

다중반사에 의한 금속다층막의 자기광학 Kerr 효과 분석

최영준

대구대학교 물리교육과, 경산 713-714

서용원

대구보건전문대학 안경광학과, 대구 702-260

(1994년 9월 15일 받음, 1994년 11월 28일 최종수정본 받음)

(Fe, Co)/(Pd, Pt, Cu, Ag)로 이루어진 금속 다층박막에 대한 자기광학 Kerr 효과 (θ_k) 스펙트럼을 박막내에서 빛의 다중간섭 이론을 적용하여 계산하였고, 그 결과를 보고된 실험값과 비교하였다. Co/Pd 다층막의 경우, θ_k 스펙트럼의 조성에 따른 파장 의존성에 대한 계산값과 실험값이 서로 잘 일치하였으며, Fe/Cu 및 Fe/Ag 다층막에 있어서는 Cu와 Ag의 광흡수단 영역에서 다층막 고유의 새로운 peak가 나타나는 실험현상을 계산결과로 설명이 가능하였다. 그러나 Co/Pt 다층막의 경우에는 실험으로 측정된 300 nm 파장 영역에서의 거대한 자기광학 효과를 다중간섭이론으로는 설명할 수 없었으며, 이는 Co 또는 Pt 고유의 광학정수가 다층막을 이루면서 변화되어 나타나는 현상으로 생각된다.

I. 서 론

이종의 원자 또는 분자를 교대로 기판위에 퇴적시킨 다층막은 2차원적인 배열을 한 원자가 나타내는 특이한 전기적 및 자기적 성질에 대한 물성적인 흥미를 끌 뿐만이 아니라, 이러한 새로운 성질을 응용한 신재료 개발 가능성에 대한 기대로 관심을 모으고 있다[1, 2]. 특히 강자성체와 귀금속으로 이루어진 자성다층막이 수직자화의 성질을 가지고 있으며 자기광학 Kerr회전각(θ_k)이 크다는 발표가 있는 이후[3, 4], 자성다층막을 광자기기록 재료로 응용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[5, 6].

Co와 Pd 또는 Pt으로 이루어진 Co/Pd 및 Co/Pt 다층막의 θ_k 스펙트럼은 Co만의 그것과는 달리 장파장에서 보다 단파장에서 큰 θ_k 를 보이고 있으며, Co/Pt 다층막의 경우는 300-400 nm 파장 영역에서 Co를 능가하는 큰 θ_k 를 나타 내고 있음이 보고된 바 있다[4, 7]. 또한 Fe/Cu 및 Fe/Ag 등의 다층막에서도 Cu와 Ag의 광흡수단 영역인 600 nm 및 300 nm 파장에서 각각 Fe 보다 큰 θ_k 를 보이는 등 자성다층막의 자기광학 효과는 각층의 종류 및 두께에 따라 변화가 심하게 나타남이 Katayama[8] 등의 실험결과로 잘 알려져있다.

자성다층막의 다양한 자기광학 효과의 원인으로는 박막의 2차원성에 의한 비대칭분포로 자성원자의 전자상태가 bulk 상태의 그것과 다르게 되어 나타날 수 있다. 또한 다층막에 d전자가 국재하고 있는 귀금속이 포함된 경우

에는 자성금속의 자기모멘트가 귀금속의 전도전자 및 d 전자를 분극시켜 귀금속에 의한 자기광학효과 및 반대로 자성금속의 d전자상태가 귀금속에 의하여 변화되어 나타나는 효과 등에 의한 여러가지 가능성이 있을 수 있으나 [9], 아직까지 그러한 효과들에 의하여 다층막의 자기광학 Kerr spectrum을 설명할만한 명확한 실험결과는 없다. 한편 전자상태의 변화가 없는 경우에는 다층막내의 자성금속층과 귀금속층이 각각 금속 고유의 도전율을 갖고 있는 것으로 생각된다. 그러나 다층막 전체의 가상 복소굴절률이 금속의 종류 및 각층의 두께에 따라 변화됨에 의하여 자성금속 특유의 자기광학효과가 변화되어 나타날 가능성이 있다.

본 논문에서는 자성다층막내의 각층이 고유의 광학정수를 유지한다고 보고 박막내에서 일어나는 빛의 다중간섭효과를 고려하여 TM(Co, Fe)/NM(Pd, Pt, Ag, Cu)으로 이루어진 다층막의 자기광학 Kerr spectrum을 계산적으로 구하고 이것을 보고된 실험값과 비교하여 고찰하였다.

II. 자기광학효과와 광학정수와의 관계

직선편광된 광선이 자성체 표면에 수직으로 입사하여 반사될 때 그 반사광은 일반적으로 편광축이 회전된 타원편광이 된다. 이와 같은 현상을 자기광학 Kerr 효과라 하며 타원의 장축이 회전된 각도를 자기광학 Kerr회전각

(θ_k), 타원율을 자기광학 Kerr타원율(η_k)이라 하고 각각은 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\theta_k = \frac{1}{2} \tan^{-1}[\tan 2\alpha \cos(\psi_y - \psi_x)] \dots\dots\dots(1)$$

$$\eta_k = \frac{1}{2} \sin^{-1}[\sin 2\alpha \sin(\psi_y - \psi_x)] \dots\dots\dots(2)$$

윗 식의 α 와 ψ_x, ψ_y 는

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{|\gamma_y|}{|\gamma_x|} \dots\dots\dots(3)$$

$$\hat{\gamma}_x = |\gamma_x| e^{i\phi} = (\hat{\gamma}^- + \hat{\gamma}^+) \dots\dots\dots(4)$$

$$\hat{\gamma}_y = |\gamma_y| e^{i\phi} = (\hat{\gamma}^- - \hat{\gamma}^+) \dots\dots\dots(5)$$

로 표현되어지고, $\hat{\gamma}^+$ 와 $\hat{\gamma}^-$ 는 직선편광된 입사광선을 우원편광(+)과 좌원편광(-) 성분으로 분해했을 경우 각각에 대한 복소반사계수를 의미한다. $\hat{\gamma}^{\pm}$ 는 그림 1과 같이 유리기판 위에 먼저 Co 혹은 Cu, Ag 등을 h_2 두께로 증착한 다음으로 이어서 Pd, Pt, 또는 Fe 등을 h_1 의 두께로 교대로 퇴적시킨 형태의 일반적으로 실험에 이용되는 다층막 구조를 고려한 경우 다음식으로 나타내어진다[10].

$$\hat{\gamma}^{\pm} = \frac{\hat{\gamma}_{0,1}^{\pm} + \hat{\gamma}_1^{\pm} e^{i\phi_1}}{1 + \hat{\gamma}_{0,1}^{\pm} \hat{\gamma}_1^{\pm} e^{i\phi_1}} \dots\dots\dots(6)$$

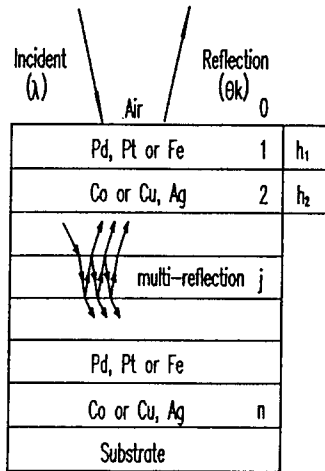


Fig. 1. Schematic diagram of a model for the structure of multilayer film.

이 식에서 $\hat{\gamma}_{0,1}^{\pm}$ 은 공기와 제1층 사이에서 나타나는

Fresnel 계수이며 위상각 ϕ_1^{\pm} 은 $4\pi h_1 \hat{n}_1^{\pm} / \lambda$ (\hat{n}_1^{\pm} 은 제1층의 우원 및 좌원 편광에 대한 복소굴절률, λ 는 입사광선의 진공중의 파장)을 의미한다. 또한 $\hat{\gamma}_1^{\pm}$ 은 제1층과 그 아래 전체층과의 사이에 나타나는 가상 복소반사계수이고, 이는 일반적으로 j층과 j층 이하 전체와의 가상 복소반사계수($\hat{\gamma}_j^{\pm}$)를 연산하여 계산되며, $\hat{\gamma}_j^{\pm}$ 는

$$\hat{\gamma}_j^{\pm} = \frac{\hat{\gamma}_{j,j+1}^{\pm} + \hat{\gamma}_{j,j+1}^{\pm} e^{i\phi_{j+1}}}{1 + \hat{\gamma}_{j,j+1}^{\pm} + \hat{\gamma}_{j,j+1}^{\pm} e^{i\phi_{j+1}}} \dots\dots\dots(7)$$

로 표현되고, j층과 j+1층 사이의 복소반사계수는

$$\hat{\gamma}_{j,j+1}^{\pm} = \frac{\hat{n}_j^{\pm} - \hat{n}_{j+1}^{\pm}}{\hat{n}_j^{\pm} + \hat{n}_{j+1}^{\pm}} \dots\dots\dots(8)$$

로 주어지는 Fresnel계수이다.

그러므로 각층의 광학정수인 복소굴절률(\hat{n}_j^{\pm})을 알고 있으면 (8)식에 대입하고 그 결과를 (7)식에 대입하는 등의 과정으로 금속다층막에서의 자기광학 Kerr spectrum을 이론적으로 계산할 수 있다.

III. 계산결과 및 고찰

계산에서 TM류의 파장별 우원 및 좌원편광에 대한 복소굴절률(\hat{n}_j^{\pm})값은 Krinchik[11]이 보고한 값을 인용하였고, NM류는 비자성체로 보고 Johnson의 data[12]를 인용하였다. 실험이나 계산에 사용된 다층막의 두께는 약 1000 Å 정도로 빛이 통과하지 못할 정도로 충분히 두껍다고 가정하여 기판에서의 다중반사 효과를 무시하였으며, 기판은 SiO₂ 유리로 가정하고 Philipp의 data[13]를 사용하였다.

Fig. 2(a)와 (b)는 각각 1000 Å 두께의 Co 및 Fe 단층막에 대한 θ_k 의 계산결과 (o표시)와 이와 비교를 위하여 Choe[14] 등이 측정된 실험값(+표시)을 함께 표시하였다. Co의 경우 계산값과 실험값 모두 파장이 짧아지면서 θ_k 가 감소하다가 400 nm 파장 부근에서 증가하는 동일한 경향을 보이고 있으나, 계산치가 더 급격한 변화를 보인다. Fe의 경우도 계산값 및 실험값 모두 파장이 짧아지면서 감소하다가 400-500 nm 파장 영역에서 증가하는 서로 유사한 경향을 보이고 있으나, Co와 마찬가지로 계산값이 전파장 영역에서 작고 더 급격한 변화를 보이고 있다. Fig. 1(a)의 로 표시된 data는 Krinchik이 보고한 Co의 광학정수중 \hat{n}^+ 값의 실수부를 약 ±3% 정도 수정하여 계산한 θ_k 로 실험값과 거의 같은 값이 됨을 나타내고 있다. Co 및 Fe 단층막에 대한 θ_k 의 계산값과 실험값이 다른 것

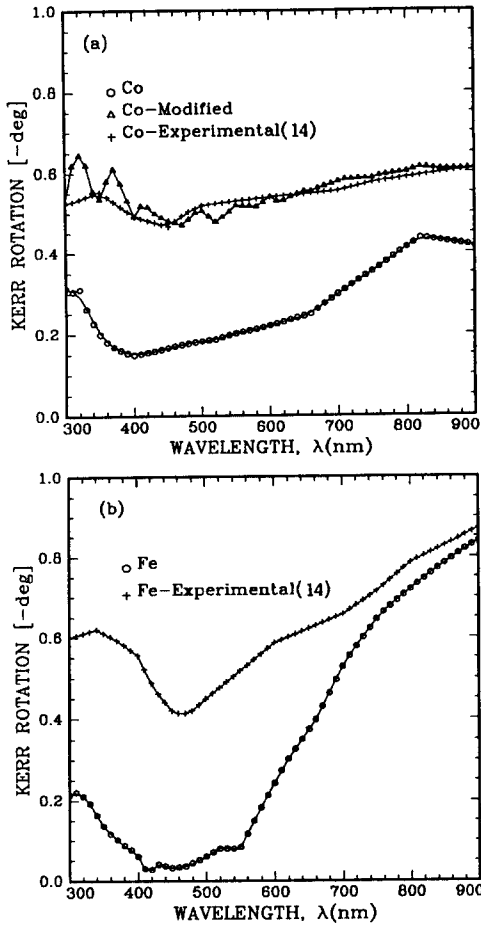


Fig. 2. Wavelength dependence of magneto-optical Kerr rotation (θ_k) of (a) Co film, and (b) Fe film.

은 Krinichik이 \hat{n}^+ 값을 측정할 때 사용한 Co 막과 Choe 등이 θ_k 측정에 사용한 Co 막과는 막의 상태가 약간 다를 수 있으므로, 이로 인하여 나타나는 미소한 광학정수의 차이 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 3(a)는 Co/Pd 다층막의 θ_k 스펙트럼 계산값을 나타내었으며 비교를 위하여 Co 단층막의 계산값도 함께 표시하였다. 그림에서 보인 다층막의 표시는 $(Co_{XX}/Pd_{YY})_{ZZ}$ 로 하였으며 XX는 Co 한 층, YY는 Pd 한 층의 두께를 Å 단위로 나타낸 값이고, ZZ는 bilayer $(XX + YY)$ 의 층수를 의미하며, XX, YY, ZZ 값은 실험값과 일치하도록 선택하였다. Fig. 3(a)의 계산값에 해당하는 다층막 구조에 대하여 실험으로 Nakamura[7]가 측

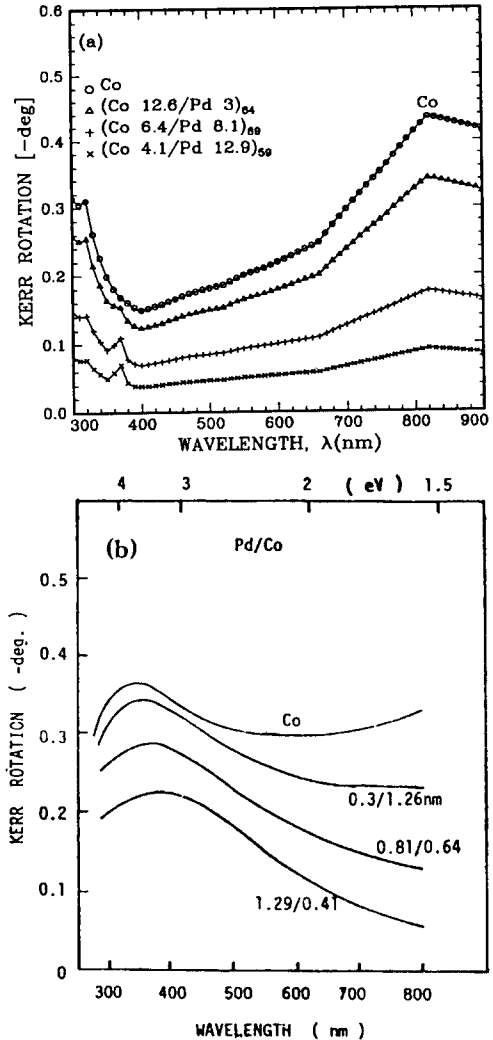


Fig. 3. Wavelength dependence of magneto-optical Kerr rotation (θ_k) of Co/Pd multilayer films, (a) calculation and (b) experimental[7].

정한 θ_k 스펙트럼을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 계산값 및 실험값 모두 다층막의 θ_k 와 단층막의 그것과 유사한 파장의존성을 보이고 있으며, 또한 Co의 두께가 얇아질수록 θ_k 값이 전파장영역에서 작아지고 장파장에서 감소폭이 단 파장에서 보다 크게 나타나는 등 여러가지 일치하는 경향을 보이고있다. 그러나 계산값 중 Co의 두께가 6.4 Å 및 4.1 Å 인 다층막의 θ_k 스펙트럼 중 370 nm 파장영역에서 보이는 작은 peak가 실험치에서는 나타나지 않았으며, 이

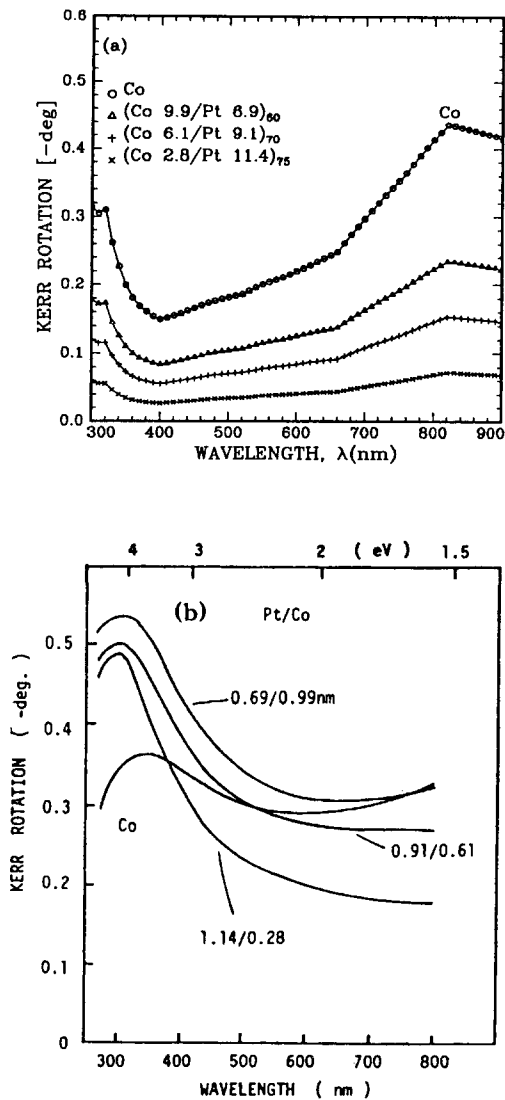


Fig. 4. Wavelength dependence of magneto-optical Kerr rotation (θ_k) of Co/Pt multilayer films, (a) calculation and (b) experimental[7].

는 실험에 사용된 막의 계면상태와 관계가 있는 것으로 생각된다.

Fig. 4(a)와 (b)는 Co/Pt 여러 다층막에 대한 파장에 따른 θ_k 의 계산값과 실험값을 각각 나타내었다. 계산값의 경우 다층막에 대한 θ_k 스펙트럼은 Co 만의 그것과 유사하며 Co층의 두께가 얇아짐에 따라 θ_k 값도 전파장에 걸쳐 작아진다. 한편 실험값의 경우에 있어서는 다층막의 경우 Co층의 두께가 얇아짐에 따라 θ_k 가 작아지는 경향

이 계산값과 유사하나 단파장 영역에서의 계산값과는 달리 다층막의 θ_k 값이 Co 단층막 만의 그 값을 능가하는 현상이 나타난다. 이러한 Co/Pt 다층막의 특유의 현상은 다층막내에서 빛의 다중반사에 의한 현상으로 이해될 수 없고, Co나 Pt이 다층구조에 의하여 그 고유의 전자 상태를 유지하지 못하는 것으로 생각된다.

Fig. 5에 Co/Pt 다층막의 bilayer 두께를 30으로 하고 각 층의 두께를 여러가지로 변경시켜가며 계산한 θ_k 스펙트럼을 보이고 있으나 어느 다층막도 Co만의 θ_k 를 능가하지는 못하였다.

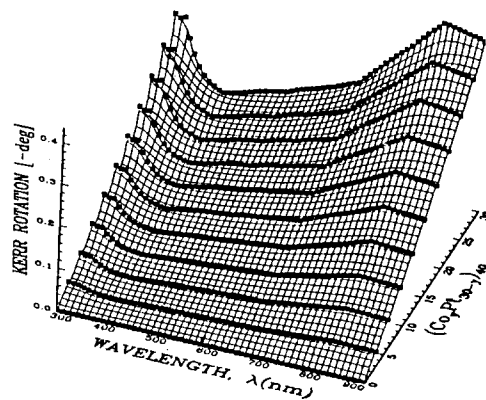


Fig. 5. Wavelength dependence of magneto-optical Kerr rotation (θ_k) of [Co y/Pt (30-y)]₄₀ multilayer films.

그림 6(a), (b)에는 Fe 단층막 및 Fe/Cu 다층막의 θ_k 스펙트럼에 대한 계산값 및 실험값을 나타내었다. 계산값 및 실험값 모두 600 nm 이상의 장파장 영역에서 파장이 길어짐에 따라 Fe 단층막은 증가하는 반면 다층막은 급격히 감소하는 경향이 있다. 또한 단층막에서 볼 수 없는 580 nm 부근의 파장 영역에서 새로운 peak를 나타내고 있으며 bilayer의 두께가 두꺼워질수록 실험값과 계산값 모두 명확하게 나타난다. 계산값의 경우 630 nm 파장에서 다층막 특유의 peak를 나타내고 있으며 또한 Fe 만의 θ_k 값을 능가하고, 이러한 경향은 계산값이 실험값 보다 명확하고 폭 넓은 파장영역에 걸쳐서 나타나 있다. Fe/Cu 다층막의 두께 의존성에 대한 θ_k 스펙트럼의 계산값과 실험값이 여러가지 유사한 점으로 보아 실험값에서 나타난 Fe/Cu 다층막의 600 nm 부근 영역의 peak는 빛의 다중간섭에 의한 영향인 것으로 보인다.

그림 7(a), (b)는 Fe/Ag 다층막에 대한 θ_k 의 계산값

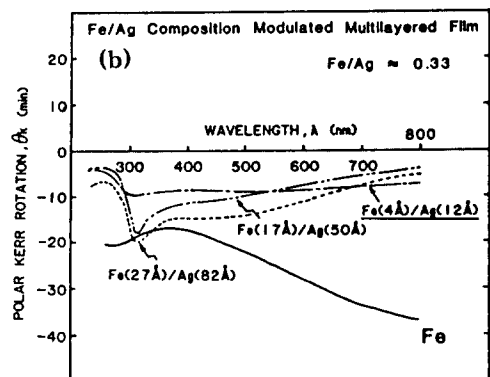
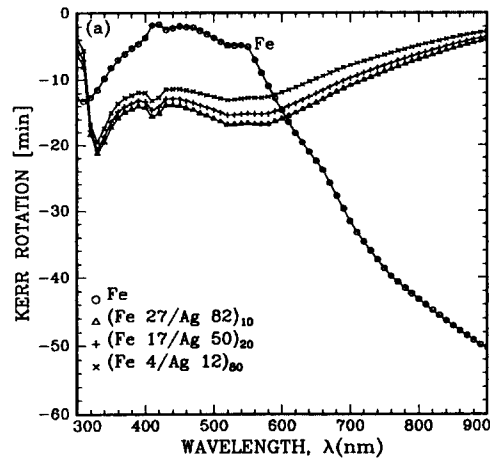
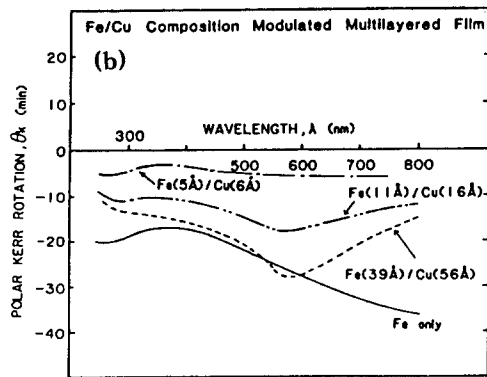
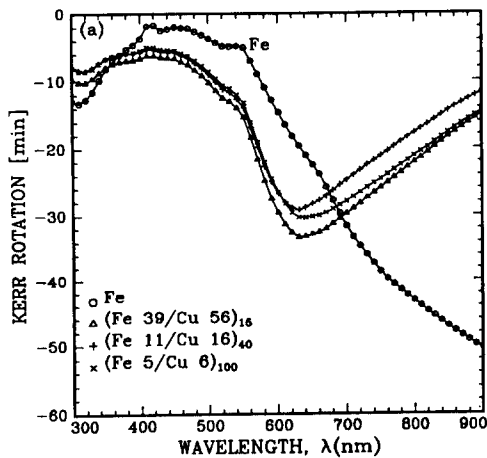


Fig. 6. Wavelength dependence of magneto-optical Kerr rotation (θ_k) of Fe/Cu multilayer films, (a) calculation and (b) experimental[8].

Fig. 7. Wavelength dependence of magneto-optical Kerr rotation (θ_k) of Fe/Ag multilayer films, (a) calculation and (b) experimental[8].

및 실험값을 각각 Fe 단층막의 그것과 함께 표시하였다. 다층막의 θ_k 스펙트럼과 Fe 단층막의 그것과 장파장 영역에서는 실험값 및 계산값 모두 크게 다르게 나타나 있으며 이런 현상은 그림 6의 Fe/Cu 에서 설명한 바와 유사하다. 그러나 Fe/Cu 다층막의 θ_k 스펙트럼이 630 nm 부근 파장에서 peak를 보인 반면 Fe/Ag는 보다 짧은 파장인 320 nm 부근에서 예리한 peak를 보이고 있다. 이 파장에서 Fe/Ag 다층막이 Fe만의 θ_k 보다 크며 이와 같은 현상은 실험값과 계산값이 유사하나, 계산값은 600 nm 까지의 넓은 파장영역에 걸쳐 나타난다. Fe/Ag 다층막에 대한 θ_k 스펙트럼의 실험값에서 나타나는 320 nm의 peak는 Fe/Cu 다층막과 같이 광 다중간섭효과가 원인인 것으로 생각되며, 이러한 Fe/Cu 및 Fe/Ag 다층막에서 보이는 특유의 peak는 Cu와 Ag의 광흡수단이 각각

600 nm와 300 nm에 존재하는 것과 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.

IV. 결 론

Fe, Co 등의 강자성 금속과 Pd, Pt, Cu 및 Ag 등의 귀금속을 유리기판위에 교대로 퇴적시켜 만든 금속 다층막에서의 자기광학 Kerr효과를 광의 다중간섭 이론으로 계산하였고, 그 계산 결과를 발표된 실험값과 비교하였다.

이미 보고된 Co/Pd 다층막의 자기광학 Kerr효과와 파장의존성이 Co의 그것과 비슷하고 Co층이 얇아질수록 전파장 영역에서 θ_k 값이 작아지나 장파장 영역이 단파장 영역보다 더 급격히 감소한다는 것과, 또한 Fe/Cu 및

Fe/Ag 등의 다층막에서는 Cu 및 Ag의 광흡수단 영역인 600 nm 및 300 nm 파장에서 Fe에서는 없는 새로운 peak가 나타나며 그 크기가 Fe의 자기광학 kerr 효과를 증가하는 등의 실험으로 보고된 다층막 특유의 자기광학 Kerr 스펙트럼을 광의 다중간섭 현상으로 잘 설명된다. 그러나 Co/Pt의 경우 다층막의 θ_k 값이 Co층의 두께가 얇아질수록 작아지는 실험 측정값과 계산결과가 잘 일치 하였으나, 단파장 영역에서 다층막의 θ_k 값이 Co의 그것을 크게 증가하는 실험 현상을 광의 다중간섭이론으로는 설명할 수 없었다. 이러한 Co/Pt 다층막 특유의 단파장 영역에서의 큰 자기광학효과는 Co 또는 Pt이 다층구조를 이루면서 그 고유의 전자구조에 변화가 생기는 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- 1) B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit and D. Mauri : Phys. Rev. B, **43**, 1297(1991)
- 2) H. Takahashi, S. Fukatsu, S. Tsunashima and S. Uchiyama, J. Mag. Magn. Mat., **104**, 1831 (1992)
- 3) P. F. Carcia, A. D. Meinhardt, A. Suna, j. Appl. Phys. Lett., **47**, 178(1985)
- 4) K. Nakamura, S. Tsunashima, S. Iwata and S. Uchiyama, J. Mag. Soc. Jpn., **13**, 319(1989)
- 5) 임은식, 김상철, 최옥식, 이진호, 최송화, 박성배, 최영준, 김택기, 응용물리, **5**, 606(1992)
- 6) 유천열, 김진홍, 신성철, 한국자기학회지, **4**, 32(1994)
- 7) K. Nakamura, Ph. D thesis (Nagoya Univ. 1991) 67
- 8) T. Katayama, J. Magn. Soc. Jpn., **11**, 567(1987)
- 9) 강정수, 김상국, 정재인, 홍재화, 이영백, 신현준, C. G. Olson, 한국자기학회지, **3**, 48(1993)
- 10) K. C. Kim, Y. S. Kim, J. H. Kim, H. Moon, K. H. Hong and D. H. Ahn, J. APPL. Phys., **69**, 5987(1991)
- 11) S. G. Krinchik and V. A. Artem'ev, Soviet Physics JEPT, **26**, 1080(1968)
- 12) P. B. Johnson and R. W. Christy, Physics Rev., B, **9**, 5056(1974)
- 13) E. D. Palik, Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press (1985) 759
- 14) Y. J. Choe, K. Nagase, S. Tsunashima and S. Uchiyama, J. Magn. Soc. Jpn., **12**, 207(1988)

Analysis for the magneto-optical Kerr effect of metal multilayers by optical multiple reflection

Y. J. Choe

Dept. of Physics Education, Taegu Univ, Keongsan 713-714

Y. W. Seo

Dept. of Ophthalmic Optics, Taegu Health Junior College, Taegu 702-260

(Received 15 September 1994, in final form 28 November 1994)

The magneto-optical Kerr effect due to the (Fe,Co)/(Pd,Pt,Cu,Ag) multilayer film is calculated considering of multiple reflection effect, and the calculated Kerr spectrum is compared to the reported experimental value. In case of Co/Pd, the reliance of composition and the variable tendency of magneto-optical Kerr rotation angle for Co thickness fully corresponds to experimental and theoretical value. The theoretical Kerr spectrum of Fe/Cu and Fe/Ag multilayer films show the peaks near the Cu and Ag optical absorption band in accordance with the experiment. But in case of Co/Pt, the increase tendency of Kerr rotation with decreasing wavelength reported by experiments could not be explained by the optical multiple interference. This difference of theoretical and experimental Kerr spectrum of Co/Pt film might be related with the change of electronic structure of Co and/or Pt from their bulk state.