

표면 자기광 커 효과의 이해

황찬용*

한국표준과학연구원 산업측정표준본부, 대전시 유성구 가정로 267, 305-340

(2011년 8월 17일 받음, 2011년 8월 22일 최종수정본 받음, 2011년 8월 23일 게재확정)

지난 20여년간 표면자성 현상의 연구에 가장 도움이 많이 되었던 실험방법중 하나인 표면 자기광 커효과(Surface magneto-optic Kerr effect, SMOKE) 실험 방법을 소개하고자 한다. 예를 들어 단일층의 철막이 강자성이 되는지, 또 큐리(Curie)온도는 bulk와 비교하여 얼마나 떨어져 있는지, 자화 용이축(easy-axis)은 어느 방향인지 등 매우 기본적인 자성박막의 특성은 스핀트로닉스(spintronic) 분야의 연구에 가장 기본적인 정보이다. 표면 자기광 커 효과(SMOKE)는 이러한 물음에 대한 답을 줄 수 있는 매우 효율적인 방법이다.

주제어 : 표면 자기광 커 효과, 표면자성학, 스핀트로닉스

I. 서 론

1845년 M. Faraday[1]가 처음으로 유리 시편에 자기장을 인가하면 투과되는 광원의 편광이 달라지는 현상을 보고하였다. 아울러 반사되는 빛에서도 그러한 현상을 보고하였지만 표면의 오염 등으로 인하여 결과가 확실하진 않았고 그 후 1877년 J. Kerr는 연마(polishing)된 자석극에서 반사되는 빛에서도 그러한 현상이 있음을 발표하였다[2]. 따라서 반사되는 빛이 시료의 자화상태에 의하여 바뀌는 현상을 커 효과(Kerr effect)라고 하고 투과되는 빛의 경우는 패러데이 효과(Faraday effect) 라고 부른다.

그 후로 오랫동안 이러한 현상은 당연히 bulk에서 관측이 되었고 단원자 층과 같은 극초박막의 경우 이 효과가 적용될

수 있음은 그보다 100년이 지난 1985년 미국 ANL에서 E. Moog와 S. Bader에 의해서 처음으로 발표되었다[3]. 이때 처음으로 초고진공 상태에서 제작된 Fe/Au(001) 계에서 측정된 MOKE 신호는 단일층의 감도(monolayer sensitivity)를 갖는다는 사실이 알려졌고 그 후로 표면에서도 이 기술이 유효하게 적용된다는 사실에 surface라는 단어를 앞에 붙인 Surface MOKE(SMOKE)로 명명되고 있다. 아주 간단한 설비로 극초박막의 강자성특성을 연구하는 대표적인 실험적인 방법으로 자리매김 하고 있다.

실험 장비는 자기장을 발생시키는 전자석을 제외하면 현재 반도체 박막의 두께 측정에 사용되고 있는 일립소메트리(ellipsometry) 와 매우 유사하다. 거의 자기광 영역에서 측정되는 ellipsometry가 단원자 층의 두께에 민감한 신호를 주는 이유가 위상차라는 사실을 고려하면 단원자 층의 자성박막에서 이러한 커(Kerr) 신호를 측정할 수 있을 거라는 생각을 실제의 실험에 적용한 것이 매우 중요하다.

II. 광자기 효과의 원리

대부분의 광학교과서에서 언급하고 있는 커 효과 혹은 패러데이 효과는 이들 효과의 크기가 시료의 자화상태에 비례한다고 하는 한 쪽 이내의 내용뿐이다. 이와 관련하여 가장 설명이 잘된 것으로 생각되는 논문은 Argyres에 의하여 1955년 Phys. Rev.에 발표된 논문이다[4]. 이 논문에서는 커(Kerr) 효과와 패러데이(Faraday) 효과에 대하여 섭동(perturbation) 이론을 이용하여 매우 자세하게 정리를 한바 있다. 이에 앞서 Hulme등이 1932년에 이러한 Kerr효과와 원인으로 전자의 스핀과 이들 전자가 유효 전위(effective potential)하에서 움직일 때 느끼는 자기장에 의하여 생긴다고

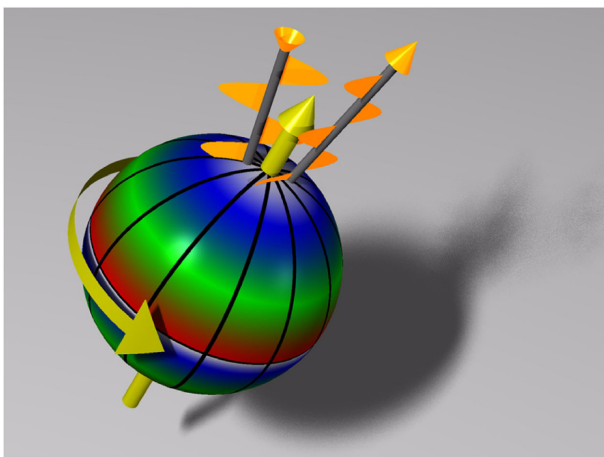


Fig. 1. Schematic presentation of magneto-optic Kerr effect.

*Tel: (042) 868-5392, E-mail: cyhwang@kriss.re.kr

지적을 한바 있다. Hulme는 Heisenberg 모델을 사용하여 자성체의 경우 spin-orbit 상호작용으로 인한 에너지 분해 (energy splitting)로 인하여 좌원 및 우원 편광에 따르는 굴절율이 달라짐을 계산하였다. 그러나 자성체에서는 궤도 능률 (orbital moment)의 소멸(quenching)로 인하여 이러한 분해 (splitting)를 기대하기 어려운 만큼 Kittel은 이러한 상호작용에 의하여 파함수(wave function)이 변화하고 이러한 변화로 자기광(Magneto-optic)을 설명할 수 있음을 증명하였다.

Argyres논문의 가장 핵심은 커 회전각(Kerr rotation angle) 혹은 커 타원율(Kerr ellipticity)은 다음과 같은 식에 의하여 변화하고 이들의 크기는 각각 자화값(magnetization, M)에 비례한다고 하는 사실이다. 이 논문에서 유도되는 몇 가지 중요결과에 관한 식을 나타내면 다음과 같다.

Kerr rotation ϕ_k 및 Kerr ellipticity ϵ_k 는 다음과 같은 식으로 나타내진다.

$$\phi_k = -\text{Im}[(N_+ - N_-)/(N_+ N_- - 1)].$$

$$\epsilon_k = -\Re[(N_+ - N_-)/(N_+ N_- - 1)].$$

$$\frac{N_+ - N_-}{N_+ N_- - 1} = (-4\pi) \frac{(\sigma_1/\omega) + i\alpha_1}{(n - ik)[(n - ik)^2 - 1]}$$

$$\sigma_1 = -\frac{4ec}{m} \left\{ \sum_{m>n} \langle Q_{nm}/(\omega_{nm}^2 - \omega^2) \rangle_{Av} \right\} M,$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi ec}{m} \left\{ \frac{1}{\omega} \sum_{m>n} \langle \delta/(\omega_{mn} - \omega) Q_{mn} \rangle_{Av} \right\} M.$$

$$Q_{mn} = 2 \frac{1}{i} \langle m | \partial_y | n \rangle * \left[\sum_{l \neq n} \frac{\langle l | o | n \rangle}{E_n - E_l} \langle m | \partial_x | l \rangle + \sum_{l \neq m} \frac{\langle l | o | m \rangle^*}{E_m - E_l} \langle l | \partial_x | n \rangle \right]$$

여기서 σ_1 과 α_1 은 off-diagonal conductivity와 polarizability tensor이다. 여기서 중요한 점의 하나는 총체적인 커(Kerr) 신호의 크기는 물체의 자화율 M에 비례하기도 하지만 여기에서 보이는 Q_{mn} 에도 비례한다는 사실이다.

III. SMOKE 실험

Fig. 2는 일반적인 MOKE 장비를 나타낸다. 자기장의 방향과 광원의 입사평면(plane-of-incidence)에 따라서 세 가지 방법, 즉 longitudinal, polar 그리고 transverse MOKE의 세 가지가 가능하다. Fig. 2에서 보듯이 Polar Kerr 효과는 자기장이 입사평면에 안에 있고 시료의 평면에 수직인 방향으로 놓일 때를 이른다. 또한 Longitudinal Kerr 효과는 자기장의 방향이 시료평면 및 빛의 입사평면에 위치하고 있을 때이고 transverse Kerr 효과는 자기장의 방향이 빛의 입사평면과 수

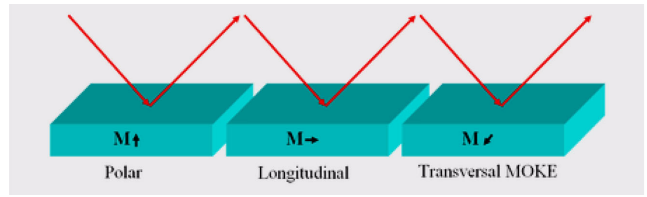


Fig. 2. Configuration of MOKE set-up.

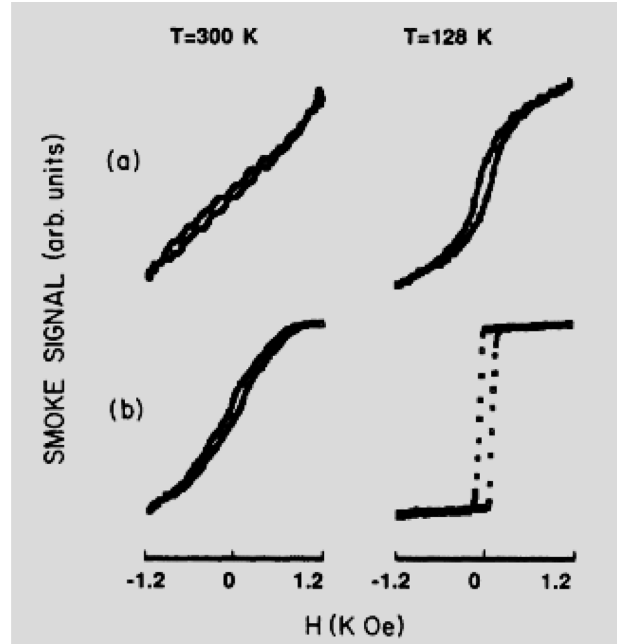


Fig. 3. Temperature dependent hysteresis curves for bcc Fe/Ag(001), (a) 1 ML, (b) 2 ML.

직을 형성할 때를 이른다. 이러한 Kerr 효과를 논의 할 때 유효한 방법의 하나는 s- 혹은 p-편광 빛이 시료에 입사하여 빛의 전기장에 따른 전자의 움직임이 자기장에 의한 Lorentz force를 어느 방향으로 받는지를 보면 쉽게 이해를 할 수 있다.

Fig. 3은 1988년 Erskine 그룹에서 Phys. Rev. B에 발표한 Fe/Ag(001)계의 SMOKE data이다. 1, 2층의 Fe 박막이 온도에 따라서 어떤 hysteresis를 보여주는지 명확하게 측정된 결과이다[5]. 우리가 알고 있는 bulk Fe의 Kerr 회전 각도는 2 eV 에너지를 갖는 광원에 대하여 약 0.4°이다. 단일 optical penetration depth를 약 50층 정도로 가정하게 된다면 단일층의 Kerr 회전각은 약 0.008°에 해당된다. 선형 편광된 입사빔이 반사 후에 이 정도의 각도로 돌아간다고 생각하면 입사빔의 전기장 방향과 수직인 방향으로 입사빔 전기장 크기에 sin(0.008°)값에 해당하는 신호의 변화가 감지될 수 있어야 한다. 이때 MOKE 장치에서 가장 중요한 세목은 편광체의 소광비(extinction ratio)가 된다. 즉 두 개의 편광판을 겹쳤을 때 두 판사이의 각도에 따라 최고의 신호크기와 최소

의 신호크기의 비에 해당하는데 이 비가 10^{-6} 일 경우 전기장으로 환산하면 10^{-3} 이 된다. $\sin(0.008)$ °의 값과 10^{-3} 값 사이에는 약 1 : 7의 비가 존재하지만 이와 같은 논의는 단순한 계산이고 단일 층으로 이루어진 Fe 박막에서 신호가 소광비(extinction ratio)의 한계 안에 있을 수 있다는 생각이 중요하다. Moog와 Bader에 의하여 1985년에 Superlattices and microstructures지에 제시된 SMOKE data는 Fe 0.53층이 Au위에서 잔류자화 곡선(hysteresis curve)을 보이고 큐리(Curie) 온도는 약 150 °C가 된다고 제시하였다[3]. Fe가 0.5 층 덮인 계의 자성을 측정하는 방법에는 몇 가지가 더 있다 예를 들어 방사광을 이용한 엑스선 자기원색성(x-ray magnetic circular dichroism, XMCD)나 스핀편향 광전분광법(spin-polarized photoelectron spectroscopy, SPPE) 등이 이러한 극초박막 시스템의 전자 구조에 기인한 자성특성에 관한 정보를 줄 수 있고 스핀편향 주사터널링 현미경(spin-polarized scanning tunneling microscope, SPSTM)이나 스핀편향 저에너지 전자현미경(spin-polarized low energy electron microscope, SPLEEM) 기술들은 자구(magnetic domain)에 관한 정보를 준다. 그러나 이들 장치에 소요되는 경비 혹은 그 기술적인 난이도를 고려해볼 때 SMOKE는 진공 용기를 제외하면 매우 단순한 광학장치의 구성으로 표면 자성의 효율적인 분석장비 임에는 틀림이 없다.

Fig. 4는 실제로 초고진공 용기를 포함하는 SMOKE 장치의 대략적인 모습이다. 본 장치의 제작에 가장 힘든 부분의 하나가 초고진공 용기안에 작게는 0.1 T에서 크게는 1 T까지의 자기장을 가하는 일이다. 초고진공하에서 모든 실험이 이루어져야 하므로 공간상으로 제약이 많이 있고 전자석의 온도가 많이 올라가게 되면 압력 또한 올라가게 됨으로 원하는 크기의 자기장을 초고진공 상태에서 얻기 위해서는 자석의 설계 및 제작에 많은 비용이 소요된다. 편광판을 거친 레이저

빛은 선편광으로 변하게 되고 표면에 입사되어 Kerr 효과에 의하여 타원편광으로 변한 반사빔을 다시 사분파장판(quarter wave plate)을 이용하여 선편광으로 바꾸게 되고 또 다른 편광판을 지나서 검출기로 들어가게 된다. SMOKE 장비가 일반 MOKE와의 가장 큰 차이점은 피할 수 없이 두 개의 진공창(vacuum window)이 빛의 경로에 들어오는 사실이다. 보통의 유리 혹은 사파이어 윈도우를 지나게 되면 복굴절(birefringence)이 생기게 되는데 이 효과를 상쇄하기 위해서 사분파장판을 사용하게 되면 측정되는 값은 진공창이 없을 때와는 반대로 Kerr intensity는 커 회전각(Kerr rotation angle)이 아닌 커 타원율(Kerr ellipticity)의 측정값이 된다. 기출판된 대부분의 MOKE 공식은 이러한 사분파장판이 필요한 진공창이 없는 경우에 계산된 값으로 실험장치가 정확하게 고려되지 않으면 커 회전각과 커 타원율을 구분하는 것이 쉽지 않다.

따라서 이러한 정보보다는 자기이력곡선(magnetic hysteresis curve)을 측정함으로써 얻어지는 SMOKE의 데이터는 초전도 양자간섭계(SQUID)로는 절대로 측정이 불가능한 표면 극소량의 자화값에 대한 측정이 가능한 만큼 이 부분에 대한 연구를 집중적으로 수행하는 것이 바람직하다. 여기에서 얻어지는 보자력(coercivity)이나 자기이력곡선(magnetic hysteresis curve)의 모양 등은 자기 이방성 연구에 매우 효율적으로 이용된다. 자기장이 없는 상태에서 잔류자화의 값은 저차원계의 자성체를 연구하는데 매우 중요한 측정값이다. 물론 SMOKE의 결과로부터 절대적인 자화값을 얻는 것은 불가능하지만 두께가 아주 얇은 영역에서는 Kerr 신호의 크기가 두께에 비례하는 것으로 알려져 있다. 물론 이 사실도 엄격하게 이야기하자면 매우 신중하게 고려되어야 한다.

Kerr 효과의 측정에 있어 주의해야할 몇 가지를 언급하고자 한다.

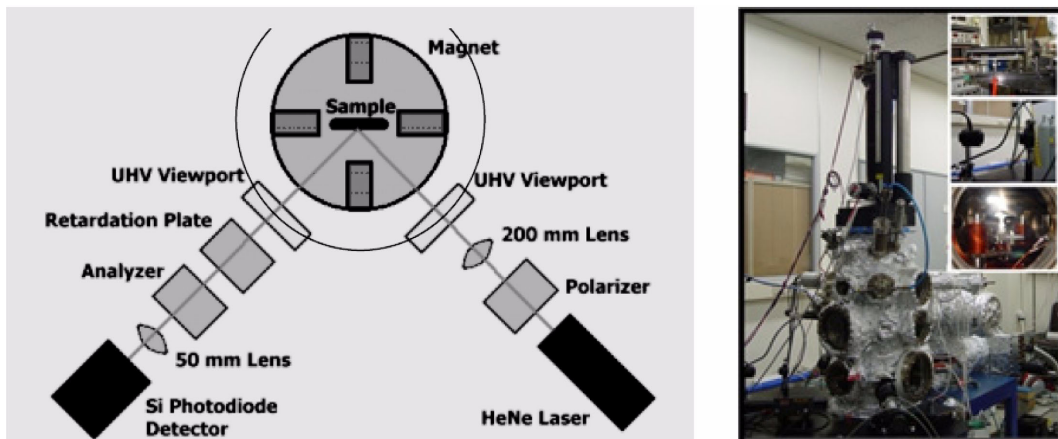


Fig. 4. Drawing of UHV SMOKE set-up and photo of set-up at KRISS.

1. 첫째로 대부분의 Kerr 효과의 측정 시에 단 한 번의 측정으로는 s/n 비가 좋을 수가 없기 때문에 여러 번 자기장을 반복해서 변화하면서 데이터를 측정해야 한다. 그러나 자화반전 동역학은 자기장 변화 주파수의 함수이고 이 주파수에 의하여 보자력의 크기가 변하는 사실이다. 보통의 MOKE를 찍는 아주 느린 주파수 영역에서도 보자력의 크기가 크지는 않지만 변화하는 사실은 주목할 필요가 있다.

2. 두 번째 대부분의 자기 이방성연구에는 polar 방향과 longitudinal 방향에서 자기이력 곡선(magnetic hysteresis curve)을 측정하고 이 데이터로 부터 이에 관련된 연구(예를 들면 스핀 재방향 전이, spin-reorientation transition)를 수행하게 되는데 대부분의 초고진공 SMOKE 장비에서 시료를 돌리고 전자석은 고정되어 있는 장치를 운용하고 있다. 이때 중요한 점은 자기장의 방향과 시료의 방향이 정확하게 정렬되어 있지 않으면 얻은 데이터를 신뢰할 수 없게 된다. 예를 들어 보자력이 아주 작은 polar 방향의 이방성을 갖는 시스템의 경우 longitudinal MOKE를 찍을 때 만일에 시료의 방향이 polar 쪽으로 5도 정도만 틀어져 있어도 모양은 거의 사각형이면서 매우 큰 값의 보자력을 갖는 자기이력곡선이 얻어진다. 이러한 예는 이미 출간된 많은 논문에서 쉽게 보여지는 오류이며 이러한 자기 이방성의 연구 시에 주의하여야 한다.

3. 두꺼운 박막이나 bulk의 경우와는 달리 매우 두께가 얇은 박막에는 낮은 온도에서도 온도의 변화에 따르는 박막계 자체의 변화에 주의하여야 한다. 즉 자성체의 연구에 온도의 변화는 여러 측정에서 필수적인 항목인데 온도를 올렸다 다시 내린 후에 그전의 자기이력곡선과는 다른 모습이 나타난다면 그것은 계면 혹은 박막 자체에 변화가 생겼다는 것을 의미한다. 특히 단원자 혹은 수 원자 층의 영역에서 큐리(Curie) 온도를 측정할 때 이러 일들이 쉽게 생길 수 있는 상황이므로 확인 작업이 필요하다.

IX. MOKE 장치의 확대

1. 시분해 SMOKE(time-resolved SMOKE)

시분해 MOKE 장비는 이미 많은 사람들이 개발하여 쓰고 있는 연구방법이며 따로 설명을 하지는 않겠지만 자성동역학의 연구에는 없어서는 안 될 정도의 중요한 정보를 제공한다. 몇몇 그룹에서 초고진공 용기 안에서 시료를 성장시키고 측정하려는 노력을 하고 있는 상황이다[6].

2. SMOKE 현미경(microscopy)

자성체의 연구에 있어 광학적인 방법이 매우 유용한 이유의 하나는 자기장을 임의로 변화시킬 수 있다는 점이다. 대부분의 전자 광학계에서는 시료가 자화되거나 혹은 자기장 안

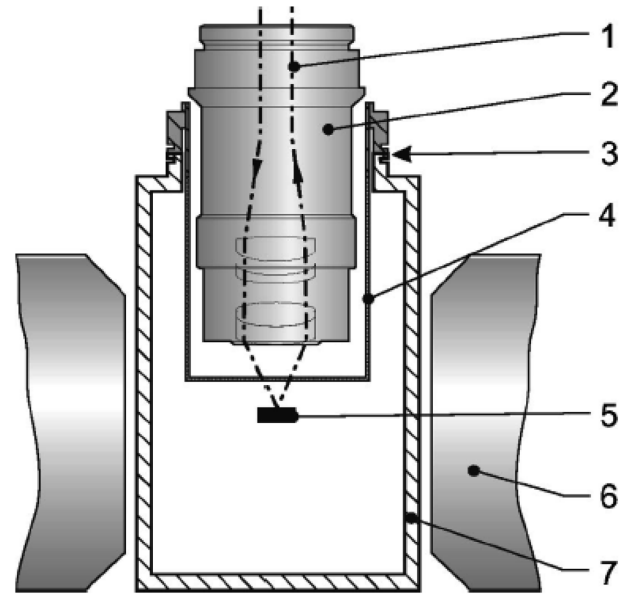


Fig. 5. The design of the UHV window for Kerr microscopy allows for objective-sample distances of 2 mm. 1. Laser beam, 2. Objective of the microscope, 3. Window-chamber-joint, 4. Strain-free quartz glass window, 5. Sample, 6. Magnet yoke, and 7. UHV chamber.

에 놓이게 되면 측정에 많은 문제가 생긴다. 자구(magnetic domain)의 연구와 같은 분야는 자기장을 교대로 가해주는 것이 필요하므로 실질적으로 공간 분해능이 좀 낮더라도 광학적인 방법을 선호하는 이유이다. XMCD(x-ray magnetic circular dichroism) 방법을 이용한 PEEM(photoemission electron microscope) 기술은 분해능은 수 nm에 근접해 있지만 자기장을 가할 수 가 없는 관계로 응용의 범위가 제한되어 있다. 초고진공에 적용하기 위해서는 여러 가지 방법이 있는데 Fig. 5는 일체형 현미경 형태를 이용한 장치를 나타낸다[7]. 본 그림은 전형적인 광학적 방법으로 full-field imaging을 하게 되어있는데 최근에는 근접장(near-field)를 이용하여 NSOM(Near-field scanning optical microscope)과 같은 방법으로 탐침자를 주사시키는 방법도 있다.

3. Diffraction-MOKE (Bragg-MOKE)

격자(grating)와 같은 주기성을 갖는 시료의 표면에 광원을 입사시키게 되면 회절되는 빛은 경로에 따라서 여러 갈래로 갈라지게 되는데 각각의 회절점(diffraction spot)에 대한 MOKE를 측정하는 기술이다. Fig. 6은 이 장치의 간단한 사양을 보여주는 그림이다[8]. 이 방법을 이용하게 되면 magnetic array 전체의 Fourier 변환된 양을 측정하기 때문에 보자력 부근에서 자구의 분포에 매우 민감하게 반응을 하게 된다. 이 방법은 정상적인 MOKE방법, 그리고 micromagnetic simulation 결과와 같이 이용하게 되면 자화반전에 대한 자세한 정보를

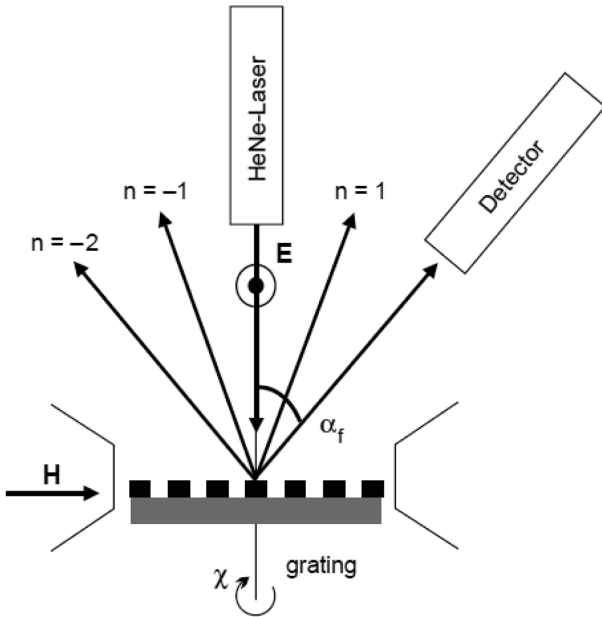


Fig. 6. Geometry of the Bragg-MOKE set-up. The s-polarized light in perpendicular incidence is diffracted from the grating.

얻을 수가 있다.

4. X-ray MOKE

방사광에서 soft x-ray광원을 이용하게 되면 3d 자성체의 absorption edge를 지나갈 수 있고 이러한 에너지를 이용하게 되면 반사된 x-ray를 측정함으로써 XMCD와 유사한 정보를 얻을 수 있다[9]. 이 방법의 장점은 앞에서 언급한 바 있지만 자기장의 변화가 자유롭기 때문에 XMCD보다는 큰 자기장을 걸었을 때 측정이 용이하다. X-ray의 투과깊이(penetration depth)는 상대적으로 전자보다 크므로 매복 계면 혹은 층(buried interface 혹은 layer)에서 좀 더 정확한 자성정보를 얻을 수 있는 장점이 있다.

5. Nonlinear MOKE

자화에 의한 이차조화생성(second harmonic generation, SHG)이 일어나기 위해서는 공간-반전 대칭(space-inversion symmetry)이 깨지는 조건하에서만 가능한데 이러한 영역이 바로 표면 혹은 계면에 해당하고 따라서 이 기술은 다른 광

학적인 방법과는 달리 표면에 매우 민감한 방법이다. 그러나 이 방법 자체가 이차수(second order) 효과이므로 신호의 크기는 매우 작다[10].

X. 결 론

본 해설에서는 SMOKE의 원리, 용도, 주의점에 대하여 살펴보고 이 방법을 적용한 다른 기술들에 대하여 간단하게 나열을 하였다. SMOKE가 개발되어 사용된 지 벌써 25년이 지났지만 아직도 이 기술은 표면자성의 연구에서 매우 중요한 장치로 많은 나노자성체 관련 연구결과가 보고되고 있다. 본 해설에서 생략된 일반적인 유도식들은 이전에 나온 해설 논문을 찾아보길 권한다[11, 12].

감사의 글

이 논문은 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] M. Faraday, Trans. R. Soc. London **5**, 592 (1846).
- [2] J. Kerr, Philos. Mag. **3**, 339 (1877); *ibid.* **5**, 161 (1878).
- [3] E. R. Moog and S. D. Bader, Superlattices Microstruct. **1**, 543 (1985).
- [4] P. N. Argyres, Phys. Rev. **97**, 334 (1955).
- [5] J. Araya-Pochet, C. A. Ballentine, and J. L. Erskine, Phys. Rev. B **38**, 7846 (1988).
- [6] Anjan Barman, T. Kimura, Y. Otani, Y. Fukuma, K. Akahane, and S. Meguro, Rev. Sci. Instrum. **479**, 123905 (2008).
- [7] D. Peterka, A. Enders, G. Haas, and K. Kern, Rev. Sci. Instrum. **74**, 2744 (2003).
- [8] A. Westphalen, M.-S. Lee, A. Remhof, and H. Zabel, Rev. Sci. Instrum. **78**, 121301 (2007).
- [9] J. B. Kortrighta, S.-K. Kim, E. E. Fullertonb, J. S. Jiangc, and S. D. Bader, Nucl. Instrum. Meth. A **467**, 1369 (2001).
- [10] Th. Rasing, J. Magn. Magn. Mater. **175**, 35 (1997).
- [11] Z. Q. Qiu and S. D. Bader, J. Magn. Magn. Mater. **200**, 664 (1999).
- [12] Z. Q. Qiu and S. D. Bader, Rev. Sci. Instrum. **71**, 1243 (2000).

Understanding the Surface Magneto-optic Kerr Effect

Chanyong Hwang*

*Korea Research Institute of Standards and Science, Division of Industrial Metrology,
267 Gajeong Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-340, Korea*

(Received 17 August 2011, Received in final form 22 August 2011, Accepted 23 August 2011)

We will introduce the surface magneto-optic Kerr effect (SMOKE), which is one of the most helpful experimental methods in the area of surface magnetism for the last two decades. The basic magnetic characteristics of magnetic thin film is the most essential part for the further understanding and application. For example, the possibility of the realization of ferromagnetism for a single layer of iron, its Curie temperature far below that of bulk iron, and the direction of easy axis are the fundamental questions for the spintronic application. SMOKE is an efficient method to answer for the questions above.

Keywords : surface magneto-optic Kerr effect, surface magnetism, spintronics