

◆특집◆ 나노메카트로닉스 분야 측정

분광결상 타원계측법을 이용한  
패턴이 형성된 나노박막의 두께측정

제갈원\*, 조용재\*, 조현모\*\*, 김현종\*, 이윤우\*, 김수현\*\*\*

Measurement of Thin Film Thickness of Patterned Samples  
Using Spectral Imaging Ellipsometry

Won Chegal\*, Yong Jai Cho\*, Hyun Mo Cho\*\*, Hyun Jong Kim\*, Yun Woo Lee\* and Soo Hyun Kim\*\*\*

**Key Words** : Imaging Ellipsometry (결상 타원계측법), Ellipsometer (타원계측기), Thin film metrology (박막계측), Spectral Imaging (분광결상), Depth profile (깊이 측면도)

1. 서론

반도체 제조산업과 나노, 바이오 산업의 비약적 발전에 따라 게이트 산화막(gate oxide)과 같이 반도체 제조공정에서 사용되는 유전체 박막(dielectric film)의 두께는 수  $\mu\text{m}$  에서 수  $\text{nm}$  에 이르기까지 다양할 뿐 아니라 얇아지고 있으며, 또한 이러한 박막 들이 다층으로 복잡하게 적층된 다층 박막의 응용이 높아지는 추세이다 따라서, 반도체 및 광통신 소자, 발광소자, 바이오 칩 어레이 등과 같은 나노박막을 이용하는 산업에서는 박막의 두께 측정을 더욱 정확하고, 보다 빠르며 효율적으로 측정할 수 있는 박막 두께 측정용 계측기가 요구된다.<sup>1-2</sup>

일반적으로 박막 두께의 측정에 사용되는 계

측기로는 TEM(Tunneling Electron Microscopy), SEM(Scanning Electron Microscopy)과 같은 전자 현미경류와 AFM(Atomic Force Microscopy)과 같은 SPM(Scanning Probe Microscopy)류의 계측기를 사용하여 패턴이 형성된 박막의 두께나 그 형상을 측정한다. 이러한 계측기는 ex-situ, 접촉식 측정, 시료를 파괴하여 측정하는 특징을 가지고 있다. 하지만, 반도체 산업 현장에서의 생산 공정 중이나 제조 공정의 초기 설치를 하는데 있어서는, 박막 두께를 측정하는데 있어서, 보다 많은 다점 측정(measurements at multiple points), 두께 균일도 측정, in-situ 측정, 비접촉식 측정, 시료의 비파괴를 통한 측정이 가능한 광학식 계측기가 절실히 요구된다. 이를 충족할 수 있는 계측기로는 일반적으로 빛의 편광상태 변화를 이용하여 박막 두께를 측정하는 타원계측법(ellipsometry)이 그 유일한 해법으로 반도체 산업계에서는 인식되고 있으며, 또한 현장에서 널리 사용되는 계측기들 중 하나이다.<sup>3-4</sup> 하지만, 기존의 타원계측기(ellipsometer)는 단일점 측정(measurement at a point) 즉, 시료의 표면에서 탐침인 빛살이 비추는 면적(일반적으로 직경이 수 mm 정도)에 대한 박막의 평균 두께를 측정하는 형태로서 앞서 언급된 박막 두께의 다점 측정에 대한 산업계의 요구를 충족시키기에는 그 한계가 있다.

\* 한국표준과학연구원 광기술표준부

Tel. 042-868-5663, Fax. 042-868-5139

Email : wchehal@kriss.re.kr

타원계측을 이용한 반도체 박막, 바이오 박막 두께 및 광학상수 측정에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

\*\* 한국표준과학연구원 광기술표준부

Tel. 042-868-5135, Fax. 042-868-5131

Email : hmcho@kriss.re.kr

\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과

Tel. 042-869-3268, Fax. 042-869-5201

최근 들어 이러한 한계점 극복을 위하여 단일점 측정 타원계측기를 개선한 결상 타원계측기 (imaging ellipsometer)에 관한 연구들이 진행되어, 그 연구 결과들이 발표되고 있다. 하지만, 이러한 연구들은 단파장 타원계측기(single-wavelength ellipsometer)의 구조에 기반한 결상 타원계측기로서 분광 계측을 통한 다층 박막의 해석 및 분광 데이터 획득을 이용한 높은 정밀도 구현에는 그 한계가 있다.<sup>5-7</sup>

본 논문에서는 단파장 결상 타원계측법(single-wavelength imaging ellipsometry)이 가지는 한계를 극복하는 분광결상 타원계측법(spectral imaging ellipsometry)에 대하여 논의한다. 즉, 기저층(substrate)에 패턴을 형성하며 도포된 투명 박막(transparent film)의 두께를 비파괴적이면서 고속으로 측정하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 분광결상 타원계측법

### 2.1 타원계측법의 원리

그림 1(a)와 같이 굴절률이  $n_0$  와  $n_1$  인 두 등방성 매질의 경계면에서 입사, 반사 및 굴절하는 빛에 대하여 입사각을  $\phi_0$ , 굴절각을  $\phi_1$  이라 하면, Maxwell 방정식과 경계면의 조건으로부터 (1)입사광과 반사광 및 굴절광은 동일면 상에 있고, (2)입사각 = (반사각), (3)  $n_0 \sin\phi_0 = n_1 \sin\phi_1$  (Snell의 법칙)을 만족한다. 전기장  $E$  와 자기장  $H$  의 접선 성분은 연속이라는 경계 조건을 입사면에 평행한  $p$  편광과 수직인  $s$  편광에 적용하면 식 (1)-(4)의  $p$  파와  $s$  파에 대한 Fresnel 반사계수  $r_p, r_s$  와 투과계수  $t_p, t_s$  를 구할 수 있다.

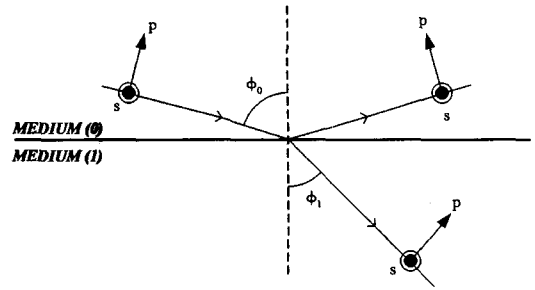
$$r_{01p} = \frac{E_{rp}}{E_p} = \frac{n_1 \cos \phi_0 - n_0 \cos \phi_1}{n_1 \cos \phi_0 + n_0 \cos \phi_1} \quad (1)$$

$$r_{01s} = \frac{E_{rs}}{E_s} = \frac{n_0 \cos \phi_0 - n_1 \cos \phi_1}{n_0 \cos \phi_0 + n_1 \cos \phi_1} \quad (2)$$

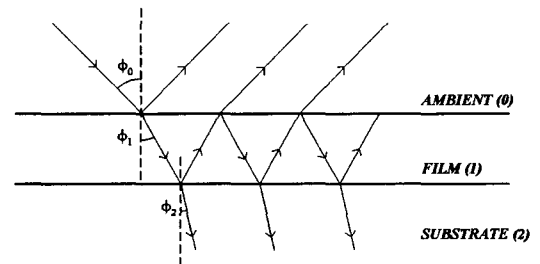
$$t_{01p} = \frac{E_{ip}}{E_p} = \frac{2n_0 \cos \phi_0}{n_1 \cos \phi_0 + n_0 \cos \phi_1} \quad (3)$$

$$t_{01s} = \frac{E_{is}}{E_s} = \frac{2n_0 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_0 + n_1 \cos \phi_1} \quad (4)$$

그림 1(b)와 같이 (대기층/박막/기저층)의 3 상 계로 이루어진 시료에 빛이 입사하여 반사하게 된다면, 반사율은 직접 박막에 반사된 빛과 박막에



(a) Reflection between two-medium interface in a three-phase system



(b) Reflection and transmission of a plane wave

Fig. 1 Reflection and transmission of obliquely incident plane wave at a planar interface

투과하여 기저층에서 반사되어 나온 무수히 많은 빛이 합하여져 식 (5)와 (6)의 전체 반사계수  $R_p$  와  $R_s$  로 계산된다.

타원계측법은 Fresnel 반사계수의 비로 정의되는 식 (8)의 타원계측함수  $\rho$  와 타원계측상수 (ellipsometric parameters),  $\psi$  와  $\Delta$  를 측정함으로써, 모델링 과정을 거쳐 이 값들을 이용하여 박막의 두께를 간접적으로 측정하는 계측법이다.

$$R_p = \frac{r_{01p} + r_{12p} e^{-2j\beta}}{1 + r_{01p} r_{12p} e^{-2j\beta}} \quad (5)$$

$$R_s = \frac{r_{01s} + r_{12s} e^{-2j\beta}}{1 + r_{01s} r_{12s} e^{-2j\beta}} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \phi_1 = \frac{2\pi d_1}{\lambda} (n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \phi_0)^{1/2} \quad (7)$$

$$\rho \equiv \frac{R_p}{R_s} = \tan \psi \exp[j\Delta] \quad (8)$$

편광자/검광자 회전형 타원계측기는 그림 2(a)와 같이 광원, 편광자, 측정시료, 검광자와 광검출

기로 구성되며 측정되는 타원계측상수의 이론적 계산은 빛의 편광 상태를 기술하는 Jones 행렬 계산법을 이용하여 구한다. 편광자의 방위각  $P$  와 검광자의 방위각  $A$  를 편광기의 투과축 (transmission axis)이 시료면에 수직하고 입사면에 나란히 되었을 때를 원점으로 정의하고, 양의 방향은 빛을 향하여 바라볼 때 반시계 방향으로 정의하면, 광감지기에 입사되는 전기장은 식 (9)와 같이 Jones 행렬과 벡터를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_u \\ E_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P & -\sin P \\ \sin P & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} E_0 \quad (9)$$

이때,  $E_0$  는 광원에서 편광자로 입사하는 빛의 전기장 진폭을 나타내며,  $R_p$  와  $R_s$  는 측정 시료의  $p$  편광파와  $s$  편광파에 대한 전체 반사계수이다. 광감지기에 입사되는 전기장  $E_u$  와  $E_v$  를 구하기 위하여 행렬식을 계산하면, 식 (10)의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E_u &= r_p \cos A \cos P + r_s \sin A \sin P \\ E_v &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

광감지기에 입사되는 빛의 세기,  $I^{cal}$  는 전기장 진폭의 제곱에 비례하므로 식 (11)과 같다.

$$I \propto (E_u \ E_v) \begin{pmatrix} E_u^* \\ E_v^* \end{pmatrix} = |E_u|^2 + |E_v|^2 \quad (11)$$

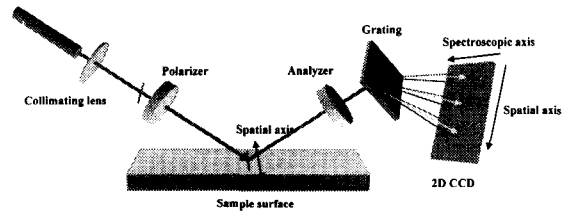
식 (11)에 식 (5)~(10)을 대입하면, 타원계측기에서 측정되는 빛의 세기  $I$  는 편광자의 방위각,  $P$  와  $A$  , 측정 시료의 타원계측상수  $\Psi$  ,  $\Delta$  의 함수 형태인 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I^{cal} &\propto 1 + \alpha \cos 2A + \beta \sin 2A \\ \alpha &= \frac{\tan^2 \Psi - \tan^2 P}{\tan^2 \Psi + \tan^2 P} \\ \beta &= \frac{2 \tan \Psi \cos \Delta \tan P}{\tan^2 \Psi + \tan^2 P} \end{aligned} \quad (12)$$

이때,  $\alpha$ ,  $\beta$  는 틀맞춤된 Fourier 계수(normalized Fourier coefficients)이며,  $\Psi$  와  $\Delta$  는 Fresnel 반사계수로 부터 계산되는 타원계측상수들이다.

## 2.2 분광결상 타원계측법

분광결상 타원계측법(spectral imaging ellipsometry)은 그림 2(a)와 같이 2 차원 CCD 센서를 이용하여 1 축의 공간(spatial axis)과 1 축의 파장(spectroscopic axis)에 대한 타원계측상수를 동시에 측정하는 타원계측법이다. 본 논문에서 제안하는 분광결상 타원계측기(spectral imaging ellipsometer)는 기존의 타원계측기의 구조를 유지하며 plug-in 타입의 단축결상 분광기(mono-axial power spectrograph)를 적용함으로써 분광결상을 구현한다.<sup>8</sup>



(a) Conceptual diagram of spectral imaging ellipsometry for simultaneous measurement of spatial and spectral ellipsometric parameters  
(b) Unfolded structure of a spectral imaging ellipsometer

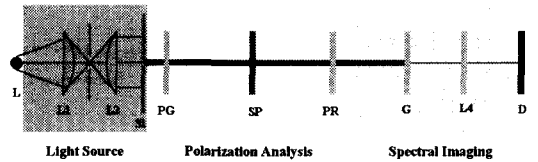


Fig. 2 Basic concept on spectral imaging ellipsometry

Fig. 2(b)는 분광결상 타원계측기의 구성도를 반사면을 펼쳐서 나타낸 것이다. 분광결상 타원계측기의 광원부는 백색광 스펙트럼을 발산하는 텅스텐-할로겐 램프(QTH lamp, L)를 이용하고, 집광렌즈(condensing lens, L<sub>1</sub>)를 이용하여 집광한다. 집광된 빛은 시준렌즈(collimating lens, L<sub>2</sub>)에 의하여 평행광으로 타원계측기 부분으로 입사된다. 이때, 타원계측기에서 측정하게 되는 영역은 공간상의 1

차원 직선 위에 위치한 점들에 대한 영역이므로 1 차원 슬릿(slit, S<sub>1</sub>)에 의하여, 시준된 빛을 얇은 직선의 평행광으로 자른다. 이렇게 얇은 1 차원의 빛은 일정한 입사각과 반사각을 이루며 타원계측기에 입사 및 반사하게된다. 타원계측기에서 출사된 빛은 결상 분광기로 입사되어 회절격자(grating, G)에 의하여 분광되어 결상렌즈(focusing lens, L<sub>4</sub>)에 의하여 2 차원 CCD(charge coupled device) 면에 spectral axis 1 축과 spatial axis 1 축의 정보를 가지며 결상된다.

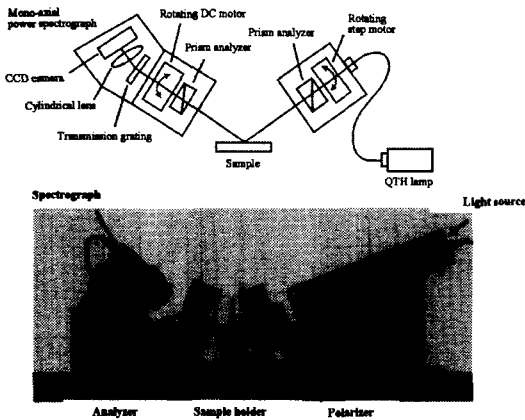


Fig. 3 Schematic diagram and photograph of custom-built spectral imaging ellipsometer

그림 3 은 제작된 분광결상 타원계측기를 나타낸 것으로, 광원은 150 W 텅스텐-할로겐 램프를 사용하였고, 유리섬유 번들과 초점 거리 300 mm의 collimator 를 이용하여 타원계측기의 광원부로 사용하였다. 편광자와 검광자는 소거비(extinction ratio)  $1 \times 10^{-6}$  이하인 단결정 Glan-Thomson 프리즘을 이용하였고, 각도 분해능 0.005° 이하의 스텝 모터와 DC 모터의 회전축에 편광기를 고정시켜 회전 편광자와 검광자를 구현하였다. 수광부는 단축결상 분광기와 CCD 카메라를 일체의 형태로 제작하였으며, 시료 받침대는 시료면에서 반사되는 측정광이 정확히 CCD 카메라에 입사할 수 있도록,

높이(height)와 기울임(tilting)을 동시에 조절할 수 있도록 3 축 스테이지를 설치하였다. 또한 타원계측기 광원 입사각은 반도체 박막 측정시 최대의 민감도를 가질 수 있도록 70° 고정형으로 제작하였다.

### 3. 박막두께 측정실험

#### 3.1 균일하게 도포된 SiO<sub>2</sub>/c-Si 의 두께측정

분광결상 타원계측기의 성능평가를 위하여 실리콘 웨이퍼 위에 SiO<sub>2</sub> 박막이 균일하게 도포된 표준인증시료(CRM, certified reference material)의 박막 두께 측정실험을 수행하였다. 박막 두께의 계산은 대기/박막/기저층의 3 상계로 구성된 모델을 기술하는 식 (5)~(8)과 오차함수 (13)을 이용하여 틀맞춤된 Fourier 계수의 오차값이 최소가 되도록 최소자승의 최적화 방법(least squares optimizations method)을 이용하여 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께를 구하였다. 실리콘 웨이퍼와 SiO<sub>2</sub> 박막의 복소굴절률 값은 문헌에 제시된 값을 참고하였다.<sup>9</sup>

$$\chi^2 = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum \left[ (\alpha^{exp} - \alpha^{cal})^2 + (\beta^{exp} - \beta^{cal})^2 \right]} \quad (13)$$

그림 4(a)는 분광결상 타원계측기를 이용하여 측정된 파장과 공간에 대한 3 차원 타원계측상수, Δ 나타낸 그림이고, 그림 4(b)는 두께 계산 과정을 거쳐 구한 다점 측정에 대한 박막 두께이다. 타원계측상수 값의 비교를 위하여 파장 620 nm 경우에 대하여, 분광결상 타원계측기와 상용품인 VUV-VASE(Vacuum Ultraviolet Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer, J. A. Woollam Co., Inc.)와의 측정 결과를 비교하면 다음과 같다. 분광결상 타원계측기의 결과는  $\Psi=27.11^\circ$ ,  $\Delta=88.38^\circ$  로 측정 되었으며, VUV-VASE 의 경우  $\Psi=27.16^\circ$ ,  $\Delta=87.86^\circ$  로 측정 되었다. 이 경우에 대하여 분광결상 타원계측기의 타원계측상수 측정 상대 오차값은  $\Psi$  의 경우  $-0.05^\circ$  와  $\Delta$  의 경우  $+0.42^\circ$  로 구해졌다.

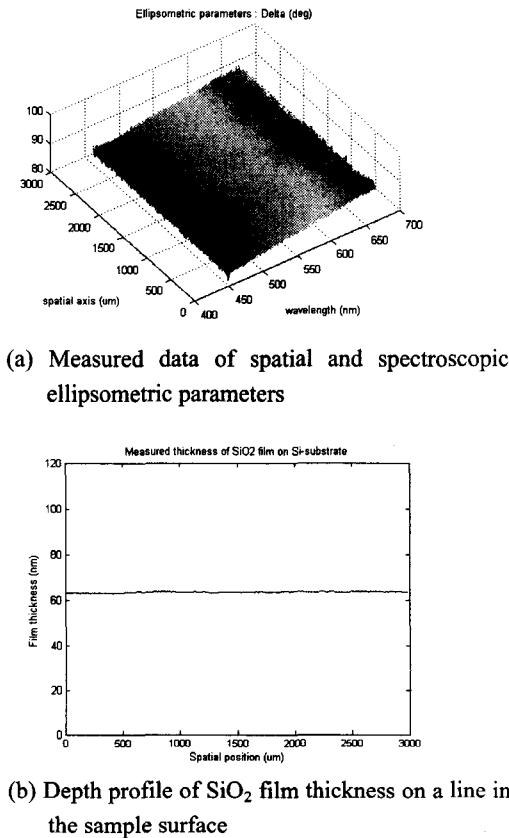


Fig. 4 Results obtained by the spectral imaging ellipsometer for an uniformly deposited SiO<sub>2</sub> film on a Si wafer

두께 계산 과정을 통하여 구한 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께는 분광결상 타원계측기의 경우는 63.4 nm 이고, 이 시료의 박막 두께 인증 값은 62.1 nm 이다. 따라서 분광결상 타원계측기의 두께 측정 오차값은 1.2 nm 로써 약 2 nm 이하의 값을 가짐을 알 수 있다.

### 3.2 선형 패턴을 형성하며 도포된 SiO<sub>2</sub>/c-Si 의 두께측정

실험에 사용된 시료는 실리콘 웨이퍼 위에 SiO<sub>2</sub> 박막을 CVD(chemical vapor deposition) 공정을 이용하여 약 200 nm 로 도포한 후, 패턴 마스크를 사용하여 약 100 nm 를 식각 시킨 형상 시료이다. 사용된 패턴 마스크는 1000 μm 에서 125 μm 까지

의 다양한 선폭을 가지도록 제작하였다. 이 패턴 마스크를 이용하여 제작된 시료는 일반적인 2 차원 패턴을 가진 시료는 아니지만, 분광결상 타원계측기의 두께 측정 정확도와 공간 분해능의 측정에 적합한 시료이다. 그림 5 는 제작된 패턴 시료를 이용하여 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께가 약 200 nm 와 약 100 nm 인 두 값에 대하여, 각각의 패턴 선폭이 1000 μm, 500 μm, 250 μm, 125 μm 인 시료를 측정 한 파장과 공간에 대한 3 차원 타원계측상수, Δ 를 나타낸 그림이다.

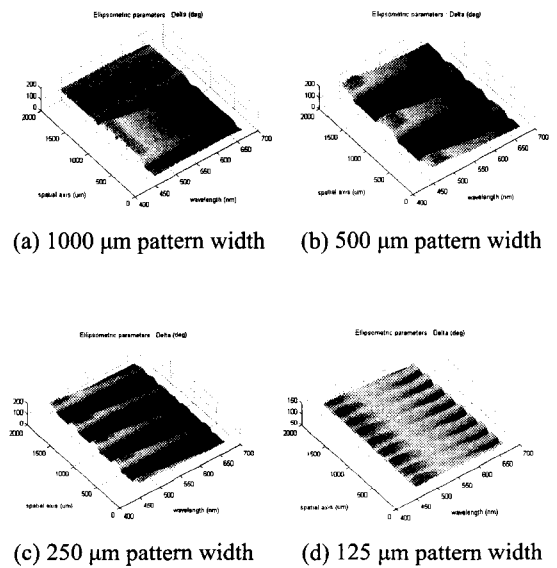


Fig. 5 Spatial and spectroscopic measurements by using the spectral imaging ellipsometer for various patterned samples with a different linewidth

그림 6 은 그림 5 에서 얻은 분광 타원계측상수를 이용하여 최소자승의 최적화 방법을 통해 구한 SiO<sub>2</sub> 박막 두께 형상을 나타낸 것이다. 분광결상 타원계측기와 VUV-VASE 의 두께 측정결과의 비교를 위하여 패턴 선폭이 1000 μm 인 경우에 대하여 비교하면 다음과 같다. 분광결상 타원계측기의 경우 얇은 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께는 122.0 nm 로 측정되었고, 두꺼운 SiO<sub>2</sub> 박막의 경우 222.9 nm 로 측정되었다. 반면 VUV-VASE 를 이용하여 측정 한 결과는 얇은 SiO<sub>2</sub> 의 경우 124.7 nm, 두꺼운 SiO<sub>2</sub> 의 경우 225.0 nm 의 결과를 얻었다. 따라서, 두

측정값의 비교를 통해 두께 측정오차는 약 3 nm 이하의 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 6(a)~(d)에서 알 수 있듯이, SiO<sub>2</sub> 박막 패턴이 두꺼운 부분과 얇은 부분의 경계면에서는 두께 계산 결과 비교적 큰 오차값을 나타내는 것을 알 수 있다. 박막 패턴의 선폭이 좁아질수록 두께 형상의 왜곡은 심해지며, 125 μm 선폭의 경우에는 실제 패턴 형상에서 크게 벗어나는 것을 알 수 있다.

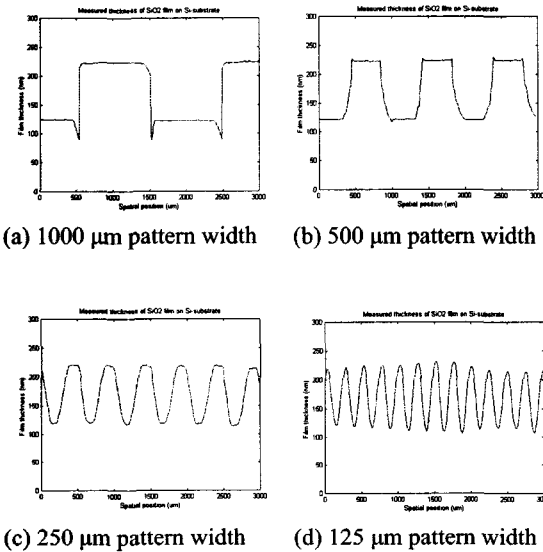


Fig. 6 Depth profiles of SiO<sub>2</sub> film thickness derived from measured spatial and spectroscopic ellipsometric parameters for various patterned samples

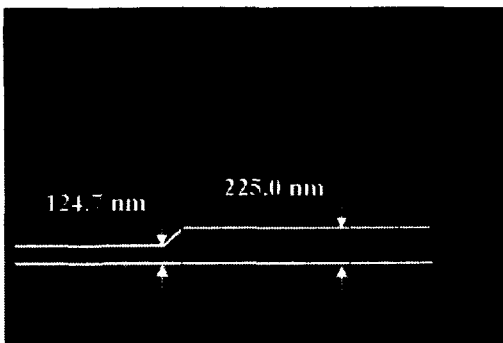


Fig. 7 SEM image of a patterned SiO<sub>2</sub>/c-Si sample

패턴 선폭이 좁아짐에 따라 발생하는 박막 두께의 왜곡은 분광결상 타원계측기의 광원으로 사용된 collimator의 회절 영향과 단축 결상분광기의 공간 분해능, 패턴의 단차가 있는 지점에서 발생하는 빛의 산란 현상이 복합적으로 작용하였기 때문에 발생한 오차로 추정할 수 있다. 따라서, 그림 6의 결과를 이용하여 두꺼운 부분과 얇은 부분의 SiO<sub>2</sub> 박막 두께 값이 약 97%의 값을 가지며 수렴하는 천이구간 길이를 공간 분해능으로 정의한다면, 제작된 분광결상 타원계측기의 공간 분해능은 약 100 μm의 값을 가짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문은 기존의 단파장 결상 타원계측법이 가지는 한계를 극복하는 분광결상 타원계측법을 제안하였다. 제작된 분광결상 타원계측기는 기존의 타원계측기 구조를 유지하며 광감지기 부분에 장착할 수 있는 compact type의 mono-axial power spectrograph를 적용하였으며, 이를 이용하여 1차원의 공간과 파장에 대한 정보를 동시에 측정할 수 있다. 제작된 타원계측기의 성능 평가를 위하여 실리콘 웨이퍼위에 SiO<sub>2</sub> 박막이 균일하게 도포된 두께인증시료와 다양한 선폭을 가지는 패턴형 시료를 이용하여 두께 측정실험을 수행하였다.

실험결과를 통해 제작된 분광결상 타원계측기의 박막 두께 측정 정확도는 약 3 nm 이하이며 공간 분해능은 약 100 μm 값을 가짐을 실험을 통해 확인하였다.

본 논문에서 제안된 분광결상 타원계측법은 1차원 선형태로 분포된 다측정점의 분광 타원계측 상수를 측정하는 방법으로 그 적용 분야는 실시간 다채널 바이오 박막 성장 모니터에 적용할 수 있다.

향후, 분광결상 타원계측기의 공간 분해능 향상을 위하여 시료의 입사 전후에 고배율 대물렌즈를 적용하여 측정광이 시료면에서 초점을 맺도록 시스템을 향상시켜, 공간 분해능을 향상 시키는 추가 연구가 필요할 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 과제는 과학기술부 나노바이오 측정제어기술 사업과 나노메카트로닉스 사업의 일환으로 수

행되었습니다.

### 참고문헌

1. Irving P. Herman, "Optical diagnostics for thin film processing," Academic Press, 1996.
2. "International Technology Roadmap for Semiconductors," International SEMATECH, 2003
3. Hall, A. C., "A century of ellipsometry," Surface Science, Vol. 16, pp. 1-13, 1969.
4. Collins, R. W., "Automatic rotating element ellipsometers: calibration, operation, and real-time application," Rev. Sci. Instrum., Vol. 61, pp. 2029-2061, 1990.
5. Tanooka, D., Adachi, E. and Nagayama, K., "Color-imaging ellipsometer: highspeed characterization of in-plane distribution of film thickness at nano-scale," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, pp. 877-880, 2001.
6. Lekner, J., "Ellipsometry of surface films on a uniform layer," Opt. Soc. Am. A, Vol. 5, pp. 1044-1047, 1988.
7. Harke, M., Stelzle, M. and Motschmann, H. R., "Microscopic ellipsometry: imaging monolayer on arbitrary reflecting supports," Thin Solid Films, Vol. 284-285, pp. 412-416, 1996.
8. Chegal, W., Kim, S. H., Kwak, Y. K., Cho, H. M and Lee, Y. W., "Mono-axial power spectrograph for a spectral imaging ellipsometer: design and experimental results," Meas. Sci. Technol., Vol. 14, pp. 558-562, 2003.
9. Palik, E. D., "Handbook of optical constants of solids I," Academic Press, 1998.