

Ellipsometric Expressions for a Near-normal-incidence Ellipsometer with the Polarizer-compensator-sample-compensator-analyzer Configuration

Sang Youl Kim[†]

Ellipso Technology Co. Ltd., Suwon 16498, Korea

(Received May 3, 2021; Revised May 23, 2021; Accepted May 24, 2021)

A near-normal-incidence ellipsometer (NNIE) is suggested as an optical critical dimension (OCD) measurement system that is highly sensitive to the bottom defect of a sample with high-aspect-ratio structured patterns. Incident light passes through a polarizer and a phase retarder in sequence, and the reflected light from the sample also passes through them, but in reverse order. The operating principle of this NNIE, where a single polarizer and a single phase retarder are shared by the incident and reflected light, is studied, and a method to determine the ellipsometric constants from the measured intensities at proper combinations of the azimuthal angles of polarizer and retarder is presented.

Keywords: High aspect ratio, Near-normal-incidence ellipsometer, Optical critical dimension, Rotating compensator ellipsometer

OCIS codes: (120.2130) Ellipsometry and polarimetry; (120.4630) Optical inspection; (240.0310) Thin films; (310.6628) Subwavelength structure, nanostructures

편광자-보정기-시료-보정기-검광자 배치를 가지는 준 수직입사 타원계의 타원식

김상열[†]

엘립소테크놀러지

☎ 16498 경기도 수원시 팔달구 권광로 258

(2021년 5월 3일 받음, 2021년 5월 23일 수정본 받음, 2021년 5월 24일 게재 확정)

높은 종횡비를 가지는 미세 패턴 시료의 하부층 구조결함에 대해 높은 민감도를 가지는 광학적 임계치수 측정 장비로서 준 수직입사 타원계를 제안한다. 이 준 수직입사 타원계에서는 입사광은 편광자와 위상지연자를 순차적으로 통과하며 반사광은 이들을 역순으로 통과한다. 하나의 편광자와 하나의 위상지연자를 입사광과 반사광이 공유하며 편광자와 위상지연자의 여러 방위각 조합에서 측정된 빛의 세기로부터 타원상수를 결정하는 이 준 수직입사 타원계의 측정원리를 검토하고 최적의 타원상수 측정방법을 제시한다.

Keywords: 높은 종횡비, 준 수직입사 타원계, 광학적 임계치수, 회전보정기 타원계

OCIS codes: (120.2130) Ellipsometry and polarimetry; (120.4630) Optical inspection; (240.0310) Thin films; (310.6628) Subwavelength structure, nanostructures

I. 서 론

반사광의 편광상태가 표면상태에 따라 예민하게 달라지는 현상을 이용하여 표면구조나 박막을 연구하는데 널리 사용되는 타원계(ellipsometer)는 박막 두께 정밀 측정이 가능하여 안경이나 카메라 렌즈의 무반사 코팅으로부터, MOSFET의

게이트 산화막에 이르기까지 거의 모든 첨단 산업에서 박막의 고정밀 정량분석에 널리 사용되고 있다. 특히 반도체 산업체에서는 소자들의 집적도가 증가함에 따라 패턴의 미세화와 초박막화가 지속적으로 이루어지고 타원계의 유용성이 이에 비례하여 증가하고 있다^[1-3]. 단일 파장을 사용한 초기의 타원계는 단층박막 두께 측정에 제한적으로 사용되었으나 여러 파장

[†]E-mail: sykim@ajou.ac.kr, ORCID: 0000-0001-5126-8291

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

에서 측정하는 분광타원계(spectroscopic ellipsometer, SE)가 개발되고 모델링 분석법이 도입됨에 따라 다층박막 시료의 구조와 광학상수의 고정밀 정량분석이 용이해졌다^[4-7]. SE는 편광자-시료-검광자(polarizer-sample-analyzer, PSA) 배치에서 회전검광자 방식으로 구동하는 타원계(rotating analyzer ellipsometer, RAE)가 먼저 개발되었는데^[4] 이 RAE 방식의 타원계는 회전편광자 방식의 타원계(rotating polarizer ellipsometer, RPE)와 마찬가지로 위상각 Δ 의 부호를 결정하지 못하거나 $\sin \Delta$ 가 0 근방인 유전영역에서 Δ 측정오차가 커지는 단점을 가지고 있다. 편광자-보정기-시료-검광자(polarizer-compensator-sample-analyzer, PCSA) 배치의 타원계나 회전보정기 방식으로 구동하는 타원계(rotating compensator ellipsometer, RCE)를 도입하여 이 단점을 극복할 수 있는데^[8-11] RCE 방식의 타원계를 더욱 개선시킨 이중 보정기 회전방식의 타원계(dual rotating compensator ellipsometer)를 도입하여 시료의 뮐러행렬 성분(Mueller matrix element) 16개 모듈을 결정할 수 있게 하는 뮐러행렬 타원계(Mueller matrix ellipsometer, MME)가 개발되어 시료의 비등방성이나, 편광지움 작용 등을 연구할 수 있게 되었다^[12].

한편 웨이퍼에 형성된 패턴의 크기와 정확성 등을 검사하는 임계치수(critical dimension, CD) 측정 기술은 노광 공정, 식각 공정 등의 반도체 제조 공정 관리에서 필수적인 기술인데 CD를 측정하는 기술 중에서 이미지 데이터를 제공하는 CD-SEM은 신뢰성이 높지만 경사면이나 가장자리 부분에서 임의성이 발생하고 높은 에너지의 전자를 사용함에 따른 시편 손상의 문제, 진공조건으로 인한 불편함 등이 동반된다^[13,14]. 비접촉 모드에서 사용하는 CD-AFM은 이미지가 탐침의 영향을 많이 받고 탐침이 쉽게 손상되며 양산성이 낮은 단점이 있다^[15]. 산란타원법(ellipsometric scatterometry)을 이용하는 광학적 임계치수(optical critical dimension, OCD) 측정 방법의 경우 앞의 두 방법에 비해 빠르고 간단하며, 사전 시료 준비나 진공을 필요로 하지 않는 장점으로 인해^[16,17] 반도체 산업 현장에서는 검사 및 측정 장비로서 압도적으로 널리 활용되고 있다. 그러나 입사각이 60도 내외인 일반적인 SE는 파장 대비 패턴의 폭이 작아질수록 구조 결합에 대한 민감도가 떨어지는데 특히 3D NAND에서와 같이 수십개의 적층 구조 상에서 높은 종횡비(high aspect ratio, HAR)를 가지는 기둥(pillar), 깊은 구멍(deep hole), 홈(trench) 등의 하부층 구조 결합을 검출하는 데에는 매우 취약하다. 이를 극복하기 위해 도입된 수직입사 방식의 OCD^[18]는 편광상태의 빛을 사용하지만 수직입사 방식을 채택함에 따라 타원법의 장점을 충분히 활용하지 못하지만 사다리꼴 1차원 회절격자 시료의 경우 입사각이 7도 근방일 때가 입사각이 60-75도 근방일 때 보다 SE 측정값의 구조민감성이 뛰어난 것으로 보고되고 있다^[16]. 한편

실리콘 기반의 다층 박막을 투과하는 빛의 침투 깊이가 근적외선(near-infrared, NIR) 영역에서 급격히 증가하는 사실을 바탕으로 NIR 영역으로 측정 파장 대역을 넓힌 NIR-SE가 제안되기도 하지만^[19,20] 아직 산업체 현장에서 검사장비로 자리 잡지 못하고 있다. 본 연구에서는 타원법의 장점을 살려 HAR 시료의 하부층이나 옆벽(side wall)의 구조결합에 대한 민감도를 향상시키기 위하여 준 수직입사 타원계(near-normal-incidence ellipsometer, NNIE)를 그 측정원리와 함께 제시한다. 이 NNIE는 입사각이 0도가 아니기 때문에 수직입사 방식의 OCD로써는 얻을 수 없는 반사광의 위상정보를 획득, 활용할 수 있으며 일반적인 SE보다 입사각이 훨씬 작기 때문에 HAR 시료의 하부층 구조에 대한 민감도를 키울 수 있다. 하지만 이 NNIE의 경우 입사광과 반사광이 이루는 각도가 작기 때문에 광원과 광량 측정모듈을 포함하여 구성하는 편광소자들의 공간배치에 큰 제약을 받는다. 이러한 공간적인 제약을 극복하기 위하여 하나의 편광자와 하나의 위상지연자를 입사광과 반사광이 공유하도록 하며 편광자의 방위각과 위상지연자의 방위각을 적절히 조합한 상태에서 측정된 빛의 세기들로부터 타원상수를 구하는 수학적 표현들을 제시한다.

II. 편광자-보정기-시료-보정기-검광자 배치 타원계

NNIE의 경우 광원에서 방출되어 매우 작은 입사각으로 시료면을 향하는 빛은 편광자와 위상지연자를 각각 통과한 다음 시료면에서 반사한다. 시료면에서 반사된 빛은 위상자와 편광자를 다시 순차적으로 지나게 되고 광 검출기로 들어가게 된다. 입사각과 반사각이 매우 작아 광원과 광 검출기의 공간배치가 원활하지 않기에 그림 1에서와 같이 하나의 편광자와 하나의 위상지연자를 입사광과 반사광이 공유하도록 하며 광 검출기와 편광자 사이에 광분할기를 두어 공간상의 제약을 극복할 수 있다. 광원과 렌즈 사이에 있는 개구부의 위치를 조정함으로써 대략 3-10도의 영역 내에서 입사각을 바꿀 수 있는 이 NNIE는 구조상으로는 편광자-보정기-시료-보정기-검광자의 배치를 가지는 PC_1SC_2A 타원계가 되는데 검광자를 통과한 빛의 존스 벡터는 다음과 같이 표현된다^[1,2].

$$\vec{E}_{A0}^{te} = \text{const} \cdot \vec{T}_A^{te} \cdot \vec{R}(A - C_2) \cdot \vec{T}_{C_2}^{fs} \cdot \vec{R}(C_2) \cdot \vec{T}_S^{xy} \cdot \vec{R}(-C_1) \cdot \vec{T}_{C_1}^{fs} \cdot \vec{R}(-P + C_1) \cdot \vec{E}_P^{te} \quad (1)$$

여기에서 존스 벡터와 존스 행렬들의 표현은 Azzam의 표현^[1,2]을 따른다. 예를 들어 $\vec{E}_{A0}^{te} = \begin{pmatrix} E_{A0t} \\ 0 \end{pmatrix}$ 와 $\vec{T}_A^{te} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ 는 각각 투과축-소거축 좌표상에서 검광자를 통과한 빛의 존스 벡터와 검광자의 존스 행렬을 가리키며 $\vec{R}(\theta)$ 는 회전각도가 θ

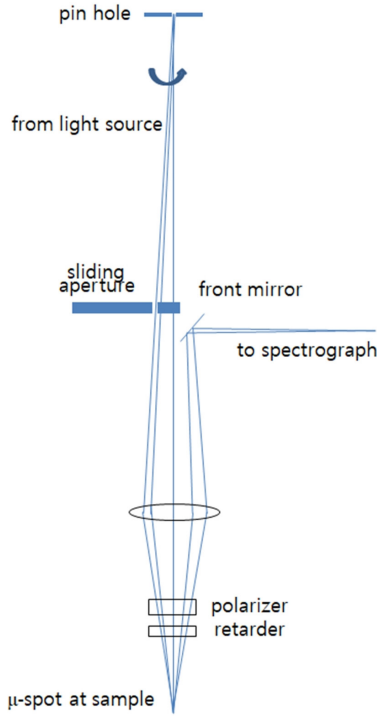


Fig. 1. Schematic figure of near-normal-incidence ellipsometer.

인 회전 존스 행렬, $\vec{T}_{C_2}^{fs} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho_{C_2} \end{pmatrix}$ 는 빠른축-느린축 좌표상에서 위상지연자의 존스 행렬, $\vec{T}_{xy}^{xy} = \begin{pmatrix} V_{ex} & 0 \\ 0 & V_{ey} \end{pmatrix}$ 는 x-y 직교좌표 축 상에서 등방성 시료의 반사를 나타내는 존스 행렬, 그리고 $\vec{E}_{P_0}^{te} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ 는 투과축-소거축 좌표상에서 편광자를 통과한 빛의 존스 벡터들을 각각 가리킨다. 광원에서 방출된 빛이 개구부와 렌즈를 통과할 때 겪는 편광상태의 변화나 시료면에서 반사하여 위상지연자와 검광자를 통과한 빛이 렌즈를 통과하고 거울에서 반사하며 겪는 편광상태의 변화는 편광자의 방위각 P 나 위상지연자의 방위각 C 와는 무관하다. 하지만 식 (1)의 const 에 포함되어 있는 렌즈나 거울 등에 의한 편광작용은 광원이나 광검출기의 편광의존성과 함께 편광자의 방위각에 따라 달라지는 빛의 세기 형태로 본 NNIE 타원법에 영향을 줄 수 있다. 이 부분에 관한 검토는 다음 절의 마지막 부분에서 다루고자 한다. 이 NNIE는 편광자와 위상지연자를 공유하기에 편광자의 방위각 P 와 검광자의 방위각 A 는 $A = -P$ 의 관계를 가지며 위상지연자의 방위각은 $C_1 = -C_2$ 와 같은 관계를 가진다. 밀러행렬 성분을 결정하는 일반적인 타원계는 PC_1SC_2A 배치에서 이중 회전보정기 방식으로 구동하며 C_1 과 C_2 는 일정한 속도비를 가지고 동기화 회전하는데 Collins 그룹에서는 이 회전 각속도비가 정수비일 경우 밀러행렬 성분을 구하는 방법을 제시하였다^[21]. 특히 회전 각속도의 비가 5:3인 경우에는 밀러행렬 성분들을 구하는 구체적인 수학적 표현들을 제시하였다^[12]. 본 연구에서는 $C_1 = -C_2$ 인 경우에 사용할 수 있는 구체적이고도 실용적인 타원상수 표현들을 유도하고자 한

다. $C_1 = -C_2 \equiv C$, $A = -P$ 를 식 (1)에 대입하면 검광자를 통과한 빛의 존스 벡터는 다음과 같이 된다.

$$\vec{E}_{AO}^{te} = \text{const} \cdot \vec{T}_A^{te} \cdot \vec{R}(-P + C) \cdot \vec{T}_C^{fs} \cdot \vec{R}(-C) \cdot \vec{T}_{xy}^{xy} \cdot \vec{R}(-C) \cdot \vec{T}_C^{fs} \cdot \vec{R}(-P + C) \cdot \vec{E}_{P_0}^{te} \quad (2)$$

측정되는 빛의 세기 정보로부터 타원상수를 구하는 기본식들을 구하기 위해 식 (2)를 풀면 다음과 같은 전기장의 표현을 얻는다.

$$E_{AO,t} = \text{const} \cdot V_{ex} [\cos C \cos(P - C) - te^{i\delta} \sin C \sin(P - C)]^2 - V_{ey} [\sin C \cos(P - C) + te^{i\delta} \cos C \sin(P - C)]^2 \quad (3)$$

등방성 시료인 경우 타원상수들은 아래 식 (4)와 같이 정의되는데 위상지연자의 작용을 식 (5)와 같이 나타내고 $V_{ex} = V_{ey} \tan \psi e^{i\delta}$ 와 함께 식 (3)에 대입하여 정리하면 보다 구체적인 전기장의 표현을 식 (6)과 같이 얻는다.

$$\tan \psi e^{i\delta} = V_{ex} / V_{ey} \quad (4)$$

$$\rho_{C1} = \rho_{C2} \equiv \rho_C = te^{i\delta} \quad (5)$$

$$E_{AO,t} / E_0 = \tan \psi e^{i\delta} [\cos C \cos(P - C) - te^{i\delta} \sin C \sin(P - C)]^2 - [\sin C \cos(P - C) + te^{i\delta} \cos C \sin(P - C)]^2 \quad (6)$$

여기에서 $E_0 = \text{const} \times V_{ey}$ 이다. 이 전기장의 표현은 꽤 복잡하며 $I = E_{AO,t} \times E_{AO,t}^*$ 와 같이 구한 빛의 세기는 더욱 복잡하여 빛의 세기를 회전 광학소자의 방위각의 함수로 나타내고 그 푸리에 계수로부터 타원상수를 결정하려는 방법은 실용성이 많이 결여된다. 예를 들어 $P=0$ 인 경우 빛의 세기 표현은 아래와 같다.

$$I/I_0 = \tan^2 \psi \cos^8 C + 2 \tan \psi \{2t \tan \psi \cos \delta + [\cos \Delta - 2t \cos(\Delta - \delta) + t^2 \cos(\Delta - 2\delta)]\} \sin^2 C \cos^6 C + \left\{ \begin{array}{l} 2t^2 \tan^2 \psi (2 + \cos 2\delta) + \\ (1 + 4t^2 + t^4 - 4t \cos \delta + 2t^2 \cos 2\delta - 4t^3 \cos \delta) \\ -2t \tan \psi [\cos(\Delta + \delta) - 2t \cos \Delta + t^2 \cos(\Delta - \delta)] \end{array} \right\} \sin^4 C \cos^4 C + 2t^2 \{2t \cos \delta - \tan \psi [\cos(\Delta + 2\delta) - 2t \cos(\Delta + \delta) + t^2 \cos \Delta]\} \sin^6 C \cos^2 C + t^4 \sin^8 C \quad (7)$$

위에서 $I_0 = |\text{const} \times V_{ey}|^2$ 이다. 이 식을 아래 식 (8)과 같이 회전하는 위상지연자의 푸리에 다항식의 형태로 유도한 다음 이 식의 푸리에 계수들로부터 타원상수를 얻는 타원법은 관련되는 수식들의 복잡성으로 인해 그 활용성이 극히 낮다. 식 (8)의 I'_0 가 I_0 에 비해할 뿐만 아니라 ψ , Δ 의 함수이기도 하기 때문에 측정값에 적당한 배수값(이론적으로 구한)을 곱하거나 나

누어 ψ, Δ 을 결정하려는 시도 또한 가능하지 않음도 관련 해석식을 복잡하게 만드는 하나의 원인이 된다.

$$I(C) = I_0'(1 + \alpha_8 \cos 8C + \alpha_6 \cos 6C + \alpha_4 \cos 4C + \alpha_2 \cos 2C + \beta_8 \sin 8C + \beta_6 \sin 6C + \beta_4 \sin 4C + \beta_2 \sin 2C) \quad (8)$$

한편 시료가 이방성을 가지고 있는 경우에도 식 (4)와 같이 타원상수 표현을 쓸 수 있겠지만 이 경우 타원상수 ψ 와 Δ 는 다층구조와 광학물성과 같은 시료의 고유 속성에 더하여 시료의 방위각에 따라서도 달라지는 타원상수 즉 유사 타원상수 (pseudo ellipsometric constant)라고 불러야 할 것이다.

III. 몇 가지 (P, C) 방위각 조합에서의 타원식

여기에서는 타원상수를 비교적 용이하게 얻을 수 있는 편광자와 위상지연자의 간단한 방위각 조합들과 이들 방위각 조합에서 측정된 빛의 세기로부터 타원상수들을 얻는 방법을 제시한다.

3.1 $P=0$ (또는 $P=\pi$)이거나 $P=\pi/2$ (또는 $P=3\pi/2$)인 경우

이 경우 전기장의 표현은 다음과 같다.

$$E_{A0,t}/E_0 = \tan\psi e^{i\Delta}(\cos^2 C + te^{i\delta}\sin^2 C)^2 - \sin^2 C \cos^2 C(1 - te^{i\delta})^2 \quad (9a)$$

$$P = 0 \text{ (또는 } P = \pi)$$

$$E_{A0,t}/E_0 = \tan\psi e^{i\Delta}\sin^2 C \cos^2 C(1 - te^{i\delta})^2 - (\sin^2 C + te^{i\delta}\cos^2 C)^2 \quad (9b)$$

$$P = \pi/2 \text{ (또는 } P = 3\pi/2)$$

이들 전기장 표현은 C 를 $C+\pi$ 로 치환하여도 달라지지 않으며(주기가 π 이며) $C=0$ 또는 $C=\frac{\pi}{2}$ 를 중심으로 좌우 대칭인 특성을 가지고 있다. 몇 가지 특수한 C 의 값에 대한 전기장의 표현은 표 1과 같다. 단

$$\xi_0 e^{i\eta_0} = (1 - te^{i\delta})^2/8 \quad (10a)$$

$$\xi_1 e^{i\eta_1} = 0.7286 + te^{i\delta}/4 + 0.0214t^2 e^{2i\delta} \quad (10b)$$

$$\xi_2 e^{i\eta_2} = (1 + te^{i\delta})^2/8 \quad (10c)$$

$$\xi_3 e^{i\eta_3} = 0.0214 + te^{i\delta}/4 + 0.7286t^2 e^{2i\delta} \quad (10d)$$

이다.

3.2 $P=\pi/4$ (또는 $P=5\pi/4$)이거나 $P=3\pi/4$ (또는 $P=7\pi/4$)인 경우

이 경우 전기장의 표현은 다음과 같다.

$$E_{A0,t}/E_0 = \tan\psi e^{i\Delta}[\cos^2 C + \sin C \cos C - te^{i\delta}(\sin C \cos C - \sin^2 C)]^2 - [\sin^2 C + \sin C \cos C + te^{i\delta}(\cos^2 C - \sin C \cos C)]^2 \quad (11a)$$

$$P = \pi/4 \text{ (또는 } P = 5\pi/4)$$

$$E_{A0,t}/E_0 = \tan\psi e^{i\Delta}[\cos^2 C - \sin C \cos C + te^{i\delta}(\sin C \cos C + \sin^2 C)]^2 - [\sin^2 C - \sin C \cos C + te^{i\delta}(\cos^2 C + \sin C \cos C)]^2 \quad (11b)$$

$$P = 3\pi/4 \text{ (또는 } P = 7\pi/4)$$

이들 전기장의 표현도 π 의 주기를 가져 C 를 $C+\pi$ 로 치환하여도 바뀌지 않지만 $C=0$ 또는 $C=\frac{\pi}{2}$ 주위의 대칭성은 없다. 몇 가지 C 에 대한 전기장 표현은 표 2와 같다. 단

$$\xi_4 e^{i\eta_4} = (1.2071 - 0.2071te^{i\delta})^2 \quad (12a)$$

$$\xi_5 e^{i\eta_5} = (0.2071 - 1.2071te^{i\delta})^2 \quad (12b)$$

이다. 이상의 결과를 하나의 표로 정리하면 표 3과 같다.

위의 전기장의 표현으로부터 빛의 세기 표현을 구할 수 있고 몇 개의 (P, C) 방위각 조합에서의 빛의 세기들로부터 타원

Table 1. Expressions of the electric field outcoming from the analyzer in the cases when $P=0, \pi$ and $P=\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$

C	Equivalent C	E/E ₀	
		P=0, π	P= $\pi/2, 3\pi/2$
0	0, π	$\tan\psi e^{i\Delta}$	$t^2 e^{2i\delta}$
$\frac{\pi}{8}$	$\frac{\pi}{8}, \frac{7\pi}{8}, \frac{9\pi}{8}, \frac{15\pi}{8}$	$\tan\psi e^{i\Delta} \xi_1 e^{i\eta_1} - \xi_0 e^{i\eta_0}$	$\tan\psi e^{i\Delta} \xi_0 e^{i\eta_0} - \xi_3 e^{i\eta_3}$
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}$	$2\tan\psi e^{i\Delta} \xi_2 e^{i\eta_2} - \xi_0 e^{i\eta_0}$	$2\tan\psi e^{i\Delta} \xi_0 e^{i\eta_0} - 2\xi_2 e^{i\eta_2}$
$\frac{3\pi}{8}$	$\frac{3\pi}{8}, \frac{5\pi}{8}, \frac{11\pi}{8}, \frac{13\pi}{8}$	$\tan\psi e^{i\Delta} \xi_3 e^{i\eta_3} - \xi_0 e^{i\eta_0}$	$\tan\psi e^{i\Delta} \xi_0 e^{i\eta_0} - \xi_1 e^{i\eta_1}$
$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$	$t^2 \tan\psi e^{i(\Delta+2\delta)}$	1

Table 2. Expressions of the electric field outcoming from the analyzer in the cases when $P = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$ and $P = \frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}$

C	E/E ₀	
	$P = \pi/4, 5\pi/4$	$P = 3\pi/4, 7\pi/4$
0, π	$\tan\psi e^{i\Delta} - t^2 e^{2i\delta}$	$\tan\psi e^{i\Delta} - t^2 e^{2i\delta}$
$\frac{\pi}{8}, \frac{9\pi}{8}$	$\tan\psi e^{i\Delta} \xi_4 e^{i\eta_4} - 2\xi_2 e^{i\eta_2}$	$2\tan\psi e^{i\Delta} \xi_2 e^{i\eta_2} - \xi_4 e^{i\eta_4}$
$\frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$	$\tan\psi e^{i\Delta} - 1$	$t^2 e^{2i\delta} (\tan\psi e^{i\Delta} - 1)$
$\frac{3\pi}{8}, \frac{11\pi}{8}$	$2\tan\psi e^{i\Delta} \xi_2 e^{i\eta_2} - \xi_4 e^{i\eta_4}$	$\tan\psi e^{i\Delta} \xi_4 e^{i\eta_4} - 2\xi_2 e^{i\eta_2}$
$\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$	$t^2 e^{2i\delta} \tan\psi e^{i\Delta} - 1$	$t^2 e^{2i\delta} \tan\psi e^{i\Delta} - 1$
$\frac{5\pi}{8}, \frac{13\pi}{8}$	$\tan\psi e^{i\Delta} \xi_3 e^{i\eta_3} - 2\xi_1 e^{i\eta_1}$	$2\tan\psi e^{i\Delta} \xi_1 e^{i\eta_1} - \xi_3 e^{i\eta_3}$
$\frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}$	$t^2 e^{2i\delta} (\tan\psi e^{i\Delta} - 1)$	$\tan\psi e^{i\Delta} - 1$
$\frac{7\pi}{8}, \frac{15\pi}{8}$	$2\tan\psi e^{i\Delta} \xi_1 e^{i\eta_1} - \xi_3 e^{i\eta_3}$	$\tan\psi e^{i\Delta} \xi_3 e^{i\eta_3} - 2\xi_1 e^{i\eta_1}$

Table 3. Expressions of the normalized electric field outcoming from the analyzer E/E₀. Here $\rho = \tan\psi e^{i\Delta}$ and $\rho_c = t e^{i\delta}$

C \ P	0, π	$\pi/4, 5\pi/4$	$\pi/2, 3\pi/2$	$3\pi/4, 7\pi/4$
0, π	ρ	$\rho - \rho_c^2$	ρ_c^2	$\rho - \rho_c^2$
$\frac{\pi}{8}, \frac{9\pi}{8}$	$\rho \xi_1 e^{i\eta_1} - \xi_0 e^{i\eta_0}$	$\rho \xi_4 e^{i\eta_4} - 2\xi_2 e^{i\eta_2}$	$\rho \xi_0 e^{i\eta_0} - \xi_3 e^{i\eta_3}$	$2\rho \xi_2 e^{i\eta_2} - \xi_5 e^{i\eta_5}$
$\frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$	$2\rho \xi_2 e^{i\eta_2} - 2\xi_0 e^{i\eta_0}$	$\rho - 1$	$2\rho \xi_0 e^{i\eta_0} - 2\xi_2 e^{i\eta_2}$	$\rho_c^2 (\rho - 1)$
$\frac{3\pi}{8}, \frac{11\pi}{8}$	$\rho \xi_3 e^{i\eta_3} - \xi_0 e^{i\eta_0}$	$2\rho \xi_2 e^{i\eta_2} - \xi_4 e^{i\eta_4}$	$\rho \xi_0 e^{i\eta_0} - \xi_1 e^{i\eta_1}$	$\rho \xi_5 e^{i\eta_5} - 2\xi_2 e^{i\eta_2}$
$\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$	$\rho \rho_c^2$	$\rho \rho_c^2 - 1$	1	$\rho \rho_c^2 - 1$
$\frac{5\pi}{8}, \frac{13\pi}{8}$	$\rho \xi_3 e^{i\eta_3} - \xi_0 e^{i\eta_0}$	$\rho \xi_5 e^{i\eta_5} - 2\xi_2 e^{i\eta_2}$	$\rho \xi_0 e^{i\eta_0} - \xi_1 e^{i\eta_1}$	$2\rho \xi_2 e^{i\eta_2} - \xi_4 e^{i\eta_4}$
$\frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}$	$2\rho \xi_2 e^{i\eta_2} - 2\xi_0 e^{i\eta_0}$	$\rho_c^2 (\rho - 1)$	$2\rho \xi_0 e^{i\eta_0} - 2\xi_2 e^{i\eta_2}$	$\rho - 1$
$\frac{7\pi}{8}, \frac{15\pi}{8}$	$\rho \xi_1 e^{i\eta_1} - \xi_0 e^{i\eta_0}$	$2\rho \xi_2 e^{i\eta_2} - \xi_4 e^{i\eta_4}$	$\rho \xi_0 e^{i\eta_0} - \xi_3 e^{i\eta_3}$	$\rho \xi_4 e^{i\eta_4} - 2\xi_2 e^{i\eta_2}$

상수 ψ, Δ 를 구할 수 있다. 예를 들어 $P=C=\frac{\pi}{2}$ 일 때의 빛의 세기를 $I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, $P=\frac{\pi}{2}$ 이고 $C=0, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}$ 또는 $\frac{3\pi}{8}$ 일 때의 빛의 세기를 각각 $I(\frac{\pi}{2}, 0)$, $I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{8})$, $I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4})$ 또는 $I(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{8})$ 와 같이 표현하면 일련의 유도과정을 거쳐 다음과 같은 타원상수 표현들을 얻을 수 있다.

$$\tan(\Delta + \eta_0) = \frac{-(\xi_3 \cos\eta_3 - \xi_1 \cos\eta_1) - I_{\text{norm}}(\xi_3 \cos\eta_3 - \xi_2 \cos\eta_2)}{(\xi_3 \sin\eta_3 - \xi_1 \sin\eta_1) - I_{\text{norm}}(\xi_3 \sin\eta_3 - \xi_2 \sin\eta_2)} \quad (13)$$

$$\tan\psi = \frac{[I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{8}) - I(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{8})] / [I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}) - (\xi_3^2 - \xi_1^2)]}{2\xi_0 [\xi_1 \cos(\Delta + \eta_0 - \eta_1) - \xi_3 \cos(\Delta + \eta_0 - \eta_3)]} \quad (14)$$

단

$$I_{\text{norm}} = \frac{I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{8}) - I(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{8}) - I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})(\xi_3^2 - \xi_1^2)}{I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{8}) - I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4})/4 - I(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})(\xi_3^2 - \xi_2^2)} \quad (15)$$

이다.

타원상수를 구할 수 있는 (P,C) 방위각 조합은 이외에도 다수가 존재하며 난이도의 차이는 있지만 대개 해석적인 방법으로 타원상수 Δ, ψ 의 수학적 표현들을 유도할 수 있다. 수치 해석적인 방법을 적용한다면 3개 이상의 독립적인 (P,C) 방위각 조합에 대응되는 빛의 세기로부터 타원상수 Δ, ψ 를 항상 구할 수 있다. (P,C) 방위각 조합이 독립적이 아니면 그 조합에 따라 구해지는 상수들이 달라지는데 이를 그룹별로 나누어 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼저 (P,C)의 조합이 $(\frac{\pi}{2}, 0)$, $(\frac{\pi}{2}, \pi)$, $(\frac{3\pi}{2}, 0)$, $(\frac{3\pi}{2}, \pi)$ 인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값을 (P,C)의 조합이 $(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, $(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$, $(\frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, $(\frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$ 인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값으로 나눈 값은 t^4 의 측정값이 되며 (P,C)의 조합이 (0,0), (0, π), (π ,0), (π , π)인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값을 (P,C)의 조합이 $(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, $(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$, $(\frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$,

$(\frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$ 인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값으로 나눈 값은 $\tan^2\psi$ 의 측정값이 된다. 비슷하게 (P,C) 의 조합이 $(0, \frac{\pi}{2}), (0, \frac{3\pi}{2}), (\pi, \frac{\pi}{2}), (\pi, \frac{3\pi}{2})$ 인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값을 (P,C) 의 조합이 $(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}), (\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}), (\frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2}), (\frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$ 인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값으로 나눈 값은 $t^4 \tan^2\psi$ 의 측정값이 된다.

이상과 같은 (P,C) 의 조합과 결정되는 측정값들을 그룹별로 분류하여 그림 2에 나타내었다. 이 그림에서 가로축은 편광자의 방위각 P , 세로축은 위상자의 방위각 C 를 나타내며 단위는 모두 π 이다. 빛의 세기 측정의 기준값은 속이 찬 원으로 표시된 (P,C) 의 방위각 조합에서 측정된 값이다. 즉 이 빛의 세기 측정 기준값을 분모로 하고 측정값의 세기를 분자로 하여 $t^4, \tan^2\psi$ 그리고 $t^4 \tan^2\psi$ 등의 측정값을 구할 수 있다. $\tan\psi$ 가 결정되었을 때 $\cos\Delta$ 의 측정값을 구할 수 있는 (P,C) 의 조합은 다음과 같다. (P,C) 의 조합이 $(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}), (\frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}), (\frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}), (\frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}), (\frac{5\pi}{4}, \frac{\pi}{4}), (\frac{5\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}), (\frac{7\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}), (\frac{7\pi}{4}, \frac{7\pi}{4})$ 인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값을 (P,C) 의 조합이 $(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}), (\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}), (\frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2}), (\frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$ 인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값으로 나눈 값이 $\tan^2\psi + 1 - 2\tan\psi \cos\Delta$ 이 되며 (P,C) 의 조합이 $(\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}), (\frac{\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}), (\frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}), (\frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}), (\frac{3\pi}{4}, \frac{\pi}{4}), (\frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}), (\frac{7\pi}{4}, \frac{\pi}{4}), (\frac{7\pi}{4}, \frac{5\pi}{4})$ 인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값을 (P,C) 의 조합이 $(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}), (\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}), (\frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2}), (\frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$ 인 곳에서 측정(또는 이들을 평균)한 값으로 나눈 값이 $t^4(\tan^2\psi + 1 - 2\tan\psi \cos\Delta)$ 의 측정값이 된다. 그림 3은 $\tan^2\psi + 1 - 2\tan\psi \cos\Delta$ 또는 $t^4(\tan^2\psi + 1 - 2\tan\psi \cos\Delta)$ 의 측정값을 결정할 수 있는 (P,C) 의 조합을 보여준다. 여기에서 속이 찬 원은 $\tan^2\psi + 1 - 2\tan\psi \cos\Delta$ 를 구하는 (P,C) 의 조합을 나타내며 속이 빈 원은 $t^4(\tan^2\psi + 1 - 2\tan\psi \cos\Delta)$ 를 구하는 (P,C) 의 조합을 나타낸다. $\tan\psi$ 가 결정되어 있을 때에는 이

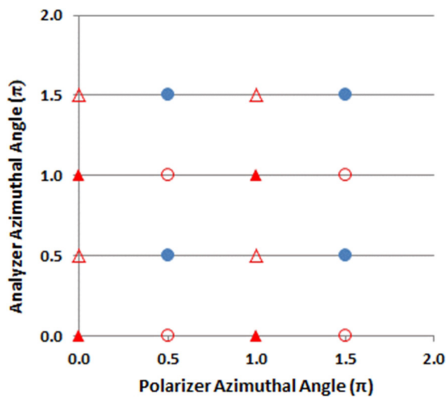


Fig. 2. When normalized by the measured intensities at the azimuthal angles of (P,C) of closed circles, $t^4, \tan^2\psi$ and $t^4 \tan^2\psi$ can be determined using the measured intensities at the azimuthal angles of (P,C) of open circles, closed triangles and open triangles, respectively.

들 조합에서 $\cos\Delta$ 를 결정할 수 있다. 한편 $\cos\Delta$ 를 측정하는 방식은 Δ 의 부호를 결정하지 못하며 $|\cos\Delta|=1$ 근방인 영역에서는 Δ 의 측정오차가 커지는 단점을 가지고 있다. 이 단점은 $\cos(\Delta - 2\delta_c)$ 또는 $\cos(\Delta - \delta_c)$ 의 측정으로 극복할 수 있다. 그림 4에서 속이 찬 원은 $\tan^2\psi + t^4 - 2t^2 \tan\psi \cos(\Delta - 2\delta_c)$ 를 구하는 (P,C) 의 조합을, 속이 빈 원은 $t^4 \tan^2\psi + 1 - 2t^2 \tan\psi \cos(\Delta - \delta_c)$ 를 구하는 (P,C) 의 조합을 나타낸다. 어느 쪽이던 $\cos(\Delta - 2\delta_c)$ 나 $\cos(\Delta - \delta_c)$ 를 결정할 수 있게 하므로 앞에서 결정된 $\cos\Delta$ 의 값과 함께 사용하면 Δ 를 정확하게 결정할 수 있다.

한편 광원이나 광량 측정장치가 편광의존성을 보인다면 편광자의 방위각을 고정하고 보정기의 방위각만을 달리하여 측정된 빛의 세기들로부터 타원상수를 결정하는 것이 바람직하다. 렌즈나 거울 등에 의한 편광상태 변화가 우려될 경우에는 편광자의 방위각을 고정하여 타원상수를 결정하는 것이 더욱 바람직하다. 렌즈나 거울 등에 의한 영향을 포함하여 광원

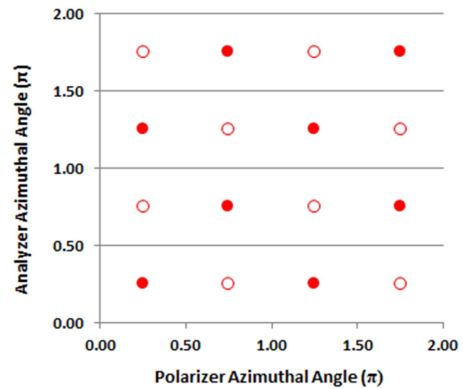


Fig. 3. When $\tan\psi$ is given, $t^4(\tan^2\psi + 1 - 2\tan\psi \cos\Delta)$ and $\tan^2\psi + 1 - 2\tan\psi \cos\Delta$ can be determined using the measured intensities at the azimuthal angles of (P,C) of open circles and those of closed circles, respectively.

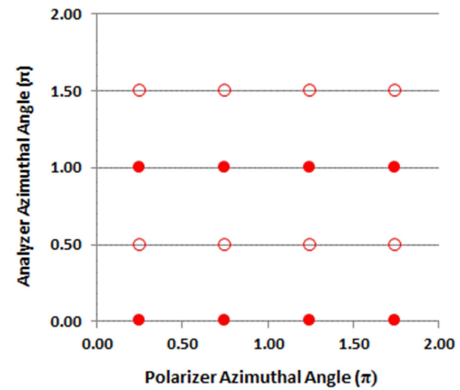


Fig. 4. When $\tan\psi$ is given, $t^4 \tan^2\psi + 1 - 2t^2 \tan\psi \cos(\Delta - \delta_c)$ and $\tan^2\psi + t^4 - 2t^2 \tan\psi \cos(\Delta - 2\delta_c)$ can be determined using the measured intensities at the azimuthal angles of (P,C) of open circles and those of closed circles, respectively.

이나 광량 측정장치의 편광의존성을 보정하면 (P, C)의 조합을 자유롭게 사용할 수 있지만 측정하는 타원상수의 정확도가 이 소자들에 의한 편광의존성 보정 정도에 크게 의존하므로 신중한 접근이 요구되는데 이 소자들에 의한 편광의존성은 편광자를 회전시키면서 등방성 표준시료에 대해 측정된 빛의 세기를 이론적으로 도출한 빛의 세기와 비교하여 수치해석적으로 분석하면 한꺼번에 통합, 보정할 수 있다. 한편 이 NNIE는 사용하는 빛의 파장에 대한 제약을 가지고 있지 않으므로 준 수직입사 분광타원계(near-normal-incidence spectroscopic ellipsometer)로 간편하게 확대 적용할 수 있다. 특히 이 준 수직입사 타원법은 이상적이지 않은 4분파장 위상지연자 즉 $t \neq 1$ 이고 $\delta \neq \pi/2$ 인 위상지연자를 보정기로 사용할 때에도 타원상수들을 정확하게 결정할 수 있게 하므로 파장의존성 위상지연자를 사용하더라도 DUV에서 NIR에 이르는 넓은 파장대역에 걸쳐 분광타원계를 정상적으로 작동할 수 있게 하는 장점을 가지고 있다.

IV. 결 론

높은 중형비를 가지는 미세 패턴 시료의 하부층 구조결합에 대해 높은 민감도를 가질 것으로 기대되는 준 수직입사 타원계(NNIE)를 제시하였다. 하나의 편광자와 하나의 위상지연자를 입사광과 반사광이 공유하는 이 NNIE에서 편광자의 8개 방위각 $P=0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4}$ 각각에 대하여 위상자의 16개 방위각 $C=0, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{8}, \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{8}, \frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{8}, \frac{9\pi}{8}, \frac{5\pi}{4}, \frac{11\pi}{8}, \frac{3\pi}{2}, \frac{13\pi}{8}, \frac{7\pi}{4}, \frac{15\pi}{8}$ 각각에서 측정된 128개의 빛의 세기들로부터 타원상수 Δ, ψ 를 구하는 방법을 검토하였다. 몇 개의 편광자의 방위각과 위상지연자의 방위각 (P, C)의 조합에 대해 타원상수를 얻을 수 있는 수학적 표현들을 제시하였다. (P, C)의 조합에 따라 얻을 수 있는 타원상수가 $\tan^2\psi, \tan^2\psi+1-2\tan\psi \cos\Delta, \tan^2\psi+t^4-2t^2\tan\psi \cos(\Delta-2\delta_c)$ 또는 $t^4\tan^2\psi+1-2t^2\tan\psi \cos(\Delta-\delta_c)$ 와 같이 달라지는데 이들을 그룹별로 분류하였다. NNIE는 이상적이지 않은 4분파장 위상지연자를 사용하는 준 수직입사 분광타원계로도 확대 적용 가능성을 확인하였다. 이러한 장점으로 인하여 이 준 수직입사 타원법은 높은 중형비를 가지는 3D NAND의 검사/측정에서 기존 SE 기반 OCD 측정 장비의 한계를 극복할 수 있게 할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술진흥원(2020년 소재·부품·장비 양산성능평가지원사업, 과제번호: P0015756)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light* (North-Holland, Amsterdam, 1987).
2. S. Y. Kim, *Ellipsometry* (Ajou University Press, Korea, 2000), Chapter 3-4.
3. H. Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications* (John Wiley & Sons, Tokyo, Japan, 2007), Chapter 5.
4. D. E. Aspnes and A. A. Studna, "A high-precision scanning ellipsometer," *Appl. Opt.* **14**, 220-228 (1975).
5. D. E. Aspnes and A. A. Studna, "Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV," *Phys. Rev. B* **27**, 985 (1983).
6. K. Vedam and P. J. McMarr, "Nondestructive depth profiling by spectroscopic ellipsometry," *Appl. Phys. Lett.* **47**, 339-341 (1985).
7. K. Vedam and S. Y. Kim, "Simultaneous determination of refractive index, its dispersion and depth-profile of magnesium oxide thin film by spectroscopic ellipsometry," *Appl. Opt.* **28**, 2691-2694 (1989).
8. T. Mori and D. E. Aspnes, "Comparison of the capabilities of rotating-analyzer and rotating-compensator ellipsometers by measurements on a single system," *Thin Solid Films* **455-456**, 33-38 (2004).
9. K. Ebert and D. E. Aspnes, "Biplate artifacts in rotating-compensator ellipsometers," *Thin Solid Films* **455-456**, 779-783 (2004).
10. J. N. Hilfiker, B. Johs, C. M. Herzinger, J. F. Elman, E. Montbach, D. Bryant, and P. J. Bos, "Generalized spectroscopic ellipsometry and Mueller-matrix study of twisted nematic and super twisted nematic liquid crystals," *Thin Solid Films* **455-456**, 596-600 (2004).
11. R. A. Synowicki, J. N. Hilfiker, and P. K. Whitman, "Mueller matrix ellipsometry study of uniaxial deuterated potassium dihydrogen phosphate (DKDP)," *Thin Solid Films* **455-456**, 624-627 (2004).
12. C. Chen, I. An, G. M. Ferreira, N. J. Podraza, J. A. Zapien, and R. W. Collins, "Multichannel Mueller matrix ellipsometer based on the dual rotating compensator principle," *Thin Solid Films* **455-456**, 14-23 (2004).
13. W. Ito, B. Bunday, S. Harada, A. Cordes, T. Murakawa, A. Arceo, M. Yoshikawa, T. Hara, T. Arai, S. Shida, M. Yamagata, J. Matsumoto, and T. Nakamura, "Novel three dimensional (3D) CD-SEM profile measurements," *Proc. SPIE* **9050**, 90500D (2014).
14. K. Harafuji, N. Nomura, and T. Kouda, "On the image brightness of the trench bottom surface in a scanning electron microscope," *J. Appl. Phys.* **72**, 2541-2548 (1992).
15. M. Watanabe, S. Baba, T. Nakata, T. Morimoto, and S. Sekino, "A novel AFM method for sidewall measurement of high-aspect ratio patterns," *Proc. SPIE* **6922**, 69220J (2008).
16. H.-T. Huang and F. L. Terry Jr., "Erratum to 'Spectroscopic ellipsometry and reflectometry from gratings (Scatterometry) for critical dimension measurement and in situ, real-time process

- monitoring' [Thin Solid Films 455-456 (2004) 828-836],” Thin Solid Films **468**, 339-346 (2004).
17. W. Wei, S. Hou, Z. Wu, Y. Hu, Y. Wang, L. Chen, Y. Xiong, Y. Tian, and G. Liu, “Optical detection method for high aspect ratio microstructures,” *Macromachines* **11**, 296 (2020).
 18. G. L. Whitworth, A. Francone, C. M. Sotomayor-Torres, and N. Kehagias, “Real-time optical dimensional metrology via diffractometry for nanofabrication,” *Sci. Rep.* **10**, 5371 (2020).
 19. KLA-Tencor Corporation, “Systems and methods for extended infrared spectroscopic ellipsometry,” Korean Patent 20180095102A (2018).
 20. KLA-Tencor Corporation, “Method and system for measuring deep trenches in silicon,” US patent 7369235B1 (2008).
 21. J. Li, B. Ramanujam, and R. W. Collins, “Dual rotating compensator ellipsometry: theory and simulations,” *Thin Solid Films* **519**, 2725-2729 (2011).