

文章编号: 1001-3806(2017)04-0494-04

VirtualLab Fusion 对 SNOM 光纤探针外部光场分布的仿真

张宝武^{1,3}, 饶鹏辉², 霍剑锋¹, 余桂英¹

(1. 中国计量大学 计量测试工程学院, 杭州 310018; 2. 讯技光电科技(上海)有限公司, 上海 200092; 3. 比萨大学 物理系, 比萨 56127)

摘要: 为了研究扫描近场光学显微镜(SNOM)光纤探针的光学特性,采用基于场追迹方法的光学软件 VirtualLab Fusion 进行了仿真实验,取得了 SNOM 光学探针尖端外部光场的分布情况。结果表明,沿 z 轴方向,不同截面上的光场分布都会呈现小孔衍射的图案,其中心斑点中心强度随着 z 值的变大而呈近似指数函数衰减,到 $z = 100\text{nm}$ 位置处几乎衰减为 0;中心斑点轮廓线的半峰全宽随着 z 值的变大而呈现先不变后增大的趋势,其拐点处于 $z = 20\text{nm}$ 位置处,此时对应的中心强度值为 $7.2\text{V}/\text{m}^2$,这个强度值按指数函数计算正好处于 $z = 0\text{nm}$ 位置处强度的 e^{-2} 。结果清晰显示了 SNOM 光学探针的光学特性,证实 SNOM 探针工作时需要与样品表面保持在 10nm 左右的必要性。

关键词: 成像系统; 扫描近场光学显微镜; 场追迹; VirtualLab Fusion; 光纤探针

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jjgs.issn.1001-3806.2017.04.007

Simulation of external optical field of SNOM optical probe with VirtualLab Fusion

ZHANG Baowu^{1,3}, RAO Penghui², HUO Jianfeng¹, YU Guiying¹

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. InfoTek Information Science & Technology Co. Inc., Shanghai 200092, China; 3. Department of Physics, University of Pisa, Pisa 56127, Italy)

Abstract: In order to study optical properties of an optical fiber probe in scanning near-field optical microscopy (SNOM), simulation experiment was carried out by using the optical software VirtualLab Fusion based on field tracing method. The distribution of external optical field at the tip of SNOM optical probe was obtained. The results show along z axis, the distributions of optical field on different sections show the pattern of small aperture diffraction, the center intensity of center sample decreases exponentially with the increase of z value, and is almost attenuated to 0 at the position of $z = 100\text{nm}$. With the increase of z value, full width at half maximum of center speckle contour remains stable at first and then increases. Its inflection point is at the position of $z = 20\text{nm}$. The corresponding center strength value is $7.2\text{V}/\text{m}^2$ at this point. If calculated by the exponential function, this strength is at exactly e^{-2} of the position of $z = 0\text{nm}$. The study shows the optical properties of SNOM optical probe. It confirms that it is necessary for SNOM probe to keep the distance of around 10nm from the sample surface.

Key words: imaging system; scanning near-field optical microscopy; field tracing; VirtualLab Fusion; optical fiber probe

引言

光学显微镜分辨率的提高一直是光学领域非常火热的话题,因为衍射现象的存在,其分辨率一直维持在

$\lambda/2$ 以下。在扫描电镜技术、激光技术和探针样品距的剪切力控制技术联合下,光学显微镜终于迎来了突破瑞利判据的曙光,在使用了 3 种极小概念(极小取样探针、极小工作距离和极小扫描步距)和一种强光源(激光)的特殊组合下^[1-2],扫描近场光学显微镜(scanning near-field optical microscopy, SNOM)应运而生^[3-7]。它因为具有非接触和快速成像等特点,至今已经被广泛应用于凝聚态物理、生命科学、化学、材料科学和信息产业中^[8-12]。在 SNOM 领域,亚微米尺度取样探针是关键部件,是 SNOM 的信息源头,决定着 SNOM 的分辨率、灵敏度和传输效率。为此,众多研究者至今不断对其进行光机电等特性的研究^[13-17]。例如 NOVOTNY 等人^[15]用多重多极子方法计算了 2 维探针的场分布。LEVIATAN 等人^[16]研究了无限大良导体平板上的小孔衍射近场结构。ZHOU 等人^[17]用

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11404312);国家自然科学基金资助项目(201408330449;201508330071);浙江省“仪器科学与技术”重中之重学科开放基金资助项目(JL150508);广西高校光电信息处理重点实验室开放基金资助项目(KFJJ2014-03);广西自动检测技术与仪器重点实验室开放基金资助项目(YQ15204)

作者简介:张宝武(1978-),男,副教授,主要研究方向为激光技术。

E-mail:zhangbaowu@126.com

收稿日期:2016-09-12;收到修改稿日期:2016-11-04

时域有限差分法 (finite-difference time-domain, FDTD) 计算了光纤探针的场分布。不过, 这些相关的工作表明理论推导复杂、仿真程序编写繁重、仿真对象具有无源性。VirtualLab Fusion^[18] 光学仿真平台的出现让这些问题迎刃而解。它的独特之处在于省却理论推导和程序编写, 因为仿真对象具有有源性和全局性的特点, 即从光源出发, 经过一系列光学元件, 完成整个系统的虚拟运行, 最终获得仿真信号, 避免了仿真信号的孤立性。这种全局化的统一建模仿真思想为相关的光学设计和仿真提供了一种崭新的技术方案。

作者以参考文献[17]中的模型为基础, 利用 VirtualLab Fusion 建模仿真研究了一种 SNOM 光纤探头尖端之外的光学特性, 其中涉及了不同垂直光轴截面内的光场分布, 光轴强度随纵向距离的变化情况等。

1 SNOM 光纤探针的 VirtualLab Fusion 建模

1.1 建模

图 1 为 SNOM 光纤探针模型^[17]。其中探针的长度 $H = 600\text{nm}$, 探针入口处孔径 $\Phi_1 = 700\text{nm}$, 探针出口处孔径 $\Phi_2 = 100\text{nm}$, 光纤的介电常数 $\epsilon = 2.25$, 光纤外层所镀铝层的厚度 $T = 80\text{nm}$, 入射激光沿着 z 轴在探针中传播, 波长为 500nm , 沿 y 方向偏振。

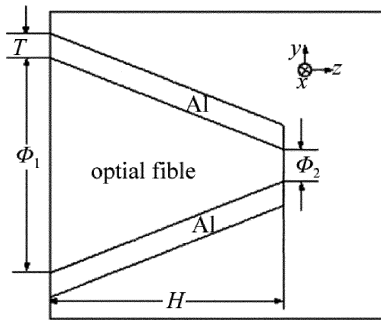


Fig. 1 Model of SNOM optical fiber for simulation

针对图 1 所示的微小探针尖端以外光场结构, VirtualLab Fusion 的仿真光路如图 2 所示, 分别为系统光源“Gaussian wave”, SNOM 探头“probe”和虚拟探测器“virtual screen”。元件之间的连线即为光路, 箭头代表传播方向, 连线表示透射。元件之间的相对距离和元件的参量, 例如光源的强度、光源的偏振态、光源的大小等等都可以随用户所想进行更改。这里需要指出的是, 图 2 中从光源到探测器的电磁场求解过程使用了傅里叶模态法 (Fourier modal method, FMM)。FMM 本身就是光纤建模的一种方法, 原本是用来精确模拟周期性结构的方法。本文中所仿真的光纤探针虽然不是周期性的, 但是鉴于其微小的结构特点, 首先在 FMM 模拟中设置大周期来实现周期性结构分析, 然后在结算结果中通过软件自动选取局部放大后, 实现对

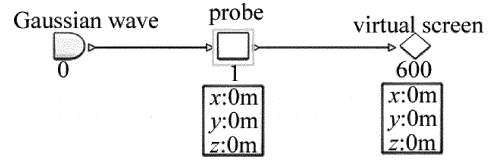


Fig. 2 Optical setup of SNOM probe with VirtualLab Fusion simulation
非周期性结构的精确模拟。“probe”的内部结构如图 3 所示。其中图 3a 为轴心切面视角, 图 3b 探针内侧视角, 图 3c 为探针外部视角。

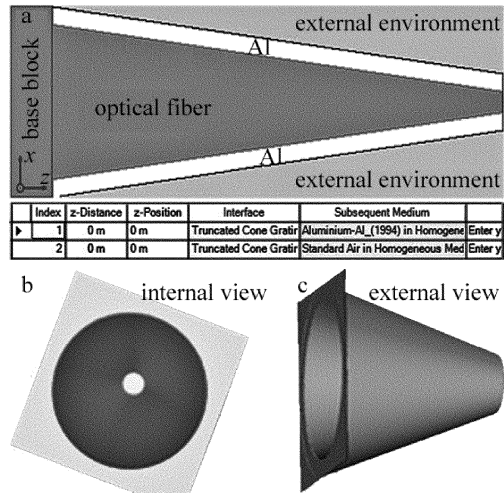


Fig. 3 Model of SNOM optical fiber in VirtualLab Fusion
a—view of axis section b—inside view c—outside view

1.2 VirtualLab Fusion 理论依据

图 2 中给出的建模非常简洁清楚, 是因为 VirtualLab Fusion 来源于场追迹理论。另外, 它还兼容了几何光学、平面波光谱法、Fresnel 远场积分、Fourier 模式方法和 ABCD 矩阵传输等多种模拟技术。参考文献[18]中对 VirtualLab Fusion 平台进行了详细的描述, 这里仅引用部分内容以说明其光学仿真准确性的依据。

如图 4 所示, 假定任意一个光学系统含有 5 个子域 $\Omega_j (j = 1, 2, \dots, 5)$, 即各种光学元件; 光源记为第 1 个子域, 每个子域的边界面分别为 Γ_j , 各子域边界上的场矢量记为 V_j , 它包含电磁波的 6 个分量。所有子域都嵌入在折射率为 n 的各向同性的绝缘或非导电介质中, 记为 Ω 。对于这个光学系统, 如果边界 Γ_1 输入一个光源场 $V_{1,s}$, 追迹主要关注的是子域边界面, 尤其是整个系统输出边界面 Γ_6 上所传播的电磁场信息 V_6 。为此, 场追迹将光学系统中各个子域对电磁场的输入和输出响应交由一个响应算子矩阵 C_j 来完成, 即带有光源的光学系统, 从光源出发, 其场矢量传输到一下个子域, 此光子域对输入其中的场矢量的反应由响应算子矩阵 C_j 来表征, 并得到一个输出矢量场, 然后在传输给下一个子域, 直到本系统的输出 V_6 。通过如此过程, 场追迹即可利用电磁谐波场的矢量信息, 完成求解含有电场矢量 E 和磁场矢量 H 的麦克斯韦方程组, 进

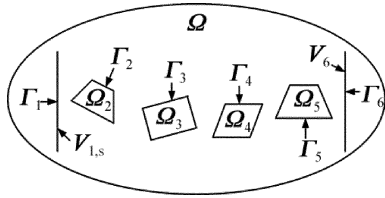


Fig. 4 In/out model of optical field in VirtualLab Fusion^[18]

行光学系统的建模和性能分析。

VirtualLab Fusion 的建模与分析主要涉及光源、各光学元件和探测器,以及各部分之间传播介质和方式。其中光源是以光场的电磁学描述方式来表达;光学元件以输入和输出面,以及两面之间填充介质的方式来表达;探测器是以矢量场分析的方式来表达。从光源到光学元件再到探测器之间的光路传播是以麦克斯韦方程组的场矢量传播规律来实现。每一个环节都是一个基于电磁场的程序模块,通过拖拽的方式在 VirtualLab Fusion 光路流程图中完成建模,参量根据用户需要进行设置。

2 SNOM 光纤探针的 VirtualLab Fusion 仿真

2.1 探针尖端外不同 z 位置截面上的光场分布

通过修改“virtual screen”下面的相对位置 z 参量,运行系统即可获得不同位置截面上的光场分布,如图 5 所示。其中图 5a ~ 图 5d 分别为 $z = -600\text{nm}$ (探针入口)、 $z = 0\text{nm}$ (探针出口)、 $z = 10\text{nm}$ 和 $z = 40\text{nm}$ 处截面上的光场分布图,图像幅度大小为 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$,图 5e 为图 5b 的中心轮廓线。图 5a 显示,虽然是高斯光源输入,但是由于高斯光源束腰处和近似于平面波,所以被软件放大以后也就是近似平面波了。图 5b、图 5c 和图 5d 显示,由于探针尖端是一个纳米量级的小孔,因此不同截面上的光场分布都会呈现小孔衍射的图案,且图 5d 中的轮廓线(见图 5e)也证实了这一点。另外,这个图案的中心斑点随着纵向距离 z 的变大而呈变大趋势。

为了更细致地观察图 5 不同距离处斑点的变化情况,首先通过设置“virtual screen”的相对位置,然后通过 VirtualLab Fusion 自身的轮廓线工具获得每张截面图片的中心轮廓线,最后将其中中心斑点的中心强度值和半峰全宽(full width at half maximum, FWHM)随 z 的变化情况描绘成曲线,分别如图 6a 和图 6b 所示。

图 6a 显示,探针尖端以外中心斑点的中心强度随着 z 值的变大而呈近似指数函数衰减,到 $z = 100\text{nm}$ 处几乎衰减为零。图 6b 显示,探针尖端以外中心斑点的轮廓 FWHM 随着 z 值的变大而呈现先不变后增大的趋势,其拐点处于 $z = 20\text{nm}$ 处,此时对应图 6a 中的强度值为 $7.2\text{V}/\text{m}^2$ 。这个强度值按指数函数计算正好处

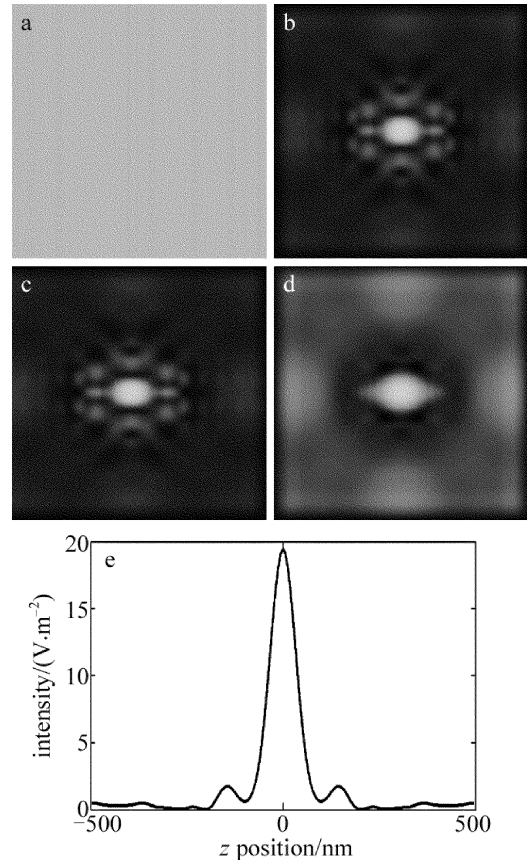


Fig. 5 Distribution of optical field in the cross section at different z positions of SNOM probe tip (y direction polarization)
a— $z = -600\text{nm}$ (the beginning of probe) b— $z = 0\text{nm}$ (the end of probe) c— $z = 10\text{nm}$ d— $z = 40\text{nm}$ e—the profile of Fig. 3b

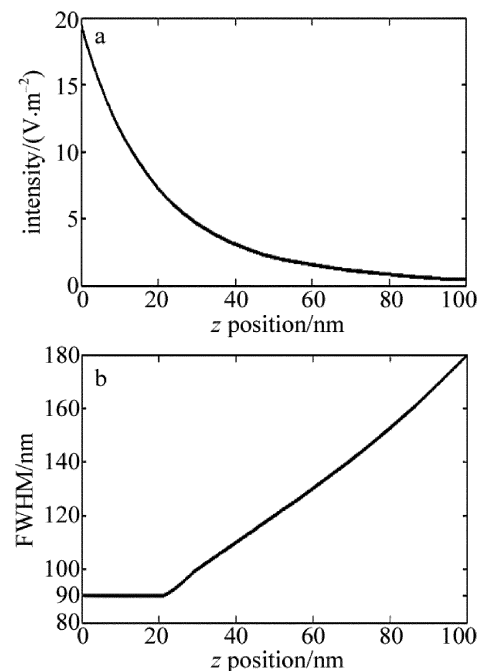


Fig. 6 Relationship between the parameters of center profile and z
a—for the intensity b—for FWHM

于 $z = 0\text{nm}$ 处强度的 e^{-2} 。由此也说明了 SNOM 探针工作时需要与样品表面保持在 10nm 左右的必要性。

2.2 入射光偏振对光场分布的影响

2.1 小节中仿真时光源为 y 偏振情况下的结果,如图 7 所示。图中显示了当光源为 x 偏振时探针尖端 $z = 0\text{nm}$ 处的截面图案和中心斑点轮廓线,其中图像幅度大小为 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 。对比于图 5e 发现,其图案随之旋转了 90° ,而轮廓线的参量却没有发生改变。

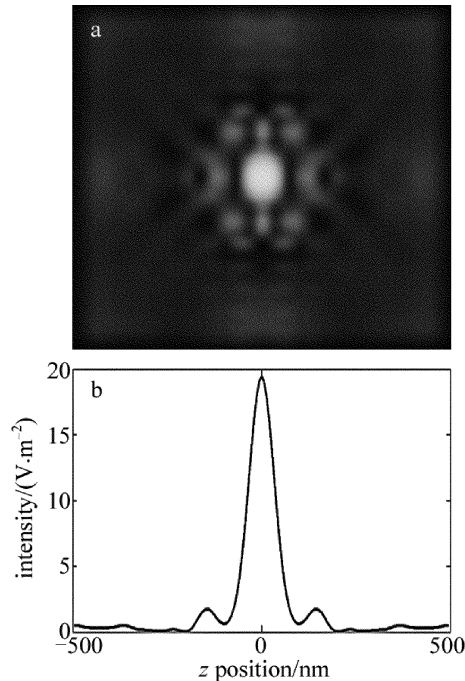


Fig. 7 a—distribution of optical field in the cross section at $z = 0\text{nm}$ of SNOM probe tip (x direction polarization) b—the profile of Fig. 7a

3 结论

SNOM 探针的光机电性能研究一直是 SNOM 领域的重中之重,因其结构特殊导致了其中光场传播过程的复杂性,在通常的研究过程中一般需要研究者自行编写精确的电磁场仿真方法。这就要求研究者具有很好的数学基础和光学理论功底。本文中选用的 VirtualLab Fusion 光学仿真软件因其理论模块化,建模系统化而为诸如 SNOM 探针的微纳结构光学特性仿真提供了一种崭新的平台。

感谢德国 Wyrowski Photonics 公司以及讯技光电科技(上海)有限公司给予的帮助和支持。

参 考 文 献

- [1] LIAO Y B. Optics: principles and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006:434(in Chinese).
- [2] GIRARD C, DEREUX A. Near-field optics theories[J]. Reports on Progress in Physics, 1996, 59(5):657-699.
- [3] WU X Y, SUN L, TAN Q F, *et al.* A novel phase-sensitive scanning near-field optical microscope[J]. Chinese Physics, 2015, B24(5): 054204.
- [4] NEUMAN T, PABLO A G, AITZOL G E, *et al.* Mapping the near fields of plasmonic nanoantennas by scattering-type scanning near-field optical microscopy[J]. Laser Photonics Review, 2015, 9(6): 637-649.
- [5] GE H Y, GUO Q Z, TAN W H. Resolution of internal total reflection scanning near-field optical microscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, B11(2): 111-116.
- [6] WANG Z, WU S F, LI H, *et al.* Measuring inclination and refractive index of the sample in collection-mode scanning near-field optical microscope with controllable illumination [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8):2272-2277(in Chinese).
- [7] CHAI W, SHANG G Y, YAO J E. Local magneto-optical Kerr effect imaging by scanning near-field optical microscope in reflection-mode [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(3):313-315.
- [8] FRANCESCO T, DANIELE V, MARIA A, *et al.* Shear-force microscopy investigation of roughness and shape of micro-fabricated holes [J]. Precision Engineering, 2015, 41: 32-39.
- [9] D'ANDREA C, FAZIO B, GUCCIARDI P G, *et al.* SERS enhancement and field confinement in nanosensors based on self-organized gold nanowires produced by ion-beam sputtering[J]. Journal of Physical Chemistry, 2014, C118(16): 8571-8580.
- [10] FRANCESCO T, FRANCESCO F, MARIA A, *et al.* Linear and circular dichroism in porphyrin J-aggregates probed by polarization modulated scanning near-field optical microscopy[J]. Nanoscale, 2014, 6(16): 10874.
- [11] ANDREA C, ISRAEL G, FRANCESCO T, *et al.* Conformational evolution of elongated polymer solutions tailors the polarization of light-emission from organic nano fibers[J]. Macromolecules, 2014, 47(14): 4704-4710.
- [12] LIU A P, REN X F. The analysis of surface plasmon polariton propagating on silver nanowire in near field[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0424001 (in Chinese).
- [13] SHI J P, DENG K X, HUANG Y, *et al.* Scanning near-field optical probe based nano-antennas[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1459-1463 (in Chinese).
- [14] SHUJI M. Fabrication of a double-tapered probe with enhanced aspect ratio for near-field scanning optical microscopy [J]. Applied Physics, 2015, A121(4):1365-1368.
- [15] NOVOTNY L, POHL D M, REGLI P. Near-field, far-field and imaging properties of the 2-D aperture SNOM [J]. Ultramicroscopy, 1995, 57(s2/3): 180-188.
- [16] LEVIATAN Y. Study of near-zone fields of a small aperture[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(5): 1577-1583.
- [17] ZHOU Q, ZHU X, LI H F. Study on light intensity distribution of tapered fiber in near-field scanning microscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(2): 210-214 (in Chinese).
- [18] WANG Ch, BI Sh B, WANG L, *et al.* Field-tracing based numerical simulation technique for the investigation of ultra-small self-focusing optical fiber probe[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 024217 (in Chinese).