

GdFeCo/TbFeCo 磁超分辨磁光记录薄膜研究*

张约品¹ 夏海平¹ 李佐宜² 沈德芳³ 干福熹³

(1 宁波大学光电子功能材料研究所, 宁波 315211)

(2 华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

(3 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 用磁控溅射法制备了 GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜, 利用不同温度的克尔磁滞回线和 VSM 磁滞回线研究了读出层(GdFeCo)变温磁化方向变化过程. 结果表明, 随温度升高读出层从平面磁化转变为垂直磁化, 交换耦合两层薄膜具有中心孔探测磁超分辨的基本性能. 转变过程主要受饱和磁化强度(M_s)的影响, 在 GdFeCo 的补偿温度附近, 读出层的磁化强度较小, 退磁场能也较小, 在交换耦合的作用下, 使读出层(GdFeCo)的磁化方向发生转变. 磁化方向的转变在 75°C~125°C 的温度范围内变化较快.

关键词 磁光记录; 磁超分辨; 交换耦合两层薄膜; 磁化

中图分类号 O484.4⁺3 **文献标识码** A

0 引言

信息科学的飞速发展使得人们追求更高的存储密度和更小的存储点, 即超高密度信息存储^[1~3]. 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. 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^[4,5]. 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 Magnetically Induced Superresolution, CAD-MSR)^[6,7]可以在不改变现有磁光驱动器读出激光波长条件下通过交换耦合两层薄膜或静磁耦合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. 它与前孔径探测(Front Aperture Detection, FAD)^[8]和后孔径探测(Rear Aperture Detection, RAD)^[9,10]磁超分辨技术相比, 具有薄膜结构简单, 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基本效应的 GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜, 利用克尔磁滞回线和 VSM 磁滞回线研究了读出层(GdFeCo)变温磁化方向的转变过程, 用微磁理论计算了不同温度 GdFeCo/TbFeCo 薄膜的磁化方向(θ_z)分布, 实验结果和理论分析相一致.

1 实验

GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜用磁控射频溅射制备, 制备 GdFeCo 和 TbFeCo 薄膜的靶材分别采用 Gd 与 Fe₇₅Co₂₅复合靶和 Tb 与 Fe₈₅Co₁₅复合靶. 溅射的本底真空度 8×10^{-7} Torr. 通过改变溅射功率和氩气压调节薄膜成分. AlN 膜由 Al 和 N₂ 反应溅射获得. 用 X 射线荧光光谱法分析 RE-TM 薄膜的成分. 克尔磁滞回线的测试波长为 650 nm, 样品可以加热. 变温磁滞回线用振动样品磁强计(VSM)测试. GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜的膜层结构为 Substrate/AlN80 nm/GdFeCo50 nm/TbFeCo40 nm/AlN80 nm. 读出层 GdFeCo 为富稀土的 RE-TM 薄膜, 成分为 Gd₂₇(Fe₇₅Co₂₅)₇₃, 补偿温度 150°C, 居里温度 300°C; 记录层 TbFeCo 为富过渡族的 RE-TM 薄膜, 成分为 Tb₂₂(Fe₈₅Co₁₅)₇₈, 补偿温度小于室温, 居里温度 250°C.

2 结果和讨论

2.1 GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜的磁滞回线研究

图 1(a)和(b)分别是振动样品磁强计(VSM)测得 GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜在 25°C 和 125°C 时的磁滞回线. 用 Kobayashi 模型及扩展的 Kobayashi 模型分析实验得到的特殊磁滞回线, 可得到变温引起的读出层磁化方向的变化过程.

Kobayashi T 等人对磁化矢量均垂直于膜面的双层稀土-过渡族金属(RE-TM)非晶态交换耦合薄膜的磁化过程进行了研究^[11]. RE-TM 非晶态亚铁磁性薄膜的净磁矩可以由 RE 磁矩贡献(富 RE), 也可由 TM 支配(富 TM). 两层耦合薄膜可分成

* 宁波大学学科项目(XK200436)和宁波大学博士基金(2004020)资助

Tel: 0574-87600765 Email: zhangyuepin@nbu.edu.cn

收稿日期: 2004-07-05

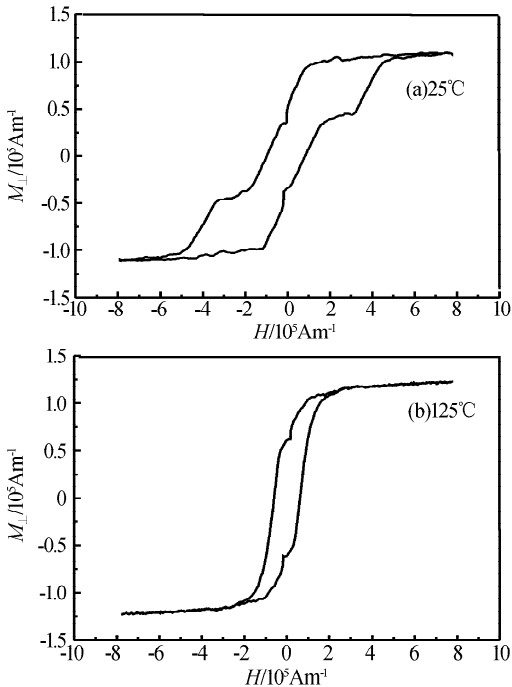


图1 交换耦合两层薄膜的磁滞回线

Fig. 1 M-H loops of the layers measured by VSM

两种类型. 类型 I: 第一层的磁矩和第二层的磁矩分别由 RE 和 TM 磁矩支配, 磁矩 M_{s1} 和 M_{s2} 反向排列, 定义为 A 型 (Antiparallel), 即两层间磁矩反平行排列. 类型 II: 第一层和第二层磁矩都由 TM 磁矩支配, 两层间的磁矩方向相同, 为 P 型排列 (Parallel), 即两层间磁矩平行排列, 见图 2. 对于 A 型磁光薄膜, 若 $H_{c1}^{exc} < H_{c2}^{exc}$, 其中 H_{c1}^{exc} 为读出层的矫顽力, H_{c2}^{exc} 为记录层的矫顽力, 则计算的磁化曲线应如图 2(a).

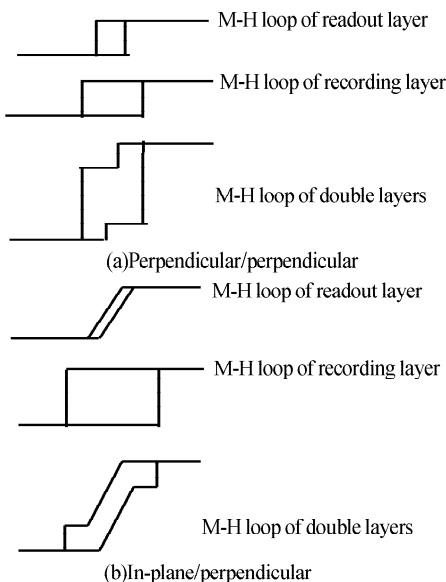


图2 交换耦合两层薄膜的计算磁化曲线

Fig. 2 Calculated magnetization curves of ECDL films

Sbiaa R 等人用扩展的 Kobayashi 模型对平面磁化/垂直磁化的双层交换耦合薄膜的磁化过程进行了研究^[12]. 对于 A 型磁光薄膜, 若 $H_{s1}^{exc} < H_{c2}^{exc}$, 其中

H_{s1}^{exc} 为读出层磁化强度达到饱和时的磁场强度, H_{c2}^{exc} 为记录层的矫顽力, 则计算的磁化曲线应如图 2(b).

25°C 时, GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜的读出层 GdFeCo 为富稀土 RE-TM 薄膜, 记录层 TbFeCo 为富过渡族的 RE-TM 薄膜, 为 A 型 (Antiparallel); 加温到 125°C 时, 低于读出层 GdFeCo 的补偿温度, 读出层还是富稀土的 RE-TM 薄膜, 而记录层 TbFeCo 仍是富过渡族的 RE-TM 薄膜, 读出层, 也为 A 型 (Antiparallel). 比较图 1 中实验得到的磁滞回线和图 2 计算的理想磁滞回线的形状, 发现图 1(a) 的形状与图 2(b) 相似, 而图 1(b) 的形状与图 2(a) 相似. 因此可推断读出层 GdFeCo 在 25°C 时为平面磁化, 升温到 125°C 时转变为垂直磁化. 随着温度升高, 读出层 GdFeCo 从平面磁化转变为垂直磁化.

2.2 GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜的磁光性质

GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层磁光薄膜读出层在 25°C 和 125°C 的克尔磁滞回线分别见图 3(a) 和 (b). 从图 3(a) 可知, 在 25°C 不加外磁场时极向克尔角为零, 读出层平面磁化. 而从图 3(b) 可知, 加热到 125°C 时, 读出层 $\theta_{kr}/\theta_k \approx 1$, 其中 θ_{kr} 为剩余克尔角, θ_k 为饱和克尔角, 不加外场时, $\theta_{kr} = 0.51^\circ$, 读

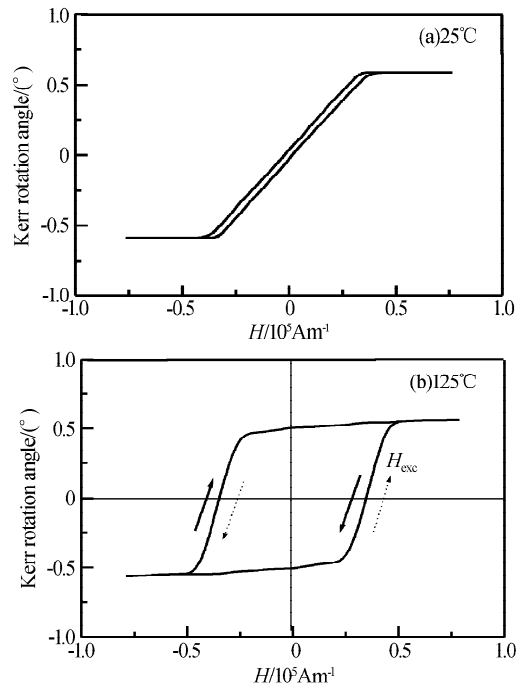


图3 读出层的克尔磁滞回线

出层的磁化方向已从平面磁化转变为垂直磁化. 另外, 125°C 时交换耦合两层薄膜读出层的克尔磁滞回线轨迹走向与通常 RE-TM 单层磁光薄膜克尔磁滞回线的轨迹相反, 见图中实箭头所示. 图中虚箭头表示一般 RE-TM 的克尔磁滞回线轨迹走向. 温度

低于读出层补偿温度时,读出层的净磁矩与 RE 磁矩同向,而记录层的净磁矩与 TM 磁矩同向,当外加磁场时,读出层和记录层的磁耦合消失,两层的磁矩反方向排列,当外磁场小于 H_{exc} 时,读出层的磁化方向跟记录层的方向一致,说明由于交换耦合的作用,读出层 TM 的磁化方向与记录层的 TM 的磁化方向一致. H_{exc} 表示读出层与记录层的耦合力.

图 4 为 GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜读出层的克尔角与温度之间的关系. 随着温度升高,交换耦合两层薄膜读出层克尔角随之增大,读出层从平面磁化转变为垂直磁化,因此交换耦合薄膜具有中心孔探测磁超分辨的基本效应. 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,克尔角迅速增加. 125°C 时达到最大值,而温度进一步升高时,克尔角又缓慢地下降. 在 75°C 到 125°C 温度范围内读出层磁化方向从平面内磁化转变为垂直磁化. 在该温度范围内磁化方向快速变化有利于获得优良 MSR 性能.

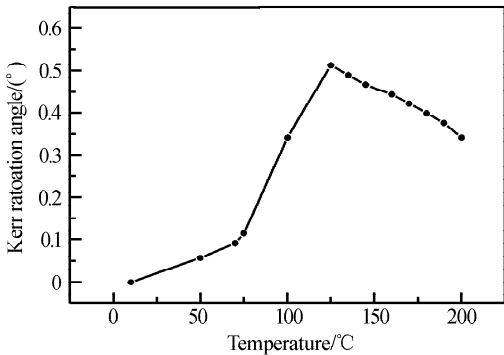


图 4 读出层克尔角与温度的关系
Fig. 4 Temperature dependence of the Kerr rotation angle of readout layers

读出层及记录层的交换常数(A),饱和磁化强度(M_s)和有效各向异性常数(K)等参数的大小影响读出层磁化强度的方向,但主要受饱和磁化强度 M_s 的影响. 图 5 为记录层和读出层单层膜的饱和磁化强度 M_s 与温度的关系曲线. 读出层采用富稀土磁光薄膜,随着温度上升,接近读出层的补偿温度时,磁化强度变小. 记录层为室温补偿成份,随温度上升其磁化强度增大,有利于记录层的记录位向读出层复制. 在 GdFeCo 的补偿温度附近,读出层的磁化强度较小,退磁场能也较小,在交换耦合的作用下,使 GdFeCo 读出层的磁化方向发生转变.

2.3 微磁理论分析

为了分析磁化转变过程,用连续模型计算了 GdFeCo/TbFeCo 交换耦合薄膜磁化方向沿垂直于膜面方向 Z 轴的分布. 交换耦合薄膜单位面积的总自由能 E 可表示为磁化方向 θ 的函数

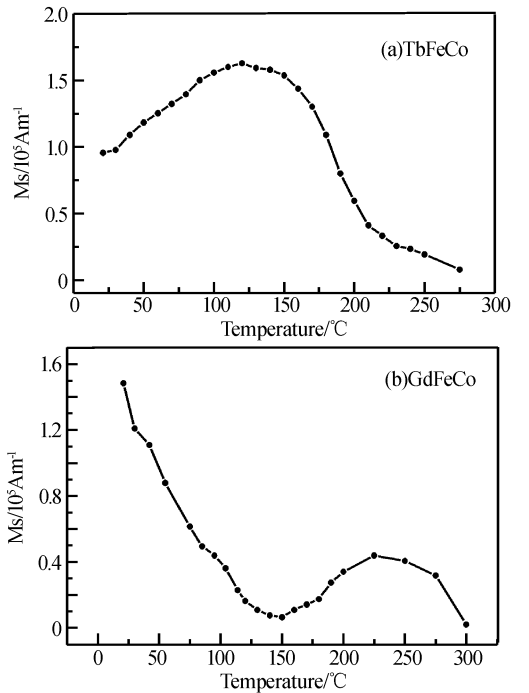


图 5 饱和磁化强度 M_s 与温度的关系曲线
Fig. 5 Temperature dependence of M_s

$$E = \int_0^{a_1} \left[A_1 \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 - K_1 \sin^2(\theta) + M_1 H \cos(\theta) \right] dz + \int_0^{a_2} \left[A_2 \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 + K_2 \sin^2(\theta) + M_2 H \cos(\theta) \right] dz$$

式中 $A_{1,2}$, $M_{1,2}$, $K_{1,2}$, $a_{1,2}$ 分别是平面磁化层和垂直磁化层的交换常数,饱和磁化强度,有效各向异性常数和厚度. θ_z 是磁化方向与 Z 轴的夹角. 通过求上式 $E(\theta)$ 的最小值得到磁化方向的平衡态分布(θ_z).

图 6(a)是磁化方向分布简图,图 6(b)是计算的不同温度下从记录层底部到读出层表面的沿 Z 轴磁化分布. 在 20°C 到 75°C ,由于读出层的退磁场能较强,记录层和读出层的交换耦合不足以使读出层

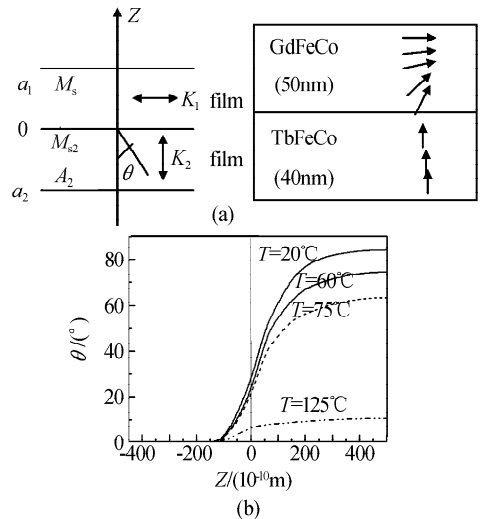


图 6 (a)磁化方向分布,(b)不同温度的磁化方向分布
Fig. 6 (a)Schematic diagram of the magnetization, (b)Calculated profile of magnetization direction at various temperature

的磁化方向发生转变,读出层平面磁化. 在接近补偿温度时,由于退磁场能的减小,及在交换耦合力的作用下,读出层由平面磁化转变成垂直磁化. 因此,实验结果与微磁理论计算结果相一致的.

3 结论

成功制备了具有中心孔探测磁超分辨基本效应的 GdFeCo/TbFeCo 交换耦合两层薄膜,磁滞回线和克尔磁滞回线研究均表明,读出层 GdFeCo 的磁化方向随温度升高从平面磁化转变为垂直磁化,转变过程中主要受饱和磁矩 M_s 的影响. 在 GdFeCo 的补偿温度附近,读出层的磁化强度较小,退磁场能也减小,磁化方向的转变速度较快. 随温度变化磁化方向快速变化有利于获得优良的 MSR 性能.

参考文献

- 1 贺锋涛,冯晓强,百永林,等. 绿光光存储实验研究. 光子学报,2004,**33**(6):761~764
He F T, Feng X Q, Bai Y L, et al. Acta Photonica Sinica, 2004,**33**(6):761~764
- 2 胡迪青,谢长生. 体全息存储中二维交错编码技术的研究与实现. 光子学报,2003,**32**(7):823~825
Hu D Q, Xie C S. Acta Photonica Sinica, 2003,**32**(7):823~825
- 3 王学恩,范兆忠,张禄,等. 金属覆层光纤探针近场特性研究. 光子学报,2004,**33**(8):912~915
Wang X E, Fan Z Z, Zhang L, et al. Acta Photonica Sinica, 2004,**33**(8):912~915
- 4 Ito A. Prospects of high-density magneto-optical

- memory. *J Magn Soc Jpn*, 2002,**26**(2):58~66
- 5 郑宏志,马彩文,吴易明,等. 无机械连接方位角测量系统中磁光调制的温度适应性研究. 光子学报,2004,**33**(5):638~640
Zheng H Z, Ma C W, Wu Y M, et al. Acta Photonica Sinica, 2004,**33**(5):638~640
 - 6 Nishimura N, Hiroki T, Ogada T, et al. Magnetostatic coupling MSR with in-plane magnetization films. *Jpn J Appl Phys*, 1996,**35**(Pt. 1, No. 1B):403~409
 - 7 Hirokane J, Takahashi A. Magnetically induced superresolution using interferential in-plane magnetization readout layer. *Jpn J Appl Phys*, 1996, **35**(Pt. 1, No. 11):5701~5704
 - 8 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**(Pt. 1, o. 1B):398~402
 - 9 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**(Pt. 1, No. 2B):576~579
 - 10 Kaneko M, Aratani K, Ohta M. Multilayered magneto-optical disk for magnetically induced superresolution. *Jpn J Appl Phys*, 1992,**31**(Pt. 1, No. 2B):568~575
 - 11 Kobayashi T, Tsuji H, Tsunashima S, et al. Magnetization process of exchange-coupled ferromagnetic double ferromagnetic double-layered films. *Jpn J Appl Phys*, 1981,**20**(11):2089~2095
 - 12 Sbiaa R, Gall H L, Desvignes J M, et al. Magnetization process in exchange-coupled double-layer films with in-plane and perpendicular anisotropy. *J Magn Magn Mater*, 1998,**183**(1-2):247~253

GdFeCo/TbFeCo Films for Magnetic Super Resolution Magneto-optical Recording

Zhang Yuepin¹, Xia Haiping¹, Li Zuoyi², Shen Defang³, Gan Fuxi³

¹ Laboratory of Photo-Electronic Material, Ningbo University, Ningbo 315211

² Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

³ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2004-07-05

Abstract The exchange-coupled double layers (GdFeCo/TbFeCo) were prepared by sputtering method. The magnetization transition caused by temperature changes has been investigated by the hysteresis loops and the Kerr rotation hysteresis loops. The results indicate that the magnetization direction of readout layer changes from in-plane to perpendicular with temperature increasing. The films have the basic properties of the CAD-MSR disks. The transition occurs mainly as a result of the changes in the saturation magnetization. When the temperature is increased to the compensation temperature, the saturation magnetization and the demagnetizing energy of the GdFeCo layer decrease, with the exchange-coupled interaction, the magnetization direction of readout layer changes from in-plane to perpendicular.

Keywords Magneto-optical recording; Magnetic super resolution; Exchange-coupled double layers (ECDL); Magnetization



Zhang Yuepin an associate professor of Ningbo University, was born in 1968, in Zhejiang, China. He obtained the Ph. D. degree in 2003 from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica. He is interested in photo-electronic materials and devices.