

반투명 기층에 의한 후면반사를 고려한 회전검광자 방식의 타원측정 및 분석

서영진¹ · 박상욱¹ · 양성모² · 김상열^{1,2†}

¹(주)엘립소테크놀러지

☎ 442-190 경기도 수원시 팔달구 우만동

²아주대학교 분자과학과

☎ 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동

(2011년 3월 4일 받음, 2011년 6월 7일 수정본 받음, 2011년 6월 10일 게재 확정)

기층의 후면에서 반사한 빛이 미치는 영향을 고려하여 반투명한 기층 위에 박막이 있는 시료의 분광타원상수를 모델링 분석하였다. 후면반사가 타원상수에 미치는 영향을 기층의 복소굴절률과 두께를 사용하여 나타내었고 이를 모델링 분석에 적용하였다. 유리 기층 위에 ITO 박막이 있는 시료에 대해 후면반사를 고려한 표현들을 사용하여 박막의 두께와 복소굴절률 등을 구한 결과가 후면에서 반사된 빛을 제거하여 측정, 분석하는 통상적인 타원법에 의한 결과와 일치함을 보였다.

Analysis of the Spectro-ellipsometric Data with Backside Reflection from Semi-transparent Substrate by Using a Rotating Polarizer Ellipsometer

Yeong Jin Seo¹, Sang Uk Park¹, Seong Mo Yang², and Sang Youl Kim^{1,2†}

¹*Ellipsotechnology Co., Suwon 442-190, Korea*

²*Department of Molecular Science and Technology, Ajou University, Suwon 443-749, Korea*

(Received March 4, 2011; Revised manuscript June 7, 2011; Accepted June 10, 2011)

The spectroscopic ellipsometric constants are analyzed to determine the thickness and the complex refractive index of a film coated on a semi-transparent substrate, with the reflection from the backside of the substrate properly considered. Expressions representing the effect of the backside reflection on ellipsometric constants are derived using the thickness and the complex refractive index of the substrate. The thickness and the complex refractive of an ITO thin film coated on a glass substrate are obtained by using this method. The results agree quite well with the ones obtained by following the conventional modeling procedure where the backside reflection is neglected during ellipsometric measurement and analysis.

Keywords: Backside reflection, Semi-transparent substrate, Ellipsometry, Extinction coefficient of glass, ITO thin film

OCIS codes: (120.5700) Reflection; (120.7000) Transmission; (260.2130) Ellipsometry and Polarimetry; (300.1030) Absorption; (310.6860) Thin Films, Optical Properties

I. 서 론

최근 출시된 스마트 폰과 같이 첨단 전자, 통신 복합기기가 소형화되고 간편하게 휴대할 수 있게 된 멀티미디어 시대에 있어서 손쉽게 기기를 작동시킬 수 있는 입력장치의 필요성은 더욱 증가하고 있다. 화면상에서 손이나 펜에 의한 직접적인 접촉으로 정보를 입력할 수 있는 터치스크린 패널

(touch screen panel)도 그 사용량이 늘고 있다. 주로 터치 휴대폰에 사용되는 터치스크린은 유리나 PET 처럼 투명한 기층 위에 저항성분의 물질을 코팅하고 그 위에 폴리에틸렌 필름을 덮어씌워 만든 형태이다. 이 터치스크린은 외형상으로는 간단해 보이나 실제로는 매우 복잡한 다층막 구조를 가지고 있다. 이러한 다층막을 구성하는 박막의 분석에는 여러가지 방법이 있으나 박막에 대해 매우 예민하고 매질에 따

†E-mail: sykim@ajou.ac.kr

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

른 제약을 받지 않으며 측정행위 자체가 시료에 영향을 주지 않는 등의 장점을 가지고 있는 타원법(ellipsometry)이 큰 주목을 받고 있다.^[1]

하지만, 타원법을 이용하여 유리나 PET와 같은 투명한 기층 위의 다층 박막을 분석할 경우 기층의 후면에서도 반사가 일어나 박막에서 반사되어 나온 빛들에 더해지게 된다. 이때 후면에서 반사된 빛은 세기와 편광상태 모두에 영향을 주므로 박막의 구조와 광학상수를 정확하게 결정하는데 부정적인 영향을 준다. 통상적으로 기층의 후면반사는 데이터를 얻는 측정과정에서 박막에 의한 반사에 영향을 미치지 못하도록 소광처리 되는데, 대표적인 소광처리 방법으로는 i) 굴절률 매칭용액(index matching fluid)을 사용하는 방법, ii) 두꺼운 기층을 사용하는 방법, iii) 반투명 테잎을 기층의 뒷면에 부착하는 방법, 그리고 iv) 사포 등으로 뒷면을 거칠게 연마하는 방법이 있다.^[2] 먼저 굴절률 매칭용액을 사용하는 방법은 기층과 굴절률이 비슷한 물질을 기층의 뒷면에 발라서 빛이 후면에서 반사하는 대신에 굴절률 매칭용액에 들어가게 하는 방법이고, 두꺼운 기층을 사용하는 방법은 후면에서 반사한 빛이 박막이 있는 전면에서 반사되어 나온 빛과 공간적으로 분리되게 하는 방법이며, 반투명 테잎을 사용하는 방법과 후면연마 방법은 빛이 후면에서 산란하게 하여 반사가 일어나지 않도록 기층의 후면을 직접 처리하는 방법이다. 이러한 방법들은 적용하기가 쉬우며 대부분의 유리나 PET 같은 물질과 굴절률이 잘 일치하는 매칭용액도 쉽게 구할 수 있다. 하지만 시료의 크기에 제약이 있으며 여러 포인트의 데이터를 얻고자 할 때 또는 in-line 상에서는 사용할 수 없다는 단점이 있다.

후면에서의 반사를 소광처리 할 수 없을 때 후면에서의 반사를 반영하여 박막의 구조와 물성을 분석하는 모델링 방법은 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어왔고 이에 관한 몇가지 방법들이 제시되고 있다.^[3-6] 특히 Yang 등은 결맞지 않게 더해지는 기층에서의 다중반사가 타원상수에 미치는 영향을 구체적인 수학적 표현으로 나타내었고 박막이 없는 유리기층 등에 대하여 가유전함수(pseudo dielectric constant) 형태로 측정결과와 계산결과를 비교하였다. 그러나 이들은 회전검광자방식 타원법에서 구한 Fourier 타원상수에 기반한 오차함수를 사용한 모델링분석에서 후면반사를 반영하여 박막의 구조와 물성을 결정하기에 최적화되어 있지 않거나^[4,6] 기층이 빛을 흡수하지 않을 때 관찰되는 가유전함수 데이터를 완벽하게 설명하지 못하는 면을 보이고 있다.^[3] 본 논문에서는 투명한 기층을 포함하여 반투명한 기층의 후면에서 반사한 빛이 미치는 효과를 반영하는 광학모델을 소개하고, 회전검광자형 타원계를 이용하여 데이터를 측정하고 분석하는 과정에서 그 모델을 사용하여 박막의 두께와 밀도 등을 분석하는 수학적 표현을 제시한다. 그리고 이 분석방법을 사용하여 분석한 결과가 후면반사를 제거하여 측정, 분석한 결과와 일치함을 보여준다. 이 방법은 후면반사를 제거하기 위해 추가적인 시료처리 과정을 필요로 하지 않으므로 측정 및 분석 시간을 단축하고 시료의 크기에 제약을 받지 않으며 in-line

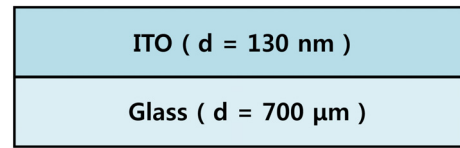


FIG. 1. Schematics of the sample structure with an ITO thin film coated on a glass substrate.



FIG. 2. A rotating analyzer type spectroscopic ellipsometer.

적용이 가능하여 기초연구와 산업현장 전반에 걸쳐 박막을 검사하고 분석하는데 실질적으로 큰 도움이 될 것이다.

II. 실험 및 방법

2.1. 시료준비

본 실험에서는 그림 1과 같이 터치패널에 주로 사용되고 있는 ITO/glass 시료를 사용하였다. 이 시료는 두께가 대략 0.7 mm인 유리기판 위에 스퍼터링 방법으로 130 nm 정도의 ITO 박막을 입힌 시료이다.

2.2. 타원상수 측정 및 투과율 측정

타원상수 측정에 사용된 편광분석 장비는 그림 2와 같은 회전검광자 방식의 상용화된 타원계이다.(엘립소테크놀로지, Elli-SE) 이 같은 회전검광자 방식의 타원계는 광원-편광자-보정기-시료-검광자-광검출기로 구성되어 구조가 간단하고 작동원리가 단순하므로 본 연구에서와 같은 후면반사가 측정되는 타원상수에 미치는 효과를 분석하기에 유리한 장점이 있다. 또한 핵심편광소자는 편광자와 검광자 뿐이므로 분광화 및 고속, 자동화 측정이 매우 용이한 장점이 있다. 측정대역은 1.2-5.2 eV로 파장으로 환산하면 240-1030 nm 이다. 투과율은 일반적인 투과율 측정장비를 사용하여 측정하였으며 측정 파장대역은 240-800 nm 이다.

III. 이 론

3.1. 투과영역과 반투과영역에서 기층의 후면반사가 타원상수에 미치는 영향

타원계를 이용하여 투명한 기층 위의 박막을 측정할 때 기층의 두께가 충분히 두꺼우면 시료 후면에서 반사된 빛을 박

막을 포함한 시료 전면에서 반사한 빛과 분리시킬 수 있다. 그러나 기층이 얇을 경우에는 기층의 후면에서 반사한 빛이 박막을 포함하여 기층의 전면에서 반사한 빛에 더해지므로 측정되는 타원상수 값은 나름대로 영향을 받게 된다.

통상적으로 매질/박막/기층의 3상계에서 얇은 박막의 전면과 박막의 후면인 기층의 전면에서 반사된 빛은 서로 결맞는 간섭(coherent interference)을 하며, 그 결과 반사된 빛의 세기와 위상정보는 타원법에서 얻는 Δ , Ψ 로 반영된다. 기층 뒷면에서 반사되는 빛은 빛의 간섭길이(coherence length) 보다 긴 경로인 기층을 한번 왕복하면서 기층의 전면에서 반사된 빛과 결맞지 않는 합성(incoherent superposition)을 하게 되는데, 이러한 경우 측정되는 빛의 세기는 기층의 전면에서 반사된 빛의 세기 I_1 과 기층 후면에서 반사된 빛의 세기 I_2 의 대수적인 합과 같다. 따라서 매질/박막/기층의 3상계에서 결맞는 간섭을 하며 반사된 빛만을 고려하여 계산된 타원상수 값들은 실제로 측정되는 타원상수 값들과 다르게 된다.

본 연구에서는 기층의 후면반사가 타원상수 표현에 미치는 영향을 존스벡터와 존스행렬을 이용하여 다음과 같이 나타내었다. 먼저, 회전검광자방식 타원법에서 각 광학소자를 거치는 동안 빛이 겪는 편광상태의 변화를 존스벡터로 표현하면 식 (1)과 같다.^[1]

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

여기에서 \vec{E}_{AO}^{ie} 와 \vec{E}_{PO}^{ie} 는 각각 검광자와 편광자를 통과한 빛의 전기장벡터를 가리키며 \vec{T}_A^{ie} , \vec{R}_S^{xy} 는 각각 검광자와 시료의 편광작용을 나타내는 존스행렬을, 그리고 $\vec{R}(A)$, $\vec{R}(-P)$ 는 각각 방위각이 A인 검광자의 회전형렬과 방위각이 P인 편광자의 역회전형렬을 가리키는 존스행렬이다.

그림 3과 같이 매질/박막/기층의 구조를 가지고 있는 3상계 시료에 입사각 ϕ_0 로 입사된 빛이 박막에서 결맞는 간섭을 하며 반사되어 나올 경우 그 반사광의 전기장 E_1 은 식 (2)와 같다.

$$\vec{E}_1 = const \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

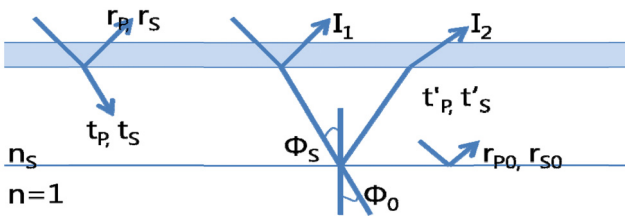


FIG. 3. Schematics of light reflecting from the front side of the substrate coated with a thin film and that from the backside of it, respectively. The angle of incidence is ϕ_0 .

여기서 r_p 와 r_s 는 매질/박막/기층으로 구성된 3상계에서 각각 p파와 s파의 유효반사계수를 나타낸다. 위 식으로부터 전기장 E_1 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_1 = const \cdot (r_p \cos P \cos A + r_s \sin P \sin A) \quad (3)$$

유리 기층은 가시영역에서는 투명하지만 자외선 영역에서는 빛을 흡수한다. 가시영역에서 자외선 영역으로 접근하면 투명한 영역에서 반투명영역을 거쳐 투명하지 않은 영역에 도달하는데 기층이 투명하지 않은 영역에서는 후면에서 반사하는 빛은 없다. 반투명영역에서는 파장에 따라 후면에서 반사하는 빛의 세기가 달라지는데 기층의 후면에서 반사하는 빛의 세기는 기층의 복소굴절률을 사용하면 정확하게 반영할 수 있다. 두께가 d 이고 복소굴절률이 $\tilde{n}_s = n - ik$ 인 기층의 후면에서 한번 반사되어 나온 빛의 전기장 E_2 는 기층에 의한 흡수를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{E}_2 = const \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-2i\beta_s} t_p' r_{p0}' & 0 \\ 0 & e^{-2i\beta_s} t_s' r_{s0}' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기에서 β_s 는 기층을 통과하는 동안 빛이 겪는 위상변화로써 위상두께라고 불린다. t_p , t_s 는 각각 p파와 s파의 매질에서 기층으로의 유효투과계수, t_p' , t_s' 는 각각 기층에서 매질으로의 p파와 s파의 유효투과계수를 가리킨다. 또한 r_{p0} , r_{s0} 는 각각 기층과 매질의 경계면에서 p파와 s파의 반사계수를 가리키는데 구체적인 표현은 다음과 같다.

$$r_{p0} = \frac{\cos \phi_s - \tilde{n}_s \cos \phi_0}{\cos \phi_s + \tilde{n}_s \cos \phi_0} \quad (5a)$$

$$r_{s0} = \frac{-\cos \phi_0 - \tilde{n}_s \cos \phi_s}{\cos \phi_0 + \tilde{n}_s \cos \phi_s} \quad (5b)$$

여기서 ϕ_s 는 기층 내 빛의 굴절각이며 β_s 와 E_2 의 표현은 각각 다음과 같다.

$$\beta_s = \frac{2\pi \tilde{n}_s}{\lambda} (d \cos \phi_s) \quad (6)$$

$$E_2 = const \cdot e^{-2i\beta_s} (t_p' t_p' r_{p0} \cos P \cos A + t_s' t_s' r_{s0} \sin P \sin A) \quad (7)$$

E_1 또는 E_2 에 의한 빛의 세기인 I_1 또는 I_2 는 각각의 절대값의 제곱에 비례하는데 여기에서는 빛의 편광상태에만 관심을 가지므로 표현을 간단히 하기 위하여 비례상수인 $const$ 를 1으로 두고 회전검광자의 함수로 빛의 세기변화를 다음과 같이 구하였다. 여기에서 기층의 두께는 측정하는 광원의

결맞음길이(coherence length)보다 크므로 E_1 과 E_2 는 서로 결맞지 않은(incoherent) 것으로 간주하였다.

$$I_1 = |E_1|^2 = |r_p|^2 \cos^2 P \cos^2 A + |r_s|^2 \sin^2 P \sin^2 A + (r_p r_s^* + r_p^* r_s) \sin P \cos P \sin A \cos A \quad (8)$$

$$I_2 = |E_2|^2 = \left| e^{-4i\beta_s} \left[\begin{aligned} & |t_p t'_p r_{p0}|^2 \cos^2 P \cos^2 A + |t_s t'_s r_{s0}|^2 \sin^2 P \sin^2 A + \\ & (t_p t'_p r_{p0} t_s^* t'_s r_{s0}^* + t_p^* t'_p r_{p0}^* t_s t'_s r_{s0}) \sin P \cos P \sin A \cos A \end{aligned} \right] \right| \quad (9)$$

따라서 반사된 빛의 세기 I 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 \\ &= |r_p|^2 + |e^{-4i\beta_s} t_p t'_p r_{p0}|^2 \cos^2 P \cos^2 A \\ &+ |r_s|^2 + |e^{-4i\beta_s} t_s t'_s r_{s0}|^2 \sin^2 P \sin^2 A \\ &+ \left[(r_p r_s^* + r_p^* r_s) + |e^{-4i\beta_s} \{ t_p t'_p r_{p0} (t_s t'_s r_{s0})^* + (t_p^* t'_p r_{p0}^*)^* t_s t'_s r_{s0} \} \right] \sin P \cos P \sin A \cos A \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서

$$\xi = |r_p|^2 + |e^{-4i\beta_s} t_p t'_p r_{p0}|^2 \quad (11a)$$

$$\eta = |r_s|^2 + |e^{-4i\beta_s} t_s t'_s r_{s0}|^2 \quad (11b)$$

$$\zeta = (r_p r_s^* + r_p^* r_s) + |e^{-4i\beta_s} \{ t_p t'_p r_{p0} (t_s t'_s r_{s0})^* + (t_p^* t'_p r_{p0}^*)^* t_s t'_s r_{s0} \} | \quad (11c)$$

와 같이 상수들을 정의하면 식 (10)은 다음과 같이 간단하게 쓰여진다.

$$I = \xi \cos^2 P \cos^2 A + \eta \sin^2 P \sin^2 A + \zeta \sin P \cos P \sin A \cos A \quad (12)$$

식 (11)에서 우변의 첫번째 항들은 박막과 기층에 의한 효과를 나타내며 두번째 항들은 기층의 후면반사에 의한 효과를 나타낸다. 예를 들어 i) 기층의 후면을 거칠게 하거나 하여 후면반사를 없애면 즉 $r_{p0}=r_{s0}=0$ 를 만족하면, 또는 ii) 기층에 의한 빛의 흡수로 인하여 $|e^{-4i\beta_s}|=0$ 를 만족하면 각 식에서 우변의 두번째 항들은 모두 0이 되어 기층의 후면반사에 의한 효과가 사라짐을 확인할 수 있다. 한편 기층이 투명한 경우 $|e^{-4i\beta_s}|=1$ 을 만족하므로 투명한 기층 후면에서의 반사가 미치는 영향이 매질과 기층전면간의 계면이나 기층후면과 매질간의 계면에서의 반사계수 또는 투과계수들만으로 표현됨을 확인할 수 있다. 이 회전검광자 방식의 타원계에서 빛의 세기 I 가 회전검광자의 방위각인 A 의 함수로 식 (12)와 같은 변화를 보일 때 이를 식 (13)과 같이 나타내면 이 조

화함수의 Fourier 계수들로 시료의 타원상수 Δ, Ψ 를 간단히 표현할 수 있다.^[1]

$$I = I_{\text{exp}} (1 + \alpha_{\text{exp}} \cos 2A + \beta_{\text{exp}} \sin 2A) \quad (13)$$

모델링 분석에서는 측정된 타원상수와 계산된 타원상수의 차이를 최소로 하는 모델상수들을 결정하게 되는데 모델링 분석에서 사용하는 오차함수(error function)는 여러가지가 있다. 측정치의 신뢰도를 반영하지 않을 때, 소위 unbiased estimator를 사용할 때는 모델분석의 정확도를 향상시키기 위해 측정치의 신뢰도가 고른 값을 가지는 그러한 오차함수를 선택하도록 각별한 주의를 기울여야 한다. 그런데 회전검광자 방식의 타원계에서 Fourier 계수에 기반한 오차함수가 분석에 따르는 불확실성을 가장 최소로 하는 것으로 보고되고 있으므로^[7] 본 연구에서는 Fourier 계수를 사용하는 모델링 분석에 맞춤형 수학적 표현들을 제시하고자 한다. 이 Fourier 계수들은 식 (11)에서 정의된 상수들로서 아래 식 (14)와 같이 쓰여진다.

$$\alpha_{\text{exp}} = \frac{\xi - \eta + (\xi + \eta) \cos 2P}{\xi + \eta + (\xi - \eta) \cos 2P} \quad \beta_{\text{exp}} = \frac{\zeta \sin 2P}{\xi + \eta + (\xi - \eta) \cos 2P} \quad (14)$$

한편 측정되는 빛에는 기층 후면에서 한번 이상 반사한 빛도 있다. 다중반사에 의한 효과는 다음과 같이 반영할 수 있다. 기층의 후면에서 $N(N \geq 1)$ 회 반사한 빛의 전기장 E_{2N} 은 식 (15)와 같고 이렇게 N 회 반사한 빛들이 타원상수에 미치는 영향은 (11a)~식 (11c)을 식 (16a)~식 (16c)으로 대치하면 된다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{2N} &= \text{const} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-2i\beta_s} t_p r_{p0} t'_p [e^{-2i\beta_s} r_{p0} (-r_p)]^{N-1} \\ 0 \end{pmatrix} \\ &e^{-2i\beta_s} t_s r_{s0} t'_s [e^{-2i\beta_s} r_{s0} (-r_s)]^{N-1} \times \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{2N} \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\xi = |r_p|^2 + \sum_N \xi_N \quad (16a)$$

$$\eta = |r_s|^2 + \sum_N \eta_N \quad (16b)$$

$$\zeta = (r_p r_s^* + r_p^* r_s) + \sum_N \zeta_N \quad (16c)$$

여기에서 ξ_N, η_N, ζ_N 들은 다음과 같다.

$$\xi_N = |e^{-4i\beta_s} t_p t'_p r_{p0}|^2 \left[|e^{-4i\beta_s} r_p r_{p0}|^2 \right]^{N-1} \quad (17a)$$

$$\eta_N = \left| e^{-4i\beta_s} \left| t_s t'_s r_{s0} \right|^2 \left[\left| e^{-4i\beta_s} \left| r_s r_{s0} \right|^2 \right]^{N-1} \right. \right. \quad (17b)$$

$$\begin{aligned} \zeta_N = & \left| e^{-4i\beta_s} \left[t_p t'_p r_{p0} (t_s t'_s r_{s0})^* \left\{ r_p r_{p0} r_s^* r_{s0}^* \left| e^{-4i\beta_s} \right\} \right]^{N-1} \right. \\ & \left. + (t_p t'_p r_{p0})^* t_s t'_s r_{s0} \left\{ r_p^* r_{p0}^* r_s r_{s0} \left| e^{-4i\beta_s} \right\} \right]^{N-1} \right| \quad (17c) \end{aligned}$$

실제로 기층의 후면에서 빛이 한번 더 반사하게 되면 즉 N이 1만큼 더 증가하게 되면 그 빛의 세기는 $|e^{-4i\beta_s} r_p r_{p0}|^2$ (p파의 경우) 또는 $|e^{-4i\beta_s} r_s r_{s0}|^2$ (s 파의 경우) 배만큼 감소하며 그만큼 타원상수에 미치는 영향이 감소한다. 시료의 구조와 입사각 그리고 편광상태와 빛의 파장에 따라 달라지지만 ITO가 코팅된 유리기층에 수직입사하는 경우 이 값들은 대략 0.002 내외, 비스듬히 입사할 경우(입사각이 70도인 경우) 대략 0.1 내외로 작은 값이다. 이는 기층의 후면에서 두 번 반사한 빛은 기층의 상부에서의 반사와 하부에서의 반사로 인하여 기층의 후면에서 한번 반사한 빛보다 그 세기가 0.002~0.1 배로 작아지며 타원상수에 미치는 영향도 기층의 후면에서 한번 반사한 빛이 미치는 영향의 10% 이하가 됨을 의미한다. 또한 기층의 두께와 장비의 광학구조(빔 크기, 입사각, 광수렴의 정도, 측정소자의 크기 및 스톱의 위치와 크기 등)에 따라 다중반사되는 빛의 일부분만 측정에 관여하게 되는데 실제로 측정에 관여하는 다중반사의 정도를 식으로 정확하게 반영하는 것은 용이하지 않다. 이 같이 여러 번 반사한 빛은 기층내부에서 반사한 횟수에 비례하여 그 세기가 지수적으로 감소하며 후면에서 두 번 이상 반사한 빛이 미치는 영향은 한번 반사한 빛이 미치는 영향의 10% 이내인 것으로 판단되므로 본 연구에서는 1차 근사로 기층의 후면에서 한번 반사한 빛만을 다루었다.

3.2. 투과율 데이터를 역방계산하여 기층의 흡수계수 결정

유리는 가시영역에서는 빛을 투과시키며 자외선 영역에서는 빛을 흡수한다. 빛의 흡수가 시작되는 파장은 대략 350 nm 이며 이보다 파장이 짧아질수록 흡수가 커진다. 빛을 흡수하는 파장대역에서 유리기판의 소광계수는 Forouhi 등에 의해 제시된 양자역학적 진동자(Quantum Mechanical Oscillator)에 의한 복소굴절율 분산식(QM 분산식)을 사용하면 그 파장의존성을 잘 나타낼 수 있다.^[8] 유리기판의 복소굴절률과 두께가 주어지면 기판의 투과율을 계산할 수 있고 역으로 투과율이 주어지면 다음과 같이 수치해석적으로 투과율을 역방계산하여 기판의 소광계수를 구할 수 있다.^[9]

유리가 그림 4에서와 같이 공기중에 놓여있을 때 투과율로부터 유리의 소광계수를 결정하는 방법을 알아보자. 유리의 복소굴절율은 $\tilde{n}_s = n - ik_s$, 유리의 두께는 d , 그리고 r_1, r_2 는 각각 공기/유리, 유리/공기의 경계면에서 프레넬 반사계수, t_1, t_2 는 공기/유리, 유리/공기의 경계면에서 프레넬 투과

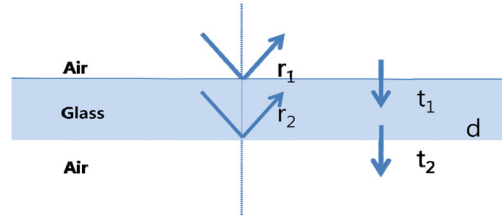


FIG. 4. The reflection coefficients and the transmission coefficients at the air/glass interfaces used for the calculation of the transmittance of the glass sample at normal incidence.

계수라고 하면 입사각이 0도 이므로 유리의 위상두께 $\beta_{s0} = \frac{2\pi d}{\lambda}(n_s - ik_s)$ 를 사용하여 투과율을 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기에서 유리내부에서의 다중반사는 고려하지만 이들은 서로 결맞지 않게 더해지는 것으로 간주하였다.

$$T = \frac{|t_1 t_2|^2 |e^{-2i\beta_{s0}}|}{1 - |r_2|^2 |e^{-2i\beta_{s0}}|^2} \quad (18)$$

기층인 유리는 빛의 파장대역에 따라서 빛을 투과시키거나 또는 흡수한다. 가시영역에서는 위상두께 β_{s0} 가 실수이므로 투과율은 대부분 투과계수에 의해 그 크기가 결정되며 대략 0.92 정도의 크기를 가진다. 빛을 흡수하는 자외선 영역에서는 위상두께 β_{s0} 의 허수부분이 상당한 크기를 가지게 되고 따라서 투과율은 0에 매우 가까워진다. 반투과 영역에서는 위상두께의 허수부분이 투과율의 크기를 크게 좌우하며 위상두께의 허수부분은 기층의 두께와 기층인 유리의 복소굴절률의 허수부분인 소광계수의 곱에 비례한다. 이에 의거하여 반투과 영역에서 사용할 소광계수 k_s 의 표현을 식 (17)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$k_s(\lambda) = -\frac{\lambda}{4\pi d} \left[\ln T + \ln \left(\frac{1 - |r_2|^2 |e^{-2i\beta_{s0}}|^2}{|t_1 t_2|^2} \right) \right] \quad (19)$$

위의 식 우측항에서 보는 것처럼 소광계수는 빛의 파장, 유리의 두께, 그리고 투과율과 프레넬 계수 및 위상두께 들을 포함한 식으로 표현된다. 프레넬 계수들은 소광계수의 함수이지만 좌측항의 소광계수 값에 가장 크게 기여하는 우측항은 투과율이므로 투과율로부터 소광계수의 일차 근사값을 구하고 이렇게 구한 소광계수의 일차 근사값을 우측항의 프레넬 계수와 위상두께에 반영하여 소광계수의 2차 근사값을 구하는 식으로 몇 번의 되먹임을 행하면 실제값에 수렴하는 소광계수의 값을 빠르게 구할 수 있다.^[9] 참고로 유리기층의 복소굴절률의 실수부분인 굴절률은 광흡수가 작은 반투과영역에서는 소광계수의 작은 변화에는 영향을 받지 않고 투명영역에서의 분산형태를 그대로 유지한다.

IV. 결과 및 분석

4.1. 후면반사를 반영하지 않은 분광타원데이터의 분석

그림 5는 유리기층의 뒷면에 반투명 테이프를 부착하여 후면반사를 제거하여 측정된 분광타원상수와 이 측정데이터에 최적맞춤한 분석결과이다. 그림 6은 후면반사를 제거하지 않고 측정된 분광타원상수 측정 데이터와 그림 5의 최적맞춤 분석결과이다. 그림 5와 그림 6에서 점들은 측정데이터, 실선은 최적맞춤한 분석결과를 나타낸다.

그림 5에서 보이는 것과 같이 후면반사를 제거하고 측정된 분광타원상수는 ITO 박막 만에 의한 반사광의 편광상태 변화 및 타원상수들을 나타내며, 따라서 박막에 의한 효과만을 반영하여 분석한 최적맞춤 결과와 매우 잘 일치한다. 이와 같이 후면반사를 제거하여 측정하고 분석하는 것은 분광타원 측정 및 분석에서는 모델링기법으로 잘 알려져 있고 널리 적용되는 방법이다.

ITO 박막의 광학상수는 로렌츠(Lorentz) 진동자를 사용하여 나타내었다. 대표적인 투명전극 물질인 ITO의 굴절률은 에너지 띠 사이에서의 전이에 의한 흡수를 반영하는 자외선 영역에서의 진동자들과 전하운반체에 의한 에너지 띠 내부에서의 전이에 의한 흡수를 반영하는 근적외선영역에서의

진동자를 사용하여 나타내는데 대개 로렌즈 진동자^[10]를 사용하여 나타낸다. 로렌즈 진동자 모델에 의한 복소유전상수 $\tilde{\epsilon}$ 의 수학적 표현은 다음과 같다.^[11, 12]

$$\tilde{\epsilon}(h\nu) = [n(h\nu) - ik(h\nu)]^2 = \epsilon_1(\infty) + \sum_{m=1}^3 \frac{A_m}{E_m^2 - (h\nu)^2 + iB_m \cdot h\nu} \quad (20)$$

여기서 $h\nu$ 는 빛의 에너지를 나타내며 무한대 에너지에서의 유전상수의 실수부분인 $\epsilon_1(\infty)$, 각 로렌즈 진동자의 진폭 A_m , 공명에너지 E_m , 그리고 선폭계수 B_m 는 최적맞춤할 변수들이다. 로렌즈 진동자 모델은 광학상수의 실수부분과 허수부분 사이에 Kramers-Kronig 인과율 관계를 유지하면서도 투명한 영역과 흡수영역에 걸쳐 최소의 변수를 사용하여 ITO의 광학상수를 표현할 수 있게 한다. 전하운반체에 의한 띠내부에서의 전이에 의한 흡수는 근적외선 영역에서의 진동자로 나타내는데 본 최적맞춤에서는 그 진동자의 공명에너지를 $E_i=0$ 으로 고정하였다.

한편 후면반사를 제거하지 않고 측정된 데이터와 그림 5에서 분석한 결과를 보여주는 그림 6을 보면 측정값과 분석값 사이에는 상당히 큰 차이를 있음을 확인할 수 있는데 이는

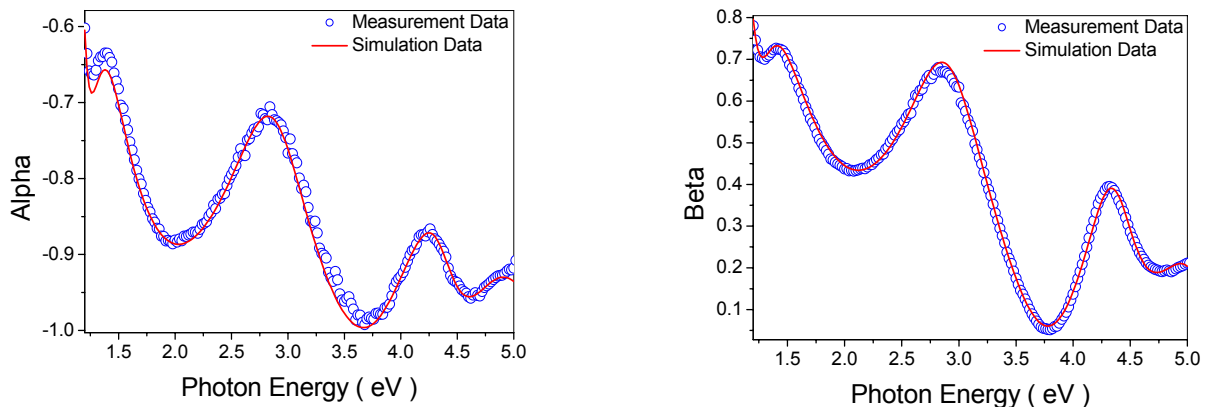


FIG. 5. The measured spectro-ellipsometric constants(dots) without the backside reflection from glass substrate and the best-fit spectra(lines).

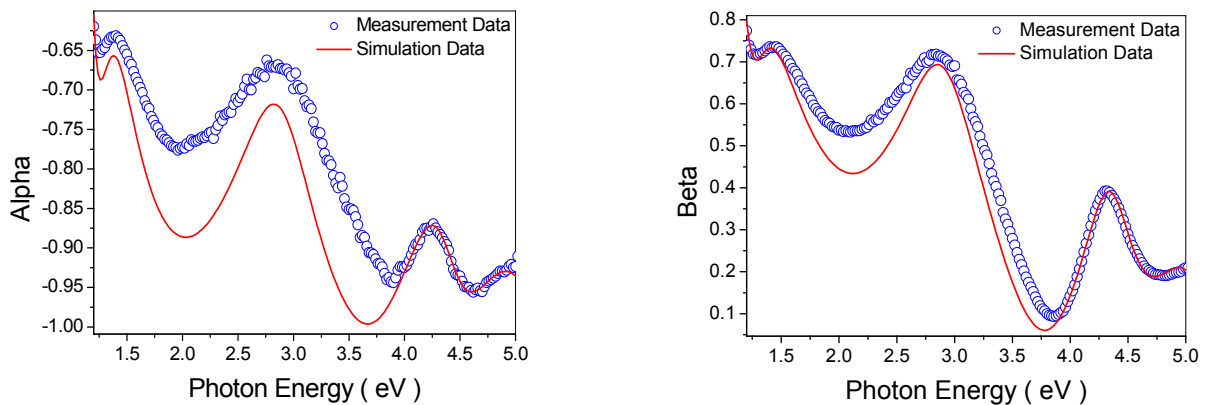


FIG. 6. The measured spectro-ellipsometric constants(dots) with the backside reflection from glass substrate and the best-fit spectra(lines) shown in FIG. 5.

분석에서 기층의 후면반사로 인한 효과를 전혀 반영하지 못하고 있기 때문이다.

4.2. 반투명한 기층의 흡수를 고려하고 후면반사를 반영한 분광타원데이터의 분석

유리기층의 후면에서 반사되는 빛의 효과를 고려하여 분광타원데이터를 분석한 결과는 아래 그림 7과 같다. 유리기층이 빛을 흡수하지 않는 영역 즉 투명한 영역에서는 후면반사 전체가 영향을 주며 유리기층이 빛을 일부 흡수하는 반투명 영역에서는 시료가 빛을 흡수하는 정도에 따라서 그 정도가 감소한다. 빛을 완전히 흡수하는 흡수영역에서는 후면반사는 아무런 영향을 주지 못한다. 후면반사 효과의 이러한 차이는 복소굴절률을 사용하여 흡수효과를 반영하는 식 (11)과 식 (13)을 사용하면 보다 정확하게 반영할 수 있다. 후면반사를 제거하지 않고 측정된 분광타원상수는 그림 6에서 보여준 바 있다. 후면반사를 제거하지 않고 측정한 이 분광타원상수에 시료의 흡수계수를 사용하고 후면반사 효과를 반영하여

최적맞춤한 분석결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 최적맞춤 계산된 분광타원상수와 측정된 분광타원상수는 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 7에서와 같이 분석하여 얻은 ITO 박막의 구조와 로렌즈 진동자의 분산계수들은 그림 5에서와 같이 후면반사를 제거하여 측정된 분광타원상수를 분석하여 얻은 박막의 구조와 로렌즈 분산계수와 비교적 잘 일치한다. 이들을 비교하여 표 1에 나타내었다.

기층의 두께는 0.7 mm 정도로 ITO 박막에 비해 매우 크다. 따라서 자외선 영역에서는 복소굴절률의 허수부분인 소광계수가 5.0×10^{-5} 정도만 되더라도 두꺼운 기층에 의한 흡수로 인해 후면에서 반사하는 빛은 거의 없어지고 후면반사에 의한 영향은 무시할 만한 크기가 된다. 소광계수가 극히 작을 때 기층의 후면에서 반사한 빛의 흡수정도를 위상두께인 β_s 의 1차 근사표현을 사용하여 다음과 같이 왕복경로에 따른 표현으로 나타낼 수 있다. 즉 왕복경로에 의한 위상두께 항인 $-2i\beta_s$ 는 $-\frac{4\pi}{\lambda}i \cdot d \tilde{n}_s \cos \phi_s$ 또는 $-\frac{4\pi}{\lambda}i \cdot d \sqrt{n_s^2 - n_0^2} \sin^2 \phi_0$ 과 같

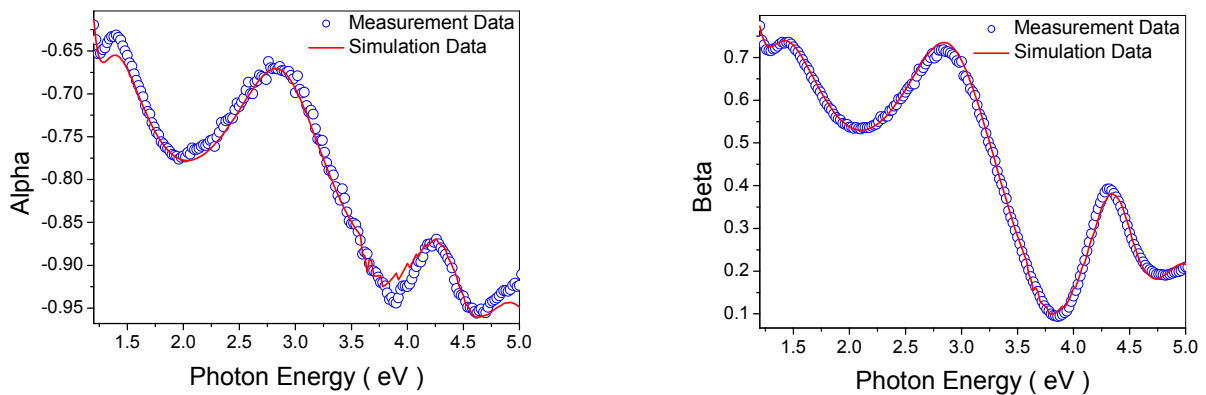


FIG. 7. The measured spectro-ellipsometric constants(dots) with the backside reflection from glass substrate and the best-fit spectra (lines).

TABLE 1. Comparison of the ITO film parameters obtained by adopting the conventional modeling analysis of spectro-ellipsometric data and those by the method proposed in this study where the backside reflection from the substrate is properly considered

구 분		후면반사제거 (Fig. 5)	후면반사반영 (Fig. 7)
ITO박막구조: 두께(nm) / 조밀도(%)	표면층	8.16 / 75.1	5.99 / 86.6
	주 층	100.16 / 100.0	100.37 / 100.0
	계면층	20.36 / 111.7	18.54 / 114.9
	유효층 (질량두께, nm)	129.03	126.85
ITO의 광학상수: 로렌즈 진동자의 분산계수들	$\epsilon_1(\infty)$	2.518	2.696
	A_1	4.074	4.244
	$B_1(\text{eV})$	0.043	0.099
	A_2	7.277	6.866
	$B_2(\text{eV})$	0.747	0.728
	$E_2(\text{eV})$	4.847	4.829
	A_3	27.202	26.724
$B_3(\text{eV})$	0.176	0.220	
$E_3(\text{eV})$	5.674	5.750	

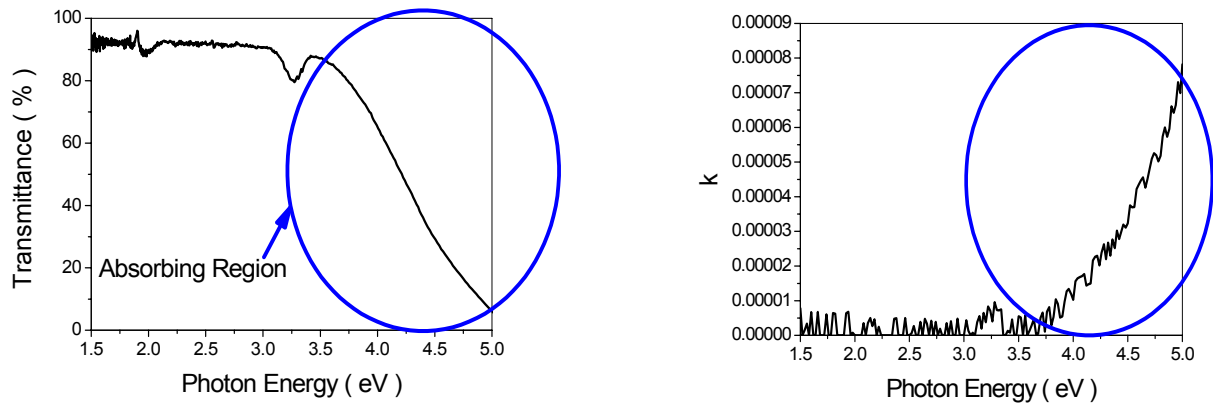


FIG. 8. The transmittance spectrum of the glass substrate and the extinction coefficient spectrum of the glass substrate obtained from numerical inversion of the transmittance spectrum.

으므로 $\tilde{n}_s = n_s - ik_s$ 와 같이 쓰고 소광계수인 k_s 가 굴절률인 n_s 보다 매우 작을 때 k_s 의 1차항 근사를 취하면 다음과 같은 표현을 얻는다.

$$e^{-2i\beta_s} = e^{-i4n_s d |\cos \phi_s|} \cdot e^{-2k_s d / |\cos \phi_s|} \quad (21)$$

따라서 빛이 기층을 왕복함에 따라 세기가 감소하는 비율은

$$\left| e^{-4i\beta_s} \right| = e^{-4k_s d / |\cos \phi_s|} \quad (22)$$

와 같으며 이는 기층내에서 비스듬하게 진행하기 때문에 빛의 광경로가 $1/|\cos \phi_s|$ 배로 길어지고 그 만큼 빛의 흡수가 커지는 것을 의미한다. 정확한 표현인 $e^{-4i\beta_s}$ 에서는 복소굴절률인 \tilde{n}_s 의 허수항에 의한 기여와 복소굴절각의 코사인인 $\cos \phi_s$ 의 허수항에 의한 기여가 더해져서 기층에 의한 전체 흡수를 나타내게 된다.

4.3. 투과율 스펙트럼을 이용한 기층의 흡수계수 결정

유리기층의 후면 반사에 의한 분광타원상수 분석에서 유리 기층의 복소굴절률의 허수부분인 소광계수 k_s 가 0이 아니면 아주 작더라도 두꺼운 유리기층을 통과하는 동안 흡수가 상당히 많이 일어나므로 이러한 유리기층의 흡수를 정확하게 반영할 수 있도록 k_s 의 정확한 수치값을 다음과 같이 구하였다. 그림 8의 좌측 그래프는 유리기층의 투과율 스펙트럼인데, 광에너지가 3.58 eV 이하인 영역은 투과율영역으로 흡수가 없고, 자외선 영역인 3.58 eV 부터 흡수가 증가함을 알 수 있다. 3.25 eV 근방에서 보이는 골짜기모양의 작은 감소는 측정장비의 구조적 오차에 기인한다. 이러한 투과율 데이터를 식 (19)를 사용하여 역방계산하여 얻은 소광계수 k_s 의 그래프는 그림 8의 우측 그래프와 같다. 기층인 유리가 투명한 영역인 3.58 eV 이하의 파장영역에서 소광계수 k_s 가 0에 접근하는 아주 작은 값을 가짐을 그림 8의 우측 그래프에서 볼

수 있고 이 영역에서의 소광계수 값으로부터 투과율 스펙트럼을 이용한 기층의 소광계수 결정 오차가 1.0×10^{-5} 이하가 될 것으로 판단할 수 있다.

V. 결 론

투명영역과 흡수영역 그리고 반투명영역을 포함하는 넓은 파장대역에서 유리기층의 후면반사를 고려하여 분광타원상수를 분석하는 방법을 제시하고 이를 ITO 박막이 있는 유리 기층 시료에 적용하였다. 후면반사를 제거하여 분광타원 상수를 측정하고 이를 모델링 분석방법을 적용하여 박막의 구조 및 광학물성을 얻는 일반적인 방법에 의한 결과와 본 연구에서 제시하는 바와 같이 후면반사를 제거하지 않고 측정 한 분광타원상수 데이터를 후면반사를 반영하여 모델링 분석한 결과가 서로 잘 일치하는 것을 보였다. 새로이 제시하는 모델링 분석에서는 기층의 복소굴절률과 두께를 사용하여 기층이 투명한 영역과 기층이 반투명한 영역 그리고 기층이 흡수하는 영역 모두에 걸쳐 후면반사의 효과를 일관성 있게 반영하였다. 기층에 의한 부분적인 흡수를 정확하게 반영하기 위하여 반투명 파장영역에서 기층인 유리의 투과율을 역방계산하여 복소굴절률의 허수부분인 소광계수값을 1.0×10^{-5} 이상의 정밀도로 결정하였다. 이 같이 후면반사효과를 반영하여 분광타원상수를 모델링 분석하는 방법은 기층에 의한 후면반사를 제거하지 않고도 분광타원 측정 및 분석을 가능하게 하므로 분광타원 측정 및 분석의 활용범위를 크게 넓혀 주고 산업현장에서 쉽게 사용할 수 있게 해 준다. 특히 넓은 면적을 가지는 8~11 세대 LCD용 유리기판 시료를 in-line, 실시간으로 측정하고 분석하여야 할 경우에는 본 연구에서 제시하는 방법이 매우 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

References

1. S. Y. Kim, *Ellipsometry* (Ajou University, Korea, 2000), Chapter 3.

2. R. A. Synowicki, "Suppression of backside reflections from transparent substrates," *Phys. Stat. Sol. C* **5**, 1085-1088 (2008).
3. H. Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications* (John Wiley & Sons, Ibaraki, Japan, 2007), Chapter 5.
4. Y. H. Yang and J. R. Abelson, "Spectroscopic ellipsometry of thin films on transparent substrate: a formalism for data interpretation," *J. Vac. Sci. Technol. A* **13**, 1145 (1995).
5. 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).
6. K. Forcht, A. Gombert, R. Joerger, and M. Kohl, "Incoherent superposition in ellipsometric measurement," *Thin Solid Films* **302**, 43-50 (1997).
8. A. R. Frouhi and I. Bloomer, *Handbook of Optical Constants of Solids II*, E. D. Palik, ed. (Academic Press, Inc., Toronto, Canada, 1991), Chapter 7.
7. S. Y. Kim and K. Vedam, "Proper choice of the error function in modelling spectroscopic ellipsometric data," *Appl. Opt.* **25**, 2013 (1986).
9. H. J. Kim, H. Y. Pang, and S. Y. Kim, "Determination of the refractive index and the extinction coefficient of TiO₂ thin films by using optical methods and of the packing density variation with growth technique," *Sae Mulli* **37**, 45-52 (1997).
10. R. A. Synowicki, "Spectroscopic ellipsometry characterization of indium tin oxide film microstructure and optical constants," *Thin Solid Films* **313-314**, 394-397 (1998).
11. G. R. Fowles, *Introduction to Modern Optics* (Dover Publications, New York, USA, 1968), Chapter 6.
12. F. Wooten, *Optical Properties of Solids* (Academic Press, New York, USA, 1972), Chapter 3.