

Spectroscopic Ellipsometer 의 제작 및 광학 박막 분석에의 응용

Fabrication of a Spectroscopic Ellipsometer and Characterization of
Optical Thin Films

김 상 영, 신 준 호
아주대학교 이과대학 물리학과

회전 편광자 형의 Spectroscopic Ellipsometer 를 제작하였다. 각 부품의 미소결함에 의한 오차를 추정하고 이들 각 부품의 미소결함이 Ellipsometric 상수들에 미치는 영향을 보정하여 정확도를 향상시키는 관련포현들을 유도하였다. Straight through operation 에 대한 성능 평가 결과 파장 대역 400 nm - 600 nm 내에서 $\tan\psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 편차는 0.2 % 내외로 만족할 만한 것으로 판단되었다. 광학 박막을 중심으로 Spectroscopic Ellipsometer 를 사용한 연구에 대하여 실험예를 중심으로 논의하였다.

I. 서론

표면의 처리 또는 표면 박막의 증착, 성장 및 가공등의 집요성 또는 효용성이 반도체 제조 관련 분야를 비롯하여 광학 박막, 전기 화학, 금속 표면 처리 등의 광범위한 관련 분야에 걸쳐 집중됨에 따라 이와 연관된 학문적, 기술적인 발달이 최근에 급격히 이루어 지고 있다. 이러한 표면 또는 표면에 분포하는 박막들을 조사 분석할 수 있는 방법은 여러가지 있으나 이들중 극히 최근에 개발되어 그 사용이 기하급수적으로 증가하고 있으나 아직 국내에서는 제작되지 않고 있는 Spectroscopic Ellipsometer (SE, 분광 타원 해석기) 의 제작과 이를 이용한 표면 및 박막의 분석에 관하여 논의 하고자 한

다. Ellipsometer 는 흔히 타원 해석기 라고 번역되며 반사광의 위상이 표면에 존재하는 얇은 막의 두께에 비례하여 극히 예민하게 변화 함이 알려진 후^[1-3] 주로 얇은 산화막의 측정 등에 그 사용이 제한되어 왔다.^[4-7] 이러한 사용상의 제한은 당시의 타원 해석기들이 단색광을 광원으로 사용함으로써 기저층(substrate)이 불확실하거나 박막의 수가 2개 이상이 있을 경우 또는 박막의 비 균질성으로 인하여 야기된 박막의 두께에 대한 오차등이 정도 이상으로 커짐에서 더욱 심화되었다. 이에 반하여 퍼스컴의 발달과 더불어 data 획득에 있어서 고속화, 자동화가 이루어 짐에 따라 타원 해석기의 분광화 즉 spectroscopic 능력을 갖춘 ellipsometer 의 제작이 1977년경 당시 Bell Lab.에 있던 Aspnes 에 의해 이루어지고^[8-13] 이에 따라 단일 파장에서 작동하는 종전의 타원 해석기에서 보다 월등히 많은 양의 정보를 짧은 시간내에 얻을 수 있게 되었다. 아울러 이 다량의 SE data 를 분석, 처리하는 data 분석 algorithm 즉 modelling procedure^[14-17] 도 비슷한 시기

본 연구는 고내 연구비 및 한국 과학 재단 연구비(신진연구)의 지원을 받아 이루어 졌음.

에 성공적으로 작동하게 되었다. 또한 반도체를 중심으로 소위 reference data가 제공되어^[18-21] depth profile의 기초가 이루어지게 되었다.

이 글에서는 이러한 SE의 국내생산 또는 SE와 관련된 국내에서의 연구활성화에 기여하기 위하여 본 실험실에서 제작한 SE를 소개하고 SE를 사용하여 포면 및 박막, 특히 광학박막의 분석에 응용한 예를 들으로써 이를 사용한 연구등에 도움이 되고자 한다.

II. Rotating Polarizer (RP) 형 SE

현재 국내외에 알려져 있는 대부분의 SE는 그 작동 원리 등이 서로 상이하나 한가지 공통적인 면은 종래의 단색광에서 작동하는 Ellipsometer가 광 측정 장치에 검출되는 빛의 세기를 줄여가는 방식 즉 nulling type으로 작동 되는데 비해 SE는 거의 모두가 회전하거나 변조된 능동 광소자의 변위에 따르는 광량을 측정하는 방식 즉 photometric type으로 작동되는 점이다. 여기서는 광원 - Rotating Polarizer - Sample - Fixed Analyzer - Monochromator - Photodetector로 이루어진 하나의 SE 방식에 대해 그 구성원리를 알아보고 이러한 방식이 가지는 오차의 원인을 분석함으로써 그 오차를 최소한으로 하고 정확도를 향상시키는 방법을 제시하고자 한다. 이러한 RP형 SE의 기본구조는 그림 1에 나타난 바와 같으며 이 SE의 작동 원리의 이론적 배경은 다음과 같다.

a) Ideal system

각 구성 성분이 이상적인 부품들로 구성되어 있을 경우 즉 광원의 편광 상태는 100% unpolarized state이며 polarizer (편광자) 또는 analyzer (검광자)의 extinction coefficient (광 소거율)는 영이며 이들에 의한 ellipticity 또는 optical activity (광활성도)도 없으며 광 측정 장치인 photomultiplier (광증배관)는 측정 광 세기의 대역에서 선형 반응을 보이고 있고 dark current (암 전류)가 영이면 그리고 편광자의 회전속도는 균일하며 이에 따라 회전 편광자와 연결되어 있는 encoder에서 발생하는 신호들이 균일하고 A/D converter의 noise 등을 무시할 수 있다면 회전 편광자의 회전각의 함수로써 광의 세기는 다음과 같이 표현된다.

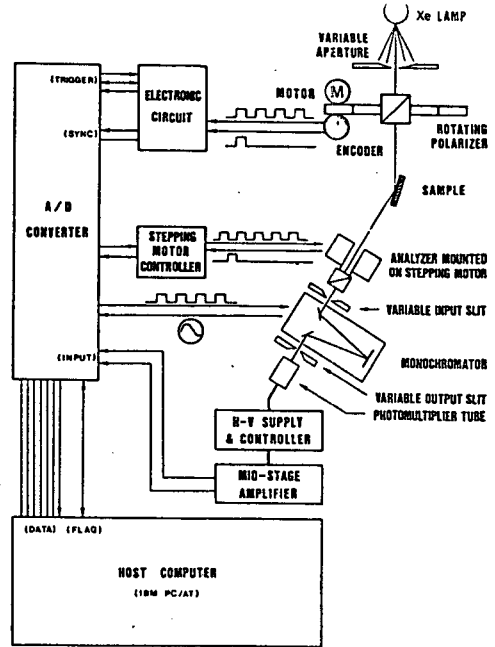


그림 1. RP형 SE의 개략적 구조도

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos p & -\sin p \\ \sin p & \cos p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} E_0 \quad (1)$$

$$I_o = |E|^2 = I_{ref} (1 + \alpha_o \cos 2P + \beta_o \sin 2p) \quad (2)$$

여기서 A와 P는 각각 입사면에 대해 측정된 검광자 및 편광자의 각도값으로써 $P = 2\pi ft + P_0$ 이며 f는 편광자의 회전수, P_0 는 편광자의 초기 위상을 나타낸다. r_p 와 r_s 는 각각 반사에 따르는 p파, 즉 전기장이 입사면에 나란한 방향으로 진동하는 선 편광자, 또는 s파, 즉 전기장이 입사면에 수직인 방향으로 진동하는 선 편광자의 반사율을 가리킨다. 이 r_p 와 r_s 로써 Ellipsometry (타원 해석법)에서 사용되는 두 상수인 Δ 와 ψ 는

$$\rho = \tan \psi \exp(i\Delta) = r_p/r_s \quad (3)$$

와 같이 정의된다.^[22] 이 Δ 와 ψ 는 각각 실수각으로써 $\tan \psi$ 는 반사에 따른 p파와 s파의 진폭의 비, Δ 는 반사에 따른 p파와 s파의 위상 변화의 차이를 나타낸다. (3) 식을 이

용하고 (1) 식과 (2) 식을 비교하면

$$\alpha_o = \frac{\tan^2 \psi - \tan^2 A}{\tan^2 \psi + \tan^2 A} \quad (4)$$

$$\beta_o = \frac{2 \tan \psi \cos \Delta \tan A}{\tan^2 \psi + \tan^2 A} \quad (5)$$

또는 이를 $\tan \psi$, $\cos \Delta$ 에 대해 풀면

$$\tan \psi = \tan A \left((1 + \alpha_o) / (1 - \alpha_o) \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\cos \Delta = \frac{\beta_o}{(1 - \alpha_o^2)^{1/2}} \quad (7)$$

로 주어지며 α_o 와 β_o 는 (2)에서 주어진 바와 같이 빛의 세기를 회전 편광자의 각도에 따른 삼각함수로 표현했을 때의 cosine 과 sine 의 계수이다. 이 계수들은 P_j 와 I_j 를 각각 J 번째의 encoder의 신호가 들어 올 때의 편광자의 각도 및 광증배관을 통하여 측정되는 빛의 세기라 하면 $P_j - P_o = 4\pi j/N$ ($j=1, 2, \dots, N$) 이므로 삼각함수에 관한 Fourier 전개 식을 사용하면 다음과 같이 구해진다.

$$\alpha_o = \sum_{j=1}^N I_j \cos 2P_j / I_{ref} \quad (8a)$$

$$\beta_o = \sum_{j=1}^N I_j \sin 2P_j / I_{ref} \quad (8b)$$

$$I_{ref} = \sum_{j=1}^N I_j / 2 \quad (8c)$$

그러나 이상과 같은 식은 각 부품이 완전한 경우에 정확한 식들로서 실제 SE에 사용된 각 부품은 미소결함을 지니고 있으므로 이들의 미소결함에서 비롯된 편차들을 보정해 주어야 한다. 이를 위하여 다음과 같이 편차의 원인과 그 영향을 분석하여 이들에 의한 영향을 보정 내지 극소화하는 방법을 찾고자 한다.

b) Error Analysis.

각 부품의 미소결함들 중에서 본 RP 형 SE의 정확도에 영향을 줄 수 있는 원인들 각각에 대하여 그 영향을 분석하고자 한다.

편광자 또는 검광자의 미소결함

편광자 또는 검광자의 미소결함은 광 소거율과 광활성도

로써 표현된다. 단결정으로 만들어진 대부분의 bi-prism형의 편광자는 그 광 소거율이 10^{-5} 이하이므로 이로 인한 오차는 다른 오차에 비해 거의 무시해도 좋다. 광활성도에 의한 오차는 Aspnes의 표현을 따르면 단결정 quartz bi-prism인 경우

$$\gamma = 0.0010 \hbar \omega / eV \quad (9)$$

로 나타난다.^[8] 비교적 고가인 단결정 bi-prism 이외의 많은 편광자 또는 검광자의 광 소거율과 광 활성도 등에 의한 미소결함은 이 미소결함의 총체적인 효과를 각각 γ_P, γ_A 로써 나타낸다면 이들에 의한 (1)식의 수정은 아래와 같이 행해진다.

$$E = (1 - \gamma_A) \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P & -\sin P \\ \sin P & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \gamma_P \end{pmatrix} E_o \quad (10)$$

위 식 즉 (10)식에 의한 Δ 와 ψ 값의 결정은 회전 검광자 (Rotating Analyzer, RA)형 SE의 경우에 잘 알려져 있고^[2,11] 본 연구에서 제작된 바와 같은 RP형 SE의 경우에는 이미 구한 회전 검광자형의 방법과 결과를 그대로 사용해도 된다. 그러나 회전 검광자형에서 유도된 표현은 수학적으로는 정확하지만 표현 자체의 복잡함으로 인하여 사용하기에 불편할 뿐더러 각 미소결함에 의한 영향을 물리적으로 직관하기에 곤란한 표현상의 단점을 가지고 있다. 여기에서는 이들 결함의 정도가 작기 때문에 이들에 대한 1차 근사식만을 취급하여 간단하면서도 물리적 의미를 파악하기 쉬운 표현을 유도하고자 한다. 구체적으로는 $\gamma_P = \gamma_{Pr} + i\gamma_{Pi}$, $\gamma_A = \gamma_{Ar} + i\gamma_{Ai}$ 와 같이 γ_P, γ_A 를 실수부분과 허수 부분으로 나누는 다음 이들 실수부분 또는 허수부분 각각에 의한 영향을 구하고 각각의 영향들을 더함으로써 전체적인 영향을 구하고자 한다. 최종적으로는 각 부품의 미소결함에 의한 영향의 합으로써 부품들에 의한 전체적인 영향을 나타낼 수가 있겠다.

1) $\gamma_A = 0$ 인 경우

이때 전기장에 관한 (10) 식과 빛의 세기에 관한 표현은 아래식들과 같다.

$$E = (\cos A - \sin A) \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P & \sin P \\ -\sin P & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \gamma_P \end{pmatrix} E_o \quad (11)$$

$$I_p = |E|^2 = I_{po}(1 + \alpha_p \cos 2P + \beta_p \sin 2P) \quad (12)$$

(3)식을 이용하여 (11)식을 풀어서 (12)식과 비교하면

$$\alpha_p = \frac{\tan^2 \psi - \tan^2 A - 4(\gamma_p + \gamma_p^*) \tan \psi \cos \Delta \tan A}{\tan^2 \psi + \tan^2 A + 4i(\gamma_p - \gamma_p^*) \tan \psi \sin \Delta \tan A} \quad (13)$$

$$\beta_p = \frac{2 \tan \psi \cos \Delta \tan A + (\gamma + \gamma_p^*)(\tan^2 \psi - \tan^2 A)}{\tan^2 \psi + \tan^2 A + 4i(\gamma_p - \gamma_p^*) \tan \psi \sin \Delta \tan A} \quad (14)$$

의 표현을 얻는다. (13) 및 (14) 식으로부터 $\cos \Delta$ 와 $\tan \psi$ 를 다음과 같은 경우에 해석적인 방법으로 구할 수 있다. $\gamma_p = \gamma_p^*$ ($=\gamma_{pr}$) 인 경우에는 (13) 및 (14) 식을 정리하여 (4), (5) 식과 비교하면 γ_{pr} 가 작을 때 (α_p, β_p) 와 (α_o, β_o) 사이에 다음과 같은 관계식이 만족함을 증명할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \alpha_p \\ \beta_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -2\gamma_{pr} \\ 2\gamma_{pr} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_o \\ \beta_o \end{pmatrix} \quad (15)$$

이 식은 γ_{pr} 가 작을 때 α_o, β_o 를 $2\gamma_{pr}$ 만큼 회전시킨 결과가 α_p, β_p 임을 나타낸다. 이는 수학적으로는 (1)식에서 $P \rightarrow P - \gamma_{pr}$ 한 것과 같음을 증명할 수 있다. 또한 $\gamma_p = -\gamma_p^*$ ($=i\gamma_{pi}$) 인 경우 γ_{pi} 의 1차 근사카지를 전개하여 (4), (5) 식과 비교하면

$$\begin{pmatrix} \alpha_p \\ \beta_p \end{pmatrix} = 1/\xi \begin{pmatrix} \alpha_o \\ \beta_o \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\xi = 1 - 2\gamma_{pi} (1 - \alpha_o^2 - \beta_o^2)^{1/2} \quad (17)$$

과 같이 주어진다. 즉 (16), (17)의 관계식은 γ_{pi} 가 작을 때 α_p 와 β_p 는 α_o 와 β_o 를 각각 $1 - 2\gamma_{pi}(1 - \alpha_o^2 - \beta_o^2)^{1/2}$ 배 만큼 크게 한 것과 같다. 즉 α_o 와 β_o 는 근사적으로 α_p, β_p 를 각각 $1 + 2\gamma_{pi}(1 - \alpha_p^2 - \beta_p^2)^{1/2}$ 배하여 구하면 된다.

11) $\gamma_p = 0$ 인 경우

이때 전기장에 관한 (10) 식과 빛의 세기에 관한 표현은 (18), (19) 식 등과 같다.

$$E = (1 - \gamma_A) \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} E_o \quad (18)$$

$$I_A = |E|^2 = I_{A0}(1 + \alpha_A \cos 2P + \beta_A \sin 2P) \quad (19)$$

(3)식을 이용하여 (18)식을 풀어서 (19)식과 비교하면 γ_A 의 1차항 카지를 취할 때 다음을 증명할 수 있다.

$$\alpha_A = \frac{\tan^2 \psi - \tan^2 A + \tan A (\gamma_A + \gamma_A^*) (\tan^2 \psi + 1)}{\tan^2 \psi + \tan^2 A + \tan A (\gamma_A + \gamma_A^*) (\tan^2 \psi - 1)} \quad (20)$$

$$\beta_A = \frac{2 \tan \psi [\cos \Delta \tan A - \{ \operatorname{Re}(\gamma_A^* \exp(i\Delta)) - \tan^2 A \operatorname{Re}(\gamma_A \exp(i\Delta)) \}] / [\tan^2 \psi + \tan^2 A + \tan A (\gamma_A + \gamma_A^*) (\tan^2 \psi - 1)]}{\tan^2 \psi + \tan^2 A + \tan A (\gamma_A + \gamma_A^*) (\tan^2 \psi - 1)} \quad (21)$$

이 경우에도 앞서와 마찬가지로 아래의 경우와 같을 때 해석적인 방법으로 해를 구할 수 있다. $\gamma_A = \gamma_A^*$ ($=\gamma_{Ar}$) 일 때 γ_{Ar} 의 1차항 카지를 고려하면

$$\alpha_A = \frac{\tan^2 \psi - \tan^2(A - \gamma_{Ar})}{\tan^2 \psi + \tan^2(A - \gamma_{Ar})} \quad (22)$$

$$\beta_A = \frac{2 \tan \psi \cos \Delta \tan(A - \gamma_{Ar})}{\tan^2 \psi + \tan^2(A - \gamma_{Ar})} \quad (23)$$

임을 증명할 수 있다. 이 표현을 (4), (5) 식의 α_o, β_o 와 비교하면 γ_{Ar} 의 효과는 A 를 $A - \gamma_{Ar}$ 로 치환하는 것임을 알 수 있다. 또한 $\gamma_A = i\gamma_{Ai}$ ($=i\gamma_{Ai}$) 이면 $\gamma_A + \gamma_A^* = 0$ 이다. 이 때는

$$\alpha_A = \frac{\tan^2 \psi - \tan^2 A}{\tan^2 \psi + \tan^2 A} = \alpha_o \quad (24)$$

$$\beta_A = \frac{2 \tan \psi \cos \Delta \tan A - 2\gamma_{Ai} \tan \psi \sin \Delta (1 + \tan^2 A)}{\tan^2 \psi + \tan^2 A} \quad (25)$$

이며 (24) 식에서 $\tan \psi$ 에 대해 풀어서 (25) 식에 대입하면 $\cos \Delta$ 에 관한 표현을 얻을 수 있다.

$$\tan \psi = \tan A ((1 + \alpha_A) / (1 - \alpha_A))^{1/2} \quad (26)$$

$$\cos \Delta = -\gamma_{Ai} \operatorname{sgn}(\sin \Delta) (\tan A + \cot A) (1 - \alpha_A^2 - \beta_A^2)^{1/2} / (1 + \alpha_A) + \beta / (1 - \alpha_A^2)^{1/2} \quad (27)$$

여기서 $\operatorname{sgn}(\sin \Delta)$ 은 $\sin \Delta$ 의 부호를 나타낸다.

Background DC level

Photometric Ellipsometer 는 (2)식에서 볼 수 있는 바와 같이 α 와 β 로 주어지는 Fourier 계수, 즉 측정된 광의 세기의 교류성분과 직류성분의 비도 부터 그 근본 정보를 구하고 있으므로 background DC level이 signal DC level 과 분리되지 않으면 그 만큼 직접적인 오차의 원인이 된다. 일반적으로 background DC level 이 일정할 경우 그 크기를 측정되는 광 신호의 세기에서 바로 가감해 주는 방법이 간단하며 많

이 사용되고 있으나 필요에 따라서는 calibration 과정등을 통해 background DC Level을 처리하기도 한다. Background DC level 이 일정하지 않을 경우 예를 들면 광증배관의 전압 이 입사광의 세기에 연계되어 자동적으로 조절이 되게 설계되어 있는 경우 등에는 이 calibration 과정을 통하여 처리하는 방법이 효과적인 방법으로 알려져 있고 실제로도 많이 사용되고 있다.^[9,12] Background DC level 은 수학적으로 (2)식에 I_{noise} 를 더해 주면 된다.

$$I_{DC} = I_{ref} (1 + \alpha_0 \cos 2P + \beta_0 \sin 2P) + I_{noise}$$

$$= I_{ref}' (1 + \alpha_{DC} \cos 2P + \beta_{DC} \sin 2P) \quad (28)$$

$$\alpha_0 = \alpha_{DC} / (1 + \eta) \quad (29)$$

$$\beta_0 = \beta_{DC} / (1 + \eta) \quad (30)$$

단 $\eta = I'_{ref}/I_{ref}-1 = I_{noise}/I_{ref}$ 으로 이 η 의 크기는 I_{noise} 의 I_{ref} 에 대한 상대 크기에 따라 주어 진다. I_{ref} 가 일정하게 유지되는 경우 I_{noise} 의 크기를 알면 이에 따른 오차가 α_0 와 β_0 에 미치는 영향을 계산, 보정할 수 있다.

Light Source Residual Polarization

광원에 따라서는 정도의 차이가 있지만 약간의 선 편광을 가지고 있다. 이러한 광원의 잔류 편광에 의한 효과는 (1)식을 아래와 같이 표현하여 그 영향을 알아보고자 한다.

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \cos A & -\sin A \\ \sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P & \sin P \\ -\sin P & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} E_0(P) \quad (31)$$

$$E_0(p)^2 = E_0^2 (1 + \alpha' \cos 2P - \beta' \sin 2P) \quad (32)$$

여기서 α' 은 p 자의 방향으로 선 편광된 빛의 전기장의 상대세기, β' 은 p 자의 방향에 대하여 45° 각도로 선편광된 빛의 전기장의 상대 세기를 나타낸다. (31) 식을 전개하여 빛의 세기, 즉 $I_0 = |E|^2$ 에 대해 풀면 아래와 같다.

$$I_0 = I_{ref}' (1 + \alpha_0 \cos 2P + \beta_0 \sin 2P) (1 + \alpha' \cos 2P - \beta' \sin 2P)$$

$$= I_0 (1 + \alpha_0 \cos 2P + \beta_0 \sin 2P + \alpha_0 \alpha' \cos 4P + \beta_0 \beta' \sin 4P) \quad (33)$$

여기서 α_0 와 β_0 는 α' , β' , α_0 , β_0 등으로써 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_0 - \alpha' - (\alpha' \beta' \beta_0 + \alpha_0 \beta'^2)/2}{1 + (\beta' \beta_0 - \alpha' \alpha_0)/2} \quad (34)$$

$$\beta_0 = \frac{\beta_0 + \beta' - (\alpha_0 \alpha' \beta' + \beta_0 \alpha'^2)/2}{1 + (\beta' \beta_0 - \alpha' \alpha_0)/2} \quad (35)$$

또한 α_4 , β_4 는 아래 관계식을 만족한다.

$$\alpha_4 = \frac{\alpha_0 \alpha' + \beta_0 \beta'}{2 + \alpha_0 \alpha' - \beta_0 \beta'} \quad (36)$$

$$\beta_4 = \frac{\alpha' \beta_0 + \alpha_0 \beta'}{2 + \alpha_0 \alpha' - \beta_0 \beta'} \quad (37)$$

이 광원의 잔류편광은 광원에 따라 다르기 때문에 사용되는 각 광원에 따라 측정하여 (34)와 (35) 식에 따라 보정하면 된다. 광원의 잔류편광 중에서 원 편광 성분은 RP형 photometric ellipsometer 의 정확도에 아무런 부정적인 영향을 미치지 않는다. 따라서 광원에 circular polarizer 를 놓게 되면 이미 존재하던 선 편광 성분이 모두 원 편광상태로 바뀌게 되므로 광원의 잔류편광의 영향을 크게 줄일 수 있다.

Detector nonlinearity

Photometric Ellipsometer 의 경우는 Nulling type Ellipsometer의 경우와는 달리 광측정 장치의 선형도에 크게 그 정확도가 좌우된다.^[12,13] 이 측정 장치의 비 선형도는 hardware 방법 또는 software 방법등 가능한 모든 방법등을 통하여 최소한으로 줄이도록 해야 한다. 이러한 비 선형도가 ellipsometric constant 들에 미치는 영향은 그 비선형의 정도 및 비선형의 성격등에 따라 분석이 다를 수 있으므로 여기서는 더 이상의 논의를 생략하기로 하겠다.

마지막으로 다른 오차의 원인 및 그들의 의한 영향 - 예를 들면 회전하는 편광자의 encoding 에 관련된 오차, periodic noise 에 의한 오차, random noise 에 의한 오차 - 등에 관한 토의는 이미 상세한 토의가 발표된 바가 있으므로 이를 참조하기를 바란다. [11-13, 23-26]

C) Calibration

Calibration 과정은 입사광과 반사광으로 만들어지는 입사면에 대해 편광자와 검광자의 영점을 정확히 구하고 앞에서 알아본 것과 같이 각 부품의 미소결함이 이 편광자 및 검광자의 영점 및 ellipsometric constant의 정확도에 미치는 영향을 계산, 보정해주는 일련의 과정으로써 data의 정확도를 향상 시키기 위해 필수적인 단계이다. 이 calibration 과정은

각 Ellipsometer의 구성 원리에 따라 서로 다르기 때문에 여기에서는 RP형 SE의 calibration 과정만을 설명하도록 한다. Calibration 과정의 첫번째 단계는 검광자의 영점을 구하는 것으로서 이는 RA형 SE에 Aspnes가 적용한 방식을 그대로 적용한다. 즉 모든 부품의 미소 결함을 무시할 수 있을 때 검광자의 영점 A_0 는 스위 Residual이 최소이게 하는 검광자의 두 각도들 A_1, A_2 라 할때

$$A_0 = 1/2 (A_1 + A_2 - \pi/2) \quad (38)$$

으로 표현된다. Residual(R)은 A_1 근방에서 아래 (39)식과 같이 2차함수의 꼴로 근사되어 지므로 최소 자승법을 사용하여 최적 근사시킨 C_1, C_2 의 값으로써 A_1 을 표현할 수 있다.

$$R(A) = C_0 + C_1 A + C_2 A^2 \quad (39)$$

$$A_1 = -C_1 / 2C_2 \quad (40)$$

이들 C_0, C_1 그리고 C_2 에 관련된 구체적인 수학적 표현은 아래와 같다.

$$C_0 = [r_0(a_2a_4 - a_3^2) + r_1(a_2a_3 - a_1a_4) + r_2(a_1a_3 - a_2^2)]/d \quad (41a)$$

$$C_1 = [r_0(a_2a_3 - a_1a_4) + r_1(a_0a_4 - a_2^2) + r_2(a_1a_2 - a_0a_3)]/d \quad (41b)$$

$$C_2 = [r_0(a_1a_3 - a_2^2) + r_1(a_1a_2 - a_0a_3) + r_2(a_0a_2 - a_1^2)]/d \quad (41c)$$

$$d = a_0a_2a_4 + 2a_1a_2a_3 - a_2^3 - a_0a_3^2 - a_1^2a_4 \quad (41d)$$

$$a_k = 1/N \sum_{j=1}^N A_j^k \quad (41e)$$

$$r_k = 1/N \sum_{j=1}^N R_j A_j^k \quad (41f)$$

여기서 R_j 는 검광자의 각도가 A_j 일때의 Residual 값을 나타낸다. 또한 검광자의 각도가 $A_1 + \pi/2$ 근방에서도 Residual 은 (39) 식과 같이 2차함수의 꼴로 근사되어 지며 그 때의 Residual 이 최소일 때의 검광자의 각도인 A_2 를 구하여 이들 A_1, A_2 로 부터 (38) 식과 같이 A_0 를 구한다. 편광자의 초기위상 즉 $t=0$ 때의 편광자의 각인 P_0 는 검광자가 A_0 의 위치에 있을 때 측정된 (2)식의 cosine 과 sine 의 계수인 α', β' 으로써 아래식과 같이 표현된다. [26]

$$P_0 = -1/2 \tan^{-1} (\beta' / \alpha') \quad (42)$$

따라서 편광자의 각도가 P-P₀ 일때 측정된 (2) 식에 해당되는 빛의 세기에 관한 cosine 과 sine 의 계수인 α_0', β_0' 으로써 편광자의 각도가 P 일때 측정되는 (2) 식의 cosine 과 sine 의 계수 α_0, β_0 은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_0 = \alpha_0' \cos 2P_0 - \beta_0' \sin 2P_0 \quad (43)$$

$$\beta_0 = \alpha_0' \sin 2P_0 + \beta_0' \cos 2P_0 \quad (44)$$

이상의 결과를 요약하면 각 부품의 미소 결함이 이들 calibration 과정에 미치는 영향은 다음과 같이 정리된다. 편광자 또는 검광자의 미소 결함을 γ_P, γ_A 로 나타낼때 이들의 실수 부분은 각각 편광자의 각도 및 검광자의 각도를 P→P - γ_{Pr} , A→A - γ_{Ar} 로 치환 하는 것과 같고 이들의 허수 부분은 Δ 와 ψ 를 각각 (16), (17) 식 또는 (26), (27) 식과 같이 수정하는 효과를 나타낸다. 광원의 잔류 선편광에 의한 효과는 (34)식과 (35)식에 의해 보정이 되며 검광자와 편광자의 영점 측정 및 그 보정은 (38)식에서부터 (44)식까지 보여진 바와 같다.

III. 제작

본 연구실에서 제작된 RP형 SE는 그 주된 구성 요소로써 백색광원, 회전 편광자, 시로, 검광자 그리고 광 측정장치와 이들에 관련된 전자 회로 및 이들을 총괄 제어하는 컴퓨터로 이루어져 있다. 광원은 비교적 넓은 파장 영역에서 상대적으로 고른 세기 분포를 가지고 있는 Xe 고압 방전 램프를 사용하였으며 편광자로서는 Glan-Thomson polarizer 를 사용 하였다. 이 편광자는 timing belt 를 통하여 지류 모터에 의해 구동되며 지류 모터의 전연인 지류 전압을 조정함으로써 이 편광자의 회전수를 조절할 수 있도록 하였다. 회전수는 대략 33Hz로 고정하였다. 이 편광자는 optical encoder 에 연결되어 있고 이 encoder 에서 균일하게 발생되는 encoder 측의 1 회전당 100 개의 신호를 이용하여 편광자가 3.6° 간격으로 회전하는 때 순간마다 A/D 변환을 행하였다. Sample holder 는 x-y 방향 (시로면의 방향)의 거시적인 선형이동과 z 방향 (시로면에 수직인 방향)의 미시적인 선형이동 그리고 x, y, z 각 축 주위의 미시적인 기울기 조절이 가능하도록 설계되었으며 시로 취급상의 용이함을 고려하고 시로 표면의 불필요한 파손 및 훼손등을 피하기 위하여 진공 흡착 방식으로 시로를

지지할 수 있게 하였다. 검광자로써는 film type polarizer 를 사용하였으며 향후 투과광 대역확장 및 낮은 광 소거를 돕을 동안 SE 전체의 성능 향상을 위하여 편광자에 사용된 것과 같은 단결정형의 편광자로 대체할 예정이다. 이 검광자는 회전축다라 동심원으로 구멍이 뚫린 stepping motor 에 바로 장착하여 매 step 에 해당되는 1.8° 식 회전각도를 변화시킬 수 있게 하였다. Monochromator (단색분광기)는 ORIEL 사의 f=25cm 인 회절격자형을 사용하였으며 mm당 1200 개의 line 이 있는 회절격자를 사용하여 측정가능 대역이 180nm-700nm 이었다. 광 측정 장치로써는 광 증배관을 사용하였고 광 증배관에서 출력되는 Analog 신호를 회전 편광자에 장착된 encoder 에서 나오는 매 신호 위치에서 동기화된 A/D 변환을 이루어 줌으로 편광자의 회전각에 대한 빛의 세기를 측정하였다. 본 실험에서 사용된 A/D 변환기 및 관련 software (IBM PC DAC Adapter #1502, #1504)는 12 bit의 분해능을 가지고 있으며 초당 8000Hz 의 속도로 A/D 변환을 가능하게 한다. 따라서 매 회전당 100개의 encoder 신호를 고려하면 더 빠른 속

도를 위하여서는 편광자의 회전수는 80Hz 까지 증가시킬 수 있겠다. Encoder 신호 위치에서의 정확히 동기화된 A/D 변환을 위한 동기화 회로는 그림 2에서 보여진 바와 같으며 encoder 신호가 매 회전당 3회 방출되며 2회전 연속하여 측정하는 가상적인 경우의 이 동기화 회로의 몇몇 위치에서 관찰되는 전압변화도 같이 나타내었다.

마지막으로 입사각을 바꿀 수 있게 하기 위하여 검광자, 단색분광기, 광 측정 장치들은 Sample holder 측 주위로 회전할 수 있는 광학대 위에 장치시켰다. 이 같이 하여 측정 가능한 입사각의 대역은 40° ~ 90° 이며 정밀도는 ~0.1° 이다.

IV. 성능 평가 및 검토

성능 평가는 각 부품의 미소 결함등을 측정 분석하여 이들을 종합하는 미시적인 방법 보다는 개괄적인 방법을 사용 총괄적인 검토를 행하였다. 구체적으로는 아래와 같이 2가지의 경우로 나누어서 평가 및 검토하였다. 첫째는 straight through operation (STO) 즉 입사각을 90° 로 하여 시료면에서 반사하지 않고 직진하는 빛을 측정하는 방법으로 이 방법을 통하여 이 RP 형 SE 자체의 개략적인 성능을 추정할 수 있다. 즉 측정 파장 대역, 정밀도, 측정 속도 그리고 각 부품의 미소결함 및 광학 소자들의 정렬 편차등에 의한 총체적인 오차등을 짐작할 수 있다. 이 STO 에서 측정되는 빛의 세기는 (3)의 식에 $r_p = r_s$ 를 대입한 것과 같고 따라서 오차가 없는 SE의 경우 측정될 전 자장 대역에 걸쳐 Δ 와 ψ 의 값은 $\tan\psi=1.0$, $\cos\Delta=-1.0$ 의 관계를 만족 해야 한다. 실제의 SE에서는 $\tan\psi$ 가 1.0 으로부터 그리고 $\cos\Delta$ 가 -1.0 으로부터 벗어나는 정도가 이 SE의 오차의 정도를 나타내며 이 값은 또한 Residual ($R=1-\alpha\sigma^2-\beta\sigma^2$)이 0의 값으로부터 벗어나는 정도와 밀접한 관계가 있다. 즉 STO에서 $\tan\psi$, $\cos\Delta$ 그리고 R의 값들은 RP형 SE의 오차의 정도를 나타내는 중요한 척도가 된다. 본 실험실에서 제작된 RP 형 SE의 측정 파장 대역은 400nm - 600nm 이었으며 이 대역을 넓히기 위해서는 광측정 장치인 광증배관을 광역 자장 영역에서 작동하는 UV-ir enhanced type 을 사용해야 하며 검광자도 단결정 bi-prism 형을 사용해야 한다. 이 SE의 정확도를 가능하기 위하여 400nm, 500nm, 그리고 600nm 의 각 자장에 대하여 측정 한 $\tan\psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 값을 그림 3에 나타내었다. (편광자의 회전수 N=200) 이 그림에서 알 수 있듯이 측정 파장 대역의

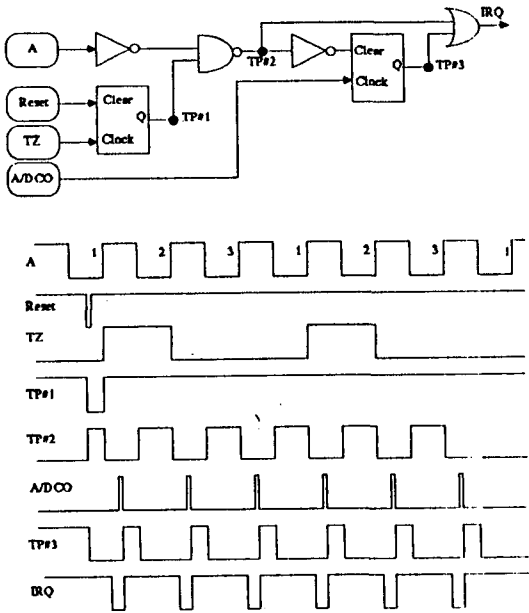


그림 2. 동기화된 A/D 변환을 위한 전자 회로도. Encoder 의 신호가 매 회전당 3회 방출되며 2회전 연속하여 A/D 변환하는 경우의 이 회로의 몇몇 위치에서 관찰되는 전압 변화도 같이 나타내었음.

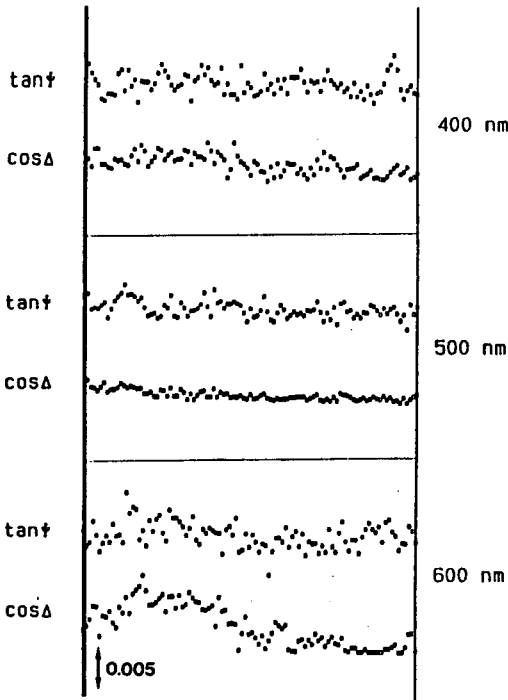


그림 3. Straight through operation 에서 측정된 $\tan\psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 편차. 측정 파장은 위에서부터 각각 400nm, 500nm, 그리고 600nm 이다.

가장자리로 갈수록 정밀도가 나빠지며 이들의 편차도 커짐을 알 수 있다. 이러한 정밀도 등은 회전 편광자의 회전수와 밀접하게 연관되어 있다. 즉 파장이 500nm 인 경우 이 회전수를 1, 4, 10, 100 등으로 증가 시키면서 측정된 $\tan\psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 값 (그림 4)에서 편광자의 회전수를 증가시키기에 따라 각 값들의 정밀도가 향상됨을 알 수 있다. $N=100$ 인 경우 $\tan\psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 편차는 0.2% 내외의 값을 가지고 있으며 이 값은 이 RP형 SE가 기존의 다른 photometric SE에 비하여도 뒤지지 않는 성능을 가진 것으로 판단하게 한다. 물체는 대표적인 하나의 반도체 시료 즉 (100) 방향의 Si 단결정면에 대하여 측정된 결과물 비교, 검토하는 방법이다. 입사각을 70° 로 하여 400nm 부터 600nm 까지 5nm의 간격으로 파장을 증가시키면서 측정된 Δ 와 ψ 의 스펙트럼은 산화막의 두께가 대략 35 Angstrom 정도인 결정질 Si의 Δ , ψ 의 스펙트럼과 매우 비슷하였다. 실제 본 실험에서 측정된 data를 사용하여 modelling 하여 계산된 Δ , ψ 의 스펙트럼을 측정된 Δ , ψ 의 스펙트

럼과 같이 그린 그림에서 이들은 서로 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 정확도를 조사하는 또 하나의 방법은 동일한 시료에 대하여 다른 SE에서 측정된 결과와 직접 비교하는 것으로 현재 계획중에 있다.

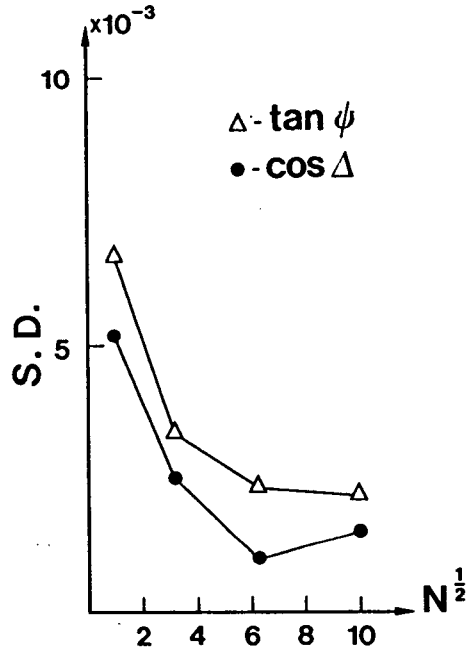


그림 4. 편광자의 회전수의 증가에 따른 $\tan\psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 편차의 변화 (straight through operation 에서 측정. 측정 파장은 500nm)

V. 응용

잘 알려진 바와 같이 Ellipsometry 는 반사광의 위상각이 표면에 존재하는 막막의 두께에 비례하여 예민하게 변하는 고유 장점을 가지고 있다. 이에 따라 초기 단일 파장에서 작동하는 대부분의 Ellipsometry 와 관련된 연구에서는 이 고유한 장점을 살려 주로 표면 산화층 또는 원자, 분자층의 흡착 및 탈착현상 또는 이들의 두께 측정에 주로 사용되어 왔다. 즉 In에 성장하는 In_2O_3 막막 성장속도 측정,^[31] 단결정 Cu 의 여러 온도에서 각 결정면의 방향에 따르는 산화막의 성장속도 측정,^[27] 깨끗하게 표면 처리된 Si 의 각 결정 방향에 의 물, 매탄올, 에탄올, 메틸 클로라이드 등의 물질의 흡착에

관한 연구,^[28-30] 흑연 표면의 변형 physisorption^[31] 등이 이루어져 왔으며 Ellipsometry 관련 상수들의 표면 거칠기에 따른 변화를 조사하여 vitreous silica의 표면 미시 거칠기 정도,^[32] 이들의 연마 또는 다른 표면 처리에 따른 미시 거칠기의 변화,^[33-35] 등에 관련된 연구도 이루어져 왔다. 또한 Ellipsometry에서는 각 파장에 따라 반사광의 세기 (ψ)와 위상 (Δ)을 동시에 측정하기 때문에 이 세기와 위상에 관한 두개의 정보 (ψ, Δ)는 투명하지 않은 물체 즉 금속 또는 반도체 substrate의 광학상수를 기술하는 복소굴절률 ($n+ik$) 또는 복소유전율 ($\epsilon_1+i\epsilon_2$)을 결정할 수 있게 한다. Au 또는 여러 반도체 물질들의 광학 상수결정, Au 박막의 계면 또는 표면에서의 미시 거칠기에 관한 연구,^[37,38] 등이 보고되었다. 한편으로는 Ellipsometry의 비 간섭성, 비 파괴성을 살려 In-situ 실험으로 많이 응용되기도 하였다. 깨끗이 처리된 Si 표면에서의 여러 유기 화합물들의 흡착에 관한 실험,^[28-30] 4.2° K에서 액화된 O₂, N₂, CO₂, H₂O, Ar, Ne, Kr 등의 굴절을 측정^[39] 등도 이루어 졌다. 특히 광학적인 방법인 가지는 매질의 진공성에 대한 무계약의 장점과 Ellipsometry의 고유한 장점인 박막에 대한 예민함을 살려 유체 매질, 특히 전해질 내의 전기 표면에서의 반응들에 관한 연구가 전기화학 분야의 연구실을 중심으로 활발히 이루어져 왔다. 전해질 내의 여러 음이온들이 금속 전극에의 흡착,^[40] Au 표면에서의 전기적 2중층이나 Au 산화막의 형성,^[41-43] Pt 양극에서의 산화막 연구 또는 고분자화막의 형성 및 성장,^[44-61] 을 비롯하여 PMMA 막의 두께 측정,^[17] n-InP의 전기화학적 처리에 따른 표면 변화,^[44] 전기 도금 과정에 따르는 PbO₂의 변환,^[45] borate 전해질 내에서의 Fe에 형성되는 보호막의 형성, 환원, 박막 성장의 Kinetics 등에 관한 연구,^[46-48] Ni 표면에서의 전기 화학적 고분자화 현상,^[49] 등 많은 연구가 이루어져 왔다.

그러나 이에 사용된 Ellipsometry는 광원으로 단색광만을 사용함으로써 기저층이 불확실 할 때의 분석의 어려움이나 박막의 수의 증가에 따른 분석의 한계등으로 인하여 그 응용이 균일한 산화층의 두께측정을 중심으로 하는 비교적 좁은 분야로 제한되어 있었다. 이 자장에 대한 제한은 퍼스컴의 발달과 더불어 Ellipsometry의 자동화가 이루어 짐에 따라 data 취득 속도, 정밀도등에 탁월성을 지니고 있으며 더불어 분광 능력까지 갖춘 Spectroscopic Ellipsometer (SE)의 개발이 이루어지고 이 SE의 분광능력에 따르는 많은 양의 정보를 처리, 분석하는 modelling algorithm이 성공적으로 적용

함에 따라 점차 극복되어 표면 및 다층 박막에 따른 정상적인 분석이 가능하게 되었다. 즉 단일 산화막의 두께 측정뿐만 아니라 산화막을 포함한 표면층들의 두께 및 각 성분의 조성비 결정, 결정의 정도 및 비정질의 밀도 측정, 반도체 계면층의 연구, 표면의 거칠기 정도 및 void의 분포 측정등의 연구가 성공적으로 이루어져 왔다. 반도체 재료 및 그와 관련된 박막 또는 반도체의 제조 공정 처리등에 관련된 박막, 계면등에 관해서 무수히 많은 연구들이 발표되었으나 이들에 관한 포의는 다음 기회에 하도록 하며 관심있는 독자들은 이에 관한 핵심 논문들을^[50-52] 참조하시기 바란다. 또한 전기 화학과 관련된 분야에서도 Si의 양극 산화막의 In-situ 조사,^[53] KOH 용액내에서의 결정면의 방향에 따른 부식과정 연구,^[54] 이 부식을 멈추게 하는 mechanism 연구,^[55,56] Si/SiO₂ 사이의 계면연구^[57] 등이 보고되고 있다. 한편 금속 박막의 초기 성장 과정 및 그 성장 형태, 산화막의 본포, 그 금속의 밀도,^[58-62] diamondlike carbon film 또는 고농도로 탄소가 주입된 Si의 광학적 특성,^[63,64] 그리고 투명하지만 전기 전도도가 높은 금속 박막의 미세구조 분석,^[65,66] 등에 관한 연구도 활발한 편이다. 이 글에서는 이같은 SE를 사용한 표면 및 박막의 많은 연구들 중에서 하나의 대표적인 응용예가 될 수 있는 광학 박막에 관련된 연구를 중심으로 소개하고자 한다.

광학 박막의 분석

박막의 존재가 빛의 반사에 중대한 영향을 미친다는 사실은 자간 색조를 띤 카메라의 렌즈면 등을 통해 일반인에게도 잘 알려져 있다. 대부분의 광학 박막은 경계면에서 빛의 반사를 최소한으로 하거나 어떤 특정 파장 대역의 빛만을 투과 또는 반사 시키기 위한 것이 그 주요 목적으로 대부분 유전물질들을 그 박막의 재료로 사용한다. 이러한 투과 또는 반사에서 광학적 특성을 향상하기 위한 박막의 그 광학적 성질을 연구하여 용도에 부합되며 재현성이 있는 양질의 광학 박막을 대량생산을 할 수 있도록 도움을 주는 것은 의미있는 일일 것이다. 지금까지 여러 종류의 박막 증착에 따른 기술적 측정이 이루어져 왔고 단일 박막의 기본적인 광학적 특성에 관한 1970년 후반까지의 연구들이 Ritter,^[67] Pulker^[68] 등에 의해 요약 발표되었다. 당시의 알려진 바에 의하면 대부분의 박막의 굴절률은 박막 물질의 bulk refractive index보다 크지 않으며 이는 박막의 광 투과도와 더불어 박막 형성의 제한 실험환경등에 크게 영향을 받았다. 대부분의 유전계 박막은

원주 또는 기둥 모양으로 성장함이 보고 되었고 substrate 의 온도 증가에 따라 대개 비정질에서 결정질로 변화하며 초기 성장시에 형성된 성장핵 또는 작은 결정들이 박막의 성장과 더불어 응집하기도 하며 빈 공간들도 내포되는 비교적 복잡한 미세구조를 가지게 된다. 이 박막내의 미세구조는 박막 성장조건, 즉 Substrate의 온도, 산소 또는 질소등의 분압, 증착 속도, 증착 방법, 다른 보조방법의 사용 여부등 많은 실험 환경의 영향을 받으며 박막의 성장에 따른 비균질성은 박막의 두께에 따른 물리적 성질의 변화를 있게 하는 근본 원인이 된다. 따라서 박막은 이방성을 띠고 불균질성을 나타내기도 한다. 이 같은 박막 구조의 복잡함과 표면층의 미시 거칠기등이 이러한 박막의 광학적 기본 특성 즉 박막의 두께 및 그 굴절율을 측정하는데 어려움을 주는 근본 이유가 된다. 이러한 박막 분석의 어려움은 동일한 조건하에서 제작된 Sc_2O_3 박막을 8개의 서로 다른 연구실에서 서로 다른 방법으로 분석한 결과를 비교하면 쉽게 이해 할 수 있다.^[69] 이 결과들을

요약, 비교한 표 1 에서 압 수 있듯이 박막 두께의 경우 대략 2%, 박막의 굴절율의 경우 4% 정도의 연구실간의 차이를 볼 수 있다. 이 같은 차이는 박막내에 존재하는 비균질성을 취급하는 박막 모형의 차이에서 기인한 것으로 이 같은 비균질성에 의한 효과는 spectro-photometric 방법에 의한 굴절율 측정시 보여진 error bar의 크기 분포 (그림5) 에서 잘 보여진다.^[69] 이러한 유전 박막의 비균질성은 Macleod 등에 의해 계속 연구, 발표되었으며,^[70-73] void 에 의한 비균질성 즉 박막 길이에 따른 void 의 분포는 ZnS 박막과 MgO 박막의 경우 3박막 모형을 사용하고 modelling 방법을 통하여 SE data 을 분석하여 밝혀진 바 있다.^[74] Vitreous silica substrate 위에 열증착 방법으로 성장시킨 ZnS 박막을 분석한 결과가 표 2 에 요약되어 있다. 먼저 이 ZnS 박막을 β -ZnS 의 굴절율을 가진 균일한 한개의 박막으로 대체시킨 모형을 사용하여 박막의 최적 두께를 결정하면 σ 는 0.14 로 비교적 큰 값을 가진다. 이 단일 박막 모형에 의한 ϵ_2 의 그래프는

표 1. Sc_2O_3 박막 분석의 결과 요약 ^[69]

Institution	Method	t_1 (nm) t_2 (nm)	Thin film model	λ (nm)	n								(n_1-n_2) at $\lambda=420$ nm		
					400	450	500	550	600	650	700	750			
Michelson Laboratory	R,T and t	224.5 452.5	nonabsorbing, homogeneous films	n	—	1.70	1.86	1.84	1.84	1.84	1.83	1.82	—	—	
University of New Orleans	Reflection Ellipsometry	228.2 462.6	absorbing, homogeneous; n same for both films	n	2.07	2.01	1.93	1.85	1.82	1.81	—	—	—	—	
Centre d'Etudes des Couches Minces	Wide-band Spectrophotometric	217.6 447.8	nonabsorbing linearly inhomogeneous films	n	1.89	1.88	1.87	1.87	1.87	1.86	1.86	—	—	0.15 0.18	
Optical Coating Laboratory Inc.	Modified Valeev turning point	219.0 447.4	absorbing linearly inhomogeneous films	n	1.91	1.89	1.88	1.86	1.85	1.84	1.84	1.83	1.83	1.82	0.17 0.20
Vought Corporation	Algebraic Inversion	225.0 450.0	nonabsorbing homogeneous films	n	—	1.84	—	1.87	1.84	1.82	1.81	—	—	—	—
National Research Council of Canada	Inverse Synthesis	221.2 450.3	absorbing, homogeneous; n same for both films	n	1.87	1.86	1.85	1.85	1.84	1.84	1.84	1.84	—	—	
Optical Science Center	Envelope	219.4 449.6	weakly absorbing, linearly inhomogeneous films	n	1.90	1.88	1.86	1.85	1.83	1.82	1.81	—	—	—	0.17 0.20

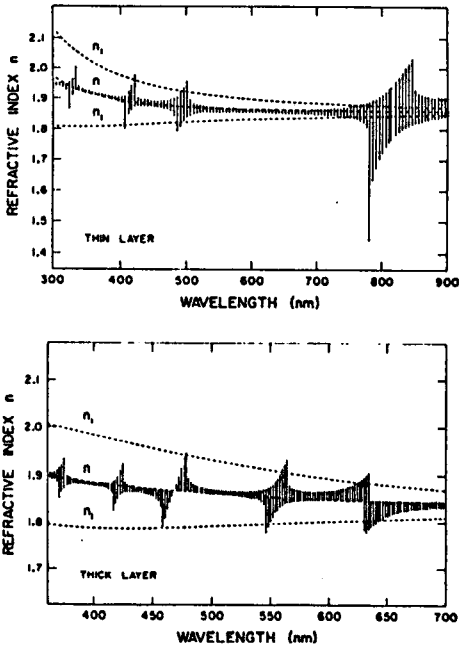


그림 5. 447.8nm(위), 217.6nm(아래)의 두께를 가진 Sc₂O₃ 박막의 spectrophotometric 방법에 의한 굴절률 측정. [69]

peak의 크기가 실험으로 측정된 ϵ_2 의 그것과 서로 교대하여 바뀌는 불일치를 나타낸다. 이 불일치는 균일한 하나의 박막으로 된 박막 모형의 결합에서 비롯된 것으로 단일박막 모형을 수정, 개선하여 그 차이를 줄일 수 있다. 즉 증착된 ZnS 박막을 3개의 박막의 합으로 본 3박막 모형에 따르면 SiO₂ substrate 바로 윗 부분은 ZnS와 void의 물리적 혼합물로 된 박막(두께=115.7±4.2nm, void 체적 함량=4±0.6%, 이 혼합물의 굴절률은 effective medium theory를 사용하여 계산함)이 있으며, 그 위에는 bulk ZnS와 같은 밀도를 가지는 두께 49.9±4.6nm의 층이 존재하며 표면에는 다시 ZnS+void의 혼

합물로 된 층이 존재하며 이층의 두께는 19.8±1.4nm, void의 체적 함량은 18±1.0%이다. σ 값은 0.03으로 350nm-800nm의 자장 영역에서 ϵ_1 와 ϵ_2 의 측정치와 계산치가 잘 일치함을 알 수 있다.(그림 6) 같은 방법으로 구한 MgO 박막의 3박막 모형에 따른 각 층의 두께 및 void 함량, 그리고 ϵ_1, ϵ_2 의 스펙트럼들은 그림 7에서 나타내었다. 이 같은 3박막 모형은 rf-sputtered 비정질 Ge 박막등에서의 void 분포를 나타내는 박막 모형과 유사한 것으로 [75,76] 박막 성장이 초기 단계에

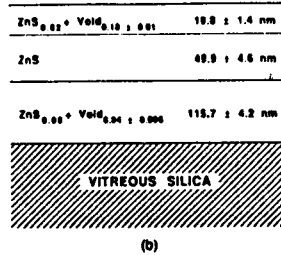
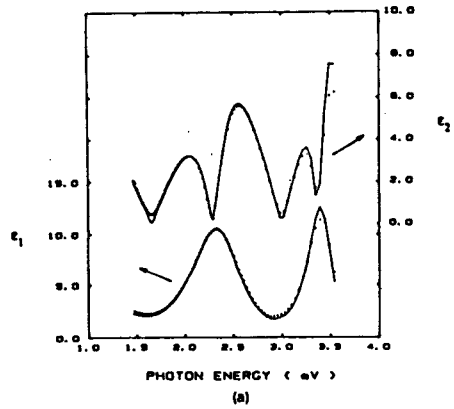
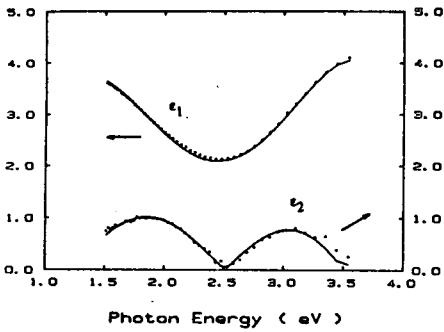


그림 6. (a) Vitreous silica substrate에 열적 증착된 ZnS 박막의 복소유전율의 실수 부분(ϵ_1)과 허수부분(ϵ_2)의 스펙트럼. 점으로 표시된 실험 결과와 실선으로 표시된 계산된 결과가 잘 일치한다. (b) 위의 계산 결과에 해당하는 3박막 모형의 개요도 및 박막 상수들.

표 2. ZnS 박막의 각 모형에 따르는 최적 상수 및 오차 한계

박막 제 1 층	박막 제 2 층	박막 제 3 층	σ
ZnS $d = 178.5 \pm 0.7\text{nm}$			0.14
ZnS + void ($8 \pm 2.0\%$) $d = 99.1 \pm 5.7\text{nm}$	ZnS $d = 84.6 \pm 5.0\text{nm}$		0.12
ZnS + void ($4 \pm 0.6\%$) $d = 115.7 \pm 4.2\text{nm}$	ZnS $d = 49.9 \pm 4.6\text{nm}$	ZnS + void ($18 \pm 1.0\%$) $d = 19.8 \pm 1.4\text{nm}$	0.03



(a)

$MgO_{0.92} + VOIDS_{0.08 \pm 0.02}$	$22.9 \pm 5.3 \text{ nm}$
MgO	$43.3 \pm 25.1 \text{ nm}$
$MgO_{0.994} + VOIDS_{0.006 \pm 0.003}$	$106.9 \pm 25.8 \text{ nm}$

Vitreous Silica

(b)

그림 7. (a) Vitreous Silica Substrate 에 열적 증착된 MgO 박막의 복소유전율의 실수 부분 (ϵ_1)과 허수부분 (ϵ_2)의 스펙트럼. 점으로 표시된 실험 결과와 실선으로 표시된 계산된 결과가 잘 일치한다. (b) 위의 계산 결과에 해당하는 3박막 모형의 개요도 및 박막 상수들.

는 성장행 등에서 시작하여 원추등의 형태로 자라고 이들이 어느 높이에서 서로 만나게 되면 그 중 어느 한쪽이 우세하게 자라며 표면은 대략 구형의 일부가 된다는 모형(77-79)과 부합한다. 즉 초기 단계에는 성장행간의 공간에 해당하는 void가 존재하며 박막이 성장함에 따라 이 void의 함량이 점차 감소하며 대략 ~100nm 정도의 두께에서는 박막의 밀도가 박막 물질의 체적 밀도와 거의 비슷해지며 표면에는 표면층의 굴곡에 해당하는 void가 존재한다. 3박막 모형은 이와 같이 성장단계에 따른 void의 분포를 3개의 박막으로 대체하여 나타내는 것으로 modelling 방법으로 계산된 각 박막의 두께, void 함량들은 실제 void 분포를 3개 박막의 평균 두께, 평균 void 함량들로서 나타낸 것이다.

3박막 모형은 이상과 같이 박막을 구성하는 물질의 굴절을 알고 있을 때 뿐만이 아니라 이 박막을 구성하는 물질의 굴절을 알지 못할 때에도 잘 적용이 된다. 대개의 유전 물질은 그 굴절율이 다음과 같은 Sellmeier형의 분산 관계식을 만족하며 이 때 각 박막의 두께, void 분포와 더불어 분산 관

계식의 계수들을 modelling 과정에서 동시에 결정함으로써 이 미시 박막의 굴절을 까지를 구할 수 있게 된다.

$$n^2(\lambda) - 1 = a + \sum_k \frac{b_k \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_k^2} \quad (45)$$

첫 식은 관심 파장 영역에서 가장 가까운 oscillator의 영향이 다른 oscillator들에 의한 것보다 크게 작용할 때

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (46)$$

으로 근사되어 지고 이때 A, B, λ_0 를 modelling procedure에서 구함으로써 유전 박막의 void profile과 박막 구성물질의 굴절을 분산 관계식을 동시에 구할 수 있다. 예를 들어 박막의 두께가 114nm인 MgO 박막의 경우 이러한 방법으로 구한 물질의 굴절율의 오차는 250nm-1000nm의 파장 영역에 걸쳐 0.2%를 초과하지 않았으며⁽⁸⁰⁾ 또한 ThF₄, CeF₃, HfF₄, LaF₃ 등의 박막에 대해서도 굴절을 분산 관계식을 구할 수 있었다. ThF₄, CeF₃, HfF₄, LaF₃ 등의 박막에서 구해진 이들의 굴절을 변화는 그림 8에서 나타나어 졌다.

마지막으로 3박막 모형에서는 박막의 초기형성 단계의 void 분포, 박막의 void free 성장단계, 박막 표면의 미시 거칠기등을 각 박막 대응 부분의 실험 두께, 평균 void 함량등으로 박막을 나타내는 것으로 박막의 두께가 커 질때는 3박막 모형으로도 불충분 할 때가 있다. 이러한 경우 void의 분포를 더욱 자세히 나타내기 위하여 초기 형성 단계에 해당되

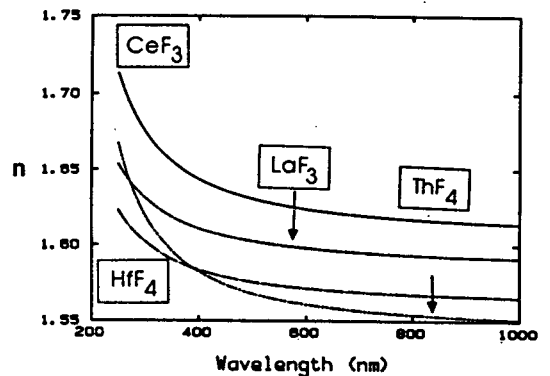


그림 8. 박막으로부터 구해진 ThF₄, CeF₃, HfF₄ 그리고 LaF₃의 굴절율 변화 곡선.

는 부분을 몇개의 서로 다른 void 함량을 가진여러개의 박막으로 나누어서 생각하여 이들이 실제 void 분포를 근사적으로 나타낼 수 있도록 각 박막의 두께, void 함량등을 최적화 한다. 이 같이 하여 분석한 약 0.6-0.7 미크론의 두께를 가진 SmF_3 박막의 void 분포를 그림 9에 나타내었다. 이 그림에서 보여진 바와 같이 SmF_3 박막은 SiO_2 substrate 에서 부터 상당히 떨어진 영역까지 void 를 가지고 있으며 이 void 의 분포나 함량은 Ion-Assisted Deposition (IAD) 의 여부에 따라 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 즉 IAD 를 한 박막의 경우 void 의 분포가 표면에 밀집해 있으며 IAD 를 하지 않은 박막의 경우보다 void free 성장단계에서는 박막의 밀도가 높음을, 즉 void 의 함량이 낮음을 알 수 있다. SmF_3 의 굴절율을 나타내는 분산 관계식의 계수들은 ThF_4 , CeF_3 , HfF_4 , LaF_3 , SmF_3 , ScF_3 , cryolite 들의 분산 관계식의 계수들과 같이 표 3 에 나타내었다.

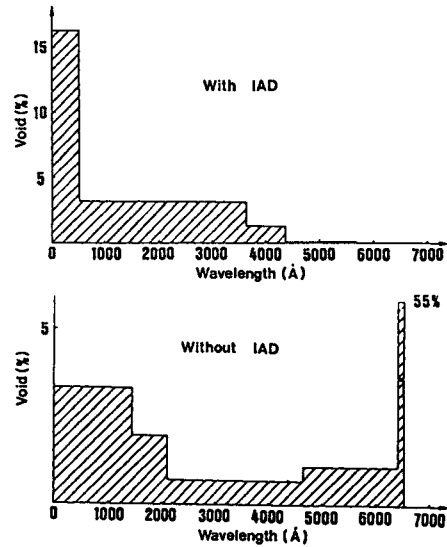


그림 9. SmF_3 박막의 void 분포.

VI. 맺는 말

Spectroscopic Ellipsometer 는 표면 또는 표면에 존재 하는 박막을 분석하는 기기로써 최근에 개발되어 다른 표면 분석 장비와 더불어 관련 분야에 유용하게 사용될 것으로 사료된다. 특히 반도체 표면 및 박막 또는 광학 박막, 그리고 비 파괴적, in-situ, in-vitro 측정을 필요로 하는 응용에 큰 도움이 될 것으로 생각되며 국내에서도 SE 관련연구가 활성화 되기를 기대한다. 마지막으로 본 연구수행시 여러가지로 도움을 주신 언 영의 교수님께 감사말 드린다.

표 3. 몇가지 불소화합 유전물들의 분산 관계 계수

	A	B	$\lambda_0(\text{nm})$
ThF_4	1.6768	0.7117	148.9
CeF_3	1.6155	0.9728	128.4
HfF_4	1.5722	0.8591	126.1
LaF_3	1.7014	0.8223	112.5
YF_3	1.5072	0.6275	125.1
SmF_3	1.8764	0.6143	134.2
ScF_3	1.5856	0.5052	153.0
Cryolite	1.6049	0.2718	52.9

참고 문헌

- 1) P. Drude, Ann. Phys. (Leipzig), vol.32, 584 (1887); vol.36, 532 (1889); vol.39, 481 (1933).
- 2) Wolfgang Budde, Appl. Opt., vol.1, no.3, 201 (1962).
- 3) B.D. Cahan and R.F. Spanier, Surf. Sci., vol.16, 166 (1969).
- 4) Frank L. McCrackin, Elio Passaglia, Robert R. Stromberg, and Harold L. Steinberg, J. Res. Nat. Bur. Std., vol.67A, no.4, 363 (1963).
- 5) A.K.N. Reddy, M.A. Genshaw, and J. O'M. Bookris, J. Chem. Phys., vol.48, no.2, 671 (1968).
- 6) Andrew Hamnett and A. Robert Hillman, J. Electroanal. Chem., vol.233, 125 (1987).
- 7) Richard Scheps, J. Electrochem. Soc., vol.131, no.3, 540 (1984).
- 8) D.E. Aspnes, J. Opt. Soc. Am., vol.64, no.6, 812 (1974).
- 9) D.E. Aspnes, Appl. Opt., vol.10, no.11, 2545 (1971).
- 10) D.E. Aspnes, J. Opt. Soc. Am., vol.64, no.5, 639 (1974).
- 11) D.E. Aspnes, J. Opt. Soc. Am., vol.61, no.8, 1077 (1971).
- 12) D.E. Aspnes and H. Arvin, J. Opt. Soc. Am., vol.73, no.12, 1759 (1983).
- 13) D.E. Aspnes and A.A. Studna, Rev. Sci. Instrum., vol.49., no.3, 291 (1978).
- 14) D.E. Aspnes, Phys. Rev. B, vol.25, no.2, 1358 (1982).
- 15) D.E. Aspnes, Phys. Rev. Lett., vol.48, no.23, 1629 (1982).
- 16) D.E. Aspnes, SPIE, vol.276, 188 (1986).
- 17) S.Y. Kim and K. Vedam, Applied Optics, vol.25, no.12, 2013 (1986).
- 18) E.D. Palik, Handbook of Optical Constants of Solids, (Academic Press, New York, 1985).

- 19) D.E. Aspnes and A.A. Studna, *Phys. Rev. B*, vol.27, no.2, 985 (1983).
- 20) D.E. Aspnes, S.M. Kelso, R.A. Logan, and R. Bhat, *J. Appl. Phys.*, vol.60, no.2, 754 (1986).
- 21) G.E. Jellison, Jr. and F.A. Modine, *J. Appl. Phys.*, vol. 53, no.5, 3745 (1982).
- 22) Rolf Muller, *Surf. Sci.*, vol.16, 14 (1969).
- 23) R.M.A. Azzam and N.M. Bashara, *J. Opt. Soc. Am.*, vol.64, no.11, 1459 (1974).
- 24) K. Riedling, *Ellipsometry for Industrial Applications*, Springer-Verlag, New York (1988).
- 25) K. Riedling, *Thin Solid Films*, vol.155, 151 (1987).
- 26) from the technical manual of SOPRA EG2G.
- 27) J.M. Elderidge, Y.J. van der Meulen, and D.W. Dong, *Thin Solid Films*, vol.12, 447 (1972).
- 28) F. Meyer, *Surf. Sci.*, vol.56, 37 (1976).
- 29) F. Meyer, E.E. de Kluizenaar, and G.A. Bootsma, *Surf. Sci.*, vol.27, 88 (1971).
- 30) F. Meyer, *Surf. Sci.*, vol.27, 107 (1971).
- 31) H.J. Koort, K. Knorr, and H. Wiechert, *Surf. Sci.*, vol.192, 187 (1987).
- 32) K. Vedam and M. Malin, *Mat. Res. Bull.*, vol.9, 1503 (1974).
- 33) K. Vedam and Samuel S. So, *Surf. Sci.*, vol.29, 379 (1972).
- 34) S.C. Mushakarara and K. Vedam, *Surf. Sci.*, vol.96, 319 (1980).
- 35) K. Vedam, *Surf. Sci.*, vol.56, 221 (1976).
- 36) I. Ohlidal and F. Lukes, *Thin Solid Films*, vol.85, 181 (1981).
- 37) I. Ohlidal, F. Lukes, and K. Navratil, *Surf. Sci.*, vol.45, 91 (1974).
- 38) I. Ohlidal and F. Lukes, *OPTICA ACTA*, vol.19, no.10, 817 (1972).
- 39) J. Kruger and W.J. Aubs, *J. Opt. Soc. Am.*, vol.49, no.12, 1195 (1959).
- 40) Woon-kie Paik, Marvin A. Genshaw, and John O'M. Bockris, *J. Phys. Chem.*, vol.74, no.24, 4266 (1970).
- 41) R.S. Sirohi and M.A. Genshaw, *J. Electrochem. Soc.*, vol.117, no.7, 910 (1969).
- 42) F. Chao and M. Costa, *Surf. Sci.*, vol.135, 497 (1983).
- 43) K. Kempe, *Surf. Sci.*, vol.157, L323 (1985).
- 44) Alain Gagnaire, Jacques Joseph, Arnaud Etcheberry, and Jacques Gautron, *J. Electrochem. Soc.*, vol.132, no.7, 1655 (1985).
- 45) J.L. Ord, Z.Q. Huang, and D.J. DeSmet, *J. Electrochem. Soc.*, vol.132, no.9, 2076 (1985).
- 46) Z. Szklarska-Smalowska and W. Kozlowski, *J. Electrochem. Soc.*, vol.131, no.4, 234 (1984).
- 47) Z. Szklarska-Smalowska and W. Kozlowski, *J. Electrochem. Soc.*, vol.131, no.4, 499 (1984).
- 48) W. Kozlowski and Z. Szklarska-Smalowska, *J. Electrochem. Soc.*, vol.131, no.4, 723 (1984).
- 49) Y. Boulzern, F. Chao, M. Costa, A. Tadjeddine, and G. Lecayon, *J. Electroanal. Chem.*, vol.172, 101 (1984).
- 50) D.E. Aspnes, *J. PHYSIQUE*, vol.C10, 3 (1983).
- 51) D.E. Aspnes, *SPIE*, vol.946, 84 (1988).
- 52) 김 상엽, 한국 광학회지, 제1권 제1호 73 (1990).
- 53) E.D. Palik and V.M. Bermudez, *J. Physique*, vol.C10, 179 (1983).
- 54) E.D. Palik, V.M. Bermudez, and O.J. Glembocki, *J. Electrochem. Soc.*, vol.132, no.4, 871 (1985).
- 55) E.D. Palik, V.M. Bermudez, and O.J. Glembocki, *J. Electrochem. Soc.*, vol.132, no.1, 135 (1985).
- 56) E.D. Palik, V.M. Bermudez, and O.J. Glembocki, pp 135 in *Micromachining and Micropackaging of Transducers*, edited by C.D. Fung and P.W. Cheung, (Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, 1985).
- 57) Orest J. Glembocki, *SPIE*, vol.452, 130 (1983).
- 58) Brian T. Sullivan and R.R. Parsons, *Thin Solid Films*, vol.154, 281 (1987).
- 59) B. Yang, S.Y. Kim, and K. Vedam, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol.55, 327 (1986).
- 60) M.M. Wind, P.A. Bobbert, J. Vlieger, and D. Bedeaux, *Thin Solid Films*, vol.164, 57 (1988).
- 61) P.A. Bobbert, J. Vlieger, and R. Greef, *Thin Solid Films*, vol.164, 63 (1988).
- 62) Chang Kwon Hwangbo, Linda J. Lingg, John H. Angus Macleod, John L. Makous, and Sang Yeol Kim, *Applied Optics*, vol.28, no.4, 2769 (1989).
- 63) A. Azim Khan, David Mathine, John A. Woollam, and Y. Chung, *Phys. Rev. B*, vol.28, no.12, 7229 (1983).
- 64) K. Srikanth, M. Chu, S. Ashok, N. Nguyen, and K. Vedam, *Thin Solid Films*, vol.163, 323 (1988).
- 65) D.E. Aspnes, A. Heller, and J.D. Porter, *J. Appl. Phys.*, vol.60, no.9, 3028 (1986).
- 66) Y. Degani, T.T. Sheng, A. Heller, D.E. Aspnes, A.A. Studna, and J.D. Porter, *J. Electroanal. Chem.*, vol.228, 167 (1987).
- 67) E. Ritter, *Physics of Thin Films*, vol.8, Academic Press, New York, (1975).
- 68) H.K. Pulker, *Applied Optics*, vol.18, no.12, 1969 (1979).
- 69) D.P. Arndt, R.M.A. Azzam, J.M. Bennett, J.P. Borgogno, C.K. Carniglia, W.E. Case, J.A. Dobrowolski, U.J. Gibson, T. Tuttle Hart, F.C. Ho, V.A. Hodgkin, W.P. Klapp, H.A. Macleod, E. Pelletier, M.K. Purvis, D.M. Quinn, D.H. Strome, R. Swenson, P.A. Temple, and T.F. Thorn, *Appl. Opt.*, vol.23, no.20, 3571 (1984).
- 70) H.A. Macleod, *J. Vac. Sci. Technol.*, vol.14, no.3, 418 (1986).
- 71) M. Harris, M. Bowden, and H.A. Macleod, *Optics Commun.*, vol.51, no.1, 29 (1984).
- 72) D.F. Bezuidenhout, K.D. Clarke, and R. Pretorius, *Thin Solid Films*, vol.155, 17 (1987).
- 73) A.A.J. Al-Douri and O.S. Heavens, *Thin Solid Films*, vol.100, 273 (1983).
- 74) K. Vedam, S.Y. Kim, L. D'Aries, and A.H. Guenther, *Opt. Lett.*, vol.12, no.7, 456 (1987).
- 75) J.R. Blanco, R. Messier, K. Vedam, and P.J. McMarr, *Mat. Res. Soc. Symp.*, vol.38, 301 (1985).
- 76) P.J. McMarr, J.R. Blanco, K. Vedam, R. Messier, and L. Pillone, *Appl. Phys. Lett.*, vol.49, 328 (1986).
- 77) P. Ramanlal and L.M. Sander, *Phys. Rev. Lett.*, vol.54, 1828 (1985).
- 78) A.G. Dirks and H.J. Leamy, *Thin Solid Films*, vol.49, 219 (1977).
- 79) R.A. Roy and R. Messier, *J. Vac. Sci. Technol.*, vol.A42, 312 (1984); R.A. Roy and R. Messier, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol.38, 363 (1985).
- 80) K. Vedam and S.Y. Kim, *Applied Optics*, vol.28, no.4, 2691 (1989).