

文章编号 1004-924X(2015)07-2043-08

## 纳结构的连续激光复合微纳探针刻划加工

程 柏<sup>1</sup>, 韩 冰<sup>1</sup>, 谷立山<sup>1</sup>, 陈晓苹<sup>1</sup>, 杨立军<sup>2\*</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了加工形貌稳定且尺寸尽可能小的纳结构, 建立了一套连续激光复合微纳探针的加工系统, 并研究了光纤探针导光的连续激光辐照微纳探针的近场增强效应以及该系统的加工性能。首先, 根据表面等离子体激元理论仿真分析了激光辐照原子力显微镜(AFM)探针的近场增强因子, 并研究了微纳探针的针尖温度场和针尖热膨胀。接着, 搭建了基于光纤探针导光的连续激光复合微纳探针的纳结构加工系统。最后, 对聚乙烯片状材料样品进行了纳结构加工。结果显示: 加工得到的纳米点尺度为 200 nm 左右; 纳米线的尺度为 30~40 nm。结果表明: 光纤探针导光连续激光复合微纳探针系统避免了复杂的空间光路结构, 是一种成本低廉, 结构简单的系统, 能够实现纳结构的加工。

**关键词:** 纳结构; 微纳探针; 连续激光; 刻划; 近场效应

**中图分类号:** TN249; TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.2043

## Nanostructure machining by AFM probe combined with continuous laser

CHENG Bai<sup>1</sup>, HAN Bing<sup>1</sup>, GU Li-shan<sup>1</sup>, CHEN Xiao-ping<sup>1</sup>, YANG Li-jun<sup>2\*</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. College of Mechaectrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: yljtj@hit.edu.cn

**Abstract:** To obtain the nanostructure with stable morphology and a smallest possible size, a nanostructure machining system is established by an Atomic Force Microscopic (AFM) probe combined with a continuous laser. With this method, the study focuses on the near-field enhancement theoretical analysis and simulation when the continuous laser irradiates the AFM probe and the machining performance of this system. Firstly, based on the mechanism of surface plasmon (SP), the Factor of Enhancement Field (FEF), temperature field and the thermal expansion on the probe tip are researched. A nanostructure machining system is set up based on the optical fiber probe to guide the laser to irradiate on the AFM probe. At last, the polyethylene (PE) is chosen as a sample to do the experiment. Experimental results indicate that the size of the processed nanodot is about 200 nm and that of the nanowire is about 30–40 nm. This method shows the proposed probe has simple-structure and inexpensive-cost and could achieve nanostructure machining.

收稿日期: 2014-12-19; 修订日期: 2015-02-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 90923041); 国家自然科学基金面上项目 (No. 51275122)

**Key words:** nanostructure; Atomic Force Microscopy (AFM) probe; continuous laser; machining; near-field enhancement

### 1 引言

纳米制造已将纳米科学的新发现转变为前沿制造技术,是支撑 21 世纪三大高技术竞争的制高点,同时也是我国制造技术发展的重要方向<sup>[1]</sup>。在纳米科技的研究中,尤以微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)的应用最为广泛,基于 MEMS 的电子元器件、计算机处理器以及各种微电子器件已经逐步应用到工业的各个领域。随着 MEMS 的应用越来越广泛,面向它们的制造技术也被研究者们密切关注<sup>[2-6]</sup>。

在上世纪末,国外学者开始关注基于激光复合扫描探针显微镜(SPM)的纳米加工技术。该技术通过将激光照射到微纳探针针尖,使其产生近场增强效应来加工纳米结构,而使用商用原子力显微镜(AFM)复合激光可以使纳米加工操作性更强,具备很高的可控性和可视性。在这一加工方法中,研究者们多使用脉冲能量高度集中、与物质相互作用热扩散范围小的飞秒激光,取得了非常不错的成果,引起了人们的广泛关注<sup>[7-11]</sup>。

目前,鲜有研究者对于连续激光复合 AFM 微纳探针加工纳结构的方法展开研究。考虑连续激光的优势,本文提出一种光纤探针导光连续激光复合 AFM 微纳探针刻划纳结构的方法。

本文采用商用 AFM 结合光纤探针导光连续激光进行纳结构加工。在飞秒激光复合 AFM 探针进行纳结构加工时通常采用拉曼原理进行光路对准,这样会使得光路复杂且设备成本高,而使用光纤探针导光连续激光可以避免复杂的空间光路结构;且光纤探针出口处孔径在理论上最小可达 20 nm,从而可以很好地实现激光辐照微纳探针。该方法可以实现近场效应加工纳结构,对微纳探针要求不高,且磨损小,可以用硬度较低的微纳探针实现硬度较高材料的加工。

### 2 纳结构加工试验系统

试验采用本原 CSPM5500 型商用 AFM 搭建纳结构加工系统(原理示意如图 1,实物系统如图 2)。该系统包括 AFM、半导体激光发

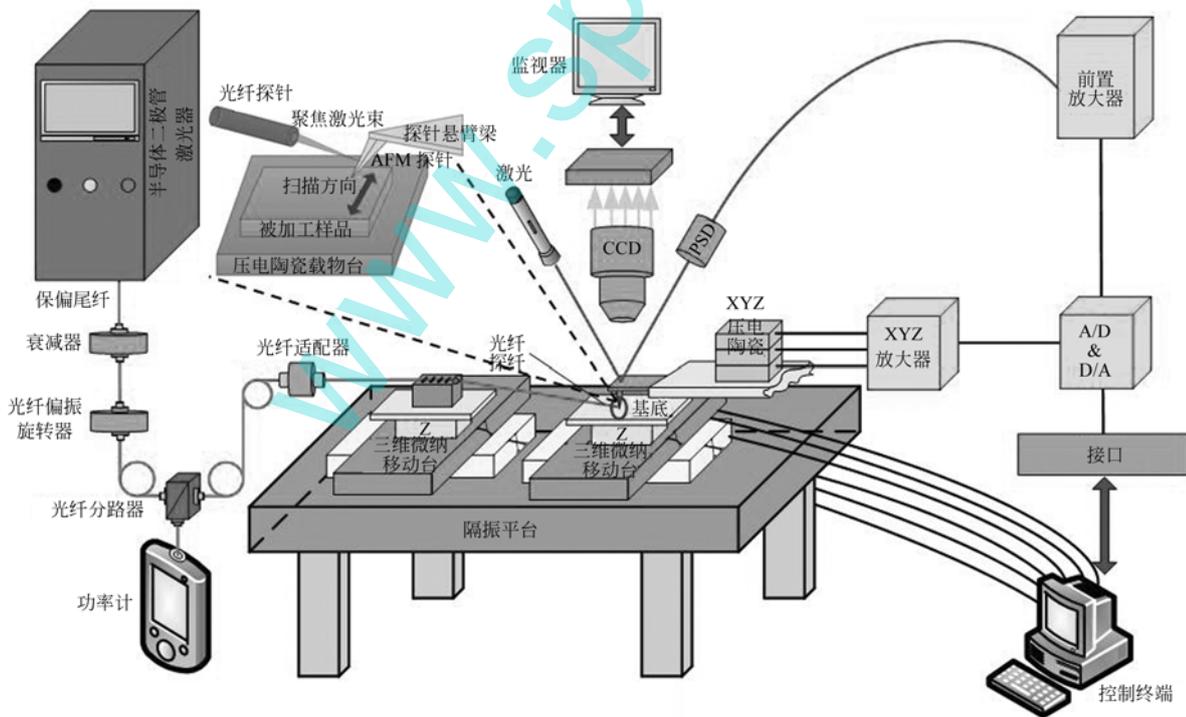


图 1 激光复合微纳探针加工纳结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nanostructure machining system by probe combined with laser

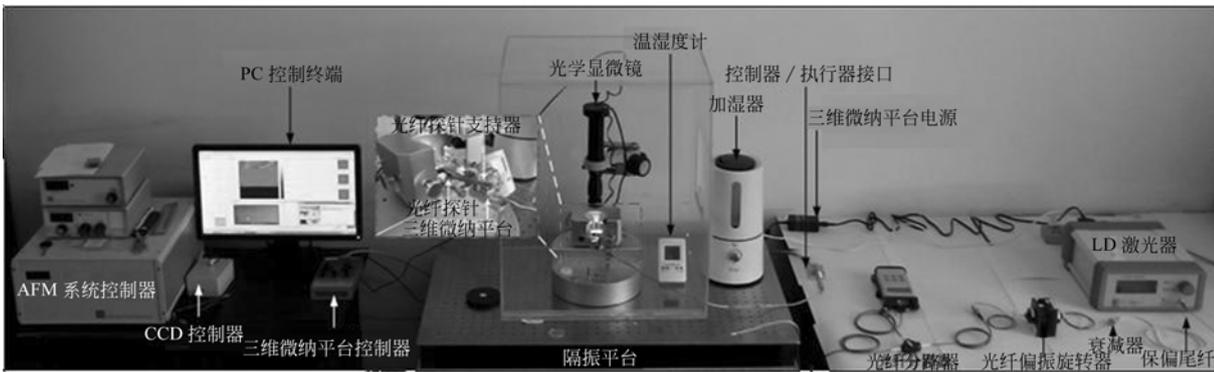


图 2 基于本原 CSPM5500 系列 AFM 的纳结构加工系统

Fig. 2 Nanostructure machining system based on AFM of BenYuan CSPM5500 series

生器、偏振旋转器、衰减器、分路器、纳米三维移动台以及光纤探针。为了简化试验系统,并使光路简单明了,本文采用全光纤化元器件,消除了传统光路聚焦精度对试验的影响。AFM 最大的扫描范围为  $15\mu\text{m}\times 15\mu\text{m}$ ,且具有专用的纳米加工模式向量扫描,这种设置可以使微纳探针沿着预设路径运动,并在运动过程中控制微纳探针压在样品材料上的作用力以及二者之间的  $z$  向距离。激光器波长为  $808\text{ nm}$ ,输出功率为  $0\sim 60\text{ mW}$  的连续激光。为了实现通光的光纤探针和微纳探针的精确对准,采用德国 SmartAct 三维移动机器人,其可以实现  $0.2\text{ nm}$  的最小移动分辨率。试验用微纳探针为 APPNANO 公司的 ACCESS-NC-GG-20 型可视化微纳探针(探针材料为 Si,悬臂梁镀金以增强反射信号),针尖与悬臂梁成一斜角,故在 CCD 下可以观察通光光纤探针和微纳探针的对准情况。

纳结构加工试验选取聚乙烯(PE)片状材料作为样品材料。PE 具有良好的光学性能和巨大的工业应用前景,同时它还是一种高频绝缘材料。作为高分子材料,它在激光复合微纳探针这一技术手段下展现出很强的可加工性,可以比较完美地体现出不同加工参数对最后试验结果的影响。

### 3 近场增强效应分析

当激光辐照微纳探针时,会在微纳探针尖端产生很强的增强电场<sup>[12]</sup>,强电场会改变微纳探针尖端周围的温度场,即带来热场,同时热场的形成又会使得探针尖部产生热膨胀,从而缩小了探针和样品之间的距离,改变了二者之间的机械接触

效应,形成了电-热-机械的耦合场同时对材料作用。鉴于仿真中需要多物理耦合场作用,故选用 Comsol Multiphysics 软件对微纳探针针尖的近场增强效应进行仿真分析。

#### 3.1 微纳探针针尖电场分析

在该仿真模型中,微纳探针取为  $15\ \mu\text{m}$ ,探针半锥角为  $\alpha=15^\circ$ ,针尖半径  $R=15\text{ nm}$ ,探针和样品之间的距离  $d=1\ \mu\text{m}$ 。采用波长  $\lambda=808\text{ nm}$  的连续激光对探针针尖进行辐照,微纳探针材料为 Si,样品材料采用银基底。同样地,在仿真分析过程中,激光电磁场的入射电场矢量为  $\mathbf{E}_0=(0,1,0)$ ,波方向  $k$  为  $(1,0,0)$ 。在这样的参数条件下,对聚焦激光辐照微纳探针进行近场效应仿真,探究微纳探针上的增强电场强度和分布如图 3 所示。

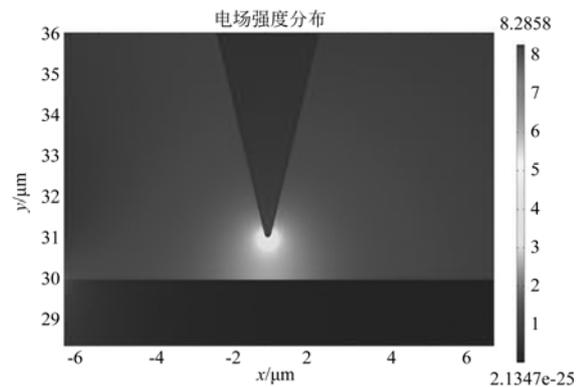


图 3 激光辐照的微纳探针针尖电场分布

Fig. 3 Electric field distribution of AFM probe under laser irradiation

通过仿真结果可以看出,近场增强效应都集中在微纳探针的尖端部分,且近场增强因子

(FEF)数值高达近 8.28,即微纳探针针尖将入射激光的电场增加了 8.28 倍。通过图 3 可以看出,近场增强效应呈圆圈状从微纳探针尖部往外扩散,越靠近探针,近场增强效应越明显。

上面的仿真结果只是针对探针和样品之间距离为  $1\ \mu\text{m}$  的情况,接下来需要考察不同的样品间距对最大近场增益因子的影响。这是因为在实际的加工试验中,需要通过调节二者之间距离来找到最优化的工艺参数,所以这样的仿真分析是十分有必要的。如图 4 所示,随着微纳探针和样品之间的距离  $d$  的缩小,所产生的近场增强因子呈指数级增加。可以看出,当间距  $d$  为  $0.5\ \text{nm}$  时,微纳探针上的近场增强因子为  $37\ \text{V/m}$ ,当间距  $d$  大于  $15\ \text{nm}$  时,近场增强因子缓慢下降至  $10\ \text{V/m}$  左右。

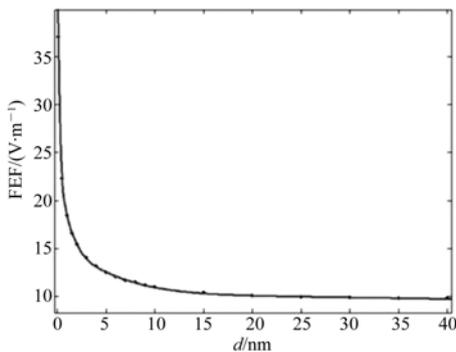


图 4 随间距变化的近场增强因子

Fig. 4 Relationship between FEF and distance

### 3.2 针尖热场及热膨胀

从产生原理上来讲,激光是一种波长短,衰减快的电磁波。电磁波在介质空间中传播时,它的能流密度用坡印亭矢量(能流密度矢量)来表示:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{S}$ 表示坡印亭矢量, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别代表电场和磁场。 $\mathbf{S}$ 的方向是电磁波(能量)的传播方向,它表示单位时间内流过与它垂直的单位面积的电磁能。可以通过麦克斯韦方程将磁场取代为电场,同时坡印亭矢量给出了入射激光的强度(即每单位面积按照  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  计算的能量流)。

$$I = S = 0.5 \epsilon_0 n E^2, \quad (2)$$

式中: $I$ 为入射激光的强度; $c$ 为光速,值为  $3 \times 10^8\ \text{m/s}$ ;  $\epsilon_0$ 为真空介电常数,  $\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 817 \times 10^{-12}\ \text{F/m}$ ;  $n$ 为空气介质的折射率,约等于 1。由

此可以算出每单位体积的热产生率(热通量)为:

$$\dot{q} = I\alpha, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为吸收系数。

$$\alpha = 4\pi k/\lambda, \quad (4)$$

式中  $k$  为消光系数,  $\lambda$  为自由空间内的激光波长。

通过计算得到不同能量的连续激光辐照微纳探针针尖时产生的热通量,将它代入到激光辐照微纳探针的热场仿真分析中,可以得到在微纳探针上的温度分布。

当激光能量为  $50\ \text{mW}$  时,通过计算可得微纳探针针尖热通量为  $1.3 \times 10^{11}\ \text{W/m}^2$ 。在这些参数的设置指导下,对微纳探针进行温度场的仿真,结果如图 5 所示,最高温度为  $1\ 390\ \text{K}$ 。

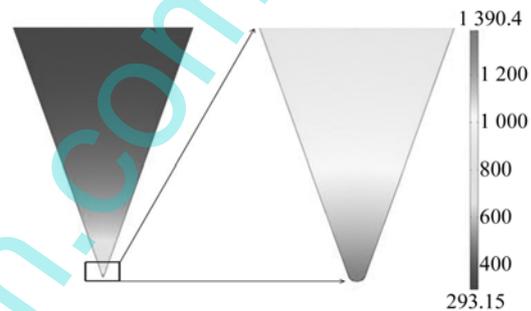


图 5 微纳探针的热场仿真结果

Fig. 5 Temperature field simulation of AFM probe

通过对微纳探针的热仿真分析可以发现,高热场主要集中在微纳探针的尖端部分。对于实际的纳结构加工来说,考察这样的高温场是否可以保持且微纳探针在多长时间能够达到这样的高温,有着很强的指导意义。本文对不同的能量激光辐照微纳探针时,其针尖的最高温度分布进行了系统研究。通过图 6 可以发现,激光辐照微纳探针时,最高温度可以达到  $1\ 500\ \text{K}$  以上。同时,在辐照时间为  $1\ \text{ms}$  时,探针上的温度可以恒定。

在针尖温度场的作用下, Si 材料探针必然会发生热膨胀,结果会导致微纳探针和样品基底之间的距离发生变化,进而改变了微纳探针下方的机械接触效应。微纳探针热膨胀仿真采用热应力模型,使用前面用于分析电场和热场的探针参数模型,针对微纳探针在不同温度下的热变形进行仿真,仿真结果如图 7 所示。

根据部分温度下 Si 材料的热膨胀系数<sup>[13]</sup>计

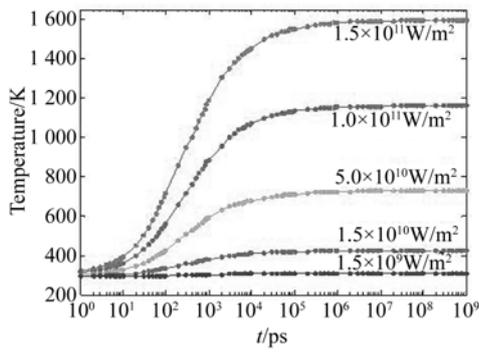


图 6 不同激光能量时微纳探针上的温度表现

Fig. 6 Temperature of AFM probe under different laser powers

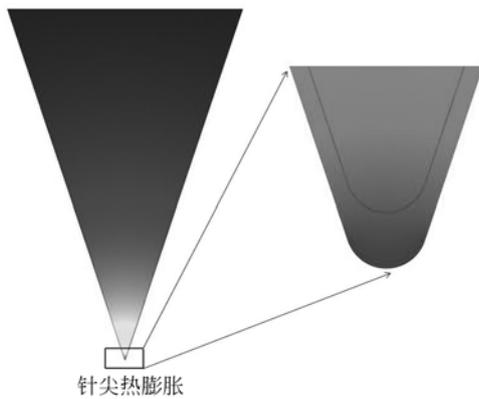


图 7 微纳探针针尖热膨胀

Fig. 7 Thermal expansion simulation of AFM probe

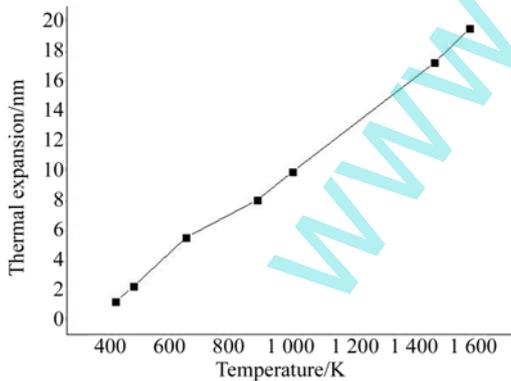


图 8 随温度变化的针尖热膨胀

Fig. 8 Relationship between temperature and thermal expansion

算出不同温度下的针尖热膨胀,如图 8 所示。可以发现,探针的最大热膨胀为 20 nm 左右。

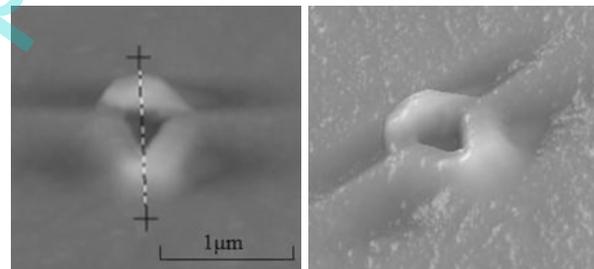
### 4 纳结构加工试验

#### 4.1 纳米点的加工

对于纳米点加工,有 3 个试验因素:激光能量 E、通光时间 t、微纳探针与样品的间距 L(用施加给压电陶瓷管的电压值来表征)。它们分别为 E: 0~60mW 连续可调;t:1~25s;L:0~180 V(表征 0 V×8.09 nm~180 V×8.09 nm,即 0 nm~1456.2 nm)。

通过工艺试验可以发现:随着间距 L 的不断增大,纳米点的深度和宽度不断减小,但是形貌不够稳定;纳结构尺寸随着通光时间的增加而变大,但是 15 s 之后基本不再发生变化;纳结构尺寸随着激光能量的增加而变大,但是过大的激光能量会对 PE 样品造成破坏性加工。

经过试验得到最好的纳米点形貌如图 9 所示,宽度约为 200 nm,深度约为 100 nm,该点的工艺参数为:E=10 mW、t=6 s、L=0 nm。因为聚乙烯具有很强的电绝缘性,结果显示为针尖的强温度场使得 PE 材料软化,在针尖热膨胀和温度场的双重作用下,材料表面出现凹陷,周边被挤压成“火山口”形貌。



(a) 二维形貌 (a)2D Morphology (b) 三维形貌 (b)3D Morphology

图 9 最优化纳米点形貌展示

Fig. 9 Morphologies of optimized nanodot

#### 4.2 纳米线的加工

根据纳米点的加工经验,同样对纳米线条展开试验研究。在专用的纳米加工模块下,针对现有的试验参数进行优化。得到的最终试验结果如图 10 所示,此纳米线条的工艺参数为:E=10 mW、t=1 s、L=0。由图 10 可知,加工出的纳米线条棱次分明,可以有效辨认出沟槽和两边的材料堆

积。此时纳米线条线宽为 35 nm、槽深为 5 nm。

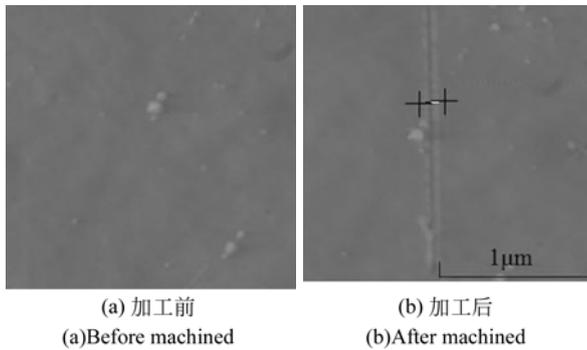


图 10 最优化纳米线试验结果

Fig. 10 Experiment results of optimized nanowire

#### 4.3 微纳探针使用情况分析

通过光纤探针导光连续激光复合微纳探针加工纳结构的试验,可以看出这是一种针对纳米加工行之有效的方法。此外,还进行了微纳探针机械刻划 PE 片状材料的试验,试验结果显示,在不同的加工参数下,样品材料在试验前后并没有明显变化。试验结束后,对加工后的探针进行了形貌对比。由于微纳探针可以看作机械加工中的刀具,刀具在加工材料的过程中一定存在磨损,因此可以通过查看刀具的磨损量来评价加工方式的优劣。如图 11(a)所示,这是利用激光复合微纳探针加工纳结构的探针 SEM 前后对比图,可以看出加工后探针针尖磨损很小,除了针尖粘有小部分杂质之外探针并没有破坏,这是因为激光复合微纳探针是利用近场效应来加工纳结构的,属于非接触的刻划,尽管针尖存在热膨胀,但是对探针的再次使用没有影响,而且激光产生的近场效应对微纳探针有清洁作用,所以加工过后的探针上面的附着物很少。

图 11(b)展示的是直接在 PE 表面刻划(没有加工出纳米结构)的探针 SEM 图,从图中可以看出,仅经过少许的机械刻划后,微纳探针表面就有所破坏,而且针尖附着有大量杂质材料。说明经过一段时间的机械刻划后探针针尖已经破坏,且存在大量磨损以及针尖污染;经过长时间机械刻划的微纳探针针尖已经断掉,整个探针不再适合进行纳米操作。结合这些分析可以得出结论:激光复合微纳探针加工纳结构这一技术手段优于微纳探针进行直接机械刻划纳结构,前者对微纳探

针的损伤极小,而且具有边加工边清洁的效果。此外,激光复合微纳探针可以提高探针的加工能力,特别适用于微纳探针直接刻划无法加工的材料。

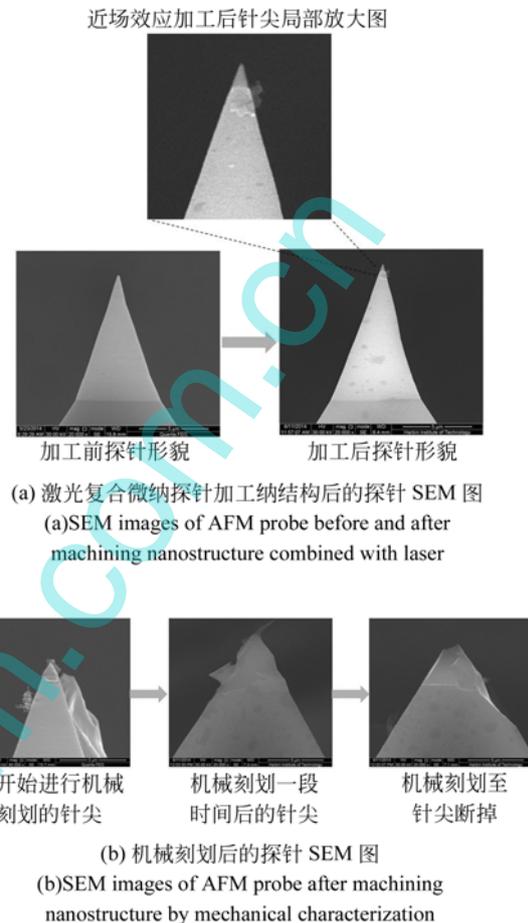


图 11 加工纳结构前后探针 SEM 对比图

Fig. 11 SEM images of AFM probe after two kinds of methods

## 5 结 论

本文针对纳结构加工提出了一种使用光纤探针导光激光复合微纳探针刻划的方法,该方法具有光路结构简单、成本低廉等优点。首先,建立了光纤探针导光激光辐照微纳探针的针尖近场增强效应数学模型。接着,利用表面等离子体极化激元作用机制阐述了近场增强效应的产生机理;针对激光辐照的微纳探针针尖处产生的电场、热场、热膨胀进行了仿真分析,从而获得了近场增强的增强因子 FEF、针尖温度、针尖热膨胀。最后,搭

建了纳结构的光纤探针导光激光复合微纳探针加工系统,进行刻划试验。通过工艺试验找出优化参数,获得了稳定的纳米结构:200 nm 宽 100 nm

深的纳米点,30~40 nm 宽的纳米线。试验结果同时表明,使用该方法的探针磨损量远小于直接使用探针机械刻划的磨损量。

### 参考文献:

- [1] 王立鼎,褚金奎,刘冲,等. 中国微纳制造研究进展[J]. 机械工程学报,2008,44(11): 2-12.  
WANG L D, CHU J K, LI CH, *et al.*. New developments on micro-nano manufacture technology in China[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008,44(11): 2-12. (in Chinese)
- [2] 张昔峰,黄强先,袁钰,等. 具有角度修正功能的大行程二维纳米工作台[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1811-1817.  
ZHANG X F, HUANG Q X, YUAN Y, *et al.*. Large stroke 2-DOF nano-positioning stage with angle error correction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1811-1817. (in Chinese)
- [3] 胡克想,王庆康,胡晓东,等. 基于 AFM 调制电信号的矢量式纳米加工系统的开发及其应用[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(1): 1-6.  
HU K X, WANG Q K, HU X D, *et al.*. Development and application of vector-mode nanofabrication system by modulating electric signals based on AFM [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2013, 49(1): 1-6. (in Chinese)
- [4] 胡克想,王庆康,胡晓东. AFM 电场诱导氧化加工技术制备微纳米结构[J]. 航空精密制造技术, 2012,48(3).  
HU K X, WANG Q K, HU X D. Preparation of micro/nanostructures by AFM field-induced oxidation[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2012,48(3). (in Chinese)
- [5] 刘增磊,焦念东,刘志华,等. 基于 AFM 的纳米线沉积加工方法[J]. 科学通报, 2013,58(S2):200-206.  
LIU Z L, JIAO N D, LIU ZH H, *et al.*. Atomic force microscope deposition method for nano-lines [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(S2): 200-206. (in Chinese)
- [6] 张朝阳,李中洋,王耀民,等. 激光冲击效应下的电化学微细刻蚀加工[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1310-1315.  
ZHANG CH Y, LI ZH Y, WANG Y M, *et al.*. Mechanical-electrochemical micro-etching under laser shock effect[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1310-1315. (in Chinese)
- [7] HUANG S M, HONG M H, LU Y F, *et al.*. Pulsed-laser assisted nanopatterning of metallic layers combined with atomic force microscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(5): 3268-3274.
- [8] HUANG S M, HONG M H, LUKYANCHUK B S, *et al.*. Sub-50 nm nanopatterning of metallic layers by green pulsed laser combined with atomic force microscopy [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2002, 20(3): 1118-1125.
- [9] CHIMMALGI A, GRIGOROPOULOS C P, KOMVOPOULOS K. Surface nanostructuring by nano-/femtosecond laser-assisted scanning force microscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(10): 104319-104319-12.
- [10] 黄文浩,朱兰芳,陈宇航,等. 基于原子力显微镜的 PMMA 飞秒激光纳米加工[J]. 光学精密工程, 2007, 15(12): 1959-1962.  
HUANG W H, ZHU L F, CHEN Y H, *et al.*. AFM based femto-second laser nanofabrication of PMMA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1959-1962. (in Chinese)
- [11] 言峰,周明,范晓萌,等. 基于局域场加强的近场纳米加工技术[J]. 光学学报, 2008, 28(s1): 176.  
YAN F, ZHOU M, FAN X M, *et al.*. Near-field nanofabrication technology base on local field enhancement effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(s1): 176. (in Chinese)
- [12] 童廉明,徐红星. 表面等离子激元——机理,应用与展望[J]. 物理, 2012, 41(9): 582-588.  
TONG L M, XU H X. Surface plasmons-mechanisms, applications and perspectives[J]. *PHYSICS*, 2012, 41(9): 582-588. (in Chinese)
- [13] 李景清. 常用材料实用手册[M]. 北京:中国标准出版社, 2012.  
LI J Q. *Commonly used Materials Practical Handbook* [M]. Beijing: China Standard Press, 2012. (in Chinese)

## 作者简介:



程 柏(1989—),男,吉林长春人,硕士,研究实习员,2012年、2014年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学检测与光机结构设计以及微纳加工方面的研究。E-mail: chengbaidx@163.com



陈晓苹(1983—),女,吉林长春人,助理研究员,2006年于长春理工大学获得学士学位,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学检测技术以及大口径光学元件表面强化技术的研究。E-mail: chenxiaoping0605@163.com



韩 冰(1981—),男,吉林长春人,副研究员,2004年于吉林大学获得学士学位,主要从事光机结构设计及光学系统像质评价方面的工作。E-mail: hanbing@ciomp.ac.cn



杨立军(1972—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,博士生导师,1995年于辽宁工学院获得学士学位,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为哈尔滨工业大学机电工程学院航空宇航制造工程系党支部书记,主要从事激光微纳制造、激光复合加工、激光加工、光机电一体化装备研制的研究工作。E-mail: yljtj@hit.edu.cn



谷立山(1958—),男,吉林长春人,高级工程师,副研究员,主要从事光学检测及检测技术方面的研究。E-mail: 1586205435@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)

www.spm.com.cn