

# Rotating Compensator Spectroscopic Ellipsometer의 개발 및 응용

이재호\* · 방경윤\* · 박준택\* · 오혜근\* · 안일신\*

## Development and Application of Rotating Compensator Spectroscopic Ellipsometer

Jaeho Lee\*, Kyoung-Yoon Bang\*, Jun-Taek Park\*, Hye-Keun Oh\*, and Ilsin An\*

### ABSTRACT

We have developed a rotating compensator spectroscopic ellipsometer (RCSE). As the ellipsometry measures a change in the polarization state of a light wave upon non-normal reflection from surface, the degree of sensitivity is enhanced greatly through the detection of relative phase change. RCSE acquires additional information from the non-ideal surface of sample and operates over the photon energy range from 1.5 to 4.5 eV. We applied RCSE to measure the optical properties of films and the line-width of patterned PR films on crystalline silicon.

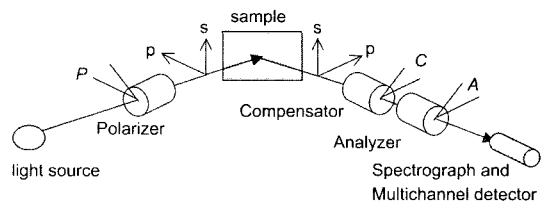
**Key Words :** Spectroscopic Ellipsometry, Effective Medium Theory, Line-and-Space, Composite Thin Film

### 1. 서 론

Ellipsometry는 독일의 Paul Drude[1]를 시조로 삼으면 약 110여 년의 역사를 가진 광 분석 기술인데 물리나 화학 실험실에서 조금씩 사용되어 오다가 근간에 반도체 산업을 위주로 한 각종 박막, 재료 관련 산업에서 크게 각광을 받기 시작하였다[2-5]. 이는 물론 70년대 소형 컴퓨터의 도입으로 인한 측정의 자동화가 시작되는 것과 같은 시기이다. 다른 측정 장비가 가지지 못한 독특한 특성과 또한 종류의 다양성, 사용 및 분석의 복잡성 때문에 대부분 광 특성이 잘 알려진 투명 박막의 두께 측정이나 덩이(bulk) 형태의 물질의 광 특성 연구에 많이 사용이 되어 왔다. 하지만 최근 박막의 두께가 점차 얇아지고 또한 사용하는 물질의 종류가 다양해짐에 따라 좀 더 복잡한 정보를 얻고자 많은 노력을 기울이고 있다. 또한 사용자의 저변이 확대되고 응용의 범위를 확장시켜 가면서 ellipsometry에 대한 관심이 크게 늘고 있다[6-9].

그러나 다른 장비에 비해 엄청나게 다른 응용 분야

가 있는 만큼 기술적으로 복잡함이 있는데 이는 ellipsometry의 종류가 100종이 훨씬 넘는 것을 보면 짐작할 수 있다. 이처럼 각 종류마다 그 특성과 응용할 수 있는 분야가 크게 다르다. 여기서 rotating compensator spectroscopic ellipsometry (RCSE) Fig. 1는 ellipsometry가 가진 기본적인 기능과 함께 분광 능력의 추가로 띠(band) 구조 등 물질의 전자적 상태의 연구와 통계적인 맞춤 과정의 도입으로 시편이 가진 많은 미지수를 추출해 내는데 사용될 수가 있다. 추가적인 RCSE



**Fig. 1.** Schematic representation of rotating compensator multichannel ellipsometry,  $P$  and  $A$  are the azimuth of transmission axes of polarizer and analyzer, respectively.  $C$  is the azimuth of the fast axis of compensator. The parallel and perpendicular directions to the plane of incidence are denoted as  $p$  and  $s$  with arrows.

\*한양대학교 응용물리학과

의 몇 가지 장점을 보면 첫째는 1/4 파장 위상지연보상판인 compensator를 사용함으로써 반사광의 선형 편광에 가까워질 때 생기는 실험 오차를 줄임으로 투명 박막이나, 투명 기판을 많이 사용하는 표면 화학이나 화면표시기 산업에 적용이 가능하다. 둘째로는 polarizer와 analyzer가 데이터를 얻는 동안 그 위치가 고정되어 있으므로 광원이 가지고 있는 잔류 편광이나 검광기가 가지고 있는 polarization sensitivity의 문제가 전혀 없다. 그리고 depolarization을 발생 시키는 시편에 대해 depolarization 정도를 알아낼 수 있다. 즉, rotating polarizer (analyzer) ellipsometry가 지니고 있는 단점을 없앤 ellipsometry가 되겠다.

## 2. 이 론

각속도  $\omega$ 로 회전하는 compensator인 RCSE의 경우 식 (1)과 같은 삼각 함수 파형의 빛의 밝기를 얻게 된다. 이때  $C_s$ 는 입사면에 대하여 compensator가 회전하기 시작하는 방위각을 나타낸다.

$$I(t) = I_0 \{ 1 + \alpha_2 - \cos 2(\omega t - C_s) + \beta_2 \sin 2(\omega t - C_s) + \alpha_4 \cos 4(\omega t - C_s) + \beta_4 \sin 4(\omega t - C_s) \} \quad (1)$$

여기서 얻은 Fourier 계수로부터 시편에서 반사된 변수인 타원 편광의 장축 방위각인  $Q$ 와 타원의 타원율인  $\chi$  구할 수 있다.

$$Q = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\beta_4}{\alpha_4} \right) - A \quad (2)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\alpha_2 \cos 2(A + Q) \tan \frac{\delta}{2}}{2\alpha_4 \sin 2A} \quad (3)$$

여기서  $A$ 는 analyzer의 입사면에 대한 투과축의 방위각이며,  $\delta$ 는 보상기의 위상 지연각이다. 이 두 식 (2)와 (3)에서 구한 두 변수를 이용하여 식(4), (5)에서 ellipsometry 각인 ( $\Delta$ ,  $\Psi$ )를 구할 수 있다. 이때  $\Delta$ 은 같은 위상으로 입사한  $p$ 파와  $s$ 파가 반사 후에 갖게되는 상호간의 위상차이고,  $\tan \Psi$ 는 반사계수의 비이다.

$$\Delta = \cos^{-1} \left[ \frac{\cos 2\chi \sin 2Q (1 - \cos 2\Psi \cos 2P)}{\sin 2\Psi \sin 2P} \right] \quad (4)$$

$$\Psi = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left[ \frac{\cos 2P - \cos 2Q \cos 2\chi}{1 - \cos 2Q \cos 2\chi \cos 2P} \right] \quad (5)$$

이렇게 측정하여 얻은  $\Delta$ ,  $\Psi$ 의 값과 박막 모형화에 대한 이론치 값을 비교함으로써 박막의 광학적 특성을

찾을 수 있다.

## 3. 실 험

본 연구를 위하여 두 종류의 시편을 준비하였다. 하나는 silicon wafer위에 deep-UV용 photoresist (PR)를 spin coating을 한 후 photo-lithography를 이용하여 여러 다른 선폭 pattern을 갖는 시편을 만들었다. 다른 하나는 crystalline silicon wafer 위에 SiO-Co 혼합물 박막을 증착한 시편이다. 혼합물 박막 시편 제작에 rf sputtering기술을 사용하였고 사용된 target의 SiO:Co 혼합비는 각각 1:0, 8:2, 6:4, 4:6, 2:8 그리고 0:1이다.

측정에 사용된 RCSE는 1) Xe arc lamp 2) polarizer 3) sample 4) MgF<sub>2</sub> compensator 5) analyzer 그리고 6) spectrometer로 구성되어 있다(Fig. 1). 여기서 분광범위는 1.5 eV부터 4.5 eV까지이며, Gran-Taylor형의 polarizer (analyzer)를 사용하였고, 1/4파장의 위상지연보상판을 사용하였다. 광원에서 나온 빛은 polarizer

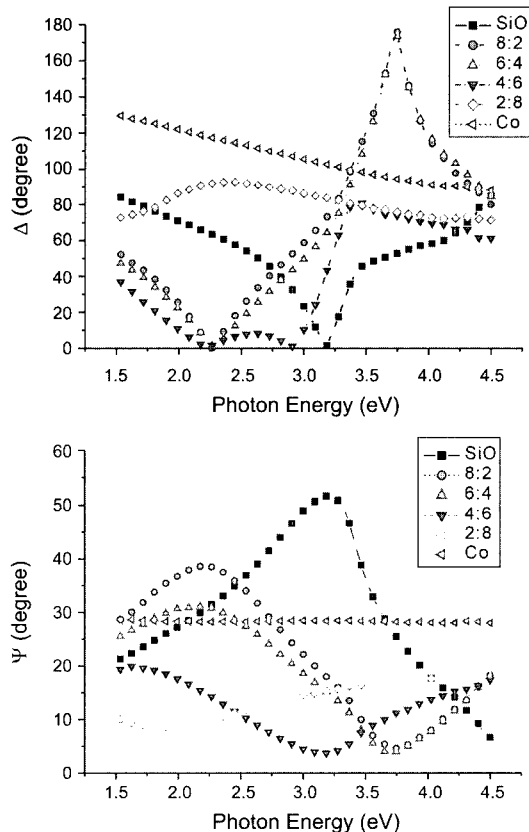


Fig. 2. Ellipsometry spectra of each film deposited from the targets with a different weight ratio. The ratios of SiO:Co are shown in the inset.

를 통과하면서 선형편광되고 다시 sample에서 반사될 때 sample의 광학적 성질을 담게 된다. Sample에서 반사된 빛은 compensator에 의해서 1/4 파장 만큼 지연되고 analyzer를 통과하면서 빛의 입사면과 수평인 p파와 수직인 s파로 분리되어 spectrometer에 의해 빛의 밝기가 측정된다.

### 4. 실험결과

SiO-Co 혼합물 박막을 RCSE로 측정하였다. Fig. 2에 보이듯이 다른 혼합비에 대한 각각의 분광 ellipsometry angle( $\Delta$ ,  $\Psi$ )을 얻었다. 그 결과로부터 Bruggeman의 effective medium approximation (EMA) 이론(식 6)[10]을 이용하여 Co의 부피비  $f$ 에 대한 SiO-Co 박막의 물성을 계산하였다.

$$f \frac{\epsilon_{Co} - \epsilon}{\epsilon_{Co} + 2\epsilon} + (1 - f) \frac{\epsilon_{SiO} - \epsilon}{\epsilon_{SiO} + 2\epsilon} = 0 \quad (6)$$

EMA 이론[10]을 이용하여 air/film/c-Si에 대한 박막의 model로 각각 박막의 ellipsometry 데이터 값에 대한 전산모사를 하였다.

Fig. 3은 이렇게 전산모사한 결과를 보여준다. 이와 같은 방법으로 SiO-Co 혼합 박막들의 물성을 찾았다.

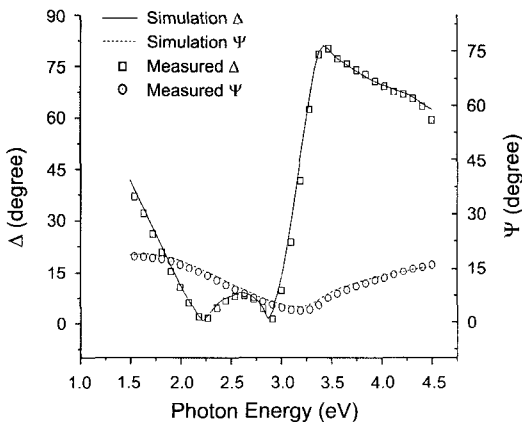


Fig. 3. Comparison between simulated and measured data.

Fig. 4는 RCSE 측정에 의한 분광 ellipsometry 데이터를 EMA를 이용하여 분석하여 찾은 각각의 혼합물 박막의 광학적 특성인  $\epsilon_1(h\nu)$ ,  $\epsilon_2(h\nu)$ , 를 보여주고 있다. 그리고 deep-UV PR에 수백 nm의 선폭이 형성된 시편들을 RCSE로 측정을 하였다. 이 경우 주기적이 peak이 나타나는데 그 중에 첫번째 peak 부분을 Fig. 5에서 보여 주었다. 먼저 CD-SEM으로 각 시편의 선폭을 측정하였다. 그리고 ellipsometry 데이터에서 보이는 첫번째 peak이 나타나는 에너지의 값에 대한 CD-SEM

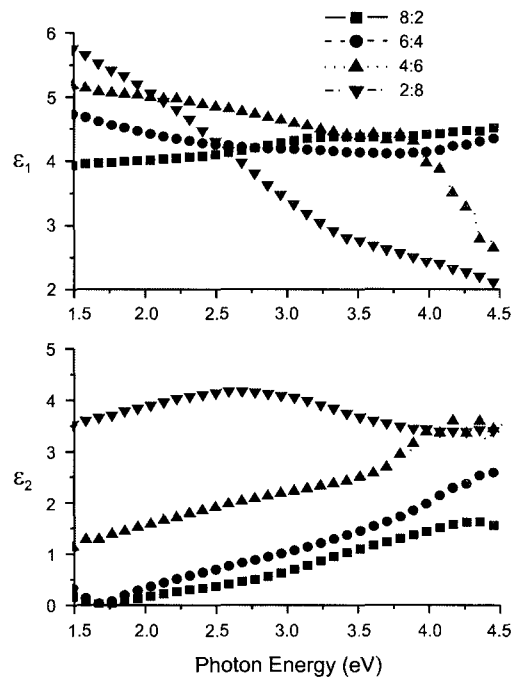


Fig. 4. The dielectric functions of SiO-Co composite thin films. The ratios of SiO to Co are shown in the inset in terms of weight ratio of the targets.

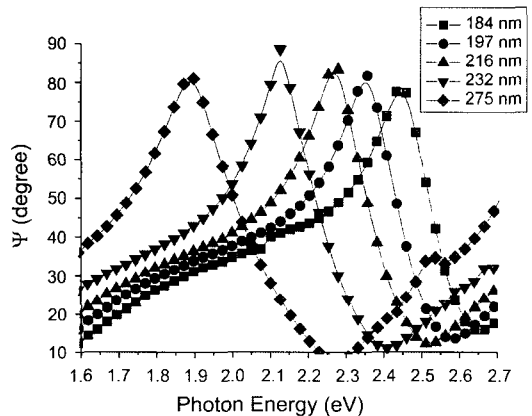
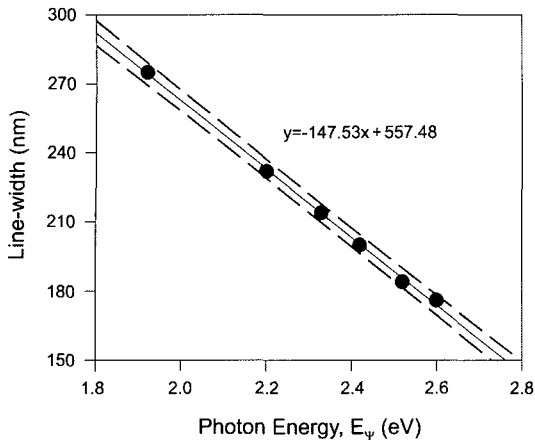


Fig. 5. The selected ellipsometry spectra of line-and space patterned PR films on crystalline silicon. The line-widths are shown in the inset.

에서 측정한 선폭 값을 그래프로 그려 보았다(Fig. 6). CD-SEM에서 측정된 시편의 선폭을 y값으로 놓고 ellipsometry 데이터의 2.7 eV 이하에서 나타나는 psi의 첫번째 peak의 photon energy 값을 x축으로 하여 데이터를 표시하였다. CD-SEM에서 측정된 선폭의 값과 peak의 photon energy 값 사이에 선형적인 관계가 나타남을 알 수 있다. 따라서 ellipsometry 를 이용하여



**Fig. 6.** The photon energy corresponding to the  $\Psi$ -peak below 2.7 eV versus line-width of patterned PR, extracted from the data shown in Fig. 5. Linear equation shows best fit to the data. Broken lines indicated 95% confidence limits.

psi의 첫번째 peak의 photon energy 값을 찾으면 시료의 선폭을 찾아 낼 수 있게 된다.

## 5. 결 론

RCSE를 이용하여 이와 같은 시편들을 측정하여 보았을 때 박막의 광학적 성질 및 두께 결정과 반도체 산업에서 선폭 값을 시편의 파괴없이 측정할 수 있었다. SiO-Co 혼합물 박막을 분석하여 각 물질의 부피를 알아냈다. 또한 RCSE는 1/4 파장 위상지연보상판을 사용함으로써 반사광의 선형 편광에 가까워질 때 생기는 실험 오차를 줄임으로 투명 박막에 대해 보통의 rotating polarizer (또는 analyzer)보다 정확한 값을 얻을 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한양대학교 양자광기능물성 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. Drude, P., "Ueber Oberflächenschichten" *Annal. Phys. Chem.* Vol 36, pp. 865-897 (1889).
2. Azzam, R.M.A. and Bashara, N.M. "Ellipsometry and Polarized Light", North Holland, Amsterdam, pp. 417-486 (1977), (1988).
3. 안일신 "엘립소미트리", 한양대학교 출판부, pp. 219-244 (2000).
4. Kim, Y.-T., Collins, R.W. and Vedam, K. "Fast scanning spectroelectrochemical ellipsometry : In situ characterization of gold oxide", *Surface science*. Vol. 233(3), pp. 341-350 (1990).
5. Vedam, K., "Spectroscopic Ellipsometry: a historical overview" *Thin Solid Films*, Vol. 313-314, pp. 1-9 (1998).
6. Collins, R. W. and Kim, Y.-T. "Real-time and spectroscopic Ellipsometry characterization of diamond and diamond-like carbon", *Thin solid Films*. Vol. 181(1/2), pp. 565-578 (1989).
7. Drevillon, B. and Benferhat, R. "Infrared ellipsometry study of oriented molecular mono layers" *Thin solid Films*. Vol. 156, pp. 295-306 (1988).
8. Ilsin, An., Nguyen, H.V. Nguyen, N.V. and Collins, R.W. "Microstructural evolution of ultrathin amorphous silicon films by real-time spectroscopic ellipsometry" *Phys. Rev. Lett.* Vol. 65(18), pp. 2274-2277 (1990).
9. Aspnes, D.E. "Fourier transform detection system for rotation-analyzer ellipsometry" *Opt. Commun.* Vol. 8, pp. 222-225 (1973).
10. Bruggeman, D.A.G., "Berechnung verschiedener physikalischer konstanten vor heterogen substanzen" *Ann. Phys. Leipzig* Vol. 24, pp. 636-664 (1935).