Journal of the Korean Vacuum Society
Vol. 8, No. 4(1), November 1999, pp. 432~437

보급형 He-Ne 타원해석기의 제작과 TiO_2 박막 유효밀도 변화의 *in-situ* 측정

김상준 · 방현용 · 김상열
아주대학교 자연과학대학
(1999년 6월 26일 접수)

Fabrication of He-Ne ellipsometer and *in-situ* measurement of effective density variation of TiO_2 thin films

Sang-June Kim, Hyun Yong Pang and Sang Youl Kim
442-749, Suwon, Natural Science College, Ajou University
(Received June 26, 1999)

요 약 – 실시간으로 변화하는 시료를 측정하고 분석할 수 있도록 비접촉식이며, 광학 방식인 단파장 *in-situ* 타원해석기를 제작하였다. He-Ne 레이저를 광원으로 사용하였고 회전검광자형 광량측정방식을 채택하였다. 기존의 진공챔버 등에 쉽게 장착할 수 있도록 동축 구조를 사용하였으므로 소형이며 단순한 설계가 가능하여졌다. 전자빔 증착 방법으로 성장시킨 조밀도가 82%인 이산화티타늄 박막의 분석에 이 타원해석기를 사용하여 수분 탈착에 따르는 이산화티타늄 박막의 유효밀도 변화를 박막의 온도 변화와 시간 변화에 따라 실시간, in situ 방식으로 관측하였다.

Abstract – We have fabricated an in situ ellipsometer operating at He-Ne wavelength. It can be applied to the real-time, *in-situ* tracking of the ellipsometric change which occurs during various sample treatments. As a rotating analyzer type, all optical elements and related parts are designed to share a common hollow-axis configuration, and hence the ellipsometer is compact in shape and simple in design. It is mountable on the spare ports of vacuum chamber with ease. Using this ellipsometer, we observed the effective density variation of previously grown TiO_2 thin films by using electron beam evaporation. The packing density of the as-grown film was 82%. When exposed to atomsphere, the micro-void of the film was filled with water vapor. This water-filled TiO_2 thin film was subject to heating/cooling cycles in vacuum and the ellipsometric variation versus temperature and cycling number was measured in real time using this in situ He-Ne ellipsometer.

1. 서 론

과학기술 및 산업의 발달로 인하여 공정 상에서의 실시간 측정의 중요성이 대두되고 있다. 일반적으로 공정 후에 채취한 몇 개의 시료들로 공정과정 또는 전 제품에 대한 평가를 해왔지만, 현재 산업사회에서는 불량률 0%에 도전한다는 취지아래 대부분의 반도체 공정, 박막 제조 공정에서 박막의 두께, 굴절율, 물질의 조성비 등을 알아내는 것이 긴요한 과제로 대두되고 있으며, 이를 위하여 실시간으로 제품의 품질을 평가하는 장비가 요구되고 있다 [1]. 또한 학문적으로도 온도변화에 따른 결정상의 변화나 수분함량의 변화 등의 시간에 따른 물성 변화나 박막의 증착과정 중 박막의 성장기구 등을 관측하는 실시간 측정장치가 유용하게 사용될 수 있다. 한편 시료 표면에서 반사한 빛의 편광상태는 표면, 박막에 예민하게 반응한다. 타원해석법은 비간섭성, 비접촉성, 편광측정 특성 등의 몇 가지 고유한 장점으로 인하여 박막 및 표면 분석 장비로써 각광을 받고 있다 [2].

타원해석기는 이상과 같은 장점을 가지는 반면 편광상태의 제어 및 측정을 필요로 하기 때문에 다른 일반

적인 광학장비에 비해 제작이 까다롭다. 상용화된 제품의 경우 상대적으로 고가이며 기기의 사용방법이나 측정 데이터의 해석이 어려운 단점도 있다. 최근에는 기기의 자동화 및 분석 프로그램의 발전으로 비전문가도 비교적 용이하게 접근할 수 있게 되었으나 기기 자체의 가격은 아직 상대적인 고가를 유지하고 있는 실정이다 [3]. 따라서 국내 타원해석기를 이용하는 연구 또는 분석의 활성화를 이루기 위해서는 국내에서 제작된 저가형 타원해석기의 보급이 긴요하다고 하겠다. 본 연구에서는 이러한 요구에 부응하는 단파장 타원해석기를 제작하고 이를 TiO_2 박막의 유효밀도 변화의 in situ 실시간 측정에 적용하여 그 유용성을 보이고자 한다.

TiO_2는 백색안료, 촉매물질 등으로 산업적으로 널리 이용이 되고 있으며, 광학 박막으로는 고 굴절율 박막물질로써 저 굴절율 상대 물질인 SiO_2 등과 함께 무반사 코팅, 광학필터 등의 제작에 널리 이용되고 있다. 이들 산화막은 가시광선 영역에서의 높은 광 투과특성을 가지고 있는 동시에 기계적, 화학적 안정성이 뛰어나지만 다른 박막들과 마찬가지로 박막 제작방식이나 제작과정에 따라 박막의 구조나 조밀도가 다르게 되고 조밀하지 않은 박막내부에는 미세공간이 존재하게 된다. 박막이 장시간 공기 중에 노출되었을 때, 조밀하지 않은 박막내부의 미세공간으로 대기중의 수분이 흡수되며 수분의 흡수에 따라 굴절율이 증가하여 스펙트럼이 장파장으로 이동하는 현상은 광학박막 종사자들에게는 잘 알려져 있다.

본 연구에서는 실험실에서 자체 제작한 보급형 He-Ne 타원해석기의 구조와 작동 원리에 대하여 간단히 소개하고, 이를 TiO_2 박막의 유효밀도 변화의 in situ 실시간 측정에 적용하여 그 유용성을 보이고자 한다.

2. *In-situ* 타원해석기

물질의 표면에서 반사하는 빛의 편광상태는 시료의 광물성과 표면구조에 영향을 받아 입사된 빛의 편광상태와는 달라지게 된다. 시료표면에 대한 반사전후의 편광상태의 변화를 파악하면 시료의 광물성과 구조에 관계된 정보를 역으로 추적해낼 수 있다. 타원해석법의 기본적인 관계식들은 맥스웰 방정식으로부터 유도되며, 반사 타원해석법에서는 p파와 s파의 프레넬 반사계수의 비로 타원해석상수 Ψ와 Δ를 식 (1) [1, 5]과 같이 정의한다.

$$\rho = \tan\Psi \exp(i\Delta) = \frac{r_p}{r_s} \quad (1)$$

타원해석기는 측정되는 빛의 세기가 0이 되는 조건을 이용하는 소광 타원해석기와 측정되는 빛의 세기를 편광자나 검광자의 회전각의 함수 또는 위상변조 방위각의 함수로 측정하여 이로부터 타원해석상수를 구하는 광량 측정방식의 타원해석기들이 있다. 광량 측정방식의 타원해석기는 컴퓨터 및 전자회로등을 이용하면 고속, 자동화할 수 있을 뿐만이 아니라 분광타원해석 측정 또한 쉽게 이룰 수 있기 때문에 대부분의 상용화된 제품들은 이 방식을 채택하고 있다. 보급형으로 제시되는 타원해석기는 Hauge에 의해 제안되고 [4] Aspnes 등에 의해 분광화가 이루어진 회전검광자형으로 구조가 간단하며 작동원리의 분석이 용이한 장점을 가지고 있다. 제작된 타원해석기는 편광자, 시료, 검광자로 구성된 PSA 구조를 기본으로하며, 필요에 따라 시료와 검광자 사이에 위상지연판인 보정기가 있는 PSCA 구조로 쉽게 변환이 되도록 하였다.

광원인 He-Ne 레이저를 포함하는 편광자 모듈과 광량 측정용 Si 광다이오드 및 주변 전자회로를 포함하는 검광자 모듈의 개략적인 구조는 그림 1과 같다. 편광자는 두께가 0.75 mm이며 편광소거율이 10^{-4}인 편광판 (sheet polarizer)을 사용하여 편광자를 통과하는 빛의 광축이동을 최소로 줄였다. 이 편광자는 스테핑모터의 회전축 상에 수직으로 장착하고 마이크로스텝 구동기를 사용하여 스테핑모터를 구동함으로써 그 방위각설정을 0.01도의 정확도를 가지고 할 수 있도록 하였다. 광원으로 사용된 632.8 nm 파장의 He-Ne 레이저는 직선편광을 내므로 4분파장 위상지연자를 부착하여 원편광으로 바꾸었다. 이렇게 함으로써 시료에 입사하는 빛의 세기가 편광자의 방위각에 무관하게 일정하게 유지되므로 안정한 타원해석 측정을 할 수 있다. 검광자 모듈에서는 증폭회로가 내장된 광량 측정용 Si 광다이오드를 사용함으로써 주변 전자회로를 간단하게 구성할 수 있도록 하였다. 검광자는 편광자와 동일한 종류의 편광판을 사용하였다. 검광자를 구동시키는 구동장치로는 직류모터 및 구동기를 사용하였다. 이 직류모터/구동기 시스템은 홀 센서와 되먹임 회로가 장착되어 있으므로 원하는 모터의 회전속도를 2%의 오차범위에서 일정하게 유지할 수 있다. 검광자가 장착된 모터는 기기 사용자가 원하는 속도에 맞추어 회전할 수 있도록 주제어 컴퓨터의 A/D 변환기의 출력값이 모터 구동기에 입력되게 프로그램되어 있다. 이렇게 함으로써 회전 검광자의 회전속도와 회전방향을 기기 사용자가 임의대로 선정할 수 있게되어

사용의 편의성이 크게 향상되었다. 또한 필요에 따라 시료와 검광자 사이에 위상지연자를 간단하게 삽입할 수 있도록 하여 유전영역에서도 정확한 Δ의 측정이 이루어질 수 있게 하였다. 편광자 모듈과 검광자 모듈 모두에 공통으로 적용되는 사항으로 스테핑모터 및 직류모터 모두 동공축형을 사용하였다. 즉 광원으로부터의 빛이 모터회전축을 따라 진행하도록 하였다. 이렇게 함으로써 이 모듈들의 구조가 극히 단순하게 되었다. 아울러 편광자와 검광자의 각도를 읽어내기 위해 동공축형 광학엔코더를 축 상에 장착하였다. 이들 광학 엔코더는 편광자와 검광자의 원점위치를 지시하여 준다. 또한 편광자의 방위각은 이 광학 엔코더의 펄스수 또는 스테핑모터의 구동 스텝수로부터 정확하게 결정되며 오차는 1/100도 보다 작다. 회전 검광자의 경우 광학 엔코더로부터의 규칙적인 A 펄스 신호에 동기화하여 A/D 변환을 행한다. 사용된 엔코더의 1회전당 A 펄스 신호는 600개인데 필요에 따라 이를 2분주 또는 4분주하여 사용한다. 광학 엔코더로부터의 펄스 신호에 동기화하여 A/D 변환을 행하는 빠르기는 5 KHz 정도가 되도록 직류모터의 회전속도를 조절하였다. 타원해석기를 기존의 진공챔버에 장착하여 in situ 타원해석 측정을 할 때 어려움이 없도록 편광자 모듈과 검광자 모듈 모두 2-3/4" Del-Seal 플랜지 규격에 맞춘 취부대를 가지고 있다. 보정기는 위상지연각도가 90도인 4분파장 위상지연판을 이용

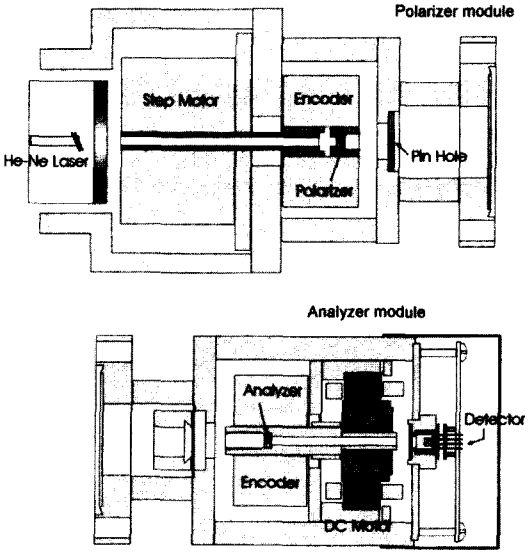

그림 1. *In-situ* 타원해석기의 편광자 모듈과 검광자 모듈의 개략적인 구조.

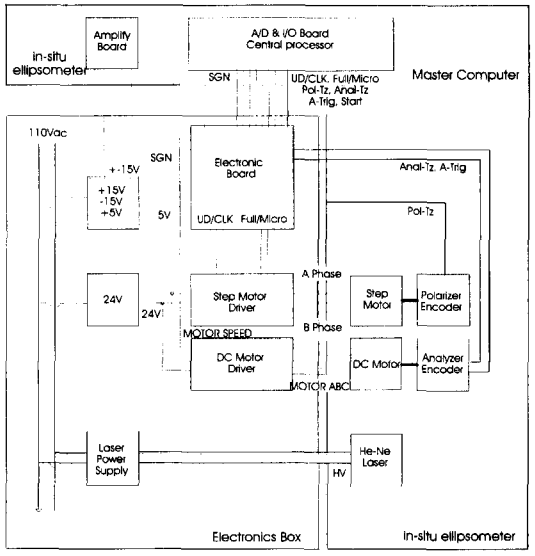

그림 2. In situ 타원해석기의 각 핵심 모듈간의 연결 및 신호처리 개략도.

하였으며 위상지연판의 빠른축의 방위각을 조절할 수 있으며 간단하게 탈착하고 부착할 수 있도록 설계, 제작하였다.

기본적인 PSCA 구조에서 반사광의 전기장 및 측정되는 빛의 세기는 회전편광자의 방위각의 함수로 각각 다음 식들과 같이 표현된다[5].

$$E=(1,0)\begin{pmatrix}\cos A & \sin A\\ -\sin A & \cos A\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos C & -\sin C\\ \sin C & \cos C\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & e^{i\theta}\end{pmatrix}$$
$$\times\begin{pmatrix}\cos C & \sin C\\ -\sin C & \cos C\end{pmatrix}\begin{pmatrix}r_p & 0\\ 0 & r_s\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos P & -\sin P\\ \sin P & \cos P\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix}E_0 \quad (2)$$

$$I=|E|^2=I_0(1+\alpha\cos 2A+\beta\sin 2A) \quad (3)$$

여기서 A, C와 P는 각각 입사면에 대해 측정한 검광자, 보정기와 편광자의 각도이며, δ는 위상지연각이다. 검광자 각도는 $A=2\pi ft+A_0$와 같이 쓸 수 있다. C=0일 때 식 (1)으로부터 $r_p=r_s\tan\Psi e^{i\Delta}$을 (2)식에 대입하여 빛의 세기를 계산할 수 있으며 식 (3)의 푸리에 계수인 α, β를 사용하여 타원해석상수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan\Psi=\tan P\sqrt{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}}$$
$$\cos(\Delta-\delta)=\frac{\beta}{\sqrt{1-\alpha^2}} \quad (4)$$

실제 측정에서 구하는 α와 β의 값은 주어진 바와 같이 빛의 세기를 회전검광자의 각도에 따른 삼각함수로 표현했을 때의 cos및 sin의 계수이다. 이 계수들은 검광자의 각도에 대한 빛의 세기를 푸리에 변환하여 구하였다. 검광자의 방위각에 대한 빛의 세기 변화로부터 푸리에계수를 구하는 과정과 시료를 정렬하여 입사면을 설정하며 편광자와 검광자의 원점을 구하는 등의 보정 과정에 대해서는 이미 많은 연구들을 통해서 잘 알려져 있다 [6].

3. TiO_2 박막의 타원해석상수 측정 및 유효밀도 변화

TiO_2 박막은 단결정규소 기판과 비정질실리카 기판 위에 전자빔 증착, 이온보조 전자빔 증착, DC 마그네트론 스퍼터링, sol-gel 등의 장비들을 사용하여 약 500~2000 Å 두께 범위로 성장시켰다. 성장시킨 TiO_2 박막들의 조밀도, 표면 거칠기 등에 관해서는 박막의 두께 및 기층의 종류, 성장 방법와 관련하여 이미 보고한 바 있다 [7]. 본 연구에서는 이들 시료 중 박막 증착 산업체에서 많이 사용되고 있는, 전자빔 증착장비로 성장시킨 시료를 선정하였다. 사용된 박막은 조밀도가 82% 정도이며 두께는 1000 Å 정도이었다. 증착된 박막을 대기 중에 노출시키면 장시간에 걸쳐 공기중의 수분을 흡착하게 된다. 타원해석 스펙트럼은 수분 흡착에 따라 장파장으로 평행이동하는 적색편이를 보여주었으며 대략 1년이 경과한 후 더 이상의 적색편이는 관찰되지 않았다.

적색편이를 더 이상 보여주지 않는 안정된 TiO_2 박막의 수분 탈착과정을 실시간으로 관찰하기 위하여 그림 3과 같이 타원해석기를 진공챔버의 포트에 장착하고 10^{-3} Torr의 진공도를 유지하며 시료를 200°C까지 가열하여 500초 동안 유지하였다가 서서히 냉각시키는 과정을 여러번 반복하며 타원해석상수 tanΨ와 cosΔ의 변화를 관찰하였다. 시료의 가열, 온도 측정 및 온도 제어를 위해 500 W의 할로겐 램프를 시료 전면으로부터 약 8.5 cm 떨어진 곳에 위치시키고 시료 후면에 K-형(Chromel-Alumel) 열전쌍을 열적접촉시켜 온도를 측정하고 이 열전쌍의 전위차를 온도 제어기에 되먹임하였다. 타원해석 상수 및 온도는 매초 간격으로 측정하였다.

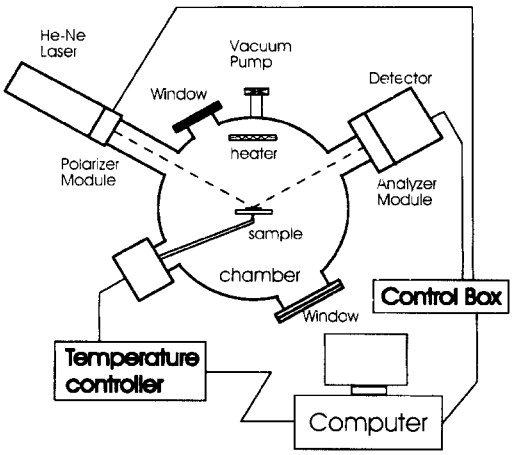

그림 3. 보급형 *in-situ* 타원해석기를 진공 챔버에 부착한 개략도.

10^{-3} Torr의 진공에서 TiO_2 시료를 200°C로 가열하였다가 서서히 냉각시키는 과정을 반복할수록 TiO_2 박막 속의 수분이 빠져나가며, 수분 탈착과정에 따르는 박막의 밀도의 변화는 박막의 굴절율 변화로 나타난다. 박막의 굴절율 변화는 타원해석상수 tanΨ와 cosΔ의 변화로 반영이 된다. TiO_2 박막내의 수분이 완전히 빠져나오면 측정되는 타원해석상수의 변화는 온도의 변화와 비례하게 된다. 즉 박막인 TiO_2와 기층인 c-Si의 온도변화에 따르는 굴절율 변화로 인하여 타원해석상수의 변화는 이 굴절율 변화에 따른 효과를 반영하게 되는데 온도 변화

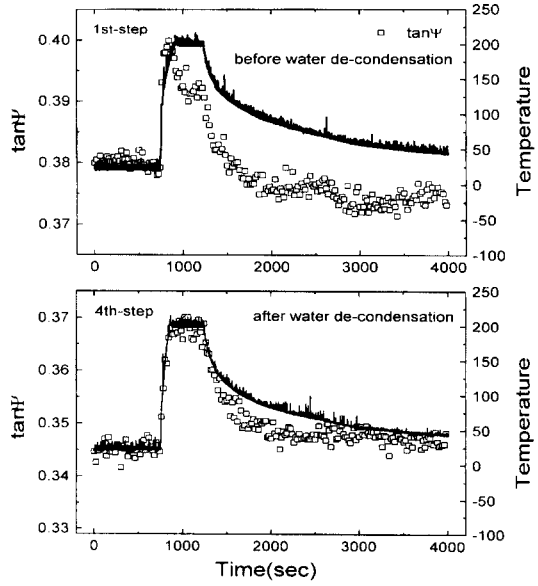

그림 4. 전자빔 증착으로 성장시킨 TiO_2 박막의 온도변화에 따른 tanΨ의 그래프. 가열/냉각의 초기단계인 위의 그래프에서는 온도변화에 대한 tanΨ의 변화가 비례하지 않으나 4번째 단계인 아래 그래프에서는 tanΨ의 변화가 온도의 변화와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다(실선 : 온도).

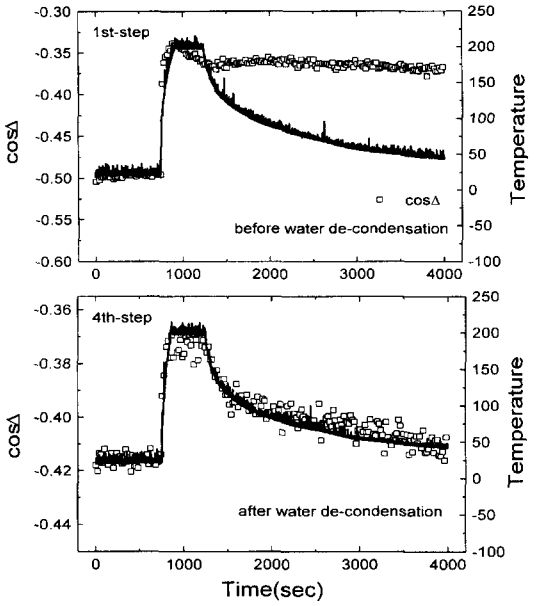

그림 5. 전자빔 증착으로 성장시킨 TiO_2 박막의 온도변화에 따른 cosΔ의 그래프. 그림 4에서와 마찬가지로 가열/냉각의 초기단계에서는 온도에 대한 cosΔ가 비례하지 않으나 4번째의 단계에서는 cosΔ의 변화가 온도의 변화와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다(실선 : 온도).

폭이 크지 않을 때에는 굴절율 변화나 타원해석상수의 변화는 모두 온도 변화와 선형관계를 보이게 된다. 이에 반하여 가열 및 냉각의 초기과정에서는 온도변화에 따르는 굴절율 변화보다는 수분의 탈착과정에 따르는 박막의 밀도변화와 굴절율 변화가 타원해석상수의 변화의 주된 원인으로 생각된다. 이는 그림 4와 그림 5에서 확인되고 있다.

그림 4에서 온도에 따른 tanΨ의 변화는 처음 가열/냉각 단계와 4번째 가열/냉각 단계를 비교해 보았을 때 많은 차이를 보여준다. 처음 단계에서는 온도가 어느 정도 상승할 때까지는 온도변화와 일치하는 듯하지만, 온도가 약 200°C 부근에 이르고 시간이 약 850초 지나는 동안 tanΨ는 온도 곡선과는 다르게 변화한다. 그러나 4번째 단계에서는 온도의 변화와 tanΨ의 변화가 거의 일치한다. 이같은 변화 양상은 cosΔ에서도 뚜렷하게 나타나고 있다. 4번째 단계에서 타원해석상수가 온도의 변화와 비례하여 바뀌는 것은 이미 설명한 바와 같이 박막 구성물질의 광 물성 변화가 온도변화에 비례하는 모습을 보여주는 것이라고 하겠다. 이에 반하여 첫번째 단계에서의 타원해석상수들의 불규칙한 변화는 전자빔 증착

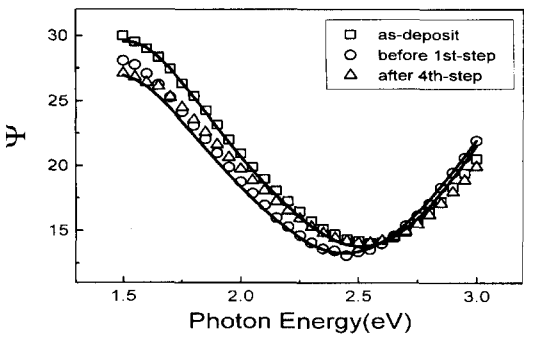

그림 6. TiO_2 박막을 전자빔 증착으로 증착 직후와 장시간 공기중에 노출시켜 수분을 흡수시킨 상태, 그리고 진공챔버에서 가열하여 수분을 탈착시킨 상태에 대한 분광타원해석상수 Ψ의 그래프. 증착 직후의 TiO_2와 수분 탈착 후에 얻은 데이터가 거의 일치하며 장시간 노출시킨 상태는 다른 두 상태와 다르다(실선 : 회귀분석법을 이용한 최적마춤 결과).

으로 제작한 TiO_2 박막을 공기중에 장시간 노출시킴으로서 박막의 미소틈새속으로 흡착되었던 수분 입자들이 진공 상태를 유지하며 가열/냉각시키는 과정중에서 서서히 빠져 나오기 때문이다. 이는 증착 직후, 가열 실험 전, 가열 실험 후에 각각 측정한 타원해석상수 스펙트럼들에서도 관찰되고 있는데 그림 6과 그림 7에서 볼 수 있듯이 수분이 흡착되었을 때의 스펙트럼은 증착 직후의 스펙트럼에 비해 왼쪽으로 이동하고, 흡착된 수분을 탈착시킨 후의 스펙트럼은 다시 오른쪽으로 이동하여 증착 직후의 스펙트럼과 근접한다. 증착 직후 박막은 빈 미소틈새에 수분이 차 있지 않은, 82%의 조밀도를 가지

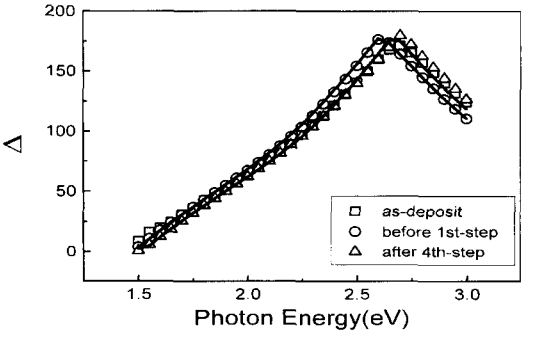

그림 7. TiO_2 박막을 전자빔 증착으로 증착 직후와 장시간 공기중에 노출시켜 수분을 흡수시킨 상태, 그리고 진공챔버에서 가열하여 수분을 탈착시킨 상태에 대한 분광타원해석상수 Δ의 그래프. 증착 직후의 TiO_2와 수분 탈착 후에 얻은 데이터가 거의 일치하며 장시간 노출시킨 상태는 다른 두 상태와 다르며, Ψ 보다 차이가 잘 보인다(실선 : 회귀분석법을 이용한 최적마춤 결과).

표 1. 가열 및 냉각과정 전과 후의 분광타원해석상수를 분석한 결과. 박막의 구조를 유지하며 빈 미소틈새에 차있던 수분이 빠져나온 모델로 설명이 되고 있다.

	가열 실험 전		가열 실험 후	
	체적비(%)	두께(Å)	체적비(%)	두께(Å)
박막층	18.5(H_2O)	1019	18.5(Air)	1019
표면층	75.6(Air)	52	75.6(Air)	52

는 TiO_2 박막으로 분석되며 가열 및 냉각 실험전, 즉 장시간 공기중에 노출시킨 후에는 미소틈새부분이 수분으로 채워져 있는 TiO_2 박막으로 분석되는 것을 볼 수 있다. 이 박막은 수 차례의 가열 및 냉각과정을 거친 후에는 수분이 빠져나가서 증착 직후의 상태로 되돌아간 것을 알 수 있다. 분광타원해석 스펙트럼의 분석은 [1, 5, 6] 단결정 실리콘(c-Si) 기판 위에 약 82%의 조밀도를 가진 TiO_2 박막층이 있고, 그 위에 표면 거칠기층이 존재하는 4상계형태로 분석하였으며, 각 층의 유효굴절율(Effec- tive Medium Theory)는 Bruggeman 유효매질이론을 사용하였다. 그림 6과 그림 7의 분광타원해석상수를 분석한 결과는 표 1에 정리되어 있다. 한편으로는 초기 단계에서의 타원해석상수의 변화를 분석함으로써 수분 탈착과정에 관한 이해를 더할 수 있겠다. 수분 탈착과정 또는 탈착기구에 관해서는 앞으로의 계속된 연구를 통해 밝혀질 수 있을 것으로 생각한다.

4. 결 론

보급형 He-Ne 타원해석기를 제작하고 이를 이용하여 TiO_2 박막에서 수분의 탈착과정을 in situ, 실시간으로 관찰하였다. 전자빔 증착으로 성장시킨 직후, 장기간 대기중에 노출시킨 후 그리고 진공챔버내에서 가열/냉각과정을 수차례 겪은 후의 타원해석 스펙트럼들을 각각 비교해 볼 때 in situ 타원해석기로 관측한 $\tan\Psi$와 $\cos\Delta$의 변화는 온도에 대한 박막물질과 기층의 굴절율 변화에 의한 기여에 더하여 수분이 박막 내부에서 빠져나오는 수분 탈착에 관계된 박막의 유효 굴절율의 변화에 의한 기여가 주된 원인임을 관찰하였다. 후자에 의한 변화는 수분 탈착과정을 이해하는데 도움을 줄 것이다. 본 타원해석기를 사용하여 박막의 물성변화를 *in-situ*, 실시간으로 관측할 수 있으며 다른 동적과정을 연구하는 실험에서도 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 보급형 He-Ne 타원해석기가 완성되기까지는 설계, 제작, 프로그래밍 그리고 성능검사 및 안정화 작업 등 여러 분야에서 수년간 아주대학교 타원해석연구실 대학원생들의 많은 도움이 있었기에 이에 감사드립니다. 본 연구는 과학재단 연구비(KOSEF 98-0702-03-01-3)의 부분지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

[1] 김상열, "타원해석법의 원리 및 반도체 응용", 월간 반도체, 제 113권, 107-129 (1997).

[2] D. E. Aspnes, E. A. Irene and R. W. Collins, Proc. ICSE-2, Charleston, SC (1997).

[3] Jobin Yvon (http://www.isainc.com); SOPRA (http://www.sopra-sa.com); J.A. Woollam Co. (http://www.jawoollam.com); Rudolph (http://www.rudolphtech.com); Gaertner (http://gaertnerscientific.com).

[4] P. S. Hauge, Surface Science **96**, 108 (1980).

[5] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light* (North-Holland, 1987).

[6] D. E. Aspnes and A. A. Studna, Applied Optics **14**(1), 220 (1975).

[7] S. Y. Kim, Appl. Opt. **35**(34), 6703 (1996); S. Y. Kim and H. J. Kim, Proc. SPIE Vol. **2873**, 234 (1996).