

회전검광자형 분광타원해석기의 제작및 불화박막의 분석*

김 상 열

아주대학교 자연과학대학 물리학과

(1992년 3월 20일 받음)

회전검광자형의 분광타원해석기 (Spectroscopic Ellipsometer, SE)를 제작하였다. 각 부품의 미소결함에 의한 오차를 고려하여 이들이 타원해석상수들에 미치는 영향을 최소로 하는 배치를 결정하였다. Straight through operation의 성능평가 결과 300 nm-850 nm의 파장대역에 걸쳐 $\tan\psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 편차는 0.2% 내외로 만족할 만한 것으로 판단되었다. SE를 사용하여 불화박막의 굴절율및 void분포형태를 측정하였고 응용성에 관하여 논의하였다.

1. 서 론

타원해석기(Ellipsometer)는 표면에 존재하는 얇은 막에 의한 반사광의 위상을 측정한다. 유전체박막일 경우가 위상값은 그 막의 두께에 비례하기 때문에 초기 단계에서 타원해석법(Ellipsometry)은 주로 얇은 산화막의 두께측정등에만 사용되어 왔다.^[1-4] 이러한 사용상의 제한은 당시의 타원해석기들이 단색광을 광원으로 사용함으로써 기저층(substrate)이 불확실하거나 박막의 수가 2개 이상이 있을 경우 또는 박막이 균일하지 않아서 박막의 두께에 대한 오차가 예상보다 커지는 데에 그 근본 원인이 있었다. 이에 반하여 퍼스컴의 발달과 더불어 데이터를 고속, 자동으로 얻는 분광타원해석기가 제작되어^[5-7] 단일 파장에서 작동하는 종전의 타원해석기보다 월등히 많은 양의 정보를 짧은 시간내에 얻을 수 있게 되고 이 다량의 SE 데이터를 분석, 처리하는 모델링 방법(modelling procedure)^[8-9]이 확립되며 반도체를 중심으로 표준 데이터(reference data)가 제공되어^[10-13] depth profile이 이루어지게 되었다. 최근에 이르러서는 표면의 처리 또는 박막의 증착, 성장및 가공등의 필요성 또는 효율성이 반도체를 비롯하여 광학박막, 전기화학, 금속 표면처리 등의 광범위한 관련 분야에 걸쳐 인지됨에 따라 이와 연관된 학문적, 기술적인 발달이 최근에 급격히 이루어지고 있다. 이러한 표면 또는 표면에 분포하는 박막 등을 조사 분석하는 여러가지 연구방법들 중에서 극히 최근에 개발되어 그 사용이 급

증하고 있는 SE의 제작과 이를 이용한 불화박막의 분석에 관하여 논의하고자 한다.

이 글에서는 본 실험실에서 이미 제작하여 소개한 바 있는 회전편광자형의 SE를 그 구성부품의 미소결함에 의한 오차를 줄일 수 있는 배치인 회전검광자형의 SE로 재구성한 결과를 소개하며 SE를 사용하여 광학박막, 특히 불화광학박막의 분석에 응용한 예를 소개함으로써 이러한 SE의 국내제조 또는 국내에서의 SE와 관련된 연구활성화에 도움이 되고자 한다. 단일산화막의 두께 측정뿐만 아니라 산화막을 포함한 표면층들의 두께 및 각 성분의 조성비 결정, 결정의 정도와 비결정질의 밀도측정, 반도체 계면층의 연구, 표면의 거칠기 정도 및 void의 분포측정 등에 관하여 많은 연구결과들이 발표되었으나 이들에 관한 토의는 다음 기회에 하도록 하며 관심있는 독자들은 이에 관한 해설논문들을^[14-16] 참조하시기 바란다.

II. 회전검광자 (Rotating Analyzer, RA)형 SE

현재 국내외에 알려져 있는 SE들은 그 작동원리로서 다르지만 한 가지 공통적인 면은 종래의 단색광에서 작동하는 타원해석기가 검출되는 빛의 세기를 줄여가는 방식 즉 nulling type으로 작동되는데 비해 대부분의 SE는 회전하거나 변조된 능동광소자의 변위에 따르는 광량을 측정하는 방식(photometric type)으로 작동된다는 점이다. 여기서는 광원-단색분광기(monochromator)-편광

*본 연구는 교육부 기초과학학술연구조성비 (BSRI-91-234) 및 한국과학재단 (903-0204-012-2)의 연구비지원을 받아 이루어 졌음.

자시료-회전검광자-광측정 장치로 이루어진 하나의 SE 방식에 대해 그 구성원리 및 작동방법을 간단히 알아 보겠다. 이러한 RA형 SE의 기본구조는 그림 1에 나타난 바와 같으며 이 RA형 SE의 작동원리는 다음과 같다.

1. Ideal system

각 구성성분이 이상적인 부품들로 구성되어 있을 경우 즉 광원은 비편광상태 또는 원편광상태에 있으며 편광자나 검광자의 광소멸계수(extinction coefficient)는 영이며 이들에 의한 광활성도 없으며 광측정장치인 광증배관은 측정하는 영역에서 선형특성을 가지며 암전류(dark current)가 없다면, 그리고 검광자의 회전속도는 균일하며 이에 따라 회전검광자와 연결되어 있는 엔코더에서 발생하는 신호들이 균일하고 A/D 변환기의 잡음 등을 무시할 수 있다면 회전검광자의 회전각의 함수로써 측정되는 빛의 세기는 다음과 같이 표현된다.

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

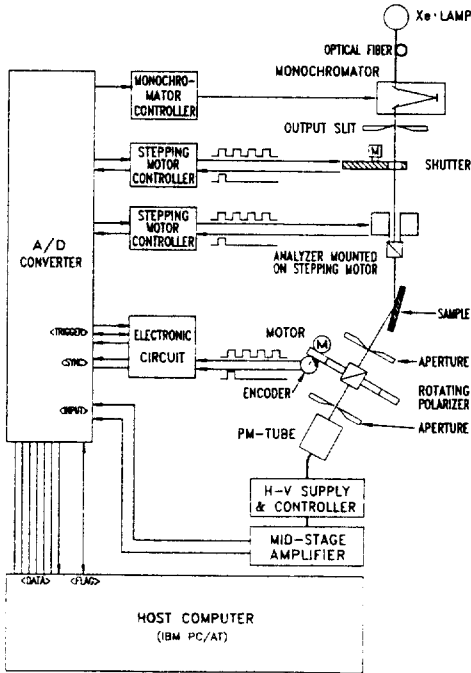


그림 1. RA형 SE의 개략적 구조도

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

여기서 A와 P는 각각 입사면에 대해 측정된 검광자 및 편광자의 각도값으로써 $A=2\pi ft + A_o$ 이며 f는 검광자의 회전수, A_o 는 검광자의 초기위상을 나타낸다. r_p 와 r_s 는 각각 반사에 따르는 p파(전기장이 입사면에 나란한 방향으로 진동하는 선편광파) 또는 s파(전기장이 입사면에 수직인 방향으로 진동하는 선편광파)의 Fresnel 반사계수를 가리킨다. 이 r_p 와 r_s 로써 타원해석법에서 사용되는 두 상수인 Δ 와 Ψ 는

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

와 같이 정의된다.^[17] 이 Δ 와 Ψ 는 각각 실수각으로써 $\tan \Psi$ 는 반사에 따른 p파와 s파의 진폭의 비, Δ 는 반사에 따른 p파와 s파의 위상변화의 차이를 나타낸다. (3)식을 이용하고 (1)식과 (2)식을 비교하면

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

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

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

$$\tan \Psi = \tan P ((1 + \alpha_o)/(1 - \alpha_o))^{1/2} \quad (6)$$

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

로 주어지며 α_o 와 β_o 는 (2)식에서 주어진 바와 같이 빛의 세기를 회전검광자의 각도에 따른 삼각함수로 표현했을 때의 cosine과 sine의 계수이다. 이 계수들은 A_j와 I_j를 각각 j번째의 엔코더신호가 들어 올 때의 검광자의 각도 및 광증배관을 통하여 측정되는 빛의 세기라 하면 $A_j - A_o = 2\pi j/N$ ($j = 1, 2, \dots, N$)이므로 삼각함수에 관한 Fourier 전개식을 사용하면 다음과 같이 구해진다.

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

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

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

이상과 같은 식들은 이상적인 부품들로 구성된 SE에 적용이 되는 식들로서 실제 SE에서는 사용된 각 부품이 지니고 있는 미소결함에 의한 영향을 보정해 주어야 한다. 그러나 이러한 미소결함의 원인과 그 영향 및 보정방법 등에 대해서는 본 연구에서는 토의를 삼가하고자 하며 이미 발표된 다른 논문들을 참고하기를 바란다.^[5, 18]

2. Calibration

Calibration과정은 입사광과 반사광으로 만들어지는 입사면에 대해 편광자와 검광자의 영점을 정확히 구하고 각 부품의 미소결함이 이 편광자 및 검광자의 영점 및 타원해석상수의 정확도에 미치는 영향을 계산, 보정해주는 일련의 과정으로써 데이터의 정확도를 향상시키기 위해 필수적인 단계이다. 이 calibration과정은 각 타원해석기의 구성원리에 따라 서로 다르기 때문에 여기에서는 RA형 SE의 calibration과정을 설명하도록 한다. Calibration과정의 첫번째 단계는 검광자의 영점을 구하는 것으로써 이는 Aspnes가 사용한 방식을 따른다.^[6] 즉 모든 부품의 미소결함을 무시할 수 있을 때 편광자의 영점 P_0 는 소위 Residual이 최소가 되게하는 검광자의 두 각도를 P_1, P_2 라고 할 때

$$P_0 = 1/2 (P_1 + P_2 - \pi/2) \tag{9}$$

으로 표현된다. Residual ($R = 1 - \alpha_0^2 - \beta_0^2$)은 P_1 근방에서 아래 (10)식과 같이 2차함수로 근사시킬 수 있으므로 최소자승법을 사용한 C_1, C_2 의 최적근사값으로써 P_1 을 표현할 수 있다.

$$R(P) = C_0 + C_1 P + C_2 P^2 \tag{10}$$

$$P_1 = -C_1 / 2C_2 \tag{11}$$

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

$$C_0 = [r_0(p_2 p_4 - p_3^2) + r_1(p_2 p_3 - p_1 p_4) + r_2(p_1 p_3 - p_2^2)]/d \tag{12a}$$

$$C_1 = [r_0(p_2 p_3 - p_1 p_4) + r_1(p_0 p_4 - p_2^2) + r_2(p_1 p_2 - p_0 p_3)]/d \tag{12b}$$

$$C_2 = [r_0(p_1 p_3 - p_2^2) + r_1(p_1 p_2 - p_0 p_3) + r_2(p_0 p_2 - p_1^2)]/d \tag{12c}$$

$$d = p_0 p_2 p_4 + 2p_1 p_2 p_3 - p_2^3 - p_0 p_3^2 - p_1^2 p_4 \tag{12d}$$

$$p_k = 1/N \sum_{j=1}^N P_j^k \tag{12e}$$

$$r_k = 1/N \sum_{j=1}^N R_j P_j^k \tag{12f}$$

여기서 R_j 는 편광자의 각도가 P_j 일 때의 R 값을 나타낸다. 또한 편광자의 각도가 $P_1 + \pi/2$ 근방에서도 R 은 (10)식과 같이 2차함수로 근사시킬 수 있으며 그 R 이 최소일 때의 편광자의 각도인 P_2 를 구하여 이들 P_1, P_2 로부터 (9)식과 같이 P_0 를 구한다. 검광자의 초기위상 즉 $t=0$ 때의 검광자의 각인 A_0 는 편광자가 P_0 의 위치에 있을 때 측정된 (2)식의 cosine과 sine의 계수인 α', β' 으로써 아래식과 같이 표현된다.^[19]

$$A_0 = -1/2 \tan^{-1} (\beta'/\alpha') \tag{13}$$

따라서 검광자의 각도가 $A-A_0$ 일때 측정된 (2)식에 해당되는 빛의 세기에 관한 cosine과 sine의 계수인 α', β' 으로써 검광자의 각도가 A 일 때 측정되는 (2)식의 cosine과 sine의 계수 α, β 은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \alpha' \cos 2A_0 - \beta' \sin 2A_0 \tag{14}$$

$$\beta = \alpha' \sin 2A_0 + \beta' \cos 2A_0 \tag{15}$$

III. 제 작

본 연구실에서 제작된 RA형 SE는 그 주된 구성요소로써 백색광원, 편광자, 시료, 회전검광자 그리고 광측정장치와 이들에 관련된 전자회로 및 이들을 총괄하고 제어하는 컴퓨터로 이루어져 있다.

광원은 비교적 넓은 파장영역에서 상대적으로 고른 세기를 보여주는 Xe고압방전램프를 사용하였다. Xe램프에서 나온 빛이 광케이블(optic fiber)을 통해 단색분광기(monochromator)로 들어가도록 어댑터를 만들어 연결하였다. 단색분광기는 2개의 회절격자(grating)를 교대로 사용하여 175 nm~1000 nm의 파장대역을 갖도록 하였다. 회절격자는 파장에 따라 다중중첩효과를 가지고 있기 때문에 이 다중중첩효과를 제거하기 위하여 270 nm~550 nm의 파장에서는 투명필터(clear filter)를 550 nm이상의 파장에서는 황색필터(yellow filter)를 각각 사용하였다. 또한 타원해석상수 측정전에 단색분광기에서 나오는 광선의 다른 빛의 세기를 측정하여 보정해주기 위하여 단색분광기에서 나오는 광선을 차단하는 서터를

장치하였다. 원판에 60°도 간격으로 직경 ~2 cm의 구멍을 5개 뚫고 두 개의 구멍에 황색필터와 투명필터를 부착하였으며 구멍이 없는 부분을 셔터로 사용하였다. 컴퓨터로 모터구동회로를 제어, 스테핑모터를 구동하여 측정 파장값에 따라 원판을 회전시켜 적당한 필터나 셔터를 선택하였다. 또한 단색분광기도 Orielsa 조절기(controller, Model 78200)와 실험실에서 제작한 릴레이 회로를 사용하여 0.5 nm의 정확도를 가지고 파장을 선택할 수 있도록 하였다. 필터를 통과한 빛은 편광자에 의해 선평광상태로 변하며 이때 사용된 편광자는 215 nm~2300 nm의 투과대역을 가지는 단결정 Glan-Taylor 편광자(Polarizer)이었다. 원통형의 지지대를 만들어 편광자를 지지대에 고정시켰으며 지지대의 동축에 산수가 64인 큰 타이밍풀리를 끼우고 매 스텝당 1.8°의 회전각을 갖고있는 스테핑모터에 산수가 25인 작은 타이밍풀리를 끼워 타이밍벨트로 대풀리와 소풀리를 연결하여 스테핑모터의 매 스텝당 편광자가 0.72°씩 회전하도록 하였다. 또한 투과형 광검지장치를 대풀리에 부착하여 편광자의 회전기준위치를 정하였다. 편광자로부터 분리되어 나오는 원하지않는 빛은 가변조리개를 사용하여 차단하여 시료면에 입사되지 않도록 하였다.

시료지지대는 x-y 방향(시료면의 방향)과 z방향(시료면에 수직인 방향)의 미시적인 선형이동 그리고 x, y 각축 주위의 미시적인 회전 및 기울기조정이 가능하도록 하여 측정하고자 하는 시료위치를 광축의 중심에 갖다 놓을 수 있고 시료면이 광축에 바로 정렬할 수 있도록 제작하였다. 또한 시료표면의 파손 및 훼손 등을 피하고 시료 취급상의 용이함을 위하여 진공흡착 방식으로 시료를 지지할 수 있게 하였다. 시료에서 반사되는 빛은 대개 타원편광상태로 변하며 이 타원편광상태의 빛은 검광자로 입사된다. 검광자는 편광자와 같은 Glan Taylor 편광자를 사용하였다. 검광자는 축에 직경 6 mm 정도의 구멍이 축방향과 나란하게 뚫려있는 원통형 지지대에 장치하며 축의 한쪽에는 엔코더와 타이밍풀리를 장착하여 DC모터에 끼워져 있는 풀리와 타이밍벨트로 연결, 대략 ~5 Hz의 일정한 속도로 회전하도록 하였다.

검광자에서 나온 광은 광검출기인 광증배관(PM-tube)으로 입사되며 본 실험에서 사용된 광증배관은 측정 가능한 파장영역이 약 200 nm~850 nm인 side-on형(Hamamatsu, R2949)이다. 이 광증배관에 공급되는 고전압(0V~ -1000 V)은 Orielsa의 측정장치(Model 7070)에 의해 공급되며 광증배관에서의 약한 광전류를 동일한 측정장치(Model 7070)를 사용하면 최대 100 mV의 전압신호로 변환시킬 수 있으며 A/D변환기의 효율을 최

대로 하기 위해 이 신호를 중간증폭단계인 operational amplifier를 사용하여 최대 10 V가 되도록 gain 및 zero offset을 조절하여 A/D변환기로 입력시켰다. 본 실험에서 사용된 A/D변환기 및 관련 프로그램들(IBM PC DAC Adapter #1502, #1504)은 12 bit의 분해능을 가지고 있으며 초당 8000회의 A/D변환을 가능하게 한다.

컴퓨터에 입력되는 빛의 세기는 검광자각도의 함수로 받아들여야 하므로 검광자의 초기위치와 데이터 입력위치의 신호를 필요로 한다. 엔코더의 Tz 신호를 기준으로 하였으며 엔코더에서 나오는 입력신호와 동기화시켜 광증배관에서 나오는 빛의 아날로그 세기를 A/D변환시켰다. 엔코더신호 위치에서의 정확히 동기화된 A/D 변환을 위한 동기회로는 그림 2에서 보여진 바와 같으며 엔코더신호가 매 회전당 3회 방출되며 2회전 연속하여 측정하는 가상적인 경우의 이 동기회로의 몇몇 위치에서 관찰되는 전압변화도 같이 나타내었다.

입사각을 바꿀 수 있게 하기 위하여 검광자, 단색분광기, 광측정장치들은 시료지지대의 중심축 주위로 회전할 수 있는 광학대 위에 장치시켰다. 측정가능한 입사각의 범위는 40°~90°이며 입사각의 오차는 ~0.05°이다.

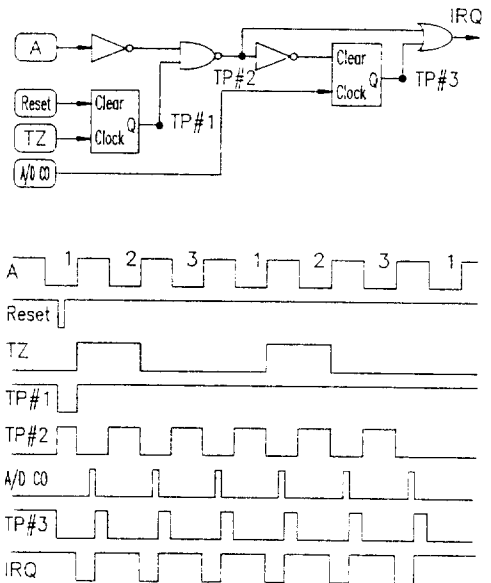


그림 2. 동기화된 연속 A/D변환을 위한 전자회로도. Encoder의 신호가 매 회전당 3회 방출되며 2회전 연속하여 A/D변환하는 경우에 이 회로의 몇몇 위치에서 관찰되는 전압 변화도 같이 나타내었다.

IV. 성능평가 및 검토

성능평가는 총괄적인 검토로써 아래와 같이 2가지의 경우로 나누어서 행하였다. 첫째는 straight through operation (STO), 즉 입사각을 90°로 하여 시료를 거치지 않고 직진하는 빛을 사용한 평가로써 SE 자체의 개략적인 성능, 즉 측정파장대역, 정밀도, 측정속도 그리고 각 부품의 미소결함 및 광학소자들의 정렬편차 등에 의한 총체적인 오차 등을 추정할 수 있다. 이 STO의 배치에 따르면 $r_p = -r_s$ 이므로 전체파장대역에 걸쳐 $\tan\Psi = 1.0$, $\cos\Delta = -1.0$ 를 만족하여야 한다. 실제의 SE에서는 $\tan\Psi$ 가 1.0으로부터 그리고 $\cos\Delta$ 가 -1.0으로부터 벗어나는 정도가 그 SE의 오차의 척도가 되며 또한 R이 영의 값으로부터 벗어나는 정도와 밀접한 관계가 있다. 즉 STO에서 $\tan\Psi$, $\cos\Delta$ 그리고 R의 값들은 SE의 오차의

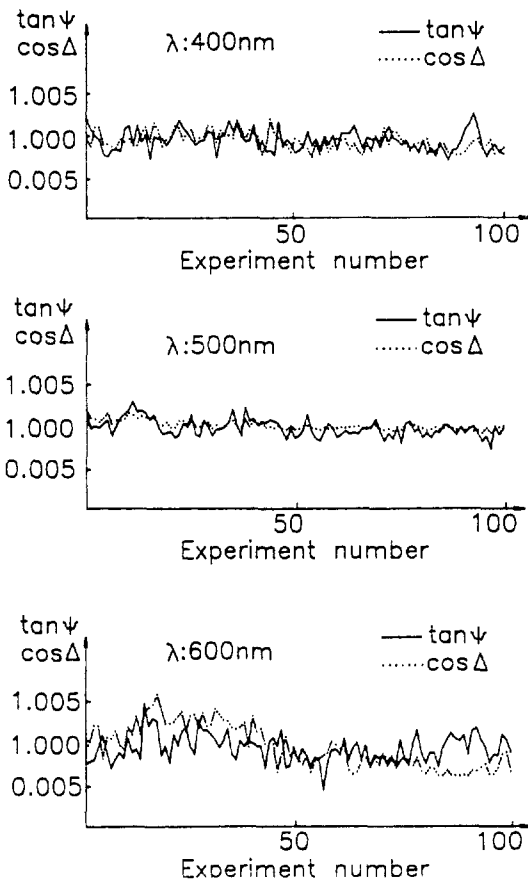


그림 3. Straight through operation에서 측정된 $\tan\Psi$ 와 $\cos\Delta$. 측정파장은 위에서부터 각각 400 nm, 500 nm, 그리고 600 nm이다.

정도를 나타내는 중요한 척도가 된다. 본 실험실에서 제작된 SE의 측정파장대역은 300 nm~850 nm이었다. 몇몇의 파장에 대하여 측정된 $\tan\Psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 값을 그림 3에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 측정파장대역의 가장자리로 갈수록 정밀도가 나빠지며 이들의 편차도 커졌다. 이러한 정밀도 등은 회전편광자의 회전수와 밀접하게 연관되어 있다. 즉 파장이 500 nm인 경우 이 회전수를 1, 4, 10, 100 등으로 증가시키면서 측정된 $\tan\Psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 값 (그림 4)에서 편광자의 회전수를 증가시키기에 따라 각 값들의 정밀도가 향상됨을 알 수 있다. 회전수가 100인 경우 $\tan\Psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 편차는 0.2% 내외의 값을 가지고 있으며 이 값은 본 실험실에서 제작된 SE가 기존의 다른 photometric SE에 비하여도 뒤지지 않는 성능을 가진 것으로 판단하게 한다. 둘째는 대표적인 하나의 반도체 시료 즉 규소층이 유전체층에 의해 두부분으로 나뉘어져 있고 상층부의 비정질규소층위에 자연산화막이 존재하며 기저층이 단결정규소인 시료를 측정된 결과를 분석, 검토하는 방법이다. 입사각을 70°로 하여 1.5 eV부터 4.1 eV (~300 nm-830 nm)까지 0.02 eV

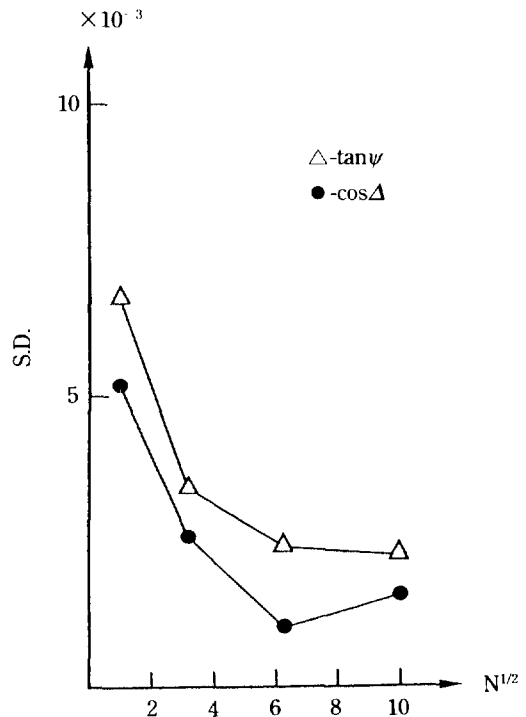


그림 4. 편광자의 회전수의 증가에 따른 $\tan\Psi$ 와 $\cos\Delta$ 의 편차의 감소. (straight through operation에서 측정. 측정 파장은 500 nm).

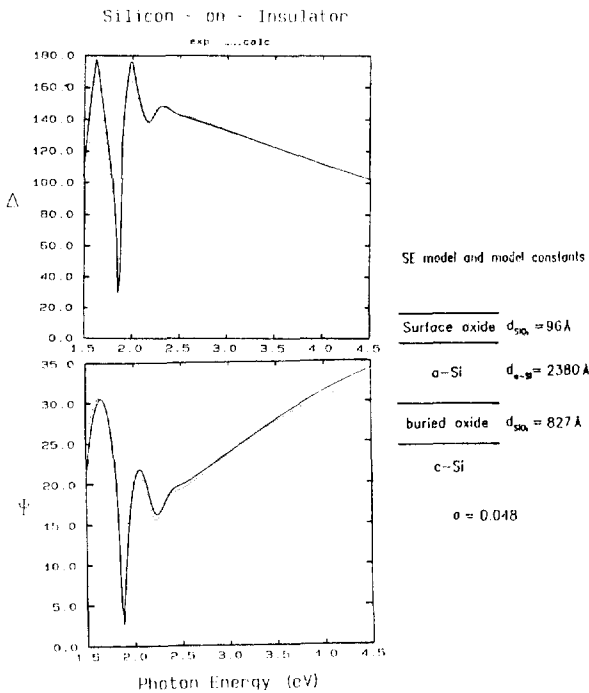


그림 5. SOI (Silicon-On-Insulator) 시료의 타원해석 스펙트럼 및 SE 모델상수.

의 간격으로 파장을 증가시키면서 측정된 Δ 와 ψ 의 스펙트럼은 표면산화막의 두께가 96 \AA 이며 상층부의 비정질규소층 (isolated amorphous silicon layer)의 두께가 2380 \AA 그리고 유전체(SiO_2 , buried oxide)층의 두께가 887 \AA 인 SE모델에 의한 Δ , ψ 의 스펙트럼과 서로 잘 일치함을 확인할 수 있다. (그림 5 참조)

V. 불화광학박막의 분석

대부분의 광학박막은 경계면에서 빛의 반사를 최소한으로 하거나 어떤 특정한 파장대역의 빛만을 일부 또는 전부를 투과 또는 반사시키는 것이 그 요구되는 주요 특성으로 유전체물질을 그 박막의 재료로 주로 사용한다. 지금까지 여러 종류의 박막증착에 따른 기술축적이 이루어져 왔고 단일박막의 기본적인 광학적 특성에 관한 연구에서 알려진 바와 같이 대부분의 박막의 굴절율은 박막물질의 체적굴절율 (bulk refractive index)보다 크지 않으며 이는 박막의 광투과율과 더불어 박막형성의 제반 실험환경등에 크게 영향을 받는다. 많은 유전체박막은 원추 또는 기둥모양으로 성장함에 보고되었고 기저층의 온도가 증가함에 따라 대개 비정질에서 결정질로 변화

하며 초기 성장시에 형성된 성장핵 또는 작은 결정들이 박막의 성장과 더불어 응집하기도 하며 핵간에 빈 공간들도 형성되는 비교적 복잡한 미세구조를 가지게 된다. 이 박막내의 미세구조는 박막 성장조건, 즉 기저층의 온도, 산소 또는 질소등의 분압, 증착속도, 증착방법, 다른 보조방법의 사용여부등 많은 실험환경의 영향을 받으며 박막의 성장에 따른 비균질성은 박막의 두께에 따른 물리적 성질의 변화를 있게 하는 근본 원인이 된다. 따라서 박막은 이방성을 가지고 복굴절을 나타내기도 한다. 이같은 박막 구조의 복잡함과 표면층의 미시거칠기등이 이러한 박막의 광학적 기본특성 즉 박막의 두께 및 굴절율을 측정하는데 어려움을 주는 근본이유가 된다. 이러한 박막 분석의 어려움은 동일한 조건하에서 제작된 Sc_2O_3 박막을 8개의 서로 다른 연구실에서 서로 다른 방법으로 분석한 결과를 비교하면 쉽게 이해할 수 있겠다.^[20] 박막두께의 경우 대략 2%, 박막굴절율의 경우 4% 정도의 연구실간의 차이를 볼 수 있다. 이같은 차이는 박막내에 존재하는 비균질성을 취급하는 박막모형의 차이에서 기인한 것으로 이 비균질성에 의한 효과는 spectro-photometric 방법에 의한 굴절을 측정시 보여진 error bar의 크기분포에서도 쉽게 알 수 있다.^[20] 이러한 유전체박막의 비균질성은 Macleod 등에 의해 계속 연구, 발표되었으며,^[21-23] void에 의한 비균질성 즉 박막깊이에 따른 void의 분포는 ZnS 박막과 MgO 박막의 경우 3 박막모형에 따라 SE스펙트럼을 분석하여 밝혀진 바 있다.^[24] 이 같은 3박막 모형은 rf-sputtered 비정질 Ge 박막등에서의 void 분포를 나타내는 박막모형과 유사한 것으로 박막성장이 초기 단계에는 성장핵 등에서 시작하여 원추등의 형태로 자라고 이들이 어느 높이에서 서로 만나게 되면 그 중 어느 한쪽이 우세하게 자라며 표면은 대략 구형의 일부들이 모인 꼴이 된다는 모형^[25]과 부합한다. 즉 초기단계에는 성장핵간의 공간에 해당하는 void가 존재하며 박막이 성장함에 따라 이 void의 함량이 점차 감소하며 대략 100 nm 정도의 두께에서는 박막의 밀도가 박막물질의 체적밀도와 거의 비슷해지며 표면에는 표면층의 굴곡에 해당되는 void가 존재한다. 3박막 모형은 이와 같이 성장단계에 따른 void의 분포를 3개의 박막으로 대치하여 나타내는 것으로 모델링방법으로 계산된 각 박막의 두께, void함량들은 실제 void분포를 3개 박막의 평균두께, 평균 void함량들로써 나타낸 것이다. 3박막모형은 이상과 같이 박막을 구성하는 물질의 굴절율을 알고 있을 때 뿐만이 아니라 이 박막을 구성하는 물질의 굴절율을 알지 못할 때에도 잘 적용이 된다. 대개의 유전물질은 그 굴절율이 다음과 같은 Sell-

meier형의 분산관계식을 만족하며 이 때 각 박막의 두께, void분포와 더불어 분산관계식의 계수들을 모델링과정에서 동시에 결정함으로써 이 미시박막의 굴절율까지 구할 수 있게 된다.

$$n^2(\lambda) - 1 = a + \sum_k \frac{b_k \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_k^2} \quad (16)$$

윗 식은 관심 파장영역에서 가장 가까운 진동자(oscillator)의 영향이 다른 진동자들에 의한 것보다 크게 작용할 때

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (17)$$

와 같이 근사시킬 수 있고 이때 A, B, λ_0 를 모델링과정에서 구함으로써 유전박막의 void 분포와 박막 구성물질의 굴절율 분산관계식을 동시에 구할 수 있다. 예를 들어 박막의 두께가 114 nm인 MgO 박막의 굴절율을 이러한 방법으로 구한 경우 그 굴절율의 오차는 250 nm-1000 nm의 파장영역에 걸쳐 0.2%를 초과하지 않았으며^[26] 체적굴절율이 알려져 있지 않은 ThF₄, CeF₃, HfF₄, LaF₃, F₃, ScF₃, cryolite 등의 박막에 대해서도 굴절율 분산관계식을 구할 수 있었다. ThF₄, CeF₃, HfF₄, LaF₃ 등의 박막에서 구해진 이들의 굴절율 분산그래프는 그림 6에서 나타내었다.

3박막모형에서는 박막의 초기형성 단계의 void분포, 박막의 void free 성장단계, 박막표면의 미시거칠기등을

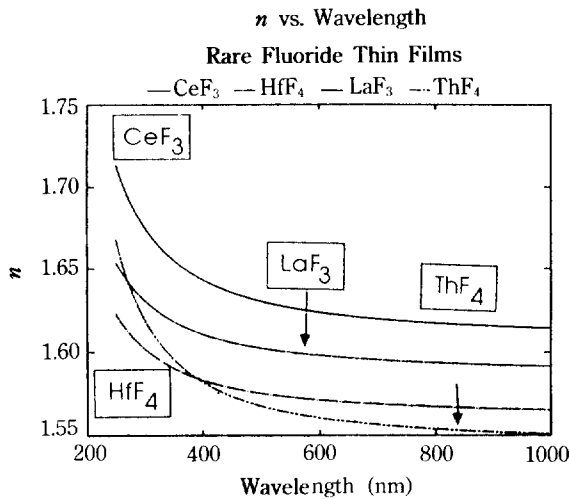


그림 6. 박막으로부터 구해진 ThF₄, CeF₃, HfF₄ 그리고 LaF₃의 굴절율 변화곡선.

박막의 각 대응 부분의 실효두께, 평균 void함량등으로 박막의 미세구조 및 광학적특성을 나타내는 것으로 박막의 두께가 커질때는 3박막모형으로도 불충분할 때가 있다. 이러한 경우 void의 분포등을 더욱 정확하게 나타내기 위하여 초기형성단계에 해당되는 부분을 서로 다른 void함량을 가진 여러개의 박막으로 구성되어 있으며 이들이 실제의 void분포를 근사적으로 나타낼 수 있도록 각 박막의 두께, void함량등을 최적화하는 모델을 사용한다. 이렇게 하여 분석한 약 0.6-0.7 미크론의 두께를 가진 SmF₃ 박막의 void분포를 그림 7에 나타내었다. 이 그림에서 보여진 바와 같이 SmF₃ 박막은 SiO₂ 기저층에서 부터 상당히 떨어진 영역까지 void를 가지고 있으며 이 void의 분포나 함량은 이온보조증착(IAD)^[27]의 여부에 따라 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 즉 IAD를 한 SmF₃ 박막의 경우 void의 분포가 표면에 밀집해 있으며 IAD를 하지 않은 박막의 경우보다 void free 성장단계에서는 박막의 밀도가 높음을, 즉 void의 함량이 낮음을 알 수 있다. SmF₃의 굴절율을 나타내는 분산관계식의 계수들은 ThF₄, CeF₃, HfF₄, LaF₃, YF₃, ScF₃, 그리고 cryolite들의 3박막 모델상수 및 분산관계식의 계수들과 같이 표 1에 나타내었다.

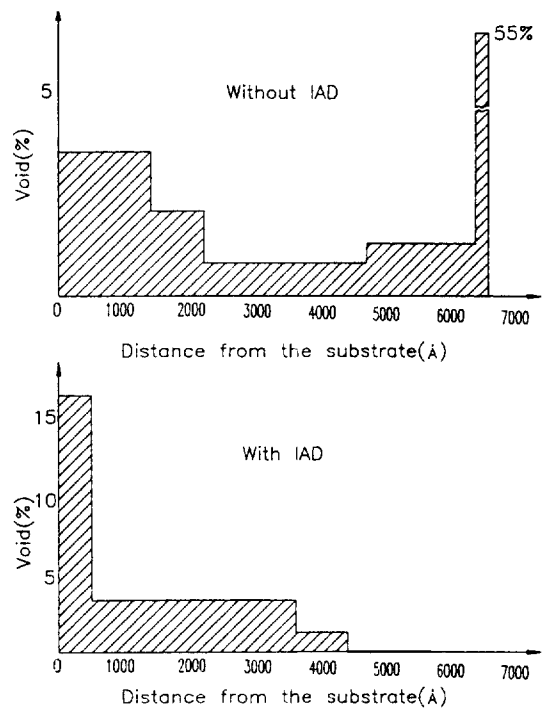


그림 7. SmF₃ 박막의 두께에 대한 void분포.

표 1. 박막 데이터로부터 구해진 3박막 모델상수 및 분산관계식의 계수

Sample	A	B	λ_0 (nm)	σ	void (%), thickness (nm)					
					표면층		중간층		초기층	
ThF ₄	1.6768	0.7117	148.9	0.004	48.7	1.84	—	138.6	8.5	39.1
CeF ₃	1.6155	0.9728	128.4	0.004	67.6	10.4	—	116.8	0.8	27.5
HfF ₄	1.5722	0.8591	126.1	0.0039	45.3	5.0	—	132.2	5.1	36.5
LaF ₃	1.7014	0.8223	112.5	0.0055	67.1	11.9	—	148.4	—	—
YF ₃	1.5072	0.6275	125.1	0.0072	—	—	—	157.7	—	—
SmF ₃	1.8764	0.6143	134.2	0.0089	—	—	—	—	—	—
ScF ₃	1.5856	0.5052	153.0	0.0089	—	—	—	226.1	—	—
Cryolite	1.6049	0.2718	52.9	0.009	43.6	13.4	—	210.6	—	—

SE model and model constants Surface oxide $d_{SiO_2} = 96 \text{ \AA}$ a-Si $d_{a-Si} = 2380 \text{ \AA}$ buried oxide $d_{SiO_2} = 827 \text{ \AA}$ c-Si $\sigma = 0.048$

VI. 맺음말

당 실험실에서 제작된 SE는 RA형 SE로써 외란광의 영향을 최소로 하기위하여 calibration 과정에 더하여 암실에서의 측정이 불가피한 단점이 있다. 1.5 eV-1.7 eV의 영역에서 광신호의 세기가 약하여 외란광의 영향을 특히 많이 받기 때문에 광의 세기를 Fourier변환하는 방식을 탈피하여 광자계수 (photon counting)방식을 사용하는 SE로의 변환을 연구중이다. 현재 측정대역이 1.5 eV-4.1 eV (~300 nm-850 nm)이나 단색분광기의 회절격자를 교환함으로써 1.5 eV-5.5eV (~230 nm-850 nm) 까지 확장할 수 있다. 전체적으로 STO측정, SOI시료의 depth profile등의 결과를 비교하여 불 때 대부분의 photometric SE와 비슷한 0.2% 내외의 정밀도를 가진 것으로 판단된다. 앞으로 반도체표면 및 관련박막 또는 광학박막의 비파괴적, 비간섭적 (non-disturbing), in-situ, real time 측정 및 분석을 필요로 하는 분야를 중심으로 국내에서의 SE 관련연구가 활성화되기를 기대한다.

VI. 감사의 말

마지막으로 SE를 제작할 때 도움을 주신 원 영희 교수님과 불화박막의 측정등에 도움을 주신 펜실베니아주립대의 K. Vedam 교수님께 감사를 드린다.

참 고 문 헌

[1] F. L. McCrackin, E. Passaglia, R. R. Stromberg, and H. L. Steinberg, J. Res. Nat. Bur. Std., **67A**, 4, 363 (1963).

[2] A. K. N. Reddy, M. A. Genshaw, and J. O'M. Bockris, J. Chem. Phys., **48**, 2, 671 (1968).
 [3] A. Hamnett and A.R. Hillman, J. Electroanal. Chem., **233**, 125 (1987).
 [4] R. Scheps, J. Electrochem. Soc., **131**, 3, 540 (1984).
 [5] D. E. Aspnes, J. Opt. Soc. Am., **64**, 6, 812 (1974).
 [6] D. E. Aspnes and H. Arwin, J. Opt. Soc. Am., **73**, 12, 1759 (1983).
 [7] D. E. Aspnes and A. A. Studna. Rev. Sci. Instrum., **49**, 3, 291 (1978).
 [8] D. E. Aspnes, SPIE, **276**, 188 (1986).
 [9] S. Y. Kim and K. Vedam, Applied Optics, **25**, 12, 2013 (1986).
 [10] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, (Academic Press, New York, 1985).
 [11] D. E. Aspnes and A. A. Studna, Phys. Rev. B, **27**, 2, 985 (1983).
 [12] D. E. Aspnes, S. M. Kelso, R. A. Logan, and R. Bhat, J. Appl. Phys., **60**, 2, 754 (1986).
 [13] G. E. Jellison, Jr. and F. A. Modine, J. Appl. Phys., **53**, 5, 3745 (1982).
 [14] D. E. Aspnes, J. PHYSIQUE, **C10**, 3 (1983).
 [15] D. E. Aspnes, SPIE, **946**, 84 (1988).
 [16] 김상열, 한국 광학회지, 제1권 제1호, 73 (1990).
 [17] Rolf Muller, Surf. Sci., **16**, 14 (1969).
 [18] K. Riedling, *Ellipsometry for Industrial Applications*, Springer-Verlag, New York (1988).
 [19] from the technical manual of SOPRA EG2G.
 [20] 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. Thonn, *Appl. Opt.*, **23**, 20, 3571 (1984).
- [21] H. A. Macleod, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A4**, 3, 418 (1986).
- [22] M. Harris, M. Bowden and H.A. Macleod, *Optics Commun.*, **51**, 1, 29 (1984).
- [23] D. F. Bezuidenhout, K. D. Clarke, and R. Pretorius, *Thin Solid Films*, **155**, 17 (1987).
- [24] K. Vedam, S. Y. Kim, L. D'Aries, and A. H. Guenther, *Opt. Lett.*, **12**, 7, 456 (1987).
- [25] R. A. Roy and R. Messier, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A42**, 312 (1984); R. A. Roy and R. Messier, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **38**, 363 (1985).
- [26] K. Vedam and S. Y. Kim, *Applied Optics*, **28**, 4, 2691 (1989).
- [27] K. K. Schuegraf, *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques*, p. 380-p. 390, Noyes Publications, New Jersey (1988); C. K. Hwangbo, L. J. Lingg, J. P. Lehan, H. A. Macleod, J. L. Makous and S. Y. Kim, *Appl. Opt.*, **28**, 4, 2769 (1989); C. K. Hwangbo, L. J. Lingg, J. P. Lehan, H. A. Macleod, and F. Suits, *Appl. Opt.*, **28**, 4, 2779 (1989).

Fabrication of a Rotating Analyzer type Spectroscopic Ellipsometer and Characterization of Fluoride Thin Films

Sang-Yeoul Kim

Department of Physics, Ajou University, Suwon 441-449

(Received April 20, 1992)

A Spectroscopic Ellipsometer(SE) is fabricated. The PSA configuration of the rotating analyzer type where the effects of the imperfect optical elements can be minimized is adopted. The straight through operation shows that the standard deviations of $\tan\psi$ and $\cos\Delta$ are less than 0.2% in the spectral range of 300nm-850nm. From the film data of ellipsometric spectra the bulk dispersion relation of a few fluorides and the void distribution inside the fluoride thin films are obtained.