

文章编号: 0253-2239(2004)03-531-5

# GdFeCo/AlN/TbFeCo 薄膜的变温磁化性能研究\*

张约品<sup>1,2</sup> 王现英<sup>1</sup> 林更琪<sup>3</sup> 李 震<sup>3</sup> 李佐宜<sup>3</sup> 沈德芳<sup>1</sup> 干福熹<sup>1</sup>

1 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800  
2 宁波大学光电子功能材料研究所, 宁波 315211  
3 华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074

**摘要:** 用磁控溅射法制备了 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜。振动样品磁强计和克尔磁滞回线测试装置的测试结果表明: 25 °C 不加外磁场时 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜读出层(GdFeCo)的极向克尔角为零, 读出层呈平面磁化; 125 °C 不加外场时读出层的克尔角最大(0.54°), 读出层的磁化方向为垂直磁化; 随着温度增高, 读出层由平面磁化转变为垂直磁化, 在 75 °C 到 125 °C 温度范围内读出层磁化方向很快从平面磁化转变为垂直磁化。对磁化过程的机理研究表明: 饱和磁化强度和有效各向异性常量影响读出层磁化方向的转变过程, 但主要受读出层饱和磁化强度的影响; 在较高温度时读出层的磁化强度较小, 退磁场能较小, 在静磁耦合作用下, 使 GdFeCo 读出层的磁化方向发生转变。制备的 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜适合作 CAD-MSR 记录介质。

**关键词:** 磁学; 磁光记录; 中心孔探测磁超分辨; 静磁耦合多层薄膜; 磁化

中图分类号: TQ597.91 文献标识码: A

## Temperature Dependence of Magnetization of Readout Layers in GdFeCo/AlN/TbFeCo Multilayer Films

Zhang Yuepin<sup>1,2</sup> Wang Xianying<sup>1</sup> Lin Gengqi<sup>3</sup> Li Zhen<sup>3</sup> Li Zuoyi<sup>3</sup> Shen Defang<sup>1</sup> Gan Fuxi<sup>1</sup>

1 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800  
2 Laboratory of Photo-Electronic Material, Ningbo University, Zhejiang Province, Ningbo 315211  
3 Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University  
of Science and Technology, Wuhan 430074

(Received 10 March 2003)

**Abstract:** The magnetostatically coupled multilayer films (GdFeCo/AlN/TbFeCo) were prepared by sputtering method. The measuring results by vibrating sample magnetometer and Kerr rotation hysteresis loop measurement indicate that the Kerr rotation angle of the readout layer (GdFeCo) at no external field is almost zero, and the magnetization direction of the readout layer is in-plane at 25 °C; the Kerr rotation angle of the readout layer has a maximal value (0.54) at 125 °C, the magnetization direction of the readout layer is perpendicular at 125 °C; the magnetization orientation of the readout changes from in-plane to perpendicular with the raise of the temperature. The magnetization direction of the readout layer changes rapidly from 75 °C to 125 °C. The magnetization mechanism of the films was studied. It was found that the magnetization reorientation of the GdFeCo layer is effected by the saturation magnetization and the effective anisotropy energy, but the transition occurs mainly as a result of the changes in the saturation magnetization. The saturation magnetization and the demagnetizing energy of the GdFeCo layer decrease with increasing temperature, and the transition of the GdFeCo layer from in-plane to perpendicular magnetization occurs. The films are suitable to be used as center aperture detection-magnetically superresolution (CAD-MSR) recording media.

**Key words:** magnetism; magneto-optical recording; center aperture detection type magnetically induced superresolution; the magnetostatically coupled multilayer films; magnetization

E-mail: zyp128@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-03-10

## 1 引 言

磁光存储作为一种光存储和磁存储并存的存储方式,既有光存储的大容量,又有磁存储的可擦重写、自由插换和硬磁盘相接近的平均存取速度的优点<sup>[1,2]</sup>。磁光数据存储作为一种重要的数据存储手段向着大容量快速发展。磁光记录密度主要是受激光光斑衍射极限的限制,记录点直径为  $d=0.5\lambda/NA$ ,其中  $\lambda$  为记录激光波长,  $NA$  为光学头的数值孔径。因此为了提高存储密度,可以使用短波长激光二极管和大数值孔径的透镜。但由于衍射极限的限制,以此提高存储密度是有限的。中心孔探测磁超分辨读出技术(Center aperture detection type magnetically induced superresolution, CAD-MSR)<sup>[3~10]</sup>可以在不改变现有磁光驱动器读出激光波长条件下通过静磁耦合多层薄膜来实现小尺寸记录畴读出,增加存储密度,因此引起人们很大的兴趣。中心孔探测技术与前孔径探测(Front aperture detection, FAD)<sup>[11]</sup>和后孔径探测(Rear aperture detection, RAD)技术<sup>[12,13]</sup>相比,具有膜层结构简单,并且读出时不需要外加磁场的优点,因而更有发展前景。

本文用磁控溅射法制备了具有中心孔探测磁超分辨效应的 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜,利用振动样品磁强计(VSM)和克尔磁滞回线测试装置研究了随着温度升高 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜读出层(GdFeCo)从平面磁化到垂直磁化的转变过程。

## 2 中心孔探测(CAD)磁超分辨读出原理

图 1 为静磁耦合多层薄膜磁超分辨读出原理图,磁光薄膜由读出层,中间层和记录层组成。在低温下读出层平面磁化,其极向克尔角为零,因而记录层的信息被其遮盖。在读出激光束照射下记录介质温度升高,在补偿温度附近,读出层显示垂直磁化,

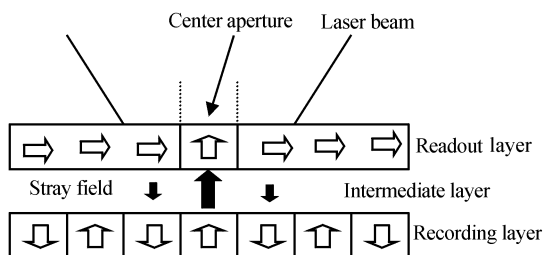


Fig. 1 Schematic diagram of readout mechanism of magnetostatically coupled films

这时通过记录层产生的漏磁场作用,使读出层复制记录层信息从此窗口读出。

## 3 实 验

GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜用磁控溅射法制备,制备 GdFeCo 和 TbFeCo 薄膜所用靶分别为 Gd 与 Fe<sub>75</sub>Co<sub>25</sub> 的复合靶和 Dy 与 Fe<sub>85</sub>Co<sub>15</sub> 的复合靶,FeCo 合金靶的直径为  $\phi 100$  mm。在 FeCo 合金靶上放置一些形状规则的 Gd 或 Tb 片,通过调整 Gd 和 Tb 片在靶面的径向位置和放置的片数来改变稀土-过渡族金属(rare earth-transition metal, RE-TM)薄膜中稀土成分比。清洗干净的玻璃用作样品衬底。靶和衬底之间的距离为 90 mm,溅射电压 350 V。溅射的本底真空度为  $1 \times 10^{-4}$  Pa,氩气溅射分压为 1 Pa。用 X 射线荧光光谱法分析稀土-过渡族金属薄膜的成分。薄膜厚度通过溅射时间控制。AlN 膜由 Al 和 N<sub>2</sub> 反应溅射获得。图 2 给出 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜的膜层结构。记录层和读出层的磁性能参量见表 1。读出层 GdFeCo 为富稀土的稀土-过渡族金属薄膜,补偿温度  $T_{\text{comp}}=150$  °C,居里温度 300 °C,记录层 TbFeCo 为富过渡族的稀土-过渡族金属薄膜,补偿温度  $T_{\text{comp}}$  小于室温,居里温度 250 °C。

克尔磁滞回线的测试激光波长为 650 nm,样品可以加热。磁特性用振动样品磁强计(VSM)测试,并在内置电阻丝的石英玻璃管内加热样品,测试变温的 VSM 磁滞回线。

Glass substrate
Protective layer AlN 80 nm
Readout layer GdFeCo 50 nm
Interlayer AlN 20 nm
Writing layer TbFeCo 40 nm
Protective layer AlN 80 nm

Fig. 2 The structure of GdFeCo/AlN/TbFeCo magnetostatically coupled films

Table 1 Magnetic properties for TbFeCo and GdFeCo monolayers

Layer	Reading layer	Writing layer
Material	GdFeCo	TbFeCo
Composition	Gd <sub>27</sub> (Fe <sub>75</sub> Co <sub>25</sub> ) <sub>73</sub>	Tb <sub>22</sub> (Fe <sub>85</sub> Co <sub>15</sub> ) <sub>78</sub>
$T_c$ /°C	300	250
$T_{\text{comp}}$ /°C	150	<R. T.
$H_c$ (kOe)	— in-plane	5
Dominant	RE-rich	TM-rich

## 4 实验结果和讨论

### 4.1 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜的变温 VSM 磁滞回线研究

图 3 是振动样品磁强计测得的外磁场垂直于膜面 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜的磁滞回线,图 3(a)和 3(b)分别是 25 °C 和 125 °C 时测得的 VSM 磁滞回线。比较实验测得的振动样品磁强计磁滞回线与计算的磁滞回线的形状可以分析读出层磁化方向的变化过程。

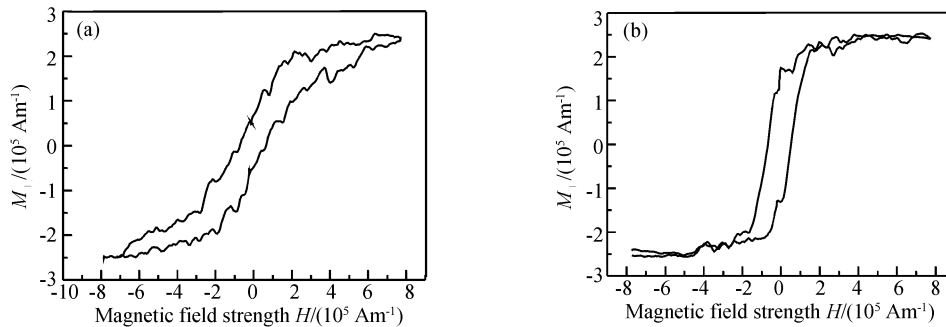


Fig. 3 M-H loops of the GdFeCo/AlN/TbFeCo magnetostatically coupled films measured by a vibrating sample magnetometer

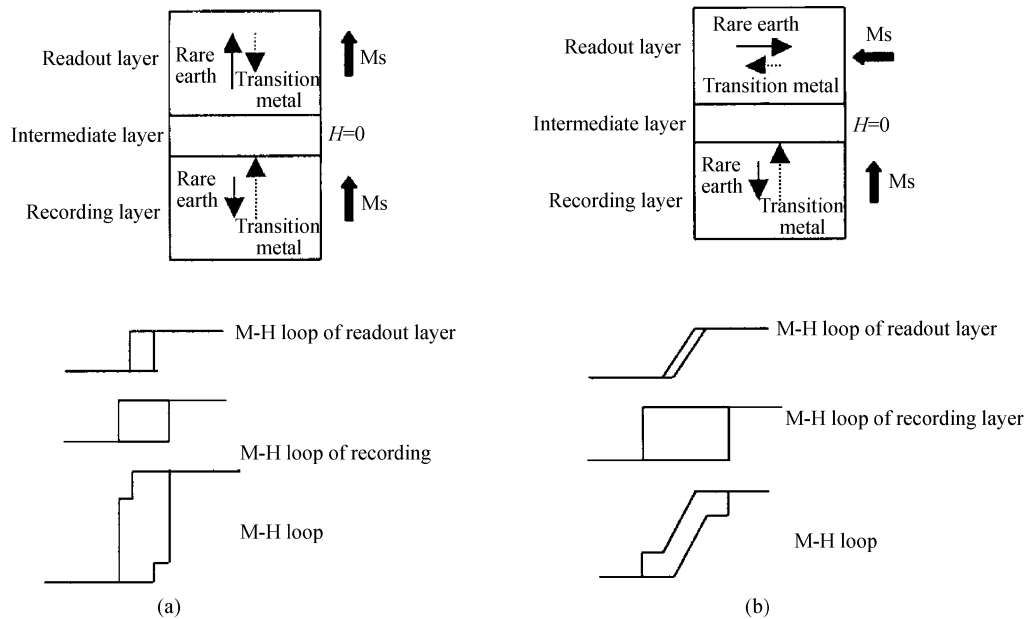


Fig. 4 Calculated magnetization curves of magnetostatically coupled films

比较图 3 中实验测得的 VSM 磁滞回线和图 4 计算的磁滞回线的形状,发现图 3(a)的形状与图 4 (b)相似,因此在室温时,读出层平面磁化。而图 3 (b)的形状与图 4(a)相似,因此可知读出层在 125 °C 转变成垂直磁化。从磁滞回线形状的分析结果,可知随着温度增高,读出层由平面磁化转变为垂直磁化。

对于磁化矢量均垂直于膜面的静磁耦合多层薄膜,两磁性层之间不存在界面畴壁,若  $H_{c1} \approx H_{c2}$ , 其中  $H_{c1}$  为读出层的矫顽力,  $H_{c2}$  为记录层的矫顽力, 则计算的磁化曲线如图 4(a) 所示。对于平面磁化/垂直磁化的静磁耦合多层薄膜,两磁性层之间不存在界面畴壁,若  $H_{s1} \approx H_{c2}$ , 其中  $H_{s1}$  为读出层磁化强度达到饱和时的磁场强度,  $H_{c2}$  为记录层的矫顽力, 则  $M_{s2} h_2 < M_{s1} h_1$  情形时静磁耦合多层薄膜的计算磁化曲线如图 4(b) 所示。

### 4.2 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜的磁光特性研究

在 25 °C 和 125 °C 时 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜读出层的克尔磁滞回线分别见图 5 (a)和(b),从图 5(a)可知,在 25 °C 不加外磁场时极向克尔角为零,读出层呈平面磁化。而从图 5(b)可知,加热到 125 °C 时,读出层  $\theta_{kr}/\theta_k \approx 1$ , 其中  $\theta_{kr}$  为剩

余克尔角,  $\theta_k$  为饱和克尔角, 不加外场时,  $\theta_{kr} = 0.54^\circ$ , 此时, 读出层的磁化方向已从平面磁化转变

为垂直磁化。

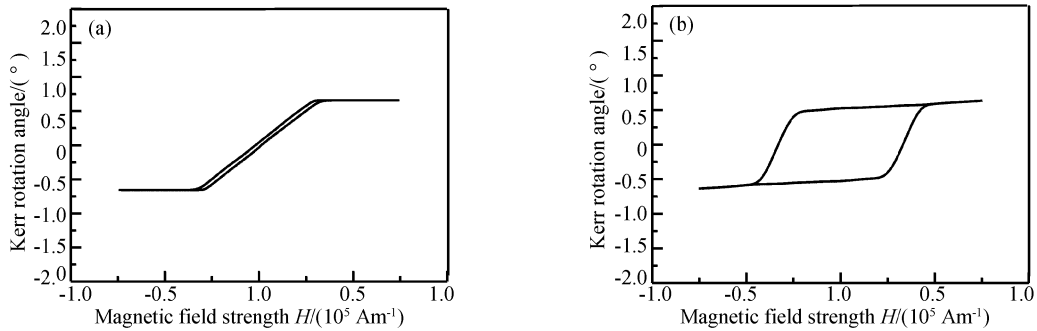


Fig. 5 Kerr hysteresis loops of readout layers. (a) at 25 °C; (b) at 125 °C

图 6 所示为 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜读出层的克尔角与加热温度之间的关系。从图可知, 随着温度升高, 静磁耦合多层薄膜读出层克尔角也随之增大, 读出层从平面磁化转变为垂直磁化, 因此静磁耦合多层薄膜具有中心孔探测磁超分辨效应。当温度小于 75 °C 时, 克尔角增加很慢, 克尔角几乎为零。当温度从 75 °C 上升到 125 °C 时, 克尔角快速增大。125 °C 时达到最大值, 而温度进一步升高时, 克尔角略有减小。在 75 °C 到 125 °C 温度范围内读出层磁化方向很快从平面磁化转变为垂直磁化。磁化方向快速变化有利于获得优的磁超分辨(MSR)性能。

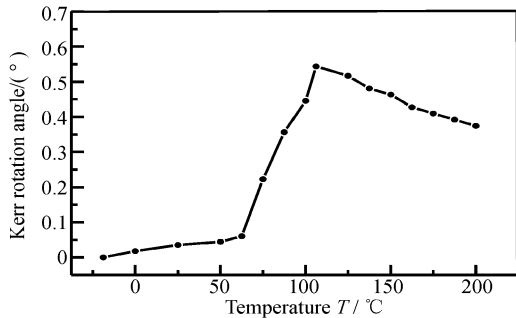


Fig. 6 Temperature dependence of the Kerr rotation angle of readout layers

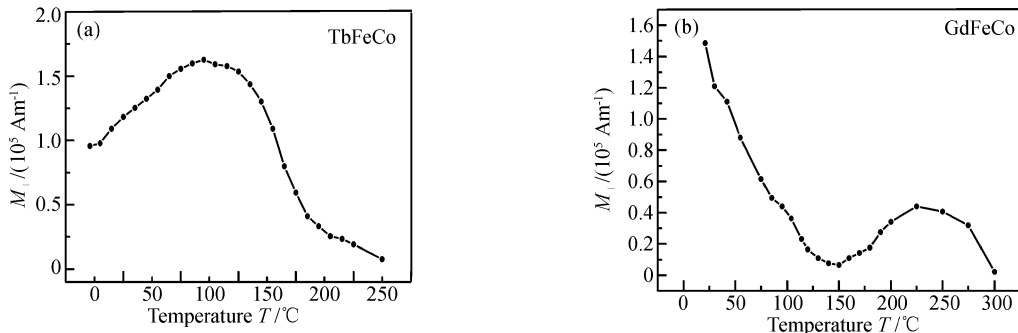


Fig. 7 Temperature dependence of the saturation magnetization  $M_s$  of recording and readout layers

磁光薄膜的磁化方向由有效各向异性常量( $K$ )决定

$$K = K_u - 2\pi M_s^2,$$

$K_u$  为垂直各向异性常量,  $2\pi M_s^2$  为退磁场能, 当有效各向异性常量  $K < 0$  时, 磁光薄膜呈平面磁化, 反之当有效各向异性常量  $K > 0$  时, 磁光薄膜为垂直磁化。

图 7(a) 和图 7(b) 分别为记录层 TbFeCo 和读出层 GdFeCo 饱和磁化强度  $M_s$  与温度的关系曲线。读出层 GdFeCo 是富稀土磁光薄膜, 在 25 °C 时, 由于退磁场能( $2\pi M_s^2$ ) 很大, 有效各向异性常量  $K < 0$ , 静磁耦合多层薄膜的读出层呈平面磁化。随着温度升高读出层磁化强度几乎直线下降, 因此退磁场能( $2\pi M_s^2$ ) 也随之快速下降。我们知道  $K_u$  随温度也下降<sup>[14]</sup>, 但退磁场能( $2\pi M_s^2$ ) 比  $K_u$  随温度下降更快。当温度上升到某一值时, 有效各向异性常量  $K > 0$ , 读出层 GdFeCo 转变为垂直磁化。记录层 TbFeCo 是富过渡磁光薄膜, 随温度上升其磁化强度有一最大值, 记录层产生的漏磁场在读出温度附近为极大, 有利于记录层的记录位向读出层转移。而当温度高于补偿温度时, 记录层的饱和磁化强度下降, 使得克尔角略有减小。因此饱和磁化强度和

有效各向异性常量随温度的变化影响了读出层的转变过程,但主要受读出层饱和磁化强度  $M_s$  的影响。

**结论** 成功制备了具有中心孔探测磁超分辨效应的 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜,读出层 GdFeCo 随温度升高从平面磁化转变为垂直磁化,转变过程中主要受读出层饱和磁化强度  $M_s$  的影响。在较高温度时读出层的饱和磁化强度较小,退磁场能减小,在静磁耦合作用下,使 GdFeCo 读出层的磁化方向发生转变。制备的 GdFeCo/AlN/TbFeCo 静磁耦合多层薄膜适合作 CAD-MSR 记录介质。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Y J. The present status and development of magneto-optical and magnetic storage. *Progress in Physics* (物理学进展), 1997, **17**(2):150~157 (in Chinese)
- 2 Ito A. Prospects of high-density magneto-optical memory. *J. Magn. Soc. Jpn.*, 2002, **26**(2):58~66
- 3 Nishimura N, Hiroki T, Ogada T *et al.*. Magnetostatic coupling MSR with in-plane magnetization films. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**(1):403~409
- 4 Tamanoi K, Shono K. Rear aperture detection on magnetostatically coupled magnetically induced magnetically induced superresolution medium. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**(1):410~414
- 5 Hirokane J, Takahashi A. Magnetically induced superresolution using interferential in-plane magnetization readout layer. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**(11): 5701~5704
- 6 Yang B W, Hwang W K, Shieh H P D. Readout scheme by pulsed irradiation center aperture detection on magneto-optical disks. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**(1):419~422
- 7 Sibaa R, Gall H L, Desvignes J M. Magnetization reorientation in ferromagnetic GdFeCo/DyFeCo double layers. *Phys. Rev. (B)*, 1998, **57**(13):5887~7891
- 8 Mergel D. Domain formation in exchange-coupled double layers. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(8):4520~4522
- 9 Kubogafa M, Hidaka Y, Hasegawa M *et al.*. Analysis of mark formation in exchange-coupled double-layer magneto-optical disk. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**(3):1732~1737
- 10 Ayres A M, Marinero E E. Exchange coupling in rare-earth/transition-metal multilayers for magnetic super-resolution. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(8):5680~5682
- 11 Kanno M, Okumura M, Nakaoki A *et al.*. A new write compensation pulse for high-density recording on magnetically induced super resolution (MSR) media. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**(1):398~402
- 12 Yoshimura S, Fukumoto A, Kaneko M *et al.*. High-density magneto-optical disk system using magnetically induced super resolution. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, **31**(2):576~579
- 13 Kaneko M, Aratani K, Ohta M. Multilayered magneto-optical disk for magnetically induced superresolution. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, **31**(2):568~575
- 14 Wang X Y, Zhang Y P. Analysis on the magnetization orientation of in-plane /perpendicular exchange-coupled double-layer magneto-optical films. *J. Chin. Rare Earth Society* (中国稀土学报), 2003, **21**(Suppl.):41~47 (in Chinese)