

편광 변조 방법에 의한 자기 Kerr 회전각 및 Faraday 회전각 측정

김현수 · 이상수

한국과학기술원 물리학과

이 용 호

한국표준과학연구원

(1992년 1월 31일 받음)

광자기 기록 박막의 자기 광학효과에 의한 미소 편광 회전각을 측정하기 위하여 편광 변조 방법을 이용하였다. 편광 변조 방법은 Faraday 회전자로 레이저광의 편광을 변조하고 phase sensitive detection 방법을 써서 변조된 신호만을 선택적으로 검출하는 것이다. 본 실험에서는 진공증착법으로 제작된 TbFeCo 박막과 RF 스퍼터링으로 제작된 iron garnet 다결정 박막의 자기 Kerr 회전 및 Faraday 회전 이력곡선을 이 방법으로 조사하였다. 그 결과 0.25° 정도의 미소한 회전각을 측정하였으며 특히 longitudinal Kerr 회전의 경우 2.5×10^{-3} ° 정도의 매우 작은 회전각도 측정할 수 있었다.

I. 서 론

물질의 자기광학적 특성은 편광된 빛이 자화된 매질을 통과할 때 빛과 매질과의 상호작용에 의하여 생기는 것으로 이는 근본적으로 매질의 circular birefringence 때문에 일어난다.^[1,2] 자기 광학 효과는 물질의 원자, 전자 구조를 밝히는데 많은 기여를 했으며 최근 수직 자기 이방성^[3]을 갖는 비정질 희토류 천이금속 합금박막^[4,5]에서의 polar Kerr 효과나 garnet 결정 박막^[6,7]에서의 Faraday 효과를 이용한 광자기 기록은 소거 가능한 대용량 기록방식으로서 많은 관심을 끌고 있다.

등방성 매질에서의 polar Kerr 효과나 Faraday 효과는 유전율 텐서의 비대칭성 즉, 유전율 텐서의 비대각 원소가 자화의 기함수(odd function)이기 때문에 생기며 광자기 기록은 바로 박막내의 수직자화 분포가 곧 반사(또는 투과)광 편광면의 회전방향의 차이를 일으키는 현상을 이용한다. 보통의 자성 박막에서 생기는 회전각의 크기는 대략 0.1° 정도^[4,5]이다.

따라서 박막의 자기 광학적 특성을 정확히 평가하기 위해서는 미소한 회전각을 정확히 측정할 수 있는 측정장치가 필요하게 되는데 일반적으로 사용되는 DC 방법, 즉 교차된 두 편광기 사이에 있는 시료에서 회전각 θ 가 생겼을 때 $\sin^2\theta$ 에 비례하는 DC 광 출력을 검출하는 방법에서는 θ 가 0.1° 정도의 크기일 때 $\sin^2\theta$ 는 $\sim 10^{-6}$

정도가 된다. 이는 편광기의 소거 한계에 지나지 않기 때문에 측정에 큰 오차가 수반된다. 본 논문에서는 Faraday 회전자를 이용한 편광 변조 및 변조된 신호를 선택적으로 검출하는 phase sensitive detection 방법을 이용하여 진공 증착된 비정질 TbFeCo 광자기 기록 박막과 RF 스퍼터링 된 iron garnet 박막의 자기 광학적 특성을 조사하였다.

II. 편광 변조를 이용한 미소 회전각 측정 이론^[8,9]

입사광의 편광이 선편광의 수직 방향으로부터 θ 만큼 회전되어 있다고 가정할 때 광검출기의 전류는 다음과 같이 주어진다.

$$i = kI \sin^2 \theta + i' \tag{1}$$

여기서 i 는 광검출기의 전류, k 는 광검출기의 이득과 광학 부품들의 투과율, 박막의 반사율 등을 고려한 인자, I 는 광의 세기, i' 는 비편광된 빛 중에서 광검출기에 검출되어 생긴 전류로서 이는 편광기의 소거 한계에 해당된다.

θ 가 작을 때 ($\theta \ll 1$), 식 (1)은

$$i = kI\theta^2 + i' \quad (\theta: \text{radian}) \tag{2}$$

으로 쓸 수 있다.

지금 두 편광기 사이에는 Faraday 회전을 일으키는 시편과 편광을 각속도 ω 로 변조시키는 편광 변조기가 있다고 하자. 그러면 θ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta = \theta_s + \theta_m \cos \omega t \quad (3)$$

여기서 θ_s 는 시편에서 생긴 회전각, 즉 Kerr 회전각 θ_k 또는 Faraday 회전각 θ_f 이며 θ_m 은 편광 변조기에 의해 인위적으로 주입된 변조각이다. 따라서 식 (2)는

$$i = kI(\theta_s + \theta_m \cos \omega t)^2 + i' \\ = kI(\theta_s^2 + \frac{\theta_m^2}{2} + 2\theta_s\theta_m \cos \omega t + \frac{\theta_m^2}{2} \cos 2\omega t) + i'$$

가 되는데 이를 주파수 별로 분리하여 보면 (4)

$$i_{DC} = kI(\theta_s^2 + \theta_m^2) + i' \quad (5)$$

$$i_{\omega} = 2kI\theta_s\theta_m \quad (6)$$

$$i_{2\omega} = \frac{kI}{2} \theta_m^2 \quad (7)$$

이 된다. 이 중에서 구하고자 하는 θ_s 는 i_{DC} 와 i_{ω} 에 존재하는데, 보통 i' 의 크기가 $kI\theta_s^2$ 의 크기와 비슷하며 ($\theta_s \sim 1^\circ$ 일때 광검출기의 출력 약 5 mV 정도로 i' 의 크기와 같다) 실험실의 전압 변동에 따른 DC noise가 문제시 되므로 DC 성분은 버린다. 그래서 ω 성분만을 phase sensitive detector(PSD)를 써서 검출하게 되는데 이 때 PSD의 출력은

$$i_{\omega} = G \cdot i_{\omega} \quad (8)$$

가 된다. 여기서 G 는 주파수 ω 인 신호에 대한 PSD의 이득이다. 따라서 θ_s 는 (6)~(8) 식으로 부터 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{i_{\omega}}{i_{2\omega}} = \frac{4G \cdot \theta_s}{\theta_m} \quad (9)$$

여기서 $i_{2\omega}$ 는 θ_m 만을 포함하고 있으므로 먼저 θ_s 가 0일 때의 $i_{2\omega}$ 를 oscilloscope로 측정하고, θ_s 가 생겼을 때의 i_{ω} 를 PSD로 부터 측정할 수 있다. 또한 G 는 oscillator로부터 나오는 ω 신호를 직접 PSD에 입력시켜 출력 i_{ω} 를 측정함으로써 얻을 수 있다.

θ_m 을 측정하기 위해서는 시편에 의한 θ_s 대신에 광이 검광기와 편광 변조기를 거치기 전에 선편광기를 써서 광의 편광면을 검광기와 수직방향에 대해서 θ_s 만큼 인

위적으로 회전시켜 놓으므로써 측정할 수 있으며 이 θ_m 을 이용하여 시편에 의한 θ_s 를 측정할 수 있다. 이 편광 변조 방법에서 signal-to-noise ratio를 향상시키기 위해서는 레이저 출력을 크게 하거나 θ_m 을 식 (2)의 근사를 만족시키는 한도내에서 크게 하거나 또는 PSD의 gain 혹은 ω 신호에 대한 selectivity를 높게 하므로써 가능하다.

III. 실험

1. 편광 변조기

솔레노이드에 의한 자장 B 속에서 Verdet상수 V , 길이 l 의 투명한 물질이 놓여져 구성된 편광 변조기를 광이 투과할 때 일어나는 Faraday 회전각, 즉 편광 변조각은

$$\theta_m = VBl \quad (10)$$

으로 주어진다.

본 실험에서 사용한 회전자 물질은 길이 10 cm, 직경 5 cm의 FR-5(Hoya Optics)로서 이는 borosilicate 유리에 Tb₂O₃를 50%섞어 만든 상자성 물질인데, 파장에 따른 Verdet 상수는 다음과 같이 주어진다.

$$V(\lambda) = 0.0781 - 0.128\lambda^{-2} - 0.51310^{-3}\lambda^{-4} \quad (\text{min/Gcm}) \quad (11)$$

여기서 파장 λ 의 단위는 μm 이다.

He-Ne레이저 파장에서 V 의 값은 -0.242 min/Gcm 이고, 굴절률은 1.67인데 MgF₂로 rod의 양면을 무반사 코팅하여 사용했다. 유리 막대에 자장을 가하기 위한 솔레노이드는 길이 12 cm로서 지름 1 mm의 에나멜 동선을 균일하게 1510회 감았으며 코일의 직류저항은 3.8 Ω , 인덕턴스는 9.5 mH, 주파수 200 Hz에서의 전체 임피던스는 12.6 Ω 이다.

한편 식(9)를 보면 박막에서 일어나는 Kerr 회전각과 Faraday 회전각을 정확히 측정하기 위해서는 먼저 변조각 θ_m 을 정확히 알고 있어야 한다. 역으로 식 (9)로부터 만약 θ_s 를 알고 있다면 i_{ω} , $i_{2\omega}$ 를 측정하게 되면 θ_m 을 결정할 수 있는데 여기서 θ_s 에 해당하는 각을 편광기와 검광기가 수직 교차 위치로 부터 서로 벗어난 각 θ_A 로 하면 가능하다. 이럴 경우 식 (9)는

$$\theta_m = \frac{4G \cdot i_{2\omega}}{i_{\omega}} \theta_A \quad (12)$$

가 된다.

실험에서 편광기와 검광기를 완전히 교차시킨 상태에서 ($\theta_A=0$, $i_{\omega}=0$) $i_{2\omega}$ 를 oscilloscope로 측정하고 θ_A 를

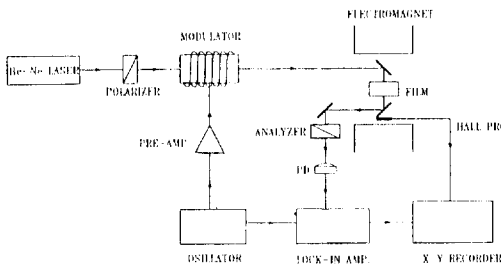


Fig. 1. Experimental setup for Faraday rotation angle hysteresis loop measurement.

0.1° 또는 0.2°씩 증가시키면서 PSD의 출력 i_p 를 voltmeter로 측정하여 식(12)로부터 θ_m 을 구하였다. 그 결과 솔레노이드에 전류를 160 mA 흘렸을 때 θ_m 은 평균 1.00°이며 오차는 약 1%이다(1.00°±0.01°). 실험에 사용된 편광기는 소거비가 10⁻⁶인 Glan Thompson 프리즘 편광기이다.

2. 박막의 Kerr 회전각과 Faraday 회전각 측정

박막의 polar Kerr 회전각 측정을 위하여 그림 1과 같은 실험 장치를 구성하였다.

He-Ne 레이저 광이 Glan Thompson 편광기를 지나면서 실험 테이블 면에 수직하게 즉, S파로 편광된 후 변조각 1.00°, 변조주파수 200 Hz의 편광 변조기를 지난다. 변조기를 구동하기 위하여 oscillator의 전압이 audio amplifier를 거쳐 출력이 증폭된 후 변조기에 전압이 가해진다. 자장은 박막에 수직하게 또는 평행하게 가해지며 박막을 자화시키기 위한 외부 자장은 최대 20 kG 까지 생성시킬 수 있는 전자석(Varian associates 제품)으로 공급했고 전자석 내에 들어가는 시료 지지대는 비자성체인 구리나 황동으로 만들었다. Polar Kerr 효과를 조사하기 위하여 알루미늄 거울을 설치하여 광이 박막에 수직하게 입사되도록 했으며 반사된 광은 편광기에 대해 수직 교차상태에 있는 검광기를 거쳐 Si 광 검출기 의해 검출된다. 이 때 출력 신호는 식 (4)로 주어지는데 $\theta_k=0$ 일 경우, 즉 자장이 걸리지 않은 상태의 광 검출기 신호의 2 ω 성분($kI\theta_m^2/2$)을 oscilloscope로 측정하였다. 이 경우 상수 k 에는 박막의 반사율이 포함되는데 TbFeCo 박막의 반사율은 45%내외이다. 자장을 서서히 가하면 박막이 자화됨에 따라 입사하는 선편광이 반사되면서 편광의 회전이 유도되는데 X-Y recorder의 X-축에는 자장의 세기를 Y-축에는 PSD의 출력을 연결하여 θ_k -H 이력곡선을 그린다. 이때 한 주기의 곡선을 그리는데 소요되는

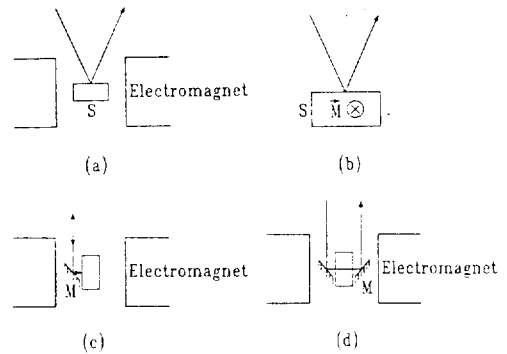


Fig. 2. Specimen alignments of (a) Longitudinal Kerr effect, (b) Transverse Kerr effect, (c) Polar Kerr effect, (d) Faraday rotation, S is a thin film specimen and M is magnetization M is a reflective mirror.

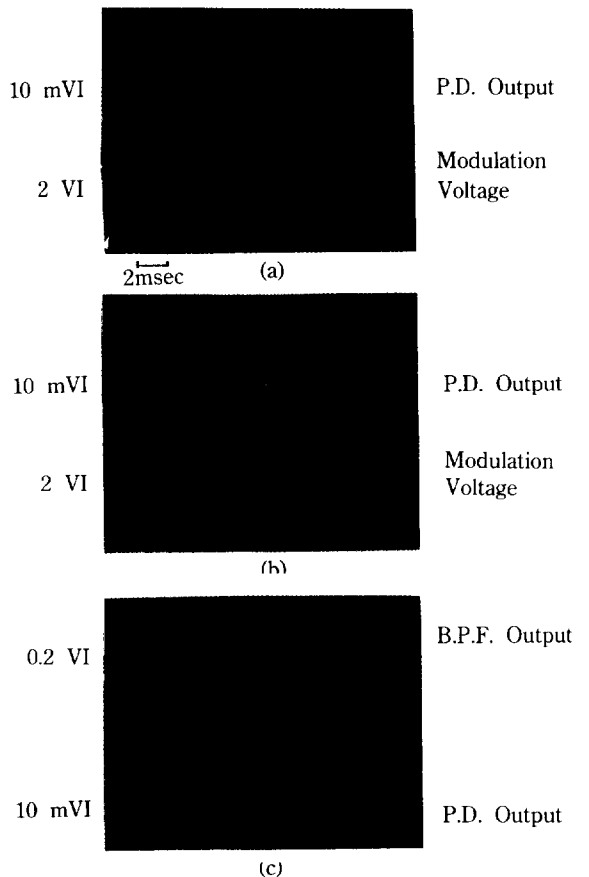


Fig. 3. Modulation voltage and photodetector output when magnetization is zero(a), magnetized(b), and photodetector output and bandpass filter output(c).

시간은 약 2분이다.

그림 2는 longitudinal Kerr 회전각과 Faraday 회전각 측정시의 시편 배치도이다.

그림 3은 광검출기 signal과 변조전압을 보여주는 사진이다. 사진 (a)는 자장을 가하지 않았을 때의 signal로서 주파수 2ω 만의 signal이 광검출기에 검출된다. 박막을 자화시켰을 때의 광검출기 signal이 (b)에 나타나 있는데 $2kI\theta_s\theta_m$ 크기의 ω signal이 생겼다. 만약 자화의 방향을 바꾸게 되면 광검출기의 위상도 180° 바뀌게 된다($\theta_s \rightarrow -\theta_s$). (c) 사진은 광검출기의 신호중 ω signal만을 LIA (lock-in amplifier)의 대역 통과 필터(band pass filter: BPF)를 거친 signal이고 이를 phase sensitive detector를 통과시킨 후 정류하여 적분하면 최종적인 DC 출력이 얻어진다. 이를 X-Y recorder의 Y-축에 연결하고 자장의 세기를 X-축에 연결하여 이력곡선을 그린다.

3. 시편 제작

실험에 사용된 TbFeCo 박막은 아르곤 기체 분위기 속에서 arc 용융법으로 제작된 텅스텐 basket으로 가열하여 세척된 slide glass 기판위에 증착시켰다. 기판의 온도는 부가적인 가열, 냉각을 하지않고 약 상온으로 유지했으며 진공도는 5×10^{-6} torr 내외이고 박막의 증착 속도는 $150 \text{ \AA}/\text{sec}$ 로 했다. 증착된 박막의 두께는 Tolansky 간섭계를 이용하여 측정했으며 실험에 사용된 박막의 두께는 1000 \AA 내외이다. 또한 iron garnet 다결정 박막은 RF 스퍼터링 방법으로 Corning glass(Corning 7059) 기판위에 제작되었다. 이때 사용된 스퍼터링 target은 $\text{Bi}_{1.5}\text{DyGaFe}_{3.5}\text{O}_{12}$ 로 산화물 powder를 직경 2 inch, 두께 4 mm 크기로 압축하여 약 900°C 에서 소결하여 만들었고 스퍼터링시의 Ar gas의 압력은 약 20 mtorr이며 base 진공은 1×10^{-5} torr 내외, 기판의 온도는 약 500°C 이다. 제작된 박막은 대부분의 경우 비정질 상태를 가지므로 garnet 결정으로 성장시키기위해서 post-annealing을 한다. Post-annealing은 약 600°C 의 furnace 속에 시편을 집어넣고 산소 분위기 속에서 주기적인 heating 방법인 multiple annealing technique 을 사용한다. Multiple annealing 은 약 5분간의 heating과 약 1분간의 cooling을 반복하여 약 1시간 동안 annealing 하는 것으로 종래의 annealing 방법보다 결정의 grain size 가 작고 균일하며 박막면의 morphology가 양호한 것으로 알려져 있다.¹⁰
¹¹ Faraday 회전각에 직접적으로 관계되는 garnet박막의 두께는 step의 높낮이를 측정할 수 있는 철필(stylus)을 이용하여 측정하였다. 박막의 두께는 edge effect로 말미암아 바깥쪽으로 갈수록 얇아지는데 중심에 비해 약

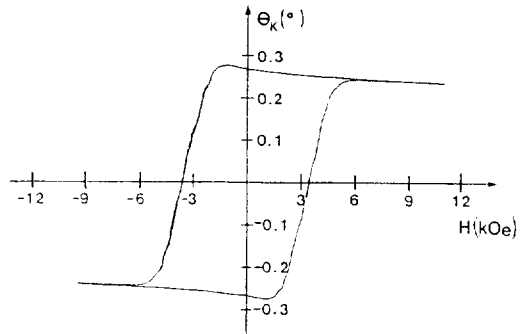


Fig. 4. A typical polar Kerr hysteresis loop of TaFeCo thin film. Thickness = 98 nm, R = 45%, $\theta = 0.27^\circ$, $H_c = 3.5 \text{ kOe}$.

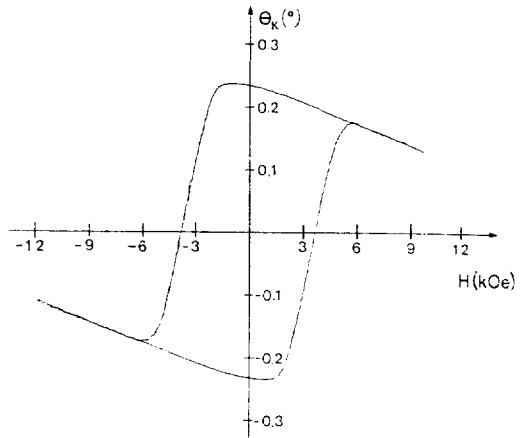


Fig. 5. A typical polar Kerr hysteresis loop measured from the glass substrate with thickness 1 mm. $\theta_k = 0.235^\circ$, $H_c = 3.7 \text{ kOe}$.

50%정도 차이를 보인다.

IV. 결과 및 논의

그림 4는 두께 980 \AA 의 $\text{Tb}_{0.21}\text{Fe}_{0.64}\text{Co}_{0.15}$ 희토류-천이 금속 합금 박막에 대해 제작 직후 레이저 광을 공기쪽으로 입사시켜서 조사한 이력곡선이다. 잔류 Kerr 회전각 θ_k 는 0.27° 이며 보자력은 3.5 kOe로서 이력 곡선의 모양은 square에 가깝다. 자장이 증가함에 따라 곡선의 꼬리 부분이 포화되지 않고 처지는 이유는 광의 일부분이 박막을 투과하여 기판 뒷면에서 반사되어 되돌아올 때 기판을 두번 투과함으로써 생기는 기판의 Faraday 회전 효과가 더해져서 광검출기에 들어오기 때문이다. 한편

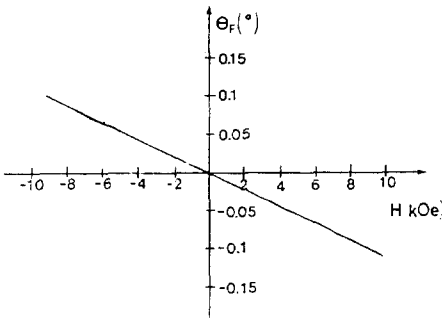


Fig. 6. Linear Faraday rotation characteristics of glass substrate with thickness 1 mm. Verdet constant = -7×10^{-3} min/Gcm.

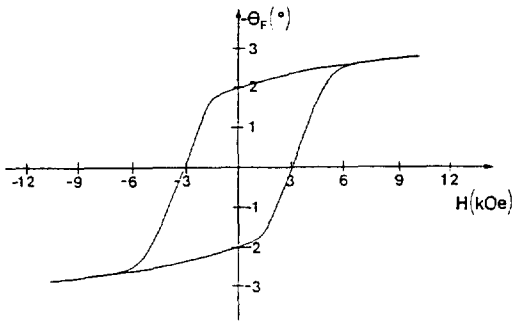


Fig. 7. Faraday hysteresis loop of TbFeCo thin film. Transmittance = 1%, $\theta_F = 2^\circ$, $H_c = 3.1$ kOe.

광을 두께 1 mm의 유리기판 쪽으로 입사시켰을 경우의 Kerr 이력 곡선이 그림 5에 나타나 있다. 이 경우 자장이 증가할수록 꼬리부분의 처짐이 더 심하게 나타남을 알 수 있다. 이 때의 Kerr 회전각은 0.235° 로 공기쪽 입사보다 적은 값을 갖는데 이는 경계조건이 다르기 때문에 생기는 반사계수의 차이로써 설명된다. 보자력은 3.7 kOe로서 공기쪽 입사보다 0.2 kOe 더 큰 값을 갖는다. 결과적으로 공기쪽과 기판쪽의 보자력 차이는 약 5%로서 박막 두께 전체에 걸쳐 볼 때 이 범위내에서 성분과 자기적 성질이 균일하다고 볼 수 있다. Slide glass는 반자성(diamagnetic)물질로서 Faraday 회전각은 VBI로 주어지며 자장에 비례하는데 기판의 자장에 대한 Faraday 회전 특성이 그림 6에 나타나 있다. 기판의 두께가 1 mm이므로 이 결과로 부터 verdet 상수를 계산하면 6328 \AA 의 광파장에서 $-7 \times 10^{-3} \text{ min/Gcm}$ 으로 Kerr 회전각과 극성이 반대이다. 그림 7은 두께 980 \AA , 투과율 1%의 TbFeCo 박막에 대한 Faraday 회전 이력 곡선이다. 역시 기판의 Faraday 회전 효과가 더해져 있어서 이력

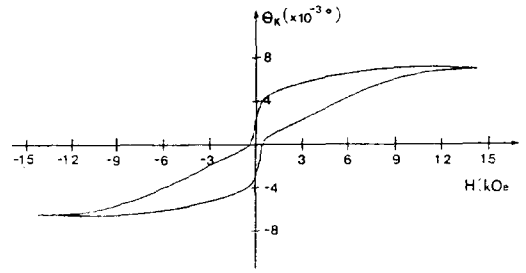


Fig. 8. Longitudinal Kerr hysteresis loop. Angle of incidence of the light is 10° .

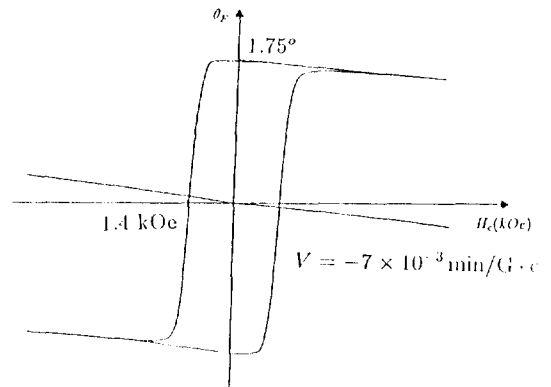


Fig. 9. Faraday rotation hysteresis loop of iron garnet thin film.

곡선의 모양이 기울어져 있다. 잔류 Faraday 회전각은 2° 로서 이를 박막의 두께로 나누면 specific Faraday 회전각은 $2 \times 10^5 / \text{cm}$ 가 된다. 그림 8은 자장을 박막면에 평행하게 가하면서 레이저 광의 입사각을 10° 로 해서 조사한 longitudinal Kerr 이력 곡선이다. Polar 방향과는 달리 자화의 반전이 좁은 자장 범위내에서 일어나지 않고 서서히 포화에 도달하는 자화 곤란 특성을 나타낸다. Polar 방향으로는 자화가 주로 자벽(domain wall)의 이동에 의해 자화될 때의 이력 특성 곡선을 가진다. 잔류 Kerr 회전각은 2.5×10^{-3} 이다. 그림 9는 두께 5000 \AA 의 iron garnet 박막에 대한 Faraday 회전 이력 곡선이다. 그림에서 이력 곡선의 중심을 지나는 직선은 기판의 Faraday 이력 곡선을 그린 것으로 이것이 박막의 Faraday 효과에 더해져서 그림과 같이 Faraday 이력 곡선이 전체적으로 기울어져 있다. 즉 박막의 Faraday 특성과 기판의 Faraday 특성이 더해져서 나타나는데 그 극성은 서로 반대임을 알 수 있다. 잔류 Faraday 회전각은 $1.75^\circ / \mu\text{m}$ 이며 보자력은 약 1.4 kOe이다.

5. 결 론

광자기 기록용 박막으로서 진공 증착법으로 제작된 비정질 TbFeCo 박막과 RF 스퍼터링 방법으로 제작된 iron garnet 다결정 박막의 자기 광학효과 (Kerr 효과, Faraday 효과)에 의한 미소 편광 회전각을 측정하는데 있어서 편광변조와 phase sensitive detection 방법을 이용하여 각 박막의 이력 곡선을 통해 조사하였다. 비정질 TbFeCo 박막의 경우 polar Kerr 이력곡선과 longitudinal Kerr 이력 곡선, Faraday 이력 곡선 등을 조사한 결과 약 0.25° 의 회전각, 특히 longitudinal Kerr 회전각의 경우 약 2.5×10^{-30} 의 매우 미소한 회전각을 측정할 수 있었다. 또한 iron garnet 다결정 박막의 Faraday 회전각은 $1.75^\circ/\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 한편 각 박막은 높은 보자력과 square 모양의 이력 곡선을 가짐으로써 광자기 기록 매질로 적합한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] R. P. Hunt, IEEE Tran. Magn. **MAG-5**, 700

- (1969).
- [2] J. Smit, *Magnetic properties of materials*, McGraw-Hill Book Co., Chap. 5.
- [3] M. H. Kryder, W. H. Meiklejohn and R. E. Skoda, **SPIE.420**, 236 (1983).
- [4] M. Akihiro, T. Satoh, J. Tada and T. Satoh, IEEE Tran. Magn. **MAG-22**, 928 (1986).
- [5] K. Nagato, A. Kawamoto, T. Sato and T. Yorozu, J. Appl. Phys. **63**, 3856 (1988).
- [6] M. Gomi, K. Utsugi and M. Abe, IEEE Tran. Magn. **MAG-22**, 1233 (1986).
- [7] K. Shono, H. Kano, N. Koshino and S. Ogawa, J. Appl. Phys. **63**, 3639 (1988).
- [8] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and polarized light*, North-Holland. Pub. Co., Chap. 4.
- [9] R. M. Duffy and R. P. Netterfeld, Appl. Opt. **22**, 1272 (1982).
- [10] T. Suzuki, F. Sequeda, H. Do, T. C. Huang and G. Gorman, J. Appl. Phys. **67**, 4435 (1990).
- [11] Katsuji Nakagawa, Kenji Odagawa and Akiyoshi Itoh, Japanese J. Appl. Phys. **29**, 1690 (1990).

Measurement of Magnetic Kerr Rotation and Faraday Rotation Angles by Polarization Modulation Method

Hyeon-Soo Kim and Sang-Soo Lee

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology

Yong-Ho Lee

Korea Research Institute of Standard Science

(Received: January 31, 1992)

In order to measure fine rotation angles by magneto-optic effects of magneto-optical recording thin films, a polarization modulation method is used. In the experiment, the polarization of laser (He-Ne laser) beam is modulated by a Faraday rotator and the amplified modulated signals are selectively detected by phase sensitive detector. The magnetic Kerr rotation and Faraday rotation hysteresis loops are investigated by this method for thermally evaporated amorphous TbFeCo thin films and RF sputtered garnet thin films. Rotation angles about 0.25° are measured easily from TaFeCo thin films. In the case of longitudinal Kerr rotation, very small rotation angle of 2.5×10^{-30} is measured with good accuracy of the measurement (about 1×10^{-40}). And it is found that each thin films have the hysteresis curves of high coercivity and good squareness.