결맞음길이보다 두꺼운 두 개의 막에 덮여있는 시료의 타원식

김상열[†]

아주대학교 물리학과

☎ 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동

(2013년 1월 11일 받음, 2013년 3월 19일 수정본 받음, 2013년 3월 21일 게재 확정)

회전검광자 방식의 타원계 구조에 기초하여 두꺼운 막들 내부에서 일어나는 다중반사에 인한 빛의 세기를 결맞지 않도록 중첩함으로써 결맞음길이보다 두꺼운 막 두 개가 다층박막시료 위에 있을 때 적용되는 타원상수 표현들을 유도하였다. 유도된 표현들을 커버유리와 공기층 아래에 있는 산화규소 박막이 코팅되어 있는 시료의 타원법 분석에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

Expressions for Ellipsometric Constants of Samples Covered with Two Thick Incoherent Films

Sang Youl Kim[†]

Department of Physics, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

(Received January 11, 2013; Revised manuscript March 19, 2013; Accepted March 21, 2013)

The expressions for ellipsometric constants of a sample covered with two thick films are derived, where incoherent superposition of multiply reflected lights inside thick films is properly considered in the frame of the rotating analyzer ellipsometry. The derived expressions are successfully applied to the analysis of a silicon wafer with a thin silicon dioxide film on it, which is placed beneath a cover glass and an air gap.

Keywords: Incoherent layers, Thick films, Ellipsometry

OCIS codes: (260.2130) Ellipsometry and Polarimetry; (120.2130) Ellipsometry and Polarimetry; (310.5448) Polarization, other optical properties; (240.0310) Thin Film

I. 서 론

타원법(ellipsometry)은 다층박막이나 표면의 구조와 광학적인 물성 연구에 매우 유용하게 활용되어 왔다. 최근에는 측정환경에 대한 제약이 없는 광학적인 방법의 장점을 살려 액체나 고밀도 플라스마 환경을 요구하는 연구 분야로의 활용도 다각적으로 시도되고 있다. 예를 들어 바이오 분야에서는 타원법을 *in vivo* 또는 *in vitro* 환경에서 실시간으로 적용할 수 있는데^[1-5] 대개 세포배양액 내에서 이러한 생체 환경을 유지하며 타원법 측정을 할 수 있도록 특수한 용기를 사용한다. 이 용기에는 입사광과 출사광이 액체에 수직으로 입사 및 출사할 수 있도록 투명한 창을 광경로에 수직한 방향으로 설치한다. 그런데 이러한 특수 용기를 사용하는 대신 세포가 부착되어 있는 시료와 액체를 얇은 커버유리 등으로

덮고 타원법 측정과 분석을 할 수 있게 되면 매우 편리하다. 그러나 바이오 분야에서 사용되는 커버유리는 그 두께가 대략 140 μm 정도가 되어 이 커버유리의 전면에서 반사하는 빛이 그 아래에 있는 시료에서 반사하는 빛과 섞이기 때문에 시료면에서의 반사에 의한 편광상태 측정에 상당한 악영향을 주게 된다. 커버유리 전면 뿐 만이 아니라 커버유리 후면에서도 반사광이 올라오며 커버유리 내부에서의 다중반사와 커버유리와 시료 사이의 배양액에서의 다중반사 등에 의한 영향도 무시하지 못할 정도로 크다. 한편 커버유리의 두께와 배양액의 두께는 대개 빛의 결맞음길이보다 두꺼우므로 이 다중반사가 미치는 효과는 위상정보를 동반하지 않은 효과 즉 세기에 의한 효과만이 반영된다. 이에 따라 빛의 결맞음 길이(coherence length) 보다 막의 두께가 두꺼워서 막 두께에 의한 위상정보를 잃어버릴 때 두꺼운 막에 의한 간섭효과

[†]E-mail: sykim@ajou.ac.kr

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

는 사라지므로 결맞음길이가 막의 두께보다 클 때 스펙트럼 상에서 파장의 변화에 따라 보이는 빠른 진동은 관찰되지 않는다. 이같이 전기장의 중첩보다는 빛 세기의 합의 형태로 반영되는 다중반사효과는 전기장의 중첩으로부터 구한 계산 결과가 보이는 빠른 진동의 평균을 취한 것과 같아진다.^[6]

박막의 두께가 빛의 결맞음길이보다 작을 때 전기장의 중첩에 기초한 다층박막의 유효반사계수, 유효투과계수 등을 계산하는 방법은 잘 알려져 있다.^[7, 8] 두꺼운 막이 여러 개 있을 때 반사 또는 투과광의 세기를 구하는 방법도 이미 여러 연구를 통해 보고되고 있으나^[6, 9] 기층이나 덮개층을 포함하여 두꺼운 막이 있을 때 이 막내에서 반사되는 빛이 타원상수에 미치는 효과에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어지고 있다.^[10-15] 예를 들어 투명한 기층 또는 부분적으로 투명한 기층의 후면에서 반사하는 빛이 타원상수에 미치는 영향에 대한 표현을 유도하고 이를 사용하여 박막이 코팅되어 있는 유리기층의 후면에 의한 반사를 반영하여 모델링 분석한 연구 등이 보고되고 있다.^[13, 14] 그러나 기층이 아닌 위치, 즉 매질과 시료사이에 두꺼운 막이 있으며 그 막이 하나 또는 여러 개가 있을 때 이들이 타원상수에 미치는 영향에 대한 연구는 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 결맞음 길이보다 두꺼운 막들이 그 아래에 있는 박막에 의한 타원상수에 미치는 효과를 검토하고 두꺼운 막들의 효과를 반영하는 수학적 표현을 유도하여 그 아래에 있는 시료의 박막정보를 해석하는 방법을 제시한다.

II. 두꺼운 막에 의한 타원상수식의 보정

2.1. 두꺼운 막이 하나 있는 경우

얇은 박막내에서 반사된 빛은 서로 결맞는 간섭(coherent interference)을 하며 그 세기정보와 위상정보가 타원상수에 반영된다. 빛의 결맞음길이보다 두꺼운 막이 있을 때는 이 두꺼운 막의 아래면에서 반사되는 빛은 윗면에서 반사된 빛과 결맞지 않은 중첩(incoherent superposition)을 하게 되는데, 이와 같이 결맞지 않게 중첩되는 빛이 타원상수에 미치는 영향은 투명한 기층의 후면반사에 의한 효과를 반영하는 방법과 동일한 방식으로 다루면 된다.^[13, 14] 즉 두꺼운 막의 윗면에서 반사된 빛의 세기 I_1 과 두꺼운 막의 아래면에서 반사된 빛의 세기 I_2 를 타원상수 표현을 통하여 대수적으로 더하면 된다. 본 연구에서는 두꺼운 막 내부에서의 다중반사가 타원상수 표현에 미치는 영향을 회전검광자 방식의 타원법에서 사용되는 타원상수 표현을 통하여 다음과 같이 나타내었다.

회전검광자방식 타원법에서 각 광학소자를 거치는 동안 빛이 겪는 편광상태 변화는 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{E}_{AO}^{te} = \text{const} \cdot \vec{R}(A) \cdot \vec{T}_A^{te} \cdot \vec{R}_S^{xy} \cdot \vec{R}(-P) \cdot \vec{E}_{PO}^{te} \quad (1)$$

여기에서 존스행렬과 전기장의 표현은 Azzam 등에 의한 표기방식을 따랐다.^[7, 8] 즉 $\vec{E}_{AO}^{te}$ 와 $\vec{E}_{PO}^{te}$ 는 각각 검광자와 편광자의 투과-소거축 좌표계에서 이들 소자를 통과한 빛의 전기장벡터이며 $\vec{T}_A^{te}$, $\vec{R}_S^{xy}$ 는 각각 검광자와 시료의 편광작용을 나타내는 존스행렬을, 그리고 $\vec{R}(A)$, $\vec{R}(-P)$ 는 각각 방위각이 A인 검광자의 회전행렬과 방위각이 P인 편광자의 역회전행렬을 가리키는 존스행렬이다.

그림 1에서와 같이 매질/두꺼운 막/다층박막/기층의 구조를 가지고 있는 시료에 입사각 ϕ_a 로 입사된 빛이 두꺼운 막에서는 결맞지 않은 중첩을 일으키며 다층박막에서는 결맞는 간섭을 하며 반사되어 나올 경우 반사광의 전기장들을 나타내는 존스 벡터들은 각각 다음과 같다. 전기장의 표현을 간단히 하기 위해 지금부터 투과-소거 축을 나타내는 위치자 te와 검광자를 통과한 빛임을 나타내는 아래첨자 AO등은 앞으로 생략하기로 한다.

$$\vec{E}_1 = E_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pg} & 0 \\ 0 & r_{sg} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2a)$$

$$\vec{E}_{2N} = E_0 e^{-2iN\beta_g} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{pg} r_p' t_{pg}' (r_{pg}' r_p')^{N-1} & 0 \\ 0 & t_{sg} r_s' t_{sg}' (r_{sg}' r_s')^{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{2N} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2b)$$

여기서 $\vec{E}_1$ 과 $\vec{E}_{2N}$ 는 각각 두꺼운 막의 윗면에서 반사한 빛의 전기장과 두꺼운 막의 아래면에서 반사한 빛이 검광자를 통과한 후의 전기장으로써 아래첨자 N은 N번째 다중반사를 가리킨다. 또한 β_g 는 두꺼운 막의 위상두께이며 r_{pg} 와 r_{sg} 는 각각 p파와 s파의 매질과 두꺼운 막의 경계면에서의 반사계수들을 가리키고 t_{pg} 와 t_{sg} 는 각각 p파와 s파의 매질과 두꺼운 막의 경계면에서의 투과계수들을 가리키킨다. ' 표시는 반대방향으로 진행하는 빛의 계수들을 가리키며 r_p 와 r_s 는 각각 두꺼운 막에서 다층박막/기층으로 입사한 p파와 s파의

n_s

FIG. 1. A schematic diagram of lights reflected from the front side of a thick film and those from the substrate coated with thin films. The angle of incidence is ϕ_a .

유효반사계수를 가리킨다. 두꺼운 막의 두께가 결맞음길이보다 긴 것으로 간주하고 있으므로 E_1 과 E_{2N} 들의 절대값을 취하고 공통상수인 E_0 를 1으로 정규화한 다음 제공하여 빛의 세기를 구하면 다음과 같다.

$$I_1 = |E_1|^2 = |r_{pg}|^2 \cos^2 P \cos^2 A + |r_{sg}|^2 \sin^2 P \sin^2 A + (r_{pg}^* r_{sg} + r_{pg} r_{sg}^*) \sin P \cos P \sin A \cos A \quad (3a)$$

$$I_{2N} = |E_{2N}|^2 = |e^{-4i\beta_f}|^N [|t_{pg} r_{pf} t_{pg}'|^2 |r_{pg} r_{pf}|^{2(N-1)} \cos^2 P \cos^2 A + |t_{sg} r_{sf} t_{sg}'|^2 |r_{sg} r_{sf}|^{2(N-1)} \sin^2 P \sin^2 A + \{ (t_{pg} r_{pf} t_{pg}')^* (t_{sg} r_{sf} t_{sg}')^* (r_{pg} r_{pf} r_{sg}^* r_{sf}^*)^{N-1} + (t_{pg} r_{pf} t_{pg}')^* (t_{sg} r_{sf} t_{sg}')^* (r_{pg}^* r_{pf}^* r_{sg} r_{sf})^{N-1} \} \times \sin P \cos P \sin A \cos A] \quad (3b)$$

따라서 반사된 빛의 전체 세기는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I = I_1 + \sum_{N=1}^{\infty} I_{2N} = \xi \cos^2 P \cos^2 A + \eta \sin^2 P \sin^2 A + \zeta \sin P \cos P \sin A \cos A \quad (4)$$

여기에서 식 (4)의 푸리에 계수들은 다음과 같다.

$$\xi = |r_{pg}|^2 + \Delta\xi_2 \quad (5a)$$

$$\eta = |r_{sg}|^2 + \Delta\eta_2 \quad (5b)$$

$$\zeta = (r_{pg} r_{sg}^* + r_{pg}^* r_{sg}) + \Delta\zeta_2 \quad (5c)$$

단

$$\Delta\xi_2 = \frac{|e^{-4i\beta_g}| |t_{pg} r_{pf} t_{pg}'|^2}{1 - |r_{pf} r_{pg}|^2 |e^{-4i\beta_g}|} \quad (6a)$$

$$\Delta\eta_2 = \frac{|e^{-4i\beta_g}| |t_{sg} r_{sf} t_{sg}'|^2}{1 - |r_{sf} r_{sg}|^2 |e^{-4i\beta_g}|} \quad (6b)$$

$$\Delta\zeta_2 = |e^{-4i\beta_g}| \left\{ \frac{(t_{pg} r_{pf} t_{pg}')^* (t_{sg} r_{sf} t_{sg}')^*}{1 - (r_{pg} r_{pf} r_{sg}^* r_{sf}^*) |e^{-4i\beta_g}|} + \frac{(t_{pg} r_{pf} t_{pg}')^* (t_{sg} r_{sf} t_{sg}')^*}{1 - (r_{pg}^* r_{pf}^* r_{sg} r_{sf}) |e^{-4i\beta_g}|} \right\} \quad (6c)$$

회전검광자 방식의 타원계에서는 측정되는 빛의 세기를 회전검광자의 방위각인 A 의 함수로 아래 식 (7)과 같이 나타내는데 식 (4)의 푸리에 계수들을 사용하면 이 식의 푸리에 계수들인 $\alpha_{\exp}$, $\beta_{\exp}$ 는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$I = I_0 (1 + \alpha_{\exp} \cos 2A + \beta_{\exp} \sin 2A) \quad (7)$$

$$\alpha_{\exp} = \frac{\xi - \eta + (\xi + \eta) \cos 2P}{\xi + \eta + (\xi - \eta) \cos 2P} \quad (8a)$$

$$\beta_{\exp} = \frac{\zeta \sin 2P}{\xi + \eta + (\xi - \eta) \cos 2P} \quad (8b)$$

FIG. 2. A schematic diagram of multiply reflecting light inside the lower thick film.

2.2. 두꺼운 막이 두개 있는 경우

얇은 산화막이 코팅되어 있는 단결정규소 시료 위에 두께가 140 μm 정도 되는 커버그라스를 두면 커버그라스와 단결정규소 시료 사이에는 공기층이 존재한다. 커버그라스에 아래방향으로 힘을 가하지 않을 경우 이 공기층의 두께는 대략 20-50 μm 정도가 되어 산화막이 있는 단결정규소 시료위에 두꺼운 막이 2개가 있게 된다. 이 경우 커버그라스는 그림 2의 위의 두꺼운 막과 대응이 되며 공기층은 아래의 두꺼운 막과 대응된다. 커버그라스와 단결정규소 시료 사이를 용액으로 채울 경우에는 커버그라스는 위의 두꺼운 막과 대응되며 용액은 아래의 두꺼운 막과 대응된다.

위의 두꺼운 막 내부에서만 다중반사를 고려한 타원상수 표현은 앞 절에서 다룬 바 있다. 위의 두꺼운 막을 투과한 후 아래 두꺼운 막에 입사한 빛이 아래 두꺼운 막 내부에서만 하는 다중반사는 위의 두꺼운 막 내부에서만 다중반사를 고려할 때와 동일한 방법으로 처리한다. 아래 두꺼운 막에서 N 회 다중반사하는 빛의 전기장을 나타내는 존스 벡터는 식 (9)와 같으며 $E_0 = 1$ 으로 정규화하고 제공하여 구한 빛의 세기는 식 (10)과 같다.

$$\vec{E}_{2N} = E_0 e^{-2iN\beta_f} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{pg} t_{pf} r_{pf}^* t_{pg}' (r_{pf} r_{pg})^{N-1} & 0 \\ 0 & t_{sg} t_{sf} r_{sf}^* t_{sg}' (r_{sf} r_{sg})^{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{2N} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$I_{2N} = |E_{2N}|^2 = |e^{-4i\beta_f}|^N [|t_{pg} t_{pf} r_{pf}^* t_{pg}'|^2 |r_{pf} r_{pg}|^{2(N-1)} \cos^2 P \cos^2 A + |t_{sg} t_{sf} r_{sf}^* t_{sg}'|^2 |r_{sf} r_{sg}|^{2(N-1)} \sin^2 P \sin^2 A + (t_{pg} t_{pf} r_{pf}^* t_{pg}')^* (t_{sg} t_{sf} r_{sf}^* t_{sg}')^* (r_{pf} r_{pg} r_{sf}^* r_{sg}^*)^{N-1} \sin P \cos P \sin A \cos A + (t_{pg} t_{pf} r_{pf}^* t_{pg}')^* (t_{sg} t_{sf} r_{sf}^* t_{sg}')^* (r_{pf}^* r_{pg}^* r_{sf} r_{sg})^{N-1} \sin P \cos P \sin A \cos A] \quad (10)$$

여기에서 반사계수 및 투과계수들을 기술하는 방식은 식 (2)에서 사용한 방식과 같으며(예를 들어 β_f 는 아래 두꺼운 막의 위상두께를 가리킨다.) 아래 두꺼운 막 주위의 반사계수와 투과계수들의 표현은 그림 3에 표시된 바와 같다. 아래 두꺼운 막 내부에서의 다중반사만을 고려할 때 이 다중반사가 식 (8)의 푸리에계수에 미치는 영향을 반영하려면 아래

FIG. 3. A schematic diagram of multiply reflecting light from the front sides and back sides of two thick films. The double lines are an abbreviated expression where the multiple reflection inside the upper thick film is considered.

식 (11)과 같이 정의된 $\Delta\xi_3$, $\Delta\eta_3$, $\Delta\zeta_3$ 를 각각 ξ , η , ζ 에 더해주면 된다.

$$\Delta\xi_3 = \frac{|e^{-4i(\beta_g + \beta_f)}| |t_{pg} t_{pf} r_p t'_{pf} t'_{pg}|^2}{1 - |r_p r_{pf}|^2 |e^{-4i\beta_f}|} \quad (11a)$$

$$\Delta\eta_3 = \frac{|e^{-4i(\beta_g + \beta_f)}| |t_{sg} t_{sf} r_s t'_{sf} t'_{sg}|^2}{1 - |r_s r_{sf}|^2 |e^{-4i\beta_f}|} \quad (11b)$$

$$\Delta\zeta_3 = \frac{|e^{-4i(\beta_g + \beta_f)}|}{\left\{ \frac{(t_{pg} t_{pf} r_p t'_{pf} t'_{pg})^* (t_{sg} t_{sf} r_s t'_{sf} t'_{sg})}{1 - (r_p r_{pf} r_s r_{sf})^* |e^{-4i\beta_f}|} + \frac{(t_{pg} t_{pf} r_p t'_{pf} t'_{pg})^* (t_{sg} t_{sf} r_s t'_{sf} t'_{sg})}{1 - (r_p r_{pf} r_s r_{sf})^* |e^{-4i\beta_f}|} \right\}} \quad (11c)$$

그러나 실제로는 위의 두꺼운 막과 아래의 두꺼운 막에 걸쳐서 하는 다중반사도 존재한다. 위의 두꺼운 막과 아래 두꺼운 막에 걸친 다중반사도 고려한 타원상수의 계산은 다음과 같이 한다.

먼저 결맞음길이보다 두꺼운 막들이 있을 때 각 막에서의 다중반사를 고려하여 전파하는 빛의 세기를 구하는 방법에 따라 위의 두꺼운 막에서 다중반사를 하며 아래 두꺼운 막에 입사하는 빛의 유효세기를 다음과 같이 구한다.^[6, 9, 15] 그림 4에서와 같이 매질(a)과 위의 두꺼운 막(g) 그리고 아래의 두꺼운 막(f)으로 진행되는 빛의 유효세기 관계식들을 구하기 위해 p파와 s파 각각에 대해 매질과 위의 두꺼운 막 사이의 계면행렬 $\vec{M}_{pg}$ 와 $\vec{M}_{sg}$, 위의 두꺼운 막과 아래 두꺼운 막 사이의 계면행렬 $\vec{M}_{pf}$ 와 $\vec{M}_{sf}$, 그리고 p파와 s파 공통으로 위의 두꺼운 막의 층행렬 $\vec{L}_g$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\vec{M}_{pg} = \frac{1}{|t_{pg}|^2} \begin{pmatrix} n_a \cos \phi_a \\ n_g \cos \phi_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -|r_{pg}|^2 \\ |t_{pg}|^2 |t'_{pg}|^2 - |r_{pg}|^2 |r'_{pg}|^2 \end{pmatrix} \quad (12a)$$

FIG. 4. A schematic of light intensities of a forward-travelling light and a backward-travelling one in each medium.

$$\vec{M}_{sg} = \frac{1}{|t_{sg}|^2} \begin{pmatrix} n_a \cos \phi_a \\ n_g \cos \phi_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -|r_{sg}|^2 \\ |t_{sg}|^2 |t'_{sg}|^2 - |r_{sg}|^2 |r'_{sg}|^2 \end{pmatrix} \quad (12b)$$

$$\vec{M}_{pf} = \frac{1}{|t_{pf}|^2} \begin{pmatrix} n_g \cos \phi_g \\ n_f \cos \phi_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -|r_{pf}|^2 \\ |t_{pf}|^2 |t'_{pf}|^2 - |r_{pf}|^2 |r'_{pf}|^2 \end{pmatrix} \quad (13a)$$

$$\vec{M}_{sf} = \frac{1}{|t_{sf}|^2} \begin{pmatrix} n_g \cos \phi_g \\ n_f \cos \phi_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -|r_{sf}|^2 \\ |t_{sf}|^2 |t'_{sf}|^2 - |r_{sf}|^2 |r'_{sf}|^2 \end{pmatrix} \quad (13b)$$

$$\vec{L}_g = \begin{pmatrix} |e^{2i\beta_g}| & 0 \\ 0 & |e^{-2i\beta_g}| \end{pmatrix} \quad (14)$$

여기에서 매질을 지나는 빛을 아래첨자 a, 위의 두꺼운 막을 지나는 빛을 아래첨자 g, 그리고 아래 두꺼운 막을 지나는 빛을 아래첨자 f를 사용하여 나타내었고 투과계수와 반사계수에 사용된 아래 두 첨자중 첫 번째 첨자는 p파 또는 s파를 나타내며 두 번째 첨자는 경계면의 아래쪽 매질을 나타낸다. 정방향으로 진행하는 빛을 위첨자 +, 반대방향으로 진행하는 빛을 위첨자 -로 각각 나타내면 진행방향에 따른 매질내의 빛의 세기와 아래 두꺼운 막에서의 빛의 세기들은 다음과 같이 관계지어진다.

$$\begin{pmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \end{pmatrix} = \vec{M}_{xg} \cdot \vec{L}_g \cdot \vec{M}_{xf} \begin{pmatrix} I_f^+ \\ 0 \end{pmatrix} \quad (x = p \text{ or } s) \quad (15)$$

식 (15)에 식 (12), (13) 그리고 식 (14)의 표현을 대입하고 정리하여 매질 a에서 입사하는 빛의 세기와 아래 두꺼운 막을 통과하는 빛의 세기의 비를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{I_f^+}{I_a^+} = \frac{|t_{xg}|^2 |t_{xf}|^2}{|e^{2i\beta_g}|} \begin{pmatrix} n_f \cos \phi_f \\ n_a \cos \phi_a \end{pmatrix} \left(\frac{1}{1 - |r_{xg}|^2 |r_{xf}|^2 |e^{-4i\beta_g}|} \right) \quad (x = p \text{ or } s) \quad (16)$$

식 (16)으로부터 두꺼운 막에서 다중반사를 고려하게 되면 다중반사를 고려하지 않았을 때보다 빛의 세기가 식 (17a)의 m_p (p파) 배 또는 식 (17b)의 m_s (s파) 배 만큼으로 커짐을 알 수 있다.

$$m_p = \frac{1}{1 - |r_{pg}|^2 |r_{pf}|^2 |e^{-4i\beta_g}|} \quad (17a)$$

$$m_s = \frac{1}{1 - |r_{sg}|^2 |r_{sf}|^2 |e^{-4i\beta_g}|} \quad (17b)$$

위의 두꺼운 막 내에서 반사하는 빛이 반사에 따라 겪는 위상변화는 0 또는 π 이다. 위상변화가 0 또는 π 일 때 빛의 세기는 변하지 않으므로 기층으로 입사하여 두꺼운 막 내에서 다중반사하는 빛들이 식 (4)의 푸리에 계수에 미치는 영향은 진폭에 의한 빛의 세기만을 통해서 반영되는데 그 방법으로는 식 (17a)의 m_p (p파) 또는 식 (17b)의 m_s (s파)를 곱하면 된다. 구체적으로는 식 (11a)의 $\Delta\xi_3$ 에는 m_p 를 곱하며 식 (11b)의 $\Delta\eta_3$ 에는 m_s 를 곱하고 식 (11c)의 $\Delta\zeta_3$ 에는 $\sqrt{m_p m_s}$ 를 곱하면 된다.

그림 3에서와 같이 2개의 두꺼운 막이 있을 때 아래 두꺼운 막과 기층과의 경계면에서 반사한 빛이 위의 두꺼운 막내부에서 만드는 다중반사에 의한 효과도 같은 방법으로 반영한다. 즉 위의 두꺼운 막에서 다중반사하는 빛의 세기는 다중반사하지 않은 빛의 세기의 m_p (p파) 배 또는 m_s (s파) 배 만큼 커지므로 $\Delta\xi_3$ 에는 m_p , $\Delta\eta_3$ 에는 m_s 를 각각 곱하고 $\Delta\zeta_3$ 에는 $\sqrt{m_p m_s}$ 를 곱한다.

지금까지의 논의를 종합하여 정리하면 다음과 같이 요약된다. 위의 두꺼운 막과 아래의 두꺼운 막 각각에서의 다중반사와 이 막들에 걸쳐서 하는 다중반사 모두를 고려하면 식 (5)의 푸리에 계수들은 다음과 같이 수정된다.

$$\xi = |r_{pg}|^2 + \Delta\xi'_2 + m_p^2 \Delta\xi_3 \quad (18a)$$

$$\eta = |r_{sg}|^2 + \Delta\eta'_2 + m_s^2 \Delta\eta_3 \quad (18b)$$

$$\zeta = (r_{pg} r_{sg}^* + r_{pg}^* r_{sg}) + \Delta\zeta'_2 + m_p m_s \Delta\zeta_3 \quad (18c)$$

참고로 두꺼운 막이 하나만 있을 때는 식 (6)에서와 같이 위의 두꺼운 막과 아래 시료면과의 경계면에서의 Fresnel 반사계수인 r_p 또는 r_s 를 사용하였지만 두꺼운 막이 2개 있을 때에 사용하는 식 (18)에서는 위의 두꺼운 막과 아래 두꺼운 막의 경계면에서의 Fresnel 반사계수인 r_{pf} 또는 r_{sf} 를 사용한 식 (19)를 사용하여야 한다.

$$\Delta\xi'_2 = \frac{|e^{-4i\beta_g}| |t_{pg} r_{pf} t'_{pg}|^2}{1 - |r_{pf} r_{pg}|^2 |e^{-4i\beta_g}|} \quad (19a)$$

$$\Delta\eta'_2 = \frac{|e^{-4i\beta_g}| |t_{sg} r_{sf} t'_{sg}|^2}{1 - |r_{sf} r_{sg}|^2 |e^{-4i\beta_g}|} \quad (19b)$$

$$\Delta\zeta'_2 = |e^{-4i\beta_g}| \left\{ \frac{(t_{pg} r_{pf} t'_{pg})(t_{sg} r_{sf} t'_{sg})^*}{1 - (r_{pg} r_{pf} r_{sg}^* r_{sf}^*) |e^{-4i\beta_g}|} + \frac{(t_{pg} r_{pf} t'_{pg})^* (t_{sg} r_{sf} t'_{sg})}{1 - (r_{pg}^* r_{pf}^* r_{sg} r_{sf}) |e^{-4i\beta_g}|} \right\} \quad (19c)$$

식 (18)은 2개의 두꺼운 막이 있을 때 위의 두꺼운 막에서 하는 다중반사 효과는 식 (19)와 같이 반영하고 아래 두꺼운 막에서 하는 다중반사 효과는 식 (11)에서와 같이 반영하며 2개의 두꺼운 막에 걸쳐서 일어나는 다중반사 효과는 식(17)의 우측항으로 표현되는 가중치를 식(11)에 곱하여 반영하고 있으나 2개의 두꺼운 막에 걸쳐서 일어나는 다중반사 효과를 완벽하게 표현하지 못하는 측면이 있다. 예를 들어 위의 두꺼운 막과 아래의 두꺼운 막이 동일한 물질일 경우 $n_f = n_g$ 가 되는데 이 때 식 (18)은 식 (6)의 우측항의 분모를 모두 1으로 할 때의 식 (5)의 근사적인 표현으로 환원이 된다. 2개의 막에 걸쳐서 일어나는 다중반사가 미치는 영향은 각각의 막에서 일어나는 다중반사에 의한 효과에 비해 상대적으로 매우 작지만 미세한 차이를 정확하게 측정하고 분석하기 위해서는 엄밀하게 처리되어야 할 사항이며 이 부분은 후속 연구를 통해 보완하여야 할 주제로 판단된다.

III. 두꺼운 막에 덮여있는 SiO₂ on c-Si 시료의 분석

그림 5는 산화규소박막이 코팅되어 있는 단결정규소 시료를 공기중에서 측정한 타원상수 스펙트럼과 이에 최적맞춘 타원상수 스펙트럼을 보여준다. 최적맞춤하는 과정 즉 모델링과정을 통해 결정된 산화규소박막의 두께는 15.06 nm이다. 분석과정에서 사용된 모델은 공기/SiO₂/c-Si의 3상계 모델인데 SiO₂와 c-Si의 굴절율은 Aspnes에 의해 최초로 제공되고 Jellison 등에 의해 수정되어 널리 사용되고 있는 표준 데이터를 사용하였다.^[16]

이 시료위에 두께가 140 um 정도 되는 커버유리를 두고 측정한 타원상수 스펙트럼을 그림 5의 타원상수 스펙트럼 및 커버유리와 공기층에 의한 반사를 고려한 계산된 스펙트

FIG. 5. The measured ellipsometric spectra of a crystalline silicon wafer coated with thin silicon dioxide thin film on it(open circles) and the best fit spectra(solid lines).

FIG. 6. The ellipsometric spectra of the same sample in FIG. 5 when it is placed beneath a cover glass and air gap(open circles) and the calculated spectra(solid lines) using the thickness determined in FIG. 5. The intensities of lights due to the multiple reflection inside the cover glass and those in the air gap between cover glass and sample surface are incoherently superposed. The measured ellipsometric spectra of the sample without cover glass are shown for a comparison(solid circles).

럼들과 함께 그렸다. 커버유리는 두께가 빛의 결맞음길이보다 훨씬 크기 때문에 이 커버유리의 상부 표면에서 반사한 빛과 하부 표면에서 반사한 빛은 서로 결맞지 않게 중첩된다. 마찬가지로 커버유리 하부표면에서 반사한 빛과 커버유리와 시료표면 사이에 있는 공기층을 지나 시료표면에서 반사한 빛도 결맞지 않게 중첩된다. 그림 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 커버유리를 두고 측정한 타원상수 스펙트럼(속이 빈 원모양)은 그림 5에서 속이 빈 원모양으로 표시하거나 그림 6에서 속이 찬 원으로 표시한, 커버유리를 두지 않고 측정한 타원상수 스펙트럼과 매우 큰 차이를 보인다. 그림 5에서와 같이 공기층에서 계산한 스펙트럼 즉 커버유리와 커버유리 아래 공기층에서의 반사를 전혀 고려하지 않고 계산한 타원상수 스펙트럼은 커버유리를 두고 측정한 스펙트럼과 당연히 그 만큼의 매우 큰 차이를 보인다. 타원상수 스펙트럼을 계산할 때 커버유리와 그 아래 공기층에서의 반사를 결맞지 않게 중첩하면 그 차이는 크게 줄어드는데 커버유리 내부에서의 다중반사와 그 아래의 공기층에서의 다중반사를 모두 고려하여 이들을 결맞지 않게 중첩할 경우 계산된 타원상수 스펙트럼들은 그림 6에서와 같이 측정된 타원상수 스펙트럼들과 매우 잘 일치한다. 한편 그림 6에서 속이 찬 원으로 표시된 스펙트럼 즉 커버유리를 두고 측정한 스펙트럼을 모델링과정에 따라 최적맞춤하여 구한 산화규소 박막의 두께는 15.11 nm로써 공기층에서 결정한 두께와 거의 일치한다.

본 연구에서 제시된 분석방법은 커버유리 같이 두꺼운 막으로 덮여있는 시료를 분석할 때 매우 유용하게 적용될 수 있다. 예를 들어 살아있는 세포를 in vitro 관찰하고자 할 때 대개 특수하게 제작된 용기를 사용하게 되는데 본 연구에서 제시하는 방법에 따르면 특수한 용기를 사용하지 않고도 측

정 및 분석을 간편하며 정확하게 할 수 있다. 즉, 배양액에 잠겨있는 세포를 커버유리로 덮어 간편하게 측정할 다음 타원법 분석에서 통상적으로 사용되는 모델링 방법을 사용하여 정확하게 분석할 수 있다. 이 경우 커버유리와 배양액은 각각 결맞지 않는 두꺼운 막들로 간주되며 이 결맞지 않는 두꺼운 막들에 의한 다중반사 효과를 본 연구에서 제시하는 방법으로 반영하면 박막층으로 근사시킨 세포의 구조와 광학물성을 정밀하게 해석할 수 있다. 또한 결맞지 않는 두 개의 두꺼운 막에 걸쳐 일어나는 다중반사에 의한 효과를 취급하기 위해 본 연구에서 도입한 표현들은 결맞지 않는 두꺼운 막이 두 개 이상인 경우에도 쉽게 확장하여 적용할 수 있으므로 본 연구에서 제시되는 방법은 박막 및 후막과 관련한 연구에 상당한 기여를 할 것으로 기대된다.

IV. 결 론

결맞음길이보다 두꺼운 막이 하나 또는 두 개가 다층박막 시료 위에 있을 때 이 두꺼운 막들에 의한 다중반사는 그 아래에 있는 박막시료에서의 반사에 의한 위상 변화에는 아무런 영향을 주지 않지만 세기에는 영향을 준다. 회전검광자형 타원계에서 결맞음길이보다 두꺼운 두 개의 막들 내부에서의 다중반사와 두 개의 막에 걸쳐 일어나는 다중반사에 의한 효과를 반영하는 타원상수 표현식들을 유도하고 커버유리와 공기층 아래에 있는 산화규소 박막시료를 예를 들어 본 연구에서 유도된 타원식들이 결맞음길이보다 두꺼운 막들 아래의 박막구조를 정확하게 반영함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구에서 유도된 수식들을 사용하여 타원상수 스펙트럼을 계산하고 모델링 분석을 할 수 있도록 실행파일을 제공하여 준 엘립소테크놀러지의 박상욱 연구원에게 감사드립니다.

References

1. G. Jin, Z. H. Wang, Y. H. Meng, and Z. Y. Zhao, "Imaging ellipsometry for the visualization of bio-molecular layers," Engineering in Medicine and Biology Society, Proc. The 20th Annual International Conference of the IEEE **20**, 581-584 (1998).
2. R. Seitz, R. Brings, and R. Geiger, "Protein adsorption on solid-liquid interfaces monitored by laser-ellipsometry," Applied Surface Science **252**, 154-157 (2005).
3. M. Poksinski and H. Arwin, "Protein monolayers monitored by internal reflection ellipsometry," The 3rd International Conference on Spectroscopic Ellipsometry **455-456**, 716-721 (2004).
4. J. K. Choi, W. Y. Shim, G. Lee, S. Y. Kim, S. U. Park, W. Chegal, Y. J. Cho, and H. M. Cho, "Study on refractive

- index and thickness of human stem cells by using imaging ellipsometry,” Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji) **20**, 53-56 (2009).
5. S.-H. Kim, W. Chegal, J. Doh, H. M. Cho, and D. W. Moon, “Study of cell-matrix adhesion dynamics using surface plasmon resonance imaging ellipsometry,” Biophysical Journal **100**, 1819-1828 (2011).
6. B. Harbecke, “Coherent and incoherent reflection and transmission of multilayer structures,” Appl. Phys. B **39**, 165-170 (1986).
7. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light* (North-Holland, Amsterdam, Netherlands, 1987).
8. S. Y. Kim, *Ellipsometry* (Ajou University Press, Gyeonggi, Korea, 2000), Chapter 3-4.
9. C. C. Katsides and D. I. Siapkas, “General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference,” Appl. Opt. **41**, 3978 (2002).
10. Y. H. Yang and J. R. Abelson, “Spectroscopic ellipsometry of thin films on transparent substrate: a formalism for data interpretation,” J. Vac. Sci. Technol. **A13**, 1145 (1995).
11. M. Kildemo, R. Ossikovski, and M. Stchakovsky, “Measurement of the absorption edge of thick transparent substrate using the incoherent reflection model and spectroscopic UV-visible-near IR ellipsometry,” Thin Solid Films **313-314**, 108-113 (1988).
12. K. Forcht, A. Gombert, R. Joerger, and M. Kohl, “Incoherent superposition in ellipsometric measurement,” Thin Solid Films **302**, 43-50 (1997).
13. H. Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications* (John Wiley & Sons, Ibaraki, Japan, 2007), Chapter 5.
14. Y. J. Seo, S. U. Park, S. M. Yang, and S. Y. Kim, “Analysis of the spectro-ellipsometric data with backside reflection from semi-transparent substrate by using a rotating polarizer ellipsometer,” Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji) **22**, 170-178 (2011).
15. http://sjbyrnes.com/fresnel_manual.pdf.
16. http://www.ellipsotech.com/AT_Semiconductor.html#1.