

文章编号 1004-924X(2006)03-0356-04

固体浸没透镜高密度光存储系统的焦深

张耀举, 陈俊峰

(温州大学 物理与电子信息学院, 浙江 温州 325027)

摘要: 基于矢量衍射理论, 分析和比较了两种等光程的半球形(h-SIL)和超半球形(s-SIL)固体浸没透镜的光场分布, 计算了4种材料(玻璃, Si, GaP, 金刚石) SIL的焦深和光斑大小。结果表明: 当数值孔径相同时, h-SIL的焦深较s-SIL的焦深大, 焦深对SIL的折射率比较敏感, 而光斑大小对波长照明比较敏感。h-SIL的焦深随透镜数值孔径的增加迅速单调减小, 而s-SIL的焦深随透镜数值孔径的增加呈现出只有一个周期的振荡行为。s-SIL对透镜的数值孔径要求较低, 它更适合应用于高密度光存储和精密光刻。

关键词: 固体浸没透镜; 高密度光存储; 焦深

中图分类号: TH703; TP333.4 文献标识码: A

Focal depth in high-density optical storage system with a solid immersion lens

ZHANG Yao-ju CHEN Jun-feng

(College of Physics and Electronic Information, Wenzhou University, Wenzhou 325027, China)

Abstract: The optical field distributions for two types of aplanatic Solid Immersion Lenses (SILs) of hemisphere (h-SIL) and supersphere (s-SIL) were analyzed by using the vector diffraction theory. The focal depths and spot sizes of the SILs for four materials (glass, silicon, gallium-phosphide, and diamond) were simulated. The results show that the focal depth of the h-SIL is greater than that of the s-SIL. The focal depth of the system is sensitive to the refractive index of the SIL and the spot size is sensitive to the illuminating wavelength. As NA (numerical aperture of lens) increases, the focal depth of the h-SIL decreases rapidly and monotonously, whereas the focal depth of the s-SIL has a one-period-only oscillatory behavior. Compared with the h-SIL, the s-SIL has an advantage that it lowers the demands for large-NA lenses in some applications, so that it is preferable to the applications in high-density optical storage and subtle photolithography.

Key words: solid immersion lens; high-density optical storage; focal depth

1 引言

传统的光学显微镜的光斑大小和焦深分别近

似为 $\lambda/2n\sin\alpha$ 和 $\lambda/2n\sin 2\alpha$, 其中 λ 是激光波长, n 是物空间的折射率, α 是聚焦透镜的会聚角。由此可见, 提高显微系统分辨率(减小光斑大小)有三种途径: 一是减小照明波长 λ , 如采用蓝

光照明;二是采用高会聚角透镜或双胶合透镜^[1],即增加 α ;三是采用液体或固体浸没介质,即增加物空间的折射率 n 。自 1990 年 Mansfield 和 Kino 首次将固体浸没透镜(SIL)技术引入到显微镜中以来^[2],SIL 技术得到了巨大的发展并获得了十分广泛的应用^[2-17]。SIL 技术之所以受到人们的重视,是因为这种技术与前两种提高系统分辨率的技术不同。前两种技术仍然突破不了衍射极限的限制,对系统分辨率的提高总是有限的;而 SIL 技术是工作在近场,即,速逝场区域,系统的分辨率不受衍射极限的限制可任意提高。在光存储中,SIL 技术可以将记录密度提高 4 倍以上^[3-4]。到目前, Si, GaP, GaAs, sapphire 和 glass 等许多材料的 SIL 已经被成功制造和实验。然而,需要注意的是,在追求高折射率固体浸没材料来提高光存储记录密度的同时,有效焦深将大大减小。Baba 等人对 Si SIL 从理论上分析^[6],Wu 等人从实验上证实^[7],为了取得大于 2.0 的等效 NA,样品与半球形 SIL 的底面之间的距离必须在 $\lambda/10$ 以内(一般是几十个纳米)。对于表面显微来说,小的焦深是允许的,但对于光存储^[3-4]和细微光刻^[5]等应用来说,焦深过小意味着光学头的飞行高度必须很低,这不利于光学头的设计,也容易损坏记录材料和光学头。本文用矢量衍射理论详细地分析了焦深与 SIL 的材料、形状以及聚焦透镜数值孔径的关系。

2 基本公式

SIL 分为半球形(h-SIL)^[1]和超半球形(s-SIL)^[2]两种。这两种 SIL 都是等光程的,在系统的焦点不产生几何像差^[14]。图 1 是一个 s-SIL 系统示意图。s-SIL 放在会聚透镜的右边,其中 SIL 的平面表面位于焦平面上,SIL 的厚度为 $R(1+1/n)$ 。假设照明光为常用的 x -偏振平面波,坐标系的原点位于焦点。应用 Török 等人^[15]和 Helsen^[16]对平行平面浸没介质时所发展的矢量衍射理论,求出了在球形 SIL 焦点附近的透射场分布:

$$\begin{aligned} E_x &= -i(I_0 + I_2 \cos 2\phi) \\ E_y &= -iI_2 \sin 2\phi \\ E_z &= -2I_1 \cos \phi, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_0 &= \int_0^\alpha A_{0,x} J_0(kr \sin \theta_2) \exp[ikz \cos \theta_3] d\theta_1 \\ I_1 &= \int_0^\alpha A_{1,x} J_1(kr \sin \theta_2) \exp[ikz \cos \theta_3] d\theta_1 \\ I_2 &= \int_0^\alpha A_{2,x} J_2(kr \sin \theta_2) \exp[ikz \cos \theta_3] d\theta_1, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_{0,x} &= \sqrt{\cos \theta_1} \sin \theta_1 (t_{1s} t_{2s} + t_{1p} t_{2p} \cos \theta_3) \\ A_{1,x} &= \sqrt{\cos \theta_1} t_{1p} t_{2p} \sin \theta_1 \sin \theta_3 \\ A_{2,x} &= \sqrt{\cos \theta_1} \sin \theta_1 (t_{1s} t_{2s} - t_{1p} t_{2p} \cos \theta_3), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\theta_3 = \begin{cases} \arcsin(n \sin \theta_1) & (\text{h-SIL}) \\ \arcsin(n^2 \sin \theta_1) & (\text{s-SIL}), \end{cases} \quad (4)$$

其中, J_n 为第一类第 n 级贝塞尔函数, k 为空气中的波数, t_{1p} 和 t_{1s} , t_{2p} 和 t_{2s} 分别为在 SIL 的球面界面和平面界面的菲涅尔透射系数。

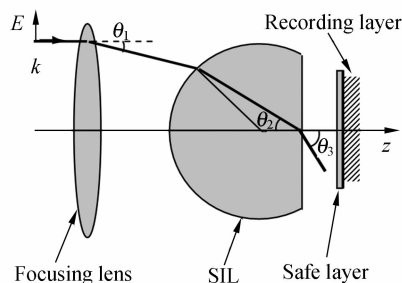


图 1 SIL 光存储系统示意图

Fig. 1 Scheme of an optical storage system with a SIL

3 焦点附近光强分布和焦深

表 1 中计算出了两种类型、4 种材料(玻璃, Si, GaP, 金刚石)SIL 的焦深。计算时,聚焦透镜的数值孔径 $NA = \sin(60^\circ) = 0.866$,材料的折射率和对应的照明波长在表 1 中给出。焦深 D 定义为:在光轴上,SIL 的底面与光强 $(|E|^2)$ 衰减 $1/e$ 时的位置之间的距离。从表 1 可以看出,s-SIL 的焦深比 h-SIL 的焦深短;SIL 的折射率越小,焦深越长。这些结果是不难理解的:s-SIL 的等效会聚角比 h-SIL 的要大,这样,它的等效数值孔径比 h-SIL 的等效数值孔径大,透过 s-SIL 的场的局域性更强,所以它的焦深短。折射率越小,在 SIL 平面界面的临界角就越大,因而透射场中传播场的成分增加。传播场具有辐射传播的特性,因而焦深随 SIL 折射率的减小而增加。相反,折射率越大,临界角变小,透射场中速逝场的成分增加。速逝场具有非辐射、局域的特性。所

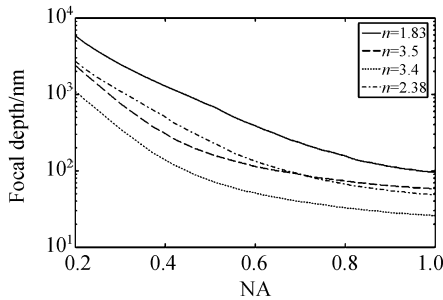
以,焦深随 SIL 折射率的增加而减小。计算还发现,焦深对折射率比较敏感,照明波长对它影响不大。

表 1 折射率和焦深

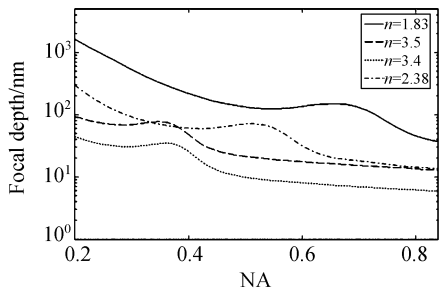
Tab. 1 Refractive index n and focal depth D

Materials	n	λ (nm)	D (nm)	
			for h-SIL	for s-SIL
Glass	1.83	780	123	32.4
Silicon	3.5	1300	66	12.4
GaP	3.4	560	30	13
Diamond	2.38	632.8	58	5.6

图 2 给出了焦深随聚焦透镜数值孔径 NA 的变化情况。从图 2(a)中可以看出,h-SIL 的焦深



(a) — h-SIL



(b) — s-SIL

图 2 两类、4 种不同材料 SIL 的焦深随会聚透镜数值孔径 NA 的变化。实线— $n=1.83, \lambda=780$ nm 的玻璃材料;虚线— $n=3.5, \lambda=1300$ nm 的 Si 材料;点线— $n=3.4, \lambda=560$ nm 的 GaP 材料;虚点线— $n=2.38, \lambda=632.8$ nm 的金刚石材料。

Fig. 2 Focal depths as a function of NA for four SIL materials, where (a) and (b) are the cases for h-SIL and s-SIL, respectively. The solid line represents the glass material of $n=1.83$ at $\lambda=780$ nm, dashed line is the silicon material of $n=3.5$ at $\lambda=1300$ nm, dotted line is the GaP material of $n=3.4$ at $\lambda=560$ nm, and dash-dot line represents the diamond material of $n=2.38$ at $\lambda=632.8$ nm.

随 NA 单调变化(NA 增加,焦深减小)。但是,s-SIL 的焦深随 NA 的变化比较复杂,呈现出只一个周期的振荡行为。比较图 2(a)和(b),可以发现,s-SIL 的焦深随 NA 的变化较为缓慢。也就是说,s-SIL 比 h-SIL 对数值孔径的容限大一些。

在 SIL 光存储系统中,由于空气禁带和记录材料保护层的存在(见图 1),记录层和 SIL 之间的距离通常在几十纳米左右。如假设这个距离至少为 60 nm,则意味着系统的焦深至少为 60 nm。表 2 中给出了当 $D=60$ nm 时,聚焦透镜的数值孔径的最大值 NA_{\max} 。此时,最小的光斑大小 G_{\min} 也在表 2 中给出。从表 2 中可以看出,除了玻璃材料 s-SIL 之外,其它三种材料 s-SIL 的光斑都比 h-SIL 的光斑大。也就是说,在这个位置($D=60$ nm),SIL 光存储系统与表面 SIL 显微镜是不同的。在表面 SIL 显微镜中,s-SIL 的光斑大大小于 h-SIL 的光斑。但是,这并不是说 h-SIL 更适合于光存储。s-SIL 降低了对聚焦透镜的要求,透镜的数值孔径越大,像差越大,制造越困难。从表 2 中可以看出,为了获得相同的光斑大小,玻璃材料 h-SIL 要求 $NA_{\max}=1$,这在实际中几乎是不可能实现的。然而,相应的 s-SIL 只要求 $NA_{\max}=0.771$,这是很容易实现的。事实上,目前的光存储系统几乎都采用了折射率接近于 2 的玻璃材料 s-SIL^[2-4]。其可能原因主要有两个:一是这里所阐述的 s-SIL 对透镜的数值孔径要求较低(与 h-SIL 相比较);二是照明波长为 780 nm,这个波长在光纤的通讯波长范围内。此外,比较 Si 和 GaP 材料的结果可以看出,光斑大小对波长比较敏感。

表 2 当 $D=60$ nm 时,几种 SIL 系统中的最小光斑和聚焦透镜数值孔径的最大值

Tab. 2 Maximum NAs and minimum spot sizes for several SIL systems

n	NA_{\max}		G_{\min} (nm)	
	(D=60 nm)		(D=60 nm, NA_{\max})	
	h-SIL	s-SIL	h-SIL	s-SIL
1.83	1	0.771	206.7	206.6
3.5	0.956	0.385	181.2	223.9
3.4	0.551	0.151	138.6	150.9
2.38	0.852	0.551	147.2	151.2

4 结 论

应用矢量衍射理论研究了固体浸没透镜近场光存储系统的光强分布。比较分析了等光程的超半球形和半球形固体浸没透镜的焦深。具体计算给出了玻璃, Si, GaP 和金刚石四种材料的焦深与 SIL 的结构和聚焦透镜数值孔径的关系。实验发现, 当数值孔径相同时, h-SIL 的焦深较 s-

SIL 的焦深大, 焦深对 SIL 的折射率比较敏感, 而光斑大小对波长比较敏感。h-SIL 的焦深随透镜数值孔径的增加单调减小, 而 s-SIL 的焦深随透镜数值孔径的增加呈现出只一个周期的振荡行为。从焦深的角度来看, s-SIL 比 h-SIL 对数值孔径的要求较低, 且允许的数值孔径容限也较大, 这方便了 s-SIL 的实际应用。当焦深一定时, s-SIL 更适合应用于高密度光存储和精密光刻。

参考文献:

- [1] 张耀举, 肖化层. 双胶合透镜的三维成像研究[J]. 光学精密工程, 2003, 11(4): 416-420.
ZHANG Y J, XIAO H C. Study of 3-D image with a doublet [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4): 416-420. (in Chinese)
- [2] MANSFIELD S M, KINO G S. Solid immersion microscope [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57(24): 2615-2616.
- [3] TERRIS B D, MAMIN H J, RUGER D. Near-field optical data storage using a solid immersion lens [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 65(4): 388-390.
- [4] TERRIS B D, MAMIN H J, RUGER D. Near-field optical data storage [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(2): 141-143.
- [5] GHISLAIN L P, ELINGS V B, CROZIER K B, et al. Near-field photolithography with a solid immersion lens [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(4): 501-503.
- [6] BABA M, SASAKI T, YOSHITA M, et al. Aberrations and allowances for errors in a hemisphere solid immersion lens for submicron-resolution photoluminescence microscopy [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, 85(9): 6923-6925.
- [7] WU Q, GFEKE G D, GRONER R D. Realization of numerical aperture 2.0 using a gallium phosphide solid immersion lens [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(26): 4064-4066.
- [8] ZHAO H, MOEHL S, WACHTER S, et al. Hot exciton transport in ZnSe quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(8): 1391-1393.
- [9] YOSHITA M, KOYAMA K, BABA M, et al. Fourier imaging study of efficient near-field optical coupling in solid immersion fluorescence microscopy [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, 92(2): 862-865.
- [10] MOEHL S, ZHAO H, DON B D, et al. Solid immersion lens-enhanced nano-photoluminescence: Principle and applications [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(10): 6265-6272.
- [11] ZHANG J C, SEE C W, SOMEKH M G, et al. Wide-field surface plasmon microscopy with solid immersion excitation [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 85(22): 5451-5453.
- [12] ZHANG Y, XIAO H, ZHENG C. Diffractive super-resolution elements applied to near-field optical data storage with solid immersion lens [J]. *New J. Phys.*, 2004, 6(75): 1-14.
- [13] ZHANG Y, ZHENG C, XIAO H. Improving the resolution of a solid immersion lens optical system using a multi-phase Fresnel zone plate [J]. *Opt. and Laser Technology*, 2005, 37(6): 444-448.
- [14] IPPOLITO S B, GOLDBERG B B. Theoretical analysis of numerical aperture increasing lens microscopy [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 97(5): 053105-12.
- [15] TÖRÖK P, VARGA P, BOOKER G R. Electromagnetic diffraction of light focused through a planar interface between materials of mismatched refractive indices: structure of the electromagnetic field [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, 12: 325-332.
- [16] HELSETH L E. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens systems [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 191: 161-172.
- [17] 周拥军, 唐火红, 黄文浩, 等. 折射率失配对双光子三维信息存储中信息点的影响 [J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 432-437.
ZHOU Y J, TANG H H, HUANG W H, et al. Influence of refractive index mismatch on data bit in two-photon three-dimensional data storage [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4): 416-420. (in Chinese)

作者简介:张耀举(1960—),男,河南南阳人,河南师范大学研究生毕业,温州大学教授,硕士研究生导师,主要从事衍射光学、光学显微和光存储等方面的研究工作。