实现非接触无损伤捕获、搬迁和放置等动作。该技术将会引领诸多科学领域的发展,特别会为纳米级的操作、测量方法和仪器系统提供有力的理论依据。目前,基于隐失场操作的纳米量级生物学领域、纳米量级化学领域、纳米量级材料学领域等都引起了广大学者强大的研究热情。例如在细胞分选上,隐失场产生的光镊可以准确地指定悬浮细胞的位置,既保证细胞的活性又使其处在一个宽阔的空间内,研究人员这时可以清晰地观测到一个固定的单细胞,方便进行下一步研究。同时,纳米技术的发展在包装领域带来了巨大的突破。在原有的包装材料中通过纳米级操作添加特定的纳米微粒可以提高新鲜果蔬的保鲜效果和保鲜时间,对于玻璃和陶瓷包装材料,搬运易碎一直是难以解决的问题,因此一些特殊的纳米颗粒可以通过纳米操作来改变包装材料的韧性^[7];同时在表面处理上纳米技术提供了新方法,不仅可以改善义齿金属材料表面性能,还可应用纳米非晶金刚石薄膜对牙科钴铬合金以及纯钛的表面进行处理^[18]。

5 结 论

通过近场光学理论可以得出镀有金属外层的光线探针型近场光镊复合 AFM 探针有助于产生利于纳米微粒操作的隐失场。理论研究表明,这种增强的隐失场可形成大于粒子与基底粘附力的作用力,最后实现纳米微粒的操作。增强隐失场操作纳米微粒技术在纳米包装材料制造上带来了新的突破,同时拓宽了其应用范围。

参 考 文 献

- 1 Hwang J, Pototschnig M, Lettow R, *et al.*. A single-molecule optical transistor[J]. Nature, 2009, 460: 76-79.
- 2 Sang I E, Yasuhiro T, Terutake H. Novel contact probing method using single fiber optical trapping probe[J]. Precision Engineering, 2009, 33(3): 235-242.
- 3 Yang Yuanhong, Yang Wei, Jiang Ting, *et al.*. Investigation on characteristics of stimulated Raman threshold in a single mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0129001.
杨远洪, 杨 巍, 蒋 婷, 等. 单模光纤中受激拉曼散射的阈值特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0129001.
- 4 Liu Jing. Research and application of micro/nano tweezers: The tool of manipulating the micro world[J]. Micronanoelectronic Technology, 2005, (3): 97-106.
刘 静. 操纵微小世界的工具——微/纳米镊的研究与应用[J]. 微纳电子技术, 2005, (3): 97-106.
- 5 Han W, Redlich P, Ernst F, *et al.*. Synthesis of GaN nanotubes composite and GaN nanorods by arc-discharge in

- nitrogen atmosphere[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(5): 652.
- 6 Xing Ming, Luo Yaming. Research of synthetic application of nano-packaging and anti-counterfeiting technologies[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(5): 182-184.
刑明, 罗亚明. 食品纳米包装与防伪技术综合应用的探索[J]. 包装工程, 2007, 28(5): 182-184.
- 7 Xu Shaohu. Progress on application research of nanometer materials for food packaging[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13): 108-111.
徐绍虎. 纳米材料在食品包装中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2011, 32(13): 108-111.
- 8 Li Li, Han Xueqin, Zhao Shiwei, *et al.*. Laser beam homogenization assessment based on uniformity and stationarity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011401.
李丽, 韩学勤, 赵士伟, 等. 基于均匀度和平稳度的激光光束匀化性评价[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011401.
- 9 Thelander C, Samuelson L. AFM manipulation of carbon nanotubes: Realization of ultra-fine nanoelectrodes[J]. Nanotechnology, 2002, 13(1): 108-113.
- 10 Fernandez J M, Chu S, Oberhauser A F. Pulling on hair (pins)[J]. Science, 2001, 292(5517): 653-654.
- 11 Macdonald M P, Paterson L, Volke-Sepulveda K, *et al.*. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. Science, 2002, 296(5570): 1101-1103.
- 12 Paterson L, Macdonald M P, Arlt J, *et al.*. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles[J]. Science, 2001, 292(5518): 912-914.
- 13 Yang Hong, Huang Yuanhui, Gong Changmei, *et al.*. Advances on techniques of breaking diffraction limitation using scattering medium[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 1-25.
杨虹, 黄远辉, 龚昌妹, 等. 散射介质超衍射极限技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 1-25.
- 14 Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, *et al.*. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603004.
陈聪, 高明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603004.
- 15 Tian X J, Liu L Q, Jiao N D, *et al.*. 3D nano forces sensing for an AFM based nanomanipulator[C]. Proceedings of International Conference on Information Acquisition, 2004: 208-212.
- 16 Duan Yaxuan, Chen Yongquan, Li Kun, *et al.*. Study on spatial measurement accuracy of standard laser source near-field parameters[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0308003.
段亚轩, 陈永权, 李坤, 等. 标准激光光源近场空域测量精度研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0308003.
- 17 Vesperinas M N, Chaumet P C, Rahmani A. Near-field photonic forces[J]. Philosophical Transactions A, 2004, 362(1817): 719-737.
- 18 Chen Gang. Application of Amorphous Diamond Nano Films in the Treatment of Dental Cobalt Chromium Alloy and Pure Titanium Surface[D]. Xi'an: The Fourth Military Medical University, 2012.
陈刚. 纳米非晶金刚石薄膜在牙科钴铬合金及纯钛表面处理中的应用[D]. 西安: 第四军医大学, 2012.

栏目编辑: 吴秀娟