

# 基于局域场加强的近场纳米加工技术

言 峰 周 明 范晓萌 张 伟

(江苏大学光子制造科学技术中心, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 介绍了一种全新的基于飞秒激光局域场加强效应的纳米加工技术,通过使用了微焦级别脉宽为 130 fs、波长 800 nm 的飞秒激光照射于原子力显微镜的探针针尖,利用其局域场加强效应在金薄膜表面加工出各种纳米图形。对加工参数对加工线宽的影响中,我们发现了随着加工能量的减小和加工速度的不断增大将导致加工线宽不断减小,最终达到了极限线宽( $\sim 10$  nm)。这项技术可以广泛的应用与各种材料的加工中,尤其适合各种金属薄膜的加工,特别是结合了现有的自动化控制系统更是可以加工出任意复杂的二维纳米图形。

**关键词** 飞秒激光; 局域场增强; 纳米加工; 原子力显微镜

**中图分类号** TH16; TH742.9 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200828s1.0176

## Near-Field Nanofabrication Technology Base on Local Field Enhancement Effect

Yan Feng Zhou Ming Fan Xiaomeng Zhang Wei

(Center for Photo Manufacturing Science and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** A new technique base on femtosecond laser local field enhancement effect is proposed. Nanomachining of thin gold films was accomplished by coupling 800 nm femtosecond laser radiation with an atomic force microscope  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tip in ambient air by the local field enhancement effect. Possible factors affecting this process are discussed like the speed of the fabrication and the laser fluence. At last we get the high spatial resolution of ( $\sim 10$  nm) (not possible with standard nanomachining techniques). The presented process provides an intriguing means for massive nanofabrication due to the flexibility in the substrate material selection and easy lithograph of complex pattern.

**Key words** femtosecond laser; local field enhancement effect; nanofabrication; atomic force microscope

### 1 引 言

近几年来随着微电子行业迅猛发展,光刻技术已经进入了纳米时代。但是由于衍射极限的限制,传统意义上的光刻手段无法很好的应用于纳米加工领域<sup>[1]</sup>。为此人们迫切需要发展一种可以方便快捷的纳米加工手段。

随着近场光学理论的提出和近场光学显微镜系统的发明让人们重新看到了突破衍射极限实现纳米级别光刻可能,1992年 Betzig 和 Trautman 首先利用近场光学显微镜在光刻胶上加工出了纳米级别的图形<sup>[2]</sup>。1995年 Krausch 等利用镀铝光纤探针稳定的在光刻胶上加工出了 50 nm 的纳米线,正式标志纳米光刻时代的开始<sup>[3]</sup>。但是由于光在通过传统的近场光学显微镜上的纳米级别的光纤探针,其光

强大大衰减。为此人们开始研究可以用于近场光刻的专用有机存储材料<sup>[4]</sup>。而随着近场理论的发展我们知道当光照射纳米颗粒或是探针时是因为 Mie 散射理论以及金属的表面等离子效应会发生局域场增强效应<sup>[5,6]</sup>。基于这种理论 S. M. Huang 利用将纳米颗粒分散在硅基底上使用纳秒激光对其照射成功加工出了纳米图形<sup>[7]</sup>,2006年 Y. Zhou 利用将 Si 颗粒分散在玻璃基底上利用飞秒激光直写成功加工 200 nm 的纳米孔<sup>[8]</sup>。而由于纳米颗粒辅助的局域场加工技术无法加工出较为复杂的图形,为此人们考虑利用将激光加在扫描探针显微镜纳米级别的针尖对物体进行加工。1998年 Jersch 利用 STM 的钨探针在纳秒激光的照射下对金薄膜进行了加工<sup>[9]</sup>。2003年加州大学伯克利分校的 A. Chimmalgi 尝试

**基金项目:** 全国百篇优秀博士毕业论文基金(2006039)、国家自然科学基金(50775104)和国家 863 计划(2006AA04Z307)资助课题。

**作者简介:** 言 峰(1982—),男,硕士研究生,主要从事局域场增强方面的研究。E-mail: tomcobra@263.net

**导师简介:** 周 明(1972—),男,博士,教授,主要从事飞秒微加工方面的研究。E-mail: zm\_laser@126.com (通信联系人)

在原子力显微镜的针尖部分耦合飞秒激光,利用探针针尖的局域场加强效应对金属薄膜进行纳米加工<sup>[10]</sup>。随着这项技术的发展和成熟它必将大大推动现有的精密加工和微细加工的发展,使得原子级的表面加工和超高密度的存储技术成为可能,为机械电子系统(MEMS)提供了良好的保障。

## 2 实验方法

### 2.1 实验系统设置

由于实验中我们使用了再生发后的飞秒激光,其单脉冲能量为 2.5 mJ 重复率为 1 kHz。为此我们先将飞秒激光通过半波片和偏振片所组成的一级衰减系统将飞秒激光的功率减小到 50 mW 以下,然后通过中性密度盘对飞秒激光进行二次衰减后将飞秒激光打入分光平片后将光束分为两束后,一束打入功率计对加工能量进行即时观察,由于透镜聚焦后的光束能量密度过大非常容易出现烧毁探针的情况,由此我们使用扩束管替代了透镜,将光斑缩小为原来的十二分之一后打入经过特殊改装的原子力显微镜(图 1)。

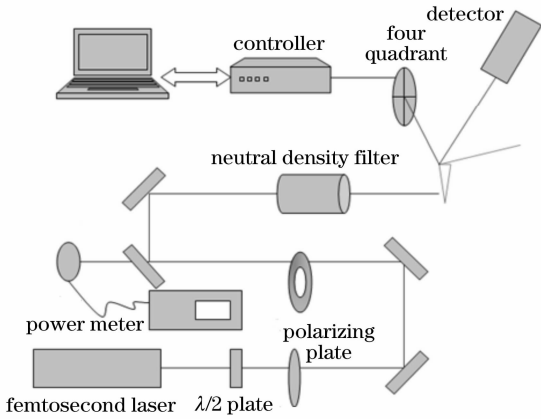


图 1 加工系统图

Fig. 1 Schematic diagram of manufacturing experimental setup

### 2.2 实验样品准备

在实验中我们选用 25 mm×25 mm 的盖玻片在 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1:3) 的溶液中清洗干净。然后在小型磁控溅射仪(K575X Emitech)上选用 30 mA 的电流溅射 2 min,在玻璃表面形成 40 nm 的金薄膜。

### 2.3 实验方法

实验中我们选用 Explorer 系统 (Veeco Santa Barbara, CA),所使用的探针为 Veeco 公司生产的 MLCT-ECEX 探针,我们选用其 C 型探针头部,探针长 320 μm,弹性系数为 0.01 使用这种探针在使用较大力量刮划金薄膜表面也不会造成任何的伤害。

对金属薄膜的加工,我们采用 Nanolithography 软件来实现这个功能。其主要原理是先使用 Nanolithography 软件对样品表面使用 Contact 模式成像,成像完成选得一块加工区域,在其表明按照我们需要的画上不同的的图形,然后在加工参数选项选定不同的针尖距离和加工速度。在加工完成后,我们再使用 Contact 模式成像得到加工图象。

## 3 实验方案与结果

### 3.1 实验方案的理论模型

尽管基于激光与扫描探针显微镜相结合的实验已经开展了十年之久,但是其具体的机理并不十分清楚。在过去的研究中有两种模型被人广泛使用: 1)利用探针区域光场变化导致其基底材料相变的场加强模型。2)由于探针在激光照射下受热膨胀导致的变化。理论上这两种模型可以看成是探针和加工样品表面在激光照射下发生的电动力学和热动力学两种现象。

而在我们实验中由于使用的飞秒激光作为加工光源。由于飞秒激光能量被限制在趋肤深度的范围内,其作用时间极短,能量还没有来得及扩散为热量,此时探针表面的热效应并不明显。由此可以认定场加强效应即当飞秒激光照射透明的绝缘纳米颗粒表面时由于米氏散射和透镜效应使得飞秒激光在近场区域能量密度大大增强应为我们近场区域内突破衍射极限完成对金属薄膜的纳米加工的主要物理模型。

### 3.2 加工能量对线宽的影响

在加工过程中我们发现如果我们人为的调整加工时的激光能量密度、加工速度可以明显的观察到加工线宽以及加工深度影响。为此我们对各个参数对加工线宽的影响进行了深入的研究。

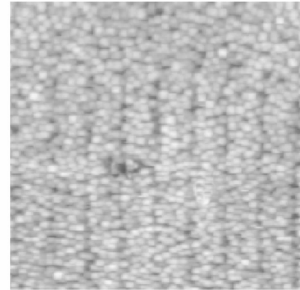


图 2 当单脉冲 10 mJ/cm<sup>2</sup> 为其加工阈值其最小线宽为 9 nm,扫描范围为 1 μm×1 μm

Fig. 2 Threshold of gold films single-pulse 10 mJ/cm<sup>2</sup> with line limit of 9 nm scan area: 1 μm×1 μm

在实验中我们使用 Liftmode 将针尖提升到样品的表面维持在 5 nm 左右,同时设定加工速度为  $1 \mu\text{m}/\text{s}$ 。通过改变加工能量来判断功率密度对加工线宽和加工深度的影响。如图 2 所示,加工过程中我们发现在单脉冲能量为  $10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  为其加工阈值的最小线宽为 9 nm,同时加工线宽出现了不连续的情况。

当能量小于  $10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  加工线宽和加工深度

已经接近我们薄膜的粗糙度,此时我们继续减小能量很难观察到连续的图形。如图 3 所示而当能量不断加大时其加工线宽随着能量的加大不断的加大,同时其加工深度也随着能量的加大而加大,当我们将能量密度加大到  $38 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  加工线条的半峰全宽达到了 50 nm,同时我们的膜厚仅为 40 nm,所以基本达到了我们加工薄膜的最大线宽。

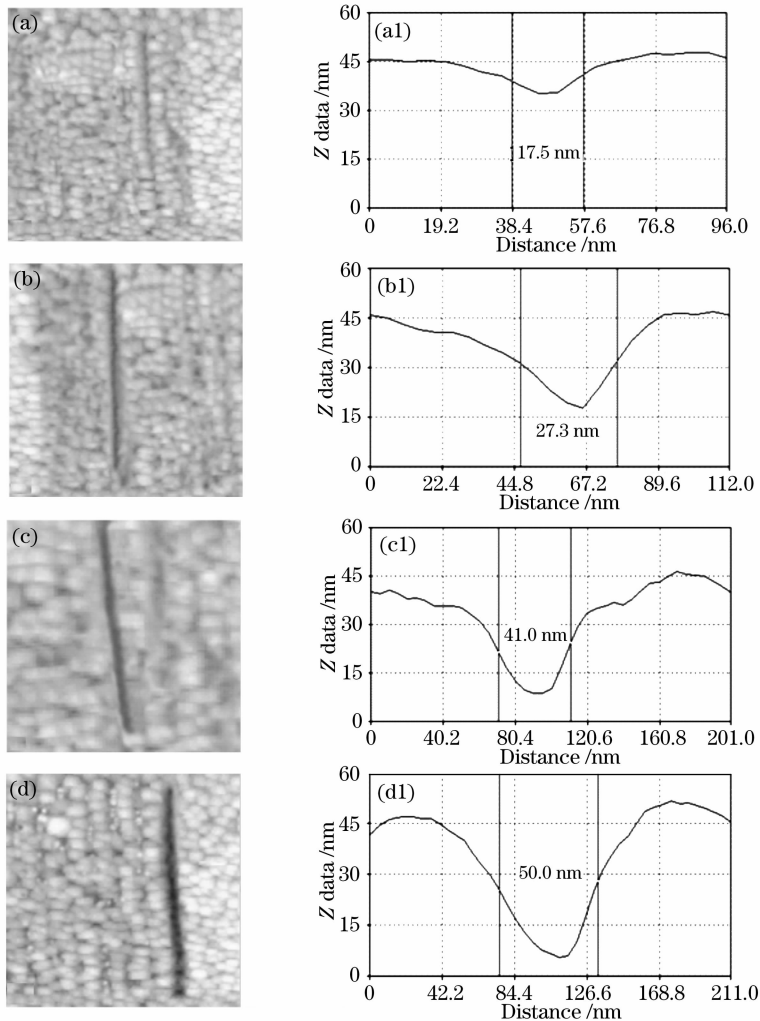


图 3 加工能量对线宽的影响。(a)在 40 nm 厚的金膜表面利用  $18 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  飞秒激光加工出了 17.5 nm 线条,(b)在 40 nm 厚的金膜表面利用  $23 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  飞秒激光加工出了 27.3 nm 线条,(c)在 40 nm 厚的金膜表面利用  $29 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  飞秒激光加工出了 41 nm 线条,(d)在 40 nm 厚的金膜表面利用  $38 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  飞秒激光加工出了 50.0 nm 扫描范围为  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$

Fig. 3 Lateral feature size and laser fluence. (a) Laser fluence about  $18 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  17.5 nm, (b) laser fluence  $23 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  27.3 nm, (c) laser fluence  $29 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  41.0 nm, (d) laser fluence about  $38 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  50.0 nm scan area:  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$

在图 4 中我们对加工线宽与加工能量的关系后发现其线宽与能量的关系几乎成线性关系。而由于薄膜的厚度为 40 nm 左右,我们在单脉冲能量

为  $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  发现其加工深度基本达到了其加工深度的极限。

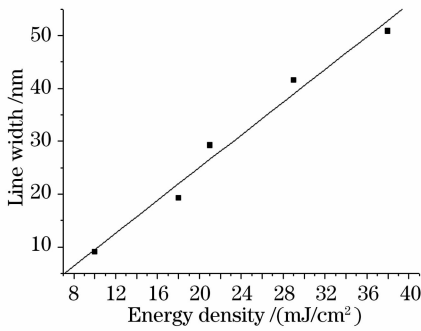


图 4 加工能量与加工线宽成线性关系

Fig. 4 Dependence of laser line width and laser energy density

### 3.3 加工速度对线宽的影响

如图 5 所示我们在实验中将在单脉冲能量为 30 mJ/cm<sup>2</sup> 的条件下,使用 Lifemode 将针提高到样品表面 3 nm 处,然后利用不同的扫描速度对样品

表面进行加工。当扫描速度为 1 μm/s 时我们发现其加工线宽为 29.8 nm,其加工深度为 8.2 nm。而当我们把加工速度提到 2 μm/s 时我们看到其加工线宽变为 25.5 nm,其加工深度为 6.4 nm,在 5 μm/s 的情况下我们看到其加工线宽变窄为 14.8 nm,同时其加工深度变为 4.6 nm。而在 10 μm/s 和 20 μm/s 的情况下我们可以看到其加工线宽已经基本达到阈值其加工线宽隐约可见,其加工宽度为 12 nm,加工深度为 4 nm。

如图 6 我们将加工速度与加工线宽对照发现,当加工速度在 5 μm/s 以下时加工线宽与加工速度成线性下降趋势,而当加工速度超过 5 μm/s 时加工线宽减小速率随着加工速度的减小趋势明显减小,当加工速度超过 10 μm/s 时加工线宽几乎达到加工阈值,线宽不再随着速度明显减小。

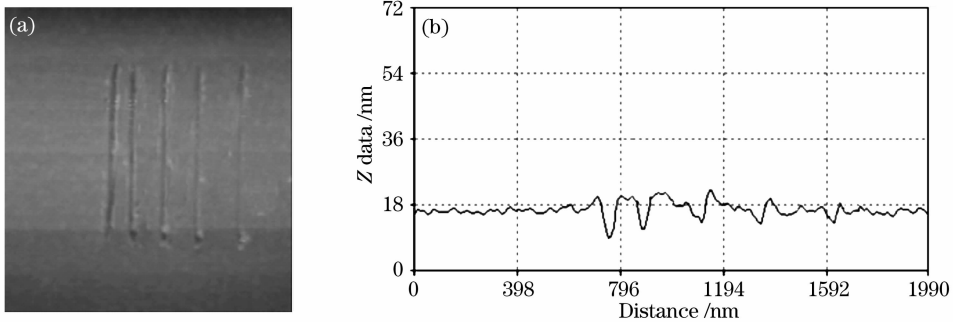


图 5 加工速度对线宽影响。(a)不同加工速度下对加工线宽的影响原子力图,(b)单线分析图扫描范围 2 μm×2 μm

Fig. 5 Laser line width and fabrication speed. (a) AFM image, (b) line profile of the fabrication scan area: 2 μm×2 μm

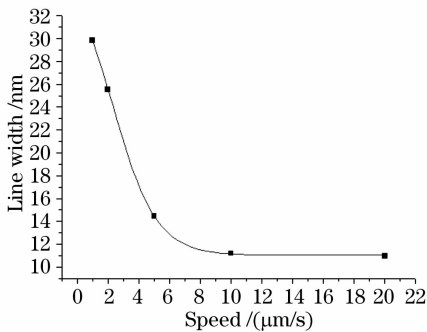


图 6 加工速度与加工线宽关系图

Fig. 6 Dependence of laser line width and fabrication speed

当我们认真研究了能量和加工速度对我们加工线宽的影响后我们选择在单脉冲能量 30 mJ/cm<sup>2</sup> 以及 1 μm/s 的扫描速度下对金薄膜进行复杂二维图形的加工,如图 7 (a)、图 7 (b) 分别加工了”NANO”和”YAN”两个单词,由于我们无法取出原子力显微镜内部的控制信号对我们激光器进行开关控制从而导致在加工过程中出现了连笔的情况。

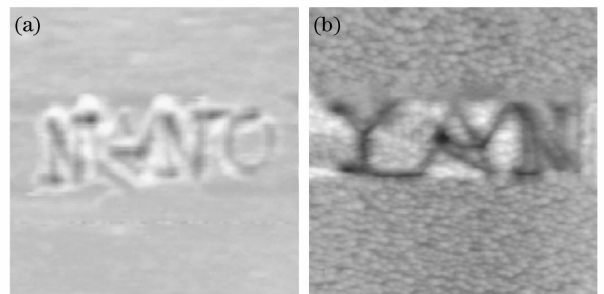


图 7 使用 30 mJ/cm<sup>2</sup> 飞秒激光在 1 μm/s 的扫描速度下对金薄膜加工。(a)“NANO”, (b)“YAN”扫描范围 1 μm×1 μm

Fig. 7 Gold film fabrication by laser fluence about 30 mJ/cm<sup>2</sup> with scan speed 1 μm / s. (a) “NANO”, (b) “YAN” scan area: 1 μm×1 μm

## 4 结 论

本文中我们建立了一套基于利用局域场增强效应结合原子力显微镜的纳米加工系统,利用当飞秒

激光照射透明的绝缘纳米颗粒表面时由于米氏散射和透镜效应使得飞秒激光在近场区域能量密度大大增强,从而可以在近场区域内突破衍射极限完成对各种材质纳米加工。在加工过程中我们发现如果我们人为的调整加工时的激光能量密度、加工速度可以明显的观察到加工线宽以及加工深度影响。为此我们对各个参数对加工线宽的影响进行了深入的研究,并且建立了加工参数与线宽的对应模型。我们同时考虑到了飞秒激光能量被限制在趋肤深度的范围内,其作用时间极短,能量还没有来得及扩散为热量,此时探针表面的热效应并不明显从而建立了利用探针区域光场变化导致其基底材料相变的场加强模型,这种全新的纳米加工系统将会应用于表面等离子体现象研究以及各种光电纳米器件的研究领域。

### 参 考 文 献

- Zhou Hui, Zhao Xiaofeng, Ruan Hao. Application of super resolution technology in high density storage [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(2): 54~60  
周 辉, 赵晓枫, 阮 昊. 光学超分辨技术在高密度光存储中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(2): 54~60
- Betzig E, Finn P L. Combined shear force and near-field scanning optical microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60** (20): 2484~2486
- Krausch G, Wegscheider S, Kirsch A J. Near-field microscopy and lithography with uncoated fiber tips: a comparison[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **119**(3~4): 283~288
- Liu Xuedong, Pu Shouzhi, Zhang Fushi. Synthesis and application of organic near-field storage material[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1460~1464  
刘学东, 蒲守智, 张复实. 有机近场存储材料的合成及其应用[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1460~1464
- M. Mosbacher, H.-J. Münzer, J. Zimmermann. Optical field enhancement effects in laser-assisted particle removal[J]. *Appl. Phys. A*, 2001, **72**: 41~44
- Xu Tiejun, Xu Jiying, Wang Jia *et al.*. Numerical analysis of interaction and perturbation between evanescent field and probe in optical field detection by SNOM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 465~469  
徐铁军, 许吉英, 王 佳等. 扫描近场光学显微镜探针与光场相互作用的分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 465~469
- S. M. Huang, M. H. Hong, B. Lukyanchuk *et al.*. Nanostructures fabricated on metal surfaces assisted by laser with optical near-field effects[J]. *Appl. Phys. A*, 2005, **77**: 293~296
- Y. Zhou *et al.*. Direct femtosecond laser nanopatterning of glass substrate by particle-assisted near-field enhancement[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**:023110-1~3
- Jersch J, Dickmann K. Nanostructure fabrication using laser field enhancement in the near field of a scanning tunneling microscope tip[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(6): 868~870
- Chimmalgi A, Choi T Y, Grigoropoulos C P. Surface nanostructuring by nano-/femtosecond laser-assisted scanning force microscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(8): 1146~1148