

## 확장된 유효 유전율 텐서를 이용한 자성 박막의 자기광학 및 광학적 빛피의 해석

한국과학기술원 유 천열\* · 신 성철, 아주 대학교 김 상열

Magneto-Optical and Optical Spectra of Magnetic Thin Films  
Using Modified Effective Dielectric Tensor Theory.

KAIST C.-Y.You\*, S.-C.Shin, AJOU Univ. S.-Y.Kim

## 1. 서론

일반적으로 시료의 물리적 성질은 그 미세 구조에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 특히 보자력이나 자기 이방성 에너지 등의 자기적 성질은 시료의 미세 구조에 의해 그 값의 자리수가 변할 정도로 민감한 양이다. 또한 금속의 광학적 성질 역시 시료의 미세 구조의 영향을 받는다는 사실 역시 잘 알려져 있고 이에 대해서도 많은 연구가 이루어져왔다. 그러나 자기 광학적 효과가 시료의 미세 구조에 영향을 받을 것이라는 자명한 사실에도 불구하고 이에 대한 연구는 그 중요성에 비해서 많지가 않았었고, 이론이 실험적 결과를 충분히 설명하지 못하였다. 따라서 실험적 결과를 올바르게 설명하기 위해서는 좀 더 개량된 이론이 필요하므로, 본 연구에서는 스칼라 양인 유전율 상수에 대해서 만들어진 Bruggeman의 유효 매질 이론을 비대각 성분이 있고 입방 대칭성이 있는 자성 타원체(magnetic ellipsoid)의 유전율 텐서에 대해 적용되도록 확장시켰고, 섬 구조를 가진 20 Å의 Co에 대한 Nakajima[1]의 실험 데이터를 이용해 비선형 fitting의 결과 Abe[2]의 이론을 이용한 결과보다 실험치와 더 잘 일치함을 보였다.

## 2. 확장된 유효 유전율 텐서 이론

Bruggeman의 유효 매질 이론을 비대각 성분이 있고 입방 대칭성이 있는 자성체의 유전율 텐서에 대해 확장하기 위해 유전율 텐서  $\tilde{\epsilon}_1$ 인 자성체 매질 1과 유전율 텐서  $\tilde{\epsilon}_2$ 인 비자성체 매질 2가 각각  $f$ 와  $1-f$ 의 확률로 존재할 수 있고, 그 주변은 유효 매질 이론으로 결정되는 유효 유전율  $\tilde{\epsilon}^{eff}$ 인 가상의 유효 매질로 둘러 쌓여 있고 가정하면 아래와 같은 식을 유도 할 수 있다[3].

$$0 = f(\tilde{\epsilon}_1 - \tilde{\epsilon}^{eff})(\tilde{\epsilon}^{eff} + \tilde{L} \cdot (\tilde{\epsilon}_1 - \tilde{\epsilon}^{eff}))^{-1} + (1-f)(\tilde{\epsilon}_2 - \tilde{\epsilon}^{eff})(\tilde{\epsilon}^{eff} + \tilde{L} \cdot (\tilde{\epsilon}_2 - \tilde{\epsilon}^{eff}))^{-1} \quad (1)$$

여기서  $\tilde{L}$ 은 회전 타원체의 모양에 의해 결정되는 편극 소거 텐서 (depolarizing tensor)이고, 위의 텐서 방정식(1)은 유전율 텐서를 모두 스칼라로 치환할 경우 일차 근사 범위내에서 잘 알려진 Bruggeman 이론의 결과와 같다. 이 결과를 다시 나타내 보면,

$$0 = (\tilde{L} - 1) \cdot \tilde{\epsilon}^{eff} \cdot \tilde{\epsilon}^{eff} + ((f\tilde{I} - \tilde{L}) \cdot \tilde{\epsilon}_1 + ((1-f)\tilde{I} - \tilde{L}) \cdot \tilde{\epsilon}_2) \cdot \tilde{\epsilon}^{eff} + \tilde{L} \cdot \tilde{\epsilon}_1 \cdot \tilde{\epsilon}_2 \quad (2)$$

와 같다. 여기서  $\tilde{I}$ 는  $3 \times 3$  단위 텐서이다. 이때, 여기서  $L_x = L_y = L$ ,  $L_z = 1 - 2L$ 라 놓고 위의 식(1)을 각 성분 별로 풀면 유효 유전율 텐서  $\tilde{\epsilon}^{eff}$ 의 대각 성분  $\tilde{\epsilon}_{xx}$ 에 대해  $\tilde{\epsilon}_1$ 의 대각 성분과 비대각 성분의 비인  $\epsilon_{xy}/\epsilon_{xx}$ 의 일차 근사 범위 내에서 아래와 같은 관계식이 성립한다.

$$\tilde{\epsilon}_{xx}^2 + \left( \frac{f-L}{L-1} \epsilon_{xx} + \frac{1-f-L}{L-1} \epsilon_0 \right) \tilde{\epsilon}_{xx} + \frac{L}{L-1} \epsilon_{xx} \epsilon_0 = 0 \quad (3)$$

위의 식(3)은 주어진 매질 1의 채적비  $f$ 와  $L$ 에 대해서 풀리는 이차 방정식이고 이는 Bruggeman 이론에 의한 결과와 같다. 또,  $\tilde{\epsilon}^{eff}$ 의  $zz$ 성분인  $\tilde{\epsilon}_{zz}$ 에 대해서도  $L$ 을  $1 - 2L$ 로 치환하면 비슷한 방정식을 얻을 수 있다. 여기서 구해진  $\tilde{\epsilon}_{xx}$ 를 이용하면 유효 비대각 성분  $\tilde{\epsilon}_{xy}$ 에 대해서 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\tilde{\epsilon}_{xy} = \frac{((f-L)\tilde{\epsilon}_{xx} + L\epsilon_0)}{2(1-L)\tilde{\epsilon}_{xx} + (L-f)\epsilon_{xx} + (f+L-1)\epsilon_0} \epsilon_{xy} \quad (4)$$

이렇게 얻어진 식(4)은 앞에서 언급한 바와 같이 Abe[2]의 결과와는 다르다.

### 3. 이론적 계산

이미 발표된 다른 실험 결과들과 비교를 하기 위해서 Nakajima[1]의 실험 데이터를 인용하였다. Nakajima의 데이터 중 섬 구조의 20-Å 두께의 Co 박막에 대한 유전율 텐서의 변화를 계산하여 그림 1에 도식하였다. 20-Å 정도 두께의 금속 박막은 유리 기판 위에서 섬 구조를 형성하며 자라나는 것으로 알려져 있으므로 본 이론을 적용하기 적합한 대상이라 생각된다. 여기서 실선은 Nakajima의 1000-Å Co의 측정결과를 인용해서 본 논문의 모델을 이용한 비선형 fitting의 결과이다. 또 여기서 점선은 Nakajima의 fitting 결과를 나타내고, open circle은 실험 데이터를 나타낸다. 이때 대각 성분과 비대각 성분 중 실수부만을 나타내고 허수부는 생략하였다.

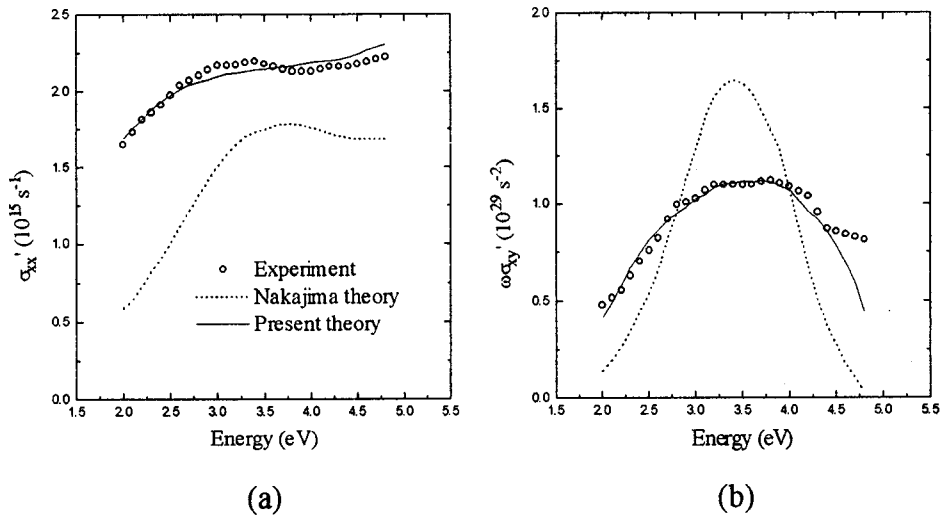


그림 1. Calculated  $\sigma_{xx}$  and  $\omega\sigma_{xy}$  spectra for 20-Å Co film. Solid line represents modified tensor Bruggeman theory, dashed line represents Nakajima's, and open circles are for experimental data of (a) real part of  $\sigma_{xx}$  and (b) real part of  $\omega\sigma_{xy}$ .

### 4. 결론

미세 구조의 변화에 의한 물질의 자기 광학적 및 광학적 빛파의 변화를 설명하기 위해서 기존의 Bruggeman의 유효 매질 이론을, 비대각 성분이 존재하고 입방 대칭성이 있는 자성 타원체의 경우에 대해서 확장했다. Nakajima[1]의 20-Å Co에 대한 in situ 실험 결과를 이용해서 유도된 이론을 적용한 결과 실험 데이터를 잘 설명할 수 있었다.

### 4. 참고문헌

- [1] K.Nakajima and T.Miyazaki, ISPM'95, Seoul, 899 (1995).
- [2] M.Abe and M.Gomi, Jpn. J. Appl. Phys. 23, 1580 (1984).
- [3] C.-Y.You nad S.-C.Shin, to be published.