

文章编号: 0253-2239(2005)04-465-5

扫描近场光学显微镜探针与光场相互作用的分析*

徐铁军 许吉英 王佳 田芊

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 采用时域有限差分方法对镀金属膜光纤探针在近场光探测中对光场产生的扰动和相互作用过程进行了数值分析。选择纳米孔径的隐失场光场和镀金属膜光纤探针建立了近场光探测的理论模型, 讨论了探针孔径尺寸、扫描高度等因素对光场探测的影响, 以及测量光场与初始光场之间的关系等。研究表明, 当探针孔径尺寸与待测纳米孔径尺寸相当, 探针扫描高度在接近探针孔径尺寸的一半时, 测量得到的光场分布数据能够准确描述初始光场分布。

关键词: 成像系统; 探针与隐失场相互作用; 时域有限差分法; 光场探测; 扫描近场光学显微镜
中图分类号: O439; TH742 文献标识码: A

Numerical Analysis of Interaction and Perturbation between Evanescent Field and Probe in Optical Field Detection by SNOM

Xu Tiejun Xu Jiying Wang Jia Tian Qian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The interaction and the perturbation between a metal-coated fiber probe and an aperture evanescent field is analyzed numerically using finite-difference time-domain (FDTD) method. The simulation model consists of a sub-wavelength aperture and a metal-coated fiber probe scanning in constant height mode. Influences of the scanning height and the aperture size of the fiber probe on optical field detection are discussed. Relationship between the measured optical field and the initial optical field without perturbation is compared and analyzed. The research results reveal that when the aperture size of the probe is comparable with the measured nano-structure and the scanning height is close to half of the aperture size, the measured field distribution shows better similarity with the initial one, that is to say, it can describe the initial one accurately.

Key words: imaging systems; interaction between evanescent field and probe; finite-difference time-domain method; optical field detection; scanning near-field optical microscope

1 引 言

扫描近场光学显微镜 (Scanning near-field optical microscope, SNOM) 的光学分辨力突破了传统光学显微镜的分辨衍射极限, 达到了纳米量级^[1]。由于其具有传统光学显微镜及扫描探针显微成像技术的双重优点, 在材料科学、生物学、信息科学等领域具有广阔的应用前景。

近场光场探测通常是将纳米探针放入局域在物

体表面的隐失场中, 借助局域激励与相互作用, 将携带高分辨率信息的隐失场转换为可被远场探测器所接收的传播场。这种探测和成像过程实际上是探针与待测样品间 (借助于电磁场) 的一种相互作用过程, 所以扫描近场光学显微镜也被称为相互作用显微镜^[2]。这种相互作用使得探针进入隐失场势必会对无探针的初始光场分布产生扰动, 那么远场探测到的信息是否能够反映局域光场的真实分布呢? 这

* 国家自然科学基金(60278029)、国家 863 计划(2003AA311132)和清华大学校重点基础基金(JE2002008)资助课题。

作者简介: 徐铁军(1976~), 男, 清华大学精密仪器系博士研究生, 主要从事近场光学扫描显微镜及近场光学探测的研究工作。E-mail: xutiejun@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2004-03-22; 收到修改稿日期: 2004-09-03

需要对探针与光场之间的相互作用过程、探针对光场的扰动进行细致的分析。Douglas 采用时域有限差分方法 (Finite-difference time-domain method, FDTD) 分析了近场光学显微镜中光纤探针针尖附近的场分布, 对放置金属样品前后针尖附近的电场矢量图和坡印廷矢量图进行比较, 发现在金属样品附近出现了边缘增强效应^[3]。Martin 利用格林函数法对近场光学显微镜中的实验信号测量进行了三维仿真计算, 考虑了如金属镀膜探针、亚波长样品及其基底等很多实际的因素, 并对各种探测和扫描模式进行了分析, 结果显示探针的运动对信号有很强的扰动, 但是通过控制照明和探测的偏振态可以大大减小这些扰动^[4]。Kawata 等^[5]考虑探针针尖的多次散射, 采用时域有限差分法方法分析了光纤探针与样品表面光场之间的相互作用, 得到的扫描近场光学显微镜光学图像近似于样品表面的几何轮廓。另外, 对扫描模式、照明光的偏振态、样品尺寸等因素对成像的影响也进行了研究。Tanaka 等^[6]利用积分方程方法得到小于波长尺寸的 F 形介电样品的扫描近场光学显微镜测量光场能够反映真实的光场分布。其它对于扫描近场光学显微镜成像的研究则忽略了探测光场与真实光场的比较, 重点放

在了对待测物本身的反映上^[7,8]。

在扫描近场光学显微镜测量中探针与样品光场间的相互作用复杂, 受到多方面因素的影响, 很难用解析方法表示。本文针对金属膜上纳米孔径透射光场的扫描近场光学显微镜测量, 采用时域有限差分数值分析方法就光场探测中镀金属膜光纤探针与被测光场之间的相互作用和扰动以及影响光场探测的若干因素进行了分析, 并对合理的隐失场光场探测条件进行了探讨。

2 数值计算模型的建立

时域有限差分法是由 Yee^[9]在 1966 年提出的, 是一种研究电磁场分布的纯数值计算方法, 也是近场光学研究中重要的数值方法之一。利用这种方法, 本研究小组已经做了部分关于近场光学方面的研究^[10~13]。本文的数值计算采用了美国 REMCOM 公司的 XFDTD5.1 软件。

2.1 初始光场分布的产生

如图 1(a)所示, 待测的初始光场是由均匀平面波透过金属膜上的纳米孔径产生的。金属膜的材料为 Au ($\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ 时, $\epsilon_r = -10.87 + 1.84i$), 厚度为 100 nm。纳米孔径为边长 100 nm 的正方形。

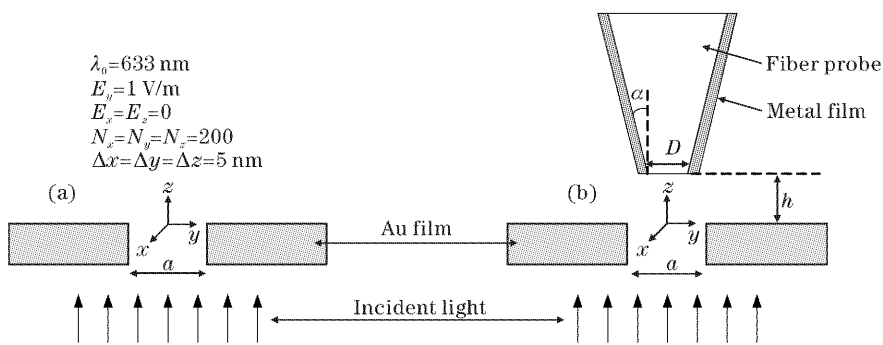


图 1 计算模型与参量。(a)无探针的计算模型,(b)有探针的计算模型

Fig. 1 Simulation model and parameters. (a) Simulation model without probe, (b) simulation model with probe

将方形纳米孔径出射表面的中心定义为坐标原点, 入射光 ($\lambda_0 = 633 \text{ nm}$) 沿 z 方向垂直入射, 电场的各分量分别为 $E_x = E_z = 0$, $E_y = 1 \text{ V/m}$ 。在纳米孔径的近场区域内可以得到没有探针扰动的隐失场分布, 称为“初始光场”。

2.2 探针对光场的扰动及测量光场

图 1(b)所示为探针对隐失场进行扫描探测的模型, 是在图 1(a)的基础上增加了扫描探针。探针为镀金属膜的光纤探针, 光纤为均匀介质 (折射率为 1.5, 锥角 $\alpha = 7.5^\circ$), 金属膜采用理想导体模拟。

探针进入隐失场必然对光场产生扰动。探针以等高工作模式进行扫描, 扫描高度为 h , 扫描步长为 Δ_{step} , 可以得到不同高度截面内的光场分布。由于时域有限差分法只能对静态系统进行数值计算, 需对探针在不同高度和不同位置的情况分别进行数值分析计算。

考虑到稳定的隐失场探测系统具有相对确定的系统传递函数, 可以采用进入探针孔径的总的光场强度来表示探针孔径中心所在位置的“测量光场”。探针扫描得到各个位置的“测量光场”, 组合起来就

形成了整个待测光场的分布。

3 计算结果与讨论

对于均匀平面波垂直入射于金属膜上的纳米孔径后的隐失场分布情况,已有多篇文章做过详细的讨论和分析^[11,12],这里不再赘述,下面将着重讨论探针进入隐失场前后光场分布的变化及参量的影响。

3.1 探针进入隐失场引起光场的变化

当探针沿 z 轴负方向由远及近逐渐进入纳米孔径后的隐失场时,探针与隐失场的相互作用逐渐增强,探针对于隐失场的扰动也逐渐增强,同时进入探针内部的光强也逐渐增大。图 2 清楚地显示了探针进入隐失场时光强分布的变化。从图中可以看出,与无探针时的初始光场相比,探针在距离膜层表面 80nm 左右时对隐失场的扰动较小,光场虽会在探

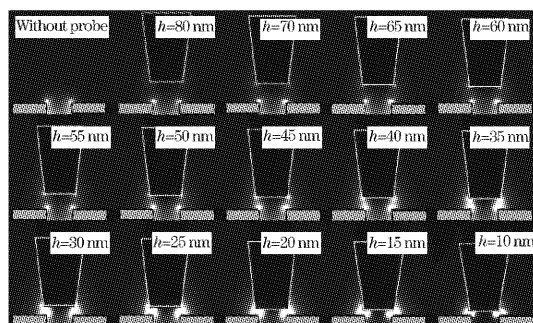
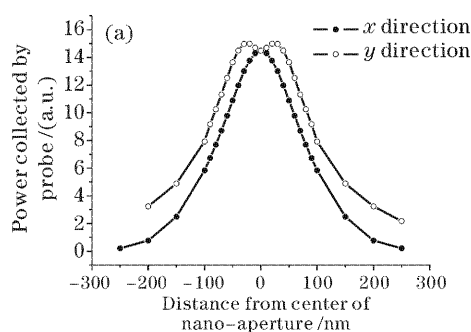


图 2 yz 面光场分布随探针逼近的变化

Fig. 2 Change of light field in yz plane when probe is approaching



针的边缘处有些增强效应,但进入探针的光强很小,纳米孔径附近的隐失场变化不大,基本与初始光场分布一致。当 $h < 50$ nm 以后,逐渐增强的探针与隐失场的相互作用及探针对于隐失场的扰动改变了初始光场的分布,来自隐失场的探测信号大大增强。

如图 3 所示,随着探针到纳米孔径的距离 h 的逐渐减小,进入探针的光强逐渐增大;但当 h 接近 10 nm ($h/D=0.1$) 时,由于探针的金属膜和孔径所在的金属膜之间的相互作用增强,影响并降低了进入探针的光强,导致了和初始光场变化的不一致。这说明在一定范围(80~15 nm)内,随着光纤探针逼近纳米孔径,探针测量到的光强变化趋势与初始光场的光强变化趋势基本一致。

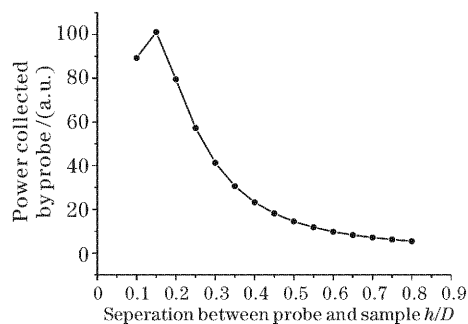


图 3 测量值随探针与小孔间距 (h/D) 的变化

Fig. 3 Measured values versus separation (h/D)

3.2 测量光场与初始光场的一致性

使探针等高扫描,步长 $\Delta_{\text{step}} = 10$ nm,所有测点的数据组成了整个测量光场的分布。当 $h = 50$ nm 时,测量光场与初始光场的分布曲线如图 4 所示。

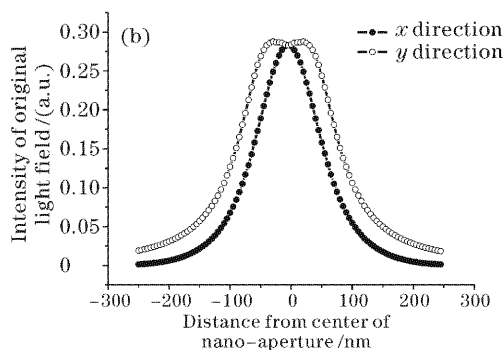


图 4 测量光场(a)与初始光场(b)间的比较

Fig. 4 Comparison between the measured light field (a) and the initial light field (b)

图 4(a)是当探针在 $x=0$ 和 $y=0$ 两条线上进行扫描时得到的测量光场的分布曲线,而图 4(b)则是该平面的初始光场分别在这两条线上的光强曲线。比较两图可以看出:测量光场和初始光场的变

化趋势完全相同。由于入射光沿 y 方向偏振,导致了 y 方向的最大值并不位于孔径中心。对于测量光场,光斑沿 x, y 方向的半峰全宽 d_x, d_y 分别为 160 nm、200 nm,而初始光场光斑半峰全宽分别为

120 nm、170 nm。测量光场与初始光场的 d_y 均较 d_x 有明显的展宽,展宽幅度基本相同,同时测量光场的光斑要比初始光场的光斑大,这是探针的孔径尺寸效应造成的。上述结果表明:当扫描高度 $h=50$ nm 时,使用直径 100 nm 的孔径探针对 100 nm 孔径出射的隐失场进行探测,虽然探针会给隐失场带来扰动,但所得到的测量光场的变化趋势能够真实地反映初始光场的光强分布。在后面将具体讨论探针的扫描高度与探针的孔径尺寸对测量光场的影响,并与初始光场做比较。

3.3 扫描高度对光场分布的影响

对于相同的计算模型,扫描高度 h 从 10 nm 到 80 nm 变化,在不同的扫描平面内沿 y 方向 ($x=0$) 进行扫描计算。如前所述,测量强度随扫描高度的增大

迅速衰减,为了便于比较测量光场与初始光场分布的变化,对它们进行了归一化处理。如图 5 所示,图中曲线分别对应不同扫描高度的测量光场和初始光场。从图中可以看出,测量光场和初始光场的变化趋势非常相似,其一致性随扫描高度的不同而有所变化:

1) 当 h 为 10~30 nm 时,测量光场与初始光场间的差异较大,特别是扫描点处于孔径的中心位置附近时两光场的差异较大,而远离孔径中心位置时则两者吻合较好;

2) 当 h 为 40~50 nm,大约探针孔径尺寸的一半时,两光场分布的一致性很好;

3) 当 $h>50$ nm 时,探针逐渐远离被测光场,两光场在中心位置相对一致,而越是远离中心位置测量光场的展宽越大,差异越大。

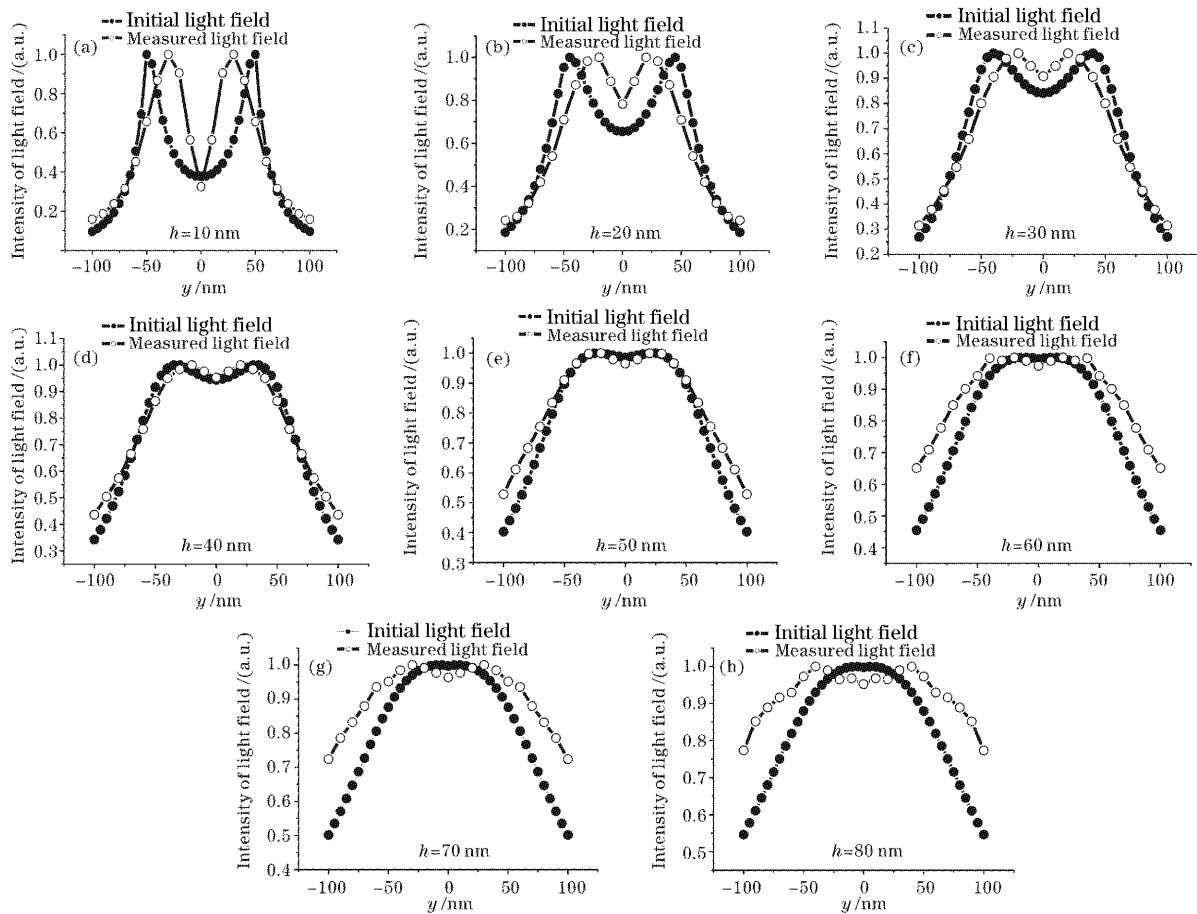


图 5 不同扫描高度的测量光场与初始光场

Fig. 5 Measured light field and initial light field with different scanning height

上述结果表明:只有探针的扫描高度保持在一定的范围(40~50 nm)内,才能使测量光场和初始光场的分布比较一致,测量光场能够很好地反映初始光场的分布。距离太近或太远都会引起测量光场和初始光场间的差异变大。可能的原因是当探针进

入隐失场且与纳米孔径距离很近时,探针与孔径的边缘之间会有较强的场增强效应和相互作用,对初始光场的扰动较大;而随着探针逐渐远离孔径相互作用减弱,测量到的光场与初始光场的分布一致性较好;当距离更大时,虽然探针对光场的扰动减小,

但进入探针孔径的光强也减弱,测量误差逐渐增大。

3.4 探针孔径尺寸对光场分布的影响

探针的孔径尺寸是决定成像分辨力的最重要的因素之一,探针与光场的相互作用与探针孔径大小有关。改变计算模型中探针的孔径尺寸,分别取 $D=70\text{ nm}$ 、 100 nm 和 150 nm ,使探针以相同的扫描高度沿 x 方向($y=0$)进行扫描测量,计算结果归一化后如图 6 所示。

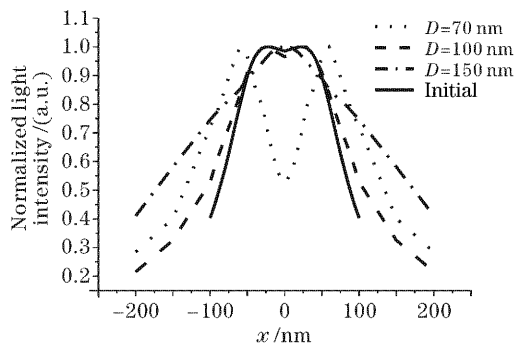


图 6 初始光场与不同孔径尺寸探针的测量光场

Fig. 6 Initial light field and measured light field by the probes with different aperture sizes

将不同孔径尺寸探针的测量光场分别与初始光场相比较,可以看出,当 $D=100\text{ nm}$,探针的孔径尺寸与待测纳米孔径尺寸相当时,二者的分布吻合得很好;当 $D<100\text{ nm}$ 时,由于通光效率较低,误差较大;而当 $D>100\text{ nm}$ 时,分辨力降低,探测结果不能反映光场细节。

计算结果表明,需根据待测样品的特征和光场特性选择合适孔径尺寸的探针,才能减小探针和光场相互作用带来的测量误差。

4 结 论

本文采用时域有限差分法仿真计算了均匀平面波垂直入射于金属膜上纳米孔径产生的隐失场及扫描近场光学显微镜的测量光场,分析了镀金属膜光纤探针与隐失场的相互作用及对隐失场的扰动,并对探针扫描高度、孔径尺寸等因素的影响进行了讨论。

结果表明当探针进入隐失场时,探针与样品间的相互作用将引起光场的局域增强和分布改变。这有利于隐失场探测信号增强的同时也会带来光场测量结果的失真。但是选择合适的探针扫描高度与探针孔径尺寸,测量光场与初始光场的分布能够很好地吻合,得到描述真实隐失场光场分布的数据。文中根据待测样品及其光场的特征选择了 $D=100\text{ nm}$

的镀金属膜光纤探针,孔径尺寸与待测的纳米孔径尺寸相当;扫描高度选在 $40\sim 50\text{ nm}$ 范围,接近探针孔径尺寸的一半,扫描近场光学显微镜的测量光场分布能够反映初始光场的分布。由于探针与光场相互作用的复杂性,在进行近场光学探测和图像解释时,一定要注意结合实验条件与测量参量对光学图像细节和系统分辨力做出科学合理的解释。

参 考 文 献

- 1 D. W. Pohl, W. Denk, M. Lanz. Optical stethoscopy; image recording with resolution $\lambda/20$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(7): 651~653
- 2 D. Courjon, C. Bainier. Near field microscopy and near field optics [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 1994, **57**: 989~1028
- 3 Douglas A. Christensen. Analysis of near field tip patterns including object interaction using finite-difference time-domain calculations [J]. *Ultramicroscopy*, 1995, **57**: 189~195
- 4 O. J. F. Martin. 3D simulations of the experimental signal measured in near-field optical microscopy [J]. *J. Microscopy*, 1999, **194**: 235~239
- 5 Hiromitsu Furukawa, Satoshi Kawata. Analysis of image formation in a near-field scanning optical microscope effects of multiple scattering [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **132**: 170~178
- 6 Kazuo Tanaka, Masahiro Tanaka, Takahiro Yoshida *et al.*. Numerical simulations of near field optics by boundary and volume integral equation methods [C]. *Proc. VIII-th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, Kharkov, Ukraine, 2000. 47~53
- 7 Hiromitsu Furukawa, Satoshi Kawata. Near-field optical microscope images of a dielectric flat substrate with subwavelength strips [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **196**: 93~102
- 8 Wu Qinghua, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Influence of polarization of the incident light on imaging of the RSNOM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 513~516 (in Chinese)
武清华,王桂英,徐至展. 入射光的偏振特性对反射式近场光学显微镜成像结果的影响 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 513~516
- 9 Kane S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1966, **14**(8): 302~307
- 10 Liu Xiumei, Wang Jia. Research on characterization of the near-field distribution of optical fiber probe by FDTD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1234~1238 (in Chinese)
刘秀梅,王 佳. 用时域有限差分方法研究光纤微探针近场分布特性 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1234~1238
- 11 Liu Xiumei, Wang Jia, Li Dacheng. Research on near-field distribution of nano-apertures [J]. *J. Tsinghua University (Science and Technology)*, 2001, **41**(2): 30~33 (in Chinese)
刘秀梅,王 佳,李达成. 纳米小孔光学近场分布的研究 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2001, **41**(2): 30~33
- 12 Xu Tiejun, Wang Jia, Sun Liqun *et al.*. Aperture design of nano-aperture semiconductor laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1421~1425 (in Chinese)
徐铁军,王 佳,孙利群等. 纳米孔径激光器出射孔径设计 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1421~1425
- 13 Hong Tao, Wang Jia, Sun Liqun *et al.*. Numerical simulation analysis of near-field optical virtual probe [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1415~1420 (in Chinese)
洪 涛,王 佳,孙利群等. 近场光学虚拟光探针的数值分析 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1415~1420