

激光照射下磁光盘片结构的热学优化新方法

周 健 宋惠忠 荀 坤 沈德芳

(中国科学院上海冶金研究所, 上海 200050)

摘 要 以激光照射下 TbFeCo 四层结构为例, 基于麦克斯韦 (Maxwell) 方程和坡印廷 (Poynting) 矢量定理, 提出了一种磁光盘片膜层结构的热学优化新方法。与常规的设计方法相比, 该方法不仅考虑了实际应用中的道跟踪需要, 而且运算更为简便, 因而对其它多层膜体系的优化设计有一定的参考价值。实验上, 根据该设计用直流共溅射方法成功地制备了 TbFeCo 四层膜并进行了相关测试, 结果表明, 设计的样盘有良好的静、动态读写性能。

关键词 磁光盘, 微盘, 直流共溅射, 热学优化新方法。

1 引 言

众所周知, 磁光盘以其储存密度高、可擦重写性能好等特点而倍受人们青睐。由于用以制造磁光盘的稀土-过渡金属在成分和结构上有较大范围的可调性, 如何适当调节其成分和结构对提高磁光盘层温度、降低激光写入功率显得尤为重要。常规的优化设计方法是借助有限元方法对热扩散方程进行数值运算, 给出多层膜中各层温度随时间 t 、横向位置 r 及纵向位置 z 的变化关系。调节各层的厚度, 计算磁光盘层的温度随各层层厚的变化规律, 从而达到提高磁光盘层温度的目的。该方法虽然能给出多层膜中的热传导的细节, 但计算量较大, 而且往往忽视了实际实验中信息道跟踪的需要。例如, 文献[1]中给出的信息道跟踪的反射率为 1.32%, 而实际应用中, 人们通常取 10% 左右的反射率进行信息跟踪。为了克服常规方法中的不足之处, 本文提出一种新的方法来准确而简便地进行多层膜膜层设计。

基于 TbFeCo 四层磁光薄膜, 借助麦克斯韦方程和坡印廷矢量定理进行推导, 得出垂直于 z 轴方向单位面积上流过的平均激光功率和各层厚度的关系表达式。进一步通过调节各层厚度, 观察增透层和中间层的平均激光功率的变化, 提出确定各层最佳厚度的尝试性热学优化新设想。实验上, 成功地制备了用于微盘(MD)的 TbFeCo 四层材料, 实验的具体细节已在文献[2]中作过报道。其读写性能基本符合 5.3 cm 可擦重写微磁光盘的使用要求。

2 TbFeCo 多层膜的热学结构优化

2.1 材料的选择

理想的磁光记录材料必须具备如下特点^[3]: 1) 居里温度在 150°C 到 200°C 之间; 2) 良好

的垂直磁各向异性; 3) 纳米量级的晶粒尺寸, 非晶态最好, 这可以保证记录和读出信号不受由于晶界引起的噪声影响。TbFeCo 系正是具有上述几个特点的磁光记录材料, 因而成为本工作的首选研究对象。该体系中 Co 含量高低对多层膜的居里温度、磁光效应、垂直各向异性都有较大影响。含 Co 量高的盘片磁光效应明显, 但居里温度高不利于信息写入; 含 Co 量过低又会减小材料的垂直各向异性。经比较, 选定材料配比为 Tb₂₈Fe₆₃Co₉。其居里温度为 195℃。在多层膜中引入中间层一方面是为了阻止磁光层中热量的纵向扩散, 从而提高磁光层温度; 另一方面, 中间层的引入还可以提高磁光薄膜的热学稳定性。因此, 在进行磁光薄膜设计时, 中间层必不可少。通常, 人们采用 SiO 作为中间层, 但有文献表明: AlN 替代 SiO 作为中间层对克尔转角有较大程度的增强^[4]。AlN 作为一种陶瓷电介质, 具有较小的热导率, 可以很好地防止温度的纵向扩散, 因此, 本文选择了 AlN 作为中间层。为了有效防止稀土-过渡金属非晶态合金薄膜的氧化和增加磁光层的光吸收, 采用 AlN 作为表面增透层, 选用 Al 作为反射层。

2.2 增透层、中间层合和磁光层厚度的调节

为了获得较大的克尔转角和较低的信息写入功率, 中间层、磁光层和增透层的厚度选择至关重要。如图 1 所示, 一束沿 Z 轴方向传输的平面偏振光垂直入射到多层膜面上。第 k 层内, 麦克斯韦方程可表示为:

$$\{d^2/dZ^2 + [2\pi m^{(k)}/\lambda_0]^2\} E_k(Z) = 0 \tag{1}$$

$$(d/dZ) E_k(Z) + i(2\pi/\lambda_0) H_k(Z) = 0 \tag{2}$$

由(1)式和(2)式解出 $E_k(Z)$ 和 $H_k(Z)$ 的表达式, 运用坡印廷矢量定理, 不难得出垂直于 Z 轴方向单位面积上流过的平均激光功率:

$$Y(Z) = \text{Re}[(1/2) E(Z) H^*(Z)] = (1/2) [n_r^{(k)} \left(\exp \{- [4\pi m_{im}^{(k)}/\lambda_0] (Z - \sum z_j) \} - |A_2^{(k)}|^2 \exp \{ [4\pi m_{im}^{(k)}/\lambda_0] (Z - \sum z_j) \} \right) - 2n_{im}^{(k)} |A_2^{(k)}| \sin \{ [4\pi m_{im}^{(k)}/\lambda_0] (Z - \sum z_j) + \Phi[A_2^{(k)}] \}] |A_1^{(k)}| \tag{3}$$

式中, j 从 k+ 1 到 N+ 1, $n_r^{(k)}$ 、 $n_{im}^{(k)}$ 为各层折射率的实、虚部。

$\Phi[A_2^{(k)}]$ 为 $A_2^{(k)}$ 的相角, $A_1^{(k)}$ 、 $A_2^{(k)}$ 为复常数, 大小为:

$$A_2^{(k)} = [(n^{(k, k-1)} + A_2^{(k-1)}) / (1 + n^{(k, k-1)} A_2^{(k-1)})] \exp \{- i[4\pi m^{(k)}/\lambda_0] z_k \} \tag{4}$$

$$n^{(k, k-1)} = [n^{(k)} - n^{(k-1)}] / [n^{(k)} + n^{(k-1)}], \quad 2 \leq k \leq N + 1$$

$$A_1^{(k)} = \left(\exp \{- i[2\pi m^{(k+1)}/\lambda_0] z_{(k+1)} \} + A_2^{(k+1)} \exp \{- i[2\pi m^{(k+1)}/\lambda_0] z_{(k+1)} \} \right) \times A_1^{(k)} / (1 + A_2^{(k)}), \quad 1 \leq k \leq N \tag{5}$$

$A_1^{(N+1)}$ 为入射光强, 取为 1.414。又由于基片上光的反射分量为零, 所以 $A_2^{(1)} = 0$ 。首先, 任意选定一种膜结构: 基片 1.2 mm/Al 30 nm/AlN (z_3)/TbFeCo 20 nm/AlN 32 nm, 根据(3)、(4)、(5)式, 不难得出通过垂直 Z 轴的单位面积的激光功率 $Y(Z)$ 随中间层厚度 z_3 的变化关系。如图 2 所示, 通过增透层单位面积的激光功率 y_5 和通过中间层单位面积的激光功率 y_3 随中间层厚度 z_3 的变化而周期性地变化(图中仅作出曲线的部分, 以确定 z_3 的最佳位置)。当 y_3 最小时 y_5 最大。 y_3 越小, Al 层吸收的激光功率越少; y_5 越大, 磁光层吸收的激光功率越多,

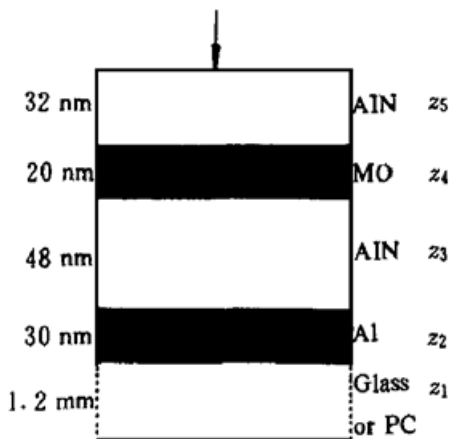


Fig. 1 Experimental optimum layer structure

对光盘结构的优化设计正是要寻找一个合适的 z_3 , 使得 $(y_5 - y_3)$ 达到最大。图 2 中画出了 $y_5 - y_3$ 随 z_3 的变化曲线, 结果发现在 z_3 取 48 nm 时 $y_5 - y_3$ 达最大, 因而, 所研究的多层膜中, 中间层的最佳厚度为 48 nm。为了确定磁光层的厚度, 选定膜结构为: 基片 1.2 mm/Al 30 nm/AlN 48 nm/TbFeCo(z_4)/AlN 32 nm 计算得图 3。如该图所示, 随磁光层厚度 z_4 的增加 y_3 从 0.25 下降到 0.05 后趋于平稳, y_5 先增大, 当 z_4 达 11.3 nm 时 y_5 达到最大, 而后降低。由于信息道跟踪的需要, y_5 不能取得太高, 一般选为 0.9, 图 3 中相应的磁光层厚度有两个:

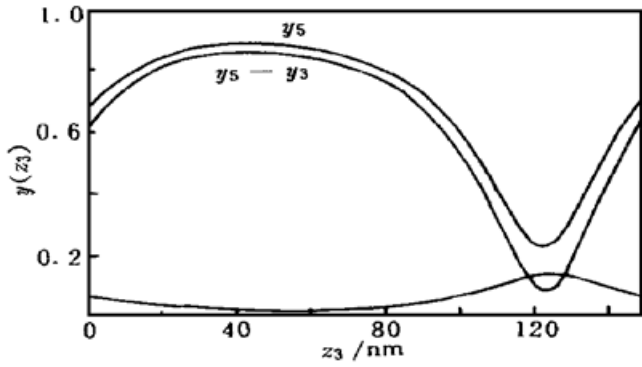


Fig. 2 The average amount of power per unit area that crosses the plane perpendicular to the Z axis at z vs the thickness of intermediate layer. Film structure: substrate 1.2 mm/Al 30 nm/AlN z_3 /TbFeCo 20 nm/AlN 32 nm

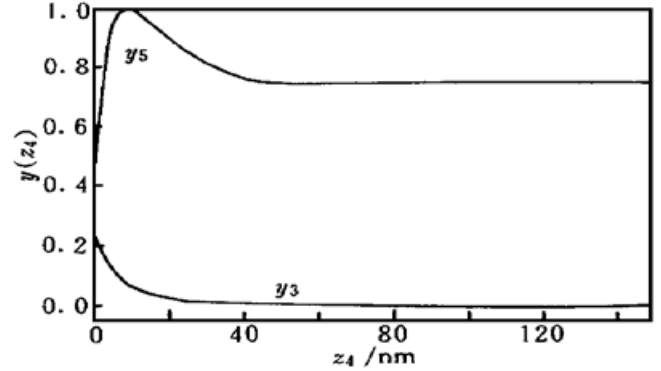


Fig. 3 The average amount of power per unit area that crosses the plane perpendicular to the Z axis at z vs the thickness of magnetic film. Film structure: substrate 1.2 mm/Al 30 nm/AlN 48 nm/TbFeCo z_4 /AlN 32 nm

6 nm 和 20 nm。由于单位磁光层厚度上的光能吸收可表示为 $(y_5 - y_3)/z_4$, 将该函数随磁光层厚度总的变化关系显示于图 4 中。如该图所示, 该函数随磁光层厚度 z_4 的增加而不断减小, 这说明, 磁光层越厚, 单位厚度上的光能吸收越少, 因此, 理论上来说, 磁光层的最佳厚度应为 6 nm。数值计算的结果(如图 7 所示), z_4 为 6 nm 时的磁光层温度为 249℃, 而 z_4 为 20 nm 时对应的磁光层温度为 212℃, 这从另一个角度证明了 6 nm 为最佳磁光层厚度的合理性。中间层和磁光层厚度确定后, 选定膜结构为: 基片 1.2 mm/Al 30 nm/AlN 48 nm/TbFeCo 6 nm/AlN(z_5)。类似地作出图 5。由该图不难看出, 随着增透层厚度 z_5 的不断增大, y_5 和 y_3 亦呈现周期性变化, 而且两者同时达到最大。相对于 y_5 来说, y_3 变化很小, 因而应主要考虑 y_5

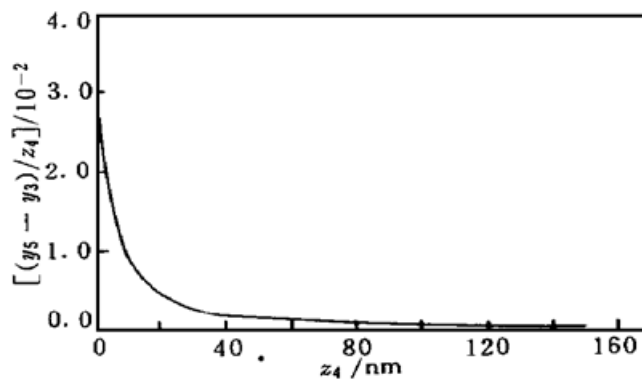


Fig. 4 The average amount of power per unit volume at z vs the thickness of magne film. Film structure: substrate 1.2 mm/Al 30 nm/AlN 48 nm/TbFeCo z_4 /AlN 32 nm

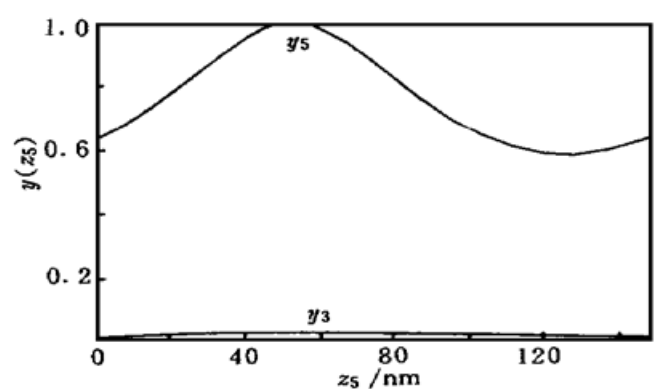


Fig. 5 The average amount of power per unit area that crosses the plane perpendicular to the Z axis at z vs the thickness of overcoat layer. Film structure: substrate 1.2 mm/Al 30 nm/AlN 48 nm/TbFeCo 6 nm/AlN z_5

的起伏对记录功率的影响。 γ_s 越高, 相应的热记录功率就越低。考虑到实际应用中信息道跟踪的需要, 相应地, 增透层厚度为 38 nm、69 nm。由于增透层越厚进入磁光层的光能越少, 所以该多层膜的最佳增透层厚度应为 38 nm。Al 反射层和基片的厚度对写入功率的影响很小, 这里不作讨论。这样, 所研究体系的理论最佳热学结构为: 基片 1.2 mm/Al 30 nm/AlN 48 nm/TbFeCo 6 nm/AlN 38 nm。

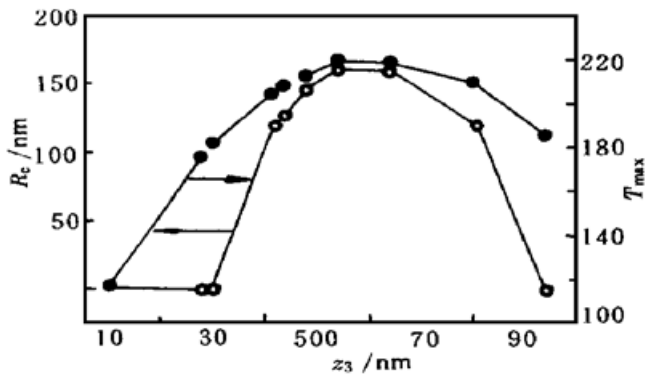


Fig. 6 Calculated temperature of magnetic film and Curie temperature radius vs the thickness of intermediate layer

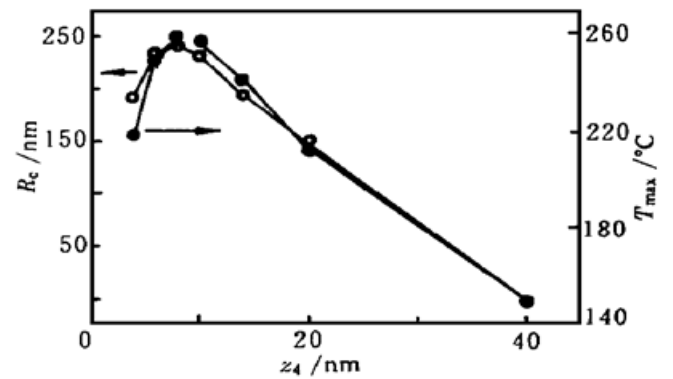


Fig. 7 Calculated temperature of magnetic film and Curie temperature radius vs the thickness of magnetic film

3 新优化方法和常规优化方法的比较

一般而言, 人们对膜层的优化大多采用有限元法等数值计算的手段。这种手段的主要思想是对高斯光束照射下的多层膜中的热扩散方程进行数值求解^[1], 得出磁光层温度的空间分布和时间分布, 然后对应于每一种膜结构, 经过运算可以得出相应的磁光层温度值 T_{\max} 、居里温度半径 R_c 和其它光学参数^[6]。通过热学和光学参数随各层厚度的变化关系来确定各层的厚度最佳值。为了对两种方法进行比较, 这里利用常规的优化方法对现研究体系加以考察。

这里, 选定膜结构为: 基片 1.2 mm/Al 30 nm/AlN(z_3)/TbFeCo 20 nm/AlN 32 nm, 用常规方法确定中间层的最佳厚度。计算用记录激光功率为 6 mW, 热学和光学参数参见表 1。通过反复计算, 把得出的磁光层最高温度 T_{\max} 和居里温度半径 R_c 随中间层 z_3 的变化关系显示于图 6 中。如该图所示, z_3 在 30~50 nm 之间不断增加时, 磁光层的居里温度半径 R_c 急剧增加, 说明中间层厚度增加使磁光层中的热量横向扩散加强, 从而导致磁光层持续升温。就这一点而言, 中间 AlN 层应厚为佳, 但中间层太厚时, 磁光层中的热扩散太多, 由于激光变动所引起热斑容易影响邻近磁畴的磁化状态, 使信号发生窜扰, 盘片的信噪比(SNR)降低。所以 AlN 的厚度应当有一个适当值。50~52 nm 之间时磁光层保持较高的温度(213°C 附近), 52 nm 以后 T_{\max} 将减小, 根据常规方法, 中间层最佳厚度约为 50 nm。这一厚度对应的磁光层温度为 213°C, 和通过新方法确定的厚度(48 nm)所对应的磁光层温度 212°C 相差不大。在确定中间层厚度时, 两种方法都无需考虑道跟踪要求, 计算确定的最佳中间层厚度非常接近。这从另一个角度验证了新方法的合理性。

下面来调节磁光层厚度。类似地, 选定膜结构为: 基片 1.2 mm/Al 30 nm/AlN 480 nm/TbFeCo(z_4)/AlN 32 nm, 计算结果显示图 7 中。图中, 随磁光层厚度的增加, T_{\max} 和 R_c 都先增大后减小。在磁光层厚度为 8 nm 时, 磁光层温度最高。根据常规方法, 8 nm 就是最佳磁光层厚度。这一结果和根据新方法运算所得结果定性上是一致的, 但定量上有差别。6 nm

对应的磁光层温度为 250°C , 而 8 nm 对应的磁光层温度为 258°C 。这一差别主要是由常规方法未考虑信息道跟踪的要求所至。实际应用中, 人们通常需要考虑 10% 左右的反射率来进行信息跟踪, 但如何在常规方法中对这一道跟踪要求加以考虑, 至今尚无报道。

从计算上来讲, 新方法要比常规方法要简捷。例如要得出图 6 中每一点计算机耗时 120 min , 而计算图 2 的三条曲线才需 5 min 。由此可见, 和常规的优化方法相比, 新方法不仅考虑了信息道跟踪的要求, 而且计算方法更为简捷。

4 实验结果与讨论

本实验中, 采用 20 nm 作为最佳磁光层厚度。经过类似于本文第二部分的处理, 可得出图 1 所示的实验理想结构: 基片 $1.2\text{ mm}/\text{Al } 30\text{ nm}/\text{AlN } 48\text{ nm}/\text{TbFeCo } 20\text{ nm}/\text{AlN } 32\text{ nm}$ 。图 1 利用共溅射的方法, 在预格式 PC 衬底上成功地制备了 $\text{Tb}_{28}\text{Fe}_{63}\text{Co}_9$ 为磁光层的磁性多层膜。实验具体细节参照文献 [2]。对材料进行了相关测试, 测试条件为: 激光功率为 $5\sim 6\text{ mW}$, 读出功率为 1 mW , 偏磁场 32 kA/m 。结果表明样盘在低偏磁场和低激光记录功率下都有良好的静态读写性能。经过 1000 次重复擦写后(偏磁场频率为 720 kHz), 其静态信号无衰减, 如图 8 所示, 说明在多次直接重写过程中有良好的擦除度。样盘的动态性能测试条件为: 盘片转速在 900 r. p. m. , 偏磁场为 12 kA/m 。测试表明信噪比大于 $40\text{ dB}^{[5]}$ 。总之, 采用新方法优化后, 盘片在低的读写功率下静、动态读写性能均良好。

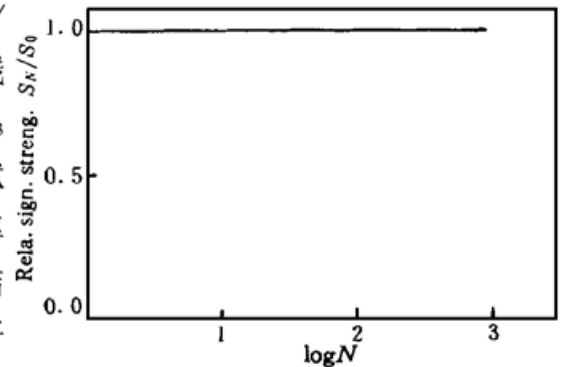


Fig. 8 Relative strength of readout signal S_N/S_0 vs the times of reading and writing (S_0 initial strength of readout signal, S_N the strength of readout signal after N_{th} reading and writing)

总 结 本文基于 TbFeCo 四层结构, 提出了一种磁光盘片膜层结构的热学优化方法。与常规的设计方法相比, 新方法更简单, 运算量小而且考虑了实际应用中的道跟踪要求。在最佳中间层厚度的设计过程中, 新方法的优化结果和常规方法的优化结果相一致, 因而具有盘片设计的合理性。根据该设计, 用直流共溅射方法成功地制备了 TbFeCo 四层膜并进行了相关测试, 结果表明, 设计的样盘有良好的静、动态读写性能。因此, 该设计方法, 不仅具有理论上的正确性、计算上的简捷性, 而且与实验结果相一致, 是一种值得推广的方法。

衷心感谢邓剑盈小姐在文章完成过程中给予的支持。感谢中科院上海冶金所四室刘世勇博士在数值计算部分程序设计方面给予了大力的帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Mansuripur M, Connell G A N, Googman J W *et al.*. Laser-induced local heating of multilayers. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(6): 1106~ 1114
- [2] 胡 琅, 宋惠忠, 沈德芳. 磁场调制直接重写磁光储存介质的记录特性研究. *功能材料学报*, 1998, **4**

(3) : 175~ 181

- [3] Williams E W. *The CD-ROM and Optical Disc Recording Systems*, Oxford: Science Publications, 1994. 105
- [4] Niihara T, Ohia N. Kerr enhancement by SiO and AlN films sputtered on plastic substrates. *IEEE Trans. Magn.*, 1986, **MAG-22**(5) : 1215~ 1217
- [5] 王 荣. 上海光学精密机械研究所博士论文, 1997.
- [6] Bhattacharyya M K, Cendes Z J. Finite-element modeling of laser beam heating of magnetic films. *J. Appl. Phys.*, 1985, **57**(1) : 3894~ 3896
- [7] Atkinson R, Salter I W, Xu J. Quadrilayer magneto-optic enhancement with zero Kerr ellipticity. *J. Magnetism & Magnetic Material*. 1991, **102** : 357~ 364

A New Thermal Design Method of Laser-Radiated MO Multilayer

Zhou Jian Song Huizhong Xun Kun Shen Defang

(*Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050*)

(Received 4 May 1998; revised 13 July 1998)

Abstract Based on the Maxwell equations and Poynting vector theorem, a new thermal design method of magneto-optical (MO) multilayer is presented taking the laser-radiated TbFeCo quadrilayer as an example. Compared with the conventional design method, the new method not only considers the practical need of tracking servo, but also shows great efficiency in calculation. It implies that this method can be used to the structure designing of other multilayers. According to the new designing, a TbFeCo quadrilayer was successfully made using the dc sputtering method. Corresponding static and moving measurements are carried out, which show good effects of reading and writing.

Key words magneto-optical disk, mini-disk, dc sputtering method, new thermal design method of magneto-optical multilayer.