

文章编号 : 0258-7025(2001)03-0253-04

用 3D-FDTD 法分析用于近场光存储的 光纤探针电磁波传输特性*

刘 凯 白 明 鲁 拥 华 唐 麟 王 超 明 海

(中国科学技术大学物理系 合肥 230026)

提要 提高近场光存储的存储信息密度的关键主要在于掌握近场存储光纤探针的透光率、近场光斑直径尺寸以及场梯度等近场物理量。采用三维时域有限差分(3D-FDTD)法分析了可用于近场光存储的光纤探针尖的光学性质,对不同类型光纤的近场光场分布进行了数值计算,给出结果并进行比较,从光学性质的角度对其在近场光存储中的应用加以讨论。完全镀膜光纤尖在极近场处的光斑可获得 10 nm 的尺寸,远小于传统光纤光学聚焦的光斑尺寸大小。

关键词 近场光存储,三维时域有限差分法,光纤探针

中图分类号 O 438 ;TP 333.4 文献标识码 A

Electromagnetic Propagation of Fiber Probe for Near-field Optical Recording Using 3-D FDTD Method

LIU Kai BAI Ming LU Yong-hua TANG Lin WANG Chao MING Hai

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The data density of the near-field optical recording is mainly determined by near-field electromagnetic distribution of probe fiber such as transmission efficiency, near-field light spot size, polarization keeping and the grade of the electromagnetic field. The optical characters and light wave propagation of various fiber probes for near-field optical recording are numerically simulated using 3D finite-difference time-domain (3D-FDTD) method in this paper. The possible application in near-field optical recording with these probes is discussed. The entirely metal coat probe is pointed out to have an extremely small near-field spot size about 10 nm, which is far less than that of the conventional probe.

Key words near field optical recording, 3D-FDTD method, fiber probe

1 引 言

在新兴的超高密度光存储技术中,提高信息存储密度的最主要困难在于传统光学系统的最小光斑尺寸受衍射极限制约,而扫描近场光存储技术使存储系统可以突破这个限制。现今扫描近场光学显微镜的近场光斑直径可以达到 20nm,其潜在信息存储密度比现有的只读光盘的存储密度高 2500 倍。光纤和非光纤探针的光学性质是近场记录的关键之一。本文重点讨论光纤探针,现有的无镀膜光纤尖、镀膜开口光纤尖、完全镀膜光纤尖和新型等离子体

针尖四种类型光纤尖具有不同的近场分布函数,其透光率、近场光斑直径尺寸以及场梯度直接决定了它们不同的光存储密度和光存储的技术难度。时域有限差分法(FDTD method)是一种新兴的数值计算方法,它简单、直观、精密度高,能直接应用于电磁场的时域计算,近几年来被广泛应用于近场光学领域中。这里,我们用三维时域有限差分法对几种不同形状、不同参数的光纤探针的光场传输特性进行了数值模拟,对影响存储密度和存储技术的几种参数进行了分析,并对其在近场光存储中的应用前景进行了讨论。

2 3D-FDTD 方法和探针模型

三维时域有限差分法直接从 Maxwell 方程出

* 国家自然科学基金(19974042)和国家 973 重点基础研究发展规划资助课题。

收稿日期:1999-12-06;收到修改稿日期:2000-01-21

发,不需要任何导出方程,避免了过多的近似,使其计算精度比较高;其次,它直接在时域中模拟电磁波的传播,便于直观理解电磁场传播的时间行为。近年来时域有限差分法被广泛应用于近场光学领域。本文采用三维时域有限差分法,从 Maxwell 方程出发,在 Yee 氏^[1]三维网格空间中,计算差分公式^[1],得到

$$\begin{aligned}
 H_x(k, i, j) &= H_x(k, i, j) + CD \times [E_y(k+1, i, j) - E_y(k, i, j) + E_z(k, i, j) - E_z(k, i, j+1)] \\
 E_x(k, i, j) &= CA \times E_x(k, i, j) + CD \times CB \times [H_z(k, i, j) - H_z(k, i, j-1) + H_y(k-1, i, j) - H_y(k, i, j)]
 \end{aligned}$$

H_y, E_y, H_z, E_z 公式与其类似。其中

$$\begin{cases}
 CA = \frac{1 - 0.5\sigma \cdot \Delta s / 2c\epsilon}{1 + 0.5\sigma \cdot \Delta s / 2c\epsilon} \\
 CB = \frac{\epsilon_0}{2 \cdot \epsilon + \sigma \cdot \Delta s / 2c} \\
 CD = \frac{1}{2}
 \end{cases}$$

σ, ϵ 分别为介质的电导率和介电常数, Δs 为单元网格的长度。边界条件采用 PML 技术^[2]。

限于计算内存容量,网格空间大小设为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, 对不同类型光纤,分别取网格空间的单元长度 $\Delta s = 10 \text{ nm}$ 或 0.5 nm , 时间步长 $\Delta t = \Delta s / 2c$ 。以 x 方向偏振的高斯光束入射,光波沿 z 向传播,波长 $\lambda = 488 \text{ nm}$ 。如图 1 所示。由于针尖直径远小于光纤芯径,近似认为针尖的折射率即为光纤芯折射率($n = 1.5$)。采用铝金属镀膜,其介电常数为 $\epsilon = -34.5 + i8.5$ 。

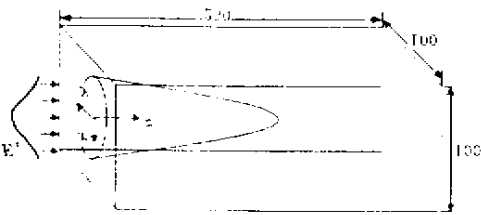


图 1 网格空间及光纤尖模型略图

Fig.1 Yee space and the model of the fiber

使用的光纤尖模型采用传输效率高,反向耦合系数比较低的抛物线型光纤探针尖^[3,4]。其针尖锥角约为 30° 。光纤尖的对称轴设为 z 轴。针尖类型为 1) 无镀膜光纤尖 2) 镀膜开口针尖 3) 完全镀膜光纤尖。对完全镀膜针尖的尖端镀膜厚度分别取

$D = 1, 2, 3, 5 \text{ nm}$ 。

3 结果和讨论

在可见光波长范围,电磁波与物质的相互作用可以由电场分量表示,本文用电场分量模平方 $|E|^2$ 表示光纤探针尖的近场电磁波分布。对上述三种模型的计算结果表明,在近场附近过针尖对称轴横截面上电场分量 $|E|^2$ 是中心对称的。见图 2(b)(c), (d)。应当注意,对于无镀膜光纤尖,当距离继续增大时,由于产生其他光场转换模式,横截面上电场分布不再是中心对称的。如图 2(a)所示距离无镀膜光纤尖 100 nm 处光斑就不再是中心对称。由于近场光存储探针尖距离存储介质距离在几十纳米范围,在下面的讨论中,我们将仅关注近场处横截面上电场分量是中心对称时的情况。

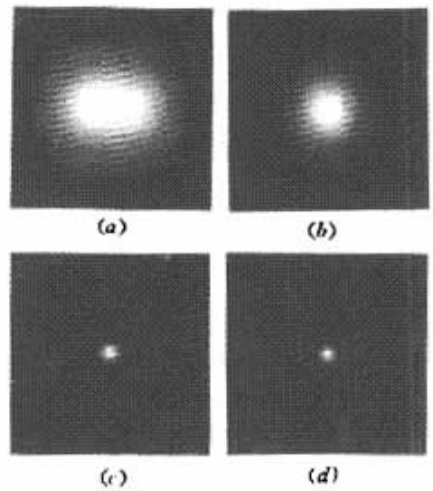


图 2 光纤尖近场输出光斑形状

- (a)(b) $(1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m})$ 距离无镀膜光纤尖 100 nm 40 nm ;
- (c) $(50 \text{ nm} \times 50 \text{ nm})$ 开口镀膜光纤尖前 5 nm 处;
- (d) $(50 \text{ nm} \times 50 \text{ nm})$ 完全镀膜光纤尖 5 nm 处

Fig.2 Distributions of the spot outside of the fiber probe (a)(b) $(1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m})$ 100 nm , 40 nm away from the tip of the bare fiber probe; (c) $(50 \text{ nm} \times 50 \text{ nm})$ 5 nm away from tip of the aperture probe; (d) $(50 \text{ nm} \times 50 \text{ nm})$ 5 nm away from the tip of the entirely coat probe

图 3 为具有相同几何形状 of 无镀膜光纤尖、镀膜开口为 100 nm 和 20 nm 的光纤尖在 $x-z$ 平面上距离针尖($z = 0$) 40 nm 处,沿 x 方向衰减的归一化电场分量 $|E|^2$ 。其量级分别为输入电场值模平方的 $10^{-2}, 10^{-4}, 10^{-6}$ 。由图可见无镀膜光纤尖、镀

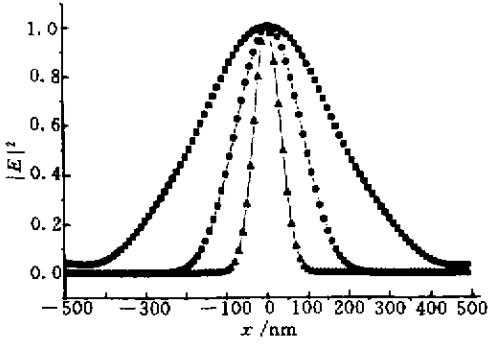


图 3 不同类型的针尖在距离针尖 ($z =$) 40 nm 处在 $x-z$ 平面上沿 x 方向的 $|E|^2$ 衰减
 ■ : 无镀膜光纤尖 ; ● : 开口直径 100 nm ; ▲ : 开口直径 50 nm
 Fig.3 Decay of $|E|^2$ along x direction 40 nm away from the tips of the probe fibers
 ■ : bare fiber probe ; ● : diameter of aperture is 100 nm ; ▲ : diameter of aperture is 50 nm

膜开口 100 nm 的光纤尖以及开口 20 nm 的光纤尖近场光斑大小 (FWHM) 分别为 400 nm, 200 nm, 100 nm。其近场光斑形状见图 2(b)(c)。可见镀膜开口光纤尖可以获得比无镀膜光纤尖更高的近场光存储密度, 开口越小, 光斑越小, 则可能实现的存储密度越大。从无镀膜光纤尖旁侧传播到真空中的电磁波在近场附近是入射电场 $|E|^2$ 的 10^{-3} , 但是在金属镀膜开口光纤尖中由于被金属膜反射而使“噪声”场大大降低。因此开口镀膜光纤尖的输出光场质量有很大提高。尖端开口极小的直径截止了大量模式的传播, 使大量的能量不能传输出去。镀膜的开口越小, 截止模式越多, 传输的能量越小; 同时电磁波在针尖中被金属膜反射以及部分在金属膜中消逝, 因此镀膜开口光纤尖的电磁波输出效率远小于无镀膜光纤尖。这就成了限制其应用于近场光存储技术中的一个主要因素。

图 4 为完全镀膜光纤尖尖端膜厚 $D = 1$ nm 时沿针尖中心对称轴的近场电场值衰减。 z 轴为距离针尖的距离。出射电磁波为消逝波, 电场值 $|E|^2$ 约为入射电场值的 10^{-9} , 其透光率为无镀膜光纤尖的 10^{-7} 以及开口镀膜光纤尖的 10^{-3} , 可见其透光率远小于上述两类光纤尖。由于其电场值随距离增大而迅速衰减, 在离开针尖几十纳米距离处光强衰变至极小, 当用于近场光存储中时, 在技术上将遇到困难。

图 5 为完全镀膜光纤尖尖端镀膜 $D = 1$ nm, 2 nm, 3 nm, 5 nm 时沿光纤尖对称轴上的瞬态电场值

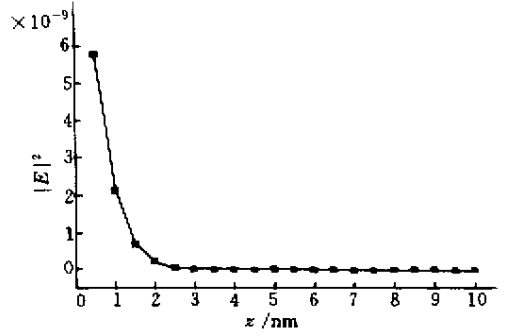


图 4 完全镀膜光纤尖尖端膜厚 $D = 1$ nm 时, 沿针尖对称轴 z 的瞬态电场分布
 Fig.4 Instant distribution of the electric field along the z -axis of the entirely coat fiber probe when residual width $D = 1$ nm

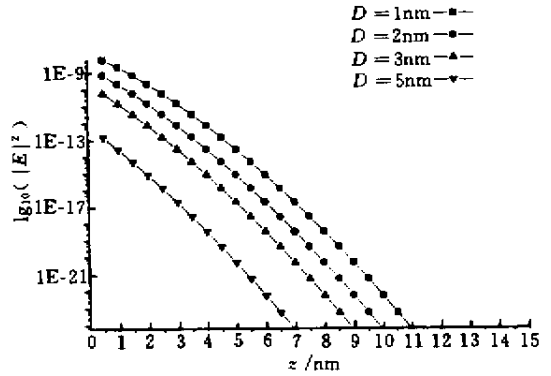


图 5 完全镀膜光纤尖尖端膜厚 $D = 1, 2, 3, 5$ nm 时, 输出电场 $|E|^2$ 沿针尖中心对称轴的衰减
 Fig.5 Decay of output $|E|^2$ along z -axis of entirely coat fiber probe when the residual width $D = 1, 2, 3, 5$ nm

衰减。当 $D = 1, 2, 3, 5$ nm 时距离针尖 1 nm 处的电场值 $|E|^2$ 分别是入射电场值的 $10^{-9}, 10^{-10}, 10^{-11}, 10^{-14}$ 。可见随着尖端镀膜的增厚, 针尖的透光率迅速下降。尖端膜厚最大不能超过镀膜金属的穿透深度。这就要求在近场光存储的应用中, 应该尽可能地减小尖端镀膜厚度, 以提高透光率, 增加出射光强。

图 6 为随完全镀膜光纤尖尖端距离增加时平行于偏振方向的 $x-z$ 平面上 $|E|^2$ 沿 x 方向分布。光纤尖尖端膜厚 $D = 1$ nm。可见这种光纤探针在极近场处有一个单峰的极小光斑, 光斑形状见图 2(d)。光斑直径在距离针尖前端 1~5 nm 处小于 10 nm, 远小于传统的金属镀膜开口光纤尖或无镀膜光纤尖的几百纳米光斑尺寸。此类型光纤比无镀膜光纤尖和开口光纤尖能提供更高的信息存储密度。但是由于其透光率相对另两类光纤尖更小, 而且光强在距离

针尖几十纳米处的迅速衰减也为其实现更高密度的近场光存储带来了技术上的诸多困难。在现有技术基础上,镀膜开口光纤探针更适用于近场光存储。

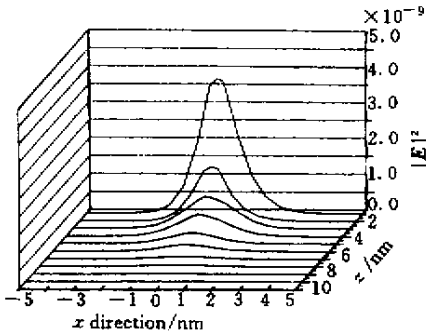


图 6 距离完全镀膜光纤尖端距离 z 增加时,平行于偏振方向的 x - z 平面上 $|E|^2$ 沿 x 方向分布。光纤尖端膜厚 $D = 1 \text{ nm}$

Fig.6 Distribution of $|E|^2$ along x -axis at different z of the entirely coat probe as the residual with $D = 1 \text{ nm}$

4 结 论

三维时域有限差分法可用于分析近场光存储技术中不同类型光纤针尖的传光特性,并可用于设计近场光存储的新型光纤探针。本文采用这一方法,对无镀膜光纤尖、镀膜开口针尖、完全镀膜光纤尖的

电磁波传输进行了数值计算,给出并讨论了电场分量 $|E|^2$ 的近场分布。对其在近场光存储中的应用进行了讨论。计算表明,无镀膜光纤尖具有较大的透光率,但光斑尺寸较大,不利于近场光信息的存储。镀膜开口光纤尖光斑尺寸减小,但是透光率也更小,而且开口越小,透光率也越小,比无镀膜光纤尖有较高的光存储密度。而完全镀膜光纤尖具有最小的光斑尺寸,在距离针尖镀膜层几纳米处光斑尺寸小于 20 nm ,具有更高的光存储记录密度。但是由于其透光率也更小,而且光强在距离针尖几十纳米处的迅速衰减也为其实现光学高密度存储带来困难。在现有技术基础上,镀膜开口光纤探针更适合应用于近场光存储。

参 考 文 献

- 1 K. S. Yee. Numerical solution of initial value problem involving Maxwell's equation in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1966, **14**(5) 302 ~ 307
- 2 J. P. Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Computational Physics*, 1994, **114**(1):185 ~ 200
- 3 Hai Ming, G. P. Zhang, Ming Bai *et al.*. Optimization of passive and active fiber probe of scanning near-field optical microscopy. *SPIE*, 1998, **3467**:115125
- 4 Xiaogang Chen, Hai Ming, Guoping Zhang *et al.*. Reflection properties of guided wave in fiber taper used for scanning near-field optical microscopy. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(6) 826 ~ 829 (in Chinese)