

GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜 磁化方向转变的研究

张约品^{1,2)} 王现英¹⁾ 林更琪³⁾ 李 震³⁾ 李佐宜³⁾ 沈德芳¹⁾ 干福熹¹⁾

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

(2003 年 3 月 14 日收到 2003 年 5 月 13 日收到修改稿)

用磁控溅射法制备了 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜, 对交换耦合两层薄膜变温磁化方向进行了研究。结果表明读出层 GdFeCo 随温度上升从平面磁化转变成垂直磁化, 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, 读出层的磁化强度近于零, 退磁场能减小, 并在交换耦合的作用下, 使读出层的磁化方向发生转变, 制备的交换耦合两层薄膜具有中心孔磁超分辨效应。

关键词: 磁光记录, 交换耦合两层薄膜, 磁化

PACC: 7820L, 7530E, 7560

1. 引 言

磁光存储作为一种重要的数据存储手段近年来不断向着大容量快速发展^[1]。磁光记录密度主要是由激光光束的大小决定的, 记录点直径为 $d = 0.5\lambda/NA$, 其中 λ 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, 选择短波长记录材料^[2-4]。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, CAD)^[5-10]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。交换耦合两层薄膜由读出层和记录层组成。在室温下, 读出层平面磁化, 极向克尔角为零。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, 这时通过交换耦合作用, 读出层磁化强度转向记录层磁化方向, 记录信号被复制到读出层上, 记录信息从此窗口读出。中心孔探测技术与前孔径探测(front aperture detection, FAD)^[11]和后孔径探测技术(rear aperture

detection, RAD)^[12-13]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/DyFeCo 交换耦合两层薄膜, 利用磁滞回线和克尔回线研究了 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜变温磁化方向的变化, 实验结果和理论分析一致。

2. 实 验

GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜用磁控溅射法制备。制备 GdFeCo 和 DyFeCo 薄膜所用的靶分别为 Gd 与 Fe₇₅Co₂₅ 的复合靶和 Dy 与 Fe₈₅Co₁₅ 的复合靶, FeCo 合金靶的直径为 100mm, 在 FeCo 合金靶上放置一些形状规则的 Gd 或 Dy 片, 通过调整 Gd 和 Dy 片在靶面的径向位置和放置的片数来改变稀土-过渡族合金(rare earth-transition metal, RE-TM)薄膜中 RE 的成分比。清洗干净的玻璃用作样品衬底。靶与玻璃衬底之间的距离为 90mm, 溅射电压 350V, 溅射的本底真空中 1×10^{-4} Pa, 氩气溅射分压 1Pa。用 X 射

线荧光光谱法分析 RE-TM 薄膜的成分,薄膜厚度通过溅射时间控制。AlN 膜由 Al 和 N₂ 反应溅射获得。图 1 给出 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层磁光薄膜的膜层结构,激光束从玻璃衬底一侧垂直膜面入射。记录层和读出层的磁性能参数见表 1。读出层 GdFeCo 为富稀土的 RE-TM 薄膜,补偿温度 $T_{\text{comp}} = 150^\circ\text{C}$,居里温度 300°C ,记录层 DyFeCo 为富过渡族的 RE-TM 薄膜,补偿温度 T_{comp} 小于室温,居里温度 270°C 。克尔磁滞回线的测试波长为 650 nm,样品可以加热,用振动样品磁强计(VSM)测试变温磁滞回线。

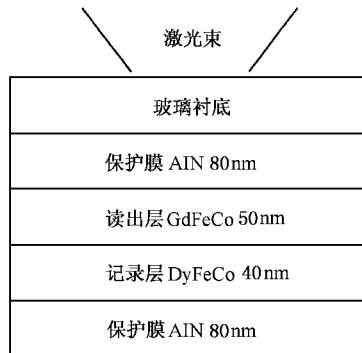
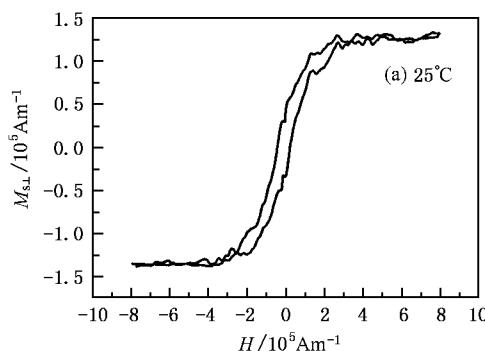


图 1 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层磁光薄膜膜层结构

表 1 GdFeCo 和 DyFeCo 单层薄膜的磁性能

膜层	材料	成分	$T_C/^\circ\text{C}$	$T_{\text{comp}}/^\circ\text{C}$	$H_C/10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	成分类型
读出层	GdFeCo	$\text{Gd}_2(\text{Fe}_{75}\text{Co}_{25})_3$	300	150	—	RE-rich in-plane
记录层	DyFeCo	$\text{Dy}_{25}(\text{Fe}_{85}\text{Co}_{15})_{75}$	270	< R.T.	3.9	TM-rich



3. 实验结果和讨论

3.1. GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜的变温磁滞回线

图 2 是 VSM 测得外磁场垂直于膜面的 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜的磁滞回线,图 2(a)和(b)分别是 25°C 和 130°C 时测得的磁滞回线。我们用 Kobayashi 模型及扩展的 Kobayashi 模型分析了磁滞回线来判断读出层磁化方向的变化过程。

Kobayashi 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)非晶态耦合薄膜的磁化过程进行了研究^[14]。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)。两层耦合膜可分成两种类型。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,定义为 P 型(parallel),即两层间磁矩平行排列。对于 A 型磁光薄膜,若 $H_{\text{cl}}^{\text{exc}} \approx H_{c2}^{\text{exc}}$,其中 $H_{\text{cl}}^{\text{exc}}$ 为读出层的矫顽力, H_{c2}^{exc} 为记录层的矫顽力,则计算的磁化曲线如图 3(a)所示。

Sbiaa 等人对平面磁化/垂直磁化的双层耦合薄膜的磁化过程进行了研究^[15]。对于 A 型磁光薄膜,若 $H_{s1}^{\text{exc}} < H_{c2}^{\text{exc}}$,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,则计算的磁化曲线如图 3(b)所示。

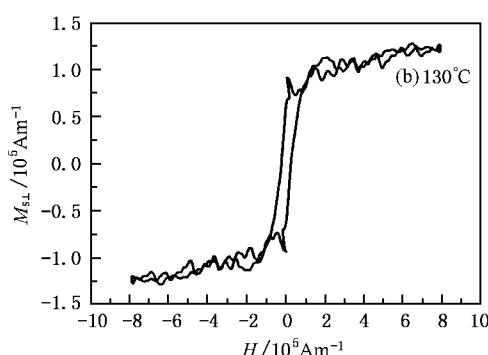


图 2 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜的磁滞回线

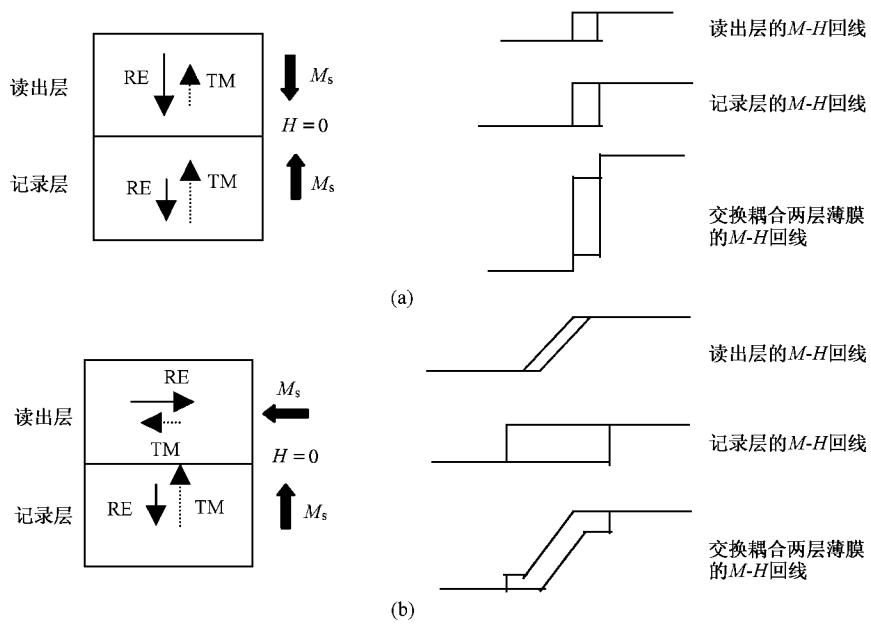


图 3 交换耦合两层薄膜的计算磁化曲线 A型

25℃时,读出层 GdFeCo 为富稀土的 RE-TM 薄膜,记录层 DyFeCo 为富过渡族的 RE-TM 薄膜,两层间磁矩反平行排列,为 A 型。130℃时,低于读出层 GdFeCo 的补偿温度,属于富稀土的 RE-TM 薄膜,记录层 DyFeCo 仍是富过渡族的 RE-TM 薄膜,两层间磁矩反平行排列,仍为 A 型。比较图 2 中实验得到的磁滞回线和图 3 计算的理想磁滞回线的形状,发现图 2(a)的形状与图 3(b)相似,因此,在室温时,读出层为平面磁化,可能由于读出层平面磁化的转变是渐变过程,使图 2(a)中没有小磁滞回线。而图 2(b)的形状与图 3(a)相似,因此可知,读出层在 130℃为垂直磁化。130℃时,可能由于 H_{s1}^{ex} 与 H_{s2}^{ex} 相差不大和畴壁能 σ_w 较小,而使图 2(b)中没有小磁滞回线。从磁滞回线形状的分析结果,可知当温度升高时,读出层由平面磁化转变为垂直磁化。

3.2. GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜的变温克尔磁滞回线

GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层磁光薄膜读出层在 25℃和 130℃的极向克尔磁滞回线分别见图 4(a)和(b),从图 4(a)可知,在 25℃不加外磁场时极向克尔角为零,读出层平面磁化。而从图 4(b)可知,加热到 130℃时,读出层 $\theta_{\text{kr}}/\theta_k \approx 1$,其中 θ_{kr} 为剩余极向克尔角, θ_k 饱和极向克尔角,不加外场时, $\theta_k = 0.52^\circ$,此时,读出层的磁化方向已从平面磁化转变为垂直磁化。另外 130℃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 薄膜克尔磁滞回线的轨迹相反,见图中实箭头所示,虚箭头表示一般 RE-TM 单层薄膜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_x 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_x 表示读出层与记录层的耦合力。

图 5 所示为 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜读出层的极向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极向克尔角随之增大。对于亚铁磁性介质,极向克尔角随着磁化强度的垂直分量增大而增大。极向克尔角的增大,说明磁化强度的垂直分量增大,而读出层磁化强度随温度升高呈下降趋势,因此读出层的磁化方向随温度升高,逐渐趋于垂直。当温度低于 80℃时,极向克尔角增加很慢,极向克尔角几乎为零。当温度从 80℃升到 130℃时,极向克尔角快速增大。130℃时达到最大值,而温度进一步升高时,极向克尔角又缓慢下降。在这温度范围内读出层磁化方向从平面磁化转变为垂直磁化。因此 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜具有中心孔探测磁超分辨效应。80℃到 130℃之间磁化方向快速变化有利于获得优异的 MSR 性能。

我们认为读出层及记录层的交换常数(A),包

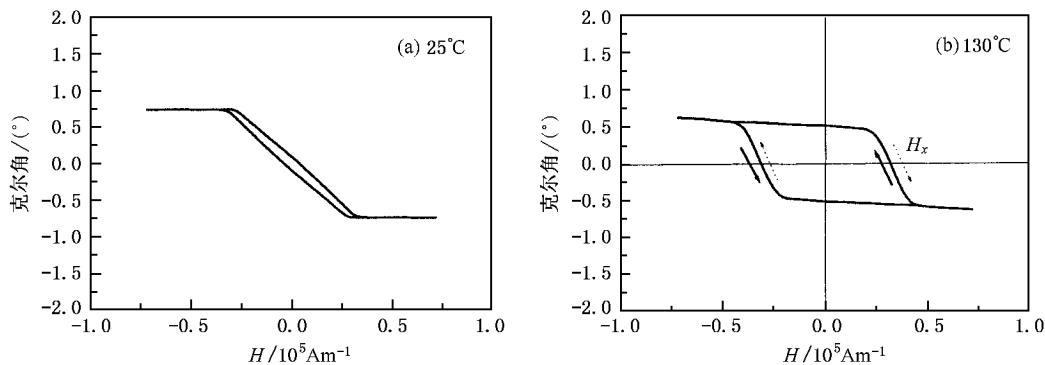


图4 $\text{GdFeCo}/\text{DyFeCo}$ 交换耦合两层薄膜读出层的克尔磁滞回线 (a) 25°C (b) 130°C

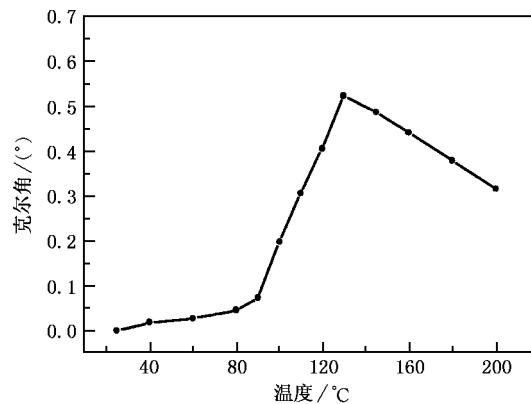


图5 $\text{GdFeCo}/\text{DyFeCo}$ 交换耦合两层薄膜读出层克尔角与温度的关系

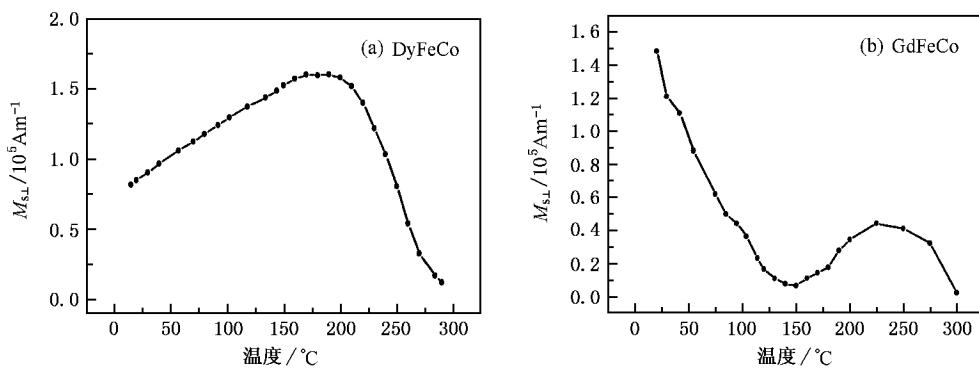


图6 记录层(DyFeCo)和读出层(GdFeCo)的饱和磁化强度 M_s 与温度的关系曲线

和磁化强度(M_s)和有效各向异性常数(K)的大小影响读出层的磁化方向,但主要受饱和磁矩(M_s)的影响^[16]。图6为饱和磁化强度(M_s)与温度的关系曲线。读出层采用富稀土磁光薄膜,温度上升时,读出层的磁光薄膜温度渐近补偿温度,磁化强度变小。记录层

为室温补偿成分,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,读出层的磁化强度近于零,退磁场能减小,并在交换耦合的作用下,使GdFeCo读出层的磁化方向发生转变。

3.3. 微磁理论分析

我们用连续模型计算了不同温度时 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜磁化方向沿垂直于膜面的 Z 轴的分布, 图 7(a) 所示为磁化方向分布示意图。对于一个由平面磁化层/垂直磁化层组成的两层磁光薄膜体系, 假设沿 Z 轴磁化方向均匀分布, 则单位面积磁能量 E 可以表示为^[16]

$$E = \int_0^{a_1} \left[A_1 \left(\frac{d\phi}{dz} \right)^2 - K_1 \sin^2 \phi + M_1 H \cos \phi \right] dz + \int_{-a_2}^0 \left[A_2 \left(\frac{d\phi}{dz} \right)^2 + K_2 \sin^2 \phi + M_2 H \cos \phi \right] dz,$$

其中 $A_{1,2}$, $M_{1,2}$, $K_{1,2}$ 和 $a_{1,2}$ 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。有效各向异性常数 $K_{1,2}$ 等于本征各向异性常数 $K_{u1,2}$ 减去 $2\pi M_{1,2}^2$, 此处为其绝对值。 H 为外加磁场。 ϕ_z 是磁化方向与 Z 轴的夹角。磁化方向的平衡态分布(ϕ_z)通过求上式 $E(\phi)$ 的最小值可得到。

计算用到的不同温度下的磁性参数($M_{1,2}$, $A_{1,2}$, $K_{1,2}$)的值通过分子场理论求得。利用计算的磁性参数, 分别计算不同温度下的双层膜膜内磁化方向分布。不同温度下沿 Z 轴磁化分布的计算结果见图 7(b)。显然, 图 7(b) 中磁化方向分布曲线与温度的关系曲线变化依赖于磁性参数($M_{1,2}$, $A_{1,2}$, $K_{1,2}$)与温度之间关系, 即不同温度磁化方向分布的改变是两个单层膜的交换常数、有效各向异性常数和饱和磁化强度与温度变化之间关系的综合效应。

图 7(b) 中 20°C 时的磁化方向沿 Z 轴的分布曲线表明, 磁化方向在读出层内连续分布, 由界面处的接近垂直逐步过渡到表面处的平面磁化, 而记录层的磁化方向在离界面 10nm 处为完全的垂直磁化, 读出层表面处的夹角 ϕ 为 80°, 小于 90°。这是由于两层的交换耦合作用, 使整个读出层内与 Z 轴的夹角都小于 90°, 在读出层表面处, 也难以得到完全的平面磁化。随着温度变化, 读出层表面处的夹角 ϕ 也随之发生变化。20°C, 50°C, 70°C 和 130°C 时读出层表

面处 M_s 与 Z 轴的夹角 ϕ 分别为 80°, 70°, 60° 和 10°。读出层表面处的 ϕ 角随着温度升高而减小, 说明读出层磁化方向逐渐由接近于平面磁化向接近于垂直磁化过渡。在 130°C 时, $\phi \approx 10^\circ$, 说明读出层表面已接近垂直磁化。极向克尔效应是表面磁光效应。因此, 读出层的极向克尔角随着温度升高也会增大。这个理论分析结果与本文 3.2 节的实验结果是一致的。

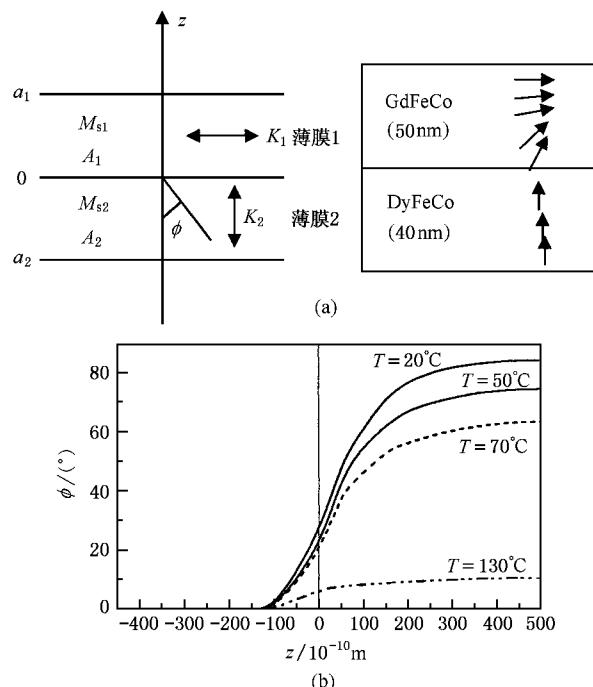


图 7 (a) 磁化方向分布示意图 (b) 不同温度的磁化方向(ϕ_z)分布

4. 结 论

我们成功制备了具有中心孔探测磁超分辨效应的 GdFeCo/DyFeCo 交换耦合两层薄膜, 读出层 GdFeCo 的磁化方向随着温度升高从平面磁化向垂直磁化转变, 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, 读出层显示垂直磁化, 80°C 到 130°C 之间磁化方向快速变化, 实验结果和理论分析相一致。

- [1] Wang Y J 1997 *Progress in Physics* **17** 150 (in Chinese) [王荫君 1997 物理学进展 **17** 150]
- [2] Zhou X , Liang B Q , Wang H *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 492 (in Chinese) [周 勋、梁冰青、王 海等 2003 物理学报 **52** 492]
- [3] Zhou J *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** s217 (in Chinese) [周 健等 1999 物理学报 **48** s217]
- [4] Yang J H , Pan L Z and Xu Y , 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 807 (in Chinese) [杨杰慧、潘留占、徐 游 2000 物理学报 **49** 807]
- [5] Shinoda M , Tanaka Y , Akiyama Y *et al* 2000 *SPIE* **4090** 160
- [6] Hirokane J and Takahashi A 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 5701
- [7] Yang B W , Hwang W K and Shieh H P D 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 419
- [8] Sibaa R , Gall H L and Desvignes J M 1998 *Phys. Rev. B* **57** (13) 5887
- [9] Kubogata M , Hidaka Y , Hasegawa M *et al* 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 1732
- [10] Ayres A M and Marinero E E 1996 *J. Appl. Phys.* **79** (8) 5680
- [11] Kanno M , Okumura M , Nakao A *et al* 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 398
- [12] Yoshimura S , Fukumoto A , Kaneko M *et al* 1992 *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** 576
- [13] Kaneko M , Aratani K and Ohta M 1992 *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** 568
- [14] Kobayashi T , Tsuji H , Tsunashima S and Uchiyama S 1981 *Jpn. J. Appl. Phys.* **20** (11) 2089
- [15] Sibaa S , Gall H L , Desvignes J M and Harfaoui M E 1998 *J. Magn. Magn. Mater.* **183** 247
- [16] Hu X and Kawazoe Y 1994 *Phys. Rev. B* **49** (5) 3294

Investigation of magnetization change in GdFeCo/DyFeCo exchange-coupled films

Zhang Yue-Pin^{1,2)} Wang Xian-Ying¹⁾ Lin Geng-Qi³⁾ Li Zhen³⁾ Li Zuo-Yi³⁾ Shen De-Fang¹⁾ Gan Fu-Xi¹⁾

¹⁾ *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China*

²⁾ *Laboratory of Photo-Electronic Material , Ningbo University , Ningbo 315211 , China*

³⁾ *Department of Electronic Science and Technology , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China*

(Received 14 March 2003 ; revised manuscript received 13 May 2003)

Abstract

The exchange-coupled films (GdFeCo/DyFeCo) were prepared by sputtering method. The magnetization transitions caused by temperature changes had been investigated for the films. The results indicate that the magnetization direction of the readout layer changes from in-plane to perpendicular when temperature increases. The transition occurs mainly as a result of the changes in the saturation magnetization. When the temperature increase to near the compensation temperature , the saturation magnetization and the demagnetizing energy of the GdFeCo layer decrease , With the exchange-coupled interaction , the magnetization direction of the readout layer changes . The films can be used for center aperture detection type magnetically induced super resolution .

Keywords : magneto-optical recording , exchange-coupled double layers , magnetization

PACC : 7820L , 7530E , 7560