

# 多层结构磁光记录介质的优化设计和制备

唐九耀\* 唐晋发

(浙江大学光仪系, 310027)

**提要:** 本文提出了一种计算磁光多层结构光学特性的新方法, 它可以用来计算包含有一层或多层磁性薄膜的磁光多层结构的反射率、Kerr角及椭圆度等光学特性, 并得到了应用。

**关键词:** 磁光盘, 记录介质, 优化设计

## Optimum design and preparation of multi-layered magneto-optical recording media

Tang Jiuyao, Tang Jinfa

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou)

**Abstract:** A new method for the computation of optical performance for magneto-optical (MO) multilayer structure was derived. It can be used in calculating the optical performance of MO multilayer structure containing one or more magnetic layers, such as reflectivity, Kerr rotation and ellipticity. The method has been applied to design and prepare MO recording media with bilayer structure.

**Key words:** magneto-optical disk, recording media, optimum design

本文在导纳特征矩阵的基础上提出了一种计算磁光多层结构光学特性的新方法。然后从磁光记录介质读出信噪比的表达式出发构成了一个多层结构磁光记录介质的评价函数, 并运用统计试验法建立了一个多层结构磁光记录介质的自动设计方法。将其应用到二层结构磁光记录介质的设计和制备中去, 得到了比较满意的结果。

### 一、磁光多层结构的光学特性

假设一个多层膜系由质地均匀、各向同性、表面平行的薄膜所组成, 一束线偏振光垂直地入射到这个多层膜系的表面(如图1所示), 那么多层膜系的组合导纳可由下式得到<sup>[1]</sup>:

$$Y = C/B \quad (1)$$

而  $B, C$  可由下面的矩阵方程式确定:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{\hat{q}}{N_j} \sin \delta_j \\ \hat{q} N_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ N_{k+1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

收稿日期: 1989年2月27日。

\* 现通讯地址: 浙江大学物理系。

其中  $N_j$  为第  $j$  层膜的光学常数,  $\delta_j$  为第  $j$  层膜的位相厚度 ( $= 2\pi N_j d_j / \lambda$ )。由组合导纳  $Y$  就可以求出这个多层膜系的振幅反射系数:

$$r = \frac{N_0 - Y}{N_0 + Y} = \frac{N_0 B - C}{N_0 B + C} = |r| e^{i\varphi} \quad (3)$$

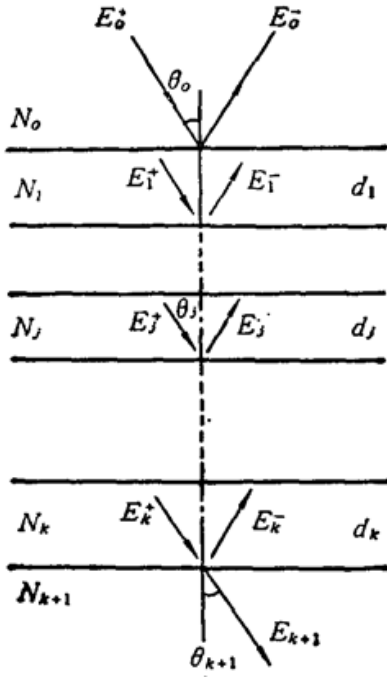


Fig. 1 A multilayer film system

然而当多层膜系包含有磁性薄膜时, 光波在膜系中独立传播的正则模式就改变了。

光波在具有回旋对称性的、磁化强度垂直于膜面的磁性介质中传播时, 其状态可由 Maxwell 方程及相应的物质方程来描述。

考虑到光频范围内材料的磁导率  $\mu \approx 1$ , Maxwell 方程可记为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 [\varepsilon] \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (5)$$

这里介电常数张量为

$$[\varepsilon] = N^2 \begin{bmatrix} 1 & -iQ & 0 \\ iQ & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $N$  为处于退磁状态的磁性介质的光学常数,  $[\varepsilon]$  张量中非对角项的引入正是为了计及磁性介质的各种磁光效应<sup>[2]</sup>, 非对角项中的  $Q$  为磁性介质的磁光常数,  $N$  和  $Q$  一般都为复数。

假设在磁性介质中传播的光波具有线偏振光的形式, 那么 Maxwell 方程组可以写作

$$n^2 [\mathbf{E} - \mathbf{k}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{k})] = [\varepsilon] \mathbf{E} \quad (7)$$

其中  $\mathbf{k}$  为波矢方向的单位矢量。在正入射的条件下可以解得  $n$  的两个根:

$$n^2 = N^2 (1 \pm Q) \quad (8)$$

由于  $|Q| \ll 1$ , 上式可被简化为

$$N_r = N (1 + Q/2) \quad (9)$$

$$N_l = N (1 - Q/2) \quad (10)$$

相应于  $N_r$  的解为右旋圆偏振光 (RCP), 相应于  $N_l$  的解为左旋圆偏振光 (LCP)。RCP 和 LCP 就是在正入射的条件下光波在磁性介质中传播的正则模式。

用于多层膜系光学特性计算的导纳特征矩阵原来是在线偏振光的情形下得出的<sup>[1]</sup>, 然而我们只要把对应于线偏振光情形的位相理解为对应于圆偏振光情形的幅角, 其证明过程对圆偏振光同样成立。因而由式(2)所表示的导纳特征矩阵仍可以用来计算正入射时 RCP 和 LCP 的光学特性。

由于入射的线偏振光能被分解为 RCP 和 LCP,

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (11)$$

而这两个模式在磁光多层结构中又都是独立传播的, 因此只要分别用  $N_r$  和  $N_l$  替代  $N$ , 导纳

特征矩阵就可以分别被应用于 RCP 和 LCP, 以求得它们的振幅反射系数:

$$r_r = \frac{N_0 - Y_r}{N_0 + Y_r} = |r_r| e^{i\varphi_r} \quad (12)$$

$$r_l = \frac{N_0 - Y_l}{N_0 + Y_l} = |r_l| e^{i\varphi_l} \quad (13)$$

这样由 RCP、LCP 和极向 Kerr 效应的关系(如图 2 所示)就不难得到磁光记录介质的反射率  $R$ 、Kerr 角  $\theta_K$  及椭圆度  $\varepsilon_K$  和  $r_r$ 、 $r_l$  的关系:

$$R = \frac{1}{2} (|r_r|^2 + |r_l|^2) \quad (14)$$

$$\theta_K = \frac{1}{2} (\varphi_l - \varphi_r) \quad (15)$$

$$\varepsilon_K = \tan \eta_K = (|r_l| - |r_r|) / (|r_l| + |r_r|) \quad (16)$$

另外还可得到  $r_r$  和  $r_l$  与通常的 Fresnel 反射系数  $r_F$  和 Kerr 反射系数  $r_K$  之间的关系。

设入射的单位振幅线偏振光沿  $x$  方向振动, 则经磁光记录介质表面反射后有

$$\begin{bmatrix} r_F \\ r_K \end{bmatrix} = r_r \cdot \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + r_l \cdot \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -\dot{\varphi} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_r + r_l \\ \dot{\varphi}(r_r - r_l) \end{bmatrix} \quad (17)$$

即

$$r_F = \frac{1}{2} (r_r + r_l) \quad (18)$$

$$r_K = \frac{\dot{\varphi}}{2} (r_r - r_l) \quad (19)$$

在上述关系式中  $\theta_K$  和  $\varepsilon_K$  的符号规则是这样确定的: 当样品的磁化强度和光的入射方向

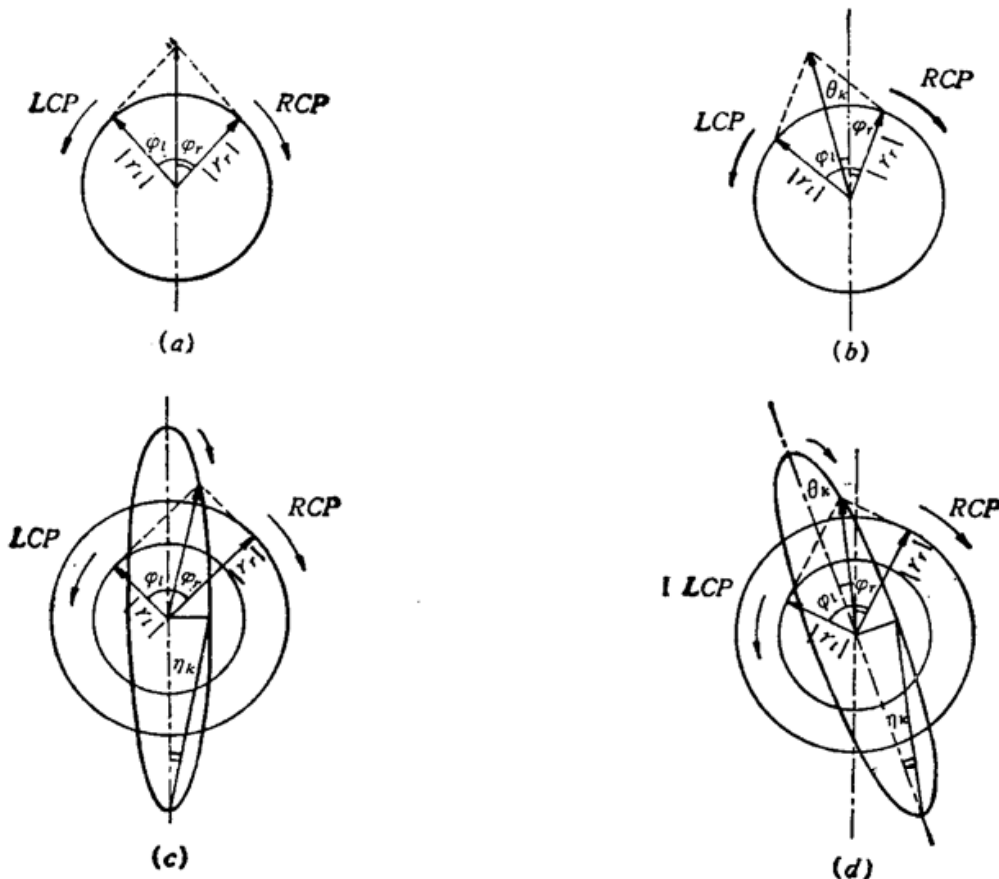


Fig. 2 Relationship between RCP, LCP and polar Kerr effect  
 (a)  $\theta_K=0, \eta_K=0$ ; (b)  $\theta_K \neq 0, \eta_K=0$ ; (c)  $\theta_K=0, \eta_K \neq 0$ ; (d)  $\theta_K \neq 0, \eta_K \neq 0$

一致时,从样品后面沿着光的出射方向看,正的  $\theta_K$  表示偏振面逆时针的转动,正的  $\delta_K$  则表示右旋的椭圆偏振光。

## 二、评价函数

多层结构磁光记录介质优化设计的主要目的就是要增强 Kerr 效应,改进磁光光盘的读出信噪比(SNR),因此应从磁光光盘 SNR 的表达式出发来构成评价函数。

对于如图 3 所示的差分读出系统,可以证明磁光光盘的读出信噪比为<sup>[3]</sup>

$$SNR = \frac{(\eta P_0/h\nu)(\beta_1 - \beta_2) \sin^2 2\theta_K}{2B\{F_G(\beta_1 + \beta_2)/(\beta_1 - \beta_2) + \langle G \rangle^{-2} n_{eq} / [(\eta P_0/h\nu)(\beta_1 - \beta_2)]\}} \quad (20)$$

其中  $P_0$  为入射激光的功率,  $\eta$  为光电探测器的量子效率,  $h\nu$  为光子的能量,  $\beta_1^{1/2}$  和  $\beta_2^{1/2}$  是从记录介质表面反射的椭圆偏振光的长轴和短轴,  $G$  是光电探测器的增益,  $B$  是系统的带宽,  $n_{eq}$  是等效热电子发射速率,  $F_G$  是光电探测器的附加噪声因子。

上式分母的第一项代表读出系统的散粒噪声,第二项代表热噪声。从式(20)可见,只要入射的激光功率足够大,热噪声和散粒噪声相比就可以忽略<sup>[4]</sup>,因此在散粒噪声极限的情况下,式(20)可记为

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{(\eta P_0/h\nu)(\beta_1 - \beta_2)^2 \sin^2 2\theta_K}{2BF_G(\beta_1 + \beta_2)} \\ &= \frac{\eta P_0/h\nu}{2BF_G} (\beta_1 + \beta_2) \sin^2 2\theta_K \left( \frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \right)^2 \\ &= \frac{\eta P_0/h\nu}{2BF_G} R \sin^2 2\theta_K \left( \frac{1 - \tan^2 \eta_K}{1 + \tan^2 \eta_K} \right)^2 \\ &= \frac{\eta P_0/h\nu}{2BF_G} R \sin^2 2\theta_K \cos^2 2\eta_K \end{aligned} \quad (21)$$

只要入射的激光功率一确定,  $\frac{\eta P_0/h\nu}{2BF_G}$  就是

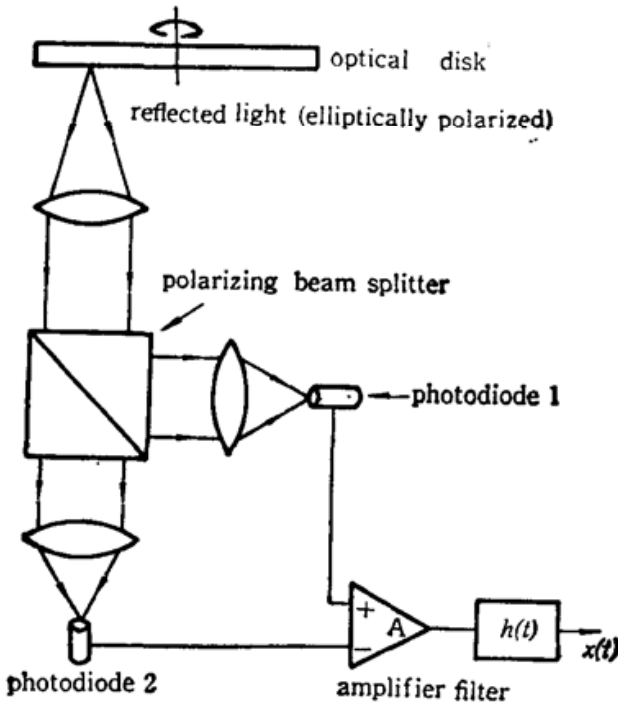


Fig. 3 Schematic diagram of a differential readout system.

系统的常数,和记录介质无关,因此我们把下式取为自动设计的评价函数:

$$F = \sqrt{R} \sin 2\theta_K \cos 2\eta_K \quad (22)$$

这个评价函数考虑了磁光记录介质的每个光学参数对 SNR 的影响,并且在  $\theta_K$  和  $\eta_K$  较小时可简化为常用的形式( $\sqrt{R} \theta_K$ ),因此它对多层结构磁光记录介质的优化设计是比较合适的。

## 三、二层结构磁光记录介质的设计和制备

### 3.1 优化设计

为了在较宽的搜索区间内求得评价函数的极值点,得到多层结构磁光记录介质的优化设计,我们在自动设计中采用了统计试验法<sup>[5]</sup>。用于多层结构磁光记录介质优化设计的统计试验法流程图如图 4 所示,计算程序已在 IBM/PC 机上建立。使用这个程序进行磁光二层结构

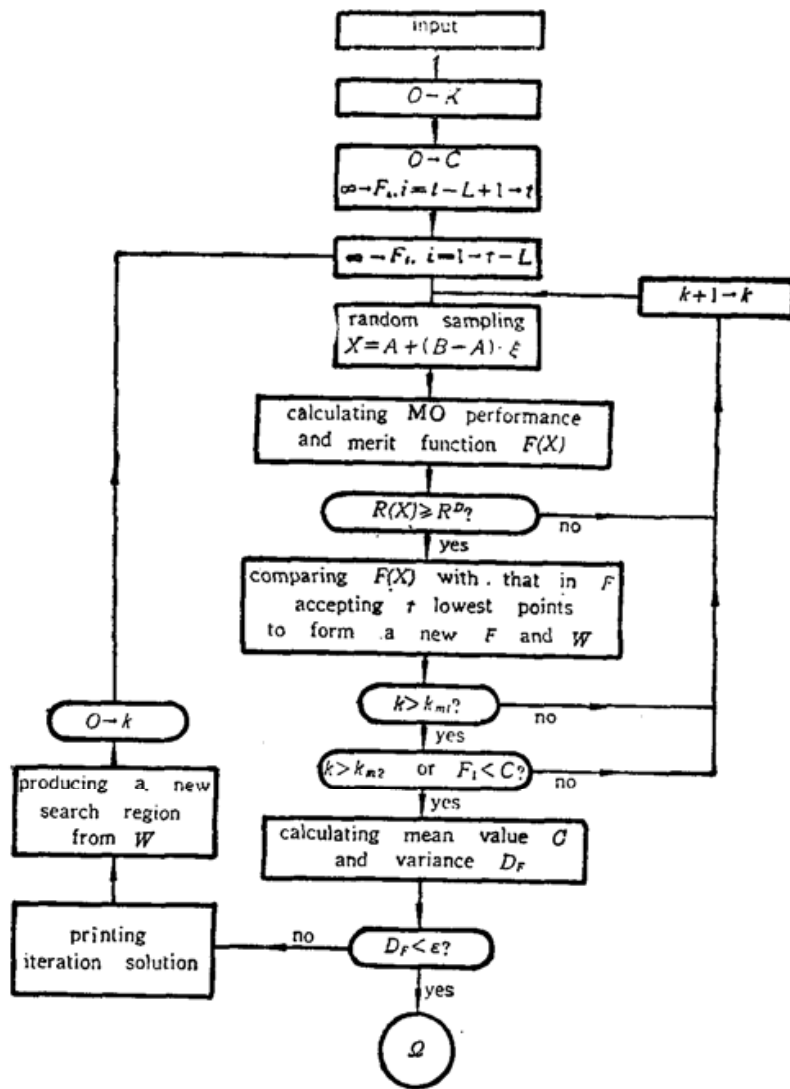


Fig. 4 Block diagram of the algorithm. Input: 1. statistical index, 2. minimum and maximum sampling number  $K_{m1}$ ,  $K_{m2}$  3. original search region  $A$ ,  $B$ , 4. remaining number  $L$ , 5. desired minimum reflectivity  $R^0$ , 6. precision  $\epsilon$

统计试验的一次迭代只要二分钟就够了,一般五次迭代就能给出磁光二层结构的设计结果。当然随着设计层数的增加,所化的机时也将相应增加。

#### (1) AlN/TbFeCo/glass 磁光二层结构

这种结构用于读出激光从空气入射的情形。在二层结构中介质层有点类似于 TbFeCo 的减反膜,它抑制了通常的 Fresnel 反射系数,而增强了 Kerr 反射系数,因此也就增大了 Kerr 角。这可从 Kerr 强度反射系数的表达式中看出,由式(19)得

$$\begin{aligned} R_K &= \frac{1}{4} [ |r_r|^2 + |r_l|^2 - 2|r_r||r_l|\cos(\varphi_r - \varphi_l) ] \\ &= \frac{1}{4} ( |r_r|^2 + |r_l|^2 - 2|r_r||r_l|\cos 2\theta_K ) \end{aligned} \quad (23)$$

如果我们忽略  $|r_r|$  和  $|r_l|$  之间的微小差异,则有:

$$R_K = \frac{1}{4} \cdot 2R(1 - \cos 2\theta_K) = (R_F + R_K) \sin^2 \theta_K \quad (24)$$

故有

$$R_K = R_F \tan^2 \theta_K \quad (25)$$

**Table 1 Optical constants and magneto-optical constants of the materials ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )**

material	$N$	$Q$
TbFeCo	$2.27 - i3.34$	$1.063 \times 10^{-2} + i2.154 \times 10^{-2}$
AlN	$1.95 - i0.0056$	—
glass	1.52	—

**Table 2. Optimum design of the two-layered magneto-optical structure(I)**

structure	thickness	magneto-optical property			
		$\theta_K$	$R$	$R_F$	$R_K$
Air	massive	$-1.075^\circ$	0.1763	$0.1763$	$0.1763$
AlN	50.3 nm	$0.1763$	$0.1763$	$0.1763$	$0.76 \times 10^{-4}$
TbFeCo	126.8 nm	$0.50^\circ$	$0.50^\circ$	$0.50^\circ$	$1.5745 \times 10^{-2}$
glass	massive				

因而当  $R_K$  增大, 而  $R_F$  减小时, 必然有  $\theta_K$  的增加。

表 1 列出了设计中所涉及的在 632.8 nm 波长处薄膜的光学常数( $N$ )和磁光常数( $Q$ ), 计算机输出的设计结果如表 2。

### (2) TbFeCo/AlN/glass 磁光二层结构

这种结构用于读出激光从衬底入射的情形。设计中所采用的材料的光学常数和磁光常数与表 1 相同, 设计结果如表 3 所示。

**Table 3 Optimum design of the two-layered magneto-optical structure(II)**

structure	thickness	magneto-optical property			
		$\theta_K$	$R$	$R_F$	$R_K$
glass	massive	$-0.615^\circ$	0.2803	$0.2803$	$0.2803$
AlN	46.5 nm	$0.2803$	$0.2803$	$0.2803$	$0.5 \times 10^{-4}$
TbFeCo	136.8 nm	$0.45^\circ$	$0.45^\circ$	$0.45^\circ$	$1.1870 \times 10^{-2}$
Air	massive				

## 3.2 实验结果

磁光二层结构中所用的 TbFeCo 薄膜是在 ANELVA SPF-430 溅射设备上利用 R.F. 磁控溅射方法制得的。所采用的溅射条件如下:

靶: 直径 100 mm 的 TbFeCo 复合靶; 放电条件: 13.56 MHz, 4 kV, 200 mA, 4 mTorr Ar; 溅射功率: 300 W; 本底真空:  $9 \times 10^{-7}$  Torr; 靶与衬底的距离: 95 mm。

AlN 薄膜是在同一台设备上, 和 TbFeCo 薄膜在同一真空罩中利用反应溅射的方法淀积上去的, 其工艺条件如下:

靶: 直径 100 mm 的高纯 Al 靶; 放电条件: 13.56 MHz, 4 kV, 200 mA, 1.5 mTorr Ar 加 2 mTorr  $N_2$ 。其他条件和制备 TbFeCo 薄膜时相同。

TbFeCo 和 AlN 薄膜的折射率及厚度是用椭偏仪测得的, 由此可以定出 TbFeCo 和 AlN 薄膜的淀积速率分别为 22.0 nm/min 和 5.5 nm/min 左右。Kerr 磁滞回线是用一台磁光回线绘迹仪作出的<sup>[6]</sup>, 根据回线可以确定磁光薄膜的矫顽力  $H_c$  及矩形比  $SQR$ , 而  $\theta_K, \eta_K$  和  $R$  则是在一台自制的磁光特性测试仪上测得的。

## (1) AlN/TbFeCo/glass 磁光二层结构

按照设计我们制备了 AlN/TbFeCo/glass 磁光二层结构,其 Kerr 磁滞回线(图 5)显示了极好的单轴各向异性和很高的矩形比,这些特性对于磁光多层结构在光学存储方面的应用是非常重要的。这个磁光二层结构的磁学和磁光特性已在表 4 中列出。与设计要求的相比,所制备的样品表现出了较大的 Kerr 角以及较低的反光率,其原因可能是 AlN 的厚度比预期的大了一些,然而它仍具有设计所要求的很高的品质因子。

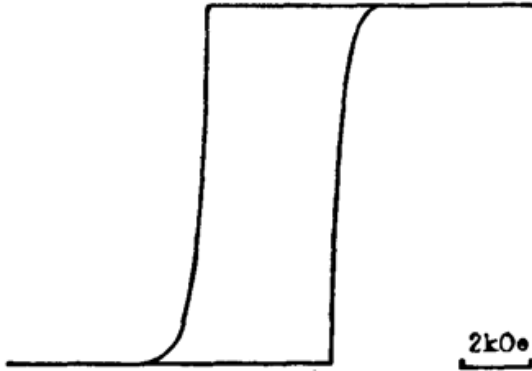


Fig. 5 Kerr hysteresis loop of an optimum AlN/TbFeCo/glass.

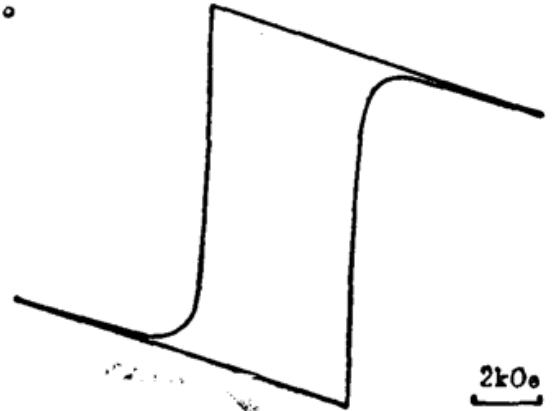


Fig. 6 Kerr hysteresis loop of an optimum TbFeCo/AlN/glass

Table 4. Measured values of magnetic and magneto-optical properties of the two-layered magneto-optical structure ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ )

magneto-optical property	AlN/TbFeCo/glass	TbFeCo/AlN/glass
$\theta_K$	$-1.30^\circ$	$-0.66^\circ$
$R$	0.122	0.29
$\eta_K$	$0.75^\circ$	$0.33^\circ$
$F$	$1.5840 \times 10^{-2}$	$1.2406 \times 10^{-2}$
$H_c(\text{kOe})$	2.0	2.2
SQR	1.0	1.0

## (2) TbFeCo/AlN/glass 磁光二层结构

这种磁光二层结构的 Kerr 磁滞回线如图 6 所示,其磁学和磁光特性已在表 4 中列出。对于这种结构,激光是从衬底入射到磁性薄膜上的,因此 Kerr 回线显得相当倾斜,这是由于玻璃在很强的外磁场中被磁化了,以致于它的 Faraday 效应影响了二层结构的 Kerr 磁滞回线。然而从回线的形状中仍然可以看出这个磁光二层结构具有很好的垂直于膜面的单轴各向异性和很高的矩形比。另外从表 4 还可以看出其磁光特性与设计所预期的符合得很好。

没有复盖 AlN 薄膜时,单层 TbFeCo 的反光率、Kerr 角以及椭圆度分别为  $0.56$ ,  $-0.28^\circ$  和  $0.18^\circ$ ,其品质因子为  $0.7375 \times 10^{-2}$ ,因此优化的二层结构 AlN/TbFeCo/glass 和 TbFeCo/AlN/glass 的读出信噪比可分别提高  $4.5\text{dB}$  和  $6.6\text{dB}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 唐晋发,郑权,应用薄膜光学,上海科技出版社,1984,41~51
- 2 L. D. Landau, E. M. Lifshits, Electrodynamics of Continuous Media, Pergamon, 1960, Secs., 58-60, 82
- 3 M. Mansuripur, G. A. N. Connell, *J. Appl. Phys.*, **53**(6), 4485 (1982)
- 4 Y. Tomita, T. Yoshino, *J. Opt. Soc. Am. A*, **1**(8), 809 (1984)
- 5 J. F. Tang, Q. Zheng, *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 1522 (1983)
- 6 谭立国,胡用时,李佐宜,华中工学院学报, **15**(3), 25 (1987)