

광자기 Kerr 분광기를 이용한 유전율 텐서 결정의 새 방법

한국과학기술원 유천열* · 신 성철

Determination of the Dielectric Tensor of Magneto-Optical Materials Using Kerr Spectrometer.

KAIST C.-Y.You* and S.-C.Shin

1. 서론

최근 광자기 기록 기술이 정보화 사회의 고밀도 디지털 데이터 저장 기술로 부상되면서 이에 대한 이론 및 응용 연구가 활발히 진행되고 있다. 이때, 시료의 자기 광학적 성질을 올바르게 이해하기 위해서는 자기 광학 효과의 원인이 되는 유전율 텐서의 비대각 성분에 대해 알아야 한다. 그러나 유전율 텐서의 비대각 성분은 통상 자기광학 효과의 Kerr 회전각과 Kerr 타원율뿐만 아니라 시료의 복소 굴절률 $n + ik$ 혹은 유전율 텐서의 대각 성분 ϵ_{xx} 의 값을 측정해야 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 단지 Kerr 회전각과 타원율을 측정할 수 있는 것으로 알려진 광자기 Kerr 분광기만을 이용해서 아무런 추가적인 장비의 필요 없이 유전율 텐서의 대각, 비대각 성분을 모두 구해내는 방법을 개발했다. 이 방법은 광자기 Kerr 회전각과 타원율을 측정할 수 있는 장비와 굴절률을 아는 투명한 기판에 증착된, 두께를 아는 자기 광학적으로 균질한 시료의 경우 항상 적용이 가능하다.

2. 이론

삼중 대칭성(three-fold symmetry) 혹은 그 이상의 대칭성을 가지고 있고 광학적으로 두꺼운 시료가 z 방향으로 자화된 경우를 먼저 고려하자. 이때 이 시료의 자기 광학 효과인 Kerr 회전각과 타원율은 일차 근사내에서 다음과 같음이 잘 알려져 있다.

$$\theta_K + i\epsilon_K = \frac{n_0 \epsilon_{xy}}{\sqrt{\epsilon_{xx}(n_0^2 - \epsilon_{xx})}} \quad (1)$$

여기서 시료의 복소 유전율의 대각 성분은 $\epsilon_{xx} = (n + ik)^2$ 으로 주어지고, 비대각 성분 ϵ_{xy} 는 $\epsilon_{xy} = \epsilon'_{xy} + i\epsilon''_{xy}$ 으로 주어진다. 이를 정리하면 Kerr 회전각 θ_K 와 타원율 ϵ_K 는 위와 같이 유전율 텐서의 비대각 성분과 대각 성분, 그리고 입사하는 매질의 굴절률의 함수로 주어진다. 이때, 박막면으로 입사하는 경우의 복소 Kerr 회전각 $\Theta_K = \theta_K + i\epsilon_K$ 와 투명한 기판으로 입사하는 경우의 복소 Kerr 회전각 $\Theta_K^* = \theta_K^* + i\epsilon_K^*$ 를 생각하자. 여기서 기판 입사의 경우는 기판에서의 다중 간섭 효과를 무시하고 기판의 Faraday 효과를 제거하면 위의 식(1)에서 n_0 를 기판의 굴절률 n_s 로 치환하면 된다. 여기서 두 복소 Kerr 회전각 Θ_K, Θ_K^* 를 이용해 유전율 텐서를 구하기 위해 다음과 같이 각 복소 Kerr 회전각의 역수를 생각하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 1/\Theta_K \\ 1/\Theta_K^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_0 & -n_0^{-1} \\ n_s & -n_s^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{\epsilon_{xx}}}{\epsilon_{xy}} \\ \frac{\epsilon_{xx}\sqrt{\epsilon_{xx}}}{\epsilon_{xy}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 위의 행렬을 N 이라 하면 행렬 N 의 역행렬은 기판의 굴절률 n_s 가 n_0 와 다르기만 하면 항상 존재한다. 따라서, 역행렬을 양변에 곱하고 다음과 같이 복소수 $p + iq, r + is$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{pmatrix} p + iq \\ r + is \end{pmatrix} = \frac{n_s n_0}{n_s^2 - n_0^2} \begin{pmatrix} -n_s^{-1} & n_0^{-1} \\ -n_s & n_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\Theta_K \\ 1/\Theta_K^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

따라서 $p + iq, r + is$ 는 실험적으로 측정이 가능한 복소 Kerr 회전각 Θ_K, Θ_K^* 와 이미 알고 있는 기판의 굴절률 n_0, n_s 의 함수로 주어지는 복소수이다. 이들을 이용해 우리가 구하고자 하는 ϵ_{xx} 와 ϵ_{xy} 를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\sqrt{\epsilon_{xx}}}{\epsilon_{xy}} = p + iq, \quad \frac{\epsilon_{xx}\sqrt{\epsilon_{xx}}}{\epsilon_{xy}} = r + is. \quad (4)$$

위의 식(4)을 정리하면

$$\epsilon_{xx} = n_0 n_s \frac{(n_0 \Theta_K - n_s \Theta_K^s)}{(n_s \Theta_K - n_0 \Theta_K^s)} \quad (5)$$

$$\epsilon_{xy} = \sqrt{\epsilon_{xx}(n_s^2 - n_0^2)} \frac{\Theta_K \Theta_K^s}{n_s \Theta_K - n_0 \Theta_K^s} \quad (6)$$

와 같이된다. 따라서, 이와 같이 측정된 Θ_K , Θ_K^s 만을 이용해서, 시료의 유전율 텐서의 모든 성분을 구할 수 있다. 그러므로 기존의 광자기 Kerr 분광기만을 가지고도 관심 있는 물리량인 유전율 텐서의 모든 성분을 측정할 수 있다.

이번에는 박막이 광학적으로 충분히 두껍지 못해서 다중 간섭 효과에 의한 광자기 효과의 증가가 일어나는 경우를 고려하자. 다중 간섭을 고려하면 위와 같은 간단한 관계식이 존재하지 않는다. 따라서 해석적인 방법으로는 계산이 곤란하므로 각 층의 복소 굴절율과 비대각 성분을 이용해 수치 해석적인 방법을 사용한다. 먼저 아래와 같은 복소 함수를 생각하자. 여기서 이 복소 함수는 Zak[1]의 방법 등을 사용하여 구할 수 있다.

$$\theta_K + i\epsilon_K = \text{Re}(f(n_i + ik_i, \epsilon'_{xy}, \epsilon''_{xy}, d)) + i\text{Im}(f(n_i + ik_i, \epsilon'_{xy}, \epsilon''_{xy}, d)) \quad (7)$$

여기서 $n_i + ik_i$ 는 진공, 시료, 기관 등 각 층의 복소 굴절률이고, d 는 시료 층의 두께이다. 이때, 이 함수는 복소 함수이므로 실수부는 Kerr 회전각을 나타내고 허수부는 타원율을 나타내는 두 개의 함수이다. 이제 기관 입사의 경우도 고려해서 측정이 가능한 양을 위 함수로 나타내면,

$$\theta_K = \text{Re}(f(n_i + ik_i, \epsilon'_{xy}, \epsilon''_{xy}, d)), \quad (8)$$

$$\epsilon_K = \text{Im}(f(n_i + ik_i, \epsilon'_{xy}, \epsilon''_{xy}, d)), \quad (9)$$

$$\theta_K^s = \text{Re}(f_s(n_i + ik_i, \epsilon'_{xy}, \epsilon''_{xy}, d)), \quad (10)$$

$$\epsilon_K^s = \text{Im}(f_s(n_i + ik_i, \epsilon'_{xy}, \epsilon''_{xy}, d)). \quad (11)$$

여기서 f_s 는 기관 입사시의 함수이다. 즉, 이제 문제는 4개의 변수 ϵ'_{xx} , ϵ''_{xx} , ϵ'_{xy} , ϵ''_{xy} 를 위 4개의 방정식을 연결하여 푸는 문제로 바뀌게 된다. 이 방정식을 풀기 위해 Newton-Raphson[2]의 방법을 사용했다. 이때, 이러한 수치 해석적인 방법 자체가 유일한 해를 가지는지의 여부는 확인할 수 없다. 그러나, Newton-Raphson 방법을 이용시 해를 구하기 위해서는 초기값이 필요한데, 이때 이 초기값은 물질이나 측정 파장에 대해서 대략적인 값은 대부분의 경우 알려져 있다. 따라서, 이 경우 시료의 대략적인 특성을 알고서 측정을 한다면 큰 오차없이 올바른 해를 찾을 수 있을 것으로 사려된다.

3. 결론

광자기 현상을 이해하기 위해서 반드시 필요한 물리량인 유전율 텐서의 모든 성분을 광자기 재질의 경우 광자기 Kerr 분광기만으로도 측정이 가능한 방법을 개발하였다. 본 방법은 굴절률을 아는 투명한 기관에 증착된 두께를 아는 자기 광학적으로 균질한 시료에 대해 항상 적용이 가능하다. Kerr 회전각과 타원율의 측정이 가능한 광자기 Kerr 분광기를 이용, 시료의 광자기 효과를 시료 면과 기관 면으로 각각 측정하여 복소 Kerr 회전각 Θ_K , Θ_K^s 를 얻은 후, 이를 이용하면 시료의 유전율 텐서의 모든 성분을 얻을 수 있는 방법을 광학적으로 두꺼운 막의 경우 해석적으로 다중 간섭 효과를 고려해야하는 박막의 경우 수치 해석적으로 구할 수 있음을 보였다.

4. 참고문헌

- [1] J.Zak, E.R.Moog, C.Liu, and S.D.Bader, J.Magn.Magn.Mat. 89, 107 (1990).
- [2] W.H.Press, S.A.Teukolsky, W.T.Vetterling, and B.P.Flannery, "Numerical Recipes in C". 2nd Ed. Cambridge Univ. Press, Ch.9, 347 (1992).