

文章编号: 0253-2239(2009)02-0473-05

探针诱导表面等离子体共振纳米光刻系统

赵成强¹ 徐文东¹ 洪小刚¹ 李小刚¹ 唐晓东²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 华东师范大学信息科学技术学院, 上海 200241)

摘要 提出了一种在原子力显微镜(AFM)基础上设计的探针诱导表面等离子体共振纳米光刻(PSPRN)系统。此系统不但实现了探针的精确控制,而且由于系统本身具有 AFM 的全部功能,因此可以实时检测样品表面的形貌以及光刻效果。系统采用改进的 Kretschmann 型共振耦合器件,在棱镜和样品基板之间注入匹配折射率油,使样品更方便更换;利用声光调制器与 AFM 配合实现了等离子体激发光照射时间的精确控制。通过初步实验,在银(Ag)膜表面获得了直径 100 nm 左右的光刻点,验证了 PSPRN 的可行性。研究了光照时间、激光功率、激光入射角、材料厚度等因素对光刻点大小、深度的影响,为实现更小的光刻点提供了参考。

关键词 光刻; 表面等离子体共振; 原子力显微镜; 探针

中图分类号 O539 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0473

Probe Inducing Surface Plasmon Resonance Nanolithographic System

Zhao Chengqiang¹ Xu Wendong¹ Hong Xiaogang¹ Li Xiaogang¹ Tang Xiaodong²

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² School of Information Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract A probe inducing surface plasmon resonance nanolithographic (PSPRN) system is introduced, which is constructed based on an atomic force microscope (AFM). Not only this system has realized accurate control of the probe, but the system itself has the complete function of AFM, it may examine surface appearance of the sample and the lithography effect in real time. The advanced Kretschmann resonance coupled device with index-matching oil between the prism and the substrate is used in this system, which makes the replacement of samples easier. Acousto-optic modulator combined with AFM is adopted to realize the accurate control of the irradiation time of plasma-excited laser. In preliminary experiment, lithographic spots with about 100nm in diameter are obtained on silver film, which has confirmed the feasibility of PSPRN. The effects of illumination time, laser power, material thickness, laser incident angle etc. on size and depth of lithography spots are studied, which provide reference for the realization of smaller lithographic spots.

Key words lithography; surface plasmon resonance (SPR); atomic force microscope (AFM); probe

1 引 言

随着纳米加工、微机电系统(MEMS)、集成电路等技术的迅速发展,为其服务的光刻技术也成了各国研究的焦点。为满足半导体产业中芯片集成度的飞速发展,光刻所用光源的波长迅速缩短,现在已经开始极紫外(EUV)、电子束投影光刻技术的研

究^[1]。然而,在纳米加工、MEMS 和一些特殊集成电路方面,由于产品个性化、小批量和更新周期变短等特点,无法使用大规模集成电路所采用的技术进行加工,且半导体产业中应用的光刻机价格昂贵,动辄数亿元的投资也为光刻技术的利用筑起了很高的门槛。研发具有成本低、操作简单、分辨率高等特点

收稿日期: 2008-08-26; **收到修改稿日期**: 2008-10-15

基金项目: 上海市基础性研究重大项目(06DJ14007)和国家自然科学基金重大项目(60490294)资助课题。

作者简介: 赵成强(1982-),男,博士研究生,主要从事原子力显微镜及等离子体光刻等方面的研究。

E-mail: chqzhao@163.com

导师简介: 徐文东(1966-),男,研究员,博士生导师,主要从事光存储相关测试、特殊光学显微镜、特殊扫描探针显微镜等方面的研究。E-mail: xuwendong@mail.sjtu.edu.cn(通信联系人)

的光刻设备就成了光刻技术发展的重要分支。目前,在这个分支上已经有多种技术产生,像激光直写技术、探针刻蚀技术和近场光学光刻技术等^[2,3]。但由于光刻分辨率、光刻效率、探针和贵金属等材料的消耗等问题的存在,上述光刻技术仍然不能满足要求。而且这些技术的很多专利和核心技术掌握在国外研究机构手中,进行新型光刻技术的研究就成了一项必不可少的课题。

探针诱导表面等离子体共振纳米光刻(PSPRN)是一种新型的探针辅助近场光刻技术,技术属于近场光学光刻技术的范畴,其利用探针在近场距离(非接触)内对介质/金属层界面形成的表面等离子体共振增强场^[4,5]进行扰动,使得耦合积聚的光能在临近探针的区域内传播,从而在探针处产生光能泄漏,进而在介质表面上实现刻蚀。有学者利用等离子体共振促使铝(Al)在水中发生化学反应,并刻蚀出了宽度为 20 nm 的线条,但其深度仅为 5.5 nm^[6]。由于等离子体共振可以使光能在样品表面大量积聚,因此光刻过程中需要的激光功率非常小;由于不受衍射极限的限制,PSPRN 理论上可以实现探针针尖大小的光刻点,与激光直写、近场光刻等其他个性化光刻技术相比,具有更高的分辨率^[7]。

2 光刻原理

金属表面,若自由电子受到电场影响和表面势阱的作用可能形成表面等离子体振荡(SP)^[8],并影响周围电子的运动使其向周围传播,形成了沿金属表面传播的电子疏密波,称为表面等离子体振荡波(SPW)。如图 1 所示,波矢为 k_0 的光波从介质层 a 入射到金属层表面并产生波矢为 k_s 的倏逝波,此倏逝波穿透金属并在金属层另一表面激发出 SPW。设电子疏密程度为 SP 波的振幅,此振幅在介质表面的 z 方向急剧衰减,而在 x 方向的衰减比较小。由 SPW 产生了 z 向和 x 向的电磁波,此电场可以

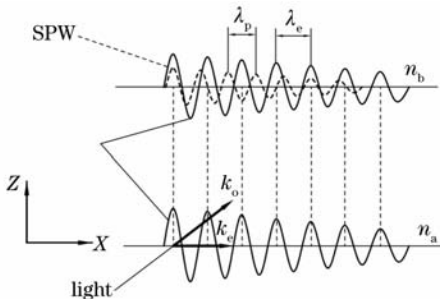


图 1 产生 SP 及 SPR 的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of SP and SPR production

写为

$$\mathbf{E} = E_0 \exp[i(k_x x \pm k_z z - \omega t)], \quad (1)$$

式中 \pm 分别对应 $z \geq 0$ 和 $z < 0$, 由于 z 向波矢 k_z 为虚数或者复数,使得 E_z 以指数的形式衰减,其中 $k_x = 2\pi/\lambda_p$, λ_p 为等离子体波的波长。经过计算可以得到

$$k_x = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

由于 SP 波和倏逝波的频率相等,因此若二者的波长相等则会发生表面等离子体共振 (SPR),入射光被吸收,使金属表面的场得到增强。但是 SP 的波矢总比自由空间光子的波矢大^[9],即 SP 的波长 λ_p 比 λ_e 小,因此要实现表面等离子共振必须引入耦合结构^[10]。

本 PSPRN 系统采用棱镜耦合方式在银膜表面激发 SPR^[4],并利用探针的局域场增强效应实现光刻^[11]。其过程为:入射 p 偏振光以共振角度从棱镜入射到 Kretschmann 型激发 SPR 膜系结构,并产生 SPR。当探针进入此共振增强场时,能量沿针尖泄漏并在针尖处产生局域场增强,即在针尖处获得高记录功率,可用于对超小记录位进行辅助加热,实现纳米光刻。采用时域有限差分 (FDTD) 法模拟的 PSPRN 系统如图 2 所示,模拟参数:光波波长为 514.5 nm;金属层和探针均为银 (Ag) 材料;金属层左边为平行光入射区,材料为 ZF6 光学玻璃,在光波长 514.5 nm 时折射率为 1.768;金属层右边区域介质为空气;探针针尖曲率半径为 10 nm,探针与金属层之间的距离为 5 nm。图 2 中方框内为局域场增强区域,可以看出在针尖与样品表面之间的场有极大的增强。

因为倏逝波的穿透能力很弱,所以金属层的厚度对场增强的影响比较明显。利用菲涅尔公式方法得到 PSPRN 的 SPR 膜系结构(棱镜、金属膜层及

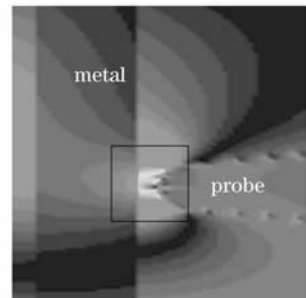


图 2 FDTD 模拟的 PSPRN 电场分布

Fig. 2 FDTD numerical simulation of electric field distribution for PSPRN

空气三层介质结构)及共振角度。在入射波长为 514.5 nm 的情况下,文中采用 Ag 为金属膜层,ZF6 为棱镜材料,模拟了不同厚度的 Ag 膜对 SPR 的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出:薄膜厚度对共振位置影响较小,但对共振深度影响较大,当 Ag 膜厚度为 50 nm 时反射谱谷值最小,共振深度达到最大,且共振峰最窄。因此样品制备的过程中需要精确控制 Ag 膜的厚度。

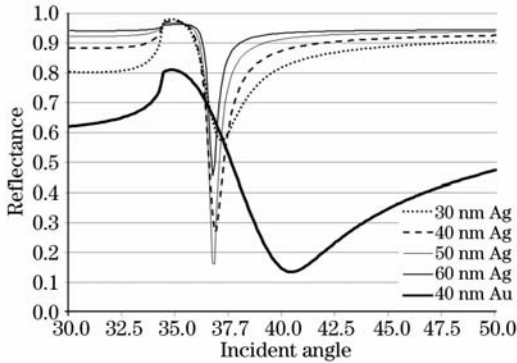


图 3 Ag 膜的光反射系数与入射角的关系

Fig. 3 Dependence of reflectance of silver film on incidence angle

3 实验装置

通过对一台自制的卧式原子力显微镜(AFM)进行改造,搭建了 PSPRN 系统,其中 AFM 的参数如表 1。在 AFM 基础上建立 PSPRN 系统,不但可以完成探针的精确控制,而且可以利用 AFM 的扫描成像功能对光刻图像进行观察。

表 1 AFM 参数

Table 1 AFM parameters

AFM parameter	AFM probe parameter
Scan range: 100 μm×100 μm	Height: 10~15 μm
XY resolution: 2 nm	Curvature radius: 10 nm
Z Resolution: 1 nm	Cone angle: ≤22°
	Reflecting surface is gold plated

3.1 系统结构

图 4 是 PSPRN 系统的光路图。所用的 AFM 为针尖扫描的大范围原子力显微镜,其优点是扫描过程中不受样品大小、重量的限制^[12],正适合改造为 PSPRN 系统。此 AFM 带有一个光学显微镜用于观察样品,在此实验中可被用于探针和激光聚焦光点的对准。

由图 4 所示,从激光器发出的激光被声光调制器调制之后,经扩束镜、反射镜、聚焦镜、棱镜、匹配

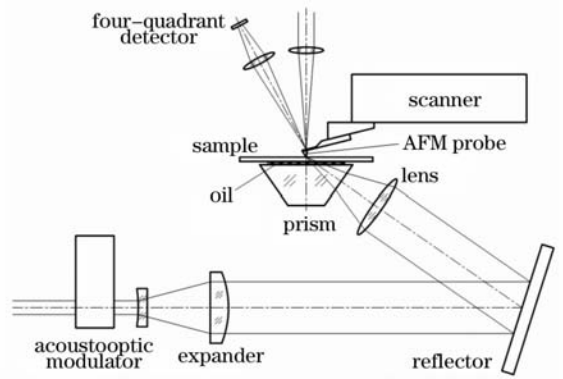


图 4 PSPRN 的光路图

Fig. 4 PSPRN optical pathway diagram

折射率油、样品基板,最终聚焦在样品表面上。

系统中表面镀 Ag 膜的样品放在棱镜上,样品基板和棱镜的材料均为 ZF6 光学玻璃。采用样品于棱镜分离的方式以便于样品的移动和更换,样品和棱镜之间填充匹配折射率油,以使光从棱镜直接入射到样品表面,避免在棱镜和样片表面发生光的全反射或部分反射,以减少光能损失。匹配折射率油应该选择对光吸收小而且必须和棱镜及玻璃基板折射率(1.768)相近的材料,本试验中选择“二碘甲烷+硫磺”以一定比例进行调制,可以使匹配油的折射率在 1.74~1.78 之间变化,可以满足实验要求,并尽量使油层变薄,以减少光吸收。

所用激光器为氩离子激光器,输出波长为 514.5 nm,光束直径为 1.5 mm,输出功率 0~200 mW 可调。声光调制器用于控制入射激光的通断,控制曝光时间。

扩束镜和聚焦镜配合使用,将激光聚焦成直径小于 200 μm 的光斑,从而使光能高度集中,提高了光刻点附近的光功率并缩短曝光时间,这对减小光

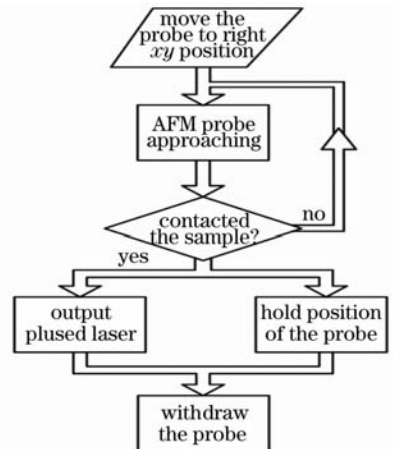


图 5 探针控制流程图

Fig. 5 Flow chart of probe control

刻点大小具有非常明显的作用。

3.2 系统控制

本系统采用 labview 进行编程控制,采用 NI 公司的 PCI-6259 进行数据采集和压电陶瓷(PZT)、声光调制器的控制。由于此 PSPRN 系统本身是原子力显微镜,因此其控制方式除在光刻时具有特殊的控制要求外,其他控制方式均与通用 AFM 相同^[12]。

由于探针与样品记录层之间的距离与光刻点的大小和深度具有直接的联系,因此需要严格控制光刻过程中探针与样品记录层之间的距离。图 5 为探针的控制流程图,图中所示:探针移动到待刻位置之后自动逼近到样品表面,由于控制探针移动的压电陶瓷

具有蠕变特性,因此当逼近动作停止时,探针会继续向样品挤压,此时必须对探针的位置进行反馈控制,而且此过程会持续相当长的时间(约 100 s)^[13]。本系统在光刻过程中采用双线程控制:一个线程对探针进行伺服反馈,控制探针位置恒定;另一个线程控制声光调制器产生激光脉冲。此控制方式消除了压电陶瓷蠕变特性的影响,提高了探针控制精度以及光刻效率。

3.3 光刻图形

图 6(a)是在此 PSPRN 系统上进行点阵光刻,并使用 AFM 本身的显微镜功能得到的观察图,扫描范围为 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$,其中 Ag 膜厚度为 40 nm,激光曝光功率为 $150\ \text{mW} \times 500\ \mu\text{s}$ 。

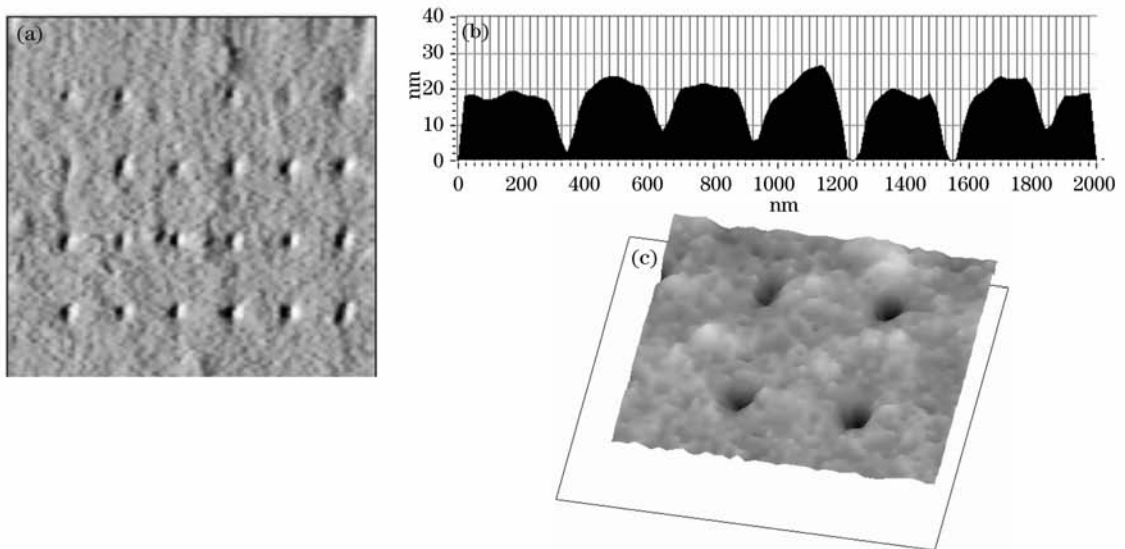


图 6 (a)光刻点阵的 AFM 扫描图;(b)截面图;(c) 3D 图

Fig. 6 (a) Lithography dot matrix of AFM scanning image; (b) section diagram; (c) 3D image

因为所用 AFM 检测探针位置利用的是光杠杆原理,因此必须将探针倾斜一定的角度(本 AFM 中探针倾斜 14°)^[13],从而导致针尖不在垂直于样品表面,致使光刻点发生变形。由图 6(a)和图 6(c)中可以看出:光刻点的形貌不是均匀的圆形,而是在某个方向有所拉长。图 6(b)为光刻矩阵横向截面图,其中横向坐标为图像宽度,纵向坐标为深度,光刻点直径平均值在 100 nm 左右。

4 结果分析

4.1 曝光时间对光刻点的影响

图 7 是单层 Ag 膜在 50 mW 的激光器出射功率下光刻点的宽度和深度与曝光时间的关系图。由图可知,随着曝光时间的增加,光刻点的直径、深度会随之增加。由图 2 的模拟图可以看出,增强场在

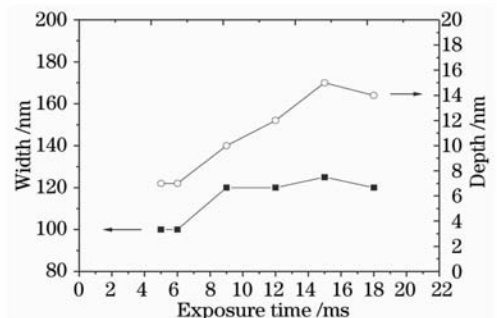


图 7 光刻点的宽度和深度与曝光时间的关系图

Fig. 7 Relation graph of width and depth of lithography points to exposure time

光刻点直径方向衰减迅速,而在深度方向有比较长的衰减长度,因此随着曝光时间的增加深度的增加系数更大。而且,由于 AFM 是以等高模式工作,刻蚀的过程中探针会随着光刻点的形成深入到其底

部,对光刻点深度的增加也起到一定的作用。若继续增加曝光时间,则由于 SPR 的作用,大量热量积聚在样品表面使整个样品被烧坏。

4.2 激光功率对光刻点的影响

激光记录功率也是影响光刻点尺寸的重要因素。分别用 $25\text{ mW} \times 18\text{ ms}$, $50\text{ mW} \times 10\text{ ms}$, $100\text{ mW} \times 1\text{ ms}$ 和 $150\text{ mW} \times 500\text{ }\mu\text{s}$ 的激光出射功率及曝光时间进行光刻实验,观察光刻点的直径和深度变化情况(所采用的曝光时间是该功率下最接近阈值的优化脉宽)。在不同的光刻功率下,光刻点直径没有明显变化,但光刻点深度则会随着激光功率的增加而迅速增加。由于激光入射功率增大,导致针尖处场强增大,而作用于记录层的光刻临界场强值不变,那么光的作用范围变大,而且主要表现在沿着探针方向的薄膜垂直方向上。根据散射光公式

$$E_0 \exp(-\beta x_0) = E_c \Rightarrow x_0 = \frac{\ln E_0 - \ln E_c}{\beta}, \quad (3)$$

式中 E_0 为入射光场强, E_c 为光刻临界场强值, β 为光衰减系数, x_0 为光在垂直方向上的传播距离。

随着激光功率的增加(即 E_0 增加),光在垂直方向上的有效作用距离增大,使光刻点深度加大。而由于激光功率增加的过程中,曝光时间也随之减小,热扩散减小,这对光刻点直径的控制也起到比较好的作用。

由以上结果可以得到,增加激光功率并缩短曝光时间对缩小光刻点直径、增加光刻点深度具有非常好的作用。本文中所述的激光出射功率,均为光从激光器出射时的功率,而由于反射损耗等因素的存在,到达光刻点附近的光能小于 10%,实际被利用的光能更小。

5 结 论

PSPRN 是一种全新的光刻方式,与其他光刻方式相比具有分辨率高、光能消耗小的优点,具有比较好的研究前景。本文中通过对 AFM 改造,搭建了 PSPRN 的实验系统,并在 Ag 膜表面获得了直径 100 nm 左右的光刻点,研究了各种因素对光刻点大小、深度的影响:

1) 曝光时间对光刻点的大小和深度影响比较大,随着曝光时间的增加,光刻点大小和深度都会增加,但光刻深度更迅速。

2) 光刻功率对光刻点大小影响不大,但对光刻深度的增加具有非常明显的效果。

因此,要获得更小更深的光刻点,通过缩小聚焦光点、增加光能利用率,以提高照射区膜面的光功率密度并缩短曝光时间,可以得到比较好的效果。就本实验装置而言:若通过镀增透膜或增反膜、增大聚焦镜的数值孔径、棱镜改为半球镜等措施增加光能的利用率,还会有显著的性能提升。

参 考 文 献

- Zhang Xingqiang, Cheng Yuanli, Wang Qi. Concept design of three-line capillary: possible source for extreme ultraviolet lithography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 81~84
张兴强,程元丽,王 骥. 可用于极紫外光刻的三线毛细管的概念设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 81~84
- Liu Jiajun, Wang Zemin, Li Aikui *et al.*. Thresholds of laser power density in fabricating strip optical waveguides by laser direct writing method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 765~770
刘家骏,王泽敏,李爱魁等. 激光直写法制备条形光波导中的功率密度阈值[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 765~770
- Yan Feng, Zhou Ming, Fan Xiaomeng *et al.*. Near-field nanofabrication technology base on local field enhancement effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 176~180
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): 176~180
- Heinz Raether. *Surface Plasmon on Smooth and Rough Surface and on Gratings*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 10
- R. E. Wilems, R. H. Ritchie. Quantum theory of the plasma resonance emission process [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, **19**(23): 1325~1327
- D. Haefliger, A. Stemmer. Writing subwavelength-sized structures into aluminium films by thermo-chemical aperture-less near-field optical microscopy[J]. *Ultramicroscopy*, 2004, **100**: 457~464
- S. M. Huang, M. H. Hong, Y. F. Lu *et al.*. Pulsed-laser assisted nanopatterning of metallic layers combined with atomic force microscopy[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(5): 3268~3274
- Zhao Xiaojun, Chen Huanwen, Song Daqian *et al.*. Surface plasmon resonance sensor, part I: Fundamentals[J]. *Analytical Instrumentation*, 2004, (4): 3~10
赵晓君,陈焕文,宋大千等. 表面等离子体共振传感器 I: 基本原理[J]. *分析仪器*, 2004, (4): 3~10
- E. N. Economou. Surface plasmon in thin films[J]. *Phys. Rev.*, 1969, **182**(2): 539~554
- Wu Bin, Wang Qingkang. Optical device based on metal surface plasmons[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(5): 513~518
吴 斌,王庆康. 基于金属表面等离子体的光学器件[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(5): 513~518
- A. L. Demming, F. Festy, D. Richards. Plasmon resonances on metal tips: Understanding tip-enhanced Raman scattering[J]. *The J. Chem. Phys.*, 2005, **122**(184716)
- Yang Jintao, Xu Wendong. Design of optical tracking for scanned-cantilever atomic force microscope [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 26~30
杨金涛,徐文东. 针尖扫描原子力显微镜的光点跟踪设计[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 26~30
- Fan Wei, Yu Xiaofen. Study on PZT actuator creep characteristics [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(11): 1383~1386
范 伟,余晓芬. 压电陶瓷驱动器蠕变特性的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(11): 1383~1386