

固体浸没透镜出射光场偏振特性研究*

贺锋涛^{1,2} 张东玲³ 白永林¹ 冯晓强¹ 侯 洵¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,瞬态光学技术国家重点实验室,西安 710068)

(2 西安邮电学院电子与信息工程系,西安 710061)

(3 河南大学物理与信息光电子学院,开封 475001)

摘要 在固体浸没透镜近场光存储中,光的偏振对近场光场分布具有很大的影响.采用三维时域有限差分法,对聚焦线偏振高斯光束通过固体浸没透镜后焦平面上各分量场分布及距离焦平面不同位置光斑图样进行了模拟.结果表明在焦平面上及距离焦平面较近的近场区域,出射光场在与入射光偏振垂直方向出现显著的场增强现象,从而使光斑图样呈近似椭圆分布;而在距焦平面较远的远场区域光斑图样趋向圆形对称分布.

关键词 时域有限差分法;固体浸没透镜;近场;高斯光束;偏振

中图分类号 O438 **文献标识码** A

0 引言

进入二十一世纪后,随着科学研究和信息产业的迅猛发展,对计算机设备的存储容量和存取速度提出了更高要求,光存储技术自70年代开始研究和开发,已经过了近30年的发展.其中,近场光存储已经成为超高密度光存储的重要方向之一,它利用光的隐失场与存储介质相互作用实现数据记录.由于不受远场光学衍射极限的限制,可大大减小记录点,提高光存储密度.

在近场光存储中,固体浸没透镜(SIL)近场存储^[1]是近场超高密度光数据存储方案之一.它由于具有存取速度快,光传输效率高等优点引起了众多研究人员的兴趣.从SIL底面出射的光场分布对光存储性能具有较大的影响,弄清楚其光场分布对优化设计SIL光存储系统,提高光存储性能有一定的指导作用.由于SIL光存储系统光学头的有效数值孔径较大,标量衍射理论不再实用,需采用矢量光学理论^[2-5]或数值解法^[6,7]对其进行分析.国内谢建平^[8]用角谱方法分析SIL的近场矢量光场特性;本文采用了三维时域有限差分法(3D-FDTD Method)分析了线性偏振的高斯光束经过半球形SIL的近场光场特性.与其他计算电磁场方法相比,FDTD方法具有概念清晰、方法简单等优点,具有广泛的实用性.

1 FDTD 算法及仿真模型的建立

假定研究的空间是无源的,并且媒质参数:介电常数 ϵ 、电导率 σ 、磁导率 μ 和磁电阻率 s 不随时间变化,则可以将麦克斯韦在直角坐标系中展成六个标量场分量方程

$$(\partial H_z / \partial y) - (\partial H_y / \partial z) = [\sigma + \epsilon(\partial / \partial t)] E_x \quad (1)$$

$$(\partial H_x / \partial z) - (\partial H_z / \partial x) = [\sigma + \epsilon(\partial / \partial t)] E_y \quad (2)$$

$$(\partial H_y / \partial x) - (\partial H_x / \partial y) = [\sigma + \epsilon(\partial / \partial t)] E_z \quad (3)$$

$$(\partial E_y / \partial z) - (E_z / \partial y) = [s + \mu(\partial / \partial t)] H_x \quad (4)$$

$$(\partial E_z / \partial x) - (\partial E_x / \partial z) = [s + \mu(\partial / \partial t)] H_y \quad (5)$$

$$(\partial E_x / \partial y) - (\partial E_y / \partial x) = [s + \mu(\partial / \partial t)] H_z \quad (6)$$

式(1)~(6)中 E 为电场强度, H 为磁场强度.将式(1)~(6)中的场分量对时间和空间的偏导数用有限差分式表示.式(1)在Yee氏网格空间中的差分式可表示为

$$E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) = C_x(i+1/2, j, k) \cdot \left\{ \begin{aligned} & -D_x(i+1/2, j, k) E_x^n(i+1/2, j, k) \\ & + [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - \\ & H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k)] / \Delta y \\ & - [H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - \\ & H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2)] / \Delta z \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中

$$C_x(i+1/2, j, k) = \left[\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left(\frac{\sigma_x(i+1/2, j, k)}{2} + \frac{\epsilon_x(i+1/2, j, k)}{\Delta t} \right) \right]^{-1}$$
$$D_x(i+1/2, j, k) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left(\frac{\sigma_x(i+1/2, j, k)}{2} + \frac{\epsilon_x(i+1/2, j, k)}{\Delta t} \right)$$

$\Delta y, \Delta z$ 为Yee氏网格单元的空间步长.知道某一时间步长网格各点的电场和磁场分量,则可直接模拟出电磁波在该空间中的传播.式(2)~(6)在Yee氏网格空间中的差分式与式(7)类同.

计算模型如图1所示:设波长为650 nm的激光通过物镜后沿半球形SIL轴线方向(z 轴)入射,并聚焦到SIL底面中心位置, θ 为全反射临界角.其电场分量 $E_y = 0, E_z = 0, E_x \neq 0$,即入射光沿 x 方向偏

振. 每个Yee氏网格单元的空间步长 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$, 时间步 $\Delta t = \Delta / (2c)$, 计算空间的网格数 $N_x = N_y = N_z = 100$.

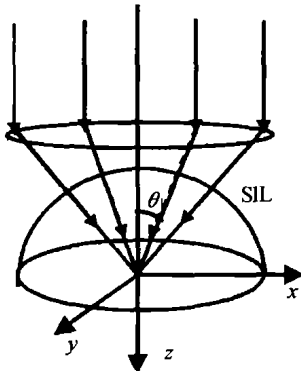


图1 光场模型
Fig.1 Model of optic field

2 高斯光源的设置

要模拟和分析这一实际过程, 照射到 SIL 上的必须是聚焦的高斯光束, 因此高斯激励源的准确设置至关重要. 本文采用等相面法, 即在模拟空间中按照会聚高斯光束的特性, 在某一等相面上按照高斯光束的振幅分布设置激励源, 则由该激励源辐射出的波束自然为高斯光束. 在各向同性的均匀介质中, 对于基模高斯光束, 只要知道束腰位置和束腰半径, 其特性就可完全确定^[9]. 同样如果知道高斯光束在某点的等相面曲率半径 $R(z)$ 和光斑半径 w_z , 就可以求出该高斯光束的腰粗 w_0 和腰的位置 z (腰离上述等相面的距离). 也可以完全确定高斯光束的特性, w_0 和 z 由下面的关系确定

$$z = R(z) \left[1 + \left(\frac{\lambda R(z)}{\pi w^2(z) n} \right)^2 \right]^{-1} \quad (8)$$

$$w_0^2 = w^2(z) \left[1 + \left(\frac{\pi w^2(z) n}{\lambda R(z)} \right)^2 \right]^{-1} \quad (9)$$

设等相面的球心在 $(0, 0, kc)$, 曲率半径为 R , 等相面球冠与光轴相交的顶点位置在 $(0, 0, 5)$, 知道了束腰和光束半径可对等相面球冠上的每一点进行赋值.

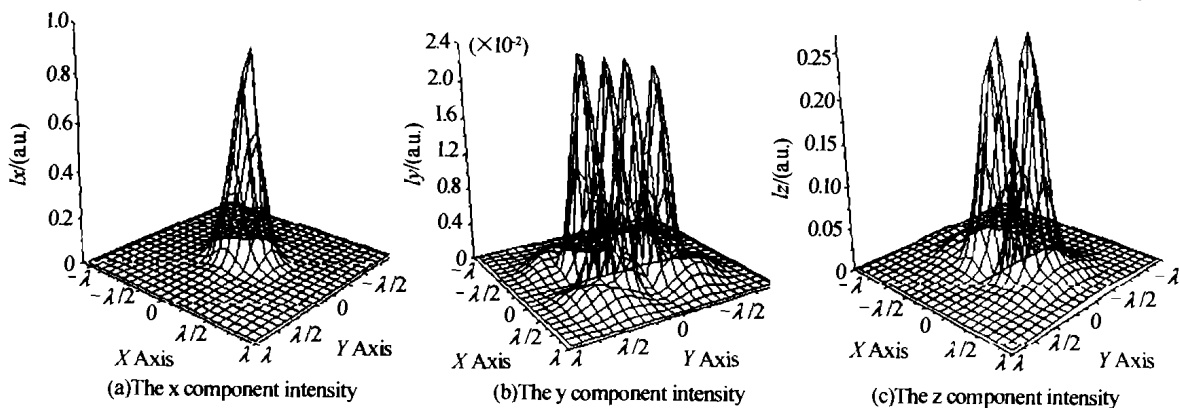


图3 x 方向偏振的入射光在焦平面上的相对强度分布

Fig.3 The relative x-polarized optical intensity of the incident light in the focal plane

则各点的振幅值为

$$E_x(i, j, k) = \frac{w(kc - R)}{w(k)} \exp \left\{ -\frac{i^2 + j^2}{w^2(k - kc)} \right\} \quad (10)$$

下表为采用等相面法运用 FDTD 程序对聚焦高斯光束激励源不同参数下的模拟结果与理论值的比较表.

表1 聚焦高斯光束激励源不同参数下的模拟结果与理论值的比较表

Δ	$w(z)$	$R(z)$	理论值		模拟结果	
			z	w_0	z	w_0
$\lambda/15$	25	45	40.2	8.13	38	10.6
$\lambda/20$	25	70	46.4	14.5	46	16.5
$\lambda/20$	30	45	45.86	9.1	45	11.2
$\lambda/20$	20	30	24.4	8.61	25	12.12

比较结果表明, 在 FDTD 程序中用等相面法设置高斯光束激励源是可行的. 图2为 $\Delta = \lambda/20$, $R(z) = 45 \times \Delta$, $w(z) = 30 \times \Delta$ 时 $y = 0$ 平面上所模拟的高斯光束在自由空间中的传播图像(电场振幅分布图).

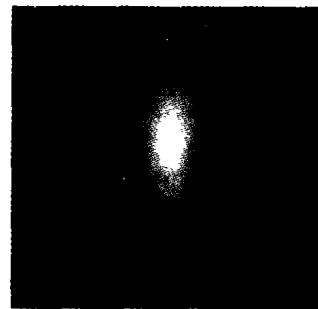


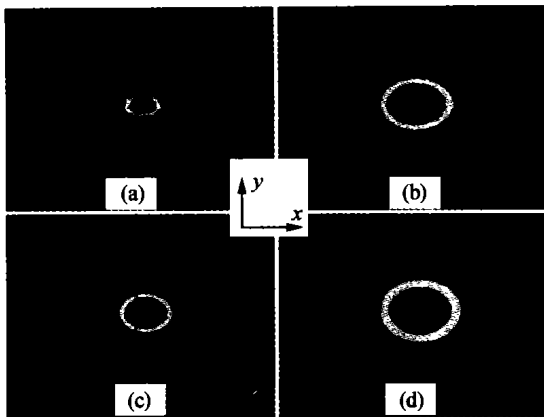
图2 真空中高斯光束的电场振幅分布图

Fig.2 The propagation of gauss beam in vacuum

3 结果与分析

图3为图2条件下采用 FDTD 方法对高斯光束聚焦在半球形 SIL 底面时焦平面上各光场分量归一化强度分布的模拟结果, 其中入射光束沿 x 方向偏振, SIL 折射率为 2. 可以看出, 焦平面上 y 、 z 分量场并不为零. 其中 y 分量最小, 分别以 x, y 为对称轴呈四个对称的峰值结构分布; z 分量次之, 在 y 轴两侧呈

对称的峰值结构. 由于 SIL 和空气两种媒质不同折射率造成的边界差异, 使得出射光场发生了退极化^[10], 产生与入射光场偏振方向垂直的两个分量场. 进一步计算结果表明: y 分量对总场的贡献很小, 可以忽略, 但纵向场 z 分量却不可忽略, 其峰值强度与总场峰值强度的比值约为 24%, 使得出射光场在入射光偏振方向上表现出显著的场增强现象. 沿偏振方向的光斑被“拉宽”从而使 SIL 焦平面上的光场强度不再呈圆形的对称分布, 而是呈现如图 4(a) 所示的近似椭圆分布.



(a)0, (b)325nm($2.5\lambda \times 2.5\lambda$), (c)650nm, (d)975nm($5\lambda \times 5\lambda$)

图4 距 SIL 底面不同距离处的光场光斑图样分布

Fig. 4 The patterns of the optical field distribution in the sections with different distance from the bottom of SIL

随着离 SIL 焦平面距离的增加, 由于 x 、 y 、 z 三分量衰减程度并不一致, 因此在与光轴垂直的不同截面上, 光斑模式并不相同, 计算结果如图 4 所示: 其中(a)、(b)、(c)、(d)分别为 SIL 焦平面及与焦平面相距半波长、一个波长和二分之三个波长处截面上的光斑分布. 可以看出, 在焦平面上及距离焦平面较近的近场区域, 光斑图样呈近似椭圆分布: 如图 4(a)、(b)所示; 在距离 SIL 底面较远的远场区域, 光斑趋于圆形: 如图 4(c)、(d)所示. 分析结果表明: 出射光斑在近场区域的非圆形分布是由入射光的偏振特性造成的; 其圆形分布的被破坏程度与 SIL 的折射率和距焦平面的距离等因素有关.

4 结论

本文通过 3D - FDTD Method 模拟了聚焦线偏振高斯光束通过固体浸没透镜后焦平面矢量光场各偏振分量的强度分布及距离焦平面不同位置的光斑

图样. 结果表明由于空气和 SIL 折射率的差异, SIL 底面出射光场发生了退极化, 表现出很强的近场局域特性: 在焦平面上及距离焦平面较近的近场区域, 光斑图样呈近似椭圆分布; 而在距焦平面较远的远场区域, 光斑图样趋向圆形对称分布.

参考文献

- 1 Terris B D, Manmin H J, Rugar D, et al. Near-field optical data storage using a solid immersion lens. *Appl Phys Lett*, 1994, **65**(4): 388 ~ 390
- 2 Ichimura T, Hayashi S, Kino G S. High-density optical recording using a solid immersion lens. *Appl Opt*, 1997, **36**(19): 4339 ~ 4348
- 3 Milster T D, Jo J S, Hirota K. Roles of propagating and evanescent waves in solid immersion lens systems. *Appl Opt*, 1999, **38**(23): 5046 ~ 5057
- 4 Guo Feng, Schlesinger T E, Stencil D D. Optical field study of near-field optical recording with solid immersion lens. *Appl Opt*, 2000, **39**(2): 324 ~ 332
- 5 Yeh W H, Mansuripur M. Evanescent coupling in magneto-optical and phase-change disk systems based on the solid immersion lens. *Appl Opt*, 2000, **39**(2): 304 ~ 315
- 6 Judkins J B, Haggans C W, Ziolkowski R W. Two-dimensional finite-difference time-domain simulation for rewritable optical disk surface structure design. *Appl Opt*, 1996, **35**(14): 2477 ~ 2487
- 7 Liu W C, Kowartz M W. Vector diffraction from subwavelength optical disk structures: two-dimensional modeling of near-field profiles, far-field intensities, and detector signals from a DVD. *Appl Opt*, 1999, **38**(17): 3787 ~ 3797
- 8 谢建平, 鲁拥华, 王沛, 等. 用角谱法分析固体浸没透镜的近场光场. *光学学报*, 2002, **22**(4): 413 ~ 416
Xie J P, Lu Y H, Wang P, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 413 ~ 416
- 9 邹英华, 孙驹亨. *激光物理学*, 北京: 北京大学出版社, 1991
Zou Y H, Sun T H. *Laser Phys*, Beijing: Beijing University industry press, 1991
- 10 刘秀梅, 王佳. 用时域有限差分法研究光纤微探针进场分布特性. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1234 ~ 1238
Liu X M, Wang J. *Acta Optics Sinica*, 2001, **21**(10): 1234 ~ 1238

Investigation on the Characteristics of Polarized Optical Field of Solid Immersion Lens

He Fengtao^{1,2}, Zhang Dongling³, Bai Yonglin¹, Feng Xiaoqiang¹, Hou Xun¹

1 *State Key Lab of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Academic Sinica, Xi'an 710068*

2 *Xi'an Institute of Post and Telecommunications Department of Telecommunications, Xi'an 710061*

3 *Institute of Physics & Information Photoelectronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475001*

Received date: 2003-12-18

Abstract In near-field optical storage system of solid immersion lens, the polarization of the incident light affects the near-field optical image greatly. In this paper 3 component optical fields intensity of focused linear polarized Gauss beam in the focal plane and the intensity patterns in the sections of various distance from the focal plane are simulated using 3-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) method. The results show that the image pattern in the focal plane or the sections near the focal takes on approximate ellipse, while the patterns in the planes of far region displays asymmetrical round.

Keywords Finite-difference time-domain method; Solid immersion lens; Near field; Gauss beam; Polarization



He Fengtao was born in 1974. He received his master degree in 2000 in the department of Physics, Northwest University and received Doctor degree in 2004 in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. Now he is working on optical information processing in Xi'an Institute of Post and Telecommunications.