

文章编号: 0253-2239(2003)05-0513-04

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*

武清华 王桂英 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放实验室, 上海 201800)

摘要: 用偶极子-自洽场理论模拟计算了反射式近场光学扫描显微镜中入射光的偏振特性对近场成像结果的影响(包括系统分辨率和相关的成像特性),并给予了相应的分析和解释。分析计算结果表明,入射光偏振性的选择将影响近场光学显微镜的成像质量。在近场区域,用垂直于样品表面偏振的入射光(即 z 方向偏振)照明成像将得到优于相应水平偏振(即 x 方向偏振)的入射光照明的系统分辨率。用 x 方向偏振的入射光照明时,所得光学图像会发生局部的光强对比度反转。

关键词: 近场光学; 入射光的偏振特性; 反射式近场光学显微镜; 隐失场与传播场; 系统分辨率

中图分类号: O439 文献标识码: A

1 引 言

近十多年来,近场光学显微镜由于其超衍射分辨能力而得到迅速的发展,也广泛地运用于材料的微结构探测,超高密度光存储,尤其是生物超高分辨活体成像^[1]等研究领域。针对所探测的各种不同类型的样品,人们研制出各种结构的近场光学显微镜,如透射式结构^[2]、全内反射式结构^[3]及外反射式结构^[4]等,以获得成像物体超分辨的细节信息。

随着对探测成像精度要求的提高,如何提高近场光学显微镜的成像质量进而提高系统成像的分辨率一直是近场成像研究过程中十分关注的问题。影响近场光学显微镜成像质量的因素有很多,包括探针的大小和形状、扫描成像的方式、探针与样品的距离及入射光的偏振特性等诸多方面。在外反射式近场光学显微镜中,光纤扫描探针深入近场,既充当照明光源同时又收集由成像样品反射回来的光场信息^[4]。由于照明光的干扰及反射光中传播场分量的影响,探测到的亚波长信号很弱,其信噪比(SNR)很低。为了提高反射式近场光学显微镜的系统信噪比,可以采用偏振光的照明方式。这样可以有效地提高信噪比和系统分辨率,从而提高系统的成像质

量。基于此,本文就入射光的偏振特性对近场光学显微镜成像质量的影响进行研究。通过数值模拟考察和分析反射式近场光学显微镜在不同偏振的入射光照明下光纤探针扫描所探测的光强(即在近场区域对样品扫描成像),获取入射光的偏振特性对系统成像质量和分辨率影响的各种信息,并对所得结果进行解释。

2 偶极子-自洽场理论

下面将用偶极子-自洽场理论^[5]来探讨相关的问题。为了求出探针所探测的光强,我们采用格林(Green)函数传播子^[6]的方法来描述近场区域的光场分布。用 N 个放在固定位置 $\mathbf{r}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 的点状偶极子球表示被测物体的表面形貌,把场与粒子的相互作用等价于场与偶极子的相互作用。假设入射光场是一角频率为 ω 的单色波,则局域场 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)$ 的表达式为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}, \omega) - \mu_0 \omega^2 \sum_{i=1}^N [\vec{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \cdot \vec{\alpha}_i(\omega)] \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}_i, \omega), \quad (1)$$

(1) 式中 μ_0 为真空中的磁导率, $\mathbf{E}_0(\mathbf{r}, \omega)$ 为 \mathbf{r} 处的初始光场, $\vec{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ 为从点源 \mathbf{r}' 到观察点 \mathbf{r} 的电磁场格林函数传播子。 $\vec{\alpha}_i(\omega)$ 为第 i 个粒子的极化率张量。在长波长的情况下,半径为 a 的各同性小球的极化率张量 $\vec{\alpha}_i(\omega)$ 可表示为

$$\vec{\alpha}_i(\omega) = \alpha(\omega) \vec{\mathbf{U}} = 4\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon(\omega) - 1}{\epsilon(\omega) + 2} \vec{\mathbf{U}}, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(60078025)、上海市光科技基金(01DJGK018)资助课题。

E-mail: gywsiofm@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期:2002-04-25; 收到修改稿日期:2002-06-03

其中 $\epsilon(\omega) = n^2$ 为小球的相对介电常量, n 为小球的折射率, \vec{U} 为单位二阶张量。

传播子 $\vec{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ 包含两部分, 即

$$\vec{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \vec{D}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) + \vec{T}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega), \quad (3)$$

其中 $\vec{D}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ 为直接传播子, 它代表一偶极子与另一偶极子之间的直接相互作用, $\vec{T}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ 为间接传播子, 它代表偶极子之间通过衬底表面的反射所产生的间接相互作用。直接传播子 $\vec{D}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ 的表达式^[7] 为

$$\vec{D}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \frac{1}{4\pi} \left[\left(-\frac{1}{R} - \frac{ic}{\omega R^2} + \frac{c^2}{\omega^2 R^3} \right) \vec{U} + \left(\frac{1}{R} + \frac{3ic}{\omega R^2} - \frac{3c^2}{\omega^2 R^3} \right) \mathbf{e}_R \mathbf{e}_R \right] \exp[i(\omega/c)R], \quad (4)$$

其中 $\mathbf{e}_R = \mathbf{R}/R$, $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, 而 $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$, 且 $\mathbf{r} \neq \mathbf{r}'$ 。

光纤探针足够小时, 也可被视为一个散射偶极子小球, 与 N 个偶极子物体小球结合, 便可得到如下的一组 $N+1$ 个自洽方程:

$$\mathbf{E}_i(\mathbf{r}_i, \omega) = \mathbf{E}_i^0(\mathbf{r}_i, \omega) + \sum_{j=1}^{N+1} \vec{F}_{ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, \omega) \cdot \mathbf{E}_j(\mathbf{r}_j, \omega), \quad i = 1, 2, \dots, N+1, \quad (5)$$

其中 $\vec{F}_{ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, \omega)$ 的表达式为

$$\vec{F}_{ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, \omega) = -\mu_0 \omega^2 / 4\pi \cdot \alpha_j(\omega) \vec{U} \cdot [\vec{D}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, \omega) + \vec{T}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, \omega)], \quad (6)$$

(5) 式中 $\mathbf{E}_i^0(\mathbf{r}_i, \omega)$ 表示在第 i 个偶极子处的初始场。 $\mathbf{E}_i(\mathbf{r}_i, \omega)$ 表示第 i 个偶极子处的光场强度。上述方程组是严格自洽的, 它包含了在近场区域光纤探针与成像样品间的相互作用及样品的各微细结构间(用 N 个偶极子小球所示)的相互作用等各类复杂的耦合与相互作用。通过严格求解该组自洽方程组便可得到探针偶极子处的光场, 从而得到样品的扫描光学图像。

3 数值模拟计算结果与分析

应用上节偶极子相互作用的自洽场方程组(5), 可以模拟计算在外反射式近场光学显微镜中不同的偏振入射光照明所得到的近场扫描样品的图像, 从而可以分析照明入射光的偏振性对成像质量的影响。图 1 是计算所用的反射式近场光学扫描显微镜的示意图。小球 A、B 表示被测样品的形貌, 实验中一般在其外层镀有银膜, 它们放置在银质的平板衬底上。小球 C 表示光纤探针, 基质为玻璃。小球 A、B 和 C 的半径均为 $r = 20$ nm, 其对应的坐标分别为

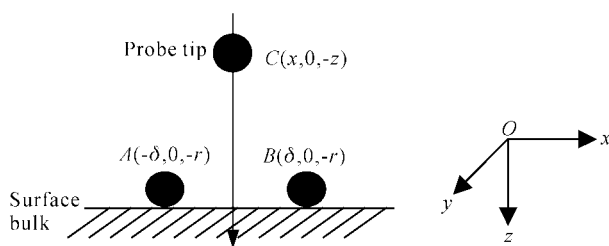


Fig. 1 Schematic diagram for the reflection SNOM configuration

$$\mathbf{r}_A = (-\delta, 0, -r),$$

$$\mathbf{r}_B = (\delta, 0, -r),$$

$$\mathbf{r}_C = (x, 0, -z).$$

入射光波长为 $\lambda = 632.8$ nm, 玻璃和金属银的折射率分别为 $n_g = 1.59$, $n_{Ag} = 0.06 + 4.0i$ 。将这些参量代入(5)式中, 得到一组自洽的方程组, 求解可得探针小球 C 处的光强 $I_C = |\mathbf{E}_C(\mathbf{r}_C, \omega)|^2$ 。在计算过程中, 我们改变入射照明场的偏振态(x 偏振或 z 偏振)及探针小球的 z 向坐标即探针与样品间的距离, 通过考察探针扫描所探测的光强来研究不同的入射照明场的偏振态对近场成像的影响。

首先讨论不同偏振的入射光照明对系统分辨率的影响。图 2 是探针沿 x 方向扫描样品所得的光强变化曲线。探针与衬底表面的间距为 45 nm(即 $z = 45$ nm), 此时探针小球的最下端与样品小球的最上端的最小距离为 5 nm。两样品小球的间距(中心至中心)为 40 nm(即 $\delta = 20$ nm, 此时两样品小球相互紧贴着)。图 2(a) 为 x 偏振光照明, 即 $\mathbf{E}_0 = (1, 0, 0)$; 图 2(b) 为 z 偏振光照明, 即 $\mathbf{E}_0 = (0, 0, 1)$ 。从图 2 中可以明显地看出由 z 方向偏振的入射光照明所得近场图像的分辨率优于相应的 x 方向偏振的入射光照明。图 2(a) 中已无法分辨出两样品小球, 而图 2(b) 中能清晰的分辨出该两样品小球。这与同类的计算结果^[8] 和实验结果^[9] 是一致的。这是因为用 z 方向偏振的入射光照明时, 在样品与探针之间的区域存在着比用 x 方向偏振的入射光照明时更强的利于探测的隐失场成分和更弱的传播场成分。我们可以将(4)式分解为隐失场成分和传播场成分^[10], 其中隐失场成分为

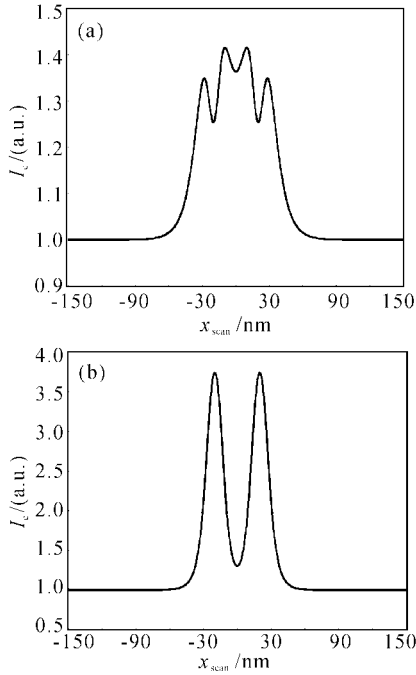


Fig. 2 Field intensity at the site of the probe dipole as a function of the x -coordinate of the probe with different polarized light. (a) x -polarized, $E_0 = (1, 0, 0)$; (b) z -polarized, $E_0 = (0, 0, 1)$

$$\vec{D}_{ev}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \frac{1}{4\pi} \left[\left(-\frac{1}{2R} + \frac{c_0^2}{\omega^2 R^3} \right) \vec{U} + \left(-\frac{1}{2R} - \frac{3c_0^2}{\omega^2 R^3} \right) \mathbf{e}_R \mathbf{e}_R \right], \quad (7)$$

那么,传播场成分则为

$$\vec{D}_h(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \vec{D}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) - \vec{D}_{ev}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega), \quad (8)$$

其中 $\mathbf{e}_R = (\mathbf{r} - \mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, \mathbf{r} 为观察点的位置矢量, \mathbf{r}' 为源点的位置矢量。由(7)式、(8)式和(4)式,可以计算出单个偶极子小球近场区域的隐失场和传播场强度分布。 $\vec{D}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ 及 $\vec{D}_{ev}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ 都是二阶张量,其中的各元素表示了在不同空间取向上不同的权重。当用不同的偏振光照明时,偶极子经照明产生的散射场的各分量(隐失场和传播场)在强度和角分布(即方向)等方面均不相同。计算表明^[11]当用 z 方向偏振 [$E_0 = (0, 0, 1)$] 的入射光照明样品时,在偶极子小球的纵向(z 方向)主要是隐失场分量,其传播场主要分布在横向(即垂直于 z 方向)。而用 x 方向偏振 [$E_0 = (1, 0, 0)$] 的入射光照明时,其传播场主要分布在纵向方向上,而在横向方向上的场分布,则主要是隐失场分量。在近场区域,一般情况是隐失场的强度远大于传播场的强度(可大至 4 个量级)。而对于近场成像,决定系统分辨率的主要是分布于样品与扫描探针间的纵向(即 z 方向)的隐失场分量。所以在近场扫描成像时,用 z 方向偏振的

入射光照明样品时会取得更好的系统分辨率。

下面我们细致地考察和分析用 x 方向偏振的入射光照明时系统的成像特性。图 3 是用 x 方向偏振的入射光[即 $E_0 = (1, 0, 0)$] 照明时探针沿 x 方向扫描样品所得的光强变化曲线。探针与衬底表面的间距为 50 nm(即 $z = 50$ nm),图 3(a) 是两样品小球的中心间距为 80 nm(即 $\delta = 40$ nm)时的光强曲线。图 3(b) 为两样品小球的中心间距为 40 nm(即 $\delta = 20$ nm,此时两样品小球相互紧贴着)时的光强曲线。

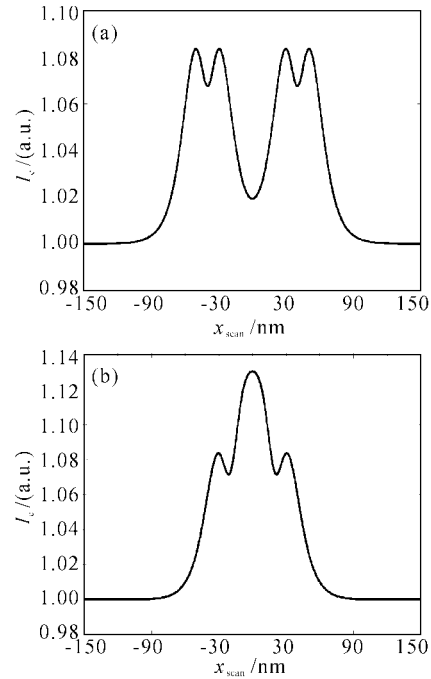


Fig. 3 Field intensity at the site of the probe dipole as a function of the x -coordinate of the probe with x -polarized light $E_0 = (1, 0, 0)$ for different distances between two sample spheres. (a) $\delta = 40$ nm; (b) $\delta = 20$ nm

从图 3(a) 中可以看出探针扫描所探测的光强在相应的样品小球位置坐标处有一凹陷,而在小球边沿对应的位置处光强值却出现两个峰值,即成像光强对比度发生了反转。这是因为用 x 方向偏振的入射光照明时,在样品小球中心的正上方主要是纵向的传播场,隐失场相对其边沿是弱的;而在样品小球的边沿处横向的隐失场与纵向的传播场发生相互干涉(干涉项为 $E_{ev} E_h^*$ 及 $E_{ev}^* E_h$),而且在近场区域内横向的隐失场强度远大于纵向的传播场强度,所以探针所探测的样品小球对应位置处的光强会出现中间下陷,两边凸起的结果。而用 z 方向偏振的入射光照明时,由于近场隐失场分量分布在纵向,而且始终是主要的光强成分,所以这种现象就不明显。

在图 3(b)中中间光强(即 $x=0$ 处)的陡增是因为当两个样品小球靠得很近时,相互间的光场尤其是隐失场分量产生了衍射相干叠加,致使中间没有小球位置处的光场增强。在图 2(a)和图 3(b)中,两者仅在探测小球和样品表面距离上有差别,前者为 $z=45$ nm,后者为 $z=50$ nm,由此可以看出衍射干涉传输的花样变化。上述现象说明成像样品衍射光场的干涉将直接影响系统的最小分辨能力。

结论 用偶极子-自洽场理论,通过数值模拟计算反射式近场光学显微镜中不同偏振入射光照明产生的近场图像,得出用 z 方向的偏振入射光照明能获得优于 x 方向偏振的入射光照明的系统分辨率。这是因为用不同偏振入射光照明时,经样品散射后会产生不同方向上强度不同的隐失场和传播场。而在近场成像过程中,纵向(即 z 方向)的隐失波场是决定系统分辨率和成像质量的关键因素。用 x 方向偏振的入射光照明所得光学图像会出现一定程度的光强对比度反转,这是由于样品的散射场中隐失波场与传播场的干涉所致。

参 考 文 献

1 Lange F D, Cambi A, Huijbens R *et al.*. Cell biology beyond the diffraction limit: Near-field scanning optical microscopy. *J. Cell Sci.*, 2001, **114**(23):4153~4160

- 2 Betzig E, Trautman J K. Near-field optics: Microscopy, spectroscopy, and surface modification beyond the diffraction limit. *Science*, 1992, **257**(5067):189~195
- 3 Inoué Y, Kawata S. Near-field scanning optical microscope with a metallic probe tip. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3):159~161
- 4 Bozhevolnyi S I, Xiao M, Keller O. External-reflection near-field optical microscope with cross-polarized detection. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(5):876~880
- 5 Keller O, Xiao Mufci, Bozhevolnyi S. Configurational resonances in optical near-field microscopy: A rigorous point-dipole approach. *Surf. Sci.*, 1993, **280**(1):217~230
- 6 Keller O. Tensor-product structure of a new electromagnetic propagator for nonlocal surface optics of metals. *Phys. Rev. (B)*, 1988, **37**(18):10588~10607
- 7 Jackson J. *Classical Electrodynamics*. New York: Wiley, 1962. 271
- 8 Martin O J F, Girard C, Dereux A. Generalized field propagator for electromagnetic scattering and light confinement. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(4):526~529
- 9 Aigouy L, Lahrech A, Gresillon S *et al.*. Polariton effects in apertureless scanning near-field optical microscopy: An experimental study. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4):187~189
- 10 Xiao M. On near-field scanning optical microscopy: Homogeneous and evanescent radiation. *J. Mod. Opt.*, 1997, **44**(2):327~344
- 11 Xiao Mufci. Evanescent field coupling of dipole to a surface: Configurational resonance at long distances. *Chem. Phys. Lett.*, 1996, **258**(3):363~368

Influence of Polarization of the Incident Light on Imaging of the RSNOM

Wu Qinghua Wang Guiying Xu Zhizhan

(Lab of High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 25 April 2002; revised 3 June 2002)

Abstract: Based on the dipole-self-consistent field theory the influence of polarization of the incident light on the imaging quality of reflection mode SNOM is simulately calculated such as the system resolution and the image quality, and the theoretical explanation is given. The analysis result shows that the imaging quality greatly depends on the polarization of incident light at the probe tip of the microscope. In the near field imaging, the system resolution is better when the incident light is polarized vertically to the surface (via z -axis polarized) than that when it is horizontally polarized. When the incident light is x -axis polarized, the imaging achieved by scanning the object can reverse locally in contrast.

Key words: near field optics; the polarization of incident light; reflection scanning nearfield optical microscopy (RSNOM); the evanescent field and the homogenous field; the system resolution