

GdFe 박막의 Kerr 이력곡선 연구

金斗哲*, 鄭原基**

A Study on the Kerr Hysteresis Loops of GdFe Thin Films

Kim Doo-chul*, Jung Won-gi**

Summary

GdFe amorphous thin films used were prepared by the rf sputtering technique on the slide glass substrates held at room temperature. Composition ratios of GdFe films were measured by AES and Kerr hysteresis loops of these films were studied by using the polar Kerr loop tracer. It has been found that some of these films show the anomalous hysteresis loops. This anomaly has been explained by the double layers model with a surface oxidation layer.

序 論

희토류 원소인 Gd, Tb 그리고 Dy 등과 천이금속 Fe, Co 등을 Sputtering 또는 진공증착방법으로 제작한 비정질 박막은 적당한 조건에서 그 평면에 수직인 자기이방성을 가지는 특성이 있다. 이러한 자성박막은 수직자화를 이용한 고밀도 광자기기록용 소자로서 매우 유용하다.

자기광 기록소자 개발을 위한 연구는 1957년 이후 Williams (Williams, 1957) 등에 의해 MnBi 박막에 대한 연구가 행해져 오다가 1973년 부터 Chaudhari (Chaudhari *et. al.*, 1973) 등에 의해 희토류 천이금속 (RE-TM) 박막이 연구되었다. 그 이후, 이 RE-TM 박막은 비정질이기 때문에 신호대 잡음비가 높고 항자력, 자화값, 수직이방성 에너지

등을 약간의 조성비 변화로 크게 변화시킬 수 있는 장점등이 있어서 많이 연구되어져 왔으나 주로, 큰 Kerr 회전각, 큰 수직 이방성 에너지값 등을 갖는 물질의 개발 내지는 박막의 제작에 관심이 집중되어 왔다. 그러나, 물질 고유의 특성이나 자기이방성의 원인, Kerr 회전각의 기구 등은 비교적 적게 연구되어져 왔으며, Kerr 회전각은 가시광선 영역에서 주로 천이금속의 자화값에 비례하는 것으로 알려져 있다. (Shigeo and Masatoshi, 1988) 그리고 Kerr 회전각 θ_k 와 타원율 η_k 는 유전율 텐서의 비대각 성분 ϵ_{xy} 에 기인한다.

본 연구에서는 여러가지 형태의 Kerr 이력곡선들을 표면산화에 의한 이중박막의 형성을 가정하고, 항자력 H_{c1} , H_{c2} 을 도입하여 설명하였다.

理 論

* 자연과학대학 조교수, ** 전주대 이공대학 전임강사

자기광학 효과로는 Faraday 효과, Kerr 효과, 자기 원이색성 등이 있다. 이 중 자기광 기록에 응용되는 것은 Faraday 효과와 Kerr 효과인데, 특히 Polar Kerr 효과를 주로 이용하기 때문에 여기서는 Polar Kerr 효과에 대한 이론만 전개하겠다.

Kerr 효과에는 Fig.1과 같이 극 Kerr 효과, 종 Kerr 효과, 횡 Kerr 효과 등 3 종류가 있다. 이중 '극 Kerr 효과'는 반사면에 수직인 자화가 존재하는 경우, 빛이 반사할 때 일어나는 효과이다. (佐藤 勝昭, 1987)

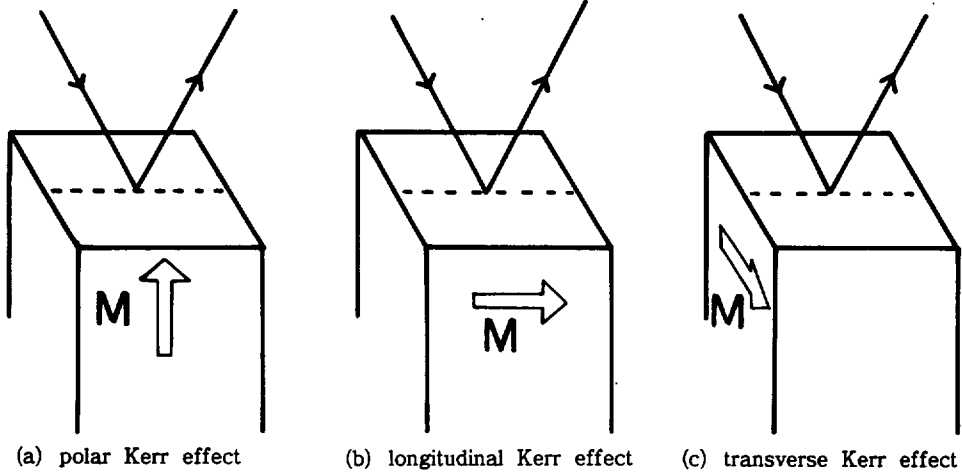


Fig.1. Three kinds of Kerr effects

빛의 전기장에 대한 매질의 반응은

$$\vec{D} = \tilde{\epsilon} \epsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{J} = \tilde{\sigma} \vec{E} \dots\dots\dots(1)$$

로 나타낼 수 있고, $\tilde{\epsilon}$ 과 $\tilde{\sigma}$ 는 각각 유전율 텐서, 전도율 텐서로

$$\tilde{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}, \quad \tilde{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \dots\dots(2)$$

이다. 여기서 $\epsilon_{ij}, \delta_{ij}$ 의 성분들은 일반적으로 복소수이며

$$\epsilon_{ij} = \epsilon'_{ij} + i \epsilon''_{ij}, \quad \sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + i \sigma''_{ij} \dots\dots\dots(3)$$

로 나타낼 수 있다. 이들을 연결시켜주는 관계식은

$$\epsilon_{ij} = \delta_{ij} + \frac{i \sigma_{ij}}{\omega \epsilon_0} \text{ [SI]} \dots\dots\dots(4)$$

이다. Z축 방향으로 자화된 매질에서는 단일축 이방성이 생기며, 유전율 텐서 $\tilde{\epsilon}$ 은 다음과 같이 된다.

$$\tilde{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

복소 유전율 $\tilde{\epsilon}$ 이 윗식과 같이 표현되는 매질 중으로 진행하는 빛(전자기파)을 고려하면 Maxwell 방정식은

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \tilde{\epsilon} \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \dots\dots\dots(6)$$

로 되며, \vec{E} 와 \vec{H} 의 해로

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 \exp \left[-i\omega \left(t - \frac{Nz}{C} \right) \right] \\ \vec{H} &= \vec{H}_0 \exp \left[-i\omega \left(t - \frac{Nz}{C} \right) \right] \end{aligned} \dots\dots\dots(7)$$

을 가정하면, (6) 식은

$$\begin{aligned} \frac{N}{C}(\vec{E} \times \vec{K}) &= -\mu_0 \vec{H} \\ \frac{N}{C}(\vec{H} \times \vec{K}) &= \tilde{\epsilon} \epsilon_0 \vec{E} \end{aligned} \dots\dots\dots(8)$$

이 된다. (8)에서 \vec{H} 를 소거하면

$$(N^2 I - \tilde{\epsilon}) \vec{E} = 0 \dots\dots\dots(9)$$

의 고유방정식을 얻을 수 있으며, 이것을 다시 쓰면

$$\begin{pmatrix} N^2 - \epsilon_{xx} & -\epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{xy} & N^2 - \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & N^2 - \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0 \dots\dots(10)$$

이 되며, $\tilde{\epsilon} \neq 0$ 인 해를 얻기 위해서는

$$\begin{vmatrix} N^2 - \epsilon_{xx} & -\epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{xy} & N^2 - \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & N^2 - \epsilon_{zz} \end{vmatrix} = 0$$

이 되어야 하며 이 식에서 복소굴절율은

$$N_{\pm}^2 = \epsilon_{xx} \pm i \epsilon_{xy} \dots\dots\dots(11)$$

가 되며, N_+ , N_- 는 각각 우원편광과 좌원편광에 대응하는 복소굴절율이다. 여기서 $N_+ = n_+ + ik_+$, $N_- = n_- + ik_-$ 라 놓고,

$\Delta n = n_+ - n_-$, $\Delta k = k_+ - k_-$, $n = (n_+ + n_-)/2$, $k = (k_+ + k_-)/2$ 를 도입하면 (11)식으로부터

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx}' &= n^2 - k^2 \\ \epsilon_{xx}'' &= 2nk \\ \epsilon_{xy}' &= n \Delta k + k \Delta n \\ \epsilon_{xy}'' &= k \Delta k - n \Delta n \end{aligned} \dots\dots\dots(12)$$

을 유도할 수 있다. 굴절율이 n_0 인 매질에서 굴절율 $n + ik$ 인 자성 박막으로 입사한 빛이 자성박막에서 반사하면 일반적으로 타원편광이 되며, 타원의 장축의 회전각 θ_k 를 Kerr angle이라고 하고, 장축

과 단축의 비를 타원율 η_k 라 한다.

우원편광과 좌원편광에 대한 Fresnel 계수를 r_+ , $\exp(i\theta_+)$, $r_- \exp(i\theta_-)$ 라 하면, Kerr 회전각 θ_k 는

$$\theta_k = -\frac{\theta_+ - \theta_-}{2} = -\frac{\Delta\theta}{2} \dots\dots\dots(13)$$

이고, Kerr 타원율 η_k 는

$$\eta_k = \frac{r_+ - r_-}{r_+ + r_-} \cong \frac{1}{2} \frac{\Delta r}{r} \dots\dots\dots(14)$$

이 된다. (13), (14)식을 Δn , Δk 로 나타내면

$$\theta_k = \frac{n_0 [2nk\Delta n + (n_0^2 - n^2 + k^2)\Delta k]}{(n_0^2 - n^2 - k^2)^2 + 4n_0^2 k^2} \dots\dots\dots(15)$$

$$\eta_k = -\frac{n_0 [(n_0^2 - n^2 + k^2)\Delta n - 2nk\Delta k]}{(n_0^2 - n^2 - k^2)^2 + 4n_0^2 k^2} \dots\dots\dots(16)$$

이 되며, 다시

$$\Delta n = \frac{2nk\theta_k - (n_0^2 - n^2 + k^2)\eta_k}{n_0} \dots\dots\dots(17)$$

$$\Delta k = \frac{(n_0^2 - n^2 + k^2)\theta_k + 2nk\eta_k}{n_0} \dots\dots\dots(18)$$

가 된다. (17), (18)식을 (13)식에 대입하면

$$\epsilon_{xy}' = \frac{n(n_0^2 - n^2 + 3k^2)\theta_k - k(n_0^2 - 3n^2 + k^2)\eta_k}{n_0} \dots\dots\dots(19)$$

$$\epsilon_{xy}'' = \frac{k(n_0^2 - 3n^2 + k^2)\theta_k + n(n_0^2 - n^2 + 3k^2)\eta_k}{n_0} \dots\dots\dots(20)$$

을 얻을 수 있다. 이것을 다시

$$\theta_k + i\eta_k = \frac{n_0 \epsilon_{xy}}{(n_0^2 - \epsilon_{xx})\sqrt{\epsilon_{xx}}} \dots\dots\dots(21)$$

로 간결한 형식으로 표현할 수도 있다. ellipsometer로 n, k 를 측정하고, 극 Kerr angle 장치로 θ_k, η_k 를 측정하면 자성박막의 유전율텐서를 계산할 수 있다.

材料 및 方法

1) Kerr 이력곡선 측정장치 제작

회트류 천이금속 박막의 Kerr 회전각은 매우 작아서 ($\phi < 0.5^\circ$) Kerr 이력 곡선을 그리기가 어렵기 때문에 증폭을 해야한다. 증폭하는 방법으로는 Farady 효과를 이용하여 Kerr 회전각의 신호를 변조하는 편광변조방식을 사용했으며 Fig.2는 Kerr 이력곡선 측정장치의 개략도이다. (Gomi *et al.*, 1981)

이 방식은 레이저에서 나온 빛을 편광기로 선편광시키고 Faraday cell에 의해 진동수 ω 로 변조시켜서 박막에 입사시킨다. 박막에서 반사된 빛은 편광기와 투과축이 90° 로 놓여진 분석기와 photodiode를 통과하고 Lockin Amp로 ω 성분만 선택 증폭되어 X-Y recorder의 Y축에 연결되며 X축은 전자석에 걸리는 전압을 연결했다. 그러면, 편광변조방식의 photodiode에서의 출력은

$$I(\phi, t) = P_i K \sin^2(\phi + a_0 \sin \omega t) \dots \dots \dots (22)$$

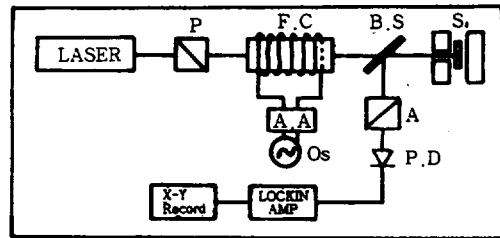
이다. 식 (22)에서 ϕ^2 항을 무시하면

$$I(\phi, t) = I_{DC} + I_{\omega} + I_{2\omega} \dots \dots \dots (23)$$

로 되고 여기서,

$$\begin{aligned} I_{DC} &= P_i K a_0^2 / 2 \\ I_{\omega} &= 2 P_i K a_0 \phi \sin \omega t \dots \dots \dots (24) \\ I_{2\omega} &= - (P_i K a_0^2 / 2) \cos 2\omega t \end{aligned}$$

이며 Kerr 회전각은 I_{ω} 성분에만 변조파의 진폭을 곱한 형태로 나타나므로 I_{ω} 성분만 선택 증폭하면 된다. 그리고, P_i 는 laser power, K 는 photodiode의 이득과 광학계의 손실의 곱이다. ϕ 는 Kerr 회전각이며 a_0 는 변조파의 진폭으로 약 1° 정도가 되도록 Faraday cell을 설계해서 만들었다. Faraday cell은 양 끝이 광학유리로 막힌 길이 12cm인 cylinder안에 CS_2 (Verdet const $V = 4.23 \times 10^4 \text{ min.}/T \cdot \text{m}$ for $\lambda = 5893 \text{ \AA}$, $20^\circ C$)를 넣고 이 cylinder를 1



P : Polarizer, A : Analyzer, F.C : Faraday Cell
S : Sample, A.A : Audio Amp, P.D : photo diode
Os : Oscilloscope, E.M : Electro Magnet

Fig. 2. Schematic diagram for Kerr hysteresis loop tracer

A의 전류에 85 Oe 정도의 교류자기장이 형성되는 solenoid속에 넣어서 만들었다.

수직 Kerr이력곡선의 측정은 빛을 박막의 유리면 쪽 또는 박막쪽으로 입사시켰으며 전자석의 자기장은 0에서 1.7kOe까지 변화시켰고 Solenoid내의 자기장은 1 A의 전류로 85 Oe가 되게했다.

2) 박막제작 및 성분조사

GdFe박막은 rf sputtering 장치로 slide glass를 기판으로 하여 제작했으며 이때 Ar기압은 5×10^{-2} Torr를 유지시켰다. 박막의 두께는 6000 Å 정도이며 박막의 조성은 AES (Auger Electron Spectroscopy)로 측정했다. Fig.3는 Auger depth profile이며 박막 두께에 대해 비교적 조성이 $Gd_{0.28}Fe_{0.72}$ 로 균일한 것으로 나타났다.

考 察

1) 정상 Kerr 이력곡선

유리기판 쪽으로 빛을 입사시켜 Kerr 이력곡선을 측정해서 Fig.4와 같은 정상 Kerr 이력곡선을 얻었다. Gd의 성분비가 보상조성비인 0.275 이하에서는 (Fe rich) 양의 자기장에 대해 양의 Kerr angle이 되고 성분조성비가 0.275 이상에서는 그 극성이 바뀐다는 것을 그림에서 알 수 있다. 이 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다.

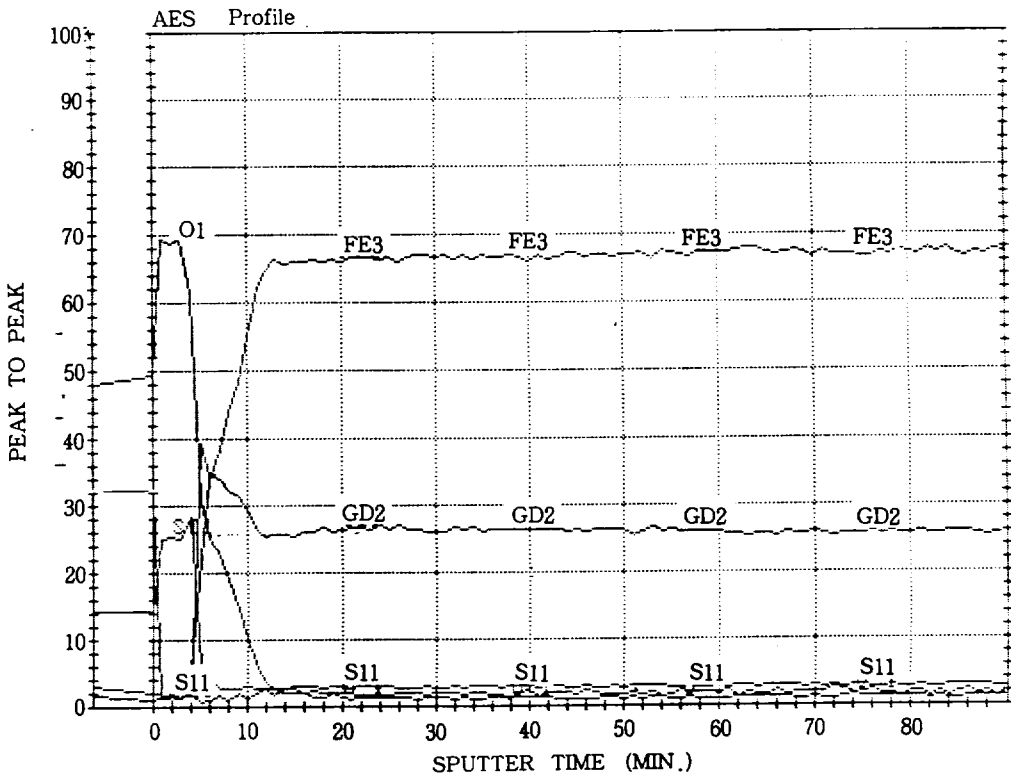


Fig. 3. AES depth profile for a GdFe thin films

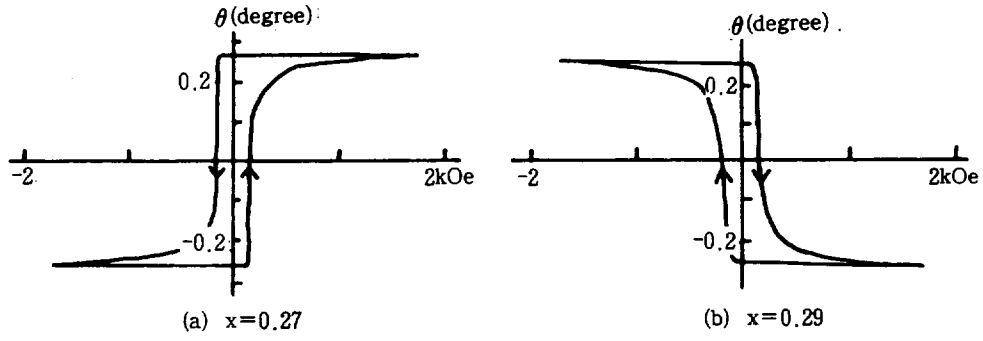


Fig. 4. Normal Kerr hysteresis loops for Gd_xFe_{1-x} films

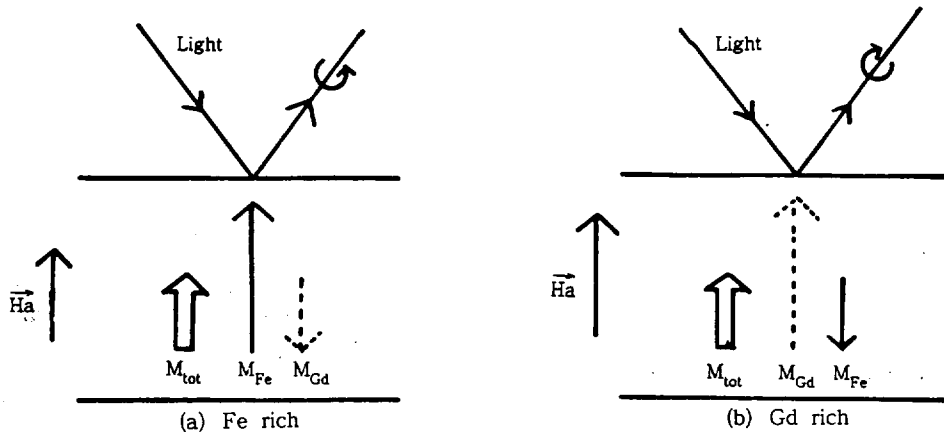


Fig. 5. Sublattice magnetization in the external field

GdFe박막은 Fig.5에서와 같이 Fe와 Gd의 부계 자자화들이 서로 반강자성 결합을 하여 서로 반대 방향을 향하는 준강자성체가 된다. 이때 박막에 외부 자기장 \vec{H}_a 가 왼쪽 방향으로 가해졌을 때, \vec{H}_a 가 항자력 \vec{H}_c 보다 크면 총 장화가 외부 자기장의 방향이 되도록 spin들이 정렬하여 Fe 부계자 자화가 아래쪽을 향하게 된다. Kerr 회전각은 가시광선 영역(본 실험에서는 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$)에서는 주로 천이금속의 자화에 기인하는 것으로 알려졌다으므로 Fe

rich 박막에서는 $+\theta$, Gd rich 박막에서는 $-\theta$ 의 Kerr 회전각을 얻게되어 Fig.4와 같은 Kerr 이력 곡선을 그리게 된다.

2) 비정상 Kerr 이력곡선

박막쪽으로 빛을 입사시켜 Kerr 이력곡선을 측정한 것들 중에는 Fig.6과 같은 비정상 Kerr 이력곡선을 나타낸 것이 있었다.

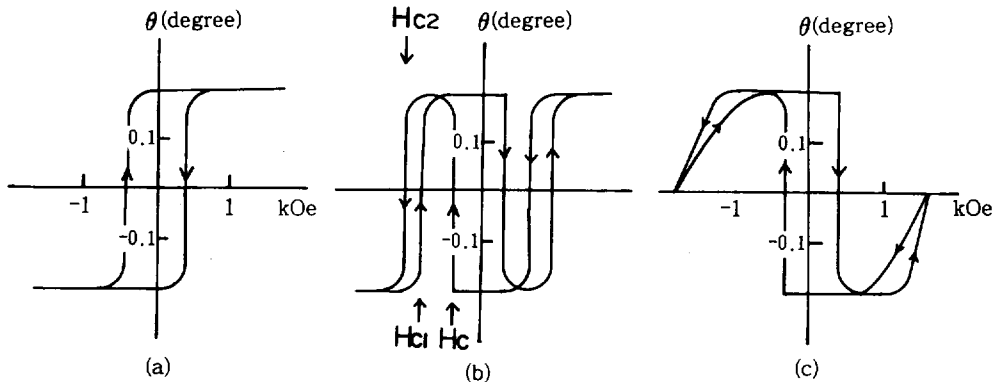


Fig. 6. Anomalous Kerr hysteresis loops for GdFe thin films

이 현상을 설명하기 위해서 Fig.7과 같이 Gd rich 박막의 표면일부가 주로 Gd만 선택적으로 산화되어 얇은 Fe rich인 산화 박막층을 형성하고 이 왼쪽 박막층은 spin 회전모델에 의해 자화방향이

바뀐다고 가정한다.

Fig.7(a)는 자기장을 왼쪽 방향으로 가했다가 제거한 상태이며, 이때의 Kerr 회전각은 $-\theta$ 이다. 여기서 임계자기장 H_{c1} 과 H_{c2} 를 도입하자.

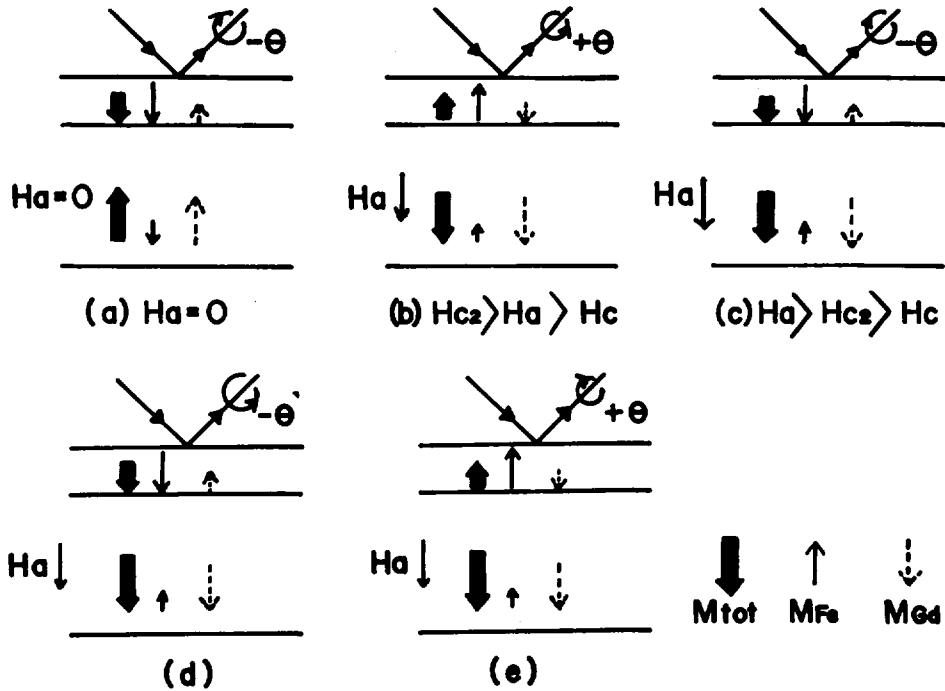


Fig. 7. Sublattice magnetization in the external field for double layers.

$$\begin{aligned}
 H_{c1} &= H_i - H_{k'} \\
 H_{c2} &= H_i + H_{k'} \dots \dots \dots (25) \\
 H_{k'} &= 2Ku / Ms - 4\pi Ms
 \end{aligned}$$

H_i 는 두 박막 사이에 작용하는 교환상호작용에 대응하는 자기장이며 $H_{k'}$, Ku , M_s 는 각각 윗쪽 박막의 유효 이방성에너지에 대응하는 자기장 수직 이방성 에너지, 자화값들이다.

첫째, Fig. 6(b)는 $H_c < H_{c1} < H_{c2}$ 인 경우이다. 자기장을 아래쪽방향으로 가해서 자기장이 아래쪽 박막의 항자력 H_c 보다 크게되면, 아래쪽 박막의 총자화가 외부자기장과 같은 방향을 향하게 되고 아래쪽과 윗쪽박막의 부역자자화들 사이의 교환상호작용에 의해 윗쪽 박막의 Fe spin은 윗쪽 방향을 향하게 되어 Kerr회전각은 $+\theta$ 가 된다(Fig. 7(b)). 외부자기장이 더 증가해서 H_{c2} 를 넘어서면(교환 상호작용+유효이방성 자기장)보다 Zeeman에너지가 더 크게 되어 윗쪽 박막의 총자화도 외부자기장의 방향인 아래쪽을 향하게 되고 따라서 Fe spin은 Fig. 7(c)의 그림과 같이 아래쪽 방향을 향하게 되어

Kerr 회전각은 $-\theta$ 로 된다. 이제 자기장을 최대가했다가 감소시켜서 H_{c1} 보다 작아지면 윗쪽 박막은 다시 교환상호작용이 (Zeeman 에너지+유효이방성 자기장)보다 더 크게되어 Fig. 7(b) 그림으로 되고 Kerr 회전각은 $+\theta$ 가 된다.

자기장의 방향이 윗쪽 방향으로 바뀔 경우도 마찬가지로 과정이며, 결국 Fig. 6(b)를 설명할 수 있다.

둘째, Fig. 6(c)는 산화박막층이 좀 더 얇은 경우로서 교환상호작용에 대응하는 H_{c1} , H_{c2} 가 매우 크다. 그래서 바깥 이력곡선이 그림과 같이 작게되고, H_{c1} , H_{c2} 가 더 크게되면 없어지게 된다.

즉, 산화 박막층이 없으면 Gd rich 박막의 정상 Kerr 이력곡선이 된다.

셋째, Fig. 6(a)는 Fe rich 박막의 거꾸로 된 Kerr 이력곡선이며 $H_c > H_{c2} > H_{c1}$ 인 경우이다. 아래쪽 방향으로 자기장이 가해져 H_c 보다 더 커지면 아래쪽 위쪽 박막 모두 총 자화가 자기장 방향으로 되며 Fig. 7(c)와 같이 Kerr 회전각은 $-\theta$ 가 된다. 자기장을 감소시켜서 H_c 이하가 되면, Fig. 7(e)와 같이 교환 상호작용에 대응하는 자기장이(Zeeman

에너지+유효 이방성 자기장)보다 크게 되어 위쪽 박막의 부격자 자화들이 아래쪽 박막의 부격자 자화와 같은 방향이 되어서 Kerr 회전각이 $+θ$ 가 된다. 자기장의 방향이 위쪽 방향으로 바뀔 경우도 마찬가지 과정이며, 결국 Fig.6(a)를 설명할 수 있다.

摘 要

GdFe 박막을 rf sputtering 방법으로 제작하였으며, Kerr 이력곡선 측정 장치를 제작하여 Kerr 이력곡선을 조사하였다. 사각형화가 좋은 Kerr 이력곡선이 자기광 기록에 필요한데, 비정상 Kerr 이력곡선이 간혹 나타났다. 이것들은 박막 표면에서 Gd가 선택적으로 산화되어 이중박막을 형성한 것으로 생각하여 잘 설명할 수 있었다.

앞으로 좀 더 정량적인 분석을 위해서 고의로 이중박막을 만들어서 연구해 볼 계획이다.

参 考 文 献

Chaudhari, P. and Cuomo, J.J. 1973. Amorphous metallic films for magneto-optic applications. *Appl. Phys. Lett.*, 22: 337~341.
Manabu Gomi, Masanori Abe and Shoichiro Nomura, 1981. A New Magento Optic Read-out Technique with high speed and high sensitivity. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 20: L821-L824.

Shigeo Honda and Masatoshi Yoshiyama, 1988. Kerr rotation angle versus cobalt sublattice magnetic moment in RE-CO sputtered films. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 27: 2073-2077.
Williams, H.J., 1957. Magneto optical recording of MnBi thin film *J. Appl. Phys.*, 28: 1181-1190.
佐藤勝昭, 1987. 光と磁氣, 14-47. 朝倉書店, 東京.