

磁光存储多层膜系统的光学与热分析方法*

郑玉祥 巨晓华 张荣君 王松有 李晶 陈良尧

(复旦大学光科学与工程系, 先进光子学材料与器件国家重点实验室, 上海, 200433)

摘要 采用光学转移矩阵法计算激光照射下磁光存储多层膜的磁光及光学响应、光强分布及焦耳热损失分布, 再用有限元方法求解在这种多层膜中的热传导方程, 从而得到激光照射下多层膜系统中的温度场分布. 这种方法可用于磁光光盘的光学与热学设计.

关键词 磁光存储, 光学薄膜, 多层膜, 磁光效应.

THERMAL AND OPTICAL ANALYSIS OF MAGNETO-OPTICAL RECORDING MULTILAYER FILM SYSTEM*

ZHENG Yu-Xiang JU Xiao-Hua ZHANG Rong-Jun WANG Song-You LI Jing
CHEN Liang-Yao

(Department of Optical Science and Engineering,
State Key Laboratory of Advanced Photonic Materials and Devices,
Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Optical matrix method was used to analyze the magneto-optical response, light intensity distribution and Joule loss distribution for a magneto-optical multilayer thin film system. Three-dimensional finite element method was applied to determine the temperature profile in the MO disk when it was exposed with a laser beam. The combination of the optical matrix method and finite element method can be used to design the MO disk.

Key words magneto-optical recording, optical thin film, multilayer thin films, magneto-optical effect.

引言

磁光存储技术是一种很有前途的信息技术, 采用磁学超分辨技术并结合高数值孔径光学系统和蓝光激光器, 可使存储密度大大提高^[1-4]. 由于波长缩短, 数值孔径增大, 使光斑大为缩小, 因而光束的功率密度将大大提高, 这会引引起光照区域的材料温度升高. 对磁光存储来说, 信息的存储或读出, 都与记录层的温度分布密切相关, 因此激光照射下磁光存储多层膜的热响应分析是非常重要的.

本文采用光学转移矩阵法计算激光照射下磁光存储多层膜的磁光光谱、光强分布及焦耳热损失分布, 然后将多层膜系统的焦耳热损失分布作为热源项, 再用有限元方法求解在这种热源作用下多层膜中的热传导方程, 从而得到激光照射下多层膜系统中的温度场分布.

1 数值方法

1.1 光学矩阵法^[5]

当光束从一个媒质传播到另一媒质, 磁场切向分量 H_x, H_y 与电场切向分量 E_x, E_y 在边界守恒. 而在光学领域通常引入 $E_s^{(i)}, E_p^{(i)}, E_s^{(r)}, E_p^{(r)}$ 来定义各类光学和磁光常数, 这里 i, r, s, p 分别表示入射光、反射光、垂直分量和平行分量. 引入 F 和 P 两个矢量, 定义如下:

$$F = [E_x, E_y, H_x, H_y]^T, \quad (1)$$

$$P = [E_s^{(i)}, E_p^{(i)}, E_s^{(r)}, E_p^{(r)}]^T. \quad (2)$$

矢量 F 和 P 满足

$$F = AP. \quad (3)$$

其中 A 是 4×4 矩阵, 称为媒质边界矩阵. 在同一层媒质内距离为 d 两点 $P(0)$ 和 $P(d)$, 矢量则由下式联系:

* 国家自然科学基金(批准号 60177031)资助项目
稿件收到日期 2002-08-11, 修改稿收到日期 2002-09-23

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60177031)
Received 2002-08-11, revised 2002-09-23

$$P(0) = \bar{D}P(d). \quad (4)$$

其中 \bar{D} 也是 4×4 矩阵,称为媒质传播矩阵. 矩阵 A 和 \bar{D} 的元素由各媒质的光学常数和磁光常数决定. 如果已知表面处入射光的各分量,根据上述关系,可以确定多层膜中的光强分布及焦耳热损失分布,以及薄膜系统的光学及磁光响应. 焦耳热损失通常由下式决定^[6]:

$$Q_j = \frac{i\omega}{4} [(\varepsilon^* - \varepsilon)\varepsilon_0 E \cdot E^* + (\mu^* - \mu)\mu_0 H \cdot H^*] \\ = \frac{\omega}{2} [\varepsilon'' \varepsilon_0 |E|^2 + \mu'' \mu_0 |H|^2]. \quad (5)$$

式(5)中 ω, ε, μ 分别为光波圆频率、媒质介电常数及磁导率.

1.2 热传导方程

在激光照射下多层膜系统的温度场分布由热传导方程决定:

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k \nabla^2 T(x, y, z, t) + Q(x, y, z, t). \quad (6)$$

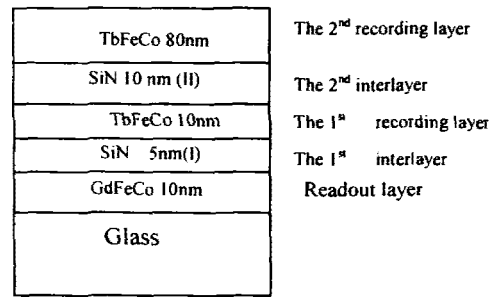
其中 ρ, c 及 k 分别为媒质密度、比热及热传导系数. 热源项 $Q(x, y, z, t)$ 由光波在媒质中的焦耳热损失决定. 若入射光为高斯光, $Q(x, y, z, t)$ 具有如下形式:

$$Q(x, y, z, t) = P(t) f_x(x, y, t) f_z(z, t) \\ = P(t) \frac{\exp\{- (x^2 + y^2)/R_0^2\}}{\pi R_0^2} f_z(z, t). \quad (7)$$

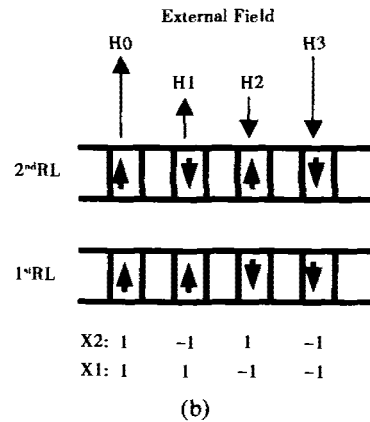
其中 $P(t), f_x(x, y, t), f_z(z, t)$ 分别是激光功率、光强在 xy 平面的分布函数及沿 z 方向的分布函数. 此方程通过三维有限元分析方法数值求解.

2 实例分析与讨论

现在主流的磁光存储材料是稀土-过渡 (RE-TM) 族金属材料,尤其是重稀土金属与过渡金属的合金,如 TbFeCo, GdFeCo 等合金材料. 在这种材料中,过渡金属的磁矩与重稀土金属的磁矩反平行排列,因此这类材料具有亚铁磁性. 适当选择稀土金属、过渡金属的组份,可形成具有垂直各向异性的膜系,并具有合适的补偿温度点,从而成为优良的磁光存储材料. 对于磁光存储,记录的信号由介质的磁化状态决定,如可规定记录点的磁化向上为 1,向下为 0. 而信号的读出则根据磁光克尔效应的测量原理,将线偏振光聚焦在记录点上,记录点处不同的磁化状态将使光束的偏振面产生不同的偏转角,从而将记录的信号读出.



(a)



(b)

图 1 (a)典型的双记录层磁光光盘结构;(b)各记录层的磁化状态图

Fig. 1 (a) The schematic diagram of a double layered MO disk; (b) Magnetization configuration for the MO Disk

日本的 K. Nakagawa A. Itoh 等人 1996 年提出多值存储多波长读出磁光存储 (MWR-MMVMO) 的概念^[4]. 在一张磁光光盘中有多个记录层,这样记录不仅可以沿着面内,也可以沿着垂直于膜层方向,即实现所谓三维存储,这将成倍提高光盘的存储容量. 图 1 给出一种具有 2 个记录层的磁光存储结构. 其中基板为玻璃, GdFeCo 作为读出层, TbFeCo 作为记录层, SiN 为介质层. 图 1(a)为膜层结构示意图, (b)为各记录层的磁化状态图. 设 X_1, X_2 分别为第一、第二记录层的记录状态,其值取 +1 或 -1 (+1, -1 分别表示向上或向下的磁化状态). 存储在两记录层中的磁光信号可用 2 个波长的激光读取,若这 2 个波长所对应的磁光信号分别为 D_1, D_2 , 则 D_1, D_2 与 X_1, X_2 可建立如下关系:

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

其中 S 矩阵中的各元素由各膜层的光学和磁光常数决定. 根据式(8),只要测出 2 种波长所对应的磁光信号 D_1, D_2 , 就可以反演出各记录层的磁化状态,从

而得到记录在各层中的信号。

在信号的读出过程中,经高数值孔径聚焦的光束具有很高的能流密度,可引起多层膜系统的温度迅速上升. A. Itoh 等人研究表明^[7],假若用一个波长读出时,能使第一个记录层温度迅速上升到补偿点,此时该处的平均磁化趋于 0,而使另外一个记录层仍维持在较低的温度,具有较高的磁化强度;相反用另一个波长读出时,使第二个记录层温度迅速上升到补偿点,因而该处的平均磁化趋于 0,并且使第一个记录层仍维持较低的温度、具有较高的磁化强度,这样可得到最佳的信噪比. 这一研究表明,对于磁光存储,在信号读出过程中,恰当控制各层温度至关重要.

磁光光盘的重要优点之一是它的可写性. 磁光存储材料的一个特点是当温度稍高于材料的补偿点时,其矫顽力随温度的上升急剧下降,此时仅需要很小的磁场就可以对记录区进行擦写. 对于具有 2 个记录层的磁光光盘,在写其中一层时,不能改变另外一个记录层中的信号. 为了实现这一目的,可用 2 个波长的激光器来加热膜层. 如写第一层时,用其中一个波长的激光来加热,使要写的记录层的温度迅速上升到补偿点,而使另一记录层维持较低温度. 这样由于要写的膜层温度上升到补偿点,其矫顽力变得很小,因而其磁化方向由写磁场决定,信号被写入. 而另一层,由于温度较低,有足够大的矫顽力抵抗外磁场,其中的信号不会因外磁场的存在而改变.

根据上面叙述可知,为得到性能优良的磁光光盘,必须对光盘的膜层系统进行仔细的光学和热学方面的设计,使光盘的薄膜系统对特定波长的激光,

具有大的磁光响应,以及理想的温度分布.

为了获得大的磁光信号,我们希望光盘的膜层系统具有大的克尔旋转角和高的反射率. 这需要仔细选择各层的材料参数和薄膜的厚度. 以图 1 所示的光盘结构为例,当其中一个膜层,如 SiN(II)层的厚度改变时,系统的克尔旋转角、克尔椭圆率及反射率等参数会随厚度周期变化,见图 2. 当然改变其它膜层的厚度也会有类似的结果,这是由于多层膜的干涉效应造成的. 正如图 2 所示的那样,一般克尔旋转角的最大值往往对应着反射率的最小值,而探测器测到的磁光信号则正比于 $(R^{1/2}\theta_k)$,为了得到最大的磁光信号,需通过大量的计算,优化各层光学参数和厚度.

在对膜系的光学分析中,除得到薄膜系统的各种磁光和光学响应外,还能得到光束在膜层中的光强度分布. 如图 3 所示,实线和虚线分别为波长 442nm 和 488nm 的激光在图 1 所示光盘结构各膜层中的光强度分布. 由于金属膜的吸收,光强在多层膜中的分布呈指数衰减的趋势. 另外对同样强度的人射光,波长 488nm 的光在膜层中的强度弱于 442nm 的光强度,这是由于这种膜层结构对 488nm 的光有较高的反射率.

在得到各膜层中的光强度分布后,很容易得到各膜层的焦耳热损失分布. 焦耳热损失反映各层吸收光能的程度,焦耳热损失越大说明光能转换成热能的数量越多. 对于图 1 所示的结构,膜层的焦耳热损失分布如图 4 所示. 由于介质层 SiN 对可见光是透明的,其中的焦耳热损失为 0.

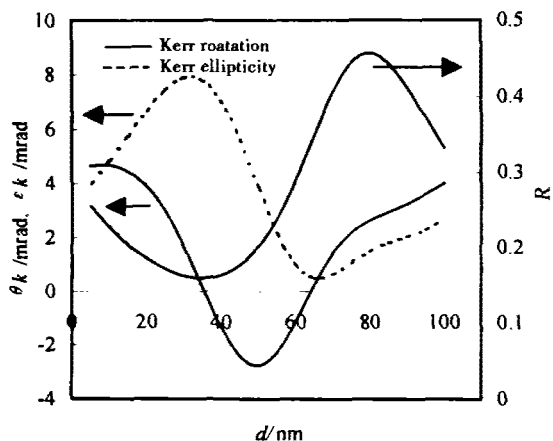


图2 克尔旋转角、克尔椭圆率及反射率随 SiN(II)层厚度的变化关系
Fig.2 Kerr rotation, Kerr ellipticity and reflectivity vary with the thickness of SiN(II)

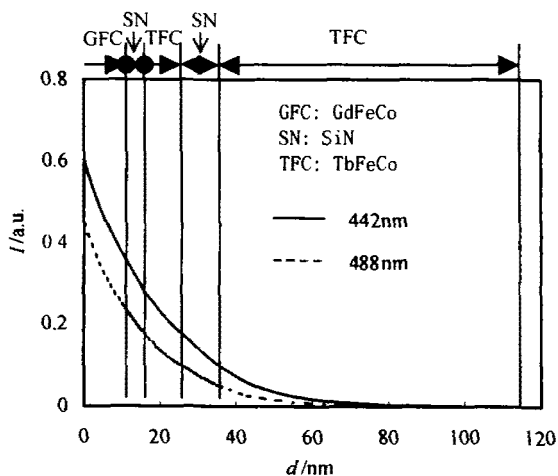


图3 膜层内的光强度分布
Fig.3 Light intensity distribution in the multilayer thin films

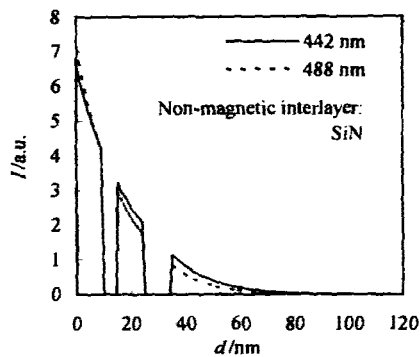
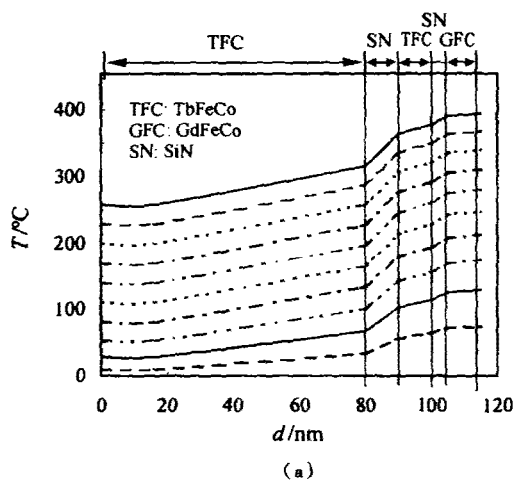
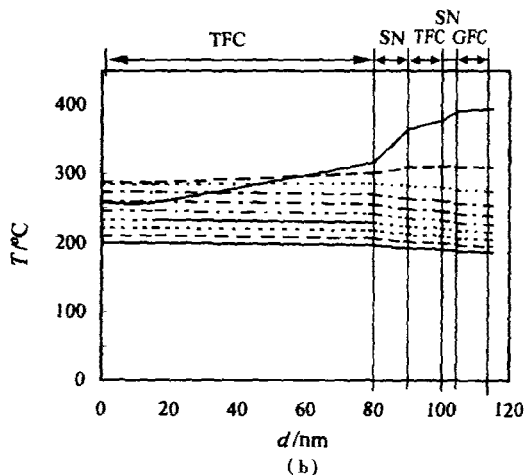


图4 膜层内的焦耳热损失分布
Fig.4 The Joule loss distribution in the multilayer thin films

焦耳热损失分布可作为薄膜系统热扩散方程中的热源项,通过有限元方法求此热扩散方程,可得到薄膜系统在激光照射下温度的空间分布,及空间各



(a)



(b)

图5 各膜层内的温度分布:(a)激光脉冲持续过程 (b)激光脉冲间隙过程
Fig.5 Temperature distribution in the multilayer films: (a) laser duration process; (b) laser extinction process

点温度随时间的演化关系. 通过适当选择各层的材料和厚度的参数,经过大量的热分析计算,可以得到具有理想的温度分布特性的光盘膜系.

如图5所示,为图1(a)的磁光光盘结构,在波长为442nm,功率为30mW,束斑半径为0.45 μ m的脉冲激光作用下的温度分布情况. 该激光脉冲的持续时间为3ns,脉冲间隙为7ns. 图5(a)显示激光脉冲持续过程中的温度分布,温度随激光辐照的时间增加而上升. 图中每条线代表0.3ns的时间间隔;图5(b)为脉冲间隙过程中的温度分布,温度随时间增加而下降并趋于平坦,图中每条线代表0.7ns的时间间隔. 从图中可以看到,在温度上升过程中各膜层温度差异较大,而在下降过程中各膜层温度则迅速达到均匀.

图6所示为第一、第二记录层处的温度随时间的演化关系. 0~3ns为激光持续时间,膜层温度迅速上升. 其后激光停止照射,温度开始下降,下降速度较缓. 从图中还可看到,不同波长引起的温度分布差异显著,而且2个记录层的温度变化趋势也有明显区别. 通过本方法分析磁光多层膜系统各点的温度特性对磁光光盘的设计意义很大.

3 结论

本文采用光学转移矩阵法计算激光照射下磁光存储多层膜的磁光光谱、光强分布及焦耳热损失分布,然后将多层膜系统的焦耳热损失分布作为热源项,再用有限元方法求解在这种热源条件下的多层

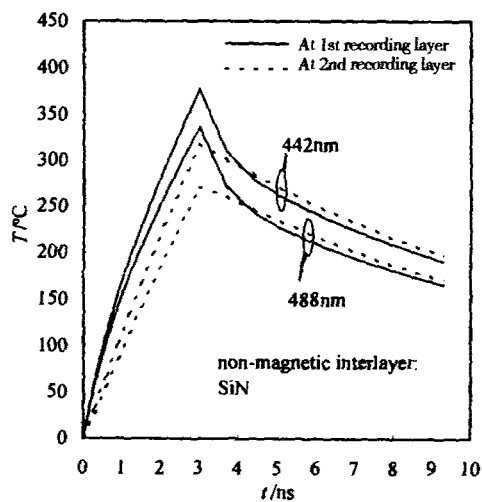


图6 由三维有限元方法得到存储层的温度随时间变化
Fig.6 Variation of temperature at the 1st and 2nd recording layers vs. the laser duration time.

膜中的热传导方程,进而得到激光照射下多层膜系统中的温度场分布.上述方法可用来进行磁光光盘的光学和热设计.

REFERENCES

- [1] Kaneko M, Aratani K, Ohta M. Multi-layered magneto-optical disks for magnetically induced superresolution. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, **31**(1): 568—575
- [2] Awano H, Ohnuki S, Hiroshi H, *et al.* Magnetic domain expansion readout for amplification of an ultra high density magneto-optical recording signal. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(27): 4257—4259
- [3] Shiratori T, Fujii E, Miyaoka Y, *et al.* High density magneto-optical recording with domain wall displacement detection. *J. Magn. Soc. Jpn.*, 1998, **22**(Suppl. 2): 47—50
- [4] Nakagawa K, Itoh A. Multi Wavelengths Readout for Multi-Valued MO Recording. *J. Magn. Soc. Jpn.*, 1996, **20**(Suppl. 1): 73—78
- [5] Zak J, Moog E R, Liu C, *et al.* Universal Approach to Magneto-optics. *J. Magn. Magn. Mat.*, 1990, **89**: 107—123
- [6] Landau L D, Lifshitz E M. *Electrodynamics of Continuous Media*. Oxford: Pergamon Press, 1984, 273
- [7] Itoh A, Nakagawa K, Shimazaki K, *et al.* High SNR readout method for double layered MO disk with single wavelength laser beam. *J. Magn. Soc. Jpn.*, 1999, **22**(Suppl. 2): 221—224