

【其他研究】

基于镜像法的扫描近场光学显微镜的分辨率分析*

肖新元^{1,2}, 邹文栋¹, 黄长辉¹

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2. 江西机电职业技术学院 信息中心, 南昌 330013)

摘要:利用偶极子及镜像偶极子模型推导出探针扫描样品表面时的场分布, 给出数值计算的扫描光强分布。引入光强对比强度概念, 获得了该对比值随样品小球间距变化的曲线和该对比值随探针与样品距离变化的曲线。结果表明, 当探针在一定高度上扫描时, 近场光学显微镜系统存在最小分辨率, 而该分辨率随着探针与样品的距离增加而降低。

关键词:扫描近场光学显微镜; 镜像偶极子; 分辨率; 偶极子干涉

中图分类号: O432.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2010)05-0146-03

到目前, 对近场光的理论研究主要包括数值计算和解析理论 2 个方面。前者为时域有限差分法^[1], 但它有着边界条件选择困难、计算工作量大等先天缺陷; 后者则包括角谱理论^[2]、近场的自洽场理论^[3]等。角谱理论只能从频谱方面分析近场光学显微镜获得超衍射限制的分辨率的原因。在近场条件下, 将探针和样品表面凸起用偶极子模型替代, 则光与物质的作用变成光和偶极子的相互作用, 由此可以获得近场下的自洽场方程组, 从而得到精确的解析结果。

但采用偶极子模型, 在近场下的自洽场方程是利用了格林函数的直接传播子和间接传播子而获得的方程组, 这些方程组运算复杂, 且不易于分析诸如近场光学显微镜分辨率等问题。本文中使用镜像偶极子的概念, 将探针、样品表面凸起用偶极子描述, 并利用静态场的镜像方法来分析场分布, 得到一系列方程组, 进而从理论上分析近场光学显微镜的分辨率特性。

1 偶极子及镜像偶极子模型

近场光学显微镜在扫描工作时, 在外场作用下, 探针和样品表面发生极化效应, 产生了偶极矩, 此时可以用偶极子代表探针头和样品表面凸起^[4]。在样品表面下方空间充满着电介质。根据静态电磁场理论, 光场在样品表面的诱导极化产生的场分布, 可以看成是偶极子和这些偶极子的镜像偶极子共同作用的结果, 如图 1 所示。沿样品表面建立 x 轴, 在样品凸起偶极子中心垂直向上建立 z 轴, 整

个系统位于 $y=0$ 的平面上。

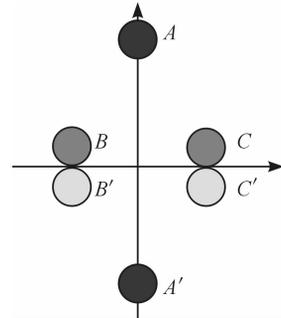


图 1 偶极子及其镜像示意图

假设偶极子的偶极矩为 p , 则偶极矩 p 沿 z 方向时, 其镜像偶极子的偶极矩^[5]为

$$p' = \gamma p \quad (1)$$

式(1)中 $\gamma = (\epsilon - 1)/(\epsilon + 1)$, ϵ 为样品偶极子介质的相对介电常数。当偶极矩 p 为平行样品表面时, 偶极子的镜像偶极子的偶极矩为

$$p' = -\gamma p \quad (2)$$

2 理论分析

对于偶极矩为 p 的偶极子, 近场下, 由于其辐射的磁场分量远远弱于电场分量, 故只需分析其电场分量^[6]:

$$E(\omega, r) = \frac{e^{i(k \cdot r - \omega t)}}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{r^3} [3n(n \cdot p) - p] - \right.$$

* 收稿日期: 2010-03-02

作者简介: 肖新元(1972—), 男, 硕士, 主要从事近场光学研究。

$$\frac{ik}{r^2} [3n(n \cdot p) - p] - \frac{k^2}{r} [n \times (n \times p)] \} \quad (3)$$

其中: n 为偶极子辐射的单位矢量; r 是偶极子到辐射点的距离。在近场下,式(3)中的 $1/r^3$ 项起了主要作用。而在静态下,忽略电磁场在近场区传播所产生的相位延迟、时谐因子项,可把偶极子辐射的电场简化为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^5} [3r(r \cdot p) - r^2 p] \quad (4)$$

这样,将探针顶部用偶极子 A 表示,需要分析显微镜分辨率的样品表面 2 个凸起分别用偶极子 B 和 C 表示,他们的镜像偶极子分别为 A', B', C' , 如图 1 所示,则

$$\begin{aligned} E_A = E_{A0} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_{BA}^5} [3r_{BA}(r_{BA} \cdot p_B) - r_{BA}^2 p_B] + \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_{CA}^5} [3r_{CA}(r_{CA} \cdot p_C) - r_{CA}^2 p_C] + \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_{B'A}^5} [3r_{B'A}(r_{B'A} \cdot p_{B'}) - r_{B'A}^2 p_{B'}] + \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_{C'A}^5} [3r_{C'A}(r_{C'A} \cdot p_C) - r_{C'A}^2 p_C] + \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_{A'A}^5} [3r_{A'A}(r_{A'A} \cdot p_{A'}) - r_{A'A}^2 p_{A'}] \end{aligned} \quad (5)$$

同理可以得到,在样品上 B, C 处电场 E_B, E_C 的类似表达式。

偶极子 A, B, C 的电偶极矩分别为:

$$p_A = \alpha_i E_A, \quad p_B = \alpha_s E_B, \quad p_C = \alpha_s E_C \quad (6)$$

式(6)中 α_i 和 α_s 分别是探针和样品表面材料的极化率^[7], 在纳米级,可简化为

$$\alpha_i = 4\pi\epsilon_0 r^3 \frac{\epsilon_i - 1}{\epsilon_i + 2}, \quad \alpha_s = 4\pi\epsilon_0 r^3 \frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 2} \quad (7)$$

而镜像偶极子 A', B', C' 的电偶极矩 p'_A, p'_B, p'_C 可根据式(1)、(2)分析得到。

由式(4)~(7)可以求出探针在样品表面扫描时获得的光场强度分布。

3 数值计算与分析

这里采用全内反射方式生成倏逝场。假设在样品表面倏逝场的光场为 $(0, 0, 1)$, 沿 z 轴, 故初始光场 $E_{E0} = E_{E0} = (0, 0, 1)$ 。因倏逝场传播时按指数级衰减, 故倏逝波传播到探针处初始光场 $E_{A0} = 0$ 。偶极子球的半径均为 10 nm, 偶极子球 A, B, C 的坐标分别是 $(x, 0, h), (-d, 0, r), (d, 0, r)$ 。利用对称性, 易得镜像偶极子球 A', B', C' 的坐标。同时 2 样品小球的距离为 $2d$, 探针、样品材料的相对介电常数分别为 $\epsilon_i = 4$ 和 $\epsilon_s = 2.5$, 探针在样品上方 30 nm 处, 以等高模式沿着 x 轴扫描, 则探针所获得的光强可以用 $E_{Ax}^2 + E_{Ay}^2 + E_{Az}^2$ 表示。

图 2 是 d 分别为 10, 15, 20, 30 nm 时, 探针水平扫描得到的光强分布。当样品偶极子小球相距 60 nm ($d = 30$ nm) 时, 探针扫描光强呈现 2 个对称的凸起曲线, 左侧可认为主要由 B 球产生的诱导光强, 右侧则认为主要由 C 球产

生的诱导光强, 从曲线的分布来看, 可以清晰分辨出 2 个样品球。当探测的样品小球距离减小, 可以发现样品偶极子小球产生的诱导光强产生重叠。特别是当 2 个样品球靠在一起 ($d = 10$ nm) 时, 探针探测 2 个样品小球的光强发生强烈的干涉效应, 显微镜探针已经无法分辨出 2 个样品小球了。可见, 扫描近场光学显微镜在理论上存在分辨极限。

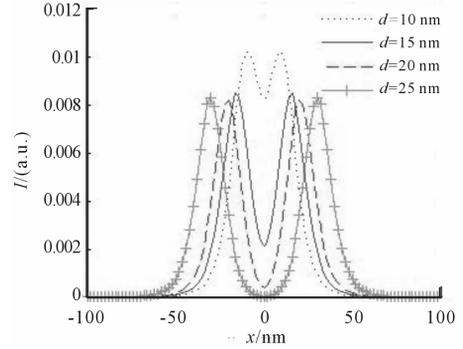


图 2 在样品表面扫描时探针的光强分布

正是偶极子的诱导光强相互干涉导致扫描近场光学显微镜的分辨率降低。为了区别偶极子干涉的程度, 引入在中心位置探针光强与水平扫描时探针最大光强之比 I_0/I_{\max} , 然后探针同样处在样品上方 30 nm 处。当样品偶极子球相距 $2d$ 变化时, 比值 I_0/I_{\max} 也随之改变。数值计算结果如图 3 所示, 若 $I_0/I_{\max} = 0.8$ 时系统可以分辨样品 2 个凸起小球, 则从图中可以发现, 此时 2 样品小球相距 $2d = 26$ nm, 即在样品上方 30 nm 处, 半径为 10 nm 的探针所获得的分辨率为 26 nm。

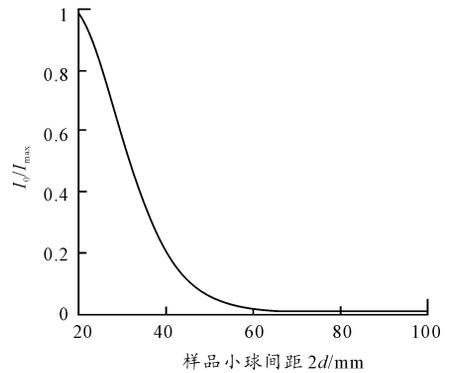


图 3 比值 I_0/I_{\max} 随 $2d$ 的变化曲线

最后分析探针与样品距离对扫描近场光学显微镜系统的分辨率的影响。假设 d 分别为 15, 20, 25 nm 时, 分别将探针从距离样品高度 20 nm 移向 60 nm, 获得对应的 3 条 I_0/I_{\max} 随高度 h 变化的曲线, 如图 4 所示。同理假设在 $I_0/I_{\max} = 0.8$ 时系统可分辨样品 2 个凸起小球。在 $d = 15$ nm, $h > 39$ nm 时系统将无法分辨该 2 个样品小球; 在 $d = 20$ nm, $h > 48$ nm 时系统将无法分辨; 在 $d = 25$ nm, $h > 57$ nm 时系统也将无法分辨。这些理论分析结果和数值分析结果与 Betzig 等^[8] 的实验结果基本一致, 从而验证了: 当探针与样品距离增加时, 扫描近场光学显微镜的分辨率将

降低。

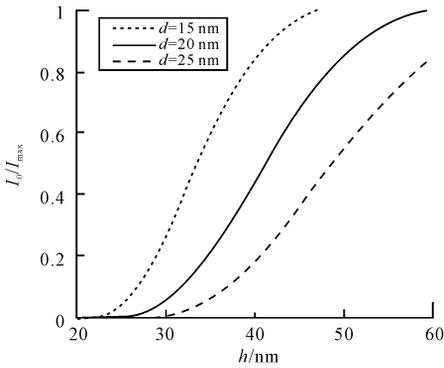


图4 d 取不同值, I_0/I_{\max} 随 h 的变化曲线

4 结束语

本文中应用了偶极子、镜像偶极子模型,在理论上获得探针扫描时光场分布的方程组,经数值分析获得在样品小球上方扫描时探针的光强分布。当样品小球相距较远时,各个样品小球对探针形成的光场较为独立,而当2个样品小球相靠近时,各自在探针处产生的光场将发生干涉,并且随距离减小而增强,当增强到一定程度时,系统便无法分辨2个样品凸起小球,达到了系统的分辨极限。而探针与样品距离增加时,扫描近场光学显微镜的分辨率将降低。

参考文献:

[1] Christensen D A. Analysis of near field tip patterns in-

cluding object interaction using finite-difference time-domain calculation [J]. Ultramicroscopy, 1995, 57(2): 189-195.

[2] Zhiyang Li, Wu Liu, Chuanyun Xiao, et al. Angular spectrum transfer function of photon scanning tunnel microscopy [J]. CCAST-WL Workshop Series, 1996, 64: 193-200.

[3] Chaument, Nieto-Vesperinas. Coupled dipole method determination of the electromagnetic force on a particle over a flat dielectric substrate[J]. Phys Rev, 2000, 61: 14119-14127.

[4] Labani B, Grard C, Courjon D, et al. Optical interaction between a dielectric tip and a nanometric lattice; implications for near-field microscopy[J]. J Opt Soc A m B, 1990, 7(6): 936-943.

[5] Knoll B, Keilmann F. Enhanced dielectric contrast in scattering-type scanning near-field optical microscopy [J]. Opt Commun, 2000, 182(8): 321-328.

[6] Jackson J D. Classical Electrodynamics [M]. New York: Wiley, 1998: 391-427.

[7] Harada Y, Asakura T. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime [J]. Opt Commun, 1996, 124: 529-541.

[8] Betzig E, Isaacson M, Lewis A. Collection mode near-field scanning optical microscopy [J]. Appl Phys Lett., 1987, 51(25): 2088-2090.

(责任编辑 刘 舸)

(上接第142页)作品为止。图5是完成后的人机交互界面。



图5 某型舰炮交互式教学软件人机交互主界面

3 结束语

设计了某型舰炮交互式教学软件的技术方案,并运用 Director MX 2004、Adobe Premiere Pro、Photoshop cs 和 Solid-

Works 2007 等工具实现了该软件。该交互式教学软件具有人机界面友好、教学内容形象直观、易于理解等特点,能为舰(艇)员学习掌握该型舰炮的工作原理,正确操作使用和维护保养该型舰炮,以及分析与排除故障提供有力的技术支持。

此外,该多媒体的开发过程遵循了软件工程和交互式教学软件开发的一般原则,也可供同类交互式教学软件开发时参考。

参考文献:

[1] 张豪,何方. Director 交互式多媒体开发[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

[2] 詹迪维. SolidWorks 快速入门教程[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[3] [美]Adobe 公司. Adobe Premiere Pro 经典教程[M]. 沈金河,译. 北京:人民邮电出版社,2005.

(责任编辑 周江川)