

Design of a Free-form Mueller Matrix Ellipsometer with Imperfect Compensators

Sang Youl Kim[†]

Ellipso Technology Co. Ltd., Suwon 16498, Korea

(Received December 7, 2021; Revised December 30, 2021; Accepted January 6, 2022)

A free-form Mueller matrix ellipsometer (MME) based on independent control of the azimuthal angle of each polarizing element is introduced. The azimuthal angles of the polarizer and the matching compensator which generate the optimum Stokes vectors of an incident beam are investigated for the polarization state generator, where the spectral responses of the retardation angle and transmittance ratio of a nonideal compensator are taken into account. Similarly, the azimuthal angles of the analyzer and the corresponding compensator are investigated for the polarization-state detector, to unambiguously determine the Stokes vector of the outgoing beam from the sample, and explicit expressions for the Stokes elements are derived. Since the suggested technique enables one to utilize a nonideal quarter-wave plate as the compensator for an MME, it will contribute to the construction and application of a Mueller matrix spectroscopic ellipsometer (MMSE) operating over a wide spectral range from deep ultra-violet to near infrared.

Keywords: Imperfect compensator, Mueller matrix ellipsometer, Wide spectral range

OCIS codes: (000.2170) Equipment and techniques; (120.2130) Ellipsometry and polarimetry; (120.5050) Phase measurement

불완전한 보정기를 적용한 자유형 물러행렬타원계의 설계

김상열[†]

엘립소테크놀로지

☎ 16498 경기도 수원시 팔달구 권광로 258

(2021년 12월 7일 받음, 2021년 12월 30일 수정본 받음, 2022년 1월 6일 게재 확정)

각 편광소자의 방위각을 자유롭게 제어하는 자유형 구동방식에 기반한 물러행렬타원계(Mueller matrix ellipsometer, MME)를 제시한다. 보정기의 위상지연각 분산특성과 전기장 투과율비의 파장의존성을 고려하여 시료에 입사하는 빛의 편광상태를 최적화하기 위한 편광자의 방위각과 편광자측 보정기의 방위각 조합들을 제시한다. 시료로부터 출사하는 빛의 스톡스상수들을 빠르고 정확하게 측정할 수 있는 검광자의 방위각과 검광자측 보정기의 방위각 조합들, 그리고 출사하는 빛의 스톡스상수들을 구하는 수학적 표현들을 제시한다. 이 MME는 이상적이지 않은 4분파장 위상지연자를 적용할 수 있도록 보정기 선택의 폭을 넓혀주므로 깊은 자외선(deep ultraviolet)부터 근적외선(near infrared)에 이르는 매우 넓은 파장 대역에 걸쳐 작동하는 물러행렬 분광타원계(Mueller matrix spectroscopic ellipsometer, MMSE)의 제작과 활용을 용이하게 해 줄 것이다.

Keywords: 불완전한 보정기, 물러행렬타원계, 광파장대역

OCIS codes: (000.2170) Equipment and techniques; (120.2130) Ellipsometry and polarimetry; (120.5050) Phase measurement

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

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



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

편광상태의 제어, 측정 및 분석에 기반한 타원법(ellipsometry)은 그 고유한 장점으로 인하여 물질의 광학적 물성의 연구나 표면의 상태 또는 박막의 정밀 측정 등에 매우 유용하다^[1-3]. 타원법이 적용되는 대부분의 시료는 편광지움효과(depolarization effect)가 없거나 무시되며 이 경우 빛의 편광상태는 존스벡터로, 시료를 포함한 편광소자에 의한 편광작용은 존스행렬로 나타내며 타원상수는 Δ , ψ 또는 이와 대응되는 두 개의 파라미터로 나타낸다^[4,5]. 타원계(ellipsometer)가 개발된 초기에는 단일파장에서 구동하는 단파장 타원계를 사용하여 단일 박막의 두께를 정밀하게 측정하였지만 넓은 파장대역에 걸쳐 다수의 타원상수 값들을 획득하는 분광타원계(spectroscopic ellipsometer, SE)가 개발된 이후 많은 타원상수 측정값들을 모델링 분석하여 다층박막시료의 구조와 물성을 빠르고 정확하게 비파괴적으로 도출할 수 있게 되어^[6-8] 반도체를 비롯한 여러 산업현장에서 분광타원법(spectroscopic ellipsometry, SE)이 매우 유용하게 활용되고 있다.

한편 패턴의 크기가 측정범위의 크기보다 매우 작아지며 수십 나노미터 크기의 미세구조를 가지는 반도체소자의 임계치수(critical dimension, CD)를 정밀하게 모니터링하고 평가하는 측정방법이나 검사방법이 반도체 집적소자의 고밀도화와 더불어 긴요해지고 있다. CD를 평가하는 방법은 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM), X-선 회절(X-ray diffraction, XRD), 원자힘현미경(atomic force microscopy, AFM) 등 여러가지가 있는데 산업현장에서는 비접촉적, 비파괴적이며 실시간 평가가 가능한 광학적인 방법이 선호되고 있기에 광학적 임계치수(optical critical dimension, OCD) 평가방법이 큰 주목을 받고 있다. 이러한 목적의 OCD 평가장치는 편광지움효과를 다룰 수 있어야 하는데^[9,10] 편광지움효과를 포함하여 편광상태를 제어, 측정하는 타원계를 물리행렬타원계(Mueller matrix ellipsometer, MME)라고 부른다. 대부분의 MME는 편광자-보정기-시료-보정기-검광자(polarizer-compensator-sample-compensator-analyzer, PC₁SC₂A)의 배치를 가지며 시료 전, 후에 있는 두 개의 위상지연자를 선별적으로 탈착하거나 이들의 방위각을 각각 제어하거나 일정비의 각속도로 동기화하여 회전시키는 이중 보정기회전(dual rotating compensator)방식 등으로 구동한다^[11-16]. Azzam^[12]은 이중 보정기회전방식에서 편광상태 측정모듈에 다채널 진폭분할 편광계(division-of-amplitude photo-polarimeter)를 적용하여 측정효율과 속도를 향상시키는 방법을 제시하였고 Collins 그룹에서는 두 개의 보정기를 5:3의 각속도비로 회전시키는 이중 보정기회전방식 다채널 분광타원계를 설계, 제작하여 보정과정을 포함하여 데이터 획득과정을 상세히 제시하며 16개의 MME 성분

을 1.5-6.5 eV의 대역에 걸쳐 빠르고 정확하게 측정할 수 있음을 보였다^[13-16]. 위상변조 방식을 적용한 MME도 개발되어 물질의 이방성 연구^[17], 마이크로초 단위의 높은 시간분해능을 필요로 하는 연구^[18] 등에 적용된 바가 있다. 시료 전, 후에 있는 각 위상지연자로는 위상지연값이 90도이고 빠른축과 느린축의 전기장 투과율비가 1.0인 이상적인 4분파장 위상지연자(quarter-wave phase retarder)가 바람직한다^[11,12]. He-Ne 레이저와 같이 단일 파장의 빛을 사용할 경우 이상적인 4분파장 위상지연자를 구하는 것이 비교적 용이하지만^[19] 넓은 파장대역에 걸쳐 구동하는 물리행렬 분광타원계(Mueller matrix spectroscopic ellipsometer, MMSE)에서 사용할 수 있는 비색성(achromatic) 4분파장 위상지연자는 존재하지 않으므로 실제로는 이와 가까운 특성을 가지는 준 비색성(quasi-achromatic) 위상지연자를 설계, 제작하여 사용한다. 넓은 파장대역에서 작동하는 위상지연자로 가장 보편적인 것은 두께가 약간 다른 두 장의 위상지연자를 광축이 수직이 되도록 접합한 복합위상지연자인데 이 경우 중심파장에서는 위상지연각도를 90도로 맞출 수 있지만 다른 파장에서는 위상지연각이 파장에 반비례하게 된다. 복합위상지연자를 사용한 MME에서 측정 정밀도를 향상시키기 위해 접합각도 미세결합이나 위상지연자의 광활성도 등에서 비롯한 영향을 보정하거나^[20-22] 위상지연각과 방위각을 보다 유연하게 조절할 수 있는 3개 이상의 위상지연자를 접합한 복합위상지연자^[23], Berek 형 또는 non-Berek 형의 위상지연자^[24,25], Fresnel rhomb 프리즘^[26,27] 또는 광탄성 위상변조기(photoelastic phase modulator)^[17,18]를 위상지연 소자로 사용하기도 하는데 광탄성 위상변조기는 보정과정과 오차보정이 까다로우며 Fresnel rhomb 프리즘은 광학정렬이 매우 까다롭다. 경사코팅된 티타늄 나노기둥이 있는 비등방성 거울의 이방성을 이용하여 이 비등방거울을 위상지연자 대신 사용하는 시도도 보고되고 있다^[28,29]. 3개 이상의 위상지연자를 접합한 복합위상지연자나 Berek 형 또는 non-Berek 형의 위상지연자는 접합각도 또는 기울임 각도에 따른 위상지연각의 조절폭이 큰 장점을 가지고 있지만 이상적인 비색성 4분파장 위상지연 특성을 보여주지는 않는다^[24,25]. 한편 극히 최근에는 비등방성 거울의 이방성을 이용하거나 후초점면주사법(back focal plane scanning) 등을 적용한 물리행렬 영상타원계(imaging MME)도 소개되고 있다^[29-31]. 한편 이상적인 4분파장 위상지연자의 위상지연 특성으로부터 많이 벗어나지 않을 경우 분광 측정이 가능하도록 보정방법이 도입되기도 하지만^[11] 접합할 때의 미세한 측정률 틀어짐에도 복합위상지연자의 특성이 크게 달라질 수 있으며^[22] 위상지연각과 유효방위각이 매우 큰 파장의존성을 보이는 복합위상지연자^[20,21]에 적합한 최적 측정방법을 찾는 연구는 지속적으로 진행되고 있다. Li 외^[20]는 자체제작한 이중회전 보정기 방식의 MME를 사용한 측정에서 상당히 큰 편광지

음효과를 관찰하고 이를 고려한 측정이론을 제시하여 MME 측정의 정확도를 향상시켰다. Bian 외^[27]는 준 비색성을 가지며 적당한 크기의 위상지연값을 가지는 Fresnel rhomb 위상 지연자 2개를 사용하는 MMSE에서 몇 개의 특정 각도에 위상 지연자를 두고 각도에 따라 노출시간을 가변조절하는 식으로 최적화된 측정방법을 소개하고 있으며 Du 외^[32]도 이중 회전 보정기방식의 MME에서 편광자와 검광자의 방위각, 회전하는 보정기의 각속도와 위상지연각의 최적조합을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 이상적이지 않은 4분파장 위상지연자들을 사용하는 PC₁SC₂A 배치의 MME를 제안하고 그 구동원리를 제시한다. 위상지연자의 위상지연각도 δ_c 는 90도가 아니며 빠른축과 느린축의 전기장 투과율비 t_c 가 1.0으로부터 상당히 벗어나는 위상지연자가 시료의 전, 후에 각각 배치된 MME에서 시료의 물리행렬을 결정하기 위한 최적의 방위각 조합들, 즉 편광자의 방위각과 시료 전의 위상지연자의 방위각의 조합, 그리고 시료 후의 위상지연자의 방위각과 검광자의 방위각 조합을 찾는 기준과 방법, 그리고 시료의 물리행렬을 결정하는 원리 및 방법과 수학적 표현들을 구체적으로 제시한다.

II. MME 구동 원리

입사광의 스톡스벡터(Stokes vector)와 출사광의 스톡스벡터를 각각 \vec{A}_i , \vec{S}_i 시료의 물리행렬을 \vec{M}_S 와 같이 표현하면 $i = 0, 1, 2, 3$ 에 해당하는 스톡스벡터의 원소들로 만들어진 물리행렬 \vec{A} 와 \vec{S} 는 아래와 같은 관계를 만족한다.

$$\vec{S} = \vec{M}_S \cdot \vec{A} \quad (1)$$

단

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} S_{00} & S_{01} & S_{02} & S_{03} \\ S_{10} & S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{20} & S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{30} & S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{M}_S = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

그리고

$$\vec{A}_i = \begin{bmatrix} a_{0i} \\ a_{1i} \\ a_{2i} \\ a_{3i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\vec{S}_i = \begin{bmatrix} S_{0i} \\ S_{1i} \\ S_{2i} \\ S_{3i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

이다. 이로부터 시료의 물리행렬 \vec{M}_S 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{M}_S = \vec{S} \cdot \vec{A}^{-1} \quad (7)$$

이는 서로 다른 4개의 입사광의 스톡스벡터 \vec{A}_i 각각에 대응되는 출사광의 스톡스벡터 \vec{S}_i 들을 확보하면 이들로부터 입사 물리행렬 \vec{A} 와 출사 물리행렬 \vec{S} 를 각각 식 (2)와 식 (4)와 같이 구성한 뒤 식 (7)에 따라 시료의 물리행렬 \vec{M}_S 를 결정할 수 있음을 말한다. 주목할 사항은 식 (7)에서 역행렬 \vec{A}^{-1} 을 구하기 위해서는 $|\vec{A}| \neq 0$ 이어야 하는데 \vec{A} 를 구성할 때 편광상태가 동일한 두 개의 입사광이 포함되면 $|\vec{A}| = 0$ 이 된다는 사실이다. \vec{A} 를 구성하는 입사광들의 편광상태가 상호 독립적일수록 $|\vec{A}|$ 가 0으로부터 더 크게 벗어나며 \vec{M}_S 결정오차가 작아지므로 $|\vec{A}|$ 가 최대한 큰 값을 가지도록 \vec{A}_i 들을 구성해야 함을 알 수 있다.

III. 편광상태의 발생

스톡스벡터가 \vec{B} 인 빛이 그림 1과 같이 방위각이 P 인 편광자와 빠른축의 방위각이 C 인 위상지연자를 연속으로 통과하면 위상지연자를 통과한 빛의 스톡스벡터 \vec{A} 는 다음과 같이 쓰여진다.

$$\vec{A} = \vec{M}_C(2C) \cdot \vec{M}_P(2P) \cdot \vec{B} \quad (8)$$

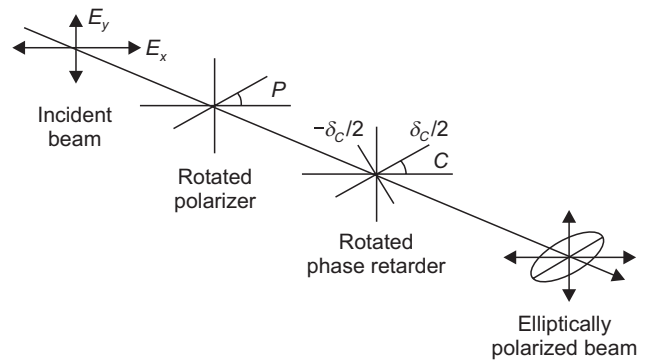


Fig. 1. Generation of an elliptically polarized light.

여기서 $\vec{M}_C(2C)$ 와 $\vec{M}_P(2P)$ 는 각각 방위각이 C 인 위상지연자의 물리행렬과 방위각이 P 인 편광자의 물리행렬로서 이들은 방위각이 0도인 위상지연자의 물리행렬인 \vec{M}_C 와 방위각이 0도인 편광자의 물리행렬인 \vec{M}_x , 그리고 회전각도가 P 인 광회전자의 물리행렬인 $\vec{M}_R(2P)$ 로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{M}_C(2C) = \vec{M}_R(-2C) \cdot \vec{M}_C \cdot \vec{M}_R(2C) \quad (9)$$

$$\vec{M}_P(2P) = \vec{M}_R(-2P) \cdot \vec{M}_x \cdot \vec{M}_R(2P) \quad (10)$$

여기에서 \vec{M}_C 와 \vec{M}_x , 그리고 회전각도가 θ 인 광회전자의 물리행렬 $\vec{M}_R(2\theta)$ 은 다음과 같다.

$$\vec{M}_C = \frac{p^2}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\gamma & 0 & 0 \\ \cos 2\gamma & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\gamma \cos \delta_c & \sin 2\gamma \sin \delta_c \\ 0 & 0 & -\sin 2\gamma \sin \delta_c & \sin 2\gamma \cos \delta_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\vec{M}_x = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\vec{M}_R(2\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (11)에서 p , γ 그리고 δ_c 는 광흡수 위상지연자의 흡수상수들과 위상지연각으로 이상적인 위상지연자의 경우 $p=1$, $\gamma=\pi/4$ 가 된다^[33]. 흡수상수 γ 는 빠른축과 느린축의 전기장 투과비인 t_c 와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$t_c = \tan \gamma \quad (14)$$

편광의존성이 없는 무편광이 입사할 경우 식 (8)의 스톡스 벡터 \vec{A} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{A} = I_0 p^2 \begin{bmatrix} 1 + \cos 2\gamma \cos(2P - 2C) \\ \cos 2P + \cos 2\gamma \cos 2C + \sin 2C \sin(2P - 2C) (1 - \sin 2\gamma \cos \delta_c) \\ \sin 2P + \cos 2\gamma \sin 2C - \cos 2C \sin(2P - 2C) (1 - \sin 2\gamma \cos \delta_c) \\ -\sin 2\gamma \sin \delta_c \sin(2P - 2C) \end{bmatrix} \quad (15)$$

이상적인 4분파장 위상지연자의 경우($\gamma=\pi/4$, $\delta_c=\pi/4$, $p=1$) 식 (15)는 다음과 같이 간단해진다.

$$\vec{A}_{idealQWP} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2P + \sin 2C \sin(2P - 2C) \\ \sin 2P - \cos 2C \sin(2P - 2C) \\ -\sin(2P - 2C) \end{bmatrix} \quad (16)$$

IV. 입사 물리행렬의 설계

깊은 자외선(deep ultraviolet, DUV)부터 근적외선(near infrared, NIR)에 걸친 넓은 파장대역에서 사용할 수 있는 광대역 위상지연자로 2장 이상의 위상지연자를 접합시켜 만든 복합위상지연자가 많이 사용되는데 대표적인 복합위상지연자로 두께가 비슷한 두 장의 단결정 석영판을 접합한 위상지연자가 있다. 그림 2는 이러한 상용 복합위상지연자의 위상지연각 δ_c 와 전기장 투과율비 t_c 를 보여주는데 δ_c 는 파장에 따라 150° 정도부터 25° 정도까지 단조감소하며 t_c 는 1.0 근방에서 빠른 진동을 보인다. 전산모의 계산에 따르면 두께가 비슷한 두 장의 위상지연자를 접합할 때 위상지연각은 두 위상지연자의 광축정렬에 덜 민감하지만 전기장 투과율비는 두 위상지연자의 광축정렬에 매우 민감하여 축이 약간 틀어지면 이 전기장 투과율비는 1.0 근방에서 빠른 진동을 보이는데 광축정렬이 정밀해짐에 따라 진동의 폭이 작아진다. 그림 2에서 복합

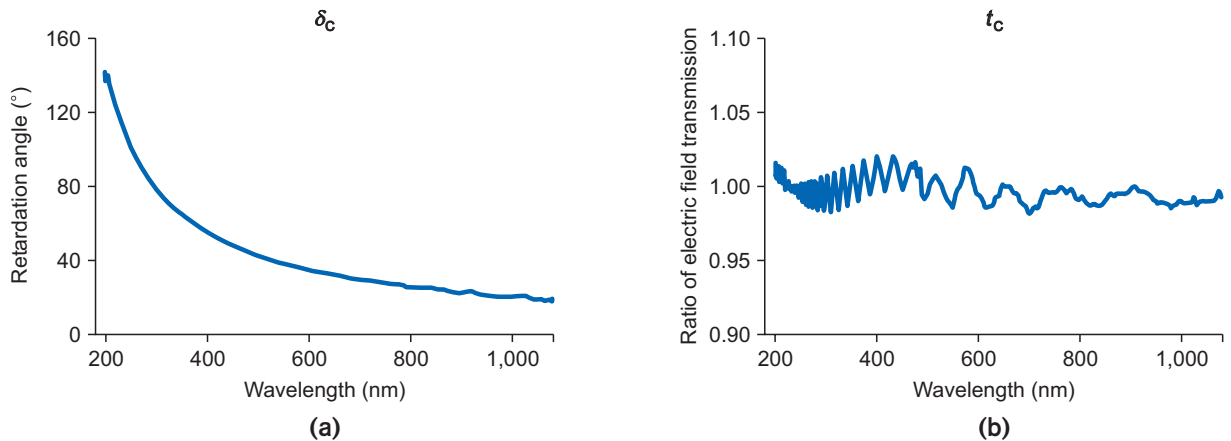


Fig. 2. Characteristics of a typical commercial composite phase retarder versus wavelength. (a) Phase retardation angle in degrees. (b) Ratio of electric field transmission.

위상지연자의 이러한 특성을 잘 확인할 수 있다.

선편광자와 그림 2와 같은 위상지연 특성을 가진 복합위상 지연자를 통과한 빛의 스톡스벡터는 식 (15)를 이용하여 구할 수 있는데 몇 가지 대표적인 (P, C) 의 조합에 대응되는 스톡스 벡터들을 표 1에 정리하였다. 이 표에서 제일 오른쪽 끝 열은 이상적인 4분파장 위상지연자를 사용할 때 나타나는 출사광의 편광상태를 기술하고 있다.

표 1에서 편광상태는 3개의 그룹으로 나뉘어져 있는데 첫 번째 그룹은 투과축이 x축과 나란한 직선편광과 투과축이 y축과 나란한 직선편광으로, 두 번째 그룹은 투과축이 x축과 +45도를 이루는 직선편광과 투과축이 x축과 -45도를 이루는 직선편광으로, 그리고 마지막 그룹은 좌원편광과 우원편광(이상적인 4분파장 위상지연자를 사용할 경우)으로 각각 구성되어 있다. 이들 6개의 편광상태는 상호 독립인 스톡스벡터들을 형성한다. 각 그룹에서 1개씩, 그리고 남은 3개의 스톡스벡터들 중에서 1개의 스톡스벡터를 무작위로 선택하여 4개의 스톡스 벡터들을 선정하고 이들로써 입사 물리행렬 \vec{A} 를 구성하면 행렬식 $|\vec{A}|$ 는 아래 그림 3(a)와 같은 파장 의존성을 보인다. 이

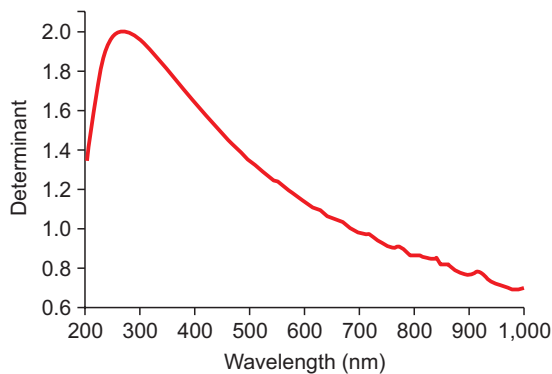
행렬식 $|\vec{A}|$ 는 복합위상지연자가 이상적인 4분파장 위상지연 특성을 보이는 270 nm 근방에서(그림 2 참조) 최대값인 2.0의 값을 가지며 이상적인 4분파장 위상지연 특성으로부터 벗어나는 파장영역에서는 2.0보다 점차적으로 작아지는 것을 그림 3(a)에서 확인할 수 있다. 행렬식의 크기와 파장의존성은 입사 물리행렬을 구성하는 스톡스벡터 \vec{A}_i 의 내용에 따라 크게 달라지는데 예를 들어 표 1의 각 그룹에서 1개씩 스톡스벡터를 선택하고 $P=20^\circ$, $C=70^\circ$ 에 대응되는 스톡스벡터를 추가하여 구성된 입사 물리행렬의 행렬식은 그림 3(b)와 같이 매우 작은 크기와 불규칙한 파장 의존성을 보인다.

V. 편광상태의 측정

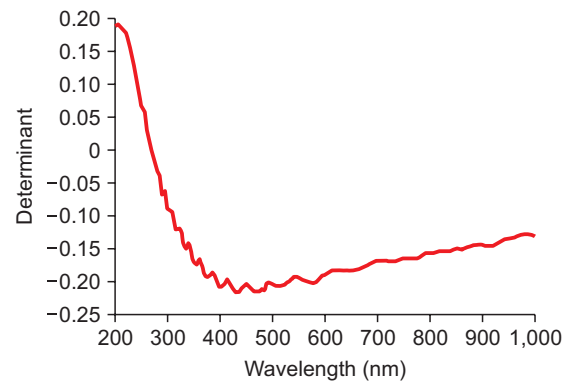
MME에서 편광상태를 측정한다는 것은 스톡스벡터 \vec{S} 의 스톡스상수들을 결정하는 것을 말하는데 스톡스상수들을 결정하는 고전적인 방법에서는 빛을 사분파장 위상지연자와 검광자를 연속으로 통과시킨다. 본 연구에서는 사분파장위상지연 조건을 만족하지 않으며 광흡수가 있는 위상지연자와 검광자

Table 1. Stokes vectors of the beam after passing through a polarizer and a phase retarder

Group	Symbol	(P, C)	Stokes vector	$\gamma = \pi/4, \delta_c = \pi/2$
xy	\vec{A}_1, \vec{A}_2	$(0, 0), (\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	x,y linear polarization
± 45	\vec{A}_3, \vec{A}_4	$(\pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{\pi}{4})$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\pm 45^\circ$ linear polarization
Circle	\vec{A}_5, \vec{A}_6	$(0, \pm \frac{\pi}{4})$	$\begin{bmatrix} 1 \\ \sin 2\gamma \cos \delta_c \\ \cos 2\gamma \\ \sin 2\gamma \sin \delta_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ \sin 2\gamma \cos \delta_c \\ -\cos 2\gamma \\ -\sin 2\gamma \sin \delta_c \end{bmatrix}$	Left, right circular polarization



(a)



(b)

Fig. 3. Calculated determinants of (a) the Mueller matrix composed of four typical Stokes vectors in Table 1 and (b) the Mueller matrix composed of three typical Stokes vectors in Table 1 and the Stokes vector corresponding to $P = 20^\circ$ and $C = 70^\circ$.

를 사용하여 스톡스상수를 결정하는 방법을 구체적으로 제시한다. 즉 스톡스벡터가 \vec{S} 인 빛을 입사파로 하여 방위각이 C 인 광흡수 위상지연자와 방위각이 A 인 검광자를 연속으로 통과시킨 후 출사광의 세기를 (A, C) 의 함수로 측정한 다음 이를 분석하여 다음과 같이 스톡스상수들을 결정한다.

스톡스벡터가 \vec{S} 인 빛이 위상지연자와 검광자를 연속으로 통과하면 투과광의 스톡스벡터 \vec{S}' 는 다음과 같다.

$$\vec{S}' = \vec{M}_P(2A) \cdot \vec{M}_C(2C) \cdot \vec{S} \quad (17)$$

여기서 $\vec{M}_P(2A)$ 와 $\vec{M}_C(2C)$ 는 각각 방위각이 A 인 검광자의 물리행렬과 방위각이 C 인 위상지연자의 물리행렬로서 이들은 각각 아래 식과 같이 나타난다.

$$\vec{M}_P(2A) = \vec{M}_R(-2A) \cdot \vec{M}_x \cdot \vec{M}_R(2A) \quad (18)$$

$$\vec{M}_C(2C) = \vec{M}_R(-2C) \cdot \vec{M}_C \cdot \vec{M}_R(2C) \quad (9')$$

식 (18)과 식 (9')에 식 (11)부터 식 (13)에 제시한 구체적인 수학적 표현들을 대입하고 이들을 다시 식 (17)에 대입하면 조금 길지만 단순한 일련의 계산과정을 거쳐 위상지연자와 검광자를 통과한 빛의 세기를 다음과 같이 A 와 C 의 함수로써 풀어낼 수 있다.

$$I(A, C) = I_0(C) + I_c(C) \cos 2A + I_s(C) \sin 2A \quad (19)$$

단

$$I_0(C) = S_0 + S_1 \cos 2\gamma \cos 2C + S_2 \cos 2\gamma \sin 2C \quad (20a)$$

$$I_c(C) = S_0 \cos 2\gamma \cos 2C + S_1(\cos^2 2C + \sin 2\gamma \cos \delta_c \sin^2 2C) + S_2(1 - \sin 2\gamma \cos \delta_c) \sin 2C \cos 2C - S_3 \sin 2\gamma \sin \delta_c \sin 2C \quad (20b)$$

$$I_s(C) = S_0 \cos 2\gamma \sin 2C + S_1(1 - \sin 2\gamma \cos \delta_c) \sin 2C \cos 2C + S_2(\sin^2 2C + \sin 2\gamma \cos \delta_c \cos^2 2C) + S_3(\sin 2\gamma \sin \delta_c \cos 2C) \quad (20c)$$

여기에서 S_0, S_1, S_2, S_3 는 입사광의 스톡스상수들로서 이들은 $I(A, C)$ 로 표현되는 빛의 세기 조합으로부터 결정할 수 있는데 이 스톡스상수들을 결정할 수 있게 하는 빛의 세기 조합은 다수 존재한다. 스톡스상수들을 결정하는 하나의 대표적인 조합은 다음과 같이 나타난다.

$$S_0 = \frac{1}{8} \sum_{i=0}^3 \left[I\left(\frac{\pi}{4}i - \frac{\pi}{4}, 0\right) + I\left(\frac{\pi}{4}i - \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (21a)$$

$$S_1 = \frac{1}{8} \sum_{i=0}^3 \left[I\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}i, 0\right) + I\left(0, \frac{\pi}{2}i\right) - I\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}i, \frac{\pi}{2}\right) - I\left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}i\right) \right] \quad (21b)$$

$$S_2 = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 \left[I\left(\frac{\pi}{2}i, \frac{\pi}{4}\right) - I\left(\frac{\pi}{2}i, -\frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (21c)$$

$$S_3 = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 \left[I\left(\frac{\pi}{2}i, -\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2}i\right) - I\left(\frac{\pi}{2}i, \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}i\right) \right] \quad (21d)$$

스톡스상수를 결정할 수 있는 또 다른 (A, C) 조합의 예로서 검광자의 방위각을 $\frac{\pi}{4}$ 또는 $-\frac{\pi}{4}$ 에 위치시킨 각각의 경우에 대하여 보정기의 방위각을 $\pm \frac{\pi}{4}$ 로 하여 측정한 빛의 세기들을 사용하여 S_2 를 결정하는 수학적 표현은 다음과 같이 된다.

$$S_2 = \frac{1}{4} \left[I\left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right) + I\left(\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}\right) - I\left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right) - I\left(-\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (22)$$

VI. 광원과 광량측정 장치의 편광의존성 및 동등한 방위각에서의 측정값 평균

광원이 편광의존성을 가지고 있을 경우 이들의 효과를 다음과 같이 보정한다. 광원의 편광의존성을 측정하여 $\vec{S}_{LS}^T = (S_{LS0}, S_{LS1}, S_{LS2}, S_{LS3})$ 와 같은 스톡스벡터로 표현한 다음 식 (15)의 우측항에 있는 상수 I_0 를 아래 식 (23)의 I'_0 으로 치환한다. 한편으로는 편광의존성이 있는 광원에서 방출되는 빛을 편광자만을 통과시킬 때 측정되는 빛의 세기의 역수를 식 (15)의 우측항에 있는 상수 I_0 에 편광자의 방위각의 함수로 곱하는 방법, 즉 직접적인 수치보정방법을 적용할 수도 있다.

$$I'_0 = I_0(S_{LS0} + S_{LS1} \sin 2P + S_{LS2} \cos 2P) \quad (23)$$

광량측정장치가 편광의존성을 가지고 있을 때에도 광원의 경우와 마찬가지로 방법으로 보정한다. 즉 광량측정장치의 유효 스톡스벡터를 결정한 다음 식 (23)에 대응하는 표현을 적용하거나 검광자를 통과한 무편광의 빛의 세기의 역수를 검광자 방위각의 함수로 하여 상수 I_0 를 수치보정한다.

광학정렬 또는 광학소자의 결합에 의한 선형오차는 광학소자의 동등한 두 방위각에서 측정한 빛의 세기를 평균함으로써 크게 줄일 수 있을 것이다. 예를 들어 식 (21) 또는 식 (22)의 표현에서 $I(P, C)$ 대신 $I(P, C)$ 와 $I(P, C+\pi)$, $I(P+\pi, C)$, 그리고 $I(P+\pi, C+\pi)$ 의 평균값을 사용하면 S_0, S_1, S_2, S_3 결정에서 검광자나 보정기의 광학정렬 또는 이들 소자의 결합과 관련된 선형오차 성분을 크게 줄이고 편광상태 측정모듈에 있는 검광자와 검광자측 보정기 외에도 편광상태 발생모듈에 있는 편광자와 편광자측 보정기에 대하여 대응하는 두 방위각에서의 세기

평균을 취하게 되면 이들의 정렬이나 결합에 의한 선형오차를 크게 줄일 수 있을 것으로 판단한다. 광학소자들의 대응하는 방위각 위치들에서의 측정값들을 평균하여 사용하는 이 방법은 선형오차를 줄이는 장점이 예상되지만 그만큼 측정 횟수가 많아지며 측정시간이 길어지는 단점도 존재하므로 실제 측정에서는 측정 정확도와 측정 시간 간의 적절한 균형점을 찾아야 할 것이다. 편광상태 측정에만 국한한다면 검광자측 보정기와 검광자 공히 (0° 와 180°), (45° 와 225°), (90° 와 270°), 그리고 (-45° 와 -135°)와 같이 대응하는 방위각에서 측정한 빛의 세기들을 평균할 경우 보정기의 방위각 설정 2개, 검광자의 방위각 설정 2개의 조합에서 각각 측정하게 되어 측정횟수와 측정시간이 4배로 증가하게 된다.

VII. 요 약

불완전한 위상지연자를 보정기로 사용하는 경우에도 시료의 물리행렬을 측정할 수 있게 하는 자유형 구동방식의 물리행렬타원계를 제시한다. 이상적인 4분파장 조건을 만족하지 않는 위상지연각 δ_c 와 1.0으로부터 상당히 벗어나는 전기장 투과율비 t_c 를 반영하여 입사광이 최적의 편광상태를 가지도록 하는 편광자의 방위각과 편광자측 보정기의 방위각을 설정하는 기준과 방법, 그리고 시료로부터의 출사광의 스톱스상수들을 결정할 수 있는 검광자의 방위각과 검광자측 보정기의 방위각 조합들을 스톱스상수의 표현식들과 함께 제시하였다. 이상적이지 않은 4분파장 위상지연자를 사용한 MME의 구동을 가능하게 하는 본 연구결과는 위상지연자의 선택폭을 크게 넓혀주므로 DUV부터 NIR에 걸친 넓은 파장대역에서 구동하는 물리행렬 분광타원계의 설계, 제작 및 구동에 유용하게 쓰이고 반도체 산업현장에서의 OCD에 기반한 나노구조의 측정 및 평가에 크게 기여할 수 있을 것이다.

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 Publishing, Amsterdam, 1987).
2. S. Y. Kim, *Ellipsometry* (Ajou University, Suwon, 2000).
3. H. Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications* (John Wiley & Sons, Tokyo, Japan, 2007).
4. S. Y. Kim and K. Vedam "Proper choice of the error function in modelling spectroellipsometric data," *Appl. Opt.* **25**, 2013-2021 (1986).
5. Horiba, "Spectroscopic Ellipsometry," https://www.horiba.com/en_en/products/by-technique/material-characterization/spectroscopic-ellipsometry/ (Accessed date: Dec. 24, 2021).
6. K. Vedam, P. J. McMarr, and J. Narayan, "Nondestructive depth profiling by spectroscopic ellipsometry," *Appl. Phys. Lett.* **47**, 339-341 (1985).
7. J. Narayan, S. Y. Kim, K. Vedam, and R. Manukonda, "Formation and nondestructive characterization of ion implanted silicon-on-insulator layers," *Appl. Phys. Lett.* **51**, 343-345 (1987).
8. S. Y. Kim and K. Vedam, "Simultaneous determination of dispersion relation and depth profile of thorium fluoride thin film by spectroscopic ellipsometry," *Thin Solid Films* **166**, 325-334 (1988).
9. S. Liu, X. Chen, and C. Zhang, "Development of a broadband Mueller matrix ellipsometer as a powerful tool for nanostructure metrology," *Thin Solid Films* **584**, 176-185 (2015).
10. X. Chen, S. Liu, H. Gu, and C. Zhang, "Formulation of error propagation and estimation in grating reconstruction by a dual-rotating compensator Mueller matrix polarimeter," *Thin Solid Films* **571**, 653-659 (2014).
11. P. S. Hauge, "Mueller matrix ellipsometry with imperfect compensators," *J. Opt. Soc. Am.* **68**, 1519-1528 (1978).
12. R. M. A. Azzam, "Mueller-matrix ellipsometry: a review," *Proc. SPIE* **3121**, 396-405 (1997).
13. R. W. Collins and J. Koh, "Dual rotating-compensator multi-channel ellipsometer: instrument design for real-time Mueller matrix spectroscopy of surfaces and films," *J. Opt. Soc. Am. A* **16**, 1997-2006 (1999).
14. J. Li, B. Ramanujam, and R. W. Collins, "Dual rotating-compensator ellipsometer: theory and simulations," *Thin Solid Films* **519**, 2725-2729 (2011).
15. 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).
16. K. Y. Bang, J. S. Kyung, H. K. Oh, O. K. Kim, and I. S. An, "Development and application of Mueller matrix ellipsometry," *J. Semicond. Disp. Equip. Technol.* **3**, 31-34 (2004).
17. A. Laskarakis, S. Logothetidis, E. Pavlopoulou, and M. Gioti, "Mueller matrix spectroscopic ellipsometry: formulation and application," *Thin Solid Films* **455-456**, 43-49 (2004).
18. S. Zhang, H. Jiang, H. Gu, X. Chen, and S. Liu, "High-speed Mueller matrix ellipsometer with microsecond temporal resolution," *Opt. Express* **28**, 10873-10887 (2020).
19. K. S. Reddy, V. M. Kumar, S. Chandralingam, P. R. Rao, and P. V. K. Rao, "Optical signature of wood sample-Mueller matrix imaging polarimetry," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* **5**, 34-38 (2010).
20. W. Li, C. Zhang, H. Jiang, X. Chen, and S. Liu, "Depolarization artifacts in dual rotating-compensator Mueller matrix ellipsometry," *J. Opt.* **18**, 055701 (2016).
21. P. Koleják, D. Vala, K. Postava, P. Provazníková, and J. Pištora, "Mueller matrix ellipsometry of waveplates for control of their properties and alignment," *J. Vac. Sci. Technol. B* **38**, 014006 (2020).
22. D. Vala, P. Koleják, K. Postava, M. Kildemo, P. Provazníková,

- and J. Pištora, "Effects of optical activity to Mueller matrix ellipsometry of composed waveplates," *Opt. Express* **29**, 10434-10450 (2021).
23. H. Gu, X. Chen, H. Jiang, C. Zhang, and S. Liu, "Optimal broadband Mueller matrix ellipsometer using multi-waveplates with flexibly oriented axes," *J. Opt.* **18**, 025702 (2016).
 24. J. A. Woollam Co., "Biased fast axis retarder system," US Patent 10606093 B1 (2020).
 25. J. A. Woollam Co., "Multiple tipped Berek plate optical retarder elements for use in spectroscopic ellipsometer and polarimeter systems," US Patent 6118537A (2000).
 26. A. Furchner, C. Kratz, W. Ogieglo, I. Pinnau, J. Rappich, and K. Hinrichs, "Ultrasensitive broadband infrared 4×4 Mueller-matrix ellipsometry for studies of depolarizing and anisotropic thin films," *J. Vac. Sci. Technol. B* **38**, 014003 (2020).
 27. S. Bian, C. Cui, and O. Arteaga, "Mueller matrix ellipsometer based on discrete-angle rotating Fresnel rhomb compensators," *Appl. Opt.* **60**, 4964-4971 (2021).
 28. A. Ruder, B. Wright, D. Peev, R. Feder, U. Kilic, M. Hilfiker, E. Schubert, C. M. Herzinger, and M. Schubert, "Mueller matrix ellipsometer using dual continuously rotating anisotropic mirrors," *Opt. Lett.* **45**, 3541-3544 (2020).
 29. A. Ruder, B. Wright, R. Feder, U. Kilic, M. Hilfiker, E. Schubert, C. M. Herzinger, and M. Schubert, "Mueller matrix imaging microscope using dual continuously rotating anisotropic mirrors," *Opt. Express* **29**, 28704-28724 (2021).
 30. T. Käseberg, J. Grundmann, J. Dickmann, S. Kroker, and B. Bodermann, "Imaging Mueller matrix ellipsometry setup for optical nanoform metrology," *EPJ Web of Conf.* **238**, 06006 (2020).
 31. C. Chen, X. Chen, C. Wang, S. Sheng, L. Song, H. Gu, and S. Liu, "Imaging Mueller matrix ellipsometry with sub-micron resolution based on back focal plane scanning," *Opt. Express* **29**, 32712-32727 (2021).
 32. W. Du, S. Liu, C. Zhang, and X. Chen, "Optimal configuration for the dual rotating-compensator Mueller matrix ellipsometer," *Proc. SPIE* **8759**, 875925 (2013).
 33. E. Collett, *Polarized Light: Fundamentals and Applications* (Merce Dekker, NY, 1993), Chapter 6.