

文章编号: 0253-2239(2010)10-3049-05

探针对表面等离子体共振的影响

洪小刚¹ 徐文东¹ 赵成强¹ 唐晓东²

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800)
²华东师范大学信息科学技术学院, 上海 200241

摘要 采用时域有限差分方法(FDTD)对探针诱导表面等离子体共振耦合纳米光刻(PSPRN)技术中探针的引入对表面等离子体共振(SPR)产生的影响进行了模拟分析,以获得最佳的光刻实验条件。结果表明,高斯光束聚焦光斑越小,SPR场增强效应也越小。接触模式下,针尖曲率半径为10 nm的硅(Si),35 nm,100 nm的金(Au)探针,分别使SPR共振角变化了0,0.8°和1°。且对于Au探针,针尖曲率半径大的,针尖处的局域场增强效应要小。分析表明,采用针尖曲率半径为10 nm的Si或35 nm的Au探针,在合适的SPR膜层上通过调整光入射角度,很有可能实现50 nm的光刻记录点。

关键词 表面光学;表面等离子体共振;时域有限差分方法;探针

中图分类号 O484;O485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.3049

Effect of Probe on Surface Plasmon Resonance

Hong Xiaogang¹ Xu Wendong¹ Zhao Chengqiang¹ Tang Xiaodong²

(¹Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
²School of Information Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract In order to get the best lithography conditions, the effect of the probe on surface plasmon resonance (SPR), which is utilized in probe induced surface plasmon resonance coupling nanolithography (PSPRN), has been investigated by using finite difference time domain (FDTD) method. The results show that SPR field enhancement effect is small with a small waist radius of fundamental mode Gaussian beam. When working in contact mode, Si probe with a tip radius of curvature of 10 nm, and 35 nm and 100 nm for Au probes, make the SPR resonance angle change 0, 0.8°, 1° respectively. For Au probes, smaller tip radius of curvature can get stronger local field enhancement effect. Analysis showed that with a Si probe of 10 nm tip radius of curvature or a Au probe of 35 nm tip radius of curvature probe, by adjusting the incident angle, it is likely to realize experimentally a 50 nm recording spot with a suitable SPR film structure.

Key words surface optics; surface plasmon resonance(SPR); finite difference time domain method(FDTD); probe

1 引 言

近几年来表面等离子体共振(SPR)技术^[1]在光刻方面的应用越来越多^[2~10],并取得了很大的进步。其中探针诱导表面等离子体共振纳米光刻(PSPRN)技术已经在理论上得到验证^[3],并在基于原子力显微镜的光刻系统上^[11],采用针尖曲率半径

为10 nm的硅(Si)探针在单层Ag膜(厚40 nm)SPR结构上获得了直径为80 nm的记录点^[12]。但理论上PSPRN技术可获得探针针尖尺寸大小的记录点。实验采用三层膜层结构最好也只能获得直径为140 nm记录点,且实验条件包括激光光刻功率及曝光时间比较难以确定。分析其原因主要有:1)

收稿日期: 2009-12-07; **收到修改稿日期**: 2010-02-25

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60490294)和上海曙光计划(06SG30)资助课题。

作者简介: 洪小刚(1982—),男,博士研究生,主要从事近场纳米光刻方面的研究。E-mail: hxg910@siom.ac.cn

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SPM显微镜和特殊光学系统设计等方面的研究。E-mail: xuwendong@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

膜层粗糙度影响,实验所镀的薄膜在 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 的范围内均方根粗糙度为 $2\ \text{nm}$,最大起伏 $5\ \text{nm}$ 。粗糙的 Ag 膜表面会产生局域 SPR 场增强,从而增大了光刻临界值^[3],其他膜层的表面粗糙度一定程度上影响了膜层的 SPR 共振场增强,且随着膜层数的增加影响越大,实验效果也越差。2)膜层结构未优化,未能在记录层表面获得大的场增强,导致剩余大量不能用于光刻并会对膜层产生副作用的能量。3)探针引入对 SPR 产生影响,实验是先通过激发 SPR 来确定激光入射角,且探针的引入会对 SPR 产生影响,此时场增强一般不是最大,未能充分利用场增强。而光刻是通过探针的局域场增强^[13]来实现的,SPR 的变化反过来也影响了针尖处的局域场增强。4)Si 探针的局域场增强太小,很难确定合适的入射激光功率、曝光时间及获得明显的记录点。

对于膜层表面的粗糙度影响很难从理论上进行分析,只能靠改进镀膜工艺来减小,而膜层可采用菲涅耳(Fresnel)公式^[14]进行优化设计,因此本文主要是分析探针的引入对 SPR 的影响,以获得最佳的探针工作方式。文献[15]只是对针尖曲率半径为 $10\ \text{nm}$ 的探针,并且探针距离记录层 $5\ \text{nm}$ 的情况进行了分析,得出探针对 SPR 没有影响的结论。但探针针尖的曲率半径往往是大于 $10\ \text{nm}$ 的,并且理论上探针采用接触模式对 SPR 的影响更大。因此有必要分析接触模式下,探针对 SPR 的影响,及探针针尖处场增强效应。采用时域有限差分方法(FDTD)^[16]模拟分析平面波源和聚焦基模高斯波源激发 SPR 的差别,接触模式下 Au 及 Si 探针的引入对 SPR 的影响,并分析探针针尖处局域场增强效应。

2 FDTD 模型

计算模型如图 1 所示^[15]。模拟采用归一化的 p 偏振基模高斯波源,波长为 $514.5\ \text{nm}$,入射角为 θ ,并采用双波法分别求得电场强度两分量分布^[3],再将两分量平方相加开根求得电场强度振幅分布。模拟的三层 SPR 膜层结构:棱镜、金属银膜层、隔热层 SiO_2 、记录层 AgO_x 及空气层。入射波源聚焦在棱镜与金属银膜层的分界面,束腰半径大小为 ω_0 ,束腰处电场强度振幅为 1。探针形状为锥形,锥角为 20° ,针尖为曲率半径为 r 的半圆。计算网格尺寸为 $1\ \text{nm} \times 1\ \text{nm}$,网格数为 1000×10000 。设定记录层表面为空气层中距离记录层最近的一层网格。各种介质对波长为 $514.5\ \text{nm}$ 的光折射率及膜层厚度如

表 1 所示^[15]。

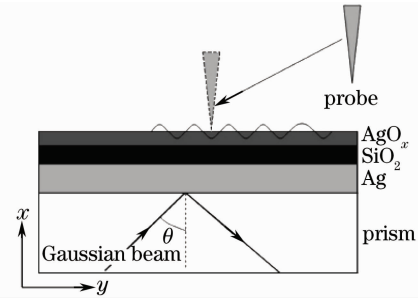


图 1 模拟模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the simulations

表 1 系统参量

Table 1 System properties

Materials	Refractive index n	Film thickness
	($514.5\ \text{nm}$)	/nm
Silver (Ag)	$0.144 + 2.993i$	40
SiO_2	1.463	10
AgO_x	$2.387 + 0.087i$	10
Gold (Au)	$0.638 + 2.096i$	
Vacuum	1	
Silicon (Si)	$4.225 + 0.06i$	

3 模拟结果分析

3.1 基模高斯波源激发 SPR

采用 Fresnel 公式计算膜层的透射角谱,并与采用归一化的平面波源及基模高斯波源模拟获得的相比较,分析入射光源对场增强的影响。由文献[14]可得三层 SPR 膜层结构即五层介质结构的磁场强度透射角谱 t_H 。但发生共振时的透射场是倏逝场,文献[14]的(16)式已不再适用。经推导,获得下面的电场强度透射系数计算公式:

$$t_E = \begin{cases} |t_H \times n_1/n_5|, & \theta < \theta_c \\ |t_H \times n_1/n_5| \sqrt{2 \left(\frac{n_1 \sin \theta}{n_5} \right)^2 - 1}, & \theta \geq \theta_c \end{cases} \quad (1)$$

式中 n_1, n_5 分别是棱镜和空气的折射率, θ_c 为全反射临界角。

图 2 是 Fresnel 公式计算的和采用平面波源(F-P)模拟的透射角谱,以及采用 $\omega_0 = 0.7\ \mu\text{m}$ 的基模高斯波源(F-G)模拟获得的记录层表面最大电场强度振幅随角度变化曲线,定义为基模高斯波源的透射角谱。如图 2 所示,公式计算和 F-P 曲线是基本重合的,因此在一定程度上说明了 SPR 共振膜层是可以采用 Fresnel 公式优化设计的。而 F-G 曲线与另外两条不重合,表现在透射系数要小,但透射系

数最大对应的入射角基本一样。这是因为相比平面波,聚焦高斯光束有一定发散角,沿非 SPR 共振角方向入射的光对场增强的贡献相对要小。因此,对于不同膜层结构,要充分利用入射光能量,应该综合考虑聚焦后束腰处电场强度振幅大小及聚焦对场增强的影响。

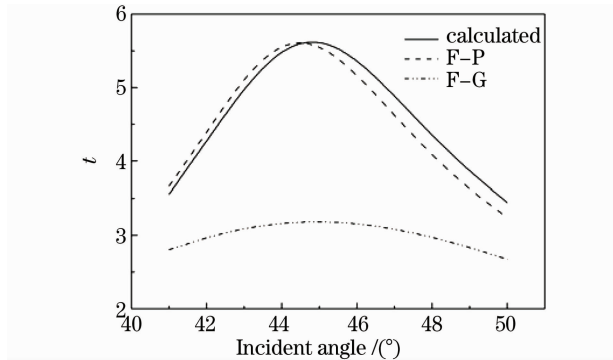


图 2 计算及模拟获得的透射角谱

Fig. 2 Curves of transmission coefficient obtained by calculating and simulation

对于一定功率的基模高斯光束,束腰处电场强度振幅大小 E_0 为

$$E_0 = A(P/\omega_0^2)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 A 为常数, P 为高斯光束功率。经场增强后,记录层表面的电场强度振幅大小为

$$E = E_0 G = AP^{1/2} (G/\omega_0), \quad (3)$$

式中 G 为 SPR 场增强因子,亦即膜层的基模高斯波源透射系数。

以上述膜层结构为例,模拟高斯光束 45° 入射时可实现范围内不同 ω_0 光束的 SPR 场增强效应,如图 3 所示。对于该膜层结构,随着 ω_0 的增大, G 增大, G/ω_0 减小,这种情况下高斯光束聚焦光斑应尽可能小以充分利用膜层结构的 SPR 场增强效应及入射光能量。对于透射角谱峰值半峰全宽小的 SPR 膜层结构,聚焦对场增强影响较大,在 ω_0 的可实现范围内 G/ω_0 就很有可能不是单调的。这是因为以高斯光束为光源的 SPR 膜层结构的 G 是光束束腰附近一定范围内不同入射角度的光线共同作用的结果。随着 ω 的减小,光束发散角增大,光线入射角度范围也增大,并有可能产生透射。因此 G 随着 ω 变化的曲线呈两头渐渐趋于水平的“J”形状,亦即 G/ω_0 总体随 ω 的增大而减小,且在一定范围内会出现一个峰。此外 SPR 膜层结构的透射角谱峰值半峰全宽越小,峰所对应的 ω 越有可能在可实现范围内。此时应该通过模拟计算来分析确定最佳的聚焦光斑大小。

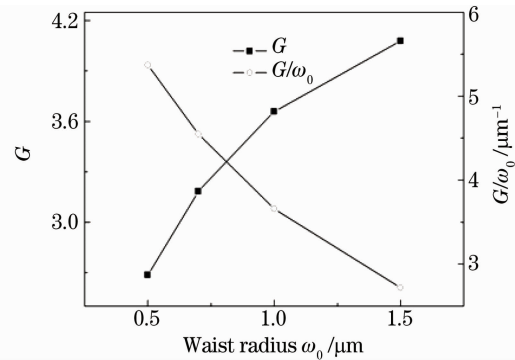


图 3 45° 入射时 SPR 场增强与束腰大小的关系

Fig. 3 Relation between SPR field enhancement factor and waist radius at incident angle of 45°

3.2 探针对 SPR 的影响

探针采用的是上海爱建纳米科技发展有限公司的原子力显微镜探针,包括硅探针,其典型的针尖曲率半径 r 为 10 nm,及 Au 探针 ($r=35$ nm)。为了进行对比,还模拟了 $r=100$ nm 的 Au 探针。探针放置在未加探针时记录层表面电场强度最大处,模拟结果如图 4 所示,其中 $\omega_0=0.7$ μm 。图中 F-G 与图 2 中的一样, F-G (Si 10), F-G (Au 35), F-G (Au 100) 分别表示三种探针针尖处的电场强度振幅大小随入射角度变化的拟合曲线。可见,接触模式下, $r=10$ nm 的 Si 探针产生的最大电场强度所对应的共振角 θ_R 与膜层共振角一样,此时探针对共振角的影响可以忽略;对于 Au 探针,随着 r 的增大, θ_R 也跟着增大,其中 $r=35$ nm 时, θ_R 增大 0.8° , $r=100$ nm 时, θ_R 增大 1° ,同时探针针尖的局域场增强效应也减弱了。

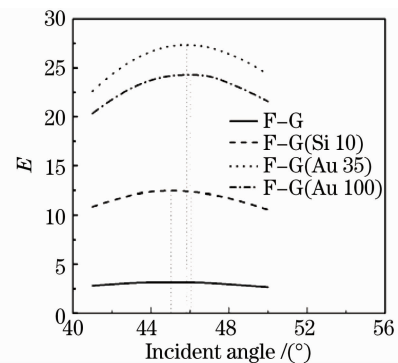


图 4 探针针尖处的电场强度振幅随角度的变化曲线图

Fig. 4 Curves of the amplitude of electrical field strength at the apex of probe versus incident angle

进行光刻实验时是通过测量反射光强来确定入射角的,亦即以反射率最小时的入射角为光刻入射角。模拟的膜层结构的反射率最小对应的入射角 45.7° ,而共振场增强最大时对应的入射角为 44.8° 。

从探针共振角的影响来看,采用 Si 探针时入射角偏大,35 nm Au 探针则正好,而 100 nm Au 探针却稍偏小,可见采用 Si 探针并没有完全利用 SPR 场增强效应。

探针的加入同时也影响着记录层表面的电场强度分布,这不单有探针针尖处局域场增强的影响,也有探针对倏逝波的反射。图 5 为采用三个不同探针时模拟的记录层表面的电场强度振幅分布,其中图 5(a)模拟的入射角为 45° ,图 5(b)和(c)的入射角

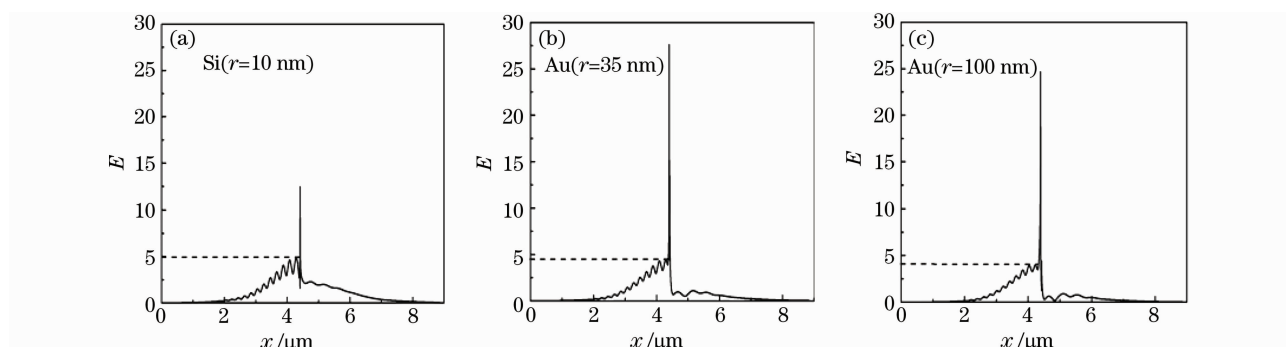


图 5 记录层表面的电场强度分布

Fig. 5 Distribution of electrical field strength on the surface of the recording layer

4 结 论

综合上述模拟结果及讨论得出探针对表面等离子体共振的影响,结果表明:未加探针时,高斯光束聚焦越小场增强也越小,对于一定功率的高斯光束应综合考虑聚焦后束腰处电场强度振幅大小及 SPR 的场增强。对于上述 SPR 膜层结构,聚焦应尽可能小。接触模式下,探针针尖曲率半径越大,对 SPR 的影响也越大,表现在共振角度的增大、探针针尖处的局域场增强减小。虽然 Si 探针的局域场增强不大,但其针尖曲率半径小,可获得超小光刻记录点;相反,虽然 Au 探针针尖曲率大,但其局域场增强较大,易获得超针尖尺寸光刻记录点。可见依照上述结论,采用 $r=10$ nm 的 Si 探针和 $r=35$ nm 的 Au 探针,再经实验分析获得最佳的实验条件,很有可能实现 50 nm 左右的光刻记录点,这有待于改进镀膜工艺后实验验证。

参 考 文 献

- 1 H. Raether. Surface Plasmon on Smooth and Rough Surface and on Gratings[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 16~18
- 2 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
- 3 Hong Xiaogang, Xu Wendong, Li Xiaogang *et al.*. Numerical simulation of probe induced surface plasmon resonance coupling nanolithography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57** (10): 6643~6648
- 4 X. Luo, T. Ishihara. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**: 4780~4782
- 5 D. B. Shao, S. C. Chen. Numerical simulation of surface-plasmon-assisted nanolithography [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 6964~6973
- 6 Fang Liang, Du Jinglei, Guo Xiaowei *et al.*. The theoretic analysis of maskless surface plasmon resonant interference lithography by prism coupling[J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(7): 2499~2503
- 7 Xiong Wei, Du Jinglei, Fang Liang *et al.*. 193 nm interference nanolithography based on SPP[J]. *Microelectron. Engng*, 2008, **85**: 754~757
- 8 K. V. Sreekanth, V. M. Murukeshan, J. K. Chua. A planar layer configuration for surface plasmon interference nanoscale lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**: 093103
- 9 Wei Xingzhan, Luo Xiangang, Dong Xiaochun *et al.*. Localized surface plasmon nanolithography with ultrahigh resolution[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(21): 14177~14183
- 10 Zeng Beibei, Zhao Yanhui, Fang Liang *et al.*. Improved near field lithography by surface plasmon resonance[C]. *SPIE*, 2009, **7284**: 728414
- 11 Zhao Chengqiang, Xu Wendong, Hong Xiaogang *et al.*. Probe inducing surface plasmon resonance nanolithographic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 473~477
- 12 Li Xiaogang. Study on Probe-Induced Optical Recording Materials with Surface Plasma Resonance [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese

为 46° 。记录层表面的电场强度在最高峰的左边呈驻波形式,而右边的电场强度则随着 r 的增大而减小,这是文献[12]实验的光刻记录点为长椭圆形的的主要原因。相比文献[15],接触模式下,图中最高峰边上的次峰高度也增大了,这使得采用 Si 探针更难获得最佳的实验条件。从图中还可以看到,随着 r 的增大,次峰高度反而减小,这是因为探针针尖模型是圆形,对倏逝波不是完全水平反射,曲率半径越大,非水平反射越多。

- Academy of Sciences, 2008, 25~26, 50~64
- 李小刚. 基于表面等离子体共振的探针诱导光存储材料研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008, 25~26, 50~64
- 13 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
- 14 Biow Hiem Ong, Xiaocong Yuan, Swee Chuan Tjin *et al.*. Optimised film thickness for maximum evanescent field enhancement of a bimetallic film surface plasmon resonance biosensor [J]. *Sensor Actuat. B*, 2006, **114**: 1028~1034
- 15 Hong Xiaogang, Xu Wendong, Li Xiaogang *et al.*. Field enhancement effect of metal probe in evanescent field [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 74~77
- 16 A. Taflove, S. Hagness. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 2ed [M]. Boston: Artech House, 2000: