

文章编号 1004-924X(2008)10-1800-05

# 超分辨近场结构光磁混合存储介质的温度场模拟

程晓敏,王昊,杨晓非,缪向水,李震,李佐宜

(华中科技大学 电子科学与技术系,湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为了进一步减小光磁混合存储记录位尺寸,建立了用于光磁混合存储记录介质的超分辨近场结构膜层模型、近场光场模型及温度场模型,采用有限元方法对超分辨近场结构光磁混合存储介质记录层的温度场进行了计算模拟。计算中采用的光磁混合记录介质膜层结构为 C(2 nm)/Sb(10 nm)/SiN(10 nm)/Co<sub>75</sub>Cr<sub>15</sub>Pt<sub>10</sub>(30 nm)。当写入温度为 550 K 时,随着入射激光功率的增加,光磁混合存储介质记录层温度场可写入区域面积增加。当激光功率从 3.9 mW 增至 6.9 mW 时,温度场可写入区域横向及纵向尺寸增加约 1 倍,记录密度减小至原记录密度的 1/4。

**关键词:** 超分辨近场结构;光磁混合存储介质;温度场

中图分类号:TP333.41 文献标识码:A

## Temperature distribution simulation of optical magnetic hybrid recording media with super-resolution near-field structure

CHENG Xiao-min, WANG Hao, YANG Xiao-fei, MIAO Xiang-shui, LI Zhen, LI Zuo-yi

(Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to further reduce the recorded bit size of optical-magnetic hybrid recording, a Super-resolution Near-field Structure (Super-RENS) thin film model, a near-field optical model and a temperature field model were established for optical-magnetic hybrid recording media. Finite element method was used to simulate the temperature distribution of the recording layer of Super-RENS hybrid recording media. The layer structure of hybrid recording media was C(2 nm)/Sb(10 nm)/SiN(10 nm)/Co<sub>75</sub>Cr<sub>15</sub>Pt<sub>10</sub>(30 nm) in experiment. Simulated results show that the temperature writable area of hybrid recording media increases with increasing laser power, when the writing temperature is 550 K. The sizes of temperature writable area in both vertical and horizontal directions are twice and the area recording density is 1/4 those of the original one, when laser power increases from 3.9 mW to 6.9 mW, which shows that the models are efficiency.

**Key words:** super resolution near field structure; optical-magnetic hybrid recording media; temperature distribution

收稿日期:2008-02-13;修订日期:2008-04-03.

基金项目:国家自然科学基金资助重大项目(No. 60490290)

# 1 引言

光磁混合存储技术是当前磁存储研究领域的最新发展方向。该技术利用磁记录介质在温度升高时矫顽力会逐渐下降的特性,通过激光对介质记录位进行局部加热,使记录位矫顽力降低至写入场以实现信息的写入。光磁混合存储通过引入光场很好地解决了常规磁存储中热稳定性高的记录介质由于矫顽场过大难以被写入的技术难题,被认为是最有发展潜力的新存储技术之一<sup>[1]</sup>。在光磁混合存储系统中,记录位尺寸由光场(或者说由光场引起的温度场)与写入磁场共同决定,因此提高其记录密度的一种直接有效的方法就是通过减小聚焦激光光斑尺寸来缩小记录位尺寸。由于光在近场传播中不受衍射极限的限制,理论上可以无限制地缩小光斑尺寸<sup>[2-3]</sup>,故近场技术成为实现超高密度光磁混合存储的一种重要的技术手段<sup>[4]</sup>;同时结合超分辨技术,可进一步解决近场高速扫描中飞行高度的控制问题。本文采用有限元方法对超分辨近场结构(Super-Resolution Near-field Structure, Super-RENS)的光磁混合存储记录介质温度场进行了计算模拟,模拟结果为进一步研究其记录位形态打下了基础。

# 2 理论模型

## 2.1 膜层结构模型及相关物理参数

采用孔径型超分辨近场结构,该结构示意图如图 1 所示。当激光打到掩模层(材料为 Sb)上时,由于光斑中心能量高,Sb 瞬间熔化,熔化态 Sb 透过率比晶态 Sb 高很多,于是形成一个直径小于激光斑点的透光小孔。激光离开后,熔化态 Sb 重新结晶,实现孔径闭合。Sb 在晶态与非晶态之间转化的响应时间 $<1 \mu\text{s}$ ,这种转化过程是可逆的。在近场区域,透过小孔的光斑尺寸由孔径大小决定而不是由激光波长决定,从而实现超分辨,而且孔径大小可通过调节激光能量分布控制<sup>[2, 5]</sup>。基于此膜层结构,并根据光磁混合存储技术对记录介质的要求,模拟仿真中采用的膜层结构模型如图 2 所示。从上至下依次为保护层,掩模层、保护层和记录层,其膜层材料分别为 C、Sb、SiN 和  $\text{Co}_{75}\text{Cr}_{15}\text{Pt}_{10}$ ,其物理参数如表 1 所

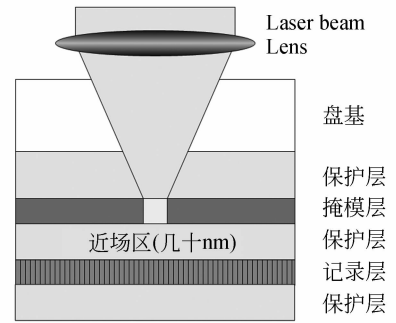


图 1 孔径型 Super-RENS 结构图

Fig. 1 Transmitted-aperture Super-RENS structure

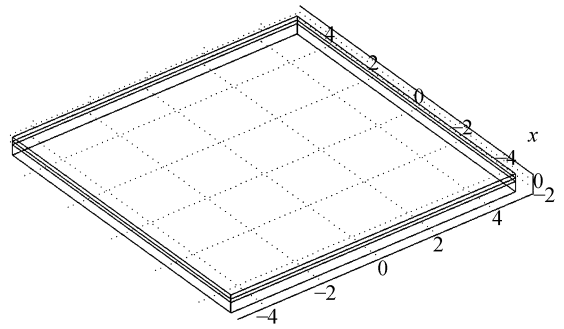


图 2 膜层结构仿真模型

Fig. 2 Simulation model of Super-RENS layer structure

表 1 膜层材料的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of each layer

材料	密度 $\rho$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	热容 $C_p$ ( $\text{J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$ )	热导率 $\kappa$ ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )	厚度 $L$ (nm)
C	2 620	520	129	2
Sb	6 684	207	24.3	10
SiN	3 100	700	20	10
Co	8 900	204	100	—
Cr	7 190	192	93.7	—
Pt	7 860	206	80.2	—
$\text{Co}_{75}\text{Cr}_{15}\text{Pt}_{10}$	8 540	202	97.6	30

示。Sb 的折射率是随温度变化的,其表达式如式(1)所示:

$$n_{\text{Sb}} = \begin{cases} 3.11 & T \leq 868\text{K} \\ 3.11 + 0.0235 \times (T - 868) & 868\text{K} \leq T < 928\text{K} \\ 4.53 & T \geq 928\text{K} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$ 为绝对温度。其余膜层的折射率定为 1。仿真中选用属于蓝光波段的波长为 405 nm 的激光光源。温度场计算模拟结果为激光加热近场超

分辨结构光磁混合存储记录介质达到平衡态,即加热和散热过程相平衡时加热区域处于稳定状态时的温度场分布。

本文采用的光磁混合记录介质的记录层材料为  $\text{Co}_{75}\text{Cr}_{15}\text{Pt}_{10}$ ,其温度与矫顽力( $H_c$ )以及剩余磁化强度( $M_r$ )的关系如图 3 所示<sup>[6]</sup>。当写入温度为 550 K 时,记录层矫顽力为 100 kA/m,同时剩余磁化强度依然足够高。因此,在仿真中,温度高于 550 K,记录层矫顽力低于 100 kA/m 的区域成为可写入区域,也就是记录位。在记录层温度场分析中,温度以 550 K 为限,温度高于 550 K 的区域为温度场可写入区域。

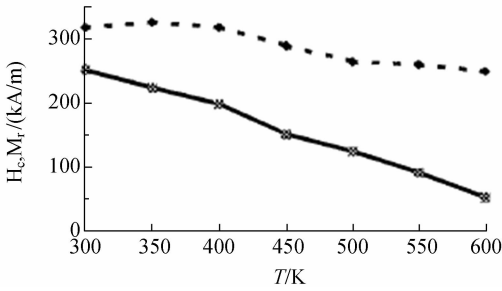


图 3 光磁混合存储介质记录层矫顽力及剩余磁化强度的温度特性曲线

Fig. 3 Temperature dependence of coercivity and remanent magnetization of recording layer in hybrid recording media

## 2.2 近场光场计算模型

对于简单媒质,利用分离变量法对麦克斯韦方程组进行电、磁矢量分离后,得到波动方程如下:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = \nabla \times \mathbf{J}, \quad (2)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\mu \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} \rightarrow$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (3)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为电场强度(V/m), $\mathbf{H}$ 为磁场强度(A/m), $\epsilon$ 为介质的介电常数, $\mu$ 为介质的磁导率, $\mathbf{J}$ 为媒质中的传导电流密度, $\sigma$ 是媒质的电导率。采用复数矢量表示电磁场与时间的关系:

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}(x, y, z) e^{j\omega t}, \quad (4)$$

$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}(x, y, z) e^{j\omega t}, \quad (5)$$

对式(2)~(5)在三维空间求解,并通过模拟计算可得出  $I = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$ ,即空间各点的光强

分布。对位于分界面上的场点,给出边界条件:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0, \quad (6)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0, \quad (7)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为界面上的法向方向的单位矢量。此边界条件表示在不同的介质分界面上,磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 和电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 的切向分量总是连续的。在用有限元法求解光波导中的传播问题时,可以近似认为光场仅存在于一个半径为有限大小的圆柱形区域内。在此圆柱的外边界上场量已衰减至零,也就是说在此圆柱面上给定第一类齐次边界条件,即

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0. \quad (8)$$

## 2.3 温度场计算模型

热传导的控制方程是 Fourier 导热方程<sup>[7]</sup>,即

$$q_x = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (9)$$

式中: $q_x$ 表示负  $x$  方向单位面积的热流率,称为热流密度, $\kappa$ 为材料的导热系数,“ $-$ ”表示传热方向永远和温度梯度方向相反。在无内热源情况下,光场作用下记录膜层温度分布的热传导方程为:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (10)$$

式中: $\rho$ 为媒质的密度; $C$ 为媒质的比热容; $\kappa$ 为媒质的热传导系数; $T$ 为绝对温度。由于光斑来源于光强的近场分布,光斑大小近似于孔径大小,取光斑大小 10 倍为边作为边界条件,此边界在  $t_1$  前后温度不变。表达式为:

$$T = T_0, \quad (11)$$

式中: $T_0$ 为室温。忽略边界热交换,对于记录介质上表面,Fourier 方程应满足:

$$\kappa \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Aq(x, y, t), \quad (12)$$

式中: $A$ 为材料热吸收系数; $q$ 为热流量。假设下表面在整个过程中为绝热边界,表达式为:

$$\kappa \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad (13)$$

另外,介质上表面光斑光强分布如下:

$$I = [P_0 / (\pi r_0^2)] \exp\{-[(x/r_0)^2 + (y/r_0)^2]\}. \quad (14)$$

式中: $I$ 为激光光强的分布; $P_0$ 为激光功率; $r_0$ 为照射在介质上表面激光光斑的半径。

### 3 模拟结果分析与讨论

当出射激光功率为 3.9 mW,且激光经过光磁混合存储写入系统光波导照射到介质上表面时的光斑半径为 100 nm 时,介质记录层的温度场分布如图 4 所示。温度场中心的最高温度达到 651 K,且呈现出椭圆形态,此椭圆形态与超分辨近场结构中掩模层的光强分布形态一致。当光在掩模层中传播时,在平行于薄膜表面的平面上产生了分别沿  $x$  方向和  $y$  方向偏振的电场分量  $E_x$  和  $E_y$ ,由于  $E_x$  和  $E_y$  的不对称性导致光场不具有圆周对称的分布特性,呈椭圆形态分布<sup>[8]</sup>。对于温度场分析来说,温度高于 550 K 的区域即为可写入区域。在此条件下温度场可写入区域如图 5 所示,中央红色部分即为可写入区域,这部分记录层材料的矫顽力被降低到 100 kA/m 以下,可在写入磁场作用下实现信息的写入。该区域纵向为 200 nm,横向约为 240 nm。

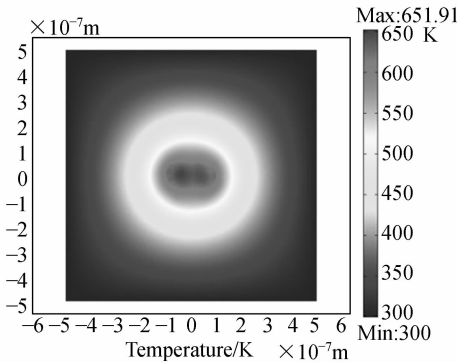


图 4 激光功率为 3.9 mW 时介质记录层的温度场分布  
Fig. 4 Temperature distribution on recording layer of hybrid recording media when laser power is 3.9 mW

保持激光光斑半径不变,当出射激光功率为 6.9 mW 时,介质记录层的温度场分布如图 6 所示,中心处最高温度为 925 K。此条件下温度场可写入区域如图 7 所示。该区域横向约为 550 nm,纵向约为 450 nm。可以看出,当激光功率上升以后,膜层温度显著升高,并且温度高于 550 K 的区域也明显增大,较激光功率为 3.9 mW 时约扩大了一倍。同时,可写入区域面积为激光功率为 3.9 mW 时的 4 倍,对于记录系统来说,记录密度缩小为  $\frac{1}{4}$ 。

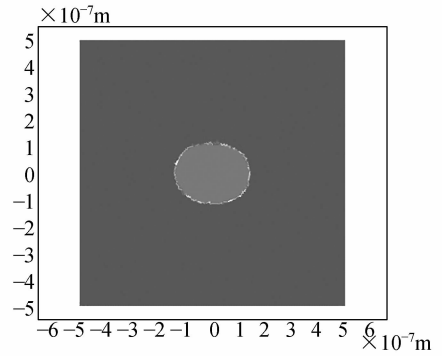


图 5 激光功率为 3.9 mW 时介质记录层温度场可写入区域  
Fig. 5 Temperature writable area on recording layer of hybrid recording media when laser power is 3.9 mW

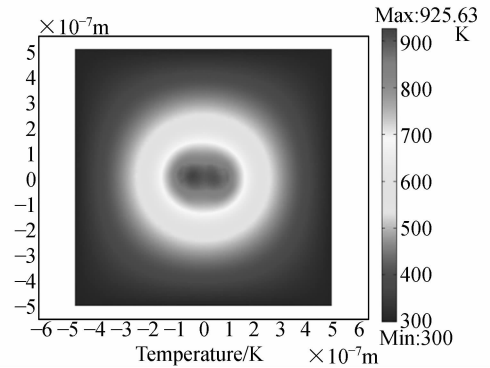


图 6 激光功率为 6.9 mW 时介质记录层温度场分布  
Fig. 6 Temperature distribution on recording layer of hybrid recording media when laser power is 6.9 mW

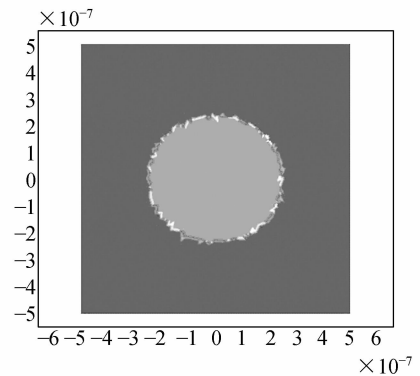


图 7 激光功率为 6.9 mW 时介质记录层温度场可写入区域  
Fig. 7 Temperature writable area on recording layer of hybrid recording media when laser power is 6.9 mW

## 4 结 论

本文通过建立用于光磁混合存储记录介质的超分辨近场结构膜层模型、近场光场模型及温度场模型,采用有限元方法计算模拟了超分辨近场结构光磁混合存储介质记录层的温度场分布。

经入射激光照射后,介质记录层的温度场分布成椭圆形。设定写入温度为 550 K,当激光功率从 3.9 mW 增至 6.9 mW 时,温度场可写入区域横向及纵向尺寸增加约 1 倍,记录密度减小至原记录密度的  $\frac{1}{4}$ 。

## 参考文献:

- [1] CUMPSON S R, HIDDING P, COEHOORN R. A hybrid recording method using thermally assisted writing and flux sensitive detection[J]. *IEEE Trans. Magn.*, 2000, 36(5): 2271-2275.
- [2] 张树霖. 近场光学显微镜及其应用[M]. 北京:科学出版社,2000.  
ZHANG SH L. *Near Field Optical Microscope and Its Application*[M]. Beijing: Science press, 2000. (in Chinese)
- [3] 王富生,谭久彬. 表面微观轮廓的高分辨率光学测量方法[J]. 光学 精密工程,2000,8(4):309-315.  
WANG F SH, TAN J B. Methods of high resolution optical measurement for surface profile[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(4): 309-315. (in Chinese)
- [4] 赵大鹏,李庆祥,李玉和,等. 一种抗灰尘的近场承载微工作台设计[J]. 光学 精密工程,2004,12(3):249-253.  
ZHAO D P, LI Q X, LI Y H, *et al.*. Design of a subminiature anti-particles load-supporting stage for near-field optical storage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 249-253. (in Chinese)
- [5] TOMINAGA J, NAKANO T, ATODA N. An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(15): 2078-2080.
- [6] RUIGROK J J M, COEHOORN R, CUMPSON S R, *et al.*. Disk recording beyond 100 Gb/in<sup>2</sup>: Hybrid recording [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, 87(9): 5398-5403.
- [7] 张洪济. 热传导[M]. 北京:高等教育出版社,1992.  
ZHANG H J. *Heat Conduction*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992. (in Chinese)
- [8] 魏劲松. Sb 掩膜型超分辨近场结构光存储技术及机理研究[D]. 中科院博士论文,2004.  
WEI J S. *Study on the Sb-type super-resolution near-field structure optical storage technique and mechanism*[D]. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)

作者简介:程晓敏(1975—),女,湖北武汉人,讲师,主要从事信息存储磁性薄膜制备与特性研究方面的工作。E-mail: xmcheng@mail. hust. edu. cn