

## Mueller Matrix Ellipsometry 제작 및 응용

방경윤<sup>†</sup> · 경재선\* · 오혜근\* · 김옥경\* · 안일신\*

<sup>†</sup>\*한양대학교 과학기술대학 응용물리학과

### Development and Application of Mueller Matrix Ellipsometry

Kyoung Yoon Bang<sup>†</sup>, Jae Sun Kyung\*, Hey Keun Oh\*, Ok Kyung Kim\*, and Il Sin An\*

<sup>†</sup>\*Department of Applied Physics, Hanyang University

#### ABSTRACT

We develop Mueller-matrix spectroscopic ellipsometry based on dual compensator configuration. This technique is very powerful for measuring surface anisotropy in nano-scale, especially when materials show depolarization. Dual-rotating compensator configuration is adopted with the rotational ratio of 5:3 originally developed by Collins et al[1]. The instrument can provide 250-point spectra over the wavelength range from 230 nm to 820 nm in one irradiance waveform with minimum acquisition time of  $T_c \approx 10$  s. In this work, the results obtained in transmission modes are presented for the initial attempt. We present calibration procedures to diagnose the system from the utilized data collected in transmission mode without sample. We expect that the instrument will have important applications in thin films and surfaces that have anisotropy and inhomogeneity.

**Key Words :** Mueller Matrix, Ellipsometry, Anisotropic, Dual Rotating Compensator Ellipsometry

#### 1. 서 론

Ellipsometry는 편광을 이용한 광 측정 기술의 일종으로 특정 편광 상태를 지닌 빛이 시편의 표면에서 반사된 후 변화되는 편광의 정도를 측정하여 그 시편이 지닌 다양한 정보를 찾아내는 기술이다[2]. 이 기술은 박막의 두께 측정이나 물질의 미세구조, 광학적 특성을 결정하는 데 매우 중요한 수단으로 오래 전부터 사용되어오고 있다[3]. Ellipsometry는 기능과 특성에 따라서 종류가 많은 데 보편적으로 사용되는 경우는 광 부품이 시간에 따라서 연속적으로 회전하는 rotating element형 ellipsometry이다[4-7].

구성이 간단한 rotating polarizer ellipsometry(RPA)나 rotating analyzer ellipsometry(RAE)는 과거 수십 년 동안 여러 연구실에서 등방성 박막과 기판의 분석에 응용되어 왔다. RPE나 RAE는 다른 종류의 ellipsometry에 비해 광학적 구성 및 원리가 비교적 간단하

다는 장점이 있지만 시료에서 반사된 빛이 선형편광을 이룰 때 측정된  $\Delta$ 가  $0^\circ$ 나  $180^\circ$  근처에 놓이는데 이에 대한 민감도가 약해 오차가 크게 나타나는 단점이 있다[8]. 따라서 유리나 같은 투명 기판 위의 박막이나 반도체나 금속 기판 위의 두꺼운 유전물질을 측정할 때 데이터에 커다란 오차가 포함될 수 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해서 최근 rotating compensator ellipsometry가 개발되었다. 이 시스템은 RPE와 RAE에서 알아 낼 수 없었던  $\Delta$ 의 부호 뿐만 아니라  $0^\circ$ 나  $180^\circ$  근처를 포함한 모든 범위에서 높은 정확도를 가지며 depolarization을 발생시키는 시편에 대해서 그 정도를 알 수 있다. 등방성 박막과 기판의 분석에서는 가장 적당한 ellipsometry라고 할 수 있다.

그러나 비등방성 또는 random depolarization 효과가 있는 시료의 경우 single rotating compensator ellipsometer는 시료에 대한 충분한 정보를 주지 못한다. 이러한 종류의 시료에 대한 적절한 해결책은 시료에 대한 완전한 Mueller matrix를 측정하는 것이다. Dual phase modulator와 dual rotating compensator를 포함하

<sup>†</sup>E-mail : kybang@ihanyang.ac.kr

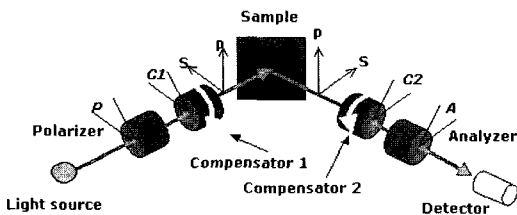
여 여러 가지 형태의 ellipsometer가 완전한 Mueller matrix를 측정하기 위해서 제안되었다. 현재 이러한 기술을 이용하여 Mueller matrix를 측정하는 데 성공하였다[1, 9].

본 연구에서 dual rotating compensator ellipsometry에 기초를 두고 Mueller matrix ellipsometry를 제작하였다. 두 compensator가 5:3의 회전비율로 회전하면서 수 백 회에 걸쳐 빛의 밝기를 측정한다. 투과형 모드에서 시료가 없이 측정하였을 때 얻어진 파형으로부터 추출한 푸리에 성분을 비교하여 시스템을 진단하였다. 또한 이 푸리에 성분을 가지고 두 compensator의 retardance를 구하여 두 retardance가 일치함을 보였고 analyzer 각과 두 compensator의 azimuth를 구하여 이 시스템이 제대로 작동함을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 시스템 이론 및 디자인

Fig. 1은 Mueller matrix ellipsometry에 기초를 두고 제작한 dual rotating compensator ellipsometry의 개념도이다.



**Fig. 1.** A simplified schematic of the dual rotating-compensator ellipsometer in the  $PC_{1r}(O_1)SC_{2r}(O_2)A$  optical configuration. The two compensators rotate 5:3 ratio.

제작한 ellipsometry의 구성을 왼쪽부터 살펴보면 다음과 같다. 광원은 D2-할로겐이고 polarizer와 analyzer는 MgF2 Rochen polarizer, compensator는 MgF2 biplate 이며 측정장치는 내부에 grating spectrograph가 있는 1024 CMOS/2048 CCD multi-channel 시스템으로 분광범위는 230~820 nm이다. Analyzer와 polarizer는 시스템에 고정되어 있다. 두 개의 compensator는 고속 스텝 모터에 의해서 회전한다. 컴퓨터에 장착된 펄스 제어신호를 보내면 스텝 모터 controller가 이 신호를 받아서 스텝 모터를 구동시킨다.

Rotating element형 ellipsometry의 경우 detector가 측정된 빛의 밝기 신호로부터 ellipsometry 각과 같은 데이터를 추출해내기 위해서는 시간변화에 따른 빛의 파형을 분석하여야 한다. Dual rotating compensator ellip-

sometry에서 빛의 밝기 신호는 두 개의 compensator 회전비에 따라서 푸리에 성분으로 구성된다. 본 연구에서 제작한 엘립소미터는 두 compensator를 5:3의 비율로 회전시켰으며 여기서 얻어지는 빛의 파형은 임의의  $i$  번째 channel에서 32개의 푸리에 성분으로 다음과 같이 나타난다.

$$I_i(t) = I_{oi} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{16} [\alpha_{2n,i} \cos(2nC - \phi_{2n,i}) + \beta_{2n,i} \sin(2nC - \phi_{2n,i})] \right\} \quad (1)$$

빛의 밝기 신호 1회 측정 시 왼쪽 compensator는 9도 회전하며 오른쪽 compensator는 5.4도 회전한다. 빛의 밝기를 200회 측정하게 되면 기계적으로 각각 5회, 3회 회전하여 5:3의 회전비가 된다. 하나의 파형을 얻는데 걸리는 시간은 대략 10 초이다.

Dual rotating compensator ellipsometry의 detector에서 측정되는 빛은 구성부품의 Mueller matrix의 곱을 하여 Stokes vector로 나타낸다. Stokes vector와 푸리에 성분으로 나타낸 파형은 동일하게 detector에 측정되는 빛의 파형을 나타내므로 두 식은 일치한다. 따라서 푸리에 성분을 가지고 측정된 시료의 Mueller matrix 값을 찾을 수 있다. 이 때, 푸리에 성분 중에  $\{\alpha_{2n}, \beta_{2n}, n=9, 12, 14, 15\}$ 는 모두 0으로 사라진다. 또한, 등방적이거나 non-depolarization 시료의 경우는  $m_{12}=m_{21}=-\cos 2\Psi$ ,  $m_{33}=\sin 2\Psi \cos \Delta$ ,  $m_{34}=-m_{43}=\sin 2\Psi \sin \Delta$  값을 각각 나타내며 다른  $m_{ij}$ 는 모두 0값을 갖는다.

이 시스템을 제작한 후 제대로 작동하는지 진단하기 위해 여러 가지의 데이터 값을 얻었다. 2048개의 채널에서 얻어진 빛의 밝기 파형을 가지고 32개의 푸리에 성분을 추출하였다. 시료가 없이 투과형 모드에서 측정하면 엘립소미터 각은  $\Delta=90^\circ$ ,  $\Psi=45^\circ$ 가 되므로  $m_{12}=m_{21}=0$ ,  $m_{33}=m_{44}=1$ ,  $m_{34}=-m_{43}=0$ 이 된다. 이 두 경우를 고려하여 시료없이 측정하였을 때의 푸리에 성분은  $n=2, 4, 6, 8, 10$ 일 경우  $(\alpha_{2n,i}, \beta_{2n,i}) \neq 0$  이 되고  $n=1, 3, 5, 7, 9, 11\sim 16$ 일 때  $(\alpha_{2n,i}, \beta_{2n,i})=0$  이다.

### 2.2. 실험결과 및 고찰

제작한 ellipsometry를 진단하기 위해서 실험을 하였다. ellipsometry의 왼쪽 팔과 오른쪽 팔을 일직선 상에 놓고 측정하였다. 투과형 모드에서 시료가 없는 상태에서 측정을 하였기 때문에 일종의 등방성 물질을 측정할 것이다. Fig. 2은 시료가 없이 측정했을 때  $n=1, 11\sim 16$ 에서  $(\alpha_{2n,i}, \beta_{2n,i})=0$ ,  $n=2$ 에서  $(\alpha_{2n,i}, \beta_{2n,i}) \neq 0$  임을 보여준다.

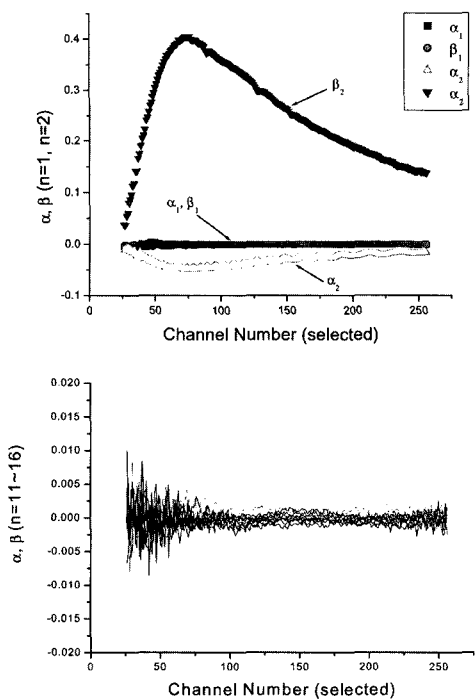


Fig. 2. Fourier coefficient spectra for  $n=1, 2, 11\sim 16$  obtained from the irradiance waveform in the straight-trough  $PC_{1r}(\Theta_1)SC_{2r}(\Theta_2)A$  configuration without a sample.

모든 값의 표준편차 값은 0을 기준으로 0.00133이다. 이것으로 제작한 dual rotating compensator ellipsometry의 데이터가 매우 신뢰할 만한 수준임을 알 수 있다.

측정된 파형에서 얻은 푸리에 성분으로 compensator의 retardance를 구할 수 있다. 우선 보정되지 않은 푸리에 성분을 가지고 다음과 같은 계수를 찾았다.

$B'_{2n} = (\alpha'_{2n} + \beta'_{2n})$ . 여기서 '은 변환되지 않은 데이터임을 의미한다.

이 계수들을 retardance에 대해서 정리를 해주면 다음과 같은 식으로 쓸 수가 있다.

$$\delta_{1(2)} = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{|B'_{8}|}{|B'_{12(20)}|} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Fig. 3은 시스템에 사용된 동일한 두 compensator의 retardance 값이 정확히 일치함을 보여준다.

입사면에 대한 두 compensator의 azimuth와 analyzer의 각도는 푸리에 성분에서 얻어지는 phase  $\Theta$  값을 이용하면 구할 수 있다. Phase  $\Theta$  값은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Theta'_{2n} = \tan^{-1} (\beta'_{2n} / \alpha'_{2n}) \quad (3)$$

측정의 구성에 따라 여러 가지 방법이 있을 수 있는

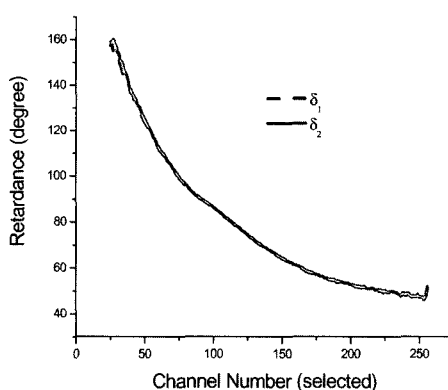


Fig. 3. Two compensators retardance plotted as a function of channel number. These results were obtained from a straight-through calibration of the dual rotating compensator ellipsometer without sample.

데 투과모드에서 시료없이 측정하면 쉽게 calibration을 할 수 있다. 이 경우  $n=2, 4, 6, 8, 10$ 일 때 0이 아닌 푸리에 성분값을 얻을 수 있다. 이 측정에서 모든 광학 부품의 각도는 고정된 polarizer 투과각  $P'$ 에 대해서 상대적인 값을 가지므로  $P' = P - P_s = 0$ 의 값을 갖는다. 결과적으로 다음과 같은 관계식에 의해서  $C_1, C_2, A$  값을 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= -(2\Theta_4 - \Theta_8) / 2, \quad C_1 = (\Theta_4 + \Theta_{16}) / 20, \\ C_2 &= (3\Theta_4 - 2\Theta_8 + \Theta_{16}) / 12 \end{aligned} \quad (4)$$

Fig. 4은 polarizer의 투과축에 대해 얻어진 analyzer 각과 두 compensator의 azimuth를 보여준다. 각각의

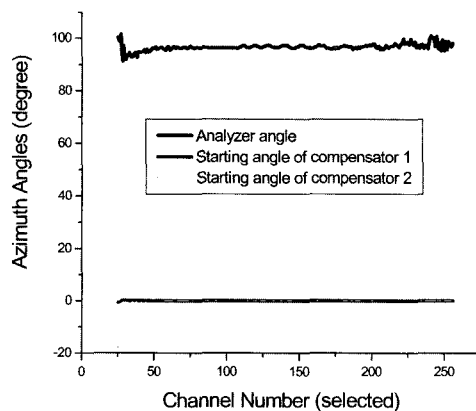


Fig. 4. Analyzer angle and azimuths for two compensators obtained with respect to polarizer transmission axis. These measurements were performed without a sample in the straight-through  $PC_{1r}(\Theta_1)SC_{2r}(\Theta_2)A$  configuration.

값들이 범위 안에서 일정하므로 시스템이 잘 작동함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

비등방성이나 depolarization 을 보이는 물질들을 분석할 수 있는 Mueller matrix ellipsometry 기술에 기반을 둔 dual rotating compensator ellipsometry를 개발하였다. 두 compensator는 고속 스텝모터를 이용하여 5:3의 비로 회전시켜 빛의 밝기 waveform을 얻게 하였다. 시스템 평가를 위해 투과형 모드에서 시료없이 측정하여 푸리에 성분을 얻었다. 시료가 없을 때의 Mueller matrix 값을 가지고 계산한 푸리에 성분과 측정된 파형에서 얻은 푸리에 성분이 잘 일치함을 확인하여 이 시스템의 정확도가 높음을 알 수 있었다. 투과형 모드에서 시료없이 측정하여 polarizer의 투과각에 대한 두 compensator 의 retardance, azimuth각과 analyzer 각을 찾았다. 앞으로 비등방성 분석 프로그램 개발과 시스템 상용화가 이루어지면 여러 연구분야에서 물질의 비등방성 연구를 도울 수 있을 것이다.

### 감사의 글

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

### 참고문헌

1. Collins, R.W., and Joohyun Koh, "Dual rotating-compensator multichannel ellipsimeter: instrument design for real time Mueller matrix spectroscopy of surfaces and films", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 16, No. 8, pp. 1-9 (1999).
2. 안일신, "엘립소메트리", 한양대학교 출판부, pp. 7-10 (2000).
3. Azzam, R.M.A., and Bashara, N.M., "Ellipsometry and Polarized Light", North Holland, Amsterdam, pp. 417-486 (1988).
4. Jobs, B., Doerr, D., Pittal, S., Bhat, I.B., and Dakshinamurthy, S., "Real-time monitoring and control during MOVPE growth of CdTe using multiwavelength ellipsometry", *Thin Solid Films*, Vol. 233, pp. 293-296 (1993).
5. Pickering, C., Hope, D.A.O., Carline, R.T., and Robbins, D.J., "Real-time spectroscopic ellipsometry monitoring of Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si epitaxial growth", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 13, pp. 740-744 (1995).
6. Maracas, G.N., Kuo, C.H., Anand, S., Droopad, R., Sovie, G.R.L., and Levola, T., "Ellipsometry for III-V epitaxial growth diagnostics", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 13, pp. 727-732 (1995).
7. Gao, X., Glenn, D.W., and Woollam, J.A., "In situ ellipsometric diagnostics of multilayer thin film deposition during sputtering", *Thin Solid Films*, Vol. 313-314, pp. 511-515 (1998).
8. Tompkins, Harland G., and McGahan, William A., "Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry", *A Wiley-Interscience publication*, pp. 44-53 (1999).
9. Chi Chen, Ilsin An, and Collins, R.W. "Multichannel Mueller Matrix Ellipsometry for Simultaneous Real-Time Measurement of Bulk Isotropic and Surface Anisotropic Complex Dielectric Functions of Semiconductors", *Physical Review Letters*, Vol. 90, 217402 (2003).
1. Collins, R.W., and Joohyun Koh, "Dual rotating-compensator multichannel ellipsimeter: instrument design