

# 照明模式 SNOM 中样品对近场光场分布的影响

范兆忠<sup>1</sup> 王学恩<sup>1,2</sup> 唐天同<sup>1</sup>

(1 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

**摘要** 在同时考虑样品的形貌及材料光学参量和入射光偏振模式的情况下, 利用基于边界元方法编写的二维矢量电磁场计算程序, 对工作在照明模式下的扫描近场光学显微镜(Scanning Near-field Optical Microscope, SNOM)的近场矢量电磁场分布进行了数值计算模拟研究. 结果表明, 在没有表面形貌特征时, 探针的光能量透射率随样品材料的折射率和损耗角的增加而增大, 而样品表面光斑尺寸受折射率和损耗角的影响很小; 对有形貌特征的探针扫描像研究结果表明, SNOM 的分辨率随着样品的折射率和损耗角的增加而提高; 对 SNOM 不同的工作模式的扫描成像信号进行的计算结果表明, 恒定间距扫描方式比恒定高度扫描方式对样品表面的细节有较强的分辨能力.

**关键词** 近场光学; 光探针; 边界元法; 扫描近场光学显微镜

**中图分类号** TH253 **文献标识码** A

## 0 引言

SNOM 突破了传统光学显微镜分辨率的衍射极限, 在过去几十年中得到飞速发展<sup>[1,2]</sup>. 在 SNOM 中, 一个具有亚波长结构的光探针在样品表面扫描, 可以获得样品表面超高分辨率的形貌和光学特性衬度信息. SNOM 可以分成两大类结构形式: 收集模式 SNOM 和照明模式 SNOM<sup>[3,4]</sup>. 在照明模式中, 光探针作为样品的照明光源, 使用它尖端近场区的消逝波来照明样品从而激发远场收集信号; 而在收集模式 SNOM 中, 样品被远场区的照明光源照明, 探针则作为探测元件, 在样品表面的近场区收集样品表面的由远场波激发的消逝波. SNOM 在两种工作模式下都可以获得超衍射极限的高分辨率, 主要是由于 SNOM 的极限分辨率不是受到光学系统成像的衍射限制, 而是由探针尖端开口大小决定.

在 SNOM 应用中, 探针与样品之间的近场光场的分布主要决定了 SNOM 的性能, 该近场光场的分布不但与探针的结构及入射光波的偏振性质有关, 而且还受到样品的形貌和光学性质影响. 许多实验工作表明, 样品的形貌及介电常量都影响了近场分布<sup>[5,6]</sup>. 样品特性对近场的影响理论及数值研究也有报道. 有人对具有形貌结构样品的近场光场的分布进行了数值分析, 在忽略探针作用的情况下, 研究了光子扫描隧道显微镜(PSTM)或收集模式 SNOM 的成像问题<sup>[7,8]</sup>. 对于照明模式, 有人使用一个在外电流驱动下的矩形金属结构, 来模拟二维探针, 研究了样品材料的光学参量对于 SNOM 扫描像的关

系<sup>[9]</sup>.

在以前的工作中, 已经建立了照明模式 SNOM 的数学计算模型, 并使用有限积分法数值计算了一个圆形光探针孔附近的近场分布<sup>[10,11]</sup>. 本文则使用基于格林函数法编写的计算程序, 在比较接近实际的照明模式 SNOM 的二维模型中, 从两个方面研究了样品光学特性与 SNOM 成像的关系. 首先不考虑样品的形貌结构, 研究了近场区样品的介电常量和导电性对于探针透射率和样品表面光斑大小的影响. 其次, 在一定样品形貌结构下, 研究了恒定高度扫描和恒定间距两种扫描方式下获得的扫描像信号, 讨论了扫描像信号的分辨率和空间频谱性质.

## 1 计算模型

在 SNOM 工作中, 探针不管是作为收集模式下的探测元件还是作为照明模式下近场光源, 都是起决定性作用. 因此, 建立 SNOM 探针的模型是非常重要的, 也是 SNOM 各种数值研究中建立模型的核心. 本文研究的二维 SNOM 的探针模型如图 1. 探针左边部分为一个宽度为  $2h$  的均匀平板波导, 右边部分为一个长度为  $L$ 、开口大小为  $\Delta$  锥形结构, 其中探针除了均匀波导左边的入口和探针右边锥形尖端的开口, 全部由金属覆盖. 激励光波从探针左边的入口入射, 由于探针左边的均匀波导一般很长, 因此激励光波通常为均匀波导的行波本征模. 样品表面距离探针开口处的距离为  $H$ . 整个计算区域分为三个部分, 就是探针内部、探针外部和样品内部三个部分, 假设它们都由均匀介质构成, 相对介电常量依次为  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  和  $\epsilon_3$ .

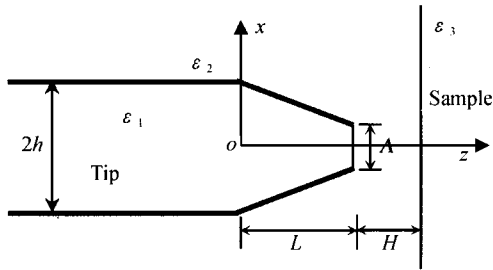


图1 SNOM系统模型

Fig.1 Computation modal of SNOM

采用基于格林函数法开发了用于研究二维SNOM近场光学问题的应用软件<sup>[12]</sup>。采用该软件在上面建立的模型中就样品的光学性质对于SNOM成像关系进行了数值计算研究。在计算中长度采用了相对单位，即以激励光波在自由空间的波长 $\lambda_0$ 为长度单位。固定了探针的参量，此时探针的参量为：均匀波导的宽度为 $0.6\lambda_0$ ，锥尖部分长度为 $0.5\lambda_0$ ，开孔大小选定为 $\lambda_0/20$ ，探针内外的相对介电常量 $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_2$ 分别为2.25和1.0，即探针置于大气中。激励光波为探针左端均匀波导最低阶的TE模，其中它的场幅按照入射功率进行了归一化。

在计算中，考虑了样品的导电性质对探针近场的影响。对于由导电介质构成的样品，以复介电常量表征其光学性质，复相对介电常量定义为

$$\epsilon'_3 = \epsilon_3 - j\sigma/\omega\epsilon_0 = |\epsilon'_3| \exp(-j\alpha_3)$$

式中 $\epsilon_3$ 为相对介电常量， $\sigma$ 为电导率， $\omega$ 为激励光波的角频率， $\epsilon_0$ 是自由空间的介电常量， $\alpha_3$ 是导电样品的损耗角。

## 2 样品光学特性与SNOM近场光场的关系

研究样品的材料特性对近场光场的影响时，首先没有考虑样品形貌的影响，即在计算模型中采用了没有形貌特征的样品，此时样品表面设为理想平面。分别对电介质材料和导电介质材料构成的两类样品进行了研究，样品光学参量为样品介电常量，主要研究他们对SNOM探针透射率和样品表面光斑大小的影响。在计算模型中，探针与样品之间的间距固定为 $0.01\lambda_0$ 。

探针功率透射率由探针开口处的能流密度定义为

$$T_p = 1/2 * \text{Re} \left\{ \int_{C_a} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot d\mathbf{l} \right\}$$

式中 $\text{Re}\{\cdot\}$ 为复数取实部运算， $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为电场和磁场强度的复振幅， $\mathbf{H}^*$ 为 $\mathbf{H}$ 的复数共轭， $C_a$ 为探针开口边界。

对于不导电样品，图2(a)给出了探针透射率与样品的相对介电常量的平方根(假设样品的相对磁导率为1.0)，即样品折射率的变化关系。从图中可

以明显看出，随着样品折射率的增加，探针透射率也逐渐增大。图2(b)给出当样品为导电介质，复介电常量的实部为4.0时，探针的透射率随样品的损耗角的变化关系。图中显示出随着样品导电性的增强，探针的透射率也逐渐增大。可见，在SNOM中，探针透射率与样品折射率和导电性质都有一定关系，都随着两者的增大而逐渐增加。对于一定形貌的样品，随着样品折射率增大和导电性的增强，探针透射率的提高，近场区光场的强度将增强，SNOM探测信号的信噪比将可能提高，从而可以提高SNOM的分辨率。

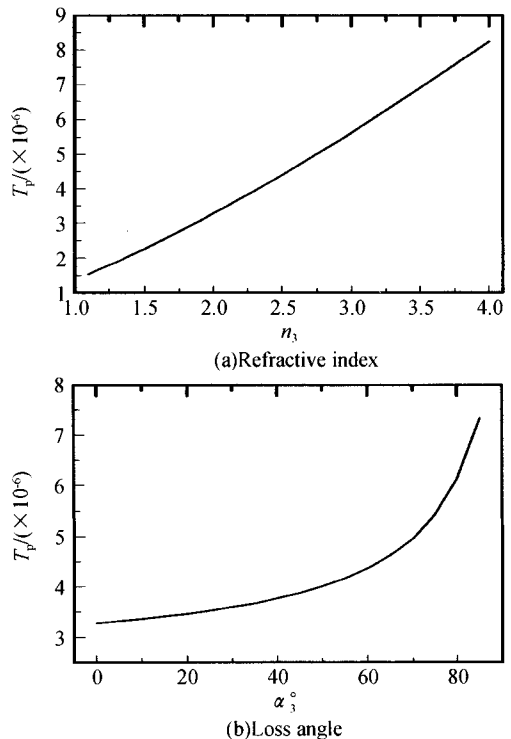


图2 SNOM光学探针的功率透射率与样品的(a)折射率和(b)损耗角的变化关系

Fig.2 Power transmission of the probe varies with the sample's (a) refractive index and (b) loss angle

与图2结果相同计算条件下，还研究了样品特性对于样品表面光斑大小的影响。样品表面光斑的大小由样品表面电场能量密度的半峰值全宽度(FWHM)定义。图3给出了样品表面光斑大小随样品折射率和导电性质的变化关系。从图3(a)可以看出，在TE模式激励下，样品表面的光斑大小随样品的折射率变化非常小，在图示中总的变化幅度不到1%。同样导电介质的损耗角对样品表面光斑大小的影响也是非常小的，虽然随着损耗角的增加，光斑大小有些下降，但是图中显示范围变化率不到3%。可见，样品的介质折射率和导电样品的损耗角对光斑大小的影响都是非常小，在实际研究中可以忽略。

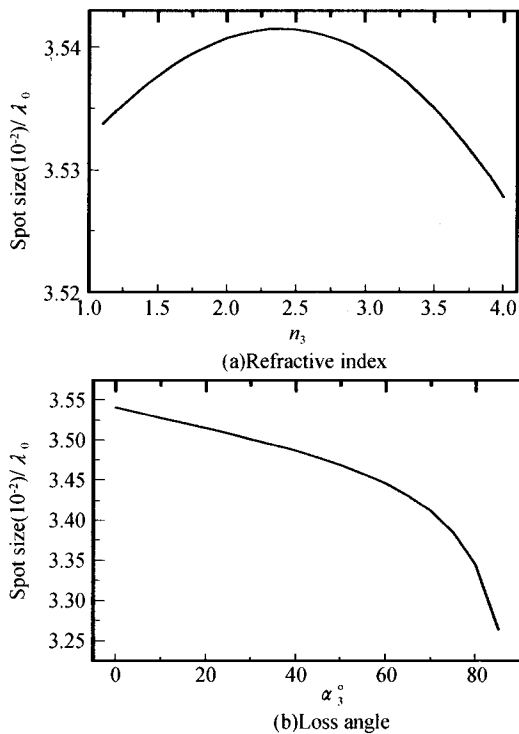


图3 样品表面光斑大小随样品的(a)折射率和(b)损耗角的变化关系

Fig. 3 Spot size on sample surface varies with the sample's (a) refractive index and (b) loss angle

### 3 样品光学特性对 SNOM 扫描像的影响

从上面计算结果可以明显看出样品材料特性对探针的透射率(或近场分布)有较大影响. 下面在样品有一定形貌的情况下, 研究样品的光学特性对于 SNOM 扫描像的影响. 计算中由均匀介质构成的样品形貌如图 4, 即样品表面有两个沟槽, 沟槽的深度  $D$ 、宽度  $W$  和间距  $S$  参量均可根据计算需要变化设定, 计算研究的是探针在样品表面上方扫描时的近场像. 由于在 SNOM 工作中, 探针在样品表面扫描的方式有多种, 如恒定高度扫描、恒定间距扫描和等强度扫描等. 恒定高度扫描是指探针扫描时, 其高度不变, 即探针沿水平面运动; 而恒定间距扫描是指探针在扫描中, 探针与样品表面的距离保持一定. 在此次计算中, 以探针的透射率(或者传输功率)作为成像信号, 数值模拟了恒定高度扫描和恒定间距扫描模式的扫描成像.

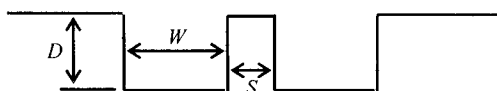


图4 样品表面形貌模型  
Fig. 4 Modal of sample surface

在计算中探针的参量和第 2 节计算时选择的参量相同, 为了研究样品的材料对于成像的影响, 计算

了由两种不导电介质和一种导电介质构成的三种不同材料的样品, 其中两种不导电介质的相对介电常量为 4.0 和 12.25 (折射率分别为 2.0 和 3.5), 导电介质的复相对介电常量为  $4.0-15j$ . 三种样品具有图 4 的形貌, 计算中选择  $W=0.03\lambda_0$ ,  $D=0.005\lambda_0$ , 考虑了双沟槽之间的间距分别为  $S=0.1\lambda_0$  和  $S=0.025\lambda_0$  的两种形貌.

图 5 是 SNOM 工作在恒定高度扫描模式下的计算结果. 从图 5(a) 可以看出, 在两个凹槽间距较大时, 样品的形貌可以从扫描成像信号中分辨出来. 样品的材料对于成像信号的对比度有很大影响, 随着折射率和损耗角的增加, 扫描成像信号的对比度在增加. 从图 5(b) 可以看出, 在两个凹槽间距比较小时, 由  $\epsilon_3=4.0$  的不导电介质构成的样品, 凹槽已经无法从扫描像中分辨出来. 而由较高介电常量或者高损耗角的材料构成的样品, 凹槽可以从扫描像中分辨出来. 可见, 样品的折射率和导电性都对 SNOM 的分辨率有较大影响, 随着折射率和损耗角的增加, 其分辨能力也在增加.

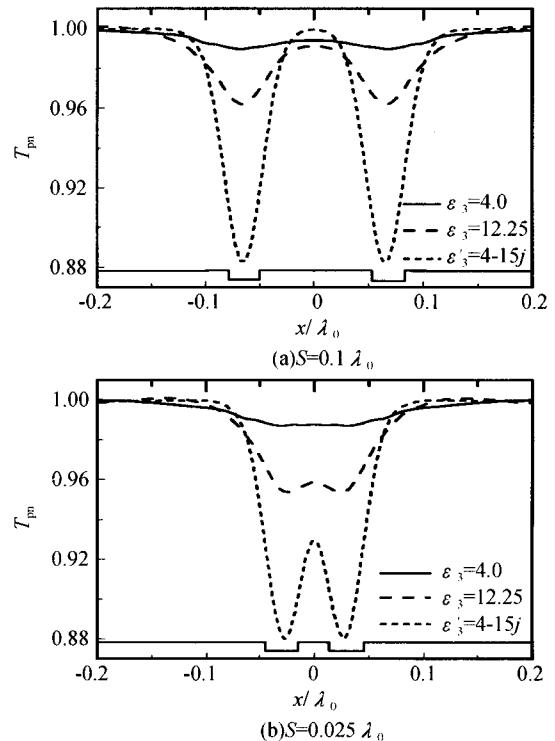


图5 两个深度为  $0.005\lambda_0$ , 宽度为  $0.03\lambda_0$  的相同沟槽的恒定高度扫描成像信号

Fig. 5 Constant-height image signals of two parallel grooves ( $0.005\lambda_0$  deep and  $0.03\lambda_0$  wide)

图 6 是和图 5 相同计算条件下的恒定间距工作模式下的扫描成像信号. 从图 6 可以看出, 恒定间距扫描像比恒定高度扫描成像信号要复杂, 样品折射率和导电性对于 SNOM 恒定间距扫描成像信号的影响不仅仅表现在对比度上, 还表现在扫描信号

的结构上. 从图明显看出, 随着样品折射率的增加和导电性的增强, 沟槽的边缘越明显, 表现为高的细节分辨能力. 和图 5 对比, 可以发现此时三种样品的两种形貌均可以从扫描成像信号中分辨出来, 表明在相同条件下, 恒定间距扫描像比恒定高度扫描像有较高的细节分辨能力.

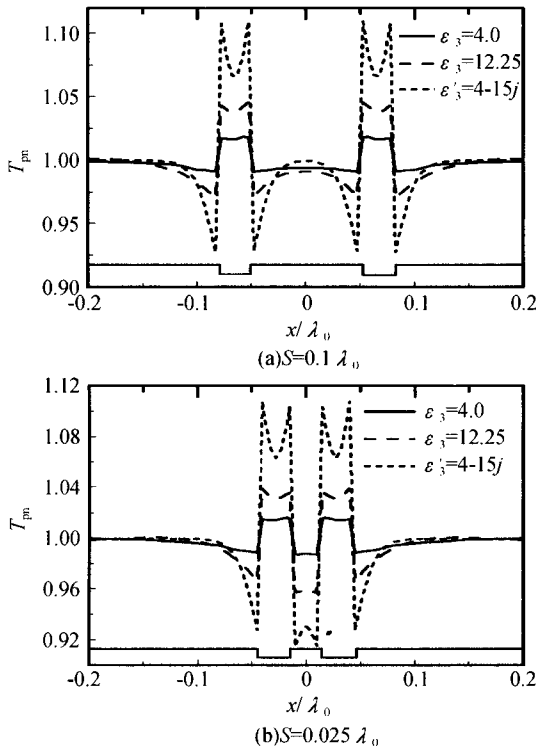


图 6 两个深度为  $0.005\lambda_0$ , 宽度为  $0.03\lambda_0$  的相同的沟槽的恒定间距扫描成像信号

Fig. 6 Constant-distance image signals of two parallel grooves ( $0.005\lambda_0$  deep and  $0.03\lambda_0$  wide)

从图 5 和图 6 可以看出, 不管 SNOM 是工作在恒定高度扫描方式还是恒定间距扫描方式, 样品材料特性都对探针扫描成像信号都有一定的影响, 也就是对 SNOM 的分辨率有影响.

## 4 结论

使用了基于边界元方法编写的 SNOM 计算程序对一个比较接近实际的 (真实) 二维 SNOM 模型中样品的形貌结构和光学参量 (即介质的介电常量和损耗角)、光探针-样品体系的近场光场的电磁场分布的影响进行研究. 研究结果表明, 当探针非常靠近样品时, 对于没有形貌特征的样品, 光探针的光能量透射率随样品材料折射率的增加而增大, 也随着损耗角的增加而增大; 而样品表面的光斑尺寸几乎不受折射率和损耗角变化的影响. 利用光探针的光能量透射率计算研究了 SNOM 的扫描成像信号. 从具有形貌特征的样品扫描像信号可以看出, 样品折射率和样品的损耗角都对 SNOM 分辨率有较大

影响, 随着损耗角和折射率的增加, SNOM 分辨率也逐渐提高. 对于 SNOM 不同工作模式的研究中得出, 在相同的条件下, 与恒定高度扫描方式相比, 恒定间距扫描方式对样品表面的细节有较强的分辨能力.

## 参考文献

- 1 Pohl D W, Denk W, Lanz M. Optical stethoscopy: image recording with resolution  $\lambda/20$ . *Appl Phys Lett*, 1984, **44** (7): 651~653
- 2 Betzig E, Finn P L, Weiner J S. Combined shear force and near-field scanning optical microscopy. *Appl Phys Lett*, 1992, **60**(20): 2484~2486
- 3 Michael A P, Patrick J M. Near-field optical theory, instrumentation and applications. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1996
- 4 张树霖. 近场光学显微镜及其应用. 北京: 科学出版社, 2000. 95  
Zhang S L. Scanning Near-Field Optical Microscopy and Its Applications. Beijing: Science Press, 2000. 95
- 5 Trautman J K, Betzig E, Weiner J S, et al. Image contrast in near-field optics. *J Appl Phys*, 1992, **71** (10): 4659~4663
- 6 Bozhevolnyi S I, Smolyaninov I, Keller O. Correlation between optical and topographical images from an external reflection near-field microscope with shear force feedback. *Appl Opt*, 1995, **34**(19): 3793~3799
- 7 Carminati R, Greffet J J. Influence of dielectric contrast and topography on the near field scattered by an inhomogeneous surface. *J Opt Soc Am*, 1995, **A12** (12): 2716~2725
- 8 Martin O J F, Girard C, Deraux A. Dielectric versus topographic contrast in near-field microscopy. *J Opt Soc Am*, 1996, **A13**(9): 1801~1807
- 9 Valle P J, Greffet J J, Carminati R. Optical contrast, topographic contrast and artifacts in illumination-mode scanning near-field optical microscopy. *J Appl Phys*, 1999, **86**(1): 648~656
- 10 王学恩, 范兆忠, 张禄, 等. 金属覆层光纤探针近场特性研究. 光子学报, 2004, **33**(8): 912~915  
Wang X E, Fan Z Z, Zhang L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 912~915
- 11 Fan Z Z, Wang X E, Tang T T. Study on the near-field optical properties of metal-clad cutting-off fiber probe with a sub-wavelength aperture. *Optik*, 2004, **115** (3): 133~139
- 12 Wang X E, Fan Z Z, Tang T T. Study on the power transmission and light spot size of optical probes in scanning near-field optical microscopes. *Opt Commun*, 2004, **235**(1): 31~40

## Effects of the Samples on the Near-field Electromagnetic Field Distributions in Illumination-mode SNOM's

Fan Zhaozhong<sup>1</sup>, Wang Xue'en<sup>1,2</sup>, Tang Tiantong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

<sup>2</sup> School of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071

Received date: 2005-06-17

**Abstract** The near-field vector electromagnetic distribution in illumination-mode scanning near-field optical microscopes (SNOM) was studied numerically using a two-dimension program based on the boundary element method, taking into consideration of both the sample properties and the polarization of the input light. The numeric results indicated, that in the case of topography-free samples, the power transmission of the optical probe was increased with the increase of the permittivity and the loss angle of the sample material, and that the spot size was hardly effected. However, in the case of topographic samples, the resolution of the SNOM was increased with the increasing of the permittivity and the loss angle of the sample material. Comparison of two operating modes of SNOM indicated that the constant-distance image had a higher resolution for the local change of the sample topography than the constant-height image.

**Keywords** Near-field optics; Optical probe; Boundary element method; Scanning near-field optical microscopes



**Fan Zhaozhong** was born in 1973, in Fujian Province, China, and currently he is pursuing his Ph. D. degree in Xi'an Jiaotong University after receiving the Master's degree at School of electronic & information engineering of Xi'an Jiaotong University. He is interested in the optical information process, near-field optics and integrated optics.