

TIS 방법을 이용한 유전체 고반사 거울의 산란 측정*

조현주 · 박홍진 · 황보창권
인하대학교 물리학과

문환구* · 김진태 · 손승현 · 이재철*
고등기술연구원 정보통신연구실
*아주대학교 시스템공학과

(1997년 3월 29일 받음)

진공 증착법으로 수정 기판 위에 증착된 유전체 고반사 다층 박막의 산란을 TIS 방법을 이용하여 측정하였다. 기판온도 250~300°C에서 증착한(Ta_2O_5/SiO_2) 다층 박막의 산란율은 0.048~0.050%이며 300°C에서 4시간 열처리에 의하여 영향을 받지 않았다. 기판온도 250°C에서 증착한(TiO_2/SiO_2) 다층 박막의 산란율은 0.029%이며 열처리에 의하여 심한 인장 응력을 받았다. 두 다층 박막의 표면 거칠기는 거의 차이가 없었고 Ta_2O_5 박막의 기둥이 TiO_2 박막보다 작고 조밀도는(Ta_2O_5/SiO_2) 다층 박막이 큰 것을 알 수 있었다. (Ta_2O_5/SiO_2) 다층박막의 산란율이 큰 것은 Ta_2O_5 박막이 더 조밀하고 기둥 크기가 작으므로 박막 내에 기둥 수가 증가하여 체적 산란이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

I. 서 론

입사하는 빛의 진폭 또는 위상을 적절히 조절하여 반사, 투과 또는 편광 상태를 조절하는 광학 박막은 여러 광학 소자에 폭넓게 사용된다. 박막에 입사한 빛의 투과율, 반사율, 흡수율, 산란율을 각각 T, R, A, S 라 하면

$$T + R + A + S = 1 \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 일반적으로 광학 박막 설계에서 산란은 그 양이 매우 작아 무시하는 경우가 많다.^[1]

광학 박막에서의 산란은 흡수와 더불어 빛의 손실을 초래하는 요소로 작용한다. 흡수에 의한 빛의 손실은 열에너지로 전환되며 산란에 의한 빛 손실은 입사한 빛이 여러 각도로 퍼져 나간다. 산란 측정은 박막의 표면 거칠기를 정확히 측정하기 위한 방법으로 연구되어 왔으며, 근래에 들어 고출력 레이저 반사경, 링레이저 자이로용 반사경, 광도파관 등의 고품위의 박막이 요구되면서 박막의 산란 및 흡수를 정확히 측정하는 기술의 요구가 점차 확대되어 왔다.^[2,3] 특히 링레이저 자이로의 경우 후방(backward) 산란되는 빛이 반대 방향으로 진행하는 빛과 상호 작용을 하여 출력 신호에 잡음으로 작용하여 광학계의 분해능을 떨어뜨린다. 광도파관의 경우 박막의 산란은 전달되는 에너지를 급격히 감소시킨다.

일반적으로 박막의 산란은 기판 또는 증착면의 표면 거칠기에 의하여 나타나는 표면 산란과 박막의 비등방성, 결정, 굴절률의 불균일, 결합 등에 의하여 나타나는 체적 산란으로 대별된다.^[4] 박막의 산란을 계산, 측정하는 이론은 박막에서 산

란되는 빛의 양을 산란 방향에 관계없이 모두 고려하는 스칼라 산란 이론과 입사한 빛에 의하여 산란되는 빛의 방향을 고려한 벡터 산란 이론이 있다.^[5] 스칼라 산란은 산란된 빛을 적분구를 이용하여 측정하는 total integrated scattering(TIS) 방법이 사용되며 벡터 산란은 산란되는 각도에 따라 단위 입체각에 도달하는 산란 광을 측정하는 angle resolved scattering(ARS) 방법을 이용한다.^[6,7] 광학 다층 박막의 스칼라 산란 이론은 Carniglia에 의하여 발표되었으며^[8] Ebert 등은^[9] 다층 박막의 산란을 TIS 방법으로 측정하였고 벡터 산란 이론을 이용한 다층 박막의 산란을 Elson 등이^[10] 발표하였다.

본 연구에서는 실험실에서 제작한 TIS 산란 측정 장비를 이용하여 기판과 박막의 산란을 각각 측정하였으며, 박막의 표면 산란은 백색광을 조사하고 60배의 반사형 현미경으로 관찰하였다. Si 웨이퍼 위에 증착된 박막의 기둥 구조, 결합 등은 SEM으로 측정하였으며, 진공과 대기간 투과 파장 이동량으로부터 박막 내부의 기둥과 기둥 사이에 존재하는 빈 공간의 양을 측정하였고 AFM으로 박막과 기판의 표면 거칠기를 측정하였다.

II. 산란 이론

그림 1과 같이 기판 위에 고굴절률 물질과 저굴절률 물질이 교대로 증착된 다층 박막 구조에서 발생하는 산란은 각각의 경계면에서 발생하는 표면 산란과 물질의 결정, 기둥 구조, 결합 등에 의하여 발생하는 체적 산란으로 나뉘어 진다. 박막의 표면 산란은 앞선 경계면의 표면 거칠기가 다음 증착된 물질의 표면 거칠기에 주는 영향의 정도에 따라 상관(correlated) 표면 산란, 비상관(uncorrelated) 표면 산란과 부분 상관(partially correlated) 표면 산란으로 구분할 수 있다. 박막의 체

* 본 연구는 1995년도 고등기술연구원의 지원에 의하여 수행되었음.

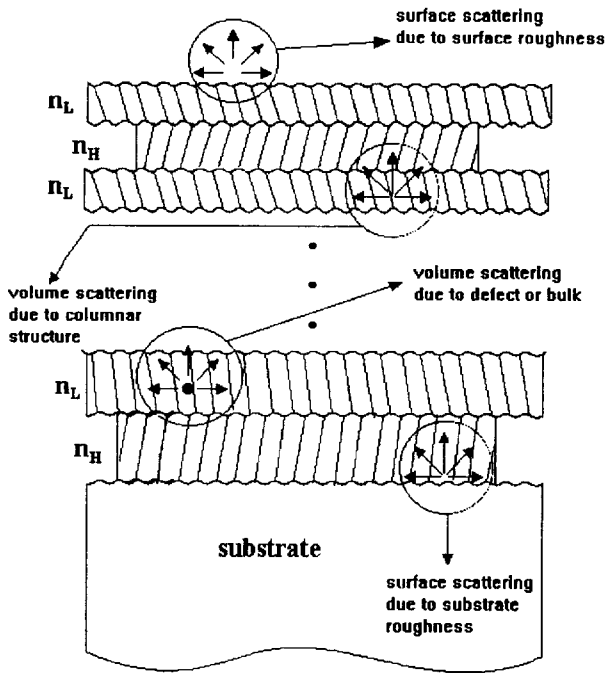


그림 1. 광학 박막의 산란 : 광학 박막의 산란은 박막의 표면 거칠기에 의한 표면 산란과 증착 물질의 결정, 결합, 기동구조 등에 의하여 나타나는 체적 산란으로 구별된다.

적 산란중 결정에 의한 산란은 박막 증착물질과 증착조건을 적절히 선택하면 최소화할 수 있고, 기동구조에 의한 산란은 기판온도 또는 증착방법을 변화하면 조절 가능하며 결합에 의한 산란은 기판의 세척상태에 크게 의존하고 기판으로부터 발생한 결합은 박막의 두께가 증가하면서 점차 커지게 된다. 박막의 표면 산란은 주로 표면 거칠기의 변화에 크게 의존하므로 예측 가능하나, 체적 산란은 기동구조, 결정, 결합에 의한 덩어리 등에 의하여 발생하며 재현성이 작고 위치에 크게 의존하므로 예측이 불가능하다.

그림 2와 같이 어떤 단일 경계면의 표면 거칠기 변화가 함수 $z=f(x)$ 로 주어지며 평균값이 0인 경우 임의의 지점 x 에서 표면 거칠기가 z 에서 $z+dz$ 의 값을 가질 확률인 확률밀도함수 $w(z)$ 는

$$w(z) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{1/2}} e^{-z^2/2\sigma^2} \quad (2)$$

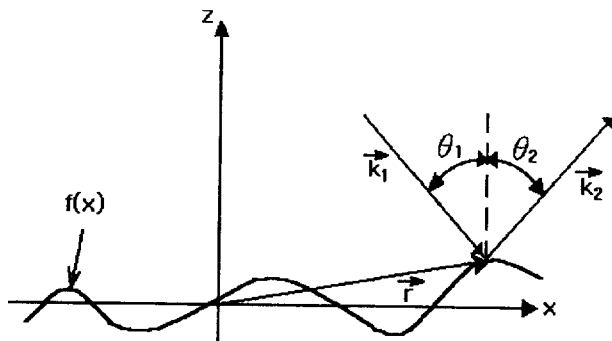


그림 2. 단일 경계면에서의 표면 거칠기와 산란

로 주어지며, 여기서 σ 는 제곱평균제곱근(root-mean-square)으로 표시한 경계면의 표면 거칠기이다.^[11,12] 임의의 표면 거칠기를 가지는 경계면을 정확히 기술하기 위해서는 경계면의 표면 거칠기 높이와 산란 강도로 이루어진 자체상관 함수 (autocorrelation function)를 알아야 한다. 경계면의 표면 거칠기가 주기적인 경우 경계면에서 발생하는 산란 강도는 표면 거칠기에 의하여 결정되며 박막이 산란되는 각도는 자체상관 길이 (autocorrelation length)에 의하여 결정된다. 일반적으로 경계면에서 산란되는 빛은 경계면을 지나 다른 굴절률을 갖은 영역으로 산란되는 투과 산란과 빛이 입사한 영역으로 산란되는 반사 산란으로 구별되며, 두 경우 모두 산란되는 빛은 가간섭성이 없다.

단일 경계면에서 산란되는 산란 광을 표현하는 산란 계수 Γ 는 입사한 광에 대한 산란된 광의 비로 정의되며

$$\Gamma = \frac{F}{2L} \int_{-L}^L \exp[i(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r}] dx \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서 $2L$ 은 표면의 길이이고 \vec{k}_1, \vec{k}_2 는 각각 입사파와 산란파의 파수 벡터이며 F 는 입사광과 산란광의 방향에 의하여 결정되는 상수이고 \vec{r} 은 원점으로부터의 거리이다.

경계면의 표면 거칠기가 함수 $z=f(x)$ 로 주어지고 확률밀도 함수가 $w(z)$ 인 경우 산란 계수의 평균값 $\langle \Gamma \rangle$ 는

$$\begin{aligned} \langle \Gamma \rangle &= \left\langle \frac{F}{2L} \int_{-L}^L e^{i\nu_x x} e^{i\nu_z z} dx \right\rangle \\ &= \langle e^{i\nu_z z} \rangle \frac{F}{2L} \int_{-L}^L e^{i\nu_x x} dx \end{aligned} \quad (4)$$

가 되며 여기서 ν_x 와 ν_z 는

$$\vec{\nu} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2 \quad (5)$$

로 정의된 벡터의 x 와 z 방향의 값이다. 식(4)의 첫 번째 항을 $x(\nu_x)$ 로 두면, 확률밀도함수의 정의에 따라

$$x(\nu_x) = \langle e^{i\nu_x x} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} w(z) e^{i\nu_x z} dz \quad (6)$$

가 되며, $x(\nu_x)$ 를 $w(z)$ 의 특성 함수라 한다. 빛이 경계면에 수직으로 입사하는 경우 함수 F 는 1이며, $\langle \Gamma \rangle$ 는

$$\langle \Gamma \rangle = x(\nu_x) \frac{\sin \nu_x L}{\nu_x L} \quad (7)$$

가 된다. 표면 거칠기 함수가 Gauss 분포를 갖고 평균값이 0이며 변량이 σ^2 인 경우 $x(\nu_x)$ 는

$$x(\nu_x) = \exp\left(-\frac{1}{2} \nu_x^2 \sigma^2\right) \quad (8)$$

이 된다. 입사각과 산란각이 모두 경계면에 수직하면 $\nu_x = 0$ 이고 $\nu_z = \frac{4m_0}{\lambda}$ 가 되므로 $\langle \Gamma \rangle$ 는

$$\langle \Gamma \rangle = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{4m_0 \sigma}{\lambda}\right)^2\right] \quad (9)$$

가 되고 반사 계수 $\langle \rho \rangle$ 는

$$\langle \rho \rangle = \rho_o \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi n_o \sigma}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (10)$$

로 주어지며, ρ_o 는 반사진폭 계수이다. 즉 반사 계수는 반사진폭 계수와 산란 계수의 곱으로 나타나며, 산란에 의하여 반사되는 빛은 표면 거칠기에 의하여 지수적으로 감소한다. 경계면에 수직 입사한 빛의 수직 반사율 R_s 는

$$R_s = \langle \rho_o \rangle < \rho_o \rangle^* = R_o \exp \left[-\left(\frac{4\pi n_o \sigma}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (11)$$

가 되며 R_o 는 표면 거칠기가 없는 경우의 거울 반사(specular reflection)이다.^[12]식 (11)에서 거친 표면에서의 수직 반사율은 표면 거칠기가 0 일 때의 반사율로부터 지수함수로 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 3은 앞선 경계면의 표면 거칠기가 그대로 다음 층에 전달되고 박막의 층수가 늘어남에 따라 표면 거칠기가 점차 같은 비율로 증가하여 더하여 지는 경우, 유리 위에 24층으로 구성된

$$\text{substrate} | (HL)^{12} L | \text{air} \quad n_H = 2.03 \quad n_L = 1.48 \quad (12)$$

의 구조를 가지는 박막의 반사율을 나타낸 것이다. 표면 거칠기가 전혀 없는 경우 박막의 반사율은 1에 가까우나 표면 거칠기가 증가할수록 반사율이 점차 감소함을 알 수 있다. 반사율이 떨어지는 정도가 파장이 짧은 영역이 더욱 크게 나타나는데 반사율 기울기 변화 η 를

$$\eta = \frac{R_{\lambda=600}}{R_{\lambda=700}} \quad (13)$$

와 같이 정의하고, 이를 계산하면 박막 표면의 거칠기가 전혀 없거나 5 nm인 경우(표면 거칠기가 기판으로부터 경계면이 하나 증가할수록 0.2 nm 씩 증가해 가는 경우) $\eta = 1$ 이나 박막의 표면 거칠기가 각각 25, 50 nm 인 경우 η 는 0.93과 0.75

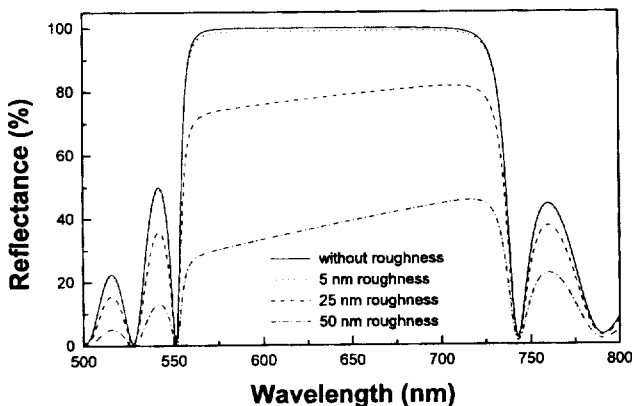


그림 3. 표면 거칠기 변화에 따른 반사율 변화

의 값을 갖는다. 이는 파장이 짧을수록 식(11)로부터 표면 거칠기와 파장의 비가 증가하여 반사율이 감소하기 때문이다.

III. 실험

3.1. 산란 측정 장치

TIS 산란측정 장치를 그림 4와 같이 구성하였다. 출력 강도와 출력 모드가 안정화된 He-Ne 레이저를 광원으로 사용하였으며, 단속기(chopper)를 통과한 빛을 운모 편광자로 한쪽 방향으로 진동하는 빛을 만들고 이를 위상 지연계로 회전하여 원하는 진동만을 갖는 빛이 적분구에 도달하도록 하였다. 조리개를 사용하여 중심의 빛만을 골라낸 후 ND 필터를 사용하여 광원의 세기를 조절하였으며, 5개의 조리개를 통과하도록 한후 기판이 장착된 적분구에 닿도록 하였다. 광축 방향으로 반사된 광은 검출이 되지 않고 적분구 바깥으로 나가도록 시준 하였다.

박막의 산란은 파장 633 nm에서 96%의 표준 산란기(standard diffuser)에서 산란된 광의 세기를 기준으로 하였다. 즉 박막의 산란율은

$$TIS(\%) = \frac{V_{\text{mirror}}}{V_{\text{diffuser}}} \times 96 \quad (14)$$

으로 주어지며, V_{mirror} 는 시료 거울의 출력 전압이고 V_{diffuser} 는 표준 산란기의 출력 전압이다.

3.2. 박막의 증착

cryo 펌프가 부착된 진공 증착기를 이용하여 10^{-7} Torr 대의 진공을 만든 후 전자총을 이용하여 물질을 증발시켜 다층 박막을 제작하였다. 증착에 사용한 기판은 표면의 연마상태가 우수한 지름 30 mm의 수정(quartz)을 사용하였으며 기판에 따른 차이를 비교하기 위하여 슬라이드 글라스를 사용하였고 SEM 분석을 위하여 Si 웨이퍼를 사용하였다.

기판의 연마 등에 의한 표면 상태 및 세척은 박막의 산란에 중요한 요소로 작용한다.^[13] 수정 기판은 중크롬산($K_2Cr_2O_7$) 분말과 황산(H_2SO_4)을 섞은 용액을 40%로 희석시켜 기판의 연마 과정에서 남아 있는 오염을 제거한 후 알코올을 사용하여 세척하였다. 세척된 기판은 오염이 남아 있는지를 세밀히 관찰하여 오염이 없는 기판을 챔버에 장착하여 바로 진공을 만들었다. 챔버의 초기 진공 시에 발생하는 와류 현상으로 인하여 기판이 오염되는 것을 방지하기 위하여 저진공 초기에는 얇은 판을 통하여 천천히 진공을 만들었다. 기판은 할로겐 램프를 사용하여 가열하였으며 자동 온도 조절 장치를 부착하여 기판온도를 일정하게 유지하였다.

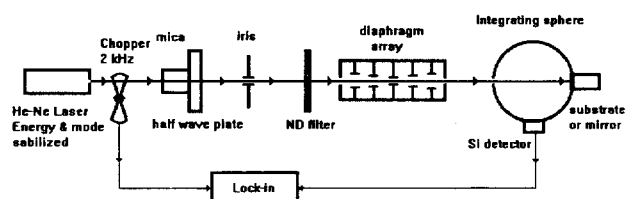


그림 4. TIS 산란 측정 장치

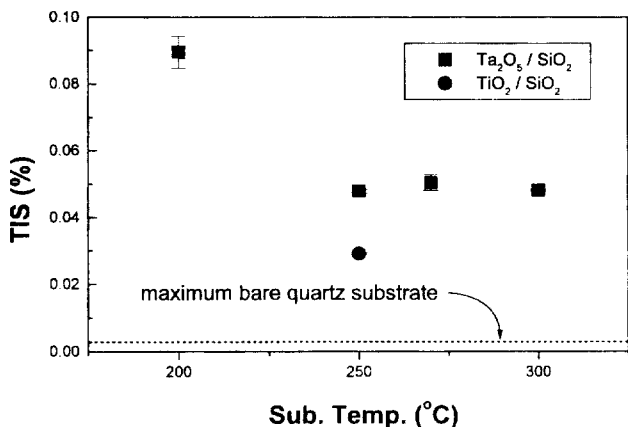


그림 5. 온도에 따른 다층 박막의 산란

박막 증착시 고굴절률 물질과 저굴절률 물질은 각각 Ta₂O₅와 SiO₂를 사용하였으며 각각의 증착 속도는 수정자 두께 측정기를 이용하여 0.1 nm/s와 0.8 nm/s로 일정하게 유지하였다. 다층 박막은 기준 파장 633 nm에서 45°입사 s편광 빛이 최대 반사를 갖도록 식(12)의 구조로 하였으며 각층의 두께는 단색화장치(monochromator)가 부착된 반사형 광학적 두께 측정기를 사용하여 조절하였다. 기판온도는 200~300°C 사이에

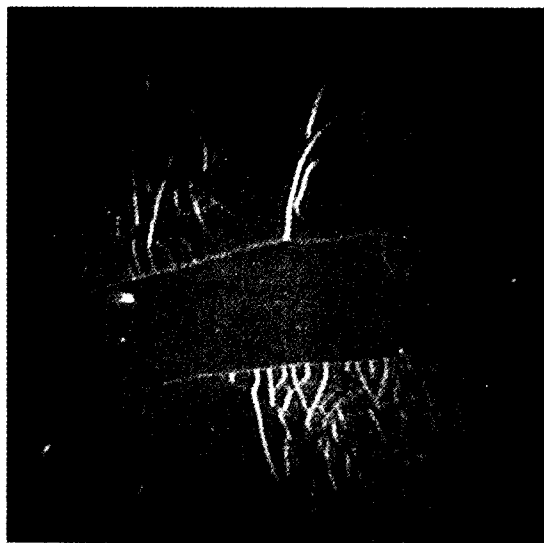


그림 6. 300°C에서 4시간 동안 열처리한 수정기판 위에 증착된 (TiO₂/SiO₂) 다층 박막의 표면

서 일정한 값을 갖도록 변화시켰으며, 증착후 300°C에서 4시간 동안 열처리(annealing)하였다. 비교를 위하여 기판온도

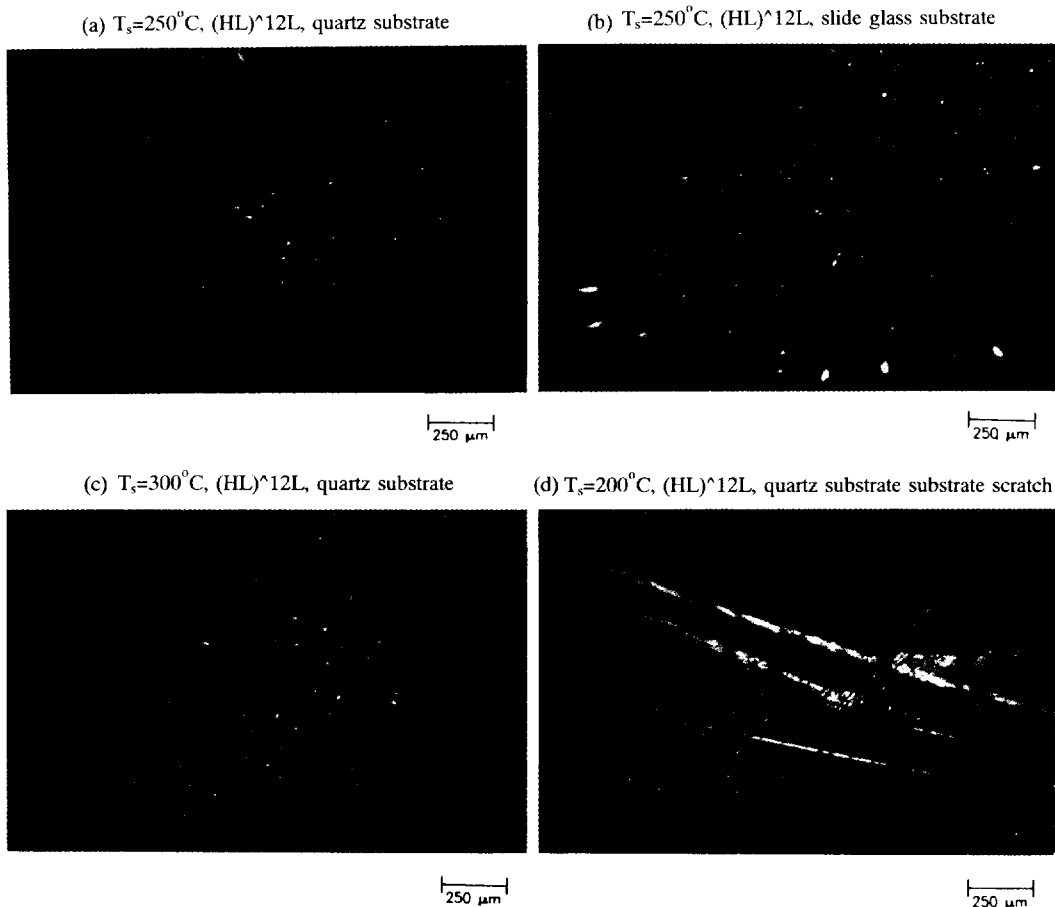


그림 7. 현미경을 이용한 박막의 표면 산란 측정 (a) 기판온도 250°C에서 수정 기판 위에 증착된 박막 (b) 슬라이드 글라스 기판 위에 증착된 박막 (c) 기판온도 300°C에서 수정 기판 위에 증착된 박막 (d) 손상(scratch)이 있는 수정 기판 위에 증착된 박막

250°C에서 고굴절률 물질로 TiO_2 를 사용하여 다층 박막을 제작하였다. 고굴절률 물질로 TiO_2 를 사용한 다층 박막은 반사율이 Ta_2O_5 를 고굴절률 물질로 사용한 경우와 같게 하기 위하여 20층으로 구성되었다.

IV. 실험 결과 및 논의

그림 5는 기판온도에 따른 다층 박막의 산란을 측정한 결과이다. 증착전 산란율이 0.002~0.003%인 수정 기판을 세척하여 사용하였으며 증착 물질은 증착전 충분히 녹인 후 증착을 시작하였다. 기판온도 200°C에서 증착된 (Ta_2O_5/SiO_2) 다층 박막의 산란율은 0.089%이고, 기판온도 250~300°C에서 증착된 대부분의 (Ta_2O_5/SiO_2) 다층박막의 산란율은 0.048~0.050%로 작은 산란을 나타내었다. 이러한 산란의 감소는 기판온도의 증가에 따른 증착 물질의 이동도(mobility) 증가에 의하여 박막의 기동 구조가 감소하고 박막 표면의 거칠기가 감소한 때문으로 판단된다. 또한 (Ta_2O_5/SiO_2)로 구성된 박막은 열처리 전과 후의 산란율이 거의 차이를 나타내지 않았다.

한편 기판온도 250°C에서 증착한 (TiO_2/SiO_2) 다층박막의 산란율은 0.029%로 낮았으나, 300°C에서 4시간 열처리 후 그림 6과 같이 인장 응력에 의하여 박막이 깨어져 열처

리 후 산란 측정이 불가능하였다. 일반적으로 TiO_2 를 사용하여 고반사 거울을 만들면 물질의 굴절률이 Ta_2O_5 보다 높으므로 전체 박막의 층수와 두께를 감소시킨 상태에서도 동일한 반사율을 얻을 수 있다. 그러나 TiO_2 의 경우 300°C정도에서 열처리하면 박막에 anatase 결정이 나타나는 것으로 알려져 있다.^[14,15] 박막에 결정이 형성되면 체적 산란이 증가하게 된다.

박막의 표면 산란을 육안으로 쉽게 확인하는 방법은 박막에서 산란되는 빛을 현미경으로 관찰하는 것이다. 그림 7은 60배 현미경을 사용하여 박막의 표면 산란을 CCD로 관찰한 사진이다. 그림 7 (a), (b)는 각각 수정 기판 위에 증착된 박막과 슬라이드 글라스 위에 증착된 박막의 표면 산란을 나타낸다. 두 박막의 기판은 동일한 세척 과정을 거쳤으며, 기판온도 250°C에서 동시에 증착되었다. 슬라이드 글라스 위에 증착된 박막의 표면 산란은 매우 크나, 수정 기판 위에 증착된 다층 박막의 표면 산란은 작은 것을 알 수 있다. 그림 7 (c)는 기판온도 300°C에서 수정 기판 위에 증착된 박막의 표면 사진으로 그림 (a)와 비슷한 경향을 나타낸다. 증착 온도가 250~300°C에서 수정 기판 위에 증착된 박막에서의 표면 산란은 그림 7 (a)와 그림 7 (c)와 같이 기판온도와 무관하게 비슷한 경향을 나타내었으며, 슬라이드 글라스와 Si 웨이퍼 위에 증착된 박막은

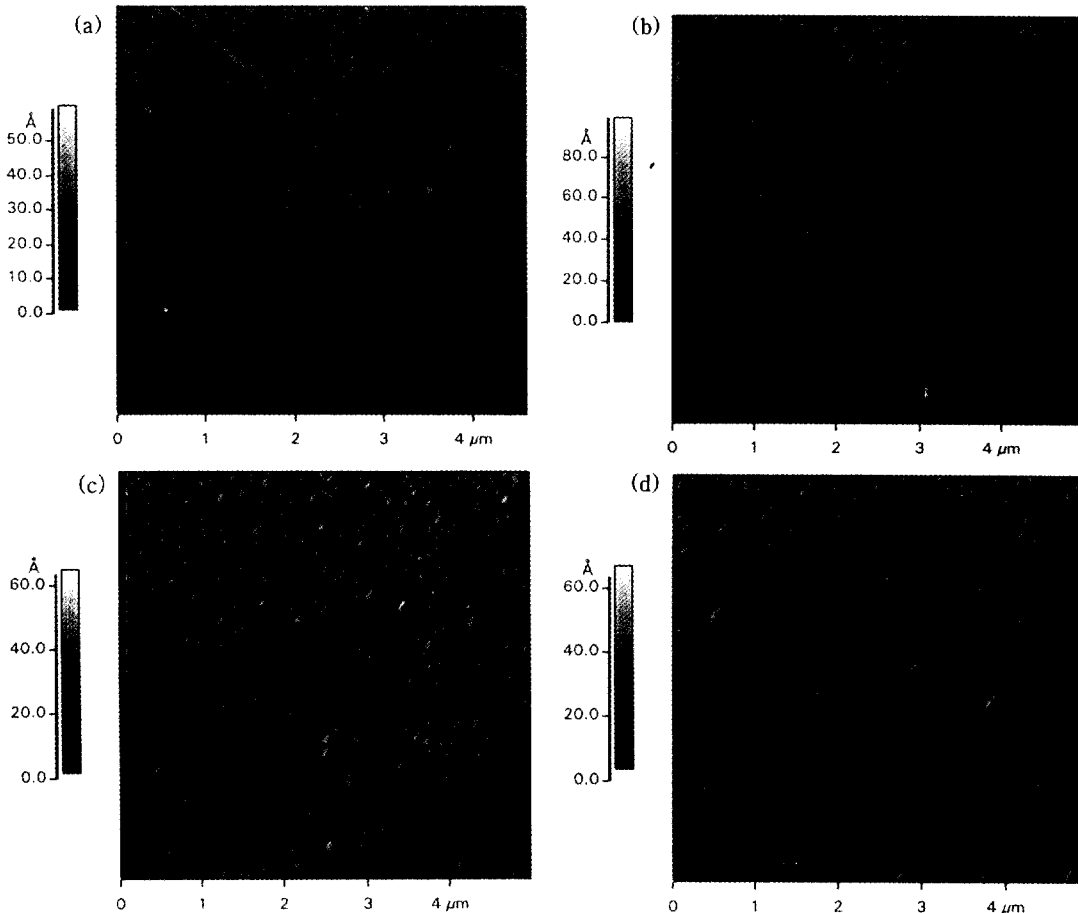


그림 8. AFM을 이용한 박막의 표면 관찰 (a) 수정 기판 (b) (Ta_2O_5/SiO_2), 200°C에서 수정기판 위에 증착된 박막 (c) (Ta_2O_5/SiO_2), 300°C에서 수정기판 위에 증착된 박막 (d) (TiO_2/SiO_2), 250°C에서 수정기판 위에 증착된 박막

표면 산란이 매우 많이 나타났다. 그림 7 (d)는 손상된 (scratched) 수정 기판 위에 증착한 다층박막의 표면 산란 사진이다. 그림 (a)에서와 같은 작은 점 모양의 산란이 드물게 나타나고 중앙에 손상된 부위의 산란이 있으며, 박막의 산란율은 약 1.3% 이었다.

그림 8은 AFM을 이용하여 측정한 기판 및 다층박막의 표면이다. 박막의 측정 영역은 사용 기기의 최대 조사 영역인 가로, 세로 각각 5 μm영역이었으며, 산란 측정 영역과 동일한 부분을 관찰하기 위하여 기판의 중심 영역을 관찰하였다. 그림 8 (a)는 증착을 하지 않은 수정 기판으로 기판의 오염 뿐만 아니라 어떤 조직(texture)도 나타나지 않는다. 그림 8 (b), (c)는 기판온도 200와 300°C에서 증착한 (Ta₂O₅/SiO₂) 다층박막으로 표면의 오염 또는 덩어리 등은 관찰되지 않으며 다른 박막도 모두 비슷한 경향을 나타내었다. 그림 8 (d)는 250°C에서 증착된 (TiO₂/SiO₂) 다층박막의 표면으로 (b), (c)의 표면과 유사하다.

그림 9는 AFM에서 측정한 수정 기판 및 다층박막의 표면 거칠기이다. 기판의 표면 거칠기는 1.1~1.8 Å이며, (Ta₂O₅/SiO₂) 다층박막은 5.2~7.4 Å이고, (TiO₂/SiO₂) 다층박막은 6.2 Å이다. 두 다층박막의 표면 거칠기는 거의 차이가 없으므로 표면 산란도 거의 같을 것으로 여겨진다. 따라서 두 박막의 기둥구조 차이에 의한 체적 산란이 전체 산란율에 큰 영향을 준 것으로 사료된다.

SEM으로 측정한 박막의 기둥 구조를 그림 10에 나타내었다. 그림 10 (a)와 (b)는 각각 기판온도 250, 300°C에서 증착한 (Ta₂O₅/SiO₂) 다층박막의 단면이고 (c)는 250°C에서 증착한 (TiO₂/SiO₂) 다층박막의 단면이다. 박막의 내부에는 산란에 영향을 줄 정도의 불순물 혹은 결함이 없는 것을 알 수 있다. 그림 (a), (b)를 비교해 보면 기판온도에 따른 Ta₂O₅ 고굴절률

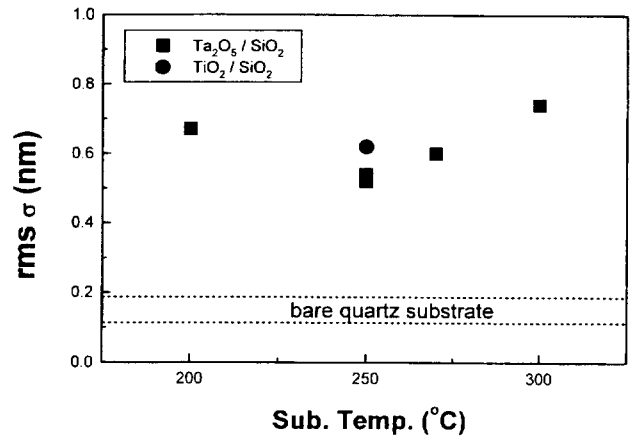


그림 9. AFM을 이용하여 측정한 기판 및 수정기판 위에 증착된 다층 박막의 rms 표면 거칠기

층의 단면 구조는 커다란 변화가 없는 것으로 판단된다. TiO₂를 고굴절률로 사용한 박막의 경우 박막을 이루고 있는 기둥의 직경이 Ta₂O₅ 층을 이루고 있는 기둥보다 큰 것으로 관측된다. TIS 산란 측정에서 (TiO₂/SiO₂) 다층 박막의 산란이 (Ta₂O₅/SiO₂) 다층 박막에 비하여 약 30% 정도 낮았는데, 이러한 차이는 기판의 표면 거칠기 측정이나 표면 산란 사진에서는 나타나지 않았다. 따라서 표면 거칠기가 커다란 차이가 없는 경우 다층박막의 산란은 체적 산란에 의하여 크게 좌우되며 그 값의 변화는 박막을 구성하고 있는 기둥의 직경에 의존하는 것으로 판단된다.

그림 11은 박막의 조밀도가 산란에 주는 영향을 알아보기 위하여 진공과 대기간의 투과과장 이동량을 측정한 결과이다. (Ta₂O₅/SiO₂) 다층 박막의 투과과장 이동은 0.62~1.27%이고, (TiO₂/SiO₂) 다층박막의 투과과장 이동은 1.29%이었다. 즉

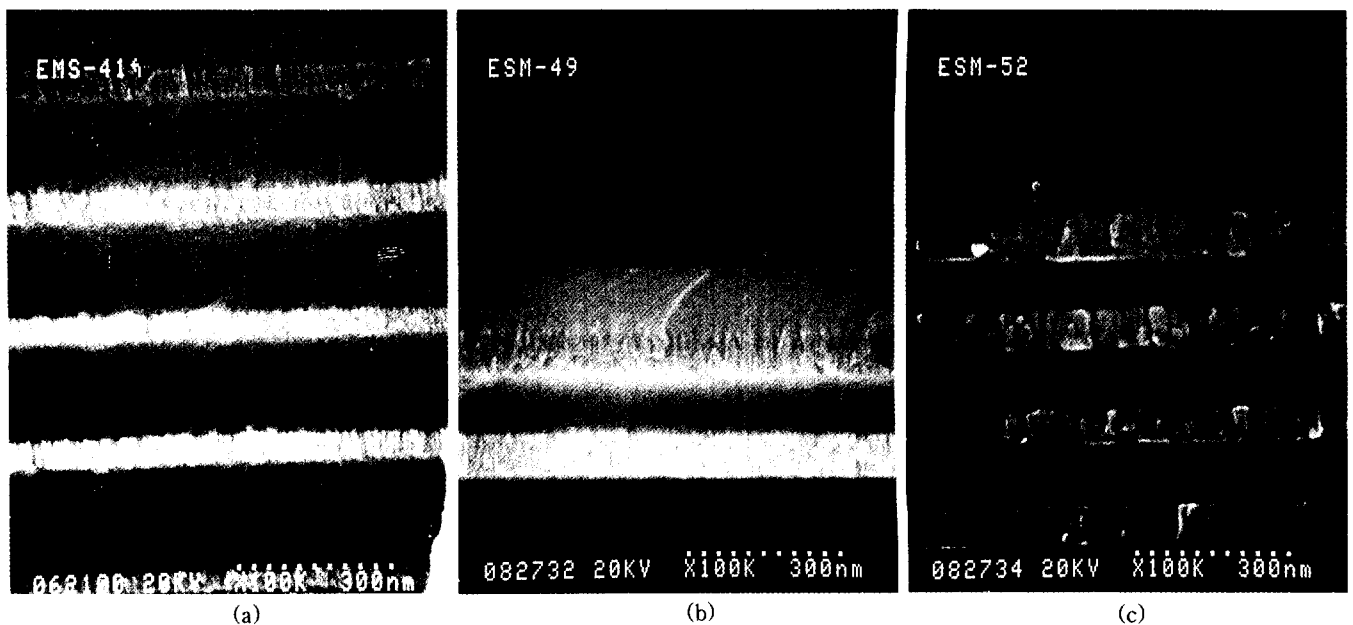


그림 10. SEM을 이용한 박막의 단면 관찰 (a) (Ta₂O₅/SiO₂), 250°C에서 Si 웨이퍼 위에 증착된 박막 (b) (Ta₂O₅/SiO₂), 300°C에서 Si 웨이퍼 위에 증착된 박막 (c) (TiO₂/SiO₂), 250°C에서 Si 웨이퍼 위에 증착된 박막

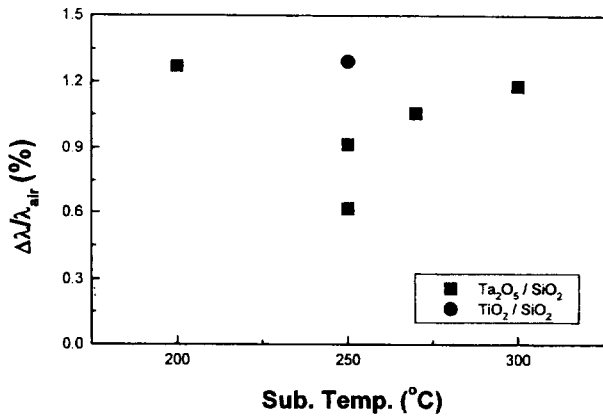


그림 11. 다층 박막의 진공과 대기간 투과 파장 이동

(Ta₂O₅/SiO₂) 다층박막이 (TiO₂/SiO₂) 다층 박막보다 조밀하며, 이는 SEM에서 관찰한 TiO₂ 박막의 기둥이 Ta₂O₅ 박막의 기둥보다 크다는 것과 일치하고 있다. Ta₂O₅ 박막이 기둥의 크기가 TiO₂ 박막보다 상대적으로 작으므로 빈 공간이 줄어들어 진공과 대기간 투과파장 이동이 줄어들며 따라서 박막의 조밀도는 증가한다. 한편 기둥 크기가 작기 때문에 조밀하기 위해서는 박막 내에 기둥의 수가 많아야 한다. 두 다층 박막의 경우 AFM으로 측정된 표면 거칠기는 비슷하고 빛을 산란시키는 기둥 표면이 Ta₂O₅ 박막 내에 많으므로 TiO₂ 박막에 비하여 박막의 체적 산란이 증가하는 것으로 판단된다.

V. 결 론

실험실에 설치한 TIS 산란 측정 장치를 이용하여 진공 증착 유전체 고반사 거울의 산란을 측정하였다. 기판온도 250~300°C에서 수정 기판 위에 24층으로 증착한 (Ta₂O₅/SiO₂) 다층 박막의 산란율은 0.048~0.050%이었으며 300°C에서 4시간 열처리한 후 산란율은 거의 변화를 나타내지 않았다. 한편 기판온도 250°C에서 동일한 반사율로 증착한 (TiO₂/SiO₂) 제작한 박막의 산란율은 0.029%로 낮았으며 열처리에 의하여 박막은 심한 인장 응력을 나타냈다. AFM으로 측정된 기판의 온도에 따른 (Ta₂O₅/SiO₂) 다층박막의 표면 거칠기는 5.2~7.4 Å이고, (TiO₂/SiO₂) 다층박막은 6.2 Å으로, 두 다층 박막의 표면 거칠기는 거의 차이가 없었다. SEM으로부터 (Ta₂O₅/SiO₂) 다층 박막의 기둥이 (TiO₂/SiO₂) 다층박막보다 직경이 작고, 투과파장 이동으로부터 조밀도는 (Ta₂O₅/SiO₂) 다층 박막이 큰 것을 알 수 있었다. TIS 방법으로 측정된 (Ta₂O₅/SiO₂) 다층 박막의 산란율이 (TiO₂/SiO₂) 다층 박막보다 큰 것은 (Ta₂O₅/SiO₂) 다층 박막이 더 조밀하고 기둥 크기가 작으므로 박막 내에 기둥 수가 증가하여 체적 산란이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] H.A. Macleod, *Thin film optical filters*, 2nd edition (Adam Hilger Ltd. Bristol, 1986).
- [2] G.A. Al-Jumaily, J.J. McNally, J.R. McNeil, and W.C. Herrmann Jr, "Effects of ion assisted deposition on optical scatter and surface microstructure of thin films," *J. Vac. Sci. Technol.* **A3**, 651 (1985).
- [3] S. Chao, Y. Lin, J. Lin, and C. Lee, "Scattering loss of an optimum pair high reflectance dielectric mirror," *Appl. Opt.* **29**, 1960 (1990).
- [4] C. Amra, "From light scattering to the microstructure of thin-film multilayers," *Appl. Opt.* **32**, 5481 (1993).
- [5] C. Amra, C. Grezes-Besset, and L. Bruel, "Comparison of surface and bulk scattering in optical multilayers," *Appl. Opt.* **32**, 5492 (1993).
- [6] A. Duparre, "Light scattering of thin dielectric films," in *Handbook of Optical properties Vol I, Thin films for optical coatings*, R.E. Hummel and K.H. Guenther eds. (CRC Press Inc., London, 1995).
- [7] A.A. Maradudin and D.L. Mills, "Scattering and absorption of electromagnetic radiation by a semi-finite medium in the presence of surface roughness," *Phys. Rev. B* **11**, 1392, (1975).
- [8] C.K. Carniglia, "Scalar scattering theory for multilayer optical coatings," *Opt. Eng.* **18**, 104 (1979).
- [9] J. Ebert, H. Pannhorst, H. Kuster, and H. Welling, "Scatter losses of broadband interference coatings," *Appl. Opt.* **18**, 818 (1979).
- [10] J.M. Elson, J.P. Rhan, and J.M. Bennett, "Light scattering from multilayer optics: comparison of theory and experiment," *Appl. Opt.* **19**, 669 (1979).
- [11] J.M. Bennett and L. Mattson, *Introduction to surface roughness and scattering* (Optical Society of America, Washington D.C., 1989).
- [12] J.M. Eastman, "Scattering by all-dielectric multilayer bandpass filters and mirrors for lasers," in *Physics of Thin Films* vol. **10** G. Hass ed. (Academic Press, New York, 1978).
- [13] K.C. Hickman, R. Wingler, F.L. Williams, C.E. Sobczak, C.K. Carniglia, C.F. Kranenberg, K. Jungling, J.R. McNeil, and J.P. Black, "Correlation between substrate preparation technique and scatter observed from optical coatings," *Appl. Opt.* **32**, 3409 (1993).
- [14] C.K. Hwangbo and H.J. Cho, "Ion assisted deposition of TiO₂ thin films by Kaufman and gridless ion sources," *The Review of Laser Engineering*, **24**, 103 (1996).
- [15] M. Lottiaux, C. Boulesteix, G. Nihoul, F. Vernier, F. Floiry, R. Galindo, and E. Pelletier, "Morphology and structure of TiO₂ thin layers vs. thickness and substrate temperature," *Thin Solid Films* **170**, 107 (1989).

Scattering measurement of dielectric high reflection mirrors by TIS method

Hyun Ju Cho, Heung Jin Bak and Chang Kwon Hwangbo
Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Hwan Gu Moon*, Jin Tae Kim, Seonghyun Son and Jae-Cheul Lee*
Institute for Advanced Engineering, Youngin 449-800, Korea
**Department of System Engineering, Aju University, Suwon 442-749, Korea*

(Received : March 29, 1997)

Scattering measurement on high reflection dielectric multilayer mirrors deposited on quartz substrate in a vacuum chamber were performed using a total integrated scattering method. Scattering of ($\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$) multilayer mirrors deposited at 250~300°C was 0.048~0.050% and did not change with an annealing at 300°C for 4 hours. On the other hand, scattering of ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) multilayer mirror at 250°C was 0.029% and it showed the heavy tensile stress after an annealing. The rms roughness of ($\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$) multilayer mirror was almost the same as that of ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) multilayer mirror. The column size of Ta_2O_5 film was smaller than that of TiO_2 film and the packing density of ($\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$) multilayer mirrors was higher than that of ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) multilayer mirror. It seems that the higher packing density and smaller column size of Ta_2O_5 films lead to more scattering.