

# 用振幅-相位杂化滤波器提高近场光存储系统的焦深

方朝龙 张耀举

(温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325035)

**摘要** 为了提高近场固体浸没透镜(SIL)光存储系统的焦深,设计了五区振幅-相位杂化的滤波器。设计建立在矢量衍射理论基础上,应用 MATLAB 优化工具箱优化设计出可以获得最大焦深的滤波器结构参数。设计过程中,限定记录光斑的大小与没有滤波器时的光斑大小相等,而光斑的强度减小一半。所设计的滤波器可以使近场固体浸没透镜光存储系统的焦深提高 1.6 倍,同时记录光斑的大小随着轴向距离扩展的速度变缓。

**关键词** 矢量衍射;近场光存储;滤波器;焦深

**中图分类号** O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.032101

## Increasing Focal Depth of Near-Field Optical Storage Systems by Five-Zone Amplitude-Phase Hybrid Filter

Fang Chaolong Zhang Yaoju

(College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

**Abstract** Based on the vector diffraction theory and by using the optimizing toolbox in MATLAB, a five-zone amplitude and phase hybrid filter is designed to increase the focal depth of a near-field solid immersion lens (SIL) optical storage system. In the process of design, the spot intensity is constrained to half of the spot intensity without a filter and the spot size is constrained to equal to the spot size without a filter. When the designed filter is applied in a SIL near-field optical storage system it improves the focal depth by 1.6 times. At the same times, it effectively restrains the expansion of recorded spot size with the increase from the SIL-air interface.

**Key words** vector diffraction; near-field optical storage; filter; focal depth

**OCIS codes** 210.1960; 210.4245; 210.4770; 210.4590

## 1 引言

传统的光学显微镜的分辨率近似为  $\lambda/(2NA)$  (衍射极限),  $NA$  为聚焦系统的数值孔径,  $NA = n \sin \alpha$ ,  $n$  为物空间的折射率,  $\alpha$  为物镜的会聚角。由此可见,要使光斑减小,提高系统的分辨率有 3 种方法:1)减小光的波长,如由红光改为蓝光成像;2)增大物空间的折射率  $n$ ,如采用液体或者固体浸没介质;3)增大会聚角  $\alpha$ ,如采用高会聚角透镜。此外,也可以应用光学滤波器来提高分辨率。1990 年, S. M. Mansfield 等<sup>[1]</sup>第一次将固体浸没透镜(SIL)引入到光学显微镜提高了显微分辨率,之后 SIL 技术受到人们广泛的关注<sup>[2~9]</sup>。SIL 技术克服了衍射极限,显微镜的分辨率获得了很大的提高。但是, SIL 显微的工作区域是近场,即倏逝场区域,导致了它的焦深很短。在光学显微上,焦深短在一些情况下是允许的,如表面显微。但是,在光刻蚀和光存储应用中,如果焦深太短,光学头与记录材料之间容易发生碰撞,使光学头和记录材料容易损坏。其次,焦深太短,伺服控制不容易。这个缺点是导致尽管在 1994 年就已在实验室中展示了近场固体浸没透镜光存储<sup>[2]</sup>,但是到目前仍没有商业化产品的主要原因。

**收稿日期**: 2010-07-01; **收到修改稿日期**: 2010-11-30

**基金项目**: 国家自然科学基金(60777005)资助课题。

**作者简介**: 方朝龙(1984—),男,硕士研究生,主要从事光存储以及光学显微等方面的研究。E-mail: Fansy21@163.com

**导师简介**: 张耀举(1960—),男,博士,教授,主要从事光学显微、光存储和光学俘获等方面的研究。

E-mail: zhangyaoju@sohu.com(通信联系人)

为了增加 SIL 近场光存储或 SIL 近场显微系统的焦深,人们通常在固体浸没透镜前加一滤波器。Liu 和 Park<sup>[6]</sup>在 2004 年用时域有限差分(FDTD)计算了一个五区二元振幅滤波器对 SIL 记录场的优化作用,发现所构造的滤波器可以增加焦深。对于高数值孔径的固体浸没透镜系统,Y. Zhang 等<sup>[10]</sup>分析得出二区振幅滤波器是不能提高焦深的。后来,他们又提出用三区二元振幅滤波器<sup>[11]</sup>和三区二元相位滤波器<sup>[12]</sup>,以及连续相位滤波器<sup>[13]</sup>来增加系统的焦深。用纯振幅滤波器可以增加近场 SIL 光存储系统的焦深,但是光斑的强度减小太多;用纯相位滤波器可以增加近场 SIL 光存储系统的焦深,光斑的强度也比用振幅滤波器时光斑的强度大,但是边瓣强度较大,甚至影响成像的清晰度。连续相位滤波器在实际当中很难制作。为了克服上述两类滤波器的不足,本文基于二元光学方法,设计了一个五区振幅-相位杂化的滤波器(简称 CF)。该滤波器可以大大增加固体浸没透镜近场光存储系统的焦深,同时有效抑制记录光斑随着离开 SIL-空气界面距离的扩展而增加。

## 2 矢量衍射公式

近场光存储系统的光路图如图 1 所示。L 是高数值孔径会聚透镜,F 是滤波器,无像差的半球形 SIL(半径为  $R$ ,折射率为  $n_1$ )放在会聚透镜 L 的焦点附近,它的平底面位于 L 的焦平面。坐标原点取在透镜 L 的焦点(即 SIL 的平面表面), $(r, \varphi, z)$ 是在像空间里的柱坐标系坐标。假定一束单位振幅、 $x$  方向线性偏光平行入射到该光学系统,依照矢量衍射理论,根据 P. Török<sup>[5]</sup>同样的方法可以得到会聚光束进入另一种介质时在焦点附近的光场分布为

$$E_x = I_0(u, v) + I_2(u, v)\cos 2\varphi, \quad E_y = I_2(u, v)\sin 2\varphi, \quad E_z = -2iI_1(u, v)\cos \varphi, \quad (1)$$

式中 $(u, v)$ 分别为轴向和横向的光学坐标:

$$u = n_2 k_0 z \sin^2 \theta_{1m}, \quad v = n_1 k_0 r \sin \theta_{1m}, \quad (2)$$

$I_j(u, v)$ 是一个积分,表达为

$$\begin{aligned} I_0(u, v) &= \int_0^{\theta_{1m}} A_{0x} J_0 \left( \frac{v \sin \theta_1}{\sin \theta_{1m}} \right) \exp \left( \frac{i u \cos \theta_2}{\sin^2 \theta_{1m}} \right) d\theta_1 \\ I_1(u, v) &= \int_0^{\theta_{1m}} A_{1x} J_1 \left( \frac{v \sin \theta_1}{\sin \theta_{1m}} \right) \exp \left( \frac{i u \cos \theta_2}{\sin^2 \theta_{1m}} \right) d\theta_1, \quad (3) \\ I_2(u, v) &= \int_0^{\theta_{1m}} A_{2x} J_2 \left( \frac{v \sin \theta_1}{\sin \theta_{1m}} \right) \exp \left( \frac{i u \cos \theta_2}{\sin^2 \theta_{1m}} \right) d\theta_1 \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} A_{0x} &= P(\theta_1) \sqrt{\cos \theta_1} \sin \theta_1 (t_s + t_p \cos \theta_2) \\ A_{1x} &= P(\theta_1) \sqrt{\cos \theta_1} \sin \theta_1 t_p \sin \theta_2 \\ A_{2x} &= P(\theta_1) \sqrt{\cos \theta_1} \sin \theta_1 (t_s - t_p \cos \theta_2) \\ \theta_2 &= \arcsin(n \sin \theta_1) \end{aligned} \quad (4)$$

$J_n$ 是第一类  $n$  阶贝塞尔函数, $t_s, t_p$ 分别为 s-偏振、p-偏振光在固体浸没透镜与空气界面的菲涅耳系数, $\theta_{1m}$ 为会聚透镜的最大会聚角, $P(\theta_1)$ 是加在透镜 L 前面的滤波器的透射率函数。

## 3 滤波器的设计

由于一个结构合理的滤波器具有优化光场分布的作用<sup>[6~13]</sup>,它之所以能使得焦深增加、分辨率提高,中心亮斑强度增大等,主要是因为它的结构参数对振幅的透射率能重新合理地分布,从而使光强分布起到优化作用。从实际制作来考虑,连续振幅或者连续相位滤波器很难制作。因此,基于二元光学的方法来设计滤波器,所设计的滤波器为一个五区振幅-相位杂化滤波器,该滤波器只起优化光场分布的作用。它的透射率函数表示为

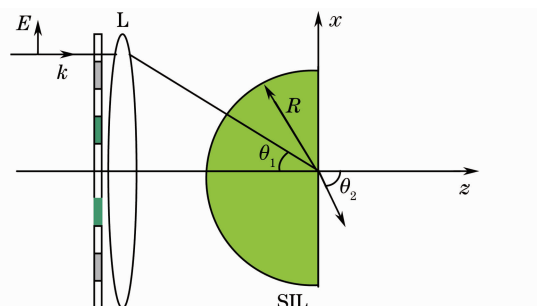


图 1 加了滤波器的半球形固体浸没透镜近场光存储系统的光路图

Fig. 1 Near-field optical storage system with a solid immersion lens and a filter

$$P(\theta_1) = \begin{cases} 1 & 0 < \theta_1 < \epsilon_1 \theta_{1m} \\ 0 & \epsilon_1 \theta_{1m} < \theta_1 < \epsilon_2 \theta_{1m} \\ 1 & \epsilon_2 \theta_{1m} < \theta_1 < \epsilon_3 \theta_{1m} \\ e^{i\delta} & \epsilon_3 \theta_{1m} < \theta_1 < \epsilon_4 \theta_{1m} \\ 1 & \epsilon_4 \theta_{1m} < \theta_1 < \theta_{1m} \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$  分别为滤波器各个区域的边界参数,  $\delta$  为相位透射率因子,  $\theta_{1m}$  为会聚透镜的最大会聚角。

一般描述滤波器对聚焦光场的优化作用需要 4 个成像参数  $D, G, M$  和  $S$ 。 $D$  表示有滤波器与没有滤波器焦深的比值, 焦深定义为光斑的最大强度减小为  $1/e$  倍时的轴向距离;  $G$  表示有滤波器与没有滤波器光斑大小的比值, 光斑大小定义为半峰全宽(FWHM);  $M$  表示最大的边瓣强度与中心亮斑最大强度的比值;  $S$  表示有滤波器与没有滤波器时光斑最大强度的比值。滤波器的 5 个区域边界参数和相位参数可以通过对成像品质参数  $D, G, M$  和  $S$  的一些限制条件而优化得到。滤波器的边界参数和相位透射率因子对成像质量品质参数起重要作用(如图 2 所示), 所以在具体优化设计过程中, 要得到最大焦深, 就必须有一套合适的结构参数。例如如图结构参数选择不合理, 就会引起边瓣强度增大或者中心亮斑强度减小, 使得最大焦深时成像质量不高, 甚至还有可能得不

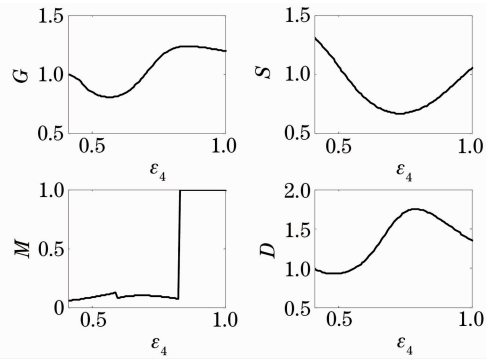


图 2 焦深  $D$ , 光斑大小  $G$ , 中心亮斑强度  $S$  和边瓣强度  $M$  在  $n_1=2, n_2=1, \theta_{1m}=65^\circ$ , 滤波器的参数为  $\epsilon_1=0.05, \epsilon_2=0.1, \epsilon_3=0.41, \delta=80^\circ$  的条件下随着滤波器的边界参数  $\epsilon_4$  的变化情况

Fig. 2 focal depth  $D$ , spot size  $G$ , Strehl ratio  $S$ , and side-lobe intensity  $M$  as a function of the filter's boundary parameter  $\epsilon_4$  when  $n_1=2, n_2=1, \theta_{1m}=65^\circ, \epsilon_1=0.05, \epsilon_2=0.1, \epsilon_3=0.41, \delta=80^\circ$

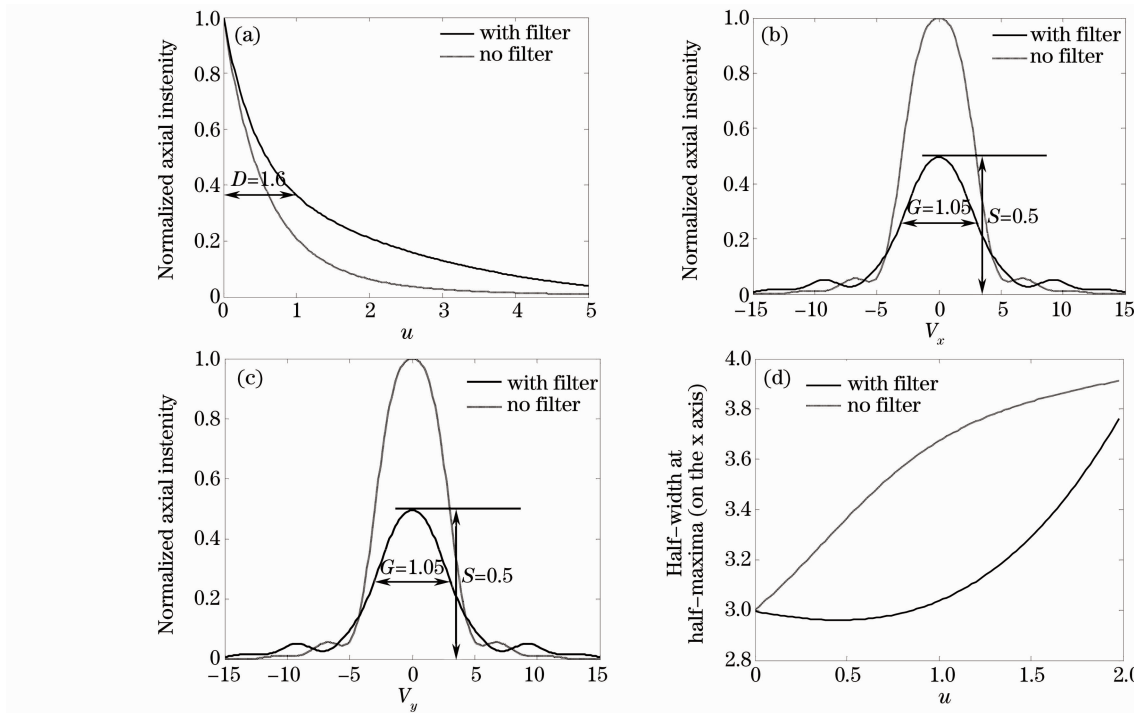


图 3 (a) 轴向强度分布, (b) 横向强度在  $x$  轴方向上的分布, (c) 横向强度在  $y$  轴方向上的分布, (d) 光斑大小随着界面距离的变化情况。虚线和实线分别表示表示没有滤波器和有滤波的情况在  $n_1=2, n_2=1, \theta_{1m}=65^\circ$  的条件下的图形, 滤波器的参数为  $\epsilon_1=0.05, \epsilon_2=0.1, \epsilon_3=0.41, \epsilon_4=0.716, \delta=80^\circ$

Fig. 3 (a) Normalized axial intensity distributions, (b) transverse intensity distributions in the  $x$  direction, (c) transverse intensity distributions in the  $y$  direction, (d) spot size in the  $x$  direction versus axial distance from the interface. Solid and dashed curves are, respectively, with and without the filter of  $\epsilon_1=0.05, \epsilon_2=0.1, \epsilon_3=0.41, \epsilon_4=0.716, \delta=80^\circ$  when  $n_1=2, n_2=1, \theta_{1m}=65^\circ$

到增大焦深的作用。为获得最大的焦深,建立数学模型

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } D(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \delta) \\ & \text{Subject to } \begin{cases} G(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \delta) \leq G_0 \\ M(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \delta) \leq M_0 \\ S(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \delta) \geq S_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $S_0, G_0, M_0$  是希望的成像参数值。

于是,在具体优化设计过程中,借助 MATLAB 优化工具箱来优化得到,假定参数  $n_1 = 2, n_2 = 1, \theta_{im} = 65^\circ, G_0 = 1.05, S_0 = 0.5, M = 0.1$ 。在这种情况下,获得焦深最大时的滤波器结构参数为: $\epsilon_1 = 0.05, \epsilon_2 = 0.1, \epsilon_3 = 0.41, \epsilon_4 = 0.716, \delta = 80^\circ$ 。把这组滤波器参数代入到(1)式中,得到光强分布( $I = |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$ )如图 3(a)~(c)所示。作为比较,图中也呈现出了没有滤波器的结果(点线)。从图 3(a)可以得到  $D = 1.6$ ,即该滤波器可以将系统的焦深延长 1.6 倍。从图 3(b)和(c)可以看出,由于滤波器的存在,光斑的强度下降了一半,而光斑的大小保持不变,光斑的边瓣强度有所增加。尽管边瓣强度有所增加,但它被限制在 11% 以内,它们比三区相位滤波器的边瓣强度小<sup>[11]</sup>,不会影响成像的清晰度。图 3(d)比较了没有滤波器时在  $x$  方向光斑大小随着离开 SIL 底面距离的变化。很显然,当滤波器不存在时,光斑的大小随着离开 SIL 的距离迅速扩展,这对高密度光存储是不利的。然而,当所设计的滤波器存在时,在  $u < 1$  内光斑几乎不扩展,这有利于保持 SIL 近场高密度存储的优点。

## 4 结 论

基于矢量衍射理论,结合二元光学方法,运用简单的 MATLAB 优化工具箱优化设计了一个五区振幅-相位杂化的滤波器。这个滤波器可以将固体浸没透镜近场光存储系统的焦深提高 1.6 倍,可以有效地抑制光斑大小随着离开 SIL 底面距离的扩展而增大。所设计的五区振幅-相位杂化的滤波器与三区纯相位滤波器相比,记录光斑的边瓣强度有所减小;与三区纯振幅滤波器相比,记录光斑的强度有所增加。需要指出的是,运用 MATLAB 优化工具箱里的 fmincon 命令优化设计时,优化的滤波器的结构参数与设定的初始值有关,给出不同的初始值,可能会出现不同的滤波器结构,本文只给出一种设计结果。

## 参 考 文 献

- 1 S. M. Mansfield, G. S. Kino. Solid immersion microscope[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(24): 2615~2616
- 2 B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar *et al.*. Near-field optical data storage using a solid immersion lens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(4): 388~390
- 3 E. Betzig, J. K. Trauman, R. Wolfe *et al.*. Near-field magneto-optics and high density data storage[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(2): 142~144
- 4 B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar. Near-field optical data storage[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **68**(2): 141~147
- 5 P. Török, P. Varga, Z. Laczik *et al.*. Electromagnetic diffraction of light focused through a planar interface between materials of mis-matched refractive indices; structure of the electromagnetic field[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(2): 325~332
- 6 Cheng Liu, Seung-han Park. Numerical analysis of an annular-aperture solid immersion lens[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(15): 1742~1744
- 7 L. P. Ghislain, V. B. Elings, K. B. Crozier *et al.*. Near-field photolithography with a solid immersion lens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(4): 501~503
- 8 S. Moehl, Hui Zhao, B. Dai Don *et al.*. Solid immersion lens-enhanced nano-photoluminescence: Principle and applications [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(10): 6265~6272
- 9 L. E. Helseth. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens systems[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **191**(3-6): 161~172
- 10 Y. Zhang, C. Zheng, Y. Zhou. Focal-field distribution of the solid immersion lens system with an annular filter[J]. *Optik*, 2004, **115**(6): 277~280
- 11 Y. Zhang. Three-zone phase-only filter increasing the focal depth of optical storage systems with a solid immersion lens[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**(1): 97~103
- 12 Y. Zhang. A new three-zone amplitude-only filter for increasing the focal depth of near-field solid immersion lens systems [J]. *J. Mod. Opt.*, 2006, **53**(13): 1919~1925
- 13 X. Ye, Y. Zhang. Optimizing the optical field distribution of solid immersion lens system by a continuous phase filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 318~321