

孔径型超分辨近场结构光盘的掩膜热效应分析^{*}

沈全洪[†] 徐端颐 齐国生 胡 恒 刘 嵘

(清华大学精密仪器与机械学系 光盘国家工程研究中心 北京 100084)

(2004 年 8 月 20 日收到,2005 年 3 月 21 日收到修改稿)

基于高斯聚焦激光束热效应的超分辨近场结构光盘存储(孔径型 Super-RENS)中,应用光学特性导纳矩阵建立的盘片光传导模型,采用有限元分析软件 FEMLAB 对不同激光功率和脉宽下的 Sb 掩膜层的孔径形成情况进行数值仿真.结果表明,当一定脉宽的激光功率超过介质的阈值时,掩膜层将有超分辨孔径形成,且孔径大小随功率的增大而增大.理论分析与孔径型 Super-RENS 光盘样片在不同激光功率下进行写入的实验结果相符,说明光热效应可以较好地描述孔径型 Super-RENS 光盘掩膜层孔径形成的过程.

关键词:光存储,孔径型,超分辨近场结构,光热效应

PACC:4230N,4240H

1. 引 言

在传统的光学系统下,光存储的密度已经接近了由物镜的数值孔径(N_A)和激光波长(λ)所确定的衍射极限($r = 0.61\lambda/N_A$),存储密度的提高受到了很大的制约.为了突破这一极限并进一步提高存储密度,引入了多维存储技术^[1-4]和超分辨率存储技术^[5].超分辨技术无需用减少波长或者增大数值孔径的方法提高存储密度,一般可以分为光学超分辨和介质超分辨两类^[6,7].

最近,Tominaga 等提出了一种新的用于记录和读取超衍射尺度记录符的超分辨近场结构技术——Super-RENS(super resolution near-field structure)^[8,9]. Super-RENS 技术是一种基于存储介质结构的超分辨技术,它吸收了近场光存储与介质超分辨两种技术的优点,是光存储领域中的一项突破,它能够在不改变读出系统光路的情况下实现超衍射极限的读写效果,具有较好的兼容性.早先提出的 Super-RENS 光盘中,在传统记录薄膜结构中加入由铈(Sb)组成的掩膜夹层结构,称为孔径型 Super-RENS 光盘.此后又以氧化银替代铈作为主要作用层,构成散射型 Super-RENS 光盘^[10,11].关于 Super-RENS 光盘掩膜层

透光孔径形成的物理机制,理论解释较多,目前尚无统一结论,其中比较有代表性的两种理论解释为 Tominaga 等提出的光热效应^[8,12]和 Tsai 等提出的表面等离子效应^[13].

清华大学光盘国家工程研究中心对孔径型 Super-RENS 光存储进行了理论和实验研究,取得了一定的成果^[14].所采用的 Super-RENS 的盘片结构如图 1 所示,其中 Sb 膜为掩膜孔径层,SiN 为介电层,Ge₂Sb₂Te₅ 为相变记录层,Al 为反射层.本文将基于激光聚焦光束的高斯分布模型,用有限元的方法对该孔径型 Super-RENS 光盘掩膜层的热效应进行数值仿真,并与实验结果相比较,对孔径型 Super-RENS 掩膜层超分辨孔径形成的过程进行研究.

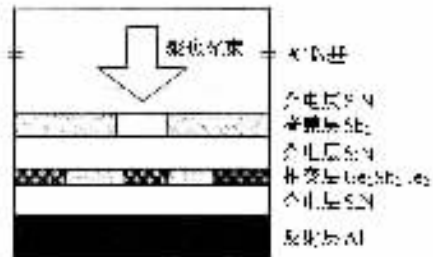


图 1 Super-RENS 光盘盘片结构

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号:G19990330)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: quanhong99@mails.tsinghua.edu.cn

2. 理论模型

2.1. 多层薄膜光传导模型

图 2 为 k 层薄膜光传导示意图, I_0 为入射光能量, R 为能量反射率, T_r 为能量透射率, n_1, \dots, n_k 分别为 k 层薄膜的复折射率, n_0 和 n_{k+1} 分别为入射媒质和出射媒质的复折射率. 关于 Super-RENS 光盘各层膜厚的优化设计可以参考文献 [15] 这里主要应用光学特性导纳矩阵建立多层薄膜的光传导模型.

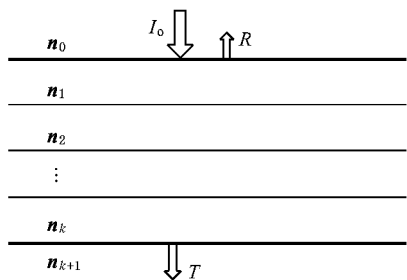


图 2 k 层薄膜示意图

假设光垂直入射, 则第 j 层介质的导纳 $\eta_j = n_j$, 其光学特性导纳矩阵为

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos g_j & (i/n_j) \sin g_j \\ i n_j \sin g_j & \cos g_j \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 g_j 为第 j 层光相位移, $g_j = 2\pi d_j n_j / \lambda$, d_j 为第 j 层膜厚度, λ 为光波长. 各层光学特性矩阵的乘积给出了 k 层薄膜的光学参数

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^k M_j \begin{pmatrix} 1 \\ n_{k+1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$R = \frac{\|n_0 B - C\|^2}{\|n_0 B + C\|^2}, \quad (3)$$

$$T = 4n_0 n_{k+1} / \|n_0 B + C\|^2, \quad (4)$$

则可得 k 层薄膜的能量吸收率为

$$A = 1 - R - T. \quad (5)$$

2.2. 聚焦光束光强分布

假设盘片以恒线速度 v 运动, 入射激光束光强在焦点处服从高斯分布, 则 [16]

$$K(x, y, t) = \frac{2P}{\pi r_0^2} e^{-\alpha((x-vt)^2 + y^2)/r_0^2}, \quad (6)$$

其中 P 为激光功率, r_0 为中心能量 e^{-2} 处的光束半径, $r_0 = 0.43 \frac{\lambda}{NA}$, x 为光斑运动方向, y 为跨道方向,

t 为时间.

2.3. 光热效应模型

构造 Sb 掩膜层的热传导模型, 线性热传导基本方程为

$$\nabla^2 T(r, t) + \frac{1}{k} g(r, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t}, \quad (7)$$

其中 T 为温度, k 为热传导系数, $g(r, t)$ 为层中单位时间和体积内产生的热量, $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ 为热扩散率, ρ 为密度, C_p 为比热.

同时考虑掩膜层中入射光和发射光的热效应 [17], 假设只有掩膜层和记录层存在能量吸收, 则掩膜层中的 $g(r, t)$ 可以写成两项之和

$$g(x, y, t) = \frac{I_1 + I_2}{d_{Sb}}, \quad (8)$$

其中 I_1 和 I_2 分别是入射光和反射光在 Sb 掩膜层中的光强分布,

$$I_1(x, y, t) = A_1 K(x, y, t) s(t) \exp(-\beta_1 z), \quad (9)$$

$$I_2(x, y, t) = A_2 K(x, y, t) s(t) \exp(-\beta_1(d_{Sb} - z)) \times \exp(-\beta_1 d_{Sb} - 2\beta_2 d_{Record}), \quad (10)$$

A_1 和 A_2 分别为 Sb 掩膜层对入射光和反射光的吸收率, 可由 (1)–(5) 式计算得到. xyz 为笛卡儿坐标系, x 为光斑运动方向, y 为跨道方向, z 为 Sb 膜厚度方向. d_{Sb} 和 d_{Record} 分别为 Sb 掩膜层和 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 记录层的厚度. β_1 和 β_2 分别为 Sb 掩膜层和记录层的吸收系数. $s(t)$ 为激光功率调制信号.

3. 数值仿真

基于上述的热传导模型假设, 采用有限元分析软件 FEMLAB 进行 3D 数值仿真分析. 3D 仿真模型的建立、边界条件和参数的设定可以参考文献 [18]. 仿真条件如表 1 和表 2 所示.

表 1 Super-RENS 光盘各层厚度和光学常数 [8, 19]

材料	光学常数	厚度/mm
盘基 (Polycarbonate)	1.52	1.2
SiN	2.1	170
Sb	固态 3.11 + i5.66 熔化态 4.51 + i3.66	15
SiN	2.1	20
$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$	结晶态 4.6 + i4.2 吸收态 4.2 + i1.9	15
SiN	2.1	20
Al	1.8 + i6.0	100

表 2 热场仿真参数^[12,20]

ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	C_p ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	k (W/mK)	λ (nm)	N_A	α ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	T_m (K)	T_0 (K)	β_1 (m^{-1})	β_2 (m^{-1})
6380	190	24.3	780	0.45	2×10^{-5}	870	300	9.12×10^7	6.77×10^7

注 表中 T_m 和 T_0 分别表示掩膜材料的熔点与初始温度.

激光功率采用脉宽调制法,即

$$s(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq W, \\ 0, & t > W, \end{cases} \quad (11)$$

其中 W 为脉宽. 图 3 显示了不同激光功率(0—12mW)和脉宽(40ns,100ns,140ns,200ns)下,SuperRENS 光盘的 Sb 掩膜层最高温度的静态 ($v=0$) 仿真实验结果. 由图 3 可知,一定脉宽下的激光功率只有达到某个阈值(Sb 掩膜层最高温度超过熔点 870K)时,才有透光孔径形成,且脉宽越窄,相应的阈值功率越大. 图 4(a)显示了一定激光功率(6mW)下 Sb 掩膜层孔径 D 大小与激光脉宽 W 之间的关系,可见当写入脉宽超过 50ns 时,掩膜层有透光孔径形成,且孔径尺寸随着脉宽的增加而增大. 图 4(b)显示了一定脉宽(100ns)下 Sb 掩膜层形成的孔径大小与激光功率之间的关系,可见当激光功率超

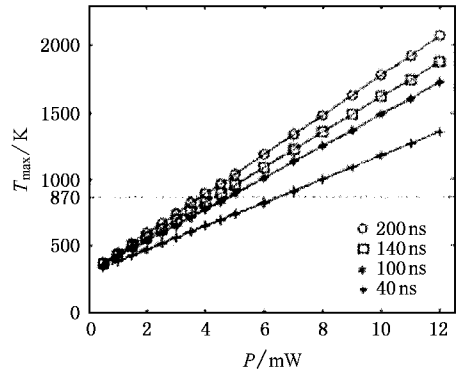


图 3 Sb 掩膜层最高温度与激光功率和脉宽之间的关系

过 4.5mW 时,透光孔径开始形成,且随着功率的增加而增大. 图 5 显示的是激光功率 6mW、脉宽 100ns 时掩膜层的温度分布截面图的仿真结果,此时形成

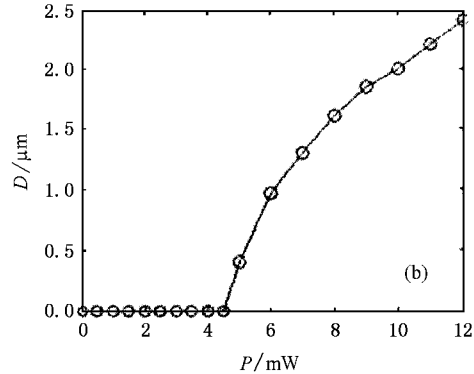
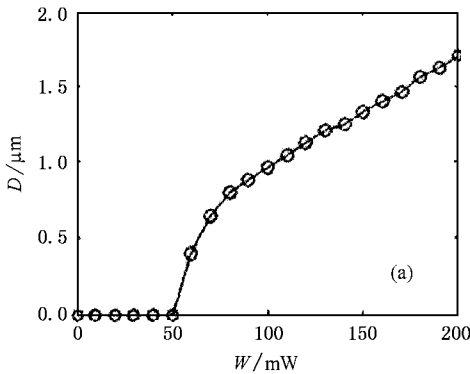


图 4 (a) 功率为 6mW 时 Sb 掩膜层孔径大小与脉宽之间的关系 (b) 脉宽为 100ns 时 Sb 掩膜层孔径大小与功率之间的关系

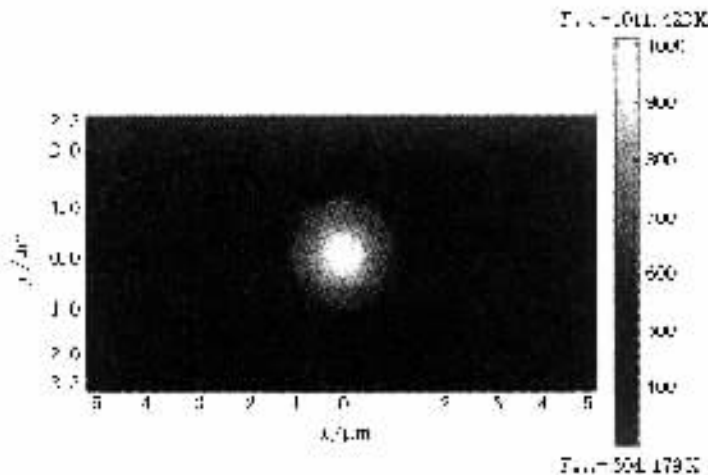


图 5 功率 6mW 脉宽 100ns 时 Sb 掩膜层温度分布截面图

的透光孔径大小约为 $0.9\mu\text{m}$ 。

4. 实验结果

采用磁控溅射镀膜工艺制备 TA 型 Super-RENS 样片,掩膜材料为 Sb,各层厚度如表 1 所示。采用传统 CD-RW 光学头(波长 780nm ,数值孔径 0.45)对样片进行静态写入实验^[14],实验装置如图 6 所示。设置不同的激光功率和写入脉宽的组合,在样片上进行静态写入。实验中采用写入激光功率为 $6\text{--}12\text{mW}$,写入脉宽 100ns ,用扫描电镜(FEI SIRION

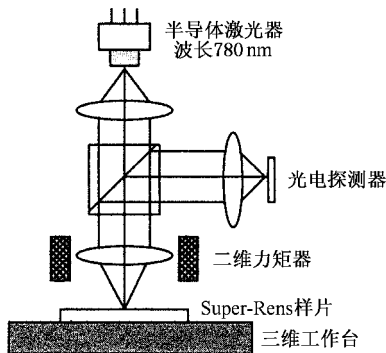


图 6 实验装置示意图

SEM,分辨率 1.5nm)测量写入实验后的 Super-RENS 样片记录符直径,得到 12mW , 10mW , 8mW 和 6mW 功率所对应记录符的平均直径分别约为 950nm , 680nm , 410nm 和 220nm 。由图 4(b)的仿真结果可知, 100ns 写入脉宽条件下, 12mW , 10mW , 8mW 和 6mW 写入功率所形成的掩膜孔径的尺寸分别约为 2400nm , 2000nm , 1500nm 和 900nm ,可见掩膜结构除了热开孔效应外,还具有聚焦效应进一步缩小光斑,详细解释请参见文献 [12]。

5. 结 论

本文基于高斯聚焦激光束热效应,应用光学特性导纳矩阵建立了孔径型 Super-RENS 的盘片光传导模型。用有限元分析软件 FEMLAB 对不同激光功率和脉宽下的 Sb 掩膜层的孔径形成情况的数值仿真结果表明当一定脉宽的激光功率超过介质阈值时,掩膜层将有超分辨孔径形成,且孔径随功率的增大而增大。该理论分析结果与孔径型 Super-RENS 光盘样片在不同激光功率的写入实验结果相符,说明光热效应可以较好地描述孔径型 Super-RENS 光盘掩膜的孔径形成过程。

- [1] Qi G S, Xiao J X, Liu R *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1076 (in Chinese) [齐国生、肖家曦、刘 嵘 等 2004 物理学报 **53** 1076]
- [2] Xiao J X, Qi G S, She P *et al* 2003 *Chin. Phys.* **12** 1241
- [3] Hang M J, Yao H W, Chen Z Y *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2536 (in Chinese) [黄明举、姚华文、陈仲裕 等 2002 物理学报 **51** 2536]
- [4] Chen G H, Wang Y S, Liu Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 436 (in Chinese) [程光华、王屹山、刘 青 等 2004 物理学报 **53** 436]
- [5] Betzig E and Trautman J K 1992 *Science* **257** 189
- [6] Ando H, Yokota T and Tanoue K 1993 *Jpn. J. Appl. Phys.* **32** 5269
- [7] Yasuda K, Kasami Y, Ono M *et al* 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 423
- [8] Tominaga J, Nakano T and Atoda N 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2078
- [9] Tominaga J, Fujii H, Atoda N *et al* 1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** L1323
- [10] Tominaga J, Hiroshi F, Akira S *et al* 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** 957
- [11] Fujii H, Tominaga J, Men L *et al* 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** 980
- [12] Wei J S and Gan F X 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2067
- [13] Tsai D P and Lin W C 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1413
- [14] Liu R, Qi G S, Xu D Y *et al* 2003 *J. Opt. Las.* **14** 929 (in Chinese) [刘 嵘、齐国生、徐端颐 等 2003 光电子激光 **14** 929]
- [15] Li J Y, Ruan H and Gan F X 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 30 (in Chinese) [李进延、阮 昊、干福熹 2002 光学学报 **22** 30]
- [16] Anderson R J 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 6639
- [17] Shi L P, Chong T C, Ho J J *et al* 1998 *SPIE* **3401** 71
- [18] Incropera F P and DeWitt D P 2002 *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (New York: John Wiley & Sons) 5th ed. p102
- [19] Peng C 2001 *Appl. Opt.* **40** 3922
- [20] Li J Z 1990 *Handbook of Optics* (Xi'an: Shanxi Science & Technology press) p394 (in Chinese) [李景镇 1990 光学手册 (西安 陕西科学技术出版社) p394]

Laser-induced thermal analysis for mask layer of transmitted-aperture type super-RENS in optical storage^{*}

Shen Quan-Hong[†] Xu Duan-Yi Qi Guo-Sheng Hu Heng Liu Rong

(*Optical Memory National Engineering Research Center ,Department of Precision instrument and Mechanics ,Tsinghua University ,Beijing 100084 ,China*)

(Received 20 August 2004 ; revised manuscript received 21 March 2005)

Abstract

The forming of transmitted-aperture in Sb layer of Super-RENS was studied based on laser-induced thermal model with Gauss assumption. The optical transmit model was created with optical admittance characteristic matrix. A numerical simulation was carried out by FEMLAB to understand the forming process of the aperture. The simulation results showed that transmitted aperture would not be formed until the exposure power exceeded a threshold within a certain pulse time, further more, the aperture size would be increased if the power was raised. The static writing experiment for transmitted-aperture type Super-RENS was carried out. The experiment results well agree with the simulation. It is concluded that a laser-induced thermal model could well describe the forming of aperture in Sb layer of transmitted-aperture type Super-RENS in optical data storage.

Keywords : optical storage , transmitted aperture , super resolution near-field structure (Super-RENS) , laser-induced thermal effect

PACC : 4230N , 4240H

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G19990330).

[†] Corresponding author. E-mail : quanhong99@mail.tsinghua.edu.cn